

电渗析提锂技术研究进展

王 阳, 韩 乔, 杨占旭

(辽宁石油化工大学 石油化工学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 综述了不同电渗析体系对盐湖中锂的分离效果, 包括单选择性电渗析、离子液膜、双极膜, 其中离子液膜具有对 Li^+ 的高度识别、电解下的长期稳定性和低能耗等特点, 发展前景较为广阔; 分析了不同电渗析体系在盐湖提锂中的优缺点及未来发展趋势, 以及推动应用电渗析体系进行盐湖提锂的工业化研究。

关键词: 盐湖; 电渗析; 离子液膜; 提锂

中图分类号: TQ131.11

文献标志码: A

doi: 10.12422/j.issn.1672-6952.2023.01.001

Research Progress on Lithium Extraction Technology by Electrodialysis

Wang Yang, Han Qiao, Yang Zhanxu

(School of Petrochemical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning 113001, China)

Abstract: This paper summarized the separation effects of different electrodialysis systems on lithium in Salt Lake, including single selective electrodialysis, ionic liquid membrane and bipolar membrane, among which ionic liquid membrane with a broad development prospect possesses the characteristics of high recognition of Li^+ , long-term stability under electrolysis and low energy consumption. Furthermore, the advantages, disadvantages and tendency of prospective development of different electrodialysis systems in lithium extraction from Salt Lake were analyzed, and the industrialization research on the application of electrodialysis systems for lithium extraction from Salt Lake was analyzed.

Keywords: Salt lake; Electrodialysis; Ionic liquid membrane; Lithium extraction

锂作为一种战略性的商品元素, 在内燃机时代向新能源时代过渡的阶段起到了基石的作用。小到便携式的能源设备, 大到驱动国家正常运转的巨型设备, 无一能逃脱锂元素, 它甚至被冠以“21世纪能源金属”的美誉^[1-2]。锂由于其优异性能, 被广泛地用于电池^[3-4]、原子能^[5-6]、玻璃陶瓷^[7-8]、航空航天^[9-11]、化工冶金^[12-13]、空调制冷以及医药制取等众多工业领域。新能源行业在我国从“草莽时代”发展到现在的颇具规模, 锂在电池中的用量大幅增加, 这给我国锂资源的开发带来了巨大挑战。

随着锂消费量的不断提高, 锂的获取显得尤为重要。从锂资源分布来看, 卤水锂占全球锂资源的62.6%, 占我国锂资源的71.9%^[14]。根据美国地质调查局报道的锂资源储藏量分布, 我国在全球锂资

源分布排行中居第二位, 其中79.0%的锂资源存在于海水中^[15]。从自然界获取锂的途径之一是矿石提锂, 矿石提锂虽然具有配套设施成熟的优势, 但矿石中锂含量少、提锂技术成本高、开发难度大等诸多因素限制了其发展^[16-17]。盐湖卤水因其储量丰富、开发难度低、环境污染较小且能满足庞大市场对锂资源的需求而备受瞩目^[18], 逐渐成为世界各国开发提锂的主要方向^[19]。

盐湖是一个丰富的自然宝库, 为科技的进步和发展提供了巨大的摇篮。盐湖卤水中除了目标离子 Li^+ 以外, 主要有 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 等离子^[20]。针对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等伴生离子对 Li^+ 的影响, 目前主要通过各种分离技术减小 $m(\text{Mg}^{2+})/m(\text{Li}^+)$ (简称镁锂比)得到 Li^+ , 并改进成为符合生产生活的锂产品, 从绿色经济的角度出发,

收稿日期: 2022-01-06 修回日期: 2022-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(21671092); 辽宁省“兴辽英才”创新领军人才项目(XLYC1802057); 辽宁省—沈阳材料科学国家研究中心联合研发基金项目(2019010280-JH3/301); 抚顺英才计划青年拔尖人才资助项目(FSYC202007001)。

作者简介: 王阳(1994-), 男, 硕士研究生, 从事盐湖卤水提锂新工艺方面的研究; E-mail: 953285016@qq.com。

通信联系人: 杨占旭(1982-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事新型储能材料及新型催化材料的研究; E-mail: zhanxuy@126.com。

