

ICS 75 - 010

E 10

备案号: 24396—2008

SY

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 6714—2008

基于风险检验的基础方法

Risk-based inspection base resource document

(API Publ 581: 2000, MOD)

2008—06—16 发布

2008—12—01 实施

国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	Ⅲ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 风险分析	11
4.1 基本原理	11
4.2 传统风险分析的系统定义	12
4.3 危害识别	13
4.4 传统风险评价的概率分析	14
4.5 传统风险评价的后果分析	14
4.6 表示风险结果的方式	16
5 RBI 的定性方法	17
5.1 概述	17
5.2 RBI 的定性方法（针对设备）	21
6 定量 RBI 综述	21
6.1 概述	21
6.2 后果综述	22
6.3 可能性分析概述	24
6.4 风险计算	24
7 后果分析	25
7.1 概述	25
7.2 确定代表性流体及其特性	25
7.3 选择一组孔径	29
7.4 可泄放流体总量的估算	30
7.5 估算泄漏速率	31
7.6 确定泄放类型	33
7.7 确定流体的最终相态	34
7.8 对泄放响应系统的评价	34
7.9 确定泄放后果	36
7.10 经济风险评价	56
8 可能性分析	61
8.1 可能性分析过程概述	61
8.2 同类失效频率	63
8.3 设备修正因子	64
8.4 管理系统评价因子	85
9 降低风险检验程序的制定	87
9.1 概述	87
9.2 检验程序的编制	87

9.3 通过检验来降低风险..... 96

9.4 完成检验计划的方法 101

10 工厂数据库结构..... 103

10.1 RBI 分析所需的信息..... 103

10.2 RBI 数据表的组成单元..... 103

10.3 推荐的用于 RBI 数据表的数据来源 111

10.4 存量计算程序..... 113

11 技术模块..... 118

11.1 技术模块概述..... 118

11.2 技术模块的格式..... 118

附录 A（规范性附录） 定性 RBI 分析计算表 120

附录 B（规范性附录） 半定量 RBI 分析计算表 129

附录 C（规范性附录） 定量 RBI 分析计算表 138

附录 D（规范性附录） 管理系统评价分析计算表 151

附录 E（资料性附录） OSHA 1910《职业安全与卫生条例》和《美国环保署危害性化学品清单》 164

附录 F（资料性附录） API 和 ASME RBI 对比 194

附录 G（规范性附录） 减薄技术模块 198

附录 H（规范性附录） 应力腐蚀开裂技术模块 263

附录 I（规范性附录） 高温氢损伤（HTHA）技术模块 289

附录 J（规范性附录） 炉管技术模块 293

附录 K（规范性附录） 机械疲劳（仅用于配管）技术模块 305

附录 L（规范性附录） 脆性断裂技术模块 311

附录 M（规范性附录） 设备衬里技术模块 329

附录 N（规范性附录） 外部损伤技术模块 334

附录 O（资料性附录） 本标准与 API Publ 581 技术性差异及其原因 349

参考文献..... 350

前 言

本标准修改采用 API Publ 581: 2000《基于风险检验的基础方法》。

由于我国法律要求和工业的特殊需要,本标准在采用 API Publ 581: 2000 时进行了修改,这些技术性差异用垂直单线标识在它们所涉及的条款的页边空白处,并在附录 O 中给出了本标准与 API Publ 581: 2000 技术性差异及其原因的一览表以供参考。

为便于使用,本标准还做了下列编辑性修改:

——删除了 API Publ 581: 2000 中“0 引言”。

——“本 BRD”改为“本标准”。

——英制单位前添加了转换后的法定计量单位。由于本标准中大量查询表格及经验公式、参数都是基于英制单位确定的,而且基于本标准编制的软件也是基于英制单位,所以进行基于风险检验(RBI)分析时,计算过程仍采用英制单位,最后结果再行转换。

——图表公式重新编号。

——增加了资料性附录 O、附录 L、附录 M 及附录 N。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 G、附录 H、附录 I、附录 J、附录 K、附录 L、附录 M 及附录 N 为规范性附录,附录 E、附录 F、附录 O 为资料性附录。

本标准由石油工业油气储运专业标准化技术委员会提出并归口。

本标准起草单位:中国石油管道研究中心、中国石油管道公司兰成渝输油分公司、中石化青岛安全工程研究院、合肥通用机械研究院。

本标准主要起草人:张华兵、史晓岩、高晞光、冯庆善、税碧垣、刘桂春、柳明、林禄彬、刘小辉、黄贤滨、陈学东、艾志斌。

基于风险检验的基础方法

1 范围

本标准规定了基于风险检验（RBI）的实施方法与详细步骤。

本标准适用于石油天然气工业为优化检验活动而开展的 RBI 活动。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是未注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 18306 中国地震动参数区划图

SY/T 6230 石油天然气加工 工艺危害管理（SY/T 6230—1997，eqv API RP 750：1990）

SY/T 6507 压力容器检验规范维护检验、定级、修理和改造（SY/T 6507—2000，eqv API RP 510：1997）

SY/T 6552 石油工业在用压力容器检验的推荐作法

SY/T 6553 管道检验规范 在用管道系统检验、修理、改造和再定级（SY/T 6553—2003，API RP 570：1998，MOD）

SY/T 6620 油罐检验、修理、改建和翻建（SY/T 6620—2005，API Std 653：2001，IDT）

SY/T 10043 泄压和减压系统指南（SY/T 10043—2002，idt API RP 521：1990）

SH/T 3037 炼油厂加热炉炉管壁厚计算

API RP 530 石油炼化厂加热炉管壁厚的计算

API RP 579 适用性评价

API RP 941 高温高压临氢用钢

ASTM A 193 高温用合金钢和不锈钢螺栓材料

NACE Pull 6H189 防火和隔热用碳钢和不锈钢的防护涂层

NACE RP 0170 炼油装置停车期间奥氏体不锈钢和其他奥氏体合金上连多硫酸应力腐蚀开裂的防护

NACE RP 0472 控制钢制设备焊缝硬度防止硫化物应力开裂技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

影响区 affected area

表示遭受危害（毒剂、热辐射、爆炸超压等）大于某一预定限值的表面大小。

3.2

自燃因子 auto-ignition factor (AF)

表示泄放的流体在高于其自燃温度的某一温度下所增加的着火概率。

3.3

自燃温度 auto-ignition temperature

某一物质在没有点火源的情况下能够着火温度。

3.4

平均个人风险 average individual risk

与死亡事故率相似的一个概念，但时间期限为一年。

3.5

平均死亡率 average rate of death

在每单位时间内预计可能发生的所有事故中的平均死亡人数。

3.6

贝叶斯定理 Bayes' theorem

一种统计方法，它可以将一不确定检验结果与检验前的“预期结果”有效地联系起来，并提供置信度更高的设备损伤速率预测值。

3.7

生产中断成本（财务风险） business interruption (financial risk)

包括工艺设备失效有关的所有费用。这些包括维修和更换设备的费用、维修和更换设备的停机损失、失效造成潜在伤害所发生的费用以及环境清理费等。

3.8

化学因子 chemical factor (CF)

化学物质的闪燃因子及其反应性因子的组合。闪燃因子与物质的 NFPA（美国国家消防协会）等级相对应；反应性因子是物质暴露于某一点火源时能够迅速爆炸的一个函数。

3.9

在寒冷天气中运行 cold weather operation

寒冷天气对装置运行所造成的附加风险，因为在这种天气情况下不能对设备进行维护和检验，而操作员也可能减少对室外设备进行监测的次数。

3.10

状况因子 condition factor (CCF)

从维护和保养的角度描述设备的物理状态。

3.11

后果 consequence

以定性或定量的方式表达一个事件或一个事态的结果，它可能是损失、伤害或不利。

3.12

后果分析 consequence analysis

在风险基础上有助于确定设备的相对风险级别所进行的分析。

3.13

后果区 consequence area

设备失效所造成明显后果的区域。

3.14

后果分类 consequence category

见 3.2, 3.8, 3.10, 3.20, 3.21, 3.91 和 3.100。

3.15

后果模拟 consequence modeling

基于一组经验公式，把泄漏速率（持续泄漏）或泄放量（瞬时泄放）用做输入项，而进行的失效后果预测。

3.16

持续泄漏 continuous release

发生时间较长的，造成流体以椭圆形状向外扩散的泄放。

3.17

均匀腐蚀 corrosion, general

指没有明显的局部侵蚀、以均匀减薄为主的腐蚀。

3.18

局部腐蚀 corrosion, localized

指所形成的腐蚀损伤是局部的，而不是均匀地分布于暴露的金属表面。

3.19

耗费 cost

涉及任何负面影响的直接和间接活动的损失，包括钱财、工时、损坏、政治影响和无形资产。

3.20

安全可信因子 credit factor (CRF)

表示装置本质安全性的度量。

3.21

损伤后果因子 damage consequence factor

化学因子、量值因子、状态因子、自燃因子、压力因子和安全可信因子的组合。

3.22

损伤因子 damage factor

与已知损伤机理相关的风险的一种度量：包括均匀腐蚀、疲劳开裂、低温暴露和高温退化程度。

3.23

损伤机理 damage mechanism

造成设备损伤的腐蚀或机械作用。

3.24

损伤状态 damage state

根据设备状态、损伤等级进行的设备分级。

3.25

探测 detection

以减少泄放持续时间为目的的系统。

3.26

直接影响模型 direct effect model

根据给定结果，采用通过/不通过的方式来预测后果，见 3.58 和 3.94。

3.27

泄放 discharge

失效造成的物料释放。它可以是瞬时的，也可以是持续的。

3.28

扩散因子 dispersibility factor (DIF)

物料扩散能力的度量。

3.29

扩散 dispersion

蒸气或挥发性液体在环境中泄放后形成的蒸气云。蒸气云通过与空气混合而分散，直到浓度最终达到一个安全水平或被点燃。

3.30

韧性过载 ductile overload

施加载荷产生的应力超过流变应力时发生的现象。

3.31

环境 environment

设施范围之外的区域，在污染的情况下，可能需要相当大的成本对其进行修复。它可以包括位于设施边界的地下水，并可能对设施以外的水体造成污染。

3.32

环境后果 environmental consequence

泄放的即时影响，以及液体泄放后对环境的影响。

3.33

环境影响 environmental impact /environmental effect

液体泄放到环境（水面、地面和储罐泄放）的判断准则。

3.34

设备复杂性 equipment complexity

根据大小和复杂程度来区分工艺容器的指标。

3.35

设备因子 equipment factor

基于装置内可能失效构件的数量确定的因子。

3.36

设备修正因子 equipment modification factor

可能对设备的失效频率有重大影响的特定条件。分成 4 个次因子，见 3.77，3.96，3.119 和 3.123。

3.37

事件 event

特定时间间隔内特定地点所发生的事故或出现的情况。

3.38

事件树 event tree

对导致可燃结果的可能事件链的直观描述；用来表示通过各种单个事件的概率来计算事件链概率。

3.39

事件树分析 event tree analysis

用来描述某个起始事件引发结果的可能范围和顺序的技术。

3.40

爆炸 explosion

当火焰向四周快速蔓延时，在一定条件下发生的事件。

3.41

失效模式及其影响分析 failure mode and effects analysis (FMEA)

在部件层面上系统地描述所有可能的失效模式并识别其对该系统所造成影响的归纳性分析。该技术是识别系统中单点失效最有效的方法。

3.42

死亡事故率 fatal accident rate (FAR)

每暴露 108h（大约 1000 个员工的工作寿命期）的死亡人数。

3.43

故障树分析 fault tree analysis

一种着重于意外事件原因的危害识别的推理方法。

3.44

火球 fireball

大量燃料与周围的空气有限混合后点燃时所发生的现象。

3.45

可燃性范围 flammability range

可燃上限值和下限值之间的差。

3.46

可燃后果 flammable consequence

可燃液体泄放到环境中的结果。

3.47

可燃效应 flammable effect

泄放的危险物质的物理行为，见 3.40，3.44，3.48，3.66，3.88 和 3.112。

3.48

闪燃 flash fire

在不造成明显过压的条件下物质云团燃烧时所发生的现象。

3.49

闪点 flash temperature

有点火源时物质可能突然点燃的温度。

3.50

流体相态 fluid phase

气体或液体。

3.51

频率 frequency

表示一个事件在给定时间内可能发生次数的度量，见 3.68 和 3.93。

3.52

气体泄漏速率 gas release rate

按两步法计算。第一步是确定气流状态（较高内压为音速，较低压力为亚音速）；第二步是采用相应的流动状态公式来估算泄漏速率。

3.53

同类失效频率 generic failure frequency

从现有设备失效历史记录汇编中得出，覆盖了每个设备类型和每种口径的管道；利用一个公司内的所有装置或一个行业内的各种装置的所有记录，文献、过去的报告和商业数据库来建立。频率值一般代表一个行业，而不反映某一特定装置或单元的实际失效频率。

3.54

危害 hazard

潜在危害源或具备引发潜在损失的状况。

3.55

危害及可操作性研究 hazard and operability study (HAZOP)

利用一系列引导词来激励小组讨论的一种程序化的“头脑风暴”法。引导词着重于工艺参数，如流量、液位、温度和压力，并延伸到其他问题，如人为因素和非正常运行。

3.56

健康后果等级 health consequence category

毒性量化因子、扩散因子、安全可信因子以及人口因子的组合。

3.57

IDLH 值 IDLH value

对生命或健康的直接危害的大小。

3.58

影响判据 impact criteria

用来估算事件后果的准则，也称为影响模型，见 3.26 和 3.94。

3.59

个人风险度量 individual risk measures

对可能位于事故影响区内任何一点的个人所面临风险的度量。

3.60

检验有效性 inspection effectiveness

将检验方法用于 5 种描述性类别之一的定性评价，从高度有效到无效。

3.61

检验因子 inspection factor

对当前检验程序的有效性，及其识别已知或可能的装置损伤机理能力的一种度量。

3.62

瞬时泄放 instantaneous release

形成大片蒸气云或大滩液池的流体快速释放。

3.63

存量 inventory

设备可能泄放流体量的上限。

3.64

存量组 inventory group

可以将实际流体量输给某个泄放设备的关联设备的存量。

3.65

隔离 isolation

使用隔离系统来减少泄放持续时间。

3.66

喷射火 jet flame

泄放的高动量气体、液体或两相流燃烧时的结果。

3.67

设备的寿命期 life cycle of equipment

基于设备的设计寿命和该设备目前已服役年限的一个指标。

3.68

可能性 likelihood

对概率和频率的一种定性描述。

3.69

可能性分析 likelihood analysis

陆上石油化工设备的同类失效频率数据库，然后通过设备修正因子和管理系统评价因子对该数据库进行修正，见 3.35，3.53 和 3.75。

3.70**可能性分类 likelihood category**

通过对影响大量泄放可能性的 6 个因子进行评价来确定。每个因子被加权后，它们的组合形成了可能性因子，见 3.10，3.22，3.35，3.61，3.76 和 3.95。

3.71**极限状态函数 limit state function**

定义一种失效模型 $g(Z_i)$ ，式中 Z_i 为与工艺设备失效相关的随机变量。失效概率为失效集合中 $g(Z_i) < 0$ 的概率。

3.72**损失 loss**

财务上的或其他方面的负面后果。

3.73**内容物的损失 loss of containment**

只有在突破压力边界时才会发生。

3.74**管理系统评价 management systems evaluation**

对一个装置的工艺安全管理系统的的所有部分进行评价，这些部分直接或间接地影响工艺设备的机械完整性。

3.75**管理系统评价因子 management systems evaluation factor**

按工艺安全管理系统的差别修正同类失效频率的因子。该因子由对影响站场风险的设施或操作单元评价结果得出。

3.76**机械设计因子 mechanical design factor**

对装置采用的设计安全系数的度量，无论该装置是否是按当前标准设计，如何独特、复杂或具有创新性。

3.77**机械次因子 mechanical subfactor**

主要说明与设备的设计和制造相关的条件，如复杂性、建造规范、寿命周期、安全系数和振动监测等。

3.78**减缓系统 mitigation systems**

用来探测、隔离和减少危险物质泄放的影响。

3.79**监测 monitor**

定期检查、监视、严格观察或记录某一活动、行为或系统的进展情况，以识别有无变化。

3.80**NBP normal boiling point**

沸点。

3.81**美国国家消防协会可燃性指数 NFPA flammability index (NFPA)**

美国国家消防协会的可燃性指数。

3.82

操作边界 operational boundaries

包括了被研究系统的正常操作和启动、停机、工艺过程波动等非常规操作。

3.83

扩散相 phase of dispersion

“最终气态”或“最终液态”。

3.84

PHAst process hazards analysis screening tool

一个包含大气扩散和后果模拟程序的集成软件包。

3.85

物理边界 physical boundaries

构成被研究系统压力包络线的所有设备。

3.86

配管的复杂性 piping complexity

与管段的接头数量、注入点数量、支管数量和阀门数量有关。

3.87

装置状态 plant condition

基于装置的整体外观、装置维护程序的效果和装置的布局及建造来确定的被评价设施当前的状态。

3.88

池火 pool fire

可燃物质储液池燃烧时形成的状况。

3.89

人口因子 population factor (PPF)

对可能受毒性物质泄放潜在影响人数的一种度量。

3.90

泄放响应系统 post-leak response systems

设计用来探测、隔离和降低危险性物质泄放影响的减缓系统。

3.91

压力因子 pressure factor (PRF)

对流体泄漏速率的一种度量。

3.92

主容器 primary containment

指盛装工艺物料的所有设备。

3.93

概率 probability

某一特定结果的可能性，通过特定结果与可能结果总数的比率来测定。概率以 0 和 1 之间的一个数来表达，0 表示一种不可能的结果，而 1 表示一种肯定的结果。

3.94

概率单位 probability unit (Probit)

评价事故后果的一种统计方法，见 3.26 和 3.58。

3.95

工艺因子 process factor (PF)

对引发容器内介质损失的非正常运行或扰动状态的潜在性的度量。它是停机或工艺中断（计划的或非计划的）次数、工艺稳定性和因堵塞或其他原因而造成保护装置失效的可能性的函数。

3.96

工艺次因子 process subfactor

对最受工艺过程（连续性和稳定性）和设施运行方式影响的条件所设定的一个数值。

3.97

定性 RBI qualitative risk-based inspection

对运行装置或装置的一部分进行简略的风险评价。定性检验不要求详细的设施信息，因此，其鉴别能力有限。

3.98

定量检验 quantitative inspection

为装置中的每个设备和管段提供风险值。据此就可以对该装置编制一份综合性检验计划。

3.99

定量风险评价 quantitative risk assessment

指从石化工艺设施中应用风险分析法而形成的程式化方法。

3.100

量值因子 quantity factor (QF)

在一次事件期中预测的从同一装置的最大物料泄放量。

3.101

泄放量 release mass

在某一瞬间泄放期间泄放的物质质量。

3.102

泄放持续时间 release duration

系统总存量除以初始泄漏速率。

3.103

泄漏速率 release rate

一种物料在长时间内的相对稳定泄漏速率。

3.104

代表性流体 representative fluid

在风险分析中，表示某种工艺流体混合物。

3.105

风险 risk

在基于风险的检验中，风险被定义为发生失效的可能性和失效后果的乘积。

3.106

风险可接受性 risk acceptance

不受风险状况影响的基于信息的决策。

3.107

基于风险的管理 risk-based management

利用风险评价结果（包括了解不确定性）来确定降低风险的“最佳”方法。

3.108

风险控制 risk control

风险管理的一部分，包括消除、避免和最大程度降低一个企业面临的风险而制定的政策、标准和规程。

3.109

风险识别 risk identification

确定可能发生什么、为什么发生以及如何发生的过程。

3.110

风险指数 risk indices

度量风险的一个数值。

3.111

风险管理 risk management

对识别、分析、评价、处理和监测风险等任务的管理政策、规程和作法的系统应用。

3.112

安全扩散 safe dispersion

可燃性流体泄放后扩散但不燃烧。

3.113

情景 scenario

可能导致不希望发生的结果的一组事件。

3.114

次容器 secondary containment

当主容器设备泄放时，为容纳工艺流体而设计的缓解系统。

3.115

地震活动性 seismic activity

位于地震活跃区的设施具有更高失效的可能性，尽管该装置是按适当标准来设计的。

3.116

社会风险度量 societal risk measures

对位于事故影响区的人群风险的评价。

3.117

状态因子 state factor (SF)

当某一物料被泄放到大气中时，对其迅速闪蒸成蒸气的难易程度的度量。

3.118

技术模块 technical module

用于评价特定失效机理对失效可能性影响的系统方法。包括两类信息的评价：其运行环境所造成的设备建造材料的退化速率，和在设施失效前其检验程序识别和监测损伤机理的有效性。

3.119

技术模块次因子 technical module subfactor (TMSF)

损伤造成的失效频率与同类失效频率之比，乘以出现的损伤等级的可能性。

3.120

毒性后果 toxic consequence

有毒物料泄放的影响。

3.121

毒性影响 toxic effect

中毒后果。

3.122

毒性量化因子 toxic quantity factor (TQF)

对某一物质的数量及其毒性的一种度量。数量基于质量，而毒性则通过使用 NFPA 毒性因子

NH 来确定。

3.123

通用次因子 universal subfactor

对设施的所有设备具有同样影响的量值，见 3.9，3.35 和 3.115。

3.124

振动监测值 vibration monitoring element

用于检验旋转设备（如泵和压缩机）的值，在设备失效前探测其有无隐患。

4 风险分析

4.1 基本原理

本标准所述的 RBI 程序不是一个完整的风险分析过程。RBI 是一项将风险分析和机械完整性两个学科组合在一起的复合技术。RBI 的一些方法与传统风险分析中的方法类似，但两者不能互换。在实施 RBI 程序之前，应该首先掌握传统分析方法的一些基本原理。了解风险分析的基本原理将有助于理解两种方法之间的差别。它还有助于用户理解风险分析工程师们所说的专业术语。

本章简要概述传统风险分析的主要概念。图 1 概要描绘了传统的风险分析过程。从其组成单元形式上看，风险分析由 5 个步骤组成。

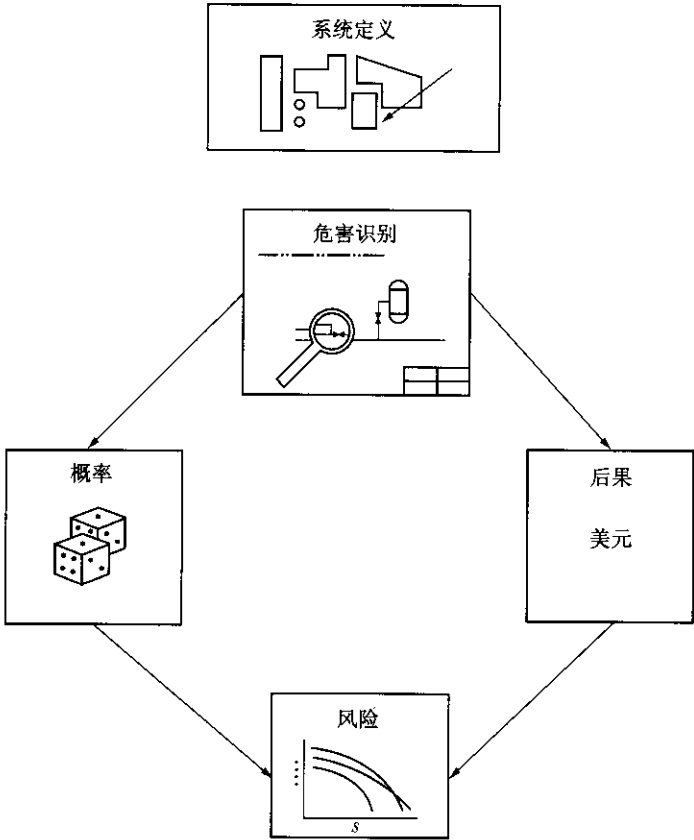


图 1 风险分析示意图

- a) 系统定义。
- b) 危害识别。
- c) 概率分析。
- d) 后果分析。

e) 风险结果。

在 RBI 程序中，对风险分析的某些阶段进行了不同的处理。例如，危害识别是传统风险分析中一个关键步骤，RBI 程序重点关注装置设备的承压壳体，并且假设失效是由于该壳体内可识别出的退化机理所造成的。次要泄放原因，如仪表失效或人为失误，暗含在 RBI 程序的管理系统处理中，而传统风险分析会用明确的条款来说明这些失效。

传统风险分析的重点是对可能导致不希望结果的各种情景进行评价，估算可能性大小和结果严重程度，并加以显示。

在风险分析中，情景是指可能导致不希望发生的结果的一组事件。图 2 给出了典型的风险分析情景的事件顺序：

- a) 内容物损失。
- b) 探测。
- c) 隔离。
- d) 减缓。

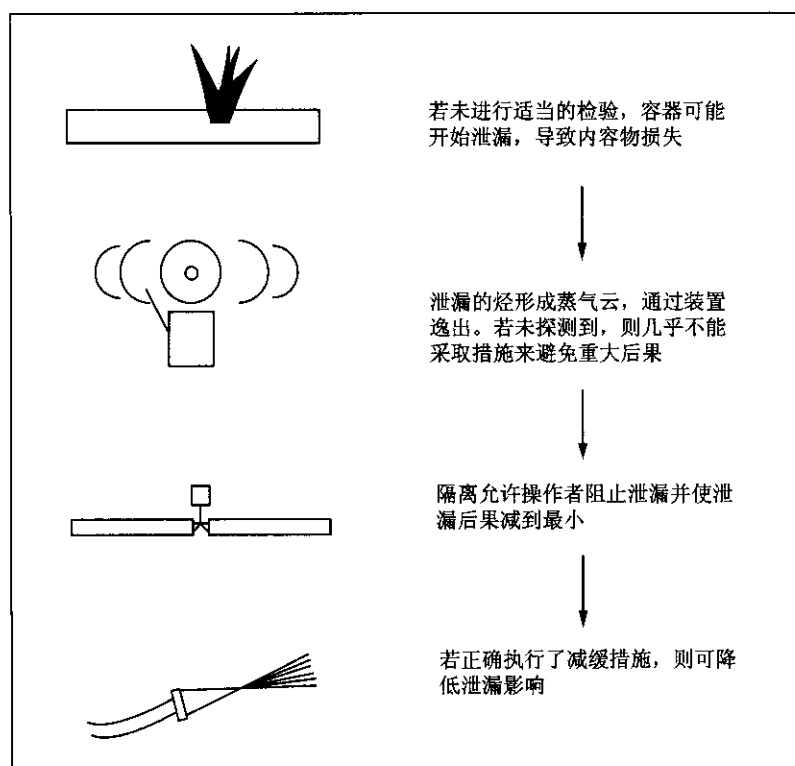


图 2 一般情景中的事件

根据工艺特性和研究细节，风险分析可能包括数以千计的不同情景，与图中所示的情况相似。风险分析将评价每个情景中事件组的可能性和后果。对于 RBI 来说，可能性和后果也要被评价，但只针对详细定义和数量有限的情景。

4.2 传统风险分析的系统定义

在风险分析的系统定义阶段，要建立基本规则和收集所有相关信息。该分析的基本规则一般包括以下方面：

- a) 目标——说明进行风险分析的动机。可能的目标是：满足标准要求、进行成本/效益分析，并就建议项目的风险进行评价。
- b) 所需的风险度量——对要求满足这些目标的最终结果予以说明。

- c) 系统边界——规定该系统的物理和运行边界。物理边界确定研究中所包括的设备，运行边界包括系统功能或运行模式。
- d) 细化等级——确定系统内装置的分析方法。诸如“模拟每段管道吗？”或“是否将管道合并为群组以便更容易进行分析？”等问题是需要评价早期就要解决的。
- e) 数据收集——规定应获取和维护什么样的数据。收集最新图纸和运行规程以便今后审查之用。其他相关数据，如天气或人口等，也要根据研究目的进行收集。例如，如果该研究仅与可燃物质危害有关，并且最近的民宅也位于 1.609km（1 英里）之外，则没有必要收集场地以外人口的详细数据。表 1 中提供了风险分析中通常应收集的数据样本。

表 1 为风险分析所收集的一般数据

危害信息	危险物质存量，材料安全数据表，现有的 HAZOP 结果，点火源的位置
设计和运行数据	容器大小，管道直径和长度，运行工况，泵和压缩机流速，堤防和排放装置设计，运行程序
气候数据	平均风速，风向概率（风向玫瑰图）
探测系统	气体探测，火焰、火灾探测，毒性探测
消防系统	灭火剂，流速，启动程序
历史数据	以往的现场泄放事件，职业伤害统计，现场人口分布图（日、夜）
场外数据	场外人口 1.61km~8.05km（1 英里~5 英里）内的用地情况，现场周边地形图

4.3 危害识别

近年来，危害识别工作已受到更多的重视。因此，它可能是构成风险分析的各步骤中最成熟的。目前，有许多可用的识别方法来识别潜在的危险情景。

4.3.1 危害和可操作性研究

危害和可操作性研究（HAZOP）是指利用一系列引导词来激励小组讨论的一种程序化的“头脑风暴”法。引导词着重于工艺参数，如流量、液位、温度和压力，并延伸到其他问题，如人为因素和非正常运行。在一个设计合理的装置中，识别的大部分潜在偏差一般都是可操作性问题。但是，也要识别潜在的安全问题和环境问题。一般由熟悉工艺流程的小组，而不是个人来实施 HAZOP，以便就所发现的潜在危险进行最有效地讨论。

4.3.2 失效模式及影响分析

失效模式及影响分析（FMEA）是在部件层面上系统地描述所有可能的失效模式并识别其对该系统所造成影响的归纳性分析。该技术是识别系统中单点失效最有效的方法。进行 FMEA 时，通常要填写一个表格，该表格要包含以下信息：

- a) 名称。
- b) 设备位号。
- c) 说明/用途。
- d) 失效模式。
- e) 对系统的影响。
- f) 失效概率。
- g) 重要性。

通常由个人完成 FMEA，但为了保证充分地利用专家们的各种专长，可由一个专家组来实施这些工作。

4.3.3 安全检查表

当工艺不是很复杂并且充分知晓这些危害时，使用检查表会很方便。通常都是根据其他详细的危

害识别研究、以往事故报告或专家判断报告来编制检查表。检查表易于使用，但可能会遗漏某一特定工艺流程或设施存在的特有危害。

4.3.4 故障树分析

故障树分析是一种演绎的方法，主要用来辨识不希望发生事件的原因。可以运用该方法，在某些情况下能够得到有用的结果。它对发现二级和三级原因所引起的危害特别有效。

4.4 传统风险评价的概率分析

实施概率评价的目的是对一些情景发生的可能性进行估算，这些情景是在风险分析的前一阶段所识别出的。若某一情景频繁发生，则最好使用历史数据来估算该事件的概率。但是，在石油工业中，关注的事件通常非常罕见，所以，如果仅基于历史数据来估算其概率的话，则没有足够的数据予以支持。

当缺乏历史数据时，可使用积木法。该情景所有单元的估算概率并加以组合，以预测该情景的总体概率。

某一情景可能性的最常见度量是其频率。频率可用于单一事件或一系列事件。一般将一年用做频率分析的标准时间间隔。频率可以是很小的数，如对于不常发生的事件，可能是百万年一次，也可能是相对高的值，如一月一次或一天4次。举例来说，如果已知一根管子大约每5年发生一次泄放，则它的泄漏频率是5年一次或每年0.2次。术语“发生周期”有时用来指频率的倒数。在例子中，泄漏的发生周期是5年。

用泄漏频率（ $F_{\text{泄漏}}$ ）与由泄漏引起的所有事件结果的概率（ $F_{\text{结果}}$ ）相乘，则得到该情景的频率（ $F_{\text{情景}}$ ）。计算公式见式（1）：

$$F_{\text{情景}} = F_{\text{泄漏}} \cdot F_{\text{结果}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$F_{\text{情景}}$ ——情景的泄漏概率；

$F_{\text{泄漏}}$ ——发生泄漏的概率；

$F_{\text{结果}}$ ——发生泄漏后引起某种结果的概率。

4.5 传统风险评价的后果分析

工艺流程设备或管道系统泄放的后果根据下列因素的变化而变化：物质的物理性质、其毒性和易燃性、天气条件、泄放持续时间和减缓措施。其后果可能影响到操作人员或设备、附近居民区的人员以及环境。

按5个步骤来估计危害后果：

- 1) 泄放。
- 2) 扩散。
- 3a) 可燃影响。
- 3b) 毒性影响。
- 3c) 环境影响。

根据泄漏物质的情况，通常只计算三种影响 [3a) ~ 3c)] 中的一个，尽管在某些混合物泄漏的情况下，这三种影响都可能出现。有关危害影响的更多信息，参见第7章，这些影响都与RBI有关。

4.5.1 步骤1——泄漏

危害泄放源包括管道和容器泄漏和破裂、泵密封泄漏和安全阀排气。泄漏时物料量、泄漏速率、物料和大气条件是计算后果时的关键因素。

泄漏可能是瞬时的，如灾难性的容器破裂，或者是持续的，如在一段时间内物质大量泄放。泄放类型也影响结果。通过适当的公式可以模拟瞬时或持续两种泄放。

4.5.2 步骤2——扩散

当蒸气或挥发性液体泄放时，便形成可见的或不可见的蒸气云。蒸气云以蒸气和悬浮液滴的形态随风传播，并通过与空气混合而逐渐扩散，直到最终达到安全浓度或被点燃。

第1阶段，蒸气云将因其物料的内能而快速膨胀，直至达到环境（大气）压力。对于重质气体，物料沿地表扩散并且因泄放冲量而使空气卷吸到蒸气云中。蒸气云中的紊流有助于这种混合。

第2阶段，随着浓度降低，大气紊流成为影响混合的主导因素，并且在蒸气云上形成一个浓度分布。该浓度分布是确定蒸气云影响的一个重要特性。

决定第2阶段扩散的若干因素如下：

- a) 密度——蒸气云的密度相对于空气的密度是影响蒸气云行为的一个很重要的因素。如果蒸气云的密度比空气大，云团将在泄放初始动量开始消耗时下降，并在其自身重力作用下扩散开来。轻气体云团则不会下降，而是上升至泄放点以上。
- b) 泄放高度和方向——对轻质气体和重质气体来说，从高处（如从烟囱）泄放可能会在地表形成较低浓度的气云。此外，向上泄放将比水平泄放或向下泄放扩散得更快些，因为空气卷吸不受地面的限制。
- c) 泄漏速率——对于只有在高浓度下才产生危害的物料，如可燃物质，初始泄漏速率非常重要。可燃物高速喷射可能会因初始动量混合而快速扩散。
- d) 天气——大气混合速率依赖于泄放时的天气条件。天气条件由3个参数来确定——风向、风速和稳定性。风速对泄放的主要影响有两个方面：确定泄放物质顺风传播的总体速率（整体速率）和确定云团内紊流的水平。随着云团逐渐被空气所稀释，浓度慢慢降低。紊流一般随风速的加大而增加。

4.5.3 步骤3a——可燃影响

碳氢化合物的燃烧可能会造成5种类型的火灾：

- a) 闪燃。
- b) 火球。
- c) 喷射火。
- d) 池火。
- e) 爆炸。

含有可燃物质的云团可能不会立即爆炸。当初始泄放浓度高于物质的可燃上限时不会点燃，除非被稀释，并存在点火源。火焰穿过位于可燃范围的云团区，从起火点开始向外扩散。

燃烧速率和火焰传播速度确定火灾的类型。当存在巨大的稀释云团时，即发生闪燃，物质在该云团中的燃烧速率比泄漏速率更快。闪燃的后果仅在燃烧云内或四周才明显。

当有大量相当浓度的物质点燃时形成火球，并产生强烈的热辐射，虽然在通常情况下这类火势的燃烧时间可能很短。

当泄放的高动量气体、液体或两相泄放被点燃时即发生喷射火。喷射火的热辐射强度在喷射方向上最高。如果泄放物质不是立即点燃，则可能会形成易燃羽流。点燃时，它将“闪燃”或返回燃以形成喷射火。

池火是由非挥发性或低温物质液池点燃而引发的。热辐射的影响仅限液池周围区域。

一旦云团被空气稀释，浓度低于其可燃下限时，就不可能再被点燃了。

在某些条件下，火焰前端可能传播很快，导致前端前面形成压力波。当火焰速度低于音速时，则发生爆燃。当火焰速度达到音速时，则发生爆炸。爆炸效应是爆燃或爆炸所产生的超压波的结果。爆炸强度按超压水平和持续时间来度量。

超压对建筑物和构（结）筑物的损伤性最大。事实上，在爆炸期间，建筑物内的人可能比在建筑物外的人的风险更大；爆炸所造成的结构坍塌、飞落的砖石和碎玻璃以及其他物质对人构成了最大

威胁。

4.5.4 步骤 3b——毒性影响

有毒物质泄放时，由其浓度和持续时间决定所造成的后果。换句话说，出现毒性效应的情况是，云团应有足够的浓度并且应停留足够长时间其作用才显现出来。所需浓度和持续时间取决于物料的性质。

目前，有很多方法根据云团浓度和持续时间来评价毒性气云的中毒后果。由于各种原因，很难对直接接触危害物质所引起的中毒反应做出精确评价。首先，由于接触有毒环境，人会遭受各种各样的不利影响；其次，一般个体之间的反应程度也因人而异，像年龄、健康以及反应能力等因素也可能会影响中毒反应；第三，大部分有关中毒反应的数据都来自动物研究，这些研究成果不一定适用于人。

有两种常用的方法来评价有毒物泄放的影响。第一种方法是采用单一标准，该标准确定一个特定级别，达到该级别时，可能会发生不利于健康的严重后果；第二种是采用概率方法，反映人们对给定剂量毒物反应的不确定性。

第二种方法采用所谓的概率单位函数（见 6.2.3），它反映人们对给定剂量的各种反应的不确定性。

4.5.5 步骤 3c——环境影响

RBI 所表明的各类情景所产生的危险物质的泄放后果通常很有限。最严重的环境损害源自残留性物质的大量泄放，如原油，它可能损害植物和动物，并且可能需要投入相当大的力量来进行事后清理工作。

评价环境损伤极其困难，因为清理工作和估算可能的民事赔偿或罚款会涉及到许多因素。环境损害一般根据具体泄放介质和泄放地点，按桶/美元来估算。

4.6 表示风险结果的方式

没有一种专门的方法来衡量化工过程操作风险。在以往风险分析中，曾使用过许多度量风险的方式。通常有三种方式来表示对人类的风险。这些方式在以下各节中描述。

4.6.1 风险指数

风险指数是一个风险数值。比较常见的风险指数有：

- a) 死亡事故率 (FAR)：估算的每接触 108h 的死亡人数。
- b) 平均个人风险：与 FAR 类似的一个概念，但时间期限为一年。
- c) 平均死亡率：单位时间内可以预计的所有事故中的平均死亡人数。

4.6.2 个人风险度量

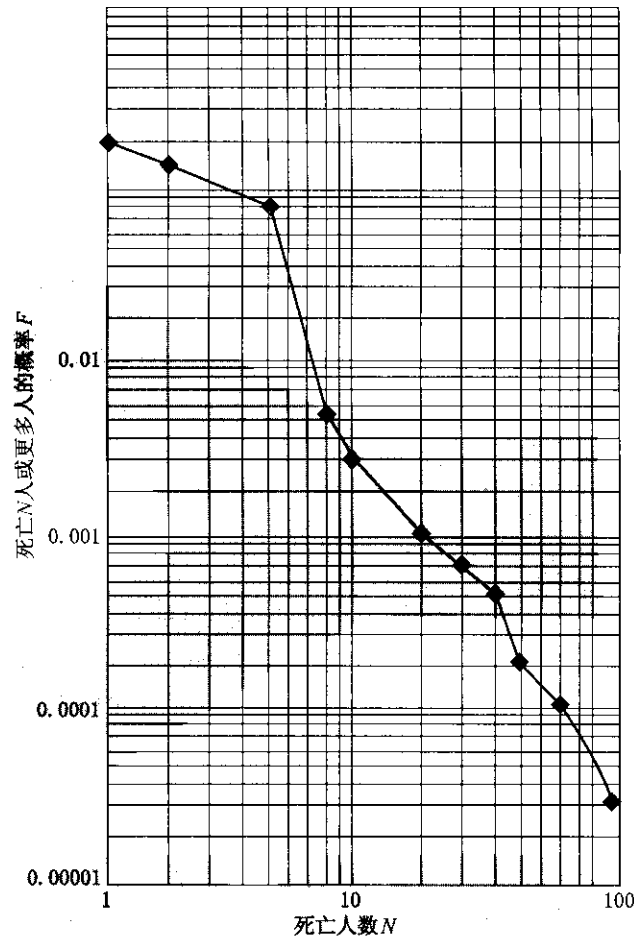
个人风险指对可能位于事故影响区内任何一点的个人所面临的风险的度量。比较常见的个人风险度量有：

- a) 个人风险图：个人风险地理分布图。表示特定场所可导致死亡的预测频率，而不管该场所是否有人。
- b) 最大个人风险：暴露于风险最高的人口密集区的个人风险。可以通过计算暴露人口中接触最大风险的人员的个人风险来得到。

4.6.3 社会风险

社会风险是对位于事故影响区人群风险的度量。通常用多起死亡事件频率分布来表示。常见图形表示导致 N 人或更多人死亡事件的频率。该类图示通常称为 F/N 图。图 3 给出了一个典型的 F/N 图。

社会风险度量通常简单采用风险指数来衡量，以便在不同装置之间进行比较。例如社会风险指数 (SRI)，也被称做潜在生命损失 (PLL)。该指数是通过 F/N 曲线的所有风险对相加计算得出的。即取传统风险分析中事件发生概率 (F) 和相应死亡人数 (N) 的每个数据点，将 F 和 N 相乘，并把结果相加。值得注意的是，该计算是在定量风险评价的原始 F 和 N 数据的基础上完成的， F/N 图上的

图3 典型的 F/N 图

点不能用来直接计算 SRI 或 PLL。风险对的相乘不能直接从 F/N 曲线图上完成，因为该曲线图仅显示死亡 N 人或更多人的事件频率。

个人风险和社会风险之间经常令人混淆。以下说明有助于澄清这种差异：

有一座办公楼位于爆炸性极高的油库附近，白天楼内有 400 人活动，晚上只有一人值班。若该油库发生导致摧毁大楼的爆炸的可能性在一天 24h 期间恒定不变的话，则该大楼内的每一个人都会处于特定个人风险中。该个人风险与在场的人数无关；对白天 400 人中每个人的风险和夜晚一个值班人员的风险是一样的。相反，社会风险是对大楼内的全体人群的，大楼白天的社会风险是晚上社会风险的 400 倍。

5 RBI 的定性方法

5.1 概述

本章介绍如何用风险来评价与承压设备完整性相关的石油炼化过程安全性。

定性方法类似于定量分析，但要求的细节资料及耗时较少。定性方法结果没有定量分析结果那么精确，但它为基于风险的检验程序的排序提供了基础。定性 RBI 的详细实施方法见附录 A。

可以在以下任何一个层面实施定性分析：

- 运行装置，例如常减压装置。
- 运行装置中的主要区域或功能段，例如常减压装置减压段。
- 系统（主要设备及其辅助设备），例如一台包括进料预热器和加料泵的空气加热器。

本章使用的术语“装置”一词是指以上这些层次的任一层次上分析的对象。被研究装置中设备的数量对定性方法的结果影响非常大。类比研究应以类似设备的数量为依据。

可以利用附录 A 中所示的简明分析计算表进行定性分析。该附录中的一系列表格可以指导用户进行评价。该分析计算表的编制理念是可以在几个小时内完成对某一典型炼油装置的评价。

定性 RBI 方法具有三个功能：

- a) 筛选现场装置，以选择所需的分析层次并明确深入分析（定量 RBI 或一些其他方法）的优点。
- b) 对装置的风险水平进行评级，并确定其在风险矩阵内的位置。
- c) 识别装置中需要重点关注的区域，这可能有利于优化检验程序。

该分析首先确定代表该区域的失效可能性因子，然后确定后果因子。最后将这两个因子在风险矩阵内组合，以得到装置的风险级别。

在制定更详细的定性 RBI 分析步骤之前，用户可以进行一次简单的筛选，以确定装置之间的相对风险。

5.1.1 基于潜在风险的装置分级

定性分析通过对两个风险要素进行分类来确定运行装置的风险级别：失效可能性和失效后果。在进行定性分析之前，应确定研究区所涉及的化学品种类和物理边界。

以下各节对定性分析中出现的那些因素进行了叙述性综述，这些因素在分析计算表（见附录 A）中有详细描述。

5.1.2 可能性分类

分析计算表的 A 部分（见表 A.1）说明可能性分类，通过对影响大量泄放可能性的六个因子的评价进行赋值。对每个因子加权，其组合形成可能性因子。该因子被绘制在风险矩阵的纵轴上（如图 4 所示）。构成可能性分类的六个次因子如下：

- a) 设备数量 [设备因子 (EF)]。
- b) 损伤机理 [损伤因子 (DF)]。
- c) 检验的有效性 [检验因子 (IF)]。
- d) 当前设备的状态 [状况因子 (CCF)]。
- e) 工艺流程的性质 [工艺因子 (PF)]。
- f) 设备设计 [机械设计因子 (MDF)]。

这六个因子的和即总体可能性因子。然后根据总体可能性因子来确定可能性分类。

5.1.2.1 设备因子 (EF) 与装置中具有失效可能的设备数量相关。EF 的最大值是 15 分。

5.1.2.2 损伤因子 (DF) 是与已知损伤机理相关的风险的一种度量，包括均匀腐蚀、疲劳开裂、低温暴露和高温退化程度。该因子在总体评价中的最大值是 20 分。

5.1.2.3 检验因子 (IF) 是对当前检验程序的有效性，及其识别已知的或可能的装置损伤机理的能力的一种度量。它考虑检验类型、其全面性和检验程序的管理。该因子用负数加权，因为检验程序的质量将部分抵消 5.1.2.2 中损伤机理所固有的失效可能性。检验因子的最大权重为 15 分。

5.1.2.4 状况因子 (CCF) 从维护和保养的角度描述设备的物理状态。根据外观检查对设备的外观状态和保养费用进行简单评价。CCF 的最大值是 15 分。

5.1.2.5 工艺因子 (PF) 是对引发容器内介质损失的非正常运行或扰动状态的潜在性的度量。它是停机或工艺中断（计划的或非计划的）次数、工艺稳定性和因堵塞或其他原因而造成保护装置失效的可能性的函数。PF 的最大权值是 15 分。

5.1.2.6 机械设计因子 (MDF) 是对装置采用的设计安全系数的度量，无论该装置是否是按当前标准设计的，如何独特、复杂或具有创新性。MDF 的权值是 15 分。

5.1.3 后果分类

有两个与石油炼化厂的运行有关的主要潜在危害：(a) 火灾和爆炸风险；(b) 毒性风险。在确定毒性后果分类时，RBI 仅考虑即时效应。

后果分析确定定性分析计算表 B 部分（见表 A. 2）中的损伤后果因子和 C 部分（见表 A. 3）中的健康后果因子。每种化学品一般都要确定这两个因子。但是许多化学品都有一个主导风险（火灾/爆炸或毒性）；因此，在已知某一给定化学品的主导风险后，只需确定对应的那个风险因子而不必两个都确定。类别分值最高的那个后果将被用来确定定性风险级别。注意，当某种化学品不具有可燃特性则可以跳过定性分析计算表的 B 部分（见表 A. 2），如果明显不存在毒性危害，则可以跳过定性分析计算表的 C 部分（见表 A. 3）。

如果该区域内有多种化学品，则用户应对百分比相对较大的化学品分别进行检查。一个好的经验作法是对最影响健康安全（后果）的那些化学品进行检查，并对组成该区域总量 90%~95% 的那些化学品进行检查。

5.1.3.1 损伤分类，在定性分析计算表的 B 部分（见表 A. 2）中有说明。从确定火灾和/或爆炸危害大小的七个因子的组合推导得出（修改了原文）：

- a) 燃烧性质 [化学因子 (CF)]。
- b) 可能的泄放量 [量值因子 (QF)]。
- c) 闪蒸成蒸气的能力 [状态因子 (SF)]。
- d) 自燃的可能性 [自燃因子 (AF)]。
- e) 高压运行的影响 [压力因子 (PRF)]。
- f) 工程保障 [安全可信因子 (CRF)]。
- g) 暴露程度对损伤的影响 [损伤潜能因子 (DPF)]。

5.1.3.2 化学因子 (CF)，化学物质的闪燃因子及其反应性因子的组合。闪燃因子与物质的 NFPA 等级相对应；反应性因子是物质暴露于某一点火源时能够迅速爆炸的一个函数。

5.1.3.3 量值因子 (QF) 是指在一次事件期间内预测的从同一装置的最大物料泄放量。

5.1.3.4 状态因子 (SF) 是指当某一物质被泄放到大气中时，对其迅速闪蒸成蒸气的难易程度的度量。根据平均工艺温度与大气压力下沸腾温度的比值来确定（该比值采用绝对温度）。

5.1.3.5 自燃因子 (AF) 被纳入定性分析计算表，表示泄放的流体在高于其自燃温度的某一温度下所增加的着火的概率。

5.1.3.6 压力因子 (PRF) 是对流体泄漏速率的一种度量。在一般情况下，对液体和气体进行高压 [大于 1034.25 kPa (150 psig)] 处理时，更可能造成其快速泄放并导致瞬时泄放，由此而造成的后果会比持续泄漏更加严重。

5.1.3.7 安全可信因子 (CRF)，表示装置的本质安全性的度量。这些安全特性可以在降低潜在的灾难性泄放后果方面发挥重要作用。该因子中包括了装置设计和运行的若干方面：

- a) 探测气体的能力。
- b) 大气的惰性。
- c) 消防系统的安全性。
- d) 隔离能力。
- e) 爆炸防护。
- f) 快速泄放系统。
- g) 电缆和结构的防火能力。
- h) 消防水供给能力。
- i) 有无固定泡沫灭火系统。
- j) 有无消防水监控装置。

k) 喷淋水幕。

5.1.3.8 损伤潜能因子 (DPF) 用来确定火灾或爆炸对装置中设备造成损伤的潜在可能性。需要对存放大量可燃性或爆炸性物质的大存量设备及周围设备价值进行估算来完成。

5.1.3.9 通过组合上述后果因子,并根据这些组合因子的范围选择相应的类别来确定损伤后果因子。

5.1.3.10 健康后果分类,在定性分析计算表的 C 部分(见表 A.3)中有说明。从以下因子推导得出,将这些要素进行组合,来表达装置的潜在毒性危害的程度:

- a) 量值和毒性 [毒性量值因子 (TQF)]。
- b) 典型工艺条件下的扩散能力 [扩散因子 (DIF)]。
- c) 探测和减缓系统 [安全可信因子 (CRF)]。
- d) 泄放发生地附近的人口 [人口因子 (PPF)]。

5.1.3.11 毒性量值因子 (TQF) 是对某一物质的数量和毒性的一种度量。量值部分基于质量并采用与定性分析计算表的 B 部分(见表 A.2)的量值因子所示的类似方法来确定。利用 NFPA 毒性因子 N_H 来确定物质的毒性。

5.1.3.12 扩散因子 (DIF) 是物料扩散能力的度量。它根据物质的沸点直接确定。沸点越高,物质扩散的可能性越小。

5.1.3.13 确定安全可信因子 (CRF),以便考察装置的安全性。包含以下因素:

- a) 探测毒性物质的能力。
- b) 隔离能力。
- c) 快速泄放能力。
- d) 减缓系统(喷淋水幕等)。

5.1.3.14 人口因子 (PPF) 是对可能受毒性物质泄放潜在影响人数的一种度量。按比例确定人口因子,以表明居住在某一危害区的人数越多,受影响人口的百分比就越小。该结果得到以往毒性物质泄放事件的实际数据的验证。

5.1.3.15 组合上述后果因子,并根据这些组合因子的范围来选择类别,以确定健康后果分类。设定这些后果分类(健康和损伤)的分值,将具有最高分值的那个类别绘制在风险矩阵的水平轴上,形成装置的风险级别。

5.1.4 结果

把装置的损伤或健康后果分类中的最高类别等级和可能性等级填入 5×5 的风险矩阵内,如图 4 所示。这些结果绘制在矩阵中后,就得到装置的风险等级。当定性分析包含了若干种物质或多组分混合物时,位于最高风险等级的装置将需要尽快进行进一步评价。

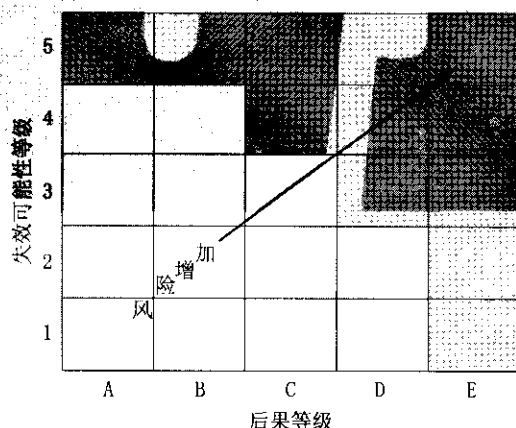


图 4 定性风险矩阵

5.1.5 识别重点检验区

可利用风险矩阵结果来确定潜在问题区，并决定工艺装置的哪些部分需要在检验中予以重点关注或需要采用哪些其他方法来降低风险。它还可用来确定定量研究是否必要。

图 4 中的阴影部分是确定潜在风险程度的指南。阴影的分布不对称，因为它们基于这样的假设，即几乎在所有案例中，后果因子在确定总风险时的权重都要比其在可能性分量中的权重更大。

无阴影时，很明显，风险量随着可能性等级和后果等级的绘制值向矩阵的右上方移动而增加。业主一般都制定并应用其自己的标准来确定何时需要进行定量 RBI 或修正其检验方案。

5.2 RBI 的定性方法（针对设备）

5.2.1 概要

识别出的影响可燃后果的关键变量是工艺流程中的流体类型（通常状态下）、存量（通常状态下）和流体相态（液体或气体）。知道了这三个变量，就可以确定可燃性后果的级别。有了温度和压力等附加信息，就可以对该级别进行细化。

毒性后果在很大程度上取决于有毒工艺流体的百分比。高毒性工艺流体或那些含有部分高毒性成分的流体的评价需要基于与 5.1.1 相同的基础信息，以及估算的工艺流体中有毒成分的百分比的信息。

评价工艺中断的方法是：用一个简化式三类别评价法评价对生产的影响，加上关于是否存在生产能力过剩的信息，或产品是否已售完的信息。

可能性的确定仅通过估算设备对六个损伤机理中的一个或多个机理的敏感性即可，这些损伤机理最可能导致生产装置的失效。根据上次对设备检验时间来修正失效可能性。

最后，根据失效后果和可能性提出推荐的检验频率。

6 定量 RBI 综述

6.1 概述

承压设备的失效和随后的危险物质泄放可能导致许多不希望发生的影响。RBI 程序已经将这些影响归类为四个基本风险类别。

- a) 可燃事件可以造成两种方式的损伤：热辐射和爆炸超压。热效应造成的大部分损伤基本在就近范围内，而爆炸效应所造成的损伤可以波及到爆炸中心以外很远的范围。
- b) 在 RBI 方法中，仅提到有毒物质泄放对人类的影响，只考虑了暴露的即时影响（相对于慢性）。这些泄放所造成的影响比火灾事件的影响范围更广，距离更远。与泄放所致火灾不一样的是，有毒物质的泄放可单独完成一个不希望发生的事件，而不需要可燃情况下的点燃这样的事件来协助完成。
- c) 环境风险是生产装置总体风险评价的重要组成部分。RBI 程序着重强调即时环境风险，而不是较低泄放水平所致的慢性风险。环境危害可以随多种物质的泄放而发生；但是，最重要的环境风险通常是大量液态烃泄放到装置边界以外所致。
- d) 工艺中断所造成的损失往往会超出设备和环境损伤的成本，因此，在 RBI 程序中应将其考虑在内。设备更换的成本（包含在可燃损伤估算中）与某个关键装置在长时间内的运行损失相比，可能是微不足道的。

图 5 概要说明了定量 RBI 的流程图。该方法一开始就要从 RBI 数据库提取工艺、设备和其他方面的信息。然后设定各种情景来显示泄放是如何发生的，以及这些泄放是怎样发展成不希望的事件的。在定量 RBI 计算中，设备孔口的尺寸是泄放情景中的 4 个决定性因子之一。由于孔径和情景之间的一一对应，所以这些变量经常互换使用。

对每一情景进行风险计算，若需要，对所有 4 个风险类别进行计算。然后通过每个情景（孔径）的各自风险分量的加和，来确定每个设备的风险。

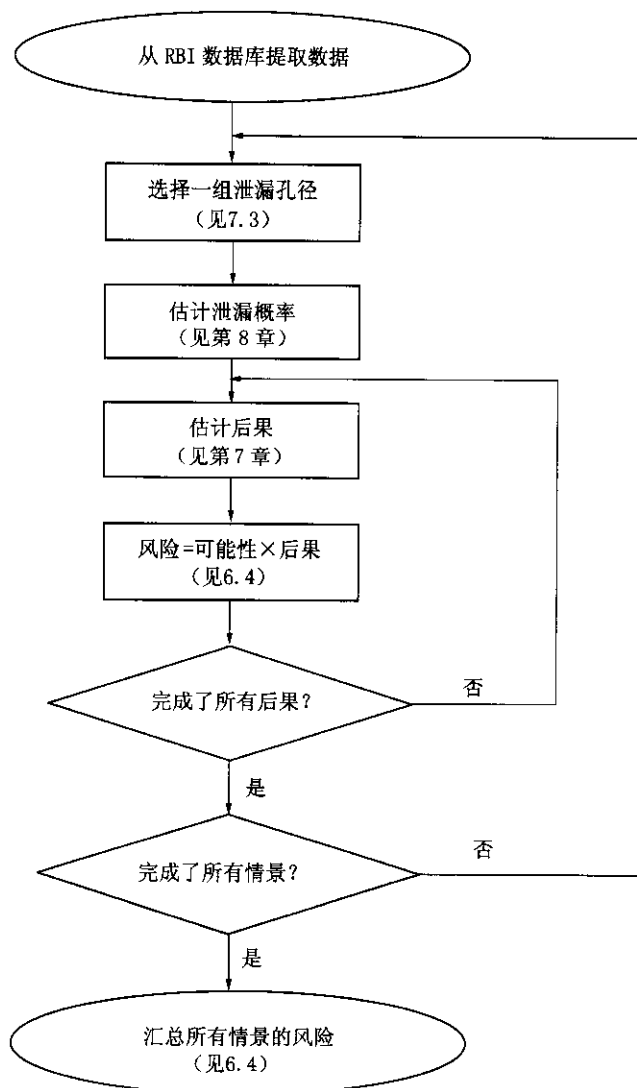


图 5 定量 RBI 方法综述

6.2 后果综述

按以下五个步骤来估算危险物料泄放后果：

- 估算泄漏速率或可能泄放的总量。
- 确定流体是快速（瞬时）扩散还是缓慢（持续）扩散。
- 确定扩散到大气中流体是液态还是气态。
- 估算减缓系统的影响作用。
- 估算后果。

如图 6 所示，环境后果输入量是泄漏速率或泄放量。此外，直接从可燃事件结果中推导出工艺中断风险。

6.2.1 估算泄漏速率

RBI 方法将所有泄放分成两种类型：瞬时泄放或持续泄漏。瞬时泄放是在相对短的时间内将容器中全部物料放空，如容器发生脆性失效事故时的泄放。持续泄漏是在相对恒定的速率下发生的长时间泄放。7.5 说明泄放分类原则。然后使用相应公式来模拟这两种类型的泄放。

6.2.2 预测结果类型

在 RBI 分析中，泄放结果是指危害物质的物理行为。结果的类型有安全扩散、爆炸或喷射火等。

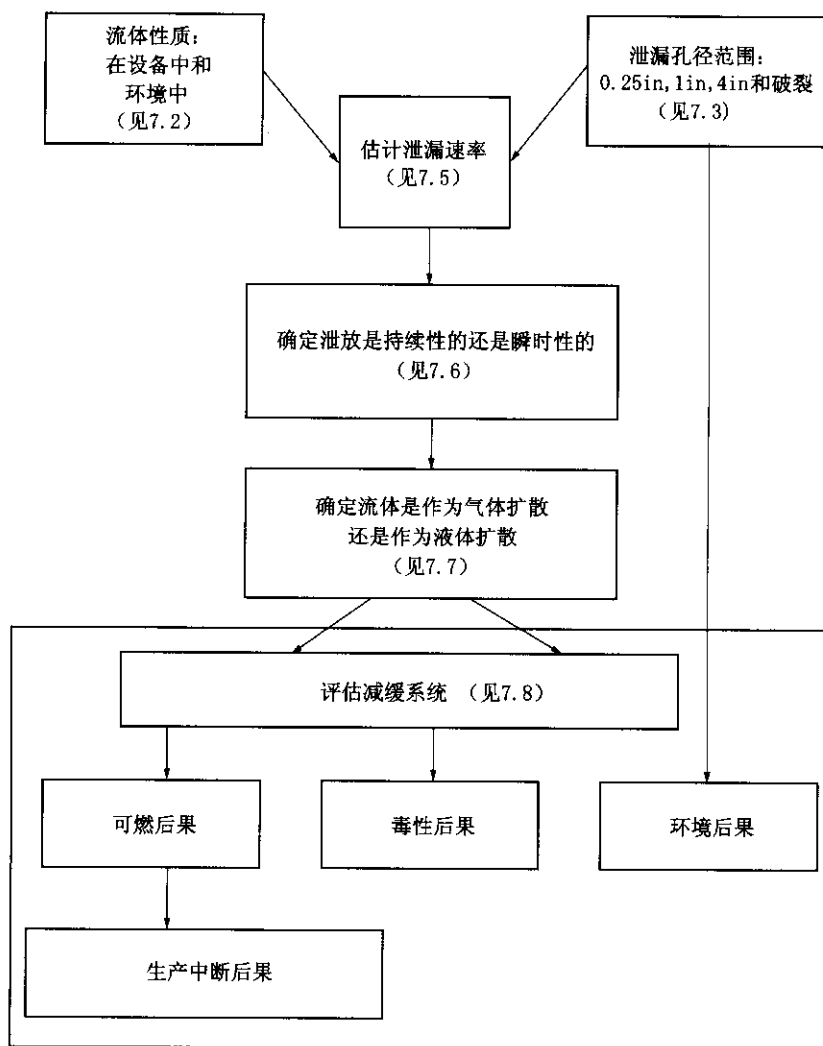


图6 后果计算综述

这些结果不应与后果混淆。在 RBI 分析中，后果是指该结果对人、设备和环境所造成的不利影响。

泄放的实际结果取决于泄放物质的特性。下面简要讨论各种类型事件的可能结果。

6.2.2.1 可燃影响

可燃流体的泄放可能会产生以下六种结果：

- 安全扩散。可燃性流体被泄放后扩散但不燃烧时所发生的现象。在遇到点火源之前流体的扩散浓度低于其可燃极限。虽然不发生燃烧结果，但可燃物质（主要是液体）的泄放仍可能会对环境产生不利的影响。环境事件单独说明。
- 喷射火。泄放的高动量气体、液体或两相流燃烧时的结果。一般越靠近喷火处，辐射强度就越高。如果泄放物质没有立即点燃，就可能会形成可燃羽流或云团。点燃时，将闪燃或回燃形成喷射状烈焰。
- 爆炸。当火焰向四周快速蔓延时，在一定条件下发生的事件。爆炸造成的损伤是火焰前端产生的超压波所致。
- 闪燃，在不造成明显过压的条件下，一团物质燃烧时所发生的现象。闪燃仅对燃烧团周边或邻近范围内产生严重后果。闪燃不会造成足以损坏设备的超压。
- 火球。大量燃料与周围的空气有限混合后点燃时所发生的现象。火球的热效应可以扩展到火球以外很远的地方，但火球的燃烧时间通常很短。

f) 池火。可燃物质储液池燃烧时形成的状况。热辐射效应被限制在液池周围的一个区域内。

6.2.2.2 毒性影响

有毒物质泄放时，可能有两种结果：安全扩散或显现毒性效应。

毒性效应的发生应满足以下两个条件：

- a) 能接触到的泄放物浓度足够高。
- b) 接触时间足够长。

不能满足其中的任何一个条件时，泄放的毒性物质就会安全扩散。安全扩散是风险评价中的一个术语，用来表示通过/不通过阈值（见 6.2.3）以下的事故。如果上述条件（浓度和接触时间）都能满足，就会出现人中毒的事件。

6.2.2.3 环境影响

从环境观点来看，如果泄放物质被完全限制在设施的物理边界以内，则会安全扩散。当没有足够的空间来容纳该物质时，危险物质就会以溢出的方式泄放出来。地表水污染被认为是一种超出装置边界的泄放。

6.2.2.4 工艺中断的影响

可燃事件后果用于分析工艺中断的影响。同样，与工艺中断分析相关的结果与上述可燃事件影响的结果是相同的。

6.2.3 将影响模型应用于后果估算

后果计算的前两个步骤是根据物理现象来预测结果。第三步是将结果转换成后果。影响模型，也被称为影响判据，被用来估算后果。

RBI 使用两个不同类型的影响标准来估算后果：直接影响模型和概率单位。比如，直接影响模型用于可燃、环境和工艺中断带来的后果，而毒性后果则采用概率单位来估算。

直接影响模型采用通过/不通过方法来预测后果。该模型中，如果结果低于预定的阈值，就不会有影响。它还高于阈值的任何结果假定了一个影响。该方法比较粗略，因为实际上，一些结果的影响已经体现出来了，但是该方法没有考虑在内。

概率单位是一种评价后果的统计方法。它反映变量随时间变化的关系，概率结果呈正态分布。概率单位的平均值为 5，方差为 1。

6.3 可能性分析概述

可能性分析始于特定设备类型的同类失效频率数据库。然后用设备修正因子（ F_E ）和管理系统评价因子（ F_M ）这两项来修正这些同类频率。把同类失效频率（ $F_{\text{同类}}$ ）乘以这两个改正因子计算得出修正的失效频率（ $F_{\text{修正}}$ ）。可能性分析可用式（2）计算：

$$F_{\text{修正}} = F_{\text{同类}} \cdot F_E \cdot F_M \quad \dots\dots\dots (2)$$

同类失效频率数据库是建立在多个行业的现有设备失效文献资料的基础上的，根据这些数据，已经就每类设备和每种口径的管道得到了同类失效概率。

设备修正因子检验每个设备的特定运行环境，然后得到专门用于该设备的修正因子。

管理系统评价因子修正设施的工艺安全管理系统（PSM）对装置机械完整性的影响。这种修正同样应用于同一研究的其他设备。

该因子仅用于区分对不同装置或具有不同管理系统的装置之间的差别。但是，评价过程可以用来提高 PSM 程序的有效性，进而降低总体风险。

6.4 风险计算

假设 RBI 的风险定义为失效后果和失效可能性的积，则情景的风险可用式（3）计算：

$$R = C_S \cdot F_S \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

S——情景编号；
C_s——情景后果（面积），ft²或美元；
F_s——情景失效频率，1/年；
R——情景的风险。

对于每一设备，风险为该设备所有情景的风险之和。风险的单位取决于所采用的后果形式：在 RBI 方法中，可燃性或毒性后果为 ft²/年，环境或工艺中断为美元/年。设备的风险可用式（4）计算：

$$R_{\text{设备项}} = \sum_{s=1}^n R_s \dots\dots\dots (4)$$

式中：
R_s——某一情景的风险，ft²/年或 美元/年；
R_{设备项}——每一设备项的风险，ft²/年或美元/年。

举例说明：
假设进行了可能性和后果计算之后，得到了表 2 所示结果。

表 2 风险计算的结果

情 景	可能性	后果	风险
	频率，1/年	设备损伤，m ²	设备损伤，m ² /年
6.35mm（1/4in）泄放	6.9×10 ⁻⁶	50.22（540ft ² ）	0.000344（0.0037ft ² /年）
25.4mm（1in）泄放	1.7×10 ⁻⁶	697.5（7500ft ² ）	0.011858（0.1275ft ² /年）
101.6mm（4in）泄放	1.7×10 ⁻⁶	1627.5（17500ft ² ）	0.002688（0.0289ft ² /年）
破裂	1.0×10 ⁻⁶	12090（130000ft ² ）	0.01209（0.13ft ² /年）
设备损伤总风险——0.02697m ² /年（0.29ft ² /年）			
注：通过检查每个孔径的风险，风险主要是 25.4mm（1in）泄放事故和破裂事故。这在最初可能不直观，但对所用方法的仔细研究可以揭示这一行为。			

7 后果分析

7.1 概述

在 RBI 程序中，进行后果分析是为了确定设备风险的相对排序。本章给出的后果度量方法是用于确定检验程序的相对优先级的简化方法。当需要更精确的后果估算时，分析人员应该参考更严格的分析技术，如定量风险分析中所采用的那些方法。

图 7 给出了对 RBI 后果计算的总体概述。分以下八个基本步骤来估算有害流体的泄放后果：

- a) 确定代表性流体及其特性（见 7.2）。
- b) 选择一组孔径，用于在风险计算时找出后果的可能范围（见 7.3）。
- c) 估算可能泄放流体的总量（见 7.4）。
- d) 估算可能的泄漏速率（见 7.5）。
- e) 定义泄放类型，以确定用于模拟扩散和后果的方法（见 7.6）。
- f) 选定流体的最终相态，即液态或气态（见 7.7）。
- g) 评价泄放后响应措施的作用（见 7.8）。
- h) 确定潜在的泄放影响区、停机造成的或环境清理的相对成本（见 7.9）。

7.2 确定代表性流体及其特性

由于炼厂的工艺物料很少是单一物质，所以代表性流体的选择需要做一些假设。这些假设及其结

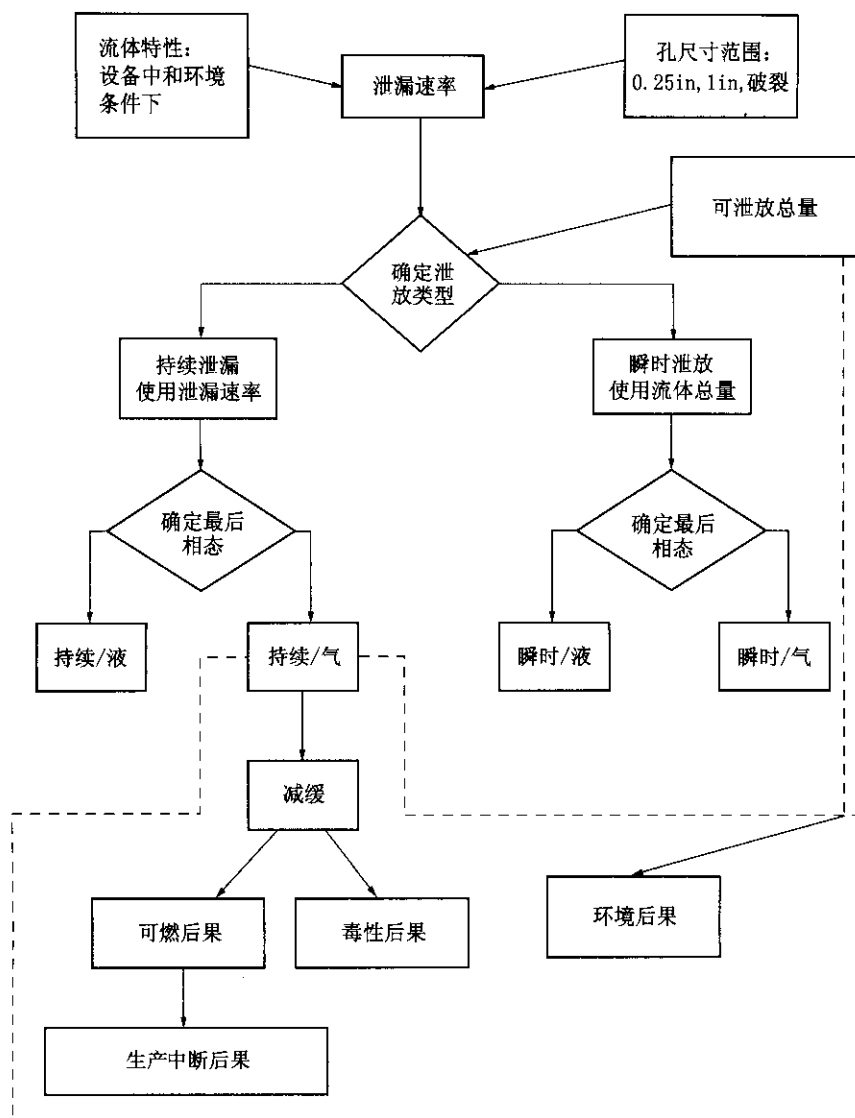


图7 RBI 后果计算概览 (某一类型/相态泄放的典型特征)

果的敏感性,在一定程度上取决于要评价后果的类型。表3给出了RBI标准中所模拟材料的清单。

对于混合物,代表性流体的确定应首先是沸点(NBP)和分子量(MW),然后是密度。当这些值未知时,可用式(5)计算混合物的特性:

$$P_{\text{混合物}} = \sum (x_i \cdot P_i) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

x_i ——组分的摩尔含量;

P_i ——可以是沸点(NBP)和分子量(MW)或密度;

$P_{\text{混合物}}$ ——混合物的特性。

流体的特性可在标准化学手册中找到。应注意的是,在RBI后果泄放模型中,NBP用来确定泄放后物质的相态,而分子量(MW)或密度则用来确定泄漏速率,但这要看泄放的是液体还是气体。对于后果评价来说,下面这些很重要:

只要分子量相似,可燃性后果的结果对选定的具体物质并不是很敏感,因为对于具有相似分子量的所有烃类来说,其在空气中扩散特性和燃烧热都是相近的。这点对直链烷烃特别明显,当物料为不

饱和烃或芳烃时，就不太明显了。

因此，当将本标准中 RBI 后果计算公式应用于本标准中没有规定的那些物质（如芳烃和氯化烃等）时，应该非常小心。在这种情况下，建议采用定量后果分析程序来进行测试，以更恰当地选择可以产生相似后果区的正确的物质。

表 3 RBI 标准中代表性流体清单

代表性流体	适用物质举例
$C_1 \sim C_2$	甲烷、乙烷、乙烯、液化天然气
$C_3 \sim C_5$	丙烷、丁烷、异丁烷、液化石油气
C_5	正戊烷
$C_6 \sim C_8$	汽油、石脑油、轻质直馏油、庚烷
$C_9 \sim C_{12}$	柴油、煤油
$C_{13} \sim C_{16}$	航煤、煤油
$C_{17} \sim C_{25}$	粗柴油、轻质原油或中质原油
C_{25}^+	渣油、重质原油
H_2	仅氢气
H_2S	仅硫化氢
HF	氟化氢
水	水
水蒸气	水蒸气
酸（低）	腐蚀性低压酸
酸（中）	腐蚀性低压酸
酸（高）	腐蚀性低压酸
芳烃	苯、甲苯、有苯环的烃
苯乙烯	苯乙烯

表 4 列出了用于本标准代表性流体的流体特性。常量 c_p 用于理想气体比热公式： $A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3$ [J/ (mol · K)]。

例如：应用上述方法，一种含 10mol% C_3 ，20mol% C_4 ，30mol% C_5 ，30mol% C_6 和 10mol% C_7 的物质将具有以下平均“关键”特性：

$$MW = 74.8$$

$$AIT = 332.11^\circ\text{C} \quad (629.8^\circ\text{F})$$

$$NBP = 39.22^\circ\text{C} \quad (102.6^\circ\text{F})$$

$$\text{密度} = 622.45\text{kg/m}^3 \quad (38.8\text{lb/ft}^3)$$

因此，对代表性流体清单中的物质的最佳选择应该是 $C_3 \sim C_5$ ，因为第一重要特性是 NBP，并且选择一种其 NBP 高于被考虑流体的代表性流体并不保守。

如果混合物含有不活泼成分，如二氧化碳、水等，就要选择除这些物质之外的所关注的可燃/有毒物质。这是一个有点粗糙的、将导致稍微保守结果的假设，但对于这个过程它则是一个非常充分的估算值。例如，当物质含有 93mol% 的水和 7mol% 的 C_{20} 时，用相应存量的烃类仅将其模拟为 C_{20} 。

表4 本标准代表性流体的特性 (英制单位)

流体	分子量	密度 lb/ft ³	沸点 °F	常温 状态	c_p 气体 常量 A	c_p 气体 常量 B	c_p 气体 常量 C	c_p 气体 常量 D	自燃 温度
C ₁ ~C ₂	23	5.639	193	气体	12.3	1.150×10^{-1}	-2.870×10^{-5}	-1.300×10^{-9}	1036
C ₃ ~C ₄	51	3.610	63	气体	2.632	0.3188	1.347×10^{-4}	1.466×10^{-8}	696
C ₆ ~C ₈	100	42.702	210	液体	-5.146	6.762×10^{-1}	-3.651×10^{-4}	7.658×10^{-8}	433
C ₉ ~C ₁₂	149	45.823	364	液体	-8.5	1.010	-5.560×10^{-4}	1.180×10^{-7}	406
C ₁₃ ~C ₁₆	205	47.728	502	液体	-11.7	1.390	-7.720×10^{-4}	1.670×10^{-7}	396
C ₁₇ ~C ₂₅	280	48.383	651	液体	-22.4	1.940	-1.120×10^{-3}	-2.530×10^{-7}	396
C ₂₅₊	422	56.187	981	液体	-22.4	1.940	-1.120×10^{-3}	-2.530×10^{-7}	396
H ₂	2	4.433	-423	气体	27.1	9.270×10^{-3}	-1.380×10^{-5}	7.650×10^{-9}	752
H ₂ S	34	61.993	-75	气体	31.9	1.440×10^{-3}	2.430×10^{-5}	-1.180×10^{-8}	500
HF	20	60.370	68	气体	29.1	6.610×10^{-4}	-2.030×10^{-6}	2.500×10^{-9}	32000
水	18	62.3	212	液体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
蒸气	18	62.3	212	气体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
酸(低)	18	62.3	212	液体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
酸(中)	18	62.3	212	液体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
酸(高)	18	62.3	212	液体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
芳族	104	42.7314	293.3	液体	-28.25	0.6159	-4.02×10^{-4}	9.94×10^{-8}	914
苯乙烯	104	42.7314	293.3	液体	-28.25	0.6159	-4.02×10^{-4}	9.94×10^{-8}	914

注: Reid, Rober C 等, 气体和液体性质, 第4版, McGraw-Hill, 纽约, 1987年。

表5 本标准代表性流体的特性 (法定计量单位)

流体	分子量	密度 kg/m ³	沸点 °C	常温 状态	c_p 气体 常量 A	c_p 气体 常量 B	c_p 气体 常量 C	c_p 气体 常量 D	自燃 温度
C ₁ ~C ₂	23	7731.069	89.44	气体	12.3	1.150×10^{-1}	-2.870×10^{-5}	-1.300×10^{-9}	1036
C ₃ ~C ₄	51	4949.31	-14.28	气体	2.632	0.3188	1.347×10^{-4}	1.466×10^{-8}	696
C ₆ ~C ₈	100	58544.442	98.89	液体	-5.146	6.762×10^{-1}	-3.651×10^{-4}	7.658×10^{-8}	433
C ₉ ~C ₁₂	149	62823.333	184.44	液体	-8.5	1.010	-5.560×10^{-4}	1.180×10^{-7}	406
C ₁₃ ~C ₁₆	205	65435.088	261.11	液体	-11.7	1.390	-7.720×10^{-4}	1.670×10^{-7}	396
C ₁₇ ~C ₂₅	280	66333.093	343.89	液体	-22.4	1.940	-1.120×10^{-3}	-2.530×10^{-7}	396
C ₂₅₊	422	77032.377	527.22	液体	-22.4	1.940	-1.120×10^{-3}	-2.530×10^{-7}	396
H ₂	2	6077.643	-252.78	气体	27.1	9.270×10^{-3}	-1.380×10^{-5}	7.650×10^{-9}	752
H ₂ S	34	84992.403	-59.44	气体	31.9	1.440×10^{-3}	2.430×10^{-5}	-1.180×10^{-8}	500
HF	20	82767.27	20	气体	29.1	6.610×10^{-4}	-2.030×10^{-6}	2.500×10^{-9}	32000
水	18	85413.3	100	液体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
蒸气	18	85413.3	100	气体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—

表 5 (续)

流体	分子量	密度 kg/m ³	沸点 ℃	常温 状态	c_p 气体 常量 A	c_p 气体 常量 B	c_p 气体 常量 C	c_p 气体 常量 D	自燃 温度
酸 (低)	18	85413.3	100	液体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
酸 (中)	18	85413.3	100	液体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
酸 (高)	18	85413.3	100	液体	32.4	0.001924	1.05×10^{-5}	-3.6×10^{-7}	—
芳族	104	58584.7494	145.17	液体	-28.25	0.6159	-4.02×10^{-4}	9.94×10^{-8}	914
苯乙烯	104	58584.7494	145.17	液体	-28.25	0.6159	-4.02×10^{-4}	9.94×10^{-8}	914

注: Reid, Rober C 等, 气体和液体性质, 第 4 版, McGraw-Hill, 纽约, 1987 年。

7.3 选择一组孔径

为了以可操作的方式进行 RBI 风险计算, 应使用一组不连续的孔径。对连续孔径进行风险计算是不现实的。经验表明, 限制孔径的数量可以使分析可管理, 并仍能反映可能结果的范围。

RBI 方法采用一组预定义的孔径。该方法为两次研究提供了再现性和一致性, 并且整个过程可以通过软件实现自动化, 这使得该方法更加容易。

RBI 确定了代表小、中、大和破裂这四种方案的孔径。选择孔径范围, 以说明潜在的现场和场外后果。对于现场效应, 小、中孔径方案通常在风险中处于支配地位, 这是因为其较高的可能性和潜在的现场后果。对于场外效应, 则中、大孔径方案在风险中处于支配地位。为了说明现场和场外风险, 并更高精度的区别设备之间的风险, RBI 通常把四种孔径用于每个设备。

表 6 给出了 RBI 程序可选择的孔径。

表 6 规定了用于风险计算的可能孔径。对于某些设备来说, 以上所有孔径可能都不可行。以下各节将就如何根据特定设备选择孔径进行讨论。

表 6 定量 RBI 分析中使用的孔径

孔尺寸	范围, mm (in)	代表值, mm (in)
小	0~6.35 (0~1/4)	6.35 (1/4)
中	>6.35~50.8 (>1/4~2)	25.4 (1)
大	>50.8~152.4 (>2~6)	101.6 (4)
破裂	>152.4 (>6)	设备的整套口径最大达 406.4 (16)

7.3.1 配管孔径的选择

如果孔口直径小于或等于管道直径, 则管道使用四个标准孔径: 6.35mm (1/4in), 25.4mm (1in), 101.6mm (4in) 和破裂。例如, 一根 25.4mm (1in) 的管子只能有两个孔径: 6.35mm (1/4in) 和破裂, 因为可选择的最大值相当于 25.4mm (1in) 孔径。同样, 一根 101.6mm (4in) 的管道有三个孔径: 6.35mm (1/4in), 25.4mm (1in) 和破裂。

7.3.2 压力容器孔径选择

假定所有容器都采用四个标准孔径。该一般分类中所包括的设备类型有:

- 容器——标准压力容器, 例如 KO 罐、储液器和反应器。
- 过滤器——标准类型的过滤器和粗滤器。
- 工艺塔——蒸馏塔、吸收塔和气体塔等。
- 换热器壳程——再沸器、冷凝器、换热器的壳程。

- e) 换热器管箱——再沸器、冷凝器、换热器的管箱。
- f) 翅片式冷却器—翅片式换热器。

7.3.3 泵孔径选择

假设泵有三种可能的孔径：6.35mm (1/4in)，25.4mm (1in) 和 101.6mm (4in)。若吸入管线小于 101.6mm (4in)，则最终的可能孔径将是吸入管线的直径。没有对泵进行过破裂模拟，并且泵的三个孔径的使用情况与历史失效数据一致。

7.3.4 压缩机的孔径选择

离心式和往复式压缩机都使用两个孔径：25.4mm (1in) 和 101.6mm (4in) (或吸入管线全口径破裂，以较小直径为准)。仅选择两个孔径的情况与历史数据相一致。

7.3.5 常压储罐的孔径选择

常压储罐具有独特的特性，要求采用特殊的孔径。储罐通常被防火堤所环绕，从而构成了泄放物的第二围堰。罐底可能在探测之前已经泄漏了很长时间，导致了地下污染。

RBI 假设这些储罐至少部分高出地面 (半地下储罐)，并且假设泄放探测时间取决于探测方法。由于以上特性和限制，假设的常压储罐的尺寸和位置如下：

- a) 从储罐地上侧 6.35mm (1/4in)，25.4mm (1in) 和 101.6mm (4in) 孔口泄放。
- b) 罐壁或罐底破裂，并假定罐底破裂可以造成泄放介质顺畅地流到储罐周围的地面上。
- c) 常压储罐底内 25.4mm (1in) 和 101.6mm (4in) 的泄放孔。

7.4 可泄放流体总量的估算

RBI 后果计算要求有一个设备可能泄放之流体量 (存量) 的上限。从理论上讲，可泄放的流体总量是在隔断阀之间容器和管道等承压设备内盛装的流体量。实际上，可能会立即进行紧急操作来关闭手动阀、减少各管段的存量或以其他方式来阻止泄放。此外，管道限制和高程差也可以有效地减缓或阻止泄漏。

注：本处说明的存量计算作为上限使用，并且不表明该流体量会在所有泄放情景下泄放。

定量 RBI 方法没有采用详细的流体动力学模型，而是采用简单的程序确定可能在某一泄放事故中实际泄放的流体量。评价一个设备时，其存量与可能实际对泄放设备提供流体质量的其他关联设备结合在一起。这些设备共同构成一个存量组。该程序把可用质量估算为两个量中的较小量：

- a) 设备存量加上在 3min 内从存量组中其他设备添加到设备的流体质量，假设泄放设备的流速相同，但在破裂情况下限制在 203.2mm (8in) 泄放。
- b) 与设备相关的存量组中被模拟流体的总质量。

添加流体的 3min 时间限制是基于大量泄放情景动力学而制定的。在大量泄放中，泄放的容器开始减少存量，而相连容器则根据泄放量提供所需的补充。因为对操作者提供了存在泄放的许多提示信号，所以预计大量泄放只能持续几分钟。补足破裂泄放量的预计时间大约是 1min~5min。选择 3min 是因为该值是这个时间范围的中间点。尽管 3min 假设不适用于小量泄放，但小量泄放将持续足够长时间来排空泄放的容器并继续排空其他容器的情况是不太可能的。

可以采用以下指南来估算设备和管道存量。

7.4.1 设备

可以计算设备内液体存量。根据近似风险方法论 (也可参考 SY/T 10043 中的一些方法)，可以采用表 7 中的一些假设 (注意：当知道正常运行等级时，应采用该等级)。

7.4.2 液体系统

对于液体系统，定义代表性设备组，只要给出该组内某种失效，就可产生类似的后果。液体系统的例子包括：

- a) 蒸馏塔的下半部，蒸馏塔再沸器和相关管道。
- b) 储液器及其出口管道。

表 7 计算设备内液体存量时采用的假设

设 备		体 积 分 数
填料塔		每种物质的 50%
盘式塔 (分两部分处理)	上半部	50%蒸气
	下半部	50%液体
分离罐和干燥器		10%液体
储液器和罐		50%液体
分液器		每一物质/相的 50% (体积)
泵和压缩机		忽略不计
换热器		50%外壳侧, 25%管侧
炉管		管中 50%液体/50%蒸气
管道		100%

- c) 长进料管。
- d) 储罐及其出口管道。
- e) 一系列换热器及其相连管道。

一旦建立了液体管道和设备组, 就将每一设备的存量相加来得到组存量。该液体存量用于该组所模拟的每个设备。

7.4.3 气体系统

对蒸气系统来说, 气体系统的共同设备和管道组包括:

- a) 蒸馏塔的上半部、其塔顶管道和塔顶冷凝器。
- b) 放空管路、其分离罐和出口管。

但是对于蒸气系统, 存量不是取决于设备内的蒸气量, 而是取决于系统的流动速率。因此, 要求在给定时间段 (如 60min) 采用该流速和使用该存量。当该流速未知时, 并且由于液体系统还可能会出现闪蒸, 所以最好只使用上游组的液体存量。但是, 这可能会得出较为保守的存量。

7.4.4 两相系统

对于两相流管道, 如分离器, 最可能使用的是有潜在溢出的液体存量, 因为其假设是泄放发生在设备的底部。同样会出现一些保守情况。对于两相管道, 上游的溢出存量可以这样考虑, 即当大部分是液体时, 那么就应该确定液体溢出存量。相反, 当上游存量主要是两相或气态时, 那么可以在对该液体部分限量的情况下来计算蒸气存量。

7.5 估算泄漏速率

RBI 后果分析将所有泄放模拟为以下两种类型之一:

- a) 瞬时泄放也被称为“急速喷涌式”泄放。
- b) 持续泄漏, 也被称为“羽烟状”泄放。

瞬时泄放是指流体快速泄放, 形成大片蒸气云或大滩液池的泄放。持续泄漏是持续时间较长的, 造成流体扩散并以椭圆形状向外扩散的泄放。分析开始时, 不知道泄放是急速喷涌式泄放还是羽烟状泄放。因此, 分析人员应首先计算出理论泄漏速率, 然后据此判断采用哪种泄放类型更合适。

泄漏速率取决于物料的物理性质、初始相态以及工艺条件。分析人员根据物料在设备内的相态及其泄放时的泄放状态 (音速或亚音速), 来选择正确的泄漏速率公式。为了简化, 已经省略了两相流公式。

流体的初始相态定义为气体或液体。“相态”仅仅是容器或管线中可能泄放的危险物质, 在与大

气接触之前（即该点不包括闪蒸和烟雾化）的相态。

对两相流系统（冷凝器、相分离器、蒸发器、再沸器等），需要对模型处理这类问题做出一些判断。在大多数情况下，选择液体作为初始状态更保守些，但更可取。两相管道系统可能是个例外。此时，可以这样考虑上游溢出存量，即当可能泄放的大部分上游物质为蒸气时，应选择“蒸气”作为初始状态。因此还应检查结果的保守性。此外还建议，承载两相物质的设备应具有非常近似的潜在溢出存量；这对非过分预测结果很有帮助。泄漏速率公式如下。

7.5.1 液体泄漏速率计算

伯努利和托里策利的著作（Perry 和 Green，1984 年）描述了液体通过一锐边孔板泄放的情形，计算公式见式（6）：

$$Q_L = C_d \cdot A_k \sqrt{\frac{2g \cdot 144p}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

Q_L ——液体泄漏速率，kg/s；

C_d ——流量系数；

A_k ——孔口截面积，m²；

ρ ——液体密度，kg/m³；

p ——上游压力和大气压力之间的压差，Pa；

g ——重力加速度，其值为 9.8m/s²（32.2ft/s²）。

锐边孔板流出的全紊流流量系数为 0.60~0.64。推荐采用 0.61 这个数值。式（6）用于闪蒸和非闪蒸两种液体。

7.5.2 气体泄漏速率公式

通过孔板的气流有两个状态：较高内压为音速（或阻流），较低内压为亚音速。因此，气体泄漏速率分两步来计算。第一步是确定属于哪一种流动状态。第二步是采用相应流动状态公式来估算泄漏速率。式（7）确定从音速变为亚音速的流态压力：

$$p_{trans} = p_a \left(\frac{K+1}{2} \right)^{\frac{K}{K-1}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

p_{trans} ——转换压力（绝压），lb/in²；

p_a ——大气压力（psia），lb/in²；

$K = c_p/c_v$ ；

c_p ——恒定压力下理想气体的比热，Btu/（lb·mol·°F）；

c_v ——恒定体积下理想气体的比热，Btu/（lb·mol·°F）。

装置内的压力大于 p_{trans} 的情况，采用音速气体流量公式，对于装置内的压力小于或等于 p_{trans} 的情况，采用亚音速气体流量公式。

7.5.3 音速气体流量的计算

以音速通过孔板（Perry 和 Green，1984 年）气体的流速可按式（8）计算：

$$W_{g音速} = C_d \cdot A' \cdot p \sqrt{\left(\frac{K \cdot M}{R \cdot T} \right) \frac{g_c}{144} \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K-1}{K}}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$W_{g音速}$ ——气体流量，音速流，lb/s；

C_d ——流量系数（对于气体， $C_d = 0.85 \sim 1$ ）；

A' ——截面积，in²；

p ——漏点压力 (绝压), lb/in²;
 M ——分子量 [lb/ (lb · mol)];
 R ——气体常数 [10.73ft³ · psia/ (lb · mol · °F)];
 T ——漏点温度, °F。

7.5.4 亚音速气体流量的计算

以亚音速通过孔板的气体的排量可按式 (9) 计算:

$$W_{g\text{亚音速}} = C_d' \cdot A' \cdot p \sqrt{\left(\frac{M}{R \cdot T}\right) \frac{g_c}{144} \left(\frac{2K}{K-1}\right) \left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{2}{K}} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right]} \quad \dots\dots (9)$$

式中:

$W_{g\text{亚音速}}$ ——亚音速时的气体流量, lb/s;
 C_d ——流量系数 (对于气体, $C_d = 0.85 \sim 1$);
 A' ——截面积, in²;
 p ——漏点压力 (绝压), lb/in²;
 M ——分子量 [lb/ (lb · mol)];
 R ——气体常数 [10.73ft³ · psia/ (lb · mol · °F)];
 T ——漏点温度, °F。

7.6 确定泄放类型

可以用不同方法来估算瞬时泄放和持续泄漏的影响。计算的后果可能差异很大, 这要取决于选定的代表性泄放的类型。因此, 将泄放正确地归类为两种泄放类型之一是非常重要的。

以下标准来源于对以往的火灾和爆炸数据的审查, 它表明, 如果在短时间内泄放 4540kg (10000lb) 以上的流体, 更可能会发生蒸气云团的无限制爆炸。持续泄漏模拟使用一个较低的概率来模拟泄放后的蒸气云爆炸 (VCE)。因此使用该阈值来确定持续泄漏, 可以反映短时间内泄放量的趋势, 少于 4540kg (10000lb) 会导致闪燃而不是 VCE。

以下过程用来确定适当的泄放模拟方法。该过程如图 8 所示。

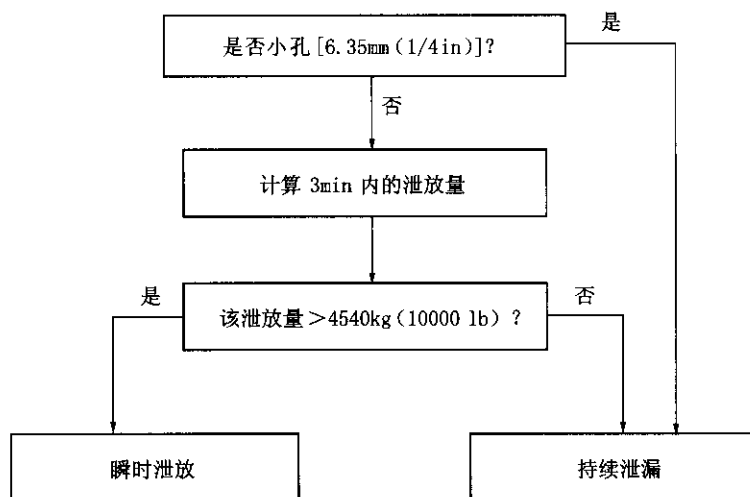


图 8 确定泄放类型的过程

- 所有小孔 [6.35mm (1/4in)] 被模拟为持续泄漏。
- 如果泄放 4540kg (10000lb) 物质的时间少于 3min, 则流经给定孔径的泄放为瞬时泄放, 并且模拟为急速喷涌式泄放。
- 所有较低泄漏速率的泄放均被模拟为持续泄漏。

7.7 确定流体的最终相态

流体泄放后的扩散特性主要取决于环境中流体的相态（即液体或气体）。如果流体从稳态运行工况转换到稳态环境条件时没有改变相态，则流体的最终相态跟初始时相同。但是，如果流体在泄放时会改变相态，则很难针对后果计算来评价物质的相。表 8 给出了后果计算时用于确定流体相的简要准则，在没有可用的更完备方法时可以应用这个指南。在确定过程中，应该向工艺或运行人员进行咨询。

表 8 流体相态确定指南

稳态运行工况下流体的相态	稳态环境条件下流体的相态	确定后果计算的最终相态
气体	气体	模拟为气体
气体	液体	模拟为气体
液体	气体	模拟为气体，如果环境条件下流体的沸点高于 26.7℃（80°F），则模拟为液体
液体	液体	模拟为液体

7.8 对泄放响应系统的评价

泄放响应评价是后果分析的最后一步。在该步骤中，就已安排就绪的各种减缓系统对控制后限制的有效性进行评价。

7.8.1 评价泄放响应的方法

确定泄放响应评价的两个关键参数：泄放持续时间和减少的危害物质扩散范围。泄放持续时间是毒性和环境后果评价中的关键参数。可燃物质可以快速达到稳态浓度，因此，对可燃物质来说，持续时间不是重要因素。生产中断风险直接根据可燃后果的结果来估算，因此，泄放时间对它来说也不是很敏感。

由于这些原因，需要用不同的方法来评价 RBI 所分析的四种后果类型的泄放后反应。下面简要说明每一后果类型的具体评价方法。

7.8.1.1 可燃物的泄放

对于可燃物质的泄放，隔离阀可以降低泄漏速率或泄放量至某一规定量，但这要根据这些系统的质量来决定。

7.8.1.2 有毒物的泄放

根据泄放探测系统和隔离系统的类型来估算泄放时间。然后将泄放时间作为输入项直接输入毒性后果估算。减缓系统，如水幕等，用来减少物质的扩散，从而降低最终后果的影响。

7.8.1.3 向环境泄放

有两个办法可以减缓对环境影响的后果：物理屏障起着阻止现场泄放物向外流散的作用，而泄放探测和隔离系统则限制泄放时间。在 RBI 中，溢出计算直接计算出现场可能容纳的体积量。泄放探测和隔离系统用来减少泄放时间，进而减少最终溢出体积。

7.8.2 对泄放响应系统的评价

所有石油化工处理厂都有各种各样的减缓系统，这些系统用来探测、隔离和减少危害物质泄放的影响。RBI 已经制定了一种简化方法来评价各类减缓系统的有效性。

减缓系统以不同方式影响泄放。有些系统通过探测和隔离泄放来减少泄放时间。其他减缓系统则使点燃机会或物质扩散范围达到最小化。在 RBI 中，后果减缓系统可以分为以下两类：

- a) 探测和隔离泄放的系统。
- b) 直接应用于危害物质以降低后果的系统。

7.8.3 对探测与隔离系统的评价

采用以下两步法来评价探测和隔离系统：

- a) 确定适用探测和隔离系统的分类等级。
- b) 参照具体后果计算章节，来估算探测和隔离系统对后果的影响。

表 9 给出了用户指南，该指南将一个定性字母等级（A，B 或 C）指定给装置的探测和隔离系统。这些字母等级将用于后面的后果估算章节，用来确定减缓系统对最终后果的影响。注意，探测系统 A 通常仅用于特定的化工应用场所，在炼油厂则较少使用。

表 9 中给出的信息只在评价持续泄漏后果时使用。换句话说，当 3min 内泄放的碳氢化合物超过 4540kg（10000lb）时，探测和隔离能力的评价程序则不适用。

表 9 探测和隔离系统分级指南

探测系统类型	探测系统分级
专门设计的仪器仪表，用来探测系统的运行工况变化所造成的物质损失（即压力损失或流量损失）	A
适当定位探测器，确定物质何时会出现在承压密闭体以外	B
外观检查、照相机，或带远距功能的探测器	C
隔离系统类型	隔离系统分级
直接在工艺仪表或探测器启动，而无需操作者干预的隔离或停机系统	A
操作者在控制室或远离泄放点的其他合适位置启动的隔离或停机系统	B
手动操作阀启动的隔离系统	C

采用人为因素分析法，将探测和隔离系统的质量等级转换为泄放时间估算值。表 10 中给出的总泄放时间是以下时间之和：

- a) 探测泄放的时间。
- b) 分析事故和确定纠正措施的时间。
- c) 完成相应的纠正措施的时间。

建议在 RBI 中采用表 10 给出的值。若用户获得更好有关操作者反应时间的信息，则应替换表 10 给出的值。

7.8.4 评价直接应用系统

没有一个标准的方法来评价将减缓措施直接应用于危害物质的系统。因此，这些类型的减缓系统都是单独针对每种后果类型的。详情请参见 7.9。

表 10 探测和隔离系统的泄放时间

探测系统等级	隔离系统等级	泄放时间
A	A	对 6.35mm（1/4in）泄放，20min 对 25.4mm（1in）泄放，10min 对 101.6mm（4in）泄放，5min
A	B	对 6.35mm（1/4in）泄放，30min 对 25.4mm（1in）泄放，20min 对 101.6mm（4in）泄放，10min
A	C	对 6.35mm（1/4in）泄放，40min 对 25.4mm（1in）泄放，30min 对 101.6mm（4in）泄放，20min

表 10 (续)

探测系统等级	隔离系统等级	泄放时间
B	A 或 B	对 6.35mm (1/4in) 泄放, 40min 对 25.4mm (1in) 泄放, 30min 对 101.6mm (4in) 泄放, 20min
B	C	对 6.35mm (1/4in) 泄放, 1h 对 25.4mm (1in) 泄放, 30min 对 101.6mm (4in) 泄放, 20min
C	A, B 或 C	对 6.35mm (1/4in) 泄放, 1h 对 25.4mm (1in) 泄放, 40min 对 101.6mm (4in) 泄放, 20min

7.9 确定泄放后果

下面描述了计算泄放后果量值的方法, 用于计算四类主要后果: 可燃、有毒、环境和生产中断。

7.9.1 后果估算概述

四种主要后果类型分布需要采用不同的方式进行分析:

- 用事件树来计算可燃后果和毒性后果, 以确定各种结果 (如闪燃、蒸气云爆炸等) 的可能性, 结合用计算机模拟的归纳公式, 最后确定后果大小。
- 估算生产中断风险, 以此作为可燃后果的一个函数。
- 环境后果直接根据最大泄放量或泄漏速率来确定。

利用包含大气扩散和后果模拟程序的危害分析筛选软件包来计算可燃后果和毒性后果。在以下章节中, 将通过直接建立后果与泄放参数的关系, 使输出结果可用。因此, 根据一组经验公式, 把泄漏速率 (持续泄漏) 或泄放量 (瞬时泄放) 作为输入来估算后果。RBI 用户也可以用可比扩散和后果模型取代本章给出的预定归纳公式。

7.9.2 一般输入假设

计算机模拟通常根据气象和泄放条件来确定最终后果要求的具体输入。代表海湾沿岸年平均值的气象条件用于 RBI 后果分析。输入假设如下:

- 大气温度 21.11°C (70°F)。
- 相对湿度 75%。
- 风速 12.87km/h (8 英里/h)。
- 稳定等级 D 级。
- 表面粗糙度 0.1 (特别对处理厂)。
- 炼油厂内典型中压工艺条件的初始压力和温度。
- 从盛装饱和液体的容器中泄放的蒸气和液体, 泄放方向在混凝土地表以上 3.048m (10ft) 高处水平向下。

分析显示, 这些假设满足各种装置状况。

7.9.3 燃烧/爆炸后果

对于可燃物质, RBI 以泄放物点燃所造成的影响区来衡量后果。可燃物质泄放的潜在结果有多种, 但 RBI 将一个综合结果确定为所有可能结果的平均值, 根据概率加权。某一结果的概率与某一泄放可能性不同, 并且不应与其混淆 (参见第 8 章)。某一结果的概率代表某一泄放发生后, 将会观察到其中特定的物理现象的概率 (结果)。

可燃物质的潜在泄放结果有如下几种:

- 安全扩散 (SD)。

- b) 喷射火 (JF)。
- c) 蒸气云爆炸 (VCE)。
- d) 闪燃 (FF)。
- e) 火球 (BL)。
- f) 池火 (PF)。

在 6.2.2.1 简要说明了每一结果。

7.9.3.1 燃烧后果分析步骤

对本标准来说，可燃后果的确定过程已得到很大的简化，从而允许 RBI 分析人员仅利用以下信息就能够确定大致的后果：

- a) 代表性流体及其性质。
- b) 扩散类型和相态。
- c) 泄漏速率或泄放量，取决于扩散类型和减缓措施的影响。

7.9.3.1.1 采用以下步骤来预测后果：

步骤 1：记录泄放类型和扩散相。

步骤 2：根据泄放类型选择合适的表（表 11、表 12、表 13 和表 14）：

- a) 表 11：不可能自燃的持续泄漏。

表 11 持续泄漏后果公式——不可能自燃^a

物质	最终相气体		最终相液体	
	设备损伤面积 ft ²	致死面积 ft ²	设备损伤面积 ft ²	致死面积 ft ²
C ₁ ~C ₂	$A = 43x^{0.98}$	$A = 110x^{0.96}$		
C ₃ ~C ₄	$A = 49x^{0.98}$	$A = 125x^{0.96}$		
C ₅	$A = 25.2x^{0.98}$	$A = 62.1x^{1.00}$	$A = 536x^{0.90}$	$A = 1544x^{0.90}$
C ₆ ~C ₈	$A = 29x^{0.98}$	$A = 68x^{0.96}$	$A = 182x^{0.89}$	$A = 516x^{0.89}$
C ₉ ~C ₁₂	$A = 12x^{0.98}$	$A = 29x^{0.96}$	$A = 130x^{0.90}$	$A = 373x^{0.89}$
C ₁₃ ~C ₁₆			$A = 64x^{0.90}$	$A = 183x^{0.89}$
C ₁₇ ~C ₂₅			$A = 20x^{0.90}$	$A = 57x^{0.89}$
C ₂₅ -			$A = 11x^{0.91}$	$A = 33x^{0.89}$
H ₂	$A = 198x^{0.992}$	$A = 614x^{0.933}$		
H ₂ S	$A = 32x^{1.00}$	$A = 52x^{1.00}$		
HF				
芳族	$A = 121.39x^{0.8911}$	$A = 359x^{0.8821}$		
苯乙烯	$A = 121.39x^{0.8911}$	$A = 359x^{0.8821}$		
^a 过程温度小于自燃温度 26.67℃ (80°F) 时，不可能自燃。				
注 1：空白区表示等式不适用的情况。				
注 2：x——总泄漏速率，lb/s；A——面积，ft ² 。				

- b) 表 12：不可能自燃的瞬时泄放。
- c) 表 13：可能自燃的持续泄漏。

表 12 瞬时泄放后果公式——不可能自燃^a

物 质	最终相气体		最终相液体	
	设备损伤面积 ft ²	致死面积 ft ²	设备损伤面积 ft ²	致死面积 ft ²
C ₁ ~C ₂	$A = 41X^{0.67}$	$A = 79X^{0.67}$		
C ₃ ~C ₄	$A = 28X^{0.72}$	$A = 57.7X^{0.75}$		
C ₅	$A = 13.4X^{0.73}$	$A = 20.4X^{0.76}$	$A = 1.49X^{0.85}$	$A = 4.34X^{0.85}$
C ₆ ~C ₈	$A = 14X^{0.67}$	$A = 26X^{0.67}$	$A = 4.35X^{0.78}$	$A = 12.7X^{0.78}$
C ₉ ~C ₁₂	$A = 7.1X^{0.66}$	$A = 13X^{0.66}$	$A = 3.3X^{0.76}$	$A = 9.5X^{0.76}$
C ₁₃ ~C ₁₆			$A = 0.46X^{0.88}$	$A = 1.3X^{0.88}$
C ₁₇ ~C ₂₅			$A = 0.11X^{0.91}$	$A = 0.32X^{0.91}$
C ₂₅ ⁺			$A = 0.03X^{0.99}$	$A = 0.081X^{0.99}$
H ₂	$A = 545X^{0.657}$	$A = 982X^{0.652}$		
H ₂ S	$A = 148X^{0.63}$	$A = 271X^{0.63}$		
HF				
芳族	$A = 2.26X^{0.8227}$	$A = 10.5X^{0.7583}$		
苯乙烯	$A = 2.26X^{0.8227}$	$A = 10.5X^{0.7583}$		

^a 过程温度小于自动点火温度 26.67℃ (80°F) 时, 不可能自燃。

注 1: 空白区表示等式不适用的情况。

注 2: X——总泄漏量, lb; A——面积, ft²。

表 13 持续泄漏后果公式——可能自燃^a

物 质	最终相气体		最终相液体	
	设备损伤面积 ft ²	致死面积 ft ²	设备损伤面积 ft ²	致死面积 ft ²
C ₁ ~C ₂	$A = 280x^{0.95}$	$A = 745x^{0.92}$		
C ₃ ~C ₄	$A = 315x^{1.00}$	$A = 837x^{0.92}$		
C ₅	$A = 304x^{1.00}$	$A = 811x^{1.00}$		
C ₆ ~C ₈	$A = 313x^{1.00}$	$A = 828x^{1.00}$	$A = 525x^{0.95}$	$A = 1315x^{0.92}$
C ₉ ~C ₁₂	$A = 391x^{0.95}$	$A = 981x^{0.92}$	$A = 560x^{0.95}$	$A = 1401x^{0.92}$
C ₁₃ ~C ₁₆			$A = 1023x^{0.92}$	$A = 2850x^{0.90}$
C ₁₇ ~C ₂₅			$A = 861x^{0.92}$	$A = 2420x^{0.90}$
C ₂₅ -			$A = 544x^{0.90}$	$A = 1604x^{0.90}$
H ₂	$A = 1146x^{1.00}$	$A = 3072x^{1.00}$		
H ₂ S	$A = 203x^{0.89}$	$A = 375x^{0.94}$		
HF				
芳族				
苯乙烯				

^a 应在至少高于自燃温度 26.67℃ (80°F) 下处理。

注 1: 空白区表示等式不适用的情况。

注 2: x——总泄漏速率, lb/s; A——面积, ft²。

d) 表 14：可能自燃的瞬时泄放。

表 14 瞬时泄放后果公式——可能自燃^a

物质	最终相气体		最终相液体	
	设备损伤面积 ft ²	致死面积 ft ²	设备损伤面积 ft ²	致死面积 ft ²
C ₁ ~C ₂	$A = 1079X^{0.62}$	$A = 3100X^{0.63}$		
C ₃ ~C ₄	$A = 523X^{0.63}$	$A = 1768X^{0.63}$		
C ₅	$A = 275X^{0.61}$	$A = 959X^{0.63}$		
C ₆ ~C ₈	$A = 76X^{0.61}$	$A = 962X^{0.63}$		
C ₉ ~C ₁₂	$A = 281X^{0.61}$	$A = 988X^{0.63}$	$A = 6.0X^{0.53}$	$A = 20X^{0.54}$
C ₁₃ ~C ₁₆			$A = 9.2X^{0.88}$	$A = 26X^{0.88}$
C ₁₇ ~C ₂₅			$A = 5.6X^{0.91}$	$A = 16X^{0.91}$
C ₂₅₊			$A = 1.4X^{0.99}$	$A = 4.1X^{0.99}$
H ₂	$A = 1430X^{0.618}$	$A = 4193X^{0.621}$		
H ₂ S	$A = 357X^{0.61}$	$A = 1253X^{0.63}$		
HF				
芳族				
苯乙烯				
^a 应在至少高于自燃温度 26.67℃ (80°F) 下处理。				
注 1：空白区表示等式不适用的情况。				
注 2：X——总泄漏量，lb；A——面积，ft ² 。				

步骤 3：一旦选定正确的表，根据流体的最终相态选择表中的相应部分：

a) 气体使用左半部。

b) 液体使用右半部。

步骤 4：根据所考虑的预期效应，选择相应的栏：

a) 设备损伤区。

b) 潜在致命区。

步骤 5：选择与代表性流体相应栏中的公式。

步骤 6：根据泄放类型，用泄漏速率或泄放量替换公式中的“X”。结果是概率权重影响区，单位是平方英尺 (ft²)。

7.9.3.1.2 通过以下三步推导上述方法提到的后果表中的值：

步骤 1：预测各种结果的概率。

步骤 2：计算每一类结果的后果。

步骤 3：将后果并入某个概率加权经验公式。

a) 步骤 1——预测可燃结果的概率。

每个结果都是事件链的结果。如图 9 所示，事件树可用于 RBI，以直观描述导致每一结果的可能事件链。事件树也可用来显示如何组合各种单个事件概率，以计算事件链概率。

