

有色综述

引文格式:王昊,蔡生吉,刘世平,等.高镁锂比盐湖提锂技术研究进展[J].中国有色冶金,2026,55(4):29-40.

Wang Hao, Cai Shengji, Liu Shiping, et al. Review on the mechanism and principle of lithium extraction technology from salt lakes[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(4): 29-40.

高镁锂比盐湖提锂技术研究进展

王昊¹, 蔡生吉², 刘世平², 姚建明¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 青海汇信新材料科技有限公司, 青海 格尔木 816099)

[摘要] 全球70%以上的锂资源以盐湖卤水形式存在,而高镁锂比、复杂杂质成分等特性对提锂技术的选择性与分离效率提出严苛要求。本文聚焦盐湖高镁锂比(Mg:Li>500)提锂技术,针对传统高镁锂比盐湖提锂工艺(化学沉淀法与溶剂萃取法)具有选择性差、分离难度大的问题,对新兴的离子筛吸附法、膜分离法及耦合提锂技术,从分子作用机制、晶体结构变化、离子迁移规律等维度进行了深度剖析,并对应用情况进行了介绍。离子筛吸附法是目前盐湖提锂领域的主流技术,其中铝系离子筛已实现工业化应用,锰系与钛系离子筛还处于实验室与中试阶段展,但由于这两种离子筛表现出的优异饱和吸附容量(分别为30~35 mg·g⁻¹、15~25 mg·g⁻¹,铝系离子筛仅为3~5 mg·g⁻¹),在未来具有较大发展潜力;锂离子选择性膜法是针对高镁锂比盐湖提锂的专用技术,具有可连续化操作、无二次污染的优势,但膜材料的通量与稳定性制约了其工业化应用;耦合提锂技术包括吸附-膜分离耦合技术、超重力强化萃取耦合技术、电化学嵌入-脱嵌(IDI)提锂技术等,具有适配性强、综合效益高、工艺参数可灵活调整的优势,是未来高镁锂比盐湖提锂技术的重要发展方向。离子筛吸附剂的吸附容量、循环稳定性等性能可通过材料改性、形貌调控、复合改性等方法进行提升,未来,随着新型吸附剂与膜材料的研发、耦合工艺的优化及智能化技术的应用,高镁锂比盐湖提锂技术将实现跨越式发展,为全球新能源产业的可持续发展提供坚实的资源保障。

[关键词] 盐湖提锂; 高镁锂比; 离子筛吸附法; 膜分离法; 耦合提锂技术; 作用机理; 离子迁移; 晶体结构

[中图分类号] TF826.3; TF804.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-6103(2026)04-0029-12
DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.04.004

0 引言

锂作为支撑新能源产业发展的战略性关键矿产,是驱动全球电动汽车、大规模储能电池等领域技术迭代与市场扩张的核心物质基础。伴随新能源产业的高速发展,全球锂资源需求呈爆发式增

长,2030年全球锂需求缺口预计达50%^[1],因此,开发高效、低成本的锂提取技术已成为矿产资源领域的研究热点与核心任务^[2,3]。

全球锂资源主要赋存于固体锂矿与盐湖卤水两大载体,其中盐湖卤水型锂资源占比超70%,且其开发成本远低于固体锂矿,是当前及未来锂资源开发利用的主流方向^[4-6]。然而,盐湖卤水提锂技术的工业化应用,尤其是针对高镁锂比盐湖(Mg:Li>500)的开发,面临着严峻的技术瓶颈^[7,8]。锂、镁两种离子同属轻金属离子,具有相近的离子半径与水

[收稿日期] 2026-02-26 [修订日期] 2026-03-15

[录用日期] 2026-03-16 [出版日期] 2026-08-01

[第一作者] 王昊(1992—),男,博士,山西太原人,高级工程师,主要从事资源高效利用领域的功能材料设计与开发研究。

化特性,在分离过程中极易相互干扰,这一特性成为制约高镁锂比盐湖锂资源高效开发的核心难题。

传统盐湖提锂工艺主要包括化学沉淀法与溶剂萃取法,这些技术在低镁锂比盐湖提锂中已实现初步应用,但在高镁锂比盐湖环境下的局限性尤为突出,面临“选择性差、分离难度大”的核心挑战^[9-11]。太阳能蒸发法依赖自然气候条件对卤水进行浓缩结晶,不仅生产周期长、受地域与季节限制明显,且对镁锂离子的分离效果极差,最终得到的锂盐产品纯度低、回收率低;化学沉淀法通常采用碳酸盐或氢氧化物体系沉淀锂离子,由于镁离子易与锂离子发生共沉淀反应,使得镁锂分离系数极低,通常在 $Mg:Li>20$ 时,分离系数降至10以下,此外,沉淀反应为一次性工艺,沉淀剂无法循环使用,既大幅增加试剂消耗,又提高生产成本,又难以保证最终锂产品纯度,同时会产生大量污染物,因此该技术仅适用于低镁锂比盐湖($Mg:Li<10$),当 $Mg:Li>20$ 时,锂回收率低于20%^[12];传统溶剂萃取法存在萃取剂毒性强、易乳化、反萃取率低等问题,不仅造成严重环境污染,且无法满足大规模工业化生产要求,通常在 $Mg:Li>100$ 时,分离系数降至100以下,常见萃取剂的萃取容量约0.05~0.15 mol/L,严重受限有机相配比,提升空间较小,一般萃取剂循环次数为50~100次,因此吨产品成本较高^[13]。本质而言,传统提锂工艺的技术路线均基于低镁锂比盐湖体系设计,其对锂离子选择性不足,难以适配高镁锂比盐湖复杂的离子环境,无法实现锂镁离子高效分离^[14]。

