

双极膜电渗析法从含铍碱液中回收碱的研究

张玉凤¹, 郭庆^{2*}, 曾娟¹, 余侃萍¹, 雷湘¹, 刘孟¹

(1. 长沙矿冶研究院有限责任公司, 长沙 410012; 2. 五矿铍业股份有限公司, 长沙 410030)

摘要: 含铍碱液是萃取法生产工业氢氧化铍过程所产生的生产废水, 含有高浓度的氢氧化钠和铍元素等有价值组分。为回收含铍碱液中的碱、提高有价值组分铍的利用率, 采用双极膜电渗析处理含铍碱液, 并以自制铍专性吸附剂回收处理后含铍铝溶液中的铍。本研究考察了双极膜电渗析的运行时间、碱浓度、浓缩比等实验条件对回收碱的影响, 获得最佳的工艺条件。结果表明, 当含铍碱液的碱浓度为 0.7 mol/L, 浓缩比为 2:1 时, 回收的碱质量浓度可达 49.22 g/L, 碱的回收率为 92.42%。

关键词: 铍; 碱液; 双极膜电渗析; 碱回收

中图分类号: TQ028; X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2026)01-0120-09

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2026.01.012

萃取法生产氢氧化铍工艺中, 含铍碱液是氢氧化钠溶液反萃有机相中铍后水解沉淀制备氢氧化铍过程中产生的生产废水, 废水量为常用的硫酸沉淀法制备氢氧化铍工艺的三倍及以上, 碱浓度较高且碱液中的铍容易富集。因此, 含铍碱液具有极高的回用价值。为了提高碱和铍的资源利用率, 对碱和铍分质回收的研究具有重要的意义。目前, 针对含铍废水的处理方法已有大量研究, 如物理沉降^[1]、化学沉降^[2-3]、吸附^[4-5]、生物法^[6-7]、萃取^[8-9]。现有的物化法和生物法大多是对酸性含铍废水的铍进行去除, 易产生二次污染, 且针对碱性废水回收碱的相关研究极少。因此, 有研究提出采用电渗析法处理冶炼产生的碱性废水。张维润^[10]采用了电渗析技术处理碱性废液, 回收了 NaOH 和工业用水。徐洁等^[11]采用电渗析技术处理氧化铝厂碱性废水, 在一定条件下可将处理后溶液的质量浓度脱除至 0.1 g/L 以下。马作恕等^[12]采用电渗析处理碱法浸

出后的浸出液, 实现了浸出液的脱盐及碱的回收。然而, 普通电渗析法仅能浓缩碱液, 不能分质回收有价值金属离子和碱。彭雪娇等^[13]采用双极膜法处理钨冶炼碱性废水, 可选择性回收碱且将待处理碱性废水 pH 从 13.5 降至 9.0 左右。在此研究的基础上, 本研究提出双极膜电渗析回收含铍碱液中的碱, 并以专性吸附剂吸附处理后盐室中的铍, 实现了碱和铍的高效回收, 为回收含铍碱液中的碱和铍提供了可行的技术方案。

1 实验

1.1 实验原料及设备

含铍碱液取自某铍冶炼厂的生产废水, 主要成分见表 1。主要实验试剂有硫酸钠(分析纯), 氢氧化钠(分析纯), 纯水(自制)。主要设备为电渗析实验成套设备, 型号为 EX3BT(采购自杭州蓝然环境技术股份有限公司); 采用二隔室双极膜电渗析膜

收稿日期: 2025-09-23; 修改稿收到日期: 2025-11-03

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2902302)

第一作者简介: 张玉凤(1990-), 女, 湖南株洲人, 工程师, 主要从事废水处理及回用技术研究。* 通讯作者, E-mail: 18975165106@189.com

引用本文: 张玉凤, 郭庆, 曾娟, 等. 双极膜电渗析法从含铍碱液中回收碱的研究[J]. 膜科学与技术, 2026, 46(1): 120-128.

Citation: Zhang Y F, Guo Q, Zeng J, et al. Study on the recovery of alkali from beryllium-containing alkali solution by bipolar membrane electro dialysis[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2026, 46(1): 120-128.

堆,膜堆含有十对双极膜电渗析膜单元,单张膜片的有效面积为 0.55 dm²;阳离子交换膜/层上含有的活性基团为磺酸基(-SO₃H)。

表 1 含铍碱液主要成分表

Table 1 Main ingredients of hydrolysis wastewater

成分	Na ⁺	OH ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	
质量浓度/(g·L ⁻¹)	22.35	11.91	6.16	3.74	
成分	Al	Be	Ca	Fe	Mg
质量浓度/(mg·L ⁻¹)	252.08	98.26	32.23	7.37	3.56

1.2 实验原理

通过计算 Be、Al 的 lg*f*(O₂)-pH 曲线和形态分布-pH 图,分析了 Al、Be 元素在水中的赋存形态。溶液 pH < 5.5, Be 元素以 Be²⁺ 形式存在;溶液

pH > 7.0 时, Be 元素主要以 Be(OH)⁺ 和 Be(OH)₂ 形态存在,逐渐产生沉淀;溶液 pH > 11.0 后,大部分沉淀已溶解, Be 元素则主要以 Be(OH)₃⁻ 的形式存在^[2,14]。Be 的沉淀 pH 范围为 8.0~12.0。Be 元素赋存形态随 pH 变化如图 1(a) 所示。溶液 pH < 4.0 时, Al 元素主要以水合络离子 Al(H₂O)₆³⁺ 形态存在;pH > 4.0 时,水合铝络离子发生逐级水解反应, Al(OH)²⁺、Al(OH)₂⁺ 等为铝水解的优势形态^[15-16];pH 为 6.0~9.0 时, Al 元素主要以沉淀 Al(OH)₃ 形态存在^[16];pH > 9.0 时,主要以 Al(OH)₄⁻ 形态存在^[17]。Al 元素的赋存形态随 pH 变化如图 1(b) 所示。实验运行时通过控制试验终点 pH > 12.0,使 Al、Be 元素在溶液中始终保持 Al(OH)₄⁻ 和 Be(OH)₃⁻ 等阴离子形态存在。

