

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

颗粒状高亲水性铝基锂吸附剂用于盐湖卤水连续提锂过程研究

曹谕娇¹, 杨颖¹, 林森^{1,2}, 于建国^{1,2}

(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 生态环境部化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237)

摘要: 铝基层状锂吸附剂作为我国低品位卤水提锂的关键分离材料, 目前已广泛应用于青海多个盐湖锂分离提取工业装置, 但是其粉体成型过程工艺对锂吸附速率及提取率仍有较大负面影响。本文系统考察了新型颗粒状高亲水性铝基锂吸附剂的连续提锂过程, 研究了不同流速下固定床吸附/解吸性能, 并设计了20柱3区连续提锂工艺进行锂分离提取效果评价。结果表明, 吸附剂在较高操作流速下, 可实现Li⁺的高效吸附与解吸, 相比于传统颗粒, 卤水处理量能够提升至原来的3倍, 高解吸流速对解吸液中Li⁺浓度影响较小, 相同时间内的解吸量能够提高至原来的3.01倍。在长周期连续提锂过程中, 锂提取率大于90%, 18次“吸附-冲洗-解吸”卤水提锂循环的锂吸附量稳定维持在7.23–8.80 mg/g; 在连续提锂工艺的80次吸附柱切换运行过程中, 解吸液Mg/Li质量比可由原料卤水的248迅速降低至0.5以下, 实现了盐湖锂资源的高效选择性分离。

关键词: 盐湖锂资源; 铝基锂吸附剂; 连续离子交换; 吸附选择性; 固定床

中图分类号: TQ115; TB34

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-09

Continuous lithium extraction from salt lake brine using granular highly hydrophilic aluminum-based lithium adsorbent

CAO Yujiao¹, YANG Ying¹, LIN Sen^{1,2}, YU Jianguo^{1,2}

(¹ National Engineering Research Center for Integrated Utilization of Salt Lake Resources, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; ² Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, Ministry of Ecology and Environment, Shanghai 200237, China)

Abstract: Layered aluminum-based lithium adsorbents, as key separation materials for lithium extraction from low-grade brines in China, have been widely applied in industrial lithium extraction processes at several salt lakes in Qinghai. However, the powder granulation process still has a significant adverse effect on the lithium adsorption kinetics and recovery. This study systematically investigates continuous lithium extraction using a novel granular highly hydrophilic aluminum-based lithium adsorbent. Fixed-bed adsorption and desorption performances at different flow rates were investigated, and a 20-column three-zone continuous lithium extraction process was designed to evaluate its lithium separation performance. The results show that the adsorbent achieves efficient Li⁺ adsorption and desorption at relatively high operating flow rates. Compared with conventional granules, the brine treatment capacity can be increased threefold, and a high desorption flow rate has little effect on the Li⁺

收稿日期: 2026-06-16 修回日期: 2026-08-18

通信作者: 林森(1987—), 男, 博士, 教授, linsen@ecust.edu.cn; 于建国(1960—), 男, 博士, 教授, jgyu@ecust.edu.cn

第一作者: 曹谕娇(2001—), 女, 博士研究生, Y13230002@mail.ecust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重大项目重点课题(92475207); 区域联合基金项目(U20A20142)

引用本文: 曹谕娇, 杨颖, 林森, 于建国. 颗粒状高亲水性铝基锂吸附剂用于盐湖卤水连续提锂过程研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–9

Citation: CAO Yujiao, YANG Ying, LIN Sen, YU Jianguo. Continuous lithium extraction from salt lake brine using granular highly hydrophilic aluminum-based lithium adsorbent[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–9

concentration in the eluent, with the amount of Li^+ desorbed within the same period increasing by a factor of 3.01. During long-term continuous lithium extraction, the lithium recovery remained above 90%, and the lithium adsorption capacity remained stable at 7.23–8.80 mg/g over 18 adsorption–rinsing–desorption cycles. During 80 adsorption–column switching operations in the continuous extraction process, the Mg/Li mass ratio was rapidly reduced from 248 in the feed brine to below 0.5 in the lithium-rich product stream, demonstrating efficient and selective separation of lithium from salt lake brine.

Keywords: salt lake lithium resource; aluminum-based adsorbent; continuous ion exchange; adsorption selectivity; fixed-bed

引 言

随着全球双碳战略与气候治理的持续推进,新能源及电动汽车产业快速发展,对锂资源的需求急剧增长^[1–4]。我国锂资源虽储量丰富,但多分布于高海拔地区、品位低、开采难度大,对外依存度高^[5–6],亟需开发高效提锂技术以保障锂资源供应安全。我国约80%的锂资源赋存于盐湖卤水中,其典型特点是 Li^+ 含量低、 Mg^{2+} 和 Na^+ 等共存阳离子含量极高^[7]。目前已较为成熟的盐湖卤水提锂技术包括:沉淀法、溶剂萃取法、膜分离法、吸附法等^[8–12]。其中,吸附法对高镁锂比卤水具有优越的选择性分离能力,更契合我国盐湖锂资源的禀赋特点^[13–14]。吸附材料主要有锰系离子筛、钛系离子筛和铝基锂吸附剂^[15–17],其中锰系和钛系离子筛需要酸洗解吸,易造成晶格结构破坏和锰溶损,且颗粒成型过程导致锂吸附容量大幅下降^[18–19];而铝基锂吸附剂具有结构稳定、无酸解吸、工艺操作简便等优势,已率先实现万吨级规模工业应用^[20–21]。