当前,全球锂资源的旺盛需求与高镁锂比盐湖开发的技术制约之间的矛盾日益凸显,成为影响全球锂资源稳定供给的关键因素。在此背景下,突破传统提锂工艺的技术局限,研发适用于高镁锂比盐湖的高选择性、高效率、环境友好型提锂技术,厘清锂镁离子分离的分子作用机制与材料构效关系,具有重要战略意义与现实价值^[15]。这不仅能够提升全球盐湖锂资源的综合利用率,缓解锂资源供需矛盾,更能推动新能源产业关键原材料保障体系的完善,助力全球新能源产业的可持续发展。

本文系统阐述三类新兴提锂技术的核心作用机理,重点聚焦离子筛吸附剂的吸附特性与作用机制,深入分析吸附剂性能与稳定性提升策略,并与传统提锂技术在锂镁分离系数、吸附容量、循环寿

命、生产成本、污染排放等关键指标方面进行比对分析,同时结合当前技术现状展望了高镁锂比盐湖提锂技术的未来发展趋势,旨在为相关领域的科研与产业化提供理论参考。

1 高镁锂比盐湖提锂新兴技术

1.1 离子筛吸附法

离子筛吸附法基于离子尺寸效应与选择性吸附原理实现锂镁分离,其核心是离子筛吸附剂^[16-18]。离子筛吸附剂是一类具有特定孔道结构或晶格缺陷的无机材料,其晶体结构中存在与 Li^+ 半径高度匹配的吸附位点,能在高镁锂比卤水中选择性捕获 Li^+ ,而 Mg^{2+} 因尺寸不匹配或电荷差异无法进入吸附位点,从而实现高效分离,其提锂机制示意如图1所示。

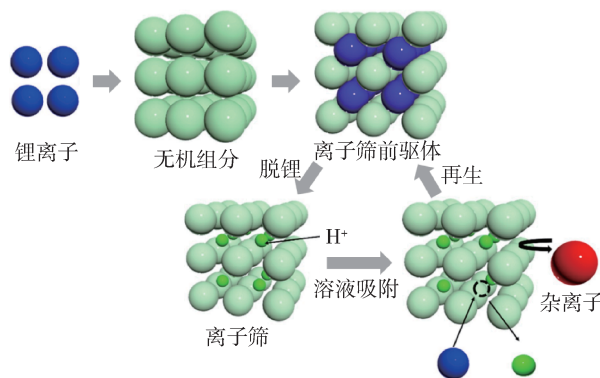


图1 离子筛提锂机制

Fig. 1 Mechanism diagram of lithium extraction by ion sieve

1.1.1 离子筛吸附剂的分类与吸附特性

离子筛吸附剂是目前研究最深入、性能最优的无机吸附剂,其制备过程为“前驱体制备-脱锂-形成多孔结构”,通过调控前驱体的晶体结构,使脱锂后形成的孔道尺寸、电荷分布与 Li^+ 高度匹配,实现“尺寸筛分+电荷选择”双重作用^[19]。根据前驱体类型,离子筛可分为锰系(LMO型)、钛系(LTO型)和铝系三类,其中铝系离子筛已实现工业化应用,是高镁锂比盐湖提锂的核心材料^[20]。根据制备原料与晶体结构的差异,三类吸附剂的吸附特性存在显著差异。

1.1.1.1 锰系离子筛(λ - MnO_2)

锰系离子筛是研究最早的一类离子筛吸附剂,其前驱体主要为尖晶石型 $LiMn_2O_4$ ^[21,22]。制备过程中,前驱体中 Li^+ 通过酸浸脱除^[23],形成具有晶格缺

陷的 λ - MnO_2 ,该缺陷位点的尺寸与 Li^+ 半径高度匹配,成为锂离子的专属吸附位点。锰系离子筛的吸附特性表现为高选择性、高吸附容量,其锂镁分离系数可达 10^4 以上,饱和吸附容量通常为 $30 \sim 35 \text{ mg/g}$ 。吸附过程遵循离子交换机制,即 γ - MnO_2 中 H^+ 与卤水中 Li^+ 发生交换反应^[24],见式(1)。



该反应为可逆反应,当吸附剂达到饱和后,通过酸浸脱附,锂离子被 H^+ 置换,吸附剂重新转化为 λ - MnO_2 ,实现循环再生。图2为锰系离子筛提锂机理,其吸附机理基于“尖晶石结构的离子空位与 Li^+ 嵌入-脱出”^[25]。①前驱体晶体结构: LiMn_2O_4 属于Fd-3m空间群,晶体结构中 O^{2-} 呈立方最密堆积, Li^+ 占据四面体间隙(8a位点), $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ 占据八面体间隙(16d位点),形成稳定的三维网络结构,8a位点与16d位点之间通过16c通道连接,为 Li^+ 的迁移提供路径^[26]。②酸处理脱锂过程:将 LiMn_2O_4 置于 $1 \sim 2 \text{ mol/L}$ 的盐酸中, H^+ 与8a位点的 Li^+ 发生离子交换, Li^+ 被洗脱进入溶液,形成 λ - MnO_2 ,此时8a位点形成大量空穴(Li^+ 空位率 $>90\%$),空穴尺寸约 0.08 nm ,与 Li^+ 的离子半径(0.076 nm)高度匹配,而 Mg^{2+} 的离子半径(0.072 nm)虽接近,但因 Mg^{2+} 的电荷密度高,与16d位点 $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ 的排斥力强,难以进入8a位点^[27]。③ Li^+ 吸附过程:当 λ - MnO_2 与卤水接触时,8a位点的空穴通过静电引力与 Li^+ 结合,实现选择性吸附,吸附容量可达 $30 \sim 35 \text{ mg/g}$,对 Mg^{2+} 的选择性系数 >1000 。然而,锰系离子筛存在明显缺陷,即在吸附-解吸循环过程中,酸性环境使 Mn^{3+} 易发生歧化反应, Mn^{2+} 溶解进入卤水(溶损率 $3\% \sim 8\%$ /循环),导致8a位点空穴数量减少,50次循环后吸附容量衰减 30% ^[28],溶出的锰离子会造成卤水污染。