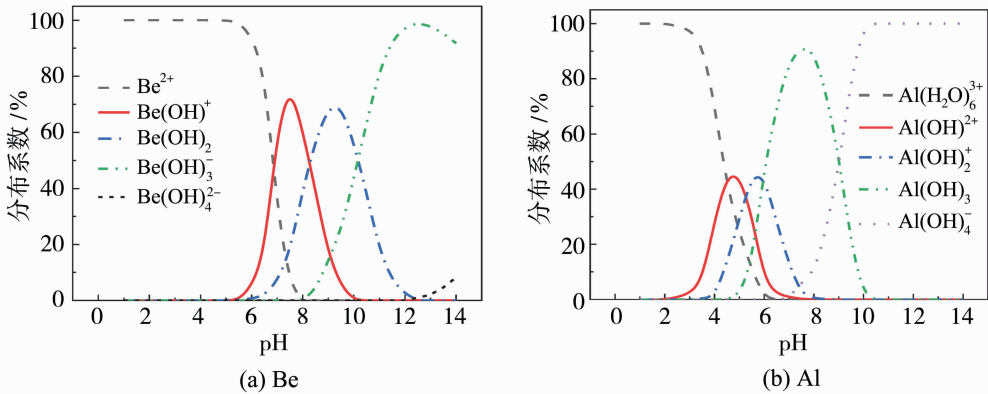


图 1 水中 Be 和 Al 赋存形态随 pH 变化

Fig. 1 The chemical forms change of Be and Al with pH in the water

电渗析由阳离子交换膜(以下简称阳膜)和阴离子交换膜(以下简称阴膜)组成,阳膜上含有带负电的磺酸基(-SO₃H),允许阳离子自由穿透膜且排斥阴离子通行。双极膜是一种特殊的电渗析膜,其由阴、阳离子交换层复合而成,且在两种荷电层之间有水解离催化层。在电场驱动下能使水解离生成 H⁺ 和 OH⁻,分别穿透阳离子交换层和阴离子交换层进入相邻的两个隔室。因此,本研究采用二隔室双极膜电渗析法处理含铍碱液,其原理如图 2 所示。膜堆单元由双极膜和阳膜组成,共十对膜堆单元,含铍碱液由靠近正极的双极膜电渗析盐室(以下简称盐室)通入。Al、Be 元素以阴离子形态存在,不能透过阳离子交换膜,Na⁺ 容易透过阳离子交换膜。在电场驱动下,Na⁺ 等阳离子透过阳膜进入双极膜电渗析碱室(以下称碱室),与双极膜 A 层产生的 OH⁻ 形成 NaOH。阴离子不能透过阳膜,以

Al(OH)₄⁻ 和 Be(OH)₃⁻ 形式存在的 Al、Be 元素及 CO₃²⁻、SO₄²⁻ 被截留在盐室,且盐室中的 OH⁻ 和双极膜 C 层产生的 H⁺ 中和形成水。

1.3 实验方法

以含铍碱液作为盐室的初始溶液,纯水作为碱室的初始溶液,接通电源后将电压设定为 20 V、电流设定为 2.0 A。开始运行后随时关注盐室和碱室的电导率、pH 值以及盐室内溶液状态。以盐室溶液变浊前的点为试验终点(防止膜片堵塞),记录各隔室的体积变化,并测定回收碱液和处理后含铍铝溶液中主要成分的含量。分析运行时间、含铍碱液的碱浓度、浓缩比对碱回收效果的影响。

1.4 分析方法

盐室和碱室中的金属离子浓度通过离子吸收分光光度法检测分析;OH⁻、CO₃²⁻ 浓度通过滴定法检测;SO₄²⁻ 浓度通过铬酸钡分光光度法测定。

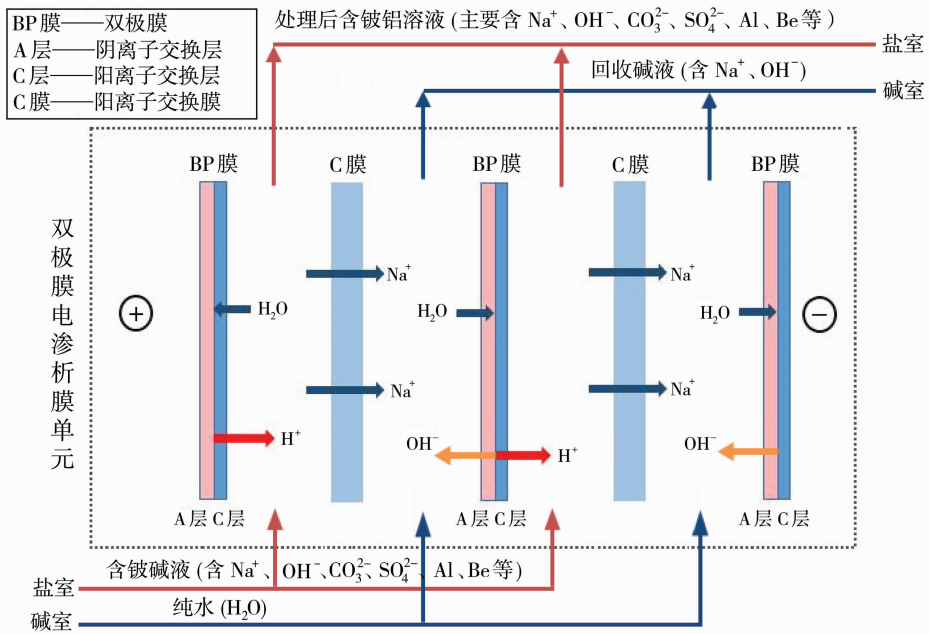


图 2 双极膜电渗析回收碱原理图

Fig. 2 Schematic diagram of alkali recovery by bipolar membrane electro dialysis

1. 4. 1 碱回收率(η)

$$\eta = \frac{C_{2,\text{OH}^-} \times V_2}{C_{0,\text{OH}^-} \times V_0} \quad (1)$$

