

不同离子交换膜电渗析浓缩的性能对比

李 丽¹ 金 艳¹ 孙淑英¹ 于建国¹ 吴福平²

1. 华东理工大学国家盐湖资源综合利用工程技术研究中心, 上海 200237;

2. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘 要:电渗析技术已广泛应用于高盐废水浓缩处理,离子交换膜则是电渗析技术的核心部分。研究对比了国内外五种纯浓缩离子交换膜的基本性能,考察了不同操作条件对浓缩效果的影响,研究表明: Na^+ 在不同离子交换膜中的迁移速率大小顺序为 $\text{AGC} \approx \text{FUMATECH} > \text{ASTOM} > \text{FUJIFILM} > \text{YICHEN}$;不同离子交换膜的能耗顺序为 $\text{AGC} \approx \text{ASTOM} < \text{FUMATECH} < \text{FUJIFILM} < \text{YICHEN}$;综合各项性能指标,五种离子交换膜中,AGC的传质性能好,能耗低,应用于纯浓缩工艺更占有优势。考察不同离子交换膜的电化学性能,传质性能及能耗情况,对电渗析技术的工程化应用具有指导意义。

关键词:电渗析;离子交换膜;浓缩倍数;传质性能;能耗

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.06.016

Performance of Different Ion Exchange Membranes on Electrodialysis Concentration

Li Li¹, Jin Yan¹, Sun Shuying¹, Yu Jianguo¹, Wu Fuping²

1. National Engineering Research Center for Integrated Utilization of Salt Lake Resources, East China University of Science and Technology, Shanghai, 200237, China;

2. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract: Electrodialysis technology has been widely used in the concentration of high-salt wastewater, and the ion exchange membrane is the core of electrodialysis. In this paper, the basic properties of five concentrated ion exchange membranes was investigated. Intermittent electrodialysis experiments were carried out to investigate the effect of different operating conditions on concentration. The order of Na^+ migration rate of different ion exchange membranes was $\text{AGC} \approx \text{FUMATECH} > \text{ASTOM} > \text{FUJIFILM} > \text{YICHEN}$, obtained by continuous electrodialysis experiments. While the order of energy consumption is $\text{AGC} \approx \text{ASTOM} < \text{FUMATECH} < \text{FUJIFILM} < \text{YICHEN}$. It is indicated that the AGC membrane has better mass transfer performance and lower energy consumption, which is more advantageous for the pure concentration process. The study on electrochemical properties, mass transfer performance and energy consumption of different ion exchange membranes provides guidance for the engineering application of electrodialysis.

收稿日期:2018-10-09

基金项目:上海市青年科技英才扬帆计划(17 YF 1403200)

作者简介:李 丽(1994-),女,浙江舟山人,硕士研究生,主要从事工业水处理研究。

Keywords: Electrodialysis; Ion exchange membranes; Concentration ratio; Mass transfer performance; Energy consumption

0 前言

电渗析技术是在直流电场作用下,以电位差为推动力,利用离子交换膜的选择透过性,把电解质从溶液中分离出来,从而实现溶液的浓缩、淡化、精制和提纯的技术。膜过程因其较低的能耗、较小的环境污染越来越受到关注^[1],制膜工艺、膜材料的发展又极大地拓宽了膜过程的应用领域^[2],如水处理^[3-5]、制药^[6]、食品^[7]等。

离子交换膜是电渗析技术的关键部分,其性能主要包括离子交换、传质和电化学性能,一般认为较理想的离子交换膜应具备选择透过性好、膜电阻小、化学稳定性好、机械强度高和扩散性低等性能^[8]。在膜性能测试和评价方面,已有学者做了一些研究工作,莫剑雄^[9]研究了膜传质性能测量方法;Tanaka Y^[10]从传质性能和电化学性能方面,评价了三种离子交换膜(Aciplex K 172 /A 172、Selemion CMR /ASR、Neosepta CIMS /ACS 3),并解释了膜表面水解离机理;徐会从^[8]通过极限电流、浓缩效果、能耗、水渗透等性能比较筛选适合海水浓缩的膜。本文的研究通过对不同膜的传质性能、电化学性能、能耗等评价,筛选出适用于零排放浓缩工艺的优质膜,并通过实验优化了电渗析操作条件,对电渗析浓缩工艺的工程化应用具有指导意义。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

电渗析装置结构见图1,膜堆由20对阴阳离子交换膜交替排列组成,膜尺寸160 mm×280 mm,有效膜面积0.021 m²。膜堆两侧通过电极与整流器连接,阳极材料为钛镀铱,阴极材料为不锈钢。每个隔室配有离心泵,用于输送液体进入膜堆、返回储槽完成循环。设备电压、电流由外置稳流器控制,可实现稳压、稳流两种操作模式。

