

实验 9 电渗析制备去离子水实验

1. 实验目的

在直流电场作用下,离子透过选择性离子交换膜而迁移,从而使电解质离子自溶液中部分分离出来,这一过程称为电渗析(electrodialysis,ED)。该方法是在离子交换基础上发展起来的一种高效膜分离技术,分离的基本依据是离子在电场作用下的定向运动和离子交换膜的选择透过性。电渗析膜分离技术的主要特征见表 3-1。由于具有能耗低、操作简便、使用寿命长、无污染等优点,电渗析技术自 20 世纪 50 年代确立以来,已经广泛应用于各种领域,如天然水淡化、海水浓缩制盐、废水处理、食品、医药工业以及化工产品精制等。

表 3-1 电渗析膜分离技术的主要特征

膜	阳离子交换膜和阴离子交换膜
厚度	约为几百 μm (100~500 μm)
孔尺寸	无孔
推动力	电位差
分离原理	Donnan 排斥机理
应用	水脱盐、食品和制药工业中脱盐、分离氨基酸、生产盐

基于以上背景,电渗析过程已经成为电场下膜分离过程的典型代表,希望通过实验学习达到以下目标。

- (1) 学习和掌握电渗析法进行水质软化的基本原理,熟悉电渗析器的构造、电渗析过程设计的基本方法。
- (2) 掌握电渗析基本特性的测定和评价方法,对极限电流密度进行测定。
- (3) 确定电渗析操作的优化条件,对电流效率、脱盐率以及淡水产量进行综合评估。

2. 电渗析过程原理

电渗析过程是利用具有选择透过性的阴阳离子交换膜,以外加电场作为推动力,引起离子定向迁移从而除去水中溶解的各种带电粒子的分离技术。所使用的

离子交换膜是由高分子材料制成的对离子具有选择透过性的薄膜,主要分为阳离子交换膜(cation-exchange membrane, CM)和阴离子交换膜(anion-exchange membrane, AM)两种。阳膜由于膜体固定基团带有负电荷离子,可以选择透过阳离子;阴膜由于膜体固定基团带有正电荷离子,因此选择透过阴离子。

电渗析过程的最基本工作单元称为膜对,由一张阳膜、淡水隔板、阴膜和浓水隔板组成,构成一个脱盐室(淡室,dc)和一个浓缩室(浓室,cc)。而通常将阴、阳离子膜交替排列,再加上一对端电极,就构成了一台电渗析器。如图 3-10 所示,以电渗析器各系统进液均为 NaCl 溶液为例,当电极两侧施加直流电场时,淡室中 Na^+ 向阴极方向迁移, Cl^- 向阳极方向迁移,由于离子膜的选择透过性, Na^+ 和 Cl^- 分别透过阳膜和阴膜迁移到相邻隔室中。因此,淡室中 NaCl 浓度不断降低,而相邻的浓室浓度逐渐增加。

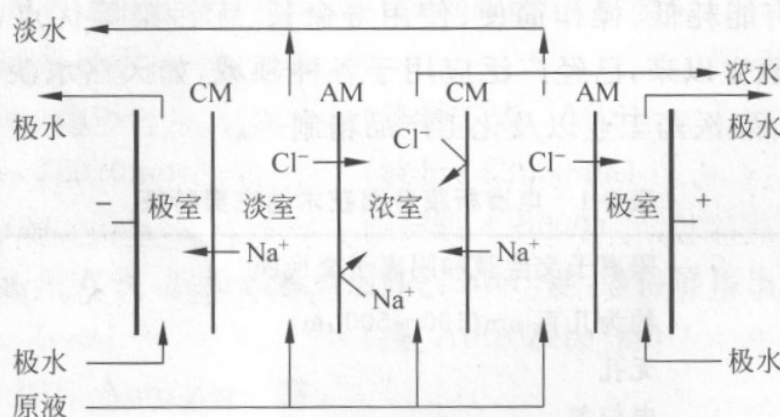


图 3-10 电渗析器工作原理示意图

1) 电渗析技术的基本应用

(1) 从电解质溶液中分离出部分离子,使电解质溶液浓度降低。如海水、苦咸水淡化制取饮用水与工业用水,放射性废水的处理等。这是电渗析技术最成熟、应用最广泛的领域。

(2) 将溶液中部分电解质离子转移到另一溶液体系中,并使其浓度增加。海水浓缩制盐就是这方面成功运用的典型例子,还有化工产品的精制浓缩、工业残液中有用成分的回收等。