式中: C_{2,OH^-} 、 C_{0,OH^-} 分别为碱室回收碱液中碱的质量浓度和盐室含铍碱液中碱的质量浓度, g/L; V_2 、 V_0 分别为碱室回收碱液的体积和盐室含铍碱液的体积, L。

1. 4. 2 截留率(R)

$$R = \frac{C_{1,i} \times V_1}{C_{0,i} \times V_0} \quad (2)$$

式中: $C_{1,i}$ 、 $C_{0,i}$ 分别为盐室处理后含铍铝溶液中截留的金属离子质量浓度和含铍碱液中金属离子质量浓度, g/L; V_1 、 V_0 分别为处理后盐室含铍铝溶液的体积和盐室含铍碱液的体积, L。

1. 4. 3 回收碱的量(m)

$$m = C_{2,\text{OH}^-} \times V_2 \quad (3)$$

式中: V_2 为碱室回收碱液的体积, L; C_{2,OH^-} 为碱室回收碱液中碱的质量浓度, g/L。

2 结果与讨论

2. 1 运行时间对双极膜电渗析回收碱的影响

取 1 L 含铍碱液作为盐室的初始溶液, 1 L 纯水作为碱室的初始溶液, 考察运行时间对电压、电流密度及回收碱效果的影响, 结果如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可知, 双极膜电渗析运行的电压为 20 V

(设定为 20 V); 而电流密度随时间变化从 0 逐渐增加, 60 min 时达到最大值 30 mA/cm² (电流为 1.65 A), 再逐渐降低至实验终止时的 18.7 mA/cm² (电流为 1.03 A)。这是由于初始碱室溶液采用的纯水, 随着外加电流的施加, 双极膜的水解离催化层发生水解反应, 产生的 H⁺ 和 OH⁻ 分别进入盐室和碱室, 以及 Na⁺ 穿透阳膜进入碱室, 离子迁移速度及数量增加, 因此膜堆的电流密度逐渐上升。由于盐室溶液中越来越多的离子穿透离子交换膜迁移至碱室, 膜与主体溶液界面的浓差越来越大, 并进一步形成边界层, 阻碍水的透过和离子迁移, 因而电流密度逐渐下降。

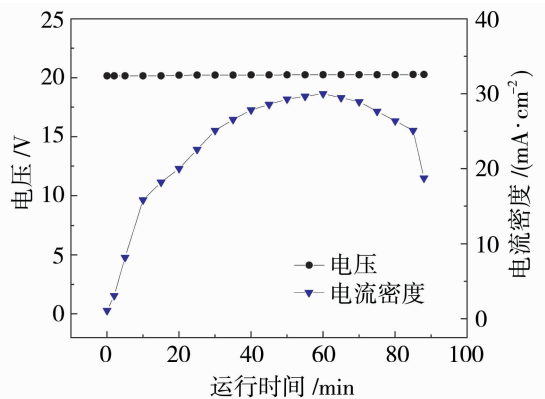


图 3 运行时间对碱回收过程中电压和电流密度的影响
Fig. 3 The effect of time on the voltage and current density of the alkali recovery

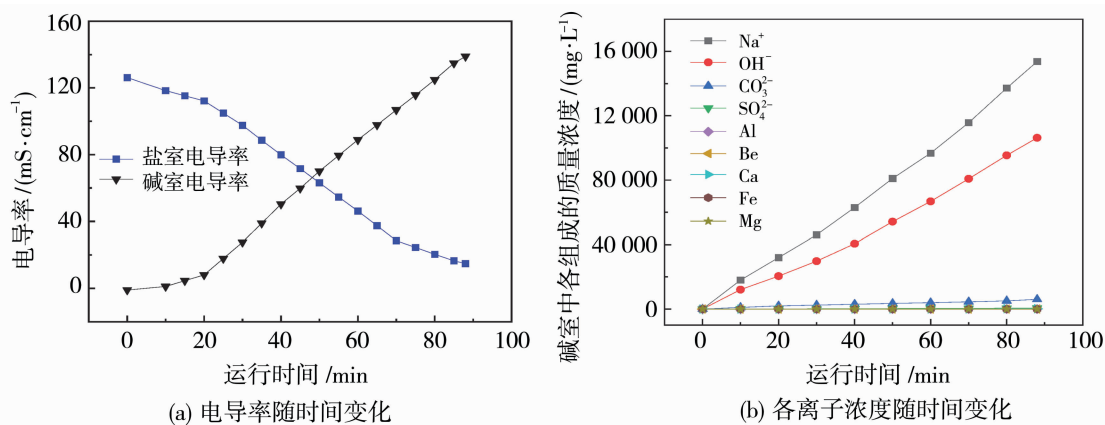


图 4 运行时间对碱回收效果的影响

Fig. 4 The effect of running time on the recovery effect of the alkali recovery

由图 4 可知,随着双极膜电渗析的运行, CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 等阴离子被截留在盐室, Na^+ 透过阳膜从盐室进入碱室, 并与双极膜 A 层产生的 OH^- 形成 NaOH , 随着碱室中 Na^+ 和 OH^- 量的增加, 电导率逐渐增加。盐室中 OH^- 和双极膜 C 层产生的 H^+ 中和生成水, 盐室中离子总浓度减小, 盐室的电导率随运行时间减小。当时间运行到 88 min、盐室的电导率约在 18~20 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时, 盐室中开始出现浑浊, 电渗析设备停止运行, 此时碱室中碱的浓度为 25.51 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此, 为保证试验运行过程中无沉淀产