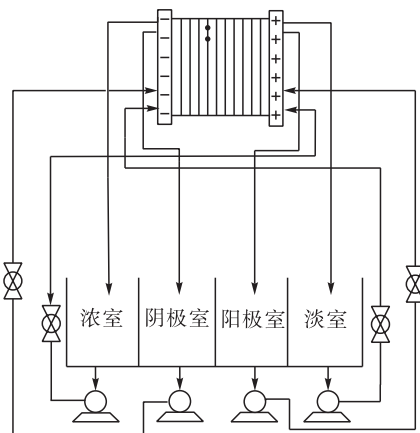


图1 电渗析装置结构

实验中选用市场上所售不同厂家的均相离子交换膜,具体型号见表1。

表1 不同离子交换膜

生产厂家	阳离子交换膜型号	阴离子交换膜型号
日本旭硝子(AGC)公司	CMV	AMV
日本 Astom 公司	CMX	AMX
荷兰 Fujifilm 公司	CEM-I	AEM-I
德国 Fumatech 公司	FKS	FAS
易辰膜科技有限公司	LCM	LAM

1.2 膜性能分析项目和检测方法

1.2.1 离子交换膜含水量

预处理方法^[11]:将4 cm×4 cm待测膜用4% NaOH和4% HCl交替处理2次,每次4 h,再用去离子水浸泡24 h清洗,将阳离子交换膜转化为H⁺型、阴离子交换膜转化为Cl⁻型。

将预处理后的膜迅速用滤纸吸干样品表面吸附水,称量湿重W₁;60℃下烘干至恒重,迅速测定干重W₂,含水量计算式为:

$$W = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中:W₁为湿重,g;W₂为干重,g。

1.2.2 离子交换膜交换容量

先将离子交换膜进行上述预处理,取预处理后的阳离子交换膜于100 mL的2 mol/L NaCl中浸泡12 h,阳离子交换膜基团上吸附的H⁺被Na⁺置换,取50 mL的浸出液用0.1 mol/L NaOH和酚酞指示剂滴定,阳离子交换膜内可交换的H⁺含量即为阳离子交换膜的交换容量^[12]:

$$A_{\text{阳膜}} = \frac{2C_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}}}{1000W_2} \quad (2)$$

式中:A_{阳膜}为阳离子交换膜的交换容量,mmol/g;W₂为干重,g;C_{NaOH}为用于滴定的标准NaOH的浓度,mol/L;V_{NaOH}为滴定消耗的NaOH体积,mL。

取预处理后的阴离子交换膜于100 mL的1 mol/L NaNO₃中浸泡12 h,用NO₃⁻置换出阴离子交换膜内的Cl⁻,用AgNO₃滴定法测定Cl⁻的含量即为阴离子交换膜的交换容量:

$$A_{\text{阴膜}} = \frac{2C_{\text{AgNO}_3} \cdot V_{\text{AgNO}_3}}{1000W_2} \quad (3)$$

式中:A_{阴膜}为阴离子交换膜的交换容量,mmol/g;C_{AgNO₃}为用于滴定的标准AgNO₃的浓度,mol/L;V_{AgNO₃}为滴定消耗的AgNO₃体积,mL。

1.2.3 膜电阻测定

采用电化学阻抗谱(EIS)测膜电阻^[13],将由不同离子交换膜分离的2个槽组成的电化学电池与电化学工作站(美国ParStat 4000)连接,采用4电极体系^[14],2个Ag/AgCl参比电极放置于膜片两侧,用于测试膜两侧的电势差和阻抗,膜片有效面积0.785 cm²,电化学阻抗谱的测试频率1 000~0.01 Hz,交流电压振幅0.01 V。交流电高频段电阻代表溶液和膜电阻之和(R_{m+s}),溶液电阻(R_s)可通过空白实验(装置中无膜)测出,膜电阻(R_m)由溶液和膜电阻之和(R_{m+s})减去溶液电阻(R_s)得到^[15]。

1.2.4 膜结构扫描电镜分析

离子交换膜表面形貌分析采用美国FEI公司的Quanta 250环境扫描电子显微镜^[16],SEM具体工作参数:分辨率(30 kV)3.0 nm、加速电压200~30 kV。

1.3 离子交换膜浓缩性能研究和评价方法

实验过程中考察了5种实验用膜的不同性能。实验分别考察了电压、浓室流量及初始浓度对浓缩效果的影响,通过连续性实验,测试了膜的传质性能。

1.3.1 浓缩倍数

浓缩倍数是指浓缩液中Na⁺浓度与原料液中Na⁺浓度之比。

$$N = \frac{C_{Na,C}}{C_{Na,F}} \quad (4)$$

式中: N 为浓缩倍数; $C_{Na,C}$ 为浓缩液Na⁺浓度,mg/L; $C_{Na,F}$ 为原料液Na⁺浓度,mg/L。

1.3.2 能耗

能耗^[17]是指电渗析在某一时间段消耗的电能与该段时间透过离子交换膜的Na⁺离子质量之比,是评价电渗析过程的主要经济指标。

$$E_{ED} = \frac{U \int_0^t Idt}{(C_{C,t} \cdot V_{C,t} - C_{C,0} \cdot V_{C,0}) \times 3\,600} \quad (5)$$

