

实验 10 反渗透法制备超纯水实验

1. 技术背景与实验目的

反渗透是与自然渗透过程相反的膜分离过程。它是通过半透膜来完成的。在浓溶液一侧施加比自然渗透压更高的压力,迫使浓溶液中的溶剂反向透过膜,流向稀溶液一侧,进而分离提纯。渗透压属于溶液的性质之一,与膜材料无关。与其他的膜相似,反渗透膜具有膜的一般特点,主要表现为:①膜分离过程不发生相变,分离系数较大,和其他方法相比能耗较低;②操作温度在室温左右;③分离装置简单,操作容易,控制及维修简单。此外,反渗透膜还有它所独有的特点。

现代高技术产业的发展对化学制品提出了越来越高的纯度要求,例如,超大规模集成电路以及宇宙航空用设备的制造过程,对所使用溶剂的纯度要求十分苛刻。水作为无毒、无害的“绿色”溶剂,成为这些工业的首选溶剂之一。然而,地球上所存在的天然水全部混有微量杂质,如 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} 等离子和某些有机杂质,甚至少量微生物,如菌类、病毒等,不能满足高技术产业的要求。近年来,人们根据各种不同场合需求,开发了几种纯水制造系统,其中电渗析-反渗透膜分离-离子交换联合流程,能够生产电导率达兆级的超纯水,它是这一工艺过程的典型代表。利用电渗析去除原水中大部分离子,可减轻反渗透膜分离负荷,保证系统长期稳定运行。反渗透膜能够分离全部不溶物,彻底脱除菌类、病毒等微生物和大部分有机化合物,各种离子脱除率达到 99% 以上,在超纯水制造工艺过程中起关键作用。

通过反渗透实验教学,希望达到以下目的:

(1) 学习和掌握反渗透膜分离基本原理,了解主要设备构成,操作方法,学习过程耦合中的处理准则。

(2) 学习化工过程的级联原理与流程设计的基本方法。

(3) 学习化工集成技术的基本原理:几种技术进行有效交叉与组合,可以达到各取所长、发挥优势、完成高度纯化与分离目标。

2. 实验内容

(1) 操作压力对分离效率的影响:通过测定反渗透过程压差与渗透流速的关系,确定反渗透膜的渗透系数。

(2) 反渗透过程的操作方式对动力消耗的影响：测定一级、二级的离子脱除率和水回收率与动力消耗的关系，确定合适级联方式和操作条件。

3. 反渗透原理

自然界中的动物和植物的细胞膜大多数具有选择性透过物质的功能，水溶液中的水分子可以透过细胞膜而溶质分子不能透过，常常将这种具有选择性透过功能的膜称作半透膜。如果将一张人工合成的半透膜固定在容器中，半透膜的一侧加入纯水，另一侧加入盐水（见图 3-13(a)），会发现纯水自动向盐水一侧渗透，盐水侧的液面逐渐升高到某个平衡位置（见图 3-13(b)）。此时两个液面形成的压差称作渗透压。当盐水侧施加压力大于溶液的渗透压时，会发现盐水溶液中的水分子透过半透膜向纯水侧渗透，而盐水中的各种离子被截留（见图 3-13(c)）。利用这种现象可以脱除溶液中的各种离子，进行水的净化。人工合成的半透膜并不能 100% 截留离子，总是在一定的分离效率下工作，通过多级分离才能够完成预定的分离目标。