1.1.1.2 钛系离子筛(H_2TiO_3)

钛系离子筛的前驱体主要为尖晶石型 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 和层状结构的 Li_2TiO_3 ,其制备原理与锰系离子筛类似,通过酸浸脱锂形成具有吸附位点的 TiO_2 基离子筛^[29-32]。钛系离子筛的核心优势在于化学稳定性强,钛离子的溶出率远低于锰离子,循环使用寿命可达100次以上^[33]。其吸附机制主要为拓扑化学离子交换,晶体结构中的八面体孔道为锂离子提供了专属传输通道,镁离子因电荷较高(Mg^{2+}),与孔道壁的静电排斥作用较强,无法进入孔道内部^[34]。图3

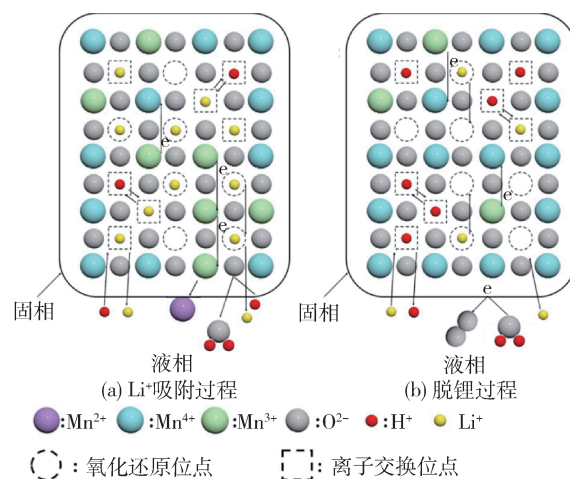


图2 锰系离子筛提锂机理^[25]

Fig. 2 Mechanism diagram of lithium extraction by manganese ion sieve^[25]

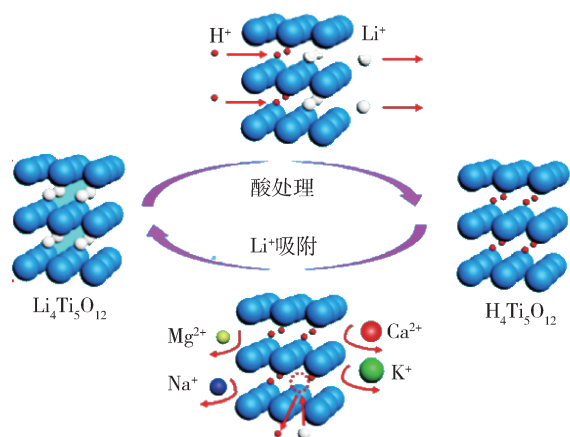


图3 钛系离子筛提锂机理图

Fig. 3 Mechanism diagram of lithium extraction by titanium ion sieve

为钛系离子筛的吸附机理图,其吸附机理表现为“层间质子交换与 $\text{Ti}-\text{O}$ 键的配位作用”^[35]。①层状 Li_2TiO_3 的脱锂过程: Li_2TiO_3 中 Li^+ 位于 TiO_2 层间,通过弱离子键与层内的 O^{2-} 结合。将 Li_2TiO_3 置于 $0.5 \sim 1 \text{ mol/L}$ 的硫酸中, H^+ 取代层间的 Li^+ ,形成 H_2TiO_3 ,脱锂率可达 95% 以上,此时 TiO_2 层间距由 0.52 nm 增至 0.58 nm ,层间保留大量羟基($-\text{OH}$),为 Li^+ 吸附提供位点^[36]。② Li^+ 吸附过程: H_2TiO_3 层间的 $-\text{OH}$ 与 Li^+ 发生质子交换反应,该反应具有明显的pH依赖性,在碱性环境($\text{pH}=9 \sim 11$)中, H^+ 浓度低,平衡向生成 Li_2TiO_3 的方向移动,吸附容量可达 $15 \sim 25 \text{ mg/g}$;在酸性环境($\text{pH}=1 \sim 2$)中, H^+ 浓度高,反应逆向进行, Li^+ 被洗脱^[37],见式(2)。



钛系离子筛具有显著的结构稳定性,其中 Ti^{4+} 的价态稳定,不易发生氧化还原反应,因此 H_2TiO_3 在吸附-解吸过程中Ti溶损率 $<0.1\%$,循环寿命 $>2\,000$ 次,但Ti-O键的键能较高,导致 Li^+ 在层间的迁移速率慢,吸附平衡时间 $>6\text{ h}$,可通过纳米化或表面包覆 SiO_2 涂层缩短 Li^+ 迁移路径,将平衡时间降至 2 h 以内^[38]。钛系离子筛的锂镁分离系数可达 10^3 以上,饱和吸附容量为 $15\sim 25\text{ mg/g}$,略低于锰系离子筛,但稳定性优势使其成为高镁锂比盐湖提锂的潜力材料。