式中: E_{ED} 为能耗,kWh/kg; U 为电压,V; I 为某时刻电流,A; t 为通电时间,s; $C_{C,0}$ 、 $C_{C,t}$ 分别为浓室初始时刻和 t 时刻Na⁺浓度,mg/L; $V_{C,0}$ 、 $V_{C,t}$ 分别为浓室初始时刻和 t 时刻溶液体积,L。

1.3.3 离子通量

离子通量指在一定电流密度下,单位时间内通过单位膜面积透过Na⁺离子物质的量^[18]。

$$J = \frac{C_{C,t} \cdot V_{C,t} - C_{C,0} \cdot V_{C,0}}{S \cdot t} \quad (6)$$

式中: J 为离子通量,mol/(m²·s); $C_{C,0}$ 、 $C_{C,t}$ 分别为浓室初始时刻和 t 时刻Na⁺浓度,mg/L; $V_{C,0}$ 、 $V_{C,t}$ 分别为浓室初始时刻和 t 时刻溶液体积,L; S 为膜面积,m²; t 为通电时间,s。

1.3.4 水通量

水通量指在一定电流密度下,单位时间内通过单位膜面积水的体积。

$$q = \frac{V_{C,t} - V_{C,0}}{S \cdot t} \quad (7)$$

式中: q 为水通量,m³/(m²·s); $V_{C,0}$ 、 $V_{C,t}$ 分别为浓室初始时刻和 t 时刻溶液体积,L; S 为膜面积,m²; t 为通电时间,s。

2 结果与讨论

2.1 不同离子交换膜性能对比

2.1.1 含水量与膜结构对比

含水量高低,在一定程度上反映了膜结构疏松与紧密程度和离子交换基团浓度大小。一般来说,离子交换膜含水量越高,亲水性越强,交联度越小^[11],但含水量高时,离子交换膜的选择透过性较差,易溶胀,因此含水量需控制在10%~25%之间。不同离子交换膜含水量对比见图2,YICHEN和FUJIFILM膜的含水量最高,其阴阳膜的含水量均超过25%,表明亲水性强;AGC和ASTOM膜的含水量为10%~20%,表明交联度较高,亲水性弱,不易溶胀。

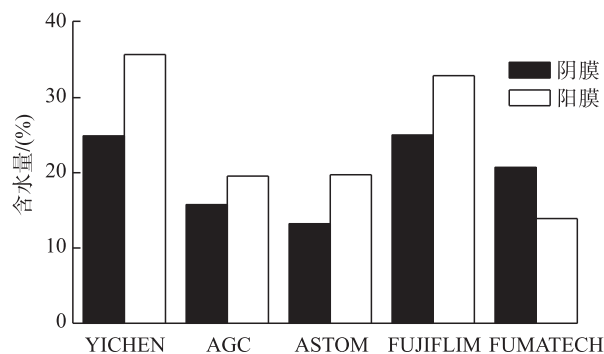


图2 不同离子交换膜含水量对比

不同阴阳离子交换膜表面形貌分析见图3,由图3可看出,FUJIFILM膜的交联程度低,空隙率大,含水量较高,与其含水量测定结果一致;AGC、ASTOM和FUMATECH膜的编织结构相似,编织紧密,交联程度高,含水量相对较低^[19]。

2.1.2 离子交换容量和膜电阻对比

离子交换容量反映了膜内活性交换基团浓度,离子交换容量高,活性基团浓度高,导电性能好。不同离子交换膜的离子交换容量和膜电阻对比见图4,由图4-a)可知,YICHEN膜的离子交换容量最大,分别为2.732、2.392 mmol/g,膜内的活性基团浓度高;FUJIFILM和FUMATECH膜的离子交换容量相对较小,膜内的活性基团浓度低。