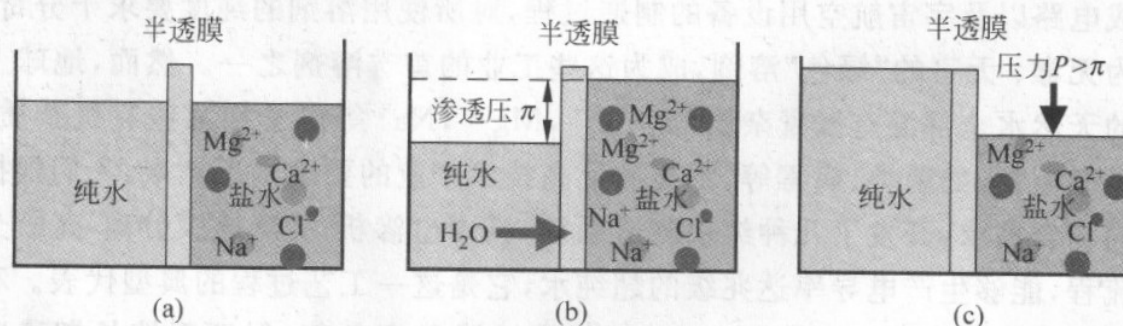


图 3-13 反渗透过程原理示意图

本实验采用北京地区自来水作为原水，其基本物理化学指标如下：

浑浊度：500~1500mg/L 矿化度：200~500mg/L

总硬度：1.5~3mmol/L pH = 7.0~8.0

要求经过两级反渗透处理后，水质达到以下指标：

电导率小于 10 μ S/cm(25℃) pH = 6.6~7.4 COD < 0.5

4. 实验装置和流程

本系统采用“预处理+一级反渗透+二级反渗透”流程。预处理采用：石英砂过滤+活性炭过滤+精密过滤+保安过滤。通过预处理的原水应该能有效地保证 RO 膜组件长期正常工作。一级反渗透通过主阀、高压泵，进入 RO 膜，出水经监测后到中间罐。经二级高压泵后进入 RO 膜，出水监测后回原水罐。实验流程如图 3-14 所示。

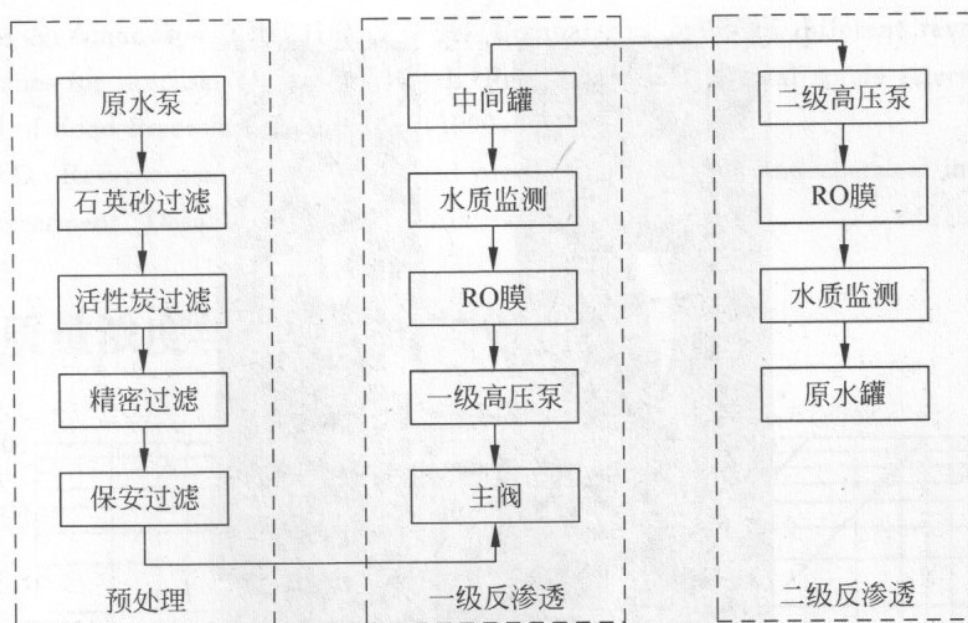


图 3-14 反渗透实验流程

1) 反渗透系统流程说明

(1) 原水经原水泵进入预处理部件,首先流入石英砂过滤器,滤除较大的颗粒泥砂、悬浮物等各种机械杂质,进入活性炭过滤。活性炭会把砂滤去除不掉的余氯及有机物截留下来,然后到精密过滤和保安过滤。精密过滤和保安过滤是完全相同的两套装备,只不过用在不同的位置叫不同的名字。但是,后者的滤芯要大于前者的滤芯,本实验设备分别为 $10\mu\text{m}$ 和 $5\mu\text{m}$ 。

