



中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 6653—2006

1 范围

1.1 目的

1.2 适用范围

2 规范性引用文件

3 术语和定义

4 基本概念

4.1 什么是风险

5 基于风险的检查 (RBI) 推荐作法

5.1 概述

Recommended practice for risk - based inspection

(API RP 580: 2002, Risk - based inspection IDT)

5.2 术语

5.3 精确性和范围

5.4 理解基于风险的检查 (RBI) 与 API RP 580 的关系

5.5 风险管理

5.6 基于风险的检查 (RBI) 与其他风险和安全管理的关系

5.7 与法定要求的关系

6 基于风险的检查 (RBI) 评估计划

6.1 目的

6.2 范围

6.3 术语

6.4 确定评估计划

6.5 选择基于风险的检查

6.6 估算所需资源

7 基于风险的检查 (RBI) 评估数据收集和资料收集

7.1 基于风险的检查 (RBI) 需要的数据

7.2 数据质量

7.3 国内和国际规范和标准

7.4 现场数据和资料来源

2006—07—10 发布

2007—01—01 实施

目 次

前言	IV
1 范围	1
1.1 目的	1
1.2 适用范围	2
1.3 适用人员	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 基本概念	7
4.1 什么是风险	7
4.2 风险管理和风险削减	8
4.3 检查周期的演变	8
4.4 优化检测方案	8
4.5 相对风险和绝对风险	9
5 基于风险的检查 (RBI) 的介绍	10
5.1 基于风险的检查 (RBI) 的后果和概率	10
5.2 基于风险的检查 (RBI) 评估的类型	11
5.3 精确性和准确性	13
5.4 理解基于风险的检查 (RBI) 是如何帮助管理运行风险	13
5.5 风险管理	13
5.6 基于风险的检查 (RBI) 与其他风险和安全措施的联系	14
5.7 与法定要求的关系	15
6 基于风险的检查 (RBI) 评估计划	15
6.1 开始	15
6.2 确定基于风险的检查 (RBI) 评估目的和目标	15
6.3 初始的筛选	16
6.4 确定运行边界	18
6.5 选择基于风险的检查 (RBI) 评估的类型	19
6.6 估算所需资源和时间	19
7 基于风险的检查 (RBI) 评估数据和资料的收集	20
7.1 基于风险的检查 (RBI) 需要的数据	20
7.2 数据质量	21
7.3 国内和国际规范和标准	21
7.4 现场数据和资料来源	21
8 识别劣化机理和失效模式	22
8.1 介绍	22
8.2 基于风险的检查 (RBI) 的失效和失效模式	23
8.3 劣化机理	23
8.4 其他失效模式	24

9 评估失效概率	24
9.1 概率分析介绍	24
9.2 失效概率分析的测量单位	25
9.3 概率分析的类型	25
9.4 失效概率的确定	25
10 评估失效后果	27
10.1 后果分析介绍	27
10.2 后果分析的类型	28
10.3 后果分析中的测量单位	28
10.4 泄漏流体的体积	29
10.5 后果影响的种类	29
11 风险确认、评估和管理	32
11.1 目的	32
11.2 风险的确认	32
11.3 风险管理决策和可接受的风险等级	33
11.4 敏感性分析	33
11.5 推断	34
11.6 风险描述	34
11.7 建立可接受风险阈值	35
11.8 风险管理	35
12 用检查工作进行风险管理	36
12.1 通过检查降低不确定度来管理风险	36
12.2 从基于风险的检查(RBI)和失效概率结果中确定风险管理的时机	36
12.3 以风险评估为基础建立检查策略	36
12.4 用检查工作管理风险	37
12.5 使用基于风险的检查(RBI)管理检查费用	37
12.6 评价检查结果,确定矫正行为	38
12.7 用基于风险的检查(RBI)实现运行周期成本最小化	38
13 其他削减风险的措施	38
13.1 概述	38
13.2 设备更换和维修	38
13.3 缺陷设备的合乎使用评价	38
13.4 设备修改、重新设计和重新定级	39
13.5 紧急切断	39
13.6 紧急降压和减少危害物存量	39
13.7 改变工艺	39
13.8 减少存量	39
13.9 洒水和(或)喷水	39
13.10 水幕	39
13.11 防爆结构	39
13.12 其他	39
14 基于风险的检查(RBI)再评估和评估的更新	40
14.1 基于风险的检查(RBI)再评估	40

14.2 为什么要进行基于风险的检查 (RBI) 再评估	40
14.3 何时实施基于风险的检查 (RBI) 再评估	41
15 岗位、职责、培训和资格	41
15.1 小组协作	41
15.2 小组成员、岗位和职责	41
15.3 实施基于风险的检查 (RBI) 的培训和资格	43
16 基于风险的检查 (RBI) 文件和记录保存	43
16.1 概述	43
16.2 基于风险的检查 (RBI) 方法	43
16.3 基于风险的检查 (RBI) 人员	43
16.4 时间安排	44
16.5 风险分析的任务	44
16.6 风险评价时所作的假设	44
16.7 风险评价的结果	44
16.8 风险削减及其后续工作	44
16.9 规范、标准和政府的条例	44
附录 A (资料性附录) 劣化机理	45

前 言

- 本标准等同采用 API RP 580: 2002《基于风险的检查 (RBI)》(英文版)。
- 本标准等同翻译 API RP 580: 2002。
- 为便于使用, 本标准删去了 API RP 580: 2002 中的与主题内容无关的内容, 包括标准的扉页、特别声明、引言、第 3 章“缩写”等内容。
- 本标准的附录 A 为资料性附录。
- 本标准由石油工业安全专业标准化技术委员会提出并归口。
- 本标准主要起草单位: 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院。
- 本标准参加起草单位: 中国石化集团公司胜利石油管理局安全环保处。
- 本标准主要起草人: 李志勇、张海峰、刘瑞霞、姜春明、杨雷、刘道信、尚志勇。

基于风险的检查 (RBI) 推荐作法

1 范围

1.1 目的

本标准的目的是给用户实施和开展基于风险的检查 (RBI) 程序的基本要素。方法将一步一步地展开, 直到最大限度的运用于实际。其内容主要包括:

- a) 基于风险的检查 (RBI) 概念和原理的介绍;
- b) 各个章节里描述了在基于风险的检查 (RBI) 工艺框架内应用这些原理的步骤:
 - 1) 基于风险的检查 (RBI) 评估的计划;
 - 2) 数据和资料的采集;
 - 3) 识别劣化机理和失效模式;
 - 4) 评估失效的概率;
 - 5) 评估失效的后果;
 - 6) 风险识别、评价和管理;
 - 7) 通过检查实施风险管理;
 - 8) 其他风险削减措施;
 - 9) 再评估和更新;
 - 10) 任务、责任、培训和资格;
 - 11) 文件和记录的保存。

基于风险的检查 (RBI) 的目的是通过适当的基于风险的检查 (RBI) 或其他风险削减措施来管理风险。基于风险的检查 (RBI) 方法可以:

- a) 对所有受评估设备进行风险排序;
- b) 对于每一个设备单元给出详细的检查计划, 包括:
 - 1) 应当使用的检查方法 (例如外观检查、超声、射线检查、磁粉等);
 - 2) 应用检查方法的范围 (检查所占的总面积百分比及特殊位置);
 - 3) 检查的时间安排;
 - 4) 通过实施检查计划实现风险管理。
- c) 其他风险削减措施的详细描述 (例如维修、更新和安全装备的升级)。
- d) 实施设备检查计划和其他风险削减措施后的预期风险水平。

1.1.1 基于风险的检查 (RBI) 方案的要点

任何基于风险的检查 (RBI) 方案都必须具备的要点:

- a) 用于维护文件、人员资质、数据需求和分析更新的管理系统。
- b) 确定失效概率的书面记录方法。
- c) 确定失效后果的书面记录方法。
- d) 通过检查和其他风险削减措施进行风险管理的书面记录方法的文档。
- e) 按照本标准进行基于风险的检查 (RBI) 时应充分考虑 1.1 中提出的全部要点。

1.1.2 基于风险的检查 (RBI) 的益处和限制

基于风险的检查 (RBI) 评估和管理方法的主要工作成果是建立了设备风险管理计划。设备风险管理计划强调来自于安全、健康、环境和 (或) 经济方面的风险。在这些设备风险管理计划里, 推荐

将削减风险的成本与削减风险的预期结果相结合进行分析。

实施这些计划可以：

- a) 全面降低所评估设备和装置的风险。
- b) 控制风险达到风险可接受水平。

基于风险的检查(RBI)计划可以确定不需要检查或需要采取风险削减措施的设备。在当前设备操作达到风险可接受水平时,检查和维护工作可以更加集中,并具有更高的成本效益。这通常可以显著减少需要收集的检查数据量,可将精力集中在较少的数据上使资料更加准确。在很多情况下,除降低风险和改善工艺安全外,基于风险的检查(RBI)计划还可以降低成本。

基于风险的检查(RBI)要基于可靠的、已验证的风险评估和管理法则,基于风险的检查(RBI)不能对下列情况起到作用:

- a) 资料缺失和资料不准确;
- b) 设计不正确或设备安装缺陷;
- c) 在可接受的设计范围之外进行检查操作;
- d) 没有有效地执行基于风险的检查(RBI)计划;
- e) 缺乏合格人员或团队的配合;
- f) 缺乏工程或操作上的正确判断。

1.1.3 使用基于风险的检查(RBI)作为持续改进的手段

基于风险的检查(RBI)的应用提供了持续改进设备检查的手段,并且可降低压力容器和管道系统失效的风险。当获得新的数据(例如检查结果)或数据发生变化时,要进行基于风险的检查(RBI)项目的再评估以便重新评价风险。风险管理计划也应进行相应的调整。

基于风险的检查(RBI)另外一个优点是可以识别当前检查技术及其工业应用效率方面的差距和不足。在有些情况下,检查技术不能充分或有效降低风险时,可以实施其他风险削减措施。基于风险的检查(RBI)应指导检查技术的发展方向,促进新兴的检查技术以及当前未被充分利用的检查技术更快更广泛地发展。

1.1.4 基于风险的检查(RBI)——综合管理工具

基于风险的检查(RBI)作为风险评估和管理的工具,涉及了其他风险管理中没有完全涉及的领域,例如工艺危险性分析(PHA)或以可靠性为中心的维护(RCM)。它是其他系统的补充,给出了与设备运行相关的、更加完备的风险评估。

根据基于风险的检查(RBI)结果来确定设备检查和维护计划。在设备检查和维护计划中,明确了为确保设备安全可靠地运行所要采取的措施。基于风险的检查(RBI)的实施可为工厂的年度计划和预算提供依据,确定人员和维护资金,在可接受的风险水平条件下运行设备。

1.2 适用范围

1.2.1 尽管本标准所描述的风险管理的原理和概念是普遍适用的,但本标准主要是针对烃加工工厂和化工厂进行风险检查而编制的。

1.2.2 应用的灵活性。因为工厂的大小、文化、国家和地方法规要求的各不相同,本标准在现有的风险管理范围之内,给予了用户实施基于风险的检查(RBI)的灵活性,以满足不同的地方法规。编写本标准旨在给用户提供一个有效的风险评估框架,同时不给用户强加不必要的限制。本标准旨在提高识别、评估和管理风险的质量,并确保这些工作的持续性。此处的风险是指由于设备材料劣化而引起泄漏的危险。

目前有许多种基于风险的检查(RBI)方法,并正在不同工业领域中应用。本标准不是要推荐某种特定的方法去实施基于风险的检查(RBI),而在于阐明基于风险的检查(RBI)分析的基本要素。

1.2.3 关注机械精确度性。基于风险的检查(RBI)过程关注承压设备的机械精确度和减少由于机

械性能劣化引起的物料损失的风险。基于风险的检查(RBI)不能替代工艺危险性分析(PHA)或危险与可操作性研究(HAZOP)。通常,工艺危险性分析(PHA)风险评价重点在于工艺单元的设计和实际操作,及其在目前或预期操作条件下的充分性。基于风险的检查(RBI)重点在于与机械完整性相关的劣化机理和通过检查实施风险管理,并以此对工艺危险性分析(PHA)做进一步补充。基于风险的检查(RBI)还可以与可靠性为核心的维护(RCM)计划互补,这两种计划都致力于了解失效机理,明确失效模式,并以此改进设备和工艺装置的可靠性。

1.2.4 包括的设备。在本标准件包括下面的承压设备和相关的部件及内件:

- a) 压力容器——全部的内部承压部件;
- b) 工艺管道——管道和管件;
- c) 储罐——常压储罐和承压储罐;
- d) 转动设备——承受内压的部件;
- e) 锅炉和加热器——承压部件;
- f) 换热器——(壳体、封头、隔板和管束);
- g) 泄压装置。

1.2.5 不包括的设备。本标准件不涉及以下不承压设备:

- a) 仪表和控制系统;
- b) 电气系统;
- c) 结构系统;
- d) 机械部件(不包括泵和压缩机外壳)。

1.3 适用人员

本标准的适用人员是检查和工程人员,他们对本标准所涉及设备的精确性和可操作性负责。基于风险的检查(RBI)不仅仅是某一些人的检查活动,还需要工厂中多个部门人员参加,例如工程、维护和操作人员。基于风险的检查(RBI)要求所有组织的合作与承诺。尽管本标准的主要适用人员是检查和材料工程师,其他可能参与的人员也应当熟悉基于风险的检查(RBI)的方法概念和原理。

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。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

SY/T 6507 压力容器检验规范 维护检验、定级、修理和改造

API 570 管道检验规范—在役管道设施的检查、维护、修理和改造

API RP 579 设施适合性

API RP 752 与加工厂建筑物位置相关的危害管理

API RP 941 在炼厂和石化厂内提高温度和压力情况下的氢设施用钢

API Std 653 罐的检查、维护、修理和改造

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

绝对风险 absolute risk

对风险完整、准确的描述和量化。

3.2

最低合理可行 as low as reasonably practical (ALARP)

一种最低化的概念,要求在当前的技术条件和合理的成本下,属性(例如风险)能被降低到某种最低程度。

3.3

后果 consequence

事件的结果,一个事件可有一个或多个后果,后果可能是有利的或不利的。从安全方面来说,后果总是不利的。后果可以用定性或定量的方式表达。

3.4

损坏容许度 damage tolerance

设备能够承受但不发生失效时的劣化程度。

3.5

劣化 deterioration

部件本身承载流体能力的降低。它可以由很多不同的劣化机理(例如减薄、断裂和机械损伤等)引起,“损伤”和“衰变”都可以用劣化来代替。

3.6

事件 event

一种特定条件下发生的事情。事件可能是确定的或者不确定的。事件可以是单一的,也可以是多个的。在给定的时限内可以对这种事件的概率进行估计。

3.7

事件树 event tree

以逻辑和图表方式组织和描述的潜在事故的分析工具。事件树首先从识别潜在初始事件开始,然后将初始事件引发的后来的可能事件(考虑安全措施)放在事件树的第二层。这个程序持续下去,形成从初始事件到其潜在结果的路线或场景。

3.8

故障树 fault tree

是把系统中许多可能发生或已发生的事故作为分析点,将导致顶上事故的原因事件按因果逻辑关系逐层列出,用树形图表示出来,构成的一种逻辑模型。

3.9

外部事件 external event

自然力引起的事件、不可抗拒力或蓄意破坏作用,或如邻近区域着火和爆炸、邻近区域危险物质的排放、电力故障、龙卷风、地震、外部运输设备的干扰(例如飞机、轮船、火车、敞棚货车或汽车等)。外部事件通常超出了雇员或设备的直接和间接控制。

3.10

失效 failure

系统、结构或部件失去其原有承载流体的能力(例如泄漏)。有的失效可能直到下次检查时才发现(未发现的失效),或在失效事件发生过程中通过某种方法发现和检查到(发现的失效)。

3.11

失效模式 failure mode

失效的方式。对于风险检查,关心的失效是承压设备的泄漏,例如孔隙、裂纹和破裂。

3.12

危害 hazard

可以导致设备失效,并引起人员伤亡或死亡、财产的损失或者环境破坏的一种物理状态或危险物

质的泄漏。危害是一种危险源。输送、存储或加工危险物质的装置是一种危险源。人为错误和外部事件也可能产生危害。

3.13 危险和可操作性研究 hazard and operability (HAZOP) study

危险和可操作性研究是一种失效模式及其影响分析的形式。危险和可操作性研究，最初从加工工业发展而来，运用系统技术识别整个装置发生的危险和可操作性问题。其对于识别由于缺乏资料导致的装置设计缺陷，或由于工艺条件或操作程序发生变更而带来的危险特别有效。危险和可操作性研究的基本目的是：

- a) 对设备或工艺进行详细的描述，包括对新设计提供条件；
- b) 系统地评价设备或工艺的每部分，从而找出与设计意图的偏差是如何产生的；
- c) 确定偏差是否会引起危险或运行问题；
- d) 评价安全措施的有效性。

3.14 可能性 likelihood

可能。

3.15 削减 mitigation

减少不利事件的后果或降低特定事件的概率。

3.16 概率 probability

在设备寿命周期内事件可能发生的程度，概率的数学定义是“给随机事件赋一个 0~1 之间的值”。概率与在一个相对较长时间内事件发生的相对频率或事件发生的可能程度相关。对高可能程度事件，概率值接近为 1。在描述风险时，经常使用“频率”而不是“概率”。概率的可能程度可以从下面等级中选择，如“几乎不/不太可能/中等/有可能/几乎确定”或“难以置信的/不可能的/细微的/偶然的/很可能的/经常的”。

3.17 定性风险分析 (评估) qualitative risk analysis (assessment)

以工程判断和经验为基础，分析失效概率和后果的方法。定性风险分析的结果依赖于分析的背景、分析人员的经验以及分析的目标。失效模式、影响和危险程度分析 (FMECA) 以及危险和可操作性 (HAZOP) 都属于定性风险分析技术，将后果和失效概率数值与有关描述输入共同进行评估时，就成为定量分析方法。

3.18 定量风险分析 (评估) quantitative risk analysis (assessment)

分析包括：

- a) 识别和描述事件的组合，如果这些事件出现，将引起严重后果（例如重大爆炸）或其他严重的事件；
- b) 评价每一组合事件发生的频率；
- c) 估计后果。

定量风险分析用可能实施的现实的方法，将相关资料整合成一个统一的描述形式，相关资料包括设备设计、操作条件、运行历史、部件的可靠性、人员行为、事故具体过程、潜在的环境和健康影响等。

定量风险分析使用逻辑模型描述那些引起严重后果的事件组合，使用物理模型描述事故的进程和危险物质在环境中的扩散。模型从定性和定量的角度给出了对风险的认识，并且识别那些影响风险的

最重要的设计、位置或运行特点。

定量风险分析的逻辑模型通常由事件树和故障树组成。事件树描述了初始事件、系统成功和失效事件的结合,而故障树描述了事件树上系统失效的方向。这些模型分析并估计了前后每一种事故的频率。