对于某一给定的泄放类型，确定可燃物质泄放结果的因素是点燃的可能性和点燃的时间。事件树

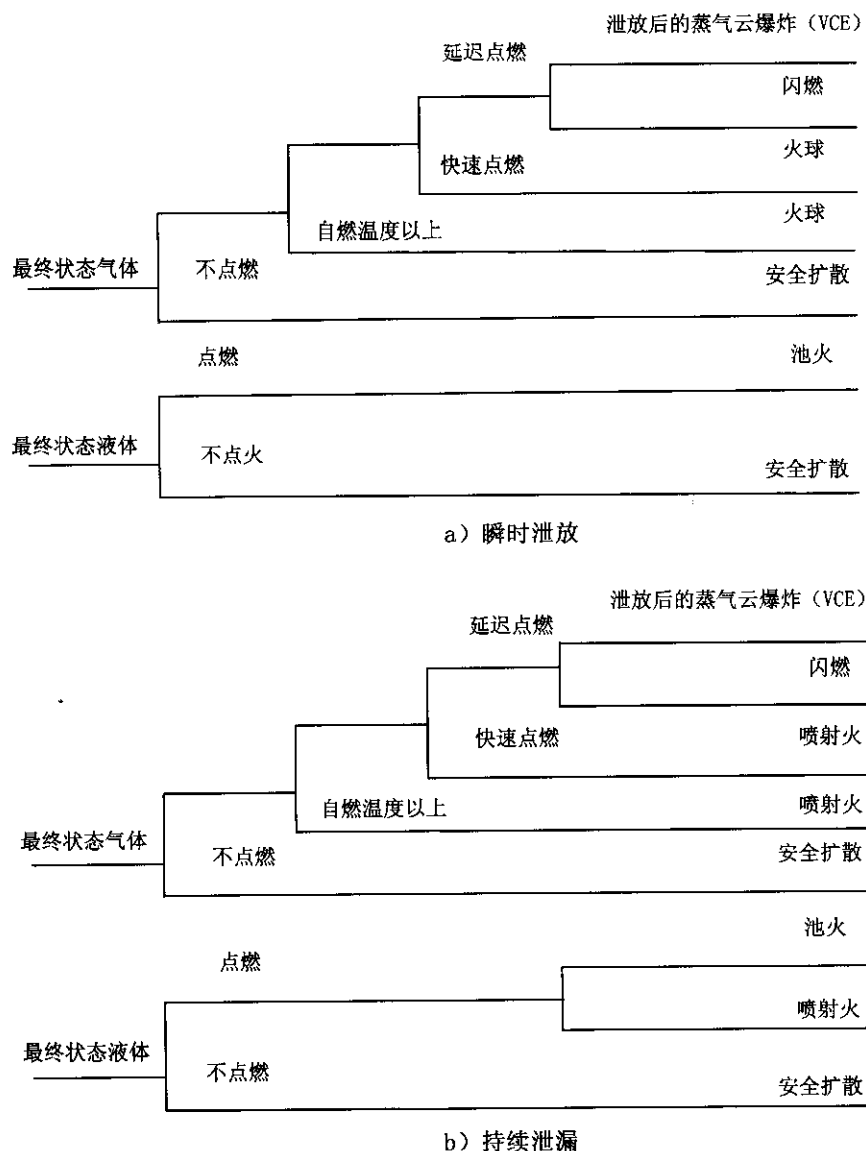


图9 RBI泄放事件树

结果所描述的三种可能性是：不点燃、快速点燃和延迟点燃。

表15和表16根据泄放类型和物质给出了所有泄放类型的事件树结果概率。根据物质，表中的每一行都包含每个潜在结果的概率。为标准风险分析编制的事件树用来建立相对结果概率。点燃概率基于以前建立的相互关系。一般来说，点燃概率被认为是以下流体参数的一个函数：

- 1) 自燃温度 (AIT)。
- 2) 闪蒸温度。
- 3) NFPA 可燃性指数。
- 4) 可燃性范围 (可燃性上限和下限之间的差)。

当某一流体在大大高于其自燃温度 [至少 26.67°C (80°F)] 的一个温度下泄放时，点燃概率将发生显著变化。表15和表16反映了这些变化。

b) 步骤2——计算每个结果的后果。

为了计算出某一特定事件的后果，首先需要定义导致某一特定后果所需的阈值等级。这些阈值等级被称为影响判据。

表 15 特定事件概率——可能自燃的持续泄漏^a

最终状态液体——在自燃温度 (AIT) 以上的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
C ₁ ~C ₂						
C ₃ ~C ₄						
C ₅						
C ₆ ~C ₈	1				1	
C ₉ ~C ₁₂	1				1	
C ₁₃ ~C ₁₆	1				0.5	0.5
C ₁₇ ~C ₂₅	1				0.5	0.5
C ₂₅ +						1
H ₂						
H ₂ S						
最终状态气体——在自燃温度 (AIT) 以上的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
C ₁ ~C ₂	0.7				0.7	
C ₃ ~C ₄	0.7				0.7	
C ₅	0.7				0.7	
C ₆ ~C ₈	0.7				0.7	
C ₉ ~C ₁₂	0.7				0.7	
C ₁₃ ~C ₁₆						
C ₁₇ ~C ₂₅						
C ₂₅ +						
H ₂	0.9				0.9	
H ₂ S	0.9				0.9	
^a 应在至少高于 AIT 26.67°C (80°F) 下处理。						
注：空白区表示不适用的结果。						

RBI 使用两级影响判据来确定影响区的大小：设备损伤和人员死亡。

设备损伤标准：

- 1) 爆炸超压——34.475kPa (5psig)。
- 2) 热辐射——12000Btu/ (h·ft²) (喷射火和池火)。
- 3) 闪燃——云团点燃时，云团可燃性下限内 25% 的区域。

人员死亡标准：

- 1) 爆炸超压——34.475kPa (5psig)。
- 2) 热辐射——4000Btu/ (h·ft²) (喷射火、火球和池火)。

表 16 特定事件概率——可能自燃的瞬时泄放^a

最终状态液体——在自燃温度（AIT）以上的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
C ₁ ~C ₂	0.7		0.7			
C ₃ ~C ₄	0.7		0.7			
C ₅	0.7		0.7			
C ₆ ~C ₈	0.7		0.7			
C ₉ ~C ₁₂	0.7		0.7			
C ₁₃ ~C ₁₆						
C ₁₇ ~C ₂₅						
C ₂₅₊						
H ₂	0.9		0.9			
H ₂ S	0.9		0.9			
最终状态气体——在自燃温度（AIT）以上的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
C ₁ ~C ₂	0.7		0.7			
C ₃ ~C ₄	0.7		0.7			
C ₅	0.7		0.7			
C ₆ ~C ₈	0.7		0.7			
C ₉ ~C ₁₂	0.7		0.7			
C ₁₃ ~C ₁₆						
C ₁₇ ~C ₂₅						
C ₂₅₊						
H ₂	0.9		0.9			
H ₂ S	0.9		0.9			
^a 应在至少高于 AIT 26.67℃（80°F）下处理						
注：空白区表示不适用的结果						

3) 闪燃——点燃时，云团可燃性下限范围内。

在危害分析筛选程序中运行一组典型物质，来确定所有潜在结果的后果区，然后将这些结果区与泄漏速率或泄放量的关系绘制成图。当按对数关系绘制时，后果曲线为直线，可用某个公式将后果与泄漏速率或泄放量联系起来。

结果公式见式（10）：

$$A_h = a \cdot x^b \quad \text{或} \quad A_h = a \cdot X^b \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

A_h ——后果区， ft^2 ；
 a, b ——与物质和后果相关的常数；
 x ——泄漏速率（持续泄漏）， lb/s ；
 X ——泄放量（瞬时泄放）， lb 。

可燃物质泄放的后果对泄放时间的关联并不是很强，因为在大气中扩散时，大部分流体都会在短时间内达到一个稳态面积或覆盖区。该通则的唯一例外是液体持续泄漏导致的池火。当可燃液体以持续方式泄放时，随池火所伴生的后果将取决于泄放时间和泄放的总质量。

对于池火来说，RBI 方法假设一个 $30.48\text{m}^2 \times 30.48\text{m}^2$ ($100\text{ft} \times 100\text{ft} = 10000\text{ft}^2$) 的堤坝，并估算这种面积的池火造成的可燃后果。

c) 步骤 3：组合后果区的计算。

可为四种泄放类型的每一种——最终相方案，推导出一个公式。该公式表示组合许多可能结果的某个单一后果区。按以下的两步法来确定组合后果区：

- 1) 将相关的事件树概率（取自表 17 或表 18）乘每一结果的后果区 [根据式 (10) 计算]。如果影响判据只使用了后果区的一部分（例如，对于设备损伤，闪燃只使用了可燃性下限范围内 25% 的面积），则要在概率公式中予以考虑。
- 2) 将步骤 1 所发现的后果概率的积相加。

表 17 特定事件概率——不可能自燃的持续泄漏^a

最终状态液体——在自燃温度 (AIT) 以上的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
$C_1 \sim C_2$						
$C_3 \sim C_4$	0.1					
C_5	0.1				0.02	0.08
$C_6 \sim C_8$	0.1				0.02	0.08
$C_9 \sim C_{12}$	0.05				0.01	0.04
$C_{13} \sim C_{16}$	0.05				0.01	0.04
$C_{17} \sim C_{25}$	0.02				0.005	0.015
C_{25}^+	0.02				0.005	0.015
H_2						
H_2S						
最终状态气体——在 AIT 以下的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
$C_1 \sim C_2$	0.2	0.04		0.06	0.1	
$C_3 \sim C_4$	0.1	0.03		0.02	0.05	
C_5	0.1	0.03		0.02	0.05	
$C_6 \sim C_8$	0.1	0.03		0.02	0.05	
$C_9 \sim C_{12}$	0.05	0.01		0.02	0.02	
$C_{13} \sim C_{16}$						
$C_{17} \sim C_{25}$						

表 17 (续)

最终状态气体——在 AIT 以下的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
C ₂₅ ⁺	0.02					
H ₂	0.9	0.4		0.4	0.1	
H ₂ S	0.9	0.4		0.4	0.2	
^a 过程温度小于自燃温度 26.67℃ (+80°F) 时不可能。						
注：空白区表示实际不可能的结果。						

表 18 特定事件概率——不可能自燃的瞬时泄放^a

最终状态液体——在自燃温度 (AIT) 以下的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
C ₁ ~C ₂						
C ₃ ~C ₄						
C ₅	0.1					0.1
C ₆ ~C ₈	0.1					0.1
C ₉ ~C ₁₂	0.05					0.05
C ₁₃ ~C ₁₆	0.05					0.05
C ₁₇ ~C ₂₅	0.02					0.02
C ₂₅ ⁻	0.02					0.02
H ₂						
H ₂ S						
最终状态气体——在自燃温度 (AIT) 以下的处理						
流 体	各种结果的概率					
	点燃	VCE	火球	闪燃	喷射火	池火
C ₁ ~C ₂	0.2	0.04	0.01	0.15		
C ₃ ~C ₄	0.1	0.02	0.01	0.07		
C ₅	0.1	0.02	0.01	0.07		
C ₆ ~C ₈	0.1	0.02	0.01	0.07		
C ₉ ~C ₁₂	0.04	0.01	0.005	0.025		
C ₁₃ ~C ₁₆						
C ₁₇ ~C ₂₅						
C ₂₅ ⁺						
H ₂	0.9	0.4	0.1	0.4		
H ₂ S	0.9	0.4	0.1	0.4		
^a 过程温度小于自燃温度 -73.3℃ (-80°F) 时不可能。						
注：空白区表示实际不可能的结果。						

归纳该过程结果的公式见式 (11)：

$$A_{\text{comb}} = P_1 \cdot A_1 + P_2 \cdot A_2 + \cdots + P_i \cdot A_i \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

式中：

A_{comb} ——组合后果区， ft^2 ；

P_1 ——特定事件概率，取自表 17 或表 18；

A_i ——单个结果后果区，来自式 (10)， ft^2 。

把组合所有潜在结果的后果公式的步骤运用于一组代表性流体。表 17 给出了持续泄漏的结果，表 18 给出了瞬时泄放的结果。

7.9.3.2 修正减缓系统的泄放量

表 19 中说明了根据探测、隔离和减缓系统来修正泄放特性值的情况。这些值基于工程判断，而该判断则是利用了定量风险分析中评价减缓措施的经验。关于评级过程的讨论，见 7.8.2。

7.9.3.3 假设和限制

RBI 后果模拟方法是对相对复杂问题进行大规模简化的一个方法。因为精简的程度，除了可能成为更深入分析的一部分的那些假定外，该过程中的大量假定都是隐含性的。本条着重强调与简化方法有关的那些重要假设中的少数几个假设，并不想进行深入讨论。

表 19 对减缓系统可燃后果的修正

反应系统等级		
探测	隔离	后果修正
A	A	将泄漏速率或泄放质量减少 25%
A	B	将泄漏速率或泄放质量减少 20%
A 或 B	C	将泄漏速率或泄放质量减少 10%
B	B	将泄漏速率或泄放质量减少 15%
C	C	无修正后果
减缓系统		后果修正
存量泄放，与 B 级或更高等级的隔离系统连接		将泄漏速率或泄放质量减少 25%
消防水喷淋系统和监视器		将后果区减少 20%
仅消防水监视器		将后果区减少 5%
泡沫喷射系统		将后果区减少 15%

- 后果区不反映发生损伤位置。喷射火和池火趋向对位于泄放点周围的局部区域造成损坏，但蒸气云爆炸和闪燃可能会导致远离泄放点区域的损伤。
- 固定气象条件和泄放方向组的使用极大地简化了详细后果计算，因为这些因素对结果具有重大的影响。
- 标准化后果结果和点燃概率事件树的使用是对 RBI 方法的一种限制。这些因素具有很强的现场针对性，并且使用者需要认识到，选择这些因素是为了反映石油化工工业的代表性条件。

7.9.4 毒性后果

有毒流体与可燃物质相似的是，并非所有毒性泄放都会导致单一影响。在它们当中，氟化氢 (HF)、氨和氯仅会造成毒性危害。另外，有些毒性物质，如硫化氢 (H_2S)，则既有毒又可燃。任何毒性物质与碳氢化合物混合时都会造成可燃危害和毒性危害。允许对这些可能性中的每种可能性进

行 RBI。

RBI 评价与四种毒性物质有关的风险。这些毒性物质 [氟化氢 (HF)、硫化氢 (H₂S)、氨 (NH₃) 和氯 (Cl)] 一般会对炼油厂造成毒性风险。同样的方法也可用来评价其他毒性物质。

7.9.4.1 情景的建立

情景选择遵循 7.3 所述方法, 采用 6.35mm (1/4in), 25.4mm (1in), 101.6mm (4in) 和破裂孔径。泄放时间由分析人员确定并取决于与泄放相关的环境。按 7.5 所述计算泄漏速率 (液体或蒸气)。

7.9.4.2 物质浓度阈值

作为一般原则, 当设备内物质的浓度处在或低于 IDLH (对生命或健康的紧急危险) 值时, 没有必要评价毒性泄放。氟化氢 (HF) 的浓度为 30g/m³ (ppm)、硫化氢 (H₂S) 的浓度为 300g/cm³ (ppm)、氨 (NH₃) 的浓度为 300g/m³ (ppm)、氯 (Cl) 的浓度为 30g/m³ (ppm)。

7.9.4.3 代表性流体

当泄放的物质不是纯毒性物质时, 应利用一种代表性流体来模拟泄漏速率。应根据混合物的平均沸点、密度和分子量来选择代表性流体。氟化氢是一种火焰抑制剂, 所以当氟化氢浓度超过 65mol% 时, 可燃后果可忽略不计。

7.9.4.4 泄漏速率/泄放量

7.9.4.4.1 在大部分情况下, 都以液态形式来储存、运输和加工氟化氢。但是, 向大气中泄放液态氟化氢所产生的毒性影响, 是由毒性蒸气云团的扩散所造成的。氟化氢液体泄放时发生的闪蒸或储液池蒸发可以生成毒性蒸气云团。进行 RBI 时, 氟化氢的初始状态被假定为液态; 计算氟化氢液体泄放毒性影响区的模型要考虑闪蒸和储液池蒸发的可能性。对于氟化氢泄放, RBI 采用以下准则:

- a) 如果泄放物质含有氟化氢, 作为混合物的一个组分, 即得到氟化氢质量分数; 并且
- b) 只能把氟化氢组分的液体比例 (或质量) 用于计算毒性影响区。

7.9.4.4.2 由于硫化氢的沸点较低, 在工艺过程中, 通常为气态, 或在高压工艺条件下, 一旦泄漏就会快速闪蒸。在这两种情况下, H₂S 向大气的泄放都会导致毒性蒸气云团的快速形成。对于硫化氢泄放情况, RBI 采用以下准则:

- a) 当泄放物质含有硫化氢, 作为混合物的一个组分时, 即得到硫化氢的质量分数。
- b) 当物质的初始状态为蒸气时, 硫化氢的质量分数只用来得出硫化氢的蒸气泄漏速率 (或泄放质量); 该泄漏速率 (或泄放质量) 用来确定影响区; 或
- c) 当物质的初始状态为液体时, 硫化氢的质量分数只用来得出硫化氢的蒸气闪蒸率 (或泄放质量)。该闪蒸率 (或泄放质量) 用来确定影响区。

7.9.4.4.3 对于持续泄漏, 泄漏速率应按 7.5 所述计算。RBI 采用一个简化方法来模拟混合物的泄放。当某一泄放物质为混合物时, 最终毒性物质泄漏速率应通过毒性组分的质量分数乘以以前计算的泄漏速率来计算。例如, 当泄放的物质为含 H₂S 1% (质量分数) 粗柴油时, 则该物质的蒸气即具有潜在毒性和可燃结果, 而其液体具有潜在可燃结果。因此, 采用 C₁₇ 用做代表性流体时, 应执行以下步骤:

- a) 按 7.5 所述来计算 C₁₇ 的液体泄漏速率。
- b) 估算可燃后果时, 按 7.9.3 所述计算潜在可燃后果区, 并取以下两种情况中的最坏情况:
 - 1) 采用 100% 泄漏速率计算 C₁₇ 的火灾影响。
 - 2) 基于 1% 泄漏速率计算硫化氢的火灾影响。
- c) 采用 1% 的泄漏速率来计算硫化氢的毒性影响。

对于瞬时泄放, 采用上述步骤, 用存量取代泄漏速率。

7.9.4.5 泄放持续时间

7.9.4.5.1 进行 RBI 时, 潜在毒性后果是根据泄放时间和泄漏速率来估算, 而 RBI 的火灾影响则只

取决于泄漏速率。泄放时间根据以下因素而定：

- a) 设备和相连系统中的存量。
- b) 探测和隔离时间。
- c) 可能采取的任何反应措施。

7.9.4.5.2 进行 RBI 时，由于以下两个原因，最大泄放时间假设成 1h。

- a) 预计工厂的应急反应人员将采取停机程序和启动组合式减缓措施来减少泄放时间。
- b) 估算氟化氢毒性影响时，所采用的数据来自持续时间为 5min~60min 动物试验。

7.9.4.5.3 如 7.8 所解释，泄放时间估算是用系统存量除以初始泄漏速率。当计算时间可能超过 1h，可能配备一个会大大缩短这一时间的系统，如截断阀和快动式检漏系统。时间应按逐个案例来确定。有效泄放时间应为以下项的最小值：

- a) 1h。
- b) 存量除以泄漏速率。
- c) 表 10 所列值（基于探测和隔离系统等级的泄放时间），加上隔离区清除泄放的存量所需的时间。

7.9.4.6 毒性影响准则

毒性影响准则是两个分量的函数：暴露时间和浓度。这两个分量组合起来形成一种被称为毒性剂量的暴露。

在 RBI 中，毒性泄放造成的伤害程度与毒性剂量直接相关。RBI 通过使用概率单位将剂量与损伤联系起来。对于毒性蒸气暴露，概率单位可用式 (12) 来表示：

$$Pr = Y + B \cdot \ln(C^N \cdot t) \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

Pr ——对承受一定伤害程度的人口百分比的一种度量；

C ——浓度， g/m^3 (ppm)；

t ——暴露时间，min；

Y, B, N ——用来形成概率公式的数学常量，每种有毒流体都有其自己的 A, B, N 。

RBI 采用一个固定的死亡可能性（50%的死亡可能性）来确定毒性影响。该级别对应 5.0 概率值。

7.9.5 后果估算

一种后果分析工具被用于一系列的泄漏速率和时间，以获得毒性后果区曲线图。评价了瞬时（少于 3min），5min（300s），10min（600s），20min（1200s），40min（2400s）和 1h（3600s）的泄放持续时间，以获得各种泄漏速率所导致的毒性后果区。

7.9.5.1 后果区

理论性持续泄漏的蒸气云团覆盖区近似为椭圆，如图 10 所示。因此，稍保守地将云团覆盖区假定为一椭圆形，并采用椭圆面积公式来计算，见式 (13)：

$$area = \pi a \cdot b \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：

$area$ ——云团面积， ft^2 ；

a ——1/2 云团宽度（短轴），在其最大点截取（在致死剂量水平的 50%可能性内），ft；

b ——1/2 顺风扩散距离（长轴），在致死剂量水平的 50%概率处截取，ft；

$\pi \approx 3.14159$ 。

图 11 和图 12 给出了毒性物质持续泄漏的后果区。

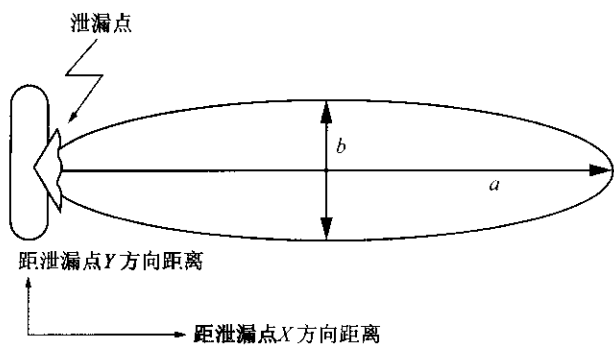


图 10 持续泄漏的毒性烟雾俯视图

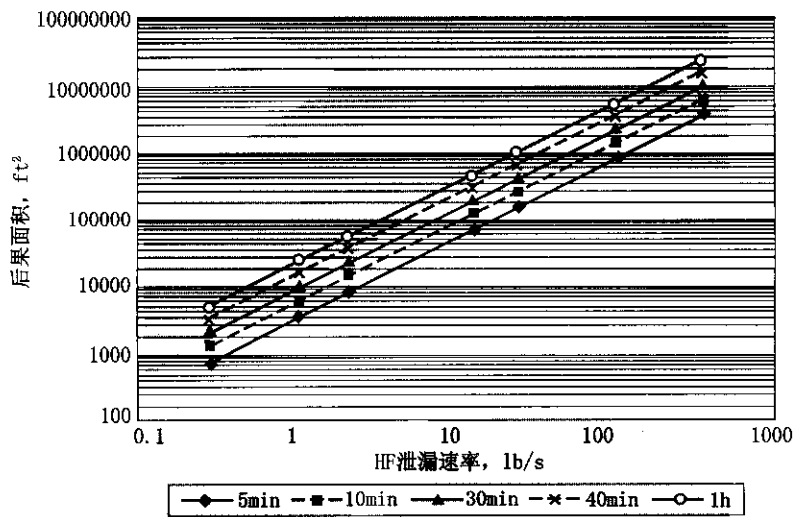


图 11 HF 持续泄漏后果区

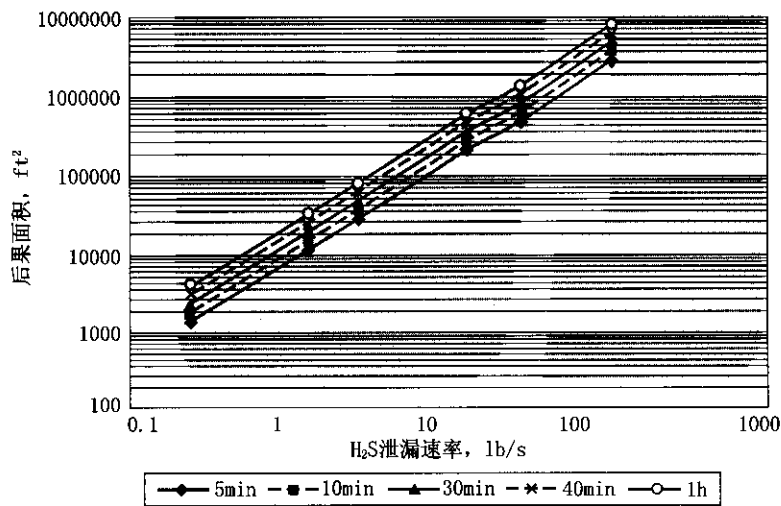


图 12 H₂S 持续泄漏后果区

对于瞬时泄放，图 13 给出了云团随时间变化的扩散。稍保守地将云团覆盖面积假定为椭圆形，只是距离泄漏点 X 方向的距离为扩散结果所确定的最大云团宽度的 1/2。图 14 给出了毒物瞬时泄放后果区曲线，它是泄放量的函数。

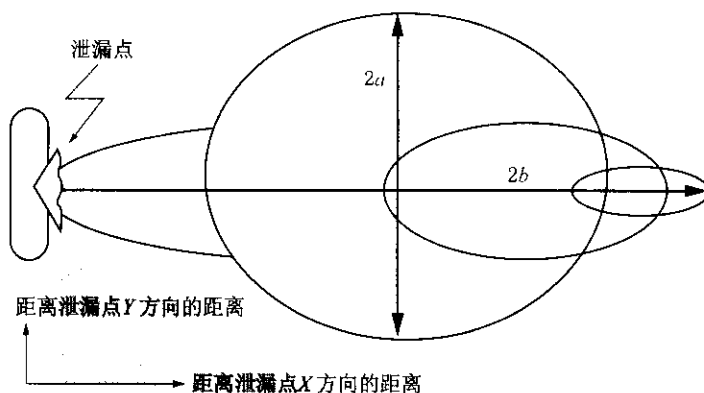
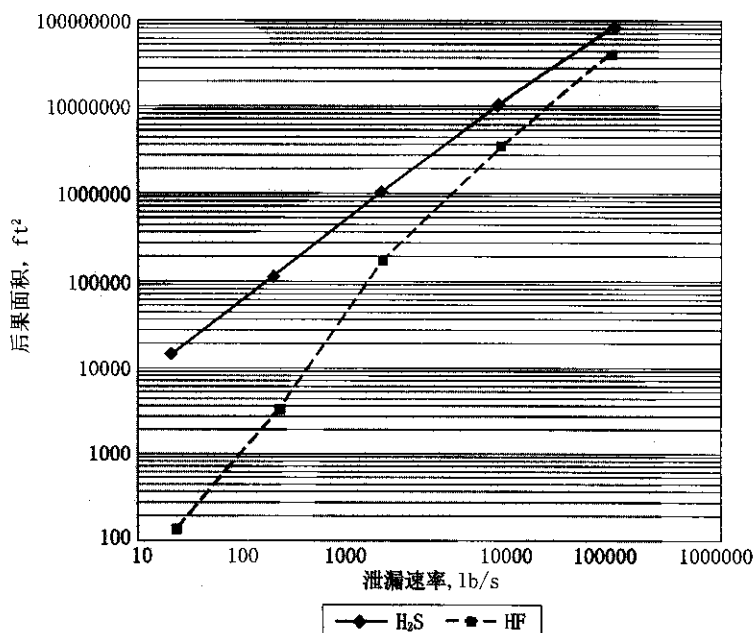


图 13 瞬间泄放毒性烟雾俯视图

图 14 HF 和 H₂S 瞬间泄放后果区

7.9.5.2 各种结果的概率

在泄放可能既涉及毒性，又涉及可燃性结果的情况下，假定可燃结果消耗毒性物质，或者毒性物质被扩散并且可燃物质具有不显著的后果。在这种情况下，毒性事件的概率是该事件保持的不点火频率（即“安全扩散”概率，如 6.2.2.1 所述。）。

7.9.5.3 毒性泄放组合后果的计算

毒性后果结果可以采用 7.9.3 所示的方法或式 (11) 来平均。如同可燃结果那样，单独的毒性事件后果区乘以其对应的事件概率。结果是代表该设备所有可能结果平均值的单独后果区。每个设备都要完成这个步骤。

7.9.5.4 氨/氯模拟

使用环境温度 [23.89°C (75°F)] 下的饱和液体，液体从罐中泄放。罐压头设为 10ft。

为了确定氨和氯持续泄漏影响区域的公式，对四种情况 6.35mm (0.25in)，25.4mm (1in)，101.6mm (4in) 和 406.4mm (16in) 分别运行不同泄放时间 (10min, 30min 和 60min)。图 15 和图 16 给出了概率单位等于 5 时，泄放与后果区的关系曲线。

泄漏速率和后果区之间的关系见式 (14)：

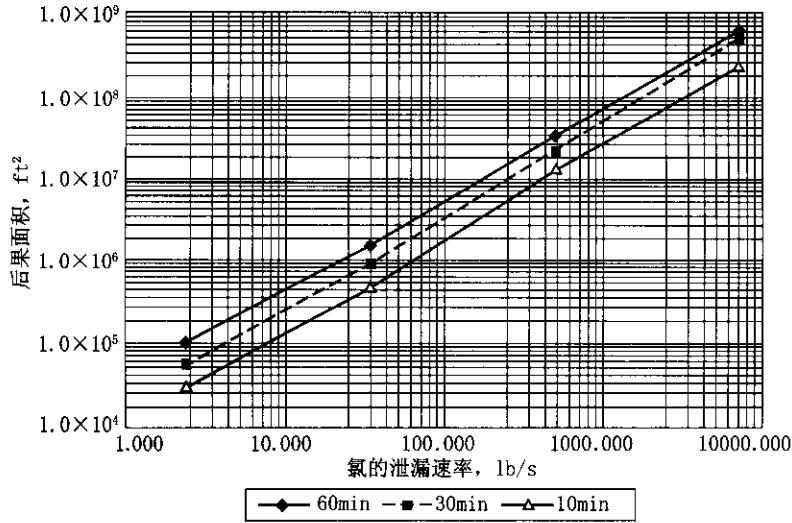


图 15 氯的持续泄漏

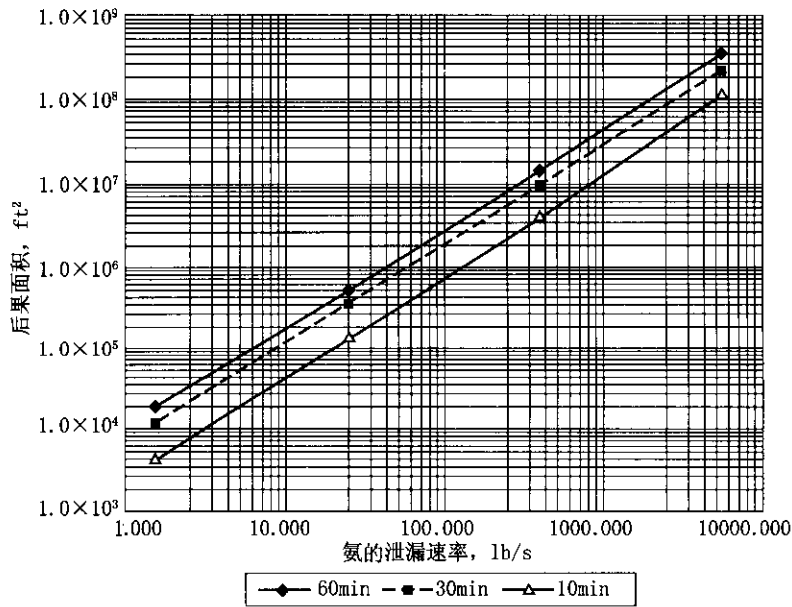


图 16 氨的持续泄漏

$$A_h = c \cdot X^b \dots\dots\dots (14)$$

式中：
 A_h ——后果区，ft²；
 X ——泄放量，lb。
表 20 中列出了不同情况下的常数（ c 和 b ）。
对于瞬时泄放情况，模拟了四种氨和氯的四种质量（10lb，100lb，1000lb 和 10000lb），发现概率值等于 5 时，存量质量和后果区域的关系为：

对于氯：
$$A_h = 14.97X^{1.177} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

A_h ——后果区, ft^2 ;

X ——泄放量, lb 。

对于氨:

$$A_h = 14.17 X^{0.9011}$$

..... (16)

式中:

A_h ——后果区, ft^2 ;

X ——泄放量, lb 。

表 20 氯和氨持续泄漏时间

化学品	泄放时间 min	c	b
氯	60	46563	1.01
	30	27711	1.10
	10	15147	1.10
氨	60	11049	1.16
	30	7852	1.16
	10	2690	1.19

图 17 和图 18 给出了瞬时泄漏速率与后果区之间的关系曲线。

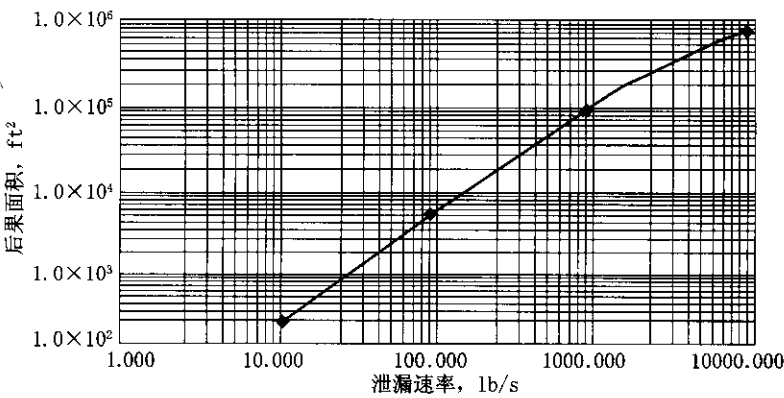


图 17 氯的瞬间泄放

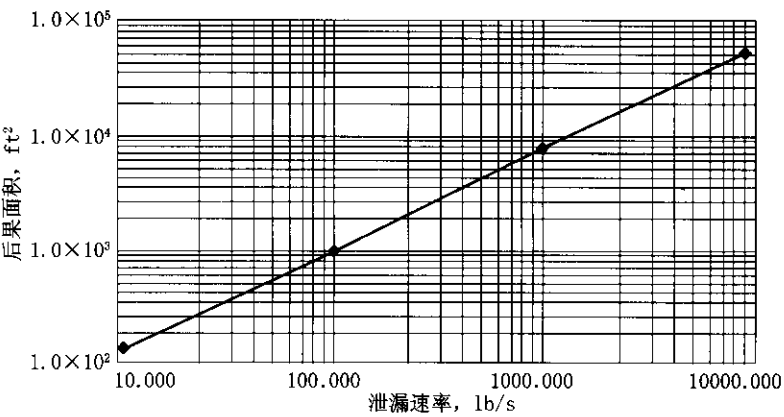


图 18 氨的瞬间泄放

7.9.6 蒸气泄放后果

蒸气对暴露于高温下的人们构成一种危害。一般情况下，在一个设备出现一个开孔后，蒸气的即时温度为 100℃ (212°F)。在几英尺范围内，根据其压力，蒸气将开始和空气混合、变冷并冷凝。在大约 20% 的浓度下，蒸气/空气的混合物冷却到大约 60℃ (140°F)。本条所采用方法是，假设只在高于 60℃ (140°F) 时发生伤害。选择 60℃ (140°F) 为人员伤害阈值，因为高于该温度时，OSHA 就要求对热表面做保温处理，以防止人员被烫伤。

为了确定蒸气持续泄漏影响区公式，针对不同蒸气压力分别运行四种泄放情况：6.35mm (0.25in)，25.4mm (1in)，101.6mm (4in) 和 406.4 (16in)。泄漏速率与 20% 蒸气浓度覆盖区域之间的关系曲线显示为线性关系，见式 (17)：

$$A_h = 0.6x \dots\dots\dots (17)$$

式中：
A_h——后果区，ft²；
x——泄漏速率，lb/s。

对于瞬时泄放事件，模拟了四种蒸气质量流量，分别为 4.54kg (10lb)，45.4 (100lb)，454kg (1000lb)，4540kg (10000lb)，质量存量与 20% 浓度之间的关系见式 (18)：

$$A_h = 63.317X^{0.6384} \dots\dots\dots (18)$$

式中：
A_h——后果区，ft²；
X——泄放量，lb。

7.9.7 酸性/碱性物料泄放后果

对于只有斑点状后果的碱性/酸性腐蚀，选择水作为代表性流体来确定人员影响区。确定的这个区域是液体喷洒或雨水飞溅所能覆盖的 180° 半圆形区域。在 4 种压力分别为 103.425kPa (15psig)，206.85kPa (30psig)，310.275kPa (45psig)，413.7kPa (60psig) 下，对 4 个孔径 [6.35mm (0.25in)，25.4mm (1in)，101.6mm (4in)，406.4 (16in)] 进行模拟。只模拟了持续泄漏，因为瞬时泄放不产生雨水冲刷。分析了结果后，获得泄漏速率和影响区之间的关系。从图 10 得到了最终公式。最终公式如表 21 所示。

表 21 API-RBI 碱性/酸性公式

压力范围 kPa (lb/in ²)	公式
低压 0~137.9 (0~20)	$y = 2699.5x^{0.2024}$
中压 144.795~275.8 (21~40)	$y = 3366.2x^{0.2878}$
高压 >275.8 (>40)	$y = 6690x^{0.2469}$

如图 19 所示，每一压力都可以用唯一的关系来描述，见式 (19)：

$$y = b \cdot x^c \dots\dots\dots (19)$$

式中：
y——人员影响区，ft²；
x——泄漏速率，lb/s；
b 和 c——压力的常数。

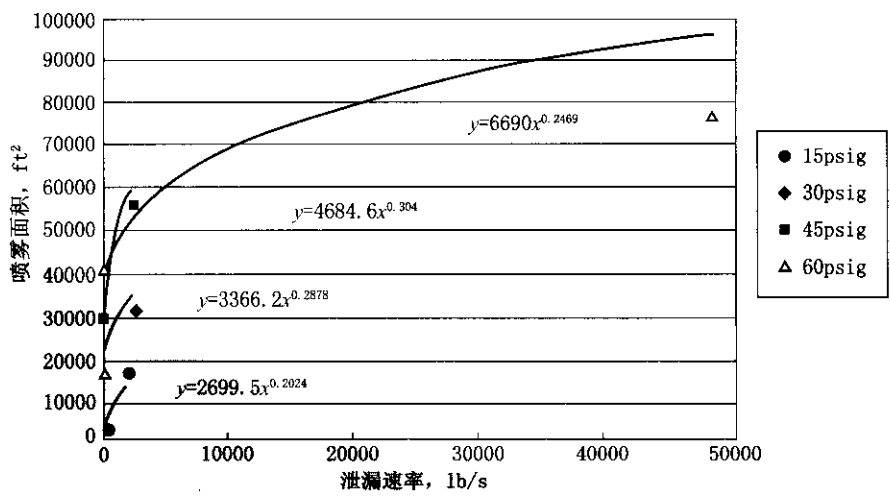


图 19 酸/碱模拟结果

310. 275kPa (45psig) 和 413. 7kPa (60psig) 趋势线相互非常靠近。因此，将这些压力归入一个大范围 [$>275.8\text{kPa}$ ($>40\text{lb/in}^2$)]。选择 413. 7kPa (60psig) 趋势线公式来表示该范围，因为它代表所有可能的泄漏速率。另外也为 103. 425kPa (15psig) 和 206. 85kPa (30psig) 情况选择范围。

选择的范围代表这些压力，在该压力下通常采用腐蚀性/酸性：

- a) 低压 103. 425kPa (15lb/in²) ——一般为 0kPa~137. 9kPa (0lb/in²~20lb/in²)。
- b) 中压 206. 85kPa (30lb/in²) ——一般为 144. 795kPa~275. 8kPa (21lb/in²~40lb/in²)。
- c) 高压 413. 7kPa (60lb/in²) ——一般为 $>275.8\text{ kPa}$ ($>40\text{lb/in}^2$)。

7.9.8 减缓措施的效果

关于这一点，在计算密闭容器内容物损失事件可能泄放的物质质量时，就已经考虑了隔离和探测能力。但是，现场可能配备了一些附加系统，比如水喷淋系统，一旦物质到达大气压力，这些系统就可能对减缓泄放发挥效力。

通过降低持续泄漏速率和泄放时间，或通过减少瞬时泄放的泄放量，就可以在 RBI 中简单地计算减缓系统的效果。

RBI 分析人员需要根据其特定的喷淋系统设计或被动减缓技术的有效性，来提出其自己的换算系数。

7.9.9 环境清理成本

环境后果表现为成本，所以应单独计算后果，并把该后果加到“生产中断”一章的其他成本中，同时把其作为经济风险的一部分。本标准方法允许严密计算，但也允许根据分析人员的意见进行简化和其他假设。表 22~表 26 是尽可能简化该方法的一种尝试。

表 22 环境清理成本投入

输入变量	输入来源	单位
考虑环境泄放?	用户输入	是/否
泄放到地面或水中?	用户输入	地面/水
来自每个损伤模块的损伤因子	损伤模块程序	无
代表性流体	用户输入	无
最终状态液体或气体	后果模块	无
瞬时或持续泄漏	后果模块	无

表 22 (续)

输入变量	输入来源	单位
后果模块	自燃可能或不可能	无
流体密度, 折算成 lb/gal	探测表	lb/gal
沸点	探测表	℃
泄放时间	根据本标准表 10 计算	min
每一孔径的泄漏速率	后果模块	lb/s
组存量	后果模块	lb
流体蒸发百分比	来自探测表	%
设备类型	用户输入	无
罐基础类型	用户根据表输入	无
底板泄放探测时间	探测表	无
同类失效频率	探测表	事件/年
新设备类型, 罐底板	加到设备表中	
探测方法	用户输入	
密封试验时间	用户输入	
堤防区封存破裂的百分比	用户输入	%, (缺省值 50%)
地下清理成本	探测表 (用户可更改)	美元/gal
地上清理成本	探测表 (用户可更改)	美元/gal
水清理成本	探测表 (用户可改变)	美元/gal

表 23 流体泄放性质

流体	分子量	密度 kg/m ³ (lb/ft ³)	沸点 ℃ (°F)	24h 蒸发量百分比 %
H ₂	2	71.12 (4.433)	-257.8 (-432)	100
C ₁ ~C ₂	23	250.89 (15.639)	-125 (-193)	100
H ₂ S	34	994.52 (61.993)	-59.4 (-75)	100
C ₃ ~C ₅	58	580.88 (36.209)	-0.56 (31)	100
HF	20	968.48 (60.37)	20 (68)	100
C ₆ ~C ₈	100	685.04 (42.702)	98.9 (210)	90

表 23 (续)

流体	分子量	密度 kg/m ³ (lb/ft ³)	沸点 °C (°F)	24h 蒸发量百分比 %
C ₉ ~C ₁₂	149	735.11 (45.823)	184.4 (364)	50
C ₁₃ ~C ₁₆	205	765.67 (47.728)	261.1 (502)	10
C ₁₇ ~C ₂₅	280	776.18 (48.383)	343.9 (651)	5
C ₂₅ +	422	901.37 (56.187)	527.2 (981)	2

表 24 环境清理成本输出

名称	主要/次要	单位
每个孔径的泄放量	次要	gal
每个孔径的环境泄放量	次要	gal
每个孔径的清理成本	次要	美元
总清理成本	次要	美元
每个孔径的清理风险	次要	美元/年
总清理风险	主要	美元/年

7.9.9.1 罐底以外设备的环境清理成本方法

用户可以选择是否把环境成本后果包括在风险公式中。默认应是“否”(不计算)。大多数工艺设备都位于专门铺设的有排水系统的区域,以便未蒸发掉或未燃烧掉的所有液体都进入特殊的溢出和废物处理设施。这些设施是为了避免造成环境后果而特别设计的。一种选择是允许预计可能从堤坝溢出的所有流体进入这些设施。

如果用户想要考虑环境影响,他们可以选择是溢出到地面上还是进入水中。这对在水路中设置储存和处理设施的站场非常重要。

首先确定最终状态是否是气体。若是气体,则退出模块。然后确定是否可能自燃。若可能,也要退出模块(液体可能点燃并燃烧)。

只有在“液体最终状态、不可能自燃”时才能计算。如果标准沸点低于 93.33°C (200°F),则退出模块(见 7.2,更轻质的沸腾液体将蒸发)。

查看泄放是瞬时的泄放还是持续的泄漏。瞬时性泄放采用整个组存量。对于持续泄漏,根据表 10 来计算泄放时间。检查泄放时间是否不受每一孔径流速的限制。采用最小时间值。利用时间、流动速率和流体密度来计算所泄放液体的加仑(gal)数,表 23 给出了本标准的代表性流体的物理性质。从该值中减去预计蒸发量的百分比(即在 24h 内),如表 23 所示。

根据向地面或水下泄放的情况,用剩余的流体量乘以流体清理成本。用孔径频率乘这个值再乘组合技术模块次因子。将所有最终结果相加,得到环境成本风险(美元/年)。环境成本风险乘以有可能发生的结果获得每年的环境风险投资,把其乘以 0.9 来计算点燃和不会导致环境污染的泄放量。

7.9.9.2 罐底环境清理成本方法

如果设备类型为—罐底，仅考虑 6.35mm (1/4in) 和 25.4mm (1in) 的孔径。由于缺乏更好的数据，可能使用储罐的同类失效频率（这些无疑包括一些罐底泄放）。

用户规定基础类型和检漏类型（见表 25 和表 26）。注意，对于密封性试验（通常不做；包括清洗、充水并保持一段时间），应规定试验之间的时间间隔（如一年）。

使用基于基础和试验时间的流量或检漏方法的阈值来确定泄放量，见表 26 所示。将泄放量乘以地下泄放清理成本。将同类频率和组合技术模块次因子相乘。这将形成地下泄放风险。

表 25 RBI 分析用储罐地下泄漏速率

基础类型	泄漏速率 m ³ /d (gal/d)	
	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)
粘土	0.00014725 (0.038)	0.00058125 (0.15)
泥沙	0.02034375 (5.25)	0.093 (24)
沙土	0.0251875 (6.5)	0.112375 (29)
砂砾	0.16275 (42)	0.744 (192)

表 26 储罐底部泄放的探测时间

探测方法	探测时间，d 或阈值，gal
密闭试验	时间——试验间隔
存量监视	阈值——10%的储罐容积
U 型管	阈值——1.9375m ³ (500gal)
蒸气井	时间——一个月

7.10 经济风险评价

在 API Publ 581: 1995 中，可以把成本用做后果度量来计算风险。这被称为“生产中断”方法。这种方法的使用暴露了一些潜在的严重不足：

- 该方法只把影响区用做确定某一失效成本的依据。这导致具有零影响区（即不可燃、无毒泄放）的设备成本为零。
- 该方法只把生产中断当做某一失效相关成本的依据。

由于认识到处理厂有许多与设备失效相关的成本，所以在“Ⅲ级”方法中提出了这些问题。这些问题包括，但不限于以下：

- 设备维修和更换成本。
- 与设备维修和更换相关所引起的停机成本。
- 与某一失效相关的潜在伤害引起的成本。
- 环境清理成本。

修改的Ⅲ级方法根据设备特定基础和影响区基础，考虑了所有这些成本。因此，任何失效成本都与其有关，无论该失效是否会实际导致某一危险流体的泄放。认识并利用这个事实对与失效相关的风险具有更实际的价值。因为这些成本不仅仅只包括生产中断，所以Ⅲ级所采用的方法被称为“经济风险”法。

7.10.1 结论：基于影响区与基于费用的风险的比较

表 27 给出了与上述Ⅲ级方法类似的方法。它结合一个一般蒸馏装置实例来说明。要特别注意的是基于影响区的风险评级与基于经济风险的风险评级之比。在高风险项目中只存在很小的差别，只有一个很重要例外。P-31 项是一条输送无毒且不可燃流体的管子。根据影响区基础，后果是零，所以风险是零。只把后果区作为风险基础，该项的排级接近设备的最底部。当包括了设备的失效成本时，该设备自动跳到列表的上部。这主要归因于一个很高的技术模块子因数。管子遵从一种损伤机理，并建立在损伤速率和过去检测的技术模块输入基础上，因此管子具有极高的失效可能性。通过允许考虑失效成本，经济风险指出，必须考虑维修、更换、停机过程中的潜在失效。

表 27 典型蒸馏装置的风险对比

ID	设备类型	代表性 流体	流体 状态	风险 ft ² /年	风险 排序	风险 美元/年	风险 排序	后果区 ft ²	技术模块 次因子的 总和	损伤修 正整频率
P-30	管-6	C ₃ ~C ₅	液体	1092	1	5573859	1	1296	3205.1	8.42×10 ⁻¹
P-41	管->16	C ₁₇ ~C ₂₅	液体	193	2	936178	2	6487	170.6	2.97×10 ⁻²
P-42	管-10	C ₁₇ ~C ₂₅	液体	154	3	754536	3	5562	185.0	2.78×10 ⁻²
C-1	塔顶	C ₆ ~C ₈	蒸气	133	4	651147	4	1322	646.9	1.01×10 ⁻²
E-33	交换器-TS	C ₆ ~C ₈	液体	31	5	166135	5	1692	115.7	1.80×10 ⁻²
E-37	交换器-TS	C ₆ ~C ₈	液体	31	6	166135	6	1692	115.7	1.80×10 ⁻²
E-39	交换器-TS	C ₆ ~C ₈	液体	31	7	166135	7	16.92	115.7	1.80×10 ⁻²
E-52	交换器	C ₂₅ ⁺	液体	22	8	161306	8	203	683.3	1.07×10 ⁻¹
P-3	管-12	C ₂₅ ⁺	液体	16	9	126325	10	190	641.6	8.66×10 ⁻²
P-40	管-8	C ₉ ~C ₁₂	液体	19	10	100906	11	1713	80.7	1.13×10 ⁻²
P-1	管-12	C ₂₅ ⁺	液体	8	14	75669	12	93	653.6	8.22×10 ⁻²
D-4	汽包	C ₆ ~C ₈	液体	12	12	69461	13	711	110.2	1.72×10 ⁻²
D-10	汽包	C ₃ ~C ₅	液体	9	13	44980	14	1493	37.7	5.88×10 ⁻³
P-11	管-12	C ₁₃ ~C ₁₆	液体	8	15	41432	15	1086	51.5	6.95×10 ⁻³
P-31	管-1	混合物	液体	0	200	40907	16	0	3846.2	9.72×10 ⁻¹
P-23	管->16	C ₉ ~C ₁₂	液体	6	16	34437	17	1539	23.9	4.16×10 ⁻³
E-100	交换器	C ₂₅ ⁻	液体	5	17	24630	18	6194	5.2	8.16×10 ⁻⁴
E-54	交换器	C ₂₅ ⁻	液体	3	21	24254	19	203	102.7	1.60×10 ⁻²
P-8	管-8	C ₁₃ ~C ₁₆	液体	4	18	22944	20	1610	18.9	2.73×10 ⁻³
E-42	交换器	C ₂₅ ⁻	液体	3	22	22895	21	198	98.6	1.54×10 ⁻²

7.10.2 经济风险法

对于经济风险分析，本标准中提出的基本风险分析方法没有改变。该风险的计算仍然是失效后果

(现在表示为成本, 美元) 乘失效可能性。对于严格而灵活的分析, 按孔径大小来评价其后果 (成本)。还可以通过使用与每个孔径相关的失效可能性, 按孔径大小来评价其风险。计算的总体风险是每个孔径的风险之和。

7.10.2.1 设备损伤成本——本设备

API Publ 581: 1995 中的“生产中断”方法的最严重问题是没有直接考虑被评价设备的成本。因而零影响区的失效导致了零风险, 这是不正确的。因为一条蒸汽管的失效肯定会对成本造成影响, 即便它不会导致像碳氢化合物管道那样的大面积损伤区。

解决的办法是估算设备失效本身的成本, 而与其是否有影响区无关。然后, 可以加上任何其他成本。对该方法的试验已经使不可燃管道从接近底部风险级向接近顶部风险级移动, 尤其是当它具有一个较高的、某些损伤机理所导致的失效可能性时。因此, 基于风险的检验 (RBI) 将适当地考虑这类管子, 认为它们是具有较高优先级的候检管道。

采用一种复合经济法——组合所有可能泄放情景 (孔径), 和采用与每个孔径相关并对每个设备都是独一无二的特定成本, 来对该方法进行验证。后一种方法的选择基于小孔成本比大孔成本之间固有的差值。在正常停机维护期间, 在可以计划永久性修复时间表之前, 有时可以使用临时夹具对管道系统上的一个小孔进行修补, 而这个孔对生产几乎没有任何影响。较大的孔通常不允许这样做, 并且停机成本加修理成本也会大幅度增加。

表 28 给出了建议在本标准所含设备的设备损伤成本。如果有实际的设备损伤值, 应采用设备实际失效成本数据 (如果有这些数据)。

表 28 设备损伤成本

设备类型	品名	失效成本, 美元			
		小 ^a	中 ^a	大 ^a	破裂 ^a
泵 1	单密封离心泵	1000	2500	5000	5000
泵 2	双密封离心泵	1000	2500	5000	5000
塔 BTM	塔	10000	25000	50000	100000
塔顶	塔	10000	25000	50000	100000
压缩机 C	离心式压缩机	10000	20000	100000	300000
压缩机 R	往复式压缩机	5000	10000	50000	100000
过滤器	过滤器	1000	2000	4000	10000
翅片式换热器	翅片式换热器	1000	2000	20000	40000
交换器	换热器 (壳体)	1000	2000	20000	60000
管 - 0.75	直径 0.75in 管/ft	5	0	0	10
管 - 1	直径 1in 管/ft	5	0	0	20
管 - 2	直径 2in 管/ft	5	0	0	40
管 - 4	直径 4in 管/ft	5	10	0	60
管 - 6	直径 6in 管/ft	5	20	0	120
管 - 8	直径 8in 管/ft	5	30	60	180
管 - 10	直径 10in 管/ft	5	40	80	240
管 - 12	直径 12in 管/ft	5	60	120	360
管 - 16	直径 16in 管/ft	5	80	160	500

表 28 (续)

设备类型	品名	失效成本, 美元			
		小 ^a	中 ^a	大 ^a	破裂 ^a
管 - >16	直径大于 16in 管/ft	10	120	240	700
罐	压力容器	5000	12000	20000	40000
反应器	反应器	10000	24000	40000	80000
泵 R	往复泵	1000	2500	5000	10000
储罐	常压储罐	40000	40000	40000	80000
加热器	直接受火加热炉炉管	1000	10000	30000	60000

^a 资料来源:

(1) Yamartino, J., 防腐管道的安装费——1978 年, 化学工程, 1978 年 11 月 30 日。

(2) Peter M. S., Timmerhaus, K. D., 化学工程师的站场设计和经济学, McGraw-Hill, 1968 年。

注意: 管道成本估算按每英尺计算。引用的数据源用来估算设备安装成本。由于设备的修理和更换通常不涉及所有支撑、基础等的更换, 所以给出的修理和更换成本不反映实际安装成本。

表 28 所示的设备损坏成本估算基于碳钢价格。对于Ⅲ级方法, 建议用这些成本乘以其材质的成本因子。表 29 给出了这些成本因子的建议值。这些因子基于制造厂商的数据和成本报价。

表 29 设备材质成本因子

材 质	成本因子	材 质	成本因子
碳钢	1.0	包覆合金 600	7.0
1¼Cr½Mo	1.3	碳钢, 特富隆衬里	7.8
2¼Cr½Mo	1.7	包覆镍	8.0
5Cr½Mo	1.7	合金 800	8.4
7Cr½Mo	2.0	70/30 Cu/Ni	8.5
复合 304SS	2.1	904L	8.8
9Cr½Mo	2.6	合金 20	11
405SS	2.8	合金 400	15
410SS	2.8	合金 600	15
304SS	3.2	镍	18
包覆 316SS	3.3	合金 625	26
碳钢, 萨兰树脂衬里	3.4	钛	28
碳钢, 橡胶衬里	4.4	合金 C	29
316SS	4.8	锆	34
碳钢, 玻璃衬里	5.8	合金 B	36
包覆合金 400	6.4	钼	535
90/10Cu/Ni	6.8		

7.10.2.2 设备损伤成本——其他受影响设备

如本标准所述,当失效导致一可燃事件时,仍然有必要计算失效发生地附近的其他设备的设备损伤成本。对于Ⅲ级方法,将每平方英尺设备成本的生产装置常数值作为该装置所有设备的缺省值。换言之,是作为任一给定设备周围的其他设备的平均成本大致相同情况下的一个起始点。单独设备的这个值可以更精确些,方法是当有一个更高或更低缺省值时(适当时),可以忽略该缺省值。例如试验性研究所采用的设备平均成本为550美元/ft²。用该值乘以影响区,即得到失效所损坏的其他设备的成本。

7.10.2.3 生产中断成本——按具体项目

API Publ 581:1995中“生产中断”方法的另一个缺点是,与单独设备失效相关的停工时间也是根据受影响区建立的。因此,没有考虑失效本身所造成的停工时间,并且当失效影响区为零时,与其相关的成本也同样为零。

纠正这个缺点的方法与纠正不考虑设备损伤和修补缺点的方法相同。对于每一孔径,表30给出了估算的每一设备的停工时间。

如果有在线的联网离心泵备件,就不会有与这类设备失效相关的停工时间。

表 30 估算的设备停工时间

设备类型	描述	停工时间, d			
		小	中	大	破裂
泵 1	单密封离心泵	0	0	0	0
泵 2	双密封离心泵	0	0	0	0
塔 BTM	塔	2	4	5	21
塔顶	塔	2	4	5	21
压缩机 C	离心式压缩机	2	3	7	14
压缩机 R	往复式压缩机	2	3	7	14
过滤器	过滤器	0	1	1	1
翅片式换热器	翅片式换热器	1	1	3	5
交换器	换热器(壳体)	1	1	3	5
管-0.75	直径 0.75 管/ft	0	0	0	1
管-1	直径 1 管/ft	0	0	0	1
管-2	直径 2 管/ft	0	0	0	2
管-4	直径 4 管/ft	0	1	0	2
管-6	直径 6 管/ft	0	1	2	3
管-8	直径 8 管/ft	0	2	3	3
管-10	直径 10 管/ft	0	2	3	4
管-12	直径 12 管/ft	0	3	4	4
管-16	直径 16 管/ft	0	3	4	5
管->16	直径大于 16 管/ft	1	4	5	7
罐	压力容器	2	3	3	7
反应器	反应器	4	6	6	14
泵 R	往复泵	0	0	0	0
储罐	常压储罐	0	0	0	7
加热器	直接受火加热炉炉管	1	2	4	5

7.10.2.4 生产中断成本——其他受影响设备

如果失效没有影响区，则应考虑更换和维修其他受影响设备所需停工时间的成本。Ⅲ级方法仍然采用与其他设备损伤总成本相关的停工时间。图 20 给出了该方法。

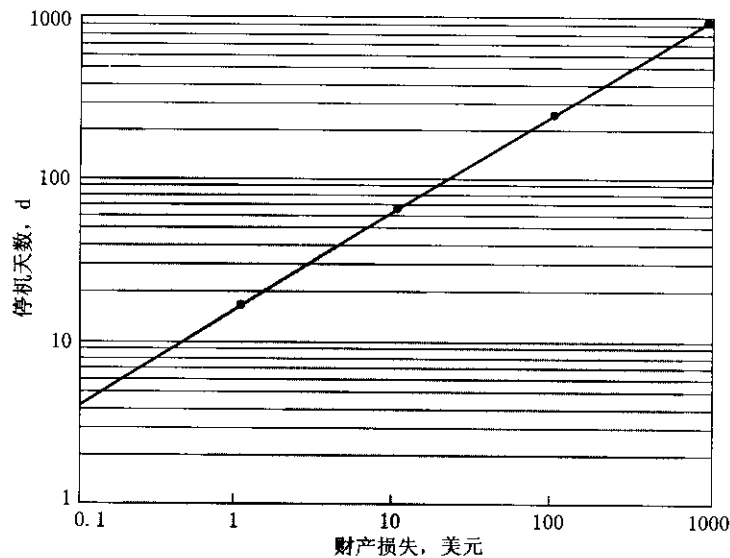


图 20 生产中断成本

7.10.2.5 潜在伤害成本

当发生失效时要考虑的另一个成本是潜在伤害成本。当企业把该成本计入风险管理方案时，就应花费合适的资源来防止这类伤害的发生。就像不考虑零影响区事件的运行成本就可能导致低估该事件的风险等级一样，如果未考虑伤害成本，就可能出现分配检测资源时没有考虑到的风险。

Ⅲ级方法所采用的方法是，将生产装置的人口密度常数作为该装置所有设备的缺省值。根据特定设备所处的位置，如控制室、通道、道路等，可用一个更高或更低的值来修正该缺省值。除了人口密度外，还应输入受影响个人成本。这个值应足够高，以便足以代表运行造成某人员伤害（包括致命伤害）的一般成本。在以下例子中，人口密度设为 0.001075 人/m² (0.0001 人/ft²)，并且每人的伤害成本设为 10000000 美元。

8 可能性分析

8.1 可能性分析过程概述

对于基础方法中其他基于风险的检验方法，下面给出了一个建议的方法。越详细的分析可以产生越精确的结果。可能性分析始于工艺设备的同类失效频率数据库，然后通过两个因子来修正这些同类频率——设备修正因子 (F_E) 和管理系统评价因子 (F_M)，以得到一个修正后的失效频率 ($F_{修正}$)，见式 (20)：

$$F_{修正} = F_{同类} \cdot F_E \cdot F_M \quad \dots\dots\dots (20)$$

该计算在图 21 给出。

修正因子反映生产装置之间和生产装置内的设备之间可识别的差别。设备修正因子通过检查每一设备的具体细节及该设备的运行环境，确定区别于其他设备的设备修正因子。管理系统评价因子反映了修正设施管理系统对装置的机械完整性的影响。该修正同样适用于其他所有设备。如果被评价的管理系统随不同装置或装置区域的不同而发生改变，则应确认这些不同点，并应对管理系统评价因子做出相应的修正。

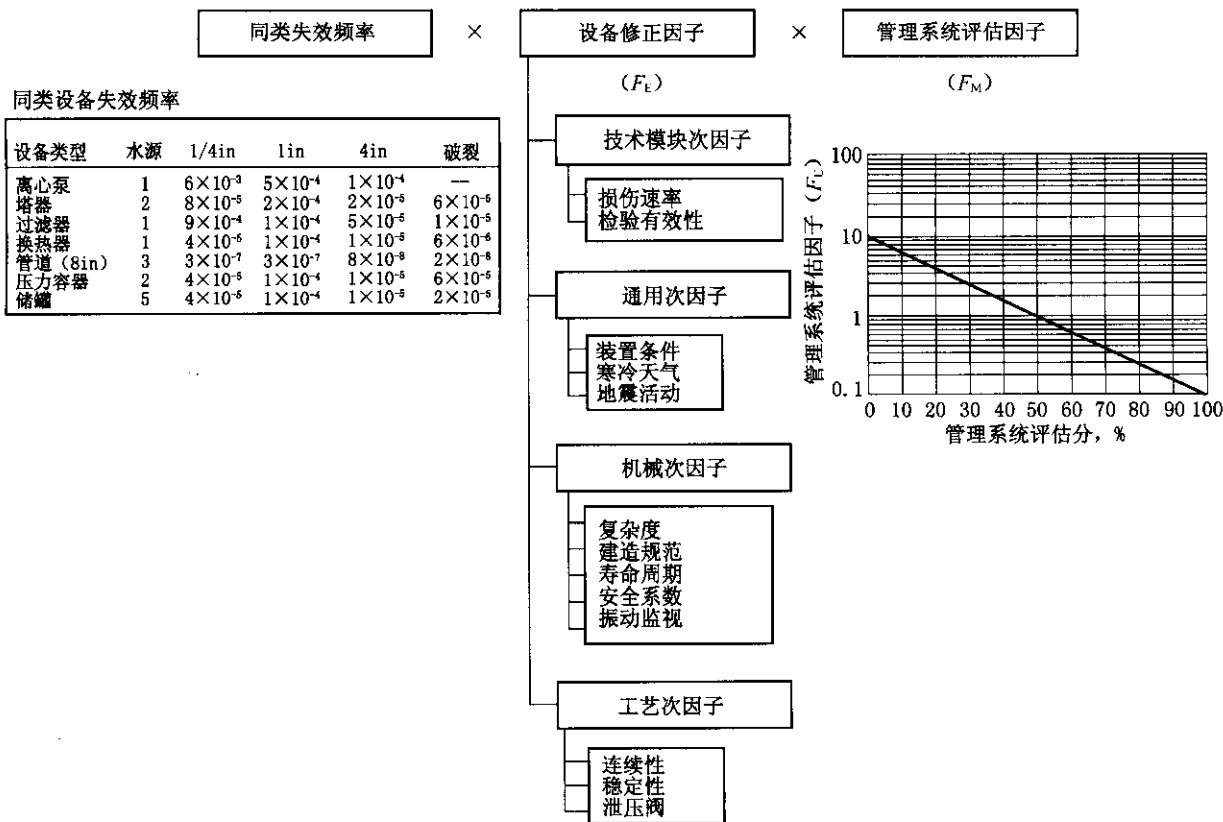


图 21 计算修正的失效频率

数值大于 1.0 的修正因子将增加修正的失效频率，数值小于 1.0 的修正因子将减少修正的失效频率。两个修正因子总是正数。

8.1.1 同类设备失效频率

同类设备失效频率数据库建立在现有设备失效历史记录汇编基础上，这些记录可以来自各种资料来源。已经根据这些数据编制了每类设备和每种管径的同类失效频率。8.2 和表 31 给出了一个详细的同类失效频率数据库。

8.1.2 设备修正因子

设备修正因子识别那些可能对设备失效频率有重要影响的特定条件。这些条件分为以下四个次因子：

- 检查建筑材料、环境及检验程序的技术模块。
- 影响装置内所有设备的通用条件。
- 不同设备的制造因素影响。
- 可能影响设备完整性的工艺因素影响。

设备修正因子将在 8.3 讨论。

8.1.3 管理系统评价因子

一个公司的工艺安全管理系统的有效性可能对机械完整性产生重要的影响，RBI 程序包括一个评价工厂管理系统组成部分的评价工具，此管理系统最直接影响到设备的失效频率。该评价包括与检验、维护、工艺和安全人员的一系列面谈。这些问题主要以 SY/T 6230，SY/T 6552 和 SY/T 6553 规定的指南为依据。

该评价对有效区别这些管理系统提供了充分、详细的依据。评价细节在 8.4 描述，评价分析计算表见附录 D。图 25 中给出了将评价得分转换成管理系统评价因子的关系曲线。

8.2 同类失效频率

如果一个给定设备具有足够多的数据，则可以根据实际观察到的失效情况来计算实际失效概率。即使一个设备没有发生过失效，根据经验得知，其实际失效概率大于 0，并且该设备运行达到失效仍需要足够长的时间。

作为评价设备失效概率的第一步，有必要借助于大型设备数据库，来找到足够多的数据以合理估算设备的实际失效频率。

利用工厂内的所有装置或行业内的各种装置的记录，或根据文献资料、历史报告以及商业数据库来建立同类失效频率。因此，同类失效频率值一般代表一个行业，而不是反映某一特定装置的实际失效频率。

假设同类失效频率遵循对数正态分布，误差率范围为 3~10。表 31 给出了建议的同类设备失效频率中值。

RBI 方法要求分析人员使用同类失效频率直接进行概率分析。选用的数据源应选取能够代表与所研究的设备类似的装置或设备。例如，可以从核电站报告数据库整理出许多高质量的同类数据，然而，这些数据也许不适合炼油厂应用，因为在维护和检验质量，以及其服务性质方面都存在差异。分析人员应熟知所使用的同类数据源及其对被分析设备的适用性。

表 31 给出了建议的同类失效频率清单及其来源。

表 31 建议的同类设备失效频率值

设备类型	数据源 (参考)	泄放频率 (1 年, 4 个孔径)			
		6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破 裂
单密封离心泵	1	6×10^{-2}	5×10^{-4}	1×10^{-4}	
双密封离心泵	1	6×10^{-3}	5×10^{-4}	1×10^{-4}	
塔器	2	8×10^{-5}	2×10^{-4}	2×10^{-5}	6×10^{-6}
离心压缩机	1		1×10^{-3}	1×10^{-4}	
往复式压缩机	6		6×10^{-3}	6×10^{-4}	
过滤器	1	9×10^{-4}	1×10^{-4}	5×10^{-5}	1×10^{-5}
叶片/风扇冷却器	3	2×10^{-3}	3×10^{-4}	5×10^{-8}	2×10^{-8}
换热器、壳体	1	4×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-6}
换热器、管侧	1	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-6}
19.05mm (0.75in) 直径管子/ft	3	1×10^{-5}			3×10^{-7}
25.4mm (1in) 直径管子/ft	3	5×10^{-6}			5×10^{-7}
50.8mm (2in) 直径管子/ft	3	3×10^{-6}			6×10^{-7}
101.6mm (4in) 直径管子/ft	3	9×10^{-7}	6×10^{-7}		7×10^{-8}
152.4mm (6in) 6in 直径管子/ft	3	4×10^{-7}	4×10^{-7}		8×10^{-8}
203.2mm (8in) 直径管子/ft	3	3×10^{-7}	3×10^{-7}	8×10^{-8}	2×10^{-8}
254mm (10in) 直径管子/ft	3	2×10^{-7}	3×10^{-7}	8×10^{-8}	2×10^{-8}
304.8mm (12in) 直径管子/ft	3	1×10^{-7}	3×10^{-7}	3×10^{-8}	2×10^{-8}
406.4mm (16in) 直径管子/ft	3	1×10^{-7}	2×10^{-7}	2×10^{-8}	2×10^{-8}
>406.4mm (16in) 直径管子/ft	3	6×10^{-8}	2×10^{-7}	2×10^{-8}	1×10^{-8}

表 31（续）

设备类型	数据源 (参考)	泄放频率（1 年，4 个孔径）			
		6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破 裂
压力容器	2	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-6}
反应器	2	1×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-5}	2×10^{-6}
往复泵	7	0.7	0.01	0.001	0.001
常压储罐	5	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	2×10^{-5}

8.3 设备修正因子

根据设备的特定运行环境，为每个设备制定了一个设备修正因子（ F_E ）。 F_E 由四个次因子组成，这将在下面进行讨论。图 22 显示出了设备修正因子概览。

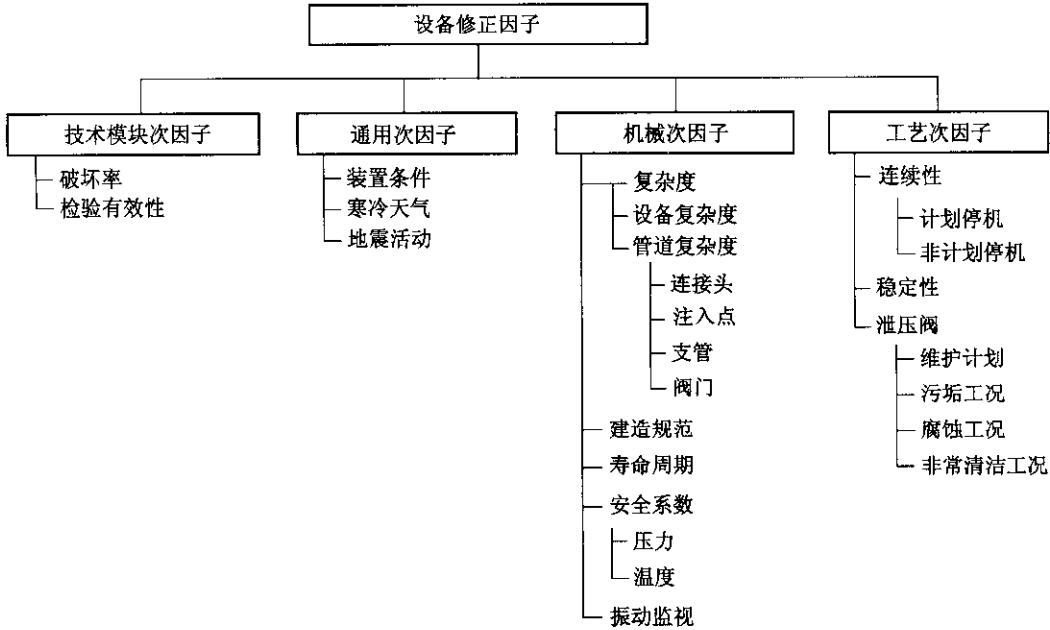


图 22 设备修正因子概览

每个次因子由几个要素组成，根据明确定义的规则对每个要素进行分析。每个要素都赋予数值，作为被分析条件的结果，该数值表明失效频率偏离同类失效频率的幅度。比同类频率更高的那些条件赋予正值，比预期失效频率低的赋予负值。当预期条件使失效频率大约增加一个数量级时，赋予值为 +10。

除非有特殊的说明，在 RBI 分析的这个部分中，假设所有设备都是依据行业标准和企业标准设计和制造的，这些标准通常基于公认的行业标准，如 ASME，TEMA 和 ANSI。在确认设计准确性方面已经超出了 RBI 分析范围。RBI 主要强调可能对正确设计的设备产生不利影响的条件。推导出的数值反映了这些条件对失效频率的影响。

赋予的量化损伤速率的所有数值都是正数，因为失效可能性不会因某一损伤机理的存在而减小。但是，根据定义，同类失效频率数据包括所有设备，其中有些设备具有活跃的损伤机理，而有些则没有。由此得出的结论是，当一个设备不具有有效损伤机理时，其具有的失效频率要比同类失效频率低一些。因此，赋予所有设备的基数值都是 -2.0，加上适当的损伤机理值，-2.0 基数值是通过对所

有装置进行 RBI 研究后确定的。没有确定损伤机理时，在所有其他因子都相等的情况下，这个系统会就该设备生成一个低于同类失效频率负值的值（因此，低于同类失效频率）。

如果相加的设备因子为负值，应按以下所述进行换算，以得到一个正的最终设备修正因子。

第 9 章规定 RBI 研究所需的数据，并推荐了获得这些数据的来源。本章还包含一个样本数据表，用来收集建立 F_E 所需的信息。

分析了这些次因子之后，将所有这些分项确定的数值相加，得到该设备的最终数值。最终设备修正因子建立在该值基础上。这个总和可以是正数或负数，其正常范围在 $-10 \sim 20$ 之间，尽管在程序开始时，当一个设备具有较高的损伤速率和相对无效的检验历史时，该因子可能会很高。最终数值将换算成 F_E ，如表 32 所示。

表 32 换算的设备修正因子

若数值总和为	则 F_E 为
小于 -1.0	该数值绝对值的倒数
$-1.0 \sim 1.0$	1.0
大于 $+1.0$	等于该数值

每一设备的最终设备修正因子都是唯一的，且都基于该设备的具体运行环境。

8.3.1 技术模块

技术模块是用来评价特定失效机理对失效可能性影响的系统方法。它们有以下四个功能：

- 筛选正常和扰动运行条件下得出的损伤机理。
- 建立环境下的损伤速率。
- 量化检验程序的有效性。
- 计算用于“同类”失效频率的修正因子。

技术模块对以下两类信息进行评价：

- 设备运行环境导致的设备建造材料的退化率。
- 工厂检验程序对识别和监测失效前运行损伤机理的有效性。

检验和监测失效机理所需的检验技术可能完全不同于另一失效机理所需的检验方法。可以通过创建每种损伤机理的单独技术模块来说明这些差别。对于某些损伤机理来说，在某些非例行条件下，损伤速率可能非常高，如某一特定污染物的温度激增或者浓度发生异常变化。这些条件经常发生于工艺故障、启动或停工期间。该技术模块描述这些条件并对失效可能性做出相应的修改。本条举例说明技术模块的编制过程。附录 G~附录 N 给出了编制完整的技术模块。

RBI 系统的用户不应认为本章描述的程序是包罗万象的和不可修改的。本章的目的是就影响失效频率的因素建立一种系统的、可重现的分析方法。同时，应在具有相关技术专长的专门人员的监督下进行 RBI 研究。

在役损伤和检验对失效可能性的影响分析，涉及以下七个步骤：

- 筛选损伤机理和建立预期损伤速率。
- 确定损伤速率置信水平。
- 确定检验程序在确认损伤程度和损伤速率方面的有效性。
- 计算检验程序对提高损伤速率置信水平的影响。
- 计算给定损伤水平超过设备损伤容限并导致失效的概率。
- 计算技术模块次因子。
- 计算所有损伤机理的综合技术模块次因子。

本条以均匀内腐蚀技术模块为实例概述了实验方法。均匀腐蚀的定义是指有相当多的设备外壁呈

均匀减薄状态。由于局部腐蚀速率具有较高可变性、检测局部腐蚀的难度较大、影响区面积非常小、压力设备承受更深层缺陷的能力等原因，需要不同的技术模块来处理不同的局部腐蚀。为了继续这个均匀腐蚀的例子，下面以压力容器为例说明，见表 33。

表 33 压力容器的技术模块

容器	高架式常压贮液器
材料	SA285 - Gr. C
厚度	9.525mm (3/8in)
设计压力	344.75kPa (50psig)
腐蚀裕量	4.76mm (3/16in)
直径	1.9812m (6ft 6in)
设计腐蚀速率	0.254mm/年 (10 密耳/年)
使用年限	6 年
以往检验数据	无

下面说明分析的七个步骤。

8.3.1.1 筛选损伤机理和建立预期损伤速率

筛选步骤由以下组成：对每个设备的工艺条件和建造材料进行评价，以确定潜在活跃的损伤机理。未发现损伤机理时，则该特定设备的技术模块次因子为 -2，从而降低同类失效的可能性。均匀腐蚀技术模块采用以下两个筛选问题：

- a) 已知腐蚀速率是否小于 0.0254mm/年 (1 密耳/年)？或者
- b) 该设备设计是否留有腐蚀裕量？

如果对第一个问题的回答是“否”，或如果对第二个问题的回答是“是”，则允许分析人员直接对该设备进行评价。

确定存在某种损伤机理的地方，一般都了解或可以估算处理厂设备的损伤进展速度。有关损伤速率的信息源包括：

- a) 已发表的数据。
- b) 试验室试验。
- c) 现场测试。
- d) 使用类似设备的经验。
- e) 以前的检验数据。

目前正在编制特定材料——环境组合式技术模块补遗，并规定说明特定机理的参考资料。

例如，对于均匀内部腐蚀损伤速率来说，损伤速率是采用 SY/T 6553 规定的计算方法确定剩余寿命和检验频率的腐蚀速率。在一些案例中，测定腐蚀速率也许是不可能的。技术模块将提供一个缺省值，一般从发表的数据或类似工艺经验中推导出该缺省值，以备在得到检验结果之前使用。

案例研究：在本压力容器实例中，筛选步骤已经确认该工艺会导致容器的均匀内部腐蚀。在没有检验数据的情况下，0.254mm/年 (10 密耳/年) 的设计腐蚀速率可用于损伤速率的最佳估算值。

8.3.1.2 确定损伤速率置信水平

通常并不能确切地了解工艺设备的损伤速率。精确地了解损伤速率的能力受到设备复杂性、工艺过程变化、金相变化和检验的不可接近性的限制，以及检验和试验方法的限制。

可以根据历史频率数据来确定预期损伤速率的不确定性。对预期损伤速率不确定性的实际理解包括考虑各种类似工艺过程和设备方案的历史。最好的信息可能来自运行经验，其他信息源可能包括装

置经验数据库或依靠专家的意见。因为装置数据库（配备这类数据库的场合）通常不包含足够详细的信息，因此经常使用的方法是后一种方法。

例如，经济有效地设计设备通常要求内腐蚀速率小于 0.127mm/年（5 密耳/年）。然而，有时可以观察到更高的腐蚀速率。经常发生观察腐蚀速率两倍于预期或以前观察到的情况。通常会在检验期间检测到这些较高的腐蚀速率，但在突破工艺压力边界之前，有时很难检测到这些高于预期腐蚀速率的情况。

观察的腐蚀速率四倍于预期腐蚀速率的情况不多。均匀腐蚀的腐蚀速率高于预期腐蚀速率四倍（局部腐蚀的可变性很大，因此应用单独的技术模块进行评价）的情况非常罕见。期望把此处给的缺省值用于多个工艺过程。注意，腐蚀速率的不确定性随腐蚀速率数据的来源和质量的变化而变化。

对于均匀内部腐蚀，用于建立腐蚀速率的信息源可靠性可分成以下三类：

a) 可靠性较低的腐蚀速率信息源：

- 1) 已发表的数据。
- 2) 腐蚀速率表。
- 3) “缺省”值。

尽管在决定设计方案时经常采用这些信息，但在给定工艺状态下观察到的实际腐蚀速率可能与设计值有明显的差别。

b) 中等可靠性腐蚀速率信息源：

- 1) 模拟工艺条件下的实验室试验。
- 2) 有限的现场腐蚀挂片试验。

根据模拟实际工艺条件所得到的腐蚀速率数据通常提供较高的预测腐蚀速率置信水平。

c) 可靠性较高的腐蚀速率信息源：

- 1) 来自彻底检验的大量现场数据。
- 2) 挂片数据，反映 5 年或 5 年以上工艺设备经验（假定工艺条件一直没发生变化）。

如果可以从实际工艺经验中获取足够的信息，在正常运行条件下实际腐蚀速率大大超过预期值的可能性很小。

表 34 根据损伤速率数据的可靠性，给出了属于表中所列损伤速率范围内的实际损伤速率置信水平。

表 34 在预测损伤速率方面的置信水平

实际损伤速率范围	可靠性较低的数据	中等可靠性数据	可靠性较高的数据
预测损伤速率或更小	0.5	0.7	0.8
2 倍于预测损伤速率	0.3	0.2	0.15
>2 倍~4 倍于预测损伤速率	0.2	0.1	0.05

案例研究：在本压力容器实例中，预计腐蚀速率是基于设计信息。在该案例中，我们查对了已发表的数据，并且设计人员对该工艺也具有相当的经验。腐蚀速率信息置信水平基于数据“可靠性较低”的判断。

8.3.1.3 确定检验程序在确认损伤程度和损伤速率方面的有效性

检验程序（用来确定设备状态的 NDT 方法，如目视检查、超声波检验等的组合）在确定损伤位置和损伤尺寸的有效性方面是可变的，因此，在确定损伤速率的效力方面也是可变的。一个程序的能力会受到很多限制，其在提高损伤程度的置信水平方面的限制是由于其不可能 100% 地检验出受损的区域，以及由于一些检测和量化损伤试验方法的内在限制。可能性检验曲线提供了固定测试限制方面的一些信息，并将在 9.2.3 对其进行更深入的讨论。

技术模块基于表 35 所确定的三种损伤状态。

一个检验程序的有效性可以量化地表示为观察到损伤状态（因而预测损伤速率）的可能性，而该损伤状态实际上代表了真实状态。如在前面关于损伤速率估算中所讨论，装置信息和经验以及专家意见提供了一些信息，这些信息用来表达检验程序的有效性。

一般情况下，检验程序分成下列五类中的一类：

- a) 高度有效。
- b) 通常有效。
- c) 一般有效。
- d) 有效性差。
- e) 无效。

在这一点上，本标准将用综合性内腐蚀实例来继续说明如何开发技术模块。

9.2.2 解释了如何制定检验有效性估算值和如何进行分类。例如，对于一般性内腐蚀，可以通过一次彻底检验来非常有效地确定损伤速率，甚至一些随机性“点”检验量也会得到可观的信息，因为腐蚀速率的变化通常不大，但区域范围非常大的情况除外。

认识到这点是很重要的，即检验规范和作法希望在一些可重复测量的位置进行壁厚测量，以提高腐蚀速率计算的精确性。

表 35 说明了三个检验程序并规定了其有效性类别。

根据专家意见，表 36 和表 37 提供了有效性的缺省值，这些缺省值表示置信水平，即三个检验有效性等级中的每一等级都将精确地确定腐蚀。

案例研究：作为案例的压力容器未进行过检验。

表 35 损伤状态类别的一般性描述

损伤状态类别	实例——均匀腐蚀
损伤状态 1 设备的损伤状态不比根据损伤速率模型或经验所预期的损伤更差	均匀腐蚀速率小于或等于根据过去的检验记录，或没有进行过检验时的历史数据所预测的腐蚀速率
损伤状态 2 设备的损伤状态比预期的损伤稍差，有时可以在类似设备中观察到这类损伤等级	均匀腐蚀速率是预期值的 2 倍
损伤状态 3 设备损伤状态明显地差于预期损伤。在类似设备中罕见这类损伤等级，但在业界中偶尔能观察到	均匀腐蚀速率是预期值的 4 倍

表 36 一般内腐蚀的检验有效性

定性检验有效性分类	实例——均匀腐蚀
高度有效 几乎在每种情况下（90%以上），检验方法都能准确地识别预期在役损伤	通过对内壁进行全面目视检查（结合超声测厚）来评价均匀腐蚀
通常有效 在多数时间（70%以上）里，检验方法能准确地识别实际损伤状态	通过对内壁进行部分目视检查（结合超声测厚）来评价均匀腐蚀

表 36 (续)

定性检验有效性分类	实例——均匀腐蚀
一般有效 大约在一半时间里, 检验方法能准确地识别实际损伤状态 (50%以上)	通过对外壁进行局部超声测厚来评价均匀腐蚀
有效性差 检验方法提供很少的能准确地识别实际损伤状态的信息 (40%)	通过锤击试验、警报孔等来评价均匀腐蚀
无效 检验方法不能或几乎不能提供准确地识别实际损伤状态的信息 (33%)	通过对外壁进行目视检查来评价均匀腐蚀

表 37 均匀腐蚀——检验有效性

损伤速率状态	实际损伤速率范围	检验结果确定实际损伤状态的可能性			
		差/无效	有效	通常有效	高度有效
1	实测损伤速率或更小	0.33	0.5	0.7	0.9
2	实测损伤速率~2 倍实测损伤速率	0.33	0.3	0.2	0.09
3	>2 倍~4 倍实测损伤速率	0.33	0.2	0.1	0.01

8.3.1.4 计算检验程序对提高损伤速率置信水平的影响

关于这一点, 技术模块已经规定了需要确定对设备进行评价时发生给定损伤状态的可能性。该问题的一般形式是: 给出一给定状态的期望值, 并给定进行一个试验来提高该状态期望值的置信水平, 如果该试验没有得出最终结果, 那么试验后该状态的期望值是多少?

可以通过采用一个广泛认可的“贝叶斯定律”统计方法来解决这类问题。该定律将先验概率 $p[A_i]$ (期望状态) 和条件概率 $p[B_k | A_i]$ (检验有效性) 组合起来, 得到一个设备在任一状态 A_i 下的概率表达式。已知: 观察的该设备处于状态 A_k 下, 这导致观察结果 B_k [见式 (21)]:

$$p[A_i | B_k] = \frac{p[B_k | A_i] p[A_i]}{\sum_{j=1}^n p[B_k | A_j] p[A_j]} \quad \dots\dots\dots (21)$$

概率 $p[B_k | A_i]$ 被称为检验后的概率。

对不熟悉式 (21) 的那些人来说, 可表达如下: (实际状态概率, 给定一试样的状态) = [(该试样状态概率, 给定实际状态) × (状态预先概率)] ÷ [(试样状态概率, 给定实际状态) 的所有状态的总和 × (状态预先概率)]

该定律的作用是, 它提供了一种将不确定检验结果与基于分析或意见的期望条件信息融合的方法。

给定一个不同损伤速率可能性的期望值, 并给定趋向显示一个或另一个损伤速率的检验结果, 则贝叶斯定律可用来更新预先期望值。

检验频率和检验总次数用来进行检验结果的更新。利用贝叶斯定律可明确地确定一个提高损伤速率确定性的检验“值”。然后用更新的损伤速率置信水平来计算设备中可能出现的损伤量。

例如, 对于以上有关期望损伤速率和检验有效性的例子, 可以根据以下来确定检验后更新的损伤速率置信水平:

- a) 根据腐蚀表来估算一个新装置的腐蚀速率。
- b) 运行一段时间后进行一次彻底检验。
- c) 确认预期腐蚀速率。

如表 38 所示,可以通过贝叶斯定律来得到更新预期腐蚀速率的置信水平。

案例研究:在本压力容器实例中,假设第一次检验为通常有效的检验。

图 23 以图示形式显示了表 38 的内容。注意:检验的作用是降低期望腐蚀速率的不确定性。

表 38 检验后的损伤速率置信水平

损伤速率状态	损伤速率范围	一般有效	通常有效	高度有效
1	实测速率或更小	0.66	0.814	0.940
2	实测速率~2 倍实测速率	0.24	0.140	0.056
3	>2 倍~4 倍实测速率	0.10	0.046	0.004

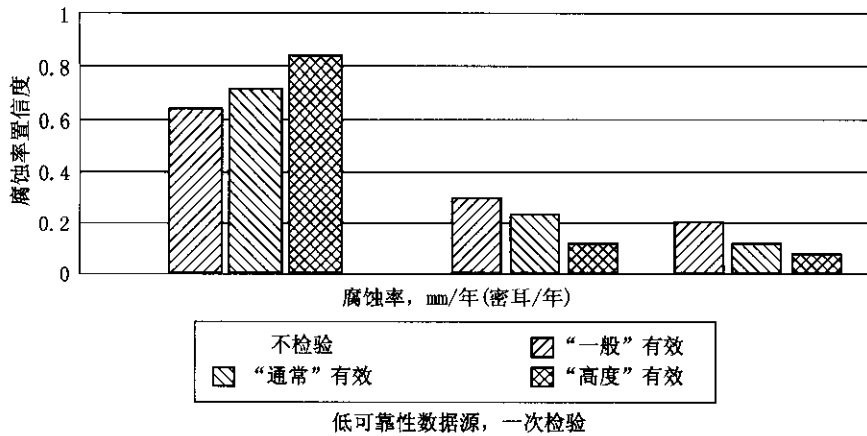


图 23 损伤速率置信水平——检验更新与检验有效性的关系

8.3.1.5 计算给定损伤水平超过设备损伤允许值并导致失效的频率

用估算损伤速率的不确定性来表示潜在损伤速率,将导致给定运行时间后的不同损伤等级。技术模块的下一步是计算与给定损伤状态有关的失效频率。

与损伤状态有关的工艺设备失效取决于若干个随机变量, $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ 等,如最高压力、最大裂纹尺寸、屈服强度或断裂韧性。这些量值的空间被分成以下两个区域:

- a) 安全集包含不导致失效的基础变量 Z_i 的那些组合。
- b) 失效集包含导致失效的变量 Z_i 的所有组合。

根据极限状态函数 $g(Z_i)$ 来确定失效模式。用 $g(Z_i) = 0$ 来描述表面将变量划分为安全集 $[g(Z_i) > 0]$ 和失效集 $[g(Z_i) < 0]$ 。

例如:一压力容器的极限状态函数可能是式 (22):

$$g = S - L \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

S ——强度, MPa;

L ——载荷, MPa。

无论何时,只要载荷超过强度,容器就失效,并且 $g(S, L) < 0$ 。

对于一个由极限状态函数描述的失效模式,失效概率就是处于失效集 $g(Z_i) < 0$ 的概率。可使

用若干方法来计算失效概率，对于 RBI，由于它是一个决策工具，所以选用了相对简单可靠的指数方法。

这里使用的程序是通过把输入修正到可靠性指数的方法，把计算的失效概率“修正”到同类失效频率上，以便得到一个“可接受的”损伤等级，该等级与同类失效频率相对应。这个“修正的”可靠性指数模型用来计算更高损伤状态下的失效频率。

例如：对于均匀腐蚀情况，失效模式是延性过载，当施加载荷所引起的应力超过减薄壁中的流变应力时，会发生这种情况。

对于上述具有不同潜在腐蚀速率的例子来说，可以计算每一腐蚀速率的损伤状态（壁厚损失）。然后用一简单可靠的指数方法来计算每种状态的失效频率。

案件研究：对于压力容器实例，要记住容器已服役了 6 年。表 39 给出了对应于三种不同损伤状态的失效概率。

表 39 计算不同损伤状态的失效频率

损伤状态	腐蚀速率, in/年	壁厚损失, in	剩余壁厚, in	失效频率
1	0.010	0.06	0.315	8×10^{-6}
2	0.20	0.12	0.255	2×10^{-5}
3	0.040	0.24	0.135	5×10^{-3}

8.3.1.6 计算技术模块次因子

技术模块的下一步是计算“技术模块次因子”。该次因子用来对比损伤状态所致失效频率和考虑的设备类型的同类失效频率。技术模块次因子是损伤所致失效频率与同类失效频率之比，乘以出现损伤等级的概率。

用“同类”失效频率除以损伤状态失效频率。最终比率表示被分析设备因给定损伤状态而失效的可能性比“同类”设备的失效可能性要大多少。然后将这个比率乘以存在损伤状态的概率，如检验信息更新那样。

案例研究：对于均匀腐蚀的压力容器来说，表 40 显示出了计算的技术模块次因子。如检验更新效应图所示，计算以下两个案例的次因子：

表 40 计算技术模块次因子

损伤状态	失效状态	“同类”失效频率	与“同类”之比	损伤概率（检验前）	部分损伤因子（未检）	损伤概率（检后）	部分损伤因子（1 次检验）
1	8×10^{-6}	1×10^{-4}	0.08	0.5	0.04	0.81	0.06
2	2×10^{-5}	1×10^{-4}	0.2	0.3	0.06	0.14	0.03
3	5×10^{-3}	1×10^{-4}	50	0.2	10	0.05	2
全部技术模块次因子					10		2

- a) 容器服役时间为 6 年，并未检验过。
b) 容器服役时间为 6 年，并已接受过一次“通常有效”检验。
注意：检验后，技术模块次因子减小。

图 24 以图示形式显示了表 40 的内容。注意：检验起着明显降低较高损伤状态可能性的作用。

技术模块次因子是不同损伤状态的部分损伤因子之和。技术模块次因子的最低值为 1.0，因为在风险分析中，对不存在任一特定类型的损伤不赋予信用度。

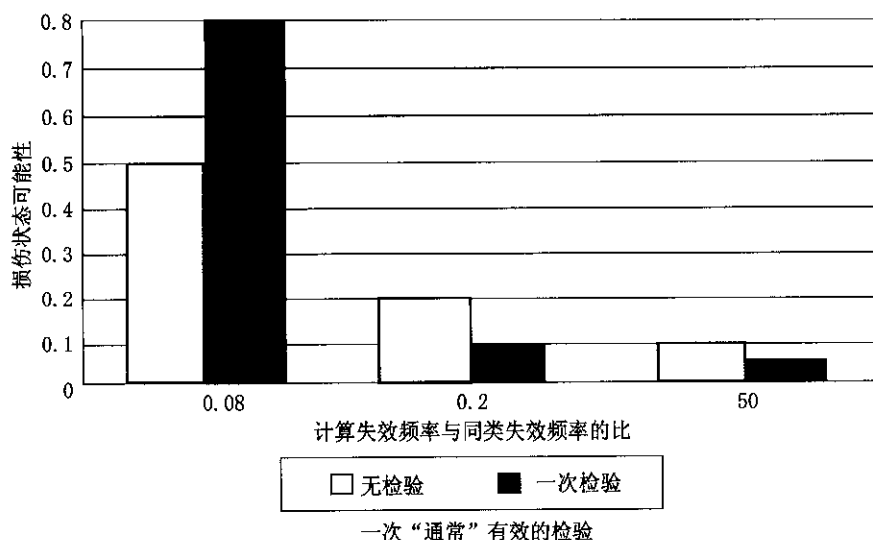


图 24 失效频率——检验对计算频率的影响

8.3.1.7 计算所有损伤机理的综合技术模块次因子

计算了对每台设备起作用的每一损伤机理的技术模块次因子。为了计算所有设备技术模块次因子，将所有单个次因子相加。该方法的优点是，当任何一个次因子发生变化时，可以显示总因子中的某个定量变化。该方法还反映出，不同损伤机理通常并不是完全独立的。也就是说，一种机理造成的损伤可能会对另一机理所致损伤的严重程度产生影响（如应力腐蚀开裂可能始于点蚀导致的应力集中点）。

8.3.1.8 在无专家意见和数据情况下使用实测腐蚀速率

如果不充分考虑腐蚀速率数据源时，按照本章所述应用 RBI 技术中可能存在一个严重的缺陷。在给定的模型中，假设的腐蚀速率具有高于预期值的潜在性，除非已通过彻底检验或多次检验排除了这种潜在性。有关壁厚减薄的技术模块次因子表是在更新的贝叶斯定律简化版本的基础上建立的，该版本假设一般采用专家意见来建立腐蚀速率。因为这些专家意见十分可靠，并且通常选择保守的作法，所以采用的方法通常也选择保守的作法。但是，许多装置并不具有或不采用专家意见作为腐蚀速率依据，而是完全依赖于技术人员进行壁厚测量得出的数据，而这些技术人员很少有或不具备工艺腐蚀方面的知识。在这种情况下，建议由具有丰富知识的人员利用像技术模块增补那样的数据或工具来进行腐蚀速率估算。

在没有腐蚀数据、专家意见，或以往的知识不能确定发生于某一特定系统的腐蚀类型和腐蚀速率的情况下，建议采用以下两种方法来建立腐蚀速率。

8.3.1.8.1 方法 1——简化法

在无腐蚀速率数据或有关局部腐蚀的信息的情况下，腐蚀速率被用于基于风险的检验时，通常会出现这样的问题，“需要多少次检验才能确定腐蚀速率和类型？”采用用于此目的的局部外壁测厚也许有风险，但如果不需要更彻底的检验方法，则采用此方法可能会浪费资金。提供以下指南有助于做出正确决策。

- a) 可能发生的局部腐蚀：采用“高度有效”准则来明确确定是否发生局部腐蚀。这些方法在附录 G 壁厚减薄技术模块中有说明。应该属于这个类别的工艺流体包括所有含水流体或其他导电性流体¹⁾加以下物质：

1) “其他导电性流体”指的是一些种类的有机化学品，它们像水一样可以导电。这些流体（如二甲基酰胺、正丁醇通常不是炼油工艺流体的一部分，但存在于某些化工厂中）作为一般原则，导电率小于 $10^{-7} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的流体为非导电性流体，因此它们具有非腐蚀趋向。

- 1) 氯化物或其他卤化物。
- 2) 含硫化物。
- 3) 有机酸。
- b) 可能发生的局部腐蚀：采用“通常有效”法来明确确定是否发生局部腐蚀。这些方法在附录 G 壁厚减薄技术模块中有说明。应该属于这个类别的工艺流体包括不含水的流体或不含其他导电性流体，但含以下物质：
 - 1) 氯化物或其他卤化物。
 - 2) 含硫化物。
 - 3) 有机酸。
- c) 不可能发生的局部腐蚀：采用“有效”法来明确确定是否发生局部腐蚀。这些方法在附录 G 壁厚减薄技术模块中有描述。应属于这个类别的工艺流体包括不含水的流体或不含其他导电性流体，且不含以下物质：
 - 1) 氯化物或其他卤化物。
 - 2) 含硫化物。
 - 3) 有机酸。

8.3.1.8.2 方法 2——严格方法

有时会出现腐蚀数据、专家意见或先前对腐蚀类型和腐蚀速率的认识与检验结果不一致的情况。如果检验发现腐蚀速率高于预期值，则很少会对这些较高腐蚀速率的存在产生怀疑，并且会利用这些较高值，直到它们所导致的工艺故障或异常条件得到了纠正。另一方面，如检验数据表明腐蚀速率低于预期值，则会在判断正确数据方面出现冲突。

如果实测腐蚀速率比预期腐蚀速率小，则应对这些较低腐蚀速率进行反复观察后，才能用它来“取代”预期值，这跟当前采用的方法非常相似，即通过反复检验来消除较高腐蚀速率的可能性。由于进行了更多次检验，或者进行了更多次高度有效的检验，所以，采用的腐蚀速率才能从较高预期值逐渐接近实测腐蚀速率。腐蚀速率的采用取决检验次数和检验类型、实测腐蚀速率比期望值低多少，并取决于用来建立期望腐蚀速率的专家意见或数据的置信水平。

更新贝叶斯定律以生成下列表格。根据检验次数和类型，从表中查找一个因子。用该因子乘以实测腐蚀速率，即得出可输入该程序的腐蚀速率。

在期望腐蚀速率和实测腐蚀速率之间会产生一些争议，而争议程度部分取决于对期望腐蚀速率的置信水平。在下列表 41～表 43 中，以三种方式之一来描述该置信水平：

表 41 实测腐蚀速率大约为预期腐蚀速率的 1/2

加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率 = 预期值的 1/2；置信水平 = 高				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
1	1.4	1.8	1.9	1.9
2	1.0	1.5	1.8	1.9
3	1.0	1.1	1.7	1.9
4	1.0	1.0	1.5	1.8
5	1.0	1.0	1.3	1.8
6	1.0	1.0	1.2	1.7
7	1.0	1.0	1.1	1.7
8	1.0	1.0	1.1	1.6
9	1.0	1.0	1.0	1.6
10	1.0	1.0	1.0	1.5
11	1.0	1.0	1.0	1.4
12	1.0	1.0	1.0	1.3

表 41 (续)

加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率=预期值的 1/2；置信水平=中				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
1	1.1	1.5	1.7	1.8
2	1.0	1.2	1.5	1.7
3	1.0	1.0	1.4	1.6
4	1.0	1.0	1.2	1.6
5	1.0	1.0	1.1	1.5
6	1.0	1.0	1.1	1.4
7	1.0	1.0	1.0	1.4
8	1.0	1.0	1.0	1.3
9	1.0	1.0	1.0	1.2
10	1.0	1.0	1.0	1.2
11	1.0	1.0	1.0	1.2
12	1.0	1.0	1.0	1.1
加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率=预期值的 1/2；置信水平=低				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
1	1.1	1.2	1.4	1.4
2	1.0	1.1	1.2	1.4
3	1.0	1.0	1.1	1.3
4	1.0	1.0	1.1	1.3
5	1.0	1.0	1.0	1.2
6	1.0	1.0	1.0	1.2
7	1.0	1.0	1.0	1.1
8	1.0	1.0	1.0	1.1
9	1.0	1.0	1.0	1.1
10	1.0	1.0	1.0	1.1
11	1.0	1.0	1.0	1.1
12	1.0	1.0	1.0	1.1

表 42 实测腐蚀速率大约为预期腐蚀速率的 1/4

加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率=预期值的 1/4；置信水平=高				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
1	2.0	3.4	3.6	3.7
2	1.1	2.4	3.4	3.7
3	1.0	1.4	3.0	3.6
4	1.0	1.1	2.5	3.5
5	1.0	1.0	2.0	3.3
6	1.0	1.0	1.5	3.2
7	1.0	1.0	1.3	3.0
8	1.0	1.0	1.1	2.8
9	1.0	1.0	1.1	2.5
10	1.0	1.0	1.0	2.3
11	1.0	1.0	1.0	2.0
12	1.0	1.0	1.0	1.9
加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率=预期值的 1/4；置信水平=中				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
1	1.3	2.4	2.9	3.1
2	1.0	1.5	2.4	3.0
3	1.0	1.1	1.9	2.8
4	1.0	1.0	1.6	2.6
5	1.0	1.0	1.3	2.4

表 42 (续)

加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率 = 预期值的 1/4；置信水平 = 中				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
6	1.0	1.0	1.2	2.1
7	1.0	1.0	1.1	1.9
8	1.0	1.0	1.0	1.8
9	1.0	1.0	1.0	1.6
10	1.0	1.0	1.0	1.5
11	1.0	1.0	1.0	1.4
12	1.0	1.0	1.0	1.3
加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率 = 预期值的 1/4；置信水平 = 低				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
1	1.1	1.5	1.9	2.1
2	1.0	1.1	1.6	2.0
3	1.0	1.0	1.3	1.8
4	1.0	1.0	1.2	1.6
5	1.0	1.0	1.1	1.5
6	1.0	1.0	1.0	1.4
7	1.0	1.0	1.0	1.3
8	1.0	1.0	1.0	1.3
9	1.0	1.0	1.0	1.2
10	1.0	1.0	1.0	1.2
11	1.0	1.0	1.0	1.1
12	1.0	1.0	1.0	1.1

表 43 实测腐蚀速率大约为预期腐蚀速率的 1/10

加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率 = 预期值的 1/10；置信水平 = 高				
检验次数	高度有效	通常有效	有效	有效性差
1	4.2	8.3	9.0	9.3
2	1.2	5.3	8.3	9.1
3	1.0	2.3	7.2	8.8
4	1.0	1.1	5.7	8.5
5	1.0	1.0	4.0	8.1
6	1.0	1.0	2.8	7.7
7	1.0	1.0	1.9	7.1
8	1.0	1.0	1.5	6.5
9	1.0	1.0	1.3	5.8
10	1.0	1.0	1.1	5.2
11	1.0	1.0	1.1	4.5
12	1.0	1.0	1.0	3.9
加权平均腐蚀速率；实测腐蚀速率 = 预期值的 1/10；置信水平 = 中				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
1	2.2	5.4	7.0	7.7
2	1.1	2.5	5.6	7.2
3	1.0	1.3	4.1	6.6
4	1.0	1.1	2.8	6.0
5	1.0	1.0	2.0	5.3
6	1.0	1.0	1.6	4.7
7	1.0	1.0	1.3	4.1
8	1.0	1.0	1.2	3.6
9	1.0	1.0	1.1	3.1
10	1.0	1.0	1.1	2.7
11	1.0	1.0	1.0	2.3
12	1.0	1.0	1.0	2.1

表 43 (续)

加权平均腐蚀速率; 实测腐蚀速率 = 预期值的 1/10; 置信水平 = 低				
检验次数	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差
1	1.5	2.7	4.0	4.8
2	1.0	1.5	2.9	4.2
3	1.0	1.1	2.1	3.7
4	1.0	1.0	1.6	3.2
5	1.0	1.0	1.4	2.8
6	1.0	1.0	1.2	2.5
7	1.0	1.0	1.1	2.2
8	1.0	1.0	1.1	2.0
9	1.0	1.0	1.0	1.8
10	1.0	1.0	1.0	1.7
11	1.0	1.0	1.0	1.5
12	1.0	1.0	1.0	1.4

- a) 置信度高——意见或数据稍微保守, 较低腐蚀速率是未预期的。
 b) 中等置信度——意见或数据有点保守, 但认识到有一些较低腐蚀速率的偶然性。
 c) 置信度低——意见或数据很保守, 但认识到有相当大的较低腐蚀速率的偶然性。

例如, 某管道系统的腐蚀速率数据是根据类似系统的有效性而建立的, 并且发表的数据和试验也支持该数据。预期的最大腐蚀速率为 0.254mm/年 (10 密耳/年), 并且已知该腐蚀通常是高度局部腐蚀。承包商对局部壁厚进行抽样测量, 并且报告的腐蚀速率为 0.0254mm/年 (1 密耳/年)。很显然, 有理由对这个数据表示怀疑。因为承包商仅做了抽样测量, 并且不知道该对哪些位置进行测量, 因此判断的检验有效性为“差”。在表 43 中, 对于有高置信水平的预期腐蚀速率来说, 导致 1/10 预期腐蚀速率测量值的差有效性检验因子是 8.3。该因子乘以实测腐蚀速率 0.0254mm/年 (1 密耳/年), 得到的输入腐蚀速率为 0.23622mm/年 (9.3 密耳/年)。换言之, 实测得出的数据并没有明显且成功地改变专家意见。注意: 重复检验和更多次地高度有效的检验 (如果他们持续观察较低腐蚀速率) 将使 RBI 输入腐蚀速率接近实测速率。表 41 和表 42 中的因子用法相似。

8.3.2 通用次因子

通用次因子包含同样影响设施所有设备的那些条件。因此, 有关这些条件的信息只需收集和记录一次。赋予次因子的三个要素中的每个要素值同样适用于所有设备。

如图 22 所示, 通用次因子包括下列要素:

- a) 装置条件。
 b) 寒冷天气运行。
 c) 地震活动。

8.3.2.1 装置条件

该要素考虑被评价设施的当前条件, 当考虑下列特性时, 评级应以观察者的专业判断为依据。

- a) 视察装置时, 对整个装置总体外观的评价, 视察因素包括:
- 1) 内务管理的总体状况。
 - 2) 临时性维修的证据, 特别是看起来已经具备了延长维修期的“临时”条件方面的证据。
 - 3) 油漆退化、蒸气大量泄放, 或忽略日常维护等方面的其他证据。
- b) 与操作和维护人员面谈而得知的装置维护程序的有效性。一个有效程序将是:
- 1) 一次性正确完成大部分维护工作, 很少返工。
 - 2) 避免大量和不断增加的积压工作要求。
 - 3) 在维护人员和操作人员之间保持一种建设性关系。

c) 装置的布局与结构。在当前条件下, 进行维护和检验活动所需的装置设备的空间和走向。应根据表 44 规定的准则对设施进行评级。

表 44 按装置条件评级

装置条件	类别	数值
明显好于工业标准	A	- 1. 0
与工业标准大致相当	B	0
低于工业标准	C	+ 1. 5
明显低于工业标准	D	+ 4. 0

8.3.2.2 寒冷天气运行

寒冷气候将给装置运行带来一些额外风险。因为在极端低的温度下禁止进行维护和检验作业, 并且在这种温度下, 操作人员可能会很少外出, 从而会减少检查室外设备的次数。

严冬条件也可能对设备产生直接影响。冰冻和积雪可能会造成小口径管线、仪表和电气管路等的变形或断裂。另外, 液位控制器冻结、水管爆裂、含水盲管破裂或冻结以及工艺管线堵塞也是冬季常见的问题。可以通过合理的设计将冷天气引发的问题降至最小, 但并不能完全消除这些问题。

如表 45 所示, 根据装置现场的最低日平均温度采用一个补偿值。对于室内装置, 则应考虑最低室内温度。

表 45 寒冷天气运行的补偿

冬季温度	数 值
4. 44℃ (40 ℉) 以上	0
- 6. 67℃ ~ 4. 44℃ (20 ℉ ~ 40 ℉)	1. 0
- 28. 89℃ ~ - 6. 67℃ (- 20 ℉ ~ + 20 ℉)	2. 0
- 28. 89℃ (- 20 ℉) 以下	3. 0

8.3.2.3 地震活动

尽管已经按相关标准对装置进行了设计, 但位于地震活动区内的装置比位于这类区域以外的装置的失效可能性更高。表 46 给出的数值以 GB 18306 给出的震区为依据。

表 46 地震带运行的补偿

地 震 区	数 值
0 或 1	0
2 或 3	1. 0
4	2. 0

8.3.3 机械次因子

机械次因子强调的条件和设备的设计与制造有重大关联。通常可以在 P&ID 图, 工程文件等资料中找到分析所需的信息。生成的数值常常因每台设备的不同而不同。

如图 22 所示, 该次因子由以下 5 个要素组成:

- a) 复杂性。
- b) 建造规范。

- c) 寿命周期。
- d) 安全系数。
- e) 振动监测。

如讨论所表明的那样，一些要素具有多个子要素。

8.3.3.1 复杂性

对于按单独要素次因子处理的设备和配管来说，所采用的复杂性要素各不相同。

8.3.3.1.1 设备复杂性

同类失效频率数据库不区分压力容器、塔器、换热器等设备的尺寸和复杂性。在大多数情况下，判定设备复杂性，即判断设备尺寸的方法，是通过确定设备上的接管数量。很容易计算接管总数，并且该计算被应用于所有类型的设备。

表 47 给出了所有类型压力容器的一系列接管数的数值。大于或等于 2in 的所有接管都应计算在内，包括当前不在役的那些接管。人孔也应包括在内。

表 47 接管数与数值的对应关系

设备		数 值			
		- 1.0	0	+ 1.0	+ 2.0
接管数量	塔器—全部	<20	20~35	36~46	>46
	塔器—一半	<10	10~17	18~23	>23
	压缩机	2	3~6	7~10	>10
	换热器—壳程	<7	7~12	13~16	>16
	换热器—管程	<4	4~8	9~11	>11
	泵	—	2~4	>4	—
	容器	<7	7~12	13~16	>16

8.3.3.1.2 配管复杂性

在一次有代表性的 RBI 研究中，被分析设备中的 60%~80% 是管段。研究表明，在所有严重的设备失效事故中，配管大约占了 1/3，高于所有其他单一设备类。因此，区分不同管段，就像区分任何其他设备类的设备一样，是非常重要的。

同类数据库以管径和管线长度为基础进行划分：各种管径的失效频率描述为失效次数每年每英尺长度 [次/ (年·ft)]。基于管段的复杂程度进行进一步划分，这通过赋予复杂性因子来确定。该因子是一条管段特征的总和，这些特征可能会增加失效的可能性。

管道复杂性由下列因素组成：

a) 接头数量：

法兰接头比焊接头具有更高的泄放可能性。管段上的每个法兰都被赋予一个复杂性因子——10.0（假设装置上没有用螺纹、临时管夹或其他非标准管件连接的工艺管线。如果正在使用这类接头，则应赋予一个更高的因子）。

b) 注入点数量：

通过注入点，少量的潜在腐蚀性物质被注入到工艺流体中，从而改变了流体的组成或其他工艺参数。注入点实例包括：向重整炉中注氯、向分馏塔系统中注水、向催化裂解湿气注入多硫化物及注入防沫剂等（两种工艺流体汇合的位置不是注入点，如混合三通）。

经验表明，即便在正常运行工况下，注入点附近的配管也可能遭受加速腐蚀或局部腐蚀。注入点增加的复杂性因子是 20。

c) 支管数量：

以三通而不是注入点的形式接入被评价管段的所有管线都被认为是一条支管。包括排液管、混合三通及泄压阀支管。每条支管都有失效隐患，这是所施加的应力、盲管腐蚀、疲劳等原因所造成的。支管的复杂性因子是 3.0。

d) 阀门数量：

在 RBI 分析中，认为阀门是配管的一部分。为了分析的一致性，管段下游的所有阀门都应看做是该管段的一部分。这包括所有截断阀、控制阀、排液阀。但泄压阀不包括在内。

阀门填料处的微小到中等大小的泄漏是正常的。每个阀门增加的复杂性因子为 5。

管段的复杂度因子是以上四个值之和，即：

管段复杂性因子 = (接头数 × 10) + (注入点数 × 20) + (支管数 × 3) + (阀门数 × 5)

因为同类失效频率单位是每英尺管长，所以还应根据管长来修正复杂性因子。用以上确定的管段复杂性因子除以管长，来确定每英尺管长的复杂性因子。然后按表 48 所示，对每一管段赋予上述数值。

表 48 复杂性因子

复杂性因子, ft	数 值	复杂性因子, ft	数 值
<0.10	~ 3.0	2.0~3.49	1.0
0.10~0.49	~ 2.0	3.50~5.99	2.0
0.50~0.99	~ 1.0	6.00~10.00	3.0
1.00~1.99	0	>10.0	4.0

8.3.3.2 建造规范

建造规范代表制造行业几代人的经验和知识的积累。虽然不能确保按建造规范设计和建造的设备可以无故障地运行，但建造规范却保证把应用中的多数问题减到最小。

当然，建造规范并不总是有效的，尤其是对特殊设备和新兴技术的应用更是如此。为这些最终用途而设计和制造的设备可以与建造规范规定的更传统设备一样安全地运行，但在建立大量知识来改进基础设计之前，可靠性和可预见性常常受到考验。另外，因为规定的指南较少，所以可能会增加制造厂商之间的可变性。