对伴生离子进行二次处理得到相应产物,从一定程度上减少离子资源的浪费。

卤水中与 Li^+ 共存的还有多种碱土金属离子,其中 Mg^{2+} 与 Li^+ 物性相似,大大增加了提锂难度,这也成为盐湖卤水提锂的技术关键。目前,提锂手段包括沉淀法^[21-23]、萃取法^[24-25]、离子交换与吸附法^[26-29]、纳滤法^[30-32]、电化学提锂法^[33]、电渗析法等。其中,电渗析法具有操作简单、效率高、能耗低等优势。电渗析技术不仅在酸碱回收^[34]、电镀废液处理^[35]以及工业废水回收等方面成效显著,而且在盐湖提锂方面也表现出技术成熟、工艺简单、分离性能好等一系列优点。

在电渗析提锂过程中,交换膜的种类是影响电渗析提锂的重要因素。本文对近年来国内外电渗析提锂技术进行分析,并针对目前电渗析提锂过程中存在的问题及不足指出研究方向,为电渗析技术更好的发展与应用提供思路和参考。

1 电渗析技术原理

电渗析是一种基于电化学膜的分离过程,它依赖于水溶液中不同离子物质的电位梯度^[36]。在两个电极之间电位差的影响下产生一个电场,电场诱导离子通过离子交换膜。典型的电渗析装置主要由一对阴阳电极与若干对阴阳离子交换膜组成,用固定电压做驱动力,使阴阳离子选择性透过交换膜,通过交替形成浓水室与淡水室来达到离子分离的目的(见图1)^[37]。电渗析提锂的实质是利用电场作用驱动离子选择性通过交换膜,从而达到离子分离与富集目的。

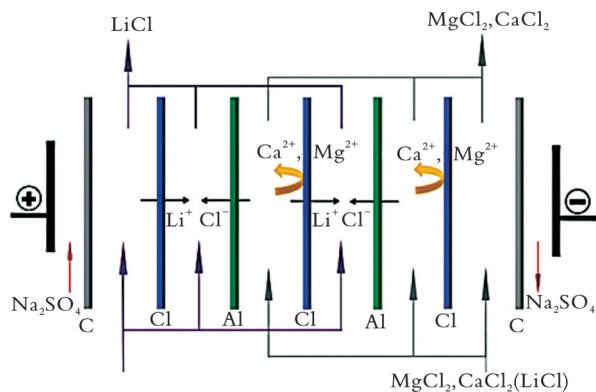


图1 电渗析原理图

电渗析提锂实验的重点是 Li^+ 的选择性提取与高效富集。普通电渗析通过设置多组阳离子与阴离子交换膜,一价离子交换膜能够阻隔 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的迁移, Li^+ 在电驱动下实现定向迁移并完成一价二价离子选择^[38];液膜中的有机液体作为 Li^+ 载体有出色的离子识别能力且稳定性良好,能够达到使 Li^+

快速电迁移的效果^[39]。

电渗析提锂具有循环稳定、高效运行的优势。其成本主要为设备(电渗析装置、膜)成本与运行成本。因此,通过装置优化控制成本与选择稳定性好的膜,电渗析提锂具有良好的发展前景。电渗析提锂主要考虑的因素有操作电压、pH、浓淡室进料流量、卤水镁锂比与其他离子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+});主要参考条件为镁锂分离系数、 Li^+ 回收率、电流效率与能耗^[40]。

2 电渗析种类

2.1 单价离子选择性

离子交换膜是电渗析技术的主要元件,它拥有选择性透过的膜状高分子结构,电渗析分离离子的能力大小取决于交换膜性能的好坏。离子交换膜的种类很多,不同的标准有不同的归类方法。根据交换膜的材料可以分为无机系离子交换膜和有机高分子系离子交换膜。有机高分子系离子交换膜具有性能优异、适用范围广、制备简便等特点,因此该离子交换膜被大量生产使用。