3.19

相对风险 relative risk

设备、工艺单元、系统、设备部件相对其他设备、工艺单元、设备部件的风险。

3.20

残余风险 residual risk

实施风险削减措施后的剩余风险。

3.21

风险 risk

失效概率和失效后果的结合。在某些情况下,风险就是指与期望(值)的偏离。概率和后果量化后,风险就是二者的乘积。

3.22

可接受风险 risk acceptance

可以接受的风险。风险可接受程度取决于风险标准。

3.23

风险分析 risk analysis

应用系统的信息识别风险源并进行风险评价。风险分析是风险评价、削减风险和可接受风险程度的基础。所使用的信息中包括历史数据、理论分析、被告知的意见和风险当事方关注的问题。

3.24

风险评估 risk assessment

风险分析和风险评价的全过程。

3.25

风险规避 risk avoidance

不涉及风险的决策或者从危险状态退出的行为。决策建立在风险评价基础之上。

3.26

基于风险的检查(RBI) risk-based inspection

一种重点在于工艺装置中承压设备因材料劣化引起的物料泄漏的风险评价和管理过程。主要通过对设备进行检查来管理这些风险。

3.27

风险沟通 risk communication

在决策者和其他风险承受者之间进行风险信息交换和共享。这些信息包括风险的存在性、自然属性、概率、严重度、可接受度、处理措施和风险的其他各个方面。

3.28

风险控制 risk control

实施风险管理决策的行为。风险控制包括监督、再评价、接受和执行决策。

3.29

风险标准 risk criteria

评估风险的一个参考条件。风险标准可能涉及到成本和收益、法律和法令要求及社会效益 and 环境保护方面,关系到风险当事方、优先顺序及评估的其他方面。

3.30

风险估值 risk estimation

给风险的概率和结果赋值的过程。风险估值应当考虑的内容包括成本、效益、投资者的关注及其他适合于风险评估的因素。

3.31**风险评价 risk evaluation**

比较风险与给出的风险标准，以确定风险程度过程。风险评价可以用来确定是接受风险还是削减风险。

3.32**风险识别 risk identification**

找到、列出和描述风险的过程，包括源、事件、后果、概率。风险识别还要识别股东所关心的问题。

3.33**风险管理 risk management**

通过采取协调行动来指导和控制工厂风险的行为。风险管理通常包括风险评估、风险削减、可接受风险和风险信息的沟通与交流。

3.34**风险削减 risk mitigation**

选择和实施调整风险措施的过程，风险削减条款有时被用来评价风险。

3.35**风险降低 risk reduction**

降低风险发生概率，减轻不利的后果，或两者结合降低风险的行为。

3.36**危险源 source**

具有潜在后果的事物和行为。在安全领域里，危险源是指危害。

3.37**危险源识别 source identification**

找到、列出和描述危险源的过程。在安全领域，危险源识别又称为危害识别。

3.38**风险当事方 stakeholder**

所有可能造成风险影响、被风险影响或者意识到自己受到风险影响的个人、团体或组织。

3.39**有毒化学品 toxic chemicals**

物质安全数据表(MSDS)中所列的任何化学品都对人身和健康，或者对环境有一定危害。有些化学品(当被摄入、呼吸或通过皮肤吸收)可能引起生物组织的破坏、中枢神经系统的损伤、严重的疾病甚至死亡。有些化学品还可能对环境造成不利影响(以生态影响及有毒化学物质在生物体内持续和潜在的积累来衡量)。

3.40**未削减的风险 unmitigated risk**

采取削减措施之前的风险。

4 基本概念**4.1 什么是风险**

每一天，每个人都会遇到风险。有意或无意的，人们总是不断做出基于风险的决定。一些简单的

决定,例如开车去上班或者穿过一个繁华的街道,都包含着风险;大的决定,例如购买房子、投资和结婚等都意味着接受风险。生活中风险无处不在,即使最小心的人也要承担一定的风险。

例如开车时,人们接受了他们有可能死亡或严重伤害的概率。接受风险的原因是人们认为死亡或严重伤害的概率非常低,所以接受了这个风险。影响决策的因素主要包括车的类型、安全特性、交通流量、速度,以及其他因素,如可得性、风险和其他替代措施的使用(例如公共交通工具)。

风险是事件发生的概率和与事件相关联的后果(通常是不利的)的函数。风险可以用以下数学形式表示:

$$\text{风险} = \text{概率} \times \text{后果}$$

可能性和概率是同义词,在本标准中为保持一致性全部使用概率。

4.2 风险管理和风险削减

表面上,风险管理和风险削减好像是同义词。然而风险削减仅仅是风险管理的一部分。风险削减是将已知的风险减低到一个较低水平。风险管理是评价风险的过程,以确定风险削减措施是否必要,并制定计划将风险控制在一個可以接受的水平之下的过程。通过风险管理,很多风险可以认为是可以接受的,因此不需要任何风险削减措施。

4.3 检查周期的演变

在工艺车间中,检测计划的建立是为了检查和评价在用设备的劣化。检查方案影响的范围很广,从众所周知大家都关心的反应器的检测方案到包含各种设备的广泛相关方案。有两个极端情况,一个是“不进行维修直到其损坏”,另一个是以“一定频率检查所有的设备”。

检查周期的设定随着时间不断变化。为了定期验证设备的完整性,很多工厂最初以工作时间或工作日为基础来确定周期。

随着检查方式的进步和对劣化速率、类型更深入的了解,检查周期越来越取决于设备的条件,而不再是一个绝对的以工作日来确定周期。SY/T 6507、API 570 和 API Std 653 等规范和标准规定了检查原则,其基本要素包括:

- 以设备寿命的一定比例作为检查周期(例如寿命的一半);
- 对劣化速率较低的设备,用在线检查代替内部检查;
- 针对工艺环境引起开裂失效机理的内部检查要求;
- 基于风险后果,确定检查周期。

基于风险的检查(RBI)代表了新的检查方式和检查周期的设置,检查的最终目的是识别运行设备的安全性和可靠性。基于风险的检查(RBI)作为一种以风险为基础检查的方法,将注意力集中在最大风险的设备和相关的劣化机理。在关注风险及其削减措施时,基于风险的检查(RBI)提供了一个较好的方法将导致设备失效机理和有效降低风险的检查方法结合起来。在本标准中,失效意味着物料泄漏。

4.4 优化检测方案

相关设备的风险已经确定,进行估值和量化,就有了足够的信息进行基于风险的检查(RBI)方案的优化。

图1表示了随着检查程度和频率的增加,风险降低程度的曲线。上面的曲线表示一种典型的检查方案。没有进行检查时,有很高的风险,就像图中纵向轴上的点所指示的那样。随着最初检查工作的投入,风险明显降低。降低到一定程度后,额外的检查工作对降低风险十分有限。如果过度检查,风险水平甚至会回升。这是因为特定条件下,介入性检查可能导致另外的劣化[例如带着含多硫化物的潮气(如连多硫酸)进入设备,检查破坏了保护层或容器的玻璃衬里]。在图1中这种情况表示为上面曲线末端的虚线。

然而,在检查在役装备的损伤和减少风险方面,并非所有的检查方案是同等有效的。对于任何损伤机理都有多种的检查技术,每一种方法都有不同的费用和有效性。

基于风险的检查 (RBI) 提供了一个检查方法和检查频率优化组合方案。基于风险的检查 (RBI) 对每一种检查方法进行分析并评价每种检查方法在减少失效概率方面的相对有效性。给出这些信息和每个方法的费用后, 将给出一个优化的方案。制定这种方案的关键点是评估每一个相关设备存在的风险能力及判断最合适的检查技术。在图 1 中下面的曲线表示了基于风险的检查 (RBI) 这个方案的有效性, 用相同的检测活动量获得较低的风险, 这是因为通过基于风险的检查 (RBI) 检测活动集中于高风险项目, 放弃了一些低风险项目。

如图 1 所示, 并不能仅仅通过检查使风险减少到零。物料损失的剩余风险包括而不仅限于以下几项:

- a) 人的失误;
- b) 自然灾害;
- c) 外部事件 (例如碰撞或落物);
- d) 临近单元的影响;
- e) 同一单元相关设备的后果影响;
- f) 蓄意行为 (例如阴谋破坏);
- g) 检查方法的先天限制;
- h) 设计缺陷;
- i) 未被认识的劣化机理。

现场的工艺安全管理系统对上述很多因素有很大影响。

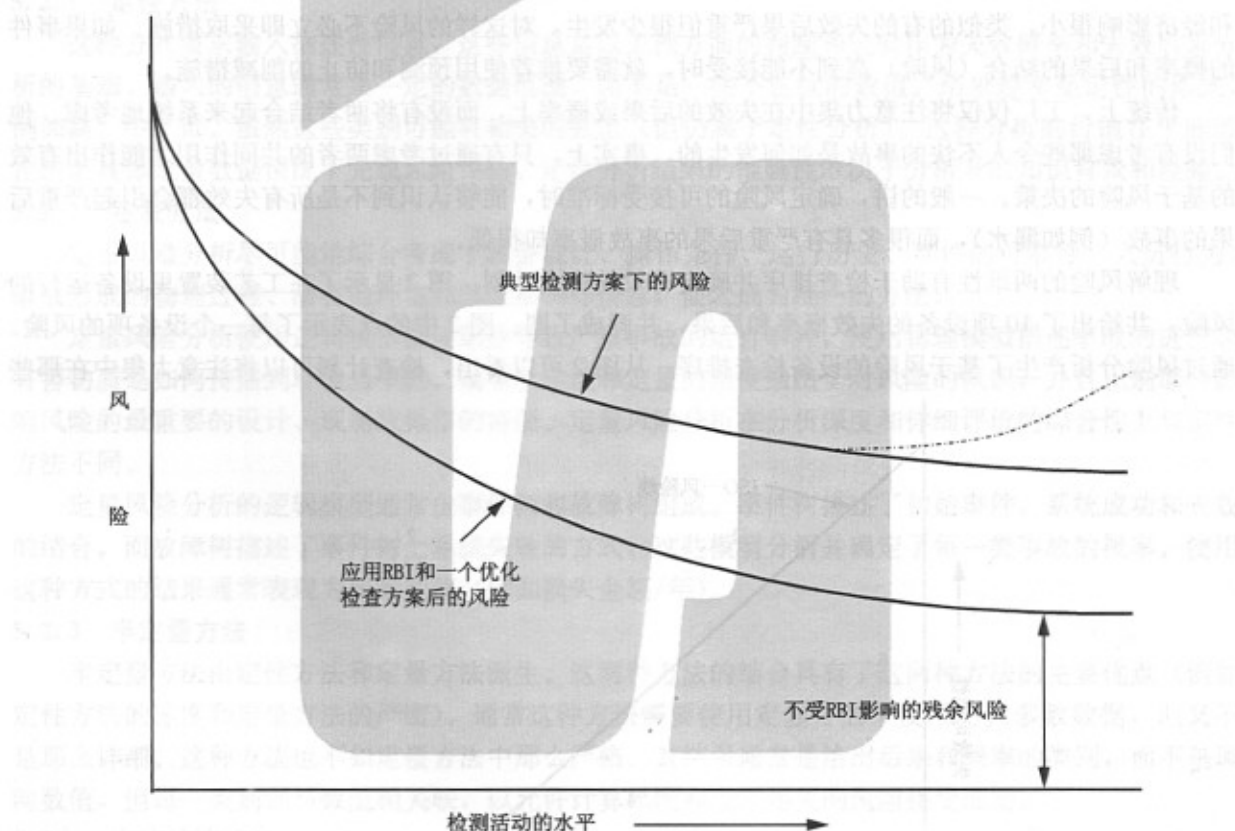


图 1 使用基于风险的检查 (RBI) 的风险管理

4.5 相对风险和绝对风险

风险计算的复杂性取决于影响风险因素的数量。计算绝对风险非常费时费力, 而且通常由于存在很多不确定性, 这种计算是不现实的。引起炼化生产装置中的物料损失的变量很多, 因此确定绝对风

险数值往往是不经济的。基于风险的检查(RBI)定位在系统化的推断相对风险。以这种方式,装置、单元、系统、设备或组件可以以相对风险来分等级。这就可以将风险管理重点放在高风险上。然而,如果严格地进行了定量的基于风险的检查(RBI)研究,风险评估结果数值能明显接近实际上由于劣化造成的物料损失引起的风险。使用相应的精确分析方法进行定性和半定量评价得出数字化的风险值也可以用来评价风险的可接受程度。

5 基于风险的检查(RBI)的介绍

5.1 基于风险的检查(RBI)的后果和概率

基于风险的检查(RBI)的目的是指出在设施失效的情况下,什么样的事故可能发生,如何发生及发生的概率。例如保温层下压力容器的腐蚀劣化而产生的泄漏,将产生一系列后果。这些可能的后果是:

- a) 形成易燃的气体云,将导致人员伤害和设备损坏;
- b) 漏出有毒化学品,引起人员中毒;
- c) 导致溢流,引起环境破坏;
- d) 设备被迫停止运行,导致经济损失;
- e) 对安全、健康、环境 and 经济有一个最小影响。

一种或多种事件发生的概率与后果的组合确定运行的风险。有的失效经常发生,但对环境、安全和经济影响很小,类似的有的失效后果严重但很少发生,对这样的风险不必立即采取措施。如果事件的概率和后果的结合(风险)高到不能接受时,就需要推荐使用预测和防止的削减措施。

传统上,工厂仅仅将注意力集中在失效的后果或概率上,而没有将两者结合起来系统地考虑。他们没有考虑那些令人不快的事是如何发生的。事实上,只有通过考虑两者的共同作用才能作出有效的基于风险的决策。一般的讲,确定风险的可接受标准时,能够认识到不是所有失效都会引起严重后果的事故(例如漏水),而很多具有严重后果的事故概率却很低。

理解风险的两维性有助于检查排序并确定有效的检查计划。图2显示了在工艺装置里设备运行的风险,共给出了10项设备的失效概率和后果,并画成了图。图2中的点表示了每一个设备项的风险。通过风险分析产生了基于风险的设备检查排序。从图2可以看出,检查计划可以将注意力集中在那些

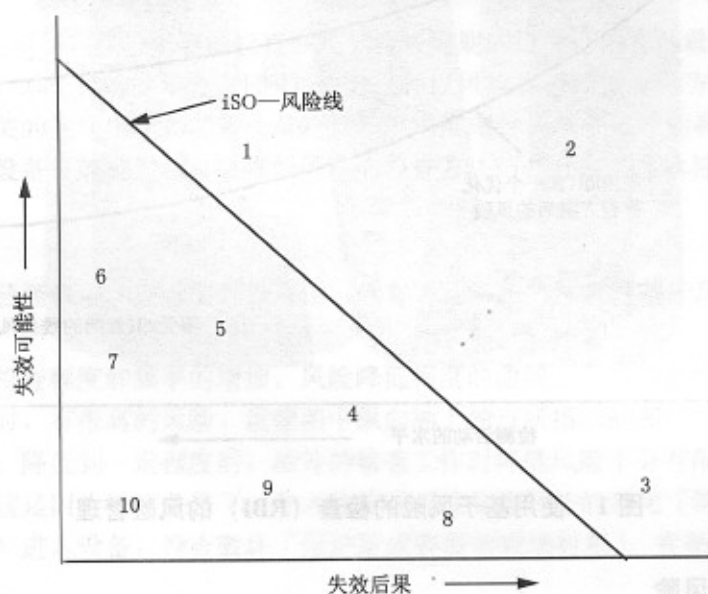


图2 风险图

最高风险的区域。图 2 中给出了一条 iso—风险线。这条线代表了一个恒定的风险水平。用户定义的风险接受水平也可以画为一条 iso—风险线。以这种方式,将不可接受的风险项与可接受的风险项区分开。对所评估的项目的相对风险理解后,利用双对数坐标这种计算方式画出风险点。

5.2 基于风险的检查(RBI)评估的类型

在不同风险水平可以有不同类型的基于风险的检查(RBI)评估。方法的选择主要依靠以下多种变化的条件,例如:

- a) 评价的目标;
- b) 评价的装置和设备的数量;
- c) 可以利用的资源;
- d) 评价的时间框图;
- e) 设备和工艺的复杂程度;
- f) 现有数据的性质和数量。

基于风险的检查(RBI)的过程可以是定性、定量或者两者的综合运用(例如半定量)。每一种方式提供了一种系统化的方式来进行风险识别,确定存在潜在风险的区域,为进一步的检查或分析提供优先顺序列表。每一种方式都提供了一种风险分类方法,分别评价失效概率和潜在失效后果,然后这两个值结合起来评估风险。不论风险评价为何种类型或级别水平,大多数风险评价中要包括和重视专家意见。

5.2.1 定性方法

这种方式要求输入描述性信息,这些信息是以工程方面的判断和经验作为失效概率和失效后果分析的基础。输入的信息通常是一定的数据范围,而不是一些不连续的数值。结果通常是定性的形式,例如高、中、低。虽然这些类别可能有相关的数值(但仍属于定性分析)。这种分析的价值在于能够在缺乏具体定量数据情况下完成风险评估。定性分析结果的准确性取决于分析者的知识背景和经验。

5.2.2 定量方法

定量风险分析尽可能地综合考虑了设备设计、操作条件、运行历史、部件的可靠性、人员行为、事故形成的物理过程、潜在的环境和健康影响等信息,使之成为统一的方法。

定量风险分析使用逻辑模型描述那些导致严重事故的组合事件,使用物理模型描述事故的进程和有害物质是如何传播到环境当中的。模型从定性和定量的角度给出了对风险的认识,并且识别那些影响风险的最重要的设计、现场或操作的特征。定量风险分析在分析深度和详细评价的综合性上与定性方法不同。

定量风险分析的逻辑模型通常由事件树和故障树组成。事件树描述了初始事件、系统成功和失效的结合。而故障树描述了事件树上系统失效的方式。这些模型分析并确定了每一类事故的概率。使用这种方式的结果通常表现为风险数值(例如损失金额/年)。

5.2.3 半定量方法

半定量方法由定性方法和定量方法派生。这两种方法的结合具有了这两种方法的主要优点(例如定性方法的速度和定量方法的严密)。通常这种方法需要使用定量方法中使用的大多数数据,但又不是那么详细。这种方法也不如定量方法中那么严格。其结果通常是给出后果和概率的类别,而不是风险数值,但每一类别都与数值相关联,以允许计算风险和应用相关的风险接受准则。

5.2.4 方法的连续体

实际上,基于风险的检查(RBI)研究通常使用定性、定量和半定量的方法。三种方法相互补充,而不是相互排斥。例如,高水平的定性方法可以用来评估某单元的风险水平,去发现哪些装置中有最高级别风险的单元。单元里的系统和设备可以使用定量水平更高的定性方法进行筛选。另一个应用实例是定性的结果分析和半定量的概率分析结合使用。

把这三种方法看作是一个连续体,定性和定量方法是这个连续体的两极,半定量方法是连续体的

中间。图3说明了这种连续体的概念。

图4中是基于风险的检查(RBI)流程的一个简单方块图,描述了风险分析的检查计划的关键要素。不论使用了哪一种基于风险的检查(RBI)方法,都适用于图3。不论采用哪种方法(定性、半定量或定量),图4中给出的关键要素都是完整的基于风险的检查(RBI)计划所必需的。