膜电阻与膜电导率成反比,离子交换膜电导率取决

于膜本身可电离的活性基团浓度^[11],膜电阻越小,膜电导率越高,膜的活性交换基团浓度越高。由图4-b)可知,阳离子交换膜的膜电阻高于阴离子交换膜时,阴离

子交换膜导电性优于阳离子交换膜;FUJIFILM和FUMATECH膜的膜电阻较高,表明膜内活性基团浓度低,与其离子交换容量测定结果一致。

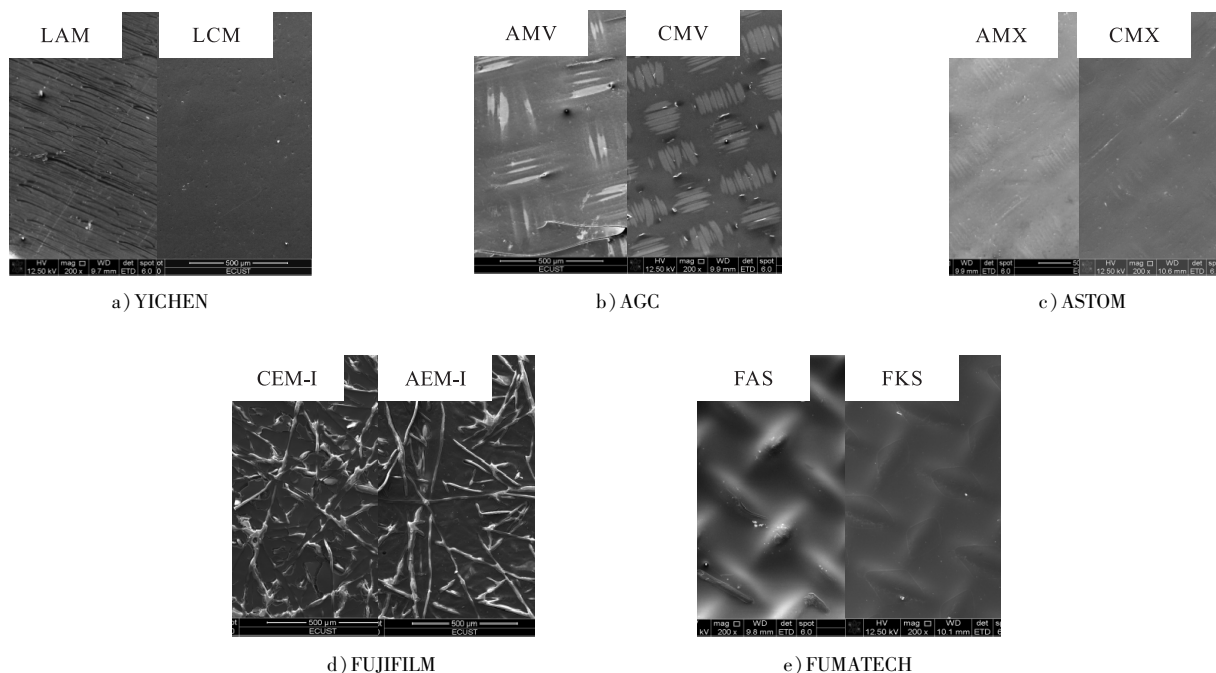


图3 不同阴阳离子交换膜表面形貌分析

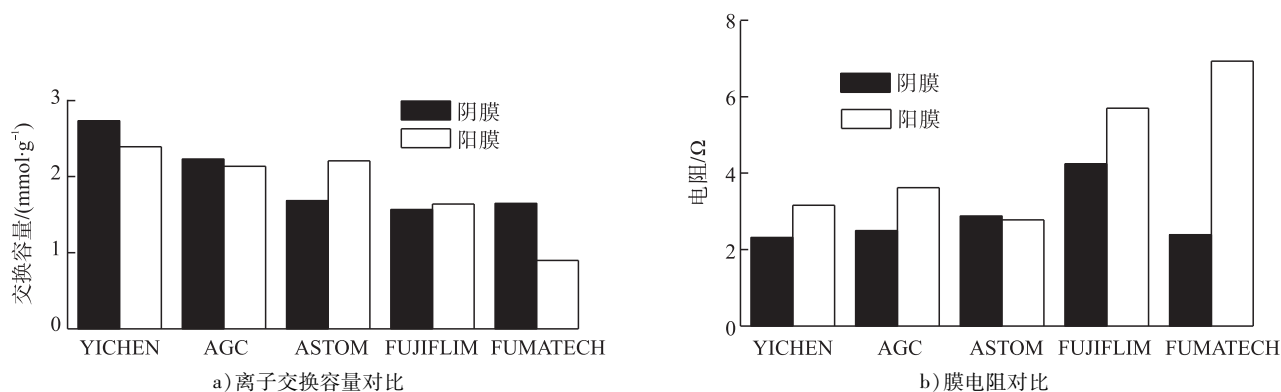


图4 不同离子交换膜的离子交换容量和膜电阻

2.2 不同离子交换膜浓缩性能研究

2.2.1 不同流量比对浓缩效果的影响

本实验中,浓、淡室分别配制3.5 L的30 g/L NaCl盐溶液,控制恒压10 V,保持阴、阳极室循环流量为100 L/h,淡室内循环流量为250 L/h,改变浓室流量分别为100、200、250、300、400 L/h,考察不同流量比对电渗析浓缩效果的影响。不同离子交换膜在不同浓室流量下浓缩倍数及能耗见图5。

由图5可知,不同离子交换膜在不同浓、淡室流量下的最佳浓缩倍数大小顺序为:AGC > ASTOM > FUMATECH ≈ YICHEN > FUJIFILM,分别为2.43、2.21、2.01、1.99、1.87,说明AGC膜的浓缩性能较优;相应的能耗大小顺序为:YICHEN > ASTOM ≈ AGC > FUMATECH > FUJIFILM,表明