图2为多级电渗析实验装置图^[38]。

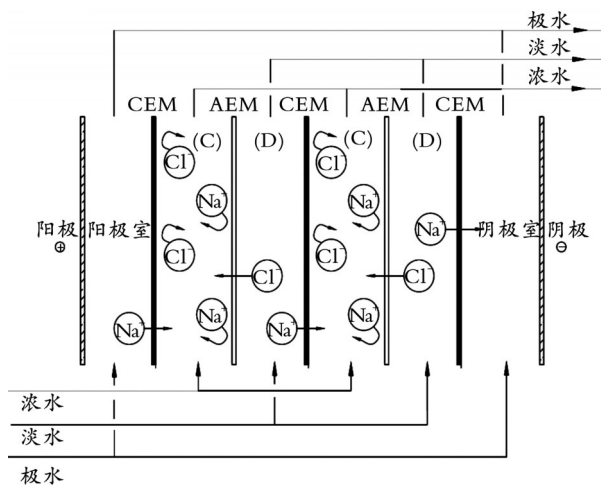


图2 多级电渗析实验装置图

图2中,淡水室、浓水槽和极水槽分别放有高镁锂比的卤水、一定浓度的氯化钠溶液和硫酸钠溶液,通过增压泵实现独立循环运输,进水流量由转子流量计计量。在外接电压做驱动力时,淡化室中的阳离子从正极透过阳离子交换膜推向阴极,被相邻隔室的阴离子交换膜阻挡,并在浓缩室中发生富集;淡化室中的阴离子在负极的推动下透过阴离子交换膜向阳极移动,被相邻隔室的阳离子交换膜阻挡,在浓缩室中发生聚集^[40]。一般氯化钠溶液不做电解液,这是因为 Cl^- 在阳极一侧发生反应生成氯气,不仅造成空气污染,而且破坏膜结构。因此,选择在电极上不发生反应的溶液或者在电解液中添加

入还原剂避免产生有毒气体。

基于上述原理, Y.B. Qiu 等^[37]通过选择性电渗析膜堆证明了同时浓缩锂与去除二价离子的可行性。结果表明, 通过选择合适的电流密度可避免膜结垢, 膜堆对二价离子具有优异的分选性能。

X.Y. Nie 等^[41]研究了外加电压、镁锂比、pH 和进料溶液线速度对 Li^+ 回收率的影响。当镁锂比从 150.0 降低至 8.0 时, Li^+ 回收率提高至 95.3%; 在高外加电压下, 分离系数、 Li^+ 回收率和比能耗均显著提高, 但是, 为了最大限度地减少电渗析的能量需求, 最终选择 5 V 为最佳外加电压。进料溶液中 M (例如, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 或 K^+) 与 Li^+ 的质量比是一个关键的操作参数, 因为它限制电渗析工艺中的 Li^+ 分离效率。

电渗析已经是一种成熟的膜分离技术, 它具有操作简便、分离效率高和便于工业化等优点。随着实验的进行, 膜的维修与替换是必不可少的环节, 选择稳定性好和选择性高的膜对电渗析提锂实验很重要, 同时要开发新类型的膜。

2.2 离子液体膜

离子液体膜通常由作为 Li^+ 载体的液体与两个阳离子交换膜组成, 起到将 Li^+ 载体与进料溶液和接受溶液物理分离的作用^[42] (见图 3), 从高镁锂溶液中回收锂^[43-45]。通常选择对 Li^+ 选择性高的有机溶液为 Li^+ 载体, 离子液体膜中 Li^+ 载体是电渗析提锂的关键。在电渗析过程中, 电极反应发生在电极表面; 同时, 阳离子膜阻挡阴极室中的阴离子, 阳极室进料盐水中的阳离子迁移到阴极以维持带电离子的平衡。理论上, 在盐水中的阳离子 (Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+}) 中, 只有 Li^+ 可以被液膜识别并电化学提取, 然后 Li^+ 在液膜中发生电迁移, 在液膜处发生电化学剥离^[46]。