生, 使工艺运行通畅, 选取盐室电导率为 20 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 做为试验终点。

2.2 碱浓度对双极膜电渗析回收碱的影响

采用 NaOH (分析纯) 和纯水调节含铍碱液中的碱浓度, 使其浓度分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。分别取 1 L 不同碱浓度的含铍碱液作为盐室的初始溶液, 1 L 纯水作为碱室的初始溶液, 以盐室的电导率 20 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 为试验终点, 考察碱浓度对碱回收效果和能耗的影响, 结果如图 5 所示。

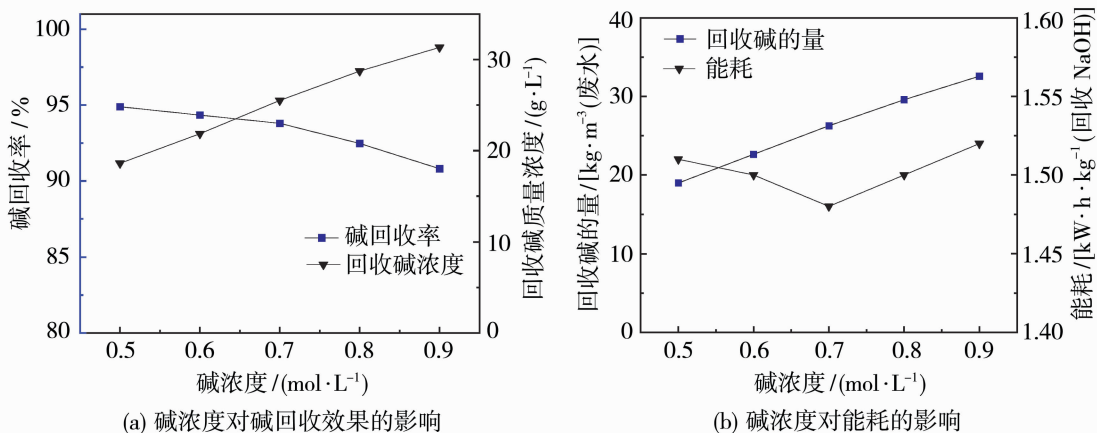


图 5 碱浓度对双极膜电渗析法碱回收效果和能耗的影响

Fig. 5 Effect of alkali concentration on alkali recovery and energy consumption by bipolar membrane electrodialysis

由图 5(a)可知,碱浓度对碱回收率有一定影响。随着碱浓度的增加,碱的回收率呈下降趋势,这是由于碱浓度越高,随着更多 Na^+ 进入碱室并形成碱,膜与主体溶液界面的浓差越来越大,加重浓差极化的作用,会阻碍 Na^+ 和水穿透阳膜,因此碱的回

收率呈下降趋势。含铍碱液中 0.5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的碱回收率最高,为 94.89%,回收碱的质量浓度 18.61 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 0.9 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的碱回收率最低,为 90.81%,而回收碱的质量浓度 31.34 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由图 5(b)可知,碱浓度越高回收碱的量明显增加,而每千克回收碱的能耗先

降低再升高,碱浓度 0.7 mol/L 时能耗最低。这是由于随着碱浓度升高,回收碱的量和能耗均增加,而碱浓度小于 0.7 mol/L 时回收能耗的增加幅度低于碱回收量的幅度,单位回收碱的能耗呈下降趋势;当碱浓度大于 0.7 mol/L 时,由于浓度越高,浓差极化现象越明显,回收碱的能耗进一步增加,使得能耗的增加幅度高于碱回收量的幅度,因而单位能耗呈上升趋势。生产过程中含铍碱液的碱浓度一般为 0.6~0.7 mol/L,此时回收碱的能耗约为 1.48~1.50 kW·h/kg (回收 NaOH),碱回收率约为 94%,回收碱的质量浓度为 21.86~25.51 g/L。由

于实际生产中含铍碱液的碱浓度越高则铍的沉淀率越低,再综合考虑碱回收效果及能耗随碱浓度的关系,后续采用碱浓度为 0.7 mol/L 的含铍碱液进行试验研究。

2.3 浓缩比对双极膜电渗析回收碱的影响

以 1 L 含铍碱液作为盐室的初始溶液,分别取一定量的纯水作为碱室的初始溶液,控制浓缩比(盐室与碱室的溶液体积之比)分别为 1:1、1.5:1、2:1、2.5:1,以盐室的电导率 20 μS/cm 为试验终点,考察浓缩比对碱室中碱回收效果和能耗的影响,结果如图 6 所示。