YICHEN膜能耗高,FUJIFILM膜能耗较低。

对于同一种离子交换膜,随着浓室流量增大,浓缩倍数有不同程度增加,这主要是因为当浓室流量增大到一定值时,膜表面滞流层的厚度变薄,离子的传递阻力减小^[1],边界层的传质加快,离子的迁移速率增大,使浓缩倍数增大。

2.2.2 不同操作电压对浓缩效果的影响

本实验中,浓、淡室分别配制3.5 L的30 g/L NaCl盐溶液,保持阴、阳极室循环流量为100 L/h,浓、淡室内循环流量为250 L/h,保持浓、淡室流量比为1:1,改变电压分别为6、8、10、12 V,考察不同电压电渗析处理效果的影响。不同离子交换膜在不同操作电压下浓缩倍数及能耗见图6。

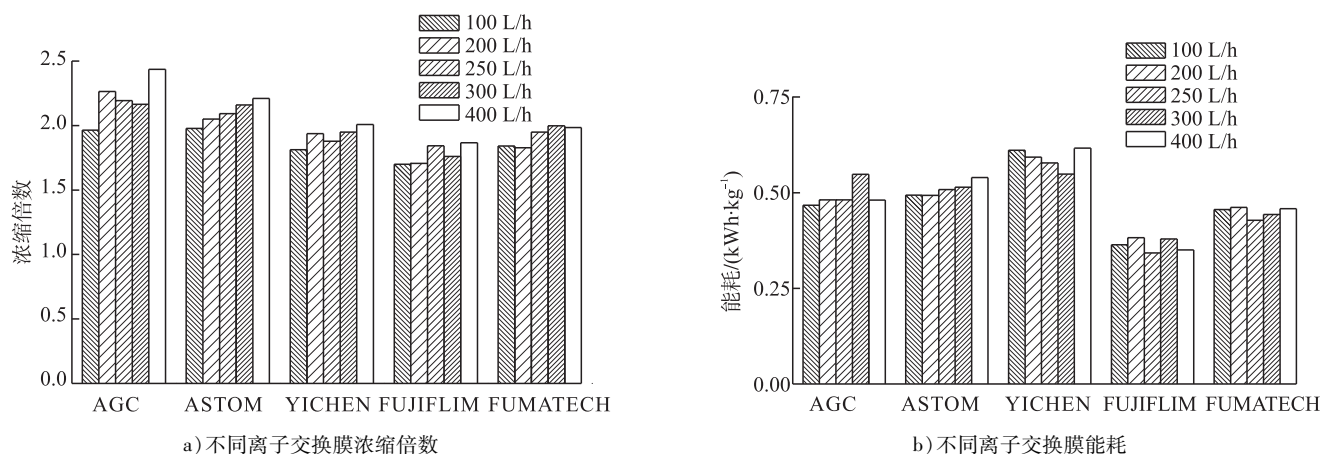


图5 不同离子交换膜在不同浓室流量下浓缩倍数及能耗

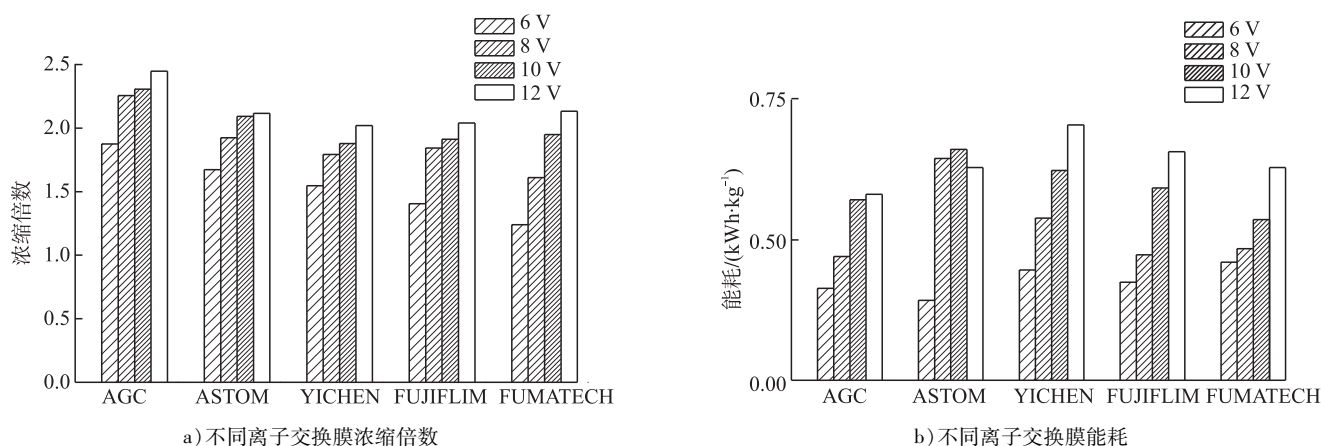


图6 不同离子交换膜在不同操作电压下浓缩倍数及能耗

由图6可知,不同离子交换膜在不同操作电压下的最佳浓缩倍数大小顺序为: AGC > FUMATECH > ASTOM > YICHEN ≈ FUJIFILM, 能耗大小顺序为: YICHEN > ASTOM ≈ FUJIFILM ≈ FUMATECH > AGC, 进一步说明 AGC 膜浓缩性能最佳, 而 YICHEN 膜能耗较高, 与 1.1.1 中的整体趋势相似。对于同一种离子交换膜, 浓缩倍数随着电压的增大而增大, 相应的能耗也随电压增大而增大。

2.2.3 不同淡室初始浓度对浓缩效果的影响

本实验中, 浓室配制 3 L 的 30 g/L NaCl 盐溶液, 淡室分别配制浓度为 1%、3%、6% 和 9% 的 NaCl 溶液, 控制操作电压 8 V, 考察不同初始淡室浓度对电渗析处理效果的影响。不同离子交换膜在不同初始 NaCl 浓度下浓缩倍数及能耗见图 7。

由图 7 可知, 对于同一种离子交换膜, 随着原料室初始浓度的增加, 浓缩倍数增加, 当 NaCl 浓度高于 6% 时, 浓缩倍数基本不变, 这主要是因为当 NaCl 浓度低于 6%, 膜两侧浓度差显著, 电势差大, 离子迁移阻力大, 能耗较大, 初始浓度对浓缩倍数影响较大; 但当 NaCl 含量高于 6% 时, 淡室离子含量充足, 电渗析过程中离子迁移

对淡室电导率变化影响较小, 离子迁移阻力较小, 相同操作条件下, 此时浓缩倍数与初始 NaCl 浓度大小无关。