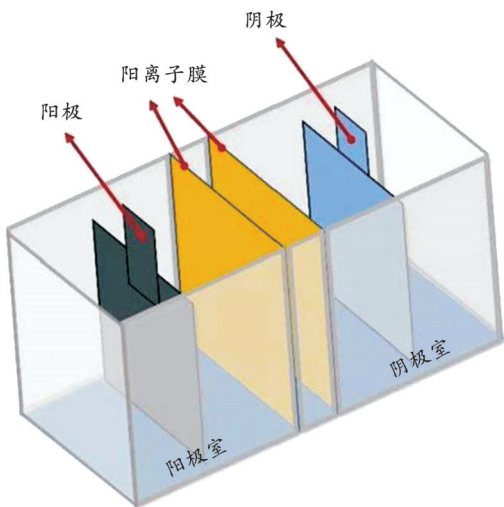


图3 离子液体膜装置示意图

C.Liu 等^[42]通过溶剂萃取实验, 对比了四个室温离子液体膜系统 (见图 4)。结果表明, $\text{C}_4\text{MInTFSI}$ 由于具有出色的电导率, 在作为 Li^+ 载体液膜时有最高的 Li^+ 迁移率。该系统由两个阳离子交换膜 (CEM) 之间的液膜组成, 液膜能够增加 Li^+ 的电迁移, 使盐水中的镁锂比从 50.0 下降至 0.5, 运行 12 h 后电流密度为 4.375 A/m^2 。此外, 与典型的电渗析相比, 液膜电渗析系统实现了 $16.00 (\text{W}\cdot\text{h})/\text{g}$ 的较低能耗。值得一提的是, 卤水中的 K^+ 和 Ca^{2+} 几乎完全被液膜阻挡, 高浓度的 Na^+ 倾向于与 Li^+ 进行电迁移竞争, 因此该方法更适用于高镁锂、低钠卤水。

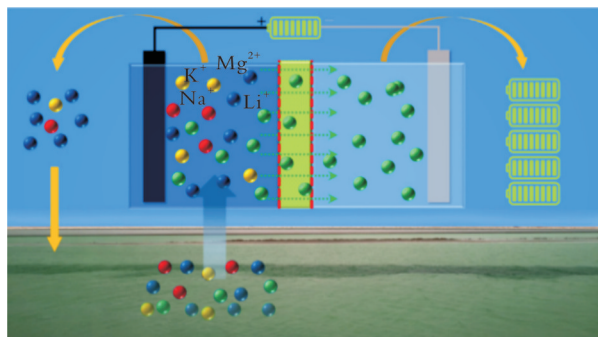


图4 液膜电渗析提锂示意图

Z.Zhao 等^[47]将离子萃取与电渗析结合建立了一种夹层式液膜电渗析系统。选择 $\text{TBP} + \text{ClO}_4^-$ 体系作为液膜, 盐水中镁锂比从 100.0 降低至 2.0, 在最佳外加电压为 3 V 和温度为 20°C 的条件下, 最小能耗为 $0.13 (\text{kW}\cdot\text{h})/\text{mol}$ 。该体系对 K^+ 、 Ca^{2+} 有较强的阻隔能力, 对 Li^+ 、 Na^+ 的分离效果较好, 因为阳极卤水溶液中混合离子较多时会造成溶液黏度升高, 阻碍电迁移 Li^+ 。这些实验结果证实了液膜电渗析是一种很有前途的方法, 因为它在处理含有多种离子的盐水溶液时, 对 Li^+ 具有高选择性和低能耗。

尽管 Li^+ 的分离与回收都取决于离子膜, 但实验中会伴随着膜污染和结垢的情况。从实践的角度来看, 未来的工作需要致力于开发具有更大 Li^+ 选择性和减少膜结垢的改进膜。

Z.Li 等^[48]报道了一种固态电解质膜电渗析提锂的新方法 (见图 5)。通过此方法合成的 LLTO 是一种有钙钛矿晶体结构的固态电解质 Li^+ 超导体 (见图 6), 其晶格框架由 TiO_6 八面体组成; La^{3+} 充当支撑柱以稳定晶体结构, 允许 Li^+ 嵌入。该工艺对 Li^+ 具有高电导率与高渗透性, 可将海水样品富集 45 000 倍, 并沉淀出满足电池行业纯度要求的磷酸锂, 同时具有能耗低的优势, 在经济方面具有可行性。

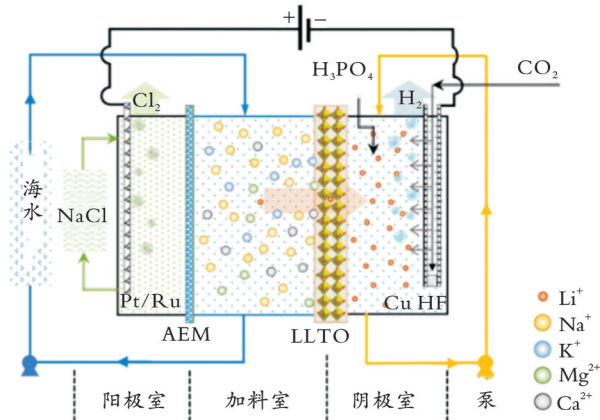


图5 固态电解质电渗析原理图

2.3 双极膜

双极膜电渗析是把双极膜与电渗析膜堆中阴阳离子交换膜集成在一起的技术。双极膜由阳离子交换层、 Ag^+ 交换层、亲水界面层构成，如

图7所示^[49-50]。施加直流电场时，亲水层中的水分子分解成 H^+ 和 OH^- ，电场诱导带负电的离子通过阴离子交换膜(AEM)向阳极转移，带正电的离子通过CEM向阴极转移。同时， H^+ 和 OH^- 分别与通过AEM和CEM的阴离子和阳离子结合^[51]。