铝基锂吸附剂为二维层状结构,Al和O共边六配位构成主体骨架, Li^+ 嵌入八面体空穴形成荷正电

层板, Cl^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子分布于层间平衡电荷^[22–24]。其吸附–解吸过程受离子强度推动:低离子强度下 Li^+ 脱出,高离子强度(如盐湖老卤)下 Li^+ 重新嵌入^[25]。工业应用中,吸附剂粉末成型造粒后填充至吸附柱中,可实现较长周期循环运行^[26–27]。然而,成型过程带来的传质阻力使其在高黏度的盐湖老卤中吸附速率显著下降,限制了提锂效率^[28–29]。本文制备了高亲水性铝基锂吸附剂颗粒,系统考察了不同流速下单柱吸附–解吸性能;在此基础上,设计了20柱3区连续提锂工艺,以期突破成型传质限制、实现盐湖卤水锂资源高效回收提供支撑。

1 实验材料和方法

1.1 材料

研究所用铝基锂吸附剂粉末为进一步共沉淀法合成^[17];一水合氯化锂、六水合氯化镁、氢氧化钠、硝酸,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;两种吸附剂颗粒为实验室研制传统颗粒^[26]和新型高亲水性颗粒^[28];卤水采用阿根廷、中国罗布泊和察尔汗三个湖区的卤水以及实验室配制模拟卤水,成分见表1。

表1 实验用卤水中离子浓度

Table 1 Ion concentration in the brine used for experiments

卤水种类	各阳离子浓度/g/L					pH	黏度/mPa·s
	Li^+	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Ca^{2+}		
罗布泊	0.200	92.915	3.389	2.374	0.032	5.61	987
阿根廷	0.638	1.273	108.037	1.342	0.342	7.13	401
察尔汗老卤	0.162	107.865	0.926	0.344	0.020	5.72	1313
模拟卤水	0.432	107.09	/	/	/	5.33	1028

1.2 仪器设备

连续离子交换设备,Hsep20–4,华盛流体分离科技(厦门)股份有限公司;电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP–OES),Arcosfhs 12,德国斯派克分析仪器公司;分析天平,BSA224S–CW,德国赛多利斯公

司;X射线多晶衍射仪(XRD),D8 Advance 达芬奇,德国布鲁克 AXS 有限公司。场发射扫描电镜(SEM),Quanta 650,德国赛默飞世尔科技有限公司。

1.3 静态吸附动力学

采用所研制高亲水性铝基锂吸附剂颗粒,分别置于罗布泊、阿根廷和察尔汗三个湖区的实际卤水中,在 t 时刻取样测定卤水中 Li^+ 浓度 c_t ,根据式(1)计算得到 t 时刻的 Li^+ 吸附容量 q_t :

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t) \times V_a}{m_a} \quad \#(1)$$

其中, $V_a(\text{L})$ 和 $m_a(\text{g})$ 分别为实际卤水的体积和卤水中所加吸附剂颗粒的质量, $c_0(\text{mg/L})$ 为初始卤水中的 Li^+ 离子浓度。

1.4 固定床提锂性能评价

1.4.1 单柱固定床动态吸附-解吸实验 将铝基锂吸附剂颗粒装入型号为 $\Phi 16\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ 的层析柱中,分别以2、4、6、8和10 BV/h的流速自下而上通入卤水,取样测定 t 时刻固定床出口处的 Li^+ 浓度 C_t ,固定床穿透曲线可以描述为 C_t/C_0-t ,随时间而增加的床层吸附容量 Q_t 可以由方程(2)计算得到:

$$Q_t = \int_0^t \frac{Q_v(C_0 - C_t)}{m} dt \quad \#(2)$$

其中, Q_v 为卤水穿过固定床的流速,L/h; C_0 和 C_t 分别为卤水中的初始 Li^+ 浓度和 t 时刻固定床出口的 Li^+ 浓度,g/L; m 为吸附剂床层的干重,g。

吸附剂床层在 t 时刻的 Li^+ 回收率由方程(3)计算得到:

$$R = 1 - \frac{\int_0^t C_t/C_0 dt}{t} \quad \#(3)$$

采用1.5 BV的去离子水对吸附剂床层进行冲洗之后,分别按照4、8、12、16 BV/h的流速自下而上通入去离子水对床层进行解吸,取样测定 t 时刻固定床出口的 Li^+ 浓度,在不同流速下的解吸曲线描述为 C_t-t , t 时刻 Li^+ 解吸量 q_{dt} 可根据方程(4)计算得到:

$$q_{dt} = \frac{\int_0^t C_t Q_{dv} dt}{m} \quad \#(4)$$

其中, Q_{dv} 为解吸液穿过固定床的流速,L/h。

1.4.2 单柱固定床循环 Li^+ 吸附实验 将540mL卤水以6 BV/h的流速自下而上通入固定床,吸附结束后自上而下通入1.5 BV去离子水对床层进行冲洗,再以12 BV/h的流速自下而上通入360 mL去离子水对床层进行解吸,完成一次完整的吸附-冲洗-解吸流程。按照上述条件进行18次循环吸附实验,该过程中的循环吸附容量 Q_c 由方程(5)计算得到:

$$Q_c = \frac{(C_0 - C_c) \times V}{m} \quad \#(5)$$

其中, C_0 和 C_c 分别为吸附前后卤水中的 Li^+ 浓

度,g/L; V 为卤水的体积,L。

1.4.3 20柱12-2-6连续提锂实验 通过20柱3区连续离子交换实验,评价所制备的高亲水性铝基锂吸附剂颗粒的连续提锂性能。装置中配置有20根型号为 $\Phi 20\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ 的吸附柱,将所制备的吸附剂颗粒装填至20根吸附柱中^[30]。按照图1将系统划分为吸附区、冲洗区和解吸区。初始时,1-12号吸附柱位于吸附区,13-18号吸附柱位于解吸区,19-20号吸附柱位于冲洗区。系统每10 min逆时针切换一根吸附柱,即经过一次切换,1号吸附柱转入冲洗区,13号吸附剂转入吸附区,19号吸附柱转入解吸区。如此循环,每完成20次切换视为一个吸附周期。