1.1.1.3 铝系离子筛

铝系离子筛是目前唯一实现工业化应用的离子筛吸附剂,其前驱体为锂铝复合氧化物,经酸浸脱锂后形成多孔结构的 $\gamma\text{-AlOOH}$ ^[39, 40]。铝系离子筛的吸附位点为多孔结构中羟基,吸附过程遵循表面络合机制,即卤水中的 Li^+ 与 $\gamma\text{-AlOOH}$ 表面的一OH发生络合反应,形成稳定的 $\text{Li}-\text{O}$ 键,而镁离子因水化能过高,难以取代羟基中 H^+ ,从而实现选择性吸附。铝系离子筛的吸附特性为耐腐蚀性强、适配性好,能在高盐度、高镁锂比卤水中稳定吸附,相较于

锰系和钛系离子筛,铝系离子筛的吸附容量较低,但制备成本低、环境友好,且循环稳定性强,已在青海盐湖等高镁锂比盐湖实现规模化应用,吸附容量 $\geq 3.0\text{ mg Li}^+/\text{g}$ 吸附剂,在高镁锂比条件下($400\sim 500$), $\text{Mg}^{2+}:\text{Li}^+$ 分离系数 >150 ,设备中装填堆密度约 $0.65\sim 0.9\text{ g/cm}^3$,磨损率 $\leq 0.5\%$,循环寿命 ≥ 500 次。

图4为铝系离子筛提锂机理图,铝系离子筛的吸附过程有“ Li^+ 插入-层间定位-稳定结合”三个阶段,当 $\text{Li}/\text{Al-LDH}$ 与卤水接触时,层间的 Li^+ 空位会优先吸附卤水中 Li^+ , Li^+ 进入层间后,与层内 AlO_6 八面体中的 O^{2-} 形成稳定的配位键,同时层间结晶水重新排列,形成以 Li^+ 为中心的水合壳层,水合壳层的空间尺寸恰好排斥 Mg^{2+} 的水合离子,实现“空间位阻筛选”^[41]。此外, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的两性特征使 $\text{Li}/\text{Al-LDH}$ 在中性环境中表面带负电,通过静电引力吸引 Li^+ ,而 Mg^{2+} 电荷密度高,与表面负电荷的结合能力过强,导致其无法进入层间通道,进一步提升选择性。铝系离子筛对 Li^+ 的吸附容量约 $3\sim 5\text{ mg/g}$,对 Mg^{2+} 的选择性系数 $>3\,000$,在镁锂比 $500:1$ 的卤水中, Li^+ 吸附率可达 85% 以上^[42]。

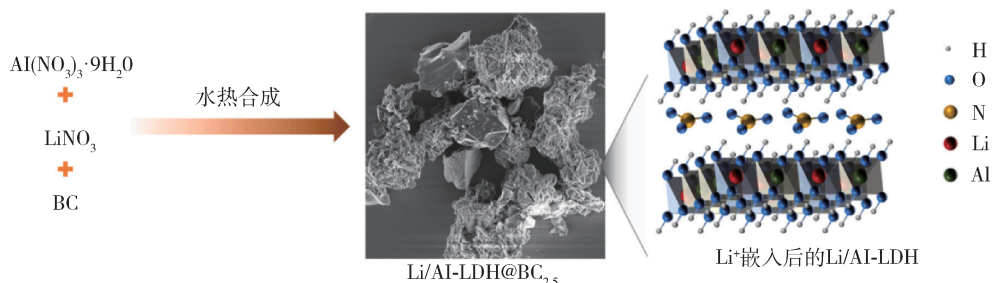


图4 铝系离子筛提锂机理图^[42]

Fig. 4 Mechanism diagram of lithium extraction by aluminum ion sieve^[42]

1.1.2 三种离子筛性能对比分析

离子筛吸附法是盐湖提锂领域的主流技术路径之一,锰系、钛系和铝系离子筛凭借各自独特的结构与性能特点,成为该技术的核心研究与应用载体。其中铝系离子筛已实现工业化应用,锰系与钛系则在实验室与中试阶段展现出较大潜力。为清晰对比三类离子筛的应用优势与局限,现将其饱和吸附容量、锂镁分离系数、溶损率及循环寿命等核心性能参数进行横向梳理,具体见表1。

1.1.3 离子筛吸附的作用机制

离子筛吸附的作用机制可分为物理吸附与化学吸附,二者共同作用实现锂离子的选择性

表1 锰系、钛系和铝系离子筛特性对比

Table 1 Comparison of characteristics of manganese, titanium and aluminum ion sieves

性能参数	锰系离子筛	钛系离子筛	铝系离子筛
饱和吸附容量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	30~35	15~25	3~5
锂镁分离系数	100~800	500~1 000	150~3 000
溶损率/%	3~8	1~3	<1
循环寿命/次	50~300	400~600	>500
耐腐蚀性	中等(易酸解)	较强	强
制备成本	中等	较高	低
工业成熟度	中试阶段	实验室或中试阶段	工业化应用