S.Bunani等^[52]研究了在模拟双极膜盐水中分离回收 Li^+ 与 B^{3+} 的可行性。结果表明，在高电压(18 V)的条件下， Li^+ 分离效率为99.0%，然而高电压的施加会引起离子泄露； Li^+ 分离效率几乎不随pH的变化而变化。实验结束后， Li^+ 和 B^{3+} 分别以 LiOH 和 H_3BO_4 的形式回收。

与一般电渗析相比，双极膜具有机械稳定性好、电流效率高、渗透选择性高与寿命长等优点。但是，电渗析过程对离子膜依赖程度过高^[53]，还有望进一步通过研究降低依赖性。

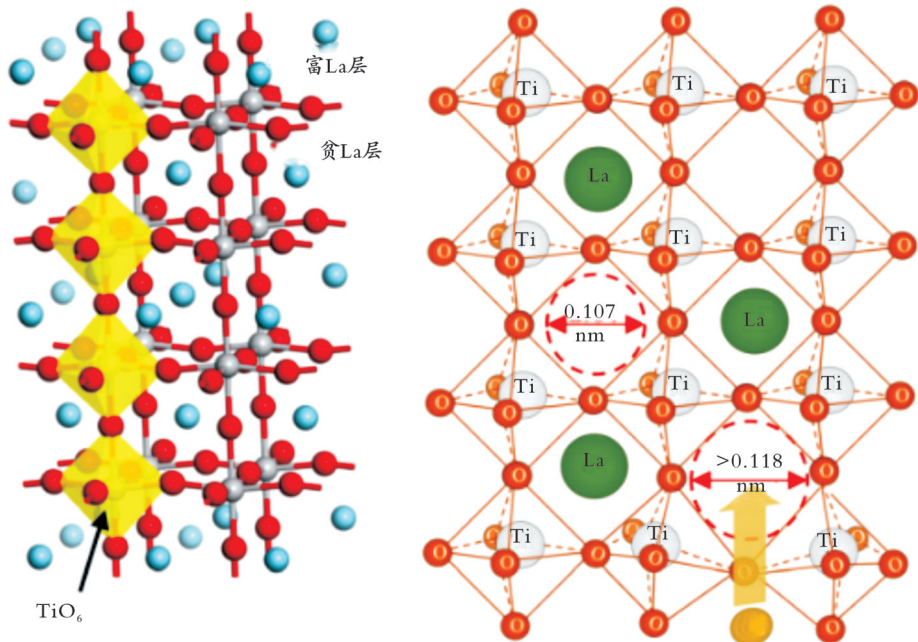


图6 LLTO结构示意图

3 技术经济指标

3.1 分离系数

盐湖提锂的最大干扰是存在于卤水中的各种离子。分离系数是评价 Li^+ 选择性透过的重要指标，其计算公式如下：

$$F_{\text{Mg-Li}} = \frac{c_{\text{Li}}/c_{\text{Li}_t}}{c_{\text{Li}_0}/c_{\text{Li}_t}} \quad (1)$$

式中， c_{Li_t} 为 t 时刻 Mg^{2+} 的浓度，mol/L； c_{Li_0} 为 Mg^{2+} 的初始浓度，mol/L； c_{Li_t} 为 t 时刻 Li^+ 的浓度，mol/L； c_{Li_0} 为 Li^+ 的初始浓度，mol/L。

选择性离子交换膜的选择性决定 Mg^{2+} 截留率，

从而影响分离系数。高选择性的膜材料可保证电渗析过程中高 Li^+ 迁移率与高 Mg^{2+} 截留率，表现出很高的镁锂分离系数。

3.2 回收率

Li^+ 回收率(R_{Li})的计算公式如下：

$$R_{\text{Li}} = \frac{V_{\text{ct}}(c_{\text{ct}} - c_{\text{c0}})}{V_{\text{d0}}c_{\text{d0}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中， c_{d0} 为淡化室中 Li^+ 的初始浓度，mol/L； V_{d0} 为淡化室中溶液的体积，L； c_{ct} 为 t 时刻浓缩室中 Li^+ 的浓度，mol/L； c_{c0} 为浓缩室中 Li^+ 的初始浓度，mol/L； V_{ct} 为 t 时刻浓缩室中溶液的体积，L。