以下划分了按现行建造规范、过时建造规范或没有可用建造规范时设计和制造的设备分类，如果已经改造了一种规范性容器，则该改造还应满足建造规范要求，或认为它是一个非标准容器。表 49 给出了每个类别的数值。

表 49 建造规范状况值

建造规范的状况	类 别	数 值
设备满足建造规范的最新版本	A	0
自设备制造以来，已经对这个类型设备的建造规范做出了重大修改	B	1.0
制造这个设备型时还没有正式建造规范，或未按现行建造规范制造这类设备	C	5.0

在一些案例中，“C”类可能适合采用不同数值。大量行业经验证明，当某一特定类型设备的服务性能很好（或很差）时，可相应地修正该数值。但它决不可以小于 2.0。数值大于 10.0 表示存在很严重的问题。

8.3.3.3 设备的寿命周期

在设备运行的前几个月或几年内，其可靠性较低，并且其失效的可能性很高。在解决了初步设计

问题、制造缺陷和运行难题等问题后，设备的失效频率将保持相对稳定，直到接近其有效寿命末期，那时，设备的失效频率会再度增加。

本评价以设备的设计寿命和设备当前已经运行的年数为基础。使用年限可能与装置服役年限不同：如果该设备已被更换或添加，则使用年限小于装置服役年限；如果该设备以前被用于其他场合，则使用年限大于装置服役年限。

设备的设计寿命是其服务于工艺过程的一个函数。遭遇侵蚀损伤机理的设备，如严重腐蚀或疲劳问题等，常常按有限寿命来设计。这类设备失效的可能性随其接近设计寿命而增加。在更有利环境中运行的设备不存在规定或暗示设计寿命。但是，运行一段时间后，这些设备的预期失效频率也可能会增加。RBI 程序规定的这个期限是 40 年。

文中使用的设计寿命并不等效于经济寿命。在设计时，一些工艺设备的预期经济寿命相对较短，这可能会影响一些设计考虑。然而，除非存在一些已知的、限制设备寿命的损伤机理，否则就应假设这类设施中的设备设计寿命是 40 年。

对于寿命周期要素来说，需要确定每台设备的“服役年限”和“设计寿命”。寿命周期校正数值基于已经消耗的设计寿命的百分比，因为该设备进入了当前服役期（见表 50）。

8.3.3.4 安全因子

安全因子由以下两个子要素组成：

- a) 运行压力。
- b) 运行温度。

表 50 寿命周期值

已消耗的设计寿命的百分比	数 值
0~7	2.0
>7~75	0
76~100	1.0
>100	4.0

8.3.3.4.1 运行压力

运行压力与设计压力之比用来度量正常运行工况下的安全因子。当设备运行压力大大低于设计压力时，与在设计压力下运行的设备相比，它的失效可能性会更低。表 51 给出的数值反映了这一基本原理。

表 51 运行压力值

$p_{\text{运行}}/p_{\text{设计}}$	数 值
>1.0	5.0
0.9~1.0	1.0
0.7~0.89	0
0.5~0.69	-1.0
<0.5	-2.0

8.3.3.4.2 运行温度

当设备的运行温度大大高于正常温度、并且接近其制造材料的温度上限时，失效频率会增加。同样，设备在异常低的温度下运行时，失效频率则较高。当设备被冷却到大大低于环境温度时，

就会产生应力，从而会在法兰处发生泄漏。运行温度因子不考虑碳钢或低合金钢在低温运行条件下的脆性断裂，但应作为技术评价的一部分来评价脆性断裂的潜在性。

表 52 给出的数值反映了这些问题。

当运行温度处于上、下限之间时，运行温度要素值是 0。

表 52 操作温度值

$T_{\text{运行}}$	数 值
碳钢 $>287.78^{\circ}\text{C}$ (550°F)	2.0
1%Cr 钢~5%Cr 钢 $>343.33^{\circ}\text{C}$ (650°F)	2.0
5%Cr 钢~9%Cr 钢 $>398.89^{\circ}\text{C}$ (750°F)	2.0
304/316 不锈钢 $>815.56^{\circ}\text{C}$ (1500°F)	2.0
所有钢材 $<-28.89^{\circ}\text{C}$ (-20°F)	1.0

8.3.3.5 振动监测因子

磨损是泵、压缩机等旋转设备的常见失效原因。与磨损相关的损伤可能导致密封失效、轴损伤，或在极端情况下，甚至泵壳破裂。振动监控一般可以在发生设备失效前，检测正在发展的问题。表 53 给出的数值应用于被调查的所有泵和压缩机装置。

表 53 泵与压缩机的振动监测对应值

控制方法	数 值	
	泵	压缩机
无振动监控程序	0.5	1.0
定期振动监控	-2.0	0
在线振动监控	-4.0	-2.0

对于旋转设备的承压部件受到侵蚀或磨损，从而增加装置风险的问题，RBI 分析可以利用附录 G 所述的壁厚减薄机理技术模块。该模块可以根据被处理的物质、使用条件、具体监控方法等规定一些较高的修正因子。

通过相加本节所述之五个要素中每个要素的因子来计算机械次因子。

8.3.4 工艺次因子

工艺次因子包括最受工艺影响的条件以及设备运行方式。分析这些条件所需的信息来自运行记录、与操作人员的讨论等。最终数值可以是通用的或针对特定设备，这取决于具体情况。该次因子具有以下三个要素，每一要素又具有七个子要素：

- 工艺连续性。
- 工艺稳定性。
- 泄压阀。

许多研究表明，在非常规运行期间，如启动、停机和故障等，设备失效率是不成比例的。在 M&M 防护咨询公司报告的大规模损失中，把失效值定为 25%。该要素针对工艺连续性和基本稳定性修正同类失效频率。

对于许多设施，所有设备的连续性数值和稳定性数值都是常数。然而，当一个装置的不同工段可以独立运行或具有固有的不同稳定特性时，则应就每一工段制定特定值。在少数案例中，单个设备所要求的数值可能比设施中的其他设备更低些；放热反应器就是一个例子。

8.3.4.1 工艺连续性**8.3.4.1.1 计划停车**

计划停车包括计划中按标准运行程序所实行的所有停车，其被关注程度随工艺复杂程度的不同而不同。其意图仅包括那些按正常、系统停车程序所实施的停机。应采用在过去三年里每年计划停车的平均数来确定这个数值，反常年情况除外。

任何停车，即便是那些周密计划和谨慎实施的停车，都可能会存在潜在的操作误差和机械失效。停车次数越多，这种失效的可能性就越大。可能性的增加通常与计划停车次数不成正比。但可以假设计划停车已经把影响降至最小。表 54 给出的数值中包含了这个假设。

8.3.4.1.2 非计划停车

非计划停车是最少预先计划，并且包括诸如停电、泄放与火灾等状况所造成的停车。即便已经具备了完备的应急程序，非计划停车也比计划停车具有更大的危害性。以下所赋数值反映了这一倾向（见表 55）。

表 54 计划停车数值

计划内停车次数 次/年	数 值
0~1	-1.0
1.1~3	0
3.1~6	1.0
>6	1.5

表 55 非计划停车数值

非计划内停车次数 次/年	数 值
0~1	-1.5
1.1~3	0
3.1~6	2.0
>6	3.0

此外，应采用过去三年里每年非计划停车次数的平均数。

8.3.4.2 工艺稳定性

一些工艺可以在操作员很少干涉的情况下日复一日地平稳运行。而其他一些工艺则需要经常关注，以便调节设定值、控制产品质量或者改变产品等级。工艺不稳定将导致相当大的干扰或非计划停车，从而增加失效频率。

对该要素所赋予的数值基于固有的工艺稳定性。为了了解工艺稳定性，RBI 使用者应与工艺人员、设计人员和维护人员面谈，然后审查现有的运行记录和来自其他渠道的文件。将根据观察者的专业判断对稳定性进行评级。

进行这种判断时，要考虑的因子如下：

- a) 化学工艺是否特别复杂？该工艺是否包括任何放热反应或异常严重的温度或压力条件？
- b) 该现场或其他现场的任何重大事故是否与该工艺有关联？
- c) 该工艺是否涉及任何未经证实的工艺技术或设计概念，或者该工艺的配管或设备是否要求任

何特殊建造材料？

d) 控制系统是否满足现行标准？是否包括具有适当安全特性的计算机控制？是否需要和/或配备了紧急停车系统和控制系统备用电源？

e) 是否对工艺操作员和当班监督员进行了工艺训练？这些人员是否具有相关的工艺经验？

在许多案例中，装置中的所有设备都将被赋予相同的级别。但是，如果装置的某一工段明显地比其他工段稳定或不稳定，并且该工段的稳定性不会明显地影响装置的其他部分，则该工段设备的级别应不同于装置剩余部分的定级。

如表 56 所示，将稳定性等级被转换成一个数值。

表 56 用于稳定性评级的数值

稳定性等级	数 值
比工艺平均值更稳定	- 1.0
工艺具有稳定性平均值	0
比工艺稳定性平均值低	1.0
比工艺稳定性平均值低得多	2.0

8.3.4.3 泄压阀要素

以下四个子要素包括整个装置的泄压阀：

- 维护程序。
- 结垢工况。
- 腐蚀工况。
- 很清洁工况。

RBI 程序并不注重特定泄压阀的尺寸和位置。假设在装置最初的设计期间就针对这些要求做出适当规定，或者把其作为详细工艺危害性分析的一部分。对起影响作用的设计和工艺条件——泄压阀是否能够在需要时发挥功能进行评价。显然，在清洁工况，和正确检验及维修条件下，泄压阀最可能按设计功能发挥作用。背离这些条件会增加失效的可能性。

在许多情况下，装置范围内影响泄压阀的条件更具有普遍性，这不针对特定设备。一个泄压阀常常保护两个或更多个容器和所有附带配管。另外，装置某些工段的泄放系统比其他系统存在更多的问题。在特定情况下，应规定是按普遍性还是按特定设备来处理这些问题。

8.3.4.3.1 泄压阀维护程序

根据 SY/T 6552 规定，应定期对停运的泄压阀进行维护和检验，以确保其正确地发挥功能。但是，RBI 程序的工作范围不包括分析泄压阀（RV）维护程序的适用性。相反，该子要素的数值是在装置与其 RV 维护程序保持一致水平的基础上建立的。

应查询工厂记录，以确定是否有延期执行泄压阀维护和检验计划的情况和这种情况所占的百分比。这个百分比应根据延期执行维护和检验计划的泄压阀数量而定，与泄压阀总数相比较。如果没有制定明确的泄压阀维护计划，或者工厂没有保存延期执行维护和检验计划的泄压阀的记录，则适用于所有设备的缺省值应为 D 类。

如果一个设施已选择在一些或所有泄压阀下方安装一些截断阀，以便在装置运行期间，使泄压阀能够停运，则该设施应制定一个明确且严格的执行程序，来确保这些截断阀不会在泄压阀运行期间意外关闭。该程序应包括一个要求，即当运行的泄压阀处于开启位置时，密封或锁定所有截断阀。当设施的泄压阀下方装有截断阀，并且该设施没有制定有关截断功能的书面程序时，则装置中的所有设备都应被设定为 D 类（假设当一个冗余阀门被安装就位时，只能够停运一个泄压阀）。

在巡检装置期间，观察员应当检查泄压阀下方的截断阀，以确定它们是否可能会意外关闭。如果

发现任何截断阀有非密封性开启或者关闭受阻的现象，则所有设备都应被设定为 D 类。

应按表 57 所示来赋予数值，包括上面提到的可能补偿值。

表 57 泄压阀维护数值

泄压阀维护状态	类别	分值
小于延期维护的泄压阀的 5%	A	-1.0
是延期维护的泄压阀的 5%~15%	B	0
是延期维护的泄压阀的 15%~25%	C	1.0
大于延期维护的泄压阀的 25%，或没有泄压阀维护或截断阀计划	D	2.0

8.3.4.3.2 结垢工况

应用于含大量聚合物或粘稠物质的工艺流体中的设备比用于清洁流体中的设备更难加以保护。即便在合理的系统设计的情况下，这些物质也可能会在泄放装置和入口管路内和其周围堆积，从而堵塞或限制流体进入泄压阀。

赋予一个数值以表明泄压阀是否处在有结垢物组分的工艺流体条件下（见表 58）。如果整个装置的结垢倾向是可变的，则可能有必要按特殊设备或工段来处理这个问题。

表 58 泄压阀结垢趋势数值

结垢趋势	类别	分值
没有大量结垢	A	0
具有聚合物或其他结垢物质，在系统的一些部分有偶然结垢的现象	B	2.0
高结垢，在泄压阀和/或系统的其他部件上有沉积物频繁结垢的现象	C	4.0

8.3.4.3.3 腐蚀工况

腐蚀性工艺流体是泄放系统中的特殊问题。该系统的设备与配管都是按抗腐蚀性流体设计的，但在一般情况下，泄压阀内部的耐腐蚀性较差。贯穿阀座的任何微小泄漏都可能对弹簧、导向器等造成腐蚀，从而导致不可预见的泄压阀操作。

如果认为该工艺流体对碳钢或低合金钢具有腐蚀性，则应赋予一个补偿因子（如表 59 所示），除非已知所有泄压阀内件至少像阀门内腔那样是耐腐蚀的，或者是已在泄压阀下面安装了耐腐蚀爆破片。

表 59 腐蚀工况数值

腐蚀工况（无耐腐蚀设计）	分值
是	3.0
否	0.0

8.3.4.3.4 非常清洁工况

位于没有可识别的结垢趋势、腐蚀物质或其他污染物的工艺流体中的泄压阀的可靠性应当高于所有泄压阀的平均值。若工艺流体符合这些要求（如表 60 所示），则应赋予一个置信度值。

8.3.5 总结——设备修正因子

在以上各条中，已经建立了设备修正因子，它由技术模块、通用性、机械性及工艺等四个次因子组成。而每个次因子又由以上所述的几个子要素构成。

表 60 非常清洁工况数值

非常清洁工况	分 值
是	-1.0
否	0

8.4 管理系统评价因子

很久以来人们就已经意识到，有效的管理系统评价在防止有害物质泄放和保持工艺设备机械完整性方面的重要性。工艺过程危害管理应按照 SY/T 6230 执行。

RBI 程序采用系统评价因子来修正不同工艺安全管理系统的同类失效频率。从设施评价结果或运行装置管理系统的评价结果（该评价影响到工厂的风险）中推导出这个因子。在一个设施中，各装置内的不同作法可能会导致装置之间不同的管理系统评价因子。但在所有研究中，管理系统评价因子都应该是相同的。该因子要均衡地运用于研究中的所有设备，但不得改变各设备风险评级的级别顺序。管理系统评价因子可以对研究中所计算的每个设备和合计风险的总风险水平产生极大的影响。在比较整个装置的风险水平、或比较不同装置之间或工厂场地之间类似设备的风险值时，该因子是十分重要的。

8.4.1 管理系统评价

就 RBI 程序制定的管理系统评价涉及到工厂 PSM 系统所覆盖的所有区域。该 PSM 系统直接或间接地影响到工艺设备的机械完整性。管理系统评价大部分基于 API 推荐作法和检验规范所包含的那些要求。它还包括已证实的有效安全管理方面的其他技术。

表 61 给出了管理系统评价所包含的主题清表，以及给定每个主题的权重。注意主题范围包括 SY/T 6230—1997 中的一些主要段落（加上领导和管理一章和承包商一章）。管理系统评价重点是机械完整性问题。机械完整性是内容最多的单独章节，并且其他主题范围中的大多数问题要么与机械完整性密切相关，要么与总装置风险相关。

表 61 管理系统评价

项 目	标 题	问 题 数	总 分 值
1	领导和管理	6	70
2	工艺安全信息	10	80
3	工艺危害性分析	9	100
4	管理变更	6	80
5	操作规程	7	80
6	安全作业作法	7	85
7	培训	8	100
8	机械完整性	20	120
9	开工前安全审查	5	60
10	应急措施	6	65
11	事故调查	9	75
12	承包商	5	45
13	安全生产管理系统评价（审计）	4	40
总 计		101	1000

管理系统评价作为一个分析计算表附于本报告，详见附录 D。它由 101 个问题组成，大多数问题具有多个部分。大部分问题是这样构建的，即它们可以只有一个答案：是或否；a，b 或 c；完成的百分比等。每个问题的可能答案均被赋予一个权值，这依据其答案的适当性和主题的重要性而定。该系统为管理系统评价提供了一个定量的可复验的分值。它还简化了对结果的分析，从而允许审计人员精确地确定工厂 PSM 系统的优势区和薄弱区。管理系统评价中的问题数量和宽泛的主题范围，使管理系统评价能够区别两种不同效果的 PSM 系统。

没有设定表示遵守与不遵守法规的特定分值。表 61 所示为对影响机械完整性的管理系统的质量进行评价。1000 分相当于 PSM 中影响机械完整的问题达到优秀。许多测定的问题可能大大超出遵守法规所要求的范围。

8.4.2 审计技术

管理系统评价涉及广泛的论题，需要回答设施内多个不同学科的所有问题。最好与来自下列职能部门的代表进行面谈：

- a) 工厂管理。
- b) 运行。
- c) 维护。
- d) 安全。
- e) 检验。
- f) 培训。
- g) 设计。

完成管理系统评价所需的单独面谈次数因用途的不同而不同。在许多情况下，一个人可以有效地回答涉及两个或两个以上职能部门的问题。所以，通常至少需要进行四次面谈。

审计员人数可以随意，但超过一个以上则大有益处。如果有两个或更多审计人员，管理系统评价小组就可以相互比较笔记，并且可以经常避免漏看或错误理解重要信息。

应指定被面谈人员，然后从总管理系统评价中选取一分组问题。这些问题应与每个被面谈人的专业知识相符。当然，应由某个人来回答所有审计问题，但并不是在一次面谈中就要询问很多审计问题，应分几次来问、答。在面谈过程中，不时地做出连续答复和澄清是很重要的。此外，比较不同学科人士的各种应答结果，可能会有一定的启迪作用。双方可能都诚实、坦白地回答了问题，但双方的理解力可能存在明显的不同。

管理系统评价的目的是，针对每个问题获得唯一最佳答案。除了比较不同面谈人士的各种回答外，还应通过对相关书面程序、文件及记录进行实物审查来证实这些回答。审计人员应确保事实与回答相符，并且在确信这些回答之前，确保满足问题的意图。

8.4.3 将管理系统评价分数转换成管理系统评价因子

如果要把管理系统评价分数转换成管理系统评价因子，至少需要两条信息来制定转换因子：(a) 装置应得到的管理系统评价平均分数是多少？(b) 如果一个具有平均 PSM 系统的工厂安装了一个“完善的”PSM 系统，则总装置风险能降低多少？

但实际上两项都没有一个可用的量化值。然而对两者进行一些合理的假设是可能的。

具有广泛行业知识的机构对管理系统评价中的问题进行审查后，估算的美国石化工厂的平均分值为 50%。

通过改进公司的 PSM 系统来减少总装置的风险，但是这个风险量很难量化。这可以表明，一些公司伤害性工时损失率至少比其他公司的平均值低一个数量级。假设大部分性能的提高是因为这些公司具备完善的 PSM 系统，这是合乎逻辑的。又假设，即便是伤害率最低的公司也不具备“完善的”PSM 系统，这也是合乎逻辑的，并且管理系统评价分也不应该是 100%。

将管理系统评价分转换成管理系统评价因子的推荐比例基于这样的假设，即装置的管理系统评价

平均得分为 50%，并且 100% 分值等于降低装置总风险的一个数量级。这些数值被绘制在图 25 的半对数曲线上。该曲线图提供了一个用于所有管理系统评价分数的管理系统评价因子。

当管理系统评价结果中有更多可用数据时，可以随时对以上假设进行修正和改进。

应记住，管理系统评价因子同样适用于所有设备，但不改变设备检验的风险级别。在比较两个运行装置或工厂场地时，可采用该因子值。

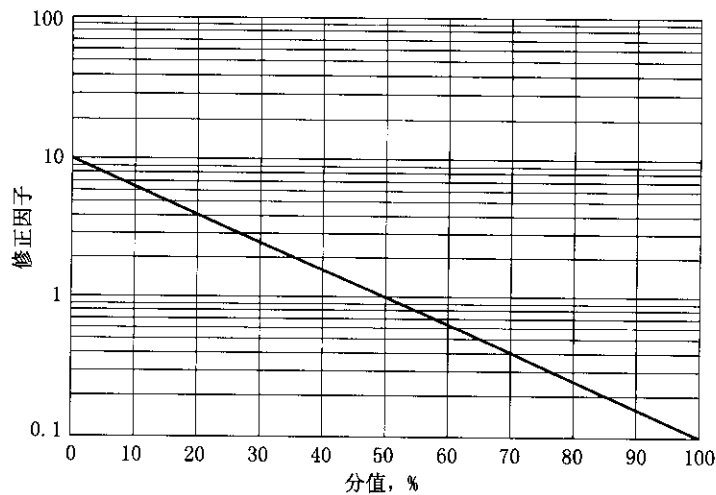


图 25 管理系统评价分值与 PSM 修正因子的关系

9 降低风险检验程序的制定

9.1 概述

本章包含以下两个主要分节：

- a) 制定检验程序。这些程序强调检验应当检测的损伤类型，和检测该损伤的适当检验方法。
- b) 通过检验来降低风险。它讨论将基于风险的检验工具应用于降低风险和优化检验程序。

检验主要是通过降低失效可能性来影响风险。很多不利因素（如设计错误、制造缺陷、控制装置失灵等）都可导致设备失效，但是在役检验主要是对渐进性损伤进行检验。这类损伤所引发的失效可能性与以下四个因素有关：

- a) 损伤机理和损伤的最终类型（裂纹、减薄等）。
- b) 损伤速率。
- c) 利用检验技术来检测损伤，并预测未来损伤状态的可能性。
- d) 设备对各类损伤的耐受性。

与传统的检验管理不同，定量 RBI 考虑上述所有因素。它提供概念和方法，即便在数据丢失或不确定时，也能对决策予以支持。采用第 6 章～第 8 章给出的那些定量方法可以做出合理的决定。本章讨论这类决策方法的应用并将其应用于检验程序，以降低风险。在工作实例报告中进一步介绍了这些概念和方法。

9.2 检验程序的编制

检验程序的目的是对一些活动做出定义并实施这些活动。这些活动是在失效发生前检测在役设备退化所必需的。编制检验程序要系统地识别以下项目：

- a) 要寻找哪种类型的损伤？
- b) 在哪里寻找这种损伤？
- c) 如何寻找这种损伤（采用哪种检验技术）？
- d) 何时（采取什么频率）寻找？

用户在开始上述步骤之前应获得一些数据。这些数据包括设备设计和制造、设备所处的工艺条件，以及设备历史方面的信息。以下基础数据足以用来识别大多数损伤机理：

设计和制造数据包括：

- a) 设备类型（热量、质量或动量传递）和功能（管壳式换热器、塔盘式蒸馏塔、离心泵等）。
- b) 建造材料。
- c) 热处理。
- d) 壁厚。

工艺数据，包括以下变化：

- a) 温度。
- b) 压力。
- c) 化学工况，包括微量组分（如氯化物、CNs、氨盐等）。
- d) 流速。

设备历史包括：

- a) 以前的检验数据。
- b) 失效分析。
- c) 维护作业。
- d) 更换方面的信息。
- e) 改造。

9.2.1 要寻找哪种损伤类型，以及在哪里寻找

损伤类型是可以被某种检验技术检测到的某种损伤的物理特性。损伤机理是产生损伤的腐蚀或机械作用。表 62 描述了损伤类型及其特性。表 63～表 67 按广泛分类法列出这些损伤机理。同时还列出了与这些损伤机理相关的损伤类型。这些损伤机理清单是由 API 参于使用项目组的一些成员编制的。

表 62 损伤类型及特性

损伤类型	解 释
减薄（包括均匀减薄、局部减薄和点蚀）	一个或更多表面的金属损失，可能是整体或局部腐蚀
连接面开裂	与一个或多个金属表面相连的开裂
次表面裂纹	金属表面下的裂纹
微裂纹/微孔形成	金属表面下的微裂纹或微孔
冶金组织变化	金属金相组织改变
尺寸变化	物体的物理尺寸或取向改变
鼓泡	钢板夹渣中形成氢致鼓泡
材料性质变化	金属材料性质改变

表 63 腐蚀损伤机理

腐蚀类型	损伤机理
HCl 腐蚀	保温层/防火材料下的腐蚀
有机氯化物腐蚀	冷却水腐蚀
无机氯化物腐蚀	大气腐蚀
有机硫腐蚀	土壤腐蚀

表 63 (续)

腐 蚀 类 型	损 伤 机 理
H ₂ /H ₂ S 硫化	高温氧化
CO ₂ 腐蚀	热腐蚀
环烷酸腐蚀	燃料气腐蚀
酸水腐蚀	脱合金成分腐蚀
硫酸腐蚀	电化腐蚀
氢氟酸腐蚀	裂缝、熔敷层下腐蚀
酚/亚硝基甲酚腐蚀	生物腐蚀
磷酸腐蚀	注入点腐蚀
碱性腐蚀	锅炉水/冷凝水腐蚀
氨腐蚀	燃气露点腐蚀
氯/次氯酸钠腐蚀	
注：所有以上损伤机理都与腐蚀所致的金属减薄有关。所有这些机理的损伤类型都是减薄。	

表 64 应力腐蚀裂纹损伤机理

腐 蚀 类 型	损 伤 机 理
应力腐蚀裂纹	胺 氨 苛性碱 碳酸盐 氯化物 连多硫酸 液态金属脆化 氢氟酸 腐蚀疲劳
注：所有以上损伤机理都与金属表面相连的裂纹有关。	

表 65 氢致损伤机理

损 伤 机 理	损 伤 类 型
鼓泡	鼓泡、表面下的裂纹、与表面相连的裂纹、尺寸变化
氢致裂纹，包括阶梯式裂纹	表面下的裂纹、与表面相连的裂纹
应力导向氢致裂纹 (SOHC)	微裂纹/微孔形成、次表面裂纹、与表面相连的裂纹
硫化物型应力裂纹	与表面相连的裂纹
氰化物应力裂纹 (HCN)	与表面相连的裂纹
氢化	次表面裂纹、与表面相连的裂纹、金相改变
氢腐蚀	微裂纹/微孔形成、金相改变、裂纹
氢脆	与表面相连的裂纹、金属性质改变

表 66 机械损伤机理

损伤机理	损伤类型
固体侵蚀	减薄
滴液侵蚀	减薄
气蚀	减薄
滑动磨损	减薄
疲劳	与表面相连的裂纹、表面下的裂纹
热疲劳	与表面相连的裂纹
腐蚀疲劳	与表面相连的裂纹
蠕变和应力断裂	微裂纹/微孔形成、表面下的裂纹、与表面相连的裂纹、金相改变、尺寸改变
蠕变裂纹	微裂纹/微孔形成、表面下的裂纹、与表面相连的裂纹
热棘轮效应	与表面相连的裂纹、尺寸改变
过载（塑性垮塌）	尺寸改变、减薄
脆性断裂	金相变化、材料性质改变

表 67 金相和环境损伤机理

损伤机理	损伤类型
初熔	微裂纹/微孔形成、表面下裂纹、与表面相连的裂纹、金相变化和材料性质变化
球化和石墨化	微裂纹/微孔形成、表面下裂纹、与表面相连的裂纹、金相变化和材料性质变化
硬化	金相变化和材料性质变化
西格马和克黑相脆化	金相变化和材料性质变化
885 ℃脆化	金相变化和材料性质变化
回火脆化	金相变化和材料性质变化
再热裂纹	与表面相连的裂纹、金相变化和材料性质变化
碳化物析出脆化	金相变化和材料性质变化
渗碳	金相变化和材料性质变化
脱碳	金相变化和材料性质变化
金属尘化	减薄
渗氮	金相变化和材料性质变化
弥散硬化	金相变化和材料性质变化
过度时效引起的软化	金相变化和材料性质变化
高温老化引起的脆性	金相变化和材料性质变化

根据工作机理，损伤可能均匀地发生于整个设备，或发生在设备的局部位置。可以在所有方便检验位置对均匀发生的损伤进行检验和评价，因为结果可以预测或代表整体条件。局部发生的损伤需要在检验时给予更多的关注。这可能会涉及大面积检验以确保能够检测到那个局部损伤点。当充分认识到损伤机理，从而能够预测损伤发生的位置时，就可以把检验注意力集中在那些区域。

9.2.2 寻找损伤的方式（检验技术）

根据检验技术发现损伤类型的能力来选择检验技术，但是导致损伤的机理可能会影响检验技术的选择。

以下损伤机理可能产生一种或多种类型的损伤。相关损伤类型见表 65～表 67。

表 68 以定性的方式列出了一些检验技术的效果，这些技术与表 62 所列的每种损伤类型相关。根据各意见方提出的建议，包括 API 检验分委员会的建议，就一些损伤类型/检验技术组合给出了一系列效果。检验技术的选择不但取决于该方法的有效性，而且还取决于设备的适用性和是否可以对该设备进行内检验。

9.2.2.1 检验有效性

表 68 给出观察各种检验技术效果的指南。注意，对微裂纹/微孔形成这一损伤类型来说，还没有任何效果很好的检验技术。还应注意的是，一种检验技术并非对所有损伤类型始终都是高度有效的。但是对大多数损伤类型来说，可以采用一种以上的检验技术，而每种检验技术都可以加强另一种技术的效果。例如：如果超声测厚仪能与内部目视检查结合起来，而在定位内腐蚀时，超声测厚仪就会更加有效。任何一种检验技术都不能有效地发现蠕变损伤以及所伴生的微孔形成、裂隙和尺寸改变，但是采用了组合技术（如超声、射线检查、尺寸测量和金相覆膜技术）后，检验结果通常是令人满意的。

RBI 要求量化估算检验效果，以便将其用于 8.3.1 所述的技术模块。以下各条表明如何制定检验效果估算方法。

表 68 不同损伤类型的检验技术的效果

检验技术	减薄	与表面相连的裂纹	次表面裂纹	微裂纹/微孔形成	金相变化	尺寸变化	鼓泡
目视检查	1~3	2~3	×	×	×	1~3	1~3
超声纵波	1~3	3~×	3~×	2~3	×	×	1~2
超声横波	×	1~2	1~2	2~3	×	×	×
荧光磁粉	×	1~2	3~×	×	×	×	×
着色渗透	×	1~3	×	×	×	×	×
声发射	×	1~3	1~3	3~×	×	×	3~×
涡流	1~2	1~2	1~2	3~×	×	×	×
漏磁	1~2	×	×	×	×	×	×
射线检查	1~3	3~×	3~×	×	×	1~2	×
尺寸测量	1~3	×	×	×	×	1~2	×
金相	×	2~3	2~3	2~3	1~2	×	×

注：“1”表示高度有效“2”表示通常有效；“3”表示一般有效；“×”表示不常用。

9.2.2.2 对检验效果进行定性评价

分析人员在观察检验技术的效果、到量化一个设备的检验计划是否有效的整个过程中，必须对以下 5 个因素进行评价：

- a) 损伤强度及可变性。
- b) 检验样品的有效性。
- c) 样品尺寸。

- d) 检验方法的检测能力。
- e) 在过去观察的基础上做出合理的未来预测。

严格的定量方法将要求对这五个因素中的每个因素进行概率描述，从而允许按概率表达式来表示检验效果。但是，对于基于风险检验的一般方法来说，这种方法则过于昂贵和复杂。

评价检验有效性的 RBI 方法将检验类型或其组合的能力进行分类，以进行检测和评价在役设备损伤状况。一个组合例子是，用于检测和测量均匀腐蚀的目视检查和超声检测的组合。基于对上述五个因素的评价结果进行效果分类。根据这些因素，按各检验技术检测和量化预计累进损伤的能力，对检验技术进行分类。

检验有效性分类如下：

- a) 高度有效。
- b) 通常有效。
- c) 一般有效。
- d) 有效性差。
- e) 无效。

因为获取的数据通常很难进行严格的定量分析，所以 RBI 评价在很大程度上要依靠专业判断和专家意见。表 69 描述在 RBI 中或在严格定量方法中将要考虑的那些因素，并提供一个容器均匀腐蚀案例。

表 69 检验效果评价中要考虑的因素

评定因素	严格的定量方法	RBI 方法	RBI 方法规定的均匀腐蚀实例
损伤强度及可变性	对强度、平均和极端值分布的损伤	a) 大面积或小范围内所发生的损伤； b) 损伤可能随机发生，或可以预测损伤的位置	表面积的相当大部分发生了均匀腐蚀，并且腐蚀相对均匀
样品的有效性	样品应代表要进行统计推断的那些人口	检验程序是为了集中在可能发生损伤的区域而设计的	对于均匀腐蚀，大部分样品将代表一些条件；但一台设备内的腐蚀速率可能有很大的不同
样品尺寸	在统计上，样品尺寸应相当大	被检验区域应适合于高度局部化的损伤机理	结合超声检查的目视检查增加了样品对仅有抽样超声测厚读数的重要性
检测能力	检测可能性 (POD) 曲线说明该方法的能力	对检验类型的能力进行定性评价	参见表 68。目视检查被定级为“可能有效”到“高度有效”；超声测厚被定级为“适度有效”到“高度有效”
未来预测的效果 (以以往的观察为基础)	对损伤进行模拟，以显示损伤速率随时间而变化	用以前观察的损伤状况来预测未来，根据损伤速率的增、减，或根据影响损伤状况的工艺参数的变化	假设将要发生的均匀腐蚀速率与过去的腐蚀速率相同，除非工艺发生变化（进料、温度等）

通过将检验方法指定为表 70 所列的五种描述性类别之一，可以定性评价检验有效性。依据专业判断和专家意见来指定各个类别。针对一个已经均匀内腐蚀的容器来说，表 70 举例表明了每个分类

的具体情况。

表 70 五种效果分类

定性检验有效性分类	均匀腐蚀示例
高度有效 检验方法几乎能正确地识别每种情况的预测在役损伤（99%）	目视检查整个内部情况，并结合超声测厚，以此来评价均匀腐蚀
通常有效 在大部分时间内，检验方法将正确地识别实际损伤状态（70%）	目视检查部分内部情况，并结合超声测厚，以此来评价均匀腐蚀
一般有效 在约一半时间内，检验方法能正确地识别真实损伤状态（50%）	通过外部定点测厚超声测厚来评价均匀腐蚀
效果差 检验方法将提供很少的正确识别实际损伤状态的信息（40%）	通过锤击试验、检漏孔来评价均匀腐蚀
无效 检验方法不提供或几乎不提供正确识别实际损伤状态的信息（33%）	通过外部目视检查来评价均匀腐蚀

9.2.2.3 量化检验效果

为了以定量的方式来表达检验对失效可能性的影响，有必要建立一种方法，将以上定性分类转换成对检验效果的定量测量。采用的方法按技术模块（见 8.3.1）中的实例而定。其目的是要表达检验是如何有效地正确识别被检设备的损伤状态。如果将损伤状态考虑成是三个分类之中的一个分类，则会简化这个方法。对每个技术模块来说，分类的严格定义各有不同，但下面提供了一个同类说明，用于重复说明第 8 章所采用的均匀腐蚀实例。

所采用的方法利用了贝叶斯定律（见 8.3.1.4）。可以有效地利用该定律来定量处理基于专家意见的那些信息。需要更新这些意见时，要根据一些试验进行更新，而试验本身则不能决定。贝叶斯定律可以再一次证明有效。定性分类的检验有效性是利用贝叶斯定律更新技术进行量化的。

表 71 损伤状态类别的同类说明

定性检验有效性分类	均匀腐蚀示例
损伤状态 1 对设备的损伤并不比基于损伤速率模型或经验所预料的更差	如果没进行过检验，则均匀腐蚀速率小于或等于过去的检验记录或历史数据所预测的速率（0 倍～1 倍）
损伤状态 2 对设备的损伤比预料的更差。该损伤等级有时可在类似设备中可看到	均匀腐蚀速率是预料速率的两倍（1 倍～2 倍）
损伤状态 3 对设备的损伤比预料的“差的多”。该损伤等级在类似设备中罕见，但有时在行业范围内观察得到	腐蚀速率是预测腐蚀速率的四倍（2 倍～4 倍）

首先考虑“高度有效”定性分类。适合这一分类的检验方法仅在少数实例中不能识别损伤状态。如果采用这种技术来检验一个设备，则可能的损伤状态将比检验结果显示为 1%或更低（即通过进一步分析，只有百分之一的检验会显示损伤状态为“更差”）的可能损伤状态“更差”（状态 3）。“高度

有效”定性检验分类属于损伤状态 3 的定量效果赋值是 0.01。因此，在 99% 的情况下，设备的实际损伤状态均属于状态 1 或状态 2；在 90% 的情况下，实际损伤状态是检验方法所显示的状态；剩下的 9% 的损伤状态则比检验所显示的状态（状态 2）“更差”。

如果检验方法被认为“无效”，则根据贝叶斯定律更新法，至少根据该检验方法的结果，一种损伤状态与另一种损伤状态一样都可能会发生。在这种情况下，每一损伤状态的定量效果值都是 0.33。以此为指导，如果认为该方法只稍稍好于完全无效，则预测实际损伤速率的可能性将稍高于 0.33，并且 4 倍于损伤速率的可能性将稍稍低于 0.33。根据上述专家意见，可以进一步修正这些值，并使其与以前的预测相一致。

表 72 给出了上述每一实例的定量效果值，加上位于通常有效、一般有效和有效性差之间的其他检验分类。

这些值可用于 8.3.1 所述的基于贝叶斯方法的检验更新。

表 72 定量检验效果——检验有效性确定实际损伤状态的可能性

损伤状态分类	高度有效	通常有效	一般有效	有效性差	无效
状态 1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.33
状态 2	0.09	0.2	0.3	0.33	0.33
状态 3	0.01	0.1	0.2	0.27	0.33

9.2.3 检测到缺陷的概率

检验技术在其精度上各有不同，这取决于操作者的技能和试验条件。可以通过对不同尺寸的已知缺陷进行重复检查并记录结果来测量精度。以这种循环方式进行的实际试验反映了检测一个试样块上的缺陷的可能性。当应用于在役装置检验时，这些数据则受到一定的限制，因为它们是建立在舒适的实验室环境中，对预制的试样块进行检验的基础上。但是它们提供了两条很重要的信息：

- 它们建立了检测的概率（POD）。即便在受控条件下，无损探伤的应用受到限制，但随着缺陷尺寸的增大，检出缺陷的概率也随之增加。
- 它们建立了可以预测最大检验效果的基础。对“真实世界”可能性的检测也许会接近这个效果，但则不可能希望超过这个效果。

一些机构已经厌倦了以这种循环方式试验来量化检测的可能性：

- Nordtest in Europe（北欧技术测试合作组织）[超声检查（UT）、磁粉探伤法 MPI（MT）和射线检查（RT）]。
- PISC（意大利）。
- ERPI（美国）。
- CIPS USA（UT—核电应用）。
- Nippon Steel Japan（MPI）。
- US—海军（UT 和 RT—潜艇）。

由这类试验产生的 POD 曲线图如图 26 所示。三参数威布尔分布图已经被拟合到该数据中。

如 9.2.2.1 关于检验有效性的讨论一样，如果还有可用的、足够详细的有关损伤状态分布方面的信息，则可以通过极限值分析把这些 POD 数据用于检验效果的定量评价。

可用时，POD 数据还有助于指定一些检验方法，把其用于适当的检验效果分类。

9.2.4 查找损伤的时间（时间间隔）

如 8.1 及前面各章节所述，通过组合基于风险检验的四个因素来确定检验频率：

- 损伤机理和损伤最终类型（开裂、减薄等）。
- 损伤的进展速率。

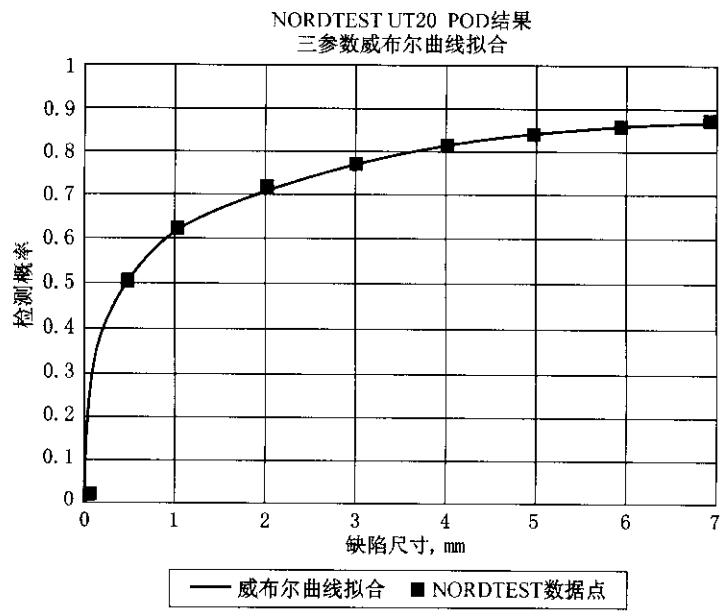


图 26 超声检验的 POD 曲线

- c) 设备对损伤类型的耐受性。
 - d) 利用检验方法来检测损伤的概率，并预测未来的损伤状态。
- 把频率选做设备剩余寿命的某个分数。剩余寿命被定义为 [见式 (23)]：

$$T_{\text{剩余寿命}} = \frac{W_{\text{损伤容差}}}{V_{\text{损伤速率}}} \dots\dots\dots (23)$$

有关 8.3.1 所述的均匀腐蚀的简单示例，根据 SY/T 6552 中的经验公式得出：

容器	常压塔顶贮液器
材料	SA285 - Gr. C
壁厚	9.525m (3/8in)
设计压力	344.75kPa (50psig)
腐蚀裕量	4.7625mm (3/16in)
直径	1.9812m (6ft 6in)
设计腐蚀速率	0.254mm/年 (10 密耳/年)
服役年限	6 年
预先检验数据	无

图 27 显示出了一个更为复杂的渐进损伤实例。对于一台有一定承载功能的设备来说，其设计寿命所需的强度通常大于某一安全系数规定的载荷。损伤机理开始以渐进的方式减弱该设备。对于这个示例，我们假设，在一些情况下已经观察到对类似设备的损伤以更快的速度发展（下部短线），而在另一些情况下进展速度则慢一些（上部短线），同时观察到某一平均速率（两条短线之间的实线）。此外，在施加载荷时有一些波动，这以点线来表示。

前几次失效都发生在存在最快速损伤状况的地方，这与施加的最大载荷相重合。一台“平均”设备保持不变，直到平均损伤进程导致与平均载荷相对应的强度的降低。这说明“平均”失效。少数设备显示了较低的损伤增长率，并且也经历了施加的低载荷。这几台少数设备的持续时间最长。通过识别损伤增长率的不确定性、设备对损伤的耐受性以及施加的载荷，把设备寿命看做是随时间而增加的失效可能性。检验提供了“看庄家牌”的机会，也就是精确地确定一特定设备处于损伤进程的某个时间点位的机会。这样，就可以根据高速率或低速率损伤进程来估算“实际”失效可能性。然后，根据

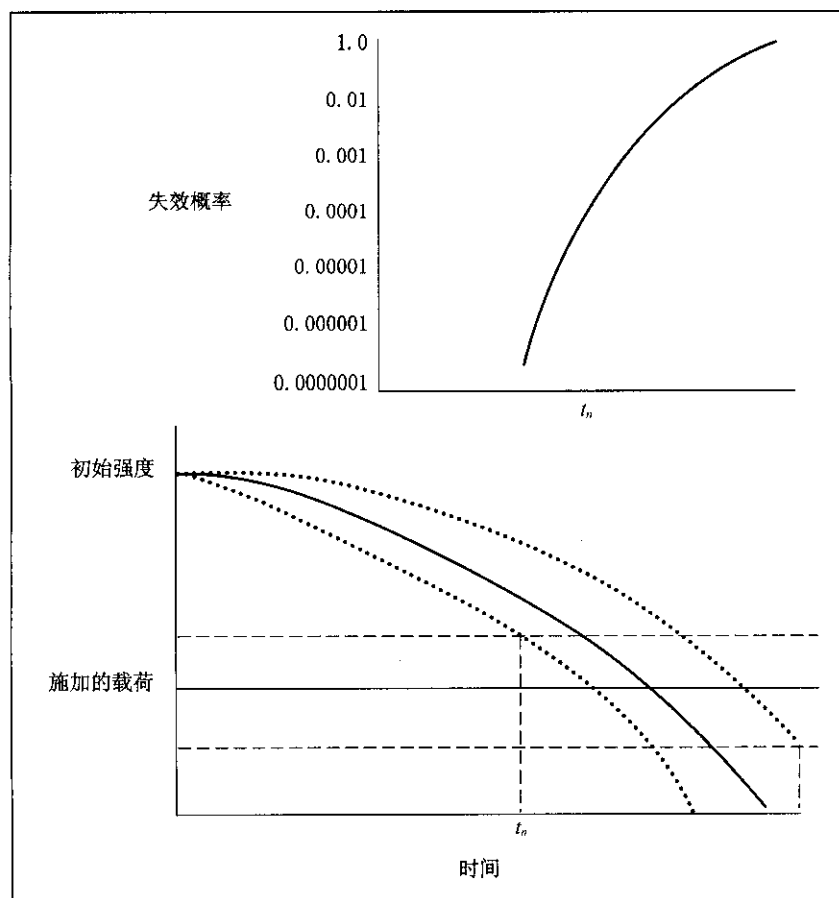


图 27 随时间而变的失效概率

这个新信息来做出该设备是继续服役，还是予以更换的决定。

9.3 通过检验来降低风险

根据 9.2 的检验程序编制指南来制定本节，并且引入了第 8 章所示的检验工具，以展示通过检验来降低风险的情况。

9.3.1 度量现有检验系统的相关风险

为了通过检验程序来评价风险降低情况，应测量与现有程序相关的风险。给定已经对设备进行检验的检验等级，根据第 8 章存在不同损伤状态的可能性，对失效可能性进行量化。这被用做利用不同技术或频率来评价不同程序的一个起点。本节重复利用第 9 章的实例来图解这一方法。

在本案例研究中，6 年后进行了一次“通常有效”检验。对于下面的分析，假设检验反映的实际腐蚀为 0.127mm/年（5 密耳/年）；预测腐蚀速率为 0.254mm/年（10 密耳/年）。利用表 73，以下步骤显示用于风险评价的损伤次因子的计算方法：

步骤 1：计算 $a \cdot r/t$ 的比：

这是设备服役年限（或当前服役时间） a 乘腐蚀速率 r （密耳/年），再除以原始厚度（或设备投入当前服役时的厚度） t 。

例如：0.127mm/年（0.005in/年），6 年服役年限，原始厚度 9.525in（0.375in）； $a \cdot r/t = 6 \times 0.005/0.375 = 0.08$ 。

步骤 2：确定超安全标准设计（保险设计）因子：

从表 73 中选取的一个修正因子，它将被用于损伤次因子。该修正是必要的，因为选自该表的次因子基于一个有 25% 壁厚腐蚀裕量的容器，而在本实例中，容器壁厚的腐蚀裕量为 50%。具有

表 73 损伤次因子

检验次数	0	1				2				3				4				5				6			
$a \cdot r/t$	无效	检验有效性				检验有效性				检验有效性				检验有效性				检验有效性				检验有效性			
		有效性差	一般有效	通常有效	高度有效	有效性差	一般有效	通常有效	高度有效	有效性差	一般有效	通常有效	高度有效	有效性差	一般有效	通常有效	高度有效	有效性差	一般有效	通常有效	高度有效	有效性差	一般有效	通常有效	高度有效
0.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0.04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0.06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0.08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0.10	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0.12	6	5	3	2	1	4	2	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0.14	20	17	10	6	1	13	6	1	1	10	3	1	1	7	2	1	1	1	5	1	1	1	1	1	
0.16	90	70	50	20	3	50	20	4	1	40	10	1	1	30	5	1	1	1	20	2	1	1	1	1	
0.18	250	200	130	70	7	170	70	10	1	130	35	3	1	100	15	1	1	1	70	7	1	1	3	1	
0.20	400	300	210	110	15	290	120	20	1	260	60	5	1	180	20	2	1	1	120	10	1	1	6	1	
0.25	520	450	290	150	20	350	170	30	20	240	80	6	1	200	30	2	1	1	150	15	2	1	7	1	
0.30	650	550	400	200	30	400	200	40	4	320	110	9	2	240	50	4	2	1	180	25	3	2	10	2	
0.35	750	650	550	300	80	600	300	80	10	540	150	20	5	440	90	10	4	1	350	70	6	4	280	40	
0.40	900	800	700	400	130	700	400	120	30	600	200	50	10	500	140	20	8	1	400	110	10	8	350	90	
0.45	1050	900	810	500	200	800	500	160	40	700	270	60	20	6000	200	30	15	1	500	160	20	15	400	130	
0.50	1200	1100	970	600	270	1000	600	200	60	900	360	80	40	800	270	50	40	1	700	210	40	40	600	180	
0.55	1350	1200	1130	700	350	1100	750	300	100	1000	500	130	90	900	350	100	90	1	800	260	90	90	700	240	
0.60	1500	1400	1250	850	500	1300	900	400	230	1200	650	250	210	1000	450	220	210	1	900	360	210	210	800	300	
0.65	1900	1700	1400	1000	700	1600	1105	670	530	1300	880	550	500	1200	700	530	500	1	1100	640	500	500	1000	600	

注 1: 找到带有计算 $a \cdot r/t$ 的值或下一较高值的行, 或者在行之间使用插值。
注 2: 确定最高检验有效性的检验次数的相应栏下的次因了。

注 1: 找到带有计算 $a \cdot r/t$ 的值或下一较高值的行, 或者在行之间使用插值。

注 2: 确定最高检验有效性的检验次数的相应栏下的次因子。

较大腐蚀裕量的容器就具有一个较低的损伤次因子，而具有较小腐蚀裕量的容器壁厚的腐蚀裕量则为50%。具有较大腐蚀裕量的容器应该具有一个较低的损伤次因子，而具有较小腐蚀裕量的容器则应该具有一个较高的损伤次因子。

例如，原始壁厚 = 9.525mm (0.375in)

腐蚀裕量 = 4.7625mm (0.1875in)

$$t_{\text{实际}} / (t_{\text{实际}} - \text{腐蚀裕量}) = 0.375 / 0.1875 = 2.0$$

从表 73 中选择的保险设计因子是 0.5；即损伤次因子乘以 1/2（对大于 1 的次因子而言）。

步骤 3：从表 73 中找到该容器的损伤次因子。在一次（任何效果）检验中并且 $a \cdot r/t = 0.08$ 时，损伤次因子为 1。

步骤 4：将步骤 3 的结果乘以步骤 2 的结果。

9.3.2 备选检验程序的评价

需要对以下四个计划可选检验程序进行检查：

计划 1：继续每三年进行一次“通常有效”检验。该检验包括与一次部分内检测相组合的定点测厚读数。

计划 2：继续“通常有效”检验，但将检验周期延长到 6 年。

计划 3：换成每六年一次的“高度有效”检验。该检验涉及一次广泛的内检验，这包括一些厚度测量。

计划 4：每三年只进行一次外部超声点检验厚度（“一般有效”）。

应根据以上这四个计划对风险的影响来对检验程序进行评价。由于这四个检验计划的失效后果是相同的，所以为了评价相互间的计划，只需要对损伤次因子进行比较。可以把与计划相关的风险与其他容器的其他计划相比较，然后根据下一节所述的风险确定优先排序。

首先对计划 1 进行评价。如在表 74 中所见，当前时间（第一次检验后）的损伤次因子为 1。下一步是确定与该计划有关的每个未来时间点的损伤次因子。对计划的评价基于这样的假设——将来的检验结果与上次检验结果没有很大的差别。当确实存在差别时，则需要按本条所述的相同方式对计划进行重新评价。

计算计划 1 检验次数的 $a \cdot r/t$ 比。这些次数是从当前的容器服役年限（6 年）开始所进行的每三年一次的检验。分别计算出 9 年（0.12）、12 年（0.16）、15 年（0.20）和 18 年（0.24）的比率。在计划 1 的下一次检验时，容器的服役年限将是 9 年，并在计划检验之前刚刚检验过一次。找到一次检验案例（通常有效）的损伤次因子和 $a \cdot r/t = 0.12$ 。该损伤次因子为 1。将来的检验重复这一过程。结果见表 74。

表 74 检验结果

年限（容器服役年限）	$a \cdot r/t$	检验次数	损伤次因子
6 年（起点）	0.08	1	1
9	0.12	1	1
9	0.12	2	1
12	0.16	2	2
12	0.16	3	1
15	0.20	3	3
15	0.20	4	1
18	0.24	4	1
18	0.24	5	1

可以看出,在所检查的整个检验期间,损伤次因子一直保持接近于1。对计划2、计划3和计划4也以类似方式进行评价。表75显示出了四个检验程序的损伤因素。

计划1和计划3在整个检查期都保持较低的损伤次因子水平,而计划2和计划4都没有进行足够充分有效的检验来排除一个重要概率,即腐蚀速率超过观察到的5密耳/年。计划1和计划3所涉及的检验类型的成本差别不大,因为这两者都涉及到内部进入。计划3被选为更经济型方案,因为它所涉及的活动较少,并且损伤因子和此后的风险等级,都不会与计划1有显著的不同。

表 75 四个检验计划的损伤因子

年数	检验前/后的损伤因子				损伤因子注解
$(a \cdot r/t)$	计划 1	计划 2	计划 3	计划 4	
6 (0.08)	1	1	1	1	四个计划开始时相同
9 (0.12)	1/1			1/1	1/1 表示检验前/后的损伤因子相同
12 (0.16)	2/1	10/2	2/1	10/5	在检验前,计划2和计划4开始显示较高的损伤因子
15 (0.2)	3/1			30/10	计划4没有进行足够的检验。腐蚀速率置信水平没有超出存在较高腐蚀速率的可能性
18 (0.24)	1/1	15/3	1/1	15/8	计划2没有进行足够的检验。腐蚀速率置信水平没有超出存在较高腐蚀的可能性

9.3.3 优化检查程序

上述是采用基于风险的检验工具来评价检验程序的实例,该示例表明如何通过以下措施来优化检验计划:

- 当风险降低水平不够高时,增加检验等级或者频率。
- 当较高的检验等级不能达到降低风险的结果时,降低检验等级或者减少频率。

以下是可用于程序优化的一般指南:

- 通过适中范围的检验活动,通常可以使损伤因子保持在接近1的水平上。通常可以避免损伤因子值超过10。
- 当对以前的一个未基于风险的检验程序进行首次评价时,计算的损伤因子可能会大于10。显示这些较高值的设备应排在检验优化的首要位置。在该组设备中,应首先对风险最高的那些设备进行评价。
- 已经经过多次检验,并且已经确认损伤速率低的那些设备可以不做检验。可以通过确定风险影响的技术模块,对减少检验活动或频率的那些可选方案进行评价。在这组设备中,应首先对风险最低的那些设备进行评价。
- 损伤速率(如技术模块所表示)极其不确定的设备需要进行频繁且彻底地检验,以使其保持较低的风险等级。至少要在建立足够的运行业绩之前使其保持较低的风险等级。
- 因腐蚀或其他恶化而正在接近其寿命终点的设备,需要增加检验次数以确信其没有超出恶化范围(如腐蚀裕量)。一旦剩余寿命已经耗尽,增加检验次数也不会降低损伤因子。
- 检验程序可选方案对设备预计剩余寿命的相当大部分,至少一半以上加以规划。如果检验次数不够,则损伤因子可能随时间的延长而增加。

表 76 汇总了这些指南。

表 76 对降低和优化风险的检验程序进行评价

步骤 1	基准风险评级	对当前的系统进行风险评级
步骤 2	降低风险	从最高风险项目组中选择那些因高损伤次因子而具有高失效可能性的项目。评价可选检验计划以降低风险，并执行选定计划
步骤 3	检验优化	从最低风险项目组中选择那些因低损伤次因子而具有低失效可能性的项目。评价可选检验计划，以找到保持低风险所需的最佳检验次数

9.3.4 按良好材料标识排列设备优先顺序指南

基于风险的检验为评价各种“假如……，会怎么样”的情景提供了一种强有力的工具。例如，一个计划可能希望评价以下情形：

- a) 如果提高工艺温度会怎样？
- b) 如果改变炼油进料会怎样？
- c) 如果在建造或修复中因疏忽而使用了不适当的建材会怎样？

在这些例子中，当对用于建造或修复的材料的质量控制产生质疑时，最后一个例子尤其令人感兴趣。如果在材料进货和存放时没有极谨慎地识别和标记材料，则会轻易地偶然使用看起来是正确材料的那些不适当的材料。这种看起来相像的混淆材料一般是用碳钢制造的，其中含有低合金钢材料；而用不锈钢制造的材料中则含有镍基合金材料。

基于风险的检验有助于对那些质疑的、看起来相像的混淆材料进行优先排序。RBI 将根据混淆材料的性质来确定那些最容易失效的设备，并采用失效后果及可能性按风险秩序对这些设备进行排序。允许以与 RBI 管理原则相一致的方式执行良好材料标识（PMI）程序。

步骤 1：初步评价。

实施 PMI 优先排序方案始于工作启动之前，这要求对候选区域和设备类型或部件进行认真评价：

- a) 是否存在任何建造或修复项目，是否特别质疑其中的材料质量控制过失？
- b) 是否存在已知材料混淆的情况，是否可能对在相同条件下制造或修复的其他设备产生质疑？
- c) 混淆是否与某特定部件相关，如焊接材料、一批锻造管件或特殊铸件？

显然，对于综合性 PMI 程序来说，诸如此类的情况都将是很好的候选对象。

步骤 2：识别特定混淆情况（如果可能）。

PMI 优先排序过程的下一步是识别哪些是已知或怀疑已发生的混淆类型。例如，是否使用了等级不对的低合金材料（如使用了 1½ 的铬钢，而规格要求则是 2½ 的铬钢）？或者是否使用了错误等级的高合金材料（即使用了 316 不锈钢，而规格则要求使用 20 号合金）？或者你并不能确定可能使用了什么材料，但却知道或怀疑已经造成了混淆。

步骤 3：识别将对错误材料造成影响的损伤机理。

使用一种规定用于特定伺服目的以外的材料，经常会导致在役损伤速率的增加。这类混淆还可能导致一些损伤类型，这与设计所允许的那些损伤类型不同。举例如下：

- a) 高温氢蚀：使用指定材料以外的碳钢或低合金钢会导致较高的侵蚀率。
- b) 硫化腐蚀：使用指定材料以外的碳钢或低铬含量钢会导致腐蚀增加。
- c) 酸性腐蚀或其他特定环境腐蚀：许多高腐蚀性环境都采用耐腐蚀的高合金钢或者非铁基合金。

使用错误等级的材料可能会使腐蚀速率大大高于期望腐蚀速率。

应力腐蚀开裂：使用奥氏体不锈钢来代替镍合金钢可能导致应力腐蚀裂纹，而使用指定材料则不会出现这种情况。

氢效应：使用错误等级的材料会导致各种问题，包括硬焊缝热影响区开裂，或者板材发生鼓泡。

步骤 4：“假如……，则怎样”分析。

利用本标准所述的 RBI 工具来进行“假如……，则怎样”分析。采用适当的技术模块来评价质疑设备的损伤机理（按步骤 3 所规定的）。确信输入资料、腐蚀速率、裂纹敏感性等都是针对“错误”材料，而不是针对指定材料的。倘若你不能肯定可能已经误装了什么材料，建议采用最坏案例进行“假如……，则怎样”分析，如在受高温氢蚀的系统中代用碳钢。根据所涉及的实际情形，可能计算出用于所有研究设备的高技术模块次因子。然而一些因素可能比其他次因子影响程度更高些，并且与一些装置有关的后果也比其他设备的后果影响程度更高。这首先为基于最高风险设备的评价产生一个基于风险的评级。

步骤 5：PMI 过程。

良好的材料标识可以利用一些工具来识别错误材料。如果怀疑混淆情况是铁素体不锈钢材料代替奥氏体不锈钢，只需用一块磁铁就可以快速筛选这种混淆。其他工具包括 X 射线荧光灯，用来分析较重元素如铁、镍、铬、钼等的大致含量。在需要更高精度的其他场合，现在可以买到现场便携式光学发射光谱仪（OES）。这些仪器可以分析较轻元素，尤其是碳含量，以识别是否使用了正确等级的钢材。当怀疑混淆涉及到焊接材料时，射线照相可以在不拆开所有保温层的情况下定位保温管的焊缝。

PMI 所采用的确切方法和所要求的试验范围取决于特殊情形，并且超出了本标准的范围。

9.4 完成检验计划的方法

这是完成检验计划的许多可能方法之一。该计划方法对不同损伤机理采取不同措施（根据必要性）。例如，一个减薄机理暗示一个设备的有限寿命，在这个寿命期间应进行检验。在检查、发现和修补应力腐蚀裂纹时，不必暗示设备所具有的固定剩余寿命。

9.4.1 方法——减薄机理

$a \cdot r/t$ 检查表所隐含的是一个剩余寿命。若对设备进行 4 次或者更多次“高度有效”检验时，损伤因子仍为 10 或者更高，设备即处于或接近其寿命终点。换言之，已经进行了足够多的检验，并获得了相对确定的腐蚀速率，并且额外检验不会对损伤因子有进一步的改善。该检验计划方法解决了这个点 [在修正压力和腐蚀裕量的情况下， $a \cdot r/t = 0.4$ （大致）] 发生时的年数。当该值是一年或少于一年时，就会调用一个“诊断”模块来发出一个基于输入腐蚀速率、伺服服役年限和检验次数，以及设备已经处于或接近其寿命终点的警告。建议认真地检查设备状态数据和/或确认设备状态。

当剩余寿命大于一年时，要确定所需的检验次数，以获得有关设备剩余寿命期间腐蚀速率的高置信水平。表达方法是：无论过去已经进行了多少次检验，无论检验效果如何，都假设这是该装置的“理想”检验类型。根据以下关系，检验次数可以被轻易地换算成一个效果不同的当量检验次数：

一次“高度有效”检验相当于两次“通常有效”检验，相当于 4 次“一般有效”检验。

除了内部减薄外，如果 CUI 可用的话，则每个机理的目标损伤因子被设为 5，以便组合机理不会导致损伤因子大于 10。

9.4.2 方法——应力腐蚀开裂

确定当前的技术模块次因子。如果它小于 10，则使用 SCC 模块“自动修正”因子 = 1.1（自上次检验以来的年数），以确定年数，直到 TMSF 达到 10 为止。作为缺省作法，那时进行一次“一般有效”检验，作为对 SCC 条件的检查。

如果当前的 TMSF 大于 10，则使用表 77 中的关系来确定所需的检验等级。

建议在上次检验后三年内进行一次检验，或如果三年已经过去的话，则应尽可能早地进行检验。

9.4.3 方法——炉子的检验计划

第一部分：长期损伤：

如果当前的 TMSF 小于 10，增加 t （运行小时）为 10000（~1 年），直到 TMSF 达到 10。则增量数即是下次检验的时间， $T_{\text{检验}}$ 利用表 78 来确定检验要求。

如果当前的 TMSF 大于 10，利用以下关系来确定所需的检验等级：

建议检验在上次检验的三年内进行，或如果三年已经过去的话，则尽可能早地进行检验。

第二部分：短期损伤：

对短期损伤 $TMSF$ ，采取下述措施。

表 77 检验等级和技术模块次因子之间的关系

当前 SCC $TMSF$	推荐的检验等级
$10 < TMSF \leq 100$	进行“一般有效”检验
$100 < TMSF \leq 1000$	进行“通常有效”检验
$1000 < TMSF$	进行“高度有效”检验

表 78 $TMSF$ 小于 10 的炉子的检验间隔期

$T_{\text{检验}}$ ，年	检验方法	检验时间
≥ 20	一般有效	5
	通常有效	10
	高度有效	20
≥ 10	一般有效	3
	通常有效	6
	高度有效	12
≥ 5	一般有效	不允许
	通常有效	3
	高度有效	12
< 5	一般有效	不允许
	通常有效	不允许
	高度有效	$T_{\text{检验}}$

表 79 $TMSF$ 大于 10 的炉子的检验间隔期

当前炉子 $TMSF$	推荐的检验等级
$10 < TMSF \leq 50$	进行“通常有效”检验
$50 < TMSF \leq 500$	进行“高度有效”检验
$500 < TMSF$	进行“高度有效”检验并进行剩余寿命评价

9.4.4 方法——高温氢损伤 (HTHA)

对 HTHA 来说， $TMSF$ 可能表明损伤已经发生，或者表明损伤敏感性。根据 $TMSF$ ，采取表 81 所列的措施。

表 80 短期 $TMSF$ 所要求的措施

短期 $TMSF$	措施	换成长期检验频率
$10 < TMSF \leq 500$	进行日常目视检查和燃烧器修正	无变化
$500 < TMSF \leq 1000$	进行日常目视检查和燃烧器修正	频率增加 1.5 次

表 80（续）

短期 TMSF	措施	换成长期检验频率
$1000 < TMSF$	进行热红外照相或加贴蒙皮热电偶。 进行日常目视检查和燃烧器修正	频率增加 2 次

表 81 HTHA 要求的措施

TMSF	措施或检验	频率
10000	通过尽可能早地（ASAP）适当修复进行工程评价	尽可能早（ASAP）
2000	“通常有效”检验	3 年
$500 \leq TMSF < 2000$	“通常有效”检验	6 年
	“一般有效”检验	3 年
$100 \leq TMSF < 500$	“通常有效”检验	12 年
	“一般有效”检验	6 年
$10 \leq TMSF < 100$	“通常有效”检验	20 年
	“一般有效”检验	10 年
$TMSF < 10$	不检验	无

10 工厂数据库结构

10.1 RBI 分析所需的信息

定量 RBI 分析需要对每台需要评价的设备的设计、制造、服役条件和检验程序进行完整的说明。为了保证分析结果的准确性、可再现性和每次评价的一致性，应对分析中使用的每项数据做出明确的定义。所有数据采集工作应由训练有素且知识丰富的人员来完成。

定性分析所需的数据量并不太多，精度要求也不是很高。如果所采集的数据均采用一致定义，则所收集的用于定性分析的信息就可以成为以后定量分析的基础。

数据表附在本章之后。它们举例说明了一些设备。在收集 RBI 分析所需信息时可以参考这些资料。完整的数据表共有四项，每个设备都要求有一个填好的数据表。10.2 讨论了如何使用数据表，并给出了数据条目的定义，这有助于进行标准化分析。10.2 也列出了建议的有关该数据的出处。

在有些情况下，对可能的响应予以分组，即称为“分类”，用以说明正在评价的条件和特征（如 <10 ， $10 \sim 30$ ， >30 等）。这类分类的建立简化了数据采集工作，并提高了评价的一致性。

样本数据表可以提供多数评价所需的全部信息。但在某些情况下，对一个特定损伤机理进行评价可能还需要一些其他数据。当需要这样的输入时，该损伤机理的技术模块应规定数据要求。

可以为要进行的评价特别编制和发布专用数据表。这类数据表应包含所有预计损伤机理数据，并省略样本数据表上所有不适用的条目。

假设使用计算机来进行正常的 RBI 分析。本章中有一些允许对 RBI 进行正确编程的协议。应遵循协议所制定的方法，以便正确地进行计算机分析。

10.2 RBI 数据表的组成单元

RBI 数据表（见本章末）由以下六个部分组成：

- a) 标题——具体设备说明和有关主要数据源的清单。
- b) 通用信息——适用于评价的所有设备的信息。该部分只需要填写一次。

- c) 机械信息——规定设备的设计和制造方面的数据。
- d) 工艺信息——关于工艺、工艺流体和工艺条件对设备的影响方面的信息。
- e) 检验/维护信息——设备的重大监测和维护历史汇编。
- f) 安全系统信息——用来保护设备的任何监测装置和/或减缓装置的记录。

下面说明以上每一部分所要求的数据条目，下面各条括号中的数字与数据表中的数字相对应。

10.2.1 标题

10.2.1.1 设备编号 (1)

在整个 RBI 分析中，设备号是一个设备的主要标识符号。只要可能，就应使用工厂指定的设备编号。如果没有设备编号（如管段），则应建立一个编号体系，并对每个设备指定一个独有的号码。例如，有些设备需要有一个后缀来构成完整的标识，以区分换热器的壳体和管程侧。下面列出了这些后缀的例子。在特殊情形下，可能需要其他项目。

换热器—壳程	EXXX - S
换热器—管程	EXXX - T
换热器—多程	EXXX - 1……n
塔顶	T - XXX - TOP
塔底	T - XXX - BTM
反应器—运行	R - XXX - OP
反应器—再生	R - XXX - REG

应当单独列出正常在线的和正常运行的每类设备。例如，当装置有两个塔式再沸器，并且这两个设备都正常服役时，那么这两个交换器就应分别记录为单独设备。另一方面，当其中一个换热器是作为备用而安装的，并且没有正式运行时，那么就应只列出一个设备。

10.2.1.2 分类 (2)

应对每个设备指定一个分类，该分类的通用失效频率值是可用的。通用数据适用于表 82 所列的设备分类。应记录能够最贴切地描述被评价设备的分类名称。

表 82 设备分类

类 别	设备列表
Column	蒸馏塔、吸附塔、洗涤塔和类似容器
Compr - 1	离心式压缩机
Compr - 2	往复式压缩机
Filter	标准型过滤器和精滤器
Fin/Fan	翅片/风扇式换热器
HX - Shell	冷凝器、再沸器和其他换热器的壳体
HX - Tube	冷凝器、再沸器和其他换热器的管箱侧
Pipe	管道，用于任何应用场合
Pump - 1	单密封离心泵
Pump - 2	轴向/双密封离心泵
Pump - 3	往复泵
Reactor	反应容器
Tank	储罐
Vessel	压力容器，用于任何应用场合

10.2.1.3 说明 (3)

应足够详细地说明设备,以便使可能不熟悉工艺的分析人员能够清楚地识别各种设备。当装置通常所用的术语表能足以描述设备时,应当使用该术语表(如脱丁烷塔、分离器回流泵、乙烷进蒸发器)。有时可能需要扩充装置术语表。

对于管道,推荐采用“从……到……”这样的描述(如从 V-402 至 P-411)。说明书中至少应包括一个设备编号,以便于在 P&ID 图上定位管段。

10.2.1.4 设备数 (4)

假设每个运行设备都按设备项编号规定(见 10.2.1.1)单独列出,则该输入项一般会为 1.0。

当受设备的运行工况、设备设计或物理尺寸所限,需要按两个或更多个分段系统来更好地表达一个系统时,应做例外情况。例如,当一个反应容器被交替用于其反应功能和催化再生功能之间,而且这两种运行工况之间的功能差别很大时,该容器就应被看做是两个分段系统。应根据其自身的运行工况、故障潜在性等,对每一分段进行单独分析。容器在每种服役条件中的时间分数将确定各分段系统设备号的输入项。两个输入项之和应等于 1.0。

蒸馏塔经常被当做两个或多个分段系统来对待。当塔的各个分段具有不同直径或是用不同建造材料建造时,每个部分都应被作为单独部分来对待。塔身每个部分的总长度的分数将确定设备数的输入项。

即便塔具有统一的直径和材料,但如果塔顶和塔底之间的运行温度差值超过 50°F (28°C),也应被当做两个半塔部分来对待。该量级的温度差会使塔顶和塔底的流体组分产生显著的差别,从而可能对后果计算、损伤机理发展速率等造成影响。

10.2.1.5 PID 号 (5)

备有工艺和仪表图时,应记录包括主体设备在内的 PID 号。在分析期间,该信息可能有用。

10.2.1.6 PFD 号 (6)

备有工艺流程图时,应记录包括主体设备在内的工艺流程图号。

10.2.1.7 流体号 (7)

工艺流程图通常标记主要工艺流体并提供有关流体组成、状态、流速等方面的信息。当该信息可用时,应记录 PFD 上显示的流体名称。

对于有多种流体流入/流出的设备,应记录流入或存量部分的代表性流体。

10.2.2 通用信息**10.2.2.1 项目 (8)**

该输入项是为确定项目而设定的。应使用项目名称、项目号、电脑文档号或任何适当的标识符号。

10.2.2.2 装置条件 (9)

该输入项考虑了被评价设施的现有条件。8.3 给出了要考虑的因素和四个分类的定义。应在代表合适分类的字母上划圈。

10.2.2.3 冬季的日低温 (10)

该值被用来确定是否对寒冷天气下的运行补偿进行评价。采用最冷月份期间装置现场的平均日低温值来确定补偿的大小。应使用该现场的气象记录来确定平均日低温值(可用时)。如没有气象记录,应与当地气象局联系,通过从相邻地区外推数据或与装置人员交谈来确定平均温度。

10.2.2.4 地震活动 (11)

即使装置是按相关标准设计的,但位于地震活动区的装置比位于这类区域以外的设施具有更高的失效可能性。关注程度与地震可能性相关,而地震则是通过地震带表示的。

应记录装置所处的地震带。

10.2.3 机械信息

这部分提供有关所有设备的设计和制造方面的信息。8.3 提供了更详细的资料来帮助完成数据表的填写工作。

度量单位 (in, mm 等) 应标在合适的位置。在一般情况下, RBI 计算书都是用英制单位来设计的。

10.2.3.1 厚度 (12)

应记录原始壁厚。

如果设备很高 (长), 而其各个部分的壁厚又不一致, 就像蒸馏塔那样的情况, 则应把该塔分成几个部分 (即塔顶、塔底等), 并记录每个部分。

10.2.3.2 长度 (13)

记录设备物理尺寸的主要目的是可以计算设备的体积, 因而可以计算工艺存量。在测量结果方面并不要求高精度, 重要的是各设备项上保持一致性。

表 83 包括若干个简化的假设, 以便尽可能地减少数据收集工作所需的各种资源。

表 83 设备的长度

设备类型	测量项
压力容器	圆柱段的长度, 不包括封头
塔器	被当做一个单一设备的、具有统一直径的塔器的总长度, 不包括封头
	被当做两个半塔部分的、具有统一直径的塔器的总长的一半, 不包括封头
	具有变径部分的塔器特定段的长度。包括具有较大直径部分的过渡段
换热器—壳程	长度, 不包括管箱及封头
换热器—炉管	管箱长度加上壳内的管长
泵和压缩机	零 (简化认为这些设备的存量为零)
储罐	高度
配管	管段的总长, 包括所有支管

10.2.3.3 主要口径 (14)

见表 84 的设备类型和测量项。

表 84 设备的主要口径

设备类型	测量项
容器, 塔器	内径
换热器—壳程	对于有统一口径的壳程来说, 是指内径; 对于釜式换热器等, 垂直于长度的最大尺寸; 对于套管, 是指外管的直径
换热器—管程	对于套管, 是指内管的直径; 对于所有其他类型的换热器, 是指管箱直径 (注: 在体积计算中, 补偿管束直径的无管部分)
泵、压缩机	零
配管	公称直径

10.2.3.4 其他直径 (15)

这个部分仅用于具有非统一直径的换热器壳程, 如釜式换热器, 需要记录管箱直径。

10.2.3.5 塔盘数 (16)

蒸馏塔的塔盘数用于计算塔的体积存量。按两个单独分段来分析具有统一直径的塔器时,可以假设每个分段均有一半(1/2)数量的塔盘。对于变径分段的塔器来说,应记录每个分段的实际塔盘数量。

10.2.3.6 制造日期 (17)

设备的制造日期用于服役年限和确定规范的有效版本。

10.2.3.7 制造规范 (18)

应记录设备的制造规范,该规范表明设备是按该制造规范设计和建造的。

10.2.3.8 规范状态 (19)

应记录设备的规范状态(如果有),该规范表明设计和制造设备时,设备的状态。

10.2.3.9 容器衬里 (20)

这个部分说明设备是否有内涂层或衬里。对于所有加衬里的容器,应记录衬里的材料。

10.2.3.10 设计压力 (21)

应记录设备的设计压力。如果由于改造而改变设备的原始设计压力,则应记录设备的当前压力值。

10.2.3.11 设计温度 (22)

应记录设备的设计温度。对于低温工况的设备可能具有一个最低设计金属温度和一个最高设计温度。如果有,应记录这两个温度。

10.2.3.12 设计寿命 (23)

遭受严重侵蚀损伤机理(如严重腐蚀或疲劳问题等)的设备经常按有限寿命来设计,如果被评价的设备存在这样的情况,则应列出设计寿命。

如果没有证据证明设备是按有限寿命来设计的,则应记录“40年”。

10.2.3.13 当前的服役时间 (24)

无需说明。

10.2.3.14 保温层 (25)

对于施加保温层的设备,保温层下可能会发生外腐蚀。如果设备做了完全或部分保温,则无论是什么类型的保温层或其厚度如何,都应在“是”上划圈。

10.2.3.15 外涂层 (26)

只有做过保温隔热处理的设备才需回答这个问题。该问题是指保温层下的外涂层,并且它确定一个设备是否应在保温层下设置可靠的附加防腐层。回答“是”则要求有一个高品质的“浸没级”涂层,而不仅仅是一层底漆。

10.2.3.16 管式换热器 (27)

套管式换热器要求用一个公式来计算容积,该公式不同于传统换热器所用的公式。

10.2.3.17 建造材料 (28)

建造材料是评价各种损伤机理时要考虑的主要因素。应记录材料的标识以确保进行正确的分析。

对于大多数设备,应在第一行“壳程”记录建造材料。允许在其他行定义各种换热器部件。

在每一行都有一些选项,用来说明设备是正火的,还是回火的,是否接受了焊后热处理,以及材料是否是用细晶粒工艺生产的。应在每一选项的正确答案上划圈。

10.2.3.18 制造的复杂性 (29)

一个设备的制造是否复杂会对设备的失效概率产生影响。潜在失效点数越大,预计的失效频率就越大。

8.3.3给出了这个输入项所列的每个设备的定义。应统计所列出的每个特性。

10.2.4 工艺信息

这部分提供了所有设备工艺和运行信息，包括术语定义和数据表填写须知。

应在适当的位置标出度量单位（kg/m³，psig 等）。因为 RBI 计算书是用英制单位设计的，所以适宜用任何公制单位来换算。

10.2.4.1 存量组 (30)

存量组是一个术语，指的是在紧急情况下，可以通过远程操作，与装置的其他工段隔离开的一组设备。存量组概念被用于计算后果区。假定，一旦存量组范围内任何地方的一个压力边界失效，存量组内所有设备的总存量就会存在潜在泄放的可能性。

当可以从控制室或类似的远程位置操作安装就位的遥控阀时，它们将确定存量组的边界。

当遥控阀是手动控制式或不可用时，通常可以通过关闭远程操作控制阀和相邻区域的手动阀，来隔离装置的各个工段。虽然用控制阀和手动阀进行隔离时，其安全性比远程操作遥控阀的安全性要差，但希望该方法足以限制来自其他工段的流量，从而确定一个存量组。

无论何时，只要采用控制阀、手动操作遥控阀或相邻区域的阀门来确定一个存量组，就应考虑装置的布局情况。例如，在一个蒸馏系统中，塔器间的间隔距离很宽，一个塔及其附属设备都可能看做是一个存量组。相反，如果所有载体都位于一个单一结构中，而且相互紧密布置，则整个蒸馏系统就应被看做是一个存量组。

10.2.4.2 原油特性或流体组成 (31)

设备所处理的工艺流体的组成是确定可能损伤机理的关键因素。根据流体的类型，输入项可以是一份有两种或三种主要成分的清单、一个沸点范围，或一份用通俗易懂的术语予以说明的说明书。当流体中包含任何已知会引起腐蚀或其他问题的成分时，应在输入项 35 中（污染物浓度，%）注明这些成分。其他信息在 7.2 提供。

10.2.4.3 代表性组分 (32)

经验表明，一些设备应被当做两个单独部分来分析。尤其是处理气、液两个不同相的设备。在一般情况下，塔器都被分割成两个部分。在不同工艺条件下，每个部分都有自己的代表性流体。

当选择一种代表性流体时，那么，就需要在工艺条件下的流体的一些关键的物理性质：

- a) 沸点（标准大气压下）。
- b) 自燃温度。
- c) 分子量。
- d) 比热常数。
- e) 密度。
- f) 毒性分数。

在 RBI 后果模型中，只要已知上述性质，则计算书的泄漏速率部分适用于任何流体。对于后果分析的最后部分（损伤面积计算），流体应与一种预定流体相关联。这个预定流体清单在第 7 章中列出。当将所关注流体与预定清单上的流体联系起来时，引用一种具有相似沸点和分子量的流体是重要的，因为在后果分析的最后部分这两个参数都很关键。

对于混合物，可以利用下面的逐次逼近公式找到代表性流体的性质 [见式 (24)]：

$$\sum_i (X_i \cdot P_i) \dots\dots\dots (24)$$

式中：

i ——混合物组分；

X_i ——该组分的摩尔分数；

P_i ——组分的性质。

作为 RBI 分析程序中的一个简化假设，可以根据一个单一的代表性组分，而不是可能出现的实

际混合流体来计算后果区。选做代表性流体的组分通常可能是浓度最高的组分，使用不同的组分可能导致后果区明显变大的情况除外。

10.2.4.4 运行工况

在 RBI 分析的各个阶段，应按如下所述，规定标准运行工况和任何潜在的故障条件。

10.2.4.5 压力 (33)

正常运行压力输入用于各种后果计算，并且用于确定 8.3.3 所讨论的安全因素。当采用一系列运行压力时，如一个生产不同等级产品的装置，应记录正常规定的最高压力。

如果故障条件下的极限压力与正常运行压力有很大的差别，也应把它们记录在案。例证中应包括可能使压力容器真空化的那些条件；或者使泄压阀的设定压力远高于正常运行压力的那些条件。应根据下述可能性 (36) 给出的定义，来判断发生干扰的可能性。对于导致大规模压力变化的设备（泵、冷凝器等），输入较高侧压力是更合理的作法。

10.2.4.6 温度 (34)

正常运行温度也被用于后果计算，并且该温度可能是若干损伤机理中一个重要变量。当采用一系列运行温度时，如一个生产不同等级产品的装置，应记录正常规定的最高、最低温度（高温运行条件下的最高温度，低温运行条件下的最低温度）。故障条件下的极限温度可能对各种损伤机理的损伤速率产生极大的影响。应把可能发生的最高温度和最低温度都记录下来。还应列出发生故障的可能，如以下可能性 (36) 所述。对于可能引起较大的温度变化的设备（换热器、炉子等），输入整个设备的平均温度是最好的选择。

10.2.4.7 污染物浓度 (35)

该输入项用于记录工艺流体中存在的、可能造成或导致某种失效机理的那些成分。

关键组分或污染物浓度的明显变化可能会极大地改变腐蚀速率、应力腐蚀开裂速率等。存在这种情况时，也应列出故障条件下关键组分的浓度百分比。

10.2.4.8 可能性 (36)

故障条件对失效可能性的影响是故障严重程度和发生此类故障可能性的一个函数。对于上述三种故障条件（压力、温度和浓度）中的每一种条件，应根据以下指南，从 A~D 指定可能性分类，见表 85。

表 85 可能性分类

分 类	发生的可能性
A	过去在设施上观察到的状况
B	据判断可能在设施寿命期发生的状况
C	据判断可能会在 10 个装置的寿命期发生一次的状况
D	理论上是可能的，但判断几乎不可能发生的状况

10.2.4.9 初始状态 (37)

在后果计算中，确定泄放的工艺流体的量在很大程度上取决于逸出物位于设备泄放点时是液体还是气体。

RBI 程序假定，在泄放点的所有流体均为液体或气体，而不是两者的混合物。

对于大多数设备，确定初始状态时，考虑的主要问题是进入的主流流体的物理状态（采用进入流体是因为该流体始终处于高压状态）。对于两相系统（如冷凝器、相分离器、蒸发器、再沸器）需要做出一些判断来确定初始相。初始状态的划分主要根据泄放模型处理初始状态输入的方法。在大多数情况下，选择液体是保守的，但却是可取的。有时，这可能不是一个适当的缺省作法，尤其是当含有两相流的管子与大部分为蒸气的大规模存量相连时，特别是系统压力开始下降时，这种作法就更不合

适了。为了保持评价的一致性,建议采用以下原则来确定是把流体当做液体还是气体。

- a) 对于汽包、反应器、换热器—壳程、换热器—管程和过滤器:根据进入的主流流体的物理状态,在“液体”或“气体”项下打勾。
- b) 对于塔器、泵和压缩机:不需要输入项。
- c) 对于所有管道:根据管中物质的物理状态来划分液体或气体。对于含有液、气混合物的管道,则要说明主要成分的状态。

10.2.4.10 最终状态 (38)

后果计算也在很大程度上取决于向大气泄放后,泄放物质的物理状态(最终状态)。环境温度和物质在标准大气压下的沸点是划分最终状态时要考虑的主要因素。夏季时,在海湾沿岸, C_4 和较轻的物质将被看做是气体。在北方,冬季时, C_3 以上的较重的物质将被看做是液体,应根据装置的地点和代表性成分的物理性质来确定是液体还是气体。

RBI程序假设,所有泄放流体的最终状态为100%的液体或100%的气体。

10.2.4.11 液体百分数 (39) 和蒸气百分数 (40)

这两个值用来确定储罐、容器、换热器等容器内的液体量。当容器的液位受到控制时,应记录液位控制器的标准读数。

对于塔器以外的大多数设备类型来说,液位控制器通常位于容器的中间部分,所以该读数接近容器中的液体百分比。下面单独讨论塔器。

根据正常运行工况,所有管道都被认为是含有100%的液体或100%的蒸气。所以只需输入这两个值中的一个值。

10.2.4.12 塔器的塔底液位 (41)

这部分仅适用于蒸馏塔和其他类型的塔器。

仅输入液体百分数不能确定塔底的液位。液体百分数输入基于塔底液位控制器的标准读数,所以液体总量是液位控制器接管位置和液体控制器设定点的一个函数。为了计算塔底液位,应用液位控制器接管上部和下部之间的距离乘以液体百分数显示值,所得的乘积应再加上从塔底到液位控制器下部接管之间的距离。每个塔器都要进行这种计算,并把结果记录在该塔器的数据表上。

10.2.4.13 液体密度 (42) 和蒸气密度 (43)

在正常运行工况下的密度用于计算存量。因为存量计算并不完全依赖于密度值,所以一个合理的估算就可以满足要求。

10.2.4.14 年停车次数 (44)

许多误操作和机械故障通常都是由于停车所致。停车次数越多,这类故障的可能性就越高。

这部分应记录每年计划性和非计划性平均停车次数。如8.3.4所定义,计划性停车是在采用标准停车操作规程的情况下所实施的停机;而非计划性停车是在极少有事先计划的情况下所发生的停车,所以该输入项应基于过去三年内每种停车情况的平均值。

10.2.4.15 稳定性评级 (45)

RBI分析人员将根据8.3.4给出的说明,决定设施每一工段的工艺稳定性级别。应在设备数据表上记录包括被评价设备在内的该装置工段的稳定性评级。

10.2.4.16 影响泄压阀的条件 (46)

数据表上有关泄压阀的四个输入项是用来评价是否存在某些设计或工艺状况,这些状况是否会在需要泄放系统动作时阻止其发挥功能。关于这四个输入项的定义,请查阅8.3.4。

应根据保护该设备的泄压阀的状况来填写每个设备的数据表。

10.2.4.17 技术模块所需的数据 (47)

对于某些损伤机理,损伤速率是工艺流体中某些组分或污染物相态浓度的一个函数。数据表的这部分应记录评价这类损伤机理所需的所有数据。

损伤机理技术模块将列出所需的特定信息。

10.2.5 检验/维护信息

数据表的这个部分要填写每个设备的检验计划和实际检验次数。列出了常用的大部分检验程序，并留出一些空格，以供说明采取了哪些检验以及检验次数。还应留出一些空白，以供说明试验的百分比范围（适当时）。

应审查设备的检验记录，以确定检验活动的实际有效性等级。计划好的但未执行的检验通常没有任何信用度，除非历史记录表明该检验是在一个合理的时期内，按适当时间间隔定期进行的。

还留出一些空白，以供记录该设备的相关检验历史。应记录所有的重要维修或改造，并在评述栏中做出简要说明。

如果检验或维护确定了腐蚀速率或损伤速率，就应按损伤速率来记录这个数值。造成恶化的损伤类型和损伤机理也应按这类数据来记录。

10.2.6 安全系统信息

对 RBI 程序计算得出的后果值进行修正，以便说明装置中所有检验装置及所有已安装的减缓设施的有效性。

像泄压阀一样，一组探测装置和减缓装置可能保护若干个设备。但装置中各工段的保护等级经常是不一样的，因此，每个设备的数据表都包括一个有关安全系统的部分。应当根据表 9 给出的定义来记录最适用于该设备的那些设施的分类。

应当记录用来保护该设备的所有减缓装置。数据表中列出一些常用的装置。数据表还应当填写安装好的所有其他减缓装置。

10.3 推荐的用于 RBI 数据表的数据来源

表 86 给出了一份代表性数据源清单，它列出 RBI 数据表中每个输入项所需的、最可靠的数据源，以及如果可靠数据源不能提供所需信息，可能利用的第一和第二备选数据源。

表 86 推荐的用于 RBI 数据表的数据源

通用信息 机械信息			
变量	可取数据源		第一可选数据源
装置条件 冬季温度 地震带	专业气象局记录 GB 18306		观察员的判断 装置记录
变量	可取数据源	第一可选来源	第二可选来源
厚度	U-1	制造图	设计书
长度	U-1	制造图	设计书
主直径	U-1	制造图	设计书
其他直径	U-1	制造图	设计书
塔盘数	制造图	设计书	—
制造日期	U-1	制造图	设计书
制造规范	U-1	制造图	设计书
设计压力	U-1	制造图	设计书
设计温度	U-1	制造图	设计书

表 86 (续)

通用信息 机械信息			
变量	可取数据源		第一可选数据源
装置条件 冬季温度 地震带	专业气象局记录 GB 18306		观察员的判断 装置记录
设计寿命	设计书	—	—
当前服役时间	维护记录	—	—
保温	P&ID	设计书	—
外涂层	制造图	设计书	—
管式换热器	U-1	制造图	设计书
建造材料	U-1	制造图	设计书
热处理	U-1	制造图	设计书
细晶处理	U-1	制造图	设计书
接管数	制造图	P&ID	设计书
焊缝、法兰、支管和阀门数	管道 ISO	根据 P&ID 确定	现场检查
存量组	P&ID	工艺流程图	—
原油特性或流体组分	工艺流程图	运行	—
代表性组分	工艺流程图	运行	—
运行压力	工艺流程图	运行	设计书
运行温度	工艺流程图	运行	设计书
故障压力	运行	—	—
故障温度	运行	—	—
可能性	指南	运行	—
初始状态	工艺流程图	设计书	运行
最终状态	指南	—	—
液体百分数	运行	—	—
蒸气百分数	运行	—	—
液体密度	工艺流程图	设计书	—
蒸气密度	工艺流程图	设计书	—
液位	运行	—	—
计划停机次数	装置记录	—	—
非计划停机次数	装置记录	—	—
稳定性等级	专业判断	—	—

表 86 (续)

通用信息 机械信息			
变量	可取数据源		第一可选数据源
装置条件 冬季温度 地震带	专业气象局记录 GB 18306		观察员的判断 装置记录
RV 维护程序	维护记录	—	—
结垢工况	运行	检验记录	—
腐蚀工况	运行	检验记录	—
技术模块用数据	参见技术模块数据源	—	—
检验	检验记录	检验计划	—
维护历史	维护记录	—	—
安全系统信息	设计信息	运行	—

RBI 用户可以按要求修改所示的推荐数据源,使其与被分析设施的数据源相适应。最准确、最容易获得的数据源应被列为首选来源。

编制一份综合数据源清单的目的是使分析程序标准化。无可置疑,一些人将从事数据采集和数据分析工作。通过制定明确的规则和指南来规范各个分析阶段,可以尽量减少分析人员之间的差别。

10.4 存量计算程序

后果计算要求有每个设备的正常工作存量。下面给出了进行这些计算的标准化程序。在多数情况下,已经做了一些简化假设,以尽可能地减少计算所需的各种资源。绝对精确的存量计算在风险排序中并不很重要,相比之下,程序的一致性则是更重要的。

一般情形下会给出一些方法来计算设备总容积和液体体积。可以把蒸气容积看做是设备的总容积减去液体体积。设备内件的容积可以忽略不计。

10.4.1 塔器

10.4.1.1 总容积

对于具有一致直径的塔器,应根据数据表上填写的长度和直径来计算容积。塔顶和塔底封头的容积忽略不计。单独分析塔器的上、下两半段时,这两部分的容积应相等。

对于两部分直径有变化的塔器,应根据其实际长度和直径单独计算每个部分的容积。应认为两个直径间的过渡区是较大直径部分的一部分。同样,上、下封头的容积也忽略不计。

10.4.1.2 液体容积

对于盘塔,塔盘上的液体量与塔底的液体量相加,以确定液体总量。依据数据表上的“塔底液位”输入值来确定塔底的液体容积。该液位是根据塔底的液体高度计算得出的。通过假设平均液体深 3in 和有效面积为塔横截面积的一半(用来计算精馏柱溢流管面积和塔盘上的液体含气量)来计算每个塔盘上的液体量。数据表还应记录塔盘数量。

对填料塔来说,在塔器达到满液运行之前,填料区内的液体量忽略不计。对于充满液体的填料塔来说,要计算所有液体的体积量。如果不是满液状态,则仅需考虑塔底的液体量。

10.4.2 压缩机

通常认为压缩机容积的存量为零。但在后果计算中,要考虑压缩机被连接到相应存量组这一

情况。

10.4.3 热交换器—壳程

10.4.3.1 净容积

- a) 对于所有类型的换热器，净容积即壳程的总容积和该管束所占容积之间的差值。假设管束的容积为管箱直径和壳程长度所确定的容积一半。
- b) 对于具有统一直径的换热器壳程，壳程的总容积为数据表给出的长度和直径确定的圆柱体的容积，封头体积忽略不计。这类换热器的壳程直径和管箱直径相等。
- c) 对于釜式换热器和其他非统一直径的换热器，假设壳程的总容积为数据表给出的“主直径”圆柱体的容积。该数值是垂直于换热器长度的最大尺寸。数据表给出的作为“其他直径”的管箱直径被用来计算管束容积。

10.4.3.2 液体容积

假设换热器的液体容积为壳体的净容积乘以数据表上的“液体百分数”值。

10.4.4 换热器—管程

10.4.4.1 净容积

假设净容积为数据表给出的管箱直径和管子长度确定的圆柱体的容积的一半。

10.4.4.2 液体（或气体）容积

假设换热器的管侧是纯液体或者纯气体，并且 100% 充满。因此，液体或气体的容积等于净容积。

10.4.5 管式换热器—壳程

10.4.5.1 净容积

外层管被认为是壳程。净容积是外层管容积减去换热器—管程数据表给出的内层管容积。

10.4.5.2 液体（或气体）容积

假设管式换热器的壳程和管程侧都 100% 地充满，因此，液体或气体的容积等于净容积。

10.4.6 管式换热器—管程

10.4.6.1 总体积

根据内层管的公称直径和长度计算该容积。

10.4.6.2 液体（或气体）容积

假设管侧被 100% 充满，因此，液体或气体的总容积等于内层管的总容积。

10.4.7 配管

10.4.7.1 总容积

管道内径是管子规格明细表的一个参数。通常通过查询装置用管道规格书来确定管子规格明细表。如果不容易获得这些数据，则应根据装置的运行工况进行假设。

10.4.7.2 液体（或气体）容积

假设所有管道均 100% 充满，并且为纯液体或气体，则液体或气体容积等于总容积。

10.4.8 泵

10.4.8.1 总容积

与压缩机一样，假设所有的泵都具有零容积，但是它们是一个存量组的一部分，并且在失效时内部装有那些存量。

10.4.9 容器

10.4.9.1 总容积

总容积等于数据表给出的长度和直径确定的圆柱体的容积。

10.4.9.2 液体容积

液体容积等于总容积乘以数据表给出的“液体百分数”输入项。

RBI 数据表

设备号_____									
标 题									
1. 设备编号_____			2. 分类_____						
3. 说明_____			4. 设备数_____						
5. PID 号_____			6. PFD 号_____			7. 流体号_____			
通用信息									
8. 项目_____									
9. 装置条件: A B C D									
10. 冬季日低温_____℃ (°F)					11. 地震带_____				
机械信息									
12. 厚度_____ mm (in)					21. 设计压力_____ kPa (psig)				
13. 长度_____ mm (in)					22. 设计温度_____ °C (°F)				
14. 主要口径_____ mm (in)					23. 设计寿命_____ 年				
15. 其他直径_____ mm (in)					24. 当前服役时间_____ 年				
16. 塔盘数_____					25. 保温层 是 否				
17. 制造日期_____					26. 外涂层 是 否				
18. 制造规范_____					27. 管式换热器 是 否				
19. 规范状态 A B C D									
20. 容器衬里									
若是, 衬里材料 (MOC) _____									
28. 建造材料									
	正火		焊后热处理		细晶处理		冲击试验温度		
	回火								
壳程_____	是	否	是	否	是	否	是	否	
管板_____	是	否	是	否	是	否	是	否	
管程_____	是	否	是	否	是	否	是	否	
29. 制造复杂性									
设备_____					管道				
接管数_____					接头数_____				
					注入点数_____				
					支管数_____				
					阀门数_____				
RBI 数据表									
设备号_____									
工艺信息									
30. 存量组_____									
31. 原油特性或流体组成_____									
32. 代表性组分_____									

进行工况	正常运行	故障条件		可能性
		最大	最小	
33. 压力 [kPa (psig)]	_____	_____	_____	_____
34. 温度 [°C (°F)]	_____	_____	_____	_____
35. 污染物浓度 (%)	_____	_____	_____	_____
36. 故障可能性	_____	_____	_____	_____
	液体	气体		
37. 初始状态 (设备中)	_____	_____		
38. 最终状态 (泄放后)	_____	_____		
39. 液体百分数 (%)	_____	42. 液体密度 [kg/m ³ (lb/ft ³)]		_____
40. 蒸气百分数 (%)	_____	43. 蒸气密度 [kg/m ³ (lb/ft ³)]		_____
41. 仅对塔器, 塔底液位	_____			m (ft)
44. 停机次数/年:	45. 稳定性等级:			
计划 _____	A B C D			
非计划 _____				
46. 影响泄压阀的条件:				
泄压阀维护程序	A	B	C	腐蚀工况 是 否
结垢工况	A	B	C	非常清洁工况 是 否
47. 技术模块数据:				
腐蚀种类或密闭	浓度 (%)		相态	
_____	_____		_____	
_____	_____		_____	
_____	_____		_____	
RBI 数据表				
设备编号 _____				
检验/维护信息				
	试验间隔期			
检查程序	计划	实际	覆盖率 (%)	
目视检查—外部	_____	_____	_____	
目视检查—内部	_____	_____	_____	
超声检查—外部	_____	_____	_____	
超声检查—内部	_____	_____	_____	
自动超声检查	_____	_____	_____	
剪切波超声检查	_____	_____	_____	
声发射检查	_____	_____	_____	
射线检查	_____	_____	_____	
涡流检查	_____	_____	_____	
湿荧光磁粉检查	_____	_____	_____	
液体渗透检查	_____	_____	_____	
IRIS—内部	_____	_____	_____	
水压试验	_____	_____	_____	

对保温设备：

选择性剥离

完全剥离

射线照相

对旋转设备：

定期振动测量

持续振动测量

其他程序：

未实施的检验

N/A

N/A

N/A

维护历史：

主要修复

是

或

否

损伤速率

主要改造

是

或

否

损伤类型

更换的设备

是

或

否

损伤机理

评语：

RBI 数据表

设备编号：

安全系统信息

检验分类：

A 工艺仪表

B 恰当布置的检测器

C 目视检测或边缘检测器

隔离系统：

A 直接启动隔离/停车系统

B 操作员启动隔离远程泄放

C 手动操作阀门进行隔离

安装就位的减缓装置：

消防监控系统

喷淋系统

大容量喷淋系统

泡沫系统

防爆墙

液体溅射密闭体

结构钢耐火材料

其他（规定）

11 技术模块

11.1 技术模块概述

石油化工工业缺少失效频率方面的特定经验数据库，失效频率根据设备类型和特定工艺环境分类。因此，本标准方法通过一个因子修正每种设备类型的同类失效频率，该因子与发生在特定使用场合和检验类型的潜在在役退化类型以及所实施的监控类型有关。本标准利用“技术模块”这一术语来描述用于计算修正因子的方法体系。下列技术模块作为本标准的附录：

- a) 减薄——附录 G。
- b) 应力腐蚀开裂——附录 H。
- c) 高温氢损伤——附录 I。
- d) 炉管——附录 J。
- e) 机械疲劳（仅适用于配管）——附录 K。
- f) 脆性断裂（BF）——附录 L。
- g) 设备衬里——附录 M。
- h) 外部损伤——附录 N。

这些技术模块包括处理退化类型和针对特定退化机理的详细补充技术信息的一般方法。建立的技术模块具有强大的能力，依据最近获得的最新检验和监控信息更新修正因子（表述为“技术模块次因子或 $TMSF$ ”）。如果可能存在一种以上的一般损伤类型，则应添加个别的 $TMSF$ 。

例如：

$$TMSF_{\text{减薄}} + TMSF_{\text{scc}} + TMSF_{\text{高温氢损伤}}$$

如果用炉管模块来确定 $TMSF_{\text{炉管}}$ ，则 $TMSF_{\text{炉管}}$ 应取代 $TMSF_{\text{减薄}}$ ，例如：

$$TMSF_{\text{炉管}} + TMSF_{\text{scc}} + TMSF_{\text{HTH}}$$

确定累加 $TMSF$ 的综合等式为：

$$TMSF_{\text{最终}} = TMSF_{\text{减薄}} + TMSF_{\text{scc}} + TMSF_{\text{高温氢损伤}} + TMSF_{\text{疲劳}} \\ + TMSF_{\text{脆性断裂}} + TMSF_{\text{衬里}} + TMSF_{\text{外部损伤}} \dots\dots\dots (24)$$

注：如果 $TMSF_{\text{衬里}}$ 或 $TMSF_{\text{减薄}}$ 两者都有效的话，应选用其中的较小者。

技术模块拟用于支持基于风险的检验方法体系，即通过提供一种确定检验优先排序并优化检验能力的筛选工具来完成。技术模块不提供所涉及设备确定性的“适用性评价（FFS）”原则的评估。模块的基本功能是从统计学的角度评价可能出现的损伤量和检验活动的有效性。技术模块次因子的计算以概率论为基础，但这些次因子不能反映用于可靠性分析得出的实际失效概率。技术模块次因子根据所述的模块假设，反映对设备的相对关注程度。

11.2 技术模块的格式

每个技术模块都包含以下部分。下面简要说明每个部分。

11.2.1 范围

本节说明技术模块的范围和限制，包括所涉及的损伤类型和机理。

11.2.2 技术模块筛选问题

所有设备都应考虑减薄和应力腐蚀开裂。简单筛选用来确定高温氢损伤、炉管、脆性断裂、机械疲劳、外部损伤和衬里模块等开始时这些模块是否适用。技术模块的目的是根据对设备的专门知识，如依据经验和检验历史所建立的实测腐蚀速率或应力腐蚀敏感度等，来确定技术模块次因子。

如果可用的检验信息极少或者信息不可靠，则技术模块会提供一些有关减薄和应力腐蚀开裂的附加筛选问题，以确定设备是否有可能存在特定损伤机理。当不能从一次或多次有效检验所获得的测定

值中推导出腐蚀速率时，技术模块特定损伤机理的补充可以提供有关腐蚀速率的保守估算。应对这些筛选问题回答“是”或“否”。回答“是”时，应有大量的附加信息作为腐蚀速率保守估算的补充数据。

11.2.2.1 基本数据

基本数据表汇总了确定技术模块次因子所需的数据。基本数据表描述了确定 TMSF 所需的信息。

11.2.2.2 基本假设

这部分提供了损伤速率和严重度适用模型的说明，以及模型所做的假设。这些模型用于计算技术模块次因子。所做的假设适用于研发筛选工具，但可能不适用于适应性评价。

11.2.2.3 技术模块次因子的确定

提供了确定技术模块次因子时如何填写表格的指南，规定了利用技术模块中所包含的查对表和公式来确定最终技术模块次因子的各个步骤和分步流程图。

11.2.2.4 腐蚀速率、敏感性及严重度指数的确定

简要说明如何根据运行条件和工艺条件来确定腐蚀速率或损伤（或存在损伤）敏感性的方法。

11.2.2.5 对筛选问题的技术补充

当缺乏借以建立损伤状态的有效检验结果时，本节提出一些筛选问题，以指导用户参考相关章节中对特定损伤机理的阐述。

11.2.2.6 检验效果分类

为用于确定技术模块次因子的检验效果分类，给出了适用于每个类别典型方法的建议实例。

应按表 87 描述的 5 种检验效果进行分类：

11.2.3 技术模块次因子（TMSF）的确定

在每个技术模块的最后包含一个技术模块次因子表格。

表 87 检验有效性类别

定性检验有效性类别	说 明
高度有效	这些检验方法几乎能正确识别每种情况下的实际损伤状态（80%~100%可信度）
通常有效	这些检验方法能大部分正确识别损伤状态（60%~80%可信度）
一般有效	这些检验方法能约半数正确识别损伤状态（40%~60%可信度）
有效性差	这些检验方法能提供极少地正确识别实际损伤状态的信息（20%~40%可信度）
无效	这些检验方法不提供或几乎不提供正确识别实际损伤状态的信息和无效的探测特定损伤机理的信息（少于 20%可信度）

11.2.4 对技术模块次因子（TMSF）的修正

应就注入点/盲管段的潜在腐蚀或防腐绝缘层下腐蚀对 TMSF 进行修正。另外，还应对在线监控进行修正。

11.2.5 特定损伤机理章节

每个损伤机理章节都提供了存在某一潜在损伤（或对其敏感性）可能性的指南，并可能指出预计损伤程度（即预计腐蚀速率）。在给定的技术模块中，可能存在一个或多个损伤机理。

附 录 A
(规范性附录)
定性 RBI 分析计算表

A.1 定性分析计算表概述

本定性分析计算表描述定性 RBI 分析程序的详细内容。它是一种填空式的工作单。该计算表用来确定给定装置的失效可能性和后果等级。根据装置中化学品的性质，按可燃或毒性危害确定装置后果等级。在计算表中，可燃后果用损伤后果等级来表示，因为可燃事件（火灾或爆炸）的主要影响损伤设备，毒性后果则属于健康方面，因为其影响通常仅限于对健康的不利影响。

本定性分析计算表可分为如下三个部分：

A 部分：可能性等级（表 A.1）；

B 部分：损伤后果等级（表 A.2）；

C 部分：健康后果等级（表 A.3）。

确定最终后果等级时，务必使用 B 部分和 C 部分中较高的失效后果等级（A 最低，E 最高）。

当装置具有若干种不同流体时，应对每种物质都进行评估，以获得每种物质的风险等级。对装置进行定性 RBI 分析评估时，首先应考虑导致最高风险等级的物质。

在一般情况下，当某一问题具有可选方案时，分析人员应选择可选方案中的一个方案。使不同研究的结果更加一致。

表 A.1 A 部分 可能性分类的确定

设备因子 (EF) 基于装置内可能失效构件的数量确定的因子。通常把定性风险分析用于以下三个不同层次： 1. 装置——对现场的整套装置进行评估。一般情况下要进行装置层次的评估，以便根据运行风险进行比较和优先排序。 2. 运行装置的工段——一个运行装置可分成各个逻辑（功能）工段，以识别该装置的高风险工段。 3. 系统或装置单元——这是定性方法所要应用的最高细化等级	
使用本表来确定设备因子： 评估整套装置时（一般大于 150 个主设备），$EF = 15$ 评估某运行装置的一个主工段时（一般为 20 个~150 个主设备），$EF = 5$ 评估一个系统或装置的运行情况时（一般为 5 个~20 个主设备），$EF = 0$ 从上面选择一个适当的 EF 值	
1	这是总设备因子
损伤因子 (DF) 与已知损伤机理相关的风险的一种度量，在评估运行状况时，这些损伤机理是活跃的或潜在活跃的。根据损伤机理引发严重事件的潜在性对其进行优先排序	
2	如果已知存在可能导致碳钢或低合金钢腐蚀开裂的损伤机理，则 $DF_1 = 5$
3	如果存在灾难性脆性失效的潜在性，包括碳钢材料在低温运行或故障条件下的脆化、回火脆化，或没有经过冲击试验评定， $DF_2 = 4$

表 A.1 (续)

4	如果装置上有些位置发生了机械或热疲劳失效, 并且该失效机理可能仍然比较活跃, 则 $DF_3 = 4$
5	如果已知发生了高温氢损伤, 则 $DF_4 = 3$
6	如果由于工艺运行, 已知发生了奥氏体不锈钢腐蚀开裂, 则 $DF_5 = 3$
7	如果发生局部腐蚀, 则 $DF_6 = 3$
8	如果发生均匀腐蚀, 则 $DF_7 = 2$
9	如果已知高温工艺中正在发生蠕变损伤, 包括炉子和加热器, 则 $DF_8 = 1$
10	如果已知正在发生材料退化, 存在诸如 σ 相形成、渗碳、珠光体球化等退化机理, 则 $DF_9 = 1$
11	如果已经识别出其他活跃损伤机理, 则 $DF_{10} = 1$
12	如果有资质的材料工程师还没有对运行装置的潜在损伤机理进行评估, 并且还没有对其进行定期审查, 则 $DF_{11} = 10$
13	总损伤因子将是第 2 行~第 12 行的总合, 总损伤因子最大值可达 20
检验因子 (IF) 对当前检验程序的有效性, 及其识别已知或可能的装置损伤机理能力的一种度量	
14	第 1 步: 容器检验——衡量容器检验程序的有效性, 看其是否能够发现所识别的上述损伤机理。 a) 如果检验程序范围广泛, 并且采用各种检测和监控方法, 则 $IF_1 = -5$ 。 b) 如果有一个安排就绪的正式检验程序, 并且正在进行一些检测, 但主要是外观检查和超声测厚检测, 则 $IF_1 = -2$ 。 c) 如果没有安排就绪的正式检验程序, 则 $IF_1 = 0$ 。 从上面选择适当的 IF_1 值
15	第 2 步: 管道检验——度量管道检验程序的有效性, 看其是否能够发现所识别的上述损伤机理。 a) 如果检验程序范围广泛, 并且采用了各种检测方法, 则 $IF_2 = -5$ b) 如果有安排就绪的正式检验程序, 并且正在做一些检测, 但主要是外观检查和超声波测厚检测, 则 $IF_2 = -2$ c) 如果没有安排妥当的正式检测, 则 $IF_2 = 0$ 从上面选择适当的 IF_2 值
16	第 3 步: 总检验程序——检验程序是否采取综合性设计? 是否评估了检测结果并且把该结果用于检验程序的修改? a) 如果已经识别出各个设备的退化机理, 由胜任的检测员或材料工程师根据检测结果来修改检验程序, 则 $IF_3 = -5$ 。 b) 如果检验程序设计不包括失效机理确认, 也不包括对所有检测结果的严格评估, 即做了其中的一项或另一项, 而不是两者都做了, 则 $IF_3 = -2$ 。 c) 如果检验程序不符合前段的准则, 则 $IF_3 = 0$ 从上面选择合适的 IF_3 值
17	总检测因子是第 14 行~第 16 行的总和, 但总检测因子绝对值不能超过损伤因子值 (第 13 行)

表 A.1 (续)

状态因子 (CCF) 从维护和保养的角度描述设备的物理状态		
18	第 1 步：在装置巡视中，如何判断装置的内务管理（包括涂漆和保温维护程序）？ a) 明显优于行业标准，则 $CCF_1 = 0$ 。 b) 接近行业标准，则 $CCF_1 = 2$ 。 c) 明显低于行业标准，则 $CCF_1 = 5$ 。 从上面选择适当的 CCF_1 的值	
19	第 2 步：装置的设计和建造质量如下： a) 明显优于行业标准，其中业主采用了更严格的标准，则 $CCF_2 = 0$ 。 b) 接近行业标准，其中采用了典型合同标准，则 $CCF_2 = 2$ 。 c) 明显低于行业标准，则 $CCF_2 = 5$ 。 从上面选择适当的 CCF_2 值	
20	第 3 步：在审查装置维护程序的有效性，包括制造、PM 程序和质量保证 (QA) / 质量控制 (QC)，它们被判断为： a) 明显优于行业标准，则 $CCF_3 = 0$ 。 b) 接近行业标准，则 $CCF_3 = 2$ 。 c) 明显低于行业标准，则 $CCF_3 = 5$ 。 从上面选择适当的 CCF_3 值	
21	总状态因子为第 18 行~第 20 行的总和	
工艺因子 (PF) 对引发容器内介质损失的非正常运行或扰动状态的潜在性的度量，它们可能引起密闭壳体内容物损失		
第 1 步：一年中计划或非计划停机次数（这主要针对正常的连续工艺运行）从下表获得 PF_1 值		
22	停工次数	PF_1
	0~1	0
	2~4	1
	5~8	3
	9~12	4
	>12	5
根据以上确定适当的 PF_1 值		
23	第 2 步：对运行状态评估中超出关键工艺变量的潜在性进行评估 (PF_2)： a) 如果工艺特别稳定，并且已知不存在可能造成失控反应或其他不安全条件的组合性故障条件，则 $PF_2 = 0$ 。 b) 只有非常异常的情形才可能会使故障条件上升为某种不安全状况，则 $PF_2 = 1$ 。 c) 如果已知存在一些可有导致加速设备损伤的条件或其他不安全条件，则 $PF_2 = 3$ 。 d) 如果失去控制的可能性是工艺中所固有的，则 $PF_2 = 5$ 。 从以上选择适当的 PF_2 值	

表 A.1 (续)