(2) 一级 RO 包括 2 个不锈钢压力容器,共装入 2 个 4040RO 膜组件。预处理水经主阀高压泵进入膜组件,产出纯水经流量计电导仪在线监测后到中间罐。浓水一部分经浓水调节阀排放,一部分经流量计单向阀回收到主机入口,重新进行处理。本系统刚开机时将浓水电磁阀打开进行冲洗,大量的水冲刷 RO 膜表面后被排放,冲洗完毕后(冲洗时间可调),系统会自动进入工作状态。所用反渗透实验装置如图 3-15 所示,在开机前需要检查阀门系统的开关状态,以免超压运行,开机后通过调整高压泵出口阀门开度控制反渗透膜组件的运行压强差。高压泵运行时,有供频和变频两种运行方式,通常使用变频方式。

(3) 中间罐内设有液位控制,控制二级 RO 主机启停时间。中间罐内无水停机,有水开机,以免二级 RO 系统中的高压泵无水空载运行。

2) 注意事项

(1) 在运行时,不论何时两级 RO 系统的浓水排放阀都不允许关闭,以免使 RO 膜受高压冲击被冲坏,在调整时可先开至最大,再慢慢调小到额定压力与流量。

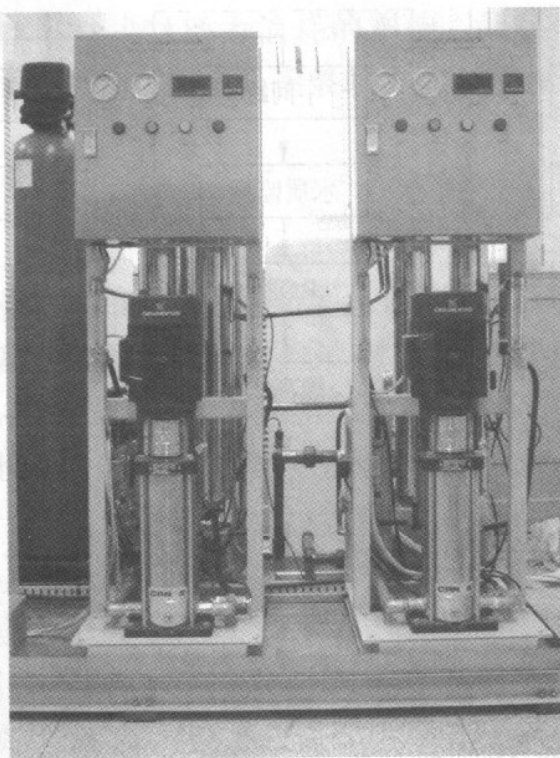


图 3-15 反渗透实验装置

(2) 长期停运时,RO 系统长时间不通水(特别是在炎热的夏天),会造成严重的微生物污染。所以需要定期通水,或充入保护液(1%甲醛)。

(3) 在开机时,石英砂过滤器、精密过滤器和保安过滤器必须进行排气处理。

(4) 检修与维修时必须关掉总电源。

5. 实验思考题

(1) 推导出稀溶液的渗透压公式并计算 25℃ 时含 NaCl 3.5%(质量分数)的海水渗透压,以及含 NaCl 0.1%(质量分数)的苦咸水渗透压。

(2) 提高反渗透系统的水回收率受哪些条件限制? 如何克服?