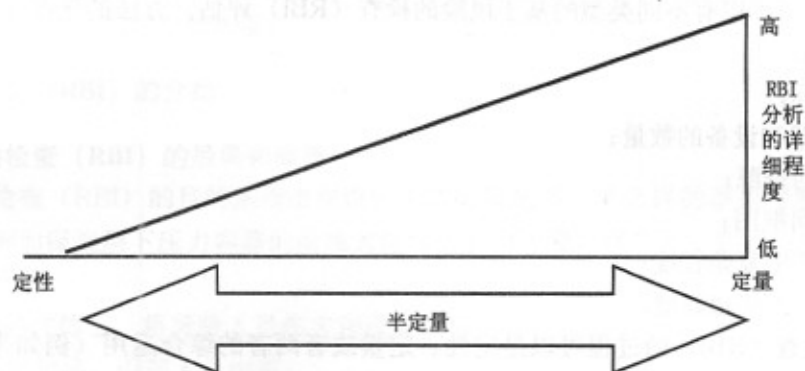


图3 RBI方法的连续体

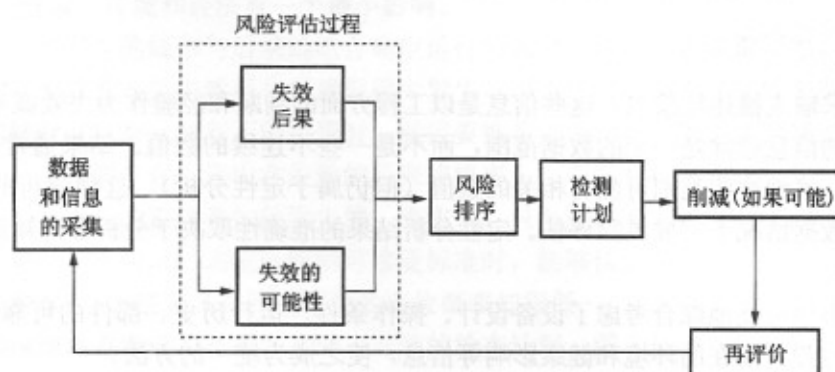


图4 RBI计划流程

5.2.5 定量风险评估

定量风险评估(QRA)确认使用的几种方法,是对各种不同类型的装置包括炼化工艺装置的评价技术总结而来。它是一种传统的分析方法,包含了所有的意图和目的。基于风险的检查(RBI)分析可以与定量风险评估(QRA)共享很多相关的技术和数据。如果为一个工艺单元已经准备了一个定量风险评估(QRA),基于风险的检查(RBI)的后果分析可以从中获得广泛的借鉴。

传统的定量风险评估(QRA)一般由下面五个任务组成:

- 系统识别;
- 危险识别;
- 概率评估;
- 后果分析;
- 风险结果。

系统的定义、危险的识别和后果的分析是一个相关联的整体。在基于风险的检查(RBI)分析里,危险的识别通常集中在设备的可识别失效机理(能够检查的),而没有明确地涉及其他潜在的失效形态,例如供电故障或人为失误等事件。定量风险评估(QRA)包括了全部的风险,而不仅仅是与设备劣化相关的风险。

定量风险评估 (QRA) 通常包括比基于风险的检查 (RBI) 更详细的评价。通常定量风险评估 (QRA) 分析的项目包括:

- a) 现有的危险和可操作性研究 (HAZOP) 或工艺危险分析 (PHA) 结果;
- b) 围堤和排水设计;
- c) 危险监测系统;
- d) 防火系统;
- e) 泄漏统计;
- f) 伤害统计;
- g) 人口分布;
- h) 地形;
- i) 气候条件;
- j) 土地使用。

通常需要有经验的分析专家进行定量风险评估 (QRA)。这样详细的定量风险评估 (QRA) 就与基于风险的检查 (RBI) 研究建立了联系。

5.3 精确性和准确性

用精确的数值表示的风险值 (定量分析) 比风险矩阵 (定性分析) 具有更高的准确性。由于概率和后果固有的不确定因素, 精确性和准确性之间的这种联系可能是不存在的。输出的准确性既是使用方法的作用, 也是可以得到数据的质量和数量的作用。预测损害和等级的基本原则、检测数据的可靠性、检测技术是应该考虑的全部因素。实际上, 有很多其他外来的因素与失效的后果一样也将影响失效概率的估计, 这些因素不能完全在一个固定的模型里全部考虑进去。因此, 使用定性和定量的方法作为相互补充是有益处的, 因为这种形式是能产生最大效力和最有效率的评估方法。

定量分析使用逻辑模型计算失效的概率和后果。用来描述设备材料劣化性质和明确失效后果的逻辑模型通常有明显的可变性, 从而给风险评估的质量带来了错误和不准确性。由专家判定这些逻辑模式是否可用是非常重要的。

任何类型的基于风险的检查 (RBI) 分析的准确性都依赖于使用适应的方法、良好的数据质量和知识渊博的技术人员。

5.4 理解基于风险的检查 (RBI) 是如何帮助管理运行风险

机械完整性和设备的功能完好性取决于设备的适应性, 即设备在正常和超常 (意外) 条件下安全和可靠地运行。在进行基于风险的检查 (RBI) 评估时, 确定出设备对某种或多种劣化机理 (例如腐蚀、疲劳和破裂) 的敏感程度。在正常操作条件下, 每种设备的易感性都应清晰定义。这些操作条件包括:

- a) 工艺流体、杂质和介入物;
- b) 单元生产能力;
- c) 计划的两次停车检修期间的的时间;
- d) 操作条件, 包括不稳定条件, 如压力、温度、流速、循环变化的压力或温度。

设备适应性和当前的条件将确定设备一种或多种劣化机理的失效概率。当概率与相应失效后果 (COF) (见第 11 章) 相耦合后, 将确定相应设备的风险和减小风险的必要性, 例如检查、改变材料或改变运行条件。

5.5 风险管理

5.5.1 通过检查实施风险管理

检查通过改善对设备劣化状态的认识和失效概率的预测, 改变承压设备风险的不确定性。尽管检查不能直接减少风险, 但检查管理行为可能会削减风险。在线检查首要关注的是检查和监测劣化。由这种劣化引起的失效概率是四个因素的作用:

- a) 劣化类型和机理;
- b) 劣化速率;
- c) 劣化识别和检查, 以及使用检查技术预测将来的劣化状态的可能性;
- d) 设备对于这种劣化的承受能力。

5.5.2 使用基于风险的检查(RBI)建立检查计划和检查优先顺序

实施基于风险的检查(RBI)的最基本的成果是建立针对评估设备的检查计划。这个检查计划应当详细说明在当前运行状态下未削减的风险。对于那些不可接受的风险, 计划中应当包括一些风险削减措施, 这些推荐措施是用来将未削减风险降低到一个可接受的水平。

对于检查将导致大的风险管理成本支出的设备项, 计划应当描述推荐的检查类型、范围和时间。按照未削减的风险水平对设备排序, 为用户安排检查的优先顺序提供指导。通常用未削减的风险水平来评价执行检查的紧迫性。

5.5.3 其他风险管理

有些风险不能通过检查进行充分的管理使其达到一个可接受的风险水平。下面给出了一些例子:

- a) 接近退役的装备;
- b) 在限定的压力/温度范围内操作而导致失效的失效机理(例如脆裂、疲劳);
- c) 非常可能产生事故后果的风险。

在这种情况下, 非检查的削减措施(如设备维修、替代和更新、装置重新设计或对于运行条件严格控制 and 保持)可能是降低风险到可接受水平的方法, 见第 13 章。

5.6 基于风险的检查(RBI)与其他风险和安全措施的联系

基于风险的检查(RBI)方法是对其他风险和安全管理措施的补充。很多其他方法的结果可以为基于风险的检查(RBI)提供输入, 基于风险的检查(RBI)的结果可以用来加强工厂已经实施的安全和风险管理。

5.6.1 工艺危险分析

工艺危险分析(PHA)使用系统化的方法识别和分析工艺单元的危险性。基于风险的检查(RBI)研究可以包括已进行工艺危险分析(PHA)评价的单元的所有输出的评估。工艺危险分析(PHA)里的危险识别在基于风险的检查(RBI)分析里给予了特殊处理。

工艺危险分析(PHA)里潜在危险识别通常影响失效概率。危险可能来自于导致工艺混乱的一系列事件, 或者由于工艺设计或仪器的缺乏引起的。在任一情况下, 危险都可能增加失效概率, 这种情形在基于风险的检查(RBI)程序里也应当同样反映。

有些危险的识别将影响风险发生的后果。例如, 隔离阀的潜在失效可能增加泄漏物料的总量。基于风险的检查(RBI)程序里应当对后果计算进行修正, 以反映这种危险的增加。

同样的, 基于风险的检查(RBI)评估的结果能够显著地改进工艺危险分析(PHA)的整体数据。

5.6.2 工艺安全管理(PSM)

强化工艺安全管理程序可以显著地降低工艺装置的风险级别。基于风险的检查(RBI)可以包括评价维护机械完整性的管理系统。这种管理系统评价的结果可作为风险决策的参考。

一个好工艺安全管理(PSM)项目可给基于风险的检查(RBI)研究提供资料。在基于风险的检查(RBI)分析里需要更广泛的设备和工艺数据, 工艺危险分析(PHA)结果和事故调查报告增加了基于风险的检查(RBI)研究的有效性。同样, 基于风险的检查(RBI)可以在机械完整性方面改进工艺安全管理(PSM)项目。一个有效的工艺安全管理(PSM)程序应当包括一个完备的设备检查程序。基于风险的检查(RBI)系统将改进检查计划的关注点, 从而加强工艺安全管理(PSM)项目。

在实施全面检查程序后可降低工厂装置泄漏的风险, 并有助于实施相关的安全措施。

5.6.3 设备的可靠性

设备的可靠性可以为基于风险的检查(RBI)程序的概率分析部分提供资料。可靠性记录可以用来记录设备的失效概率和泄漏频率。如果泄漏可能会造成物料泄漏而导致失效,如断电,这时候考虑设备的可靠性就显得非常重要。与基于风险的检查(RBI)相关联的可靠性措施,例如以维护为中心的可靠性(RCM),就能够制定一个减少运行单元停车时间的完整方案。

5.7 与法定要求的关系

规范和法定的要求在管辖权上差别很大。在很多情况下,法定要求是强制性的行为,例如检查的周期和检查的类型。在允许应用基于风险的检查(RBI)的API检查规范和标准的法定要求内,基于风险的检查(RBI)制定的检查计划应当是一个可接受的方法。推荐的作法是建议用户研究一下法定要求和规范有关使用基于风险的检查(RBI)作为检查计划的要求。

6 基于风险的检查(RBI)评估计划

6.1 开始

这一节帮助用户确定基于风险的检查(RBI)评估的范围和优先顺序。通过甄别来集中风险评估工作的重点,通过边界条件的识别以确定在评估过程中什么是至关重要的,从而有组织地进行优先顺序矫正、风险甄别。边界条件识别能提高评估及管理风险最终结果的效率和效力。

基于风险的检查(RBI)评估是一个团队合作的过程。在实施评估的初期,明确以下内容是非常重要的:

- a) 为什么要做评估;
- b) 如何进行基于风险的检查(RBI)评估;
- c) 评估需要什么知识和技能;
- d) 评价小组由哪些人员组成;
- e) 在基于风险的检查(RBI)过程中人员的角色是什么;
- f) 人员的具体责任和应从事工作;
- g) 包括什么设备、资产和部件;
- h) 在评估中使用什么数据;
- i) 应用的规范和标准是什么;
- j) 什么时间完成评估;
- k) 评价的有效期和更新时间;
- l) 如何使用评价结果。

6.2 确定基于风险的检查(RBI)评估目的和目标

实施基于风险的检查(RBI)评估应当有明确的目的和目标,这个目的和目标应为基于风险的检查(RBI)小组和管理人员充分了解。在6.2.1~6.2.7给出了一些例子。

6.2.1 了解风险

基于风险的检查(RBI)的目标之一是更好地了解车间或工艺单元的运行风险以及所采取的检查、维护和风险削减措施。

通过对风险的了解来设计检查方案,以优化检查和车间维护资源的使用。

6.2.2 确定风险标准

基于风险的检查(RBI)评估将确定所评估项目的风险。基于风险的检查(RBI)小组和管理者可能希望判断某个单体设备和叠加风险是否能够接受。如果用户没有判断风险接受程度的标准,建立这个标准就成为基于风险的检查(RBI)评估的目标之一。

6.2.3 风险的管理

在识别风险之后,已经被证明能够减少风险到可接受水平的一些检查和(或)其他削减措施可能

被采用。采取的这些措施可能与法定的或已被允许使用的检查方法明显不同。管理和降低风险的结果是为了促进安全、避免物料损失和经济损失。

6.2.4 降低成本

减少检查成本通常不是基于风险的检查(RBI)评估的主要目的,但通常是风险优化作用的一方面。当检查方案进行了基于风险的优化之后,就可能实现下面的一种或多种成本的降低。

- a) 停止无效的、不必要的或者是不正确的检查;
- b) 减少和停止对低风险项目的检查;
- c) 在线和非介入性检查方法替代了要求装置停工的介入性方法;
- d) 更加有效的较低频率的检查能够替代那些低效高频率的检查。

6.2.5 符合安全和环境管理要求

为了满足安全和环境要求,使用基于风险的检查(RBI)进行风险管理的重点是实施一个有效检查方案。基于风险的检查(RBI)将风险管理工作集中在那些风险最大的区域。基于风险的检查(RBI)提供了一个系统化的方法,指导用户选择检查设备和确定检查频率、范围以及满足可操作目的。

6.2.6 选择削减替代措施

基于风险的检查(RBI)评估能识别那些不通过检查而采取管理措施就能降低的风险。风险削减措施可包括但不限于以下内容:

- a) 修改工艺流程以消除传递风险的条件;
- b) 修改操作规程以避免产生风险的环境;
- c) 在工艺流程中加入化学处理以减少劣化速率;
- d) 改变组件的金属材料减少失效概率;
- e) 去除不需要的隔热层,减少隔热层下的腐蚀概率;
- f) 减少物料总量以减小失效后果;
- g) 更新安全或监测系统;
- h) 改用非易燃或低毒的物料。

基于风险的检查(RBI)评估的数据对确定降低风险优化经济策略非常有用。经济策略在装置使用周期的不同阶段不尽相同。例如通常在设计阶段修改工艺流程或改变金属材料要比运行时修改工艺流程或改变金属材料更经济。

6.2.7 新项目的风险评估

在设计阶段进行新设备或新项目的基于风险的检查(RBI)评估,可以从潜在风险中获取重要信息,这样就可以在实际安装之前通过设计使风险最小化。

6.2.8 设备寿命晚期的策略

接近使用寿命的设备是一种特殊的情况,实施基于风险的检查(RBI)对这种设备的风险管理非常有帮助。在装置的使用寿命晚期,可获得最大剩余经济效益,而无过度的人力、环境或财务风险。

寿命晚期的策略直接将检查重点集中在高风险区域,通过检查将降低装置剩余寿命期间的风险。在剩余寿命期间,那些不能降低装置风险的检查活动通常将被减少或取消。

寿命晚期的基于风险的检查(RBI)策略可以与损坏部件的合乎使用性评估相结合,评估办法按API RP 579的规定执行。

在剩余寿命策略建立和实施之后,如果装置的剩余寿命延长了,对基于风险的检查(RBI)评估进行复查是非常重要的。

6.3 初始的筛选

6.3.1 建立基于风险的检查(RBI)评估的物理边界

评价中有形资产的边界确定要与总体目标一致,评估数据的水平和资产资源的可利用性直接影响

评估的资产范围。筛选工艺的重点是集中在那些最重要的资产上,这样能有效地利用时间和资源。

基于风险的检查(RBI)评估的范围可以从整个炼油厂、车间到单个设备的一个部件。但通常在多个设备上(例如一个完整的工艺单元)而不是在一个单独部件上实施基于风险的检查(RBI)。

6.3.2 装置筛选

在装置层面上,基于风险的检查(RBI)可以适用于下面的各类装置而又不仅限于此:

- a) 油气生产装置;
- b) 油气处理和输送终端;
- c) 炼油厂;
- d) 石油化工厂和化工厂;
- e) 管道和泵站;
- f) 液化天然气厂。

工厂层面的筛选可以通过简单的定性的基于风险的检查(RBI)评估完成,也可用以下方式去做:

- a) 资产或产值;
- b) 工厂每个装置出现问题(或)失效的历史;
- c) 工艺安全管理(PSM)和(或)非工艺安全管理(non-PSM)装置;
- d) 装置的年限;
- e) 接近公众的程度;
- f) 是否在环境敏感区域附近。

在工厂层面要回答的关键问题举例如下:

- 1) 工厂有按照基于风险的检查(RBI)更改检查周期的权限吗?
- 2) 为了得到基于风险的检查(RBI)的益处,工厂的管理层愿意做资源上的投入吗?
- 3) 工厂有实施基于风险的检查(RBI)评估的足够资源和经验吗?

6.3.3 工艺单元的筛选

如果基于风险的检查(RBI)评估的工厂是一个多单元的工厂,实施基于风险的检查(RBI)的第一步是筛选全部工艺单元,给出相对风险排序。这种筛选,指出了高优先的区域,并且给出了从哪一个工艺单元开始的建议。同时对不同的单元操作系统和设备可操作性的评估也提出了要求。

可以按照下面的原则给出风险评估的优先顺序:

- a) 工艺单元的相对风险;
- b) 工艺单元的相对经济影响;
- c) 工艺单元的相对失效后果;
- d) 工艺单元的相对可靠性;
- e) 检修时间表;
- f) 相似单元的经验。

在工艺单元层面要回答的关键问题与在工厂层面要回答的关键问题相似:

- 1) 工艺单元对工厂的运行有明显影响吗?
- 2) 工艺单元运行时是否有重大风险?风险削减措施的影响是否可以测算的?
- 3) 工艺单元的操作人员能认识到实施基于风险的检查(RBI)得到的益处吗?
- 4) 工艺单元有足够的资源和经验实施基于风险的检查(RBI)评估吗?

6.3.4 工艺单元内部系统筛选

按照工艺的化学性质、压力和温度、金属材料、设备的设计和运行历史等条件将工艺单元中的设备进行系统地分组是有利的。通过将工艺单元划分为系统,使得设备可以随组筛选,从而节省了单独对比处理每一设备的时间。

通常利用区块物流或工艺流图识别系统。金属材料、工艺条件、潜在劣化机理和历史问题的有关资料可以在相应的系统图中得到。

以基于风险的检查(RBI)评估和整体优化为目的进行工艺单元划分时,通常最好包括单元的全部系统。从实际方面考虑,例如资源的可用性,要求基于风险的检查(RBI)评估仅限于单元里的一个或多个系统。系统的选择可以用下列各项作为基础:

- a) 系统的相对风险;
- b) 相关系统的失效后果;
- c) 相关系统的可靠性;
- d) 实施基于风险的检查(RBI)预期的益处。

6.3.5 设备筛选

在大多数装置中,单元的大部分风险主要集中在相对少数的设备上。在风险评估时应当着重注意哪些具有潜在高风险的项目。设备筛选常常用来识别哪些具有较高风险的项目,以便进行更详细风险评估。

基于风险的检查(RBI)评估可以适用于所有的承压设备,例如:

- a) 管道;
- b) 压力容器;
- c) 反应器;
- d) 换热器;
- e) 加热炉;
- f) 储罐;
- g) 泵(承压部分);
- h) 压缩机(承压部分);
- i) 泄压装置(承压部分);
- j) 控制阀(承压部分)。

设备类型的选择应当满足在6.2的要求。在筛选设备时,需要考虑下面的问题:

- 1) 劣化机理将危及安全设备的完整性吗?
- 2) 哪一类型的设备可靠性最差?
- 3) 如果承压壳体失效,设备哪些部件失效后果最严重?
- 4) 设备哪些部件最易于劣化,而且这种劣化将影响带压物料?
- 5) 设备哪些部件的设计安全余量或腐蚀余量较小,这些余量将影响壳体对带压物料的承装?