捕获^[43]。

1)物理吸附机制。物理吸附主要基于尺寸筛分效应,离子筛吸附剂的晶体结构中存在特定尺寸的孔道或缺陷位点,其孔径大小与锂离子水合半径或裸离子半径高度匹配。 Li^+ 水合半径为0.382 nm,在高镁锂比卤水中,锂离子能够通过扩散作用进入孔道内部,被吸附位点捕获;而 Mg^{2+} 水合半径较大(0.428 nm),无法通过孔道,从而实现物理筛分。此外,吸附剂的比表面积也会影响物理吸附效果,比表面积越大,吸附位点越多,吸附容量越高。

2)化学吸附机制。化学吸附是离子筛吸附的核心机制,主要包括离子交换与表面络合两种类型。对于锰系与钛系离子筛,化学吸附以离子交换为主,吸附剂中 H^+ 与卤水中 Li^+ 发生可逆交换,形成稳定的化学键;对于铝系离子筛,化学吸附以表面络合为主,锂离子与吸附剂表面的羟基基团发生络合反应,生成稳定的络合物。化学吸附的选择性极强,不受卤水中其他杂质离子的干扰,是离子筛吸附法在高镁锂比盐湖提锂中高效分离的关键。

1.2 膜分离法

膜分离法是基于膜材料的选择性渗透特性实现锂镁分离的技术,其核心是具有锂离子识别功能的分离膜。根据分离机制的差异,膜分离法主要分为纳滤膜法、电渗析膜法^[44]、锂离子选择性膜法三类,其中锂离子选择性膜法是针对高镁锂比盐湖提锂的专用技术^[45]。

1.2.1 锂离子选择性膜的分离原理

锂离子选择性膜属于液膜或固体电解质膜,其膜内含有锂离子载体(冠醚类化合物、锂离子交换树脂等)^[46]。图5为选择性膜分离机理图,在分离过程中,卤水中的锂离子与膜内载体发生络合反应,形成络合物,该络合物在膜内扩散至渗透侧,然后在渗透侧发生解络合反应,释放出锂离子;而镁离子因无法与载体发生络合反应,被截留于原料侧,从而实现锂镁分离^[47]。该过程的核心是载体与锂离子的特异性结合,冠醚类载体的空腔尺寸与锂离子半径高度匹配,能够选择性络合锂离子,锂镁分离系数可达 10^3 以上。膜分离法的吸附特性表现为连续化操作,无二次污染,但膜材料的通量与稳定性是制约其工业化应用的关键因素。

1.2.2 膜分离过程中的吸附辅助机制

在膜分离过程中,膜表面的吸附作用对分离效

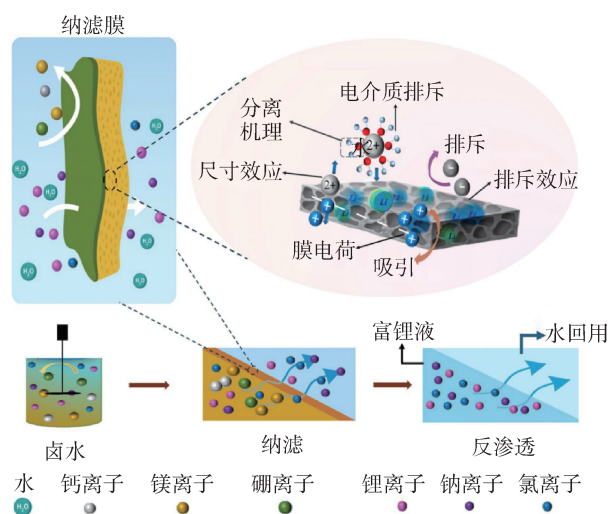


图5 选择性膜分离机理图^[48]

Fig. 5 Mechanism diagram of selective membrane separation^[48]

率具有显著提升作用。膜材料的表面通常具有羟基、羧基等官能团,这些官能团能够通过静电引力或氢键作用吸附锂离子,增加锂离子在膜表面的浓度,从而提高锂离子的渗透通量。此外,膜表面的多孔结构也会产生物理吸附作用,进一步增强对锂离子的选择性捕获。这种“络合-吸附-扩散”的协同机制,是膜分离法高效分离锂镁离子的重要保障。

1.3 耦合提锂技术

耦合提锂技术是将两种或多种单一提锂技术进行组合,实现优势互补的复合技术,高镁锂比盐湖卤水耦合提锂的工艺中,吸附-膜分离耦合、超重力强化萃取耦合、电化学嵌入-脱嵌(IDI)提锂技术是最具工业价值与学术创新性的三类耦合工艺。耦合提锂技术的核心原理是分段处理、逐级分离,通过不同技术的协同作用,提升整体提锂效率。

1)吸附-膜分离耦合技术。该技术核心基于离子筛选择性离子交换与膜分离筛分效应的协同机制,图6为吸附-膜分离耦合技术工艺流程图,其以离子筛吸附剂通过层间离子交换选择性捕获 Li^+ ,经纳滤(NF)截留二价杂质、反渗透(RO)浓缩锂液,双极膜电渗析(BMED)实现锂浓度富集,构建“富集-纯化-浓缩-精制”短流程体系。现有运行工艺中,吸附段吸附容量达3~5 mg/g, $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ 分离系数 >500 ,循环寿命 ≥ 500 次;在卤水流速3~10 BV/h、吸脱附温度25~45℃的条件下,解析率 $\geq 90\%$,解析液 Li^+