(3) 综述现有 RO 用膜种类和膜分离性能。

(4) 综述现有 RO 技术的应用领域。

6. 参考文献

- 1 马成良. 我国反渗透技术发展浅析. 膜科学与技术, 1998, (3): 62~63
- 2 张颖, 顾乎, 齐庚申. 膜技术应用于饮用水处理的进展间. 中国给水排水, 2001, 17(5): 29~32

- 3 Morales A, Amundson C H, Hill C G Jr. Comparative study of different reverse osmosis membranes for processing dairy fluids. I. Permeate flux and total solids rejection studies. Journal of Food Processing Preservation, 1990, 14, 39~58
- 4 Pepper D. Reverse osmosis for improved products in the food and chemical industries and water treatment. Desalination, 1990, 77, 55~77

附 1 质量浓度与电导率的关系

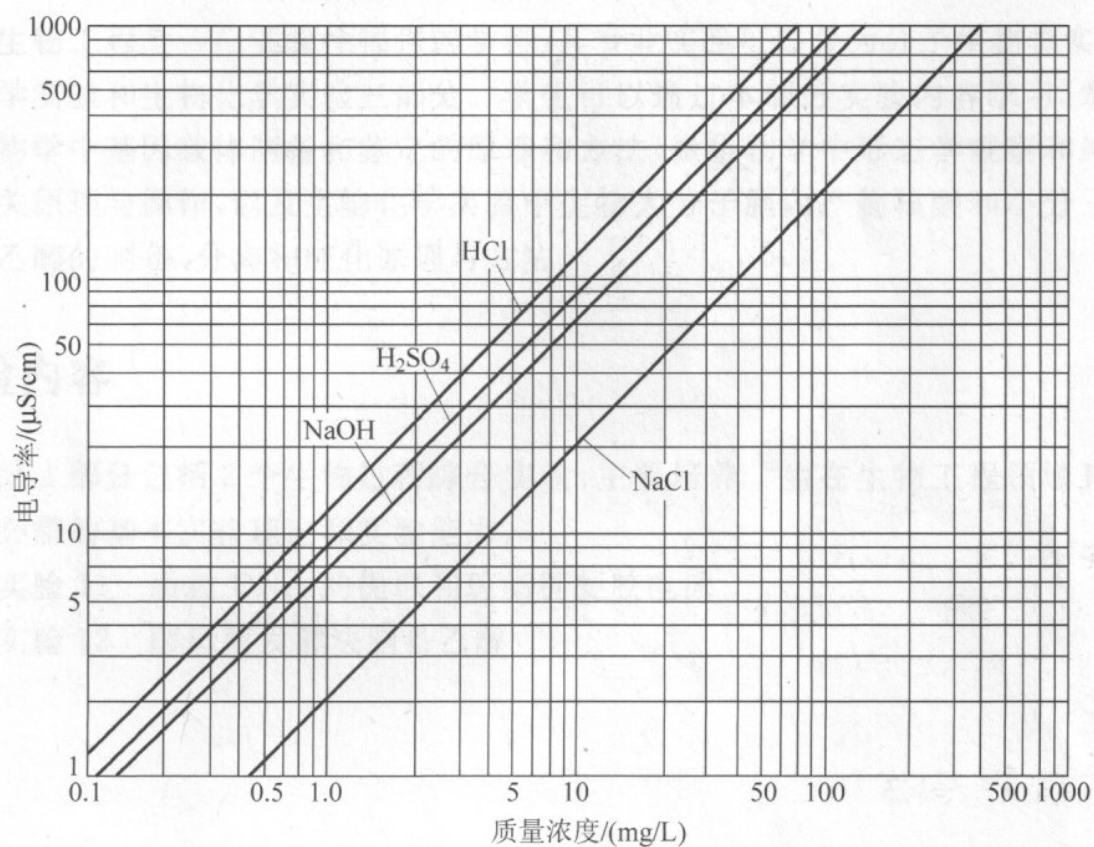


图 3-16 质量浓度与电导率的关系(25℃)