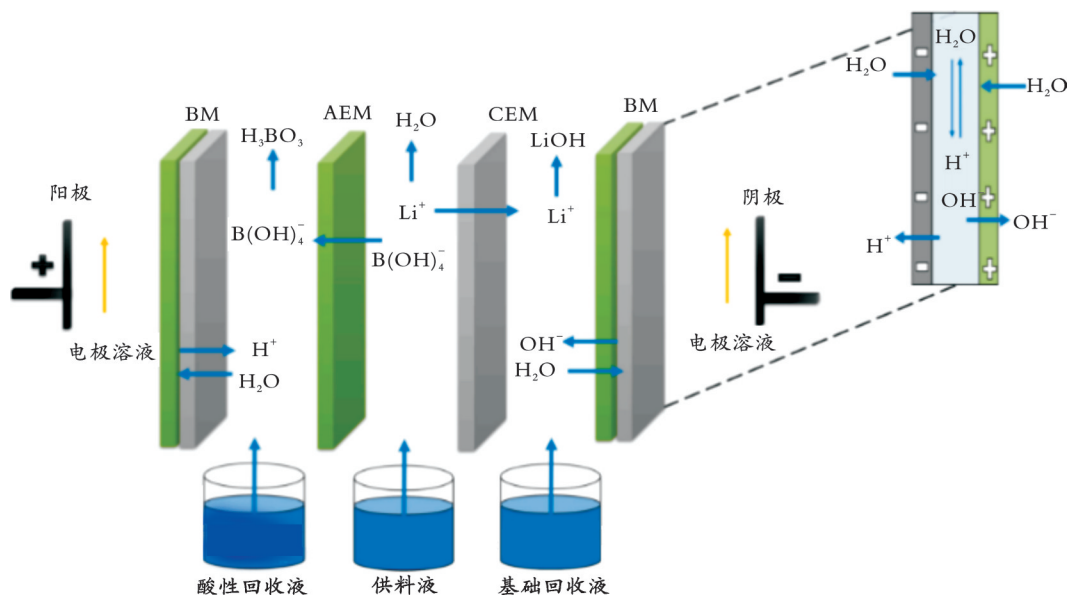


图7 双极膜结构示意图

3.3 单位能耗

单位能耗是指淡化室回收提取 1 mol Li^+ 所需的能量,其计算公式如下:

$$E_{\text{SEC}} = \frac{U \int_0^t I(t) dt}{n_c} \quad (3)$$

式中, U 为电压, V; I 为电流, A; t 为操作时间, min; n_c 为浓缩室中 Li^+ 增加的物质的量, mol。

电压驱动力与离子迁移时间一般通过影响 Li^+ 的迁移物质的量影响单位能耗。

4 结论与展望

电渗析技术对高镁锂比的卤水可进行有效的离子分离。利用电渗析方法提锂已成为近年来的研究热点,发展前景广阔。在该方法中,膜对提锂效果起非常重要的作用,它决定 Li^+ 回收率、镁锂分离系数以及单位能耗等重要指标。但是,电渗析提锂依然存在诸多不足,在今后的研究中应从以下几个方面逐渐完善:

(1) 选择性电渗析具有优异的单价离子渗透选择性和多价离子的高保留率,同时对卤水的预处理要求低。近年来,为了提高锂的选择性,将吸附材

料插入膜的表面进行修饰与加工已经成为主流。

(2) 双极膜电渗析提锂手段优点突出,但在实验中对交换膜的依赖度过大,有望进一步研究改善此情况。

(3) 液体膜技术在处理含多种离子的盐水中表现出较高的回收率与低单位能耗。但是,膜结构与污染问题未能得到解决,未来需要致力于开发具有更大锂选择性和减少膜结垢的改进膜。另外,应开发具有固态电解质膜结构的卤水提锂系统以确保锂的供应,这是一项极具前景的工作。

综上所述,电渗析技术因具有操作简单、分离效果优异、对环境污染小的优点而从众多提锂手段中脱颖而出。由于电渗析技术中膜是一切的核心,因此各种改进与提高的手段都是基于这一结构。当然,膜的成本相对较高,而且实验会对膜造成一定程度的污染。单纯的选择性膜离子分离效果有限,所以众多专家学者通过引入液膜与固态膜结构,很大程度上使离子分离更彻底,锂的回收率更高,能耗减少,成本相对降低。电渗析技术依赖膜程度较高,如何设计一种新工艺在不依赖选择性膜的基础上实现对二价离子的“截留”,可能会成为未来电渗析提锂需要思考的新方向。

参 考 文 献

- [1] Grosjean C, Miranda P, Perrin M, et al. Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(3): 1735-1744.
- [2] Brandt F, Haus R. New concepts for lithium minerals processing [J]. Minerals Engineering, 2010, 23(8): 659-661.
- [3] Wang Z F, Wang Y P, Li Z, et al. The optimal charging method research for lithium-ion batteries used in electric vehicles [J]. Energy Procedia, 2016, 104: 74-79.