6.3.6 公用设施、应急系统和区域外系统

是否应当包括公用设施、应急系统和区域外系统,这取决于基于风险的检查(RBI)的评估计划和被检查工厂的检查要求。包含区域外系统和公用设施的可能原因有:

- a) 基于风险的检查(RBI)评估是为了实现整体检查资源优化,也包括环境和经营失效后果。
- b) 公用设施具有特殊的可靠性问题,例如具有腐蚀和阻塞问题的冷水系统。基于风险的检查(RBI)方法能够帮助整个工厂建立最有效的检查、削减、监控和处理措施的组合。
- c) 工艺单元的可靠性是基于风险的检查(RBI)分析的主要对象。

如果基于风险的检查(RBI)评估包括了应急系统(如闪光报警系统、紧急停车系统),这些系统在常规运行和工作循环期间的使用情况就应当进行考虑。

6.4 确定运行边界

与物理边界相似,基于风险的检查(RBI)研究的运行边界应当与研究目标、评估的数据水平以及资源相一致。建立运行边界是为了识别那些影响装置劣化的关键工艺参数。基于风险的检查(RBI)评估通常包括正常运行条件下失效后果(COF)和失效概率(POF)的评价。开工和停车条件与突发事件

和非正常条件一样,应当评价它们对失效概率(POF)和失效后果(COF)的潜在影响。

在基于风险的检查(RBI)评估中使用的运行条件,包括任何敏感性分析,应当记录为评估的运行界限。

在边界内运行与好的运行实践一样,对于基于风险的检查(RBI)研究正确性来说是至关重要的。监控关键工艺参数以确保其运行在边界之内是非常值得的。

6.4.1 开工和停车

在开工和停车期间的工艺条件对装置的危险性有重大的影响,尤其是当这些条件比正常运行条件更苛刻(可能加速劣化)时。一个典型例子是含多硫化物的潮气(如连多硫酸)应力腐蚀开裂。装置的失效概率由停车工艺是否采取了风险削减措施控制。开车线路通常包含在工艺管道中,应当考虑它们在启动和后续运行期间的工作条件。

6.4.2 正常、意外和循环运行

如果装置或工艺单元有可用的工艺流体模型或物料平衡模型,则很容易得到装置的正常运行条件。然而在文件里找到的正常运行条件应当去进一步证实,因为出现那些严重影响基于风险的检查(RBI)结果的差异并不少见。应当给出下面这些数据:

- a) 运行温度和压力,包括变化范围;
- b) 工艺流体的组成,包括进料组成变化范围;
- c) 流体的速率,包括变化范围;
- d) 潮气或其他污染物的出现。

由于不正常或者意外情况导致工艺的变化,例如压力、温度、介质成分的变化,应该在基于风险的检查(RBI)评估中予以考虑。

循环运行的系统,例如反应器再生系统应当考虑完整循环范围的条件。循环条件可能影响某些劣化机理造成的失效概率(例如疲劳、温度疲劳和隔热层下的腐蚀)。

6.4.3 运行期间

所选择的工艺单元和(或)设备运行时间长短是一个要考虑的重要限制。基于风险的检查(RBI)评估可以包括工艺单元/设备的整个运行寿命,或只针对一个所选时期。例如工艺单元经常为了维护而停车,工艺单元运行时间的长短取决于工艺单元里设备的条件。基于风险的检查(RBI)分析可以集中在当前的运行周期,或者包括当前和下一个运行周期。装置运行周期也对经过研究的决策和检查计划有一定影响,例如检查、维修、替换、继续运行等。作为确定装置运行周期基础之一,以后的运行计划也是很重要的。

6.5 选择基于风险的检查(RBI)评估的类型

选择基于风险的检查(RBI)评估的类型将取决于多种因素,例如:

- a) 评估是选在工厂、工艺单元、系统、装置或部件的哪一个界面上;
- b) 评估对象;
- c) 数据的质量和可用性;
- d) 资源的可用性;
- e) 对风险评价的认识或以前的评估过的风险;
- f) 时间限制。

应当建立使评估类型适合预期或评估风险的策略。例如对预期有较低风险的工艺单元,仅仅需要简单的、相对保守的方法就能完全实现基于风险的检查(RBI)的目标。然而,对于具有高预期风险的工艺单元,则需要更具体详细的方法。另外一个例子,定性评价工艺单元里的全部设备,然后对于高风险项使用定量化的方法识别。更多类型的基于风险的检查(RBI)评估类型参考5.2。

6.6 估算所需资源和时间

实施基于风险的检查(RBI)评估需要的资源和时间对不同的工厂区别很大,这取决于基于风险

的检查 (RBI) 评估所包括的因素的数量, 这些因素有:

- a) 实施策略和 (或) 计划;
- b) 实施人员的知识和培训;
- c) 所需数据和资料的可用性和质量;
- d) 实施评价所需要的可用资源和成本;
- e) 每一基于风险的检查 (RBI) 分析层面所包括的设备数量;
- f) 选择的基于风险的检查 (RBI) 分析的复杂程度;
- g) 准确性的要求。

估算完成基于风险的检查 (RBI) 评估的范围和成本可以包括:

- 1) 评价的工厂、单元、设备项和部件数量;
- 2) 收集被评价项目的数据所需要的时间和资源;
- 3) 实施评价人员所需要的培训时间;
- 4) 提供基于风险的检查 (RBI) 评估所需要的数据和资料的时间和资源;
- 5) 评价基于风险的检查 (RBI) 评估结果和制定检查、维护和削减计划所需的时间和资源。

7 基于风险的检查 (RBI) 评估数据和资料的收集

7.1 基于风险的检查 (RBI) 需要的数据

基于风险的检查 (RBI) 评估可以使用定性、半定量和 (或) 定量的方法。这些方式的最基本相互区别是输入、计算和输出的数量及详细程度的不同。

每一种基于风险的检查 (RBI) 方法, 对于研究和评价的基础数据从开始就采用一致的原则进行全面的记录是很重要的。与规定的和标准程序相偏离的任何行为都应当进行完整地记录。形成对设备和管道的统一标识对任何层次的研究都是很有帮助的。设备也应统一地分组或定位, 例如在位于特殊装置的特殊工艺单元。

基于风险的检查 (RBI) 分析需要的典型数据包括但不限于:

- a) 设备类型;
- b) 构筑材料;
- c) 检查、维修和替换记录;
- d) 工艺流体成分;
- e) 流体总量;
- f) 运行条件;
- g) 安全系统;
- h) 测试系统;
- i) 劣化机理、速率和严重性;
- j) 人员密度;
- k) 保护层、覆盖层和隔热层;
- l) 停工损失;
- m) 设备更换成本;
- n) 环境恢复成本。

7.1.1 定性基于风险的检查

定性方法通常不需要 7.1 中提到的所有数据。定性方法仅仅要求将风险从大的方面进行归类或者根据一个参考点进行分类。重要的是建立一组规则, 确保风险分组分类的一致性。

定性分析应用范围比较广泛, 这往往要求比定量方法更高水平的判断、技巧和理解。范围和概括方面可能用来评价条件变化较大的环境, 这就要求使用者仔细考虑输入对风险评估结果的影响。因

此, 尽管其比较简单, 也要求具有相应知识和技巧的人进行定性基于风险的检查 (RBI) 分析。

7.1.2 定量基于风险的检查

定量风险分析使用逻辑模型描述那些能够导致各种严重事故的事件组合, 使用物理模型描述事故的进程和有害物质在环境中的扩散。模型从定性和定量的角度评估了风险水平的情况, 并且识别对风险最有影响的设计、位置或运行特点, 从而评估出事故的概率。因此, 在模型的输入方面, 定量基于风险的检查 (RBI) 需要更详细的资料和数据。

7.1.3 半定量基于风险的检查

半定量分析方法使用的数据通常和定量方法中使用的数据类似, 但不是那么详细。例如可以估计流体的体积。尽管半定量分析没有定量分析那么精确, 但数据收集和分析的时间减少了。

7.2 数据质量

数据的质量与基于风险的检查 (RBI) 分析的相对准确性有直接的关系。尽管各种基于风险的检查 (RBI) 分析对数据需求有很大不同, 但数据输入的质量是同等重要的。确保数据是最新的并经过相关学识的人证实的, 对于基于风险的检查 (RBI) 分析的完整性是非常有益的 (见第 15 章)。

像任何检查程序要求实事求是那样, 有多种理由表明证实数据的真实性至关重要。其中包括图纸和文件过时, 检查者的失误、笔误, 测量设备的准确性。分析中另一个潜在的错误源是设备历史 (数据) 的假设。例如如果没有进行实际检查或没有记录, 将使用公称厚度代替实际厚度。这种假设对设备早期腐蚀速率的计算有明显影响, 这种影响可能掩盖高腐蚀速率或夸大低腐蚀速率。一个类似情况是低腐蚀速率设备的剩余寿命要求更高的检查频率。这种测量错误可能导致计算腐蚀速率偏高或偏低。

这种真实性强调要求从事比较检查、判定劣化机理和数据工作的人员应具有较高的知识。专家可以把系统以往的检查、同一场所或公司内的相似系统的检查, 或其他公布的数据进行对比。在这种评价中, 统计资料是有用的。这种评价也应当是工艺调整或变化的一种因素。

7.3 国内和国际规范和标准

在数据采集阶段, 通常需要评估目前使用的规范和标准, 及设备设计阶段使用的规范与标准。工厂使用的规范和标准的数量和类型对于基于风险的检查 (RBI) 的结果有明显影响。

7.4 现场数据和资料来源

基于风险的检查 (RBI) 需要的资料可以在工厂很多地方找到。需要重点强调的是数据的准确性应与使用的基于风险的检查 (RBI) 方法的复杂性相一致。采集任何数据之前, 个人和小组应当了解方案所需的敏感性数据。尽可能将基于风险的检查 (RBI) 采集的数据与其他风险和 (或) 危险分析采集的数据 [例如工艺危险分析 (PHA)、定量风险评估 (QRA)] 结合起来是比较有益处的, 因为这些数据可能会重叠。

资料的特殊潜在来源包括但不限于:

a) 设计和建造记录/图纸:

- 1) 管道仪表图 (P&IDs)、工艺流程图 (PFDs)、设备流程图 (MFDs) 等;
- 2) 管道等容图;
- 3) 工程说明书清单;
- 4) 建造材料记录;
- 5) 施工质量保证和质量控制 (QA/QC) 记录;
- 6) 使用的法规和标准;
- 7) 保护仪表系统;
- 8) 泄漏检查和监控系统;
- 9) 防腐保温系统;
- 10) 物料记录;

11) 紧急减压和泄压系统;

12) 安全系统;

13) 防火和灭火系统;

14) 工厂布局图。

b) 检查记录:

1) 时间表和频率;

2) 检查类型和数量;

3) 维修和替换;

4) 管道维护检查记录;

5) 检查结果。

c) 工艺数据:

1) 流体成分分析, 包括污染物或微量成分;

2) 分布式控制系统数据;

3) 操作程序;

4) 开工和停车程序;

5) 应急程序;

6) 运行日志和工艺记录;

7) 工艺安全管理 (PSM)、工艺危险分析 (PHA)、定量风险评估 (QRA) 数据或报告。

d) 管理变更记录。

e) 非现场的数据和信息——如果后果可能影响远离现场的区域。

f) 失效数据:

1) 一般失效频率数据——工厂或内部;

2) 行业特定失效数据;

3) 工厂和设备特定失效数据;

4) 监控条件的可靠性和记录;

5) 泄漏数据。

g) 厂址条件:

1) 天气和(或)气候记录;

2) 地震活动记录。

h) 设备更换费用:

1) 计划费用报告;

2) 工业数据库。

i) 有害研究数据:

1) 工艺安全管理 (PSM) 研究;

2) 工艺危险分析 (PHA) 研究;

3) 定量风险评估 (QRA) 研究;

4) 其他场所的特定风险或有害研究。

j) 事故调查。

8 识别劣化机理和失效模式

8.1 介绍

识别基于风险的检查 (RBI) 评估涉及的全部设备的相应劣化机理、频发性和失效模式, 对于基于风险的检查 (RBI) 评估的质量和效果非常重要。应当向防腐专家或冶金专家咨询, 以确定设备的相应

劣化机理、频发性和失效模式。使用的数据和作出的设想应当是经过验证的并备有证明文件。在评价中应当考虑工艺条件（正常和意外）与预期的工艺变化。劣化的机理、速率和频发性是失效概率评价的最基本输入。除假定组分总量全部泄漏的最坏后果分析外，失效模式是确定失效后果的关键输入。

8.2 基于风险的检查（RBI）的失效和失效模式

失效定义为失去执行设计功能的能力。本标准描述的基于风险的检查（RBI）与一种类型的失效相联系，即劣化引起的物料损失。

失效模式就是失效的方式，失效模式的范围为从渗漏到完全破裂。

8.3 劣化机理

劣化机理定义为导致物料损失的劣化类型。在烃加工工业和化学工业有四种主要的劣化机理：

- a) 减薄（包括内部和外部）；
- b) 应力腐蚀开裂；
- c) 金属和环境；
- d) 机械。

识别劣化机理非常关键的要素是理解设备运行以及与化学和机械环境的相互作用。例如理解由流体介入和作用引起的局部减薄与理解腐蚀机理同等重要。工艺专家提供的资料（例如工艺条件范围、介入点等）可以帮助材料专家识别劣化机理和速度。

附录 A 给出了一个表，这个表包括四大类劣化机理的描述、造成劣化的关键变量，以及这些劣化发生在哪些典型烃加工行业。这个表包含了大多数常见的劣化机理。在特殊烃加工工厂和化学工厂也可能发生其他劣化类型，但相对来说很少出现。

8.3.1 减薄

减薄包括总体腐蚀、局部腐蚀、点蚀以及其他导致内表面和外表面材料损失的机理。减薄的影响可以从下面的信息中给出：

- a) 厚度——出厂的、过去的和当前的测量厚度；
- b) 设备运行的年限——当前工作条件下的工作年限和改变工作条件后的工作年限；
- c) 腐蚀余量——当前工作条件下的设计余量；
- d) 腐蚀速率；
- e) 运行温度和压力；
- f) 设计压力；
- g) 检查的类型和数量。

8.3.2 应力腐蚀开裂

当设备暴露于导致开裂机理的环境中，将会发生应力腐蚀开裂现象，例如腐蚀剂开裂、胺开裂、硫化物应力腐蚀（SSC）开裂、氢开裂（HIC）、应力产生的氢开裂（SOHIC）、碳酸盐开裂、连多硫酸（复合硫化酸）开裂（PTA）、氯化物开裂。确定设备的应力腐蚀频发性需要专家观点和经验。根据下面的原则，这种频发性可指定为高、中、低：

- a) 结构的材料；
- b) 机械性能和频发性；
- c) 运行温度和压力；
- d) 关键工艺腐蚀物（例如酸碱度、氯化物、硫化物等）的浓度；
- e) 组装的变化因素，例如焊缝热处理。

频发性的确定不应当仅仅考虑设备和（或）管道破裂的敏感度（或破裂的初始概率），还应当考虑裂纹导致泄漏或破裂的概率。

8.3.3 材料的金属和环境劣化

金属和环境的失效原因非常复杂，但是通常包括由于暴露在工艺环境中的材料的机械和（或）物

理性质的劣化。

高温氢化腐蚀 (HTHA) 是这种劣化机理的一种形式, 它发生在那些暴露于高温时高氢分压环境中的碳钢和低合金钢。历史上, 高温氢化腐蚀 (HTHA) 的防护主要依靠工业经验预测, 这些工业经验已经形成了一系列的碳钢和低合金钢的高温高氢分压 (HTHA) 曲线。高温高氢分压 (HTHA) 曲线给出了这些金属成功使用而没有由于高温高氢分压 (HTHA) 引起劣化的温度和氢分压界限。高温高氢分压 (HTHA) 曲线, 通常指 Nelson 曲线, API RP 941 根据工业经验给出了这些曲线。

设备的高温高氢分压 (HTHA) 频发性方面的考虑基于:

- a) 结构的材料;
- b) 运行温度;
- c) 氢分压;
- d) 暴露时间。

这种类型的失效和原因可参见附录 A。一般情况, 劣化的关键变量是结构的材料、工艺运行条件、开工和停车条件 (尤其是温度) 及由这些条件引起劣化的知识。

8.3.4 机械性能

与金属和环境失效相同, 也有多种机械性能的劣化类型和原因。这种类型的失效原因和例子可以在附录 A 中找到。最普通的机械性能劣化是疲劳 (机械、温度和腐蚀)、应力/蠕变破裂、过载。

8.4 其他失效模式

基于风险的检查 (RBI) 还可以扩展到其他失效, 而不仅限于物料损失。这些失效和失效模式为:

- a) 泄压设施失效——阻塞、污垢、不能启动;
- b) 热交换管束失效——管束泄漏、阻塞;
- c) 泵失效——密封泄漏、电机失效、旋转部件破坏;
- d) 内部衬里——孔隙, 剥离。

9 评估失效概率

9.1 概率分析介绍

基于风险的检查 (RBI) 程序的概率分析是用来估算物料损失引起的特定不利后果的概率, 这种物料损失是由某些劣化机理引起的。在考虑设想的失效已经发生条件下, 将要发生的特定后果的可能性是由假定事件失效概率和失效后果统一决定的。这一章给出了确定失效概率的一些指南。指导确定特定后果概率见第 11 章。

失效概率分析应当包括易发设备的所有劣化机理。也就是说, 应当包括易发设备发生的多重劣化机理的所有情况 (例如减薄和蠕变)。分析应当可信, 可重复性高, 并进行详细地记录。

需要注意的是劣化机理不仅仅是物料损失的唯一原因。物料损失还包括一些其他原因, 包括但不限于:

- a) 地震活动;
- b) 极端气候;
- c) 由于泄压装置失效引起的过压;
- d) 操作错误;
- e) 建造材料替代时产生的疏忽;
- f) 设计错误;
- g) 蓄意破坏。

这些和其他导致物料损失的原因可能对失效概率产生影响, 也应当包括在失效概率分析里。

9.2 失效概率分析的测量单位

失效概率通常用频率表示。频率用一定时间内事件发生的次数表示。对于概率分析，时间通常表示为一个固定间隔（例如一年），频率通常表示为每个时间段事件发生的次数（例如每年 0.0002 次）。时间还可以表示为偶发的事件时间间隔长度（例如一个运行期），频率表示为每种事件发生的次数（例如每运行一次 0.03 次失效）。对于定性分析，失效概率可以进行分类（例如高、中和低，或 1~5）。然而，即使在这种情况下，将每个事件频率和每一个概率类别联系起来，给那些负责确定概率的人提供适当的帮助。如果这么做了，从一个类别到另一个类别的变化应当是一个或多个量级顺序，或者提供其他容易识别的区别标志。