0.5 g/L、镁锂比 ≤ 1.5 ；纳滤膜截留率 $>99\%$ ，渗透通量 $150\sim 300\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，跨膜压 $<0.5\text{ MPa}$ ，镁锂比降至0.2以下， Li^+ 浓缩至 $0.8\sim 1.0\text{ g/L}$ 。采用该技术锂总收率可以达到75%以上^[49]。

2)超重力强化萃取耦合技术。该技术核心基于超重力场传质强化理论,图7为超重力强化萃取耦合技术工艺流程图,其通过旋转产生 $8\,000\sim 10\,000$ 倍重力加速度,压缩液液传质边界层,提升相

间传质速率;结合三级抗乳化分离技术,解决传统萃取分层慢、乳化严重的瓶颈,实现 Li^+ 高效萃取与反萃。超重力萃取机设定转速 $8\,000\sim 12\,000\text{ r/min}$ 、分离因数 $8\,000\sim 10\,000\text{ G}$,此条件下,分相时间 $<5\text{ s}$,有机相夹带量 $<50\text{ }\mu\text{L/L}$,沉锂母液三级逆流可得锂萃取率近94%;萃取剂以OHB/BTPO为主,相比 $\text{O/A}=1:1\sim 1:3$,分配系数 ≥ 1.5 。该技术具有分相快、乳化少的优势,锂总收率可以达到80%以上^[50]。

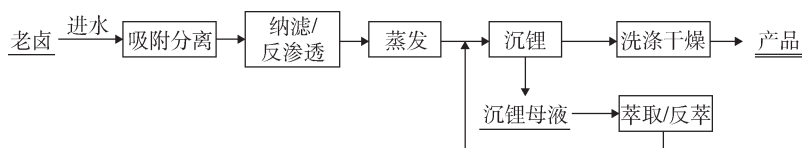


图6 吸附-膜分离耦合技术工艺流程图

Fig. 6 Process flow chart of adsorption-membrane separation coupling technology

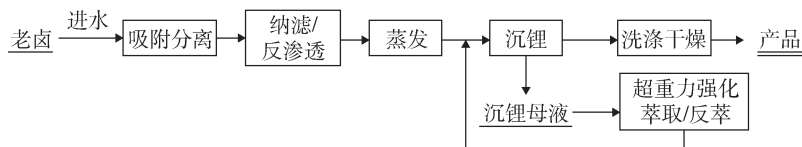


图7 超重力强化萃取耦合技术工艺流程图

Fig. 7 Process flow chart of high gravity enhanced extraction coupling technology

3)电化学嵌入-脱嵌(IDI)提锂技术。该技术核心基于法拉第嵌入材料的 Li^+ 专属嵌脱机制,图8为电化学脱嵌提锂技术工艺流程图,其以 LiFePO_4 、钛酸锂(LTO)等为工作电极,在特定电位下 Li^+ 可逆嵌入晶格,通过电位调控实现选择性捕获与释放,搭配离子交换膜隔绝杂质离子,得到浓度较高的富锂溶液^[51]。以 LiFePO_4 电极为例, Li^+ 嵌入容量约 $14\sim 22\text{ mg/g}$, Li^+/Na^+ 选择性达 $1\,650\sim 2\,100$, $\text{Li}^+/\text{Mg}^{2+}$ 分离

系数达 $430\sim 1\,650$,循环寿命 ≥ 300 次,在电位 $3.2\sim 3.8\text{ V}$ 、流速 $5\sim 15\text{ BV/h}$ 、温度 $25\sim 40^\circ\text{C}$ 的条件下,嵌入效率 $\geq 90\%$,脱嵌率 $\geq 95\%$,锂纯度 $>99.5\%$,采用该技术在模拟卤水提锂研究中获得86%的锂收率, $\text{Li}^+/\text{Mg}^{2+}$ 选择性达 434.9 ^[52]。

耦合提锂技术的优势表现为适配性强、综合效益高,能够根据不同盐湖的卤水特性调整工艺参数,是未来高镁锂比盐湖提锂技术的重要发展方向。

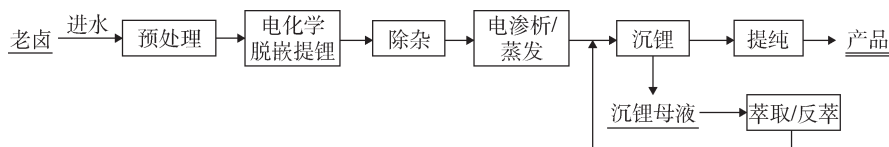


图8 电化学脱嵌提锂技术工艺流程图

Fig. 8 Process flow chart of electrochemical deintercalation technology for lithium extraction

2 离子筛吸附剂性能与稳定性的提升策略

离子筛吸附剂的吸附容量、选择性与循环稳定性是决定离子筛吸附法工业化应用的核心因素。针对当前离子筛吸附剂存在的吸附容量低、循环稳定性差等问题,有学者在材料改性、形貌调控、复合