24	第3步：对由于堵塞或工艺流体结垢而使保护装置，如泄压装置和关键传感元件，不工作的潜在性进行评估。 a) 清洁运行工况，无潜在的堵塞，$PF_3 = 0$。 b) 轻微结垢或潜在的堵塞，$PF_3 = 1$。 c) 明显结垢或潜在的堵塞，$PF_3 = 3$。 d) 发现保护装置在使用中受到损坏，$PF_3 = 5$。 选择适当的 PF_3 值												
25	总工艺因子为第 22 行~第 24 行的总和												
机械设计因子 (MDF) 机械设计因子是对装置采用的设计安全系数的度量													
26	第1步： a) 如果设备并不是根据当前的规范或标准来设计的，则 $MDF_1 = 5$。 例如：低温工况下未做冲击试验的碳钢、运行于最新 Nelson 曲线以上的临氢工况下的材料、特殊工况（如碱性）下的未做消除应力处理的材料，或按当前规范要求应进行消除应力的厚钢板。 b) 如果被考虑的所有设备在建造时都是按当时有效的规范进行设计和维护的，则 $MDF_1 = 2$。 c) 如果被考虑的所有设备都是按当前的规范进行设计和维护的，则 $MDF_1 = 0$。 从上面选择适当的 MDF_1 值												
27	第2步： a) 如果被评估的工艺是异常或特殊的，或者极端工艺设计条件，则 $MDF_2 = 5$。 极端设计条件被认为是： 压力超过 68950kPa (10000lb/in²)； 温度超过 815.56℃ (1500°F)； 腐蚀条件要求采用高合金材料（比 316 不锈钢耐蚀性更好的材料）。 b) 如果工艺相同，并且是正常设计条件，则 $MDF_2 = 0$。 从上面选择适当的 MDF_2 值												
28	第3步：将第 26 行和第 27 行相加，这就是机械设计因子												
可能性分类													
29	第1步：确定可能性因子。可能性因子是以前确定之因子的总和。 将第 1 行、第 13 行、第 17 行、第 21 行、第 25 行和第 28 行的数值相加，就是可能性因子												
30	第2步：采用下表，根据可能性因子（29 行以上）来确定可能性分类。 <table> <tr> <th>可能性因子</th><th>可能性分类</th></tr> <tr> <td>0~15</td><td>1</td></tr> <tr> <td>16~25</td><td>2</td></tr> <tr> <td>26~35</td><td>3</td></tr> <tr> <td>36~50</td><td>4</td></tr> <tr> <td>51~75</td><td>5</td></tr> </table> 输入可能性分类	可能性因子	可能性分类	0~15	1	16~25	2	26~35	3	36~50	4	51~75	5
可能性因子	可能性分类												
0~15	1												
16~25	2												
26~35	3												
36~50	4												
51~75	5												

表 A.2 B 部分 损伤后果等级的确定

本部分用于可燃物质，如果只有有毒化学品，则直接跳到 C 部分。

化学因子 (CF)						
化学因子是对化学品内在点燃倾向的度量。对本部分的回答应建立在主导或代表流体物质的基础上。如果装置具有若干种不同工艺流体，则应进行单独分析。						
31	第 1 步：采用 NFPA 可燃危害评级确定一个“闪燃因子”（NFPA 危害识别系统上标明的红色菱形）。 输入 NFPA 可燃危害等级					
32	第 2 步：采用 NFPA 反应危害评级系统确定一个“反应活性因子”（NFPA 危害识别系统上标明的黄色菱形）。 输入 NFPA 危害等级					
第 3 步：确定“化学因子”						
		反应活性因子 (第 32 行)				
		1	2	3	4	
闪燃因子 (第 31 行)		1	7	9	12	15
		2	10	12	15	20
		3	12	15	18	25
		4	13	15	20	25
33	从上面选择化学因子					
量值因子 (QF)						
该量值因子代表在一种情景下，可能从装置中泄放的物质的最大泄放量						
可直接从以下获得量值因子。对于物质泄放量，采用在一次泄放事件中可能损失的可燃物质存量的最大量						
泄放的物质，kg (lb)		量值因子				
<454 (1000)		15				
454~908 (1000~2000)		20				
>908~4540 (>2000~10000)		25				
>4540~13620 (>10000~30000)		28				
>13620~36320 (>30000~80000)		31				
>36320~90800 (>80000~2×10 ⁵)		34				
>90800~317800 (>2×10 ⁵ ~7×10 ⁵)		37				
>317800~454000 (>7×10 ⁵ ~1×10 ⁶)		39				
>454000~908000 (>1×10 ⁶ ~2×10 ⁶)		41				
>908000~4540000 (>2×10 ⁶ ~1×10 ⁷)		45				
>4540000 (1×10 ⁷)		50				
34	输入上面适当的值，这就是量值因子					
状态因子						
状态因子取决于流体的沸点，即当流体泄放到环境中时，蒸发和扩散趋势的表示						

表 A.2 B (续)

根据标准沸点 (大气压) 摄氏温度选择状态因子	
沸点, °C (°F)	状态因子
低于 -73.33 (-100)	8
-73.33~37.78 (-100~100)	6
>37.78~121.11 (100~250)	5
>121.11~204.44 (250~400)	1
>204.44 (400)	-3
35	从以上选择适当值, 这就是状态因子
自燃因子 (AF) 自燃因子是一个补偿因子, 在高于流体自燃温度 (AIT) 的某个温度下处理流体时应用这个因子	
如果在低于流体自燃温度下处理流体, 则输入 -10; 如果在高于流体自燃温度下处理流体, 则应采用下表来根据流体的沸点 (摄氏度) 确定 AF。	
沸点, °C (°F)	自燃因子
小于 -17.18 (0)	3
> -17.78~148.89 (0~300)	7
高于 148.89 (300)	13
36	从上面选出适当值输入, 这就是自燃因子
压力因子 (PRF) 压力代表流体快速泄放的趋势, 从而导致一个较大的瞬态影响的可能性	
a) 如果设备中的流体是液体, 则输入 -10。 b) 如果设备中的流体是气体且处在大于 1034.25kPa (150 lb/in ²) 压力下, 则输入 -10。 c) 如果上述两个条件都不成立, 则输入 -15	
37	从上面选出适当值, 这就是压力因子
安全可信因子 (CF) 安全可信因子是已有工程系统的若干次因子的乘积, 它能够减少某个事件的损伤性	
38	如果已经安装了气体探测装置, 并且该装置可探测 50% 甚至更高的初始泄漏速率, 则输入 -1, 否则输入 0
39	如果工艺设备在一惰性氛围下正常运行, 则输入 -1, 否则输入 0
40	如果消防系统在重大事故情况下是“安全的”(如消防水系统在爆炸情况下将保持完整无损), 则输入 -1, 否则输入 0
41	如果可以远程控制在这个区域内的设备的隔离能力, 并且: a) 保护隔离装置和相关仪器免受火灾和爆炸的损伤, 则输入 -1。 b) 或者, 如果仅保护隔离装置和相关仪器免受火灾的损伤, 则输入 -1。 c) 或者, 如果没有防止隔离能力免受火灾或爆炸的保护设施, 则输入 -1。 否则输入 0
42	如果在最关键 (一般为最高压力设备) 设备周围设有防爆墙, 则输入 -1, 否则输入 0

表 A.2 B (续)

43	如果设有倾卸、排放或泄放系统，其将在 5min 或更短时间内泄放掉 75% 或更多的物质，并且可靠性达到 90%，则输入 -1，否则输入 0												
44	如果在结构和电缆上都已敷设了耐火材料，则输入 -1，如果仅在结构上或电缆上（其中之一）敷设了耐火材料，则输入 0.95，否则输入 0												
45	如果设置的消防水供水系统至少能持续 4h，则输入 -1，否则为 0												
46	如果已安装就位了固定泡沫系统，则输入 -1，否则为 0												
47	如果安装了能够覆盖受影响装置所有区域的消防监控系统，则输入 -1，否则为 0												
48	将第 38 行~第 47 行相加，这就是安全可信因子												
损伤后果等级													
第 1 步：确定损伤后果因子													
49	将第 33 行、第 34 行、第 35 行、第 36 行、第 37 行和第 48 行相加，这就是损伤后果因子												
第 2 步：然后根据下表，将损伤后果因子转换成损伤后果等级。													
<table><tr><th>后果因子</th><th>结果等级</th></tr><tr><td>0~19</td><td>A</td></tr><tr><td>20~34</td><td>B</td></tr><tr><td>35~49</td><td>C</td></tr><tr><td>50~79</td><td>D</td></tr><tr><td>>70</td><td>E</td></tr></table>		后果因子	结果等级	0~19	A	20~34	B	35~49	C	50~79	D	>70	E
后果因子	结果等级												
0~19	A												
20~34	B												
35~49	C												
50~79	D												
>70	E												
50	输入损伤后果等级												

表 A.3 C 部分 健康后果等级

如果考虑的工艺流体仅具有可燃后果，则跳过 C 部分。

毒性量值因子 (TQF)											
毒性量值因子是对化学品的数量及其毒性的一种度量											
51	第 1 步：可以直接从下表获得毒性量值因子。对于泄放的化学品的数量，采用在一次泄放事件中可能损失的有毒物品存量的最大量。 <table><tr><th>泄放的物质，kg (lb)</th><th>量值因子</th></tr><tr><td><454 (1000)</td><td>15</td></tr><tr><td>454~4540 (1000~10000)</td><td>20</td></tr><tr><td>>4540~45400 (10000~100000)</td><td>27</td></tr><tr><td>>45400 (100000)</td><td>35</td></tr></table> 输入上面给出的量值因子，这就是 TQF_1	泄放的物质，kg (lb)	量值因子	<454 (1000)	15	454~4540 (1000~10000)	20	>4540~45400 (10000~100000)	27	>45400 (100000)	35
泄放的物质，kg (lb)	量值因子										
<454 (1000)	15										
454~4540 (1000~10000)	20										
>4540~45400 (10000~100000)	27										
>45400 (100000)	35										
52	第 2 步：根据 NFPA 危害识别系统上标明的蓝色菱形，按下表估算毒性因子 (TQF_2) <table><tr><th>NFPA N_h</th><th>毒性因子 (TQF_2)</th></tr><tr><td>1</td><td>-20</td></tr><tr><td>2</td><td>-10</td></tr><tr><td>3</td><td>0</td></tr><tr><td>4</td><td>20</td></tr></table> 输入毒性量值因子	NFPA N_h	毒性因子 (TQF_2)	1	-20	2	-10	3	0	4	20
NFPA N_h	毒性因子 (TQF_2)										
1	-20										
2	-10										
3	0										
4	20										

表 A.3 C (续)

53	第 3 步：将第 51 行和第 52 行相加，这就是毒性量值因子	
扩散因子 (DIF)		
扩散因子是在给定的一般工艺条件下，对物质扩散能力的一种度量		
54	沸点,℃ (°F) < - 1. 11 (30) - 1. 11~26. 67 (30~80) >26. 67~60 (>80~140) >60~93. 33 (>140~200) >93. 33~148. 89 (>200~300) >148. 89 (>300) 输入该扩散因子	扩散因子 1 0. 5 0. 3 0. 1 0. 05 0. 03
安全可信因子 (CRF)		
安全可信因子说明通过探测、隔离和减缓来降低有毒物质泄放后果的安全特性		
55	第 1 步： a) 如果就所考虑流体已经安装了探测器，该探测器可以探测 50％甚至更多的初始泄漏速率， 则输入 - 1。 b) 否则输入 0	
56	第 2 步： a) 如果盛装该物质的主容器可以自动隔离，而且是根据某一有毒物质探测器的一个较高读数来 启动隔离，则输入 - 1。 b) 如果隔离为远程手工启动，则输入 - 5。 c) 如果隔离仅为手动操作，则输入 - 25。 d) 否则输入 0	
57	第 3 步： a) 如有已经安装了一个系统（如水幕等），并且证明该系统至少能够有效地减缓 90％的流体， 则输入 - 5。 b) 否则输入 1	
58	第 4 步：将第 55 行~第 57 行相加，这就是安全可信因子	
人口因子 (PPF)		
人口因子是对受毒性事件影响的潜在人数的一种度量		
59	根据下表估算人口因子。距离泄放点 0. 40225km (1/4 英里) 范围内的平均人数。要考虑装置场地 内、外的人口。在装置边界内，采用日间人口数。 0. 40225km 范围内的平均人数 <10 10~100 >100~1000 >1000~10000 输入人口因子	
	人口因子	0 7 15 20

表 A.3 C (续)

健康后果等级													
60	第 1 步：将第 53 行、第 54 行和第 59 行相加，这就是健康后果因子												
61	第 2 步：然后按如下，将健康后果因子写在健康后果等级中。 <table><tr><td>健康结果因子</td><td>健康结果等级</td></tr><tr><td><10</td><td>A</td></tr><tr><td>10~19</td><td>B</td></tr><tr><td>20~29</td><td>C</td></tr><tr><td>30~39</td><td>D</td></tr><tr><td>>40</td><td>E</td></tr></table> 输入健康后果等级	健康结果因子	健康结果等级	<10	A	10~19	B	20~29	C	30~39	D	>40	E
健康结果因子	健康结果等级												
<10	A												
10~19	B												
20~29	C												
30~39	D												
>40	E												
总后果等级													
从第 50 行或第 61 行中选择最高类别的字母（A 为最小，E 为最大），这就是总后果等级													

附 录 B
(规范性附录)
半定量 RBI 分析计算表

B.1 引言

完成第一个基于风险的检验先导项目后，为了更加方便而又不需要很多输入，开发了一个按比例缩小的 RBI 分析方法。同样也希望以简化的方式来得出结果，如显示可能性与后果关系的一个 5×5 矩阵。在该矩阵中数值是以分类的形式出现的。这个 5×5 矩阵如图 B.1 所示。这个按比例缩小的方法被称为“Level II”方法：定性方法（见第 5 章）是“Level I”；而使用本标准所有方法的那个方法是“Level III”方法。

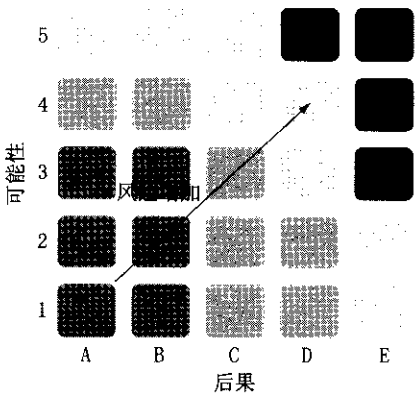


图 B.1 Level II 风险矩阵

B.2 后果分析

对于 Level II RBI 方法，其后果模型与第 7 章所述的模型基本相同。一个主要的简化是在存量的确定上。在先导项目中，大量时间和精力花在存量量值的确定上。对于 Level II 方法，为了简化该过程，可采用以下指南按量值大小顺序来估算存量：

从表 B.1 所示的五个“数量级”分类中选择其中的一个存量。

表 B.1 存量分类范围

分 类	范围, kg (lb)	计算所用值
A	45.4~454 (100~1000)	500
B	>454~4540 (>1000~10000)	5000
C	>4540~45400 (>10000~100000)	50000
D	>45400~454000 (>100000~1000000)	500000
E	>454000~4540000 (>1000000~10000000)	5000000

使用者可以按表 B.2 所述，根据对每一分类的判断性评估选择各个分类。

表 B.2 存量分类描述

分 类	定 性 描 述
A	泄放小于被评估设备总存量的脱存
B	泄放导致被评估设备总存量的脱存
C	泄放导致被评估设备, 加上 1 个~10 个其他设备的总存量脱存
D	泄放导致被评估设备, 加上 10 个或更多其他设备总存量脱存
E	泄放导致单元总存量脱存

分析人员仍然可以选择使用任何存量值。例如, 如果已经计算出存量, 则可以输入该存量值。

按第 7 章所述精确地计算出每个孔径的后果面积。为了计算出每个设备的单独整体失效后果, 需要计算出一个“可能性加权”平均区域。进行该计算时, 首先将每个孔径的后果面积乘以该孔径的“同类”频率与所有孔径的“同类”频率之和的比值 [见式 (B. 1)]。

$$\frac{FREQ_{n=4}}{FREQ_{n=1}} \cdot AREA_n \dots\dots\dots (B. 1)$$

该比值确定要赋予每个孔径的计算面积的“加权”, 这要根据该孔相对于其他孔的相对可能性来决定。在该方法中, 每个“同类”频率的值并不重要, 只是每个同类频率与其他频率的相对值的关系。然后将计算的每个孔径的加权面积相加, 得出一个后果面积值 [见式 (B. 2)]。当观察到许多事件都符合所采用的同类孔径分布时, 就可以认为该值是最可能受到影响的区域。

$$\text{可能性加权平均面积} = \sum_{n=1}^4 AREA_n \cdot \frac{FREQ_n}{\sum_{n=1}^4 FREQ_n} \dots\dots\dots (B. 2)$$

仅需要对这些面积值进行简单归类就可能将可能性加权平均面积转换成一个后果等级。根据研究需要, 可能要把一个区域与任何分类相联系, 这取决于选择的分配类别。API RBI 发起小组的一致意见是, 应就各个分类采用相同的面积分配, 来对所有炼油厂进行对比。表 B. 3 列出了一个简单的数量级分配。

表 B.3 后果面积分类

后 果 等 级	可能性加权平均面积, m ² (ft ²)
A	<0.93 (10)
B	0.93~9.3 (10~100)
C	>9.3~93 (>100~1000)
D	>93~930 (>1000~10000)
E	>930 (>10000)

Level II 的原则是按设备风险对设备排级, 并且是一个简化的方法, 所以该方法不包括生产中断和环境后果。

B.3 可能性分析

先导研究中观察到的一个重要现象是, 在许多情况下, 技术模块次因子的加权远远超过所有其他组合次因子的加权。技术模块次因子的范围可高达 1000, 甚至更高, 而其他次因子则相对很小 (<10)。此外, 一个装置或单元的其他次因子 (机械次因子除外) 倾向于恒定不变, 因此在任何给定

装置或单元的设备之间没有任何区别。从而可以把这些次因子用于不同现场之间的比较，但不会有助于形成基于风险的检验计划。表 B. 4 将列出“其他”次因子以供参考。

表 B. 4 技术模块次因子的可变性

次 因 子		可 变 性
通用次因子	装置条件	对装置来说恒定不变
	寒冷天气	对装置来说恒定不变
	地震活动性	对装置来说恒定不变
机械次因子	设备复杂性	随设备不同而改变
	建造规范	随设备不同而改变
	寿命周期	随设备不同而改变
	安全系数	随设备不同而改变
	振动监测	在一单元内通常恒定不变
工艺次因子	连续性	对一单元来说恒定不变
	稳定性	对一单元来说恒定不变
	泄压阀	对一单元来说恒定不变
工艺安全管理		对单元或装置来说恒定不变

根据这些观察，通过技术模块次因子就可以确定可能性。这是唯一的直接受检测影响的次因子，并且将形成检测计划的基础。

技术模块次因子转换成可能性分类，是通过简单地将分类分配给次因子值来实现的。选择一个简单的数量级分配并将其标示于表 B. 5。

表 B. 5 技术模块次因子的转换

可能性分类	技术模块次因子
A	<1
B	1~10
C	>10~100
D	>100~1000
E	>1000

B. 4 风险分析

Level II 方法的风险分析是直接将可能性和后果分配到其合适的分类，并将其放置到 5×5 矩阵中。矩阵的不同阴影区表示风险的“高”、“中高”、“中”和“低”等几个分类，见图 B. 2。

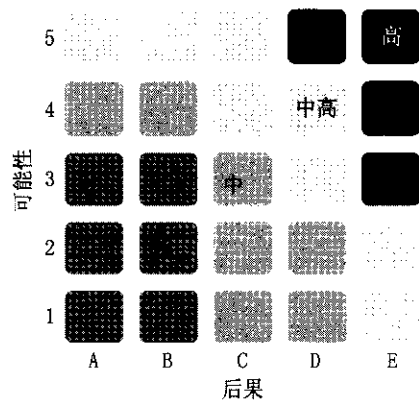


图 B.2 Level II 定性风险矩阵

注意风险矩阵中的不对称，将较高风险分配到较高的后果事件上。这通常在绘制风险矩阵时就完成，表示低后果事件与高后果事件的对比。

B.5 Level II 方法计算表

该计算表可与 Level II RBI 方法一起，作为一个工作表来使用。它获取附录 A 中所述的有关信息和计算，并通过所需的步骤来引导用户对可能性、后果和风险进行分类。该计算表（见表 B.6）被设计用于一台设备。它计算 Level II RBI 所包含的以下两个不同后果。

- a) 可燃后果。
 - b) 毒性后果。
- 可燃后果和毒性后果的结果按一个分类进行报告。

表 B.6 Level II 方法计算表

运行装置：					
设备编号：					
说明：					
A 部分：泄漏速率计算					
估算不同孔径的泄漏速率、泄放类型和每一孔径的持续泄漏时间					
步骤 I	计算泄漏速率				
1	输入被评估设备中所盛装的代表物质（见表 3）				
2	根据 B.2 的指南输入设备的存量分类				
2a	输入存量值，作为范围的中点或计算值（见表 B.1）				lb
3	使用表 9 输入适用于区域中出现的监控系统的监测等级				
4	根据表 9 来输入适用于区域内配置的隔离系统的隔离等级				
5	根据表 10 来估算基于探测和隔离系统的泄放持续时间	6.35mm (1/4in) min	25.4mm (1in) min	101.6mm (4in) min	破裂 min

表 B.6 (续)

6	输入操作压力	psia			
7	根据设备中流体的相态,在气体或液体上划圈。若为液体,则跳到第 15 行	气体	液体		
气体泄漏速率					
8	输入运行温度	°F			
9	根据流体性质标准表,输入气体在第 8 行给出的温度下的比热 (c_p)	Btu/(lb·mol·°F)			
10	计算并输入 K ($K = c_p/c_v$)				
11	采用式 (7),计算转换压力 (p_{trans})	psia			
12	设备内流体压力是否高于转换压力 (第 6 行 > 第 11 行)? 如果是,则在“音速”上划圈,进入第 13 行; 如果不是,则在“亚音速”上划圈,并跳到第 14 行	音速	亚音速		
	孔径	6.35mm (1/4in)	24.5mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
13	使用式 (8) 来计算每一所列孔径的泄漏速率,跳到第 16 行	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s
14	采用式 (9) 来计算列出的每个孔径的泄漏速率,并输入该泄漏速率。跳到第 16 行	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s
液体泄漏速率					
15	采用式 (6) 来计算泄漏速率,输入泄漏速率,进到第 16 行	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s
步骤 II 确定每个孔径的泄放类型					
16	将最大允许泄放存量除以相应的泄漏速率 = 第 2 行/(第 13 行、第 14 行或第 15 行),再除以 60 得到分钟数。输入分钟值。这是减少存量所要求的时间 (根据初始流量)	min	min	min	min
17	泄漏速率 (第 13 行、第 14 行或第 15 行) 乘 3min > 100000lb 吗? 若回答是“是”,则在“瞬时”上划圈,表示瞬时泄放。否则则在“持续”上划圈,表示持续泄漏。注意: 1/4in 孔径始终是“持续”的	瞬时 持续	瞬时 持续	瞬时 持续	瞬时 持续
确定泄放后的相态					
18	输入大气压下流体的沸点 T_{NBP}	°F			
19	采用表 8 来确定泄放后流体的相态,输入该相态				
20	输入第 17 行、第 19 行中划圈项的词头。这就是泄放类型 (即 IL 表示瞬时液体等)				

表 B.6 (续)

21	看第 5 行和第 16 行。对每个孔径，输入两个中的较小者。这就是泄放持续时间。对于瞬间泄放，持续时间假设为 0（第 5 行的泄放持续时间以探测/隔离为基础，而第 16 行的泄放持续时间基于存量 ÷ 泄漏速率）	min	min	min	min
瞬间释放量的确定					
22	输入第 2a 行被评估设备的存量。这就是瞬时释放量	lb			
B 部分：可能性分析					
可能性分析是能够显示设备失效可能性的几个因子的乘积					
第 I 步：技术模块次因子（见 8.3.1）					
进行筛选，以识别损伤机理。采用适当的损伤机理模块（见附录 A）来确定各个因子。					
如果未识别出损伤机理，则输入 -2 作为技术模块次因子					
1	识别损伤机理 1a 减薄/腐蚀（是/否） 2b 高温氢损伤（HAHA）（是/否） 3c SCC（是/否）				
注：第 2 行～第 7 行用于记录适用于技术模块的一些基础信息。每个技术模块并非都需要所有行，并且以下并没有提供每个技术模块所需的全部数据		1a	2b	3c	
2	设备在当前工况下的服役年限				
	2a 估算/实测的腐蚀速率 2b Nelson 曲线温度 2c SCC 的裂纹尺寸或敏感性				
3	计算技术模块表的左栏				
4	确定检验有效性（H，U，F，P，I）				
	4a 检验次数				
5	查表确定技术模块次因子				
6	冗余设计修正				
7	高度可靠损伤速率数据修正				
8	修正的技术模块子因子				
9	组合的技术模块子因子				
10	表 B.5 的可能性分类				
C 部分：后果计算					
C.1 可燃后果计算					
估算碳氢化合物泄放点燃时，对设备和人员造成的可燃后果区					
1	复制代表性物质（A 部分：泄漏速率计算第 1 行）				

表 B.6 (续)

	孔径→	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
泄放类型					
2	复制泄放类型（A 部分：泄漏速率计算第 17 行）				
泄漏速率或泄放量					
3	根据泄放类型复制泄漏速率或泄放量（A 部分：泄漏速率计算第 13 行、第 14 行和第 15 行）	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min
监测等级					
4	复制泄漏速率计算第 3 行（适用于该区域现有监测系统的探测等级）				
隔离等级					
5	复制泄漏速率计算第 4 行（适用于该区域现有隔离系统的隔离等级）				
对可燃事件减缓系统的修正					
6	参照表 19，根据上述第 4 行和第 5 行来修正泄漏速率或泄放量。输入修正的泄漏速率或泄放量对减少后果区的减缓系统（消防水处理系统、监视器或泡沫喷淋系统），对第 9 行进行修正	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min
设备损伤区					
7	查看后果公式表 11～表 14 中的设备损伤公式，并用泄漏速率或泄放量（第 6 行）代替“x 或 X”（利用第 1 行、第 2 行、第 3 行的信息来选择正确的公式）。如果流体温度为 26.67℃（80°F）（高于其自燃温度），采用表 13 或表 14，否则采用表 11 或表 12	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
潜在致死区					
8	查看后果公式表 11～表 14 中的潜在致死面积，并用泄漏速率或泄放量（第 6 行）代替“x 或 X”（利用第 1 行、第 2 行、第 3 行的信息来选择正确的公式）。如果流体温度为 26.67℃（80°F）（高于其自燃温度），则采用表 13 或表 14，否则采用表 11 或表 12				
后果降低					
9	如果因为表 19 中的减缓系统而使后果降低，则将设备损伤面积（第 7 行）降低至推荐的百分比。这就是最终设备损伤面积	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
10	如果因为表 19 中的减缓系统而使后果降低，则将未修正的潜在致死面积（第 7 行）降低至推荐的百分比。这就是最终致死面积	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²

表 B.6 (续)

C.2 毒性后果计算					
估算 HF 或 H ₂ S 泄放所造成的毒性后果区					
1	复制物质 (泄漏速率计算手册 A 部分第 1 行) 注: 只编制了 HF 或 H ₂ S 的检查表				
	孔径→	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
2	复制泄放类型 (A 部分: 泄漏速率计算第 20 行)				
3	复制泄漏速率 (A 部分: 泄漏速率计算第 13 行、第 14 行、第 15 行)。对于“瞬时性”, 跳到第 8 行	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s
4	复制泄漏速率计算的第 21 行的泄放持续时间				
5	有关“持续性泄漏”, 请见图 11 (HF) 和图 12 (H ₂ S)。选择一个有泄放持续时间的曲线, 该时间超过或等于上面第 4 行中所示的持续时间, 但小于 1h。利用选取的曲线来找到与第 3 行给出的泄漏速率相对应的后果面积	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
6	对于“瞬时性泄放”, 输入泄放的总存量 (A 部分: 泄漏速率计算第 22 行)	gal	gal	gal	gal
7	对于“瞬时性泄放”, 见图 14。定位适用于所选物质的曲线。确定泄放后果面积	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
8	在本行输入第 5 行或第 7 行的结果。这就是毒性后果区	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
D 部分: 风险计算					
单台设备的泄放情景风险值					
	孔径→	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
1	按照表 31 的孔径输入同类失效频率				
2	计算失效频率之和	次/年			
3	用同类频率之和除以孔径同类频率, 以此计算每个孔径的分数	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
4	复制可燃后果结果 (C.1 中的第 9 行——设备损伤, 或 C.1 中的第 10 行——致死面积)	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
5	将第 4 行的各个值乘以第 3 行相对应的分数				
6	复制毒性后果结果 (C.2 中的第 8 行)	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
7	将第 6 行的各个值乘以第 3 行相对应的分数	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
8	将第 5 行中的值相加。这就是可燃后果面积值	ft ²			
9	将第 7 行的各个值相加。这就是毒性后果区值	ft ²			

表 B. 6 (续)

10	根据表 B. 3, 将第 7 行或第 8 行中的值转换成对应分类。 这就是后果等级	
11	复制该计算表 B 部分第 10 行的可能性等级	
12	利用图 B. 2, 将第 10 行和第 11 行的类别转换成一个风险	

为了进行定量 RBI 计算, 需要对泄放的一些特性进行定义。本计算表的 A 部分包含确定泄漏速率、持续时间等的初步计算。

然后进行可能性分析 (B 部分) 以获得设备的可能性分类。根据表 B. 5, 通过技术模块次因子来确定可能性分类。

最后, 通过将可能性分类和后果等级放置到风险矩阵中来评价风险 (D 部分)。一个单元或装置内的所有设备都重复上述过程, 这将得出一些风险测定值, 这些值也许有助于按照设备的潜在风险对设备进行优先排序。

附 录 C
(规范性附录)
定量 RBI 分析计算表

C.1 定量检验方法概述

本附录与本标准一起用于定量 RBI 分析。该计算表综合了第 6 章～第 8 章规定的信息和计算，并引导用户通过所要求的每一步进行风险值估算。本附录适用于单体设备，计算 RBI 中所包含的四种不同后果。

- a) 可燃后果。
- b) 毒性后果。
- c) 环境后果。
- d) 生产中断后果。

可燃后果和毒性后果的分析结果用受影响区的面积表示。环境后果和生产中断后果用经济损失计算。

为了进行定量 RBI 计算（见表 C.1），需要确定某些泄放特性。本计算表 A 部分包含确定泄漏速率、泄放类型、泄放时间等的初步计算。

然后进行可能性分析（B 部分），以同类失效频率作为初始点，计算设施的失效频率数据。根据若干个可能增加或降低失效频率的因子对这些同类失效频率加以修正。为了更准确地描述给定装置中具体设备的失效频率，需要考虑以下四个因子：

- a) 技术模块因子——对损伤速率和检验有效性的度量。
- b) 通用因子——一般应用于整个装置的因子。
- c) 机械因子——与具体设备相关的因子。
- d) 工艺因子——对工艺稳定性和泄压阀的评估因子。
- e) 工艺安全管理因子——来自管理系统评估的修正因子。

最后进行风险计算（D 部分），风险等于可能性因子和四种后果之一的乘积。对于所评价的设备，需要计算本研究所考虑的四中风险类型（可燃、毒性、环境和生产中断）。对一个单元或装置内的所有设备都重复上述过程，得到风险值，基于潜在风险进行设备排序。

表 C.1 定量 RBI 分析计算表

项目号：		
运行装置：		
设备编号：		
说明：		
A 部分：泄漏速率计算（见 7.5） 估算不同孔径的泄漏速率、泄放类型和泄放时间		
第 1 步：计算泄漏速率		
1	输入被评估设备中盛装的代表性物质	
2	输入设备存量，采用可能泄放的最大存量。包括不易被隔离（在 5min 内）的容器的存量	
3	利用表 9 输入适用于该区域现有探测系统的检测等级	

表 C.1 (续)

4	利用表 9 输入适用于该区域现有隔离系统的隔离等级				
5	利用表 10 估计基于探测和隔离系统的泄放持续时间	6.35mm (1/4in) min	24.5mm (1 in) min	101.6mm (4 in) min	破裂 min
6	输入操作压力	psia			
7	根据设备中流体的相态,在“气体”或“液体”上划圈。如是液体,则跳到第 15 行。	气体		液体	
气体泄漏速率					
8	输入工艺温度	°F			
9	根据标准流体物性表,输入工艺温度下的气体比热(c_p)	Btu/(lb·mol·°F)			
10	计算并输入 K ($K = c_p/c_v$)				
11	利用式 (7),计算并输入转换压力 (p_{trans})	psia			
12	设备内的流体压力是否高于转换压力 (第 6 行 > 第 11 行)? 如果是,则在“音速”上划圈,进入第 13 行 如果不是,则在“亚音速”上划圈,转到第 14 行	音速		亚音速	
孔径→		6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
13	利用式 (8) 来计算右侧列出的每一孔径的泄漏速率,转到第 16 行	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s
14	利用式 (9) 来计算右侧列出的每一孔径的泄漏速率,并输入泄漏速率。转到第 16 行	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s
液体泄漏速率					
15	利用式 (8) 来计算泄漏速率,输入泄漏速率,转到第 16 行	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s
第 2 步: 确定每一孔径的泄放类型					
16	用最大允许泄放存量除以相应的泄漏速率等于第 2 行除以 (第 13 行、第 14 行或第 15 行),除以 60 得到分钟数。输入分钟值。这就是排空存量所需的时间 (根据初始流量)	min	min	min	min
17	泄放持续时间是否小于 3min? 若是,则为瞬时泄放,否则为持续泄漏				
18	将泄漏速率乘以 3min [(第 13 行、第 14 行或第 15 行) × 180s],输入所得值	lb	lb	lb	lb

表 C.1 (续)

19	第 18 行是否大于 10000lb? 若是, 则为瞬间泄放, 否则为持续泄漏				
20	输入物质的沸点	°F			
21	输入环境状态				
22	参考表 8 来确定流体的最终状态	气态		液态	
23	若第 17 行和第 19 行表明为“持续性的泄漏”, 则输入“CONSTANT”, 否则输入“INSTANT”				
24	输入第 22 行和第 23 行中划圈的项, 即泄放类型 (持续/瞬时和气体/液体)				
25	查看第 15 行和第 16 行。对每一孔径, 输入两者中的较小值, 即泄放时间。对瞬时泄放, 持续时间假设为 0。(第 5 行的泄放持续时间基于检测/隔离系统, 第 16 行的泄放持续时间基于存量/泄漏速率)	min	min	min	min
孔径		6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
26	根据设备类型和总存量限制计算瞬时泄放时的最大泄放量 (第 2 行): 配管——计算管路中的存量, 并加上管路中最大管径的 3min 流量; 泵——计算管路中最大管径的 3min 流量; 其他设备——计算总存量 (顶部和底部), 并加上管路中最大管径的 3min 流量	lb	lb	lb	lb
B 部分: 可能性分析					
可能性分析能够表示设备失效可能性的若干因子的乘积					
同类失效数据					
1	输入设备类型				
孔径		6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
2	根据表 31, 输入各种孔径下的同类失效频率				
设备修正因子					
第 1 步: 技术模块次因子 (8.3.1)					
识别损伤机理。采用合适的损伤机理技术模块来确定各个因子。					
如果未识别出损伤机理, 则输入 -2 作为技术模块次因子 (表 A.1 中第 11 行)					
3	识别出的损伤机理				
	3a 减薄/腐蚀 (是/否) 局部 (是/否)				
	3b 高温氢损伤 (HTHA) (是/否)				
	3c SCC (是/否)				

表 C.1 (续)

注：第 4 行～第 7 行用于记录技术模块的某些基本信息。并非每个模块都需要所有行，并且并非每个技术模块要求的所有数据都给出		3a	3b	3c
4	设备在当前工况的服役年限			
	4a 估算/实测损伤速率			
	4b Nelson 曲线			
	4c SCC 裂纹尺寸或敏感性			
5	计算技术模块表的左栏			
6	确定检验有效性 (H, U, F, P, I)			
6a	检验次数			
7	查表得到技术模块次因子			
8	冗余设计的修正			
9	高度可靠损伤速率数据的修正			
10	修正的技术模块次因子			
11	综合技术模块次因子			
第 2 步：通用次因子 (8.3.2) ——可在 8.3.2 找到所有数值				
12	装置状态因子基于被评估设备的当前条件基础上，由观察者根据专业知识做出判断。设施被评为_____类别，输入数值。			
13	寒冷天气因子表示极低温度所增加的设备失效可能性。输入数值。			
14	地震活动因子反映地震带提高的失效可能性。输入地震带等级_____。输入数值。			
15	通用次因子求和 (Σ 第 12 行、第 13 行和第 14 行)			
第 3 步：机械次因子 (8.3.3) ——可在 8.3.3 中找到所有数值				
设备复杂性因子是管道复杂性次因子或容器复杂性次因子				
16	仅对容器而言，容器复杂性次因子与接管数量有关。 输入接管数量_____。输入接管数量在数值表中相应的值			
对管道而言，管道复杂性次因子要求以下 5 条信息 (第 17 行～第 21 行)				
17	1) 输入接头数量 $\times 10$			
18	2) 输入注入点数量 $\times 20$			
19	3) 输入支管数量 $\times 3$			
20	4) 输入阀门数量 $\times 5$			
21	5) 输入管道长度 (ft)			

表 C.1 (续)

22	计算管道复杂性次因子 [Σ 第 17 行、第 18 行、第 19 行、第 20 行/管道长度 (ft)]	
23	设备复杂性次因子 (第 22 行或第 16 行)	
24	制造规范因子反映按公认规范设计的设备安全可信度, 根据设备制造规范类别	
25	寿命周期因子假设在设备寿命早期和晚期的失效频率较高 服役年限_____/设计寿命_____=_____%	
	设计安全因子反映设备在较高运行压力与设计压力比下、或在明显高于或低于室温下运行所增加的设备失效可能性	
26	(1) 运行压力次因子 $p_{运行}/p_{设计} =$	
27	(2) 操作温度次因子 $T_{运行}$	
28	安全因子 (Σ 第 26 行和第 27 行)	
29	对于旋转设备, 振动监测因子预测性维护程序 (见表 53)	
30	机械次因子求和 (Σ 第 23 行、第 24 行、第 25 行、第 28 行和第 29 行)	
第 4 步: 工艺次因子 (8.3.4) ——可在 8.3.4 中找到所有数值		
工艺次因子反映工艺故障对机械完整性的严重影响		
31	(1) 计划停车次因子反映即便是计划停车也可能增加失效频率 (见表 54)	
32	(2) 非计划性停车次因子要求对每年的非计划性停机次数进行平均 (见表 55)。年平均____	
33	次因子求和 (Σ 第 31 行和第 32 行)	
34	工艺稳定性因子 (见表 56) 从装置的稳定性等级指南中得出。稳定性等级____	
	泄压阀次因子反映泄压阀对保护设备的重要性	
35	泄压阀维护次因子 (见表 57) 是对维护程序关键参数的度量。泄压阀维护类别____	
36	工艺流体的物料成分可能影响泄压阀的可靠性 (见表 58)。结垢工况次因子类别____	
37	腐蚀性系统次因子 (见表 59) 是____否____	
38	清洁工况次因子 (见表 60) 是____否____	

表 C.1 (续)

39	泄压阀次因子 (Σ第 35 行、第 36 行、第 37 行和第 38 行)				
40	组合工艺次因子 (Σ第 33 行、第 34 行和第 39 行)				
41	设备修正因子 (Σ第 11 行、第 15 行、第 30 行和第 40 行)				
工艺安全管理 (PSM) 修正因子					
42	根据图 25, 输入 PSM 修正因子的值				
修正的失效频率					
	孔径	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
43	同类失效频率×设备修正因子×PSM 修正因子 (第 2 行×第 41 行×第 42 行)				
C.1 可燃后果计算 (见 7.9)					
估算因碳氢化合物泄放点燃而对设备和人员造成危害的可燃后果面积					
代表性物质					
1	从 A 部分: 泄漏速率计算第 1 行复制代表性物质				
	孔径	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
泄放类型					
2	复制泄放类型 (A 部分: 泄漏速率计算第 23 行)				瞬时
泄漏速率或泄放量					
3	根据泄放类型复制泄漏速率或泄放量 (A 部分: 泄漏速率计算第 13 行、第 14 行和第 15 行或第 28 行)	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min
探测等级					
4	复制泄漏速率计算的第 3 行 (适用于该区域现有探测系统的探测等级)				
隔离等级					
5	复制泄漏速率计算的第 4 行 (适用于该区域现有隔离系统的隔离等级)				
对可燃事件减缓系统的修正					
6	查找表 19, 以修正基于上述第 3 行的泄漏速率或泄放量。对于减缓系统 (消防水处理系统、监视器或泡沫喷洒系统), 输入修正后的泄漏速率或泄放量来对第 9 行进行修正	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min	lb 或 lb/min	

表 C.1 (续)

设备损伤区域					
7	查找表 11~表 14 中的设备损伤公式，并用修正后的泄漏速率或泄放量（第 6 行）代替相应公式中的“ x 和 X ”（利用第 1 行、第 2 行和第 3 行的信息来选择正确的公式）。当流体温度高于自燃温度 26.7℃（80°F），则利用表 13 或表 14，否则用表 11 或表 12	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
潜在致死区					
8	查看表 11 和表 14 中的潜在致死区，并用修正后的泄漏速率或泄放量（第 6 行）代替相应公式里的“ x 和 X ”（利用第 1 行、第 2 行和第 3 行的信息来选择正确的公式）。如果流体在 26.67℃（80°F），高于其自动点火温度时，则选择表 13 或表 14，否则选择表 11 或表 12	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
降低后果					
9	若表 19 中的任何减缓系统可以降低后果，应将设备损伤区（第 7 行）以推荐的百分比降低。这就是设备损伤区	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
10	若表 19 中的任何减缓系统可以降低后果，应将未修正的潜在致死区（第 8 行）降低至推荐的百分比。这就是致死区	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
C.2 毒性后果计算（见 7.9.4）					
估算 HF 或 H ₂ S 泄放造成的毒性后果区					
1	输入有毒物质及其百分比 注：只编制了 HF 和 H ₂ S 探查表。				
	孔径	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
2	复制泄放类型（A 部分：泄漏速率计算第 24 行）				
3	将泄漏速率（A 部分：泄漏速率计算第 13 行、第 14 行或第 15 行）乘以有毒物质的百分比。若为“瞬时泄放”，则转到第 8 行	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s
4	复制泄放持续时间（A 部分：泄漏速率计算第 25 行）	min	min	min	min
5	有喷水或雨淋系统吗？有 没有				
6	若第 5 行为“是”，则采用水喷淋系统设计信息估算减少的泄漏速率或泄放量。输入修正后的泄漏速率或泄放量	lb/s	lb/s	lb/s	lb/s

表 C.1 (续)

7	对于“持续”泄放，见图 11（HF）或图 12（H ₂ S）。确定下一次最大泄放持续时间的曲线的位置。输入第 6 行（若有可用的雨淋系统）或第 4 行（若没有雨淋系统），给出与泄漏速率相对应的后果区。	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
8	对于“瞬时”泄放，输入总存量（A 部分：泄漏速率计算第 26 行）	kg	kg	kg	kg
9	对于“瞬时”泄放，见图 14。确定适用于选定物质之曲线的位置。输入第 8 行给出的泄放量后果区	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
10	输入第 7 行或第 9 行的结果。这就是毒性后果区	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
C.3 环境后果计算（见 7.9.9）					
估算液体溢出及相关清理所造成的经济损失					
第 1 步 计算泄放量（体积）					
1	复制物质的沸点（NBP）（A 部分：泄漏速率计算第 20 行）。当 NBP < -184.4℃（-300°F）时，输入“不适用”，表示没有因该设备失效而导致的急性环境后果。否则，继续	°F			
2	复制最大有效存量（A 部分：泄漏速率计算第 26 行）	lb			
3	输入大气压力和温度下物质的液体密度	lb/gal			
4	将液体密度乘以最大有效存量（第 2 行~第 3 行）。这就是可能溢出液体的最大容许体积（V _{max} ）	gal			
地下泄放		6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
5	是否可能从容器向地下泄放？ 若答案为“否”，则跳到第 10 行。 是 否				
6	根据地基类型输入相应的泄漏速率（见表 25） 对于瞬时泄放，使用最大孔径（4in）的泄漏速率。 地下瞬时泄放按持续泄漏处理，因为储罐所有面都被土壤所围绕，所以可防止瞬时泄放	gal/d	gal/d	gal/d	gal/d
7	根据探测方法输入相应的探测次数或泄放量的阈值（见表 26）	d	d	d	d
8	将第 6 行和第 7 行相乘，计算泄放量。输入泄放量。这就是地下泄放量	gal	gal	gal	gal

表 C.1 (续)

9	地下泄放的体积是否大于最大体积? (第 8 行 > 第 4 行?) 是 否 若为“是”, 输入第 4 行的值。 若为“否”, 输入第 8 行的值。 如果容器的其他侧壁位于地面以上, 则进入第 10 行。否则, 跳到第 12 行				
地上泄放		6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
10	将液体泄漏速率乘以隔离时间。这就是泄放量 (通过 A 部分: 泄漏速率计算, 第 15 行 × 第 5 行)。不得超过 C.3 部分第 2 行给出的值	gal	gal	gal	gal
11	将液体密度乘以泄放量 (第 3 行 × 第 10 行), 得出溢出的质量。输入溢出的物质质量。若泄放的质量超出最大容许存量 (第 10 行 > 第 2 行), 则采用最大允许存量来计算溢出量	gal	gal	gal	gal
第 2 步: 去除无环境影响的情景 (仅对地上、防火堤和持续泄漏情景)					
12	输入防火堤的容积——若没有堤坝, 则输入 0, 并跳到第 17 行	gal			
13	假设为矩形堤坝, 确定其 4 面中的关键屏障 (即诸如围墙, 当溢出物漫过该围墙时, 需要对其进行清理, 非关键屏障是与邻近堤坝共用的围墙。) 输入关键围墙的比例分数 (K_{crit}) (0, 1)。 若 $K_{crit} = 0$, 则可以放弃该情景。跳到第 30 行, 并且所有孔径均输入 0				
14	从堤坝容积中减去泄放体积 (第 11 行 ~ 第 12 行)	gal	gal	gal	gal
15	泄放体积是否小于堤坝容积 (即第 14 行 < 0)	是 否	是 否	是 否	是 否
16	堤坝是否可以通行, 并且不渗水 (即不能作为道路)	是 否			
17	若第 15 行和第 16 行均为“是”, 对于相应的孔径, 在此处及第 30 行输入 0。跳过第 18 行、第 19 行中的这些孔径。否则继续				
第 3 步: 估算泄放到环境中的物料量					
持续泄漏		6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
18	在没有堤坝时, 如果是地上泄放, 则向环境中泄放量 (V_{env}) 应当等于第 11 行所述的体积				

表 C.1 (续)

19	输入堤坝可能打开的概率（建议值为 0.025）				
20	将堤坝容积乘以第 19 行	gal			
21	将第 20 行加上第 14 行。这就是非破裂性泄放泄放到环境中的物料量	gal	gal	gal	gal
22	对于持续泄漏，若第 14 行 ≤ 0 ，则输入第 14 行的值，作为泄放到环境中的物料量（ V_{env} ）	gal	gal	gal	gal
溢出堤坝的物料量					
23	计算最大允许泄放体积与堤坝体积之比（第 4 行/第 12 行）。输入该值				
24	根据 7.9.9，得出与第 20 行的值相应的泄漏量因子 K_{vol} 。输入 K_{vol}				
25	输入从储罐中心到关键堤坝围墙的平均距离	ft			
26	输入容器半径	ft			
27	输入从容器中心到关键围墙的平均距离与容器半径的比值（ K_d = 第 25 行/第 26 行）				
28	第 4 行 $\times$ 第 13 行 $\times$ 第 24 行 $\times$ 第 27 行。即瞬时泄放到环境中的体积（ $V_{env} = V_{max} \cdot K_{crit} \cdot K_{vol} \cdot K_d$ ）	gal			
29	将上述第 22 行和第 28 行相加，以确定向地上泄放的总量	gal			
第 4 步：估算最终液体体积——仅地上泄放					
30	输入物质的蒸发常数（ K ） （见图 15～图 18）				
31	输入完成 1/2 清理工作所需的估算时间（ $t_{1/2}$ ）	h			
32	计算最终液体体积因子 F_{liquid} （未蒸发液体的定量描述）。 按照 7.9.9 计算。 若为地下泄放，则 $F_{liquid} = 1$				
第 5 步：确定单位体积清理成本					
33	输入估算的清理地下泄放所需的单位清理成本 （若没有可用数据，7.9.9 列出了一些建议成本值）	美元/gal			
34	输入地上泄放的清理成本估计值。见表 22	美元/gal			
35	确定清理地下泄放的成本——第 9 行乘以清理地下泄放的成本（第 33 行）	美元	美元	美元	美元
36	地上泄放的清理——第 32 行乘以第 34 行，以确定清理地上泄放的清理成本	美元	美元	美元	美元

表 C.1 (续)

37	将第 35 行和第 36 行相加,以确定该设备的总清理成本	美元	美元	美元	美元
C.4 生产中断计算					
日值损失法 (见 7.10)					
已知停车所造成的日损失,估算生产中断所造成的经济损失					
1	输入装置/设施停车所造成的日损失	美元/d			
2	估算设施每平方米 (m ²) 的设备成本。在此处输入该数值	美元/ft ²			
	孔径	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
3	根据可燃后果计算表 (C.1 第 9 行),输入可燃后果 (设备损失面积)	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
4	第 2 行乘以第 3 行得到可燃事件造成的设备损伤损失,输入该损失的值	美元	美元	美元	美元
5	根据图 20 输入与第 4 行的设备损伤相对应的生产中断天数	d	d	d	d
6	被评估设备是否是唯一的或难以替换的,并且其损失是否将导致设施的大范围停车?若是,输入估算的停车时间。 若不是,输入 0	d			
7	对于每个孔径,用 7.10.2.2 的内容估算该设备的可燃事件损伤邻近关键设备,如电力线、控制电缆等的可能性。 采用第 3 行的面积来估算损伤可能性				
8	估算邻近关键设备损伤所导致的停车时间,并在此处输入天数	d	d	d	d
9	第 7 行乘以第 8 行即为由于邻近设备损伤所导致的预计装置停产时间	d	d	d	d
10	对每一孔径输入上述第 5 行、第 6 行和第 9 行的最大值。可燃事件所造成的装置停产时间	d	d	d	d
11	将第 10 行的各栏乘以第 1 行,每个孔径的可燃后果所造成的生产中断损失	美元	美元	美元	美元
12	在该栏输入数字 5,这就是缺省的基准乘数	5			
	孔径	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
13	估算公司更换损坏设备的能力。参见表 28				

表 C.1 (续)

14	估算该事故对邻近关键设备如电力线、控制电缆等的潜在损伤。根据第 3 行所示的损伤面积,对每一孔径进行估算。采用表 28 的概率				
15	估算邻近关键设备的事故后果因子。也可以从 7.10.2.2 获得该值				
16	第 14 行乘以第 15 行,并在该行输入结果				
17	该单元的产品损失对其他设施/单元的运行产生什么样的影响? 根据 7.10.2.2 给出的信息输入一个数值				
18	将第 12 行、第 13 行、第 16 行和第 17 行的值相加。在此处输入结果				
19	输入单位面积的设备成本	美元 /ft ²			
20	根据 C.4 的第 3 行,输入设备损失面积—可燃后果	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
21	第 19 行乘以第 20 行即为每个孔径泄放所造成的设备损伤损失	美元	美元	美元	美元
22	将第 18 行中的值乘以第 21 行的金额(美元)。在此处输入结果。这是每个孔径泄放所造成的服务中断损失				
D 部分: 风险计算 (见 6.4)					
单台设备泄放的风险值					
	孔径	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	破裂
1	复制失效频率 (B 部分: 可能性分析计算第 43 行)	次/年	次/年	次/年	次/年
2	复制可燃后果 (C.1 可燃后果计算第 9 行——设备损伤或第 10 行——致死面积)	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
3	复制毒性后果 (C.2 毒性后果计算第 10 行)	ft ²	ft ²	ft ²	ft ²
4	复制环境后果 (C.3 环境后果计算第 37 行)	美元	美元	美元	美元
5	复制生产中断结果 (C.4 生产中断后果计算部分的两种方法之一, 第 11 行或第 22 行)	美元	美元	美元	美元
第 1 步: 计算风险结果					
6	可燃烧后果乘以失效频率 (第 1 行×第 2 行)	ft ² /年	ft ² /年	ft ² /年	ft ² /年
7	毒性后果乘以失效频率 (第 1 行×第 3 行)	ft ² /年	ft ² /年	ft ² /年	ft ² /年
8	环境后果乘以失效频率 (第 1 行×第 4 行)				

表 C.1 (续)

9	生产中断后果乘以失效频率 (第 1 行×第 5 行)				
10	所有孔径的可燃风险总和 (Σ第 6 行)	ft ² /年			
11	所有孔径的毒性风险总和 (Σ第 7 行)	ft ² /年			
12	所有孔径的环境风险总和 (Σ第 8 行)	美元/年			
13	所有孔径的生产中断风险总和 (Σ第 9 行)	美元/年			
第 2 步: 计算加权的风险后果					
14	求所有孔径的失效频率总和 (Σ第 1 行)	1/年			
15	确定风险加权的可燃后果 (第 10 行/第 14 行)	ft ²			
16	确定风险加权的毒性后果 (第 11 行/第 14 行)	ft ²			
17	确定风险加权的环境后果 (第 12 行/第 14 行)	美元			
18	确定风险加权的生产中断后果 (第 13 行/第 14 行)	美元			

附 录 D
(规范性附录)
管理系统评价分析计算表

管理系统评价分析计算表见表 D. 1 和表 D. 2。

表 D. 1 分值分配

项 目	主 题	问 题 数	总 分 值
1	领导和管理	6	70
2	工艺安全信息	10	80
3	工艺危害性分析	9	100
4	变更管理	6	80
5	操作规程	7	80
6	安全作业	7	85
7	培训	8	100
8	机械完整性	20	120
9	开工前安全审查	5	60
10	应急措施	6	65
11	事故调查	9	75
12	承包商	5	45
13	安全生产管理系统评价	4	40
总计		101	1000

表 D. 2 管理系统评价分析计算表

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
1	领导和管理		
	领导对实施和保证有效的安全管理具有举足轻重的意义		
1. 1	管理层或基层单位对安全管理事项是否有总的方针政策来说明，强调安全与损失控制，以及领导的安全管理责任	10	
1. 2	总体政策说明是否：		
	a) 纳入分析计算表？	2	
	b) 张贴告示于各特定作业区？	2	
	c) 作为操作规范和章程的一部分？	2	
	d) 在所有主要培训课程中涉及？	2	
	e) 用在其他方面？（请详细说明之）	2	
1. 3	在每位管理人员的工作责任分工中，对安全和健康事故处理的责任权限是否有清晰明确的规定	10	
1. 4	工艺安全 and 健康问题是否都作为年度目标落实到所有管理人员身上，且在定期和年度考评中，是否将这些目标纳入重点考核项目之列	15	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
1.5	过去三年中, 整个管理团队中有百分之几的人员参加过安全管理方面的正规培训课程和外界举办的相关专题交流研讨会	%×10	
1.6	企业是否设有安全委员会或类似性质的机构? a) 这一委员会组织是否为企业内交叉式机构? b) 委员会是否定期会晤协商, 其合理化建议是否登记在案且如期执行	5 5 10	
总分数		70	
2	工艺安全信息		
2.1	对每一单元加工或使用的所有化学品有无材料安全数据单 (MSDS)? a) 每一化学品现场最大存储量是否按清单列出? b) 这些信息是否提供给操作、维护以及承包单位的相关人员? c) 标准操作规程和操作培训中是否明确提醒现场中的各种材料由于疏忽混合可能导致的灾难性后果	5 2 2 2	
2.2	质量控制规程是否备齐并付诸实施, 以确保所有标识的原材料按技术要求使用和库存	10	
2.3	单位内部是否存有最新的以下文件? a) 操作过程的化学原理概要。 b) 温度、压力、流量以及成分等工艺参数的安全范围清单。 c) 工艺参数偏离安全范围所导致安全事故后果的说明	3 3 3	
2.4	是否有工艺流程框图或工艺流程简图, 以助于操作人员加深对工艺的理解	5	
2.5	是否有现场所有装置的 P&ID (工艺和仪表框图)	10	
2.6	是否有文件表明装置内所有设备的设计制造均符合相关的规范、标准, 并具有良好通用的工艺操作性能	8	
2.7	a) 所有按过时的规范、标准设计和制造的设备是否都做了标识? b) 是否有关于此类设备的设计、维修、检测、测试均可保证其安全运行的文件记录	4 4	
2.8	对工艺过程的每台设备是否都编制了书面记录, 且是否包括如下所述项目? a) 制造材料。 b) 规范和设计标准。 c) 电器类别。 d) 安全泄放系统设计及其依据。 e) 通风系统设计。 f) 安全系统 (包括联锁、监测以及紧急控制系统)	1 1 1 1 1 1	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
2.9	现有章程是否确保每个管理工艺的责任人员均具有与其相关的工艺安全方面的作业知识	5	
2.10	上述工艺安全信息是否作为参考手册造册存放? 信息的个别要素可以多种形式存入在不同地点, 但手册中应明确提出其存放地点	8	
总分数		80	
3	工艺危害性分析		
3.1	在过去五年中, 所有处理危险性化学品的工艺装置中, 有百分之几的装置进行过正规的工艺危害性分析 (PHA)	$\% \times 10$	
3.2	为指导将来的工艺危害性分析 (PHA), 是否建立了优先次序? 优先基本原则是否强调了下述各因素? a) 作业场所有有毒、易燃、易爆物品的存放。 b) 物料的毒性或反应等级。 c) 直接接近设备的人数, 包括现场人员和周边人员。 d) 工艺的复杂性。 e) 苛刻的工艺条件或可能引起腐蚀或侵蚀的工艺条件	5 1 1 1 1 1	
3.3	最新的危险评估是否强调: a) 工艺的危险性? b) 对本装置以往意外事件/事故报告进行分析总结, 以确认此类事故造成灾难性后果的潜在可能性? c) 对危险品的工程与管理控制及其相互关系? d) 工程与管理失控所致的后果? e) 设备装置地点? f) 人为因素? g) 因失控对人员安全及健康影响的定性评估	2 2 2 2 2 2 2	
3.4	基于最近进行的危险性分析 (PHA): a) 评估组组长在该技术领域是否有丰富经验? b) 评估组组长是否接受过该技术领域的正规培训? c) 评估组中是否至少有一人是本工艺方面的专家? d) 评估组是否在工作过程中体现良好的职业纪律或根据需要制定了相关的纪律? e) 评估组中是否至少有一人参与初步设计	3 3 3 3 3	
3.5	是否有正规而健全的体系保证准确记录危险性评估中提出的问题及建议, 以保证所提问题和建议及时采纳和执行, 且入档备查? a) 若是, 是否制定了执行的时间表? b) 该体系是否要求 PHA 中与决策相关的建议及其完成状态告知操作、维修和其他有关人员	8 3 3	
3.6	过去或计划将要进行的危险性分析所采用的技术方法是否适合本工艺的复杂性	10	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
3.7	危险性分析的领导是否接受过该分析方法的培训	12	
3.8	基于最近进行的危险性分析, 其平均分析值是否适合本系统的复杂性 (一般来说, 2 个~4 个 P&ID 的复杂性应每天进行分析)	10	
3.9	确定了工艺操作的危险性后, 对情景的失效可能性及后果是否进行了定性或定量分析	5	
总分数		100	
4	变更管理		
4.1	设备是否备有书面的变更管理规程, 保证增加的新设备或修改工艺的操作有章可循? 有无明确恰当地说明变更授权程序	9 5	
4.2	变更管理程序是否涉及下述变更内容? a) 设备的特性变更, 而非种类变更 (如扩产、设备维修、仪表或报警系统更新等)。 b) 工艺中化学品的变更及其参数调整 (如进料、催化剂、溶剂等)。 c) 工艺条件的变动 (如操作温度、操作压力、产量等)。 d) 操作规程的重大变动 (如开停车规程、装置定员标准或分工等)	4 4 4 4	
4.3	对临时变更的设备是否有真正的理解? a) 变更管理是否分临时变更和永久变更? b) 临时变更设备是否有“临时”标识, 以便确认该设备在使用一段时间后需要拆除或重新划归为永久性设备	5 4 5	
4.4	一旦工艺系统发生变更, 变更管理规程是否明确要求按以下步骤运行? a) 对操作单元进行危险性分析。 b) 更新制定有关的操作程序。 c) 更新有关的维修程序及检测计划。 d) 修改 P&ID 操作范围的说明、原料安全数据表以及有关的工艺安全信息。 e) 通知工艺变更区域所有的操作和维修人员, 并对其提供必要的培训。 f) 通知受工艺变更影响的所有承包商。 g) 重新审核工艺变更对上下游单体或相关设备的影响	3 3 3 3 3 3 3	
4.5	当工艺或操作规程发生变更时, 是否有书面程序要求审核此变更对设备及其制造材料所产生的影响以及失效机理的改变	10	
4.6	当通过更换或维修项目的名义变更设备或制造材料时, 是否采用一套健全体系正规审核所有相关材料的金相转变, 以确认新材料满足工艺要求	5	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
总分数		80	
5	操作规程		
5.1	所有装置的操作及维护人员是否都有书面形式的操作程序、规程？ 该操作程序、规程是否明确规定每一区域操作人员的岗位责任？	10 5	
5.2	下述操作注意事项是否包含在标准操作规程（SOP）中？ a) 首次开车。 b) 正常（也包括紧急情况）操作。 c) 正常停车。 d. 1) 紧急停车。 d. 2) 起草本规程人员的岗位确定吗？ e) 用于校正或避免偏离安全操作范围的步骤。 f) 维修后的开车。 g) 安全系统及其作用	 2 2 2 2 2 2 2 2	
5.3	下述安全健康注意事项是否包括在所含化学品的所有标准操作规程（SOP）中？ a) 化学品的特性及其毒性。 b) 防止化学品外露而采取的必要措施，包括控制及人身防护设备。 c) 一旦发生身体接触而采取的控制措施	 3 4 3	
5.4	书面形式的设备标准操作规程（SOP）是否简明扼要，以确保对其准确理解和规范执行	10	
5.5	是否具备健全的程序确保各班次间交接相关信息	10	
5.6	操作规程例行审核的频率如何，以确保其及时反映实际操作情况，并按要求更新？（仅选一项） ——至少每年一次，或只要工艺性更改。 ——每两年一次。 ——仅在重大工艺变更时。 ——尚未建立修订计划	 11 6 3 0	
5.7	多长时间对书面操作规程的执行情况进行一次客观评定（仅选一项）？ ——每6个月一次。 ——每年一次。 ——每3年一次。 ——从未做过相关评级	 8 4 2 0	
总分数		80	
6	安全作业		

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
6.1	是否对雇员和承包人采取安全作业措施, 严格控制操作维护中的安全隐患, 包括: a) 高温作业。 b) 线路切断操作程序。 c) 关闭/打开作业。 d) 狭窄通道作业。 e) 打开工艺设备或管道的作业。 f) 负责维护、承包、测试或其他技术支持人员进入设备的作业。 g) 车辆准入。 h) 起重作业。 i) 特殊危险品的处理 (如有毒物、放射性物质等) 作业。 j) 在役设备检修与维护	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	
6.2	在 6.1 所列的安全生产实施前是否都需要工作授权书或作业许可? 若是, 该审批程序是否具备以下内容: a) 表格是否适当涵盖目标区域。 b) 详细列举文件副本的数量及颁发者清单。 c) 文件起草后的授权与批准。 d) 工作完成后的验收。 e) 班次变换后增加或重新起草的程序	10 1 1 1 1 1	
6.3	上述每项操作的授权签发人员是否经过正规培训	10	
6.4	按上述许可和程序的要求, 受影响的工作人员是否接受过培训	10	
6.5	多长时间进行一次独立评估 (如由安全部门或类似部门负责主持的评估), 其评估结果通报主管人员, 以确定施工许可的要求, 以及在其职责权限内确定关键装置的特殊施工程序? (仅选一项) ——每 3 个月一次。 ——每 6 个月一次。 ——每年一次。 ——尚未评估过	8 4 2 0	
6.6	现有程序是否要求至少每三年对所有施工许可程序进行一次正式的审核并根据需要更换? 以往记录是否表明这些均按期实施	10 4	
6.7	是否做过为确定作业环境是否符合人机工程标准的勘查? 上述调查有否发现不足? 若有, 是否已经纠正	4 4	
总分数		85	
7	培训		
7.1	是否有书面程序规定, 新雇员要接受诸如现场安全操作程序、操作实习等方面的一般培训	10	
7.2	是否有书面程序规定, 在从事新工作前雇员要接受除 7.1 中规定的一般培训外, 还要接受一定内容和数量的现场特殊培训	10	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
7.3	7.2 规定的培训工作是否包括下列项目： a) 操作工艺及其特殊安全健康危害的概况。 b) 全部操作规程的培训。 c) 现场应急程序的培训。 d) 强调与安全相关的问题，如施工许可，联锁的重要性和其他安全制度。 e) 安全施工实习。 f) 必要的基本技能	3 3 3 3 3 3	
7.4	对操作员正式培训工作结束后，用什么方法认定员工理解了所讲授的内容（选择一项）？ ——记录考察及操作技能考核。 ——仅进行操作技能考核。 ——导师的意见。 ——无需认定	10 7 3 0	
7.5	每隔多长时间对工艺操作员进行一次正式的再培训（选择一项）： ——至少 3 年一次。 ——仅当主要培训操作工艺变更时。 ——从来没有	10 5 0	
7.6	对每位操作员每年进行培训的平均时间为多久？按各种培训级别平均计算 （选择一项）： ——15d/年或更久。 ——11d/年~14d/年。 ——7d/年~10d/年。 ——3d/年~6d/年。 ——小于 3d/年	10 7 5 3 0	
7.7	是否使用一种系统方法（如雇员调查、任务分析等）确定在实际工作中所有员工需要培训的情况，包括 7.1 和 7.2 中提到的培训程序？ a) 已经建立的培训计划有明确的要求吗？ b) 对培训要求进行定期审核和修改吗	4 4 4	
7.8	正式培训计划是否包括以下项目？ a) 确定每位培训员的资格，并建档。 b) 为确保完成既定内容，按照审核和批准的书面教学计划实施。 c) 在进行“动手培训”时，利用教具和模型。 d) 为每位受训者保留培训记录，记录内容含有培训日期和教学方法的说明，以确定对内容的融会贯通	5 5 5 5	
总分数		100	
8	机械维修		

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
8.1	是否已经为每台工艺设备制定了包括以下要素的书面检测计划： a) 已经确认需要检测的所有设备？ b) 检测工作的责任是否已经下达？ c) 检验次数是否确定？ d) 检测方法和地点是否已经指定？ e) 检测报告的要求是否已经明确	2 2 2 2 2	
8.2	8.1 提到的检测计划是否包括对所有工艺装置的正规、外观检测规程： a) 在外观检测项目中，是否考虑下列所有因素：设备外部条件、保温、油漆/涂层、支架、附件，还有认定机械损坏、腐蚀、振动、泄放、不合用的零件或修理。 b) 是否按 8.1 中的检测计划，对每套装置中的所有压力容器至少每 5 年要进行一次外观检测？ c) 是否根据检测计划，对所有现场处理挥发、易燃、有毒、酸、碱及其他类似物料的管理，至少每 5 年进行一次外观检测	2 1 2 2	
8.3	是否根据检测计划，对装置中的所有压力容器采用无损检测技术进行一次内部或详细地检测	5	
8.4	对操作设备的每一元件是否均有适当的人员进行审查，以认定老化或失效的可能原因？ a) 当制订检测方法、部位、检测频率和预防性检修计划时是否使用以上信息？ b) 是否按照操作适用性评价确定了缺陷的范围	5 1 1	
8.5	是否采用正规的程序对管道和容器进行测厚？ a) 当选定了厚度检测的部位时： ①失效的可能性和后果是主要因素吗？ ②是否考虑了局部腐蚀或侵蚀？ b) 为保证同一部位的重复测量，是否在管道和容器本身及其图纸上均对测厚部位做了清晰的标识？ c) 此次厚度检测是最新的吗？ d) 检测结果是否用于预测寿命及调整未来检验频率	3 1 1 2 2 2	
8.6	借助适用的规范和当前操作条件，对所有管道系统都确定了最高允许工作压力 (MAWP) 了吗？ 每次厚度检测后，是否采用最新的壁厚和腐蚀速率对最高允许工作压力 (MAWP) 进行了修正	3 2	
8.7	在检测频率方法及程序修改前，是否有书面程序规定其审核和批准的级别要求	5	
8.8	是否有详细的检查明细表，该表是否已经采用？ 设备或操作工艺变更时，对检查明细是否定期审查和修改	3 2	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
8.9	对所有设备进行的检测、检测和维修是否及时存档	3	
	存档内容包括下列所有内容吗? a) 检测日期。 b) 检测者的姓名。 c) 受检设备的标识。 d) 检测或测试内容的说明。 e) 检测结果。 f) 基于检测结果的建议。 g) 所有维修项目的日期和情况说明	3	
8.10	有无书面程序要求对检测过程中发现的所有设备缺陷应安全及时地进行维修,并跟踪其实施情况,确保按进度完成? a) 是否有帮助确定优先实施项目的体系? b) 若注意到有缺陷,继续使用设备的决定是否基于适用性的可靠的工程评价	5 1 2	
8.11	是否有一完整的、最新的、核心的文件记载所有检验程序和报告? 是否每位工艺操作员都可得到该类文件	3 2	
8.12	参与设备的维修与检测的所有员工是否都得到关于工艺及其危险性方面的培训	5	
8.13	是否对所有参与设备维修和检测的员工,都按其工作岗位进行了培训,以保证工作的安全和效果? 上述培训工作完成后,是否用正规的方法证实员工对培训内容已经理解	3 2	
8.14	是否按适当的行业规范和标准对检测进行了性能验证? (SY/T 6552, SY/T 6553 和 SY/T 6620)	5	
8.15	在特殊设备和车间需要特定技能的情况下,为保证安全操作,有否对承包商员工专门组织特殊的培训	5	
8.16	是否对设备中所有安全阀的检验和测试制定了计划? a) 计划正在执行? b) 所有检测和维修都归档? c) 所有安全阀维修人员是否都经全面培训且有丰富的安全阀维修经验	3 1 1 1	
8.17	设备预防性维修程序是否满足下列要求? a) 所有关键设备,如电气开关和转动设备都有特殊说明。 b) 采用检查表和检查单。 c) 工作按时完成。 d) 检验程序是否根据检测反馈的信息而不断修改? e) 根据预防性检修程序 (PM) 确认、跟踪并完成维修	1 1 1 1 1	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
8.18	设备的制造和维修是否有质量保证计划? a) 是否确保使用合理的材料? b) 制造和检测规程是否正确? c) 设备是否按照规范和标准维修? d) 是否正确安装和紧固法兰? e) 是否对更换材料和维修材料准确认定、检测和保存	1 1 1 1 1	
8.19	是否对所有压力容器都有永久的记录, 包括如下项目: a) 制造商资料和其他永久性数据。 b) 容器标识。 c) 安全阀资料。 d) 最新的检测、维修、更换和重新标定的结果	5	
8.20	诸如书面要求、监控签收等方面的体系是否可以保证对所有容器和管道均按规范进行维修和更换	5	
小计		15	
总分数		120	
9	开工前安全审查		
9.1	对所有新开发、建设和重大技术改造项目, 公司政策是否要进行正规的生产工艺危险性分析 (PHA)	10	
9.2	在新的或经重大技术改造的设备启动前, 是否有书面程序要求完成以下条款? a) 书面操作程序已公布。 b) 生产工艺中所有人员培训已结束。 c) 适用的维护、检验、安全与紧急事故处理程序均已就位。 d) 从正式的 PHA 中得到任何建议都已实施	10	
9.3	是否有书面要求所有设备在启动前检查, 确认其按照设计说明和制造厂家的建议进行安装? a) 是否在每一适当的制造和施工阶段, 书面程序要求出具正式的检测报告? b) 当发现故障时, 书面程序是否提出了排除方法和跟踪要求	10 5 5	
9.4	在开车前的安全勘查中, 是否要求进行物理检查以确保: a) 在系统注入高危害化学品前, 所有机械设备密封完好? b) 开车前, 所有控制设备操作正常。 c) 所有安全设施 (安全阀、联锁器、检漏设备等) 均安装正确, 操作正常	5 5 5	
9.5	开车前, 在 9.1, 9.2, 9.3 和 9.4 中各条款均要求有正式完成的记录, 合并一份一起作为设备管理文件	5	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
总分数		60	
10	应急措施		
10.1	是否有一份设备应急计划, 描述其所有可能的紧急情况	10	
10.2	是否要对应急计划定期进行正规检查和修订? a) 设备变更管理程序是否包括考虑变更对设备应急计划的可能影响? b) 新的 PHA 的审查结果是否确定, 新的危害源作为修改应急计划的必要考虑因素	2 2	
10.3	应急计划是否至少包括下列几项? a) 指派一人作为紧急情况协调员, 并明确其职责的程序。 b) 紧急撤离程序和指定的撤离路线。 c) 在疏散前, 仍然在关键岗位操作员工须遵守的操作程序。 d) 紧急疏散后, 清点所有员工的程序。 e) 参与抢救人员和医务人员的职责。 f) 火警和其他紧急情况报警的推荐方法。 g) 控制危险品的操作程序。 h) 搜寻和抢救计划。 i) 清场和再入程序	2 2 2 2 2 2 2 2 2	
10.4	是否对设备建立了紧急情况控制中心? 是否配备下述资源? a) 应急电源。 b) 必要的通讯设备。 c) 所有关于设备操作的 P&ID, SOP, MSD, 配置图和其他关键安全资料的备份	2 2 5	
10.5	按照应急计划, 是否任命了一些能够提供进一步信息或解释的人员便于进一步联系? 上述人员名单是否已张贴到有关部位 (如控制室、安全办、紧急情况控制中心等)	5 2	
10.6	是否安排定期的疏散演习以评估和加强应急计划	10	
总分数		60	
11	事故调查		
11.1	是否有书面的事故及其直接损失调查报告程序? 程序是否要求对调查报告中的问题和建议尽快解决	10 5	
11.2	调查程序是否要求调查组包括以下人员: a) 受过事故调查技术培训的人员。 b) 生产线总监或同样熟悉工艺过程的人员	3 3	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
11.3	指出调查程序是否要求由调查员对下述项目进行调查,并以标准格式记录调查结果?		
	a) 火灾和爆炸。	2	
	b) 等于或略高于重建价的财产损失。	2	
	c) 受伤(非残疾)和职业病的人数。	2	
	d) 危险品的泄放。	2	
	e) 其他突发事件导致的直接损失	2	
11.4	事故调查是否有一个标准格式,且包括下列内容?		
	a) 事故日期。	2	
	b) 开始调查日期。	2	
	c) 事故说明。	2	
	d) 事故可能的原因。	2	
	e) 潜在的严重后果及事发频率的评估。	2	
	f) 预防事故再次发生的建议	2	
11.5	根据对工厂记录的审查,对事故调查程序进行的程序如何	5	
11.6	若事故是由于设备的零件或部件引起,在事故分析中是否要求有相关的检测和技术人员参与失效分析,以便确定事发条件或操作条件	10	
11.7	对事故调查报告进行的审核是否由涉及到事故的直接人员评议,包括合同工	5	
11.8	在过去的12个月内,是否将任何事故的报告和结论都通报到公司内其他类似车间班组	6	
11.9	程序是否要求将事故报告和工艺危害性分析中发现的问题认真审核并写入新的危险性分析(PHA)中	6	
总分数		75	
12	承包商		
12.1	签订合同前,选择承包商的程序包括下列各项?		
	a) 承包商安全和健康状况审查。	3	
	b) 承包商以前亏损数据审查。	3	
	c) 对有关承包商进行安全有效施工经验和技能的文件审查	3	
12.2	开工前,是否书面通知承包商?		
	a) 所有生产工艺和承包商工作中已知的潜在性危险。	2	
	b) 本厂的安全工作实际情况。	2	
	c) 准入控制。	2	
	d) 所有应急计划中适用的条款	2	
12.3	是否与承包商举行开工前会议、认真审核承包商工作范围以及本单位对安全、质保和性能的要求	9	

表 D.2 (续)

项 目	主题及评价分析	满 分	实 评 分
12.4	是否进行定期评估, 确保承包商为其员工提供培训、指导、监督等, 保证合同工完全遵守工厂的安全操作规程	9	
12.5	本节所提到的规程是否包括诸如维修、检修、重大技术发行或特种作业的所有承包商	10	
总分数		45	
13	安全生产管理系统评价		
13.1	对工厂安全生产管理系统多久时间进行一次正式的书面评价 (选择一项)? a) 每一年一次。 b) 每三年一次。 c) 尚未进行	10 7 0	
13.2	根据上次评价的要求, 是否已经制定实施计划	10	
13.3	根据最近的评价, 评估小组是否包括具有下述技能的人员: a) 受过正规评估方法培训? b) 被认定具有深厚的工艺知识	5 5	
13.4	根据对最近评估的审核, 评价的广度和深度是否符合工厂情况	10	
总分数		40	

附 录 E
(资料性附录)

OSHA 1910 《职业安全与卫生条例》和《美国环保署危害性化学品清单》

(强制执行) (OSHA 1910.119, 附录 A)

表 E.1 为毒性和反应性高危害化学品清单, 在该清单中给出的阈值之上存在发生灾难性事故的潜在性。

表 E.1 高危害性化学品、有毒品和反应物品清单

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (1b) ^b
乙醛	75-07-0	1135 (2500)
丙烯醛 (2-丙烯醛)	107-02-8	68.1 (150)
丙烯酰氯	814-68-6	113.5 (250)
烯丙基氯	107-05-1	454 (1000)
丙烯胺	107-11-9	454 (1000)
烷基铝	变化	2270 (5000)
无水氨	7664-41-7	4540 (10000)
氨溶液 [≥44%氨 (质量)]	7664-41-7	6810 (15000)
高氯酸铵	7790-98-9	3405 (7500)
高锰酸铵	7787-36-2	3405 (7500)
肿 (也称砷化氢)	7784-42-1	45.4 (100)
二氯甲基醚	542-88-1	45.4 (100)
三氯化硼	10294-34-5	1135 (2500)

表 E.1 (续)

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (lb) ^b
三氯化硼	7637-07-2	113.5 (250)
溴	7726-95-6	681 (1500)
一氯化溴	13863-41-7	681 (1500)
五氟化溴	7789-30-2	1135 (2500)
三氯化溴	7787-71-5	6810 (15000)
三溴丙烯 (也称为溴丙炔)	106-96-7	45.4 (100)
叔丁基过氧化物	75-91-2	2270 (5000)
过氧化叔丁基苯甲酸酯	614-45-9	3405 (7500)
碳酰氯 (又称光气)	75-44-5	45.4 (100)
碳酰氯	353-50-4	1135 (2500)
硝酸纤维素 (氮浓度>12.6%)	9004-70-0	1135 (2500)
氯	7782-50-5	681 (1500)
二氧化氯	10049-04-4	454 (1000)
五氟化氯	13637-63-3	454 (1000)
三氟化氯	7790-91-2	454 (1000)
氯甲甲醚	107-30-2	227 (500)

表 E.1 (续)

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (1b) ^b
三氯硝基甲	76-06-2	227 (500)
三氯硝基甲和溴甲烷混合物	无	681 (1500)
三氯硝基甲和氯甲烷混合物	无	681 (1500)
氢过氧化钴烯	80-15-9	2270 (5000)
氰	460-19-5	1135 (2500)
氯化氰	506-77-4	227 (500)
氰尿酸氟	675-14-9	45.4 (100)
过氧化乙酰 (浓度>70%)	10-22-5	2270 (5000)
重氮甲烷	334-88-3	227 (500)
过氧化二苯酰	94-36-0	3405 (7500)
乙硼烷	19287-45-7	45.4 (100)
叔丁基过氧化物	110-05-4	2270 (5000)
二氯代乙炔	7572-29-4	113.5 (250)
二氯甲硅烷	4109-96-0	1135 (2500)
二乙基锌	57-20-0	4540 (10000)
过氧化二异丙基二碳酸酯	105-64-6	3405 (7500)

表 E.1 (续)

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (lb) ^b
二月桂酰过氧化物	105-74-8	3405 (7500)
二甲基二氯硅烷	75-78-5	454 (1000)
1,1-二甲基胍	57-14-7	454 (1000)
无水二甲胺	124-40-3	1135 (2500)
2,4-二硝基苯胺	97-02-9	2270 (5000)
乙烷基甲基过氧化酮 (又称过氧化甲乙酮; 浓度>60%)	1338-23-4	2270 (5000)
乙腈	109-95-5	2270 (5000)
乙胺	75-04-7	3405 (7500)
二氟乙醇	371-62-0	45.4 (100)
氧化乙烯 (环氧乙烷)	75-21-8	2270 (5000)
乙撑亚胺	151-56-4	454 (1000)
氟	7782-41-4	454 (1000)
甲醛 (又名福尔马林)	50-00-0	454 (1000)
呋喃	110-00-9	227 (500)
六氟丙酮	684-16-2	2270 (5000)
无水盐酸	7647-01-0	2270 (5000)

表 E.1 (续)

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (lb) ^b
无水盐酸	7664-39-3	454 (1000)
溴化氢	10035-10-6	2270 (5000)
氯化氢	7647-01-0	2270 (5000)
无水氰化氢	74-90-8	454 (1000)
氟化氢	7664-39-3	454 (1000)
过氧化氢 (质量分数 52%或更大)	7722-84-1	3405 (7500)
硒化氢	7783-07-5	68.1 (150)
硫化氢	7783-06-4	681 (1500)
羟胺	7803-49-8	1135 (2500)
五羰基铁	13463-40-6	113.5 (250)
异丙胺	75-31-0	2270 (5000)
乙烯酮	463-51-4	45.4 (100)
甲基丙烯醛	78-85-3	454 (1000)
α -甲基丙烯酰氯	920-46-7	68.1 (150)
甲基丙烯酰氧乙基异氰酸酯	30674-80-7	45.4 (100)
甲基丙烯腈	126-98-7	113.5 (250)

表 E.1 (续)

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (lb) ^b
无水甲胺	74-89-5	454 (1000)
溴化甲烷	74-83-9	1135 (2500)
氯化甲烷	74-87-31	2270 (5000)
氯甲酸甲酯	79-22-1	227 (500)
过氧化甲乙酮 (浓度>60%)	1338-23-4	2270 (5000)
氟乙酸甲酯	453-18-9	45.4 (100)
甲基氟硫酸酯	421-20-5	45.4 (100)
甲基胂	60-34-4	45.4 (100)
碘代烷	74-88-4	3405 (7500)
异氰酸甲酯	624-83-9	113.5 (250)
甲硫醇	74-93-1	2270 (5000)
甲基乙烯基酮	79-84-4	45.4 (100)
甲基三氯硅烷	75-79-6	227 (500)
羰基镍 (四羰基镍)	13463-39-3	68.1 (150)
硝酸 (质量分数 94.5%或更高)	7697-37-2	227 (500)
一氧化氮	10102-43-9	113.5 (250)

表 E.1 (续)

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (lb) ^b
硝基苯胺 (对硝基苯胺)	100-01-6	2270 (5000)
硝基甲烷	75-52-5	1135 (2500)
二氧化氮	10102-44-0	113.5 (250)
氧化氮 (NO; NO ₂ ; N ₂ O ₂ ; N ₂ O ₃)	10102-44-0	113.5 (250)
四氧化二氮 (又称二氧化氮)	10544-72-6	113.5 (250)
三氟化氮	7783-54-2	2270 (5000)
三氧化二氮	10544-73-7	113.5 (250)
油 (质量分数 65%~80%, 亦称发烟硫酸)	8014-94-7	454 (1000)
四氧化锇	20816-12-0	45.4 (100)
二氟化氧 (一氧化氟)	7783-41-7	45.4 (100)
臭氧	10028-15-6	45.4 (100)
硼烷	19624-22-7	45.4 (100)
过醋酸 (浓度>60%的乙酸; 又称过乙酸)	79-21-0	454 (1000)
高氯酸 [浓度>60% (质量)]	7601-90-3	2270 (5000)
过氧甲基硫醇	594-42-3	68.1 (150)
高氯酰氟	7616-94-6	2270 (5000)

表 E.1 (续)

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (lb) ^b
过乙酸 (浓度>60%乙酸, 又称过醋酸)	79-21-0	454 (1000)
光气 (又称碳酰氯)	75-44-5	45.4 (100)
磷 (磷化氢)	7803-51-2	45.4 (100)
三氯氧化磷 (又称磷酰氯)	10025-87-3	454 (1000)
三氯化磷	7719-12-2	454 (1000)
三氯氧磷 (又称磷酰氯)	10025-87-3	454 (1000)
溴丙炔	106-96-7	45.4 (100)
硝酸丙脂	627-3-4	1135 (2500)
沙林	107-44-8	45.4 (100)
六氯化硒	7783-79-1	454 (1000)
铈化氢 (氢化铈)	7803-52-3	227 (500)
二氧化硫 (液态)	7446-09-5	454 (1000)
五氟化硫	5714-22-7	113.5 (250)
四氟化硫	7783-60-0	113.5 (250)
三氧化硫 (又称为硫酸酐)	7446-11-9	454 (1000)
硫酸酐 (又称为三氧化硫)	7446-11-9	454 (1000)

表 E.1 (续)

化学品名称	CAS 编号 ^a	总量 kg (lb) ^b
六氟化铋	7783-80-4	113.5 (250)
四氢乙烯	116-14-3	2270 (5000)
四氟肼	10036-47-2	2270 (5000)
四甲基铅	75-74-1	454 (1000)
亚硫酸氯	7719-09-7	113.5 (250)
乙烯基三氯(氯甲基)硅烷	1558-25-4	45.4 (100)
乙烯基三氯(二氯苯基)硅烷	27137-85-5	1135 (2500)
三氯硅烷	10025-78-2	2270 (5000)
三氟氯乙烯	79-38-9	4540 (10000)
三甲基乙氧基硅烷	2487-90-3	681 (1500)
^a 化学文摘社号。 ^b 阈值量 (lb) (本标准包含的所需量)。		

表 E.2 预防意外泄放的物质和阈值清单——
 清洁空气法案 (修正版) 第 112 节 (r) 规定的要求

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
丙酮合氰化氢	75-86-5	2270 (5000)	(b)
丙烯醛	107-02-8	454 (1000)	(b)

表 E. 2 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
丙烯腈	107-13-1	4540 (10000)	(b)
丙烯酰氯	814-68-6	454 (1000)	(b)
烯丙醇	107-18-6	2270 (5000)	(b)
丙烯胺	107-11-9	454 (1000)	(b)
氨 (无水)	7664-41-7	454 (1000)	(a), (b)
氨 (水溶液, 浓度 20% 或更高)	7664-41-7	2270 (5000)	(a), (b)
苯胺	62-53-3	2270 (5000)	(b)
五氟化锑	7783-70-2	454 (1000)	(b)
三氯化砷	7784-34-1	2270 (5000)	(b)
砷化氢	7784-42-1	227 (500)	(b)
二氯化苄 (苄叉二氯)	98-87-3	454 (1000)	(b)
三氟甲基苯胺	98-16-8	454 (1000)	(b)
三氯甲苯	98-07-7	227 (500)	(b)
氯化苄	100-44-7	454 (1000)	(b)
苯乙腈	140-29-4	454 (1000)	(b)
三氯化硼	10294-34-5	454 (1000)	(b)

表 E.2 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
三氟化硼	7637-07-2	454 (1000)	(b)
三氟化硼和甲醚的混合物 (1:1)	353-42-4	2270 (5000)	(b)
溴	7726-95-6	454 (1000)	(b)
二硫化碳	75-15-0	4540 (10000)	(b)
氯	7782-50-5	454 (1000)	(a), (b)
二氧化氯	10049-04-4	227 (500)	(d)
氯乙醇	107-07-3	454 (1000)	(b)
氯仿	67-66-3	4540 (10000)	(b)
氯甲醛	542-88-1	227 (500)	(b)
氯甲甲醚	107-30-2	454 (1000)	(b)
丁烯醛	4170-30-3	4540 (10000)	(b)
(E) - 丁烯醛	123-73-9	4540 (10000)	(b)
氯化氰	506-77-4	454 (1000)	(d)
反-1, 4-二氯丁烯	110-57-6	454 (1000)	(b)
二氯乙醚	111-44-4	4540 (10000)	(b)
二甲基二氯硅烷	75-78-5	454 (1000)	(b)

表 E.2 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
二甲基胂	57-14-7	2270 (5000)	(b)
二甲基二硫代磷酸酯	2524-03-0	454 (1000)	(b)
环氧氯丙烷 (表氯醇)	106-89-8	4540 (10000)	(b)
乙二胺	107-15-3	4540 (10000)	(b)
乙撑亚胺	151-56-4	454 (1000)	(b)
环氧乙烷	75-21-8	2270 (5000)	(a), (b)
氟	7782-41-4	227 (500)	(b)
甲醛	50-00-0	227 (500)	(b)
甲醛氰醇	107-16-4	2270 (5000)	(b)
呋喃	110-00-9	454 (1000)	(b)
联氨 (胂)	302-01-2	2270 (5000)	(b)
盐酸 (浓液, 浓度 25% 或更高)	7647-01-0	2270 (5000)	(e)
氰氢酸	74-90-8	227 (500)	(a), (b)
氯化氢 (无水)	7647-01-0	454 (1000)	(a), (b)
氟化氢	7664-39-3	227 (500)	(a), (b)
过氧化氢 (浓度 > 52%)	7722-84-1	2270 (5000)	(b)

表 E. 2 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
硒化氢	7783-07-5	227 (500)	(b)
硫化氢	7783-06-4	454 (1000)	(a), (b)
五羰基铁	13463-40-6	227 (500)	(b)
异丁腈	78-82-0	4540 (10000)	(b)
氯甲酸异丙酯	108-23-6	2270 (5000)	(b)
乳腈	78-97-7	2270 (5000)	(b)
异丁烯腈	126-98-7	454 (1000)	(b)
溴化甲烷	74-83-9	2270 (5000)	(b)
氯化甲烷	74-87-3	4540 (10000)	(a)
氯甲酸甲酯	79-22-1	454 (1000)	(b)
甲腈	60-34-4	2270 (5000)	(b)
异氰酸甲酯	624-83-9	454 (1000)	(a), (b)
甲硫醇	74-93-1	454 (1000)	(b)
硫氰酸甲酯	556-64-9	4540 (10000)	(b)
甲基三氯硅烷	75-79-6	454 (1000)	(b)
羰基镍	13463-39-3	227 (500)	(b)

表 E. 2 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
硝酸	7697-37-2	2270 (5000)	(b)
一氧化氮	10102-43-9	454 (1000)	(b)
硝基苯	98-95-3	4540 (10000)	(c)
对硫磷	56-38-2	454 (1000)	(c)
过乙酸	79-21-0	454 (1000)	(b)
全氯甲硫醇 (过氯甲硫醇)	594-42-3	454 (1000)	(b)
苯酚 (液态)	108-95-2	4540 (10000)	(c)
光气	75-44-5	227 (500)	(a), (b)
磷化氢	7803-51-2	454 (1000)	(b)
三氯化磷	10025-87-3	454 (1000)	(b)
氯化磷	7719-12-2	2270 (5000)	(b)
哌啶	110-89-4	2270 (5000)	(b)
丙腈	107-12-0	454 (1000)	(b)
氯甲酸丙酯	109-61-5	2270 (5000)	(b)
丙烯亚胺	75-55-8	4540 (10000)	(b)
环氧丙烷	75-56-9	4540 (10000)	(b)

表 E.2 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
2-甲基-5-乙烯基吡啶	140-76-1	454 (1000)	(b)
二氧化硫	7446-09-5	454 (1000)	(a), (b)
硫酸	7664-93-9	2270 (5000)	(c)
四氟化硫	7783-60-0	454 (1000)	(b)
三氧化硫	7446-11-9	454 (1000)	(a), (b)
四甲基铅	75-74-1	454 (1000)	(b)
四硝基甲烷	509-14-8	454 (1000)	(b)
苯硫酚	108-98-5	454 (1000)	(b)
四氯化钛	7550-45-0	227 (500)	(b)
甲苯-2,4-二异氰酸酯	584-84-9	454 (1000)	(a)
甲苯 2,6-二异氰酸酯	91-08-7	454 (1000)	(a)
二异氰酸甲苯 (不明异构体)	26471-62-5	454 (1000)	(a)
乙基三氯硅烷	115-21-9	454 (1000)	(b)
三甲基氯硅烷	75-77-4	454 (1000)	(b)
醋酸乙烯酯单体	108-05-4	2270 (5000)	(b)

表 E.2 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (1b)	列表依据
氯乙烯	75-1-4	10000	(a)
注：列表依据如下： (a) 大会要求的列表。 (b) 在 EHS 清单中，蒸气压力为 66.661Pa (0.5mmHg) 或者更高。 (c) 在 EHS 清单中，蒸气压力小于 66.661Pa (0.5mmHg)，但已涉及导致死亡或伤害的事故。 (d) 有毒气体。 (e) 依据氯化氢的毒性、泄放氯化氢的潜在性和事故历史列出清单。			

表 E.3 预防意外泄放的有毒物质和阈值清单——以 CAS 编号排序—100 种物质

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (1b)	列表依据
50-00-0	甲醛	227 (500)	(b)
56-36-2	巴拉松	454 (1000)	(c)
57-14-7	二甲基联胺	2270 (5000)	(b)
60-34-4	甲基联胺	2270 (5000)	(b)
62-53-3	苯胺	2270 (5000)	(b)
67-66-3	氯仿	4540 (10000)	(b)
74-83-9	溴化甲烷	2270 (5000)	(b)
74-87-3	氯化甲烷	4540 (10000)	(a)
74-90-8	氢氰酸	227 (500)	(a), (b)
74-93-1	甲硫醇	454 (1000)	(b)

表 E.3 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
75-01-4	氯乙烯	4540 (10000)	(a)
75-15-0	二硫化碳	4540 (10000)	(b)
75-21-8	环氧乙烷	2270 (5000)	(a), (b)
75-44-5	光气	227 (500)	(a), (b)
75-55-8	丙烯亚胺	4540 (10000)	(b)
75-56-9	环氧化丙烯	4540 (10000)	(b)
75-74-1	四甲基铅	454 (1000)	(b)
75-77-4	三甲基氯硅烷	454 (1000)	(b)
75-78-5	二甲基二氯硅烷	454 (1000)	(b)
75-79-6	甲基三氯硅烷	454 (1000)	(b)
75-86-5	丙酮氰化氢	2270 (5000)	(b)
78-82-0	异丁腈	4540 (10000)	(b)
78-97-7	乳腈	2270 (5000)	(b)
79-21-0	过乙酸	454 (1000)	(b)
79-22-1	氯甲酸甲酯	454 (1000)	(b)
91-08-7	甲苯-2,6-二异氰酸酯	454 (1000)	(a)

表 E.3 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
98-07-7	苯川三氯	227 (500)	(b)
98-16-8	三氟甲基苯胺	454 (1000)	(b)
98-87-3	二氯化苯	454 (1000)	(b)
98-95-3	硝基苯	4540 (10000)	(c)
100-44-7	氯化苯	454 (1000)	(b)
106-89-8	环氧氯丙烷	4540 (10000)	(b)
107-02-8	丙烯醛	454 (1000)	(b)
107-07-3	氯乙醇	454 (1000)	(b)
107-11-9	丙烯胺	454 (1000)	(b)
107-12-0	丙腈	454 (1000)	(b)
107-16-4	甲醛氯醇	2270 (5000)	(b)
107-18-6	甲基烯丙醇	2270 (5000)	(b)
107-30-2	氯甲甲醚	454 (1000)	(b)
108-05-4	醋酸乙烯酯单体	2270 (5000)	(b)
108-23-6	氯乙酸异丙酯	2270 (5000)	(b)
108-91-8	环己胺	2270 (5000)	(b)

表 E.3 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
108-95-2	苯酚 (液态)	4540 (10000)	(c)
108-98-5	苯硫酚	454 (1000)	(b)
109-61-5	氯甲酸丙酯	2270 (5000)	(b)
110-00-9	呋喃	454 (1000)	(b)
110-57-6	反 1, 4 二氯丁烯	454 (1000)	(b)
110-89-4	吡啶	2270 (5000)	(b)
111-44-4	二氯乙醚	4540 (10000)	(b)
115-21-9	乙基三氯硅烷	454 (1000)	(b)
123-73-9	(E) - 丁烯醛	4540 (10000)	(b)
126-98-7	异丁烯腈	454 (1000)	(b)
140-29-4	苯乙腈	454 (1000)	(b)
140-76-1	2-甲基-5-乙烯基吡啶	454 (1000)	(b)
151-56-4	乙二胺	454 (1000)	(b)
302-01-2	联胺	2270 (5000)	(b)
353-42-4	三氟化硼和甲醚混合物 (1:1)	2270 (5000)	(b)
506-77-4	氯化氰	454 (1000)	(d)

表 E.3 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
509-14-8	四硝基甲烷	454 (1000)	(b)
542-88-1	氯甲醛	227 (500)	(b)
556-64-9	硫氰酸甲酯	4540 (10000)	(b)
584-84-9	甲苯-2,4-二异氰酸酯	454 (1000)	(a)
594-42-3	全氯甲硫醇	454 (1000)	(b)
624-83-9	异氰酸甲酯	454 (1000)	(a), (b)
814-68-6	丙烯酰氯	454 (1000)	(b)
2524-03-0	二甲基二硫代磷酸酯	454 (1000)	(b)
4170-30-3	丁烯醛	4540 (10000)	(b)
7446-09-5	二氧化硫	454 (1000)	(a), (b)
7446-11-9	三氧化硫	454 (1000)	(a), (b)
7550-45-0	四氯化钛	227 (500)	(b)
7637-07-2	二氟化硼	454 (1000)	(b)
7647-01-0	氯化氢 (无水)	454 (1000)	(a), (b)
7647-01-0	盐酸 (溶液, 浓度 25%或更大)	2270 (5000)	(c)
7664-39-3	氟化氢	227 (500)	(a), (b)

表 E.3 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
7664-41-7	氨(无水)	454 (1000)	(a), (b)
7664-41-7	氨(水溶液, 浓度 20%或更大)	2270 (5000)	(a), (b)
7664-93-9	硫酸	2270 (5000)	(c)
7697-37-2	硝酸	2270 (5000)	(b)
7719-12-2	三氯化磷	2270 (5000)	(b)
7722-84-1	过氧化氢(浓度>52%)	2270 (5000)	(b)
7726-95-6	溴	454 (1000)	(a), (b)
7782-41-4	氟	227 (500)	(b)
7782-50-5	氯	454 (1000)	(a), (b)
7783-06-44	硫化氢	454 (1000)	(a), (b)
7783-07-5	硒化氢	227 (500)	(b)
7783-60-0	四氟化硫	454 (1000)	(b)
7783-70-2	五氟化砷	454 (1000)	(b)
7784-34-1	三氯化砷	2270 (5000)	(b)
7784-42-1	砷化氢	227 (500)	(b)
7803-51-2	磷化氢	454 (1000)	(b)

表 E.3 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
10025-87-3	三氯化磷	454 (1000)	(b)
10049-04-4	二氧化氯	227 (500)	(d)
10102-43-9	一氧化氮	454 (1000)	(b)
10294-34-5	三氯化硼	454 (1000)	(b)
13463-39-3	四碳化基镍	227 (500)	(b)
13463-40-6	五羰基铁	227 (500)	(b)
19287-45-7	乙硼烷	227 (500)	(b)
26471-62-5	二异氰酸甲苯 (不明异构体)	454 (1000)	(a)
注：列表依据如下： (a) 大会要求的清单。 (b) 在 EHS 清单中，蒸气压力压为 66.661Pa (0.5mmHg) 或者更高。 (c) 在 EHS 清单中，蒸气压力小于 66.661Pa (0.5mmHg)，但已经涉及导致死亡和伤害事故。 (d) 有毒气体。 (e) 依据氯化氢的毒性，泄放氯化氢的潜在性或事故历史列出清单。			

表 E.4 预防意外泄放的易燃物质和阈值清单

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
乙醛	75-07-0	4540 (10000)	(g)
乙炔	74-86-2	4540 (10000)	(f)
溴三氟乙烯	598-73-2	4540 (10000)	(f)

表 E.4 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
1, 3-丁二烯	106-99-0	4540 (10000)	(f)
丁烷	106-97-8	4540 (10000)	(f)
1-丁烯	106-98-9	4540 (10000)	(f)
2-丁烯	107-01-7	4540 (10000)	(f)
丁烯	25167-67-3	4540 (10000)	(f)
2-顺丁烯	590-18-1	4540 (10000)	(f)
2-反丁烯	624-64-6	4540 (10000)	(f)
氧硫化碳	463-58-1	4540 (10000)	(f)
氧化氯	7791-21-1	4540 (10000)	(f)
2-氯丙烯	557-98-2	4540 (10000)	(g)
1-氯丙烯	590-21-6	4540 (10000)	(g)
氰	460-19-5	4540 (10000)	(f)
环丙烷	75-19-4	4540 (10000)	(f)
二氯甲硅烷	4109-96-0	4540 (10000)	(f)
二氟乙烷	75-37-6	4540 (10000)	(f)
二甲胺	124-40-3	4540 (10000)	(f)

表 E.4 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
2, 2-二甲基丙烷	463-82-1	4540 (10000)	(f)
乙烷	74-84-0	4540 (10000)	(f)
乙基乙炔	107-00-6	4540 (10000)	(f)
乙胺	75-04-7	4540 (10000)	(f)
氯乙烷	75-00-3	4540 (10000)	(f)
乙烯	74-85-1	4540 (10000)	(f)
乙醚	60-29-7	4540 (10000)	(g)
乙硫醇	75-08-1	4540 (10000)	(g)
乙腈	109-95-5	4540 (10000)	(f)
氢	1333-74-0	4540 (10000)	(f)
异丁烷	75-28-5	4540 (10000)	(f)
异戊烷	78-78-4	4540 (10000)	(g)
异戊二烯	78-79-5	4540 (10000)	(g)
异丙胺	75-31-0	4540 (10000)	(g)
2-氯丙烷 (异丙基氯)	75-29-6	4540 (10000)	(g)
甲烷	74-82-8	4540 (10000)	(f)

表 E.4 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
甲胺	74-89-5	4540 (10000)	(f)
甲醚	115-10-6	4540 (10000)	(f)
甲酸甲酯	107-31-3	4540 (10000)	(g)
2-甲基丙烯	115-11-7	4540 (10000)	(f)
1,3-戊二烯	504-60-9	4540 (10000)	(f)
正戊烷	109-66-0	4540 (10000)	(g)
1-戊烯	109-67-1	4540 (10000)	(g)
(E)-2-戊烯	646-04-8	4540 (10000)	(g)
(Z)-2-戊烯	627-20-3	4540 (10000)	(g)
丙二烯	463-49-0	4540 (10000)	(f)
丙烷	74-98-6	4540 (10000)	(f)
丙烯	115-07-1	4540 (10000)	(f)
丙炔	74-99-7	4540 (10000)	(f)
硅烷	7803-62-5	4540 (10000)	(f)
四氟乙烯	116-14-3	4540 (10000)	(f)
四甲基硅烷	75-76-3	4540 (10000)	(g)

表 E.4 (续)

化学品名称	CAS 编号	阈值量 kg (lb)	列表依据
三氯甲硅烷	10025-78-2	4540 (10000)	(g)
三氟氯乙烯	79-38-9	4540 (10000)	(f)
三甲胺	75-50-3	4540 (10000)	(f)
乙烯基乙炔	689-97-4	4540 (10000)	(f)
乙烯乙基醚	109-92-2	4540 (10000)	(g)
氟乙烯	75-02-5	4540 (10000)	(f)
二氯乙烯	75-35-4	4540 (10000)	(g)
二氟乙烯	75-38-7	4540 (10000)	(f)
甲基乙烯基醚	107-25-5	4540 (10000)	(f)
注：列表依据如下： (f) 可燃性气体。 (g) 挥发性可燃液体。			

表 E.5 预防意外泄放的易燃物质和阈值清单——以 CAS 编号排序——60 种物质

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
60-29-7	乙醚	4540 (10000)	(g)
74-82-8	甲烷	4540 (10000)	(f)
74-84-0	乙烷	4540 (10000)	(f)

表 E.5 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (1b)	列表依据
74-85-1	乙烯	4540 (10000)	(f)
74-86-2	乙炔	4540 (10000)	(f)
74-89-5	甲胺	4540 (10000)	(f)
74-98-6	丙烷	4540 (10000)	(f)
74-99-7	丙炔	4540 (10000)	(f)
75-00-3	氯乙烷	4540 (10000)	(f)
75-02-5	氟化乙烯	4540 (10000)	(f)
75-04-7	乙胺	4540 (10000)	(f)
75-07-0	乙醛	4540 (10000)	(g)
75-08-1	乙硫醇	4540 (10000)	(g)
75-19-4	环丙烷	4540 (10000)	(f)
75-28-5	异丁烷	4540 (10000)	(f)
75-29-6	异丙基氯	4540 (10000)	(g)
75-31-0	异丙胺	4540 (10000)	(g)
75-35-4	二氯乙烯	4540 (10000)	(g)
75-37-6	二氟乙烷	4540 (10000)	(f)

表 E.5 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
75-38-7	二氟乙烯	4540 (10000)	(f)
75-50-3	三甲胺	4540 (10000)	(f)
75-76-3	四甲基硅烷	4540 (10000)	(g)
78-78-4	异戊烷	4540 (10000)	(g)
78-79-5	异戊二烯	4540 (10000)	(g)
79-38-9	三氟氯乙烯	4540 (10000)	(f)
106-97-8	丁烷	4540 (10000)	(f)
106-98-9	1-丁烯	4540 (10000)	(f)
106-99-0	1,3-丁二烯	4540 (10000)	(f)
107-00-6	乙基乙炔	4540 (10000)	(f)
107-01-7	2-丁烯	4540 (10000)	(f)
107-25-5	甲基乙烯基醚	4540 (10000)	(f)
107-31-3	甲酸甲酯	4540 (10000)	(g)
109-66-0	正戊烷	4540 (10000)	(g)
109-67-1	1-戊烯	4540 (10000)	(g)
109-92-2	乙烯乙基醚	4540 (10000)	(g)

表 E.5 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
109-95-5	乙腈	4540 (10000)	(f)
115-11-7	2-甲基丙烯	4540 (10000)	(f)
116-14-3	四氟乙烯	4540 (10000)	(f)
124-40-3	二甲胺	4540 (10000)	(f)
460-19-5	氰	4540 (10000)	(f)
463-49-0	丙二烯	4540 (10000)	(f)
463-58-1	氧硫化碳	4540 (10000)	(f)
463-82-1	2,2-二甲基丙烷	4540 (10000)	(f)
504-60-9	1,3-戊二烯	4540 (10000)	(f)
557-98-2	2-氯丙烯	4540 (10000)	(g)
563-45-1	3-甲基-1-丁烯	4540 (10000)	(f)
563-46-2	2-甲基-1-丁烯	4540 (10000)	(g)
590-18-1	2-顺丁烯	4540 (10000)	(f)
590-21-6	1-氯丙烯	4540 (10000)	(g)
598-73-2	溴三氟乙烯	4540 (10000)	(f)
624-64-6	2-反丁烯	4540 (10000)	(f)

表 E. 5 (续)

CAS 编号	化学品名称	阈值量 kg (lb)	列表依据
627-20-3	(Z)-2-戊烯	4540 (10000)	(g)
646-04-8	(E)-2-戊烯	4540 (10000)	(g)
689-97-4	乙烯基乙炔	4540 (10000)	(f)
1333-74-0	氢	4540 (10000)	(f)
4109-96-0	二氯硅烷	4540 (10000)	(f)
7791-21-1	一氧化氯	4540 (10000)	(f)
7803-62-5	硅烷	4540 (10000)	(f)
10025-78-2	三氯硅烷	4540 (10000)	(g)
25167-67-3	丁烯	4540 (10000)	(f)
注：列表依据如下： (f) 可燃性气体。 (g) 挥发性可燃液体。			

附 录 F
(资料性附录)
API 和 ASME RBI 对比

F.1 摘要

本附录概述了 API (美国石油学会) RBI 基本方法 (BRD) 和 ASME (美国机械工程师协会) RBI 文件之间的区别和相似点。评述的 ASME RBI 文件是:

- 第 1 卷: 通用文件;
- 第 2 卷: 轻水反应堆 (LWR) 核电厂部件;
- 第 3 卷: 化石燃料发电厂发电厂应用。

在 API RBI 和 ASME RBI 方法上没有原则上的区别, 然而, 来自工程的最后文件却显著不同。原因是这两个方法具有不同的范围和目的。ASME RBI 工程是为制定检验指南而确定基于风险的方法和研究活动。而 API RBI 工程则旨在开发装置检测层面上易理解的实用工具和方法。API RBI 工程建立在 ASME RBI 文件中说明的方法上, 但在相关部分做了相当大的简化。

F.1.1 API RBI

API BRD 旨在装置人员层次上的理解和可用。需要并正在开发应用工具来充分获得基于风险的检测的好处, 因为即使在使用简化模型的情况下, 在典型炼油厂或化工厂里应用 RBI 技术需要大型数据库。BRD 提供了一个良好的开端来展示技术的可行性和价值。

F.1.2 ASME RBI

ASME RBI 活动目标是最高层次的技术开发, 因为它旨在成为一个研究项目。该方法对希望使用这些方法开展应用的人提供了很大的价值。但是, 在 ASME RBI 文件描述的技术中只有高水平的专家联合小组才能理解和应用。ASME RBI 文件为未来的 RBI 设定了高标准。

F.2 范围

F.2.1 API RBI

API RBI 旨在开发在装置检测层次上易于理解的实用工具和方法。工程在识别相关的复杂性水平增加的同时, 尝试识别因复杂模型的简化而造成的所用技术的限制范围。

F.2.2 ASME RBI

ASME RBI 工程是为制定检验指南确定基于风险的方法的研究活动。它们不必要制定这些指南。ASME RBI 方法考虑并包括复杂性的所有层次。

- a) 技术。
- b) 部件层次。
- c) 故障/事件树分析。
- d) 决策树分析。

F.3 定性 RBI

API RBI 和 ASME RBI 文件都使用定性和定量 RBI 方法, 只是不必以同样方式使用。ASME RBI 矩阵如图 F.1 所示。

F.3.1 API RBI

在 BRD 中, 定性方法旨在用做运行装置层面上的一个筛选工具。使用者可以快速关注具有最高风险影响装置的那些区域。该方法旨在易于使用:

- a) 添加对高风险有影响的因素。
- b) 减去对风险管理有影响的因素。

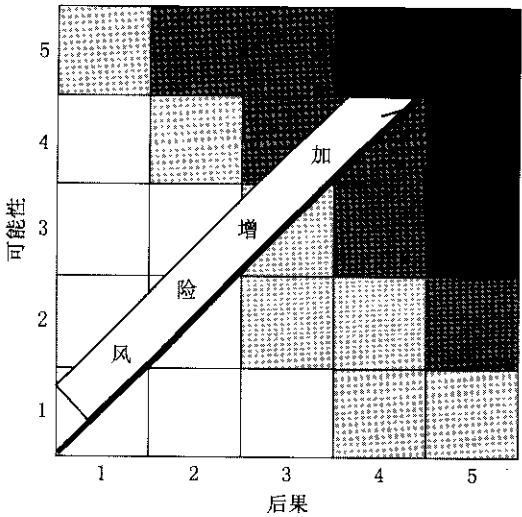


图 F.1 ASME 定性风险矩阵

结果呈现在一个 5×5 可能性和后果矩阵中。该方法可扩展到设备层次上，并且正在为这一开发建立一个当前工程（第 2 阶段）。

F.3.2 ASME RBI

ASME 定性风险评估方法，如需要可扩展到部件层次。在 ASME RBI 方法中，定性是基于专家意见的判断，下面给出了收集这些意见的几种方法：

- a) FMEA（故障模式和影响分析）。
- b) HAZOP（危害和可操作性研究）。
- c) FTA（故障树分析）。
- d) MLD（主逻辑图）。
- e) 如果……将什么样（假设分析）。

与 API RBI 方法相似，定性分析结果呈现在一个 5×5 矩阵中。

API 矩阵如图 F.2 所示。注意阴影部分的风险等级的不对称，表示考虑风险时侧重高后果的影响。

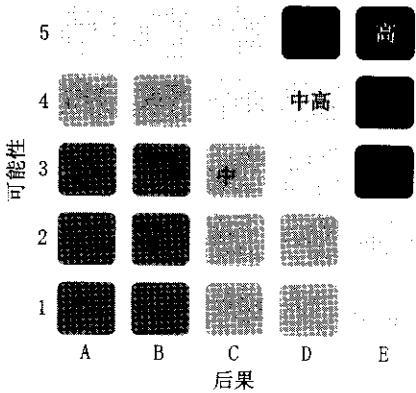


图 F.2 API 定性风险矩阵

F.4 定量 RBI

F.4.1 失效可能性

F.4.1.1 API RBI

API BRD 使用同类失效频率数据库来确定对加工工业常见的不同类型设备的基准失效率。该方法的优点是 RBI 的应用提供了一个起点，但是缺点在于数据库对任一类型的工业不是特定的。因此需要修改这些同类频率以便使用概率结构力学说明各种损伤机理，从而评估不同损伤程度对失效可能性的影响。使用简化的机械模型来匹配可用的数据。API 方法使用一个贝叶斯更新技术来说明，在失效前发现损伤时由于基于检测技术有效性的检测而导致的失效可能性的降低。