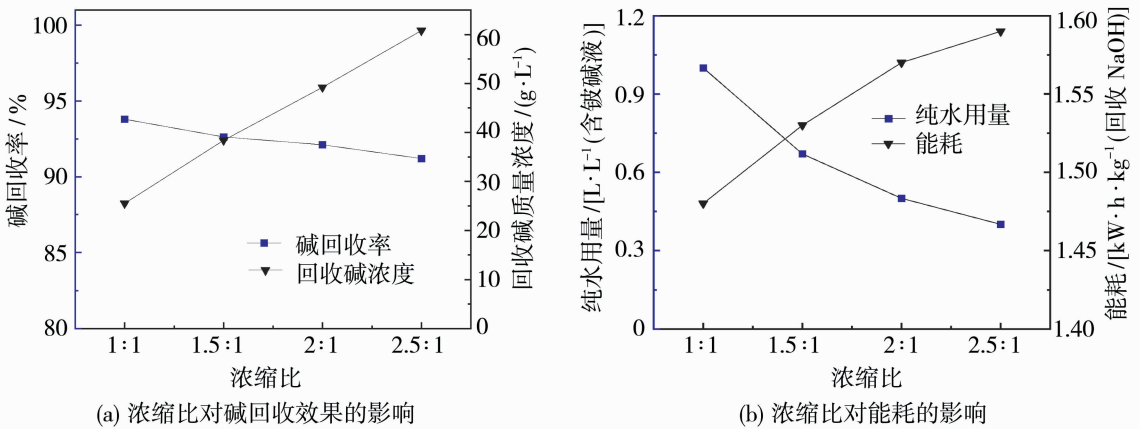


图 6 浓缩比对双极膜电渗析法碱回收效果和能耗的影响

Fig. 6 Effect of concentration ratio on alkali recovery and energy consumption by bipolar membrane electrodialysis

由图 6(a)可知,随着浓缩比的提高,碱回收率呈下降趋势,而回收碱的浓度明显提高。浓缩比为盐室与碱室的溶液体积之比,随着浓缩比的提高,碱室回收碱的浓缩效果更加明显,因此回收碱浓度越高。然而,浓缩比越大,随着更多 Na⁺ 进入碱室并形成碱,膜与主体溶液界面的浓差越来越大,加重浓差极化的作用,会阻碍 Na⁺ 和水穿透阳膜,因此碱的回收率呈下降趋势。浓缩比 1:1 时碱回收率最高,为 93.80%,浓缩比为 2.5:1 时回收碱的质量浓度最高,为 60.8 g/L。由图 6(b)可知,随着浓缩比的提高,纯水用量明显减少,而处理工艺单位能耗增加,这是由于浓缩比越大,随着工艺的运行,浓差极化现象越明显,回收相同量的碱会消耗更多的电能,因此单位能耗呈上升趋势。当浓缩比最大,为 2.5:1 时,回收 1 kg 碱的能耗最高,为 1.59 kW·h,但此时碱的回收率也最低,为 91.20%。综合考虑回收率、能耗以及纯水的用量,选取浓缩比 2:1,此时碱的质量浓度为 49.22 g/L,碱回收率 92.42%,回收

1 kg 碱的能耗为 1.57 kW·h,且纯水用水为 0.5 L/L (含铍碱液)。

处理后含铍铝溶液中铍质量浓度为 96.85 mg/L,再以自制的铍专性吸附剂进行吸附。向 1 L 处理后的含铍铝溶液中加入 20 g 吸附剂,搅拌 2 h 后过滤,可将铍质量浓度降至 0.1 mg/L 以下。铍的吸附率可达 99.9%,处理后含铍铝溶液中铍几乎可完全被吸附回用。

2.4 双极膜电渗析工艺离子流向分析

以 1 L 含铍碱液(水质见表 1,碱浓度约为 0.7 mol/L)作为盐室进料,1 L 纯水作为碱室的初始溶液,控制浓缩比为 1:1,以盐室电导率为 20 mS/cm 为试验终点,试验后取样分析碱室各组分的浓度,如表 2、表 3 和图 7 所示。

由表 2 可知,回收碱中的主要物质为 OH⁻ (质量浓度为 10.84 g/L)、Na⁺ (质量浓度为 15.37 g/L),及少量的 CO₃²⁻ (质量浓度为 0.30 g/L)。由表 3 可知,处理后的盐室中截留大部分的 Al 和 Be 元

素,以及约 0.63 g/L 的 OH^- 。Ca 为二价阳离子,理论上可透过阳膜,迁移速度比 Na^+ 慢,原水中浓度比 Na^+ 低。由图 7 可知,有 47.6% 的 Ca 迁移到碱室,其质量浓度为 16.15 mg/L。其余金属离子基本留在盐室中,碱室中的含量 Al 约为 2.05 mg/L,透过率 3%;Be、Fe、Mg 均低于 1 mg/L,且透过率均

小于 1%。这是由于 Al 和 Be 以 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 和 $\text{Be}(\text{OH})_3^-$ 形态存在溶液中;而 Ca、Fe、Mg 为二价阳离子,电迁移速率比 Na^+ 慢,且浓度远低于 Na^+ ,所以双极膜电渗析能选择性回收 NaOH,并截留其他成分。因此废水中 Al、Be、Ca、Fe、Mg 透过阳膜到碱室中的量可忽略不计。

表 2 回收碱液中主要成分

Table 2 Main composition of alkali recovery solution

成分	Na^+	OH^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Al	Be	Ca	Fe	Mg
质量浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	15.37	10.84	0.30	0.057	2.05	0.37	16.15	0.05	0.11

表 3 处理后含铍铝溶液主要成分

Table 3 Main composition of beryllium-containing aluminum solution after treatment

成分	Na^+	OH^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Al	Be	Ca	Fe	Mg
质量浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	6.64	0.63	5.78	3.66	248.36	96.85	15.27	7.28	3.49