9.3 概率分析的类型

下面段落讨论了确定概率的不同方法。为了这种讨论的目的，这些方法可以归为“定性”或“定量”方法。但是，应当认识到“定性”和“定量”是一个连续体的两个端点，而不是截然不同的方法（如图 3 所示）。大多数概率评估混合使用了两种方法。

应当确定评估所使用的方法，以便可以使用敏感性分析或其他方法以确保其与实际相符，尽管这样作有些保守，但可以得到概率的值。

9.3.1 失效概率的定性分析

定性方法包括识别工艺单元、系统或设备、结构的材料和工艺腐蚀成分。在取得对运行历史、将来的检查维护计划和可能的材料劣化等认识的基础上，可以对每一个单元系统、设备组或单独的设备项的失效概率单独进行评估。工程判断是这种评估的基础。可以确定每个单元、系统、设备组或设备项的失效概率等级。按这种方法，失效概率等级可以用文字描述（例如高、中、低），或者可以使用数字描述（例如 0.1 次/年~0.01 次/年）。

9.3.2 失效概率的定量分析

有很多定量概率分析的方法，例如利用特定失效数据或专家意见计算失效概率，就使用了概率论的方法。可以从有问题的特定设备项或相似设备项得到这些失效数据。概率通常表示为分散值而不是单一确定的值。

当所关心的特定项目失效数据不正确或不充足时，就要使用其他的方法进行分析。在这种情况下，使用通用的行业、公司或工厂的失效数据。应当使用一定的方法去评定这种数据的适用性。如果合适，则按照设备的特殊信息增加或减少预测的失效频率，对这种失效数据进行修改，使之适用所分析的设备。以这种方式，通用失效数据就可以用来产生适用于一个特殊应用设备的修正失效概率。这种对于通用值的修改可以是针对每一个设备项进行，以说明那些在特殊工作状态下可能发生的潜在劣化类型，同时说明所采取检查和监控措施的有效性。这些修改应根据具体情况，由那些具备相关知识的人来进行。

9.4 失效概率的确定

不管是使用一个或多个的定性或定量分析，确定失效概率主要考虑：

- a) 由运行环境（内部或外部）引起的设备建造材料的劣化机理和速率。
- b) 工厂检查方案识别和监控劣化机理的有效性，以使设备能够在失效之前修理或更换。

分析在役设备劣化的影响和检查失效概率包括以下步骤：

- a) 识别在这个时间段内预料要发生的现行的或可靠的劣化机理（考虑正常和意外条件）。
- b) 确定劣化的易发性和速率。
- c) 量化过去的和将来的检查和维修方案的有效性。在评价失效概率时通常必须考虑将来替代的检查和维修策略，这些策略可能包括“不检查或不维护”策略。
- d) 确定设备以现在的运行条件按所知道的劣化速率继续劣化下去，超出设备的承受能力，导致失效的概率。失效模式（例如小泄漏、设备破裂）应当根据劣化机理确定。通常，在一些情况下要考虑一种以上的失效模式并综合考虑这些风险。

9.4.1 确定劣化的易发性和速率

应当将每一种设备的工艺条件和结构的材料结合起来进行评估,以识别活动的和潜在的劣化机理。确定这些机理和易发性的方法是将具备相同内部和外部环境和相同建造材料的部件组成一组。这一组中每一项设备的检查结果可以与同组的其他设备相关。

对工艺设备来讲,许多机理通常可以以劣化速率来被理解和确定。劣化速率对于减薄表示为腐蚀速率,对于那些不知道劣化速率或不可测量(例如应力腐蚀开裂)的机理则表示为易发性。易发性通常按照环境条件和结构的材料相结合指定为高、中、低,制造中的一些不确定因素和维修历史对易发性也同样重要。

特定工艺装备的劣化速率往往是不确定的。精确确定劣化速率的能力受设备的复杂性、劣化机理的类型、工艺或金属材料的变化、难以接近的检查、检查和试验方法的限制和检查人员经验等多种因素的影响。

劣化速率的信息源包括:

- a) 公布的数据;
- b) 实验室的测试结果;
- c) 现场实验和在线监测;
- d) 相似设备的经验;
- e) 以前的检查数据。

最好的资料来自运行经验,通过这些经验可看到:在产生以往的劣化速率的条件下,所评估的设备可能产生什么样的劣化速率。其他信息源包括工厂的经验数据库或来自专家的观点。后一种方法经常使用,因为工厂的数据库即使是存在,有时也并不能包括足够详细的信息。

9.4.2 确定失效模式

失效概率分析往往用来评价失效模式(例如泄漏、开裂、灾难性破裂)和评价每种失效模式发生的概率。重要的是将劣化机理和最有可能出现的失效模式联系起来,例如:

- a) 点蚀通常引起渗漏;
- b) 应力腐蚀开裂可以发展成为小的贯穿壁厚裂纹或灾难性的破裂;
- c) 金属劣化和机械性能劣化能引起从针孔泄漏到灾难破裂的失效模式;
- d) 由腐蚀引起的减薄一般能够导致较大泄漏或破裂。

失效模式从根本上影响后果的量级。因为这个原因和其他原因,概率分析和后果分析应当相互联系。

9.4.3 过去检查方案有效性的量化

不同的检查方案(例如外观、超声波、射线等,检查的频次以及检查覆盖面和位置)在确定劣化位置和尺寸方面,以及在确定劣化速率方面的有效性不同。在识别出相似的劣化机理后,应当对检查方案进行评估,以确定其在发现已识别的劣化机理方面的有效性。

检查方案有效性的限制是由于:

- a) 受劣化的覆盖范围不足;
- b) 一些检查方法在检查和定量某些劣化类型上的固有限制;
- c) 选择了不适当的检查方法和工具;
- d) 使用检查方法和工具的检查人员没有进行足够的培训;
- e) 检查程序不全面;
- f) 在某些极端条件下劣化速度太快,以至于在一个很短的时间内失效。由于条件的改变或意外,即使在检查中没有发现任何劣化,失效仍有可能发生。例如如果过量的酸从一个系统的抗腐蚀部分流到由碳钢制造的下游容器,快速的腐蚀将在几个小时或几天之内导致失效。同样的,如果氯化物水溶液放在一个敏感的不锈钢容器中,氯化物应力腐蚀开裂将会很快的发生(取

决于温度)。

如果已经进行了多种检查,重要的是认清最后的检查能够最直接的反映当前的运行条件。如果运行条件改变了,以前运行条件下的检查数据就可能无效了。

确定检查的有效性应当考虑:

- 1) 设备类型;
- 2) 活动的和可信的劣化机理;
- 3) 劣化速率或易发性;
- 4) 无损检测方法、范围和频率;
- 5) 预期劣化区域的可接近性。

可以利用更适合现行的或可信的劣化机理的无损检测(NDE)方法、调整检查范围、调整检查频率或它们的组合来优化将来检查的效果。

9.4.4 通过劣化类型计算失效概率

通过将预期劣化机理、劣化速率或易发性、检查数据和检查的有效性结合,就可以明确每种劣化类型和失效模式的失效概率。与确定当前的失效概率一样,还可以确定将来一段时期在当前条件下的失效概率。重要的一点是要验证计算失效概率所用的方法对于用户来讲事实上是有效的、足以满足要求的。

10 评估失效后果

10.1 后果分析介绍

进行基于风险的检查(RBI)后果分析,是为区分设备在可能失效时的严重程度。基于风险的检查(RBI)一般是由工厂检查人员或检查工程师来实施。通常他们用检查和维护计划来管理风险,通常他们没有多少能力来改变失效后果。但另一方面,管理和工艺安全人员可能想要降低失效后果。在第13章给出了很多修正失效后果的方法。对所有用户来说,后果分析的目的是要建立设备的相对风险等级。后果分析应该能够可靠估计会发生何种情况,假如被评价过的设备发生失效,这种后果分析应该能够通过重复性出现来认定,简单可信。

使用后果分析方法的复杂程度取决于想要实施的评价。选择的后果分析方法应可以提供区分较大后果和较小后果设备等级的识别能力。

10.1.1 物料损失

物料损失后果通常用流体流向外环境的损失来估算。物料损失后果影响一般可由以下几种情况来考虑:

- a) 安全健康影响;
- b) 环境影响;
- c) 生产损失影响;
- d) 维修和重建费用。

10.1.2 其他功能失效

虽然基于风险的检查(RBI)主要关心物料失效损失,如果用户需要,其他功能失效可以包含在研究的范围内。失效包括:

- a) 压力容器内部组件(如圆盘、除雾器衬垫、凝聚器的部件、分配器硬件等)的功能或机械失效;
- b) 换热器管的失效;

注:换热器管失效可能导致换热器或辅助设备的物料损失,特别是包括从高压侧向低压侧的泄漏和由此导致的低压侧的物料损失。

- c) 泄压装置失效;

d) 旋转设备失效（如密封泄漏、叶片失效等）。

还有些其他功能失效通常包含在以可靠性为中心的维护方案中，因此本标准不涉及具体的细节。

10.2 后果分析的类型

以下讨论确定失效后果的不同方法。出于讨论的目的，这些方法归类为“定性”和“定量”。然而，应该认识到“定性”和“定量”方法只是连续体中的两个终端，而不是相互不同的方法（如图3所示）。

10.2.1 后果定性分析

定性分析方法涉及到单元、系统或设备，以及操作条件和工艺流体存在的危害识别。依据专家的知识 and 经验，可以对每一单元、系统、设备组或设备项单独进行估算失效后果（安全、健康、环境或经济损失）。

对定性方法，后果分类（例如从“A”~“E”或“高”、“中”、“低”）是为每一单元、系统、组或设备进行分类的一种定型做法。将后果种类与数值（例如成本）（见10.3.2）联系起来可能是恰当的。

10.2.2 后果定量分析

定量方法包括使用描述事件组合的逻辑模型表示对人员、财产、生产运行和环境的影响。定量模型中通常含有一个或多个标准失效情景或结果。失效后果的计算基于以下因素：

- a) 设备中工艺流体的类型；
- b) 设备中工艺流体的状态（固体、液体或气体）；
- c) 工艺流体的主要性质（相对分子质量、沸点、自燃温度、燃烧能、密度等）；
- d) 工艺操作参数，例如温度和压力；
- e) 泄漏事故的泄漏总量；
- f) 失效模式和引起的泄漏规模；
- g) 泄漏物质在大气环境下的状态（固体、气体或液体）。

定量分析的结果通常是数值。后果分类也可以用于把更多的评价后果分成可管理的组别。

10.3 后果分析中的测量单位

不同种类后果最好用不同的方法来描述。基于风险的检查（RBI）分析人员应该考虑到存在的危害的本质，选择合适的测量单位。然而，分析人员应该记住，作为结果的后果应该尽可能有可比性，以方便随后的风险排序。

以下给出了基于风险的检查（RBI）评估中使用的后果测量单位。

10.3.1 安全

安全后果通常用数值表示，或用后果类型来表示，将事故与可能造成的伤亡程度联系起来。

例如安全后果可以表示为伤亡程度（例如致死、重伤、医务处理、急救），也可以表示为与伤亡程度相联系的等级（例如A~E）。

10.3.2 损失成本

损失通常用于指示潜在的后果。虽然不总是可靠的，但为所有类型的后果指定损失还是可能的。可以用“损失”表示的典型后果包括：

- a) 生产效率降低或停工造成的生产损失；
- b) 应急反应设备和人员的调配；
- c) 泄漏造成的产品损失；
- d) 生产质量的降低；
- e) 损坏设备的更换和修理；
- f) 周围的财产损失；
- g) 溢出和（或）泄漏现场和周边的清理（费用）；

h) 生产中断损失(利润损失);

i) 市场的损失;

j) 伤亡;

k) 土地的改造;

l) 诉讼;

m) 罚款;

n) 信誉。

以上各项包括比较全面,但事实上其中一些在进行基于风险的检查(RBI)时既不现实也不是所必须的。

充分评价损失通常要有非常详细的信息。有关产品价值、设备损失、维修费用、人力资源和环境损害方面的资料可能很难得到,而需要用来进行完全的经济后果分析的人力可能很有限。然而,损失分析具有一个优点,它允许在一个共同的基础上对所有类型的损失进行直接比较。

10.3.3 受影响区域

受影响区域也被用来描述风险评价的潜在后果。如同它的字面意思一样,受影响区域的表面积的数量要大于原来所确定的受影响的面积(如毒物、热辐射、爆炸超压等)。基于选定的阈值,区域内的所有事物(人员、设备、环境)都会受到危害后果的影响。

为了给受影响区域划分后果等级,通常假设整个单元受到危害的人员和设备分布均匀。更严谨的方法是对不同的单元面积内随不同时间或不同的设备密度,确定不同的人员数量。

受影响区域的面积单位[平方米(平方英寸)]不是很容易按平时的习惯转换,因此一些人不愿使用这种方法,但它还是有些特点值得思考。受影响区域的方法具有的特征是:它可以比较泄漏造成的受影响区域内的毒性和燃烧后果。

10.3.4 环境损害

环境后果测量是目前使用的基于风险的检查(RBI)最新发展。在目前技术中还没有环境损害测量的通用单位,这使得环境后果很难评价。环境损害程度的间接测量单位有:

a) 每年影响土地的面积:平方公里(英亩);

b) 每年影响海岸的长度:公里(英里);

c) 生物或人消耗资源的数量。

对环境破坏的描述,不可避免的会用环境资源破坏和恢复所需要的费用(元/年)来定义。

10.4 泄漏流体的体积

在大多数后果评价中,决定后果大小的一个关键要素是流体泄漏体积。通常泄漏体积结合以下几个方面推导:

a) 泄漏流体的有效体积——设备和相关设备中的流体体积,理论上是截止阀之间流体的数量;

b) 失效模式;

c) 泄漏速度;

d) 测定和切断的时间。

在一些情况下,泄漏体积就是可以泄漏的体积,通常采用安全和间隔措施以使物料能被隔断,以确保泄漏体积比可以泄漏的体积小。

10.5 后果影响的种类

承压壳体失效和进而造成的流体泄漏可能对安全、健康、环境、装置和经济造成损失。基于风险的检查(RBI)分析人员应该考虑危害的性质,要考虑被评估的装置、系统、单元或工厂相应的要素。

无论是采用定性成分多或是定量成分多的哪一种分析方法,估算失效后果的主要因素都在以下部分列出。

10.5.1 燃烧事件(火和爆炸)

当泄漏物和点火同时存在时燃烧事件就会发生。火可以由火源或自燃引起的。燃烧事件可以通过两种方式造成损害：热辐射和爆炸超压。热辐射造成的大部分影响集中在较近的范围内，而爆炸引起的损害能影响以爆炸为中心的较大范围。下面是几种典型的火和爆炸的类型：

- a) 蒸气云爆炸；
- b) 池火；
- c) 喷射燃烧；
- d) 闪燃；
- e) 沸腾液体膨胀扬沸爆炸（BLEVE）。

通常燃烧事故后果来自下列因素的综合作用：

- 1) 点燃的固有趋势；
- 2) 泄漏流体的体积；
- 3) 闪蒸的能力；
- 4) 自燃的可能性；
- 5) 高压或高温操作的影响；
- 6) 暴露于危险的人员和设备。

10.5.2 有毒泄漏

在基于风险的检查（RBI）中，只有有毒泄漏对人员（现场和公众）有所影响的时候才予以考虑。这些泄漏比燃烧事故造成的影响距离更大。与燃烧事故不同，有毒泄漏不需额外的事件（例如有可燃物时的点火）就能造成人员伤亡。通常基于风险的检查（RBI）方案关注于能够马上造成危害的有毒风险，而不是暴露于少量的毒物的侵害造成的慢性危害。

通常有毒后果由以下几个因素形成：

- a) 泄漏流体的体积和毒性；
- b) 在特定工艺和环境条件下扩散的能力；
- c) 探测和削减系统；
- d) 泄漏周围的人口。

10.5.3 其他有害流体的泄漏

其他液体的排放，当它们能够使人员受到影响时，则在基于风险的检查（RBI）评估活动中给予极大关注。当人接触到这些物质时，会引起烫伤或化学灼伤。一般流体，包括蒸汽、热水、酸性和腐蚀性物质泄漏都会有安全问题。通常因为它影响区域小很多，危险也很小，所以这种类型泄漏的后果比易燃或有毒介质泄漏轻得多。估算的主要参数有：

- a) 泄漏流体的体积；
- b) 区域内的人员密度；
- c) 流体的类型和造成伤害的性质；
- d) 安全系统（如人员防护服、喷淋等）；

分析时的其他考虑：

- e) 因没有盛放泄漏物的地方而造成的环境损害；
- f) 设备损害：一些反应流体，与设备和管道接触时，能导致迅速劣化和失效。

10.5.4 环境后果

环境后果是考虑化工厂整体风险的一个重要组成部分。通常基于风险的检查（RBI）集中于剧烈和立即发生的环境风险，而不是少量扩散造成的长期风险。

通常环境风险主要由以下几方面造成：

- a) 泄漏流体的体积；
- b) 闪蒸的能力；

- c) 泄漏物料的安全防护;
- d) 对环境资源的影响;
- e) 法律后果 (如违章传讯、罚款、被依法强制停工可能性)。

流体泄漏可能引起土壤、地下水、地表水的污染。气体泄漏也很重要,但很难评价,因为后果与当地的法律限制和超出限制后的惩罚相联系。

环境损害的后果以费用多少表示更好理解。费用可以用下式计算:

$$\text{环境费用} = \text{清理费用} + \text{罚款} + \text{其他费用}$$

清理费用的变化取决于很多因素,主要因素有:

- 1) 泄漏的类型——地表、地下、地表水体等;
- 2) 流体的类型;
- 3) 清理的方法;
- 4) 泄漏的体积;
- 5) 泄漏地点的可接近性和地形。

罚款部分的费用主要取决于适用的当地的法律规定。

其他费用包括泄漏引起的土地所有者和其他当事人的诉讼,这部分与设备所在地点有密切联系。

10.5.5 生产后果

生产后果通常伴随工艺流体物料损失和公用流体(水、蒸汽、燃气、酸、腐蚀剂等)物料损失发生。生产后果可能独立于可燃、有毒、危险或环境后果之外或独立发生。基于风险的检查(RBI)中主要的生产后果是经济损失。

经济后果包括损失的工艺流体和生产中断的价值。损失流体的价值用损失流体体积乘价格很容易得到。计算生产中断较为复杂。适应方法的选择取决于:

- a) 范围和研究的详细程度;
- b) 得到的生产中断的数据的可利用性。

用下式估算生产中断后果是一个简单的方法:

$$\text{生产中断} = \text{工艺单元日价值} \times \text{停工天数}$$

单元日价值可以是以税收或利润为基础。估算的停工时间可能是恢复生产需要的时间。DOW 化学燃烧爆炸指数是估算燃烧或爆炸造成的停工时间的一种典型方法。

估算生产中断后果的更严谨的方法应考虑以下几个因素:

- a) 补偿损失的生产能力(如备用设备、重新启动等)。
- b) 对邻近设备的潜在损害(如撞击损伤);
- c) 其他单元潜在的生产损失。

在生产中断分析中应对现场特定的环境加以考虑,避免给出的后果过高或过低。应考虑以下几个方面:

- 1) 生产损失在其他未充分利用或闲置的设备得到补偿;
- 2) 如果其他设备使用这一设备的产物作为原料或工艺流体,则利润损失更加复杂;
- 3) 设备小损伤的修理时间可能和大损伤修理的时间一样长;
- 4) 延长停工时间可能丢掉客户和市场,重新生产后仍会延续利润损失;
- 5) 保险范围。

10.5.6 维护和重建的影响

维护和重建的影响是指要求纠正失效和更换由于失效引发事故(例如火灾、爆炸)造成损害的设备维修和更换所需的努力。在基于风险的检查(RBI)中应计算维护和重建的影响。维护影响通常用货币计算,主要包括:

- a) 修理;
- b) 设备更换。

11 风险确认、评估和管理

11.1 目的

这一章叙述了按照第 9 章和第 10 章工作的结果联系结合起来, 确认风险的过程。还提供了按照风险标准进行风险排序和风险可接受性评价的指南。这一工作阶段的目的是制定并执行风险管理计划。

11.2 风险的确认

11.2.1 确定特定后果的概率

一旦针对相关的劣化机理确定了失效模式和失效概率(见第 9 章), 就应该确定每一确信无疑的后果情况的概率。也就是说, 引起特定后果的一系列事件中, 可能只有物料损失是第一事件。引起特定后果的事件的概率应分解成为特定后果发生的概率。例如物料损失后的首要事件是安全装置(隔离、警报等)启动或失效。第二事件可能是扩散、稀释或流体积聚。第三事件可能是最初的防护措施的启动或失效(熄灭附近的点火源, 中和流体等)等。直到特定的后果事件发生(火灾、有毒物泄漏、伤害以及向周围环境的泄漏等)。

明白失效可能性和可能引起事故的概率之间的联系非常重要。特定后果的可能性与后果的严重程度联系在一起, 与设备自身的失效有相当大的不同。事故发生的概率通常随事故的严重性上升而降低。例如事故造成死亡的概率总是比事故造成需要急救或医疗的概率低。明白这一关系非常重要。

没有经验的风险评价人员在评估办法中经常将失效概率与想象的最严重的后果联系起来。一个特别的例子, 一个劣化机理的失效模式是由一个小洞泄漏造成大火与失效概率联系起来。这种联系导致风险评价非常保守, 因为小洞泄漏很少造成大火。每一种劣化机理都有自己的破坏模式特点。对一特定的劣化机理, 在考虑设备失效后果中事故发生概率时, 应考虑预测的失效模式。例如小泄漏造成的后果与一个较大的脆性破裂造成的后果显著不同。

下面的例子用来说明如何确定特定后果的概率。这个例子已被简化, 而且使用的数据完全是假设的。

假设一个装了烃的设备需要评价。由物料损失开始的事件树, 如图 5 所示。

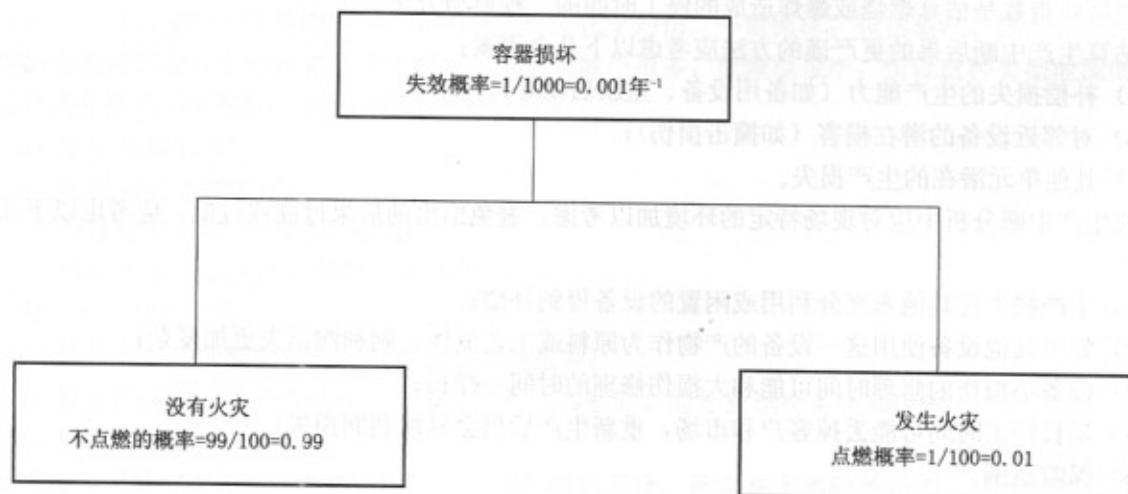


图 5 事件树范例

特定后果的概率是每一个导致特定后果事件概率的产物。在这个例子中，特定的后果估计是燃烧。燃烧的概率是：

$$\begin{aligned}\text{燃烧的概率} &= \text{失效概率} \times \text{引燃的概率} \\ &= 0.001 \text{ 年}^{-1} \times 0.01 = 10^{-5} \text{ 年}^{-1}\end{aligned}$$

不发生燃烧的概率包括两种情况（有物料损失和无物料损失）。没有燃烧的可能性是：

$$\begin{aligned}\text{无燃烧概率} &= (\text{失效概率} \times \text{不引燃概率}) + \text{不失效的概率} \\ &= (0.001 \text{ 年}^{-1} \times 0.99) + 0.999 \text{ 年}^{-1} = 0.99999 \text{ 年}^{-1}\end{aligned}$$

注：所有后果的概率之和应等于 1.0。在这个例子中，燃烧这一特定后果的概率（ $1 \times 10^{-5} \text{ 年}^{-1}$ ）加上不燃烧的概率（ $9.9999 \times 10^{-1} \text{ 年}^{-1}$ ）等于 1.0。

通常还有其他的应该被评价的实际发生的后果。然而，通常确定一组主要的概率和后果，不必将所有可能的情况都包括在分析中。工程判断和经验用于消除不重要的情况。

11.2.2 计算风险

参考风险公式：

$$\text{风险} = \text{概率} \times \text{后果}$$

现在可以为每一个特定后果计算风险。风险公式可以表示为：

$$\text{特定后果的风险} = \text{特定后果的概率} \times \text{特定的后果}$$

总的风险是每一个特定后果单个风险的总和。通常一个概率/后果组是主要的，总的风险与主要风险大致相等。

在 11.2.1 提到的例子中，如果一个火灾后果的评价为 1×10^7 元，那么风险为：

$$\text{燃烧风险} = (1 \times 10^{-5} \text{ 年}^{-1}) \times (1 \times 10^7 \text{ 元}) = 100 \text{ 元/年}^{-1}$$

如果概率和后果无法用数值表示，风险通常可由矩阵中的概率、后果绘图来决定（见 11.6）。不同情况的概率和后果组可以在风险矩阵中画出，确定每种情况的风险。注意：当使用风险矩阵时，划定的概率应该和相应的后果联系起来，而不是失效的概率。

11.3 风险管理决策和可接受的风险等级

11.3.1 风险接受

风险分析为对设备物料损失的风险进行分析提供了一个工具。很多企业都有共同的风险准则，规定了安全、环境和经济风险可接受的标准。在制定基于风险的检查（RBI）决定时应该使用这些风险标准。由于每个公司对可接受的风险标准都不一样，公司之间的风险管理决定也不一样。

成本—效益分析是很多公司、政府和法制部门使用的一个有力工具，作为判定风险可接受性的一个方法。用户参照压力容器研究协会的“风险可接受对比标准”来获得更多的风险可接受的信息。不同的风险接受性可能有变化。例如对环境风险的容忍可能比安全和健康风险大。

11.3.2 在检查和维护计划中使用风险评估

在检查和维护计划中的风险评估的使用具有统一性，实施评价计划过程中它把以传统操作为基础而得到的后果资料和以通常的工程维护为基础得到的失效概率资料结合起来。计划执行的一部分是决定检查什么、如何检查（技术），以及检查的工作量（范围）。确定工艺单元的风险，或单个工艺设备的风险，决定各种工艺设备或装置的风险并以风险值为基础的检查顺序。这一过程的第二部分是决定何时检查设备。掌握风险如何随时间变化可以有助于推进本过程的这部分工作。参考第 12 章，可以获得风险分析的检查计划细节。

11.4 敏感性分析

理解每一变量的值和它如何影响风险计算，是确定哪些是关键输入变量，哪些变量不会有很大影

响的关键。执行风险分析更重要的是更加详细和更数量性的描述。

敏感性分析包括检查风险分析的部分或全部输入变量，以确定其对相应风险后果值的总影响。一旦执行风险分析，用户就会看到哪些输入变量显著影响风险的数值。这些关键变量要给予最大的关注。

为这些变量收集更多的资料是值得的。对后果和概率的初步估计可能过于保守或悲观；因此，敏感度分析后的资料收集应集中在使关键的输入变量更准确。这一过程意味着最终要对输入变量重新估算。只有这样，风险分析的质量和准确性才能提高。这是风险评价数据确认阶段重要的一部分。

11.5 推断

当不能得到失效后果和（或）概率数据时，经常使用推断和估计值，甚至已经知道数据存在，在最初的分析中输入以后的工艺或工程模型的资料时，可能使用保守的估计数据，例如敏感性分析。推荐的谨慎措施过于保守，如对失效后果和（或）概率值的过高估计，对计算出来的风险值会造成不必要的夸大。提供夸大的风险值会误导检查计划制定者、管理人员和保险公司，使人们对方法的应用者和基于风险的检查（RBI）减少了信任。

11.6 风险描述

一旦风险数值确定，可以通过各种方式将分析结果提交给决策者和检查计划制定者。风险分析的一个目标就是将结果用大家都能明白的相同格式进行交流。使用风险矩阵或图表对实现这一目标很有帮助。

11.6.1 风险矩阵

使用后果和概率类型的风险等级方法，是不用数据说明工厂和工艺装置中各处的风险分布的一个有效途径。风险矩阵的例子如图6所示。在图6中，后果和概率的类别分布使最高的风险等级在右上角的位置。通常需要数值来表示类型，为评价人员提供指导（例如C型是从0.001~0.01）。可以使用不同大小的矩阵（例如5×5，4×4等）。无论如何选择矩阵，后果和概率类型应为区分评价项目提供足够的区别。

风险类型可以是风险矩阵中的一个区域。图6给出了风险矩阵中风险分类（高、中、低）的一个示例。在这个例子中，风险类型图中的类别代表长度是对称的。它们也可能不对称，代表后果类别的

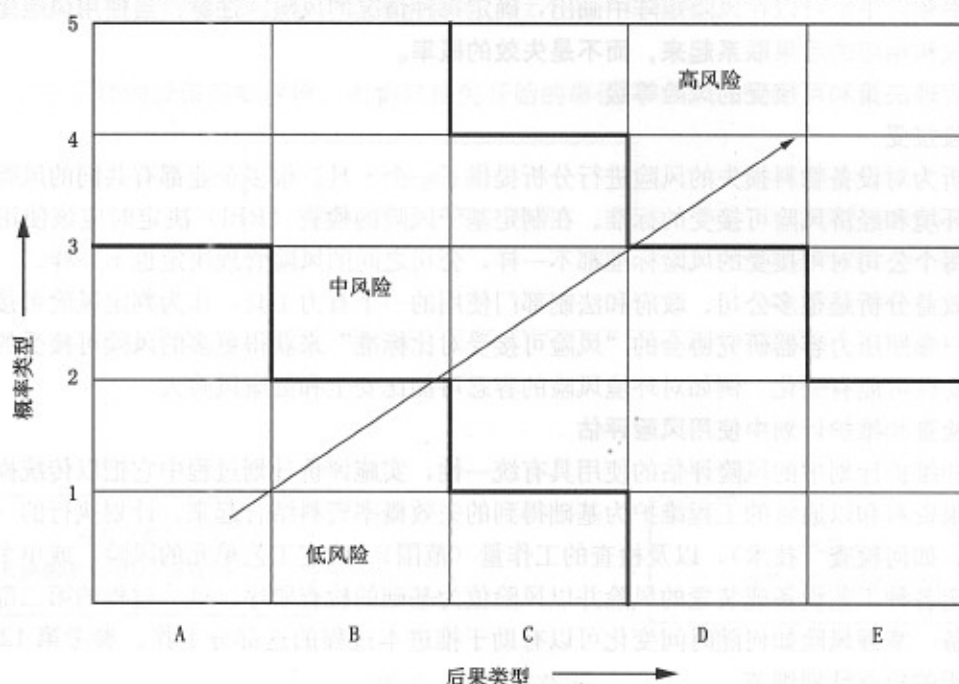


图6 用概率和后果类型表示风险等级的风险矩阵

长度比代表概率类别的长度要长。

11.6.2 风险标绘图

当需要使用多个定量后果和概率数据时，并且在显示数字风险值对于风险承担者更有意义的地方，可以运用风险标绘图或曲线（如图 7 所示）。这张图的结构和风险矩阵有相似处，右上角是最高风险区。通常使用双对数坐标绘出风险图，这样能更好理解所评价设备之间的相对风险。图 7 给出了一个例子，表示了 10 套设备的风险和一条 iso—风险线。如果图中直线是风险可接受的极限，1 设备~3 设备应有削减措施，使它们的风险降到直线以下。

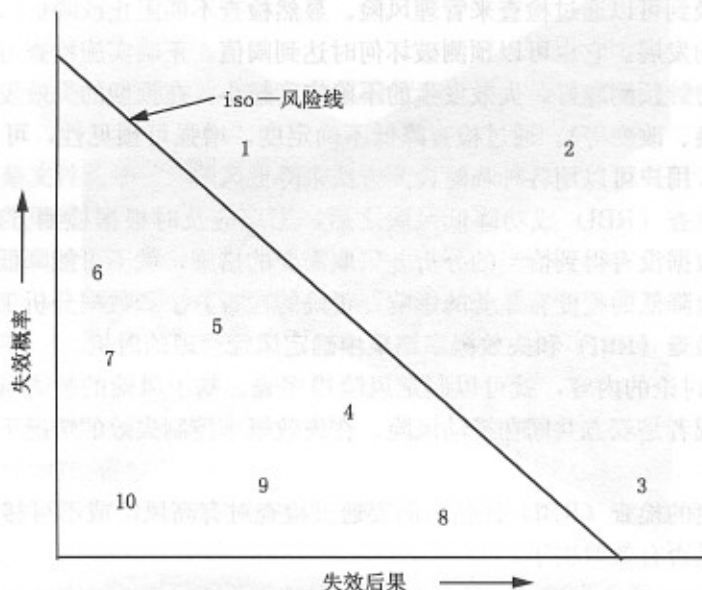


图 7 用风险数值绘出的风险图

11.6.3 使用风险标绘图或风险矩阵

在风险标绘图或风险矩阵中位于右上角的设备在检查计划中极可能排在前面，因为这些设备是高风险的。同样位于左下角的应排在后面，因为这些设备的风险很低。一旦风险标绘图完成，它就可以作为排序过程的一种图示工具。

11.7 建立可接受风险阈值

风险分析完成和风险标绘图画出后，风险评价过程开始。风险标绘图和风险矩阵可以用来显示初步确定的高、中、低风险设备。可以根据设备的风险值，用表格进行排序。阈值可以将风险标绘图、风险矩阵或表格分成可接受和不可接受区域。公司的安全和经济的政策、约束或风险标准会影响阈值的设定。法律法规可能有助于确定可接受的风险阈值。

将一些风险降低到可接受水平以下，由于技术和经费的约束使某些风险难以降低到一个可接受水平。这些设备需要使用“最低合理可行”（ALARP）的风险管理方法或其他的风险管理方法进行管理。

11.8 风险管理

基于设备等级和风险阈值，进行风险管理。对可接受的风险，没有必要采取削减措施和采取进一步的措施。

对不可接受的风险，需要降低风险。以下是各种削减措施的种类：

- 退役：设备对支持装置运行是否是必需的？
- 检查和（或）状态监控：是否能够实施一个有效成本控制的检查方案，根据检查结果进行维修，并将风险等级降到可接受的水平？

c) 削减后果：采取的措施能否削减设备失效的后果？

d) 削减概率：采取的措施能否（例如改变材质，重新设计）降低设备失效概率？

这样风险管理就可以决定采取何种措施来降低风险、风险管理和（或）削减在第 12 章和第 13 章详细说明。

12 用检查工作进行管理

12.1 通过检查降低不确定度来管理风险

在前几章中已经谈到可以通过检查来管理风险。显然检查不能阻止或降低劣化机理。检查只是确定、监测和测量劣化的发展。它也可以预测破坏何时达到阈值。正确实施检查可以提高用户预测劣化机理和劣化速率的能力。预测越好，失效发生的不确定度越小。在预期的失效发生之前就计划和实施削减措施（维修、更换、改变等）。通过检查降低不确定度，增强可预见性，可以直接降低失效的概率，因此降低了风险。用户可以用各种临时检测方法来降低风险。

通过基于风险的检查（RBI）成功降低风险之后，工厂应及时根据检测方法确定的结果采取措施。如果收集的检查数据没有得到恰当的分析并采取需要的措施，就不可能降低风险。检查数据和分析、解释的质量对风险降低的程度有显著的影响。正确的检查方法和数据分析工具是十分关键的。

12.2 从基于风险的检查（RBI）和失效概率结果中确定风险管理的时机

通常按照第 11 章讨论的内容，就可以制定风险排序表。基于风险的检查（RBI）要确定是失效后果还是失效概率，或者是双方共同在推动风险。在失效概率控制失效的情况下，通常可以用检查来管理风险。

一旦完成基于风险的检查（RBI）评估，需要通过检查对有高风险或不可接受风险的设备进行潜在风险的管理。检查是否有效取决于：

- a) 设备的类型；
- b) 现行的和可信的劣化机理；
- c) 劣化速率或易发程度；
- d) 检查方法、范围和频率；
- e) 接近预期破坏区域的难易程度；
- f) 停车的要求；
- g) 成功降低失效概率（POF）的值 [例如通过检查再继续降低一个低的失效概率（POF）值通常是很困难的]。

依靠设备的剩余寿命和劣化机理的类型，通过检查进行风险管理，效果不好或者没有效果。这种情况的例子有：

- 1) 腐蚀速率准确，并且设备接近寿命的终点；
- 2) 与操作条件有关的瞬间失效，如脆断；
- 3) 检查技术不能准确的测出或量化劣化情况；
- 4) 从开始劣化到最终失效时间与定期检查的间隔相比时间太短（例如高频率疲劳裂纹）；
- 5) 事件导致失效（无法预测的外部环境）。

在这些情况下，一个替换的削减方式可能是需要的。

每个设备都可以建立更可行、有成本效益的风险削减策略。通常检查提供总体风险管理策略的主体内容。

12.3 以风险评估为基础建立检查策略

基于风险的检查（RBI）评估和风险管理评价的结果，可以作为相关项目组整体检查策略制定的基础。检查策略可以和其他的削减计划一起制定，这样来说所有设备风险的结果都可以接受。在制定检查策略时，用户应该考虑风险的等级、风险推动因素、设备的历史、检查的数量和结果、检查的类