2.2.4 连续性电渗析实验

实验控制电流密度为 25 A/m², 浓室初始加入 1.5 L 3% 的 NaCl 溶液, 淡室 NaCl 含量控制在 3%, 每隔 30 min 对浓室进行取样分析, 记录实验中的电流、电压、浓室的体积及相应的离子浓度。连续流运行下浓缩倍数、能耗、离子通量及水通量对比见图 8~10。

由图 8 可知, 连续进料过程中, 浓室 Na⁺ 迁移速率大小顺序为: AGC ≈ FUMATECH > ASTOM > FUJIFILM > YICHEN, 随着时间增加, Na⁺ 浓度趋于稳定, 其中采用 YICHEN 膜时, 浓室 Na⁺ 浓度最先趋于平衡。

由图 9 可知, 不同离子交换膜能耗大小顺序为: AGC ≈ ASTOM < FUMATECH < FUJIFILM < YICHEN, 主要是因为 YICHEN 膜电阻小, 相同操作电压下的功率大, 而 YICHEN 膜水通量大, 离子通量小, 使 YICHEN 膜处理的能耗最大, 可知 AGC 膜和 ASTOM 膜运行成本较低。

由图 10 可知, 五种离子交换膜的离子通量与水通量有明显差别。从离子通量上分析, AGC 膜离子通量最

大,为 $0.5467 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, YICHEN 膜离子通量最小,为 $0.4657 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,表明 AGC 膜中离子迁移速率最快,传质性能最好;从水通量上分析,AGC 膜水通量最小,为 $0.0013 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, YICHEN 膜水通量最大,为 $0.0068 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,表明离子电迁移过程中 YICHEN

膜水透过速率较大。由电渗析过程中最大浓缩浓度公式^[20] $C'' = J/q$ 可知,AGC 膜水通量小而离子通量大,可以达到最高的浓缩倍数最大,而 YICHEN 膜可以达到的最高浓缩倍数最小,进一步说明 AGC 膜传质性能更好。

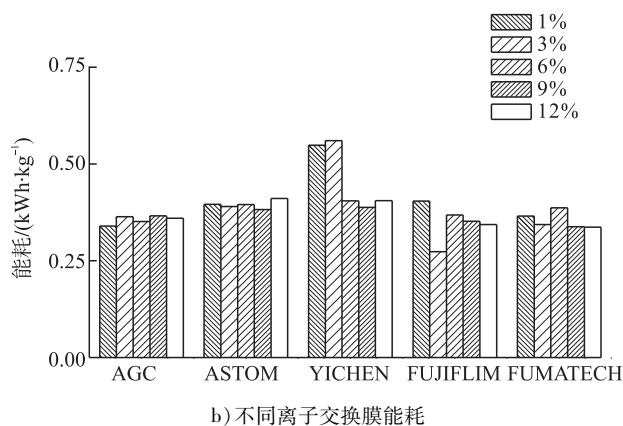
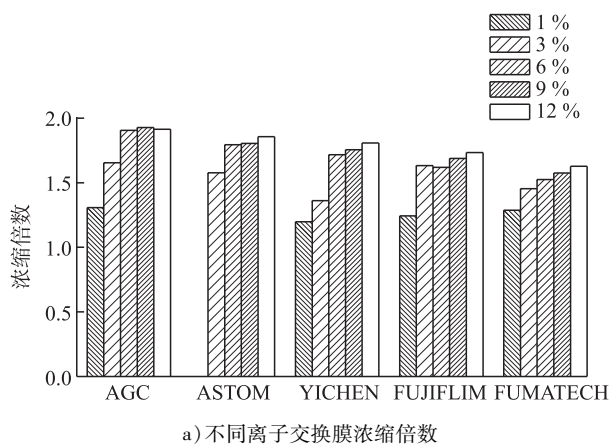