改性等方面进行了提升。

2.1 材料改性技术

材料改性是通过调整离子筛吸附剂的化学组成,优化晶体结构,从而提升吸附性能与稳定性的方法,主要包括掺杂改性和缺陷调控两种方式。

2.1.1 掺杂改性

掺杂改性是指在离子筛前驱体制备过程中,引

入少量金属离子,取代前驱体中的部分金属离子,从而优化晶体结构^[53]。如在铝系离子筛 $\text{LiAl}_2(\text{OH})_6\text{Cl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的制备过程中,引入 Mg^{2+} 取代部分 Al^{3+} ,形成 $\text{LiMg}_x\text{Al}_{2-x}(\text{OH})_6\text{Cl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 前驱体,经酸浸脱锂后得到掺杂型 $\lambda\text{-Al}(\text{OH})_3$ 。图9为镁掺杂改性铝系离子筛提锂机理, Mg^{2+} 的引入能够增强晶体结构的稳定性,降低铝离子的溶出率,同时 Mg^{2+} 的离子半径与 Al^{3+} 相近,掺杂后可调控层状结构的层间距,提升吸附剂对锂离子的选择性,优化吸附动力学性能。研究

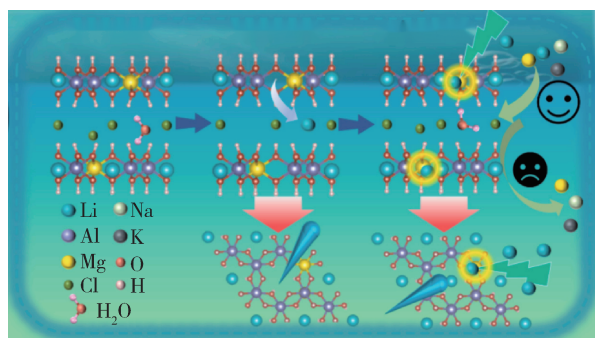


图9 镁掺杂改性铝系离子筛提锂机理图^[54]

Fig. 9 Mechanism diagram of lithium extraction by magnesium doping modified aluminum ion sieve^[54]

表明,当 $\text{LiMg}_x\text{Al}_{2-x}(\text{OH})_6\text{Cl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 中 x 为0.3时,铝系离子筛在循环使用20次后,吸附容量仍保持7.5 mg/g。掺杂改性核心机制是晶格调控与选择性优化,掺杂离子的引入会导致层状晶格发生适度畸变,增加锂离子的嵌入通道与吸附位点数量;同时, Mg^{2+} 与 Al^{3+} 的电荷差异会产生局部电荷不平衡,强化吸附剂与锂离子的静电作用,从而兼顾吸附容量与循环稳定性的双重提升^[54]。

2.1.2 缺陷调控

缺陷调控是通过调整制备工艺参数,人为引入更多的晶格缺陷,增加吸附位点的数量。在钛系离子筛 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 的制备过程中,提高焙烧温度至 800°C ,能够促进晶体结构的有序排列,同时产生更多的氧空位缺陷;延长酸浸时间至6 h,能够充分脱除前驱体中的锂离子,形成更多的吸附位点。研究表明,缺陷调控后钛系离子筛吸附容量提升至28 mg/g,锂镁分离系数提升至1 500^[55]。缺陷调控关键在于精准控制缺陷类型与数量,过量的缺陷会导致晶体结构坍塌,降低吸附剂的稳定性,因此需要通过优化工艺参数,实现缺陷数量与晶体稳定性

的平衡。

2.2 形貌调控技术

形貌调控是通过调整制备工艺,控制离子筛吸附剂形貌与尺寸,从而提升吸附性能的方法。离子筛吸附剂的形貌主要包括纳米颗粒、纳米棒、纳米片、多孔微球等,不同形貌吸附剂具有不同比表面积与孔道结构,吸附性能差异显著。纳米颗粒型离子筛吸附剂比表面积较大,吸附位点丰富,吸附容量较高,但纳米颗粒易团聚,导致吸附剂循环稳定性下降;纳米棒与纳米片型离子筛吸附剂具有一维或二维孔道结构,锂离子扩散路径短,吸附速率快,且不易团聚,循环稳定性较强;多孔微球型离子筛吸附剂具有三维多孔结构,比表面积大,机械强度高,便于工业化应用。采用溶剂热法制备的锰系离子筛纳米棒,其直径为50~100 nm,长度为1~2 μm ,比表面积可达 $120\text{ m}^2/\text{g}$,吸附容量为35 mg/g,循环使用寿命可达120次,远高于传统固相法制备的块状离子筛吸附剂^[56]。形貌调控核心是控制晶体生长方向与聚集状态,通过选择合适制备工艺与模板剂,可实现吸附剂形貌精准调控。

2.3 复合改性技术

复合改性是将离子筛吸附剂与其他材料复合,形成复合吸附材料,从而提升吸附性能与稳定性的方法。复合改性的核心机制是协同效应,即复合后的材料兼具两种或多种材料的优势,实现性能的互补提升。

2.3.1 离子筛-碳材料复合

碳材料具有比表面积大、导电性好、化学稳定性强等优势,将离子筛吸附剂与碳材料复合,能够提升吸附剂的比表面积与导电性,加快锂离子的扩散速率。将锰系离子筛 $\lambda\text{-MnO}_2$ 与石墨烯复合,制备的 $\lambda\text{-MnO}_2$ /石墨烯复合吸附剂,比表面积提升至 $180\text{ m}^2/\text{g}$,吸附容量提升至40 mg/g,且石墨烯的引入能够抑制锰离子的溶出,循环使用寿命提升至200次^[57]。

2.3.2 离子筛-分子筛复合

分子筛具有规则的孔道结构,能够对锂离子进行二次筛分,提升吸附剂的选择性。将钛系离子筛与ZSM-5分子筛复合,制备的复合吸附剂,锂镁分离系数可达2 000以上,远高于单一钛系离子筛^[58]。此外,分子筛的孔道结构能够增强吸附剂的机械强度,减少吸附-解吸循环过程中的结构坍塌。