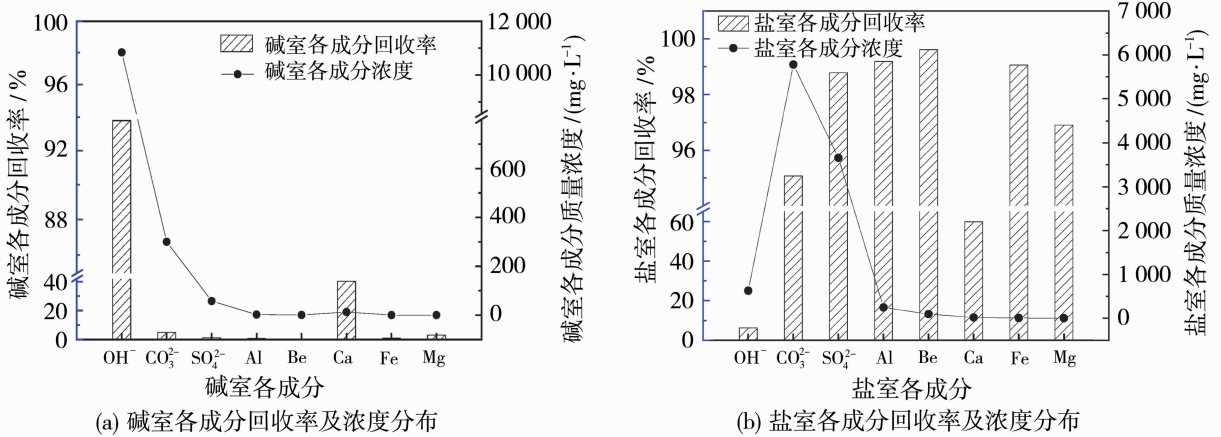


图 7 处理后碱室和盐室各成分回收率及浓度分布

Fig. 7 Recovery rates and concentrations of various components in salt compartment and alkali compartment after treatment

2.5 含铍碱液回收碱工艺对膜面性能影响的分析

为了解含铍碱液回收碱过程中对膜性能的影响,采用 SEM(扫描电镜)和 EDS(能谱分析)等分析手段,分析膜片表面的形貌及元素。测试膜片为经过一年间歇使用的双极膜电渗析膜堆,该膜堆使用情况:含铍碱液(成分:碱浓度约为 0.5~0.9 mol/L,Al 质量浓度为 20~250 mg/L,Be 质量浓度为 20~100 mg/L),单次处理量 1.0~1.2 L,单次运行时间 1~3 h,实验次数约 80 次,累计运行时间 100~200 h。以双极膜电渗析膜堆中使用的阳膜、双极膜为研究对象,通过 SEM 和 EDS 分析膜表面微观形貌、表面沉淀或结垢的组成,并与未使用的相应膜片

进行横向对比,结果如图 8~图 10 所示。

比较图 8(a)、8(b),放大 100 倍的图片表明,膜在长时间使用后,表观形貌无明显变化,但膜面有少量的沉积物。对 SEM 图有沉淀部位进行元素分析,见图 8(d),使用后的阳膜表面沉淀物为 Mg、Fe;含铍碱液中主要金属离子有 Na(18~30 g/L)、Al(20.0~250.0 mg/L)、Be(20.0~100.0 mg/L),以及低浓度的 Mg(约 3 mg/L)、Fe(约 7 mg/L),主要离子对膜形貌基本无影响,而低浓度的 Mg、Fe 杂质离子形成沉淀结垢在膜表面有少量沉积。