(3) 从有机溶液中去除电解质离子。目前主要用于食品和医药工业,例如乳清脱盐、糖类脱盐和氨基酸脱盐精制等。

(4) 用于电解质溶液中电性相同但电荷数不同的离子的分离。例如,使用只允许一价离子通过的离子交换膜浓缩海水制盐。

2) 离子交换膜

离子交换膜是电渗析装置的重要组成部分,它对离子的选择透过机理和离子在膜中的迁移可以通过以下三种作用加以说明。

(1) 孔隙作用:贯穿膜体内部的是弯曲的通道,这些孔隙可以将大小不同的分子加以分离。孔隙作用的强弱主要取决于孔隙度的大小和均匀程度。

(2) 静电作用:由于膜体内分布着带电荷的固定离子交换基团,因此在膜内构成了强烈的电场。阳膜为负电场,阴膜为正电场。依据静电效应,阳膜只能选择吸附阳离子,而阴膜只能选择吸附阴离子。

(3) 扩散作用:离子透过膜的过程可以分为选择吸附、交换解吸和传递转移三个阶段。膜对溶解离子所具有的传递迁移能力称为扩散作用,依赖于膜内活性离子交换基团和孔隙的存在。

以上三方面是膜本身的作用,外加电场则是实现离子交换膜选择透过性必不可少的条件。从理论方面探讨,它的选择透过性可以通过 Donnan 平衡理论加以解释。实质上,电渗析脱盐或浓缩过程得以实现,就是借助于电解质离子在膜相迁移数与溶液相中迁移数的差。同时,在电渗析过程中,还会因为在膜两侧存在浓度差和压力差而发生电解质离子的扩散和反渗透等过程。因此,实际电渗析过程中存在多种作用力下的多种物流流动。

3. 实验装置和操作

1) 实验装置和流程

采用上海化工厂生产的异相离子交换膜,干燥状态膜厚约 0.8mm,共有 120 对阴离子交换膜和阳离子交换膜交替排列,分为 4 段,每段 30 对膜片。

本系统的正常工作流程如图 3-11 所示。

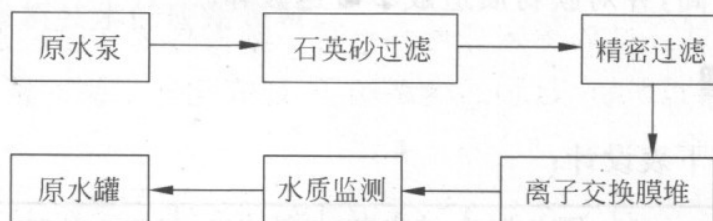


图 3-11 电渗析装置工作流程

采用北京地区的自来水作为原水。混浊度: 500~1500mg/L; 矿化度: 200~500mg/L; 总硬度: 1.5~3mmol/L; pH: 7.0~8.0。

要求处理以后：产水电导率 $<30\mu\text{S}/\text{cm}(25^\circ\text{C})$ ； $\text{pH}=6.6\sim7.4$ ； $\text{COD}<0.5\text{mg}/\text{L}$ 。

2) 实验步骤

实验装置如图 3-12 所示。接通电源,启动装置,改变原水流量分别为 $6\text{L}/\text{min}$ 和 $3\text{L}/\text{min}$,记录膜堆电压、膜堆电流、原水电导率、浓水电导率、浓水流量、淡水流量以及入口压强等参数的变化。