F.4.1.2 ASME RBI

通过使用适用于电力工业得到历史数据库在参考文献中 ASME RBI 方法进行图解说明。如果这类数据可用的话，这将大大简化方法。ASME RBI 文件还图解说明概率结构力学的使用 [在 ASME RBI 文件中称做结构可靠性和风险评估 (SRRA)]。ASME RBI 文件中这些技术针对每一案例的图解说明都使用相同的演示：疲劳裂纹扩展速率通过严格的弹塑性断裂力学来评估。使用该图解说明是因为有可用的裂纹扩展、检测可能性和损伤对结构可靠性 [失效可能性 (POF)] 影响的概率评估模型。但是，除了依靠以正式方法确定的失效可能性的专家判断外，ASME RBI 方法没有提及在没有这类模型情况下如何进行的措施。

F.4.2 后果

F.4.2.1 API RBI

API BRD 提供了对下列任一后果类型量化的方法：

- a) 可燃/爆炸性。
- b) 毒性。
- c) 环境。
- d) 生产中断成本。

计算基于泄放情景的技术模型。

F.4.2.2 ASME RBI

ASME RBI 方法使用各种技术来确定后果。对于轻水反应堆核电装置，后果表达为每一事件堆芯损伤的可能性。对于这种情况，没有尝试对泄放情景的实际模拟。对于燃料化石发电厂 (FFF-PP)，则直接从对给定失效事件提供采购的替换电力的成本的工业数据库获取后果。提供了采用故障树/事件树分析演示燃料化石发电厂事故后果，但极其复杂。

F.4.3 定量风险评估

F.4.3.1 API RBI

来自 API BRD 的最终结果将风险表示为以下一种或多种措施：

- a) 生产中断 (美元/年)。
- b) 设备损伤 ($\text{ft}^2/\text{年}$)。
- c) 健康影响 ($\text{ft}^2/\text{年}$)。
- d) 环境影响 (美元/年)。

F.4.3.2 ASME RBI

ASME RBI 文件的最终结果将风险表示为以下一个或多种度量方式：

- a) 每年堆芯损伤的可能性。
- b) 经济损失 (FFFPP) (美元/年)。
- c) 人员伤亡 (FFFPP) (锅炉破裂的后果)。

F.5 结论

ASME RBI 调查研究阐述了制定 RBI 指南所必需的基础工作，但并不实际提供这类指南。API BRD 项目建立在 ASME RBI 研究的基础上，为通过合理的支出实施基于风险的检验提供了实用的工具。

附 录 G
(规范性附录)
减薄技术模块

G.1 范围

本模块为遭受减薄机理引起损伤的工艺设备确定了一个技术模块次因子（修正的失效可能性），包括均匀减薄和局部减薄（包括点蚀和侵蚀）。如果尚未根据厚度检测数据确定减薄速率，则在本模块中可获得补充，以便对减薄速率进行保守估计。在缺乏实测数据情况下，也可采用专家建议来预测减薄速率。

G.2 技术模块的筛选问题

所有设备应进行该技术模块的分析。

G.3 基本数据**G.3.1 所需数据**

表 G.1 中所列的基本数据是当腐蚀速率已经通过一次或多次的有效检测确定后，确定减薄技术模块次因子所需的最少数据。

表 G.1 减薄分析所需基本数据（腐蚀速率已确定）

基本数据	说 明
厚度, in	投入使用时实测的厚度或最小建造壁厚。所用厚度应是服役时间开始时的厚度
使用年限, 年	设备已经遭受产生下面所用腐蚀速率的工艺条件下的年数。默认值是设备年龄。但是如果腐蚀速率可能由于工艺条件变化的结果而发生较大改变, 则时间期限和厚度应做相应修正。时间期限应从改变的时间算起, 厚度应为改变时的最小壁厚（可能不同于原始壁厚）
腐蚀裕量, in	腐蚀裕量是规定的设计余量或投入使用时的实际腐蚀裕量
腐蚀速率, in/年	根据可用的厚度数据计算的当前减薄速率。根据厚度数据计算的腐蚀速率一般随检测变化而变化。这些变化可能由于壁厚的变化引起, 或它们可能表明实际腐蚀速率在变化。如果“短期”腐蚀速率（根据当前厚度和以前厚度之间的差计算）明显不同于“长期”腐蚀速率（根据当前厚度和原始厚度之间的差计算）, 则设备可用“短期”腐蚀速率进行评估, 但应使用合适的时间和厚度。如果腐蚀速率未通过检测确定, 则估计的腐蚀速率可根据相关的补充或专家建议来确定
减薄类型（均匀减薄或局部减薄）	用有效检测活动, 确定减薄是均匀的减薄还是局部的减薄。均匀腐蚀定义为影响 10% 以上表面积和壁厚变化小于 50 密耳的腐蚀。局部腐蚀定义为影响 10% 以下表面积或壁厚变化大于 50 密耳的腐蚀
运行温度, °F	运行期间（考虑正常和异常运行条件）预计的最高运行温度
运行压力, lb/in ²	预计最高运行压力（可以是泄压阀的整定压力, 除非那样高的压力不可能）
MAWP, lb/in ²	用来确定最小允许壁厚的压力。如果 MAWP 不可用, 则可用设计压力代替

表 G.1 (续)

基本数据	说 明
检验有效性等级 (高度有效、通常有效、一般有效、有效性差、无效)	已经在时间期限内 (上述规定) 对设备进行的每次检验活动的有效性类别。见表 G.6 (a) 和表 G.6 (b) 关于分配给均匀减薄、局部减薄和 CU1 的检验有效性指南
检测数量	在使用年限内 (上述规定) 已进行的检验活动中检验有效性为中以上的次数
在线监测 (挂片、探针、工艺变量或其组合)	采用预防性的在线监测方法或工具的类型, 如腐蚀探针、挂片、工艺变量等
减薄机理	如果要使在线监测结果可信, 则应知道潜在的减薄机理。向知识丰富的材料/腐蚀工程师咨询这一信息
建造材料 (碳钢、低合金钢、其他不锈钢或高合金钢)	设备/配管的建造材料
是否存在注入点/混合点 (是/否)	对配管来说, 确定管路中是否存在注入点或混合点
注入点/混合点检测等级 (高度有效或通常有效)	对有注入点或混合点的管路, 是否采取了探测这些点的局部腐蚀的高度有效的检测措施
盲管段腐蚀的检测类型	对有盲管的管路, 是否采取了探测盲管的局部腐蚀的高度有效的检测措施

G.3.2 附加数据

如果腐蚀速率没有根据一个或多个有效检测期间获得的厚度测量确定, 则需用表 G.2 中的步骤来确定哪些潜在减薄机理起作用, 并确定估计的腐蚀速率。

表 G.2 确定估计腐蚀速率的步骤 (之前腐蚀速率未确定)

步 骤	措 施
1	为回答表 G.4 中所列的筛选问题收集数据
2	回答表 G.4 中的筛选问题
3	为步骤 2 中识别出的、适用的补充收集基本数据表中规定的

G.4 基本假设

本技术模块假设, 在基本数据表定义的时间期限内, 由平均速率引起的减薄基本恒定。通过检查该减薄速率大于预计值的可能性, 来估计失效可能性。发生减薄速率高出可能性的, 由已进行的检测

量和在线监测测量确定。检测越彻底和检测越频繁，并且持续使用在线监测，则减薄速率大于预计值的机会的可能性越小。

本技术模块假定减薄将最终导致塑性过载失效。失效可能性通过表 G. 3 中给出的极限状态函数的可靠性指数来确定。

表 G. 3 韧性过载极限状态函数

表 达 式		说 明	
$g_2 = S_t \left(1 - \frac{\Delta t}{t} \right) - \frac{p \cdot D}{2t}$		g_2 为极限状态函数	
变量	说明	变量	说明
S_t	流动应力 = $(S_y + UT) / 2$	p	压力
D	直径	t	壁厚
Δt	壁厚变化		
注：本极限状态函数仅适用于有内压力的情况（不适用于真空压缩）。			

G. 5 技术模块次因子的确定

图 G. 1 中给出了确定减薄技术模块次因子所需步骤的流程图。下面将讨论这些步骤及所需的表格。

G. 5.1 腐蚀速率的确定

腐蚀速率应根据检测设备时得到的厚度数据来计算。若有计算得到的腐蚀速率，则应在确定 $a \cdot r/t$ 时采用（转到 G. 5. 2）。

如果没有计算得到的腐蚀速率，则应使用本技术模块的补充来确定每一潜在减薄机理的估计腐蚀速率。用筛选问题来确定哪一种减薄机理适用。应输入这些适用部分参数来确定可能的减薄机理的估计腐蚀速率的保守值。然后使用估计的腐蚀速率来确定 $a \cdot r/t$ 。此外，也可用专家建议来确定最大预计腐蚀速率，以确定 $a \cdot r/t$ 值。

表 G. 4 中所列的筛选问题用于选择相关的减薄机理。

表 G. 4 减薄机理的筛选问题

筛 选 问 题	措 施
1. 盐酸 (HCl) 腐蚀 工艺中含有 HCl? 工艺流体中含有自由水（包括初始凝结条件)? pH 值 < 7.0	如果全部为“是”，转到 G. 6
2. 高温硫/环烷酸腐蚀 工艺中有含硫的油吗? 运行温度 > 204. 44℃ (400°F)	如果两者都为“是”，转到 G. 7
3. 高温 H ₂ S/H ₂ 腐蚀 工艺中含有 H ₂ S 或 H ₂ 吗? 运行温度 > 204. 44℃ (400°F)	如果两者都为“是”，转到 G. 8
4. 硫酸 (H ₂ SO ₄) 腐蚀 工艺中含有硫酸吗	如果“是”，转到 G. 9
5. 氢氟酸 (HF) 腐蚀 工艺流体中含有 HF 吗	如果“是”，转到 G. 10
6. 酸性水腐蚀 有含 H ₂ S 的自由水吗	如果“是”，转到 G. 11
7. 胺腐蚀 设备暴露于处理胺 (MEA, DEA, DIPA, MDEA) 的酸气下吗	如果“是”，转到 G. 12
8. 高温氧化 温度 ≥ 482. 22℃ (900°F) 吗? 存在氧气吗	如果两者都为“是”，转到 G. 13

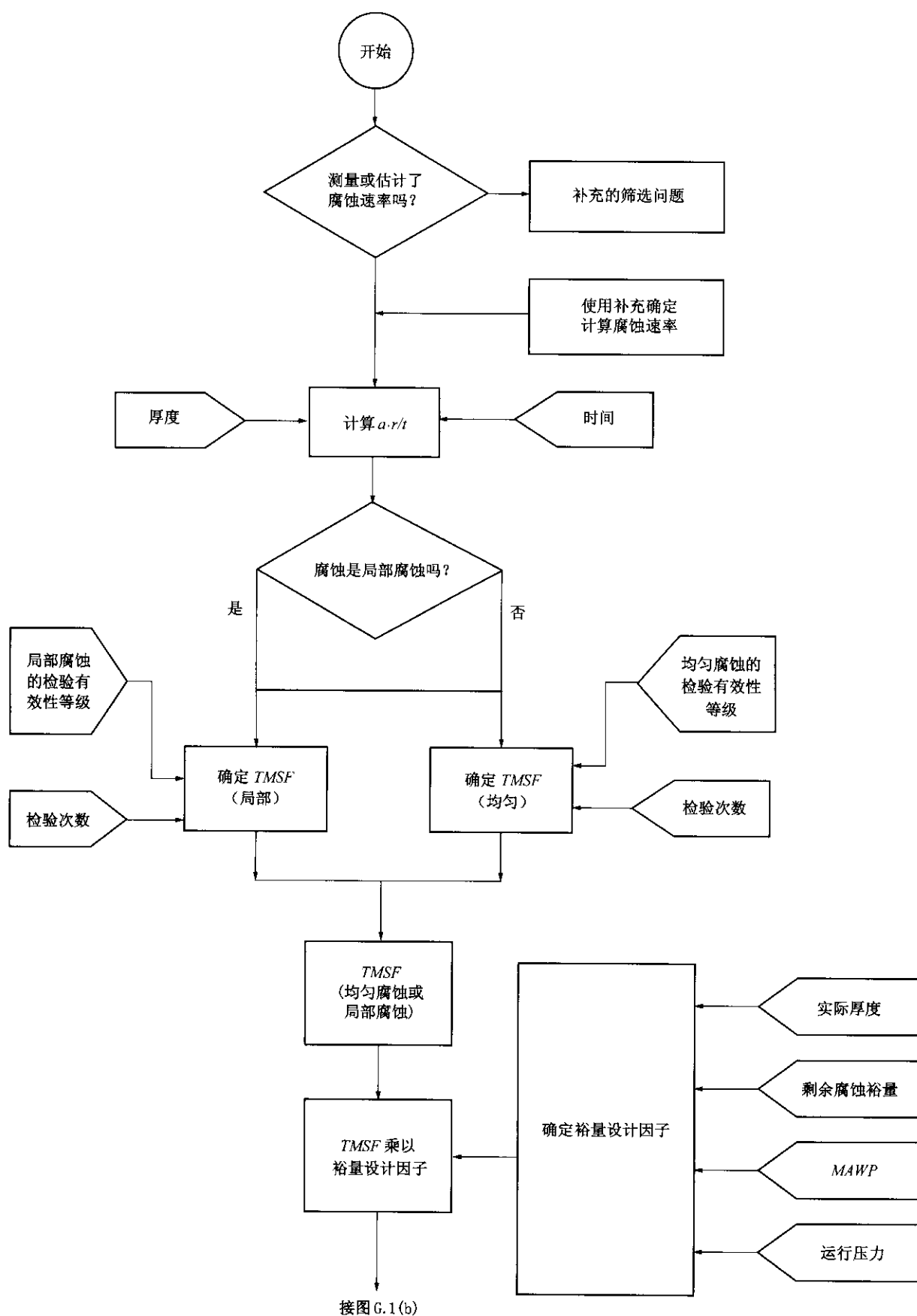


图 G.1 (a) 减薄技术模块次因子的确定

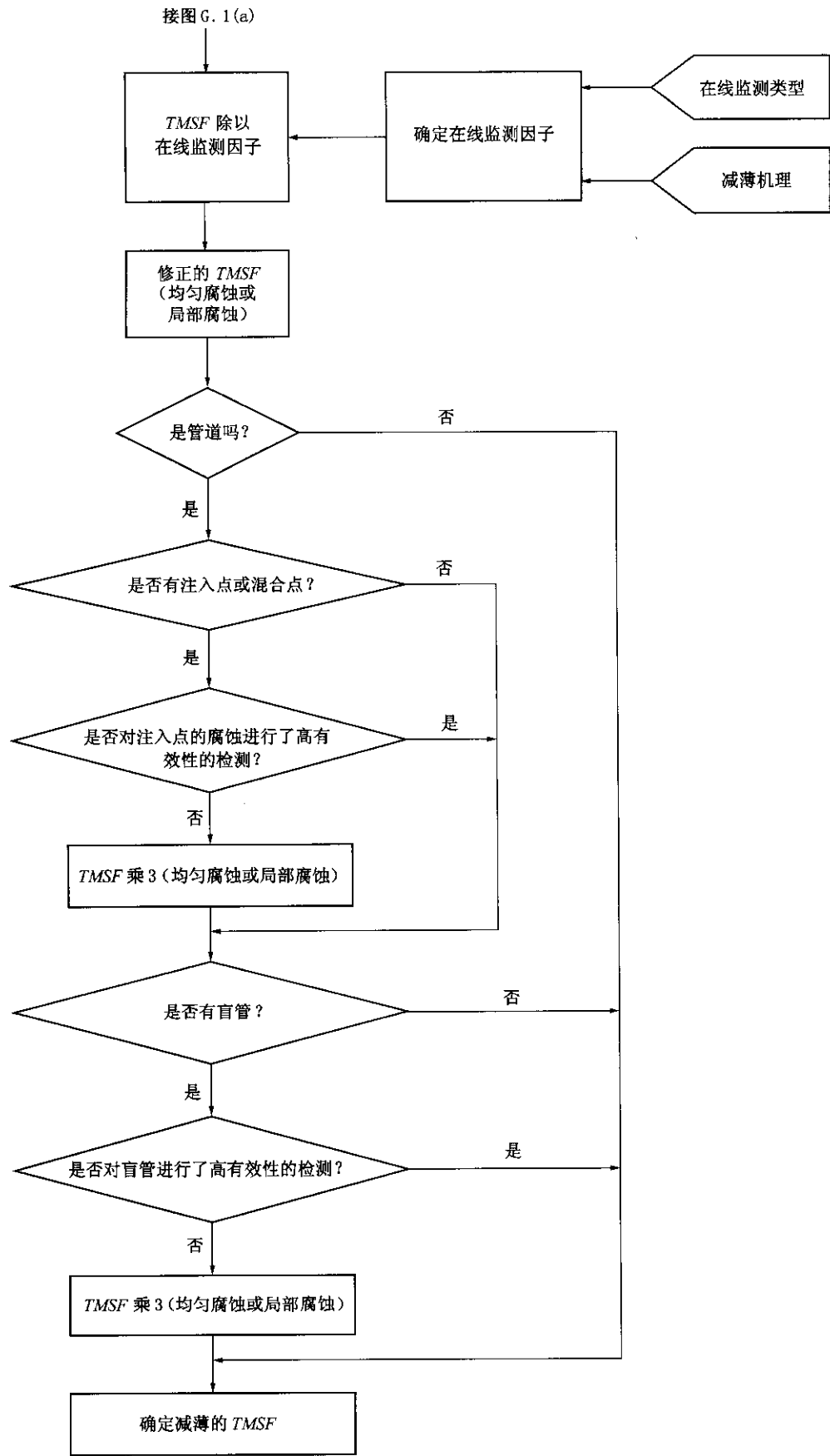


图 G. 1 (b) 减薄技术模块次因子的确定

G.5.2 $a \cdot r/t$ 的计算

根据表 G.1 中所述的时间 (a)、腐蚀速率 (r) 和厚度 (t) 数据来计算 $a \cdot r/t$ 。该数值相当于因减薄而造成的壁厚损失的比例。

G.5.3 减薄类型的确定

应使用对设备/配管已进行的有效检测的结果,来确定减薄类型(即均匀腐蚀与局部腐蚀)。如果没有这样的信息,则表 G.5 列出了各种减薄机理对应的减薄类型(均匀减薄或局部减薄)。如果均匀减薄和局部减薄两者均可能,则将减薄类型指定为局部减薄。指定的减薄类型将用来确定已进行的检验的有效性。

表 G.5 减薄类型

筛 选 问 题		措 施
盐酸 (HCl) 腐蚀		局部减薄
高温硫化物/环烷酸腐蚀	$TAN \leq 0.5$	均匀减薄
	$TAN > 0.5$	局部减薄
高温 H_2S/H_2 腐蚀		均匀减薄
低速硫酸 (H_2SO_4) 腐蚀	$\leq 0.6096\text{mm/年}$ (2ft/s), 碳钢	均匀
	$\leq 1.2192\text{mm/年}$ (4ft/s), 不锈钢	
	$\leq 1.8288\text{mm/年}$ (6ft/s), 高合金钢	
高速硫酸 (H_2SO_4) 腐蚀	$\geq 0.6096\text{mm/年}$ (2ft/s), 碳钢	局部
	$\geq 1.2192\text{mm/年}$ (4ft/s), 不锈钢	
	$\geq 1.8288\text{mm/年}$ (6ft/s), 高合金钢	
氢氟酸 (HF) 腐蚀		局部
低速酸性水腐蚀	$\leq 0.6096\text{mm/年}$ (2ft/s)	均匀
高速酸性水腐蚀	$\geq 0.6096\text{mm/年}$ (2ft/s)	局部
低速胺腐蚀	$< 1.524\text{mm/年}$ (5ft/s), 富胺	均匀
	$< 6.096\text{mm/年}$ (20ft/s), 贫胺	均匀
高速胺腐蚀	$> 1.524\text{mm/年}$ (5ft/s), 富胺	局部
	$> 6.096\text{mm/年}$ (20ft/s), 贫胺	局部
高温氧化		均匀

G.5.4 检验有效性等级

根据确定减薄和预测正确的减薄速率时的有效性,将检验进行分级。某一给定的检测技术的实际有效性取决于减薄机理的特性(即它是均匀减薄还是局部减薄)。

表 G.6 (a) 和表 G.6 (b) 分别给出了针对均匀减薄和局部减薄的检测活动的实例,既有侵入式的检测(需进入设备),也有非侵入式检测(在外部进行)。注意:分配给检测活动的有效性类别根据减薄是均匀减薄还是局部减薄而不同。

对局部减薄而言,选择检查部位应基于对特定工艺中损伤机理的透彻理解。本模块以下章节可提供指导。

G.5.5 最高有效性检测数量的确定

应根据表 G.6 (a) 和表 G.6 (b) 描述在指定时间期限内进行的每一检验的有效性。最高有效性

检测数量将用来确定技术模块次因子。如果在指定时间期限内已经进行了多次低有效性的检测，则可根据以下关系将它们折算为等效的较高有效性的检测数量：

- a) 两次及以上“通常有效”检验等于一次“高度有效”检验。
- b) 两次及以上“一般有效”检验等于一次“通常有效”检验。

表 G.6 (a) 检验有效性分配指南——均匀减薄

检验有效性等级	实例：侵入式检测	实例：非侵入式检测
高度有效	50%~100%表面检查（拆卸部分内件），并进行测厚	覆盖 50%~100%超声波扫查或射线探伤
通常有效	名义上 20%检查（不拆卸内件）和外部超声波抽检测厚	名义上 20%超声波扫查（自动或人工）或断面射线探伤或者外部的点检测厚（统计确认）
一般有效	目检，不进行测厚	2%~3%检查，外部超声波测厚抽检和很少或无内部目检
有效性差	只有外部点检测厚读数	若干个测厚和有文件记录的检测计划
无效	无检测	仅进行若干外部测厚和一个文件记录差的检测计划系统

表 G.6 (b) 检验有效性分配指南——局部减薄

检验有效性等级	实例：侵入式检测	实例：非侵入式检测
高度有效	100%目检（拆卸内部填料、塔盘等）和测厚	在腐蚀工程师或其他知识丰富的专家指定的区域内 50%~100%自动超声波扫查，或断面射线探伤
通常有效	100%目检（部分拆卸内件），包括人孔，接管等和测厚	在腐蚀工程师或其他知识丰富的专家指定的区域内 20%自动超声波扫查，或者 50%断面射线探伤
一般有效	名义上 20%目检和超声波点检测厚	在腐蚀工程师或其他知识丰富的专家指定的区域内 20%自动超声波扫查，或者断面射线探伤和点检测厚
有效性差	不检测	超声波点检测厚或断面射线探伤，腐蚀工程师或者其他知识丰富的专家不指定区域
无效	不检测	超声波点检测厚，腐蚀工程师或者其他知识丰富的专家不指定区域

G.5.6 技术模块次因子 (TMSF) 的确定

应使用计算的 $a \cdot r/t$ 和最高有效性检验次数来确定表 G.7 中的减薄技术模块次因子。

G.5.7 考虑安全设计，对 TMSF 进行修正

如果设备在其最大允许工作压力 (MAWP) 下很好地运行，则可以显著地降低失效的可能性。因此，对显著的安全设计可以提高一个可信度。

使用 MAWP 和运行压力 (OP) 来计算比值 $MAWP/OP$ 。相反，安全设计因子可通过计算实际厚度 (T_{act}) 除以 $[T_{act} - \text{剩余腐蚀余量 (CA)}]$ 的比值或 $T_{act} \cdot CA$ 来确定。使用这些比值，按照表 G.8 可以确定其的安全设计因子。

将安全设计因子乘以 TMSF，得到一个修正过的 TMSF。

表 G.7 减薄技术模块次因子

检验次数		1			2			3			4			5			6		
$a \cdot r/t$	未检验	检验有效性			检验有效性			检验有效性			检验有效性			检验有效性			检验有效性		
		有效	一般	高度	有效	一般	高度	有效	一般	高度	有效	一般	高度	有效	一般	高度	有效	一般	高度
0.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.10	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.12	6	5	3	2	1	4	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
0.14	20	17	10	6	1	13	1	1	1	1	7	2	1	1	1	1	1	1	1
0.16	90	70	50	20	3	50	20	4	1	1	30	5	1	20	2	1	1	1	1
0.18	250	200	130	70	7	170	70	10	1	1	100	15	1	70	7	1	1	3	1
0.20	400	300	210	110	15	290	120	20	1	1	180	20	2	120	10	1	1	6	1
0.25	520	450	290	150	20	350	170	30	2	2	200	30	2	150	15	2	1	120	7
0.30	650	550	400	200	30	400	200	40	4	4	320	50	4	180	25	3	2	150	10
0.35	750	650	550	300	80	600	300	80	10	5	540	90	10	350	70	6	4	280	40
0.40	900	800	700	400	130	700	400	120	30	10	500	140	20	400	110	10	8	350	90
0.45	1050	900	810	500	200	800	500	160	40	20	600	200	30	500	160	20	15	400	130
0.50	1200	1100	970	600	270	1000	600	200	60	40	800	270	50	700	210	40	40	600	180
0.55	1350	1200	1130	700	350	1100	750	300	100	90	900	350	100	800	260	90	90	700	240
0.60	1500	1400	1250	850	500	1300	900	400	230	210	1000	450	220	900	360	210	210	800	300
0.65	1900	1700	1400	1000	700	1600	1105	670	530	500	1200	700	530	1100	640	500	500	1000	600

注 1：找到带有计算的 $a \cdot r/t$ 值或下一较高值的行，或者在行之间使用插值。
注 2：确定最高检验有效性的检验次数的相应栏下的次因子。

表 G.8 确定安全设计因子指南

$\frac{MAWP/OP \text{ 或 } T_{act}}{(T_{act} \cdot CA)}$	安全设计因子
1.0~1.5	1.0
>1.5	0.5

G.5.8 在线监测的 TMSF 的修正

除检测外，通常在许多工艺中还使用腐蚀（或者关键工艺参数影响腐蚀）的在线监测来防止腐蚀失效。在线监测的优势是可远在定期检测以前探测到因工艺参数变化而造成的腐蚀速率的变化。这种较早的探测通常能做到采用更及时的措施，从而降低失效的可能性。可以采用多种腐蚀监测方法，包括腐蚀探针、腐蚀挂片以及关键工艺参数的监测。本标准承认如果采用在线监测，则应提高可信度，来反映预测的减薄速率的较高可信度。但是，这些方法的成功程度根据特定的减薄机理而变化。

根据减薄机理和在线监测类型来确定表 G.9 的在线监测因子。如果采用了一种以上的监测方法，则应使用最高因子（不能累加）。将 TMSF 除以该因子。TMSF 为 1 的情况该因子不适用。

表 G.9 在线监测修正因子表

减薄机理		关键工艺过程变化	腐蚀探头	腐蚀挂片
盐酸腐蚀		10（带探头时为 20）	10	2
高浊硫化物腐蚀/环烷酸腐蚀		10	10	2
高温 H ₂ S/H ₂ 腐蚀		1	10	1
低速硫酸(H ₂ S/H ₂) 腐蚀	≤0.9144m/s (3ft/s)，碳钢	20	10	2
	≤1.524 m/s (5ft/s)，不锈钢			
	≤2.1336 m/s (7ft/s)，高合金钢			
高速硫酸(H ₂ S/H ₂) 腐蚀	>0.9144 m/s (3ft/s)，碳钢	10（带探头时为 20）	10	1
	>1.524 m/s (5ft/s)，不锈钢			
	>2.1336 m/s (7ft/s)，高合金钢	10		
氢氟酸（HF）腐蚀		10	1	1
低速酸性水腐蚀	≤6.096 m/s (20ft/s)	20	10	2
高速酸性水腐蚀	>6.096 m/s (20ft/s)	10	2	2
低速胺		20	10	2
高速胺		10	10	1
氧化		20	1	1
注：除非注明，否则因子为不可加的。本表假设设备有一个组织好的在线监测计划，可以识别潜在的腐蚀机理。关键工艺变量是氧、pH、含水量、速度、Fe 含量、温度、压力、H ₂ S 含量、CN 水平等。应由一位知识丰富的专家确定的合适的时间间隔监测相关变量。例如：每个季度监测挂片，而 pH、氯化物等则可每周监测。				

G.5.9 注入点/混合点的修正

注入点/混合点定义为将化学品（包括水）加到主流体的一个点。对于该技术模块，一个腐蚀性

206

混合点定义如下：

- a) 可能产生汽化蒸气的液态流体和蒸气的混合。
- b) 水出现在一种或两种流体中。
- c) 混合流体的温度低于组合流体的露点。

如果是含有一个注入点或混合点的配管回路，那么应对描述该位置的减薄活动的较高可能性的 TMSF 进行修正。修正通过将 TMSF（均匀减薄或局部减薄 TMSF 中较大者）乘以 3。如果专门对注入点管路（根据 SY/T 6553）内的注入点/混合点腐蚀进行了高度有效的检测，则无需进行修正。

G. 5. 10 对盲管段的修正

盲管段定义为只在间歇性工作（如启动、停车或连续工作以外的再生循环等）期间使用的一段管子或管路。如果是含有一段盲管的管路，则应对描述在减薄可能性高的 TMSF 进行修正，以便解决该部位减薄出现几率较大的问题。修正的方法是将 TMSF（均匀减薄的 TMSF 或局部减薄的 TMSF 中的较大者）乘以因子 3。如果采用了高度有效的检测来查明盲管中可能出现的局部腐蚀，那么无需进行上述修正。

G. 6 盐酸（HCl）腐蚀

G. 6. 1 损伤说明

在一些最常见的炼制加工装置中，盐酸（HCl）腐蚀是人们关注的一个问题。盐酸在各种浓度下对许多常见材料都具有腐蚀性，并且经常表现为局部腐蚀，特别是当它与局部含氯化物的氨或胺盐或急剧冷凝相关时。奥氏体不锈钢通常表现为点蚀，也可能发生缝隙腐蚀和氯化物应力腐蚀开裂。当存在氧化剂，或合金不处在固溶退火热处理状态下时，那么部分镍基合金可能经历加速腐蚀。

HCl 腐蚀需要关注的主要炼油装置有原油蒸馏、加氢处理和催化重整等装置。原油装置内通过氯化镁和氯化钙盐水解形成 HCl，并导致塔顶系统出现稀 HCl。在加氢处理装置中，由于烃进料中有有机氯化物的加氢作用形成 HCl，或者随烃进料或氢一同进入装置，并且与排液系统中的水一起冷凝。在催化重整装置中，氯化物可以与催化剂分离并与氢气化合，导致排液系统或者再生系统中 HCl 腐蚀。

G. 6. 2 基本数据

需要表 G. 10 中所列数据，来估计稀盐酸中的腐蚀速率。更高浓度的酸不属于本节的考虑范围。图 G. 2 显示了确定腐蚀速率所需的步骤。如果没有测量准确的数据，则应向知识丰富的工艺专家咨询。

表 G. 10 HCl 腐蚀分析所需基本数据

基 本 数 据	说 明
建造材料	确定设备或配管的建造材料
pH 值	对于碳钢和 300 系列不锈钢，建议用 pH 值来估计稀的浓度下的腐蚀速率。如果 Cl ⁻ 的浓度已知，则可使用表 G. 11 估计其 pH 值。但是注意中和剂的存在也可提高 pH 值
	对于高合金材料，使用 Cl ⁻ 浓度来估计腐蚀速率
最高温度，°F	确定该设备/配管中出现的最高温度。它可能是最高工艺温度，但也应考虑局部加热条件，如日照或伴热管作用
空气或氧化剂是否存在 (是或否)	空气（氧气）的存在可以提高腐蚀速率，特别对合金 400 和合金 B-2。其他氧化剂，如三价铁离子、二价铜离子将对这些合金有类似作用

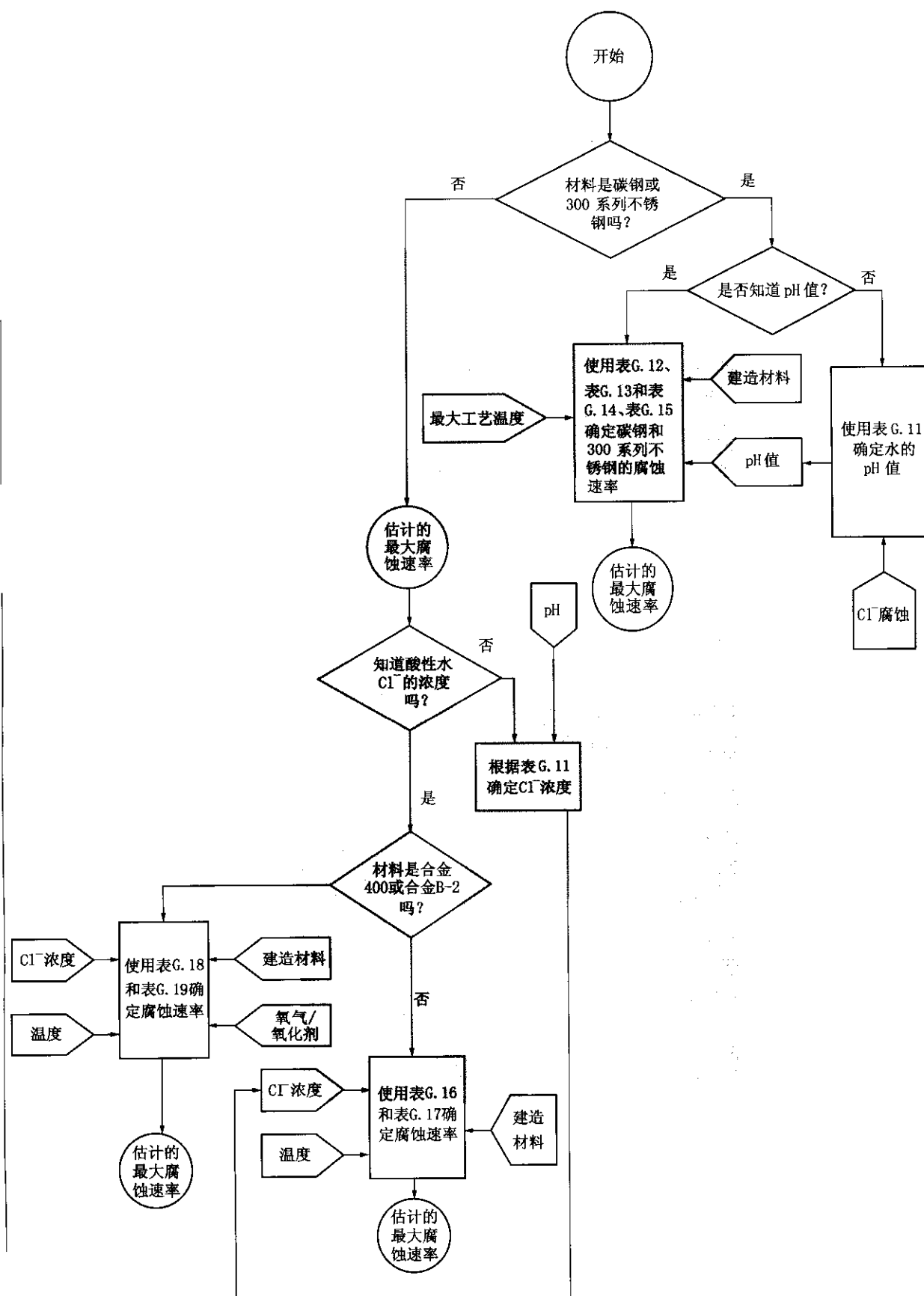


图 G.2 HCl 腐蚀速率的确定

G. 6.3 盐酸腐蚀速率的确定

应当使用表 G. 12～表 G. 19 来估计暴露于各种稀盐酸中材料的腐蚀速率。

表 G. 11 根据 Cl⁻ 浓度确定 pH 值^a

氯离子浓度 (质量分数), 10 ⁻⁶ (ppm)	pH
3601~12000	0.5
1201~3600	1.0
361~1200	1.5
121~360	2.0
36~120	2.5
16~35	3.0
6~15	3.5
3~5	4.0
1~2	4.5
<1	5.0

^a 假设没有碱性介质 (NH₃, 胺, 苛性碱) 存在。

表 G. 12 估计的碳钢腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

pH	温度, °F			
	100	>100~150	151~200	>200
≤0.5	999	999	999	999
0.6~1.0	900	999	999	999
1.1~1.5	400	999	999	999
1.6~2.0	200	700	999	999
2.1~2.5	100	300	400	560
2.6~3.0	60	130	200	280
3.1~3.5	40	70	100	140
3.6~4.0	30	50	90	125
4.1~4.5	20	40	70	100
4.6~5.0	10	30	50	70
5.1~5.5	7	20	30	40
5.6~6.0	4	1	20	30
6.1~6.5	3	10	15	20
6.6~7.0	2	5	7	10

注: 这些腐蚀速率为均匀腐蚀速率的 10 倍, 用来描述局部点蚀。

表 G.13 估计的碳钢腐蚀速率 (法定计量单位) mm/年

pH	温度,℃			
	37.78	>37.78~65.56	66.11~93.33	>93.33
≤0.5	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
0.6~1.0	22.86	25.3746	25.3746	25.3746
1.1~1.5	10.16	17.78	25.3746	25.3746
1.6~2.0	5.08	7.62	25.3746	25.3746
2.1~2.5	2.54	3.302	10.16	14.224
2.6~3.0	1.524	1.778	5.08	7.112
3.1~3.5	1.016	1.27	2.54	3.556
3.6~4.0	0.762	1.016	2.286	3.175
4.1~4.5	0.508	0.762	1.778	2.54
4.6~5.0	0.254	0.508	1.27	1.778
5.1~5.5	0.1778	0.0254	0.762	1.016
5.6~6.0	0.1016	0.254	0.508	0.762
6.1~6.5	0.0762	0.127	0.381	0.508
6.6~7.0	0.0508	25.3746	0.1778	0.254
注: 这些腐蚀速率为均匀腐蚀速率的 10 倍, 用来描述局部点蚀				

表 G.14 300 系列不锈钢的估计腐蚀速率 (英制单位) 密耳/年

pH	温度,°F			
	100	>100~150	151~200	>200
≤0.5	900	999	999	999
0.6~1.0	500	999	999	999
1.1~1.5	300	500	700	999
1.6~2.0	150	260	400	500
2.1~2.5	80	140	200	250
2.6~3.0	50	70	100	120
3.1~3.5	30	40	50	65
3.6~4.0	20	25	30	35
4.1~4.5	10	15	20	25
4.6~5.0	5	7	10	12
5.1~5.5	4	5	6	7
5.6~6.0	3	4	5	6
6.1~6.5	2	3	4	5
6.6~7.0	1	2	2	4
注: 这些腐蚀速率是均匀腐蚀速率的 10 倍, 用来说明局部点蚀。				

表 G.15 300 系列不锈钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

pH	温度, °C			
	37.78	>37.78~65.56	66.11~93.33	>93.33
≤0.5	22.86	25.3746	25.3746	25.3746
0.6~1.0	12.7	25.3746	25.3746	25.3746
1.1~1.5	7.62	12.7	17.78	25.3746
1.6~2.0	3.81	6.604	10.16	12.7
2.1~2.5	2.032	3.556	5.08	6.35
2.6~3.0	1.27	1.778	2.54	3.048
3.1~3.5	0.762	1.016	1.27	1.651
3.6~4.0	0.508	0.635	0.762	0.889
4.1~4.5	0.254	0.381	0.508	0.635
4.6~5.0	0.127	0.1778	0.254	0.3048
5.1~5.5	0.1016	0.127	0.1524	0.1778
5.6~6.0	0.0762	0.1016	0.127	0.1524
6.1~6.5	0.0508	0.0762	0.1016	0.127
6.6~7.0	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016

注：这些腐蚀速率是均匀腐蚀速率的 10 倍，用来说明局部点蚀。

表 G.16 合金 825, 20, 625, C-276 的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

合 金	Cl ⁻ 浓度(质量分数) %	温度, °F			
		<100	100~150	151~200	>200
合金 825 和合金 20	≤0.5	1	3	40	200
	>0.5~1	2	5	80	400
	>1~5	10	70	300	999
合金 625	≤0.5	1	2	15	75
	>0.5~1	1	5	25	125
	>1~5	2	70	200	400
合金 C-276	≤0.5	1	2	8	30
	>0.5~1	1	2	15	75
	>1~5	2	10	60	300

表 G. 17 合金 825, 20, 625, C-276 的估计腐蚀速率 (法定计量单位) mm/年

合 金	Cl ⁻ 浓度 (质量分数) %	温度, °C			
		<37.78	37.78~65.56	66.11~93.33	>93.33
合金 825 和合金 20	≤0.5	0.0254	0.0762	1.016	5.08
	>0.5~1	0.0508	0.127	2.032	10.16
	>1~5	0.254	1.778	7.62	25.3746
合金 625	≤0.5	0.0254	0.0508	0.381	1.905
	>0.5~1	0.0254	0.127	0.635	3.175
	>1~5	0.0508	1.778	5.08	10.16
合金 C-276	≤0.5	0.0254	0.0508	0.2032	0.762
	>0.5~1	0.0254	0.0508	0.381	1.905
	>1~5	0.0508	0.254	1.524	7.62

表 G. 18 合金 B-2 和合金 400 的估计腐蚀速率 (英制单位) 密耳/年

合 金	Cl ⁻ 浓度 (质量分数) %	温度, °F							
		100		>100~150		151~200		>200	
		氧/氧化物存在吗?							
		N	Y	N	Y	N	Y	N	Y
合金 B-2	≤0.5	1	4	1	4	2	8	4	16
	>0.5~1	1	4	1	4	5	20	20	80
	>1~5	2	8	5	20	10	40	25	100
合金 400	≤0.5	1	4	3	12	30	120	300	999
	>0.5~1	2	10	5	20	80	320	800	999
	>1~5	19	40	25	100	150	600	900	999

表 G. 19 合金 B-2 和合金 400 的估计腐蚀速率 (法定计量单位) mm/年

合金	Cl ⁻ 浓度 (质量分数) %	温度, °C							
		37. 78		>37. 78~65. 56		66. 11~93. 33		>93. 33	
		氧/氧化物存在吗?							
		N	Y	N	Y	N	Y	N	Y
合金 B-2	≤0. 5	0. 0254	0. 1016	0. 0254	0. 1016	0. 0508	0. 2032	0. 1016	0. 4064
	>0. 5~1	0. 0254	0. 1016	0. 0254	0. 1016	0. 127	0. 508	0. 508	2. 032
	>1~5	0. 0508	0. 2032	0. 127	0. 508	0. 254	1. 016	0. 635	2. 54
合金 400	≤0. 5	0. 0254	0. 1016	0. 0762	0. 3048	0. 762	3. 048	7. 62	25. 3746
	>0. 5~1	0. 0508	0. 254	0. 127	0. 508	2. 032	8. 128	20. 32	25. 3746
	>1~5	0. 4826	1. 016	0. 635	2. 54	3. 81	15. 24	22. 86	25. 3746

G.7 高温硫化物腐蚀和环烷酸腐蚀

G.7.1 损伤说明

高温硫化物腐蚀的形式通常是均匀腐蚀，它可发生在大约高于 204.44℃ (400°F) 的温度下。该形式的腐蚀有时根据被加工的油品伴随环烷酸腐蚀发生。环烷酸腐蚀发生时通常是局部的。

硫化物类发生在大多数原油中，但其浓度因原油的不同而不同。这些自然生成的化合物其自身具有腐蚀性。并且当它们通过热解转换成硫化氢时也具有腐蚀性。含 H_2S 和 H_2 的蒸气的腐蚀见 G.8。

与硫的化合物一样，环烷酸一般发生在某些原油中。原油蒸馏时，这些酸倾向于在沸点较高的馏分如重质常压汽油、常压渣油和真空瓦斯油中浓缩。酸也可能存在于真空瓦斯渣油中，但许多更具腐蚀性的酸常常蒸馏成真空侧线馏出物。沸点较低的流体在环烷酸中通常较少。腐蚀可能以点蚀的形式出现，在酸含量较低时更常见；或在较高酸浓度，尤其在较高速度下表现为表面划伤和凹槽。环烷酸可以使材料上的防护膜（硫化物或氧化物）改性或失稳，从而引起较高的硫化腐蚀速率，或它自身直接侵蚀基体金属。

高温硫化物环境中的腐蚀速率是材料、温度和存在的硫化合物浓度的函数。但是大量环烷酸的存在可能显著降低材料的抗腐蚀能力，而材料可能原本是有一定的耐腐蚀能力的。下面汇总腐蚀中的关键变量：

- a) 在高温硫化物环境中，材料如碳钢和低合金钢等形成硫化物腐蚀产物。这些材料的防护程度取决于上述环境因素。在足够高的温度和/或硫含量下，腐蚀产物防护性可能降低，因而腐蚀可能以更快的速率发生。
- b) 在碳钢中添加适量的铬会增加材料的抗腐蚀能力。含 5%，7% 和 9% 铬的合金在这些环境中往往足以表现出良好的材料性能。较低的合金（如 $1\frac{1}{4}\%Cr$ 和 $2\frac{1}{4}\%Cr$ ）与碳钢相比性能并没有多大的改善。不锈钢如 12%Cr (410, 410S, 405SS) 和 304SS 可能在特别高的含硫量和温度下用到。
- c) 硫化腐蚀与流体中硫的含量有关，并且通常简单表示为质量分数硫。通常，腐蚀随硫含量的增大而加剧。
- d) 高温硫化物腐蚀发生在约 204.44℃ (400°F) 以上的温度。环烷酸腐蚀一般发生在 204.44℃ ~ 371.11℃ (400°F ~ 700°F) 温度范围内，虽然已经有报告说在该温度范围外也有呈现环烷酸特性的腐蚀。在 398.89℃ (750°F) 以上时，环烷酸不是分解就是蒸馏成气相。硫化在液相和气相都发生，而环烷酸腐蚀仅发生在有液相存在的场合。
- e) 最易受环烷酸腐蚀的材料是常用于炼油业腐蚀性场合的碳钢、铁—铬 (5%Cr ~ 12%Cr) 合金。12%Cr 比碳钢的腐蚀速率更大。304SS 不锈钢有一定的耐环烷酸腐蚀能力，但一般为了耐浓度更高的酸，通常要求采用含钼的奥氏体不锈钢 (316 和 317SS)。已经发现 316 型不锈钢中至少要求含 2.5%Mo，才能具有最佳的耐环烷酸腐蚀的能力。
- f) 环烷酸的含量常用“中和指数”或“总酸值 (TAN)”表示。组成环烷酸系的各种酸可能具有明显不同的腐蚀性。TAN 由 ASTM 标准滴定法确定，并以 mg (KOH) /g 为单位报告结果，它是指中和 1g 油样的酸度所需的氢氧化钾 (KOH) 的量。当比色滴定法和电位滴定法都可用时，电位滴定法是更常用的方法。应注意：滴定中和其中所有的酸，而不仅仅是环烷酸。例如，溶解的硫化氢将体现在样品的 TAN 中。从腐蚀的观点看，评估液体烃流体的 TAN 而不是整个原油的 TAN，TAN 是确定环烷酸腐蚀敏感性的一个重要参数。
- g) 腐蚀的另一个重要因素是流体的速度，尤其当环烷酸也是一个腐蚀因素的场合。速度增加将通过更多去除保护性硫化物而增加了腐蚀性。这一影响在流速高的液—汽混合相系统中最明显。
- h) 在硫含量特别低时，甚至在 TAN 低时，环烷酸腐蚀可能更加严重，因为保护性硫化物可能还没形成。
- i) 最常观察到的硫化物和环烷酸腐蚀的加工装置是常减压原油蒸馏装置以及诸如加氢装置、催化裂化和焦化装置等下游装置的进料系统。在加氢装置中，未报告在氢气加注点的下游甚至

反应器的上游有环烷酸腐蚀。也未报告过在这些装置的分馏段发生催化裂化和焦化装置热分解环烷酸，除非夹带了未裂化进料。当加工含环烷酸的进料时，炼制润滑油流体中可能出现高浓度的环烷酸。应注意的是：在环烷酸可能热分解的场合，可能形成轻质有机酸或二氧化碳，它们会影响冷凝水的腐蚀性。

G.7.2 基本数据

表 G.20 中所列数据要求用来确定高温硫化物和环烷酸环境中估计的腐蚀速率。图 G.3 显示了确定腐蚀速率所需的步骤。如果没有精确的测量数据，应请教知识丰富的工艺专家。

表 G.20 高温硫化物和环烷酸腐蚀分析所需基本数据

基 本 数 据	说 明
建造材料	确定设备/配管的建造材料。 对于 316SS，如不知道 Mo 含量，假定其<2.5%（质量分数）
最高温度,℃	确定工艺流体的最高温度
流体的硫含量	确定设备中流体的硫含量。如果不知道硫含量，请联系知识丰富的工艺工程师做一下估计
总酸值 (TAN) [TAN=mg(KOH)/g(油样)]	重要的 TAN 是存在于待评估设备/配管中的液体烃相的 TAN。如果不知道总酸值，请联系知识丰富的工艺工程师做估计
速度	确定该设备/配管中的最大速度。虽然容器中的状态基本上是停滞的，但应考虑流动接管中的速度

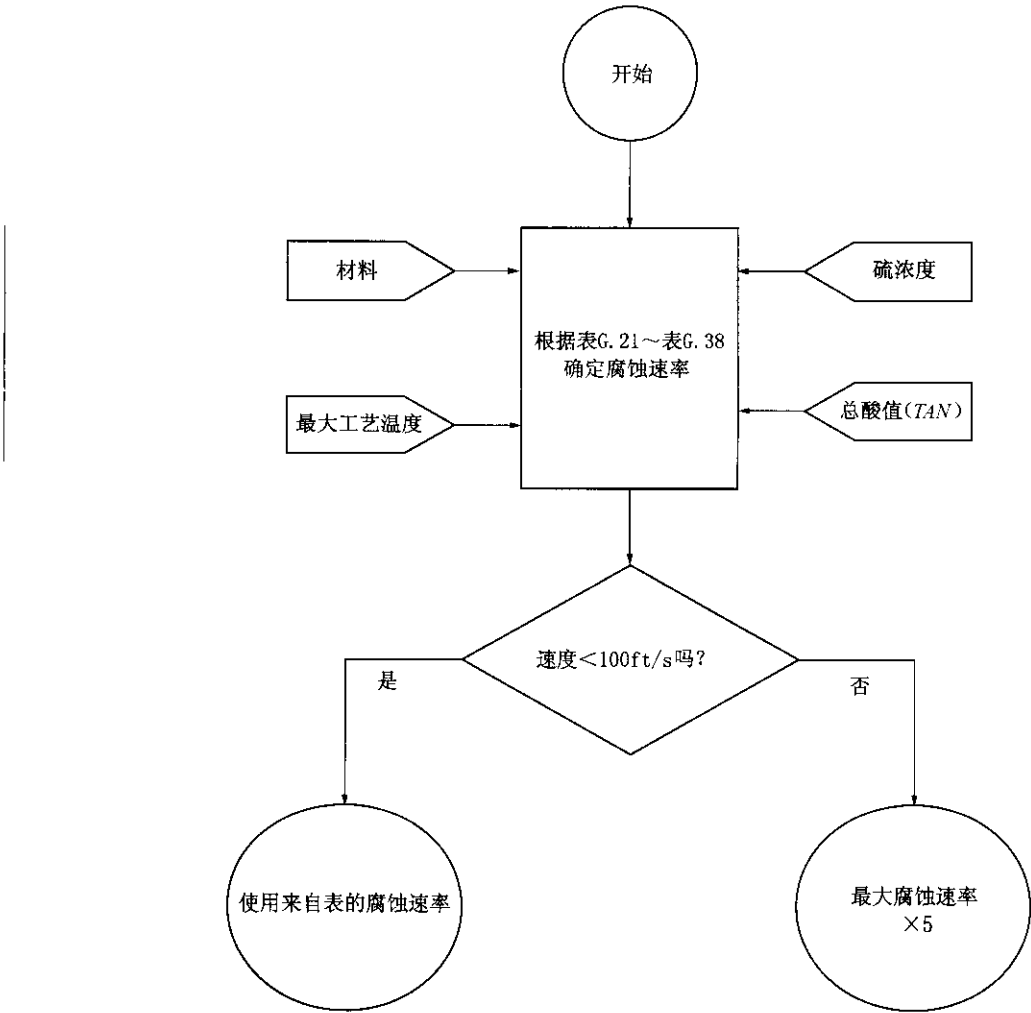


图 G.3 高温硫化物和环烷酸腐蚀速率的确定

G.7.3 高温硫化物和环烷酸腐蚀速率的确定

根据表 G.21~表 G.38 可确定环烷酸腐蚀速率的估计值。在没有环烷酸影响的情况下, 高温硫化物环境中的腐蚀速率根据修正的 McConomy 曲线确定。虽然已经有关于环烷酸腐蚀的各种论文, 但还没有广泛认可的用于确立腐蚀速率和影响腐蚀速率的各种因素之间的相互关系。因此, 当环烷酸腐蚀作为一个因素时所用的腐蚀速率仅确定一个数量级的腐蚀速率。一旦腐蚀速率从适用的表中选取, 则当速度大于 30.48m/s (100ft/s) 时, 腐蚀速率应该乘以 5。

表 G.21 碳钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

硫(质量分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		<450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0.2	≤0.3	1	3	7	15	20	35	50	60
	0.31~1.0	5	15	25	35	45	55	65	75
	1.1~2.0	20	25	35	65	120	150	180	200
	2.1~4.0	30	60	60	120	150	160	240	240
	>4.0	40	80	100	160	180	200	280	300
0.21~0.6	≤0.5	1	4	10	20	30	50	70	80
	0.51~1.0	5	10	15	25	40	60	80	90
	1.1~2.0	8	15	25	35	50	75	90	110
	2.1~4.0	10	20	35	50	70	100	120	130
	>4.0	20	30	50	70	90	120	140	160
0.61~1.0	≤0.5	1	5	10	25	40	60	90	100
	0.51~1.0	5	10	15	30	50	80	110	130
	1.1~2.0	10	185	30	50	80	100	130	150
	2.1~4.0	15	30	50	80	100	120	140	170
	>4.0	25	40	60	100	120	150	180	200
1.1~2.0	≤0.5	2	5	15	30	50	80	110	130
	0.51~1.0	7	10	20	35	55	100	130	50
	1.1~2.0	15	20	35	55	100	120	140	170
	2.1~4.0	20	30	55	85	110	150	170	200
	>4.0	30	45	75	120	140	180	200	260
2.1~3.0	≤0.5	2	7	20	35	55	95	130	150
	0.51~1.0	7	10	30	45	60	120	140	170
	1.1~2.0	15	20	40	60	75	140	170	200
	2.1~4.0	20	35	60	90	120			
	>4.0	35	50	80	120	150	200	260	280
>3.0	≤0.5	2	8	20	40	60	100	140	160
	0.51~1.0	8	15	25	45	65	120	150	170
	1.1~2.0	20	25	35	65	120	150	180	200
	2.1~4.0	30	60	60	120	150	160	240	240
	>4.0	40	80	100	160	180	200	280	300

表 G.22 碳钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °C							
		<232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	>398.89
≤0.2	≤0.3	0.0254	0.0762	0.1778	0.381	0.508	0.889	1.27	1.524
	0.31~1.0	0.127	0.381	0.635	0.889	1.143	1.397	1.651	1.905
	1.1~2.0	0.508	0.635	0.889	1.651	3.048	3.81	4.572	5.08
	2.1~4.0	0.762	1.524	1.524	3.048	3.81	4.064	6.096	6.096
	>4.0	1.016	2.032	2.54	4.064	4.572	5.08	7.112	7.62
0.21~0.6	≤0.5	0.0254	0.1016	0.254	0.508	0.762	1.27	1.778	2.032
	0.51~1.0	0.127	0.254	0.381	0.635	1.016	1.524	2.032	2.286
	1.1~2.0	0.2032	0.381	0.635	0.889	1.27	1.905	2.286	2.794
	2.1~4.0	0.254	0.508	0.889	1.27	1.778	2.54	3.048	3.302
	>4.0	0.508	0.762	1.27	1.778	2.286	3.048	3.556	4.064
0.61~1.0	≤0.5	0.0254	0.127	0.254	0.635	1.016	1.524	2.286	2.54
	0.51~1.0	0.127	0.254	0.381	0.762	1.27	2.032	2.794	3.302
	1.1~2.0	0.254	4.699	0.762	1.27	2.032	2.54	3.302	3.81
	2.1~4.0	0.381	0.762	1.27	2.032	2.54	3.048	3.556	4.318
	>4.0	0.635	1.016	1.524	2.54	3.048	3.81	4.572	5.08
1.1~2.0	≤0.5	0.0508	0.127	0.381	0.762	1.27	2.032	2.794	3.302
	0.51~1.0	0.1778	0.254	0.508	0.889	1.397	2.54	3.302	1.27
	1.1~2.0	0.381	0.508	0.889	1.397	2.54	3.048	3.556	4.318
	2.1~4.0	0.508	0.762	1.397	2.159	2.794	3.81	4.318	5.08
	>4.0	0.762	1.143	1.905	3.048	3.556	4.572	5.08	6.604
2.1~3.0	≤0.5	0.0508	0.1778	0.508	0.889	1.397	2.413	3.302	3.81
	0.51~1.0	0.1778	0.254	0.762	1.143	1.651	3.048	3.556	4.318
	1.1~2.0	0.381	0.508	1.016	1.524	1.905	3.556	4.318	5.08
	2.1~4.0	0.508	0.889	1.524	2.286	3.048			
	>4.0	0.889	1.27	2.032	3.048	3.81	5.08	6.604	7.112
>3.0	≤0.5	0.0508	0.2032	0.508	1.016	1.524	2.54	3.556	4.064
	0.51~1.0	0.2032	0.381	0.635	1.143	1.651	3.048	3.81	4.318
	1.1~2.0	0.508	0.635	0.889	1.651	3.048	3.81	4.572	5.08
	2.1~4.0	0.762	1.524	1.524	3.048	3.81	4.064	6.096	6.096
	>4.0	1.016	2.032	2.54	4.064	4.572	5.08	7.112	7.62

表 G. 23 1¼Cr 和 2¼Cr 钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		≤450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0.2	≤0.3	1	1	4	7	13	21	25	30
	0.31~1.0	3	8	15	20	25	30	35	40
	1.1~2.0	10	15	20	30	60	75	90	100
	2.1~4.0	15	30	30	60	75	85	120	120
	>4.0	20	40	50	80	100	120	140	160
0.21~0.6	≤0.5	1	2	5	10	20	30	35	40
	0.51~1.0	2	5	8	15	20	30	40	45
	1.1~2.0	4	8	15	20	25	40	45	55
	2.1~4.0	5	10	20	25	35	50	60	65
	>4.0	10	15	25	35	45	60	70	80
0.61~1.0	≤0.5	1	3	6	15	25	40	45	50
	0.51~1.0	3	5	8	20	30	45	55	60
	1.1~2.0	5	8	15	25	40	50	65	75
	2.1~4.0	7	15	25	40	50	60	70	85
	>4.0	12	20	30	50	60	75	90	100
1.1~2.0	≤0.5	2	3	8	15	30	50	55	65
	0.51~1.0	4	5	10	20	40	55	65	75
	1.1~2.0	6	10	20	30	50	65	70	80
	2.1~4.0	10	15	30	45	60	75	85	100
	>4.0	15	20	35	60	75	90	100	130
2.1~3.0	≤0.5	2	4	9	20	35	55	65	75
	0.51~1.0	4	5	15	25	40	60	70	80
	1.1~2.0	7	10	20	30	45	70	80	100
	2.1~4.0	10	15	30	45	60	80	100	120
	>4.0	15	25	40	60	80	100	120	140
>3.0	≤0.5	2	4	10	20	35	60	70	80
	0.51~1.0	5	8	15	25	40	70	75	85
	1.1~2.0	10	15	20	30	60	75	90	100
	2.1~4.0	15	30	30	60	75	85	120	120
	>4.0	20	40	50	80	100	120	140	160

表 G.24 1¼Cr 和 2¼Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度,℃							
		<232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	>398.89
≤0.2	≤0.3	0.0254	0.0254	0.1016	0.1778	0.3302	0.5334	0.635	0.762
	0.31~1.0	0.0762	0.2032	0.381	0.508	0.635	0.762	0.889	1.016
	1.1~2.0	0.254	0.381	0.508	0.762	1.524	1.905	2.286	2.54
	2.1~4.0	0.381	0.762	0.762	1.524	1.905	2.159	3.048	3.048
	>4.0	0.508	1.016	1.27	2.032	2.54	3.048	3.556	4.064
0.21~0.6	≤0.5	0.0254	0.0508	0.127	0.254	0.508	0.762	0.889	1.016
	0.51~1.0	0.0508	0.127	0.2032	0.381	0.508	0.762	1.016	1.143
	1.1~2.0	0.1016	0.2032	0.381	0.508	0.635	1.016	1.143	1.397
	2.1~4.0	0.127	0.254	0.508	0.635	0.889	1.27	1.524	1.651
	>4.0	0.254	0.381	0.635	0.889	1.143	1.524	1.778	2.032
0.61~1.0	≤0.5	0.0254	0.0762	0.1524	0.381	0.635	1.016	1.143	1.27
	0.51~1.0	0.0762	0.127	0.2032	0.508	0.762	1.143	1.397	1.524
	1.1~2.0	0.127	0.2032	0.381	0.635	1.016	1.27	1.651	1.905
	2.1~4.0	0.1778	0.381	0.635	1.016	1.27	1.524	1.778	2.159
	>4.0	0.3048	0.508	0.762	1.27	1.524	1.905	23.114	2.54
1.1~2.0	≤0.5	0.0508	0.0762	0.2032	0.381	0.762	1.27	1.397	1.651
	0.51~1.0	0.1016	0.127	0.254	0.508	1.016	1.397	1.651	1.905
	1.1~2.0	0.1524	0.254	0.508	0.762	1.27	1.651	1.778	2.032
	2.1~4.0	0.254	0.381	0.762	1.143	1.524	1.905	2.159	2.54
	>4.0	0.381	0.508	0.889	1.524	1.905	2.286	2.54	3.302
2.1~3.0	≤0.5	0.0508	0.1016	0.2286	0.508	0.889	1.397	1.651	1.905
	0.51~1.0	0.1016	0.127	0.381	0.635	1.016	1.524	1.778	2.032
	1.1~2.0	0.1778	0.254	0.508	0.762	1.143	1.778	2.032	2.54
	2.1~4.0	0.254	0.381	0.762	1.143	1.524	2.032	2.54	3.048
	>4.0	0.381	0.635	1.016	1.524	2.032	2.54	3.048	3.556
>3.0	≤0.5	0.0508	0.1016	0.254	0.508	0.889	1.524	1.778	2.032
	0.51~1.0	0.127	0.2032	0.381	0.635	1.016	1.778	1.905	2.159
	1.1~2.0	0.254	0.381	0.508	0.762	1.524	1.905	2.286	2.54
	2.1~4.0	0.381	0.762	0.762	1.524	1.905	2.159	3.048	3.048
	>4.0	0.508	1.016	1.27	2.032	2.54	3.048	3.556	4.064

表 G.25 5% Cr 钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

硫 (质量分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		≤450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0.2	≤0.7	1	1	2	4	6	8	10	15
	0.71~1.5	2	3	4	6	10	10	15	20
	1.6~2.0	7	10	15	20	25	35	45	50
	2.1~4.0	10	15	20	30	40	45	50	60
	>4.0	15	20	30	40	50	60	70	80
0.2~0.6	≤0.7	1	2	3	5	8	10	15	20
	0.71~1.5	2	3	4	6	10	15	20	25
	1.6~2.0	2	4	6	8	15	20	25	30
	2.1~4.0	4	6	8	10	15	20	30	35
	>4.0	6	8	10	10	20	25	35	40
0.61~1.0	≤0.7	1	2	4	6	10	15	23	25
	0.71~1.5	2	4	6	8	15	20	25	30
	1.6~2.0	4	6	8	10	15	20	30	35
	2.1~4.0	6	8	10	10	20	25	35	40
	>4.0	8	10	10	15	20	30	40	50
1.1~2.0	≤0.7	1	2	5	8	15	20	30	35
	0.71~1.5	3	5	10	15	20	30	35	40
	1.6~2.0	5	10	15	20	30	35	40	45
	2.1~4.0	10	15	20	30	35	40	45	50
	>4.0	15	20	30	35	40	50	60	70
2.1~3.0	≤0.7	1	3	6	9	15	20	35	40
	0.71~1.5	5	7	10	15	20	25	40	45
	1.6~2.0	7	10	15	20	25	35	45	50
	2.1~4.0	10	15	20	30	40	45	50	60
	>4.0	15	20	30	40	50	60	70	80
>3.0	≤0.7	2	3	6	10	15	25	35	40
	0.71~1.5	5	7	10	15	20	30	40	45
	1.6~2.0	7	10	15	20	25	35	45	50
	2.1~4.0	10	15	20	30	40	45	50	60
	>4.0	15	20	30	40	50	60	70	80

表 G. 26 5% Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °C							
		≤232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	>398.89
≤0.2	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.381
	0.71~1.5	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.254	0.254	0.381	0.508
	1.6~2.0	0.1778	0.254	0.381	0.508	0.635	0.889	1.143	1.27
	2.1~4.0	0.254	0.381	0.508	0.762	1.016	1.143	1.27	1.524
	>4.0	0.381	0.508	0.762	1.016	1.27	1.524	1.778	2.032
0.2~0.6	≤0.7	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.2032	0.254	0.381	0.508
	0.71~1.5	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.254	0.381	0.508	0.635
	1.6~2.0	0.0508	0.1016	0.1524	0.2032	0.381	0.508	0.635	0.762
	2.1~4.0	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.381	0.508	0.762	0.889
	>4.0	0.1524	0.2032	0.254	0.254	0.508	0.635	0.889	1.016
0.61~1.0	≤0.7	0.0254	0.0508	0.1016	0.1524	0.254	0.381	0.5842	0.635
	0.71~1.5	0.0508	0.1016	0.1524	0.2032	0.381	0.508	0.635	0.762
	1.6~2.0	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.381	0.508	0.762	0.889
	2.1~4.0	0.1524	0.2032	0.254	0.254	0.508	0.635	0.889	1.016
	>4.0	0.2032	0.254	0.254	0.381	0.508	0.762	1.016	1.27
1.1~2.0	≤0.7	0.0254	0.0508	0.127	0.2032	0.381	0.508	0.762	0.889
	0.71~1.5	0.0762	0.127	0.254	0.381	0.508	0.762	0.889	1.016
	1.6~2.0	0.127	0.254	0.381	0.508	0.762	0.889	1.016	1.143
	2.1~4.0	0.254	0.381	0.508	0.762	0.889	1.016	1.143	1.27
	>4.0	0.381	0.508	0.762	0.889	1.016	1.27	1.524	1.778
2.1~3.0	≤0.7	0.0254	0.0762	0.1524	0.2286	0.381	0.508	0.889	1.016
	0.71~1.5	0.127	0.1778	0.254	0.381	0.508	0.635	1.016	1.143
	1.6~2.0	0.1778	0.254	0.381	0.508	0.635	0.889	1.143	1.27
	2.1~4.0	0.254	0.381	0.508	0.762	1.016	1.143	1.27	1.524
	>4.0	0.381	0.508	0.762	1.016	1.27	1.524	1.778	2.032
>3.0	≤0.7	0.0508	0.0762	0.1524	0.254	0.381	0.635	0.889	1.016
	0.71~1.5	0.127	0.1778	0.254	0.381	0.508	0.762	1.016	1.143
	1.6~2.0	0.1778	0.254	0.381	0.508	0.635	0.889	1.143	1.27
	2.1~4.0	0.254	0.381	0.508	0.762	1.016	1.143	1.27	1.524
	>4.0	0.381	0.508	0.762	1.016	1.27	1.524	1.778	2.032

表 G.27 7% Cr 钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		≤450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0.2	≤0.7	1	1	1	2	4	6	7	8
	0.71~1.5	1	2	3	5	7	8	10	15
	1.6~2.0	4	7	10	15	20	25	30	35
	2.1~4.0	7	10	15	20	25	30	35	45
	>4.0	10	15	20	25	30	35	45	60
0.21~0.6	≤0.7	1	1	2	4	5	8	10	15
	0.71~1.5	1	2	4	5	8	10	15	15
	1.6~2.0	2	4	5	6	10	15	15	20
	2.1~4.0	3	5	6	9	12	15	20	20
	>4.0	4	6	9	10	15	20	20	25
0.61~1.0	≤0.7	1	1	3	4	6	10	15	15
	0.71~1.5	2	3	4	6	10	15	15	20
	1.6~2.0	3	4	6	10	12	15	20	25
	2.1~4.0	4	6	10	12	15	20	25	30
	>4.0	5	10	12	15	20	25	30	35
1.1~2.0	≤0.7	1	2	3	6	8	15	15	20
	0.71~1.5	2	3	6	10	15	15	20	25
	1.6~2.0	3	6	10	15	20	20	25	30
	2.1~4.0	6	10	15	20	20	25	30	35
	>4.0	10	15	20	20	25	30	35	45
2.1~3.0	≤0.7	1	2	4	6	9	15	20	25
	0.71~1.5	6	7	9	10	15	20	25	30
	1.6~2.0	7	9	10	15	20	25	30	35
	2.1~4.0	9	10	15	20	30	35	35	40
	>4.0	10	15	20	30	35	470	50	55
>3.0	≤0.7	1	2	4	7	10	15	20	25
	0.71~1.5	2	4	7	10	15	20	25	30
	1.6~2.0	4	7	10	15	20	25	30	35
	2.1~4.0	7	10	15	20	25	30	35	45
	>4.0	10	15	20	25	30	35	45	60

表 G. 28 7% Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位) mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °C							
		≤232. 22	232. 78~ 260	260. 56~ 287. 78	288. 33~ 315. 56	316. 11~ 343. 33	343. 89~ 371. 11	371. 67~ 398. 89	>398. 89
≤0. 2	≤0. 7	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0508	0. 1016	0. 1524	0. 1778	0. 2032
	0. 71~1. 5	0. 0254	0. 0508	0. 0762	0. 127	0. 1778	0. 2032	0. 254	0. 381
	1. 6~2. 0	0. 1016	0. 1778	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889
	2. 1~4. 0	0. 1778	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889	1. 143
	>4. 0	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889	1. 143	1. 524
0. 21~0. 6	≤0. 7	0. 0254	0. 0254	0. 0508	0. 1016	0. 127	0. 2032	0. 254	0. 381
	0. 71~1. 5	0. 0254	0. 0508	0. 1016	0. 127	0. 2032	0. 254	0. 381	0. 381
	1. 6~2. 0	0. 0508	0. 1016	0. 127	0. 1524	0. 254	0. 381	0. 381	0. 508
	2. 1~4. 0	0. 0762	0. 127	0. 1524	0. 2286	0. 3048	0. 381	0. 508	0. 508
	>4. 0	0. 1016	0. 1524	0. 2286	0. 254	0. 381	0. 508	0. 508	0. 635
0. 61~1. 0	≤0. 7	0. 0254	0. 0254	0. 0762	0. 1016	0. 1524	0. 254	0. 381	0. 381
	0. 71~1. 5	0. 0508	0. 0762	0. 1016	0. 1524	0. 254	0. 381	0. 381	0. 508
	1. 6~2. 0	0. 0762	0. 1016	0. 1524	0. 254	0. 3048	0. 381	0. 508	0. 635
	2. 1~4. 0	0. 1016	0. 1524	0. 254	0. 3048	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762
	>4. 0	0. 127	0. 254	0. 3048	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889
1. 1~2. 0	≤0. 7	0. 0254	0. 0508	0. 0762	0. 1524	0. 2032	0. 381	0. 381	0. 508
	0. 71~1. 5	0. 0508	0. 0762	0. 1524	0. 254	0. 381	0. 381	0. 508	0. 635
	1. 6~2. 0	0. 0762	0. 1524	0. 254	0. 381	0. 508	0. 508	0. 635	0. 762
	2. 1~4. 0	0. 1524	0. 254	0. 381	0. 508	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889
	>4. 0	0. 254	0. 381	0. 508	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889	1. 143
2. 1~3. 0	≤0. 7	0. 0254	0. 0508	0. 1016	0. 1524	0. 2286	0. 381	0. 508	0. 635
	0. 71~1. 5	0. 1524	0. 1778	0. 2286	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762
	1. 6~2. 0	0. 1778	0. 2286	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889
	2. 1~4. 0	0. 2286	0. 254	0. 381	0. 508	0. 762	0. 889	0. 889	1. 016
	>4. 0	0. 254	0. 381	0. 508	0. 762	0. 889	11. 938	1. 27	1. 397
>3. 0	≤0. 7	0. 0254	0. 0508	0. 1016	0. 1778	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635
	0. 71~1. 5	0. 0508	0. 1016	0. 1778	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762
	1. 6~2. 0	0. 1016	0. 1778	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889
	2. 1~4. 0	0. 1778	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889	1. 143
	>4. 0	0. 254	0. 381	0. 508	0. 635	0. 762	0. 889	1. 143	1. 524

表 G. 29 9% Cr 钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		≤450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0.2	≤0.7	1	1	1	2	3	4	5	6
	0.71~1.5	1	2	2	4	4	5	6	8
	1.6~2.0	2	4	5	8	10	15	15	20
	2.1~4.0	3	6	10	12	15	20	20	25
	>4.0	5	8	12	15	20	25	30	30
0.21~0.6	≤0.7	1	1	2	3	4	6	7	8
	0.71~1.5	1	1	2	4	5	7	8	10
	1.6~2.0	2	2	3	5	8	8	10	10
	2.1~4.0	3	3	5	8	10	10	12	15
	>4.0	4	5	8	10	10	12	15	15
0.61~1.0	≤0.7	1	1	2	3	5	8	9	10
	0.71~1.5	1	2	3	5	8	10	10	10
	1.6~2.0	2	3	5	8	10	10	10	15
	2.1~4.0	3	5	8	10	10	15	15	15
	>4.0	5	8	10	10	15	15	20	20
1.1~2.0	≤0.7	1	1	2	4	6	10	10	15
	0.71~1.5	1	2	3	5	7	10	15	15
	1.6~2.0	2	4	4	6	8	12	15	20
	2.1~4.0	3	6	5	8	10	15	20	20
	>4.0	5	8	10	12	15	20	20	25
2.1~3.0	≤0.7	1	1	3	5	7	10	15	15
	0.71~1.5	1	2	4	6	8	10	15	15
	1.6~2.0	2	4	5	8	10	15	15	20
	2.1~4.0	3	6	10	12	15	20	20	25
	>4.0	5	8	12	15	20	25	30	30
>3.0	≤0.7	1	1	2	5	8	10	15	15
	0.71~1.5	2	3	5	8	10	15	15	20
	1.6~2.0	3	5	10	12	15	20	20	25
	2.1~4.0	5	8	12	15	20	25	30	30
	>4.0	7	9	15	20	25	30	35	40

表 G.30 9% Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °C							
		≤232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	>398.89
≤0.2	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0254	0.381	0.0762	0.1016	0.127	0.1524
	0.71~1.5	0.0254	0.0508	0.0508	0.0508	0.1016	0.127	0.1524	0.2032
	1.6~2.0	0.0508	0.1016	0.127	0.1016	0.254	0.381	0.381	0.508
	2.1~4.0	0.0762	0.1524	0.254	0.2032	0.381	0.508	0.508	0.635
	>4.0	0.127	0.2032	0.3048	0.3048	0.508	0.635	0.762	0.762
0.21~0.6	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0508	0.381	0.1016	0.1524	0.1778	0.2032
	0.71~1.5	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.2032	0.254
	1.6~2.0	0.0508	0.0508	0.0762	0.1016	0.2032	0.2032	0.254	0.254
	2.1~4.0	0.0762	0.0762	0.127	0.127	0.254	0.254	0.3048	0.381
	>4.0	0.1016	0.127	0.2032	0.2032	0.254	0.3048	0.381	0.381
0.61~1.0	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0508	0.254	0.127	0.2032	0.2286	0.254
	0.71~1.5	0.0254	0.0508	0.0762	0.0762	0.2032	0.254	0.254	0.254
	1.6~2.0	0.0508	0.0762	0.127	0.127	0.254	0.254	0.254	0.381
	2.1~4.0	0.0762	0.127	0.2032	0.2032	0.254	0.381	0.381	0.381
	>4.0	0.127	0.2032	0.254	0.254	0.381	0.381	0.508	0.508
1.1~2.0	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0508	0.254	0.1524	0.254	0.254	0.381
	0.71~1.5	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1778	0.254	0.381	0.381
	1.6~2.0	0.0508	0.1016	0.1016	0.127	0.2032	0.3048	0.381	0.508
	2.1~4.0	0.0762	0.1524	0.127	0.1524	0.254	0.381	0.508	0.508
	>4.0	0.127	0.2032	0.254	0.2032	0.381	0.508	0.508	0.635
2.1~3.0	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0762	0.3048	0.1778	0.254	0.381	0.381
	0.71~1.5	0.0254	0.0508	0.1016	0.127	0.2032	0.254	0.381	0.381
	1.6~2.0	0.0508	0.1016	0.127	0.1524	0.254	0.381	0.381	0.508
	2.1~4.0	0.0762	0.1524	0.254	0.2032	0.381	0.508	0.508	0.635
	>4.0	0.127	0.2032	0.3048	0.3048	0.508	0.635	0.762	0.762
>3.0	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0508	0.381	0.2032	0.254	0.381	0.381
	0.71~1.5	0.0508	0.0762	0.127	0.127	0.254	0.381	0.381	0.508
	1.6~2.0	0.0762	0.127	0.254	0.2032	0.381	0.508	0.508	0.635
	2.1~4.0	0.127	0.2032	0.3048	0.3048	0.508	0.635	0.762	0.762
	>4.0	0.1778	0.2286	0.381	0.381	0.635	0.762	0.889	1.016

表 G.31 12% Cr 钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		≤450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0.2	≤0.7	1	1	1	1	1	1	2	2
	0.71~1.5	1	1	1	1	1	2	4	5
	1.6~2.0	2	2	2	4	4	5	8	10
	2.1~4.0	5	10	15	20	25	30	25	40
	>4.0	10	15	20	25	30	25	40	45
0.2~0.6	≤0.7	1	1	1	1	1	2	3	3
	0.71~1.5	1	1	1	1	1	2	3	3
	1.6~2.0	1	2	2	2	2	4	5	5
	2.1~4.0	2	3	3	3	3	5	10	15
	>4.0	3	4	5	8	10	12	15	20
0.61~1.0	≤0.7		1	1	1	1	2	3	4
	0.71~1.5	1	1	1	1	1	2	3	4
	1.6~2.0	2	2	4	5	6	6	7	8
	2.1~4.0	3	3	5	8	10	12	15	20
	>4.0	4	5	5	8	10	15	20	25
1.1~2.0	≤0.7	1	1	1	1	2	3	4	5
	0.71~1.5	1	1	1	1	2	3	4	5
	1.6~2.0	2	2	3	5	7	8	10	10
	2.1~4.0	3	3	5	8	10	12	15	20
	>4.0	5	8	10	12	15	20	25	30
2.1~3.0	≤0.7	1	1	1	1	2	3	5	6
	0.71~1.5	1	1	1	1	2	3	5	6
	1.6~2.0	2	5	7	9	10	12	15	15
	2.1~4.0	3	8	10	15	20	20	25	30
	>4.0	5	10	15	20	25	30	35	40
>3.0	≤0.7	1	1	1	1	2	3	5	6
	0.71~1.5	1	1	1	1	2	4	5	6
	1.6~2.0	3	5	7	9	10	12	15	15
	2.1~4.0	4	8	10	15	20	20	25	30
	>4.0	5	10	15	20	25	30	35	40

表 G.32 12% Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度,℃							
		≤232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	>398.89
≤0.2	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508
	0.71~1.5	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.127
	1.6~2.0	0.0508	0.0508	0.0508	0.1016	0.1016	0.127	0.2032	0.254
	2.1~4.0	0.127	0.254	0.381	0.508	0.635	0.762	0.635	1.016
	>4.0	0.254	0.381	0.508	0.635	0.762	0.635	1.016	1.143
0.2~0.6	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.0762
	0.71~1.5	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.0762
	1.6~2.0	0.0254	0.0508	0.0508	0.0508	0.0508	0.1016	0.127	0.127
	2.1~4.0	0.0508	0.0762	0.0762	0.0762	0.0762	0.127	0.254	0.381
	>4.0	0.0762	0.1016	0.127	0.2032	0.254	0.3048	0.381	0.508
0.61~1.0	≤0.7	0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016
	0.71~1.5	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016
	1.6~2.0	0.0508	0.0508	0.1016	0.127	0.1524	0.1524	0.1778	0.2032
	2.1~4.0	0.0762	0.0762	0.127	0.2032	0.254	0.3048	0.381	0.508
	>4.0	0.1016	0.127	0.127	0.2032	0.254	0.381	0.508	0.635
1.1~2.0	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127
	0.71~1.5	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127
	1.6~2.0	0.0508	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.2032	0.254	0.254
	2.1~4.0	0.0762	0.0762	0.127	0.2032	0.254	0.3048	0.381	0.508
	>4.0	0.127	0.2032	0.254	0.3048	0.381	0.508	0.635	0.762
2.1~3.0	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1524
	0.71~1.5	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1524
	1.6~2.0	0.0508	0.127	0.1778	0.2286	0.254	0.3048	0.381	0.381
	2.1~4.0	0.0762	0.2032	0.254	0.381	0.508	0.508	0.635	0.762
	>4.0	0.127	0.254	0.381	0.508	0.635	0.762	0.889	1.016
>3.0	≤0.7	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1524
	0.71~1.5	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.127	0.1524
	1.6~2.0	0.0762	0.127	0.1778	0.2286	0.254	0.3048	0.381	0.381
	2.1~4.0	0.1016	0.2032	0.254	0.381	0.508	0.508	0.635	0.762
	>4.0	0.127	0.254	0.381	0.508	0.635	0.762	0.889	1.016

表 G.33 不含 Mo 的奥氏体不锈钢的估计腐蚀速率 (英制单位) 密耳/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		≤450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0.2	≤1.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.1~2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	1	2	3	4	4
	>4.0	1	1	1	2	3	4	5	6
0.21~0.6	≤1.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.1~2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	1	2	3	4	4
	>4.0	1	1	1	2	3	4	5	6
0.61~1.0	≤1.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.1~2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	2	3	4	5	6
	>4.0	1	2	2	4	6	8	10	12
1.0~2.0	≤1.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.1~2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	2	3	4	5	6
	>4.0	1	2	2	4	6	8	10	12
2.1~3.0	≤1.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.1~2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	2	2	4	6	8	10	12
	>4.0	1	2	4	7	10	14	17	20
>3.0	≤1.0	1	1	1	1	1	1	1	2
	1.1~2.0	1	1	1	1	1	2	2	2
	2.1~4.0	1	2	2	4	6	8	10	12
	>4.0	1	2	4	7	10	14	17	20

表 G.34 不含 Mo 的奥氏体不锈钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位) mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度,℃							
		≤232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	>398.89
≤0.2	≤1.0	1.016	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	1.1~2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1016
	>4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1524
0.21~0.6	≤1.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	1.1~2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1016
	>4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1524
0.61~1.0	≤1.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	1.1~2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1524
	>4.0	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.3048
1.0~2.0	≤1.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	1.1~2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1524
	>4.0	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.3048
2.1~3.0	≤1.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	1.1~2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~4.0	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.3048
	>4.0	0.0254	0.0508	0.1016	0.1778	0.254	0.3556	0.4318	0.508
>3.0	≤1.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508
	1.1~2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.0508
	2.1~4.0	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.3048
	>4.0	0.0254	0.0508	0.1016	0.1778	0.254	0.3556	0.4318	0.508

表 G.35 含<2.5%Mo 的 316 不锈钢的估计腐蚀速率^a (英制单位) 密耳/年

硫 (质量分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		≤450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0.2	≤2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	1	1	2	2	2
	>4.0	1	1	1	2	4	5	7	10
0.21~0.6	≤2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	1	2	2	2	2
	>4.0	1	1	2	3	4	5	7	10
0.61~1.0	≤2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	1	2	2	2	3
	>4.0	1	1	2	3	5	5	7	10
1.0~2.0	≤2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	1	3	3	3	4
	>4.0	1	1	3	5	5	5	7	10
2.1~3.0	≤2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.1~4.0	1	1	1	2	3	3	4	5
	>4.0	1	1	3	5	5	6	8	10
>3.0	≤2.0	1	1	1	1	1	1	1	2
	2.1~4.0	1	1	1	2	4	5	5	6
	>4.0	1	2	3	5	5	6	8	10

^a 包括含<2.5%Mo 不锈钢, 如, 316, 316L, 316H 等。表 G.36 含<2.5%Mo 的 316 不锈钢的估计腐蚀速率^a (法定计量单位) mm/年

硫 (质量分数) %	TAN mg/g	温度, °C							
		≤232.22	232.78~260	260.56~287.78	288.33~315.56	316.11~343.33	343.89~371.11	371.67~398.89	>398.89
≤0.2	≤2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.0508
	>4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.127	0.1778	0.254
0.21~0.6	≤2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.0508	0.0508
	>4.0	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1778	0.254
0.61~1.0	≤2.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~4.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.0508	0.0762
	>4.0	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.127	0.1778	0.254

表 G. 36 (续) mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °C							
		≤232. 22	232. 78~ 260	260. 56~ 287. 78	288. 33~ 315. 56	316. 11~ 343. 33	343. 89~ 371. 11	371. 67~ 398. 89	>398. 89
1. 0~2. 0	≤2. 0	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254
	2. 1~4. 0	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0762	0. 0762	0. 0762	0. 1016
	>4. 0	0. 0254	0. 0254	0. 0762	0. 127	0. 127	0. 127	0. 1778	0. 254
2. 1~3. 0	≤2. 0	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254
	2. 1~4. 0	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0508	0. 0762	0. 0762	0. 1016	0. 127
	>4. 0	0. 0254	0. 0254	0. 0762	0. 127	0. 127	0. 1524	0. 2032	0. 254
>3. 0	≤2. 0	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0508
	2. 1~4. 0	0. 0254	0. 0254	0. 0254	0. 0508	0. 1016	0. 127	0. 127	0. 1524
	>4. 0	0. 0254	0. 0508	0. 0762	0. 127	0. 127	0. 1524	0. 2032	0. 254
*包括含<2. 5%Mo 不锈钢, 如 316, 316L, 316H 等。									

表 G. 37 含≥2. 5%Mo 的 316 不锈钢和 317 不锈钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °F							
		≤450	451~500	501~550	551~600	601~650	651~700	701~750	>750
≤0. 2	≤4. 0	1	1	1	1	1	1	1	1
	4. 1~6. 0	1	1	1	1	1	2	4	5
	>6. 0	1	1	1	2	4	5	7	10
0. 21~0. 6	≤4. 0	1	1	1	1	1	1	1	1
	4. 1~6. 0	1	1	1	1	2	4	4	5
	>6. 0	1	1	2	3	4	5	7	10
0. 61~1. 0	≤0. 2	1	1	1	1	1	1	1	1
	4. 1~6. 0	1	1	1	1	2	4	4	5
	>6. 0	1	1	2	3	4	5	7	10
1. 1~2. 0	≤4. 0	1	1	1	1	1	1	1	1
	4. 1~6. 0	1	1	1	1	2	3	5	7
	>6. 0	1	1	3	5	5	5	7	10
2. 1~3. 0	≤4. 0	1	1	1	1	1	1	1	1
	4. 1~6. 0	1	1	1	2	3	4	5	7
	>6. 0	1	1	3	5	5	6	8	10
>3. 0	≤4. 0	1	1	1	1	1	1	1	2
	4. 1~6. 0	1	1	1	2	3	4	5	7
	>6. 0	1	2	3	5	5	6	8	10

表 G.38 含 $\geq 2.5\%$ Mo 的 316 不锈钢和 317 不锈钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

硫 (质量 分数) %	TAN mg/g	温度, °C							
		≤ 232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	> 398.89
≤ 0.2	≤ 0.2	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~6.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.127
	> 6.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.127	0.1778	0.254
0.21~0.6	≤ 0.2	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~6.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.1016	0.127
	> 6.0	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1778	0.254
0.61~1.0	≤ 0.2	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~6.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.1016	0.127
	> 6.0	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1778	0.254
1.1~2.0	≤ 0.2	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~6.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778
	> 6.0	0.0254	0.0254	0.0762	0.127	0.127	0.127	0.1778	0.254
2.1~3.0	≤ 0.2	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
	2.1~6.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1778
	> 6.0	0.0254	0.0254	0.0762	0.127	0.127	0.1524	0.2032	0.254
> 3.0	≤ 0.2	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508
	2.1~6.0	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1778
	> 6.0	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.127	0.1524	0.2032	0.254

G.8 高温 $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ 腐蚀

G.8.1 损伤说明

高温 $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ 腐蚀通常是均匀腐蚀的形式, 它可能发生在约 204.44°C (400°F) 以上的温度。这种形式的硫化腐蚀不同于补充 C 中说明的高温硫化物和环烷酸腐蚀。一旦硫化物通过与 H_2 发生催化反应转化成硫化氢, 在加氢装置, 例如加氢脱硫装置和加氢裂化装置, 将发生 $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ 腐蚀。即使有 H_2 , 甚至在高温下, 硫化物转换成 H_2S 也一般不会大量地发生, 除非有催化剂存在。腐蚀速率是建造材料、温度、工艺流体的性质和 H_2S 浓度的函数。

在 $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ 环境中, 低含量的铬 (例如 $5\%\text{Cr}\sim 9\%\text{Cr}$) 仅能适度地提高钢的耐腐蚀能力, 若要明显地提高钢的耐腐蚀性能, Cr 含量至少需要 12% 。加入更多 Cr 和 Ni 则可使钢的耐腐蚀能力显著提高。

工艺流体的性质是确定腐蚀速率的一个因素。在只有 $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ 的环境中 (全部为气态), 腐蚀速率可能比引用的有烃存在情况下的腐蚀速率高 50% 。不过, 可用 Couper 和 Gorman 提出的关系来估计无烃环境和含烃环境的腐蚀速率。在高 H_2S 含量和高温这两个环境中的预测腐蚀速率都很高, 一组数据即可满足两个环境中的 RBI 评估。

G.8.2 基本数据

需用表 G. 39 中所列数据来确定高温 H_2S/H_2 环境中的腐蚀速率。图 G. 4 显示了确定腐蚀速率所需的步骤。如果没有精确的测量数据，则应请教知识丰富的专家。

G.8.3 高温 H_2S/H_2 腐蚀速率的确定

在 H_2S/H_2 环境中的估计腐蚀速率使用表 G. 40～表 G. 50 来确定，其中的数据来自 Couper 和 Goman 建立导出的关系。

表 G. 39 高温 H_2S/H_2 腐蚀分析所需的基本数据

基本数据	说 明
建筑材料	确定设备/配管的建筑材料
存在的烃类型 (石脑油或瓦斯油)	使用“石脑油”代表石脑油和轻质馏分(如煤油、柴油、喷气燃料油) 使用“瓦斯油”代表所有其他烃类(常压瓦斯油和更重的油)以及不含烃的 H_2
最高温度, °C	确定最高工艺温度
蒸气的 H_2S 含量(摩尔分数), %	确定蒸气中的 H_2S 含量 注: 摩尔分数 = 体积分数(不是质量分数)

表 G. 40 碳钢、 $1\frac{1}{4}Cr$ 钢和 $2\frac{1}{2}Cr$ 钢的估计腐蚀速率(英制单位) 密耳/年

H_2S (摩尔 分数) %	烃的 类型	温度, °F											
		400~ 450	451~ 500	501~ 550	551~ 600	601~ 650	651~ 700	701~ 750	751~ 800	801~ 850	851~ 900	901~ 950	951~ 1000
<0.002	石脑油	1	1	1	1	2	3	4	6	8	10	14	18
	瓦斯油	1	1	1	2	3	5	7	10	14	20	26	34
0.002~ 0.005	石脑油	1	2	3	4	7	11	16	22	31	41	55	71
	瓦斯油	1	2	3	4	7	11	16	22	31	41	55	71
0.006~ 0.01	石脑油	1	1	2	3	5	7	11	15	21	29	38	50
	瓦斯油	1	2	4	6	9	14	21	29	41	55	73	94
0.02~ 0.05	石脑油	1	2	3	5	9	13	19	27	38	51	67	87
	瓦斯油	2	4	6	10	16	25	36	51	71	96	130	170
0.06~ 0.1	石脑油	1	2	4	7	10	16	23	33	46	62	82	110
	瓦斯油	2	4	8	13	20	30	44	63	87	120	160	200
0.11~ 0.5	石脑油	2	3	6	10	15	23	34	48	66	90	120	150
	瓦斯油	3	6	11	18	29	44	64	91	130	170	230	300
0.51~1	石脑油	2	4	7	11	17	26	38	54	75	100	130	170
	瓦斯油	4	7	12	21	32	49	72	100	140	190	250	330
>1	石脑油	3	5	8	13	21	32	47	67	93	130	170	220
	瓦斯油	5	9	15	26	40	61	89	130	180	240	310	410

表 G.41 碳钢、1¼Cr 钢和 2½Cr 钢的估计腐蚀速率（法定计量单位） mm/年

H ₂ S（摩尔 分数） %	烃的 类型	温度，℃											
		204.44~ 232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	399.44~ 426.67	427.22~ 454.44	455~ 482.22	482.78~ 510	510.56 ~537.78
<0.002	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.3556	0.4572
	瓦斯油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.254	0.3556	0.508	0.6604	0.8636
0.002~ 0.005	石脑油	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1778	0.2794	0.4064	0.5588	0.7874	1.0414	1.397	1.8034
	瓦斯油	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1778	0.2794	0.4064	0.5588	0.7874	1.0414	1.397	1.8034
0.006~ 0.01	石脑油	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.2794	0.381	0.5334	0.7366	0.9652	1.27
	瓦斯油	0.0254	0.0508	0.1016	0.1524	0.2286	0.3556	0.5334	0.7366	1.0414	1.397	1.8542	2.3876
0.02 ~ 0.05	石脑油	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.2286	0.3302	0.4826	0.6858	0.9652	1.2954	1.7018	2.2098
	瓦斯油	0.0508	0.1016	0.1524	0.254	0.4064	0.635	0.9144	1.2954	1.8034	2.4384	3.302	4.318
0.06 ~ 0.1	石脑油	0.0254	0.0508	0.1016	0.1778	0.254	0.4064	0.5842	0.8382	1.1684	1.5748	2.0828	2.794
	瓦斯油	0.0508	0.1016	0.2032	0.3302	0.508	0.762	1.1176	1.6002	2.2098	3.048	4.064	5.08
0.11~ 0.5	石脑油	0.0508	0.0762	0.1524	0.254	0.381	0.5842	0.8636	1.2192	1.6764	2.286	3.048	3.81
	瓦斯油	0.0762	0.1524	0.2794	0.4572	0.7366	1.1176	1.6256	2.3114	3.302	4.318	5.842	7.62
0.51~1	石脑油	0.0508	0.1016	0.1778	0.2794	0.4318	0.6604	0.9652	1.3716	1.905	2.54	3.302	4.318
	瓦斯油	0.1016	0.1778	0.3048	0.5334	0.8128	1.2446	1.8288	2.54	3.556	4.826	6.35	8.382
>1	石脑油	0.0762	0.127	0.2032	0.3302	0.5334	0.8128	1.1938	1.7018	2.3622	3.302	4.318	5.588
	瓦斯油	0.127	0.2286	0.381	0.6604	1.016	1.5494	2.2606	3.302	4.572	6.096	7.874	10.414

表 G.42 5%Cr 钢的估计腐蚀速率（英制单位） 密耳/年

H ₂ S (摩尔分数) %	烃的 类型	温度，℉											
		400~ 450	451~ 500	501~ 550	551~ 600	601~ 650	651~ 700	701~ 750	751~ 800	801~ 850	851~ 900	901~ 950	951~ 1000
<0.002	石脑油	1	1	1	1	1	2	3	4	6	8	11	14
	瓦斯油	1	1	1	2	3	4	6	8	12	16	21	27
0.002~ 0.005	石脑油	1	1	1	2	3	5	7	9	13	18	23	30
	瓦斯油	1	1	2	4	6	9	13	18	25	33	44	57
0.006~ 0.01	石脑油	1	1	2	2	4	6	9	12	17	23	31	40
	瓦斯油	1	2	3	5	7	11	17	24	33	44	58	76
0.011~ 0.05	石脑油	1	2	3	4	7	10	15	22	30	41	54	70
	瓦斯油	2	3	5	8	13	20	29	41	57	77	100	130
0.051~ 0.1	石脑油	1	2	3	5	8	13	19	27	37	50	66	85
	瓦斯油	2	4	6	10	16	24	36	51	70	94	130	160
0.11~ 0.5	石脑油	1	3	5	8	12	18	27	39	53	72	95	120
	瓦斯油	3	5	9	15	23	35	52	73	100	140	180	240
0.51~1	石脑油	2	3	5	9	14	21	31	44	60	81	110	140
	瓦斯油	3	6	10	17	26	40	58	82	110	150	200	270
>1	石脑油	2	4	7	11	17	26	38	54	75	100	130	170
	瓦斯油	4	7	12	21	32	49	72	100	140	190	250	330

表 G.43 5%Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

H ₂ S (摩尔分数) %	烃的类型	温度, °C											
		214.44~ 232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	399.44~ 426.67	427.22~ 454.44	455~ 482.22	482.78~ 510	510.56~ 537.78
<0.002	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.2032	0.2794	0.3556
	瓦斯油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.2032	0.3048	0.4064	0.5334	0.6858
0.002~ 0.005	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.2286	0.3302	0.4572	0.5842	0.762
	瓦斯油	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.1524	0.2286	0.3302	0.4572	0.635	0.8382	1.1176	1.4478
0.006~ 0.01	石脑油	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016	0.1524	0.2286	0.3048	0.4318	0.5842	0.7874	1.016
	瓦斯油	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.2794	0.4318	0.6096	0.8382	1.1176	1.4732	1.9304
0.011~ 0.05	石脑油	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1778	0.254	0.381	0.5588	0.762	1.0414	1.3716	1.778
	瓦斯油	0.0508	0.0762	0.127	0.2032	0.3302	0.508	0.7366	1.0414	1.4478	1.9558	2.54	3.302
0.051~ 0.1	石脑油	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.2032	0.3302	0.4826	0.6858	0.9398	1.27	1.6764	2.159
	瓦斯油	0.0508	0.1016	0.1524	0.254	0.4064	0.6096	0.9144	1.2954	1.778	2.3876	3.302	4.064
0.11~ 0.5	石脑油	0.0254	0.0762	0.127	0.2032	0.3048	0.4572	0.6858	0.9906	1.3462	1.8288	2.413	3.048
	瓦斯油	0.0762	0.127	0.2286	0.381	0.5842	0.889	1.3208	1.8542	2.54	3.556	4.572	6.096
0.51~1	石脑油	0.0508	0.0762	0.127	0.2286	0.3556	0.5334	0.7874	1.1176	1.524	2.0574	2.794	3.556
	瓦斯油	0.0762	0.1524	0.254	0.4318	0.6604	1.016	1.4732	2.0828	2.794	3.81	5.08	6.858
>1	石脑油	0.0508	0.1016	0.1778	0.2794	0.4318	0.6604	0.9652	1.3716	1.905	2.54	3.302	4.318
	瓦斯油	0.1016	0.1778	0.3048	0.5334	0.8128	1.2446	1.8288	2.54	3.556	4.826	6.35	8.382

表 G.44 7%Cr 钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

H ₂ S (摩尔分数) %	烃的类型	温度, °F											
		400~ 450	451~ 500	501~ 550	551~ 600	601~ 650	651~ 700	701~ 750	751~ 800	801~ 850	851~ 900	901~ 950	951~ 1000
<0.002	石脑油	1	1	1	1	1	2	3	4	6	8	10	13
	瓦斯油	1	1	1	2	2	4	5	8	11	14	19	25
0.002~ 0.005	石脑油	1	1	1	2	3	4	6	9	12	16	21	28
	瓦斯油	1	1	2	3	5	8	11	16	23	30	40	52
0.006~ 0.01	石脑油	1	1	1	2	4	5	8	11	16	21	28	37
	瓦斯油	1	2	3	4	7	10	15	22	30	40	53	69
0.02~ 0.05	石脑油	1	1	2	4	6	10	14	20	28	37	49	64
	瓦斯油	1	3	5	8	12	18	27	38	52	71	94	120
0.06~ 0.1	石脑油	1	2	3	5	8	12	17	24	34	46	60	78
	瓦斯油	2	3	6	9	15	22	33	46	64	86	110	150
0.2~ 0.5	石脑油	1	2	4	7	11	17	25	35	49	66	87	110
	瓦斯油	3	5	8	13	21	32	47	67	93	130	170	220
0.6~1	石脑油	2	3	5	8	13	19	28	40	55	74	98	130
	瓦斯油	3	5	9	15	24	36	53	76	100	140	190	240
>1	石脑油	2	3	6	10	16	24	35	49	68	92	120	160
	瓦斯油	4	7	11	19	30	45	66	94	130	180	230	300

表 G.45 7%Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

H ₂ S (摩尔分数) %	烃的类型	温度, °C											
		204.44~ 232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	399.44~ 426.67	427.22~ 454.44	455~ 482.22	482.78~ 510	510.56~ 537.78
<0.002	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.2032	8.382	0.3302
	瓦斯油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016	0.127	0.2032	0.2794	0.3556	0.254	0.635
0.002~ 0.005	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.2286	0.3048	0.4064	0.4826	0.7112
	瓦斯油	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.2032	0.2794	0.4064	0.5842	0.762	0.5334	1.3208
0.006~ 0.01	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.127	0.2032	0.2794	0.4064	0.5334	1.016	0.9398
	瓦斯油	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1778	0.254	0.381	0.5588	0.762	1.016	0.7112	1.7526
0.02~ 0.05	石脑油	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.1524	0.254	0.3556	0.508	0.7112	0.9398	1.3462	1.6256
	瓦斯油	0.0254	0.0762	0.127	0.2032	0.3048	0.4572	0.6858	0.9652	1.3208	1.8034	1.2446	3.048
0.06~ 0.1	石脑油	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.2032	0.3048	0.4318	0.6096	0.8636	1.1684	0.1016	1.9812
	瓦斯油	0.0508	0.0762	0.1524	0.2286	0.381	0.5588	0.8382	1.1684	1.6256	2.1844	1.524	3.81
0.2~ 0.5	石脑油	0.0254	0.0508	0.1016	0.1778	0.2794	0.4318	0.635	0.889	1.2446	1.6764	2.2098	2.794
	瓦斯油	0.0762	0.127	0.2032	0.3302	0.5334	0.8128	1.1938	1.7018	2.3622	3.302	2.1336	5.588
0.6~1	石脑油	0.0508	0.0762	0.127	0.2032	0.3302	0.4826	0.7112	1.016	1.397	1.8796	4.318	3.302
	瓦斯油	0.0762	0.127	0.2286	0.381	0.6096	0.9144	1.3462	1.9304	2.54	3.556	2.4892	6.096
>1	石脑油	0.0508	0.0762	0.1524	0.254	0.4064	0.6096	0.889	1.2446	1.7272	2.3368	4.826	4.064
	瓦斯油	0.1016	0.1778	0.2794	0.4826	0.762	1.143	1.6764	2.3876	3.302	4.572	3.048	7.62

表 G.46 9%Cr 钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

H ₂ S (摩尔分数) %	烃的类型	温度, °F											
		400~ 450	451~ 500	501~ 550	551~ 600	601~ 650	651~ 700	701~ 750	751~ 800	801~ 850	851~ 900	901~ 950	951~ 1000
<0.002	石脑油	1	1	1	1	1	2	3	4	5	7	9	12
	瓦斯油	1	1	1	1	2	3	5	7	10	13	17	23
0.002~ 0.005	石脑油	1	1	1	2	2	4	6	8	11	15	17	25
	瓦斯油	1	1	2	3	5	7	11	15	21	28	37	48
0.006~ 0.01	石脑油	1	1	1	2	3	5	7	10	14	20	26	34
	瓦斯油	1	1	2	4	6	10	14	20	27	37	49	64
0.02~ 0.05	石脑油	1	1	2	4	6	9	13	18	25	34	45	59
	瓦斯油	1	2	4	7	11	17	24	35	48	65	86	110
0.06~ 0.1	石脑油	1	2	3	4	7	11	16	22	31	42	55	72
	瓦斯油	2	3	5	9	13	20	30	42	59	79	110	140
0.11~ 0.5	石脑油	1	2	4	7	10	16	23	32	45	61	80	100
	瓦斯油	2	4	7	12	19	30	43	61	85	120	150	200
0.51~1	石脑油	1	3	4	7	12	18	26	37	51	68	90	120
	瓦斯油	3	5	8	14	22	33	49	69	96	130	170	220
>1	石脑油	2	3	6	9	14	22	32	45	63	85	110	150
	瓦斯油	3	6	10	17	27	41	60	86	120	160	210	280

表 G. 47 9%Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

H ₂ S (摩尔分数) %	烃的类型	温度, °C											
		204.44~ 232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	399.44~ 426.67	427.22~ 454.44	455~ 482.22	482.78~ 510	510.56~ 537.78
<0.002	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1778	0.2286	0.3048
	瓦斯油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.254	0.3302	0.4318	0.5842
0.002~ 0.005	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016	0.1524	0.2032	0.2794	0.381	0.4318	0.635
	瓦斯油	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.2794	0.381	0.5334	0.7112	0.9398	1.2192
0.006~ 0.01	石脑油	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.254	0.3556	0.508	0.6604	0.8636
	瓦斯油	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.1524	0.254	0.3556	0.508	0.6858	0.9398	1.2446	1.6256
0.02~ 0.05	石脑油	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.1524	0.2286	0.3302	0.4572	0.635	0.8636	1.143	1.4986
	瓦斯油	0.0254	0.0508	0.1016	0.1778	0.2794	0.4318	0.6096	0.889	1.2192	1.651	2.1844	2.794
0.06~ 0.1	石脑油	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1778	0.2794	0.4064	0.5588	0.7874	1.0668	1.397	1.8288
	瓦斯油	0.0508	0.0762	0.127	0.2286	0.3302	0.508	0.762	1.0668	1.4986	2.0066	2.794	3.556
0.11~ 0.5	石脑油	0.0254	0.0508	0.1016	0.1778	0.254	0.4064	0.5842	0.8128	1.143	1.5494	2.032	2.54
	瓦斯油	0.0508	0.1016	0.1778	0.3048	0.4826	0.762	1.0922	1.5494	2.159	3.048	3.81	5.08
0.51~1	石脑油	0.0254	0.0762	0.1016	0.1778	0.3048	0.4572	0.6604	0.9398	1.2954	1.7272	2.286	3.048
	瓦斯油	0.0762	0.127	0.2032	0.3556	0.5588	0.8382	1.2446	1.7526	2.4384	3.302	4.318	5.588
>1	石脑油	0.0508	0.0762	0.1524	0.2286	0.3556	0.5588	0.8128	1.143	1.6002	2.159	2.794	3.81
	瓦斯油	0.0762	0.1524	0.254	0.4318	0.6858	1.0414	1.524	2.1844	3.048	4.064	5.334	7.112

表 G. 48 12%Cr 钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

H ₂ S (摩尔分数) %	温度, °F											
	400~ 450	451~ 500	501~ 550	551~ 600	601~ 650	651~ 700	701~ 750	751~ 800	801~ 850	851~ 900	901~ 950	951~ 1000
<0.002	1	1	1	1	2	3	4	5	6	9	11	14
0.002~0.005	1	1	1	1	2	3	4	6	8	11	14	18
0.006~0.01	1	1	1	2	2	4	5	7	9	12	15	19
0.02~0.05	1	1	1	2	3	4	6	9	12	15	19	25
0.06~0.1	1	1	1	2	3	5	7	10	13	17	22	27
0.2~0.5	1	1	2	3	4	6	9	12	16	21	27	34
0.6~1	1	1	2	3	5	7	10	13	18	23	30	38
>1	1	2	3	4	7	10	13	18	25	32	42	53

表 G.49 12%Cr 钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

H ₂ S (摩尔分数) %	温度, °C											
	204.44~ 232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	399.44~ 426.67	427.22~ 454.44	455~ 482.22	482.78~ 510	510.56~ 537.78
<0.002	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1524	0.2286	0.2794	0.3556
0.002~0.005	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.2032	0.2794	0.3556	0.4572
0.006~0.01	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.1016	0.127	0.1778	0.2286	0.3048	0.381	0.4826
0.02~0.05	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.2286	0.3048	0.381	0.4826	0.635
0.06~0.1	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.254	0.3302	0.4318	0.5588	0.6858
0.2~0.5	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1524	0.2286	0.3048	0.4064	0.5334	0.6858	0.8636
0.6~1	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.254	0.3302	0.4572	0.5842	0.762	0.9652
>1	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.1778	0.254	0.3302	0.4572	0.635	0.8128	1.0668	1.3462

表 G.50 300 系列不锈钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

H ₂ S (摩尔分数) %	温度, °F											
	400~ 450	451~ 500	501~ 550	551~ 600	601~ 650	651~ 700	701~ 750	751~ 800	801~ 850	851~ 900	901~ 950	951~ 1000
<0.002	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
0.002~0.005	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3
0.006~0.01		1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3
0.02~0.05	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4
0.06~0.1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	5
0.2~0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	3	4	5	6
0.6~1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	5	6
>1	1	1	1	1	1	1	2	2	4	5	7	9

表 G.51 300 系列不锈钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

H ₂ S (摩尔分数) %	温度,℃											
	204.44~ 232.22	232.78~ 260	260.56~ 287.78	288.33~ 315.56	316.11~ 343.33	343.89~ 371.11	371.67~ 398.89	399.44~ 426.67	427.22~ 454.44	455~ 482.22	482.78~ 510	510.56 ~537.78
<0.002	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.127	0.0254	0.0508	0.0508
0.002~0.005	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.0762
0.006~0.01	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.0762
0.02~0.05	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.0762	0.1016
0.06~0.1	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127
0.2~0.5	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.127	0.1524
0.6~1	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1016	0.127	0.1524
>1	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0508	0.0762	0.127	0.1778	0.2286

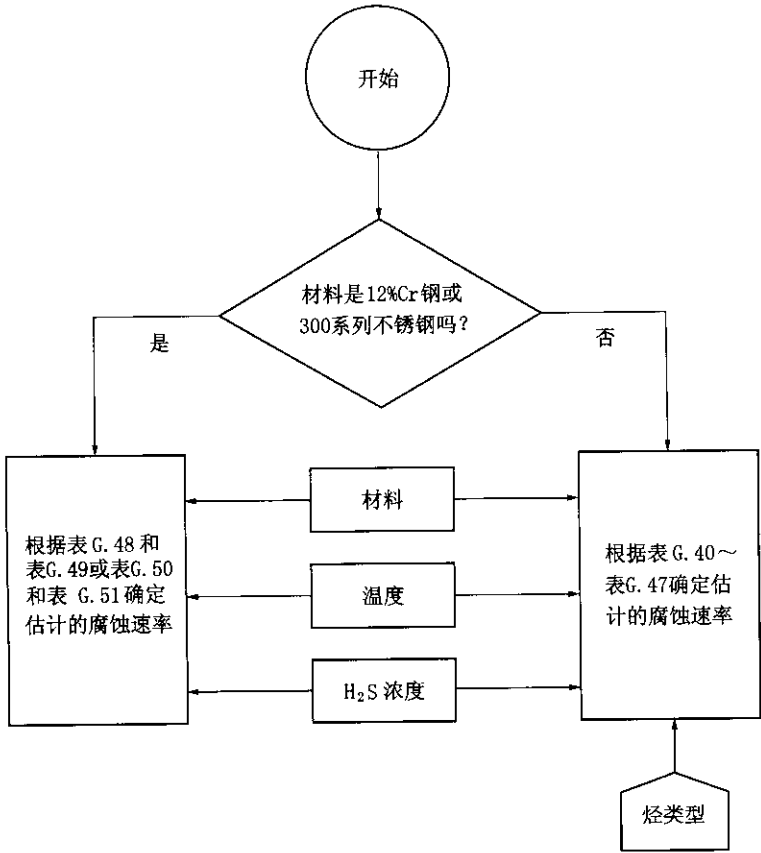


图 G.4 高温 H₂S 腐蚀速率的确定

G.9 硫酸 (H₂SO₄) 腐蚀

G.9.1 损伤说明

硫酸 (H₂SO₄) 是广泛使用的工业化学品之一。浓硫酸的一个共同用途是作为烷基化工艺中的催化剂。硫酸是一种很强的酸,在一定条件下,它具有极强的腐蚀性。硫酸的腐蚀性变化很大,并且取决于多种因素。硫酸浓度和温度是影响其腐蚀性的最主要因素,此外,流速和酸中的杂质,特别是氧气和氧化剂的存在对腐蚀性有显著影响。

尽管硫酸腐蚀碳钢,但碳钢仍是在接近环境温度下处理浓硫酸的设备和配管通常选择的材料。在静止或低速流动 [(0.9144m/s (3ft/s))] 条件下通常造成碳钢的均匀减薄。腐蚀产物硫酸亚铁形成的膜有一定的保护作用,随着腐蚀产物在金属表面堆积,腐蚀速率减小。硫酸亚铁从腐蚀钢表面的质量转移是腐蚀速率限制的过程。高于大约 0.9144m/s (3ft/s) (湍流) 的酸溶液速率对这一质量转移速率有显著影响,进而影响腐蚀速率。根据已知的数学模型计算出了各种条件和速率下输送硫酸的钢制配管的腐蚀速率。计算的腐蚀速率建立在酸溶液中不含硫酸亚铁的纯硫酸溶液基础上。然后将直管中的湍流的腐蚀速率乘以 3 来说明在肘管、三通、阀门和内表面不平区域,如焊缝的凸起处发生的更高的局部腐蚀。结果将是最大估计腐蚀速率,实际腐蚀速率可能是这些估计的最大腐蚀速率的 20%~50%。