分别以6 BV/h、12 BV/h、2BV/h的流速将卤水、解吸液、冲洗水通入吸附区、解吸区、冲洗区。由于每个分区的吸附柱串联排布,吸附剂颗粒的散堆分布会对流体在其中的流动产生一定的阻力,所以在三个分区的出口处监测实际的流速 $Q_{v,n}$,由方程(6)计算得到:

$$Q_{v,n} = \frac{V_n}{t} \quad \#(6)$$

其中, V_n 为 t 时间内出口处的流体体积, n 分别为卤水、冲洗水、解吸液。

连续离子交换装置运转2个完整周期(即柱切换40次)后,系统视为达到稳定状态。从第41次切换开始计时,定期从吸附区、冲洗区和解吸区的出口取样,监测各区 Li^+ 浓度随运行时间的变化趋势。在随后的连续60次切换过程中,每次切换后均收集10 min内三个分区出口的混合液,测定其中的 Li^+ 和 Mg^{2+} 的浓度,并以解吸液中的 Mg/Li 质量比来评价所制备高亲水性铝基锂吸附剂的 Li/Mg 分离能力。

2 实验结果与讨论

2.1 静态吸附动力学

图2(a)为所制备的高亲水性铝基锂吸附剂颗粒的SEM图。与传统颗粒相比,新型颗粒尺寸更小,内部形成了疏松多孔的聚合物网络结构,使其具有较高的孔隙率。含水率测定结果显示,该颗粒含水率高达64.82%,远高于传统颗粒的28.24%,表明其孔隙率和亲水性均显著提升;经测试,亲水性颗粒的接触角为 40.8° ,传统颗粒为 72.0° ,证明了其亲水性的改善。图2(b)的XRD图谱进一步证实,新型颗粒与原始吸附剂粉末的衍射峰完全吻合,均显

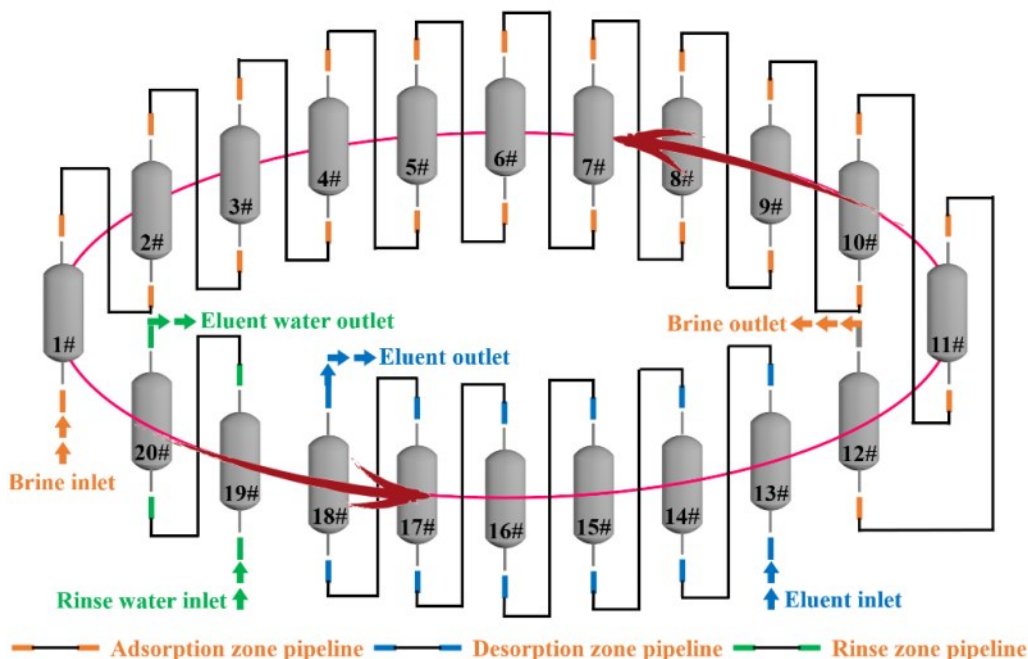


图1 连续离子交换分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the continuous ion exchange zone configuration

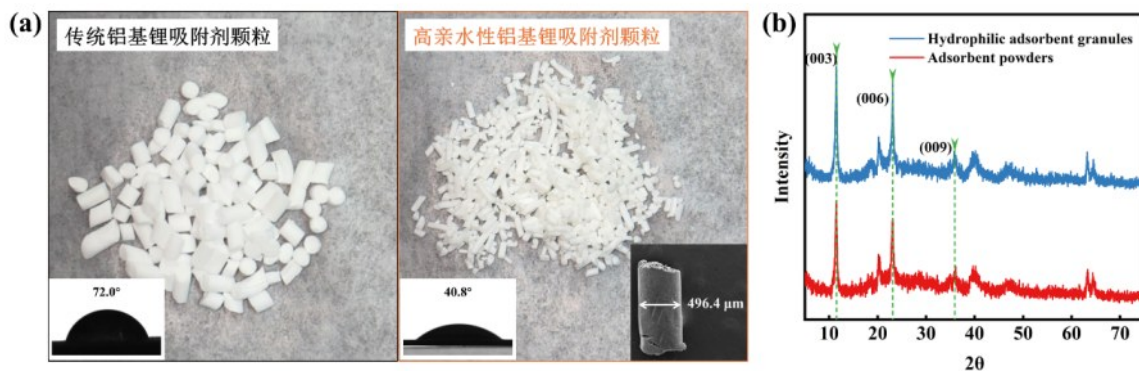


图2 (a)传统铝基锂吸附剂颗粒和高亲水性铝基锂吸附剂颗粒形貌对比(内嵌图:接触角)及(b)吸附剂粉末和亲水性吸附剂颗粒的XRD谱图

Fig.2 (a) Comparison of morphology between conventional and hydrophilic aluminum-based lithium adsorbent granules (insert image: contact angle), and (b) XRD patterns of adsorbent powder and hydrophilic adsorbent granules