型和有效性,相似工况的设备和剩余寿命。

只有检查方法所使用的检查技术能够测定出劣化模式和它的严重程度时,检查才能有效。例如,如果劣化机理造成无法预期的局部腐蚀(例如点腐蚀、硫化氢的腐蚀、局部减薄),那么沿管线测得的壁厚没有用。在这种情况下,超声波扫描、射线探伤等更有效。通过检查得到的风险降低取决于:

- a) 劣化机理的失效模式;
- b) 开始破坏和失效之间的时间间隔(例如劣化速度);
- c) 检查技术的测定能力;
- d) 检查的范围;
- e) 检查的频率。

工厂通过认真、系统的考虑通过检查确定的风险管理水平,要注意通过检查确定的风险管理不是万能的。

检查的策略应该是文件化并且经过反复研究确定,以确保检查工作总是针对高风险的设备,并且实行检查活动有效降低风险。

12.4 用检查工作管理风险

过去检查的有效性一定程度决定了现在的风险。将来的检查工作会影响将来的风险。基于风险的检查(RBI)用“如果……怎么样(what if)”方法决定检查时间、内容和方式,从而产生一个可接受的预期风险水平。影响将来风险的主要参数和范例如下:

- a) 检查的频率:增加检查频率可以更好地确定、识别或监控劣化机理,从而降低风险。可以优化常规和周期性的检查频率。
- b) 范围:单个或多个的不同区域的检查可以被模型化,并加以评估,以确定其在可接受的风险水平内。例如:
 - 1) 高风险的管道系统可能需要扩大检查范围,使用一个或多个无损检测(NDE)方法确定劣化机理的位置;
 - 2) 评价可以揭示需要集中关注的容器的高风险所在的位置并进行风险量化;而不是把精力放在只有低风险劣化过程的容器的其余部分。
- c) 工具和方法:选择和使用合适的检查工具和方法可以有效优化开支和降低风险。选择检查工具和方法时,检查人员应考虑到多种可以降低风险的技术,然而不同选择得到的削减程度也有不同。例如用射线对局部腐蚀的壁厚进行检查比超声波更有效。
- d) 过程和实践:检查过程和实际的检查操作影响劣化机理的识别、测量和(或)监控的有效性。如果检查活动是由训练有素且有资格的检查人员执行的,可以获得期望的风险管理结果。用户要注意不要要求所有的检查员和无损检测(NDE)测试员都是有非常好的资格和经验,而更适当的是采取措施保证他们有合适的经验水平和资格。
- e) 内部或外部检查:需要对通过内部和外部检查降低风险进行评估。通常外部检查和对运行设备的有效检查可以为风险评估提供有用的数据。值得注意的是,内部检查有时会引起破坏,增加设备的风险。这种情况发生的例子有:
 - 1) 湿气进入设备造成应力腐蚀开裂或连多硫酸开裂;
 - 2) 玻璃衬里容器的内部检查;
 - 3) 保护膜被破坏;
 - 4) 倒流程时的人为失误;
 - 5) 设备停车和启动时带来的风险。

用户可以通过调整这些参数获得优化的风险管理检查计划,使检查计划即经济又可行。

12.5 使用基于风险的检查(RBI)管理检查费用

通过实施基于风险的检查(RBI)可以更有效地管理检查费用,可以按资源使用或按故障发生

定为高风险的区域。从而,可以考虑相同的策略以减少基于风险的检查(RBI)区域内的检查活动,或者减少对相关风险帮助很少甚至没有帮助的检查活动。这样使检查的资源用在最需要它们的地方。

另一种管理检查费用的方法是在检查计划中确定那些非介入式在线检查的方案。如果非介入式检查能提供充分的风险管理,那么就可以节约开支,而不需要停工间的加盲板、开罐、清理、内部检查。如果检查的设备项是带来操作单元的停车的主要原因,那么非介入式检查可以增加单元的正常运行时间。用户应认识到实施基于风险的检查(RBI)有降低检查开支的可能,设备完整性和检查费用优化是重心。

12.6 评价检查结果,确定矫正行为

检查结果,如劣化机理、劣化速率、设备对劣化类型的承受能力,可以作为评定剩余寿命和将来的检查计划的变量。结果也可以用于比较和确认可能已经用于失效概率计算的模型。

对所有需要维修和更换的设备部件,可以做出一份文字的削减风险的计划。计划中给出维修(或更换)的范围、建议,推荐的维修方法,合适的质量管理和质量控制计划完成日期。

12.7 用基于风险的检查(RBI)实现运行周期成本最小化

基于风险的检查(RBI)不仅可以通过优化检查费用直接降低运行周期的成本,它还可以通过各种成本一效益评价,降低整个运行周期的成本。下面的例子给出了如何运用基于风险的检查(RBI)的成本一效益评价来降低运行周期的成本。

- a) 基于风险的检查(RBI)强调了对劣化机理造成的失效的预测。这增加了用户继续安全运行设备的信心,使运行时间更接近预期的失效时间。这样做会增加设备运行时间,降低运行周期的成本。
- b) 运用基于风险的检查(RBI)可以评价腐蚀性流体增加带来的影响。在后续的计划中可以确定改善制造材料或更换个别的零件。制造材料计划可以考虑优化安全运行时间,使其与检查计划相符。这相当于通过减少维护、优化检查、增加设备正常运行时间的方法来增加利润,降低运行周期的成本。
- c) 检修和维护费用对设备运行周期的成本也有影响。使用基于风险的检查(RBI)检查计划的结果,可以更准确地指出检查的位置和需要的维修和更换,可以预先计划检查和维护工作,有时可以使检查和维护工作的费用比无计划的要低。

13 其他削减风险的措施

13.1 概述

上一章已经说明,检查是风险管理的一个有效方法。然而,检查并不总能降低风险,它也可能不是最有效益的方法。本章的目的是给出其他削减风险的方法。这里列出的方法并不意味着包含全部的方法。削减风险的措施可以由以下一种或几种方法组成:

- a) 降低后果的大小;
- b) 降低失效的概率;
- c) 增强后果影响的设备和人员的承受能力;
- d) 削减主要的后果来源。

13.2 设备更换和维修

设备的劣化到风险不可接受的水平时,更换和维修是降低风险的惟一方法。

13.3 缺陷设备的合乎使用评价

检查可以识别设备的缺陷。设备适合性评价(见 API RP 579)可以用来确定设备是否可以继续安全运行,在什么条件下和多长时间安全运行。可以确定设备合乎使用性分析的缺陷有一定尺寸标准,如果在今后的检查中又有新的发现,将要求修理或更换设备。

13.4 设备修改、重新设计和重新定级

设备修改和重新设计可以降低失效概率，例子包括：

- a) 改变金属材质；
- b) 增加保护衬里和涂层；
- c) 去除损坏部分；
- d) 增加腐蚀裕量；
- e) 物理变化可以帮助控制和（或）减小劣化；
- f) 提高防腐、隔热能力；
- g) 喷射点设计变更。

有时一些设备的工艺条件超出设计承受能力了，设备的重新定级可以减少失效概率。

13.5 紧急切断

紧急切断可以降低泄漏事件的中毒、爆炸或燃烧后果。选择合适的位置安装截断阀是成功降低风险的关键。通常要求遥控操作可以显著降低风险。降低燃烧和爆炸风险，操作应能发觉泄漏并迅速启动截断阀（在几分钟内）。稍长的反应时间仍可以降低正在发生的燃烧和有毒物质泄漏的影响。

13.6 紧急降压和减少危害物存量

这种方法降低泄漏的数量和速率。与紧急切断一样，需要在几分钟内紧急降压和（或）减少存量以减少燃烧和（或）爆炸风险。

13.7 改变工艺

可以通过降低工艺的危险条件来削减主要后果源，例如：

- a) 将温度降低到大气压力下介质的沸点以下以降低蒸气云的大小；
- b) 用危险性较小的材料代替（例如用低闪点溶剂替换高闪点溶剂）；
- c) 采用连续工艺代替间歇式工艺；
- d) 冲淡有害物质。

13.8 减少存量

这种方法降低了后果的大小，例如：

- a) 减少和（或）消除有害供料和中间产品的储存；
- b) 修改工艺，减少压力波动的容器、回流容器或其他工艺中间储存中的介质的存量；
- c) 选择需要较少存量的工艺操作；
- d) 用气相代替液相。

13.9 洒水和（或）喷水

这种方法可以减少火灾损失或阻止扩散。正确设计的操作系统可大大降低容器遭受沸腾液体膨胀扬沸爆炸（BLEVE）的概率。

13.10 水幕

喷水截止大量空气不能进入蒸气云中。水幕通过像稀释和隔离一样吸收了挥发气削减了能溶于水的蒸气云（包括大部分可燃气）。越早采取措施，风险降低越明显。水幕应位于泄漏点和点火源（例如炉子）之间，或位于人可能出现的地方。设计中，设计是阻燃的关键，因为在某些情况下，水幕可能会增加燃烧的速度。

13.11 防爆结构

利用防爆结构可以削减爆炸引起的危险，也可以阻止事故的扩大。在建筑物（见 API RP 752）具有防爆结构时，可以保护人员不受到爆炸的影响。防爆结构对于应急反应的关键设备、关键仪表和（或）控制线路等也是非常有用的。

13.12 其他

- a) 溢出探测器；

- b) 蒸汽或空气幕;
- c) 防火;
- d) 仪器 (联动装置、停车系统、警报系统等);
- e) 惰性气体覆盖;
- f) 大楼和封闭结构的通风;
- g) 管路再设计;
- h) 机械的流动限制;
- i) 火源控制;
- j) 提高设计标准;
- k) 通过实施安全管理方案予以提高;
- l) 紧急疏散;
- m) 掩体 (安全的地方);
- n) 大楼通风口的毒物洗涤收集;
- o) 溢流物的盛装;
- p) 设备场地的选择;
- q) 状态监控;
- r) 提高培训和工艺程序。

14 基于风险的检查 (RBI) 再评估和评估的更新

14.1 基于风险的检查 (RBI) 再评估

基于风险的检查 (RBI) 是个动态的工具, 可以对现在和未来的风险进行评估。然而, 这些评估是基于当时的数据和认识, 随着时间推移, 不可避免会有改变, 基于风险的检查 (RBI) 评估的结果应该更新。

维护和更新基于风险的检查 (RBI) 方案是很重要的, 应保证包含最新的检查、工艺和维护信息。检查的结果、工艺条件的改变、进行维护的活动实施, 都对风险和引发新的评估有显著的影响。

14.2 为什么要进行基于风险的检查 (RBI) 再评估

风险可因事件而改变, 基于风险的检查 (RBI) 再评估应谨慎从事。为在变化的状态下对装置进行有效管理, 确定正确的再评估实际非常重要。14.2.1~14.2.4 就某些能够导致基于风险的检查 (RBI) 再评估的一些主要因素给出指南。

14.2.1 劣化机理和检查活动

很多劣化机理都依赖于时间。基于风险的检查 (RBI) 评估着眼于持续速率的劣化。在现实中, 劣化速率可能随时间而变化。通过检查活动, 可以很好确定劣化的平均速率。

有些劣化机理与时间无关 (例如只有存在特定的条件下才会发生劣化)。这些条件在最初的评估中不可能预测, 但后来可能发生。

检查活动会增加设备的有关信息。在检查活动已经完成后, 应对结果进行评审, 决定是否进行基于风险的检查 (RBI) 再评估。

14.2.2 工艺条件和硬件改变

工艺条件和硬件改变, 例如设备修改或更换, 经常显著地改变风险, 需要进行再评估。与设备的快速失效、不可预测的腐蚀和开裂联系在一起的工艺条件的改变, 对受工艺条件影响较大的劣化机理是非常重要的。典型的例子包括不锈钢氯化物应力腐蚀开裂、碳钢湿 H_2S 腐蚀开裂、酸液腐蚀。在每种情况下, 工艺条件的变化都能显著影响腐蚀速率和开裂趋势。硬件的变化对风险也有影响, 例如:

- a) 失效概率受到容器内件设计、管线系统尺寸、形状等变化的影响, 加速了腐蚀影响的速度;

b) 失效后果可能受容器与火源之间的位置调整的影响。

14.2.3 基于风险的检查 (RBI) 评估前提变化

基于风险的检查 (RBI) 评估前提可能会变化, 并对风险结果有显著的影响。可能的变化包括:

- a) 人口密度的增加或减少;
- b) 材料、维修和 (或) 更换费用的改变;
- c) 产值的变化;
- d) 安全与环境法律法规修订;
- e) 用户风险管理计划修改 (例如风险标准改变)。

14.2.4 削减策略的影响

应对安装安全系统、维修等削减风险的策略进行监控, 保证它们成功实现预期的削减。一旦实施了削减策略, 要对风险进行再评估以更新基于风险的检查 (RBI) 方案。

14.3 何时实施基于风险的检查 (RBI) 再评估

14.3.1 重大变化之后

在 14.2 中已讨论过, 很多原因会引起风险的重大变化。有资质的人员要评估每一个重大变化, 以决定风险变化的趋向。工艺条件、劣化机理、劣化速率、劣化的严重程度以及基于风险的检查 (RBI) 的前提的明显改变都可能需要基于风险的检查 (RBI) 再评估。

14.3.2 规定时间之后

尽管没有发生重大变化, 长时间会发生很多细小变化, 积累会引起基于风险的检查 (RBI) 评估的重大改变。用户应确定实施基于风险的检查 (RBI) 再评估最长的时间间隔。在这项工作中应包含对管理检查规范 (见 SY/T 6507, API 570 和 API Std 653) 和有关法律规定的适用性进行核对。

14.3.3 实施风险削减策略之后

一旦实施了风险削减策略, 要注意削减风险策略是如何使风险降低到可接受水平的。用风险再评估和准确适时的文件记录来反映这一点。

14.3.4 维护检修之前和之后

在维护检修之前进行评估, 使检修作为计划的一部分, 有益于实施基于风险的检查 (RBI) 再评估。第一步是计划检修, 保证工作集中在高风险的设备上, 可能有益获得安全、经济、有利于环境的预定操作运行时间。

由于大量的检查、维修和修改是在维护检修期间完成的, 检修后更新评估对反映新的风险水平是非常有益的。

15 岗位、职责、培训和资格

15.1 小组协作

基于风险的检查 (RBI) 需要从很多方面收集数据, 专门分析和作出风险管理的决定。一般来说, 一个人不会有单独完成整个研究所需的知识阅历和技能。通常由一个有所需知识阅历和技能的小组来有效实施基于风险的检查 (RBI) 评估。15.2 给出了一个基于风险的检查 (RBI) 所需的典型小组成员表。根据应用, 所列的一些成员可能不需要。某些小组成员可根据需要参加部分工作。如果其他的小组成员有所需的多种技术和知识, 可能不需要所列的全部小组成员。有一个熟悉情况的成员对会议讨论和组内交流是很有用的。

15.2 小组成员、岗位和职责

15.2.1 小组领导

小组领导可以是下面提到的小组成员的任何一位。小组领导应是常务的小组成员, 并是所分析设备/装置的风险承担者。小组领导的职责是:

- a) 组建小组, 确保小组成员有所需的技术和知识。

- b) 确保研究正确进行, 做好以下几点:
 - 1) 准确收集数据;
 - 2) 做出的假设合乎逻辑并进行记录;
 - 3) 使用适当的人选提供数据和假设;
 - 4) 对数据的收集和分析的质量和有效性要进行核查。
- c) 准备基于风险的检查 (RBI) 研究的报告, 将它分发给那些做出风险管理决定的责任人或实施削减风险行动的责任人。
- d) 监督确保实施正确的风险削减行为。

15.2.2 设备检查员或检查专家

设备检查员或检查专家的职责是收集设备的现状数据和历史数据。数据包括新的、设计时的和在运行的状态。这些信息通常包含在设备检查和维护文件中。如果得不到这些数据, 检查员和 (或) 检查专家应与材料和腐蚀专家联系预测出现在的状态数据。检查员和 (或) 检查专家、材料和腐蚀专家有责任评价过去检查的有效性。设备检查员和 (或) 检查专家通常有责任实施基于风险的检查 (RBI) 推荐的检测计划。

15.2.3 材料和腐蚀专家

材料和腐蚀专家负责在综合考虑设备的工艺条件、环境、金属材质和寿命等条件下, 评估劣化机理的类型及设备的适用程度。专家应将这一评估与设备的实际状态进行比较, 确定预期条件和实际条件不同的原因, 并为以后基于风险的检查 (RBI) 研究中使用的劣化机理、劣化速率提供指导。比较应包括确定检查对相关的劣化机理是否合适。专家应推荐降低失效概率的方法 (例如改变金属材质, 加强控制, 增加涂层和衬里等), 及监控劣化速率变化的控制方法 (例如 pH 监控、腐蚀速率的监控、物料监控等)。

15.2.4 工艺专家

工艺专家的职责是提供工艺条件的信息。这些信息用工艺流程表的形式给出。工艺专家负责记录由正常事件 (例如启动和停车) 及非正常事件引起的工艺条件的变化。工艺专家负责给出工艺流体和 (或) 气体的组分和变化, 以及它们的毒性和可燃性。工艺专家应推荐通过改变工艺条件削减风险 (概率和后果) 的方法。

15.2.5 操作和维护人员

操作和维护人员的职责是核实设备在工艺设定的参数范围之内运行。他们还有责任提供当工艺偏离工艺条件限制时的事件发生时的数据, 他们也有责任按照设备检查员提供的数据进行设备的维修/更换/添加。操作和维护人员有责任执行适合于工艺或设备的更新和监控的建议。

15.2.6 管理者

管理者的职责是为基于风险的检查 (RBI) 研究提供保证和资源 (人力、财物)。他们负责做出风险管理的决策, 并为组织内其他人提供风险管理的框架和 (或) 机理, 使他们做出按照基于风险的检查 (RBI) 研究的结果开展工作。最后管理者还负责为执行削减风险措施提供资源和后续系统。

15.2.7 风险评估人员

风险评估人员的职责是收集所有的数据, 执行基于风险的检查 (RBI) 分析。他们的主要责任是:

- a) 确定其他小组成员应提供的数据;
- b) 确定数据的准确水平;
- c) 通过质量检查修正数据和假设的正确性;
- d) 将数据输入和 (或) 传送到计算机程序, 运行程序 (如果使用了这样的程序);
- e) 数据输入和输出的质量控制;
- f) 人工计算风险 (如果不使用计算机程序);
- g) 将结果用可理解的方式显示出来, 准备基于风险的检查 (RBI) 分析报告。

此外,如果有必要,风险评估人员应对本组的风险和(或)利润进行分析。

15.2.8 环境安全人员

环境安全人员的职责是提供环境安全系统的数据和有关法规。他(她)还负有推荐和评估削减失效后果方法的职责。

15.2.9 外财务/营销人员

财务和(或)营销人员的职责是提供分析设备所需费用和设备停工时的财务影响方面的数据。他(她)还应该推荐方法,以削减由于失效所造成的财务后果。

15.3 实施基于风险的检查(RBI)的培训和资格

15.3.1 风险评估人员

风险评估人员应通过教育、培训或实践对风险分析有透彻的理解。他(她)应接受基于风险的检查(RBI)方法和基于风险的检查(RBI)实施程序的详细训练,明白程序如何操作和影响最后结果的关键因素。