- [4] Chen Z Y, Xiong R, Tian J P, et al. Model-based fault diagnosis approach on external short circuit of lithium-ion battery used in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2016, 184(15): 365-374.
- [5] 张明杰, 郭清富. 21 世纪的能源金属——锂的冶金现状及发展[J]. 盐湖研究, 2001, 9(3): 52-60.
- [6] 刘皓阳. 基于系统动力学的中国锂资源需求趋势分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [7] 游清野. 锂在玻璃陶瓷工业中的应用[J]. 世界有色金属, 2000(2): 26-31.
- [8] 黄新友, 花海堂, 高春华, 等. 锂离子掺杂量对 BLMNS 陶瓷的介电性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(S1): 57-59.
- [9] 王秀莲, 李金丽, 张明杰. 21 世纪的能源金属——金属锂在核聚变反应中的应用[J]. 黄金学报, 2001, 3(4): 249-252.
- [10] Fasel D, Tran M Q. Availability of lithium in the context of future D-T fusion reactors[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 75-79: 1163-1168.
- [11] Hoshino T, Terai T. High-efficiency technology for lithium isotope separation using an ionic-liquid impregnate organic membrane[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86: 2168-2171.
- [12] Swain B. Recovery and recycling of lithium: A review[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 172: 388-403.
- [13] 何启贤. 世界锂金属资源开发利用现状及其市场前景分析[J]. 轻金属, 2011, 35(1): 118-132.
- [14] 苏彤, 郭敏, 刘忠, 等. 全球锂资源综合评述[J]. 盐湖研究, 2019, 27(3): 104-111.
- [15] 汪镜亮. 卤水锂资源提锂现状[J]. 化工矿物与加工, 1999, 28(12): 1-5.
- [16] 祝增虎, 朱朝梁, 温献明, 等. 碳酸锂生产工艺研究进展[J]. 盐湖研究, 2008, 16(3): 64-72.
- [17] 田千秋, 陈白珍, 陈亚, 等. 锂辉石硫酸焙烧及浸出工艺研究[J]. 稀有金属, 2011, 35(1): 118-123.
- [18] Brandt F, Haus R. New concepts for lithium minerals processing[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(8): 659-661.
- [19] Sun S Y, Ye F, Song X F. Extraction of lithium from salt lake brine and mechanism research[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2011, 27: 439-444.
- [20] 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 等. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2123-2165.
- [21] Boryta D A, Kullberg T F, Thurston A M, et al. Production of lithium compounds directly from lithium containing brines: US 6921522 [P]. 2005.
- [22] Hamzaoui A H, Hammi H, Mnif A. Operating conditions for lithium recovery from natural brines[J]. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2007, 12(52): 1859-1863.
- [23] 徐徽, 毛小兵, 李增荣, 等. 一种从盐湖卤水中联合提取硼、镁、锂的方法: CN 101024502 [P]. 2007.
- [24] 张金才, 王敏, 戴静, 等. 卤水提锂的萃取体系概述[J]. 盐湖研究, 2005, 13(1): 42-48.
- [25] 巫辉, 张柯达, 吴杰, 等. 我国盐湖锂资源的开发及技术研究[J]. 化学与生物工程, 2006, 23(8): 4-6.
- [26] 李杰, 熊小波. 铝盐吸附剂盐湖卤水提锂的研究现状及展望[J]. 无机盐工业, 2010, 42(10): 9-11.
- [27] Tang W, Wang X J, Hou Y Y, et al. Nano LiMn_2O_4 as cathode material of high rate capability for lithium ion batteries[J]. Power Sources, 2012, 198(1): 308-311.
- [28] Tian L Y, Ma W, Han M. Adsorption behavior of Li^+ onto nano-lithium ion sieve from hybrid magnesium/lithium manganese oxide[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(1): 134-140.
- [29] 唐娜, 龚经款, 项军. 铝基锂吸附剂制备及其吸附性能研究[J]. 无机盐工业, 2020, 52(8): 51-56.
- [30] 邢红, 王肖虎, 毛新宇. 膜法盐湖卤水提锂工艺研究[J]. 盐业与化工, 2016, 45(1): 24-26.
- [31] 郑领英, 王学松. 膜技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [32] Somrani A, Hamzaoui A H, Pontie M. Study on lithium separation from salt lake brines by nanofiltration (NF) and low pressure reverse osmosis (LPRO) [J]. Desalination, 2013, 317: 184-192.
- [33] Guo Z, Ji Z, Wang J, et al. Development of electrochemical lithium extraction based on a rocking chair system of $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$: Self-driven plus external voltage driven[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 259: 118154.
- [34] 姜伟, 折建梅, 李志国, 等. 钢铁酸洗废水资源化利用研究现状[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2014, 34(2): 9-11.
- [35] 付春香, 李萍, 赵杉林, 等. 廉价高分子吸附剂处理含 Cr(VI) 电镀废水[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2007, 27(1): 10-13.
- [36] Campione A, Gurreri L, Ciofalo M, et al. Electrodialysis for water desalination: A critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications[J]. Desalination, 2018, 434: 121-160.
- [37] Qiu Y B, Yao L, Tang C, et al. Integration of selectrodialysis and selectrodialysis with bipolar membrane to salt lake treatment for the production of lithium hydroxide[J]. Desalination, 2019, 465: 1-12.
- [38] 冯文贤. 电渗析法分离卤水中镁锂的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.