示出Li/Al-LDHs的(003)、(006)和(009)特征峰,表明该成型过程未破坏铝基锂吸附剂的晶体结构,保持了材料的完整性^[31]。上述多孔亲水结构赋予了吸附剂颗粒优异的传质性能,吸附剂和卤水之间形成的亲水性介质可显著降低固液界面张力,促进卤水快速浸润吸附剂内部孔道,使水合锂离子扩散至Li/Al-LDHs表面,同时亲水性介质中的亲水性基团与水合锂离子周围的水分子发生竞争性结合,降低其去水合能垒,促进 $[\text{Li}(\text{H}_2\text{O})_4]^+$ 去水合化后,吸附至

Li/Al-LDHs层板,加速吸附过程^[19,32]。图3(a)为两种颗粒在真实盐湖卤水中的吸附动力学曲线。结果表明,该新型颗粒在不同实际卤水中均能实现快速吸附,约30 min即可接近吸附平衡。即使是高 Mg^{2+} 浓度的察尔汗盐湖老卤,其高黏度极大地限制了离子传质,仍可在60 min内达到吸附平衡。图3(b)显示,吸附2 h后,颗粒的吸附容量均在5.23 mg/g以上,其大小受卤水中 Li^+ 浓度和其他共存离子强度的共同影响控制。在察尔汗老卤中,新型颗粒相

较于传统颗粒在2 h内的吸附容量提升至原来的 176.69%,具有极大的速率优势。

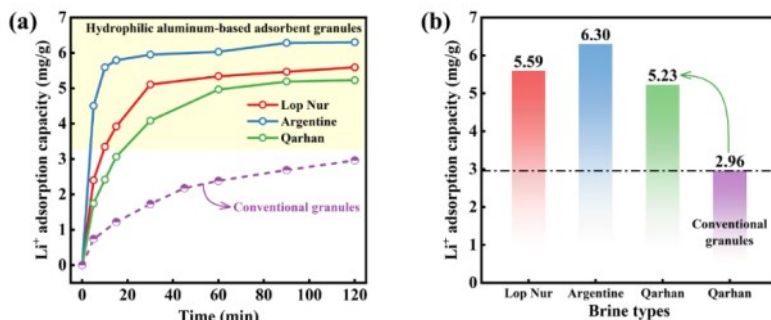


图3 高亲水性铝基锂吸附剂颗粒和传统颗粒在实际卤水中的(a)Li⁺吸附动力学和(b)2 h内的吸附容量

Fig.3 (a) Li⁺ adsorption kinetics, and (b) adsorption capacity at 2 h of highly hydrophilic aluminum-based lithium adsorbent granules and conventional granules in actual brine

2.2 单柱提锂工艺优化

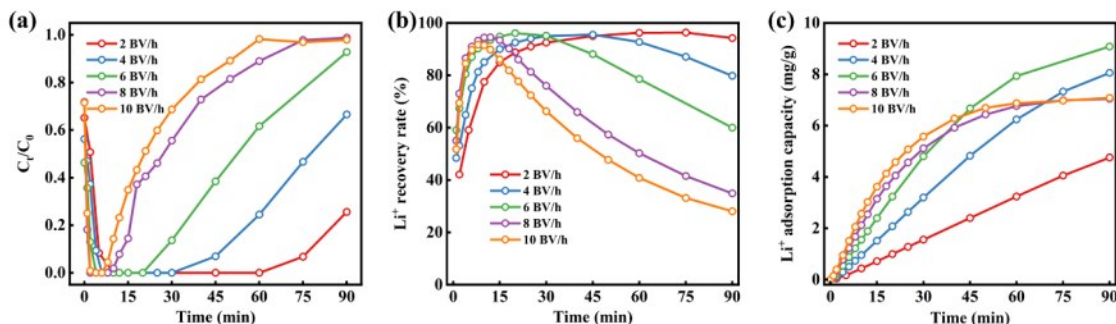


图4 高亲水性铝基锂吸附剂颗粒在模拟卤水中的吸附穿透曲线

Fig.4 (a) Breakthrough curves, (b) recovery curves and (c) adsorption capacity as a function of time for highly hydrophilic aluminum-based lithium adsorbent granules in simulated brine

注:(a)、(b)Li⁺回收率曲线以及(c)吸附容量随时间的变化曲线

2.2.1 吸附流速 图4(a)为模拟卤水在不同流速下通过吸附柱的吸附穿透曲线。可以看出,随流速升高,床层更易被穿透。这是因为单位时间内流过床层的卤水体积增大,更多的Li⁺被吸附,床层更快达到吸附饱和。但流速过高时,由于接触时间缩短、传质不充分,卤水中的Li⁺无法被完全吸附,从而导致Li⁺回收率下降。从图4(b)的回收率曲线可知,流速为2和4 BV/h时,床层可以在较长时间内维持高于80%的Li⁺回收率,但是卤水处理量受限。8和10 BV/h虽可以提高卤水处理量,Li⁺回收率却显著降低,更多Li⁺残留在吸附尾液中,无法使锂资源得到充分提取。综合来看,6 BV/h能在保持较高Li⁺回收率的同时,有效提升卤水处理能力。图4(c)进一步对比了不同流速下床层Li⁺吸附容量随时间的变化。高流速在吸附前期具有明显的吸附容量优势,