图7 不同离子交换膜在不同初始 NaCl 浓度下浓缩倍数及能耗

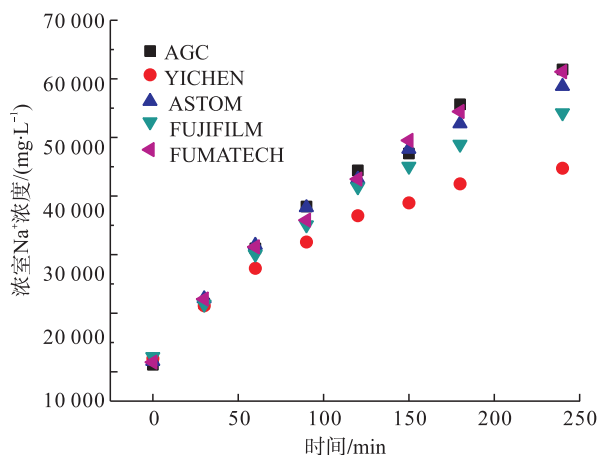


图8 不同离子交换膜浓室 Na⁺ 浓度

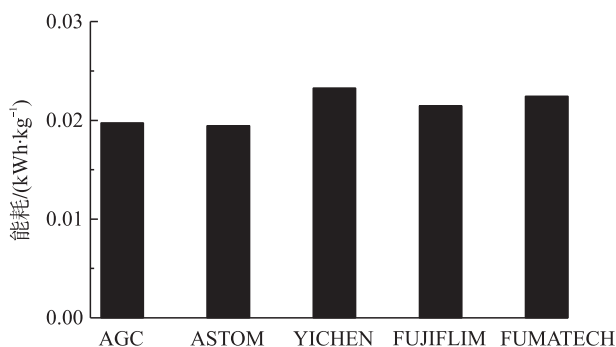


图9 不同离子交换膜能耗

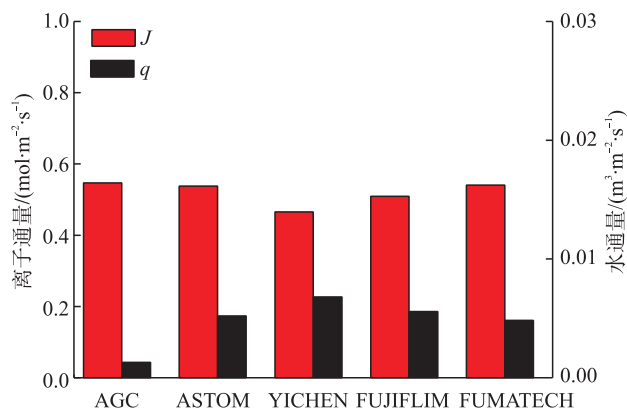


图10 不同离子交换膜离子通量与水通量对比

综上分析,五种离子交换膜中,AGC 膜应用于纯浓缩工艺占有优势。

3 结论

1) 通过对比分析五种离子交换膜的基本性能可知,离子交换膜的含水率与膜结构密切相关, FUJIFILM 阴膜的交联程度低,空隙率大,含水量高; AGC、ASTOM 和 FUMATECH 阴阳膜编织紧密,交联程度高,含水量低。离子交换基团的浓度直接影响膜电阻,阳膜的膜电阻高于阴膜,表明阴膜的导电性优于阳膜; FUJIFILM 和 FUMATECH 膜的膜电阻较高,膜内活性基团浓度低,与这两种膜的离子交换容量小一致。

2) 采用间歇式电渗析实验分别考察不同浓室流量、操作电压及初始浓度对不同离子交换膜浓缩效果的影响。并采用连续式电渗析实验,得到不同离子交换膜的 Na^+ 迁移速率大小顺序为: $\text{AGC} \approx \text{FUMATECH} > \text{ASTOM} >$

FUJIFILM > YICHEN,不同离子交换膜能耗大小顺序为: AGC $\approx$ ASTOM < FUMATECH < FUJIFILM < YICHEN,表明 AGC 膜传质性能好,且能耗低,总体性能更有优势。