尽管许多合金在硫酸环境中的腐蚀性能主要与酸浓度和温度相关,但是速率和氧化剂的存在也起着重要作用。这是因为这些合金主要依赖形成的钝化层,从而具备抗腐蚀能力的氧化物保护膜的形式。氧化剂的存在通常会改善合金的腐蚀性能,如不锈钢和许多镍合金。但合金 B-2 情况不是这样,它在酸中有氧化剂存在时可能会引起相当高的腐蚀速率。以下表格中提供的腐蚀速率来自已经出版的文献资料,合金 B-2 除外。这一保守估计是合适的,因为其他酸污染物和流速可能影响材料的钝化。假设速度对腐蚀速率的影响在一个宽的条件范围内成立,因为发表的关于速度影响的信息很少。

G.9.2 基本数据

表 G.52 中所列数据要求用来确定硫酸环境的估计腐蚀速率。如果未知精确数据,则应请教知识丰富的专家来获得最佳的估计。

表 G.52 硫酸腐蚀分析所需的基本数据

基本数据	说 明
建造材料	确定设备/配管的建造材料
酸的浓度 (质量分数), %	确定该设备/配管中出现的硫酸的浓度。当还不能提供分析结果时,请教知识丰富的工艺工程师
最高温度, °F	确定该设备/配管中出现的最高温度。这可能是最高工艺温度,但也应考虑局部加热如日照或伴热管的效应
酸的流速, ft/s	确定该设备/配管中酸的最高流速。尽管容器中的状态基本是静止的,但也应考虑在接管 (进口、出口等) 处的酸速度
存在氧气或氧化剂吗? (是或否)	确定酸中是否含有氧或某一氧化剂。如果怀疑,则请教知识丰富的工艺工程师。该数据仅当建造材料为合金 B-2 时才需要。对于碳钢和其他合金,表 G.53~表 G.66 中的腐蚀速率假设酸不含氧气/氧化剂

G.9.3 最大估计腐蚀速率的确定

利用表 G. 52 中的基本数据，确定表 G. 53～表 G. 66 相应表格中建造材料的最大估计腐蚀速率。注意，合金 B-2 的腐蚀速率在有氧化剂（如氧气或三价铁离子）时会显著增加，这在表 G. 65 和表 G. 66 没有反映出来，请向腐蚀工程师咨询合金 B-2 的腐蚀速率。确定硫酸中最大估计腐蚀速率所需的步骤流程图如图 G. 5 所示。

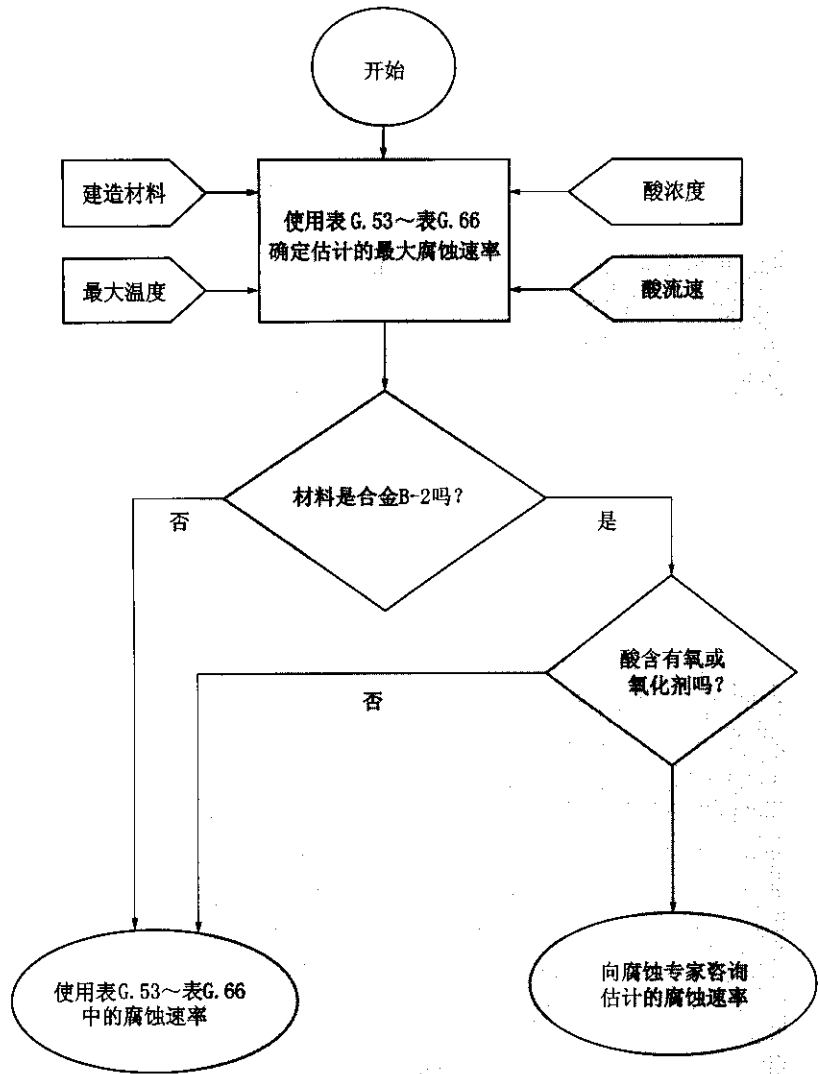


图 G. 5 硫酸腐蚀速率的确定

表 G. 53 碳钢的估计腐蚀速率（英制单位）

酸的浓度 (质量分数) %	酸的温度 °F	碳钢的腐蚀速率，密耳/年								
		酸的流速，ft/s								
		0	1	2	3	4~5	6~7	8~9	10~12	>12
90~100	<42	5	7	9	12	45	60	75	95	120
	42~77	12	14	17	20	65	85	110	140	170
	78~104	50	55	60	70	270	360	450	580	720
	105~140	100	150	200	300	999	999	999	999	999

表 G. 53 (续)

酸的浓度 (质量分数) %	酸的温度 °F	碳钢的腐蚀速率, 密耳/年								
		酸的流速, ft/s								
		0	1	2	3	4~5	6~7	8~9	10~12	>12
98	<42	4	6	8	10	35	45	60	75	90
	42~77	5	10	15	20	80	110	140	180	220
	78~104	15	25	40	60	290	390	490	640	780
	105~140	40	80	120	250	999	999	999	999	999
95~97	<42	8	10	12	15	60	80	110	130	160
	42~77	15	20	25	40	170	220	270	350	430
	78~104	25	40	60	100	500	650	820	999	999
	105~140	50	100	200	500	999	999	999	999	999
93~94	<42	10	15	20	25	120	160	200	260	330
	42~77	20	25	45	70	340	450	570	740	910
	78~104	30	40	75	130	640	850	999	999	999
	105~140	60	120	250	600	999	999	999	999	999
90~92	<42	15	25	45	70	320	430	540	710	870
	42~77	25	40	80	120	700	940	999	999	999
	78~104	35	60	100	200	940	999	999	999	999
	105~140	70	150	300	800	999	999	999	999	999
86~89	<42	20	30	50	80	380	500	630	810	999
	42~77	30	160	300	420	690	920	999	999	999
	78~104	45	450	850	999	999	999	999	999	999
	105~140	80	999	999	999	999	999	999	999	999

表 G. 54 碳钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

酸的浓度 (质量分数) %	酸的温度 °C	碳钢的腐蚀速率, mm/年								
		酸的流速, m/s								
		0	0.30	0.61	0.91	1.22~1.52	1.83~2.13	2.44~2.74	3.05~3.66	>3.66
90~100	<5.56	0.127	0.1778	0.2286	0.3048	1.143	1.524	1.905	2.413	3.048
	5.56~25	0.3048	0.3556	0.4318	0.508	1.651	2.159	2.794	3.556	4.318
	25.56~40	1.27	1.397	1.524	1.778	6.858	9.144	11.43	14.732	18.288
	40.56~60	2.54	3.81	5.08	7.62	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
98	<5.56	0.1016	0.1524	0.2032	0.254	0.889	1.143	1.524	1.905	2.286
	5.56~25	0.127	0.254	0.381	0.508	2.032	2.794	3.556	4.572	5.588
	25.56~40	0.381	0.635	1.016	1.524	7.366	9.906	12.446	16.256	19.812
	40.56~60	1.016	2.032	3.048	6.35	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
95~97	<5.56	0.2032	0.254	0.3048	0.381	1.524	2.032	2.794	3.302	4.064
	5.56~25	0.381	0.508	0.635	1.016	4.318	5.588	6.858	8.89	10.922
	25.56~40	0.635	1.016	1.524	2.54	12.7	16.51	20.828	25.3746	25.3746
	40.56~60	1.27	2.54	5.08	12.7	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746

表 G.54 (续)

酸的浓度 (质量分数) %	酸的温度 ℃	碳钢的腐蚀速率, mm/年								
		酸的流速, m/s								
		0	0.30	0.61	0.91	1.22~1.52	1.83~2.13	2.44~2.74	3.05~3.66	>3.66
93~94	<5.56	0.254	0.381	0.508	0.635	3.048	4.064	5.08	6.604	8.382
	5.56~25	0.508	0.635	1.143	1.778	8.636	11.43	14.478	18.796	23.114
	25.56~40	0.762	1.016	1.905	3.302	16.256	21.59	25.3746	25.3746	25.3746
	40.56~60	1.524	3.048	6.35	15.24	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
90~92	<5.56	0.381	0.635	1.143	1.778	8.128	10.922	13.716	18.034	22.098
	5.56~25	0.635	1.016	2.032	3.048	17.78	23.876	25.3746	25.3746	25.3746
	25.56~40	0.889	1.524	2.54	5.08	23.876	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	40.56~60	1.778	3.81	7.62	20.32	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
86~89	<5.56	0.508	0.762	1.27	2.032	9.652	12.7	16.002	20.574	25.3746
	5.56~25	0.762	4.064	7.62	10.668	17.526	23.368	25.3746	25.3746	25.3746
	25.56~40	1.143	11.43	21.59	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	40.56~60	2.032	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746

表 G.55 碳钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

酸的浓度 (质量分数) %	酸的温度 ℉	碳钢的腐蚀速率, 密耳/年								
		酸的流速, ft/s								
		0	1	2	3	4~5	6~7	8~9	10~12	>12
81~85	<42	20	25	35	45	210	280	350	460	570
	42~77	30	50	100	150	680	910	999	999	999
	78~104	40	100	200	400	999	999	999	999	999
	105~140	80	200	400	999	999	999	999	999	999
76~80	<42	15	20	20	25	110	150	190	250	300
	42~77	20	40	70	120	570	760	950	999	999
	78~104	30	60	120	250	999	999	999	999	999
	105~140	60	120	300	900	999	999	999	999	999
70~75	<42	10	15	20	25	130	170	220	280	350
	42~77	15	30	50	100	490	650	810	999	999
	78~104	25	50	100	200	980	999	999	999	999
	105~140	50	100	250	800	999	999	999	999	999
65~69	<42	20	30	40	60	280	370	460	690	740
	42~77	30	50	100	170	830	999	999	999	999
	78~104	50	100	180	300	999	999	999	999	999
	105~140	100	200	400	999	999	999	999	999	999
60~64	<42	75	85	100	120	570	760	950	999	999
	42~77	120	170	250	400	999	999	999	999	999
	78~104	200	300	600	900	999	999	999	999	999
	105~140	500	750	999	999	999	999	999	999	999

表 G.56 碳钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

酸的浓度 (质量分数) %	酸的温度 ℃	碳钢的腐蚀速率, mm/年								
		酸的流速, m/s								
		0	0.30	0.61	0.91	1.22~ 1.52	1.83~ 2.13	2.44~ 2.74	3.05~ 3.66	>3.66
81~85	<5.56	0.508	0.635	0.889	1.143	5.334	7.112	8.89	11.684	14.478
	5.56~25	0.762	1.27	2.54	3.81	17.272	23.114	25.3746	25.3746	25.3746
	25.56~40	1.016	2.54	5.08	10.16	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	40.56~60	2.032	5.08	10.16	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
76~80	<5.56	0.381	0.508	0.508	0.635	2.794	3.81	4.826	6.35	7.62
	5.56~25	0.508	1.016	1.778	3.048	14.478	19.304	24.13	25.3746	25.3746
	25.56~40	0.762	1.524	3.048	6.35	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	40.56~60	1.524	3.048	7.62	22.86	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
70~75	<5.56	0.254	0.381	0.508	0.635	3.302	4.318	5.588	7.112	8.89
	5.56~25	0.381	0.762	1.27	2.54	12.446	16.51	20.574	25.3746	25.3746
	25.56~40	0.635	1.27	2.54	5.08	24.892	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	40.56~60	1.27	2.54	6.35	20.32	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
65~69	<5.56	0.508	0.762	1.016	1.524	7.112	9.398	11.684	17.526	18.796
	5.56~25	0.762	1.27	2.54	4.318	21.082	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	25.56~40	1.27	2.54	4.572	7.62	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	40.56~60	2.54	5.08	10.16	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
60~64	<5.56	1.905	2.159	2.54	3.048	14.478	19.304	24.13	25.3746	25.3746
	5.56~25	3.048	4.318	6.35	10.16	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	25.56~40	5.08	7.62	15.24	22.86	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746
	40.56~60	12.7	19.05	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746

表 G.57 304 系列不锈钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

酸的浓度 (质量分数) %	304 系列不锈钢的腐蚀速率, 密耳/年								
	≤86 ℉			87 ℉~122 ℉			123 ℉~158 ℉		
	酸的流速, ft/s								
	0~4	5~7	>7	0~4	5~7	>7	0~4	5~7	>7
96~100	5	10	15	20	40	60	200	400	600
90~95	20	40	60	40	80	120	500	999	999
85~89	40	80	120	80	160	240	999	999	999
80~84	100	200	300	500	999	999	999	999	999
70~79	500	999	999	999	999	999	999	999	999
60~69	999	999	999	999	999	999	999	999	999
41~59	999	999	999	999	999	999	999	999	999
21~40	999	999	999	999	999	999	999	999	999
11~20	400	800	999	999	999	999	999	999	999
6~10	200	400	600	800	999	999	999	999	999
2~5	50	100	150	200	400	600	500	999	999
<2	20	40	60	70	140	210	200	400	600

表 G.58 304 系列不锈钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

酸的浓度 (质量分数) %	304 系列不锈钢的腐蚀速率, mm/年								
	≤30℃			30. 56℃~50℃			50. 56℃~70℃		
	酸的流速, m/s								
	0~1. 22	1. 52~2. 13	>2. 13	0~1. 22	1. 52~2. 13	>2. 13	0~1. 22	1. 52~2. 13	>2. 13
96~100	0. 127	0. 254	0. 381	0. 508	1. 016	1. 524	5. 08	10. 16	15. 24
90~95	0. 508	1. 016	1. 524	1. 016	2. 032	3. 048	12. 7	25. 3746	25. 3746
85~89	1. 016	2. 032	3. 048	2. 032	4. 064	6. 096	25. 3746	25. 3746	25. 3746
80~84	2. 54	5. 08	7. 62	12. 7	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
70~79	12. 7	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
60~69	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
41~59	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
21~40	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
11~20	10. 16	20. 32	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
6~10	5. 08	10. 16	15. 24	20. 32	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
2~5	1. 27	2. 54	3. 81	5. 08	10. 16	15. 24	12. 7	25. 3746	25. 3746
<2	0. 508	1. 016	1. 524	1. 778	3. 556	5. 334	5. 08	10. 16	15. 24

表 G.59 316 系列不锈钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

酸的浓度 (质量分数) %	316 系列不锈钢的腐蚀速率, 密耳/年								
	≤86 ℉			87 ℉~122 ℉			123 ℉~158 ℉		
	酸的流速, ft/s								
	0~4	5~7	>7	0~4	5~7	>7	0~4	5~7	>7
96~100	5	10	15	15	30	45	100	200	300
90~95	10	20	30	30	60	90	400	800	999
85~89	20	40	60	50	100	50	800	999	999
80~84	50	100	150	400	800	999	999	999	999
70~79	300	600	900	999	999	999	999	999	999
60~69	600	999	999	999	999	999	999	999	999
41~59	900	999	999	999	999	999	999	999	999
21~40	200	400	600	999	999	999	999	999	999
11~20	30	60	90	60	120	180	200	400	600
6~10	10	20	30	30	60	90	80	160	240
2~5	5	10	15	20	40	60	40	80	120
<2	5	10	15	5	10	15	10	20	30

表 G.60 316 系列不锈钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

酸的浓度 (质量分数) %	316 系列不锈钢的腐蚀速率, mm/年								
	≤30℃			30. 56℃~50℃			50. 56℃~70℃		
	酸的流速, m/s								
	0~1. 22	1. 52~2. 13	>2. 13	0~1. 22	1. 52~2. 13	>2. 13	0~1. 22	1. 52~2. 13	>2. 13
96~100	0. 127	0. 254	0. 381	0. 381	0. 762	1. 143	2. 54	5. 08	7. 62
90~95	0. 254	0. 508	0. 762	0. 762	1. 524	2. 286	10. 16	20. 32	25. 3746
85~89	0. 508	1. 016	1. 524	1. 27	2. 54	1. 27	20. 32	25. 3746	25. 3746
80~84	1. 27	2. 54	3. 81	10. 16	20. 32	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
70~79	7. 62	15. 24	22. 86	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
60~69	15. 24	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
41~59	22. 86	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
21~40	5. 08	10. 16	15. 24	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746	25. 3746
11~20	0. 762	1. 524	2. 286	1. 524	3. 048	4. 572	5. 08	10. 16	15. 24
6~10	0. 254	0. 508	0. 762	0. 762	1. 524	2. 286	2. 032	4. 064	6. 096
2~5	0. 127	0. 254	0. 381	0. 508	1. 016	1. 524	1. 016	2. 032	3. 048
<2	0. 127	0. 254	0. 381	0. 127	0. 254	0. 381	0. 254	0. 508	0. 762

表 G.61 合金 20 的估计腐蚀速率 (英制单位)

酸的浓度 (质量分数) %	合金 20 的腐蚀速率, 密耳/年											
	≤100 ℉			101 ℉~150 ℉			151 ℉~176 ℉			177 ℉~214 ℉		
	酸的流速, ft/s											
	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10
96~100	2	4	6	5	10	15	15	30	45	40	80	120
90~95	3	6	9	10	20	30	25	50	75	50	100	150
80~89	3	6	9	10	20	30	30	60	90	60	120	180
61~79	3	6	9	15	30	45	50	100	150	100	200	300
51~60	3	6	9	10	20	30	30	60	90	60	120	180
41~50	3	6	9	10	20	30	30	60	90	50	100	150
31~40	3	6	9	10	20	30	25	50	75	40	80	120
21~30	2	4	6	5	10	15	20	40	60	40	80	120
11~20	2	4	6	5	10	15	20	40	60	35	70	105
6~10	2	4	6	3	6	9	5	10	15	25	50	75
≤5	2	4	6	3	6	9	3	6	9	20	40	60

表 G.62 合金 20 的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

酸的浓度 (质量分数) %	合金 20 的腐蚀速率, mm/年											
	≤37. 78℃			38. 33℃~65. 56℃			66. 11℃~80℃			80. 56℃~101. 11℃		
	酸的流速, m/s											
	0~ 1. 83	2. 13~ 3. 05	>3. 05	0~ 1. 83	2. 13~ 3. 05	>3. 05	0~ 1. 83	2. 13~ 3. 05	>3. 05	0~ 1. 83	2. 13~ 3. 05	>3. 05
96~100	0. 0508	0. 1016	0. 1524	0. 127	0. 254	0. 381	0. 381	0. 762	1. 143	1. 016	2. 032	3. 048
90~95	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 254	0. 508	0. 762	0. 635	1. 27	1. 905	1. 27	2. 54	3. 81
80~89	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 254	0. 508	0. 762	0. 762	1. 524	2. 286	1. 524	3. 048	4. 572
61~79	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 381	0. 762	1. 143	1. 27	2. 54	3. 81	2. 54	5. 08	7. 62
51~60	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 254	0. 508	0. 762	0. 762	1. 524	2. 286	1. 524	3. 048	4. 572
41~50	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 254	0. 508	0. 762	0. 762	1. 524	2. 286	1. 27	2. 54	3. 81
31~40	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 254	0. 508	0. 762	0. 635	1. 27	1. 905	1. 016	2. 032	3. 048
21~30	0. 0508	0. 1016	0. 1524	0. 127	0. 254	0. 381	0. 508	1. 016	1. 524	1. 016	2. 032	3. 048
11~20	0. 0508	0. 1016	0. 1524	0. 127	0. 254	0. 381	0. 508	1. 016	1. 524	0. 889	1. 778	2. 667
6~10	0. 0508	0. 1016	0. 1524	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 127	0. 254	0. 381	0. 635	1. 27	1. 905
≤5	0. 0508	0. 1016	0. 1524	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 508	1. 016	1. 524

表 G.63 合金 C-276 的估计腐蚀速率 (英制单位)

酸的浓度 (质量分数) %	合金 C-276 的腐蚀速率, 密耳/年											
	≤125 ℉			126 ℉~150 ℉			151 ℉~175 ℉			176 ℉~200 ℉		
	酸的流速, ft/s											
	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10
96~100	3	6	9	4	8	12	5	10	15	20	40	60
90~95	4	8	12	5	10	15	20	40	60	50	100	150
81~89	5	10	15	10	20	30	20	40	60	60	120	180
71~80	5	10	15	10	20	30	20	40	60	50	100	150
41~70	5	10	15	10	20	30	15	30	45	40	80	120
11~40	4	8	12	5	10	15	15	30	45	40	80	120
6~10	4	8	12	5	10	15	10	20	30	30	60	90
≤5	3	6	9	4	8	12	5	10	15	15	30	45

表 G.64 合金 C-276 的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

酸的浓度 (质量分数) %	合金 C-276 的腐蚀速率, mm/年											
	≤51. 67℃			52. 22℃~65. 56℃			66. 11℃~79. 44℃			80℃~93. 33℃		
	酸的流速, m/s											
	0~ 1. 83	2. 13~ 3. 05	>3. 05	0~ 1. 83	2. 13~ 3. 05	>3. 05	0~ 1. 83	2. 13~ 3. 05	>3. 05	0~ 1. 83	2. 13~ 3. 05	>3. 05
96~100	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 1016	0. 2032	0. 3048	0. 127	0. 254	0. 381	0. 508	1. 016	1. 524
90~95	0. 1016	0. 2032	0. 3048	0. 127	0. 254	0. 381	0. 508	1. 016	1. 524	1. 27	2. 54	3. 81
81~89	0. 127	0. 254	0. 381	0. 254	0. 508	0. 762	0. 508	1. 016	1. 524	1. 524	3. 048	4. 572
71~80	0. 127	0. 254	0. 381	0. 254	0. 508	0. 762	0. 508	1. 016	1. 524	1. 27	2. 54	3. 81
41~70	0. 127	0. 254	0. 381	0. 254	0. 508	0. 762	0. 381	0. 762	1. 143	1. 016	2. 032	3. 048
11~40	0. 1016	0. 2032	0. 3048	0. 127	0. 254	0. 381	0. 381	0. 762	1. 143	1. 016	2. 032	3. 048
6~10	0. 1016	0. 2032	0. 3048	0. 127	0. 254	0. 381	0. 254	0. 508	0. 762	0. 762	1. 524	2. 286
≤5	0. 0762	0. 1524	0. 2286	0. 1016	0. 2032	0. 3048	0. 127	0. 254	0. 381	0. 381	0. 762	1. 143

表 G.65 合金 B-2^a 的估计腐蚀速率 (英制单位)

酸的浓度 (质量分数) %	合金 B-2 ^a 的腐蚀速率, 密耳/年											
	≤125 °F			126 °F~150 °F			151 °F~175 °F			176 °F~200 °F		
	酸的流速, ft/s											
	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10	0~6	7~10	>10
50~100	2	4	6	3	6	9	4	8	12	5	10	15
40~49	3	6	9	4	8	12	4	8	12	5	10	15
26~39	4	8	12	5	10	15	5	10	15	5	10	15
≤25	5	10	15	10	20	30	10	20	30	10	20	30

^a 存在氧化剂 [即使几个克每立方米 (g/m³) (ppm)] 会加速腐蚀速率和点蚀。合金 B-2 不应使用于氧化条件。

表 G.66 合金 B-2^a 的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

酸的浓度 (质量分数) %	合金 B-2 ^a 的腐蚀速率, mm/年											
	≤51.67℃			52.22℃~65.56℃			66.11℃~79.44℃			80℃~93.33℃		
	酸的流速, m/s											
	0~ 1.83	2.13~ 3.05	>3.05	0~ 1.83	2.13~ 3.05	>3.05	0~ 1.83	2.13~ 3.05	>3.05	0~ 1.83	2.13~ 3.05	>3.05
50~100	0.0508	0.1016	0.1524	0.0762	0.1524	0.2286	0.1016	0.2032	0.3048	0.127	0.254	0.381
40~49	0.0762	0.1524	0.2286	0.1016	0.2032	0.3048	0.1016	0.2032	0.3048	0.127	0.254	0.381
26~39	0.1016	0.2032	0.3048	0.127	0.254	0.381	0.127	0.254	0.381	0.127	0.254	0.381
≤25	0.127	0.254	0.381	0.254	0.508	0.762	0.254	0.508	0.762	0.254	0.508	0.762

^a 存在氧化剂 [即使几个克每立方米 (g/m³) (ppm)] 会加速腐蚀速率和点蚀。合金 B-2 不应使用于氧化环境。

G.10 氢氟酸 (HF) 腐蚀

G.10.1 损伤说明

浓氢氟酸在 HF 烷基化装置中用做酸催化剂。烷基化反应，是在有酸催化剂的情况下烷烃（通常是异丁烷）和烯烃（丁烯、丙烯、戊烯）的化合。氢氟酸的液体和蒸气都会对健康有严重的危害。HF 溢出时，会形成浓密的、贴地的、剧毒的云团。因此在使用氢氟酸时应特别小心。

材料在氢氟酸中的腐蚀主要与氢氟酸的浓度和温度有关。其他变量，如流速、紊流、加气、杂质等均对腐蚀产生强烈影响。一些金属会形成保护性氟化物膜来保护表面。失去这层保护膜，特别是由于高流速或紊流造成保护膜的丧失，可能导致腐蚀速率大大增加。

在 80% 和更强的 HF 水溶液中的腐蚀相当于在无水氢氟酸 [AHF , $<200\text{g/m}^3$ (ppm) H_2O] 中的腐蚀。低于 80% 时，HF 酸被认为是无水的，并且金属腐蚀与温度和流速密切相关，且通常会随其增加而增加。

在典型的 HF 烷基化装置中，氢氟酸的水溶液浓度一般为 96%~99%，温度一般低于 65.6℃ (150 ℉)。在此条件下碳钢除了不能用于运行容限要求严格的设备（即泵、阀门、仪表）外，被广泛用于所有设备。在容限要求严格的和在 65.6℃~148.9℃ (150 ℉~300 ℉) 的场合下一般采用 400 合金。

如果装置排干后在低位点（泄放阀、存水弯等）留下残余自由水的话，经常发生酸被水稀释，而造成腐蚀加速。

G.10.2 基本数据

表 G.67 列出了估计钢和合金 400 在氢氟酸溶液中的腐蚀速率所需的基本数据。该表还提供了对所需数据的说明。

表 G.67 氢氟酸腐蚀分析所需的基本数据

基本数据	说 明
含水 HF 酸的浓度 (质量分数), %	确定 HF 在水中的浓度
建造材料	确定用来制造设备/配管的材料
最高使用温度, ℉	确定工艺的介质最高工作温度
流速, ft/s	确定工艺流体的流速范围
存在氧和氧化剂吗? (是或否)	氧化剂可大大加速合金 400 的腐蚀。没有提供关于在酸中溶解氧浓度的定义。在装运和输送过程中的酸通常是完全不含水的，并且空气只在设备因检查、泄放或对装置输入配置不正确的进料而打开设备后才出现

G.10.3 估计腐蚀速率的确定

不论 HF 以何种浓度出现，都认为设备/配管易受到氢氟酸的腐蚀。根据表 G.67 的基本数据得到表 G.68 和表 G.69 碳钢的估计腐蚀速率，或根据表 G.70 和表 G.71 得到合金 400 的估计腐蚀速率。图 G.6 给出了确定相关腐蚀速率所需的步骤的流程图。

应注意，随着氟化物膜的形成，在暴露于 HF 的起始阶段，腐蚀速率是很高的。一旦保护膜形成，氟化物膜就保护钢，从而形成低的腐蚀速率，除非氟化物膜受到干扰或被移除。

已经发现，无论在稀的或浓的氢氟酸溶液中，合金钢呈现的腐蚀速率比低碳钢的腐蚀速率高，因此合金钢一般不用于这一环境。在 HF 系统中有时也采用较高合金钢，并且在腐蚀速率未知时，腐蚀速率应根据出版文献及从制造商处获得。应考虑焊接碳钢对合金 400 或其他耐蚀合金的电位差效应。电偶腐蚀可能导致碳钢的加速或局部侵蚀。已经报道了在含有大量剩余元素，尤其是 Cu, Ni, Cr 成分的碳钢中腐蚀速率增加的情况。

除了电位电流侵蚀的情况外，氢氟酸造成的腐蚀导致均匀减薄。氢氟酸的存在还导致氢致应力开

裂和鼓泡。在应力腐蚀开裂技术模块中考虑了这些退化模式。

表 G. 68 碳钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

温度, °F	流速, ft/s	HF 水溶液浓度					
		0%~1%	2%~5%	6%~63%	64%~80%	>80%	
						低	高
<80	<10	2	150	800	5	2	6
	≥10	20	999	999	50	20	60
≥80~130	<10	10	500	999	30	5	15
	≥10	200	999	999	300	50	150
>130~150	<10	10	500	999	30	10	30
	≥10	100	999	999	300	100	300
≥151~160	<10	100	999	999	500	20	60
	≥10	999	999	999	999	200	600
≥161~175	<10	100	999	999	500	50	150
	≥10	999	999	999	999	500	999
≥176~200	<10	100	999	999	500	70	210
	≥10	999	999	999	999	700	999
>200	<10	500	999	999	999	100	300
	≥10	999	999	999	999	999	999

表 G. 69 碳钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

温度, °C	流速, m/s	HF 水溶液浓度					
		0%~1%	2%~5%	6%~63%	64%~80%	>80%	
						低	高
<26.67	<3.05	0.0508	3.81	20.32	0.127	0.0508	0.1524
	≥3.05	0.508	25.3746	25.3746	1.27	0.508	1.524
26.67~54.44	<3.05	0.254	12.7	25.3746	0.762	0.127	0.381
	≥3.05	5.08	25.3746	25.3746	7.62	1.27	3.81
>54.44~65.56	<3.05	0.254	12.7	25.3746	0.762	0.254	0.762
	≥3.05	2.54	25.3746	25.3746	7.62	2.54	7.62
66.11~71.11	<3.05	2.54	25.3746	25.3746	12.7	0.508	1.524
	≥3.05	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	5.08	15.24
71.67~79.44	<3.05	2.54	25.3746	25.3746	12.7	1.27	3.81
	≥3.05	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	12.7	25.3746
80~93.33	<3.05	2.54	25.3746	25.3746	12.7	1.778	5.334
	≥3.05	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	17.78	25.3746
>93.33	<3.05	12.7	25.3746	25.3746	25.3746	2.54	7.62
	≥3.05	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746	25.3746

表 G.70 合金 400 的估计腐蚀速率（英制单位）

密耳/年

温度，°F	是否暴露于空气中	HF 水溶液浓度				
		0%~1%	2%~5%	6%~63%	64%~80%	>80%
<80	否	1	1	10	1	2
	是	10	10	25	10	15
80~150	否	1	1	15	5	3
	是	10	10	30	20	15
151~200	否	5	5	20	10	5
	是	20	20	100	50	20
>200	否	10	10	20	20	10
	是	100	100	200	200	100

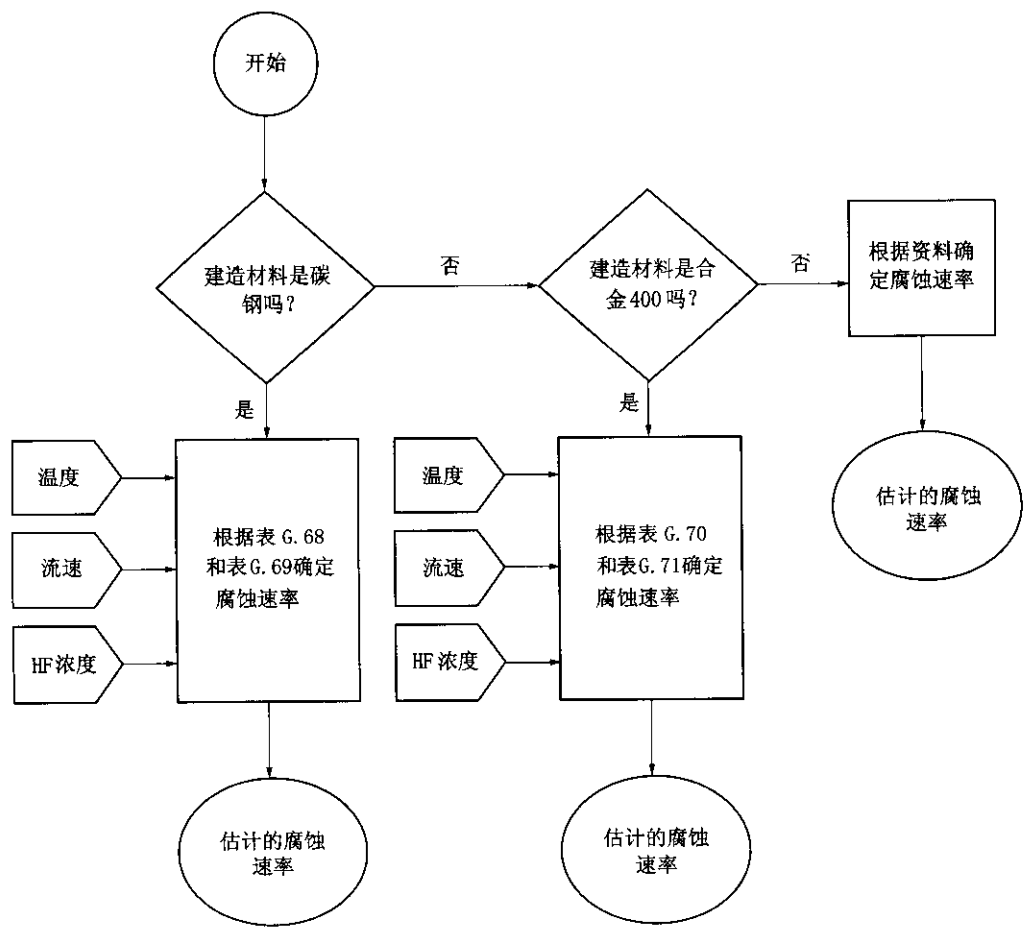


图 G.6 HF 腐蚀速率的确定

G.11 酸性水腐蚀

G.11.1 损伤说明

酸性水腐蚀定义为含水 H₂S 和氨造成的腐蚀，并且通常是在高于中性 pH 值下使用碳钢需要考

虑的问题。这种腐蚀由含水的二硫化铵（ NH_4HS ）引起，二硫化铵也称为氢硫化铵。影响酸性水腐蚀速率的主要因素是水的 NH_4HS 的浓度和流速。次要因素是 pH 值、水中氰化物和氧含量。

酸性水腐蚀是各种炼油加工装置中最常见的问题，尤其是加氢处理、加氢裂化、焦化、催化裂化、轻质油终端、胺处理，酸性水分离等。硫化氢一般通过硫化物的热或催化转换形成。同样，氨从氮的化合物形成。酸性水腐蚀根据水的 pH 值在原油蒸馏中可能会比较严重。在中性 pH 值下，HCl 通常是原油蒸馏、石脑油加氢处理和催化重整冷凝水的主导腐蚀机理。根据工况，少量的氨也可能在加氢设备的某些馏出物中形成。

表 G. 71 合金 400 的估计腐蚀速率（法定计量单位） mm/年

温度,℃	是否暴露于空气中	HF 水溶液浓度				
		0%~1%	2%~5%	6%~63%	64%~80%	>80%
<26.67	否	0.0254	0.0254	0.254	0.0254	0.0508
	是	0.254	0.254	0.635	0.254	0.381
26.67~65.56	否	0.0254	0.0254	0.381	0.127	0.0762
	是	0.254	0.254	0.762	0.508	0.381
66.11~93.33	否	0.127	0.127	0.508	0.254	0.127
	是	0.508	0.508	2.54	1.27	0.508
>93.33	否	0.254	0.254	0.508	0.508	0.254
	是	2.54	2.54	5.08	5.08	2.54

G. 11. 2 基本数据

表 G. 72 列出了估计酸性水腐蚀速率所需的数据。图 G. 7 显示了确定腐蚀速率所需的步骤，如果没有精确测量数据，则应向知识丰富的工艺专家咨询。

G. 11. 3 酸性水腐蚀速率的确定

应使用表 G. 73 和表 G. 74 来估计酸性水的腐蚀速率。图 G. 7 给出了用来估计腐蚀速率的步骤说明。

表 G. 72 酸性水腐蚀分析所需的基本数据

基本数据	说 明
NH_4HS	确定凝结水中的 NH_4HS 浓度。它可根据 H_2S 和 NH_3 的分析按下式算出。 若 H_2S （质量分数） $<2\text{NH}_3$ ，则 NH_4HS （质量分数） $=1.5\text{H}_2\text{S}$ （质量分数） 若 H_2S （质量分数） $>2\text{NH}_3$ ，则 NH_4HS （质量分数） $=3\text{NH}_2$ （质量分数）
或	
K_P 值	K_P 可用于还未进行酸性水分析的场所，且以蒸气相 H_2S 和 NH_3 为基础 $K_P = \text{H}_2\text{S}$ （摩尔分数） $\cdot \text{NH}_3$ （摩尔分数）（干基）
流速, ft/s	在两相系统中应使用蒸气相流速。液相流速应用于全液相系统

G. 12 胺腐蚀

G. 12. 1 损伤说明

胺腐蚀的形式是局部腐蚀，原则上发生于一些气体的胺处理装置中的碳钢设备上。当碳钢未进行

焊后热处理（见 H.6）时，它在气田的胺处理装置中还易遭受应力腐蚀开裂。气体净化所用胺可分成两大类：化学溶剂和物理溶剂。本补充针对最常见化学溶剂 MEA（乙醇氨）、DEA（二乙醇氨）和 MDEA（甲基二乙醇氨）中的腐蚀。这些胺用来去除装置流体中的酸气，主要是 H_2S 。MEA 和 DEA 还去除 CO_2 ，但 MDEA 只选择吸收 H_2S ，只能去除少量的 CO_2 （如果存在的话）。通常当污染物得到很好地控制时，MDEA 的腐蚀要比在 MEA 和 DEA 中的腐蚀轻。

表 G.73 碳钢的估计腐蚀速率（英制单位）

密耳/年

K_P	NH_4HS (质量分数) %	流速, ft/s			
		<10	10~20	21~30	>30
<0.07	<2	5	8	10	15
0.07~0.4	2~8	15	25	50	150
0.41~1.0	>8~20	30	50	300	500
>1.0	>20	300	500	800	999

表 G.74 碳钢的估计腐蚀速率（法定计量单位）

mm/年

K_P	NH_4HS (质量分数) %	流速, m/s			
		<3.048	3.048~6.096	6.401~9.144	>9.144
<0.07	<2	0.127	0.2032	0.254	0.381
0.07~0.4	2~8	0.381	0.635	1.27	3.81
0.41~1.0	>8~20	0.762	1.27	7.62	12.7
>1.0	>20	7.62	12.7	20.32	25.3746

胺处理装置中碳钢的腐蚀是若干相互关联因素的一个函数。主要因素是胺溶液的浓度、溶液的酸气含量（吸收量）和温度。最常用的胺浓度为 20%（质量分数）MEA，30%（质量分数）DEA 和 40%~50%（质量分数）MDEA。浓度变大时，腐蚀速率增加。

酸气吸收量以每摩尔活性胺中所含的酸气摩尔数表示。“富”溶液是较高酸气吸收量的胺，而“贫”溶液则具有较低的酸气吸收量 [通常 <0.1%（摩尔分数）]。在具有高的贫吸收量的再生差的胺中的腐蚀也是常见的问题，因为贫溶液的温度常常要比富溶液温度高。应测量 H_2S 和 CO_2 含量以确定酸气的吸收量。此外，计算吸收量时应只考虑有效的或活性胺的量。在仅有 H_2S 的酸气系统中，达到 0.7%（摩尔分数）的富胺吸收量已令人满意。在 $\text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$ 的酸气系统中，富胺吸收量经常限制在 0.35%~0.45%（摩尔分数）范围内。在 MDEA 系统中，特别是用来选择性去除 H_2S 的硫磺厂尾气处理系统，富胺吸收量经常低于这些水平。就像大多数腐蚀机理那样，温度越高，腐蚀速率越大。

胺腐蚀中的另一个重要因素是胺降解产物的存在，通常指“耐热胺盐”，或 HSAS。这些胺降解产物以两种方式起作用。一方面，它们降低可用来吸收酸气的活性胺的量，从而引起较高的酸气吸收量。此外，一些胺降解产物自身也具有腐蚀性。在 MEA 和 DEA 系统中，虽然一个共同的运行极限是 2%（质量分数），但高于 0.5%（质量分数）的耐热胺盐可能开始使腐蚀增加。在大于 2.0%（质量分数）的 HSAS 下，甚至在低的酸气吸收量下，腐蚀也可能特别严重。MDEA 还形成耐热胺盐，但对这些装

置中的主要影响是有机酸污染物（甲酸、草酸、醋酸盐）。在 MEA 系统中经常装备热回收装置以减少 HSAS，但 DEA 和 MDEA 盐更稳定而不易被热回收。DEA 比 MEA 和 MDEA 较难降解。

流速或流态也影响胺腐蚀。在没有高流速和紊流的情况下，胺腐蚀可能是十分均匀的。较高的流速或紊流导致酸气从溶液中析出，特别是在弯管和发生压力降的位置，如阀门，从而更容易造成局部的腐蚀。较高的流速和紊流还可能使形成的硫化铁保护膜破裂。在流速成为需要考虑的因素时，腐蚀形态可能表现为点蚀或坑蚀。碳钢对富胺的共同流速范围是 1.524m/s (5ft/s)，对贫胺大约为 0.6096m/s (2ft/s)。

奥氏体不锈钢常用于碳钢易受腐蚀的区域，并且取得很大成功，除非温度、胺浓度及降解产物含量特别高。不锈钢常应用于重沸器、再生系统、贫富液换热器管束和压力泄放阀及其下游配管/设备。12%Cr 钢已经成功用于洗涤塔（吸收塔）内件。铜合金易遭受加速腐蚀和应力腐蚀开裂，故通常应避免使用。

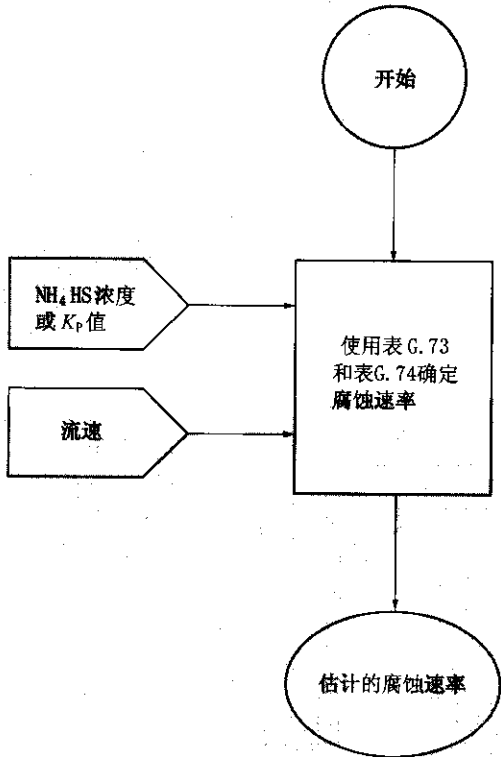


图 G. 7 酸性水腐蚀速率的确定

G. 12.2 基本数据

表 G. 75 中所列数据要求用来估计胺环境中的腐蚀速率。图 G. 8 显示了确定腐蚀速率所需的步骤。如果没有精确的测量数据，则应向知识丰富的工艺专家咨询。

G. 12.3 氨腐蚀速率的确定

碳钢的估计腐蚀速率应从表 G. 76 和表 G. 77 及表 G. 78 和表 G. 79 查得。如果使用较高的胺浓度，则应乘上表 G. 80 中的相关因子。

为了估计不锈钢的胺腐蚀速率，从表 G. 81 和表 G. 82 中选取相关的值。注意，在胺浓度、温度和降解产物含量等处于极端条件下时，不锈钢的腐蚀速率可能是表 G. 81 和表 G. 82 中值的 200 倍。

对于较高的胺强度下的腐蚀速率，将表 G. 76 和表 G. 77 及表 G. 78 和表 G. 79 中的腐蚀速率乘以下的因子。

表 G.75 胺腐蚀分析所需的基本数据

基本数据	说 明
建造材料（碳钢或不锈钢）	确定设备/配管的建造材料
胺浓度（质量分数），%	确定设备/配管中的胺浓度。由于水的汽化，在评估一些重沸器和再生设备的腐蚀时可能需要考虑局部增加胺浓度
最大工艺温度，°F	确定最大工艺温度。在重沸器和再生设备中，管子的金属温度可能比总体工艺温度要高
酸气浓度 （酸气摩尔数/活性胺摩尔数）	确定胺中的酸气吸收量。如果不能获得分析结果，则应由知识丰富的工艺专家进行估计
流速，ft/s	确定该设备/配管中胺的最大流速
热稳定胺盐（HSAS）浓度 MEA 和 DEA（质量分数） <2%，2%~4%，>4%	在 MEA 和 DEA 中，HSAS 代表胺降解产物的标准旋
MDEA	在 MDEA 中，HSAS 是指有机酸含量，主要是甲酸盐、草酸盐和醋酸盐

表 G.76 MEA [≤20%（质量分数）] 和 DEA [≤30%（质量分数）] 中的碳钢腐蚀速率（英制单位）

酸气吸收量 （摩尔分数） %	HSAS （摩尔分数） %	腐蚀速率，密耳/年											
		温度，°F											
		流速，ft/s											
		≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20
<0.1	≤2	1	3	2	6	5	15	10	30	15	45	20	60
	2.1~4.0	2	6	2	6	6	20	15	40	20	45	30	80
	>4.0	5	10	5	15	15	40	30	60	40	90	60	120
流速，ft/s													
		≤5	>5	≤5	>5	≤5	>5	≤5	>5	≤5	>5	≤5	>5
0.1~0.2	≤2	1	3	2	6	5	15	10	30	15	45	20	60
	2.1~4.0	2	6	4	12	10	30	20	60	30	90	40	80
	>4.0	5	15	8	25	20	60	40	80	60	120	120	150
0.21~0.3	≤2	2	6	3	9	7	20	10	30	20	60	25	75
	2.1~4.0	4	10	6	20	15	40	20	50	40	80	50	100
	>4.0	8	25	15	45	30	60	40	80	80	120	100	150
0.31~0.4	≤2	2	6	4	10	7	20	15	40	25	70	30	80
	2.1~4.0	4	10	8	25	15	45	30	60	50	100	100	150
	>4.0	8	25	15	40	35	70	60	100	100	140	150	180
0.41~0.5	≤2	3	9	5	15	10	30	15	45	35	70	45	100
	2.1~4.0	6	15	10	30	20	60	45	90	70	130	90	150
	>4.0	10	30	20	40	40	80	90	120	120	150	150	180

表 G. 76 (续)

酸气吸收量 (摩尔分数) %	HSAS (摩尔分数) %	腐蚀速率, 密耳/年											
		温度, °F											
		<190		190~210		211~230		231~250		251~270		>270	
		流速, ft/s											
		≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20
0. 51~0. 6	≤2	3	9	7	20	10	30	25	75	40	100	50	120
	2. 1~4. 0	6	20	15	45	20	60	50	100	80	140	100	150
	>4. 0	10	30	30	60	45	90	100	150	140	180	160	200
0. 61~0. 7	≤2	4	10	9	30	15	40	30	100	50	120	60	150
	2. 1~4. 0	8	15	20	40	30	60	60	100	90	140	100	150
	>4. 0	15	35	40	80	60	100	100	150	140	180	160	200
>0. 7	≤2	5	15	10	30	20	60	40	100	60	120	70	150
	2. 1~4. 0	10	30	20	60	40	80	70	120	100	150	120	150
	>4. 0	20	45	40	80	60	100	100	150	150	180	170	220

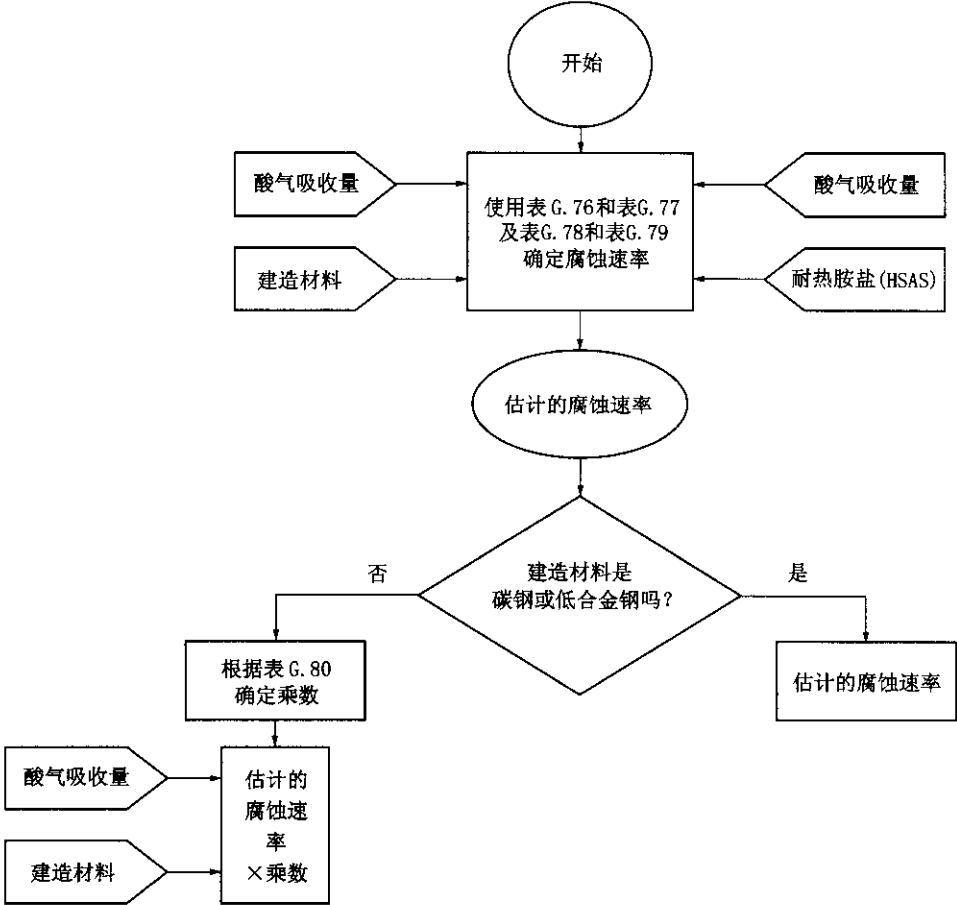


图 G. 8 胺腐蚀速率的确定

表 G.77 MEA [≤20% (质量分数)] 和 DEA [≤30% (质量分数)] 中的碳钢腐蚀速率 (法定计量单位)

酸气吸收量 (摩尔分数) %	HSAS (摩尔分数) %	腐蚀速率, mm/年									
		温度, °C									
		<87.78	87.78~98.89	99.44~110	110.56~121.11	121.67~132.22	>132.22				
		流速, m/s									
<0.1	≤2	≤6.096	>6.096	≤6.096	>6.096	≤6.096	>6.096	≤6.096	>6.096	≤6.096	>6.096
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.127	0.381	0.254	0.762	0.381	1.143
		0.0508	0.1524	0.0508	0.1524	0.1524	0.508	0.381	1.016	0.508	1.143
		0.127	0.254	0.127	0.381	0.381	1.016	0.762	1.524	2.286	3.048
0.1~0.2	≤2	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.127	0.381	0.254	0.762	0.381	1.143
		0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.254	0.762	0.508	1.524	2.286	2.032
		0.127	0.381	0.2032	0.635	0.508	1.524	1.016	2.032	3.048	3.81
0.21~0.3	≤2	0.0508	0.1524	0.0762	0.2286	0.1778	0.508	0.254	0.762	1.524	1.905
		0.1016	0.254	0.1524	0.508	0.381	1.016	0.508	1.27	2.032	2.54
		0.2032	0.635	0.381	1.143	0.762	1.524	1.016	2.032	3.048	3.81
		0.0508	0.1524	0.1016	0.254	0.1778	0.508	0.381	1.016	1.778	2.032
0.31~0.4	≤2	0.1016	0.254	0.2032	0.635	0.381	1.143	0.762	1.524	2.032	2.54
		0.2032	0.635	0.381	1.016	0.889	1.778	1.524	2.54	3.556	4.572
		0.0762	0.2286	0.127	0.381	0.254	0.762	0.381	1.143	1.778	2.54
		0.1524	0.381	0.254	0.762	0.508	1.524	1.143	2.286	3.302	3.81
0.41~0.5	≤2	0.254	0.762	0.508	1.016	1.016	2.032	2.286	3.048	3.81	4.572
		0.0762	0.2286	0.1778	0.508	0.254	0.762	0.635	1.016	1.27	3.048
		0.1524	0.508	0.381	1.143	0.508	1.524	1.27	2.54	2.54	3.81
		0.254	0.762	0.762	1.524	1.143	2.286	2.54	3.81	4.572	5.08
0.51~0.6	≤2	0.1016	0.254	0.2286	0.762	0.381	1.016	0.762	2.54	1.524	3.81
		0.2032	0.381	0.508	1.016	0.762	1.524	1.524	2.54	2.54	3.81
		0.381	0.889	1.016	2.032	1.524	2.54	2.54	3.81	4.572	5.08
		0.127	0.381	0.254	0.762	0.508	1.524	1.016	2.54	3.048	3.81
0.61~0.7	≤2	0.254	0.762	0.762	1.524	1.143	2.286	2.54	3.81	4.064	5.08
		0.1016	0.254	0.2286	0.762	0.381	1.016	0.762	2.54	1.524	3.81
		0.2032	0.381	0.508	1.016	0.762	1.524	1.524	2.54	2.54	3.81
		0.381	0.889	1.016	2.032	1.524	2.54	2.54	3.81	4.572	5.08
>0.7	≤2	0.127	0.381	0.254	0.762	0.508	1.524	1.016	2.54	1.778	3.81
		0.254	0.762	0.508	1.524	1.016	2.032	1.778	3.048	2.54	3.81
		0.508	1.143	1.016	2.032	1.524	2.54	2.54	3.81	4.572	5.588
		0.127	0.381	0.254	0.762	0.508	1.524	1.016	2.54	3.048	3.81

表 G.78 碳钢在 DEA 中的腐蚀速率 [$\leq 50\%$ (质量分数)] (英制单位)

酸气吸 收量 (摩尔 分数) %	HSAS (摩尔 分数) %	腐蚀速率, 密耳/年											
		温度, °F											
		<190		190~210		211~230		231~250		251~270		>270	
		流速, ft/s											
		≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20	≤20	>20
<0.1	≤0.5	1	3	1	3	3	10	5	15	10	25	15	40
	0.51~4.0	2	6	2	6	6	20	15	40	20	45	30	80
	>4.0	5	10	5	15	15	40	30	60	40	90	60	120
流速, ft/s													
		≤5	>5	≤5	>5	≤5	>5	≤5	>5	≤5	>5	≤5	>5
0.1~ 0.2	≤0.5	1	3	2	6	5	15	10	30	15	45	20	60
	0.51~4.0	2	6	4	12	10	30	20	60	30	90	40	80
	>4.0	5	15	8	25	20	60	40	80	60	120	120	150
0.21~ 0.3	≤0.5	2	6	3	9	7	20	10	30	20	60	25	75
	0.51~4.0	4	10	6	20	15	40	20	50	40	80	50	100
	>4.0	8	25	15	45	30	60	40	80	80	120	100	150
0.31~ 0.4	≤0.5	2	6	4	10	7	20	15	40	25	70	30	80
	0.51~4.0	4	10	8	25	15	45	30	60	50	100	100	150
	>4.0	8	25	15	40	35	70	60	100	100	140	150	180
0.41~ 0.5	≤0.5	3	9	5	15	10	30	15	45	35	70	45	100
	0.51~4.0	6	15	10	30	20	60	45	90	70	130	90	150
	>4.0	10	30	20	40	40	80	90	120	120	150	150	180
0.51~ 0.6	≤0.5	3	9	7	20	10	30	25	75	40	100	50	120
	0.51~4.0	6	20	15	45	20	60	50	100	80	140	100	150
	>4.0	10	30	30	60	45	90	100	150	140	180	160	200
0.61~ 0.7	≤0.5	4	10	9	30	15	40	30	100	50	120	60	150
	0.51~4.0	8	15	20	40	30	60	60	100	90	140	100	150
	>4.0	15	35	40	80	60	100	100	150	140	180	160	200
>0.7	≤0.5	5	15	10	30	20	60	40	100	60	120	70	150
	0.51~4.0	10	30	20	60	40	80	70	120	100	150	120	150
	>4.0	20	45	40	80	60	100	100	150	150	180	170	220

表 G.79 碳钢在 DEA 中的腐蚀速率 [≤50% (质量分数)] (法定计量单位)

酸气吸收量 (摩尔分数) %	HSAS (摩尔分数) %	腐蚀速率, mm/年									
		温度, °C									
		<87.78	87.78~98.89	99.44~110	110.56~121.11	121.67~132.22	>132.22				
<0.1	≤0.5 0.51~4.0 >4.0	流速, m/s									
		≤6.096	>6.096	≤6.096	>6.096	≤6.096	>6.096	≤6.096	>6.096	≤6.096	>6.096
		0.0254	0.0762	0.0254	0.0762	0.0254	0.0762	0.0254	0.0762	0.0254	0.0762
		0.0508	0.1524	0.0508	0.1524	0.0508	0.1524	0.0508	0.1524	0.0508	0.1524
		0.127	0.254	0.127	0.254	0.127	0.254	0.127	0.254	0.127	0.254
0.1~0.2	≤0.5 0.51~4.0 >4.0	流速, m/s									
		≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762
		0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524
		0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381
0.21~0.3	≤0.5 0.51~4.0 >4.0	流速, m/s									
		≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762
		0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524
		0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381
0.31~0.4	≤0.5 0.51~4.0 >4.0	流速, m/s									
		≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762
		0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524
		0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381
0.41~0.5	≤0.5 0.51~4.0 >4.0	流速, m/s									
		≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762
		0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524
		0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381
0.51~0.6	≤0.5 0.51~4.0 >4.0	流速, m/s									
		≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762
		0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524
		0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381
0.61~0.7	≤0.5 0.51~4.0 >4.0	流速, m/s									
		≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762
		0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524
		0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381
>0.7	≤0.5 0.51~4.0 >4.0	流速, m/s									
		≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524	≤1.524	>1.524
		0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762	0.0508	0.1524	0.0254	0.0762
		0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524	0.1016	0.3048	0.0508	0.1524
		0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381	0.2032	0.635	0.127	0.381

表 G. 80 高浓度胺腐蚀速率乘数

胺的种类	浓度 (质量分数)	乘数
MEA	≤ 20	1.0
	21~25	1.5
	> 25	2.0
DEA	≤ 30	1.0
	31~40	1.2
	> 40	1.5
MDEA	≤ 50	1.0

表 G. 81 用于所有胺的不锈钢的估计腐蚀速率 (英制单位)

密耳/年

酸气吸收量 (摩尔分数) %	温度, °F ≤ 300
< 0.1	1
0.1~0.2	1
0.21~0.3	1
0.31~0.4	2
0.41~0.5	2
0.51~0.6	3
0.61~0.7	4
> 0.7	5

表 G. 82 用于所有胺的不锈钢的估计腐蚀速率 (法定计量单位)

mm/年

酸气吸收量 (摩尔分数) %	温度, °C ≤ 148.89
< 0.1	0.0254
0.1~0.2	0.0254
0.21~0.3	0.0254
0.31~0.4	0.0508
0.41~0.5	0.0508
0.51~0.6	0.0762
0.61~0.7	0.1016
> 0.7	0.127

G. 13 高温氧化

G. 13.1 损伤说明

碳钢在高于 482.22°C (900 °F) 温度、合金钢在更高的温度下会发生高温氧化腐蚀。由于金属与环境中的氧气发生反应而引起金属损失。一般就在高于氧化开始发生的温度下, 在金属表面形成致密的保护性的氧化物, 从而降低金属的损失率。随着金属中铬浓度的增加, 氧化物膜倾向于具有更好的

保护性。

G.13.2 基本数据

表 G.83 中所列的数据要求用来估计氧化率。

表 G.83 高温氧化腐蚀分析所需的基本数据

基本数据	说 明
建造材料	确定该设备/配管的建造材料
最大金属温度，°F	确定最大金属温度。炉管的管子金属温度是控制因素

G.13.3 高温氧化情况下估计腐蚀速率的确定

表 G.84~表 G.87 可用于确定已知建造材料和金属温度情况下的估计氧化腐蚀速率。

表 G.84 估计的氧化腐蚀速率（英制单位）

建造材料	腐蚀速率，密耳/年											
	最大金属温度，°F											
	900~ 950	951~ 1000	1001~ 1050	1051~ 1100	1101~ 1150	1151~ 1200	1201~ 1250	1251~ 1300	1301~ 1350	1351~ 1400	1401~ 1450	1451~ 1500
Cs	2	4	6	9	14	22	33	48	—	—	—	—
1¼Cr	2	3	4	7	12	18	30	46	—	—	—	—
2¼Cr	1	1	2	4	9	14	24	41	—	—	—	—
5Cr	1	1	1	2	4	6	15	35	65	—	—	—
7Cr	1	1	1	1	1	2	3	6	17	37	60	—
9Cr	1	1	1	1	1	1	1	2	5	11	23	40
12Cr	1	1	1	1	1	1	1	1	3	8	15	30
304SS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12	3	4
309SS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3
310SS/HK	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
800H/HP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

表 G.85 估计的氧化腐蚀速率（法定计量单位）

建造材料	腐蚀速率，mm/年											
	最大金属温度，°C											
	482.22~ 510	510.56~ 537.78	538.83~ 565.56	566.11~ 593.33	593.89~ 621.11	621.67~ 648.89	649.44~ 676.67	677.22~ 704.44	705~ 732.22	732.78~ 760	760.56~ 787.78	788.33~ 815.56
Cs	0.0508	0.1016	0.1524	0.2286	0.3556	0.5588	0.8382	1.2192	—	—	—	—
1¼Cr	0.0508	0.0762	0.1016	0.1778	0.3048	0.4572	0.762	1.1684	—	—	—	—
2¼Cr	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.2286	0.3556	0.6096	1.0414	—	—	—	—
5Cr	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.1016	0.1524	0.381	0.889	1.651	—	—	—
7Cr	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762	0.1524	0.4318	0.9398	1.524	—

表 G. 85 (续)

	腐蚀速率, mm/年											
	最大金属温度, °C											
9Cr	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.127	0.2794	0.5842	1.016
12 Cr	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0762	0.2032	0.381	0.762
304SS	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.3048	0.0762	0.1016
309SS	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508	0.0762
310SS/HK	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508
800H/HP	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0508

表 G. 86 估计的氧化腐蚀速率 (英制单位)

	腐蚀速率, 密耳/年												
	最大金属温度, °F												
建造材料	1501~ 1550	1551~ 1600	1601~ 1650	1651~ 1700	1701~ 1750	1751~ 1800	1801~ 1850	1851~ 1900	1901~ 1950	1951~ 2000	2001~ 2050	2051~ 2100	2101~ 2150
Cs	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1¼Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2¼Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5 Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9Cr	60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12Cr	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
304SS	6	9	13	18	25	35	48	—	—	—	—	—	—
309SS	4	6	8	10	13	16	20	30	40	50	—	—	—
310SS/HK	3	4	5	7	8	10	13	15	19	23	27	31	37
800H/HP	3	4	6	8	10	13	17	21	27	33	41	50	60

表 G. 87 估计的氧化腐蚀速率 (法定计量单位)

	腐蚀速率, mm/年												
	最大金属温度,℃												
建造材料	816.11~ 843.33	843.89~ 87.11	871.67~ 898.89	899.44~ 926.67	927.22~ 954.44	955~ 982.22	982.78~ 1010	1010.56~ 1037.78	1038.33~ 1065.56	1066.11~ 1093.33	1093.89~ 1121.11	1121.67~ 1148.89	1149.44~ 1176.67
Cs	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1¼Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2¼Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 G. 87 (续)

	腐蚀速率, mm/年													
	最大金属温度, °C													
9Cr	1. 524	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12 Cr	1. 27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
304SS	0. 1524	0. 2286	0. 3302	0. 4572	0. 635	0. 889	1. 2192	—	—	—	—	—	—	—
309SS	0. 1016	0. 1524	0. 2032	0. 254	0. 3302	0. 4064	0. 508	0. 762	1. 016	1. 27	—	—	—	—
310SS/HK	0. 0762	0. 1016	0. 127	0. 1778	0. 2032	0. 254	0. 3302	0. 381	0. 4826	0. 5842	0. 6858	0. 7874	0. 9398	—
800H/HP	0. 0762	0. 1016	0. 1524	0. 2032	0. 254	0. 3302	0. 4318	0. 5334	0. 6858	0. 8382	1. 0414	1. 27	1. 524	—

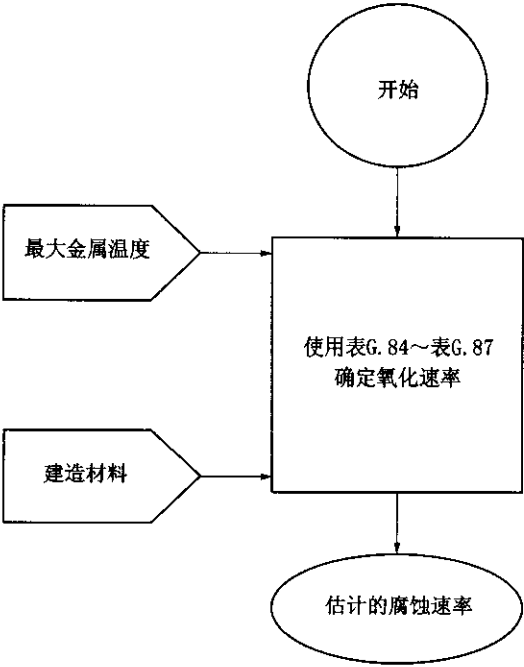


图 G. 9 氧化腐蚀速率的确定

附录 H
(规范性附录)
应力腐蚀开裂技术模块

H.1 范围

本模块为确定由于应力腐蚀开裂（SCC）造成工艺设备损伤的一个技术模块次因子（失效修正的可能性）。碱裂、胺开裂、硫化物应力开裂（SSC）、氢致开裂（HIC）、应力诱导氢致开裂（SOHIC）、碳酸盐开裂、连多硫酸开裂（PTA）和氯化物开裂（CISCC）都包含在本模块范围内。有关应力腐蚀开裂特定损伤机理的敏感性评估的技术补充也包含在本模块中。专家建议也可用于确定应力腐蚀开裂的敏感性。

H.2 技术模块的筛选问题

在筛选问题上不能绕过应力腐蚀开裂技术模块。所有设备都应进入此模块进行分析。

H.2.1 需用数据

表 H.1 中列出了确定应力腐蚀开裂技术模块次因子所需的基本数据。

表 H.1 应力腐蚀开裂分析所需的基本数据

基本数据	说 明
SCC 的敏感性（高、中、低）	按相关技术补充或专家建议确定 SCC 敏感性
运行压力，lb/in ²	预期的最高运行压力（可能是泄压阀设定压力，除非压力不可能达到该水平）
最大允许工作压力 MAWP，lb/in ²	此压力用于确定最小允许壁厚。如果无法取得 MAWP，可用设计压力作为该输入项
建造材料	来自监造记录的设备建造材料
运行温度，°F	预计运行中的最高期望运行温度（考虑正常和非正常运行条件）
存在的 SCC 和开裂机理（如果已知）（碱，胺，SSC，HIC/SOHIC，碳酸盐，PTA，CISCC，未知）	通过检验记录、失效分析报告或专家建议来确定开裂机理。如果开裂原因未知，可采用更保守的损伤因子
距最后一次 SCC 检测的时间（年数）	通过检测历史确定距上次 SCC 检测的年数
检验有效性分类	已进行检验的设备的有效性类别。每种 SCC 机理的指定检验有效性类别指南见表 H.4A～表 H.4F。
在线监测（氢探针、工艺参数或组合）	采用的经验性腐蚀监测方法或工具类型，如氢探针和/或工艺参数监测
检验次数	已进行的每种有效性类别的检验次数

H.2.2 附加数据

附加数据要求用于回答表 H.2 中列出的应力腐蚀（SCC）机理的筛选问题。每种 SCC 机理所需的更多数据列在其补遗基本数据表的开始部分。

表 H.2 SCC 机理的筛选问题

筛 选 问 题	操 作
1. 碱裂 材料是否为碳钢或低合金钢? 环境中是否含有一定浓度的碱性介质?	如果两者都是, 转至表 H. 6
2. 胺开裂 建造材料是否为碳钢或低合金钢? 设备是否暴露于酸气处理胺中? (MEA, DEA, DI-PA, MDEA 等)	如果两者都是, 转至表 H. 7
3. SSC/HIC/SOHIC 建造材料是否为碳钢或低合金钢? 环境中是否含有水和 H ₂ S?	如果两者都是, 转至表 H. 8~表 H. 13
4. 碳酸盐腐蚀开裂 建造材料是否为碳钢? 环境中是否含有 pH>7.5 的酸性污水?	如果两者都是, 转至表 H. 14 和表 H. 15
5. 连多硫酸开裂 (PTA) 建造材料是否为奥氏体不锈钢或镍合金钢? 设备是否暴露于含硫化物?	如果两者都是, 转至表 H. 16~表 H. 18
6. 氯化物应力腐蚀开裂 (CISCC) 材料是否为奥氏体不锈钢? 材料是否暴露于或可能暴露于 (也考虑了扰动和设备试压过程中所残留的) 氯化物和水? 运行温度是否在 37.78℃~148.89℃ (100 ℉~300 ℉) 之间?	如果都是, 转至表 H. 19~表 H. 21
7. 氢应力开裂 (HSC-HF, HIC/SOHIC-HF) 材料是否为碳钢或低合金钢? 设备是否暴露于氢氟酸中?	如果两者都是, 转到表 H. 22~表 H. 25

H.3 基本假设

本技术模块假设每种 SCC 机理的敏感性均可由本模块的适用章节进行确定。根据工艺、材料、制造参数将敏感性分为高、中、低三种等级。“严重程度指数”是指设备/配管开裂的敏感性 (或萌生裂纹的可能性) 和导致泄漏开裂的可能性。

本技术模块还能以一种简单的方式处理已知裂纹。设备/配管的特定裂纹或裂纹簇导致失效的可能性应采用更先进的方法或适用性评价方法进行进一步评估。

H.4 技术模块次因子 (TMSF) 的确定

确定技术模块次因子的流程见图 H.1 (a) 和 H.1 (b)。各个步骤及所需的表格将在下面进行讨论。

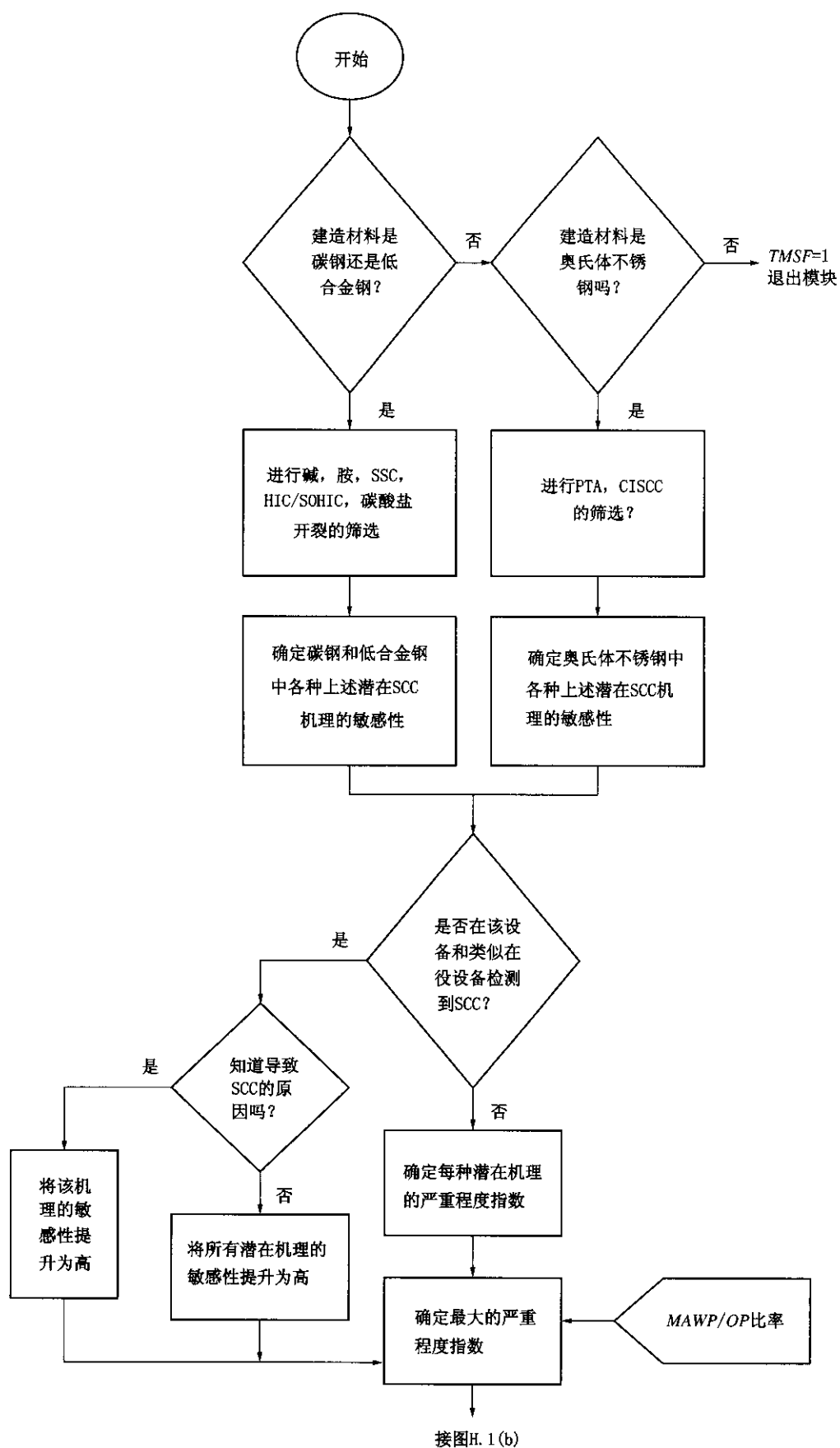


图 H.1 (a) 确定应力腐蚀开裂技术模块次因子

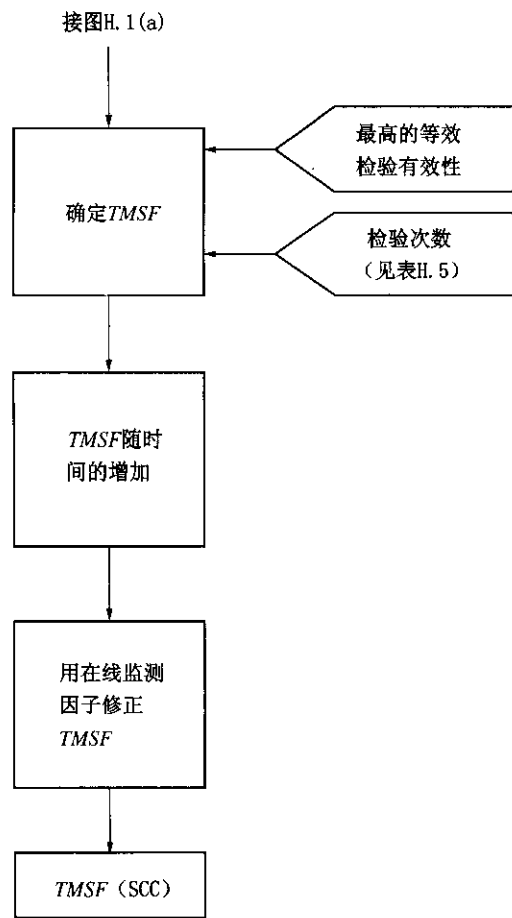


图 H.1 (b) 应力腐蚀开裂技术模块次因子的确定

H. 4. 1 技术补充的筛选问题

表 H. 2 列出的筛选问题可用于选择适用的 SCC 机理。

H. 4. 2 每种潜在 SCC 机理的敏感性确定

每种 SCC 机理的章节将确定设备可能的敏感性。

H. 4. 2. 1 存在裂纹的修正

如果设备中已经检测到 SCC，那么认为其敏感性“高”。如果检测到的 SCC 机理是已知的，则其敏感性应提升为“高”。如果检测到的 SCC 机理是未知的，则所有潜在机理的开裂敏感性都应升为“高”。

H. 4. 3 确定 SCC 的严重程度指数

将各种 SCC 机理的敏感性输入表 H. 3，并确定每种潜在/已有 SCC 机理的严重程度指数。

将在下面每种应力腐蚀开裂机理中对未经检验设备的严重程度指数进行概述。

H. 4. 3. 1 最大严重度指数

确定最大严重度指数和哪种机理将导致最大严重度指数。

H. 4. 4 检验有效性

根据检测裂纹的预期效果进行检测分级。对于某一给定的检测技术或检测技术组合，其实际效果取决于特定开裂机理的特点和其他因素。

表 H. 4A～表 H. 4F 为检验实例，包括侵入性（需要进入设备内部）和非侵入性（可以在外部执行）方法。应注意到对每种开裂机理，有效性类别会有所不同。

表 H.3 确定严重程度指数

敏感性	严重程度指数						
	碱性	胺	碳酸盐	SSC, HSC - HF	HIC/SOHIC	CISCC	PTA
高	5000	1000	1000	100	100	5000	5000
中	500	100	100	10	10	500	500
低	50	10	10	1	1	50	50
无	1	1	1	1	1	1	1

表 H.4A 碱裂检验有效性

检测有效性类别	事例：侵入性检测	事例：非侵入性检测
高度有效	对 25%~100%的焊缝/冷弯头进行湿荧光磁粉或着色渗透检测；对 25%~100%的焊缝/冷弯头进行着色渗透检测	对 25%~100%的焊缝/冷弯头进行超声波横波检测或对 50%~100%的焊缝/冷弯头进行射线检测
通常有效	对 10%~24%的焊缝/冷弯头进行的湿荧光磁粉或着色渗透检测；对 10%~24%的焊缝/冷弯头进行的着色渗透检测	对 20%~24%的焊缝/冷弯头进行超声波横波检测或对 25%~49%的焊缝/冷弯头进行的射线检测
一般有效	对少于 10%的焊缝/冷弯头进行湿荧光磁粉或着色渗透检测；对少于 10%的焊缝/冷弯头进行着色渗透检测	对少于 10%的焊缝/冷弯头进行湿荧光磁粉或着色渗透检测；对少于 25%的焊缝/冷弯头进行着色渗透检测
有效性差	目测	目测是否存在泄放
无效	不检查	不检查

表 H.4B 胺开裂和碳酸盐腐蚀开裂的检验有效性

检测有效性类别	事例：侵入型检测	事例：非侵入型检测
高度有效	对 100%的修复焊缝和 50%的其他焊缝/冷弯头进行湿荧光磁粉检测	无
通常有效	对 20%~49%的焊缝/冷弯头进行湿荧光磁粉检测	对 50%~100%的焊缝/冷弯头进行超声波横波检测；或声发射检测后再进行超声波横波检测
一般有效	对少于 20%的焊缝/冷弯头进行湿荧光磁粉检测；或对 50%~100%的焊缝/冷弯头进行干荧光磁粉检测；或对 50%~100%的焊缝/冷弯头进行着色渗透检测	对 20%~49%的焊缝/冷弯头进行超声波横波探伤检测
有效性差	对小于 50%的焊缝/冷弯头进行干荧光磁粉检测；或对小于 50%的焊缝/冷弯头进行着色渗透检测	对少于 20%的焊缝/冷弯头进行超声波横波检测；或射线照相法检测；或进行泄放目测检查
无效	目测	不检查

表 H. 4C 硫化物应力开裂和氢应力开裂检验有效性

检测有效性类别	事例：侵入型检测	事例：非侵入型检测
高度有效	对 25%~100% 的焊缝进行湿荧光磁粉检测	沿着去除焊帽后的焊缝横向和与其平行方向进行 25%~100% 超声波横波检测；或声发射检测后进行超声波横波检测
通常有效	对 10%~24% 的焊缝进行湿荧光磁粉检测；或对 25%~100% 的焊缝进行干磁粉检测；或对 25%~100% 焊缝进行着色渗透检测	对 10%~20% 的焊缝进行超声波横波检测和 50%~100% 的焊缝进行射线照相检测
一般有效	对小于 10%~24% 的焊缝进行湿荧光磁粉检测；或对 25%~100% 的焊缝进行干磁粉检测；或对 25%~100% 焊缝进行着色渗透检测	对少于 10% 的焊缝进行超声波横波检测和 20%~49% 的焊缝进行射线照相检测
有效性差	目测	对少于 20% 的焊缝进行射线检测
无效	不检查	不检查

表 H. 4D HIC/SOHIC 和 HIC/SOHIC - HF 检验有效性

检测有效性类别	事例：侵入型检测	事例：非侵入型检测
高度有效	对 50%~100% 的焊缝进行湿荧光磁粉检测，加上对亚表面裂纹进行超声波检测	无
通常有效	对 20%~49% 的焊缝进行湿荧光磁粉检测	对 20%~100% 的焊缝进行自动超声波横波检测；或进行声发射检测后再进行超声波横波检测
一般有效	对小于 20% 的焊缝进行湿荧光磁粉检测；或对 50%~100% 的焊缝进行干磁粉检测；或对 50%~100% 的焊缝进行着色渗透法检测	对少于 20% 的焊缝进行自动超声波横波检测，或对 20%~100% 的焊缝进行手动超声波横波检测
有效性差	着色渗透检测小于 50% 焊缝；目测氢鼓包	对小于 20% 的焊缝进行手动超声波横波检测
无效	不检查	射线检测

表 H. 4E 连多硫酸应力腐蚀开裂（PTA）检验有效性

检测有效性分类	事例：侵入型检测	事例：非侵入型检测
高度有效	着色渗透法（25%以上）	射线照相检测（25%以上）； 超声波横波探伤（25%以上）
通常有效	着色渗透法	射线照相检测（5%）； 超声波横波探伤（25%以上）
一般有效	着色渗透法（10%）	定点射线照相检测； 定点超声波横波探伤检测
有效性差	目测	目测是否存在泄放
无效	不检查	不检查

表 H. 4F CISCC 检验有效性

检测有效性分类	事例：侵入型检测	事例：非侵入型检测
高度有效	对 50%~100%的焊缝进行着色渗透检测	对 25%~100%的焊缝进行超声波横波检测
通常有效	对 25%~50%焊缝进行着色渗透检测	对 10%~24%的焊缝进行超声波横波检测， 对 50%~100%的焊缝进行射线检测
一般有效	对少于 25%焊缝进行着色渗透检测	对小于 10%的焊缝进行超声波横波检测，对 20%~49%的焊缝进行射线检测
有效性差	目测	目测是否存在泄放
无效	不检查	不检查

H. 4.5 技术模块次因子随时间的增长而增大

假设由于自上次检测以来设备暴露于干扰条件和其他非正常条件下等原因，开裂的可能性会随时间增长而增加；因而，TMSF 应按下列关系计算：

最终 $TMSF = TMSF \times (\text{上次开裂检验以来的年数})^{1.1}$

例如，某一设备/配管的 TMSF 值为 10，如果 5 年内没有任何检测，其值将变为 58，若 10 年内没有任何检测，其值将变为 125。此增长因子不适用于 PTA。

H. 4.6 在线监测技术模块次因子的修正

除检验之外，使用氢探针和/或关键工艺参数进行在线监测会影响 HIC/SOHIC 的敏感性。在线监测的优点在于：它可以探测在明显开裂损伤出现前由于工艺变化所引起的 SCC 敏感性改变。这种早期探测可以通过及时采取措施来减少失效的可能性。对于 HIC/SOHIC，若采用用氢探针或关键工艺参数监测时，在线监测因子为 2；若两种方法同时使用，则在线监测因子为 4。用 TMSF 除此因子。当 TMSF 为 1 时，不能采用此因子。在线监测因子不用于其他应力腐蚀开裂机理（见表 H. 5）。

H. 5 碱裂

H. 5.1 损伤描述

碱裂指在高温氢氧化钠（NaOH）情况下，金属在拉伸应力和腐蚀共同作用下的开裂。实际上，裂纹在本质上主要是晶间裂纹，以典型的网状细小裂纹在碳钢中发生。低合金铁素体钢具有类似开裂敏感性。由三个参数决定钢制件的碱裂敏感性：碱液浓度、金属壁温和拉伸应力水平。工业经验表明，一些碱裂在几天内就发生了，而有些却需要一年或更长的放置时间才能发生碱裂。增加碱液浓度或提高金属壁温可以加快开裂速度。

图 H. 3 提供了碳钢碱裂敏感性的信息。在金属温度小于 46.11℃（115 ℉）时，钢不会出现碱裂。在 46.11℃~82.22℃（115 ℉~180 ℉）范围之间，碱裂敏感性是碱液浓度的函数。超过 82.22℃（180 ℉），碱裂敏感性也是碱液浓度的函数，此时，所有超过 5%（质量分数）碱浓度都有很高的开裂倾向。尽管在碱液浓度小于 5%时的碱裂敏感性非常低，但是在高温情况时（接近沸腾）还是会产生局部高浓度区，从而增大了开裂的敏感性。该现象的明显历史案例包括把碱液加到蒸馏塔以控制 pH 值时的碱裂，或者当垫片泄放液使螺栓暴露于给水泄放液时，使锅炉给水设备或配管的螺栓碱裂。温度主要是考虑实际金属壁温，而不仅仅是正常工艺温度。还有许多仍然含碱液的伴热或者蒸气泄出导致“环境温度”碱性设备碱裂的历史案例。

表 H.5 技术模块次因子的确定

检测编号	1				2				3				4				5				6			
	检验有效性				检验有效性				检验有效性				检验有效性				检验有效性				检验有效性			
	有效	一般	通常	高度	有效	一般	通常	高度	有效	一般	通常	高度	有效	一般	通常	高度	有效	一般	通常	高度	有效	一般	通常	高度
没有检验	性差	有效	有效	有效	性差	有效	有效	有效	性差	有效	有效	有效	性差	有效	有效	有效	性差	有效	有效	有效	性差	有效	有效	有效
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	8	3	1	1	6	2	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	40	17	5	3	30	10	2	1	20	5	1	1	0	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1
100	80	33	10	5	60	20	4	1	40	10	2	1	20	2	1	1	10	2	1	1	5	1	1	1
500	400	170	50	25	300	100	20	5	200	50	8	1	100	12	2	1	50	10	1	1	25	5	1	1
1000	800	330	100	50	600	200	40	10	400	100	16	2	200	50	5	1	100	25	2	1	50	10	1	1
5000	4000	1670	500	250	3000	1000	250	50	2000	500	80	10	1000	250	25	2	500	125	5	1	250	50	2	1

焊接或弯曲等制造方法的残余应力水平高,使得焊接或冷弯的碳钢和低合金钢组件对碱裂敏感。使用后续的消除应力热处理(如焊后热处理)是一种已被证实的防止碱裂方法。每英寸(in)厚度大约在621.11℃(1150 ℉)下进行1h(最少1h)的热处理被认为是一种有效防止碳钢碱裂的消除应力热处理方法。

H. 5.2 基本数据

表 H. 6 中列出了确定碳钢和低合金铁素体钢设备和配管的碱裂敏感性所需数据。如果无法知道准确的工艺数据,则需与知识丰富的工艺工程师联系以获得最佳的估计。

H. 5.3 碱腐蚀开裂敏感性的确定

将表 H. 6 中的基本数据输入图 H. 2 的决策树来确定碱腐蚀开裂敏感性。

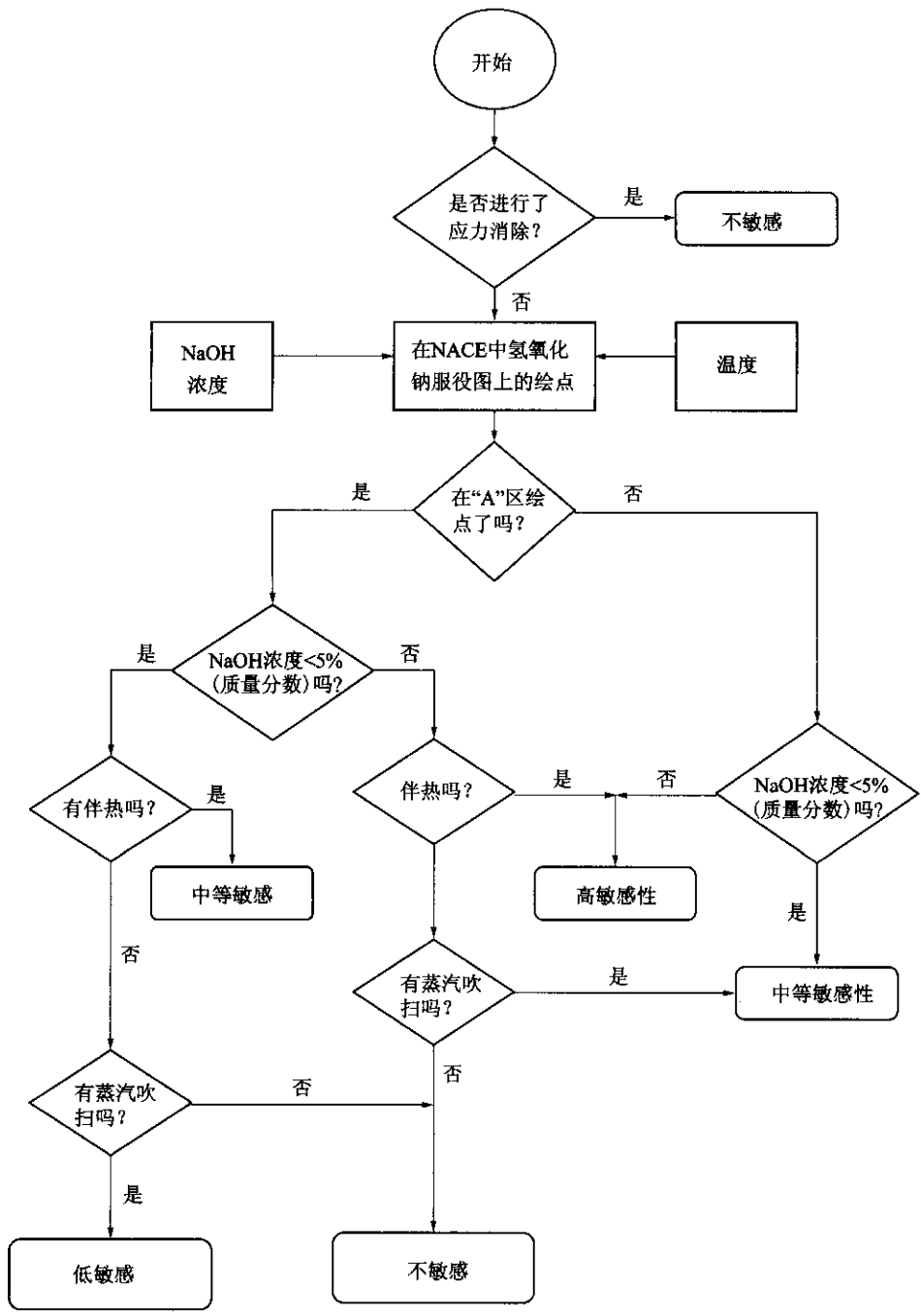


图 H. 2 碱裂敏感性的确定

表 H.6 碱裂分析所需的基本数据

基本数据	说 明
NaOH 浓度, %	确定该设备/配管中被处理碱液的浓度。要考虑水的加热或闪蒸是否会产生较高的浓度
最高工艺温度, °F	确定该设备/配管中的最高工艺温度。考虑在碱液注入点因混合而产生的局部受热
伴热? (是或否)	确定设备/配管是否是蒸气伴热或电伴热 (如防冻保护)
吹扫? (是或否)	确定设备/配管是否用水冲洗以去除残余碱液前已排出蒸气
消除应力? (是或否)	确定设备/配管是否在焊接后和冷成型后进行了适当地应力消除

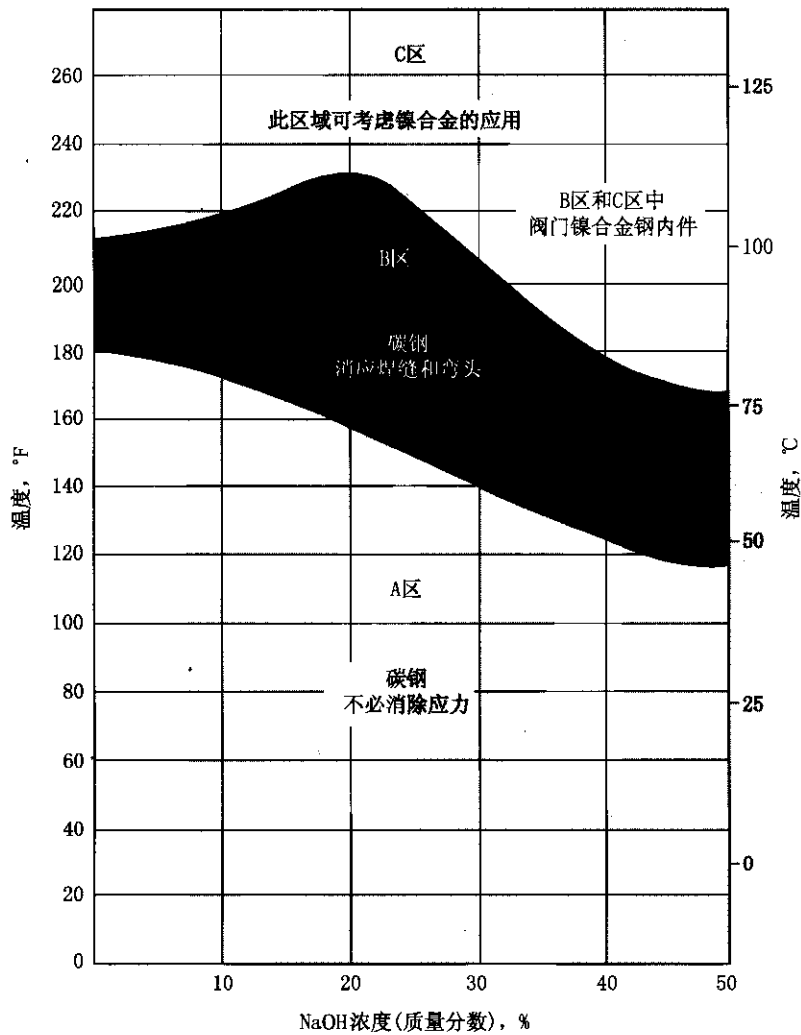


图 H.3 氢氧化钠服役图

H.6 胺腐蚀开裂

H.6.1 损伤描述

胺腐蚀开裂指在高温烷醇胺水溶液中，金属在拉伸应力和腐蚀共同作用下产生的开裂。裂纹实际

上主要是沿晶的，通常发生在碳钢中，并以细小的网状裂纹和裂纹间充满腐蚀物形式存在。低合金铁素体钢也具有胺裂敏感性。一般在使用烷醇胺水溶液去除各种气体或液态碳氢化合物流体中酸性气体（诸如 H_2S 或 CO_2 等）的胺处理装置中观察到胺裂。由四个参数来评价钢构件的胺裂敏感性：胺的种类、胺液成分、金属温度和拉伸应力水平。

在胺的种类方面：NACE 调查结果表明胺腐蚀开裂最常见于乙醇胺（MEA）和二异丙醇胺（DI-PA）装置，其次是二乙醇胺（DEA）装置中，较少出现在甲基二乙醇胺（MDEA）、硫醇和二甘醇胺（DGA）装置。

研究结论为：开裂在狭窄的电化学电势范围内发生，此电势很大程度上取决于胺液成分。碳酸盐是关键的溶液杂质，其他杂质（如氯化物、氰化物等）也影响开裂敏感性。尽管已经理解了这个机理，但是还不容易测得在役设备/配管的电化学电势。在 MEA 溶液中，胺浓度是开裂敏感性的一个因素；一些结果表明，在 15%~35% 胺浓度范围内，MEA 溶液的开裂敏感性较高。目前还不完全了解其他胺溶液中的这一关系；但值得注意的是，在通常使用较高胺浓度的 MDEA 溶液和硫醇装置中，开裂敏感性较低。

在胺液成分方面：开裂一般发生在强碱且含有很低浓度酸性气体的贫烷醇胺溶液中。在新鲜胺液（即那些没有暴露于酸性气体的胺液）中不会发生胺裂。胺腐蚀开裂不大可能出现在含有高浓度酸性气体的富烷醇胺溶液中。在富胺溶液中，更为常见的是其他形式的开裂机理。

在温度方面：高温下胺裂敏感性通常较高；关键考虑实际金属壁温，而不仅仅是正常工艺温度。开裂发生在这样一些设备和配管：通常在低温下运行，但在用水冲洗以去除残留的胺溶液之前已经有伴热或吹扫。

在拉伸应力水平方面：焊接和冷弯制造过程有高的残余应力，焊接和冷弯的碳钢和低合金钢制件对胺腐蚀开裂敏感。使用后续的消除应力热处理（如焊后热处理）是一种已被证实的防止胺腐蚀开裂方法。每英寸（in）厚度在大约在 $621.11^{\circ}C$ （ $1150^{\circ}F$ ）下进行 1h（最少 1h）的热处理被认为是一种有效防止碳钢胺腐蚀开裂的消除应力热处理方法。

注：胺设备中的其他开裂形式已有报道。它们大部分发生在暴露于富烷醇胺溶液的设备和配管中，且有典型的氢损伤形式 [譬如硫化物应力腐蚀（SSC），氢致开裂（HIC）和应力诱导氢致开裂（SOHIC）]。这些形式的开裂不包括在本部分，但在本模块的其他部分有所涉及。

H. 6.2 基本数据

表 H. 7 列出了确定碳钢和低合金铁素体钢设备和配管对胺腐蚀开裂敏感性所需的数据。如果不知道准确的工艺参数，则可通过请教知识丰富的工艺工程师来获得最佳的估计。

表 H. 7 胺腐蚀开裂分析所需的基本数据

基本数据	说 明
胺的类型	确定该设备/配管处理的是哪种类型的胺
胺液成分	确定该设备/配管所处理胺液的成分。新鲜胺未暴露于 H_2S 或 CO_2 。贫胺含有低浓度的 H_2S 或 CO_2 ，富胺含有高浓度的 H_2S 或 CO_2 。对同时暴露于贫胺和富胺的设备（比如，胺压缩机和再生器），表示为贫胺
最高工艺温度， $^{\circ}F$	确定该设备/配管的最高工艺温度
伴热？（是或否）	确定设备/配管是蒸气伴热还是电伴热（如防冻保护）
吹扫？（是或否）	确定设备/配管是否用水冲洗以去除残留胺之前排掉蒸气
是否消除应力？（是或否）	确定设备和配管是否在焊接和冷成型后进行了适当的应力消除热处理

H. 6.3 确定胺腐蚀开裂的敏感性

用表 H. 7 中的基本数据输入图 H. 4 中流程来确定胺腐蚀开裂的敏感性。

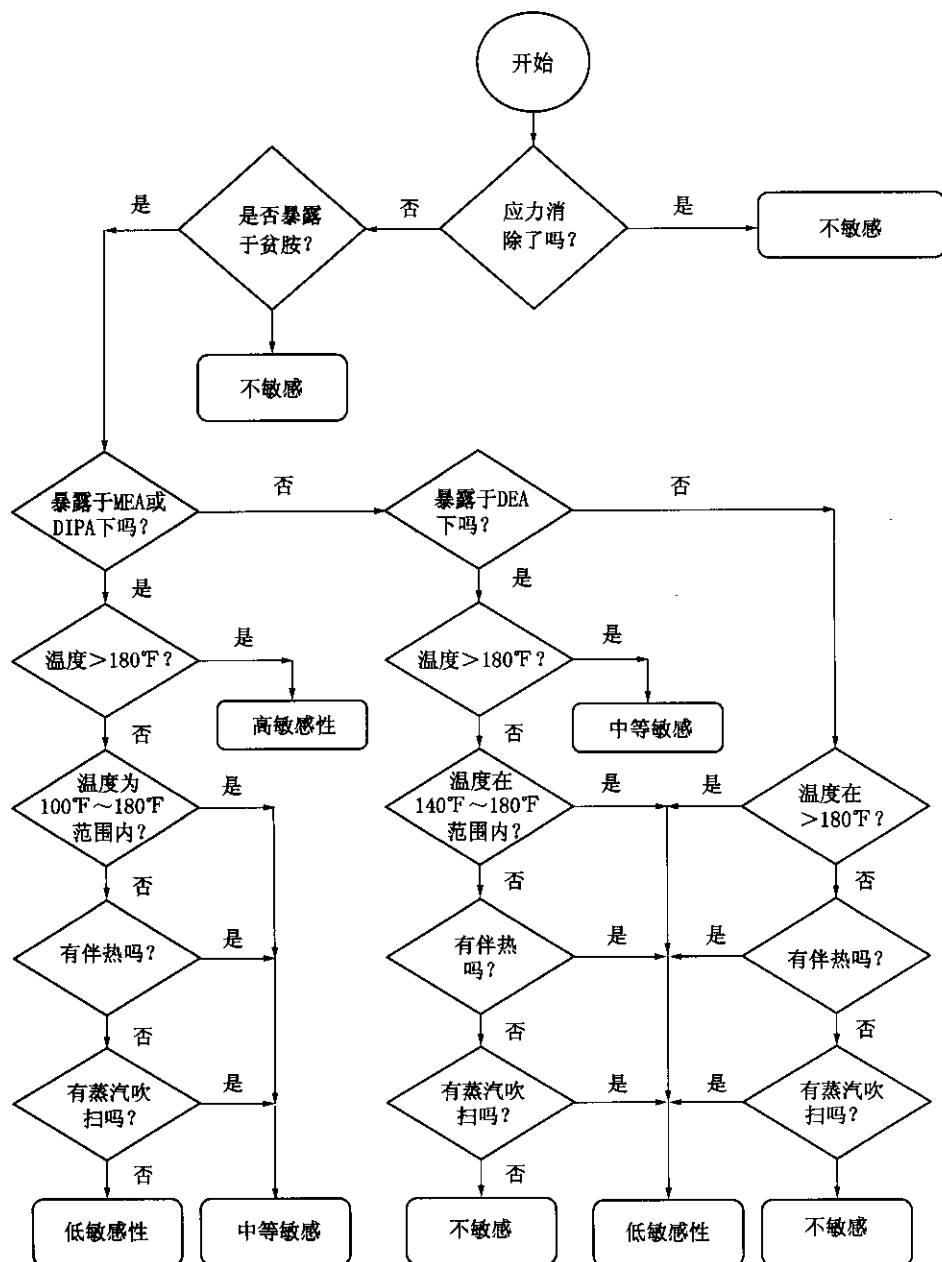


图 H. 4 胺腐蚀开裂敏感性的确定

H. 7 硫化物应力腐蚀开裂 (SSC)

H. 7.1 损伤描述

硫化物腐蚀开裂指在有硫化氢和水时，金属在拉伸应力和腐蚀共同作用下的开裂。SSC 是一种由于金属表面上发生的硫化物腐蚀过程产生的吸附氢原子而造成的氢应力开裂形式。SSC 通常更容易发生在高强度（高硬度）钢的硬质焊接熔敷金属或低强钢的硬质热影响区。

SCC 的敏感性与渗入钢内的氢量有关，而氢渗透通量主要与水的 pH 值和 H_2S 含量这两个环境参数相关。发现钢中的氢通量典型在近中性 pH 溶液中最低，而在 pH 值较低和较高的溶液中都较

高。较低 pH 值下的腐蚀由 H_2S 引起，而在高 pH 值下的腐蚀则由高浓度的二硫化物离子引起。高 pH 值溶液中存在的氰化物可加剧氢向钢中的渗透。已知钢材的 SSC 敏感性随 H_2S 含量（例如在气相中的 H_2S 分压，或水相中的 H_2S 含量）增加而增大。目前已经发现水中低于 $1g/m^3$ (ppm) 的 H_2S 浓度也足以引起 SSC。

SSC 的敏感性主要与材料的硬度和应力水平这两个材料参数有关。钢的硬度增加也会导致其 SCC 敏感性增加。由于碳钢的强度（硬度）较低，因此通常不用担心用在炼油厂湿硫化氢环境下的碳钢压力容器和配管出现 SCC。但是，焊接熔敷金属和热影响区可能含有高硬度区和焊接产生的高残余应力。与焊缝相关的高残余拉伸应力增加钢的 SSC 敏感性。焊后热处理能显著减少残余应力，并能调和（软化）焊缝溶敷金属和热影响区。在大约 $621.11^\circ C$ ($1150^\circ F$) 温度下对每英寸 (in) 厚度钢板保温 1h（最少 1h）的焊后热处理方法可有效降低碳钢焊件的 SCC 敏感性。低合金钢则需要更高一点的热处理温度。

H. 7.2 基本数据

表 H. 8 中所列数据用来确定碳钢和铁素体低合金钢设备和配管的硫化物应力腐蚀开裂敏感性。如果不知道准确的工艺数据，则需通过咨询知识丰富的工艺工程师来获得最佳的估计。

H. 7.3 确定环境苛刻性

如果没有液态水存在，则认为设备/配管对 SSC 不敏感。如果有液态水存在，则通过表 H. 8 里水中的 H_2S 含量和其 pH 值来估计环境苛刻性（用表 H. 9 中的氢通量电位水平表示）。

H. 7.4 SSC 敏感性的确定

根据表 H. 9 确定的环境苛刻性以及从表 H. 8 基本数据得到的最大布氏硬度和焊件焊后热处理情况，使用表 H. 10 来确定对 SSC 的敏感性。图 H. 5 给出了确定硫化物应力腐蚀开裂的敏感性所需的流程。

表 H. 8 分析硫化物应力腐蚀所需的基本数据

基本数据	说 明
是否存在水（是或否）	确定设备和配管中是否有自由水。不仅要考虑正常运行条件，还要考虑启动、停车及工艺波动等情况
水中的 H_2S 含量	确定水相的 H_2S 含量。如果不易取得分析结果，可以用 Petrie&Moore 方法来估算
水的 pH 值	确定水的 pH 值。如果不易取得分析结果，则由经验丰富的工艺工程师来估计
是否存在氰化物（是或否）	通过取样和/或现场分析确定是否存在氰化物。主要考虑正常运行和波动情况，也要考虑启动、停车条件
最大布氏硬度	确定钢制设备和配管的焊缝上实测的最大布氏硬度。报告实测的布氏硬度读数，而不需进行更精细技术（如维氏、努氏等）的读数转换。当不能获得实际读数时，则可使用制造规范许可的最大允许硬度
焊件是否经过 PWHT（是或否）	确定所有设备/配管焊件是否在焊接后经过了适当地焊后热处理

H. 8 硫化氢环境下氢致开裂和应力诱导氢致开裂 (HIC/SOHIC - H_2S)

H. 8.1 损伤描述

氢致开裂是指将金属中邻近平面上的氢鼓泡连接而形成的阶梯形内部裂纹或者突出到金属表面的裂纹。HIC 的形成不需要外部施加应力。开裂的驱动力是氢鼓泡内压力累积所造成的氢鼓泡周边高应力。这些高应力场的相互作用导致裂纹扩展而使不同平面上的鼓泡相连。

表 H.9 环境对 SCC 苛刻性

水的 pH 值	水的 H ₂ S 含量, g/m ³ (ppm)			
	<50	50~1000	1000~10000	>10000
<5.5	低	中	高	高
5.5~7.5	低	低	低	中
7.6~8.3	低	中	中	中
8.4~8.9	低	中	中 ^a	高 ^a
>9.0	低	中	高 ^a	高 ^a

^a如果氰化物存在时, pH 值大于 8.3 且硫化氢浓度大于 1000g/m³ (ppm) 时应力腐蚀开裂可能性增加一个等级。

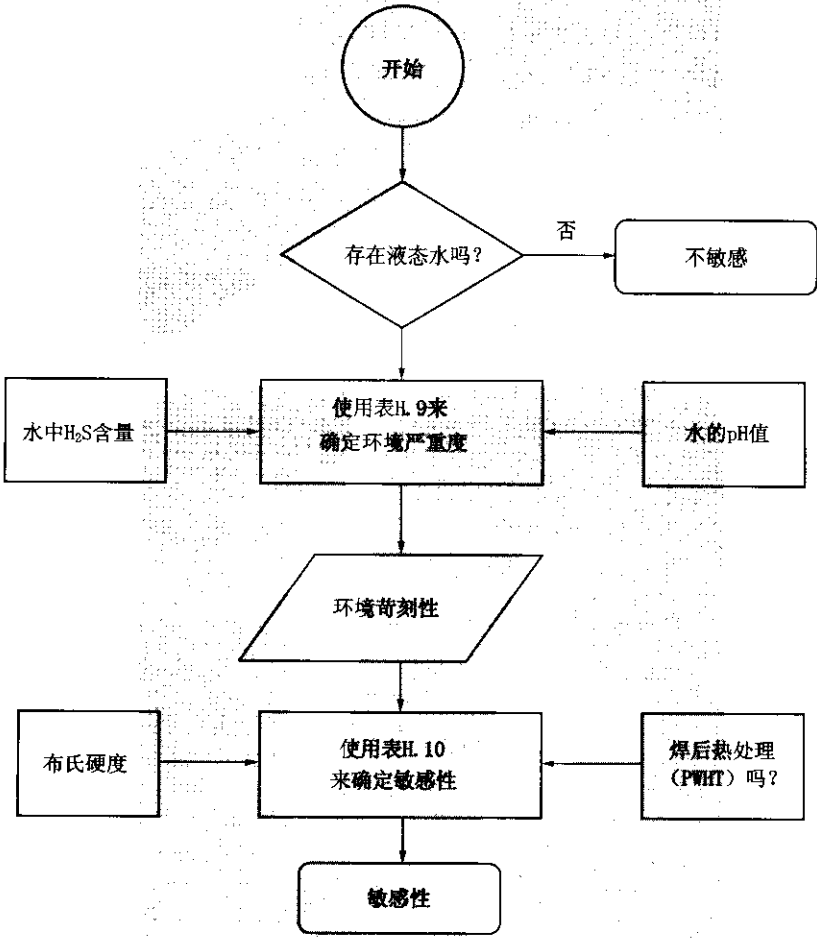


图 H.5 硫化物腐蚀应力开裂敏感性的确定

鼓泡内压力的累积与钢中的氢渗透通量有关。钢中的氢来自钢与湿硫化氢间的腐蚀反应。腐蚀反应的发生应有液态水存在, 生成的氢通量主要与“pH 值和水中的 H₂S 含量”这两个环境参数有关。通常, 钢在近中性 pH 溶液中的氢通量最低, 而在 pH 值较低和较高的溶液中氢通量有所增加。在较低 pH 值下的腐蚀由 H₂S 引起, 而在高 pH 值下的腐蚀源于高浓度的二硫化物离子。高 pH 值下的氰化物可进一步加剧氢向钢中的渗透。已知氢渗透随 H₂S 含量 (如气相中的 H₂S 分压, 或水相中的 H₂S 含量) 增加而增大。水中含 50g/m³ (ppm) 的低 H₂S 也足以引起 HIC。

表 H. 10 SSC 敏感性

环境苛刻性	焊接态最大布氏硬度 ^a			PWHT 最大布氏硬度 ^a		
	<200	200~237	>237	<200	200~237	>237
高	低	中	高	无	低	中
中	低	中	高	无	无	低
低	低	低	中	无	无	无

^a实测的布氏硬度，而不是从更精细的方法技术（如维氏、努多 Knoop 等）转换而得到的硬度。

氢鼓泡是存在于钢中不连续处（如孔隙、夹渣、分层、硫化物夹渣）所形成平面的充满氢的气孔。鼓泡通常发生在轧制钢板中，特别是那些由于拉长硫化物夹渣所产生的带状微结构钢板。因此氢鼓泡和 HIC 敏感性主要与钢板质量有关（比如钢板中不连续处的数量、大小和形状）。在这方面，钢中的硫含量是一个关键的材料参数。降低钢的硫含量可以降低钢的氢鼓泡和 HIC 敏感性。因为加入钙有助于控制硫化物夹渣形状，所以钙是有益元素。

SOHIC 是指由氢致开裂连接起来的小鼓泡堆垛簇。由于高度局部化的拉伸应力，SOHIC 沿壁厚方向的平行排列。SOHIC 是 HIC 的一个特殊形式；它通常出现在接近于焊缝热影响区的母材上，这个地方由于施加应力的附加效应（来自内压力）和焊接的残余应力作用，其应力最高。同 HIC 一样，钢板的质量是 SOHIC 敏感性的一个关键参数。另外，PWHT 可以降低残余应力，但不能消除 SOHIC 的发生及其严重度。施加的应力水平也影响 SOHIC 的发生和其严重度。虽然 HIC/SOHIC 在钢板制件中更加显著，但在钢管制件一定范围也观察到了 SOHIC，通常出现在更严重的充氢环境中。