但是随吸附时间延长,这种优势逐渐减弱。相比之下,6 BV/h条件下床层吸附容量始终保持在较高水平,因此选择6 BV/h作为最优吸附操作流速。

2.2.2 解吸流速 在此基础上,研究了解吸液流速对解吸性能的影响。图5(a)为解吸液中Li⁺浓度随解吸液体积的变化曲线。当解吸液流速从4 BV/h提升至16 BV/h时,相同体积解吸液下的Li⁺浓度并未降低。图5(b)显示,流速变化对解吸量影响不显著,但是12 BV/h在解吸后期略有提高。这说明提高解吸流速不会削弱解吸效果,却能大幅缩短解吸时间。如图5(c)所示,解吸15 min时,床层Li⁺解吸量随流速增加而显著上升:流速由2 BV/h升至12 BV/h,解吸量从2.00 mg/g增至6.02 mg/g(提高了201%);流速升至16 BV/h时增幅达224%。考虑到解吸效率,选择12 BV/h作为后续解吸操作流速。

为了得到较高品质的解吸液,采用不同体积的去离子水对吸附剂颗粒床层进行冲洗,以排出吸附阶段的残余卤水,结果如表2所示,当采用较大体积冲洗

水时,解吸液品质具有较高的品质,Mg/Li质量比较低。冲洗水用量为2.0 BV时,解吸液中的Mg/Li质量比仅为0.201。

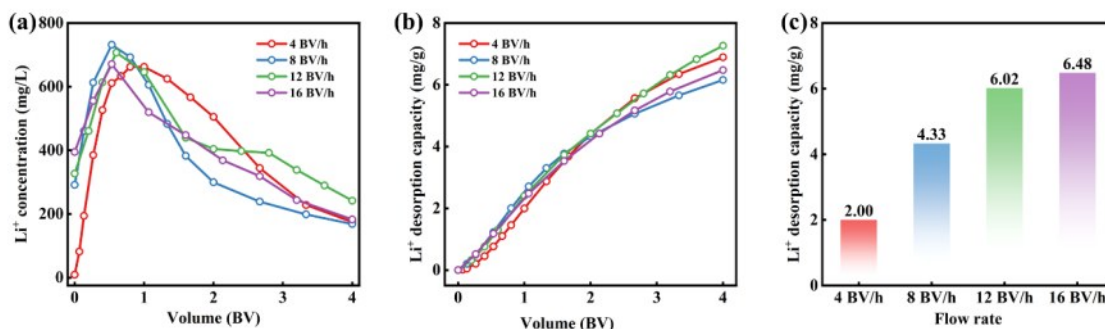


图5 解吸过程中固定床(a)出口解吸液 Li^+ 浓度和(b)解吸量随解吸液体积的变化曲线以及(c)不同流速下解吸 15 min 时的床层 Li^+ 解吸量

Fig.5 (a) Li^+ concentration in the eluent at the fixed-bed outlet and (b) desorption capacity as functions of eluent volume during desorption, and (c) Li^+ desorption capacity of the bed after 15 min of desorption at different flow rate

表2 不同冲洗水用量条件下的解吸液 Mg/Li 质量比
Table 2 Mg/Li mass ratio of the eluent under different rinse water consumption

冲洗水用量	1.0 BV	1.2 BV	1.5 BV	2.0 BV
解吸液 Mg/Li 质量比	4.068	2.653	0.998	0.201

2.3 单柱循环吸附性能

采用上述优化的吸附和解吸流速,对床层进行了18次吸附解吸循环,评价新型高亲水性铝基锂吸

附剂颗粒的循环性能。结果如图6(a)所示,第2-18次循环过程中,吸附量稳定在7.23 mg/g - 8.80 mg/g之间,波动较小。经过多次循环吸附解吸后吸附剂颗粒的衍射峰保持不变(图6(b)),进一步证明了循环后吸附剂晶体结构的完整性,并且单次吸附和解吸所需时间分别仅为90 min和30 min,表明该吸附剂颗粒具有良好的循环稳定性,在盐湖卤水锂资源高效回收方面具有极高的应用价值。

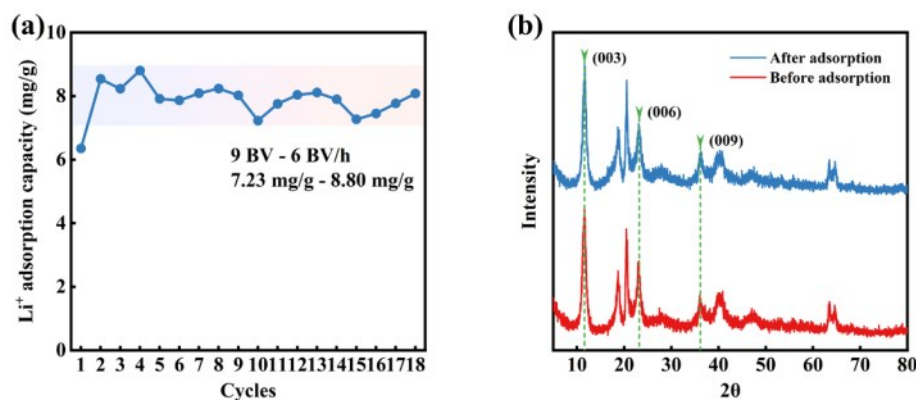


图6 (a)吸附剂固定床在18周期内的循环吸附量以及(b)循环前后的吸附剂颗粒的XRD图

Fig.6 (a) Cyclic adsorption capacity of the adsorbent fixed-bed over 18 cycles, and the XRD patterns before and after cycles