- [39] Liu G, Zhao Z, He L. Highly selective lithium recovery from high Mg/Li ratio brines[J]. Desalination, 2019, 474: 114185.
- [40] 陈青柏.面向卤水/海水锂资源提取的电渗析法分离纯化锂的研究[D].天津:河北工业大学,2016.
- [41] Nie X Y, Sun S Y, Sun Z, et al. Ion-fractionation of lithium ions from magnesium ions by electrodialysis using monovalent selective ion-exchange membranes[J].Desalination, 2017,403:128-135.
- [42] Liu C, Li Y, Lin D, et al. Lithium extraction from seawater through pulsed electrochemical intercalation[J]. Joule, 2022, 4 (7): 1459-1469.
- [43] Shi C, Jing Y, Xiao J, et al. Solvent extraction of lithium from aqueous solution using non-fluorinated functionalized ionic liquids as extraction agents[J].Separation and Purification Technology,2017,172:473-479.
- [44] Shi C, Jing Y, Xiao J, et al. Liquid-liquid extraction of lithium using novel phosphonium ionic liquid as an extractant[J]. Hydrometallurgy,2017,169:314-320.
- [45] Shi C, Jia Y, Zhang C, et al. Extraction of lithium from salt lake brine using room temperature ionic liquid in tributyl phosphate[J]. Fusion Engineering & Design, 2015, 90: 1-6.
- [46] 蒋晨啸.以电渗析为基础的传质新理论和新工艺研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.
- [47] Zhao Z, Liu G, Jia H, et al. Sandwiched liquid-membrane electrodialysis: Lithium selective recovery from salt lake brines with high Mg/Li ratio[J].Journal of Membrane Science, 2019,596(57):117685.
- [48] Li Z, Li C, Liu X, et al. Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(5): 3152-3159.
- [49] Soumaya G, Alexander C. Recent advances on electrodialysis for the recovery of lithium from primary and secondary resources-ScienceDirect[J].Hydrometallurgy,2019,189:105124.
- [50] Li Y, Shi S, Cao H, et al. Bipolar membrane electrodialysis for generation of hydrochloric acid and ammonia from simulated ammonium chloride wastewater[J]. Water Research, 2016, 89: 201-209.
- [51] Mani K N. Electrodialysis water splitting technology[J].Journal of Membrane Science,1991,58(2):117-138.
- [52] Bunani S, Yoshizuka K, Nishihama S, et al. Application of bipolar membrane electrodialysis (BMED) for simultaneous separation and recovery of boron and lithium from aqueous solutions[J].Desalination,2017,424:37-44.
- [53] Zavahir S, Elmakki T, Gulied M, et al. A review on lithium recovery using electrochemical capturing systems [J]. Desalination, 2021, 500: 114883.

(编辑 宋官龙)