比较图 9(a)、9(b),放大 100 倍的图片表明,膜在长时间使用后,双极膜 A 层表观形貌无明显变

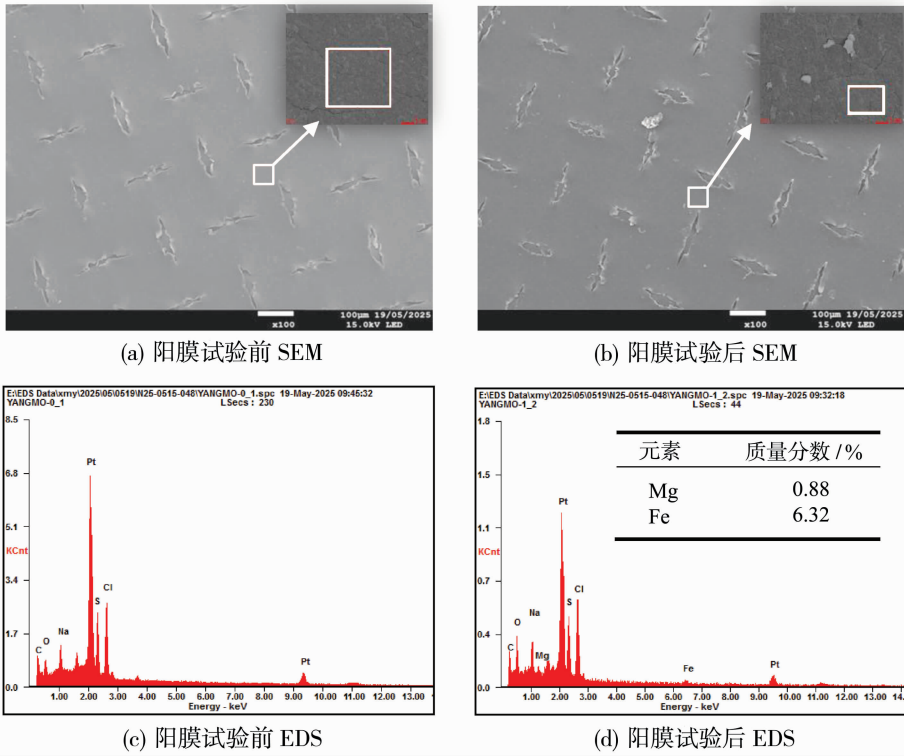


图8 阳膜 SEM 表征及 EDS 能谱元素分析

Fig. 8 SEM surface morphologies and EDS element analysis of cation membrane

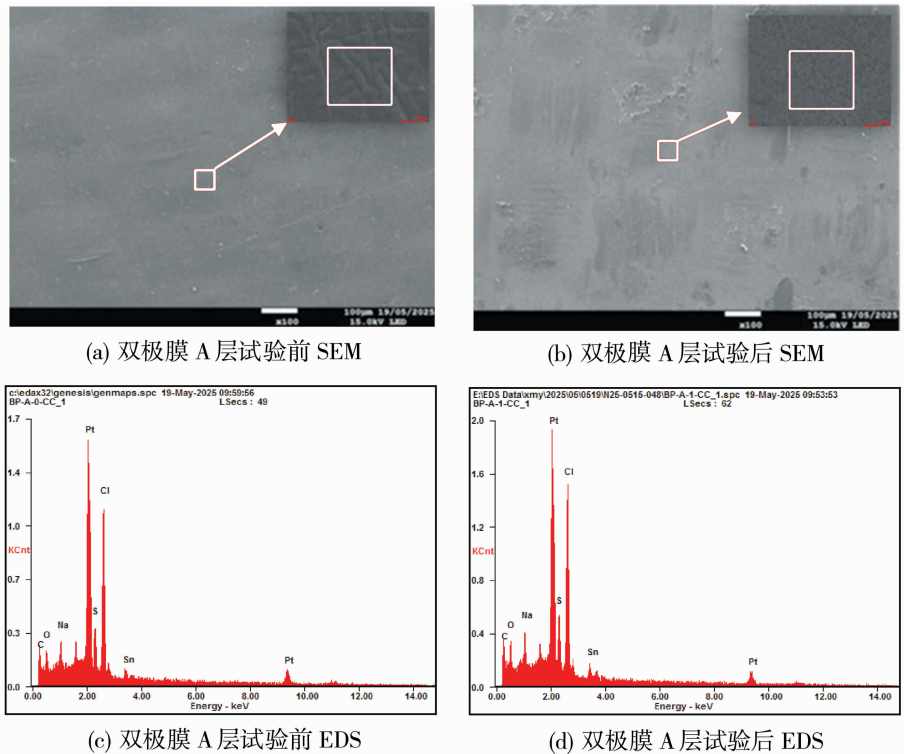


图9 双极膜 A 层(阴层)SEM 表征及 EDS 能谱元素分析

Fig. 9 SEM surface morphologies and EDS element analysis of anion layer of bipolar membrane

化,膜表面无金属元素沉积;比较图 10(a)、10(b),放大 100 倍的图片表明,膜在长时间使用后,双极膜 C 层表现观形貌无明显变化,但膜面有少许沉积

物。由图 10(c)、10(d)可知,双极膜 C 层使用后表面有少量的 Na 元素累积沉积,其他元素基本无影响。

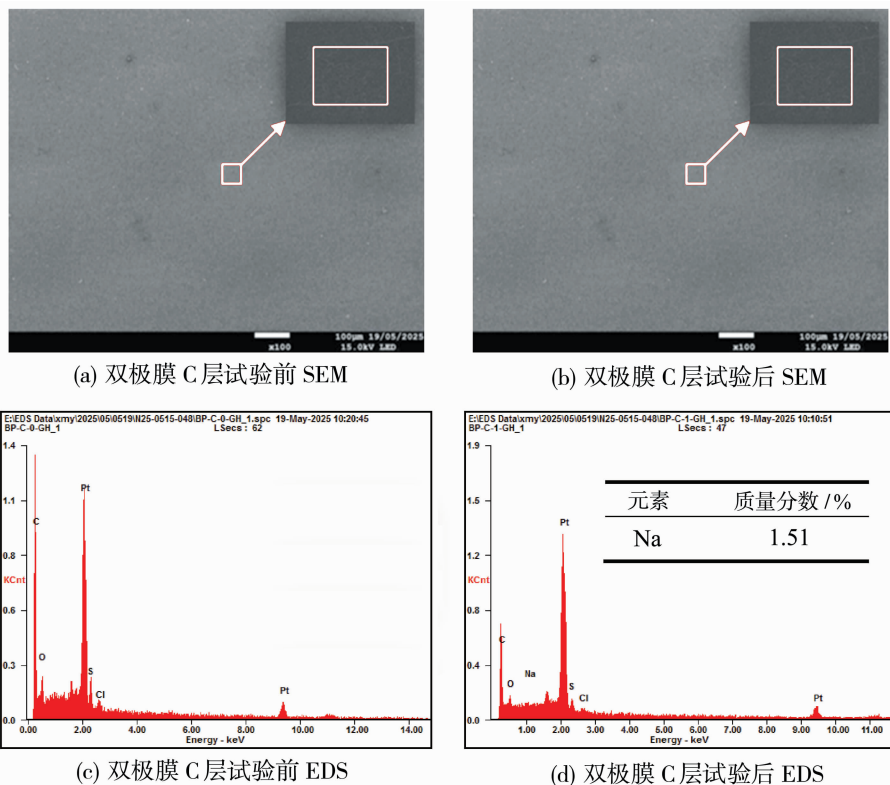


图 10 双极膜 C 层(阳层)SEM 表征及 EDS 能谱元素分析

Fig. 10 SEM surface morphologies and EDS element analysis of cation layer of bipolar membrane

综上所述,阳膜和双极膜 C 层在长期使用后, Mg、Fe、Na 等无机盐形成沉淀结垢,吸附或截留在膜表面。因此,在此工艺运行期间需定期采用 2% 的酸清洗膜堆,保持膜的性能稳定。