2.4 20柱连续提锂性能评价

在完成单柱提锂性能评价的基础上,进一步设计了20柱3区连续离子交换工艺,以考察所制备高亲水性铝基锂吸附剂颗粒的连续提锂性能,装置如图1所示。连续提锂过程中,吸附流速采用优化值

6 BV/h。由于盐湖老卤黏度较高,流经12根串联吸附柱时床层阻力大,实测吸附区出口流速降至65 mL/min。为使各区高效稳定运行,解吸液泵入流速设置为吸附区的2倍,实测解吸区出口流速为70 mL/min,冲洗区出口实际流速为6 mL/min。

装置运行2个完整周期(柱切换40次)后视为达到稳定状态。在第3周期内,测定吸附区、解吸区和冲洗三区出口的 Li^+ 浓度随时间变化。如图7(a)所示,吸附区出口的 Li^+ 浓度始终为0,表明通入床层的卤水中 Li^+ 被完全吸附。冲洗区出口锂浓度在0.4 g/L左右波动,与原料卤水中的 Li^+ 浓度相当,说明冲洗排除液主要为床层内滞留的卤水;且该浓度以10 min为周期呈线先升后降的趋势,与柱切换同步。解吸区出口 Li^+ 浓度呈明显的周期性变化,每次切换后先急剧升高,随后逐渐降低,至切换末期降至约120 mg/L,表明吸附柱完成了深度解吸。图7(b)的解吸区出口 Mg^{2+} 浓度变化显示,仅在每根柱切换瞬间因残余冲洗液混入导致 Mg^{2+} 浓度升至0.5 g/L以上,其余时间均处于较低水平。图7(c)展示了解吸区出口液Mg/Li质量比的变化,同样仅在吸附柱切换的瞬间残余冲洗液/卤水未完全排空,导致Mg/Li比出现大于0.5的情况,而后随着解吸操作的进行,

Mg/Li比迅速降低至0.5以下。

在此基础上,收集第61–80次切换过程中每10 min的三区出口混合液,分析其 Li^+ 浓度变化。如图8所示,吸附区出口混合液中 Li^+ 浓度基本低于50 ppm,对应 Li^+ 提取率在90%以上。该残余 Li^+ 源自切换进入吸附区的柱内残留的解吸液。解吸区出口 Li^+ 浓度稳定在300 ppm左右,冲洗区出口 Li^+ 浓度与原料卤水相当。尽管冲洗液 Li^+ 浓度较高,但其流速仅为6 mL/min(约占卤水进料流速的9%),且可返回吸附区再吸附,锂损失可以忽略不计。可见,在所设计的连续提锂工艺中,采用高亲水性铝基锂吸附剂颗粒,在较高操作流速可将低品位卤水(Li^+ 约0.4 g/L, Mg^{2+} 约107 g/L)在极短时间内转化为高品质解吸液。该工艺大幅提升了卤水锂资源提取过程中吸附单元操作效率^[30,33–34],实现了卤水处理量的成倍增加。