H. 8. 2 基本数据

表 H. 11 中所列数据用于估计碳钢设备和配管对 HIC/SOHIC 敏感性。如果不知道工艺参数，则可通过请教知识丰富的工艺工程师来获得最佳的估计。如果钢板中的硫含量未知，则也需请教知识丰富的材料工程师来估计钢的质量。

表 H. 11 HIC/SOHIC - H₂S 分析所需的基本数据

基本数据	说 明
是否有水存在（是或否）	确定设备和配管中是否存在液态水。不仅要考虑正常运行条件，还应考虑启动、停车、工艺波动等情况
水中是否存在 H ₂ S	确定水相中的 H ₂ S 含量。如果不容易得到分析结果，可以用 Petrie&Moore 方法来估算
水的 pH 值	确定水的 pH 值。如果不容易得到分析结果，则由一个经验丰富的工艺工程师来估计
是否有氰化物存在（是或否）	通过取样和（或）现场分析确定是否存在氰化物。不仅要考虑正常运行条件，还要考虑启动、停车和工艺波动等情况
钢板中的硫含量	确定用于制造设备/配管钢的硫含量。该数据可从设备文件中的 MTR 得到。如果没有，可咨询材料工程师来从 ASME 或 ASME 的 U - 1 表所列钢材的规范进行估计
钢产品形式（板材或管材）	确定使用何种产品形式的钢材来制造设备/配管。大多数设备用轧制和焊接钢板（如 A285，A515，A516 等）制造，但是某些小直径设备则用钢管和管件进行制造。大部分小直径配管用钢管和管件（如 A105，A234 等）制造，但大部分大直径配管（直径大于 16in 的管）用轧制和焊接钢板制造
是否进行焊接的 PWHT（是或否）	确定所有的设备/配管焊件是否在焊接后进行了适当地焊后热处理

H. 8.3 确定环境严重程度

如果没有水存在，则认为设备/配管对 SCC/SOHIC 没有敏感性。如果有水存在，则用表 H. 12 基本数据中的水中 H₂S 含量和其 pH 值数据估算环境苛刻性（用表 H. 13 中的氢通量电势水平表示）。

如果有氰化物存在，在 pH>8.3 和 H₂S 浓度大于 1000g/m³（ppm）时，将 SCC 敏感性增加。

H. 8.4 确定 HIC/SOHIC 的敏感性

对于用轧制和焊接钢板制造的设备和大直径配管，根据表 H. 12 确定的环境苛刻性和表 H. 11 中列出的关于钢板中硫化物含量及焊后热处理的基本数据，使用表 H. 13 来确定 HIC/SOHIC 敏感性。通常认为由钢管和管件制成的小直径设备/配管的 HIC/SOHIC 敏感性较低；除非没有对其进行焊后热处理和放置于高苛刻性环境，这种情况下应认为其具有中敏感性。图 H. 6 列出了确定 HIC/SOHIC 敏感性的流程。

表 H. 12 环境对 HIC/SOHIC 苛刻性

水的 pH 值	H ₂ S 浓度, g/m ³ (ppm)			
	<50	50~1000	1000~10000	>10000
<5.5	低	中	高	高
5.5~7.5	低	低	低	中
7.6~8.3	低	中	中	中
8.4~8.9	低	中	中 ^a	高 ^a
>9.0	低	中	高 ^a	高 ^a
^a 当有氰化物存在且 pH 值>8.3 和 H ₂ S 浓度高于 1000g/m ³ （ppm）时，将 HIC/SOHIC 敏感性增加一个类别。				

表 H. 13 HIC/SOHIC 敏感性

环境苛刻性	高硫钢 ^a 硫含量 S>0.01%		低硫钢 ^b 硫含量 S=0.002%~0.01%		超低硫钢 ^c 硫含量 S<0.002%	
	焊接态	焊后热处理	焊接态	焊后热处理	焊接态	焊后热处理
高	高	高	高	中	中	低
中	高	中	中	低	低	低
低	中	低	低	低	无	无
^a 典型情况包括 A70, A201, A212, A285, A515 和 1990 年以前大多数 A516 钢。 ^b 典型情况包括 1980 年的添加钙的早期 A516（HIC）钢。 ^c 典型情况包括 1990 年的后期 A516（HIC）钢。						

H. 9 碳酸盐腐蚀开裂

H. 9.1 损伤描述

碳酸盐腐蚀开裂是指含中~高浓度碳酸盐的碱性酸水环境中，金属在拉伸应力和腐蚀共同作用下的开裂。裂纹本质上主要是沿晶的；通常发生在碳钢焊接件中，并以很细的网状裂纹存在，而且裂纹中充满了氧化物。碳酸盐腐蚀开裂通常沿着与邻近母材焊缝平行的方向扩展，但有时也发生在焊缝熔敷金属或热影响区。在钢材表面观察到的裂纹形状有时被描述成小裂纹的蛛网状，这种小裂纹常常起源于或与焊接缺陷相连，该焊接缺陷服役于局部应力集中区。

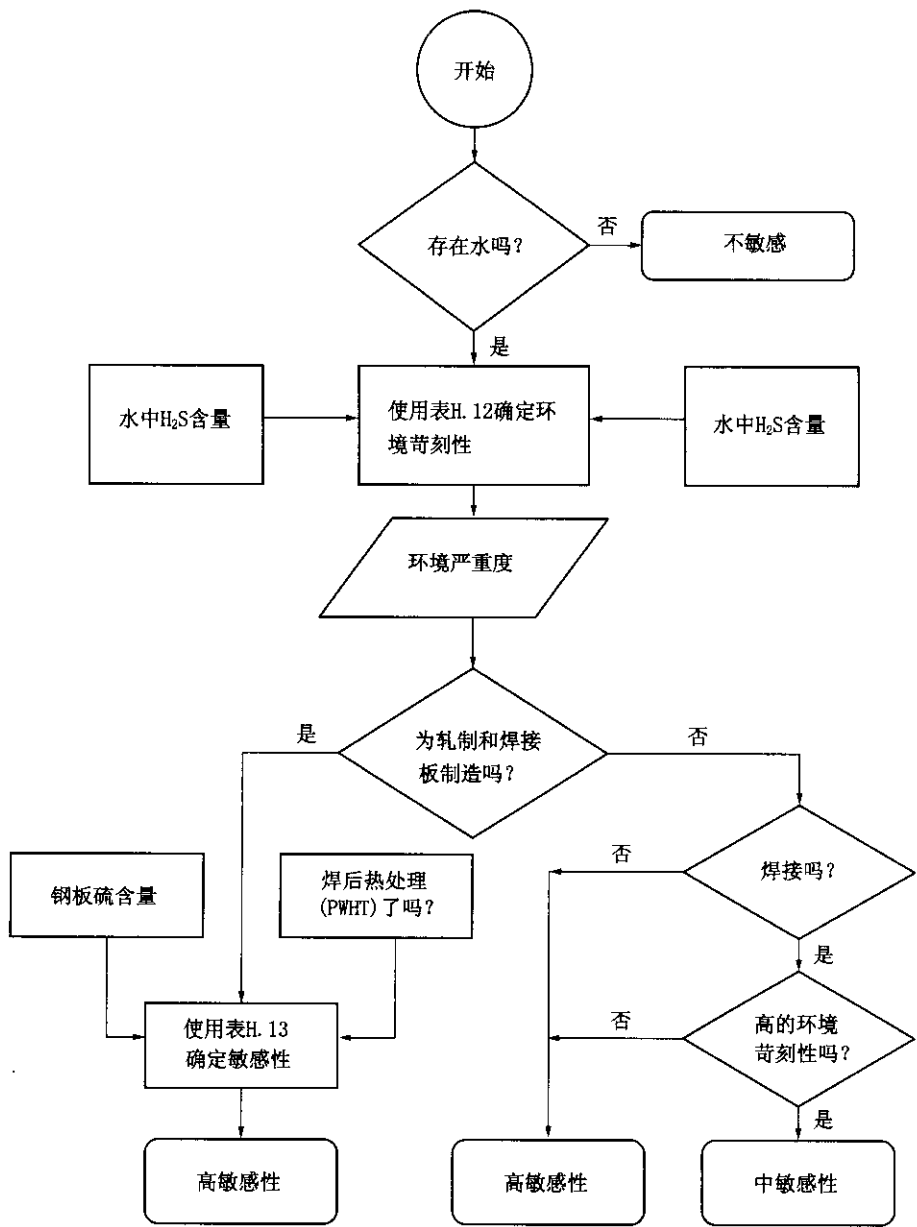


图 H.6 确定对 HIC/SOHIC 的敏感性

碳酸盐腐蚀开裂普遍出现在催化裂化装置主分馏塔塔顶冷凝回流系统、下游湿气压缩系统和从这些区域流出的酸性水系统中。假设有酸性水存在，可用三个关键参数来评估钢制件的碳酸盐腐蚀敏感性：酸性水的 pH 值、酸性水中碳酸盐浓度和拉伸应力水平。

研究结论认为，裂纹发生在一个狭窄的电化学电势范围内，此电化学电势取决于酸性水的成分。在碱性酸性水存在中～高浓度碳酸盐经常产生一个钢电化学电势，它处在发生碳酸盐腐蚀开裂的狭窄范围内。酸性水中另外一种常见的污染物是氰化物，它影响开裂敏感性。尽管已经理解这个机理，但是可能不容易测得在役设备和配管的电化学电势。因此，酸性水的 pH 值和碳酸盐浓度是判定影响钢制件碳酸盐腐蚀开裂敏感性的关键环境参数。一些文献中对许多装置的调查报告结果显示：开裂的敏感性随 pH 值和碳酸盐浓度的增加而增加。

至于拉伸应力水平，因焊接或弯曲这些制造方法所存在的高残余应力，焊接态或弯曲态碳钢制作件对碳酸盐应力腐蚀敏感。应对制成后的焊接或弯曲碳钢制作件进行消除应力热处理。焊后热处理就是

一种有效防止碳酸盐腐蚀开裂的方法。每英寸 (in) 厚度制件在大约 621.11℃ (1150 ℉) 下保温 1h (最少 1h) 的热处理方法是一种有效消除应力热处理方法, 从而防止碳钢碳酸盐腐蚀开裂。

H.9.2 基本数据

表 H. 14 中所列数据用来确定碳钢设备和配管对碳酸盐腐蚀开裂敏感性。如果不知道准确的工艺参数, 则应向知识丰富的工艺工程师咨询以获得最佳估计。

H.9.3 确定碳酸盐腐蚀开裂的敏感性

如果设备/配管经过了适当地应力消除, 则可认为它对碳酸盐腐蚀开裂不敏感。如果没有液态水存在, 或水相中 H_2S 含量小于 $50\text{g}/\text{m}^3$ (ppm), 则认为此设备/配管没有敏感性。如果设备/配管中含有 H_2S 大于 $50\text{g}/\text{m}^3$ (ppm) 或 $\text{pH} \geq 7.6$ 的水相, 则认为此设备和配管有敏感性。根据表 H. 14 基本数据与水相中的 pH 值和碳酸盐浓度的基本数据, 使用表 H. 15 来确定碳酸盐腐蚀开裂的敏感性。图 H. 7 显示出了关于确定碳酸盐腐蚀开裂敏感性所需的流程。

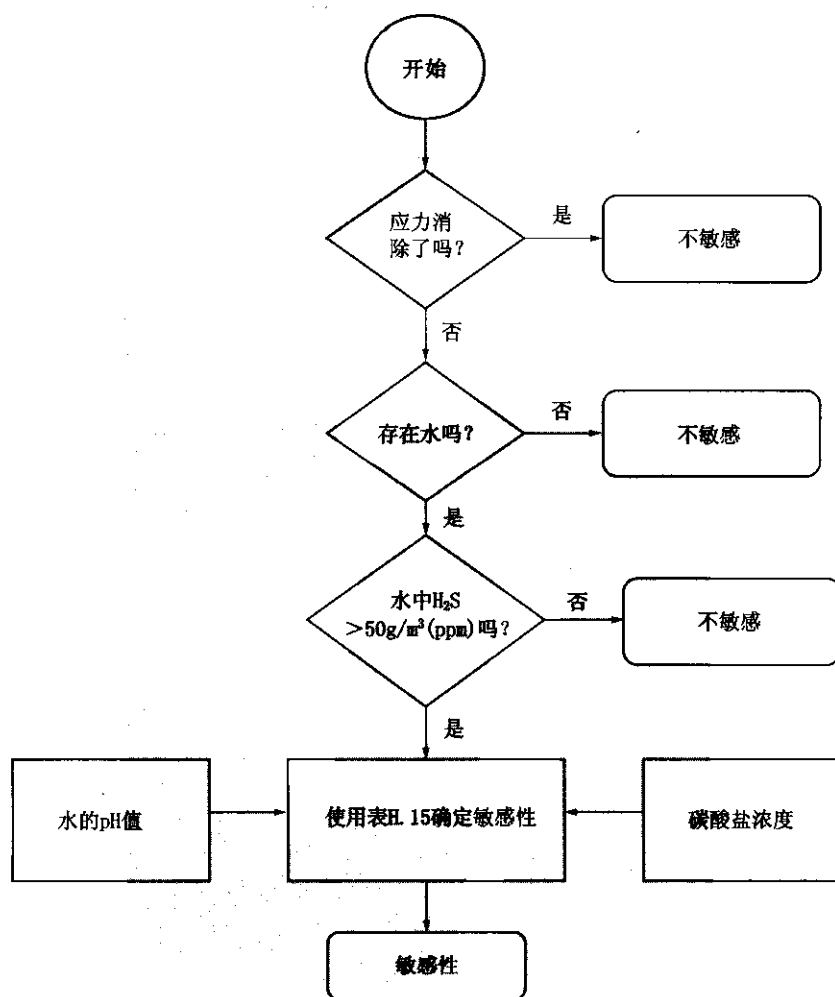


图 H. 7 碳酸盐开裂敏感性确定

H.10 连多硫酸腐蚀开裂 (PTA)

H.10.1 损伤描述

连多硫酸 (PTA) 和亚硫酸是在炼油工业, 尤其在催化裂化、脱硫塔、加氢裂化装置和催化重整工艺中主要考虑的腐蚀因素。当设备和/或配管暴露在空气和湿气时, 这些络酸在停车 (或环境)

条件下会形成含硫沉积物。酸性环境加上敏感建造材料处于敏化或焊接态条件，导致迅速地沿晶腐蚀和开裂。根据 NACE RP 0170，减少或消除 PTA 的方法包括在停车和暴露于空气后，立即用碱或纯碱溶液冲洗设备以中和硫化物，或在停车期间用干氮气吹扫以防止暴露于空气中。

表 H.14 碳酸盐腐蚀开裂分析所需的基本数据

基本数据	说 明
是否有水存在（是或否）	确定是否有水存在于设备/配管中。不仅要考虑正常运行条件，还要考虑启动、停车及工艺波动等情况
水中含有 50g/m ³ （ppm）以上的 H ₂ S（是或否）	确定该设备/配管中的水相是否含有 50g/m ³ （ppm）或以上的 H ₂ S。如果难以获得准确的数据，则应由一位知识丰富的工艺工程师来估计
水中的碳酸盐浓度	确定设备/配管的水相所含有的碳酸盐的浓度。如果难以获得准确的数据，则应由一位知识丰富的工艺工程师来估计
水的 pH 值	确定水的 pH 值。如果分析结果难以得到，则应由一位知识丰富的工艺工程师来估计
应力消除（是或否）	确定设备/配管在焊接和冷成型后是否经过适当的消除应力处理

表 H.15 碳酸盐腐蚀敏感性

水的 pH 值	水中碳酸盐浓度，g/m ³ （ppm）			
	<100	100~500	>500~1000	>1000
7.6~8.3	低	低	低	中
8.4~8.9	低	低	中	高
9.0	低	中	高	高

PTA 和亚硫酸会导致敏化的奥氏体不锈钢和镍基合金发生应力腐蚀开裂（SCC）。裂纹总是为沿晶型；裂纹萌生和扩展只需要相对低的拉伸应力。焊接态普碳或高碳不锈钢（如 304/304H 和 316/316H）的焊缝热影响区对 SCC 特别敏感。低碳钢（<0.03%C）在温度低于 426.67℃（800 ℉）时敏感性较低。化学稳定处理的不锈钢（如 321 和 347）对 PTA 敏感性较低，特别是在它们经热稳定处理的情况下。

H.10.2 基本数据

表 H.16 中所列数据用来确定碳钢设备或配管对 PTA 的敏感性。如果不知道准确工艺数据，则应咨询一位知识丰富的工艺工程师以获得最佳的估计。

表 H.16 连多硫酸腐蚀开裂分析所需的基本数据

基本数据	说 明
建造材料	确定设备/配管的建造材料
热历史（固溶退火、焊前稳定处理、焊后稳定处理）	确定材料的热历史。特别要考虑全部焊接后是否进行了热稳定化热处理
最高运行温度，℉	确定设备/配管的最高运行温度。考虑任何高温暴露，如脱焦等情况
是否存在硫化物、湿气和氧；运行期间？（是或否） 停车期间？（是或否）	确定设备/配管中是否存在这些组分。如不肯定，应咨询工艺工程师。 考虑在停车期间，硫化物环境中的高温设备/配管是否向环境敞开
采用了停工保护吗？（是或否）	确定是否已经按 NACE RP 0170 要求，提供了 PTA 的停工保护。可能包括苏打粉冲洗、冲氮或除湿

H.10.3 确定 PTA 的 SCC 敏感性

如果工艺温度小于或等于 426.7℃ (800 ℉)，则使用表 H.17 来确定敏感性。如果工艺温度大于 426.67℃ (800 ℉)，则使用表 H.18 来确定敏感性。图 H.8 显示出了确定 PTA 敏感性的流程。

表 H.17 PTA 敏感性——运行温度等于 426.67℃ (800 ℉)

	固溶退火 (默认)	焊前稳定处理	焊后稳定处理
所有普通 300 系列不锈钢及 600 和 800 系合金	中	—	—
H 级 300 系列不锈钢 L 级 300 系列不锈钢	高 低	— —	— —
321 不锈钢	中	中	低
347 不锈钢、20 合金、625 合金、所有奥氏体堆焊层	低	低	低
注：如果工艺运行温度小于 426.67℃ (800 ℉)，则敏化仅出现在焊接态条件。如果工艺运行温度大于 426.67℃ (800 ℉)，则敏化可能发生在运行期间。			

表 H.18 PTA 敏感性——运行温度大于 426.67℃ (800 ℉)

	固溶退火	焊前稳定处理	焊后稳定处理
所有普通 300 系列不锈钢及 600 和 800 系合金	高	—	—
H 级 300 系列不锈钢 L 级 300 系列不锈钢	高 中	— —	— —
321 不锈钢	高	高	低
347 不锈钢、20 合金、625 合金、所有奥氏体堆焊层	中	低	低

H.11 氯化物应力腐蚀开裂 (CISCC)**H.11.1 损伤描述**

奥氏体不锈钢的氯化物应力腐蚀能在含有氯化物的水环境中发生。CISCC 敏感性取决于氯离子浓度、温度及表 H.19 中列出的其他因素。应强调的是，由于部分水汽化，在润湿或干燥条件下测得的水中氯化物的浓度会比本体溶液浓度高。这类汽化可增加 CISCC 的敏感性。CISCC 可能更易发生在金属温度高于 65.56℃ (150 ℉) 条件下。炼油厂中氯化物的主要来源：

- 原油、产出水和压载水 (ballast water) 的氯盐。
- 自工艺流体的冷凝水 (工艺水)。
- 锅炉给水和汽提系统。
- 催化剂。
- 保温材料。
- 来自水压试验用水和其他制造过程的残余物。

g) 含有机或无机氯化物的化学烟尘。

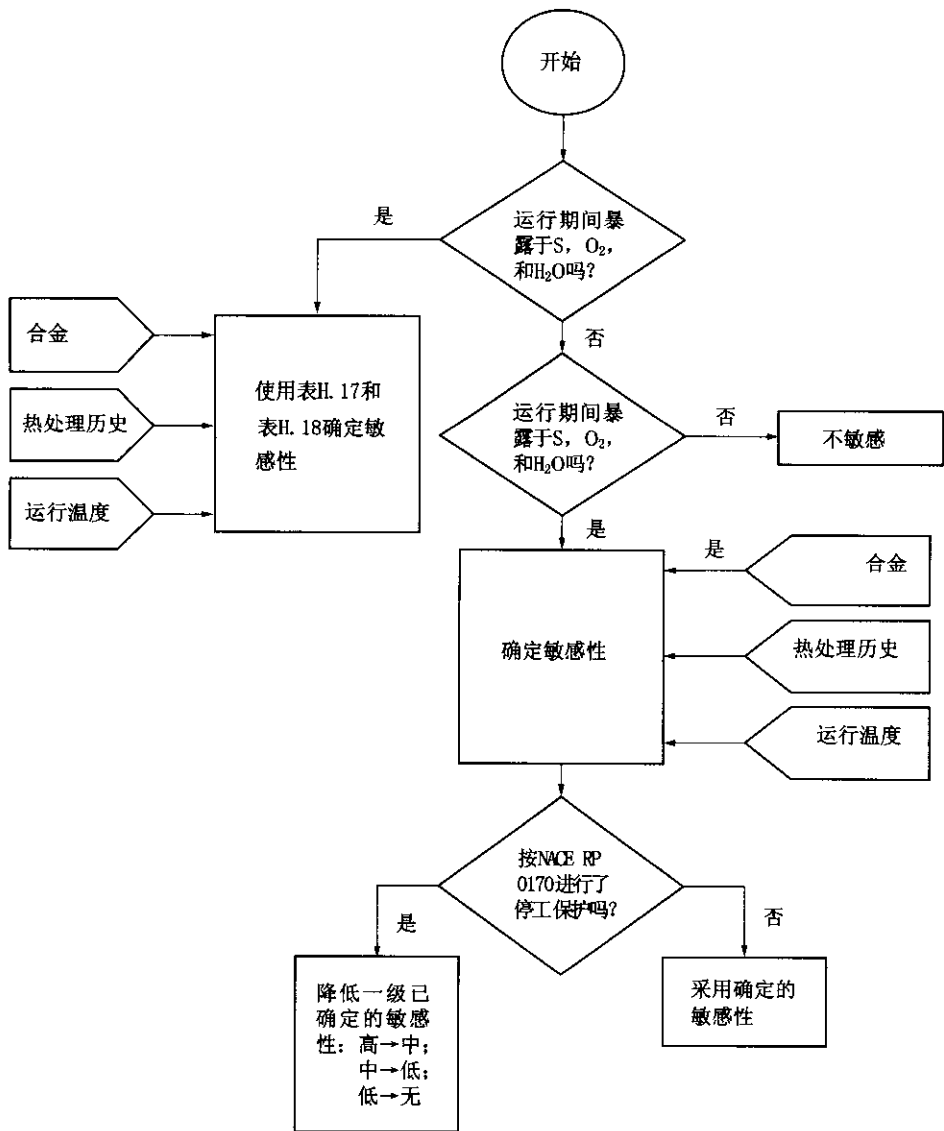


图 H. 8 连多硫酸腐蚀开裂 (PTA) 敏感性确定

如果存在含有氯化物的溶液，特别是温度高于 65.56℃ (150 ℉) 的溶液，则可能在使用和停车期间发生 CISCC。CISCC 可能在内部发生（如冲洗水或消防水引起）。

氯化物腐蚀开裂 (CISCC) 一般为穿晶型且含大量分叉。含 8%Ni 的奥氏体不锈钢（如 300 系列，304，316 等）CISCC 敏感性最大。通常的合金钢都有较大的抗 CISCC 能力，无论 Ni 含量是高还是低。低 Ni 的双相不锈钢一般对 CISCC 不敏感，就像 Ni 含量超过 42% 的合金一样。

H. 11.2 基本数据

表 H. 19 中所列数据用来确定奥氏体不锈钢设备和配管的 CISCC 敏感性。如果不知道准确工艺数据，则应咨询一位知识丰富的工艺工程师以获得最佳的估计。

H. 11.3 确定 CISCC 敏感性

根据表 H. 19 的基本数据，从表 H. 20 或表 H. 21 来确定工艺方面的 CISCC 敏感性。然后进入图 H. 9 中的决策树来确定 CISCC 敏感性。

表 H. 19 CISCC 分析所需的基本数据

基本数据	说 明
工艺水的 Cl ⁻ 浓度, g/m ³ (ppm)	确定水相中的本体 Cl ⁻ 浓度。如果未知, 其默认值为大于 1000g/m ³ (ppm)。考虑系统中任何水 (如水压试验用水、锅炉给水、蒸气) 的 Cl ⁻ 含量。还要考虑在汽化或干扰条件下可能出现的 Cl ⁻ 浓度
运行温度, °F	确定预期运行期间的最高运行温度 (考虑正常或不正常运行条件)
工艺水的 pH 值	确定工艺水的 pH 值。高 pH 值的高氯化物浓度溶液的开裂敏感性低于低 pH 值氯化物溶液的。默认 pH 值为 10
注: 除非工作温度超过 93.33°C (200 °F), 伴热管的温度一般在 54.44°C~93.33°C (130 °F~200 °F) 范围内。	

表 H. 20 工艺方面的 CISCC 敏感性 (pH 值≤10)

温度, °C (°F)	氯离子浓度, g/m ³ (ppm)			
	1~10	11~100	101~1000	>1000
37.78~65.56 (100~150)	低	中	中	高
66.11~93.33 (151~200)	中	中	高	高
93.89~148.89 (201~300)	中	高	高	高

表 H. 21 工艺方面的 CISCC 敏感性 (pH 值>10)

温度, °C (°F)	氯离子浓度, g/m ³ (ppm)			
	1~10	11~100	101~1000	>1000
<93.33 (200)	低	低	低	低
93.89~148.89 (201~300)	低	低	低	中

H. 12 氢氟酸环境下的氢应力开裂 (HSC - HF)

H. 12.1 损伤描述

氢应力开裂 (HSC) 是指在拉伸应力和腐蚀机理所产生的可扩散入金属的氢共同作用下的金属开裂。金属可能因暴露在硫化氢 (补遗 C - 硫化物应力开裂) 或暴露在氢氟酸 (HF) 下而发生 HSC。HSC - HF 发生在高强度 (高硬度) 钢中, 或发生在低强度钢的硬质焊接熔敷金属或硬质热影响区。此外, 当氢氟酸中有氧或者氧化剂存在时, HIC - HF 也会出现在受应力的 400 合金中。

浓氢氟酸 (HF) 用做 HF 烷基化装置的酸催化剂。通常, 水中的氢氟酸溶液浓度为 96%~99%, 温度低于 65.56°C (150 °F)。在这些情况下, 除了运行上要求紧配合的地方 (如泵、阀门、仪表) 之外, 大多数设备可选择完全镇静 (脱氧) 的低硫、纯净软碳钢。在那些有紧配合要求且温度为 65.56°C~176.67°C (150 °F~350 °F) 的地方, 可采用 400 合金。

材料在浓度为 80% 和更高的氢氟酸溶液中的腐蚀与在无水氢氟酸 (AHF) [AHF 的水含量小于 200g/m³ (ppm)] 中的腐蚀相当。材料在 AFH 中的腐蚀可参考其在浓度为 80% 氢氟酸溶液中的腐蚀。HF 在水中的浓度低于 80% 的氟氢酸被认为是含水的。含水和无水氢氟酸都能导致淬火碳钢和淬火合金钢的氢脆。为防止焊接钢结构的氢脆, 应参照 NACE RP 0472 执行。应对所有焊接方法形成的焊缝进行硬度测试。

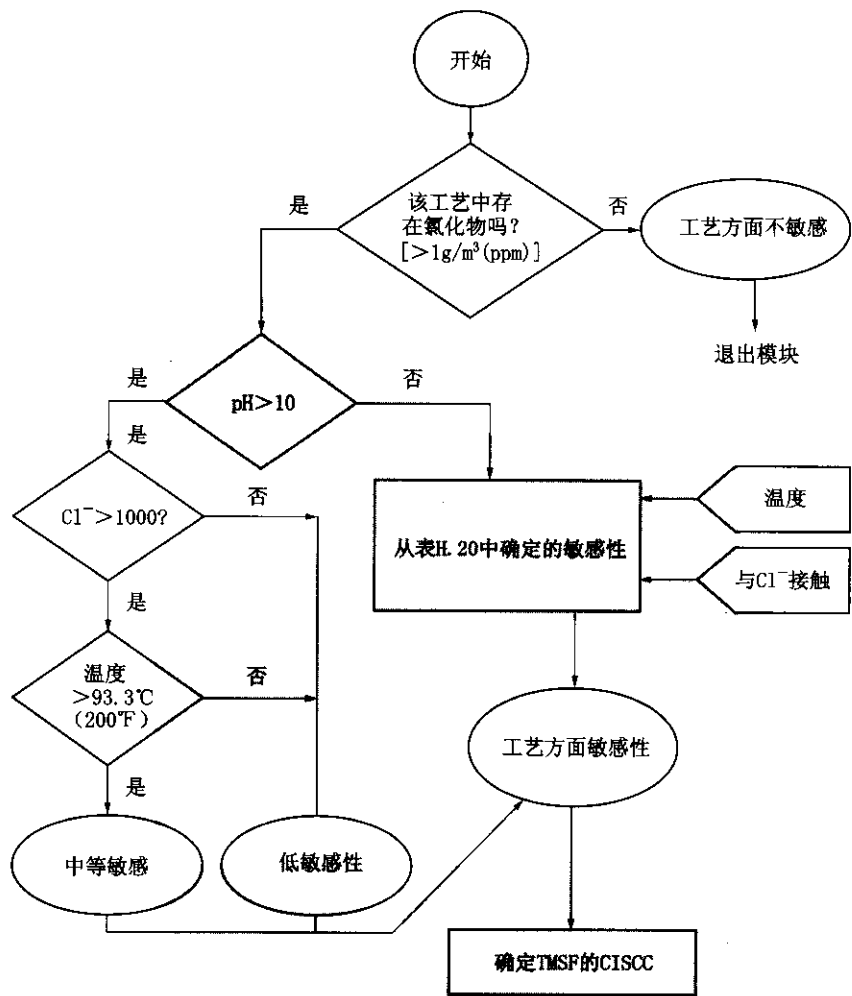


图 H. 9 确定 CISCC 的敏感性

在无水氢氟酸环境中，合金钢紧固件是许多失效根源之一。ASTM A193 B7 级的 Cr - Mo 钢制螺栓硬度高，在氢氟酸存在时它会开裂。如果不能避免与氢氟酸接触，一个更好的办法就是选用经过回火处理将布氏硬度降为 201~235 的 B7M 级钢。但如果在氢氟酸环境中 B7M 螺栓所受的应力超过其屈服点，它也会断裂。在现场法兰装配过程中，螺栓的扭矩可能难以控制。在这种情况下，可指定使用 B7 级的螺栓，并更换由法兰泄放而导致可能与 HF 接触的任何螺栓。

H. 12. 2 基本数据

表 H. 22 中列出了分析 HSC - HF 敏感性所需的基本数据。该表还提供关于所要求的数据的说明。

H. 12. 3 确定 HF - HSC 敏感性

如果存在任何浓度的氢氟酸，则设备/配管都有潜在的 HSC - HF 敏感性。根据表 H. 22 中的基本数据，可以从表 H. 23 得到碳钢的敏感性。图 H. 10 给出确定设备 HSC - HF 敏感性的流程。

H. 13 氢氟酸环境 (HIC/SOHIC - HF) 中的氢致开裂和应力诱导氢致开裂

H. 13. 1 损伤描述

氢致开裂是指连接金属内的不同平面上的相邻氢鼓泡连接而成的阶梯状内部裂纹，或者到达金属表面，氢致开裂的形成并不需要外部应力作用。开裂的驱动力来自鼓泡内压累积而在氢鼓泡周围形成

的高应力。这些高应力场相互作用导致裂纹扩展而将钢中不同平面上的氢鼓泡连接起来。

表 H. 22 HSC - HF 分析需要的基本数据

	说 明
是否存在 HF（是或否）	确定设备/配管中是否存在 HF，不仅要考虑正常运行条件，还要考虑其他设备残留的 HF 所可能引起的工艺波动情况
钢焊缝的布氏硬度	确定在钢制设备/配管的焊缝上实测的最大布氏硬度。应按布氏硬度刻度读数，而无需从显微硬度测量技术进行转换（如维氏、努氏等）。如果不能取得实际读数，可使用制造规范中允许的最大允许硬度
焊件的焊后热处理（是或否）	确定配管/设备上的所有焊缝是否已经恰当地进行了焊后热处理

表 H. 23 碳钢和低合金钢的 HSC - HF 敏感性

焊接态最大布氏硬度			PWHT 最大布氏硬度		
<200	200~237	>237	<200	200~237	>237
低	中	高	无	低	中

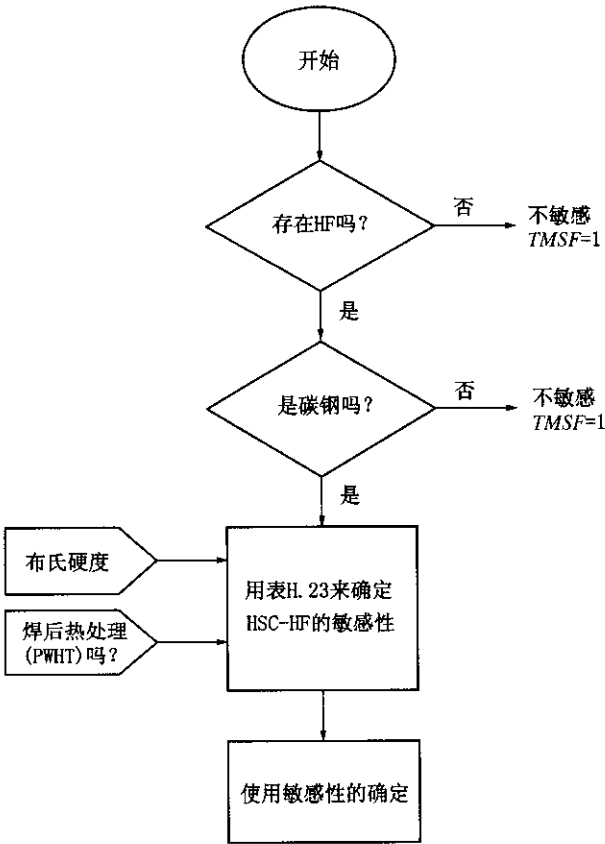


图 H. 10 确定 HSC - HF 的敏感性

钢中的氢来自于湿 H₂S（包含在 H. 8 节）或氢氟酸（HF）的腐蚀反应。用于烷基化装置的 HF 水溶液的浓度范围为 96%~99%。碳钢暴露于有水或无水的 HF 均可导致 HIC/SOHIC。

氢鼓泡是在钢中不连续处（如空隙、夹渣、分层、硫化物夹渣）形成的平面充满氢的气孔。鼓泡经常出现在具有带状微观组织的轧制钢板中，这种微观组织来自于拉长的硫化物夹渣。因此氢鼓泡和 HIC 的敏感性主要与钢板的质量有关（比如钢板中不连续点的数量、大小和形状）。钢中的硫含量是它的一个关键材料参数。降低钢的硫含量可以降低钢的氢鼓泡和 HIC 敏感性。由于加入钙有助于硫化物形状的控制，因此钙是有益元素。

SOHIC 是指氢致裂纹连接小鼓泡所形成的堆垛裂纹簇。由于局部的高拉伸应力，它们沿钢板厚度方向排列。SOHIC 是 HIC 的一个特殊形式，通常出现在靠近焊缝的母材热影响区，这个地方存在高的残余应力。同 HIC 一样，钢板的品质是 SOHIC 敏感性的一个关键参数。另外，通过 PWHT 消除残余应力可以减少 SOHIC 的发生和严重程度，但不能消除 SOHIC。

H. 13.2 基本数据

表 H. 24 列出了用来分析碳钢设备对 HIC/SOHIC - HF 的敏感性所需的数据。如果不知道钢中硫含量，则应咨询一位知识丰富的材料工程师以获得碳钢品质的估计。

H. 13.3 确定在 HF 环境中的 HIC/SOHIC 的敏感性

如果设备/配管中存在任何浓度的 HF，那么设备/配管就有潜在的 HIC/SOHIC - HF 敏感。根据表 H. 24 的基本数据，可通过表 H. 25 来获得碳钢的敏感性。认为采用常规钢锻件 [如 A 53，A 106，API 5L（不包括 5LX），A 234，A 105 等] 制成的配管具有低的 HIC/SOHIC - HF 敏感性。对于用轧制和焊接钢板制造的设备和大直径配管，应根据表 H. 25 来确定其敏感性。图 H. 11 显示了确定敏感性所需的流程。

钢对氢鼓泡的敏感性与钢的洁净度直接有关，可通过钢的硫含量测量来确定其洁净度。应注意氢鼓泡并不是一种导致泄漏的损伤机理，除非伴有延伸到表面的氢致裂纹。当鼓泡接近焊缝，且焊缝含有足够残余应力以致可以促使氢致裂纹延伸到表面时，鼓泡的确会威胁钢结构的机械完整性。在最后一种情况的极端苛刻条件下，应在确定 HIC/SOHIC - HF 敏感性时加以考虑。

表 H. 24 HIC/SOHIC - HF 分析所需的基本数据

基本数据		说 明
是否存在 HF（是或否）		确定设备/配管中是否存在 HF，不仅要考虑正常运行条件，而且要考虑其他设备残留的 HF 所可能引起的干扰情况
焊件的焊后热处理（是或否）		确定设备/配管的所有焊件是否已经进行了焊后热处理
钢板中硫含量		确定用来制造设备/配管钢板的硫含量。可以通过制造商的设备文件得到相关信息。

表 H. 25 HIC/SOHIC - HF 敏感性

高硫钢 ^a 硫含量 S>0.01%		低硫钢 ^b 硫含量 S=0.002%~0.01%		超低硫钢 ^c 硫含量 S<0.002%	
焊接态	PWHT	焊接态	PWHT	焊接态	PWHT
高	高	高	中	中	低
^a一般包括 A 70，A 201，A 212，A 285，A 515 和大约 1990 年以前的大部分 A 516 钢。 ^b一般包括 20 世纪 80 年代早期添加钙的抗 HIC 的 A516 钢。 ^c一般包括 20 世纪 90 年代后期的抗 HIC 的 A516 钢。					

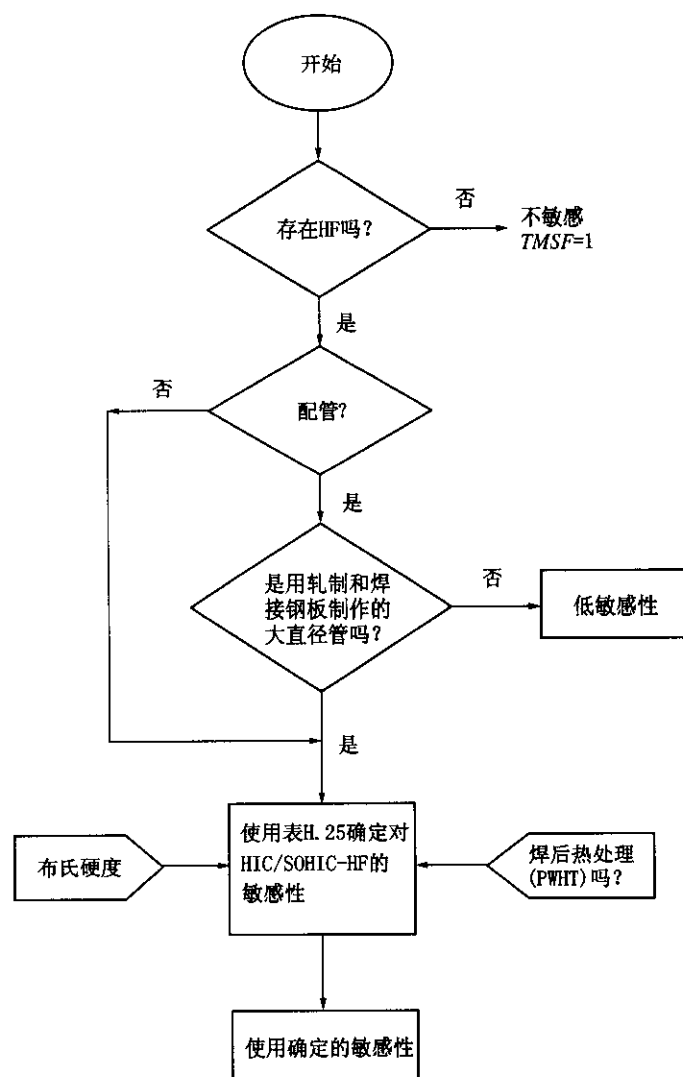
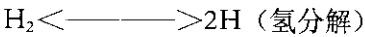


图 H. 11 确定对 HIC/SOHIC - HF 的敏感性

附 录 I
(规范性附录)
高温氢损伤 (HTHA) 技术模块

I.1 范围

高温氢损伤 (HTHA) 发生在暴露于高温下的高氢分压的碳钢和低合金钢中。它是氢原子扩散到钢并与微观组织中的碳化物发生反应的结果。有两种反应和 HTHA 相关, 第一种是氢分子 (H_2) 分解成能在钢中扩散的氢原子 (H)。



在高温和高氢分压下, 形成原子氢的反应更容易发生。因此, 当温度和氢分压都增大时, 发生 HTHA 的驱动力会增加。第二种反应发生在原子氢和金属碳化物之间



HTHA 对钢材的损伤有两种形式: 因甲烷气体在碳化物基体界面上积聚而产生内部脱碳和裂缝; 由原子氢和钢材表面或临近表面的碳化物发生反应产生的表面脱碳, 在该表面甲烷气体可溢出而不会形成裂缝。内部裂缝一般可在碳钢、 $C^{1/2}Mo$ 钢和高氢分压下的 Cr-Mo 钢中观察到, 而在高温和低的氢分压下的 Cr-Mo 钢中更普遍观察到表面脱碳。

增加钢中合金的含量, 进而提高碳钢在有氢条件下的稳定性可减缓 HTHA, 仅含有 Fe_3C 碳化物的碳钢, 其抗 HTHA 的性能大大低于任何一种含 Cr, Mo 碳化物的 Cr-Mo 合金钢, 因为 Cr, Mo 碳化物更加稳定, 具有更高的抗 HTHA 性能。

历史上, 已根据工业经验预测了抗 HTHA 性能。该性能已绘制在显示温度和氢分压范围的碳钢和低合金钢的一系列曲线上。在温度和氢分压范围内, 这些钢已经得到成功应用而没有 HTHA 造成的损伤。这些曲线通常称为 Nelson 曲线, 根据 API RP 941 中的工业经验进行维护。

I.2 技术模块的筛选问题

表 I.1 所列的 HTHA 的模块筛选问题用来确定是否应进入 HTHA 的模块。

表 I.1 HTHA 模块的筛选问题

筛 选 问 题	操 作
材料为碳钢还是低合金钢? 运行温度 $> 204.44^{\circ}C$ ($400^{\circ}F$), 运行压力 $> 551.6kPa$ (80psia)?	如果两者都是, 进入 HTHA 模块

I.3 基本数据

表 I.2 所列的数据, 如果可用的话, 可用于估计碳钢和低合金钢的 HTHA 的敏感性。如果不知道准确的工艺条件, 应咨询知识丰富的工艺工程师以获得最佳估计。

表 I.2 HTHA 分析所需的基本数据

基 本 数 据	说 明
建造材料	确定设备/配管的建造材料

表 I.2 (续)

基本数据	说 明
确定 C½Mo 热处理条件	确定 C½Mo 钢热处理是退火还是正火。退火状态下 C½Mo 的抗 HTHA 性能不优于碳钢。默认值为退火状态
氢分压, kgf/cm²	氢分压等于氢的摩尔分数乘以总压力 (绝对压力)。 1kgf/cm² = 14. 2psia
温度, K	暴露温度 (K) = $\left(\frac{^{\circ}\text{F}-32}{1.8}\right) + 273$
时间, h	确定暴露时间

I.4 基本假设

基于设备已经暴露在高温下的高压氢的时间对 HTHA 敏感性进行评估。已建立了一个单一参数 p_v 在温度和氢分压与使用时间关联。该参数已经在文献中定义如下:

$$p_v = \lg (p_{H_2}) + 3.09 \times 10^{-4} (T) [\lg (t) + 14] \dots\dots\dots (I. 1)$$

式中:

- p_{H_2} ——氢分压, kgf/cm² (1kgf/cm² = 14. 2psia);
- T ——温度, K (K = °C + 273);
- t ——时间, h。

该参数可用于确定材料受 HTHA 损伤的敏感性。本技术模块依据 HTHA 损伤的敏感性是基于设备在一给定的温度和氢分压的组合下使用了 200000h。

I.5 敏感性的确定

根据 p_v 计算和基本假设, 已经为碳钢和低合金钢的 HTHA 敏感性定义了如表 I.3 中所示的范围。

表 I.3 碳钢和低合金钢的 HTHA 敏感性

临界 p_v 因子				
材料	高敏感性	中敏感性	低敏感性	无敏感性
碳钢	$p_v > 4.70$	$4.61 < p_v \leq 4.70$	$4.53 < p_v \leq 4.61$	$p_v \leq 4.53$
C½Mo ^a (退火)	$p_v > 4.95$	$4.87 < p_v \leq 4.95$	$4.78 < p_v \leq 4.87$	$p_v \leq 4.78$
C½Mo ^a (正火)	$p_v > 5.60$	$5.51 < p_v \leq 5.60$	$5.43 < p_v \leq 5.51$	$p_v \leq 5.43$
1C½ ^b	$p_v > 5.80$	$5.71 < p_v \leq 5.8$	$5.63 < p_v \leq 5.71$	$p_v \leq 5.63$
1¼Cr½Mo ^b	$p_v > 6.00$	$5.92 < p_v \leq 6.00$	$5.83 < p_v \leq 5.92$	$p_v \leq 5.83$
2¼Cr-1Mo	$p_v > 6.53$	$6.45 < p_v \leq 6.53$	$6.36 < p_v \leq 6.45$	$p_v \leq 6.36$
^a 默认为退火状态。如果知道, 仅使用正火状态。 ^b 对于氢分压大于 1200psia, 对 1¼Cr½Mo 使用的临界 p_v 因子。				
注: 不能借用含 As, Sb, Sn 和 P 等杂质元素较高的钢。如怀疑杂质元素含量较高, 则临界 p_v 因子应降低。 对于含杂质元素高的钢的熔炼炉批, 临界 p_v 因子比 0.25 低得多。				

I.6 检验有效性

HTHA 的特性使得用常规检测技术很难进行探测。表 I.4 列出了探测 HTHA 的常用检测技术的有效性实例。

表 I.4 HTHA 检验有效性

检验有效性类别	典型的检测方法
高度有效	无
通常有效	全面先进的超声波反向散射法 (AUBT)，基于应力分析或大量现场金相分析的点 AUBT
一般有效	点 AUBT 或点现场金相分析
有效性差	超声波背散射和超声波衰减
无效	仅用超声波衰减法

I.7 确定技术模块的次因子

本技术模块假定 HTHA 的敏感性在表 I.3 确定。HTHA 的敏感性被指定为高、中、低和无敏感性四类。基于这些敏感性的高、中或低的等级来分配一个反映没有检验和监测可信度的严重度指数。

根据图 I.1，使用表 I.2 中的基本数据确定 HTHA 的技术模块次因子。

如果进行了一个有效检测且未探测到损伤，则可下调基准技术模块次因子。如同应力损伤开裂形式那样，如果在检测期间发现损伤，则应将次因子大幅上调。应注意的是，一旦观察到损伤发生，就应实施适用性评价。如果在一个检测期间观察到损伤，则应对基准技术模块次因子进行上调；而当未发现损伤时，则应对各个等级的检验有效性的基准技术模块次因子进行下调。下列次因子包括第一次检测和第二次检测都没有观察到 HTHA 损伤的可信度。

表 I.5 给出了不同等级的 HTHA 敏感性和不同检测等级的技术模块次因子。表 I.5 中还给出了检测未发现 HTHA 损伤时的技术模块次因子。已经给出了两次检测的技术模块次因子。对于较多数量的检测，技术模块次因子保持不变。

表 I.5 对有效检测技术模块次因子的修正

严重度指数	无检测	第一次检测 检验有效性			第二次检测 检验有效性		
		有效性差	一般有效	通常有效	有效性差	一般有效	通常有效
观察到的损伤	—	2000	2000	2000	2000	2000	2000
高敏感性	2000	1800	1200	800	1600	800	400
中敏感性	200	1800	1200	80	160	80	40
低敏感性	20	18	12	8	16	8	4
无敏感性	1	1	1	1	1	1	1

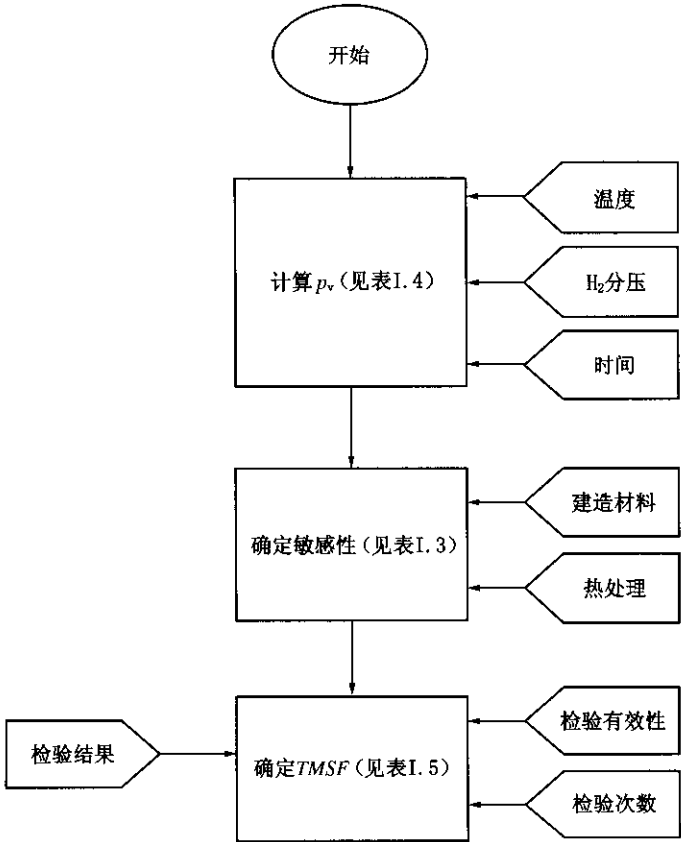


图 I.1 HTHA 敏感性的确定

附 录 J
(规范性附录)
炉管技术模块

J.1 可能性分析**J.1.1 介绍**

炉管的失效可能性在炉管技术模块中直接用长期蠕变的同类失效频率计算。如果可能发生短期蠕变,则将同类失效频率乘以因子 100,如表 J.1 所示。

表 J.1 炉管的同类失效频率

孔径, mm	长期蠕变	短期蠕变
6.35mm (1/4in)	0.0	0.0
25.4mm (1in)	4.62×10^{-6}	4.62×10^{-4}
101.6mm (4in)	1.32×10^{-6}	1.32×10^{-4}
破 裂	6.60×10^{-7}	6.60×10^{-5}

J.1.2 范围

此模块建立了直接加热炉受火炉管的损伤因子(失效可能性修正因子)。本技术模块适用于炼油厂加热炉的铁素体钢(碳钢、到 12Cr 的低合金钢)和奥氏体不锈钢(304, 316, 321, 347)的炉管。假设这些炉管在炉膛内直接受火、吸热和封闭。本模块主要探讨长期暴露于高温和短期过热引起的损伤。

J.1.3 技术模块筛选问题

技术模块筛选问题见表 J.2。

表 J.2 炉管技术模块的筛选问题

筛 选 问 题	解 决 方 法
设备类型是否是受火加热器或用于加热液态工艺流体的加热炉	若是,可以继续炉管技术模块 若不是,退出本技术模块

J.1.4 基本数据

表 J.3 中所列出的基本数据是确定炉管技术模块次因子所需的最少数据。

J.1.5 基本假设

J.1.5.1 一般来说,炼油厂的直接加热炉炉管是按 SH/T 3037 设计的。该标准用来选择炉管所需的最小壁厚,它是建造材料、温度、应力的函数。论述了蠕变和腐蚀两种损伤形式。设定允许腐蚀裕量时,SH/T 3037 还根据估计的蠕变寿命规定了最小容许管壁厚。在高温下,暴露于恒定应力下的部件在一段时间后会失效。这一失效时间随着应力或温度的升高而缩短。

J.1.5.2 关于建造材料,SH/T 3037 给出了平均蠕变强度和最小蠕变强度。SH/T 3037 中的平均曲线对应于加热管材料的平均蠕变强度,而最小曲线对应于加热管材料 95%的平均蠕变强度。

J.1.5.3 蠕变寿命、应力和温度之间的关系是比较复杂的。然而,炉管设计方法可根据加速拉伸蠕变试验使之关系简化。这些单轴蠕变试验结果分散性较大。由于试验蠕变性能的分散性以及蠕变性能与加速蠕变试验的相关性,蠕变寿命的预测有很大的不确定性。

表 J.3 炉管分析所需的基本数据

基本数据	说 明
建造材料	确定炉管的建造材料
服役时间 t_i , 年	确定炉管已经使用的总年数。如果炉管在以前使用中不存在蠕变失效问题, 则该时间可以忽略。假定每年的运行时间为 8500h
自上次检验以来的时间, 年	确定自上次有效厚度数据的炉管检测以来的年数。该时间和计算的腐蚀速率一同用来确定当前的厚度
腐蚀速率, 密耳/年	根据厚度数据确定当前计算出的减薄率
炉管金属的运行温度 TMT, °F	通过热成像或热电偶确定炉管金属的平均运行温度。如果不能获得该温度, 对不结垢、不结焦环境使用工艺出口温度加上 37.78°C (100 °F) 作为运行温度, 对于结垢、结焦环境, 则应使用工艺出口温度加上 65.56°C (150 °F) 作为运行温度
运行压力 p , lb/in ²	确定最高期望运行压力 (可能是泄压阀设定压力, 除非压力不可能达到那么高)
炉管直径 D_o , in	确定制造时用于设计计算的炉管外径
炉管壁厚, in	确定自上次检测的实测厚度。如没有检测结果, 则确定新的最小构造厚度
检验有效性类别	确定时间期限 (如上规定) 内对设备的每次检验的有效性类别参见表 J.7 关于对炉管检验有效性类别的指南
检验次数	确定在上述规定的时间期限内已经进行的每个类别的检验次数
可能的过热严重度 ΔT_{oh} , °F	估计偏离设计炉管金属温度 (不是炉管金属的运行温度) 以上 - 17.78°C ~ 148.89°C (0 °F ~ 300 °F) 的极端温度偏差大小。参见 J.1.15 选择合适的过热等级
可能的过热持续时间 t_{oh} , h	估计极端过热事件的累计持续时间
在线监测	确定实际的腐蚀监测方法或采用工具的类型, 如炉管热电偶、热成像、工艺运行参数等

J.1.5.4 炉管寿命的预测还由于其他因素的影响而变得更为复杂, 例如:

- 外部氧化。炉管最普通的腐蚀问题是炉管外表面的氧化。氧化可使管壁变薄、应力增大, 加快炉管蠕变损伤速率。氧化速率是炉膛内温度和氧气含量的函数。
- 内部腐蚀。在一些炼油厂加热炉中, 如原油蒸馏装置, 高温硫化可能成为一个不容忽视的隐患。腐蚀作用使管壁变薄、应力增大, 炉管蠕变损伤速度加速。高温硫化的速率是工艺蒸气中温度和硫含量的函数。
- 其他腐蚀。因为炉管在高温下运行, 甚至工艺或燃料中少量的污染物即可导致炉管金属的加速腐蚀。如高温和燃料中少量的钠和钒可导致过度的外部腐蚀。
- 不均匀加热。炉膛中的温度分布受炉管位置 (相对于燃烧器)、炉膛的形状与尺寸、炉管间距及炉与燃烧器之间的距离影响。
- 火焰冲击。火焰冲击受不均匀加热的相同因素影响; 但是它也受燃烧器的修正、炉膛内燃料和空气的控制影响。
- 结焦。在许多类型的原油加热炉中, 炉管内有焦炭沉积物堆积。焦炭沉积物在炉管金属和工艺介质之间起着隔热层作用, 从而提高管壁温度, 加速蠕变和腐蚀。

J.1.5.5 本技术模块假设长期蠕变失效不会发生, 除非炉管壁金属的运行温度比表 J.4 中给出的每一建造材料的温度还要高。但是, 由于不均匀加热或火焰冲击, 局部过热可能发生, 且在所有炉管中

都会出现。

J. 1. 5. 6 长期处于高于表 J. 4 中所列的温度环境而导致的失效，通常被认为是由蠕变和蠕变开裂引起。在 SH/T 3037 中详细说明了用于估计设计寿命的极限状态。如果期望的炉管金属温度小于表 J. 4 中所列的温度，则应使用一般减薄技术模块对炉管进行评估。但是，如果炉管短时间暴露于高温，则应依据 J. 1. 15 中的内容来确定可能的短期失效。

表 J. 4 考虑蠕变用金属温度极限

材料类型	弹性温度极限,℃ (°F) ^a
碳钢	410 (770)
½Mo	493. 33 (920)
1¼Cr - ½Mo	498. 89 (930)
2¼Cr - 1Mo	482. 22 (900)
3Cr - 1Mo	493. 33 (920)
5Cr - ½Mo	471. 11 (880)
5Cr - ½Mo-Si	448. 89 (840)
7Cr - ½Mo	454. 44 (850)
9Cr - 1Mo	515. 56 (960)
12Cr	426. 67 (800)
304/304H SS	582. 22 (1080)
316/316H SS	604. 44 (1120)
321 SS	543. 33 (1010)
321H SS	560 (1040)
347/347H SS	593. 33 (1100)
^a 使用符合 API RP 530 的最小破裂强度曲线，管子在此温度下会具有 100000h 设计寿命。	

J. 1. 6 确定技术模块次因子 (TMSF)

技术模块次因子的确定步骤见图 J. 1 (a) 和图 J. 1 (b)。因为存在两种失效模式。所以该程序也分两部分：估计长期蠕变失效的可能性的程序和估计短期过热失效的可能性的程序。这导致对 TMSF 的两种估计。应使用这两者中的最大值。

J. 1. 7 确定炉管金属的实际温度 (TMT)

由热成像和热电偶确定炉管金属平均运行温度。如果不能获得 TMT 的测量值，则对不结焦环境，应采用工艺出口温度加上 37. 78℃ (100 °F) 作为该运行温度；对于结焦环境，应加上 65. 56℃ (150 °F) 作为该运行温度。

J. 1. 8 确定弹性金属温度极限

对各种建造材料使用表 J. 4 来确定临界炉管金属温度 T_{clas} 。

如果实际炉管金属温度小于表 J. 4 列的临界温度，则无需考虑长期蠕变，但应按 J. 1. 15 所述的方法考虑短期过热。

J. 1. 9 腐蚀速率的确定

J. 1. 9. 1 应根据炉管检测可提供的厚度数据（如有的话），计算出平均腐蚀速率。

J. 1. 9. 2 如果不能获得计算的减薄率，则应对每一潜在的减薄机理（见附录 G）的估计减薄率使用高温硫化物和环烷酸腐蚀（见 G. 7）、高温 H₂S/H₂ 腐蚀（见 G. 8）和高温氧化（见 G. 13）来确定。

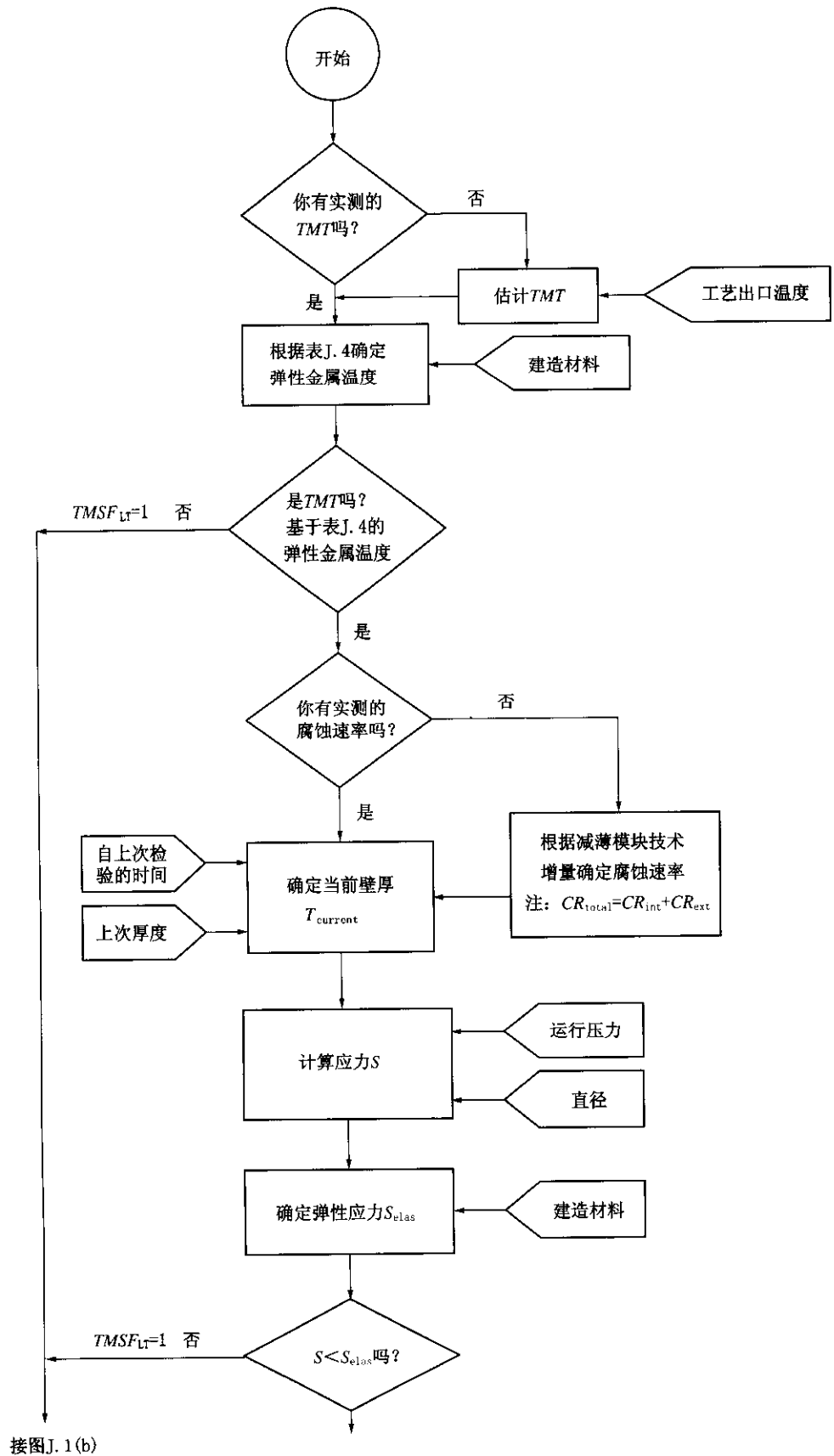


图 J.1 (a) 炉管技术模块次因子的确定

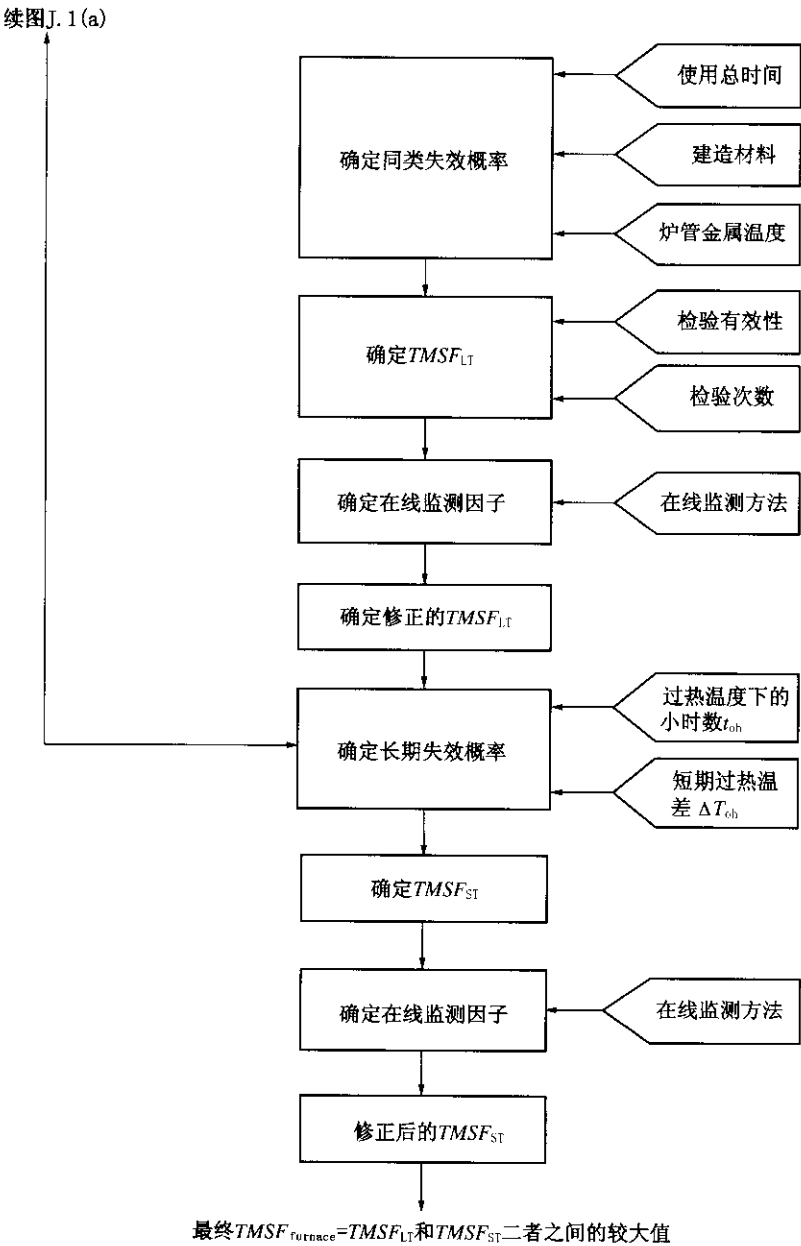


图 J.1 (b) 炉管技术模块次因子的确定

应使用表 G.4 中的筛选问题来确定适用的减薄机理。将这些减薄率相加得出一个综合的减薄率。另一方面，也可用专家建议来确定最大减薄率。

J.1.10 确定当前壁厚 $T_{current}$

使用从上次已知的检测获得的腐蚀速率和厚度来确定当前壁厚。如果没有进行过检测，则采用原始管壁厚、总服役时间和 J.1.9 中确定的估计腐蚀速率来确定当前壁厚。

J.1.11 应力计算

使用当前壁厚 $T_{current}$ 、运行压力 p 和炉管外径 D_o 来计算炉管的应力 S ，如式 (J.1) 中所示：

$$S = \frac{p}{2} \left(\frac{D_o}{T_{current}} - 1 \right) \dots\dots\dots (J.1)$$

如果炉管应力小于表 J.5 中所列值，则可以不考虑长期蠕变，但是仍应按 J.1.15 所述考虑短期过热。

表 J.5 考虑蠕变的炉管应力极限值

材料类型	弹性应力极限, MPa (ksi)
碳钢	22.08 (3.2)
1/2Mo	12.075 (1.75)
1 1/4Cr - 1/2Mo	17.94 (2.6)
2 1/4Cr - 1Mo	15.18 (2.2)
3Cr - 1Mo	16.56 (2.4)
5Cr - 1/2Mo	16.56 (2.4)
5Cr - 1/2Mo-Si	11.73 (1.7)
7Cr - 1/2Mo	10.35 (1.5)
9Cr - 1Mo	8.625 (1.25)
12Cr	14.69 (2.1)
304/304H SS	16.56 (2.4)
316/316H SS	12.765 (1.85)
321 SS	12.765 (1.85)
321H SS	14.145 (2.05)
347/347H SS	13.455 (1.95)

J.1.12 确定长期蠕变失效可能性

长期蠕变导致的失效可能性按以下步骤计算：

- a) 平均 Larson Miller 参数—— LM_{avg} ，该参数用表 J.6 中的表达式在应力计算一节中计算出的应力水平下确定。
- b) 当前运行条件下的 LM_{avg} (用 lm 表示) 按式 (J.2) 计算：

$$lm = \frac{TMT + 460}{1000} (\lg t_i + C) \dots\dots\dots (J.2)$$

式中：

TMT——炉管金属的运行温度，°F；

t_i ——总使用时间，h；

C——按材料列于表 J.6 中。

- c) 确定 LM_{delta} 参数：该参数被定义为 SH/T 3037 中平均和最小 Larson Miller 曲线的平均差。这些值列于表 J.6 中。

- d) 参数 X：将平均值和运行 Larson Miller 参数的差值除以 LM_{delta} ，见式 (J.3)：

$$X = (LM_{avg} - lm) / LM_{delta} \dots\dots\dots (J.3)$$

- e) 失效因子按式 (J.4) 计算：

$$FF_{LT} = \min(1, 10^{-0.6723X^3 + 0.2854X^2 - 0.5905X - 0.3001}) \dots\dots\dots (J.4)$$

J.1.13 确定长期技术模块次因子 $TMSF_{LT}$

技术模块次因子可以由失效因子按式 (J.5) 计算：

$$TMSF_{LT} = 0.55e^{13FF_{LT}} \dots\dots\dots (J.5)$$

表 J. 6 Larson Miller 参数计算公式

材 料	LM_{avg} 表达式	LM_{delta}	C
CS	$42.2443 - 0.000025156S^3 - 1.24914\sqrt{S} - 1.90435\ln S$	0.34	20
C-½Mo	$41.2074 - 0.000011355S^3 - 2.30593\ln S$	0.62	20
1¼Cr-½Mo	$42.601 - 2.62249\ln S$	1.11	20
2¼Cr-½Mo	$47.1367 - 4.18064\ln S - 1.8401/\sqrt{S} - 8.41296\exp - S$	0.85	20
3Cr-1Mo	$44.786 - 3.5014 \ln S$	0.69	20
5Cr-½Mo	$45.5586 - 3.92851 \ln S$	1.41	20
5Cr-½Mo-Si	$45.1928 - 4.06518 \ln S$	1.82	20
7Cr-½Mo	$45.7938 - 4.42502 \ln S$	1.19	20
9Cr-1Mo	$44.7031 - 3.10233 \ln S$	1.32	20
12Cr	$59.8012 - 13.6331 \ln S + 4.3462 \ln^2 S - 0.60141 \ln^3 S$	1.29	25
304/304H SS	$43.1703 - 4.15807 \ln S$	1.57	15
316/316H SS	$41.4735 - 3.3742 \ln S$	0.75	15
321 SS	$39.8956 - 3.12309 \ln S$	1.97	15
321H SS	$42.1308 - 3.84328 \ln S$	1.63	15
347/347H SS	$41.6803 - 3.38401 \ln S$	0.72	15
注：S——炉管应力，ksi； LM ——Larson Miller 参数以 (°R) (lgh) 为单位。			

J. 1. 14 检验有效性类别

检验有效性是根据其能否发现炉管损伤和正确预测炉管剩余寿命进行分级的。给定的检测技术或检测技术的组合的实际有效性取决于所使用的建造材料的特性和使用的方法。表 J. 7 给出了炉管检测实例。

非侵入性检测不适合于炉管检测，因为炉管检测应进入到炉膛内。
检测的可信度通过使用表 J. 8 中的表达式确定。 N 是检验次数，若 $N > 4$ ，则取其值为 4。
使用式 (J. 6) 确定 $TMSF_{adj}$

$$TMSF_{adjusted} = TMSF \times \text{检验有效性降低因子} \dots\dots\dots (J. 6)$$

使用 J. 1. 16 中给出的指南可对长期技术模块次因子进行修正以便为在线监测提高可信度。

表 J. 7 检验有效性指南

检验有效性类别	例子：侵入性检测
高度有效	目视检测，所有炉管的 UT 厚度测量，UT 测量位置的外径测量，不同位置的 FMR
通常有效	目视检测，所有炉管的 UT 厚度测量
一般有效	75%炉管的目视检测、UT 厚度测量
有效性差	目视检测、UT 厚度测量抽检
无效	目视检测

表 J.8 检验有效性降低因子

检验有效性类别	TMSF 降低表达式 N = 检验次数
高度有效	$\max \{ \min [1, (1.25N^2 - 10.15N + 25.75) / 100], 0 \}$
通常有效	$\max \{ \min [1, (0.75N^2 - 9.65N + 33.75) / 100], 0 \}$
一般有效	$\max \{ \min [1, (1.75N^2 - 18.05N + 56.25) / 100], 0 \}$
有效性差	$\max \{ \min [1, (4N^2 - 39.60N + 119.5) / 100], 0 \}$
无效	1.0

J.1.15 短期失效可能性的确定

J.1.15.1 在 J.1.12 中所述的方法是假定在炉管整个寿命中导致长期蠕变的工况是稳态或接近稳态的。这一损伤类型不是可能发生失效的唯一模式。短期暴露于高温或火焰冲击也能导致失效。虽然这种失效模式很普遍,但定量评估更加困难,因为它是由炉子的运行或点火期间的非预期环境或干扰造成的。本节所讨论的方法、图表和程序可以为工程师评估过热造成的短期失效的潜在敏感性提供一些指导。

J.1.15.2 这类失效取决于采用大量复杂多变的因素进行精确计算,这里所述的方法取决于两个因素:

- a) 可能的过热的严重度估计,这是用炉管过热时的炉管表面温度和设计温度之差进行衡量的,用 ΔT_{oh} 表示。
- b) 炉管在过热条件下工作的累计时间估计,用 t_{oh} 表示。

J.1.15.3 一个可能的过热的严重度 ΔT_{oh} 是以下各种因素的函数。 ΔT_{oh} 的值可在 148.89°C (300 °F) 的范围内变化,表明在短期内,炉子的某些地方的金属温度可能比设计温度高出 148.89°C (300 °F)。对具有下面一种或几种问题的加热炉应采用高的 ΔT_{oh} 值。

- a) 过热历史。对于在异常短期后已经失效的加热炉应采用高的 ΔT_{oh} 值。
- b) 观察到的火焰冲击。
- c) 高的严重焦化可能性。

J.1.15.4 t_{oh} 是过热事件发生次数和持续时间的一个度量。 t_{oh} 值的变化范围为 10h~1000h,它表示炉子暴露于恶劣工况下的累积时间量。当加热炉具有以下问题的一个或多个时,应采用高的 t_{oh} 值。

- a) 不稳定运行。具有不稳定运行历史的炉子应分配一个高的 t_{oh} 值。
- b) 燃烧器控制问题。具有燃烧器难以调节和控制历史的炉子应分配一个高的 t_{oh} 值。

J.1.15.5 短期过热造成失效的可能性可按以下步骤计算:

步骤 1: $\Delta T_{5\%}$ 的值使用式 (J.7) 中的函数和过热事件的预计累计时间计算。该过热温度 $\Delta T_{5\%}$ 与 LM 曲线上导致 5% 的失效可能性的 ΔT_{oh} 值对应。

$$\Delta T_{5\%} = 35.5 \ln(1029/t_{oh}) \quad \dots\dots\dots (J.7)$$

式 (J.7) 假设升高 0.56°C (1 °F) 过热 1000h 相当于一个 1h 长 138.89°C (250 °F) 过热事件。长时间事件根据炉管是否长期在其设计压力和温度下运行的观察校定,失效可能性约为 5%。短期事件根据炉管经受住短暂的突发事件(如不必要灭火)的观察校定。

步骤 2: 随着实际过热温度 ΔT_{oh} 增加,失效可能性也作为 ΔT_{oh} 和 $\Delta T_{5\%}$ 之差的一个函数增加。使用式 (J.8) 来计算短期过热的失效因子。

$$FF_{ST} = \min(0.05e^{0.0422(\Delta T_{oh} - \Delta T_{5\%})}, 1.0) \quad \dots\dots\dots (J.8)$$

J.1.16 短期技术模块次因子的确定 ($TMSF_{sr}$)

技术模块次因子可根据式 (J.5) 得出的失效可能性来计算。

J.1.17 在线监测因子的 $TMSF$ 修正

炉管的意外高腐蚀速率、不均匀加热、意外短期过热以及火焰冲击都对炉管消耗的寿命分数的增加有影响。除检测外，通常也使用短期干扰和二次点火条件的在线监测来防止炉管的过早失效。在线监测的优点在于它在定期检测之前可探测到炉管金属温度的短期变化，从而可更好地估计炉管的消耗寿命分数和估计的剩余寿命。在线监测采用了多种方法，包括炉管热电偶、热成像法和目测与燃烧器校正的组合等。如采用在线监测，应给出置信度以反映在所消耗的预测寿命分数中有较高可信度。然而，这些方法是否有效地随炉子类型和炉管材料的变化而变化。表 J.9 提出的修正因子假定通过在线监测发现的问题都作为发现的结果得到纠正。

表 J.9 在线监测因子确定指南

在线监测方法	长期蠕变在线监测因子	短期蠕变在线监测因子
没有监测	1.0	1.0
日常目视和燃烧器运行修正	5	50
热成像	10	100
配管热电偶和连接到控制柜的仪表	10	100
注： $TMSF_{adjusted} = TMSF / \text{在线监测因子}$		

J.1.18 长期技术模块次因子和短期技术模块次因子的组合 ($TMSF$)

炉子模块的 $TMSF$ 应取短期技术模块次因子和长期技术模块次因子中的较大者。

J.2 后果分析

J.2.1 概述

炉子的后果分析严格遵循第 7 章提出的方法。第 7 章中提出的后果措施旨在作为检验程序建立相对优先次序的简化方法。如果需要对后果进行更准确地估算，分析人员应参考更严格的分析技术，如定量风险分析中采用的那些技术。

J.2.2 确定代表性流体及其特性

本附录范围限定于用来加热液态工艺蒸气的加热炉。与蒸气/甲烷重整炉等这类炉子有很大不同，除了出现大面积的失效，部分原因泄放的后果通常不太严重（即用于加热甲烷的甲烷燃烧炉，炉管向炉膛泄放更多燃料不会有严重影响）。因此，除了 $C_1 \sim C_2$ 材料不包括在内，代表性流体与第 7 章中提到的流体一样。（见表 J.10）

表 J.10 加热炉用的模拟材料列表

代表性材料	适用材料的例子
$C_3 \sim C_5$	丙烷、丁烷、异辛烷、戊烷、LPG
$C_6 \sim C_8$	汽油
$C_9 \sim C_{12}$	柴油
$C_{13} \sim C_{16}$	航空燃料、煤油
$C_{17} \sim C_{25}$	粗柴油、典型原油
C_{25}^-	渣油、重质原油

J. 2.3 选择模拟孔径

实际需要用于加热炉模拟的孔径是 1in 或稍大些的尺寸。较小的孔产生的泄放可能在炉膛内被消耗掉，因而不会呈现潜在的重大损伤。可能存在一定的内部损伤，如由于火焰冲击对相邻炉管造成的损伤（见表 J. 11）。

表 J. 11 用于炉子 RBI 分析的孔径

孔 径	范 围	代 表 值
中等的	6.35mm~50.8 mm ($1/4$ in~2in)	25.4mm (1 in)
大的	>50.8mm~152.4 mm (>2in~6in)	101.6mm (4 in)
破裂	>152.4 mm (>6in)	整个直径

因此，只要泄放直径小于或等于炉管自身直径，则炉管可使用的孔径为 25.4mm (1in)，101.6mm (4in) 和破裂。

J. 2.4 估计有效泄放流体总量

为了避免产生不合理的结果，分析者应估计可能从炉管泄放出来的流体的最大量，然后应用该最大量作为后果计算的上限。由于在大多数炉子及其所连接的容器有隔离阀（两个方向都有），因此建议最大泄放量限定为炉子的存量加上来自这两个方向的 3min 流量。如果没有隔离阀，或者在炉子附近仅有手动阀，则应增加总泄放量。

J. 2.5 估计泄漏速率

对于加热炉，所有泄放都被认为是持续的（尽管有一些可能持续时间短）。此外，本附录的范围限定于液体泄放，泄漏速率按第 7 章中液体所用的方法计算。

J. 2.6 流体排放率计算

J. 2.6.1 伯努利和托里策利（Perry 和 Green，1984）的著作论述了液体通过锐边孔板的排放，其计算公式为式（J. 9）：

$$Q_L = C_d A \sqrt{\frac{2g \cdot 144p}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (J. 9)$$

式中：

Q_L ——液体排放率，lb/s；

C_d ——排放因子；

A ——孔的横截面积，in²；

ρ ——流体密度，lb/ft³；

p ——上游压力与大气压力的压差，psig；

g ——重力加速度，其值为 9.8m/s² (32.2ft/s²)。

J. 2.6.2 锐边孔板的全紊流排放因子是 0.60~0.64。在 RBI 计算中推荐使用的值是 0.61。式（J. 9）适用于闪蒸和非闪蒸液体。

J. 2.7 确定泄放类型

对于加热炉事故，所有的泄放在性质上均为持续性的。不需要去评价其瞬时效应。

J. 2.8 确定流体的最终相

本附录的目的是，应遵循第 7 章所述的方法来确定液体从炉管泄放后的最终相（见表 J. 12）。一个例外是不考虑气态的初始流体相。对于实际的炉管失效，由于炉膛的高温，液态流体在炉管泄放开始时容易汽化。然而，在泄放显著时，炉膛迅速充满燃料，火焰被熄灭或大大减弱。后续火焰在泄放的烃可以找到足够氧气而燃烧的地方出现，如烟囱顶、通风百叶窗或观察孔周围。烃的持续泄漏一般

导致液体从炉底泄放，形成液池火。

表 J. 12 流体相态确定指南

流体在稳态工况下的相态	流体在稳态环境条件下的相态	确定后果计算的最终相态
液体	气体	以气体进行模拟，除非在环境条件下的流体沸点超过 26.67℃ (80 ℉)，在这种情况下，则以液体进行模拟
液体	液体	以液体进行模拟

J. 2. 9 采取探测、隔离和减缓系统后对泄放量的修正

表 J. 13 给出了基于探测、隔离和减缓系统的泄放特征的修正。这些值都是根据工程判断，在定量风险分析中评价减缓措施的经验来确定的。

J. 2. 10 确定泄放的后果面积

J. 2. 10. 1 确定炉管失效产生的泄放后果与第 7 章类似。重要的例外情况如下：

- a) 由于炉膛中有火源，所以认为不可能有一大于 454kg (>1000lb) 蒸气云团，因此可排除对 VCE 的考虑。
- b) 同样，由于炉管失效产生持续性泄漏，而不是瞬时性泄放，所以火球或闪火情景的可能性也被认为不存在。

表 J. 13 减缓系统对可燃后果的修正

响应系统等级		
探测	隔离	后果修正
A	A	将泄漏速率或泄放量减少 25%
A	B	将泄漏速率或泄放量减少 20%
A 或 B	C	将泄漏速率或泄放量减少 10%
B	B	将泄漏速率或泄放量减少 15%
C	C	后果不修正
减缓系统		后果修正
与 B 级或更高级别的隔离系统连接的存储、排放系统		将泄漏速率或泄放量减少 25%
消防水喷淋系统和监视器		将后果面积减少 20%
仅有消防水监视器		将后果面积减少 5%
泡沫喷淋系统		将后果面积减少 15%

J. 2. 10. 2 表 J. 14 描述了炉管泄放所预期的特定事件结果。注意，对于轻质烃，要考虑喷射火。经常会有这样的情形，大部分或全部的泄放液体气化并以很大的力从炉口逸出，形成一个巨大的火焰影响区。

J. 2. 10. 3 采用与第 7 章类似的方法，按表 J. 14 计算影响区。根据定义，点火是可能出现的，泄漏为持续性的。炉子影响区计算有一个附加限制；大多数炉子均有一个围栏形的密闭体，该密闭体至少 0.1524m (6 in) 高，距离炉子结构的外边缘约 3.048m (10ft)，这减少了向储存区的泄放影响区面积。典型的储存区面积大约为 279m² (3000ft²)。如果没有密闭体，则使用表 J. 15 中的公式计算出影响区。

表 J. 14 特定事件概率——持续性泄漏自动点火可能^a

^a在 AIT（自燃温度）以上处理的液体

流体	结果 概率					
	着火	VCE	火球	闪火	喷火	液池火
C ₃ ~C ₅	1				1	
C ₆ ~C ₈	1				1	
C ₉ ~C ₁₂	1				1	
C ₁₃ ~C ₁₆	1				0.5	0.5
C ₁₇ ~C ₂₅	1				0.5	0.5
C ₂₅ ⁺	1					
^a 应在至少高于自燃温度 26.67℃（80°F）条件下进行处理。						

表 J. 15 持续泄漏后果公式——自动点火可能^a

材料	最终相气体		最终相液体	
	设备损伤面积, ft ²	致死面积, ft ²	设备损伤面积, ft ²	致死面积, ft ²
C ₃ ~C ₅	$A = 0.1744 \times 330x^{0.95}$	$A = 0.1744 \times 847x^{0.92}$	$A = 0.1744 \times 470x^{0.95}$	$A = 0.1744 \times 1204x^{0.92}$
C ₆ ~C ₈	$A = 0.1744 \times 367x^{0.95}$	$A = 0.1744 \times 921x^{0.92}$	$A = 0.1744 \times 525x^{0.95}$	$A = 0.1744 \times 1315x^{0.92}$
C ₉ ~C ₁₂	$A = 0.1744 \times 391x^{0.95}$	$A = 0.1744 \times 981x^{0.92}$	$A = 0.1744 \times 560x^{0.95}$	$A = 0.1744 \times 1401x^{0.92}$
C ₁₃ ~C ₁₆			$A = 0.1744 \times 1023x^{0.95}$	$A = 0.1744 \times 2850x^{0.90}$
C ₁₇ ~C ₂₅			$A = 0.1744 \times 861x^{0.92}$	$A = 0.1744 \times 2420x^{0.90}$
C ₂₅ +			$A = 0.1744 \times 544x^{0.90}$	$A = 0.1744 \times 1604x^{0.90}$
^a 应在至少高于自燃温度 26.67℃（80°F）条件下进行处理。				
注 1：阴影区表示公式不适用的场合。				
注 2：x——总泄漏速率, lb/s; A——面积, ft ² 。				

附录 K
(规范性附录)

机械疲劳（仅用于配管）技术模块

K.1 范围

在一定条件下，配管系统的疲劳失效会呈现非常实际的危害。合理设计和安装的配管系统不易遭受到这样的失效，但在设计阶段，预测配管的振动是非常困难的，特别是当存在诸如往复泵和压缩机等周期性的机械应力源的情况下。另外，即使配管系统在竣工条件下不易遭受到机械疲劳，但条件变化时，如在管支架失效、失衡机械的振动加剧、工艺波动期间泄压阀的振颤、流量和压力循环变化或无支撑的支管连接头重量增加（摆动效应）等情况下，都会使配管系统对疲劳敏感。意识到在变更程序管理中考虑这些影响可以降低失效的可能性。本模块旨在为这种努力做一个辅助工具。

K.2 技术模块筛选问题

表 K.1 列出的配管机械疲劳技术模块的筛选问题用于确定是否进入该模块。

表 K.1 配管机械疲劳技术模块筛选问题

筛选问题	措施
1. 该设备是一根管子吗？	如果是，则转到问题 2
2. 该配管系统中是否有过疲劳失效，或该配管系统中有无可觉察的振动，或在 15.24m（50ft）以内是否有一个与配管相连（通过结构直接或间接连接）的周期性的振动源？振动或振动源可以是连续的或间歇的。瞬变工况常引起间歇振动	如果是，则转到配管机械疲劳失效技术模块

K.3 基本数据

表 K.2 中所列数据用于配管机械疲劳技术模块。

表 K.2 配管机械疲劳分析所需的基本数据

基本数据	说明
以前的疲劳失效数： 没有，一次或不止一次	如果没有疲劳失效的历史，或者没有重大变化，则认为疲劳失效的可能性为低
振动的严重程度（可觉察的振动）：较小、中等或剧烈	振动的剧烈程度可以按这些主观判断术语来度量，或者按本表下面的可选基本数据度量。 振动的例子有： 较小：无可见振动，触摸管子时，几乎感觉不出振动； 中等：很小或无可见振动，但当接触管子时确实感觉到振动； 剧烈：在管子、支管、连接件、支架等中有可见振动迹象，当接触管子时感觉到剧烈的振动
管子已经振动的时间： 0 周～2 周，2 周～13 周，13 周～52 周	如果配管系统最近没有显著变化，并且振动量已经多年没有变化，或者累积的循环量大于疲劳极限，则可假设不定期循环应力小于疲劳极限（大多数配管的振动频率大于 1Hz，1 年 1Hz 大约为 3×10^7 个循环，这将大大超过大多数建造材料的疲劳极限）

表 K.2 (续)

基本数据	说 明
设备附近,例如 15.24m (50ft), 的周期性应力源: 往复机械、泄压阀振颤、高压力降阀 (如排放阀或混合阀)、无振源	确定配管连接的哪种周期循环源。连接可能是直接的或间接的, 比如通过结构支撑件
采取的纠正措施: 基于全面的工程分析的改进、基于经验的改进、不改进	对反映振动配管不是一个疲劳问题的分析工作赋予可信度
配管的复杂度: 在 15.24m (50ft) 的配管, 选择: 0 个~5 个支管、管接头等 5 个~10 个支管、管接头等 大于 10 个支管、管接头等	根据支管连接数、管接头数等确定配管的复杂性等
该配管中采用的接头或支管形式类型: 螺纹承插焊连接、凸鞍形连接、凹鞍形连接、焊接小管、变径小管	确定接头或支管连接形式, 这在关于被评估配管的本节中使用
管子状况: 支撑件丢失或损坏、支管承重未做支撑、加力板破裂、加力板/支撑件直接焊到配管上、良好状态	就支撑而言, 什么是被评估的管段的条件

K.4 基本假设

K.4.1 合理设计的配管由于振动周期短、应力振幅小, 出现机械疲劳的倾向很小。振动周期由配管直径、厚度、质量、支撑间距和支撑形式确定。由于在设计阶段的初步分析无法完全准确地预测安装后的配管系统的反应, 因此本模型主要考虑那些作为失效可能性的关键标志的因素。

K.4.2 根据不同专业的装置工程师和检验员的输入, 能识别出一个高的失效可能性的关键标志如下:

- a) 以前由于疲劳引起的失效。
- b) 比典型的装置配管系统更加严重的可觉察到的振动 (包括小支管接头)。
- c) 与往复机器连接的接头, 通过泄放阀或混合阀产生的极端气蚀, 或泄压阀振颤。

K.4.3 以上任一或全部标志的出现确定基准敏感性, 然后由其他基本数据对其进行修正。详细情况参见“技术模块次因子的确定”。

K.5 检验有效性

K.5.1 在本模型的范围中提到, 配管系统的机械疲劳失效相对比较罕见, 但不幸的是, 当它们一旦发生时, 可能会引起严重的后果。而且更为不幸的是, 传统的无损检测技术在防止这种失效方面几乎没什么价值。裂纹检测技术本身不充分的理由是多方面的:

- a) 配管疲劳达到失效的大多数时间处在萌生阶段, 而这时裂纹处于形成过程中或虽已形成但非常细微, 无法检测到。
- b) 当裂纹已经达到可探尺寸时, 裂纹扩展速率高, 失效可能发生在小于典型检测频率内。
- c) 在振动配管系统中, 周期性应力倾向于具有一个十分高的频率, 这种情况会增加裂纹扩展

速度。

- d) 裂纹常在不易检测的地方形成和扩展，如角焊缝焊脚、第一个未啮合的螺纹根部及其他焊缝的缺陷中。
- e) 裂纹扩展的萌生位置不一定在管子外侧，实际上，裂纹可从一个深埋裂纹扩展，如果不使用特殊方法，从任一侧都不能探测到该深埋裂纹。

K. 5.2 因此，配管系统机械疲劳的检测主要依赖于对可能导致敏感的条件进行的探测和校正。这些技术包括：

- a) 目测管支架确保所有管支架工作正常（即它们确实支撑配管）。
- b) 目测配管的任何周期性运动。当可看见管子以周期循环方式振动或运动时，则应怀疑该配管有机械疲劳失效。
- c) 目测所有配管角焊支架及配管连接件。角焊缝对疲劳失效特别敏感，并且这些焊缝可能会在发现裂纹或失效前给出一个早期报警。
- d) 按一般规律，在其上具有未支撑阀门或控制器的一个小支管接头对失效高度敏感。检查其有无运动的迹象，并提供合适的支撑给所有的这类安装件。
- e) 用手触摸来探测管子的振动。这需要经验，但炼制装置管子的振动通常不会比怠速下的汽车发动机更剧烈。
- f) 用特殊的监测设备测量配管的振动。因为没有设定在所有条件下可接受或不可接受的振动值，所以使用和判读振动数据需要经验。
- g) 目测在瞬态和不同的运行情形（启动、停机、干扰等）下的装置，找到间歇振动条件。
- h) 检验配管部件如控制阀和管件发出的可听见的振动声音。

K. 6 技术模块次因子的确定

图 K. 1 中的流程图显示了确定技术模块次因子的逻辑思路。具体步骤如下：

第 1 步：确定以前发生的失效次数，并采用表 K. 3 所对应的基准敏感度。

表 K. 3 以前的疲劳失效

以前失效次数	基准敏感度
无	1
1	50
> 1	500

第 2 步：确定管子中发生的可觉察的振动或可听见的噪声量，并采用表 K. 4 所对应的基准敏感度。

表 K. 4 可觉察的振动

可觉察的振动	基准敏感度
较小	1
中等	50
严重	500

第 2a 步：通过乘以表 K. 5 中的因子来修正可觉察振动的基准敏感度。

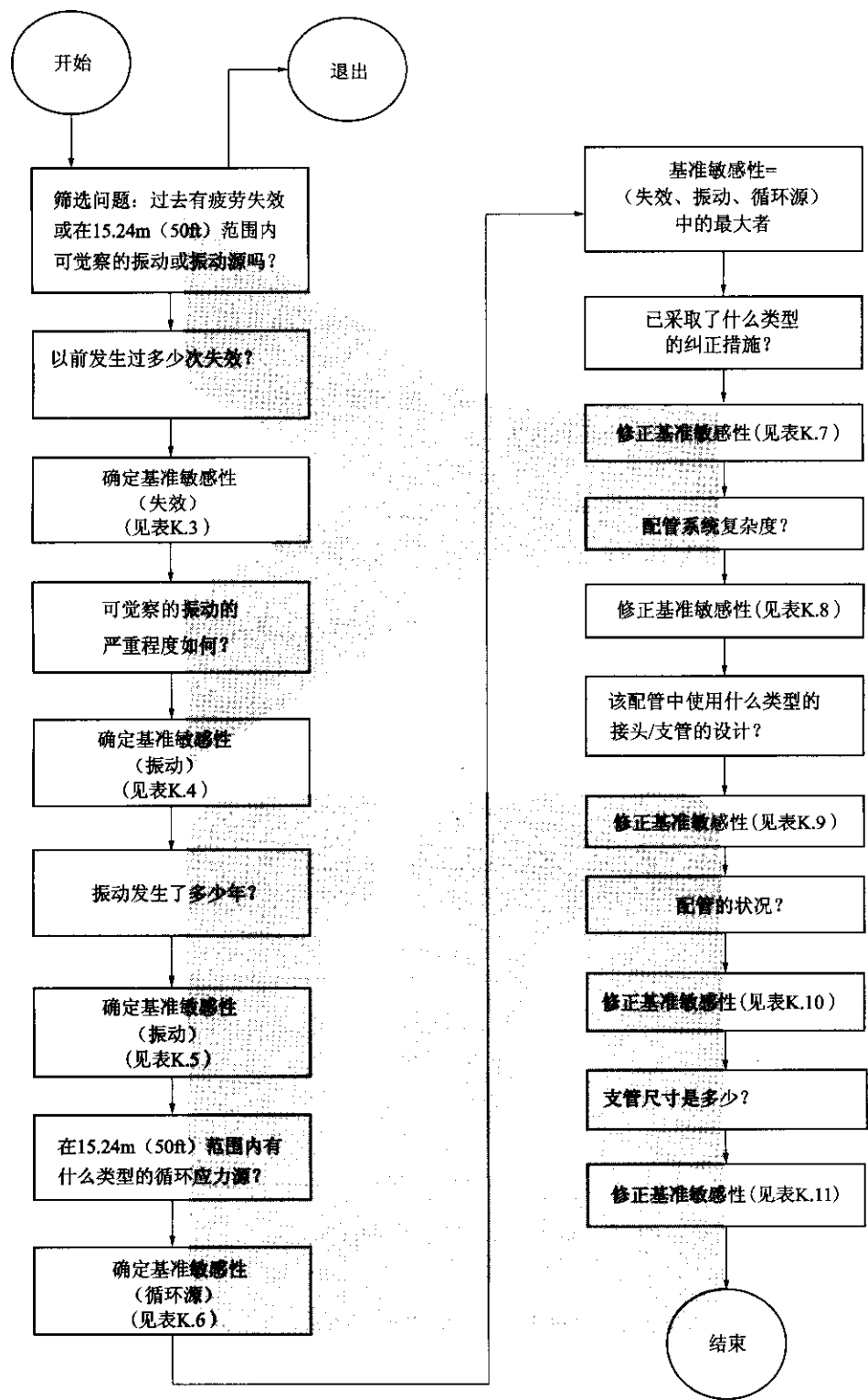


图 K.1 确定配管机械疲劳技术模块次因子

(该修正基于对有些配管系统可能经历的可见振动的数年观察。仅 1Hz (1 次/s) 的一个循环的反复应力导致一年 30000000 次以上的循环。对于大多数系统来说, 如果遭受机械疲劳失效, 则预计在达到几千万或几亿个循环之前就会失效。应注意到间歇循环是累积的。)

表 K.5 振动修正因子

振动超过 X 周	修正因子
0~2	1
2~13	0.2
13~52	0.02

第 3 步：确定 15.24m (50ft) 配管范围内直接或间接连接的循环应力的类型，并采用表 K.6 所对应的基准敏感度。

表 K.6 循环应力类型

15.24m (50ft) 内连接的循环力来源	基准敏感度
往复机械	50
泄压阀振颤	25
具有高压降的阀门	10
无	1

第 4 步：选择第 1 步、第 2 步、第 2a 步、第 3 步中的敏感度的最大者作为管子疲劳损伤的总基准敏感度。

第 5 步：通过乘以表 K.7 中的修正因子对配管系统疲劳采取的纠正措施修正总基准敏感度。

表 K.7 采取的纠正措施

采取的纠正措施	修正因子
基于完整的工程分析的修正	0.002
基于经验的修正	0.2
不修正	2

第 6 步：通过乘以表 K.8 中的修正因子修正配管复杂性的总基准敏感度。

表 K.8 配管系统的复杂性

复杂性，每 15.24m (50ft) 的配管	修正因子
0 个~5 个支管、管接头等	0.5
5 个~10 个支管、管接头等	1
大于 10 个支管、管接头等	2

第 7 步：对于接头或支管形式，通过乘以表 K.9 的修正因子，修正总基准敏感度。

表 K.9 接头或支管形式

接头形式	修正因子
螺纹连接	2
承插焊	2
凸鞍形	2

表 K.9 (续)

接头形式	修正因子
凹鞍形	1
小焊管	0.2
变径小管	0.02

第 8 步：根据管子状态，通过乘以表 K. 10 的修正因子，修正总基准敏感度。

表 K. 10 配管状态

状 态	修 正 因 子
管支架丢失或损坏	2
重量未做支撑	2
补强板破裂	2
加力板/管支架直接焊到配管上	2
良好状态	1

第 9 步：通过乘以表 K. 11 的修正因子，修正小直径支管的总基准敏感度。

表 K. 11 支管直径

支 管 直 径	修 正 因 子
支管小于或等于 50.8mm (2in)	1
所有支管均大于 50.8mm (2in)	0.02

第 10 步：第 9 步得到的值是最终的疲劳技术模块的次因子。为保证与其他的 TMSF 一致，该值的临界最大值为 5000 (5000 或超过 5000 表明几乎肯定失效)。

附 录 L
(规范性附录)
脆性断裂技术模块

L.1 范围

本模型建立易遭受脆性断裂失效的工艺设备的技术模块次因子（失效修正因子的可能性）。低温/低韧性断裂、回火脆化、473.89℃（885 ℉）脆性断裂和 σ 相脆性断裂等都包括在本模块范围内。本模块包括了对可能引起失效的特定脆性断裂机理的敏感性的估计。专家建议也可用于确定特定脆性断裂机理的敏感性。

L.2 技术模块筛选问题

没有可避开本技术模块的筛选问题。本模块包括的脆性断裂机理中包含了这些筛选问题。

L.3 基本数据

表 L.1 中所列基本数据是确定脆性断裂技术模块次因子的最少数据要求。所要求的补充数据用来回答表 L.2 中所列的脆性断裂机理的筛选问题。对每一脆性断裂机理所需的更多数据列在靠近每一机理章节的开始部分的基本数据表中。

表 L.1 脆性断裂分析所需的基本数据

基本数据	说 明
厚度, in	用来根据 ASME 冲击试验厚度判断查找需要的冲击试验温度
运行压力, psig	用来确定施加的应力
运行温度, ℉	用来确定对各种脆性断裂的敏感性
建造材料的规格和等级	用来查找设备/配管的基本性能（抗拉强度、屈服强度等）。如果已知, 应使用准确的规格和等级, 否则, 可采用保守的默认值
焊后热处理? (Y/N)	用来确定设备的残余应力

表 L.2 脆性断裂机理的筛选问题

筛 选 问 题	措 施
1. 低温/低韧性脆性断裂 A. 材料是碳钢或低合金钢吗? 参见表 L.8 中的清单。 B. 你知道 MDMT 吗? C. 在正常或干扰条件下的运行温度可以低于设计的最小金属温度 (MDMT) 吗?	如果是, 转到问题 B 如果不知, 转到 L.8; 如果知道, 转到问题 C
2. 回火脆化 材料是 $1\frac{1}{4}\text{Cr}\sim\frac{1}{2}\text{Mo}$, $2\frac{1}{4}\text{Cr}\sim\frac{1}{2}\text{Mo}$ 或 $3\text{Cr}\sim 1\text{Mo}$ 钢吗? 运行温度在 343.33℃~576.67℃ (650 ℉~1070 ℉) 之间吗?	如果都是, 转到 L.9

表 L. 2 (续)

筛选问题	措 施
3. 885 °F 脆化 材料是高铬 (>12%) 铁素体钢吗? 运行温度在 371. 11℃~565. 56℃ (700 °F~1050 °F) 之间吗?	如果都是, 转到 L. 10
4. σ 相脆化 材料是奥氏体不锈钢吗? 运行温度在 593. 33~926. 67℃ (1100 °F~1700 °F) 之间吗?	如果都是, 转到 L. 11

L. 4 基本假设

脆性断裂要求同时出现一个足够尺寸的缺陷、承受足够的应力和敏感的材料。脆性断裂失效的敏感性可能由于服役条件而发生改变。每一部分脆性断裂机理确定了适合每一情况的可能性修正 (技术模块次因子)。

L. 5 技术模块次因子 (TMSF) 的确定

每一机理都给出了确定技术模块次因子所需的步骤流程图。下面将连同所需表格一起讨论这些步骤。

L. 6 脆性断裂机理的筛选问题

表 L. 2 中所列的筛选问题用于选择适用的脆性断裂机理。

L. 7 确定每一潜在脆性断裂机理的敏感性

每一脆性断裂机理的单独部分用来确定在该设备中可能出现的每一机理的敏感性。

L. 8 低温/低韧性断裂

L. 8.1 损伤说明

L. 8.1.1 低温/低韧性断裂是结构件的突然失效, 通常在裂纹或缺陷处萌生。这是一个异常情况, 因为设计应力通常很低, 足以防止这类失效发生。然而, 一些厚壁的旧设备、可能会异常而产生低温, 这些设备或经过改造的设备对于温度变化是敏感的。

L. 8.1.2 钢的低温/低韧性断裂受以下因素影响:

- 施加的载荷。断裂较少在低施加载荷下发生。
- 材料规格。有些材料制造时具有良好的断裂性能或韧性性能。材料常通过进行冲击试验来验证合格。该试验测量使缺口试样断裂所需的能量。
- 温度。许多材料 (特别是铁素体钢) 在低于某一温度时会变脆。这一温度称为转变温度。在 148. 89℃ (300 °F) 以上, 一般不必担心脆性断裂。
- 残余应力和焊后热处理。
- 厚度。

L. 8.1.3 低温/低韧性断裂评估的目的是依据断裂失效的相对可能性对设备进行评级。该评估将考虑厚度、材质、焊后热处理和温度。

L. 8.2 基本数据

表 L. 3 所列的数据可用来估计碳钢或低合金钢的低温/低韧性脆性断裂的敏感度。若不知道确切的工艺条件，可咨询一位知识丰富的工艺工程师来获得最佳的估计。

表 L. 3 低温/低韧性脆性断裂分析所需的基本数据

基本数据	说 明
正火处理了吗？(Y/N)	用于查找必需的冲击试验温度
冲击试验温度，°F	如果进行了冲击试验。 如果此项为空，则假定未做冲击试验
对干扰采取了管理控制了吗？(Y/N)	有防止在设计压力或接受设计压力下低温（干扰）同时发生的控制和/或合理培训吗
在正常或干扰条件下的最小运行温度，°F	可由使用者输入。如果流体为液体，则可将该温度设为流体在设备中的常压沸点

L. 8.3 确定钢材低温/低韧性断裂的技术模块次因子

图 L. 1 概述了确定低温/低韧性断裂次因子的过程。

第 1 步：确定是否有防止设备在低于某一温度下满负荷运行的管理或工艺控制。如果是这样，将这一温度作为 T_{min} ，转到第 3 步。

第 2 步：确定设备可能经受的最低温度 T_{min} ，使用以下的最低值。

- a) 最低设计温度。
- b) 工艺工程师估计的最低温度，包括异常工况。
- c) 如果容器或管子充满带压液体，液体在大气压下的沸点。例如，液氮的沸点为 -33.33°C (-28°F)，丙烷的沸点为 -40°C (-40°F)。

第 3 步：确定金属厚度。根据 ASME《压力容器质量手册》中 UCS 66 使用合适的厚度。

第 4 步：确定 T_{ref} ，已知完成冲击试验的温度或对该材料规格和等级免做冲击试验的温度。使用表 L. 8 来找到该材料规格和等级免做冲击试验的曲线。如果材料经过正火，则对正火材料使用免做冲击试验曲线。使用厚度和曲线标识符在图 L. 2 中确定免做冲击试验温度。也可使用 MDMT（最小设计金属温度）。

第 5 步：确定设备是否进行过焊后热处理。若没有，则使用表 L. 4 和表 L. 5，反之采用表 L. 6 和表 L. 7 来确定技术模块次因子。

表 L. 4 无焊后热处理的技术模块次因子（英制单位）

无焊后热处理		厚度，in								
		0.25	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$T_{min} - T_{ref}$	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.9	1.1	1.2
	80	0.0	0.0	0.0	0.8	1.1	2	2	4	6
	60	0.0	0.0	1.0	2	4	9	19	36	60
	40	0.0	0.7	2	9	29	69	133	224	338
	20	0.1	1.3	10	49	143	296	500	741	1008
	0	0.9	3	39	175	424	759	1142	1545	1950
	-20	1.2	7	109	405	850	1366	1897	2415	2903
	-40	2	16	220	697	1317	1969	2596	3176	3703
	-60	2	30	350	988	1740	2479	3160	3769	4310
	-80	3	46	474	1239	2080	2873	3581	4203	4746
	-100	4	61	579	1436	2336	3160	3883	4509	5000

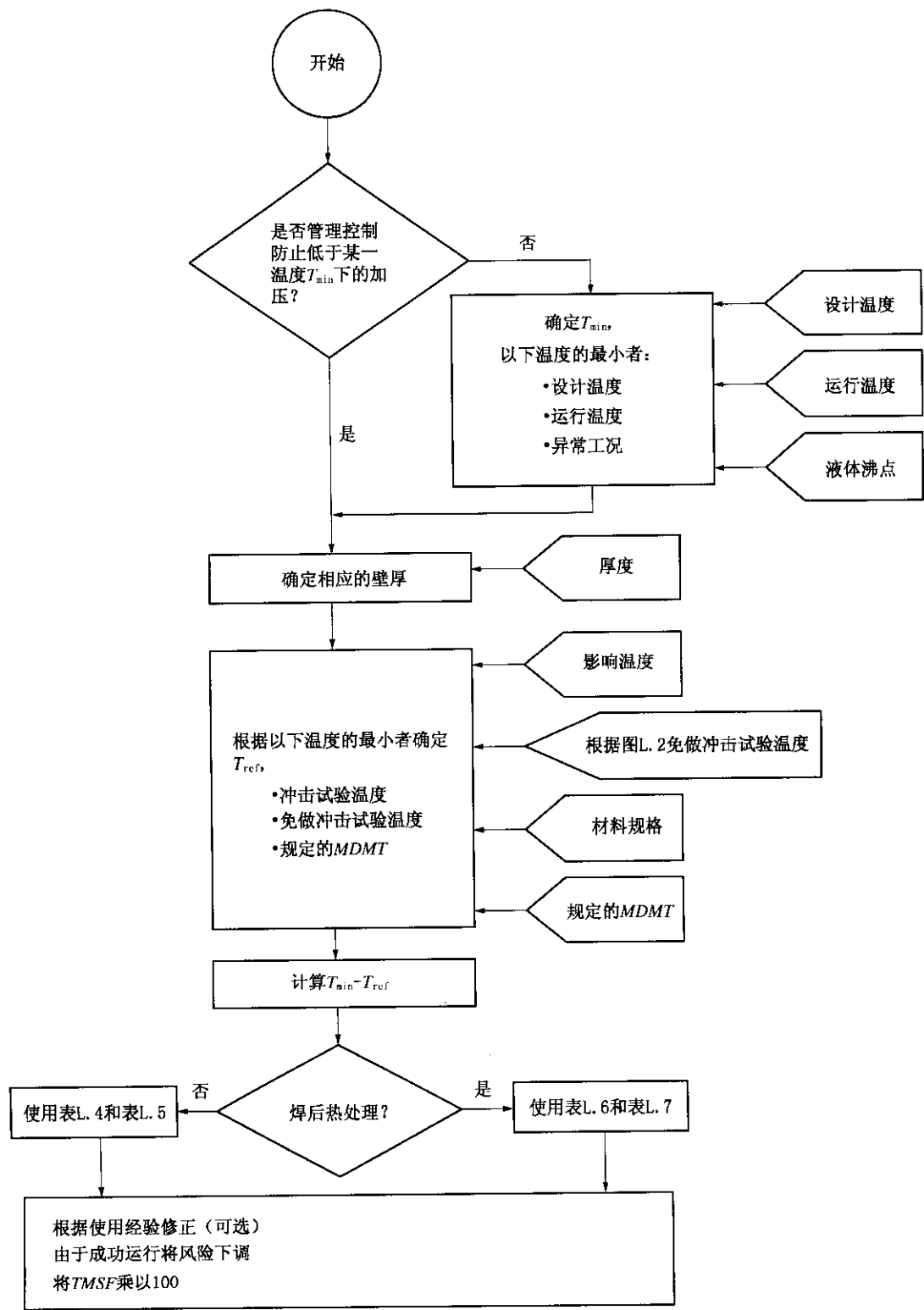
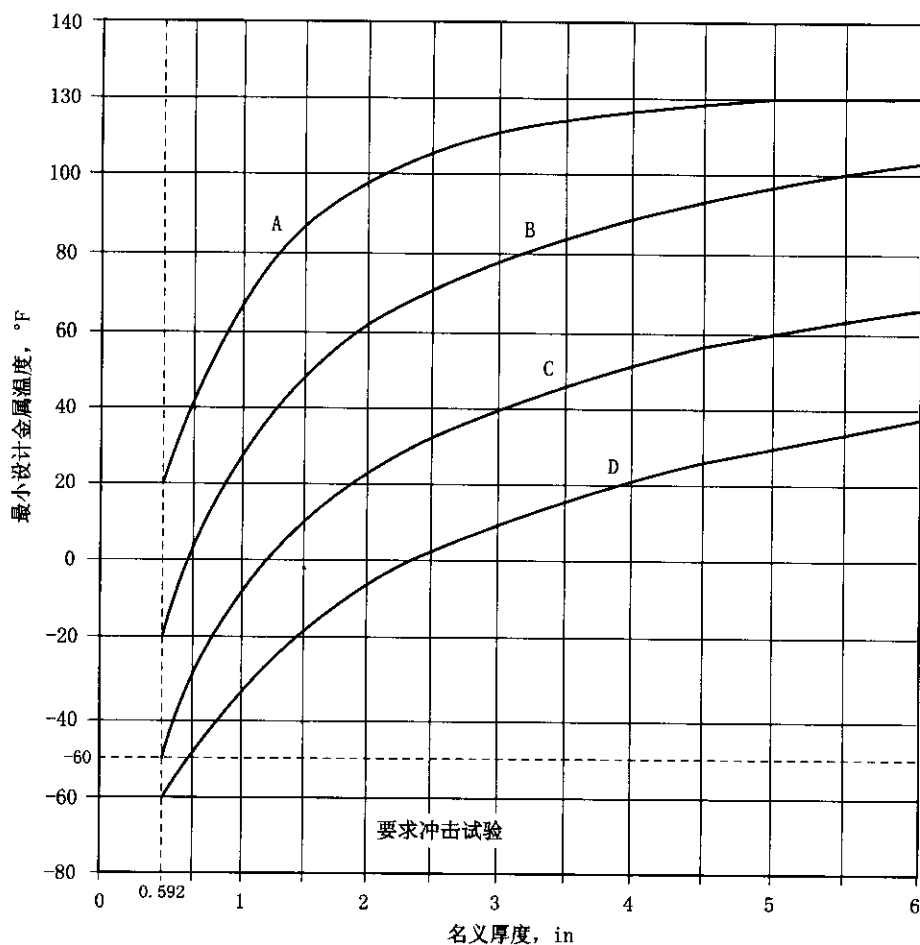