参考文献:

- [1] 马会霞. 盐水浓缩的电渗析工艺研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.
Ma Huixia. Electrodialysis Process for Saline Water Concentration [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [2] Tanaka N, Nagase M, Higa M. Preparation of Aliphatic-Hydrocarbon-Based Anion-Exchange Membranes and Their Anti-Organic-Fouling Properties [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 384 (1-2): 27-36.
- [3] Hao H, Huang X, Gao C, et al. Application of an Integrated System of Coagulation and Electrodialysis for Treatment of Wastewater Produced by Fracturing [J]. Desalination & Water Treatment, 2014, 55 (8): 2034-2043.
- [4] Peraki M, Ghazanfari E, Pinder G F, et al. Electrodialysis: An Application for the Environmental Protection in Shale-Gas Extraction [J]. Separation & Purification Technology, 2016, 161: 96-103.
- [5] 徐 进. 电渗析膜分离提纯制备高纯度乙醇酸的研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
Xu Jin. Studies on Preparation of Glycollic Acid by Means of Membrane Separation Technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [6] 张 影,马学虎,兰 忠,等. 电渗析浓缩模拟浓盐水工艺的实验研究[J]. 高校化学工程学报,2014,28(5):951-956.
Zhang Ying, Ma Xuehu, Lan Zhong, et al. Experimental Study on Concentrating the Simulated Salt Water with Electrodialysis [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2014, 28 (5): 951-956.
- [7] 王传怀,张国宝,吕希化,等. 电渗析提取柠檬酸技术[J]. 膜科学与技术,1992,12(3):44-48.
Wang Chuanhuai, Zhang Guobao, Lv Xihua, et al. A Technique of Extraction of Citric Acid by Electrodialysis (ED) [J]. Membrane Science and Technology, 1992, 12 (3): 44-48.
- [8] 徐会从. 海水浓缩用离子交换膜的比选研究[D]. 天津:河北工业大学,2008.
Xu Huicong. Study on the Comparisons of Membranes for Seawater Concentration [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2008.
- [9] 莫剑雄. 离子膜的传质性参数对电渗析性能的影响[J]. 净水技术,1989,(2):9-14.
Mo Jianxiong. Effect of Mass Transfer Parameters of Ion-exchange Membrane on Electrodialysis Performance [J]. Water Purification Technology, 1989, (2): 9-14.
- [10] Tanaka Y. Water Dissociation Reaction Generated in an Ion Exchange Membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 350 (1-2): 347-360.
- [11] 张维润. 电渗析工程学[M]. 北京:科学出版社,1995.
Zhang Weirun. Electrodialysis Engineering [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [12] Zhang Wei, Miao Mengjie, Pan Jiefeng, et al. Separation of Divalent Ions from Seawater Concentrate to Enhance the Purity of Coarse Salt by Electrodialysis with Monovalent-Selective Membranes [J]. Desalination, 2017, 411: 28-37.
- [13] Długolecki P, Ogonowski P, Metz S J, et al. On the Resistances of Membrane, Diffusion Boundary Layer and Double Layer in Ion Exchange Membrane Transport [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 349 (1-2): 369-379.
- [14] Tanaka N, Nagase M, Higa M. Organic Fouling Behavior of Commercially Available Hydrocarbon-Based Anion-Exchange Membranes by Various Organic-Fouling Substances [J]. Desalination, 2012, 296 (25): 81-86.
- [15] 田中良修. 离子交换膜基本原理及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
Tanaka Y. Ion Exchange Membranes Fundamentals and Applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [16] 刘 璐,赵志娟,李 雅,等. 工业废水电渗析过程中膜污染研究进展[J]. 过程工程学报,2015,15(5):881-891.
Liu Lu, Zhao Zhijuan, Li Ya, et al. Research Progress in Fouling of Ion Exchange Membrane for Electrodialysis Desalination of Industrial Wastewater [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15 (5): 881-891.
- [17] Nie Xiaoyao, Sun Shuying, Sun Ze, et al. Ion-fractionation of Lithium Ions from Magnesium Ions by Electrodialysis Using Monovalent Selective Ion-Exchange Membranes [J]. Desalination, 2016, 403: 128-135.
- [18] 吴 亮. 聚合物基均相离子交换膜的制备、表征及离子传导特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.
Wu Liang. Preparation and Characterization of Polymer-based Homogeneous Ion Exchange Membranes as Well as Ion Transport Therein [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [19] 童 彬. 聚合物基离子交换膜的制备、表征与应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
Tong Bin. Preparation, Characterization and Application of Polymeric Ion Exchange Membranes [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [20] Tanka Y. A Computer Simulation of Ion Exchange Membrane Electrodialysis for Concentration of Seawater [J]. Membrane Water Treatment, 2010, 1 (1): 13-37.