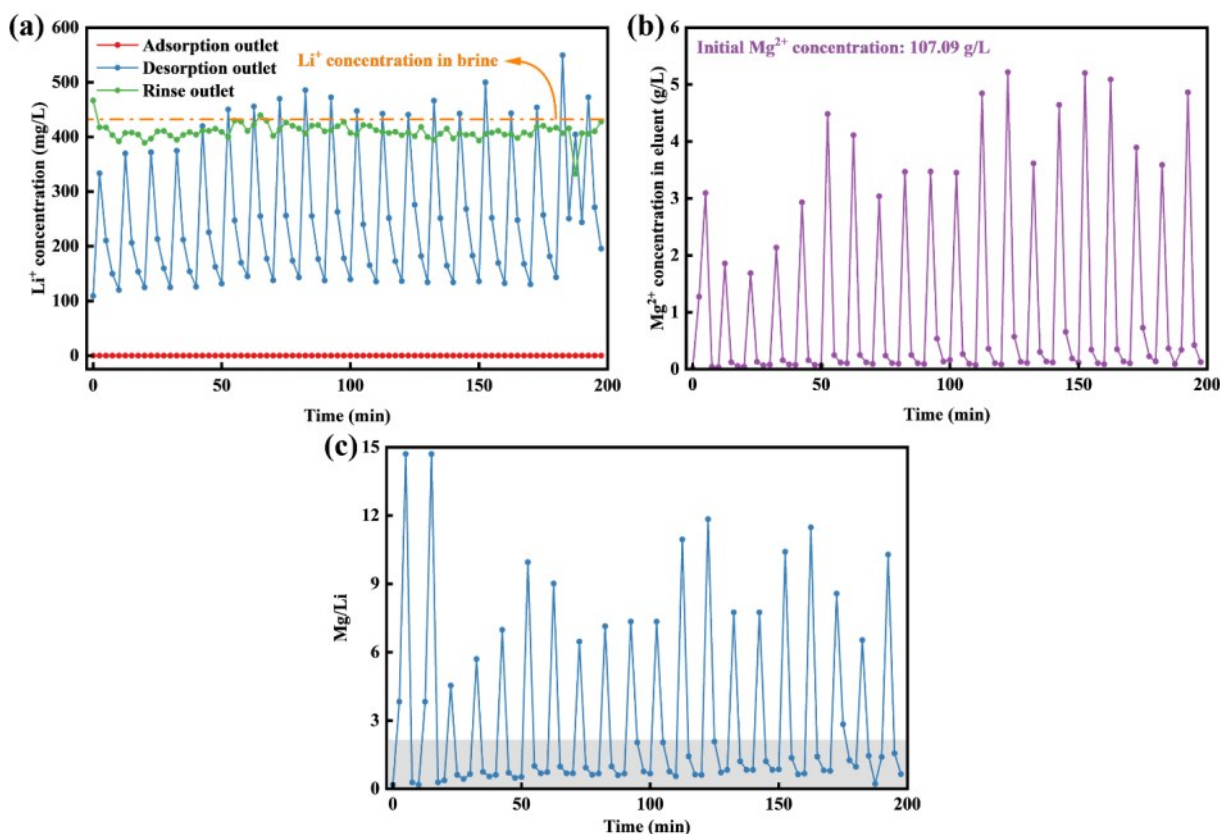


图7 (a)连续提锂工艺第3周期内吸附、解吸和冲洗三区出口 Li^+ 浓度、(b)解吸区出口 Mg^{2+} 浓度以及(c)Mg/Li质量比随时间变化曲线

Fig.7 (a) Li^+ concentration at the outlets of the adsorption, desorption, and rinsing zones, (b) Mg^{2+} concentration and (c) Mg/Li mass ratio at the outlet of the desorption zone as a function of time during the 3rd cycle in the continuous lithium extraction process

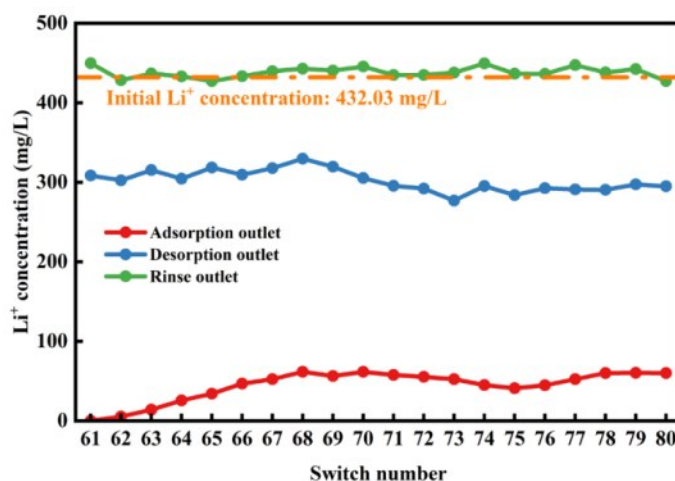


图8 连续提锂工艺中第4周期内吸附、解吸和冲洗三区出口混合液的Li⁺浓度变化曲线

Fig.8 Li⁺ concentration variation of the mixed solution at the outlets of the adsorption, desorption, and rinsing zones as a function of switch number during the 4th cycle in the continuous lithium extraction process

3 结论

本文考察了所研制的新型铝基锂吸附剂颗粒连续提锂性能,对不同流速下固定床吸附解吸性能进行评价,设计了20柱3区连续提锂工艺,主要结论如下:

(1)在实际卤水中的静态吸附动力学对比表明,新型高亲水性铝基锂吸附剂颗粒具有极高的吸附速率和广泛的适用性;

(2)单柱固定床吸附-解吸工艺优化表明,适当提高卤水通过固定床的流速,可以在增加卤水处理量的同时保持较高的锂提取率;提高解吸流速能够有效缩短解吸时间,并维持较高的解吸液锂浓度。优化的吸附、解吸流速分别为6 BV/h和12 BV/h;

(3)在优化流速下,吸附剂颗粒单柱在18周期内维持7.23–8.80 mg/g的吸附容量,在循环过程中晶体结构保持完整;

(4)20柱连续提锂过程研究证实,该工艺能够在较高操作流速下将Li⁺与共存阳离子有效分离,长周期运行稳定。该新型高亲水性铝基锂吸附剂颗粒可实现锂资源的高效选择性分离,具有极高的工业应用价值。

参考文献

[1] Forsythe C R, Gillingham K T, Michalek J J, et al. Technology advancement is driving electric vehicle adoption[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of

America, 2023, **120**(23): e2219396120.

[2] Malehmirchegini L, Chapman A J. Strategies for achieving carbon neutrality within the chemical industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, **217**: 115762.

[3] Zhang S H, Cai W J, Zheng X Z, et al. Global readiness for carbon neutrality: From targets to action[J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2025, **25**: 100546.

[4] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2026[R]. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2026.

[5] 罗清平, 郭朋成, 李存增, 等. 我国锂资源分布及提取工艺研究现状[J]. 湿法冶金, 2012, **31**(2): 67–70.

Luo Q P, Guo P C, Li C Z, et al. Distribution of lithium resources and research status on lithium extraction technology[J]. Hydrometallurgy of China, 2012, **31**(2): 67–70.

[6] Yin Z Z, Zhao Y M, Wang G, et al. The sustainable supply of lithium carbonate in China—Extracting brine-type lithium resource from salt lakes in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2025, **45**: e01556.

[7] 伍倩, 刘喜方, 郑绵平, 等. 我国盐湖锂资源开发现状、存在问题及对策[J]. 现代化工, 2017, **37**(5): 1–5.

Wu Q, Liu X F, Zheng M P, et al. Present situation, existing problems and countermeasures of development of salt lake lithium resources in China[J]. Modern Chemical Industry, 2017, **37**(5): 1–5.

[8] Zhang Y, Hu Y H, Wang L, et al. Systematic review of lithium extraction from salt-lake brines via precipitation approaches[J]. Minerals Engineering, 2019, **139**: 105868.

[9] Kanagasundaram T, Murphy O, Haji M N, et al. The recovery and separation of lithium by using solvent extraction methods[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2024, **509**: 215727.

[10] Li X H, Mo Y H, Qing W H, et al. Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources: a review[J]. Journal of Membrane Science, 2019, **591**: 117317.