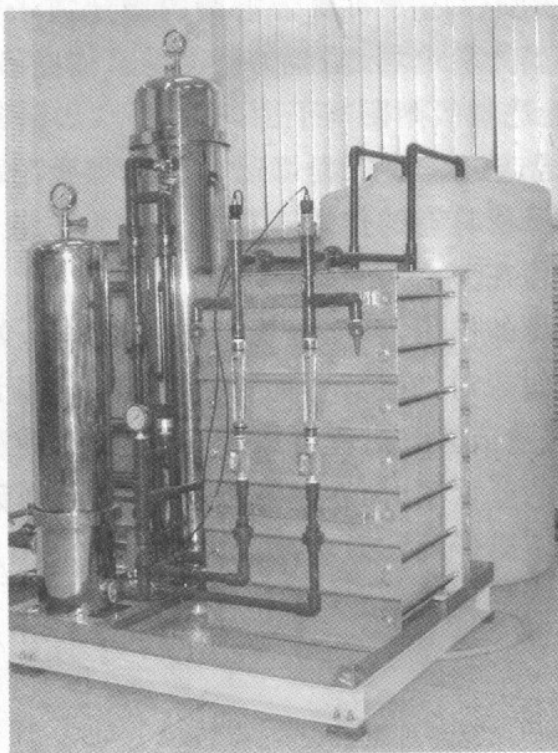


图 3-12 电渗析实验装置

3) 操作过程和注意事项

运行时要注意“先开水,后通电”,停止时则需要“先断电,后停水”。空载运行将导致设备温度过高,并对膜材质造成不可逆破坏。

4) 实验数据处理

实验记录可按下表设计：

序号	膜堆 电压/V	膜堆 电流/A	原水电 导率/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	浓水电 导率/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	淡水 电导率/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	浓水流 量/(L/h)	淡水 流量/ (L/h)	入口压强/ (L/h)

数据处理过程如下。

(1) 作图表示电渗析过程中的电流-电压关系,并计算极限电流密度。其中极限电流密度的表达式为

$$i_{\text{lim}} = \frac{I_{\text{max}} \times 10^3}{S} (\text{mA}/\text{cm}^2) \quad (3-9)$$

式中: S 为隔板的有效面积, cm^2 , 本实验中 $S=2625\text{cm}^2$ 。

(2) 研究相同电流条件下操作流速对脱盐效率的影响。脱盐效率的表达式如下:

$$\eta = \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}} \times 100\% \quad (3-10)$$

式中: C_{in} 为入口浓度, mg/L ; C_{out} 为出口浓度, mg/L 。

(3) 研究电流密度对脱盐效率的影响。

(4) 研究操作流速对电渗析过程电流效率的影响,其中电渗析电流效率的计算公式为

$$\eta = \frac{Q(C_{\text{in}} - C_{\text{out}})}{I \times 2.18 \times 10 \times n} \times \% \quad (3-11)$$

式中: Q 为淡水产量, L/h ; C_{in} 为入口浓度, mg/L ; C_{out} 为出口浓度, mg/L ; I 为电流, A ; 2.18 为 NaCl 的转换常数; 10 为单位换算值; n 是电渗析器的脱盐室中离子膜的对数, 本实验中 $n=30$ 。

4. 实验思考题

- (1) 提高电渗析系统的水回收率受哪些条件限制? 如何克服?
- (2) 极限电流密度和脱盐率分别与哪些因素有关?
- (3) 浓水的浓度受哪些因素的限制?
- (4) 综述现有的电渗析用膜种类和膜分离性能。
- (5) 综述电渗析技术的应用领域。

5. 参考文献

- 1 时钧, 袁权, 高从. 膜技术手册. 北京: 化学工业出版社, 2001. 421~423
- 2 Mohammadi T, Kaviani A. Water shortage and seawater desalination by electrodialysis. Desalination, 2003, 158: 267~270
- 3 Schugerl K. Integrated processing of biotechnology products. Biotechnology Advances, 2000, 18 (7): 581~599

- 4 Blackburn J W. Electrodialysis applications for pollution prevention in the chemical processing industry. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, 49 (8): 934~942
- 5 Cauwenberg V, Peels J, Resbeut S, et al. Application of electrodialysis within fine chemistry. *Separation and Purification Technology*, 2001, 22(1-3): 115~121
- 6 Janssen L J J, Koene L. The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection. *Chemical Engineering Journal*, 2002, 85 (2-3): 137~146
- 7 Koter S, Warszawski A. Electromembrane processes in environment protection. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2000, 9 (1): 45~56