3 结论

1) 以含铍碱液为研究对象,采用双极膜电渗析处理方法,研究了运行时间、碱浓度、浓缩比等条件对回收碱的影响,确定了盐室终点电导率为 $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、碱浓度 $0.7 \text{ mol}/\text{L}$ 、浓缩比 $2:1$ 的条件下,含铍碱液中的碱回收率可达 92.42% ,此时回收碱液中碱的质量浓度为 $49.22 \text{ g}/\text{L}$,回收 1 kg 碱的能耗为 $1.57 \text{ kW} \cdot \text{h}$,且纯水用水为 $0.5 \text{ L}/\text{L}$ (含铍碱液)。处理后含铍碱液采用专性吸附剂吸附回收铍,铍的吸附率可达 99.9% ,溶液中的铍质量浓度可降至 $0.1 \text{ mg}/\text{L}$ 以下。

2) 通过 SEM、EDS 分析,间歇运行 $100\sim 200 \text{ h}$ 后的电渗析阴膜、阳膜和双极膜的膜表面均无明显

沉积物,膜面微观形貌无明显变化,仅有少量 Mg、Fe 沉积。双极膜电渗析工艺对处理含铍碱液的适应性较好。在此工艺运行期间需定期采用 2% 的酸清洗膜堆,保持膜的性能稳定。

参考文献:

- [1] 刘兴. 含铍废水处理的应用及研究[J]. 新疆有色金属, 2019, 42(4):10-11.
- [2] 姜科,周康根,杨有才. 铁氧体沉淀法处理工业含铍废水研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018, 70(6):83-86.
- [3] 叶开凯,苏学斌,张佳宇,等. 二次沉淀法深度处理工艺废水中的铍试验研究[J]. 湿法冶金, 2023, 42(3):302-305.
- [4] 庄明龙,柴立元,闵小波,等. 改性污泥处理含铍废水的吸附特性研究[J]. 应用化工, 2005, 34(1):25-27.
- [5] Zhao X, Zheng B, Xia H, *et al.* Effective removal of beryllium from industrial wastewater by alkali-leaching activated carbon[J]. Water Air Soil Poll, 2023, 234

- (9):11270-11281.
- [6] 闵小波,袁林,柴立元,等.含铍废水生物净化试验[J].中南大学学报(自然科学版),2006,37(1):41-46.
- [7] 闵小波,柴立元,庄明龙,等.石灰中和-生物净化处理含铍废水[J].中国有色金属学报,2005,15(8):1289-1293.
- [8] Meeravali N N, Madhavi K, Kumar S J. A novel surfactant assisted dispersive liquid-liquid microextraction for the removal/recovery of beryllium from industrial effluents [J]. Desalination Water Treat, 2018, 101(1):283-290.
- [9] Xia H, Zheng B, Zhao X, *et al.* Separation and recovery of uranium and beryllium from acidic sulphate solutions by solvent extraction using mixture of organophosphonic extractants[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2025, 334(1): 405-418.
- [10] 张维润.电渗析处理赤泥碱性废水[J].水处理技术, 1996, 22(5):271-276.
- [11] 徐洁,康长安,辛朝.电渗析技术处理氧化铝厂碱性废水实验研究[J].工业安全与环保, 2011, 37(3): 41-42.
- [12] 马作恕,臧国强,齐志贤,等.电渗析法从碱性萃原液中脱盐回收碱的研究[J].水处理技术, 1980, 6(2): 28-31.
- [13] 彭雪娇,牛建国,周勇.双极膜电渗析法处理钨冶炼碱性废水的研究[J].东华理工大学学报:自然科学版, 2008, 31(3):283-286.
- [14] Shiv B, Hasintha W, Mohsin T, *et al.* Beryllium contamination and its risk management in terrestrial and aquatic environmental settings[J]. Environ Pollut, 2023, 320(3):121077-121095.
- [15] 刘会娟,曲久辉.铝的水溶液化学特征及其聚合物生成机制[J].高技术通讯, 2005, 15(9):106-110.
- [16] Driscoll C T, Schecher W D. The chemistry of aluminum in the environment[J]. Environ Geochem Health, 1990, 12(1):28-49.
- [17] Botté A, Mariem Z, Jolle G, *et al.* Correction to: Aluminium in aquatic environments; abundance and ecotoxicological impacts[J]. Aquat Ecol, 2022, 56(4):1359.

Study on the recovery of alkali from beryllium-containing alkali solution by bipolar membrane electro dialysis

ZHANG Yufeng¹, GUO Qing², ZENG Juan¹,
YU Kanping¹, LEI Xiang¹, LIU Meng¹

(1. Changsha Research Institute of Mining & Metallurgy Co., Ltd., Changsha, 410012, China;
2. China Minmetals Beryllium Co., Ltd., Changsha 410030, China)

Abstract: Beryllium-containing alkali solution is production wastewater generated during the extraction method for producing industrial beryllium hydroxide, which contains high concentrations of valuable components such as sodium hydroxide and beryllium elements. In order to recycle alkali and beryllium, bipolar membrane electro dialysis was used to treat beryllium-containing alkali solution, and a self-prepared adsorbent for beryllium was used to recover beryllium from the solution containing beryllium and aluminum after treatment. In this paper, the running time, alkali concentration and concentration ratio of bipolar membrane electro dialysis treatment process was investigated. The results showed that when the alkali concentration of beryllium-containing alkali solution was 0.7 mol/L and concentration ratio was 2 : 1, the recovered alkali concentration could reach 49.22 g/L, and alkali recovery rate reached 92.42%.

Key words: beryllium; alkali solution; bipolar membrane electro dialysis; alkali recovery