[11] 刘东帆, 孙淑英, 于建国. 盐湖卤水提锂技术研究与发展[J]. 化

- 工学报, 2018, **69**(1): 141–155.
- Liu D F, Sun S Y, Yu J G. Research and development on technique of lithium recovery from salt lake brine[J]. CIESC Journal, 2018, **69**(1): 141–155.
- [12] Li Z, Chen I C, Cao L, et al. Lithium extraction from brine through a decoupled and membrane-free electrochemical cell design[J]. Science, 2024, **385**(6716): 1438–1444.
- [13] Hu H Q, Guo X S, Yang L M, et al. Adsorption materials toward highly-efficient lithium extraction from non-conventional lithium sources[J]. Advanced Materials, 2025, **37**(38): 2506055.
- [14] Yang S X, Wang Y G, Pan H, et al. Lithium extraction from low-quality brines[J]. Nature, 2024, **636**(8042): 309–321.
- [15] Weng D, Duan H Y, Hou Y C, et al. Introduction of manganese based lithium-ion sieve—a review[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2020, **30**(2): 139–152.
- [16] Liu J C, Zhang Y B, Miao Y, et al. Alkaline resins enhancing Li^+/H^+ ion exchange for lithium recovery from brines using granular titanium-type lithium ion-sieves[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, **60**(45): 16457–16468.
- [17] Zhong J, Lin S, Yu J G. Li^+ adsorption performance and mechanism using lithium/aluminum layered double hydroxides in low grade brines[J]. Desalination, 2021, **505**: 114983.
- [18] Liu P, Yan X L, Chen Z, et al. Preparation of half-coated manganese oxide lithium ion-sieve precursor with low manganese dissolution loss for lithium recovery[J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, **74**: 107785.
- [19] Liu Q, Xing H F, Zhang Y, et al. Highly hydrophilic H_2TiO_3 ion sieve with neodymium (Nd) doping enables fast and high-efficiency Li extraction[J]. Separation and Purification Technology, 2024, **345**: 127263.
- [20] Zhang L J, Zhang T T, Lv S K, et al. Adsorbents for lithium extraction from salt lake brine with high magnesium/lithium ratio: From structure–performance relationship to industrial applications [J]. Desalination, 2024, **579**: 117480.
- [21] 陈君, 钟静, 林森, 等. 铝基吸附剂固定床分离卤水锂资源过程研究[J]. 无机盐工业, 2023, **55**(1): 64–73.
- Chen J, Zhong J, Lin S, et al. Study on lithium separation from brine by aluminum? based adsorbent in fixed bed[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023, **55**(1): 64–73.
- [22] Hou X Q, Bish D L, Wang S L, et al. Hydration, expansion, structure, and dynamics of layered double hydroxides[J]. American Mineralogist, 2003, **88**(1): 167–179.
- [23] Williams G R, Moorhouse S J, Prior T J, et al. New insights into the intercalation chemistry of $\text{Al}(\text{OH})_3$ [J]. Dalton Transactions, 2011, **40**(22): 6012.
- [24] Tarasov K A, Isupov V P, Chupakhina L E, et al. A time resolved, *in-situ* X-ray diffraction study of the de-intercalation of anions and lithium cations from $[\text{LiAl}_2(\text{OH})_6]_n\text{X}\cdot q\text{H}_2\text{O}$ ($\text{X} = \text{Cl}^-$, Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-})[J]. J Mater Chem, 2004, **14**(9): 1443–1447.
- [25] Sun Y, Guo X Y, Hu S F, et al. Highly efficient extraction of lithium from salt lake brine by LiAl -layered double hydroxides as lithium-ion-selective capturing material[J]. Journal of Energy Chemistry, 2019, **34**: 80–87.
- [26] Zhong J, Lin S, Yu J G. Lithium recovery from ultrahigh $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ ratio brine using a novel granulated Li/Al -LDHs adsorbent[J]. Separation and Purification Technology, 2021, **256**: 117780.
- [27] Luo Q L, Dong M Z, Nie G L, et al. Extraction of lithium from salt lake brines by granulated adsorbents[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, **628**: 127256.
- [28] Chen J, Yu J G, Lin S. Reduction in adsorbent granule dimensionality to strengthen lithium adsorption in low-grade salt lakes[J]. AIChE Journal, 2025, **71**(6): e18795.
- [29] Zhang J Y, Zhou Y, Hai C X, et al. Enhancing lithium extraction efficiency from salt lake brines through three-dimensional conductive network-incorporated thick electrodes[J]. Separation and Purification Technology, 2024, **334**: 126010.
- [30] 江慧雄. 盐湖卤水连续吸附提锂过程研究[D]. 上海:华东理工大学, 2020: 99–103.
- Jiang H X. Research on continuous adsorption process for lithium recovery from salt lake brine[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020: 99–103.
- [31] Chen J, Du J L, Yu J G, et al. A one-step regeneration method *in-situ* for deactivated aluminum-based lithium adsorbent used in high $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ brines[J]. Desalination, 2023, **554**: 116491.
- [32] Sun J, Li X W, Huang Y H, et al. Preparation of high hydrophilic H_2TiO_3 ion sieve for lithium recovery from liquid lithium resources [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **453**: 139485.
- [33] Li Z F, Yang Y, Yu J G. Modeling and application of continuous ion exchanges process for lithium recovery from salt lake brine[J]. Separation and Purification Technology, 2023, **326**: 124841.
- [34] 顾俊杰, 李增荣, 唐发满, 等. 用于盐湖卤水吸附法提锂的连续离子交换工艺研究[J]. 无机盐工业, 2020, **52**(7): 46–51.
- Gu J J, Li Z R, Tang F M, et al. Study on continuous ion exchange process applied in lithium extraction from salt lake brine with adsorption method[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, **52**(7): 46–51.