图 L. 1 低温/低韧性断裂技术模块次因子的确定



- 注1: 曲线A~曲线D定义符合表L. 8的材料规范等级。
 注2: CET高于相应材料曲线的设备免于进一步脆性断裂评估。
 注3: 该图与ASME UCS66第Ⅷ章第一部分的图相同。

图 L. 2 免做冲击试验曲线

表 L. 5 无焊后热处理的技术模块次因子 (法定计量单位)

无焊后热处理		厚度, mm								
		6.35	12.7	25.4	38.1	50.8	63.5	76.2	88.9	101.6
$T_{\min} - T_{\text{ref}}$	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.9	1.1	1.2
	80	0.0	0.0	0.0	0.8	1.1	2	2	4	6
	60	0.0	0.0	1.0	2	4	9	19	36	60
	40	0.0	0.7	2	9	29	69	133	224	338
	20	0.1	1.3	10	49	143	296	500	741	1008
	0	0.9	3	39	175	424	759	1142	1545	1950
	-20	1.2	7	109	405	850	1366	1897	2415	2903
	-40	2	16	220	697	1317	1969	2596	3176	3703
	-60	2	30	350	988	1740	2479	3160	3769	4310
	-80	3	46	474	1239	2080	2873	3581	4203	4746
	-100	4	61	579	1436	2336	3160	3883	4509	5000

表 L.6 焊后热处理的技术模块次因子（英制单位）

焊后热处理		厚度，in								
		0.25	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$T_{\min} - T_{\text{ref}}$	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2
	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	1.1	1.3
	40	0.0	0.0	0.0	0.5	1.1	1.3	2	3	4
	20	0.0	0.0	0.6	1.2	2	4	7	13	23
	0	0.0	0.0	1.1	2	6	14	29	53	88
	-20	0.0	0.4	2	5	17	41	83	144	224
	-40	0.0	0.9	3	12	38	90	171	281	416
	-60	0.0	1.1	5	22	68	153	277	436	623
	-80	0.0	1.2	7	34	102	219	382	582	810
	-100	0.0	1.3	9	46	133	277	472	704	962

表 L.7 焊后热处理的技术模块次因子（法定计量单位）

焊后热处理		厚度，mm								
		6.35	12.7	25.4	38.1	50.8	63.5	76.2	88.9	101.6
$T_{\min} - T_{\text{ref}}$	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	1.1	1.3
	40	0.0	0.0	0.0	0.5	1.1	1.3	2	3	4
	20	0.0	0.0	0.6	1.2	2	4	7	13	23
	0	0.0	0.0	1.1	2	6	14	29	53	88
	-20	0.0	0.4	2	5	17	41	83	144	224
	-40	0.0	0.9	3	12	38	90	171	281	416
	-60	0.0	1.1	5	22	68	153	277	436	623
	-80	0.0	1.2	7	34	102	219	382	582	810
	-100	0.0	1.3	9	46	133	277	472	704	962

表 L.8 碳钢和低合金钢的免冲击试验曲线

规 格	默认曲线	正火曲线
SA 36	A	B
SA-283 所有等级	A	B
SA-285 所有等级	B	C
SA-299	A	B
SA-414GrA	B	C

表 L.8 (续)

规 格	默 认 曲 线	正 火 曲 线
SA-414GrB, C, D, E, F, G	A	B
SA-442 Gr55 & 60	B	D
SA-455	A	B
SA-515 Gr 55	B	C
SA-515 Gr 60	B	C
SA-515 Gr 65	A	B
SA-515 Gr 70	A	B
SA-516 Gr 55	C	D
SA-516 Gr 60	C	D
SA-516 Gr 65	B	C
SA-516 Gr 70	B	C
SA-537 所有等级	D	D
SA-562	A	B
SA-612	B	D
SA-620 Gr 1	A	B
SA-620 Gr 2	A	B
SA-662 Gr A	C	D
SA-662 Gr B	B	D
SA-662 Gr C	A	D
SA-737 Gr B & C	A	B
SA-738 Gr A & B	A	B
SA-812 Gr 65 & 80	A	B
SA-202 Gr A & B	A	A
SA-203 所有等级	D	D
SA-204 所有等级	A	A
SA-225 Gr C	A	A
SA-302 Gr A	A	A
SA-302 Gr B	A	A
SA-302 Gr C	C	C
SA-302 Gr D	D	D
SA-387 Gr 2 Cl. 1	A	A
SA-387 Gr 2 Cl. 2	A	A
SA-387 Gr 12 Cl. 1	A	A
SA-387 Gr 12 Cl. 2	A	A
SA-387 Gr 11 Cl. 1	A	A

表 L.8 (续)

规 格	默 认 曲 线	正 火 曲 线
SA-387 Gr 11 Cl. 2	A	A
SA-387 Gr 22 Cl. 1	A	C
SA-387 Gr 22 Cl. 2	A	C
SA-387 Gr 21 Cl. 1	A	C
SA-387 Gr 21 Cl. 2	A	C
SA-387 Gr 5 Cl. 1	A	A
SA-387 Gr 5 Cl. 2	A	A
SA-387 Gr 91 Cl. 2	A	A
SA-533 Gr A. Cl. 1	A	A
SA-533 Gr B. Cl. 1	B	B
SA-533 Gr C. Cl. 1	C	C
SA-542 Gr C. Cl. 4a	A	A
SA-832	A	A
SA-53 管子 Gr A & B	A	A
SA-106 管子, 所有等级	A	A
SA-179 小管	A	A
SA-192 小管	A	A
SA-210 小管 Gr A-1 & C	A	A
SA-333 管子 Gr 1 & 6	A	A
SA-334 小管 Gr 1 & 6	A	A
SA-524 管子 Gr I & II	D	D
SA-556 小管, 所有等级	A	A
SA-135 管子 Gr A & B	A	A
SA-178 小管 Gr A & C	A	A
SA-214 小管	A	A
SA-226 小管	A	A
SA-557 小管, 所有等级	A	A
SA-587 小管	A	A
未知	A	B

第 6 步: 根据 API RP 579 二级评价中的方法 3 的使用经验修正。如果设备多年暴露在最低期望温度下, 但是设备不在疲劳或 SCC 场合下服役, 那么风险可能被修正到较低水平。这是基于多年成功的工业经验。将技术模块次因子除以 100。

L.8.4 检验有效性

L.8.4.1 低温/低韧性断裂可通过合适的设计和操作规程的共同作用予以防止。当低温/低韧性断裂发生时, 它总是在某一预先存在的裂纹类缺陷处萌生。从萌生点开始, 裂纹将迅速扩展, 导致严重的

泄放，有时导致设备的完全破裂或解体。理论上说，定位和消除这类预先存在的缺陷的检测能降低失效的可能性。但是，萌生缺陷可能很小，且并不暴露在可被发现的表面，因此，通常认为对这类缺陷的检测不是防止脆性断裂的一个有效方法。

L. 8.4.2 如果设备的现有记录不能表明其是用经过正火的板材制造，则金相检查可能有助于解决这一问题。在某些情况下，可取足够大的材料试样进行试验以确定韧性。这还可提高对低温/韧性断裂可能性预测的准确性。

L. 8.4.3 如 L. 8.4.1 和 L. 8.4.2 所述，检测不能增加“可信度”。但是，金相试验可用来更新本附录的输入数据，且可能导致低温/韧性断裂次因子的改变。

L. 9 回火脆化

L. 9.1 损伤描述

L. 9.1.1 许多钢材长期处于 343.33℃ (650 ℉) 和 576.67℃ (1070 ℉) 的温度范围下时，其韧性会降低，这一现象被称为回火脆化。炼油和石油化工工业特别关心的一个问题就是在脆性温度范围的运行中使用的 Cr-Mo 钢的脆化问题。金属断裂韧性的降低只影响设备在启动和停机时处于较低温度下的材料。避免脆性断裂的作法曾经在容器温度低于某一最低工艺温度时，将运行压力降至设计压力的四分之一。典型的工业实践是对较老的低合金钢最低温度为 300 ℉~350 ℉，对较新的钢为更低的温度。

L. 9.1.2 回火脆化由钢材中残存元素和合金元素沿晶界析出引起。钢材中磷和锡的含量尤其重要，其作用因钢中的锰和硅这两种重要的合金元素而变差。一般规定一个基于成分的“J”因子来控制钢材对回火脆化的敏感性。“J”因子按公式： $J = (Si + Mn) \times (P + Sn) \times 10^4$ 来计算。实验室和长期现场研究都证实了“J”因子和回火脆化量之间的良好的相互关系。

L. 9.1.3 回火脆化的一个很重要方面是焊缝金属和热影响区呈现出的脆性敏感性比锻钢母材高的趋势。少数研究表明， $2\frac{1}{4}\text{Cr} - \frac{1}{2}\text{Mo}$ 和 $3\text{Cr} - 1\text{Mo}$ 特别敏感。 $1\frac{1}{4}\text{Cr} - \frac{1}{2}\text{Mo}$ 钢是否也敏感仍有争议，但在本模块中，仍将它们列入。

L. 9.2 回火脆化的筛选问题

表 L. 9 中所列的回火脆化筛选问题用于确定是否应采用关于回火脆化的节段。

表 L. 9 回火脆化的筛选问题

筛 选 问 题	步 骤
1. 材料是 $1\frac{1}{4}\text{Cr} - \frac{1}{2}\text{Mo}$ ， $2\frac{1}{4}\text{Cr} - \frac{1}{2}\text{Mo}$ 或 $3\text{Cr} - 1\text{Mo}$ 钢吗	如果都是，转到 L. 10. 4
2. 工作温度在 343.33℃~576.67℃ (650 ℉~1070 ℉) 之间吗	

L. 9.3 基本数据

表 L. 10 中所列数据用于估计碳钢和低合金钢对回火脆化的敏感性。如果不知道准确的工艺条件，则应咨询一位知识丰富的工艺工程师以得到相关数据。

表 L. 10 回火脆化分析所需的基本数据

基 本 数 据	说 明
是否正火？(Y/N)	用来查找必需的冲击试验温度
冲击试验温度，℉	如果进行了冲击试验的话。如果此项为空，则假定未做冲击试验

表 L.10 (续)

基本数据	说 明
对干扰有管理控制吗? (Y/N)	是否有防止在设计压力或接近设计压力下的低温同时发生的控制和合理培训
在正常、启动/停机或干扰条件下的最低运行温度, °F	为了控制断裂失效, 对于回火脆化设备, 当低于这个温度时, 可以通过降低压力来修正。如果未输入, 则当流体为流体时, 将温度设成设备中的流体的常压沸点
使用时间, 年	在温度范围内的使用年数
$\Delta FATT$ (韧脆性转变温度增量), °F	由本附录根据材料类型、冶炼条件、运行温度和使用时间提供。使用者如能获得更好数据, 可取代此值
钢材的化学成分 (可选)	特别是 Si%, Mn%, P%, Sn%, 它们对回火脆化敏感性有影响。如果未知, 则假定有一转换
材料是否筛选? (Y/N)	材料是否用于钢材成分规定的回火脆化敏感性的筛选, 或规定“步冷”试验 (SCE) 的转变温度要求等方法筛选了回火脆化敏感性了吗
SCE 指定的 Δ 温度, °F	为步冷试验 (SCE) 指定的 Δ 温度

L.9.4 基本假设

表 L.11 列出了已知对回火脆化敏感的一些普通材料。

表 L.11 对回火脆化敏感的材料

规 格	默 认 曲 线	正 火 曲 线
SA-387 Gr 11 Cl. 1	A	A
SA-387 Gr 11 Cl. 2	A	A
SA-387 Gr 22 Cl. 1	A	C
SA-387 Gr 22 Cl. 2	A	C
SA-387 Gr 21 Cl. 1	A	C
SA-387 Gr 21 Cl. 2	A	C
未列出	A	A

L.9.5 确定回火脆化技术模块次因子

图 L.3 概述了确定回火脆化次因子的过程。

第 1 步: 确定是否有防止设备在低于某一温度下设备满负荷运行的管理或工艺控制措施。如果是这样, 以这一温度作为 T_{min} , 转到第 3 步。

第 2 步: 确定设备可能承受的最低温度 T_{min} , 使用以下项的最低值:

- a) 最低设计温度。
- b) 工艺工程师估计的最低温度, 包括异常工况。

第 3 步: 确定金属厚度。根据 ASME UCS 66 应用适当的厚度。

第 4 步: 确定 T_{ref} , 已知完成冲击试验的温度或对该材料规格和等级免做冲击试验的温度。使用表 L.11 来找到该材料规格和等级免做冲击试验的曲线。如果材料经过正火, 则对正火材料使用免除冲击试验曲线。使用厚度和曲线标识符在图 L.1 中确定免做冲击试验温度。也可使用 $MDMT$ (最小设计金属温度)。

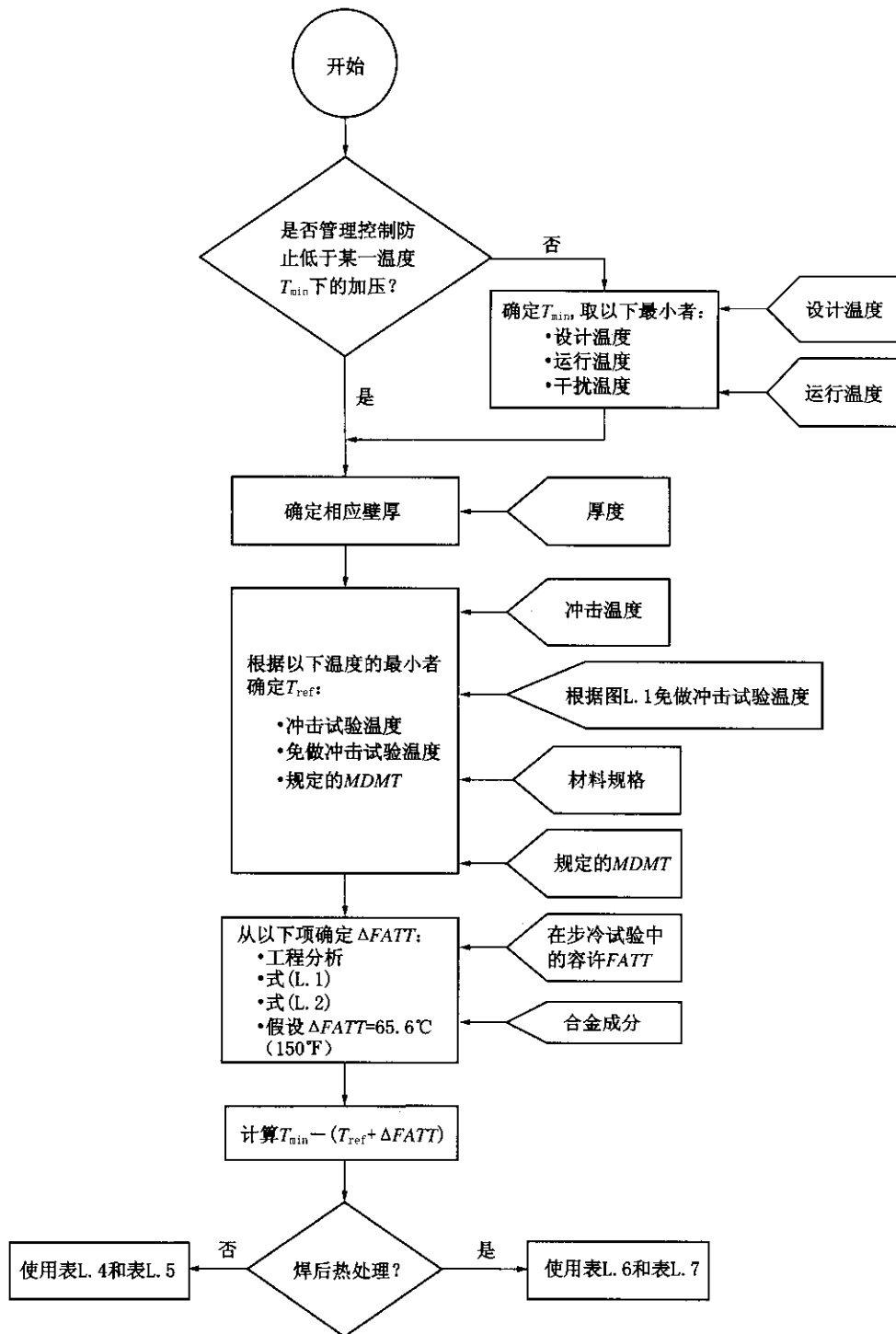


图 L.3 回火脆化技术模块次因子的确定

第5步：将 $\Delta FATT$ 加 T_{ref} 。

$\Delta FATT$ 可由以下按精确度降序列出的方法估计：

a) 按工程分析或对金属试样的实际试验的确定，直接输入 $\Delta FATT$ 。

b) 输入为步冷（SCE）试验中确定允许 $\Delta FATT$ 规定的值。它可以根据运行小时数，使用公式 $\{\Delta FATT = 0.67 \times [\lg(t - 0.91) \cdot SCE]\}$ 与实际在役 $\Delta FATT$ 相关联。公式中 t 是运行小

时数，SCE 是 $FATT$ 的规定变化值。

c) 根据化学成分（如果未知）来确定 J 因子， J 因子可与长期使用后的 $\Delta FATT$ 相关联。根据长期暴露，它大致通过等式 ($\Delta FATT = 0.6J - 20$) 保守地与 J 因子发生联系。

b) 对于长期的 $\Delta FATT$ ，可假设一个 65.56°C (150°F) 的保守值。

第 6 步，确定设备是否经过焊后热处理。如果没有，则使用表 L. 4 和表 L. 5，否则，使用表 L. 6 和表 L. 7 的技术模块次因子。

L. 10 473.89°C (885 °F) 脆化

L. 10.1 损伤说明

L. 10.1.1 473.89°C (885 °F) 脆化是含量大于 13% 的铁素体不锈钢在暴露于 $371.11^{\circ}\text{C} \sim 537.78^{\circ}\text{C}$ ($700^{\circ}\text{F} \sim 1000^{\circ}\text{F}$) 温度后发生的韧性下降。韧性下降是由于铬—磷金属间相在高温时的析出。与导致由于金相改变而发生的韧性损失的其他机理的情况一样，对韧性的影响主要不是发生在运行温度下，而是发生在装置停机或异常工况的较低温度下。

L. 10.1.2 金属间相的析出被认为最容易在 473.89°C (885 °F) 左右发生，这一机理的命名即得于此。含铬量超过 27% 的钢受影响最大，但这些钢一般不用于炼油和石化工艺。通常认为马氏体不锈钢，如 410 不受这一问题的影响。405 是一种铁素体不锈钢，当它的含铬量达到其成分范围的上限时，容易出现这一问题。

L. 10.1.3 473.89°C (885 °F) 脆化的存在可通过影响区的硬度增加自身体现出来。从使用设备上取试样的物理试验最能说明这一问题。

L. 10.1.4 通过适当的热处理来溶解析出物，然后快速冷却，473.89°C (885 °F) 脆化是可逆的。热处理温度一般在 $760^{\circ}\text{C} \sim 815.56^{\circ}\text{C}$ ($1400^{\circ}\text{F} \sim 1500^{\circ}\text{F}$) 之间，因此这可能对许多设备项来说并不实用。

L. 10.2 473.89°C (885 °F) 脆化的筛选问题

表 L. 12 中所列的筛选问题用于确定是否应采用关于 473.89°C (885 °F) 脆化断裂的节段。

表 L. 12 473.89°C (885 °F) 脆化的筛选问题

筛 选 问 题	措 施
1. 材料是高铬 (>13%) 铁素体钢吗？见表 L. 14 清单 2. 运行温度在 $371.11^{\circ}\text{C} \sim 565.56^{\circ}\text{C}$ ($700^{\circ}\text{F} \sim 1050^{\circ}\text{F}$) 之间吗？	如果都是，转到 L. 11.3

L. 10.3 基本数据

表 L. 13 中列出的可能数据可用来估计对 473.89°C (885 °F) 脆化的敏感度。如果不知道确切的工艺条件，则应咨询一位知识丰富的工艺工程师以获得最佳估计。

表 L. 13 473.89°C (885 °F) 脆化分析所需的基本数据

基 本 数 据	说 明
对异常工况有管理控制吗？(Y/N)	有防止在设计压力或接近设计压力下低温（异常工况）同时发生的控制和意识培训吗
正常或异常工况下的最低运行温度，°F	由使用者输入
初始转换温度，°F	模块中采用的 T_{ref} 。如果不能获得 T_{ref} ，可取转换温度为 26.67°C (80°F)

L. 10. 4 基本假设

L. 10. 4. 1 由于 473. 89℃ (885 ℉) 脆性可在较短的时间内发生，所以本模块假设表 L. 14 所列已经暴露于 371. 11℃~537. 78℃ (700 ℉~1000 ℉) 温度范围的任一种铁素体钢都受到影响。

表 L. 14 受 473. 89℃ (885 ℉) 脆化影响的材料

钢材常用型号	铬含量,%
Type405	11. 5~14. 5
Type430	16~18
Type430F	16~18
Type442	18~23
Type446	23~27

L. 10. 4. 2 API RP 579 建议，对脆化的材料，其韧性应由在 37. 78℃ (100 ℉) 下截短的 K_{Ir} 曲线 (断裂终止) 确定。还进一步建议，对于严重脆化的材料，应使用该值的 50%。铁素体不锈钢 (400 系列) 的塑性—脆性转变温度处在 10℃~37. 78℃ (50 ℉~100 ℉) 范围之内。在本模块中，如果使用者没有异议的话，将 T_{ref} 取为 26. 67℃ (80 ℉)。图 L. 4 示出了 K_{Ic} 和 K_{Ir} 的对比曲线。

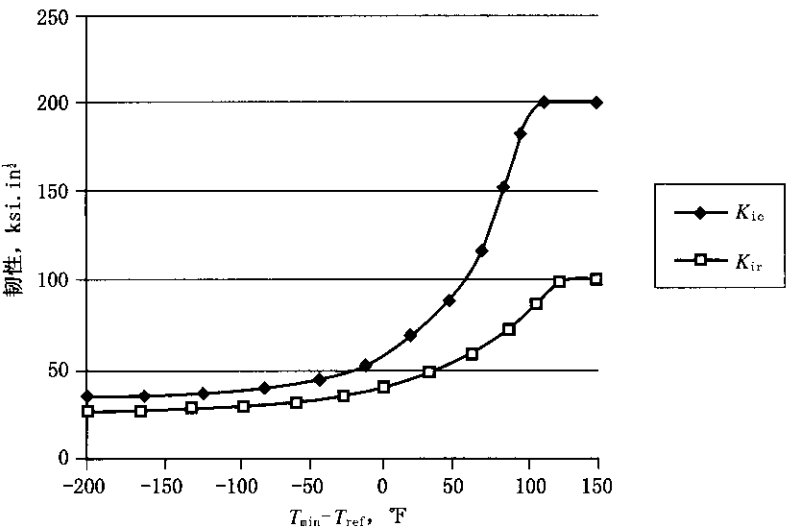


图 L. 4 断裂停止曲线

L. 10. 5 确定 473. 89℃ (885 ℉) 脆化的技术模块次因子

图 L. 5 概述了确定技术模块次因子的过程。

第 1 步：确定是否有防止设备在低于某一温度下满负荷运行的管理控制或工艺控制。如果有，以这一温度作为 T_{min} ，转到第 3 步。

第 2 步：确定设备可能承受的最低温度 T_{min} ，使用下列中的最低值：

- a) 最低设计温度。
- b) 工艺工程师估计的包括异常工况在内的最低温度。

第 3 步：确定 T_{ref} 。可以使用 26. 67℃ (80 ℉) 默认值，或已知的其他初始转化温度。

第 4 步：从表 L. 15 中查出技术模块次因子。

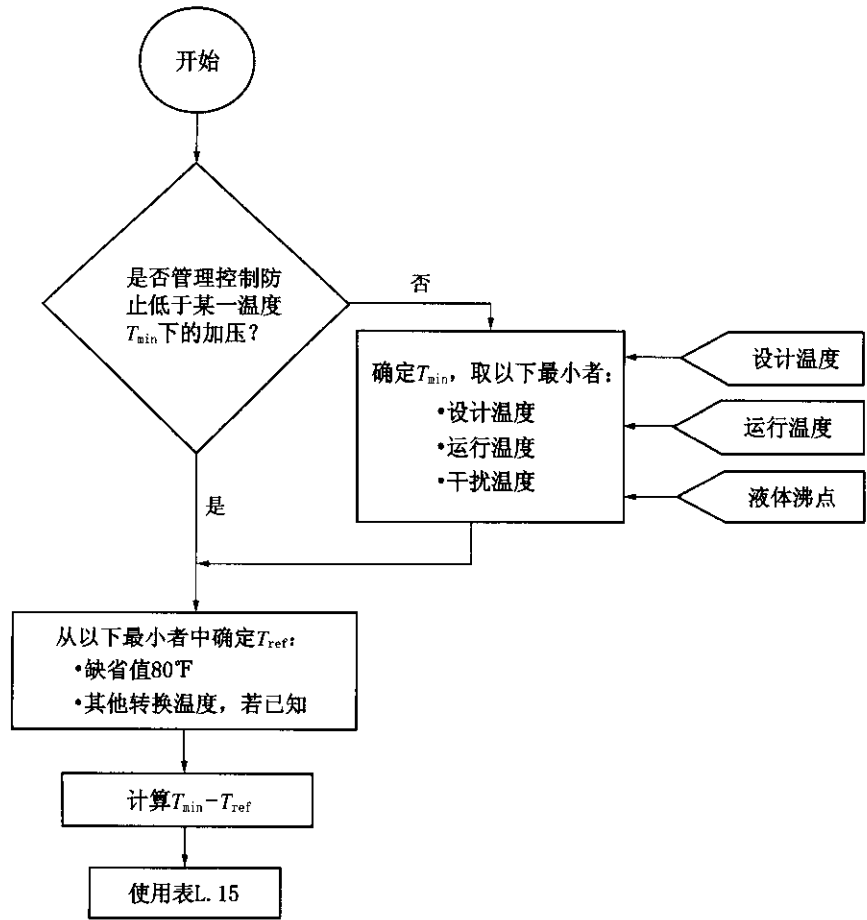


图 L. 5 473.89°C (885 °F) 脆化技术模块次因子的确定

表 L. 15 473.89°C (885 °F) 脆化技术模块次因子

$T_{min} - T_{ref}$	$TMSF$
100	2
80	8
60	30
40	87
20	200
0	371
- 20	581
- 40	806
- 60	1022
- 80	1216
- 100	1381

L. 11 σ 相脆性断裂

L. 11.1 损伤描述

L. 11.1.1 σ 相是铁和铬大致组成为 $Fe_{0.6}Cr_{0.4}$ 的一种硬质脆性金属间化合物。当暴露于 593.33°C

~926.67℃ (1100 ℉~1700 ℉) 温度下时, 它发生在铁素体 (Fe-Cr)、奥氏体 (Fe-Cr-Ni) 和马氏体 (Fe-Cr) 不锈钢中。 σ 的形成速度和量取决于合金的化学成分和前期冷加工历史。铁素体稳定元素 (如 Cr, Si, Mo, Al, W, V, Ti, Nb) 倾向于促进 σ 相的形成, 而奥氏体稳定元素 (如 C, Ni, N, Mn) 则倾向于减缓 σ 相的形成。奥氏体不锈钢合金一般呈现最大 10% σ 相, 或随着镍含量增加而更低。但是, 额定的组成为 60% 铁、40% 铬 (大约为 σ 相的组成) 的其他合金可被转变为实质上 100% σ 相。这种 Fe-Cr 合金的转变时间曲线表明在 725℃ (1377 ℉) 下过冷全转变为 σ 相只需 3h。当奥氏体不锈钢在 690.56℃ (1275 ℉) 下进行焊后热处理时, 奥氏体不锈钢中向 σ 相的转变也可以在几小时内发生, 就像已知的 σ 相形成趋势证明的那样。 σ 相在 898.89℃ (1650 ℉) 以上温度下不稳定, 奥氏体不锈钢部件在 1065.56℃ (1950 ℉) 下经历 4h 固熔退火处理, 然后水淬, 可消除 σ 相。

L. 11.1.2 σ 化材料的机械性能受到影响取决于存在的 σ 相的量和 σ 相颗粒的大小和形状。因此, 预测 σ 化材料的机械性能是困难的。

L. 11.1.3 σ 化不锈钢的拉伸强度和屈服强度比固熔退火处理的材料稍微高一些。这种强度的增加伴随着延展性的降低 (通过延伸率和面积减少衡量) 和硬度的稍微增加。

L. 11.1.4 受 σ 相形成影响最大的性能是韧性。冲击试验表明, σ 化不锈钢与固熔退火处理的材料相比, 其冲击能量吸收和剪切断裂百分比减少。这一影响在 537.78℃ (1000 ℉) 以下的温度下最显著。虽然在更高温度下冲击性能也可能有一些降低, 然而, 因为奥氏体不锈钢在固熔退火处理状态下显示良好的冲击性能, 所以即使有显著的退化, 冲击性能也可与工艺工业中使用的其他钢相当。材料性能委员会的适用性评价报告草案对热脆化奥氏体不锈钢的基体金属和焊接金属推荐的默认断裂韧性值分别为 $150\text{ksi} \cdot \text{in}^{\frac{1}{2}}$ 和 $80\text{ksi} \cdot \text{in}^{\frac{1}{2}}$ 。

L. 11.1.5 对 FCC 再生器内件的 σ 化不锈钢试样进行的试验表明, 即使只有 10% σ 相形成, 在 648.89℃ (1200 ℉) 下夏比冲击韧性为 $52.842\text{N} \cdot \text{m}$ ($39\text{ft} \cdot \text{lb}$)。这一数值对大多数钢都是足够的, 但它远小于在固溶退火处理的不锈钢测得的 $257.435\text{N} \cdot \text{m}$ ($190\text{ft} \cdot \text{lb}$)。在该试样上, 冲击韧性在室温下减少到 $13\text{ft} \cdot \text{lb}$, 是一个边际值, 但对许多应用都是可接受的。剪切断裂百分率是材料冲击韧性的另一指标, 它表示夏比冲击试样中塑性断裂的百分比。对上面提到的 10% σ 化试样, 其值的范围为室温下的 0% 到 648.89℃ (1200 ℉) 下的 100%。因此, 虽然冲击韧性在高温下降低, 但试样以 100% 塑性方式断裂, 说明材料仍然适用。室温下断裂韧性的缺乏表明在停机时, 因为可能形成脆性断裂, 应小心避免对 σ 材料施加高应力。图 L. 6 汇总了 304 和 321 不锈钢的冲击性能数据。

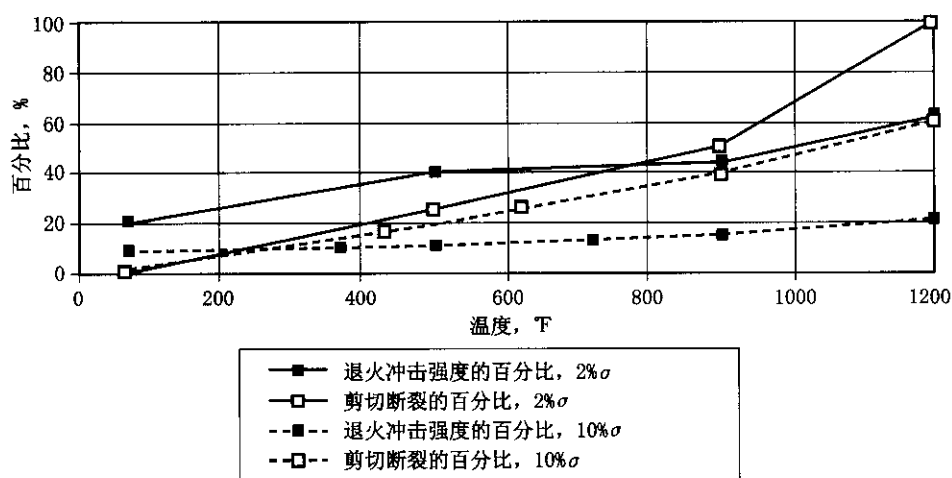


图 L. 6 σ 相不锈钢与 304SS, 2% σ 和 321 SS, 10% σ 的冲击性能的对比

L. 11.2 σ 相脆化的筛选问题

表 L. 16 中所列的 σ 相脆化筛选问题用于确定是否应进入 σ 相脆化模块。

表 L. 16 σ 相脆化的筛选问题

筛 选 问 题	措 施
1. 材料是奥氏体不锈钢吗? 2. 运行温度在 593.33℃ ~ 926.67℃ (1100 ℉ ~ 1700 ℉) 之间吗?	如果两者都是, 则转到 L. 11.3

L. 11.3 基本数据

表 L. 17 中列出的数据可用来估计对于 σ 相脆化的敏感度。如果不知道确切的工艺条件, 则应咨询一位知识丰富的工艺工程师以获得最佳估计。

表 L. 17 σ 相脆化分析所需的基本数据

基 本 数 据	说 明
对异常工况管理有管理控制吗? (Y/N)	有防止在设计压力或接近设计压力下低温 (异常工况) 同时发生的控制和意识培训吗
在正常、异常工况或停机条件下的评估温度, ℉	用户输入
σ 相的量 (估计):	用户输入
低 (>1% ~ <5%)	
中 (5% ~ <10%)	
高 ($\geq 10\%$)	

L. 11.4 基本假设

因为数据缺乏且呈现很大的分散性, 所以假设 σ 化奥氏体不锈钢的脆性方式与铁素体钢类似。现有数据表明性能下降, 但并不是初始性能下降。对于本模块, 假设奥氏体不锈钢的初始冲击韧性大约为 300ksi · in^{1/2}。

图 L. 6 显示出了性能与 σ 相百分比和温度之间的趋势关系。数据缺乏且呈现很大的分散性。表 L. 18 列出了查到的试验数据。

表 L. 18 韧性对温度的性能趋势数据

	304 SS 2% σ		321 SS 10% σ		304 SS 1% σ		304 SS 2% σ		347 SS 1% σ	
试 验	冲击 性能	剪切 性能	冲击 性能	剪切 性能	冲击 性能	剪切 性能	冲击 性能	剪切 性能	冲击 性能	剪切 性能
温度, °C (°F)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
21.11(70)	21	0	7	0	—	—	21	10	50	90
260(500)	38	25	10	20	—	—	—	—	100	100
482.22(900)	44	50	15	40	20	10	—	—	100	100
648.89(1200)	63	100	21	60	71	90	77	90	100	100

表 L. 18 中的数据用来构建低 σ （1%~2%）、高 σ （10%）和中等 σ （低 σ 和高 σ 的平均值）之间的性能趋势线。图 L. 7 显示出了这些趋势。

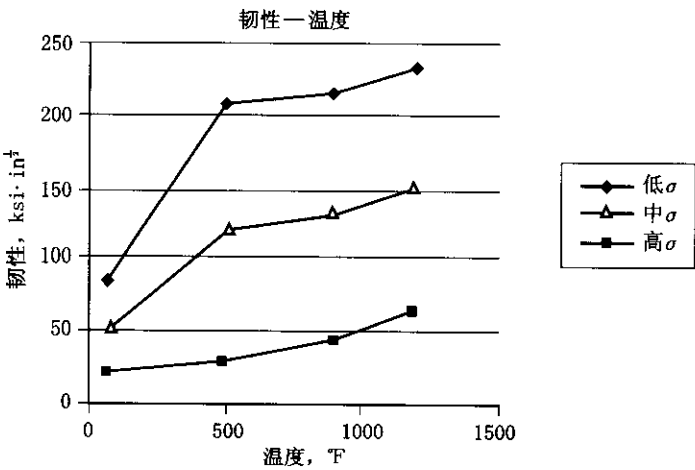


图 L. 7 韧性—温度的性能趋势

L. 11.5 确定 σ 相脆化技术模块次因子

图 L. 8 列出了确定技术模块次因子的步骤。

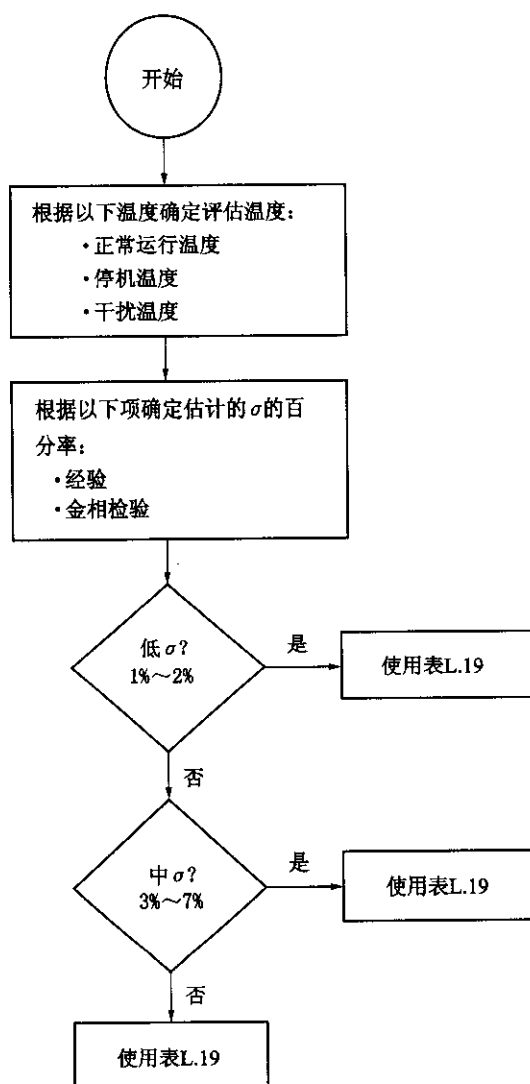
第 1 步：确定评价温度。材料可在正常运行条件下或较低温度，如停机或异常工况，温度下进行评估。

第 2 步：确定材料中估计的 σ 百分比。这可通过与类似使用中的材料对比进行，或借助试样的金相检验进行。

第 3 步：在表 L. 19 上查找次因子。

表 L. 19 σ 相脆化技术模块次因子

评估温度,℃ (°F)	低 σ	中 σ	高 σ
648.89 (1200)	0.0	0.0	18
537.78 (1000)	0.0	0.0	53
426.67 (800)	0.0	0.2	160
315.56 (600)	0.0	0.9	481
20.444 (400)	0.0	1.3	1333
93.33 (200)	0.1	3	3202
65.56 (150)	0.3	5	3871
37.78 (100)	0.6	7	4196
10 (50)	0.9	11	4196
- 17.78 (0)	1.0	20	4196
- 45.56 (- 50)	1.1	34	4196

图 L. 8 σ 相脆化技术模块次因子的确定

附 录 M
(规范性附录)
设备衬里技术模块

M.1 范围

本技术模块的目的是为具有保护性内衬里的工艺设备提供一种通用 RBI 方法。通常的作法是用已知在运行环境下将失效的一种材料来制造设备，但该设备用表 M.1 中所述的一种耐腐蚀衬里来保护材料免受环境侵蚀。

表 M.1 保护性内衬里的典型例子

衬里系列标识	环境（母材的损伤机理）	衬 里 举 例
合金衬里	腐蚀性（减薄，SCC）	包覆合金焊接/堆焊合金/带状衬里合金
有机防腐层	腐蚀性（减薄，SCC）	有机防腐层或衬里
耐火材料	高温环境（减薄、蠕变、侵蚀）	可铸耐火材料/塑性耐火材料/耐火砖
		火陶瓷纤维耐火材料/耐火材料（合金）组合
玻璃衬里	腐蚀性（减薄，SCC）	玻璃衬里
耐酸砖	腐蚀性（减薄，SCC）	砖/胶泥

对衬里设备使用 RBI 的一个通用方法包括对基体材料预期发生损伤的严重度评估，并对衬里的存在给予可信度评价。没有论及衬里本身的退化率。衬里防止损伤的有效性评估基于专家意见。

M.2 技术模块的筛选问题

应使用表 M.2 中所列的设备衬里通用方法的筛选问题来确定是否应进入本模块。

表 M.2 设备衬里通用方法的筛选问题

筛 选 问 题	措 施
该设备是否有衬里	如果有，则转到 M.3

M.3 基本数据

表 M.3 中所列数据是设备衬里技术模块所需基本数据。

表 M.3 设备衬里分析所需的基本数据

基 本 数 据	说 明
衬里类型	从清单中选取（参见表 M.4）
衬里使用年限或自上次检测以来的年数（彻底目检）	用户输入
衬里状况	用户输入（参见表 M.6）
衬里失效的在线监测	用户输入
基体材料的各种损伤机理的技术模块次因子（TMSF）	使用其他技术模块

M.4 基本假设

所有衬里都具有一定程度的免受运行环境影响的作用。许多衬里的使用寿命可以维持一段不定期的时

限，基本不受可能发生的损伤机理的影响。其他衬里会随时间慢慢退化，因而寿命有限。在这类情况下，衬里的使用年限（或距上次检测的年数）在分配因子时显得尤为重要。特别是对于有机类材料的衬里而言，假设衬里与环境相容，应在设计温度极限范围（包括蒸汽吹扫）内运行，并注意合理使用，养护得当。

表 M.4 衬里类型及抵抗能力

类 型	抵 抗 能 力
合金包覆层或焊接堆焊层	耐环境侵蚀性能
合金包覆层或焊接堆焊层	可能遭受侵蚀，例如，焊缝腐蚀或稀释焊接堆焊层
带状衬里合金（“贴壁纸型”）	一般遭受焊缝处失效
有机防腐层，一般干膜厚度 $\geq 0.76\text{mm}$ （30 密耳）	有限寿命
耐热作业： 可铸耐火材料/塑性耐火材料/耐火砖	遭受偶然的剥落或坍塌
苛刻/磨蚀作业： 可铸耐火材料/瓷砖	在高磨蚀环境下寿命有限
玻璃衬里	完全保护，遭受热或机械冲击引起的失效
耐酸砖	部分保护。耐酸砖提供热保护，但不能用来防止液体接触基体材料

M.5 技术模块次因子的确定

M.5.1 下面说明技术模块次因子的确定，并在图 M.1 中以流程图方式进行图解说明。基本方法是根据衬里类型、使用年限或自上次检测以来的年数来确定其失效因子。应根据衬里状态的定性描述进行修正，然后根据衬里失效造成设备失效的可能性进行进一步修正（如果衬里失效，设备是迅速失效还是可望持续一段较长的时间？）。应对能够给衬里失效的早期探测提供在线监测服务，并对其进行最终可信度评价。

M.5.2 下一步应是将修正的衬里失效因子和为基体材料确定的总技术模块次因子进行比较。使用两个值中的较小值。这样做的依据是如果其他技术模块次因子小于衬里的失效因子，则衬里是否失效无关紧要。这也将对衬里失效并非等同于设备失效的说法提供验证。对用户，可“关闭”设备衬里技术模块并使用为每一损伤机理确定的实际技术模块值也是可能的。

M.5.3 表 M.5（a）和表 M.5（b）给出了初始衬里失效因子及使用年限的对应关系。

M.6 衬里状态的修正

表 M.6 给出了基于衬里状态定量评价因子进行修正。

M.7 在线监测的修正

某些衬里设备具有监测系统，能对衬里泄漏或其他失效进行早期探测。监测允许在设备失效发生前按顺序关闭设备。如果使用在线监测，并且已知对探测出的衬里退化有效，则将衬里失效因子乘以 0.1。监测系统的例子包括热红外成像技术或热敏漆（耐火衬里）、装有探测装置的吹扫预留孔（疏松合金衬里）及电阻探测（玻璃衬里）等。

M.8 技术模块次因子

M.8.1 第 1 步：确定修正的衬里失效因子。

M.8.2 第 2 步：确定基体材料的其他技术模块次因子的总和。

注：为了确定减薄技术模块次因子，当分配检验有效性时应假设是局部腐蚀。这是因为防腐层一般局部脱落。

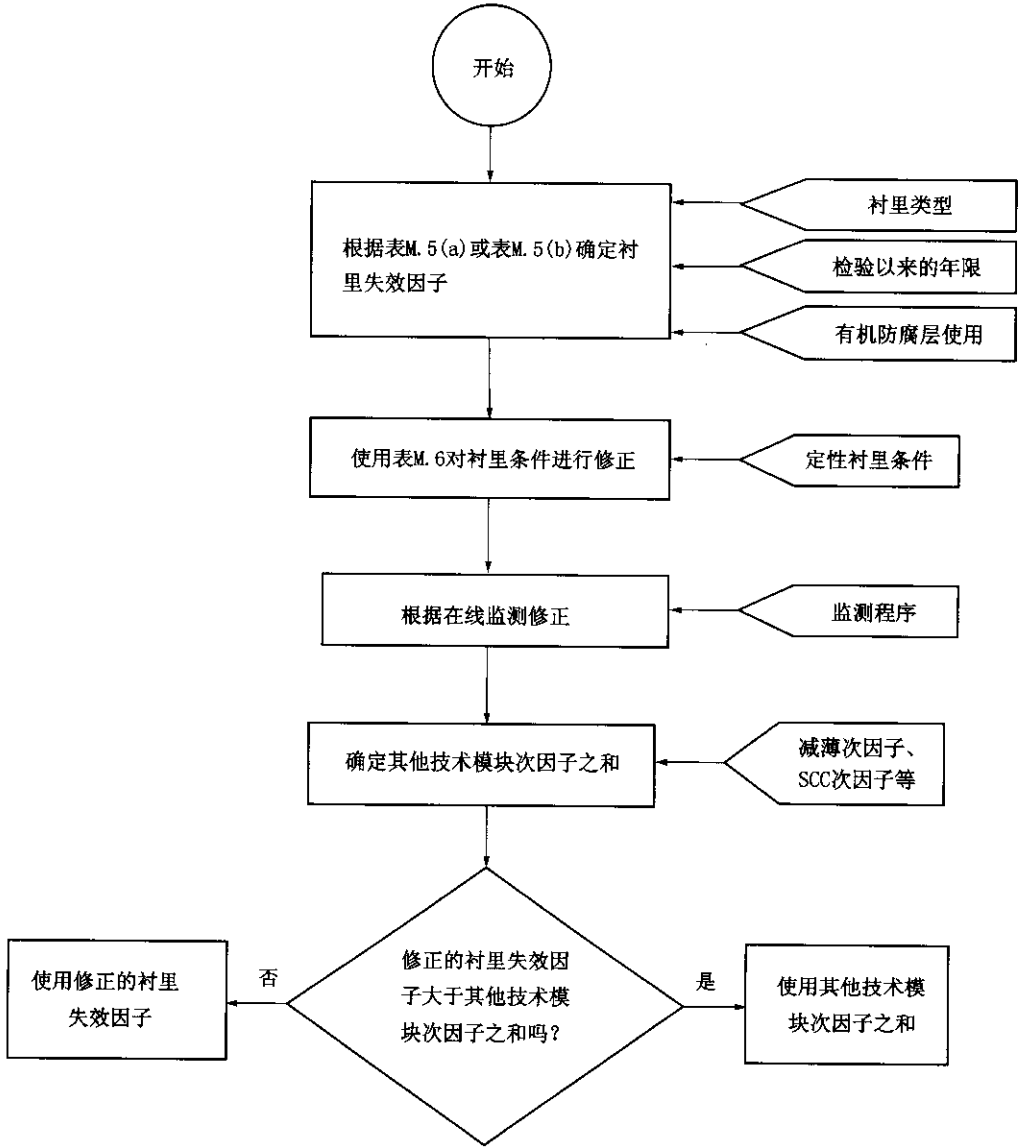


图 M.1 设备衬里技术模块次因子的确定

M.8.3 第3步：使用第1步、第2步的两个值中的最小值作为技术模块次因子。
可以采取的措施来关闭设备衬里技术模块。这允许用户在衬里失效但不反映设备失效的情况下有更多灵活性选择（例如，仅提高产品纯度为目的安装衬里）。

表 M.5 (a) 衬里失效因子

自上次检验 以来的年数 (彻底目检)	合金包覆层 或焊接堆焊层 (耐蚀)	合金包覆层或 焊接堆焊层 (可能侵蚀)	带状衬里 合金 (耐蚀)	可铸耐火材料	可铸耐火材料 ——苛刻环境	搪玻璃衬里	耐酸砖
1	0	3	0.3	0.5	9	3	0
2	0	4	0.5	1	40	4	0
3	0	6	0.7	2	146	6	0

表 M. 5 (a) (续)

自上次检验 以来的年数 (彻底目检)	合金包覆层 或焊接堆焊层 (耐蚀)	合金包覆层或 焊接堆焊层 (可能侵蚀)	带状衬里 合金 (耐蚀)	可铸耐火材料	可铸耐火材料 ——苛刻环境	搪玻璃衬里	耐酸砖
4	0	7	1	4	428	7	0
5	0	9	1	9	1017	9	1
6	0	11	2	16	1978	11	1
7	0.1	13	3	30	3000	13	1
8	0.1	16	4	53	3000	16	1
9	0.1	20	6	89	3000	20	2
10	0.2	25	9	146	3000	25	3
11	0.3	30	12	230	3000	30	4
12	0.5	36	16	351	3000	36	5
13	0.7	44	22	518	3000	44	7
14	1	53	30	738	3000	53	9
15	2	63	40	1017	3000	63	11
16	2	75	53	1358	3000	75	15
17	3	89	69	1758	3000	89	19
18	4	105	89	2209	3000	105	25
19	6	124	115	2697	3000	124	31
20	9	146	146	3000	3000	146	40
21	12	170	184	3000	3000	170	50
22	16	199	230	3000	3000	199	63
23	22	230	286	3000	3000	230	78
24	30	266	351	3000	3000	266	97
25	40	306	428	3000	3000	306	119

表 M. 5 (b) 衬里失效因子—有机防腐层

使用年数	6年多以前检测过	过去6年内检测过	过去3年内检测过
1	30	1	0
2	89	4	0
3	230	16	0
4	518	53	0
5	1017	146	0.2
6	1758	351	1
7	2697	738	4
8	3000	1358	16

表 M.5 (b) (续)

使用年数	6年多以前检测过	过去6年内检测过	过去3年内检测过
9	3000	2209	53
10	3000	3000	146
11	3000	3000	351
12	3000	3000	738
13	3000	3000	1358
14	3000	3000	2209
15	3000	3000	3000
16	3000	3000	3000
17	3000	3000	3000
18	3000	3000	3000
19	3000	3000	3000
20	3000	3000	3000
21	3000	3000	3000
22	3000	3000	3000
23	3000	3000	3000
24	3000	3000	3000
25	3000	3000	3000

表 M.6 衬里状态的修正

定性条件	说明	修正因子
差	衬里以前发生过失效或呈现出可能在近期导致失效的迹象。对以前失效的修复不成功或质量差	$\times 10$
一般	衬里没有显示出任何因损伤机理引起的过大侵蚀的迹象。可能曾进行过局部修复,但修复质量良好,并成功改善了衬里的条件	$\times 2$
好	衬里状态如新,没有任何因损伤机理引起的侵蚀迹象。无需对衬里进行修复	$\times 1$

附 录 N
(规范性附录)
外部损伤技术模块

N.1 范围

N.1.1 大多数工艺设备都会发生外部损伤，结果是一些材料逐渐减薄或导致另一些材料的应力腐蚀开裂。最严重的外部损伤情况也许涉及防腐层下的腐蚀（CUI）。这种损伤形式特别有害，因为防腐材料会受潮或受污染，从而加速腐蚀。CUI 特别严重的另一原因是很难探测到这种腐蚀。但无论如何，通过正确的腐蚀检测、防腐材料的正确涂装和保养或通过正确选择、使用和保养防腐层，总能减少或消除这一问题。

N.1.2 对碳钢/低合金钢（遭受减薄）和奥氏体不锈钢（遭受应力腐蚀开裂）分别进行外部损伤评估，每一种这类材料在本模块的单独节段论述。

N.1.3 碳钢和低合金钢的外部损伤是减薄技术模块应用的一个特例。不锈钢的外部应力腐蚀开裂（SCC）与开裂技术模块类似。这是一个独立的技术模块，其技术模块次因子的计算和存储与其他（内部的）减薄和（内部的）SCC 损伤机理无关。

N.2 技术模块筛选问题

外部损伤的筛选问题如表 N.1 所列。筛选过程见图 N.1。

表 N.1 外部损伤的筛选问题

筛 选 问 题	措 施
1. 材料是碳钢还是低合金钢	如果是，则转到问题 2， 如果不是，则转到问题 4
2. 运行温度（持续或间歇）在 $-12.22^{\circ}\text{C} \sim 121.11^{\circ}\text{C}$ ($10^{\circ}\text{F} \sim 250^{\circ}\text{F}$) 之间吗？	如果是，则转到问题 3， 如果不是，则退出模块
3. 设备是否做了防腐处理	如果是，则转到表 N.5， 如果不是，则转到表 N.3 和表 N.4
4. 材料是否是奥氏体不锈钢	如果是，则转到问题 5， 如果不是，则退出模块
5. 运行温度（持续或间歇）在 $37.78^{\circ}\text{C} \sim 148.89^{\circ}\text{C}$ ($100^{\circ}\text{F} \sim 300^{\circ}\text{F}$) 之间吗？	如果是，则转到问题 6， 如果不是，则退出模块
6. 设备是否做了防腐处理	如果是，则转到表 N.6， 如果不是，则转到表 N.7

N.3 碳钢和低合金钢的外部腐蚀

通常，位于年降雨量大的区域或较暖和的海上区域的装置比位于较寒冷、干燥的中部大陆地区的装置更容易受到外部腐蚀。不管气候如何，位于冷却塔和蒸气排放口附近的装置都易受外部腐蚀的影响，就像其运行温度反复通过露点的装置那样。

通过涂刷油漆可减缓外部腐蚀。油漆退化的检查和修补的定期程序可防止大多数外部腐蚀的

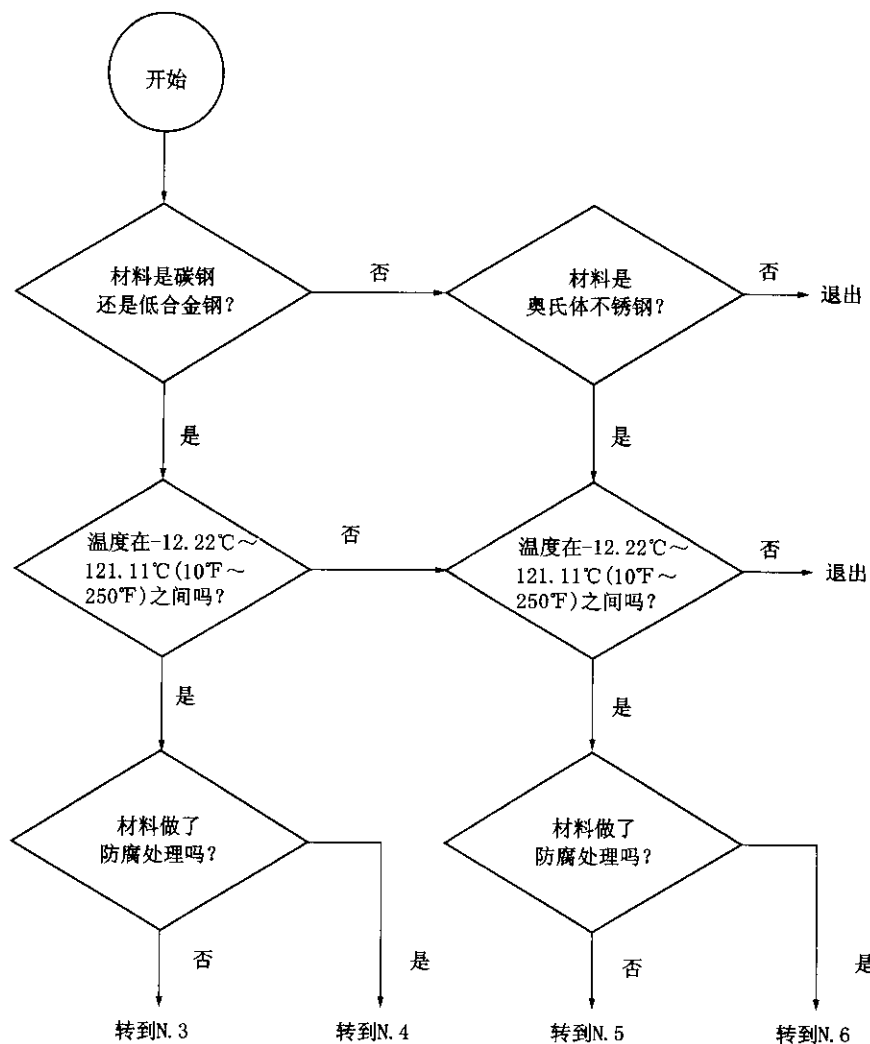


图 N.1 外部损伤流程

发生。

某些区域和系统比其他区域和系统更容易发生外部腐蚀。高度存疑区域或系统的例子包括以下内容：

下面是进行外部腐蚀检测时应考虑的一些存疑区域的例子：

- a) 暴露于冷却塔喷雾过大的区域。
- b) 暴露于蒸气排放口附近的区域。
- c) 暴露于雨淋系统的区域。
- d) 遭受工艺淋漏物、湿气侵入或酸蒸气的区域。
- e) 工作在 $-12.22^{\circ}\text{C} \sim 121.11^{\circ}\text{C}$ ($10^{\circ}\text{F} \sim 250^{\circ}\text{F}$) 之间运行的碳钢系统。在运行温度引起大气湿气频繁或持续凝结和再次蒸发的场合，外部腐蚀特别具有侵蚀性。
- f) 于 121.11°C (250°F) 以上，但却处在间歇场合或经历经常停机的在役正常运行的碳钢系统。
- g) 防腐层和包覆层已退化的系统。
- h) 一直在大气露点以下温度运行的冷环境设备。

N.3.1 基本数据

表 N.2 中所列是碳钢和低合金钢的外部腐蚀所需要的基本数据。

表 N.2 碳钢和低合金钢的外部腐蚀所需的基本数据

基本数据	说 明
诱因	外部腐蚀的诱因。这可以是设备所在地的天气（如海洋性气候）、冷却塔飞溅量、使用喷淋装置或其他贡献因素
速率, mm/年	外部腐蚀的腐蚀速率。根据温度、诱因或用户输入的数据得出, 见表 N.3
日期	确定进入减薄技术模块的时间（年）。缺省日期为安装。可根据防腐层日期做出改变
检验有效性	外部腐蚀检测程度的有效性, 见表 N.7
检验次数	外部腐蚀检测的次数
防腐层质量	与使用的防腐层的类型有关, 见表 N.4。无、中等、高的意义, 建议如下: 无——没有防腐层或仅涂底漆; 中——单层环氧涂料; 高——多层环氧防腐层或填充环氧涂料
喷涂日期	确定防腐层年龄
管支架恶化? (Y/N)	如果配管直接由梁或其他构造支承而难以对防腐层进行适当保养, 外部腐蚀可能会更严重, 见表 N.5
界面恶化? (Y/N)	如果管子界面可进入污泥或水, 则该界面区容易受到大的腐蚀, 见表 N.6

N.3.2 基本假设和方法

见表 N.3~表 N.7。

表 N.3 默认腐蚀速率——碳钢外部腐蚀（英制单位）

运行温度, °F	腐蚀诱因腐蚀速率, 密耳/年		
	海上/冷却塔漂水区	温和环境	干旱/干燥环境
小于 10	0	0	0
11~60	5	3	1
61~120	2	1	0
121~200	5	2	1
201~250	1	0	0
大于 250	0	0	0

表 N.4 默认腐蚀速率——碳钢外部腐蚀（法定计量单位）

运行温度, °C	腐蚀诱因腐蚀速率, 密耳/年		
	海上/冷却塔飞溅区	温和环境	干旱/干燥环境
小于 -12.22	0	0	0
> -12.22~-15.56	0.127	0.0762	0.0254
16.11~48.89	0.0508	0.0254	0
49.44~93.33	0.127	0.0508	0.0254
93.89~121.11	0.0254	0	0
大于 121.11	0	0	0

表 N.5 防腐层质量的修正

防腐层质量		
无	中等	高
日期 = 安装日期	日期 = 涂装日期 + 5	日期 = 涂装日期 + 15

表 N.6 对管支架恶化的修正

有 恶 化	无 恶 化
损伤速度 = 损伤速率 × 2.0	损伤速度 = 损伤速率 × 1.0

有 N.7 根据界面恶化的修正

有 恶 化	无 恶 化
损伤速度 = 损伤速率 × 2.0	损伤速度 = 损伤速率 × 1.0

N.3.3 碳钢和低合金钢的外部腐蚀检验等级

见表 N.8。

表 N.8 检验的有效性

检验有效性分类	检 验 方 法
A	对>95%的外表面目测，然后用 UT，RT，深度尺进行检测
B	对>60%的外表面目测，然后用 UT，RT，深度尺进行检测
C	对>30%的外表面目测，然后用 UT，RT，深度尺进行检测
D	对>5%的外表面目测，然后用 UT，RT，深度尺进行检测
E	对<5%的外表面目测，然后用 UT，RT，深度尺进行检测

N.3.4 确定碳钢和低合金钢的外部腐蚀技术模块次因子

碳钢和低合金钢外部腐蚀技术模块次因子的确定过程见图 N.2。

注意：由于外部腐蚀损伤的复杂度和腐蚀的多样性，建议根据已知的外部腐蚀的案例做一次验证，以确定最合适的变量。

- 第 1 步：确定所研究的装置或装置的一部分中，引起外部腐蚀的诱因。
- 第 2 步：根据腐蚀诱因和运行温度确定腐蚀速率。
- 第 3 步：根据防腐层的种类和喷涂日期，修正外部腐蚀可能发生的时间。
- 第 4 步：根据支架恶化情况，修正管子发生外部腐蚀的速率。
- 第 5 步：根据界面恶化情况，修正管子发生外部腐蚀的速率。
- 第 6 步：根据减薄技术模块修正后的腐蚀速率和检验的类型、次数来确定 TMSF。

N.4 碳钢和低合金钢的 CUI

防腐层下腐蚀（CUI）是由防腐层与金属表面之间的蒸气空间（或环状空间）中的积水造成的。积水可能来源于雨水、漏水、水汽凝结、冷却塔的飞溅、冲淋系统或蒸气配管泄放等。CUI 造成管壁局部腐蚀损伤。CUI 常发生在 -12.22℃~121.11℃（10 ℉~250 ℉）下，尤其是温度在 48.89℃~93.33℃（120 ℉~200 ℉）下，最为严重。

一般说来，年降水量大或温暖的沿海地区的装置比在寒冷、干燥的中部大陆位置的设备更易受到

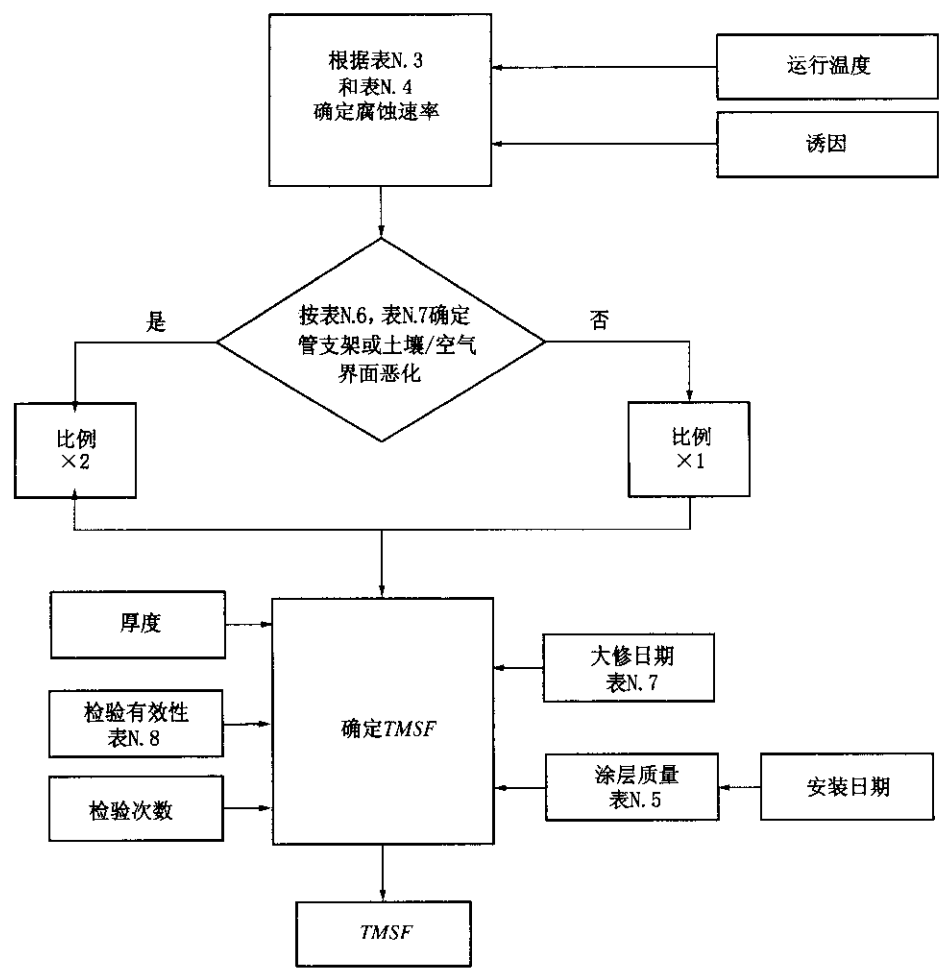


图 N.2 碳钢和低合金钢外部腐蚀流程图

CUI。无论气候条件如何，位于冷却塔和蒸气排放口附近的设备都非常易于发生 CUI 腐蚀，运行温度变化反复通过露点的设备也一样。防腐系统的外部检测应包括对防腐系统中可造成 CUI 的条件及发生 CUI 的迹象（如锈斑或鼓泡）的整体评估。但是，CUI 腐蚀并不总是有外部征兆。

良好的防腐措施和使用适当的防腐层，能够减缓 CUI 的发生。正确安装和维修保养能防止大量积水渗入防腐层。近年来，在 CUI 温度范围运行的设备/配管和常发生 CUI 的地方，经常指定防腐层防护系统。推荐使用高质量侵入性涂料，如用于热水箱中的涂料。NACE Publ 6H189 可提供使用方面的指导。性能良好的防腐层防护系统能保持至少 15 年。如果设备/配管已使用 5 年以上，并且没有合适的防腐层，则为了以后的发展应安排检查。

相比之下，某些区域或系统更容易发生 CUI。特定的位置和/或系统，如防腐层穿透部位或可见的防腐层损伤部位，这些地方是非常可疑的，应在检测计划中予以考虑。下面仅举几个容易发生 CUI 地方的例子。

- a) 穿透部位：
 - 1) 防腐层上的所有穿透部位或缺口，如开口部位（吹扫管、排水口和其他类似地方）、悬挂和其他支撑部位、阀门和配件、螺栓连接的管箍、阶梯和平台处。
 - 2) 蒸汽管的开口处。
 - 3) 法兰和其他管件的防腐层端头处。
- b) 防腐层受损处：

- 1) 防腐层损伤或缺失。
- 2) 垂直配管或设备防腐层的端面。
- 3) 接缝填充物硬化、分离或已脱落。
- 4) 防腐层鼓泡、污损或扎带脱落（鼓泡说明此处腐蚀物已产生）。
- 5) 防腐层已出现损伤的系统最低点，包括无支撑长配管的最低点。
- 6) 高合金配管中，防腐层下的碳钢或低合金钢法兰、螺栓或其他部件。

以下例子是进行 CUI 检测时应加考虑的其他可疑部位：

- a) 受冷却塔飞溅影响的区域。
- b) 蒸气出口附近区域。
- c) 喷淋系统影响的区域。
- e) 受工艺控制设备泄放、湿气或酸雾影响的区域。
- e) 碳钢设备系统，包括为进行人员保护而设置防腐层的系统，运行温度在 $-12.22^{\circ}\text{C} \sim 121.11^{\circ}\text{C}$ ($10^{\circ}\text{F} \sim 250^{\circ}\text{F}$) 之间，设备运行温度引起大气湿气的频繁或者连续地凝结和蒸发时，特别容易引起 CUI 腐蚀。
- f) 碳钢系统工作于 121.11°C (250°F) 以上，但却间断工作或经常停机。
- g) 防腐层伸出的分支和附件，其运行温度和主配管（即防腐层支承环、配管/平台附件）运行温度存在温差。
- h) 振动损伤防腐层，造成渗水的系统。
- i) 存在泄放的蒸气配管系统，尤其是防腐层下部的配管接头。
- j) 防腐层或包覆层已受损的系统。
- k) 在大气露点以下温度运行的冷环境设备。

防腐系统中，可取出进行厚度检测的检查孔或检查塞集中反映了防腐层可能发生泄放的情况。要特别注意这些地方。应立即更换这些检查塞并密封好。

N.4.1 基本数据

表 N.9～表 N.16 为碳钢和低合金钢的 CUI 分析需要的数据。

N.4.2 假设

- a) 可疑区包括防腐层损坏处、穿透处及防腐层端部等。
- b) 检测质量是高的。
- c) 表面穿透处可以采用 NDE 厚度测量技术测量最小壁厚。
- d) 安全注意事项：应小心谨慎处理待检测表面。

N.4.3 确定碳钢和低合金钢 CUI 腐蚀技术模块次因子

确定碳钢和低合金钢的 CUI 腐蚀技术模块次因子的过程见图 N.3。

注意：由于外部腐蚀损伤的复杂度和腐蚀的多样性，建议根据已知的外部腐蚀案例做一次验证，以确定最合适的变量。

第 1 步：确定所研究的装置或其中的一部分中，引起外部腐蚀的诱因。

第 2 步：根据腐蚀诱因和运行温度确定腐蚀速率。

第 3 步：根据防腐层的种类和涂敷日期，修正外部腐蚀可能发生的时间。

第 4 步：根据系统的复杂度修正外部腐蚀速率（管线分支、支架等的数量，水可通过这些部位进入防腐层）。

第 5 步：根据对防腐层的状况和对气候影响（如有的话）的定性评估修正外部腐蚀速率。

第 6 步：根据支架恶化的情况修正外部腐蚀速率（如果可用的话）。

第 7 步：根据界面恶化的情况修正外部腐蚀速率（如果可用的话）。

第 8 步：根据修正后的腐蚀速率和检测的类型和次数，确定减薄技术模块的 TMSF。

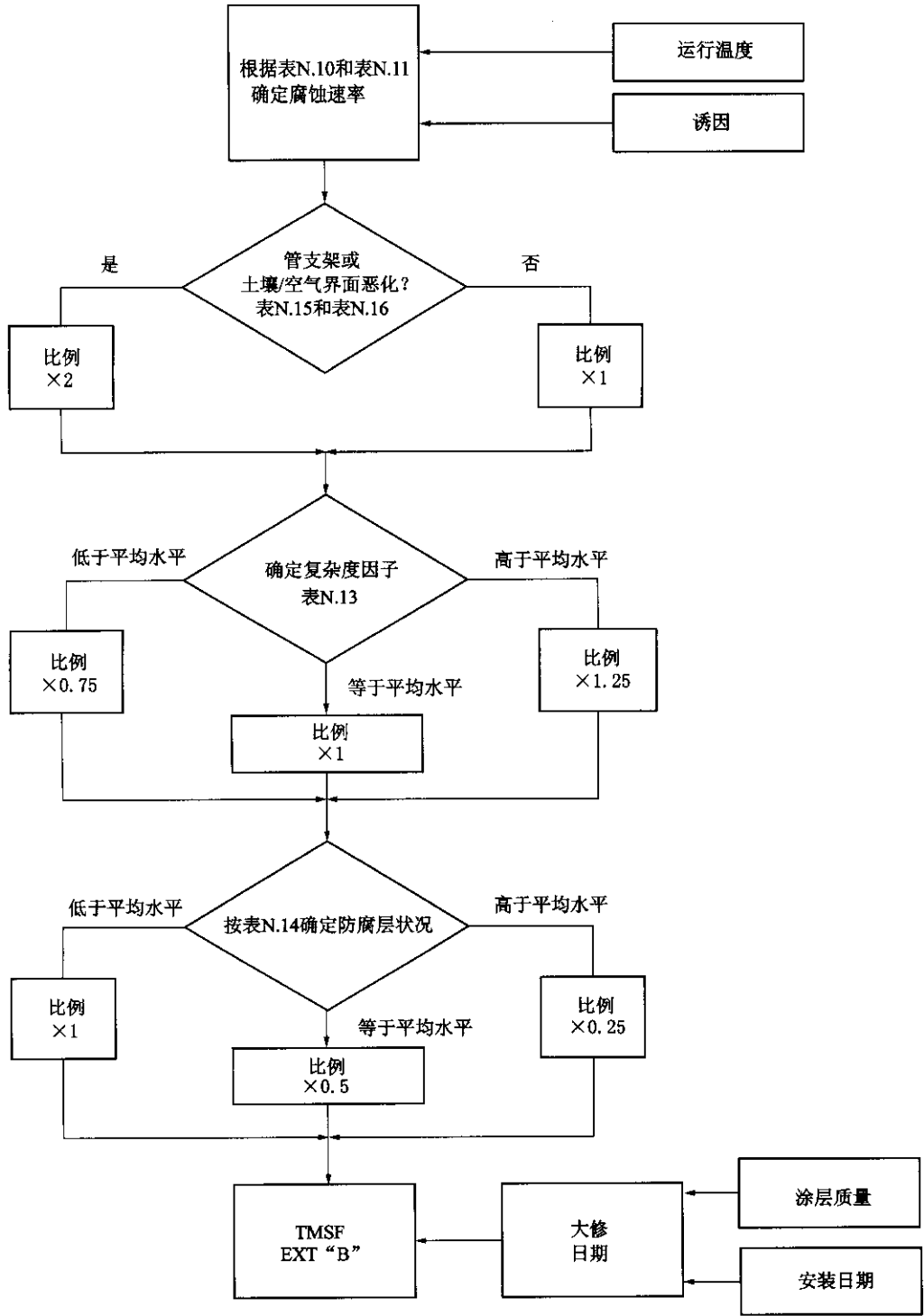


图 N.3 碳钢和低合金钢 CUI 流程图

表 N.9 分析碳钢和低合金钢的 CUI 需要的基本数据

基本数据	说明
诱因	外部腐蚀的诱因。这可以是设备所在地的气候（如海洋性气候）、可能发生冷却塔飞溅影响、使用喷淋装置或其他因素

表 N.9 (续)

基本数据	说 明
速率, 密耳/年	外部腐蚀的腐蚀速率。根据温度、诱因或用户输入的数据得出, 见表 N.10 和表 N.11
日期	确定进入减薄技术模块的时间 (年)。缺省日期为安装日期。可根据防腐层日期、上次全部剥去并重新修复防腐层后的时间做出改变
检验的有效性	CUI 检验程序的有效性, 见表 N.17
检验次数	CUI 检验的次数
防腐层质量	与防腐层下使用的防腐层的类型有关 (见表 N.5)。无、中等、高的意义建议如下: 低——没有防腐层或仅涂底漆; 中等——单层环氧涂料; 高——多层环氧防腐层或填充环氧涂料
喷漆日期	确定防腐层使用时间
复杂度	分支数目 (见表 N.13): 低于平均水平, 平均水平, 高于平均水平
防腐层状况是否良好? (Y/N)	根据目测到的防腐层状况来确定。良好的防腐层表面没有任何受损迹象 (如刺穿、撕裂或防水圈脱落、填充料脱落) 或积水 (如发棕色、发绿或黑色污迹)。应特别注意水容易进入的部位; 像检测孔口或防腐层的穿透部位 (如龙头、支承环和卡箍等)。水平部位也能积水。如果发现任何受损情况, 缺省取 “NO” (见表 N.14)
管支架恶化? (Y/N)	如果配管直接由梁或其他构造支承而难以对防腐层进行适当保养, 外部腐蚀可能会更严重, 见表 N.6
界面恶化? (Y/N)	如果管子界面可进入污泥或水, 则界面区域更容易受到腐蚀, 见表 N.7

表 N.10 碳钢和低合金钢 CUI 分析的基本假设和方法 (英制单位)

运行温度, °F	外部环境腐蚀速率, 密耳/年		
	海上/冷却塔飞溅区	温和环境	干燥环境
小于 10	0	0	0
11~60	5	3	1
61~120	2	1	0
121~200	10	5	2
201~250	2	1	0
大于 250	0	0	0

表 N.11 碳钢和低合金钢 CUI 分析的基本假设和方法 (法定计量单位)

运行温度, °C	外部环境腐蚀速率, mm/年		
	海上/冷却塔飞溅区	温和环境	干燥环境
小于 -12.22	0	0	0
-11.67~15.56	0.127	0.0762	0.0254

表 N. 11 (续)

运行温度,℃	外部环境下腐蚀速率, mm/年		
	海上/冷却塔飞溅区	温和环境	干燥环境
16. 11~48. 89	0. 0508	0. 0254	0
49. 44~93. 33	0. 254	0. 127	0. 0508
93. 89~121. 11	0. 0508	0. 0254	0
大于 121. 11	0	0	0

表 N. 12 根据防腐层质量的修正

防腐层质量		
无	中等	高
日期 = 设备安装日期	日期 = 喷涂日期 + 5	日期 = 喷涂日期 + 15

表 N. 13 根据配管复杂度的修正

低于平均水平	平均水平	高于平均水平
腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 0. 75	腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 1. 0	腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 1. 25

表 N. 14 根据防腐层状况的修正

低于平均水平	平均水平	高于平均水平
腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 1. 0	腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 0. 5	腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 0. 25

表 N. 15 根据配管支架恶化的修正

有 恶 化	无 恶 化
腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 2. 0	腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 1. 0

表 N. 16 根据界面部位恶化的修正

有 恶 化	无 恶 化
腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 2. 0	腐蚀速度 = 腐蚀速率 × 1. 0

表 N. 17 碳钢和低合金钢 CUI 检验类别

检验有效性分类	拆除防腐层	不拆除防腐层
A	- 拆除 95% 以上的防腐层; - 对露出的表面进行目测, 然后再用 UT, RT, 深度尺进行检测	对整个表面: 大于 95% 表面的射线检测或实时射线检测
B	对整个表面: - 在拆除防腐层前, 对 95% 以上进行目测, 且 - 拆除包括可疑部位在内的 60% 以上的防腐层, 且 - 对露出的表面进行目测, 然后再用 UT, RT, 深度尺进行检测	对整个表面: - 对 95% 以上进行目测, 且 - 对包括可疑部位在内的 60% 以上表面的射线检测或实时射线检测

表 N. 17（续）

检验有效性分类	拆除防腐层	不拆除防腐层
C	对整个表面： - 在拆除防腐层前，对 95% 以上进行目测，且 - 拆除包括可疑部位在内的 30% 以上的防腐材料，且 - 对露出的表面进行目测，然后再用 UT，RT，深度尺进行检测	对整个表面： - 对 95% 以上进行目测，且 - 对包括可疑部位在内的 30% 以上表面的射线检测或实时射线检测
D	对整个表面： - 在拆除防腐层前，对 95% 以上进行目测，且 - 拆除包括可疑部位在内的 5% 以上的防腐层，且 - 对露出的表面进行目测，然后再用 UT，RT，深度尺进行检测	对整个表面： - 对 95% 以上进行目测，且 - 对包括可疑部位在内的 5% 以上表面的射线检测或实时射线检测
E	- 不检测时仅拆除 5% 以下的防腐层，或 - 不检测或检测技术无效	不检测或检测技术无效或目测范围或小于 95%

N. 5 奥氏体不锈钢的外部应力腐蚀破裂（SCC）

减轻外部 Cl- SCC 的最好方法是避免氯化物在不锈钢表面的积聚。含氯的液体、气雾或固体应避免接触未隔离的表面。在不锈钢表面使用的标记、染色和胶带等都应进行认证，确保能够使用。通常，未被隔离的不锈钢极少能通过防腐层加以保护。

N. 5.1 基本数据

表 N. 18 为奥氏体不锈钢外部应力腐蚀开裂（SCC）分析需要的数据。

表 N. 18 奥氏体不锈钢外部应力腐蚀开裂（SCC）分析所需的基本数据

基本数据	说 明
诱因	外部腐蚀的诱因。这可以是设备所在地的气候（如海洋性气候）、可能发生冷却塔飞溅影响、使用喷淋装置或其他因素
开裂严重性	外部腐蚀开裂技术模块的开裂严重性。根据敏感性（温度和气候，见表 N. 19）
日期	确定计算 TMSF 的时间（年）。缺省日期为安装日期。可根据防腐层日期、上次全部剥去防腐层并重新修复后的时间做出改变
检验的有效性	外部腐蚀检验程序的有效性（见表 N. 21）
检验次数	外部腐蚀检测的次数
检验日期	上次外部腐蚀检测的日期
防腐层质量	与防腐层下所使用的防腐层类型有关，分为无、中等、高，见表 N. 20
涂装日期	确定防腐层使用时间，除非防腐层质量是“无”，否则应提供此项数据

N. 5.2 基本假设和方法

见表 N. 19～表 N. 21。

表 N. 19 奥氏体不锈钢外部应力腐蚀破裂 (SCC) 的敏感性

运行温度,℃ (°F)	外部环境下的 SCC 敏感性		
	海上/冷却塔飞溅区	温和环境	干燥环境
<60 (<140)	无	无	无
60~93. 33 (140~200)	中等	低	无
>93. 33~148. 89 (>200~300)	低	低	无
>148. 89 (300)	无	无	无

表 N. 20 根据防腐层质量的修正

防腐层质量		
低	中等	高
日期 = 设备安装日期或距上次检验日期 (如设备已经检测)	日期 = 涂装日期 + 5 或上次检验日期 (如设备已经检测)	日期 = 涂装日期 + 15 或上次检验日期 (如设备已经检测)

表 N. 21 奥氏体不锈钢外部应力腐蚀开裂 (SCC) 的检验分类

检验有效性分类	侵入性检测
A	对整个表面: 对 95% 以上做着色渗透或涡流试验, 并根据相关结果进行 UT 检测
B	对整个表面: 对 60% 以上做着色渗透或涡流试验, 并根据相关结果进行 UT 检测
C	对整个表面: 对 30% 以上做着色渗透或涡流试验, 并根据相关结果进行 UT 检测
D	对整个表面: 对 5% 以上做着色渗透或涡流试验, 并根据相关结果进行 UT 检测
E	有效性小于 “D” 级或不做测试或使用的测度技术无效

N. 5.3 确定技术模块的次因子

确定奥氏体不锈钢外部 CI-SCC 腐蚀技术模块次因子的过程见图 N. 4。

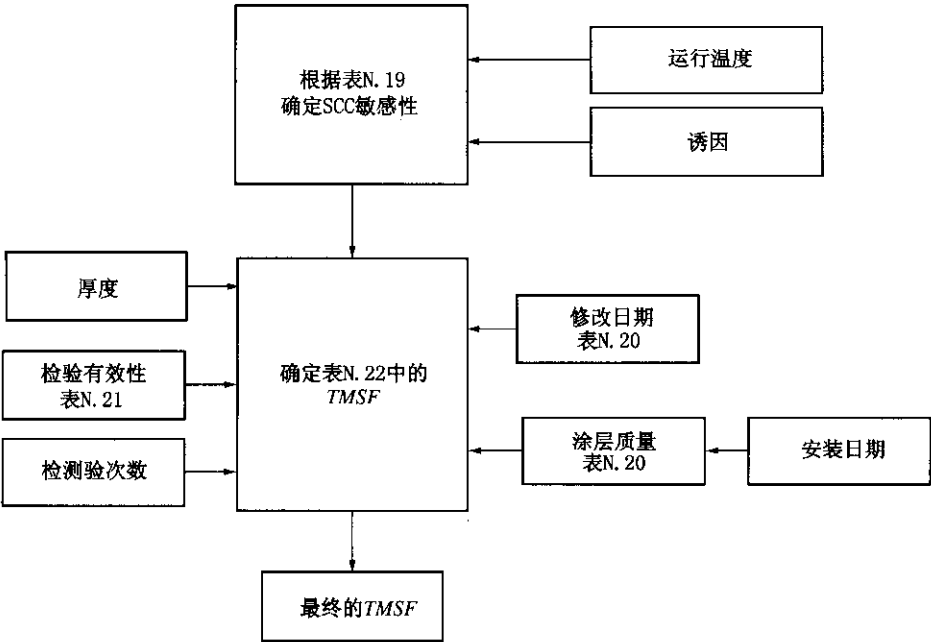


图 N. 4 奥氏体不锈钢外部 SCC 流程图

注意：由于外部腐蚀损伤的复杂度和腐蚀的多样性，建议根据已知的外部腐蚀案例做一次验证，以确定最合适的变量。

- 第 1 步：确定所研究的装置或其中的一部分，引起外部腐蚀的诱因。
- 第 2 步：根据腐蚀诱因和运行温度确定敏感性。
- 第 3 步：根据存在的裂纹进行修正，如果该设备已检测出 SCC，那么就认为敏感性高。
- 第 4 步：Cl-SCC 腐蚀的严重度指数见表 N. 22。
- 第 5 步：根据上次检验的时间及防腐层的类型和使用时间，确定外部腐蚀可能发生的时间。
- 第 6 步：由于自上次检验后随着时间的增加，处于运行异常状态和其他不正常状态的时间也在增加，故假定开裂的可能性也将增加。因而，TMSF 按以下关系增加（见第 7 步）。
- 第 7 步：最终的 $TMSF = TMSF \times (\text{上次检验距今的年数})^{1.1}$ 。
- 第 8 步：例如，TMSF 为 10 的设备/配管在使用 5 年而未做任何检验后，TMSF 将增加到 58，使用 10 年而未做任何检验将进一步增加到 125。

表 N. 22 Cl-SCC 的严重性指数

敏 感 性	不锈钢外部腐蚀 (Cl-SCC)
高	50
中	10
低	1

N. 6 奥氏体不锈钢的外部 CUI SCC

防腐层可能成为氯化物的来源，并在防腐层下聚集氯化物和水。Cl-SCC 可能会因海水飞溅、主流的风吹散的冷却塔飞溅造成。喷洒的海水浸湿了奥氏体不锈钢设备/配管表面的防腐层，水蒸发后，氯离子浓度变大，裂纹就在存在残余应力的部位产生了（如焊缝和弯头处）。另外，因水滴在防腐管不锈钢上及防腐层中氯化物的溶解，会导致防腐层下其他开裂情况的发生。

减轻防腐层下的 Cl-SCC 腐蚀的最好办法是避免氯离子在不锈钢表面积聚。第一，要保持防腐材料的完好。第二，要通过防护层防止氯离子接触不锈钢表面。在不锈钢表面使用适合于不锈钢的侵入性涂料，被证明是有效的防护手段。用铝箔包裹不锈钢，同时用做防护层和阴极保护层，也被证实是一种有效的防护方法。

N. 6.1 基本数据

表 N. 23 为奥氏体不锈钢外部 CUI SCC 技术模块需要的数据。

表 N. 23 分析奥氏体不锈钢外部 CUI SCC 需要的基本数据

基 本 数 据	说 明
诱因	外部腐蚀的诱因。这可以是设备所在地的气候（如海洋性气候）、可能发生冷却塔飞溅影响、使用喷淋装置或其他因素
开裂严重性	外部腐蚀开裂技术模块的开裂严重性。根据敏感性（温度和气候，见表 N. 24）
日期	确定计算 TMSF 的时间（年）。缺省日期为安装日期。日期可根据涂装日期、上次检测距今的时间做出改变
检验的有效性	外部腐蚀检验程序的有效性
检验次数	外部腐蚀检验的次数
检测日期	上次防腐层下外部腐蚀检验日期

表 N. 23 (续)

基本数据	说 明
防腐层质量	与防腐层下所使用的防腐层类型有关：无，中等或高，见表 N. 25
涂装日期	确定防腐层使用时间，除非防腐层质量是“无”，否则应提供此项数据
防腐层状况是否良好？(Y/N)	良好的防腐层表面没有任何受损迹象（如刺穿、撕裂或防水圈脱落、填充料脱落）或积水（如发棕、发绿或黑色污迹）。应特别注意水容易进入的部位；像检测孔口或防腐层的穿透部位（如龙头、支承环和卡箍等）。水平部位也能积水。如果发现任何受损情况，缺省取“NO”，见表 N. 27
复杂度	分支数目：低于平均水平、平均水平、高于平均水平，见表 N. 26
防腐层是否含氯？(Y/N)	确定防腐层是否含氯。如果无法确定，假设氯存在，见表 N. 28

N. 6. 2 基本假设和方法

见表 N. 24～表 N. 29。

表 N. 24 奥氏体不锈钢 SCC 敏感性

运行温度, °C (°F)	诱 因		
	海上/冷却塔飞溅区	温和环境	干燥环境
<60 (<140)	无	无	无
60~93.33 (140~200)	高	中等	低
>93.33~148.89 (>200~300)	中等	低	无
>148.89 (300)	无	无	无

表 N. 25 根据防腐层质量的修正

防腐层质量		
低	中 等	高
日期 = 设备安装日期或距上次检测日期（如设备已经检测）	日期 = 喷涂日期 + 5 或上次检测日期（如设备已经检测）	日期 = 喷涂日期 + 15 或上次检测日期（如设备已经检测）

表 N. 26 根据复杂度的修正

低于平均水平	平 均 水平	高于平均水平
降低敏感性一级（譬如中到低）	敏感性不变	提高敏感性一级（譬如中到高）

表 N. 27 根据防腐层状况的修正

低于平均水平	平 均 水平	高于平均水平
降低敏感性一级（譬如中到高）	敏感性不变	提高敏感性一级（譬如中到低）

表 N. 28 根据防腐层含氯情况的修正

不 含 氯	含 氯
降低敏感性一级（譬如中到低）	敏感性不变

表 N. 29 不锈钢 CUI 检测分类

检验有效性分类	侵入性检测	非侵入性检测
A	对整个表面： • 对 95% 以上做着色渗透或涡流试验，并根据相关结果进行 UT 检测	暂无检测技术能达到“A”级要求
B	对整个表面： • 对 60% 以上做着色渗透或涡流试验，并根据相关结果进行 UT 检测	对整个表面： • 对 95% 以上进行自动或手动超声扫描，或 • 对相关指示进行 100% 的 AE 测试
C	对整个表面： • 对 5% 以上做着色渗透或涡流试验，并根据相关结果进行 UT 检测	对整个表面： • 对 30% 以上进行自动或手动超声扫描，或 • 对 60% 以上进行射线检测
E	有效性低于“D”等，不检测或检测技术无效	有效性低于“D”等，不检测或检测技术无效

N. 6.3 技术模块的次因子的确定

确定奥氏体不锈钢外部 CUI SCC 技术模块次因子的过程见图 N. 5。

注意：由于外部腐蚀损伤的复杂性和腐蚀的多样性，建议根据已知的外部腐蚀案例做一次验证，以确定最合适的变量。

第 1 步：确定所研究的装置或装置的一部分中，引起外部腐蚀的诱因。

第 2 步：根据腐蚀诱因和运行温度确定敏感性。

第 3 步：根据存在的裂纹进行修正，如果该设备已检测出 SCC，那么就认为敏感性高。

第 4 步：Cl-SCC 腐蚀的严重度指数见表 N. 22。

第 5 步：根据上次检测的时间及防腐层的类型和使用时间，确定外部腐蚀可能发生的时间。

第 6 步：根据系统的复杂度修正腐蚀的敏感性（支管、支架等的数量，这些部位使得水可以进入防腐层）。

第 7 步：根据对防腐层的状况和对气候影响（如有的话）的定性评估修正外部腐蚀的敏感性。

第 8 步：根据修正过的敏感性及 SCC 模块中检测的次数和类型（见表 N. 28）确定 TMSF。

第 9 步：由于自上次检测后随着时间的增加，处于运行扰乱环境和其他非正常环境的时间也在增加，故假定开裂的可能性也将而增加。因而，TMSF 将按以下关系增加（见第 10 步）。

第 10 步：最终的 $TMSF = TMSF \times (\text{上次检测距今的年数})^{1.1}$ 。

第 11 步：例如，TMSF 为 10 的设备/配管使用 5 年而未做任何检测后，TMSF 将增加到 58，使用 10 年而未做任何检测进一步增加到 125。

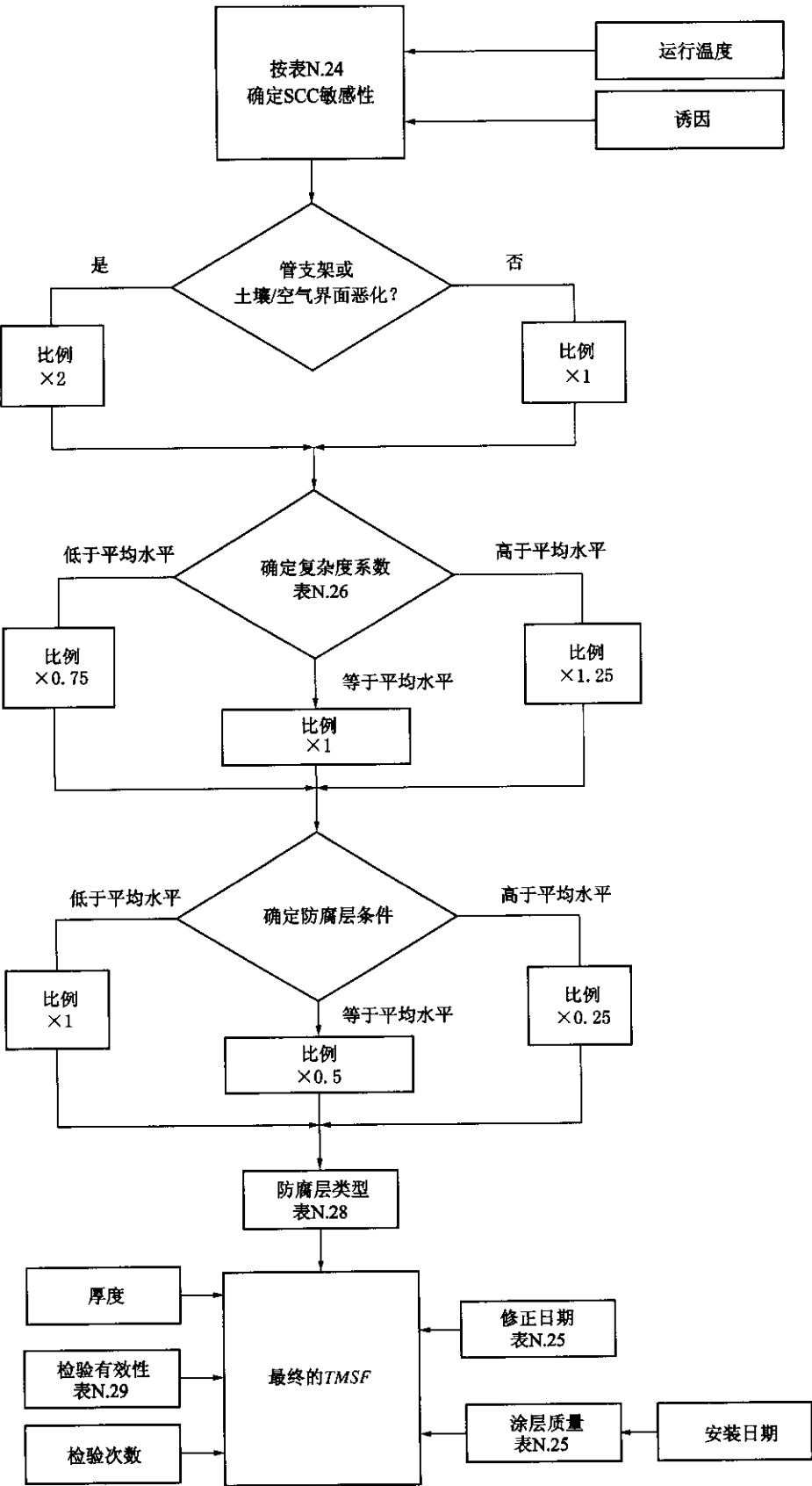


图 N.5 奥氏体不锈钢外部 CUI SCC 流程图

附 录 O
(资料性附录)

本标准与 API Publ 581 技术性差异及其原因

表 O.1 给出了本标准与 API Publ 581 的技术性差异及其原因一览表。

表 O.1 本标准与 API Publ 581 的技术性差异及其原因

本标准的章节编号	技术性差异	原 因
1	删除原“1 范围”，重新编写了“1 范围”	原文拖沓冗长，使用不便
2	将原文“2 参考文献”作为参考文献出现	以符合 GB 1.1 的要求
2	将已经采标为国内标准的规范性引用文件的编号替换为国内标准编号	增加使用的方便，符合 GB 20000.2 的要求
7.10.2.1	5Cr $\frac{1}{2}$ Mo 改为 5Cr $\frac{1}{2}$ Mo，7Cr $\frac{1}{2}$ Mo 改为 7Cr $\frac{1}{2}$ Mo	没有原文中的两种材料，属于笔误
附录 C	C.2 第 7 行，若没有雨淋系统，则输入第 4 行	原文中没有指出是输入第 4 行，无法进行计算
附录 D	3.4 中 e) 原文意思为“评估组中是否至少有一人没有参与初步设计？”，改为“评估组中是否至少有一人参与初步设计？”	与实际情况不符
附录 G	图 G.2 (a) 中的表 G.17、表 G.18 和表 G.19 分别改为表 G.11、表 G.12、表 G.13、表 G.14 和表 G.15； 图 G.2 (b) 中的表 G.20 和表 G.21 分别改为表 G.16、表 G.17、表 G.18 和表 G.19； 图 G.3 中的表 G.27~表 G.32 分别改为表 G.21~表 G.38； 图 G.4 中的表 G.34、表 G.38、表 G.39 和表 G.40 分别改为表 G.40~表 G.51； 图 G.6 中的表 G.45 改为表 G.68 和表 G.69； 图 G.7 中的表 G.47 改为表 G.73 和表 G.74； 图 G.8 中的表 G.52A、表 G.52B、表 G.52 改为表 G.76、表 G.77、表 G.78 和表 G.80	英文原文中引用编号错误
附录 G	表 G.27 中倒数第 5 行删除； 表 G.29 中的 1.6~2.1 改为 1.6~2.0； 表 G.35 中第二列的 ≤ 0.2 改为 ≤ 2.0	查询表格的范围不连续，明显错误
附录 H	英文原文图 H.8 “使用表 H.18 和 H.19 确定敏感性”改为“使用表 H.17 和表 H.18 确定敏感性”； H.4.5 的公式中“(上次开裂检验以来的年数)”增加指数 1.1	英文原文中引用编号错误

参 考 文 献

- [1] AIChE/CCPS Guidelines for chemical process quantitative risk analysis
- [2] AIChE/CCPS Guidelines for hazard evaluation procedures
- [3] AIChE/CCPS Guidelines for use of vapor cloud dispersion models
- [4] ASME Boiler and pressure vessel code, section VIII, “pressure vessels”, division 1, section IX, “welding and brazing qualifications”
- [5] EPA Risk management programs for chemical accident release prevention, 40CFR part 68, proposed rule, docket A-91-73
- [6] NFPA Fire protection guide to hazardous materials, 10th edition, 1991
- [7] OSHA Process safety management of highly hazardous chemicals standard, title 29, code of federal regulations (CFR) part 1910. 119 FR57 (36), 6356-6417
- [8] F. P. Lees, Butterworths. Loss prevention in the process industries. London. 1980
- [9] ASME The risk based management system: A new tool for assessing mechanical integrity, PVP-Vol. 251, reliability and risk in pressure vessels and piping, J. E. Aller, R. Dunlavy, K. R. Riggs, and D. Perry, 1993
- [10] OSHA Process safety management of highly hazardous chemicals standard, title 29, code of federal regulations (CFR) 1910. 119 FR57 (36); 6356 - 6417, February 24, 1992
- [11] Risk management programs for chemical accident release prevention, 40 CFR 68, proposed rule, Docket A - 91 - 73, environmental protection agency, Washington DC, 1993
- [12] Offshore reliability data, OREDA participants, OREDA - 92, distributed by DNV Technica, H Ø vik, Norway
- [13] Hydrocarbon leak and ignition database, report N658, DNV Technica, prepared for E & P Forum, 1992
- [14] T. L. Anderson, R. D. Merrick, S. Yukawa, D. E. Bray, L. Kaley, and K. Van Scyoc. Fitness-for-service evaluation procedures for operating pressure vessels, tanks, and piping in refinery and chemical service, consultant's report-MPC program on fitness for service. materials properties council, Inc, New York, NY, September, 1993
- [15] T. A. Kletz. What went wrong. Gulf Publishing Co. , Houston, TX, 1986
- [16] Handbook of case histories in failure analysis, ASM international, Materials Park, OH, 1992
- [17] Safety digest of lessons learned, section 1~6, American Petroleum Institute, Washington, D. C. , 1982
- [18] Understanding how components fail, D. J. Wulpi, American society for metals, metals park, OH, 1987
- [19] Defects and failures in pressure vessels and piping, H. Thielsch, Krieger Publishing Co. , Malabar, FL. , 1977
- [20] Large property damage losses in the hydrocarbon-chemical industries. A Thirty-Year Review, 14th Edition, Marsh & McLennan, M&M Protection Consultants, 1992
- [21] R. H. Perry, and D. Green, (editors) McGraw-Hill. Perry's chemical engineering handbook. 6th Edition. New York, 1984
- [22] Methods for the calculation of physical effects of the escape of dangerous materials: liquids and gases, apeldoorn, TNO, The Netherlands, 1979

- [23] F. Pasquill. Atmospheric diffusion: The dispersion of windborne material from industrial and other sources. 2nd Edition. Wiley York, 1974
- [24] User manual for process hazard analysis software tools (PHAST), Version 4.1, DNV Technica, Temecula, California, 1993
- [25] Hazardous waste tank failure (HWT^F) and release model: description of methodology, pope-reid associates, Inc. , sponsored by environmental protection agency, office of solid waste, EPA/530/SW86/012, interim draft report, Washington, DC 1986
- [26] Reid, Robert C, et. al. The properties of gases and liquids. 4th Edition. McGraw-Hill, New York, 1987
- [27] Dow's fire and explosion index hazard classification guide, 7th Edition, American institute of chemical engineers—AIChE technical manual, New York, 1994
- [28] Loss control in the process industries, F. P. Lees, 1980
- [29] Smith and Warwick. A survey of defects in pressure vessels, 1981
- [30] WASH - 1400, 1970, modified by Ref4. U. S. Nuclear Regulatory Commission
- [31] H. M. Thomas. Pipe and vessel failure probability. Reliability Engineering Journal, 1981
- [32] C. Galvanin, V. Columbari, G. Bellows. ENI Reliability databook, component reliability handbook. Italy, 1982
- [33] Nuclear plant reliability data system, Southwest research institute, 1981
- [34] J. R. Benjamin and A. Cornell, McGraw-Hill. Probability, statistics and decision for civil engineers. New York, 1970
- [35] A. Tallin and M. Conley. Assessing inspection results using bayes' theorem, 3rd international conference & exhibition on improving reliability in petroleum refineries and chemical plants. DNV USA, Inc. , Gulf Publishing Company, November 15 - 18, 1994
- [36] Development of a probability based load criterion for american national standard A58, National bureau of standards spec. Pub. 577, Ellingwood, et. al. , 1990
- [37] Analysis of large property losses in the hydrocarbon and chemical industries, J. Krembs, J. Connolly, M&M Protection Consultants, Refinery and Petrochemical Plant Maintenance Conference, May 23 - 25, 1990
- [38] The unreliability of non-destructive examinations. O. F. Ørli, and B. Pettersen, 4th European Conference on Non-destructive Testing, London, 1987
- [39] Non-destructive evaluation of steel structures-techniques and reliability, O. F. Ørli, Conference on non-destructive evaluation of civil structures and materials, Boulder, Colorado, 1990
- [40] W. H van Leeuwen. Reliability optimization of manual ultrasonic weld inspection. Dutch Welding Institute (NIL) to PISC Management Board Meeting, Glasgow, 1990.
- [41] Materials evaluation, p812 - 821, No. 47. J. Perdijon, July, 1989
- [42] PISC-II report No. 1 - 5, programme for the inspection of steel components, nuclear energy agency, committee on the safety of nuclear installations, CSNI No. 106 - 110
- [43] Roles of non-destructive inspection in reliability assessment of structures, M. Murata, Y. Aikawa, M. Nakayama, nippon steel technical report No. 32, 1987
- [44] Detection and disposition reliability of ultrasonics and radiography for weld inspection, R. DeNale, and C. Lebowitz, david taylor research center, annapolis, MD.
- [45] J. V. Provan (editor) . Probabilistic fracture mechanics and reliability. Dordrecht, NL: martinus nijhoff publishers, 1987, p276

- [46] O. Saugerud, and S. Angelsen. Probabilistic lifetime assessment of ammonia pressure vessels, life prediction of corrodible structures. NACE, Houston, TX, 1991
- [47] Positive materials identification of existing equipment, H. A. Wolf, 2nd international symposium on the mechanical integrity of process piping, MTI Publication No. 48, Houston, 1996
- [48] W. G. Ashbaugh, Inspection of vessels and piping for corrosion under insulation corrosion; when, where, and how to do it , materials performance, volume 29, July 1990, p 38 – 42
- [49] Corrosion of metals under thermal insulation, ASTM, Special Technical Publication 880
- [50] API 570 Piping inspection code (1st Edition), June 1993
- [51] Metals handbook, vol. 13, “Corrosion” . ASM international
- [52] T. S. Lee, III , and F. G. Hodge. Resistance of hastelloy alloys to corrosion by inorganic acids. materials performance, september 1976, p29
- [53] Corrosion resistance of hastelloy alloys , haynes international. Inc. , 1984
- [54] Resistance to corrosion, inco alloys international, Inc
- [55] “Resistance to nickel and high nickel alloys to corrosion by hydrochloric acid. hydrogen chloride and chlorine” . corrosion engineering bulletin CEB – 3, the international nickel company, Inc. , 1969
- [56] L. Colombier and J. Hochmann. Stainless and heat resisting steels, St. martins press, New York, NY
- [57] F. McConomy. High-temperature sulfidic corrosion in hydrogen-free environment, API Division of Refining, Vol. 43 (III), 1963
- [58] J. Gutzeit. High temperature sulfidic corrosion of steels, Process industries corrosion, NACE, Appendix 3, p367
- [59] High temperature crude oil corrosivity studies, American petroleum instituts, publication943, september 1974
- [60] Derungs. “Naphthenic acid corrosion-an old enemy of the petroleum industry, corrosion” . Vol. 12 No. 12, p41
- [61] J. Gutzeit. “Naphthenic acid corrosion” . NACE Paper No. 156, corrosion/76
- [62] Blanco and B. Hopkinson. “Experience with naphthenic acid corrosion in refinery distillation process units” . NACE Paper No. 99, corrosion/93
- [63] R. Pieh. “Naphthenic acid corrosion in distillation units” . materials performance, January, 1988
- [64] H. L. Craig, Jr. , “Naphthenic acid corrosion in the refinery” . NACE Paper No. 333, corrosion/95
- [65] S. Tebbal and R. D. Kane. “Review of critical factors affecting crude corrosivity” . NACE Paper No. 607, Corrosion/96
- [66] H. L. Craig, Jr. , . “Temperature and velocity effects in naphthenic acid corrosion” . NACE Paper No. 608, Corrosion/96
- [67] T. F. Degnan. Material of construction for hydrofluoric acid and hydrogen fluoride, process industries corrosion, NACE, Houston, TX 1986
- [68] NACE Publication 5A171 Materials for receiving, handing and storing hydrofluoric acid (1995 Revision)
- [69] Corrosion resistance of nickel-containing alloys in hydrofluoric acid, hydrogen fluoride and fluorine. corrosion engineering. Bulletin CEB – 5, The international Nickel Co. , Inc. , 1968

- [70] W. K. Banchard and N. C. Mack. "Corrosion results of alloys and welded couples over a range of hydrofluoric acid concentrations at 125°F" . NACE Paper 452, Corrosion/92
- [71] J. Dobis Clarida and J. Richert. "A survey of plant practices and experience in HF alkylation units" . NACE Paper 511, corrosion/94
- [72] H. Hashim and W. Valerioti. "Effect of resistant copper, nickel, and chromium on the corrosion resistance of carbon steel in hydrofluoric acid alkylation service" . NACE Paper 623, Corrosion/93
- [73] R. L. Piehl. "Survey of corrosion in hydrocracker effluent air coolers" . materials protection, January, 1976
- [74] F. Ehmke, "Corrosion correlation with ammonia and hydrogen sulfide in air coolers" . Materials protection, July, 1975
- [75] D. G. Damin and J. D. McCoy. "Prevention of corrosion in hydrodesulfurizer air condensers" . Materials performance, december, 1978, p23 - 26 (see also NACE Corrosion/78 paper #131)
- [76] C. Scherrer, M. Durrieu, and G. Jarno. "Distillate and resistant hydroprocessing: coping with high concentrations of ammonium bisulfide in the process Water" . Materials performance, november, 1980, p25 - 31 (see also NACE Corrosion/79 paper #27)
- [77] API Recommended Practice 945 Avoiding environmental cracking in amine units. first edition, August 1990. appendix B "Considerations for corrosion control"
- [78] L. Pearce, S. Gringie. "Amine gas treating solution analysis a tool in problem solving" . presentation at the 59 Annual GPA Convention March 17 - 19, 1990 Houston TX
- [79] P. Lieberman, "Amine appearance signals condition of systems" . Oil and gas journal , may 12, 1980 , p115
- [80] M. S. DuPart, T. R. Bacon, and D. J. Edwards. "Understanding corrosion in alkanolamine gas treating plants" . Hydrocarbon processing, april 1993, p75
- [81] R. Abry and M. S. DuPart. "Amine Plant Troubleshooting and optimization" . Hydrocarbon processing , april 1995, p41 - 50
- [82] H. L. Craig and B. D. McLaughlin. "Corrosive amine characterization" . NACE Paper No. 394, Corrosion/96
- [83] R. Hays, and C. J. Schulz. "Corrosion and fouling of a refinery MDEA System" . NACE paper No. 447, Corrosion/92
- [84] Kelier, B. Scott, D. Tunnell, E. Wagner, and M. Zacher. "How efficient ARE refinery amine units?" . Hydrocarbon processing, april 1995, p91 - 92
- [85] Rooney, T, R. Bacon, and M. S. DuPart. "Effect of heat stable salts on MDEA solution corrosivity" . Hydrocarbon processing, march 1996, p95
- [86] C/McCullough and R. B. ielsen. "Contamination and purification of alkaline gas treating solutions" . NACE paper No. 396, Corrosion/96
- [87] M. J. Litschewski. "More experiences with corrosion and fouling in a refinery amine system" . NACE paper No. 391, Corrosion/96
- [88] Corrosion data survey - metals section, NACE international, Houston, TX, fifth edition (March1974), p274
- [89] NACE - 5 Stress corrosion cracking of hydrogen embrittlement of iron base alloys. Edited by R. W. Staehle, et al. NACE international . Houston, TX, 1977, p583 - 587
- [90] P. Gegner. "Corrosion resistance of materials in alkalis and hypochlorites" . Process in-

dustries corrosion , NACE international, Houston TX, 1975, p296 - 305

[91] J. K. Nelson. "Materials of construction for alkalies and hypochlorites" . Process industries corrosion - The theory and practice, NACE international, Houston, TX, 1986, pp.297 - 310

[92] R. R. JPetric and E. M. Moore, Jr. . "Determining the suitability of existing pipelines and producing facilities for wet sour service" . Materials performance 28, 6 (june 1989), p59 - 65

[93] NACE - 5 Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of iron base alloys. Edited by R. W. Staehle, et al. , NACE international . Houston, TX, 1977, p541 - 559

[94] C. M. Hudgins, et al. . "Hydrogen sulfide cracking of carbon and alloy steels" . Corrosion, Vol. 22, p238 - 251

[95] NACE RP 0296 - 96 Guidelines for detection, Repair and mitigation of existing petroleum refinery pressure vessels in wet H₂S environments

[96] R. R. Petric and E. M. Moore, Jr. . "Determining the suitability of existing pipelines and producing facilities for wet sour service" . Materials performance 28, 6 (June 1989), p59 - 65

[97] R. D. Merrick. "Refinery experiences with cracking in wet H₂S environments" . Materials performance 27, 1 (January 1988), p30

[98] R. D. Merrick and M. L. , Bullen. "Prevention of cracking in wet H₂S environments," NACE Corrosion/89, paper No. 269

[99] NACE Publ 8X194 Materials and fabrication practices for new pressure vessels used in wet H₂S refinery service

[100] NACE Publ 8X294 Review of published literature on wet H₂S cracking of steels through 1989

[101] API Publ 939 Research report on characterization and monitoring of cracking in wet H₂S service, october 1994

[102] M. S. Cayard and R. D. Kane. "Characterization and monitoring of cracking of steel equipment in wet H₂S service" . NACE Corrosion/95, Paper No. 329

[103] Metals handbook. ninth editor, ASM international, Metals park, Ohio 44073, Volume 13 Corrosion, p327

[104] D. R. McIntuyre and C. P. Dillon. Guidelines for preventing stress corrosion cracking in the chemical process industries, Publication 15, Materials technology institute of the chemical process industries, 1985, p69

[105] The role of stainless steels in petroleum refining, American iron and steel institute, 1977, p42 - 44

[106] D. V. Beggs, and R. W. Howe. "Effects of welding and thermal stabilization on the sensitization and polythionic acid stress corrosion cracking of heat and corrosion-resistant Alloys" . NACE International Corrosion/93 Paper 541, NACE international, Houston, TX

[107] L. Scharfstein. "The effect of heat treatments in the prevention of intergranular corrosion failures of AISI321"