为执行基于风险的检查(RBI)提供风险评估人员的承包人,应有风险评估人员培训方案,使这些人员具有相应资质和经验的书面证明。使用内部风险评估人员进行基于风险的检查(RBI)分析的装置所有者,应有相应书面程序证明其人员有足够的资质。风险评估人员的资质和培训应作记录。

15.3.2 其他小组成员

其他的小组成员应接受基于风险的检查(RBI)使用方法和程序的基本培训。这些培训主要是理解和有效运用基于风险的检查(RBI)。这些培训应由基于风险的检查(RBI)小组的风险评估人员提供,或者是由其他有基于风险的检查(RBI)知识和实施过风险检测方法的人提供。

16 基于风险的检查(RBI)文件和记录保存

16.1 概述

充分获取对基于风险的检查(RBI)评估有效的文件资料是很重要的。通常文件应包含下面的内容:

- a) 评价的类型;
- b) 实施评价的小组成员;
- c) 执行评价的时间计划;
- d) 用于决定风险的输入和来源;
- e) 评价过程中作出的假设;
- f) 风险评价的结果(包括概率和结果的资料);
- g) 随后的风险削减策略(如果应用它们去管理风险),可以实施;
- h) 削减风险的水平(例如实施风险削减后的残余风险);
- i) 确定检查范围和频率所参考的规范或标准。

总之,要获取并保存足够的数据,以便可以重新评价,或被其他未参与最初评价的人以后重新评价时使用。为了方便,最好将这些文件保存在计算机的数据库中。这会提高分析、检索和管理的能力。数据库对基于风险的检查(RBI)评估给出的管理建议和特定的时间框架内管理所有风险非常重要。

16.2 基于风险的检查(RBI)方法

实施基于风险的检查(RBI)分析应做记录以便清楚知道实施的评价类型。对失效的概率和后果的基本情况要进行记录。如果用特定的软件执行评价,也应做记录和维护。文件应该完整,方便以后对所做的工艺决定的基础和逻辑进行核查和复制。

16.3 基于风险的检查(RBI)人员

风险评价取决于执行人员或小组的知识、经验和判断,因此要记录有关的小组成员。在重复和更

新分析时,这有助于理解风险评价的基础。

16.4 时间安排

风险的水平随时间变化。这可能是由于劣化机理随时间变化,或仅由于设备操作的变化。因此,应该确定基于风险的检查(RBI)实施的时间安排,并在最后的文件中做记录。这允许按照时间有效跟踪和管理风险。

16.5 风险分析的任务

用于评价失效的概率和后果的各种数据都应该获取。应该包括,但不仅限于下面的资料:

- a) 基本的设备数据和对过去检查的评价意见,例如操作条件、结构的材料、工况、腐蚀率、检查历史等;
- b) 操作和可靠的劣化机理;
- c) 用于判断每一种劣化严重程度的标准;
- d) 预期的失效模式(例如泄漏或断裂);
- e) 判断每一种失效模式严重程度的主要参数;
- f) 用于判定各种后果类型的标准,包括安全、健康、环境和经济;
- g) 评定风险可接受程度的风险标准。

16.6 风险评价时所作的假设

按照风险分析的特点,需要对设备劣化的特点和范围作出某些假设。而且,不管是定量分析还是定性分析,失效模式的指定和预期事件的严重程度都是基于一系列假设。要了解整体风险的基础,在最后的文件中记录这些因素非常重要。清楚记录概率和后果分析中做出的主要假设可以提高重新进行基于风险的检查(RBI)评估和更新的能力。

16.7 风险评价的结果

文件中应记录概率、后果和风险的结果。需要削减风险的项目,削减后的结果也应做记录。

16.8 风险削减及其后续工作

通过基于风险的检查(RBI)管理风险的最重要的一个方面是建立和使用削减策略。因此,在评价中,要求减少后果或概率的特定的削减风险措施要进行书面记录。执行的任何削减的方法、过程和人员都要做记录。

16.9 规范、标准和政府的条例

由于各种规范、标准和政府条例包含了大多数承压设备的检查规定,因此引用这些文献作为基于风险的检查(RBI)评估的一部分是很重要的。有关实施基于风险的检查(RBI)减少检查范围或频率的部分尤其重要。第2章给出了一些相关规范和标准。

附录 A 劣化机理

(资料性附录)

有关劣化机理见表 A.1~表 A.4。

表 A.1 减薄

劣化机理	描 述	表 现 状 态	关 键 变 量	例 子
盐酸腐蚀	引起碳钢和低合金钢的局部腐蚀,特别是在冷凝点[$<204^{\circ}\text{C}$ (400°F)]。奥氏体不锈钢受到点蚀和隙间腐蚀。镍合金在氧化状态下腐蚀	局部	盐酸含量百分比, pH 值, 建筑材料, 温度	原油常压塔封头, 加氢处理的一系列产物, 催化重整的产物和再生系统
电化学腐蚀	两种金属相连并浸入电解液中时发生	局部	相连材料在电化学场中的距离	海水和一些冷却水
二硫化氢腐蚀	侵蚀性腐蚀对碳钢和耐酸黄铜造成高的金属损失	局部	H_2S 在水中的百分比含量, 速度和 pH 值	由温度或在加氢处理中的催化裂化、加氢裂化、焦化、催化裂化、氨处理以及酸液与气体分离系统中产生
二氧化碳(碳酸)腐蚀	二氧化碳是一种弱酸性气体, 当它溶于水变成碳酸后具有腐蚀性。在处理前的上流液体经常发现二氧化碳。碳酸对碳钢和低合金钢的腐蚀是个电化学的过程, 包括正极铁的溶解和负极氢的变化。反应伴随 FeCO_3 和 (或) Fe_3O_4 膜的形成, 它能否起到保护作用由条件决定	局部	二氧化碳的浓度和工艺条件	炼油厂蒸汽凝结系统, 含氢装置, 催化裂化的挥发气回收部分
硫酸腐蚀	强酸引起各种材料金属的损失, 取决于很多因素	局部	酸百分比含量, pH 值, 建筑材料, 温度, 速度, 氧化剂	硫酸烷基化单元, 软化水
氢氟酸腐蚀	强酸引起各种材料金属的损失	局部	酸百分比含量, pH 值, 建筑材料, 温度, 速度, 氧化剂	氢氟酸烷基化单元, 软化水处理
磷酸腐蚀	弱酸引起金属损失。通常是水处理中生物腐蚀的附加	局部	酸百分比含量, pH 值, 材料成分, 温度	水处理工厂
石炭酸腐蚀	弱酸引起腐蚀和各种合金钢中的金属损失	局部	酸百分比含量, pH 值, 建筑材料, 温度	重油和脱蜡厂
氨水腐蚀	清除未溶解的 H_2S 和 CO_2 酸性气体的气体处理中出现。腐蚀通常是由吸收的酸性气体或氨的易造成劣化的产品造成	通常速度很低, 局部速度高	氨的形式和浓度, 建筑材料, 温度和所涉及的酸性气体, 速度	氨气处理单元
大气腐蚀	通常腐蚀过程在大气中发生, 碳钢转换为 Fe_2O_3	总是均匀腐蚀	含氧, 温度范围和能够介入的水或者潮气量	使用碳钢的无保护层的高温工艺很容易发生(如蒸汽管)
隔热保护层下的腐蚀(CUI)	CUI 是空气腐蚀的一个特殊情况, 温度和湿度较高。通常残余的腐蚀物或由隔离层分离的微量的腐蚀物质, 也造成更容易腐蚀的环境	通常高度集中	含氧, 温度范围和能够介入的水或者潮气量, 隔离层的腐蚀成分	带有隔热保护层的管道和容器

表 A.1 (续)

劣化机理	描 述	表现状态	关键变量	例 子
土壤腐蚀	与土壤接触的金属会发生腐蚀	通常是局部的	材料成分, 土壤特性, 涂层类型	罐的底部, 埋地管线
高温硫化物腐蚀(不含有 H_2)	腐蚀过程类似于氧气腐蚀。在这种情况下, 碳钢转化为硫化亚铁。转化速度取决于操作温度和硫的浓度	通常是均匀腐蚀	硫的浓度和温度	温度超过 232°C (450°F), 硫的含量超过 0.2% 的位置。一般的位置在粗制、焦化设备, FCC 和加氢单元
高温含氢硫化物腐蚀	含有氢, 更容易产生硫化腐蚀	通常是均匀腐蚀	硫化物、氢的浓度, 温度	温度超过 232°C (450°F), 硫的含量超过 0.2% 的位置。加氢处理单元的一些位置——反应器的氢混合点的进料的下游位置, 反应器, 反应器产物, 氢气循环, 包括换热器、加热器、分离器和管道等
环烷酸腐蚀	环烷酸腐蚀是通过有机酸对合金钢进行腐蚀。凝结的范围在 177°C (350°F) ~ 399°C (750°F)。原油当中的环烷酸的危害度明显的高于中性物质	局部腐蚀	环烷/有机酸的浓度和温度	原油加工单元真空塔的中间部分, 在空气蒸馏单元、炉子和输运管线也会发生
氧化	一定温度以上, 发生高温腐蚀, 将金属转化为金属氧化物	通常是均匀腐蚀	温度, 所含有的空气, 建造材料	在含有多余空气的条件下暴露在燃烧气中的炉管的外侧, 炉管架, 其他炉内部件

表 A.2 应力腐蚀开裂

劣化机理	描 述	表现状态	关键变量	例 子
氯化物开裂	开裂会从奥氏体不锈钢设备的内部或外部开始, 主要是由于制造应力和残余应力。一些应用应力也会引起开裂	穿晶开裂	酸的浓度, pH 值, 建造材料, 温度, 制造, 所受的应力接近屈服应力	在隔热和抗气温变化能力很差的、冷却水喷淋下风口、暴露在消防水的设备的外部出现。内部出现在氯和水同时存在的地方, 如原油加工单元的常压塔和反应器排出冷凝液
腐蚀开裂	开裂主要从碳钢设备的内部开始, 由制造和残余应力造成	主要是晶间开裂, 也可以是穿晶开裂	腐蚀性物质的浓度, pH 值, 建造材料, 温度, 应力	腐蚀性物质处理部分, 腐蚀性工作, 硫醇处理, 原油加工单元进料预热和脱盐, 含酸水处理, 蒸汽系统
连多硫酸腐蚀	敏感条件下奥氏体不锈钢在湿的连多硫酸环境下的开裂。连多硫酸是由 FeS 遇到水和氧气转化而来	晶间开裂	建造材料, 敏感的微观结构, 水, 连多硫酸	通常发生在催化裂化反应器和烟气系统以及脱硫炉和加氢处理的奥氏体不锈钢中发生

表 A.2 (续)

劣化机理	描 述	表 现 状 态	关 键 变 量	例 子
胺开裂	胺用于气体处理, 溶解 CO_2 和 H_2S 。开裂通常是由被吸收的酸性气体或胺的易造成劣化的产品造成	晶间开裂	胺的类型和浓度, 结构的材料, 温度, 应力	胺处理单元
氨开裂	碳钢和耐酸黄铜的开裂	碳钢是晶间开裂, 锌铜合金是穿晶开裂	结构的材料, 温度和应力	通常出现在氨生产和处理的位置, 例如氨中和冷凝器的封头
氢引起的开裂和应力导致氢引起开裂	碳钢和低合金钢遇到水和 H_2S 时发生。氢原子通过腐蚀, 扩散到材料中以及与其他氢原子反应在钢内产生氢气分子的方式破坏材料。劣化的形式可以是起泡和设备在消除应力热处理中不当或未进行应力热处理产生的裂纹	平面裂纹 (气泡), 气泡向焊缝发展时形成的穿晶开裂	H_2S 的浓度, 水, 温度, pH 值, 结构的材料	粗加工, 催化裂化, 气体回收, 加氢处理, 酸水处理和焦化单元中水和 H_2S 同时出现的地方
硫化物的应力开裂	碳钢和低合金钢遇到水和 H_2S 时发生。劣化的形式是由于没有或采用不当的应力热处理所产生的裂纹	穿晶开裂, 通常伴随组装、附加或维修焊接中产生	H_2S 的浓度, 水, 温度, pH 值, 结构的材料, 焊后热处理的条件, 硬度	粗加工, 催化裂化, 气体回收, 加氢处理, 酸水处理和焦化单元中水和 H_2S 同时出现的地方
氢气泡	碳钢和低合金钢遇到水和 H_2S 时发生。氢原子通过腐蚀, 扩散到材料中以及与其他氢原子反应在钢内产生氢气分子的方式破坏材料。劣化的形式可以是表面气泡, 可以发生在消除应力热处理和未进行消除应力热处理的设备中	平面裂纹 (气泡)	H_2S 浓度, 水, 温度, pH 值, 建造材料	粗加工, 催化裂化, 气体回收, 加氢处理, 酸水处理和焦化单元中水和 H_2S 同时出现的地方
氰化氢	在氰化氢可以促进氢劣化时发生, 使铁的硫化物保护层剥落	平面开裂和穿晶开裂	存在一定浓度 HCN , H_2S , 水, 温度, pH 值, 建造材料	粗加工, 催化裂化, 气体回收, 加氢处理, 酸水处理和焦化单元中水和 H_2S 同时出现的地方

表 A.3 金属和环境失效

劣化机理	描 述	表 现 状 态	关 键 变 量	例 子
高温氢侵蚀	碳钢和低合金钢遇到高温氢时发生, 通常烃的流体中含有氢。在高温 [温度 $> 260^\circ\text{C}$ (500°F)] 下, 材料劣化是由甲烷气体沿晶体边界形成裂纹引起的。原子氢扩散进材料, 与钢中的碳反应, 产生甲烷, 这样就消耗了碳钢	晶间裂纹开裂, 脱碳	建造材料, 氢的分压, 温度, 工作的时间	发生在烃加工工艺的反应段, 如加氢脱硫、加氢裂化、重整加氢和氢生产的装置
晶粒生长	在钢加热到一定温度以上时发生, 碳钢从 593°C (1100°F) 开始, 大部分从 732°C (1350°F) 开始, 奥氏体不锈钢和镍铬合金在 899°C (1650°F) 开始晶粒增大	局部	最高温度, 最高温度的时间, 结构的材料	炉管失效, 火损害设备, 易发生停止反映的设备

表 A.3 (续)

劣化机理	描 述	表现状态	关键变量	例 子
石墨化	由于长期暴露在 440℃ (825°F) ~760℃ (1400°F) 范围内, 珠光体颗粒分解成软弱的铁素体颗粒和石墨	局部	结构的材料, 暴露的时间和温度	FCC 反应器
δ 相脆化	奥氏体不锈钢和其他铬含量超过 17% 的不锈钢在较长时间暴露在 593℃ (1100°F) ~816℃ (1500°F) 范围内	在总体范围内产生	结构的材料, 暴露的时间和温度	铸造炉管和部件, FCC 中的再生旋风分离器
474℃ (885°F) 脆断	发生在不锈钢中铁素体在 343℃ (650°F) ~593℃ (1100°F) 形成段, 使在大气环境下延展性降低	在总体范围内产生	结构的材料, 暴露的时间和温度	停工期间进行的煅烧处理形成裂纹
回火脆化	低合金钢长期维持在 371℃ (700°F) ~566℃ (1050°F) 范围内。操作温度下, 韧性没有明显变化, 在环境温度下很差能引起脆断	在总体范围内产生	材料的结构, 暴露的时间和温度	在停工和启动阶段, 老的炼油厂的设备可能会出现这样的问题, 因为它运行时间较长, 足以产生这样的条件。加氢处理和加氢裂化装置可能产生这类问题, 因为它们在高温下工作
液态金属导致脆化	普通延展性的金属与液态金属接触并受到拉伸应力时形成灾难性脆断。例子包括不锈钢与锌的结合和铜基合金与汞的结合	局部	建造材料, 拉应力, 存在液态金属	原油存在现汞, 在随后蒸馏时在某些设备(如冷凝器的管道)温度低的位置浓缩和集中。众所周知应用汞的仪表的失效会将液体金属引入炼油厂工艺物料中
渗碳	高温引起碳向金属内扩散。碳含量的增加, 会导致铁素体钢和一些不锈钢的硬化。渗碳钢冷却后, 会形成易脆断结构	局部	建造材料, 温度和暴露的时间	有焦炭沉积的炉管(管内)是渗碳的一个很好例证
脱碳	铁合金表面被加热到中等温度会与碳反应, 使其表面失去碳	局部	建造材料, 环境温度	碳钢炉管。由火焰造成的过度加热(管外表)
金属粉尘化	主要发生在: 渗碳钢在 482℃ (900°F) ~816℃ (1500°F) 温度下, 被氢、甲烷、CO、CO ₂ , 以及轻质烃的混合物消耗	局部	温度, 工艺物料的成分	脱氢单元, 燃烧加热炉, 焦化炉, 裂化单元和气体透平
选择性析出	多相合金中的一个相优先损失	局部	工艺物料的条件, 建造材料	水冷系统中的耐酸管道

表 A.4 机械失效

劣化机理	描述	表现状态	关键变量	例子
机械疲劳	使用的循环应力超过材料的疲劳限度, 引发部件的断裂	局部	循环应力的等级, 建造材料	泵和压缩机的往复部件, 旋转设备的轴和相连的管, 旋转设备, 如摆动式减压器
腐蚀疲劳	腐蚀过程, 特别是点蚀促进增加了机械疲劳, 由此形成的疲劳	局部	循环应力, 结构的材料, 工艺物料中存在点蚀的能力	气包的封头, 锅炉管
气蚀	由于压力的变化导致金属表面的液体快速形成气泡或破裂造成的腐蚀	局部	工艺物料的压力	泵的叶轮的背部, 弯头
机械劣化	典型的例子是设备和工具的错用, 风力裂化, 设备运送和安装时的误处理	不确定 (N/A)	设备的设计, 操作程序	当没有使用保护盖或不小心处理时使法兰面或其他受机械加工的座口表面可能损坏
超载	载荷超过设备允许的最大载荷时发生	不确定 (N/A)	设备的设计, 操作程序	水压试验时由于重力过大导致支撑结构的超载。热膨胀和收缩会产生超载问题
超压	压力超过设备允许的最大的工作压力	不确定 (N/A)	设备的设计, 操作程序	由于调整工艺参数导致的过热能够引起过压; 截止设备在设计上不能承受工艺的最高压力
脆断	钢的缺口韧性试验值和冲击强度试验值低, 造成延展性降低	局部	建造材料, 温度	缺乏预防措施的设备的压力试验
蠕变	高温机理, 金属在低于正常屈服强度下运行, 发生的连续塑性变形	局部	建造材料, 温度和施加的应力	炉管和炉的支撑
应力断裂	所受应力低于屈服应力的金属在高温下失效的时间	局部	建造材料, 温度和施加的应力, 暴露的时间	炉管
热震动	由于膨胀和收缩的差别, 在设备的某一部件上短时间形成的大而不同的热应力, 会发生热震动。如果设备的运动对设备的移动作了限制, 会产生超过屈服强度的应力	局部	设备的设计, 操作程序	在偶发的介质中断或受到火焰时容易产生
热疲劳	由于温度的循环变化导致材料的应力循环变化, 在这个过程中产生热疲劳	局部	设备的设计, 操作程序	焦化炉受到循环热并伴有热疲劳裂纹。反应器上的旁通阀和由于焊接较多造成加强的管道, 在循环温度下工作, 也容易产生热疲劳