3 结论及展望

3.1 结论

传统高镁锂比盐湖提锂工艺(化学沉淀法与溶剂萃取法)具有选择性差、分离难度大的问题,而新发展的离子筛吸附法、膜分离法及耦合提锂技术则在工艺指标方面体现出巨大突破。

1)离子筛吸附法是目前盐湖提锂领域的主流技术,通过物理吸附与化学吸附实现锂离子的选择性捕获。铝系离子筛已实现工业化应用,锰系与钛系离子筛还处于实验室与中试阶段展,但由于这两种离子筛表现出的优异饱和吸附容量(分别为 $30\sim 35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $15\sim 25\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,铝系离子筛仅为 $3\sim 5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),在未来具有较大发展潜力。

2)锂离子选择性膜法是针对高镁锂比盐湖提锂的专用技术,通过锂离子与膜内载体发生形成络合物机型选择性分离。该方法具有可连续化操作、无二次污染的优势,但膜材料的通量与稳定性制约了其工业化应用。

3)耦合提锂技术通过不同技术的协同作用来提升整体提锂效率,现有报道的有吸附-膜分离耦合技术、超重力强化萃取耦合技术、电化学嵌入-脱嵌(IDI)提锂技术,优势表现为适配性强、综合效益高,能够根据不同盐湖的卤水特性调整工艺参数,是未来高镁锂比盐湖提锂技术的重要发展方向。

4)可通过材料改性、形貌调控、复合改性等技术提升离子筛吸附剂的吸附容量、循环稳定性等性能。未来,随着新型吸附剂与膜材料的研发、耦合工艺的优化及智能化技术的应用,高镁锂比盐湖提锂技术将实现跨越式发展,为全球新能源产业的可持续发展提供坚实的资源保障。

3.2 展望

当前,离子筛吸附法、膜分离法及耦合提锂技术等新兴技术已在高镁锂比盐湖提锂中展现出显著优势,但仍面临吸附剂成本高、膜通量低、耦合工艺复杂等问题。未来,高镁锂比盐湖提锂技术的研究将朝着低成本、高效率、环境友好、智能化的方向发展。

1)开发低成本、高性能的新型吸附剂。离子筛吸附剂的制备成本是制约其工业化应用的关键因素,未来的研究重点将集中在低成本原料的开发与绿色制备工艺的优化。利用廉价原料制备离子筛

吸附剂,开发无溶剂、低温焙烧的绿色制备工艺,降低成本、能耗与环境污染。同时,研发新型吸附剂如金属有机框架基离子筛、共价有机框架基离子筛,这类材料具有比表面积大、吸附位点可控等优势,有望实现更高的吸附容量与选择性。

2)提升膜分离材料的通量与稳定性。膜分离法的工业化应用受限于膜材料的通量低、易污染等问题,未来的研究方向将聚焦于新型锂离子载体的开发与膜材料的改性。开发具有高选择性、高稳定性的冠醚衍生物载体,提升锂离子的络合效率;通过表面接枝、交联改性等方法,增强膜材料的耐腐蚀性与抗污染能力,延长膜的使用寿命。此外,研发无机-有机复合膜,结合无机膜的稳定性与有机膜的高选择性,实现膜性能的综合提升。

3)优化耦合提锂工艺,实现智能化控制。耦合提锂技术是未来高镁锂比盐湖提锂的主流方向,未来的研究重点将集中在工艺参数的优化与智能化控制。通过数值模拟与实验验证,优化不同技术的组合方式与工艺参数,实现提锂效率的最大化;引入物联网、人工智能等技术,构建智能化提锂系统,实时监测卤水成分、吸附剂性能、膜通量等参数,实现工艺的自动化调控,降低人工成本与能耗。

4)推动技术的集成化与产业化应用。当前,新兴提锂技术大多处于实验室研究或中试阶段,未来需要加强产学研合作,推动技术的集成化与产业化应用。将电化学法引入盐湖提锂,构建“嵌入-脱嵌-富集”一体化提锂系统,实现锂资源的高效提取与高纯度产品的制备;在高镁锂比盐湖地区建设示范工程,积累产业化经验,降低技术的推广成本。

[参考文献]

- [1] 国际能源署. 全球能源转型展望2023[R]. 巴黎: 国际能源署, 2023.
International Energy Agency. Outlook for global energy transition 2023 [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [2] 高峰, 郑绵平, 乜贞, 等. 盐湖卤水锂资源及其开发进展[J]. 地球学报, 2011(4): 483-492.
Gao Feng, Zheng Mianping, Nie Zhen, et al. Lithium resources in salt lake brine and their development progress [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011(4): 483-492.
- [3] Liu Y, Ma B, Lyu Y, et al. A review of lithium extraction from natural resources[J]. Int. J. Miner. Metall. Mater., 2023, 30(2): 209-224.
- [4] 董茜, 朴香兰, 朱慎林. 从盐湖卤水中提取锂的吸附技术及研究进展[J]. 盐业与化工, 2007, 36(3): 31-34.

- Dong Qian, Pu Xianglan, Zhu Shenlin. Adsorption technology and research progress of extracting lithium from salt lake brine [J]. Salt Industry and Chemical Industry, 2007, 36(3): 31-34.
- [5] 李燕, 王敏, 赵有璟, 等. 盐湖卤水锂资源提取技术及开发现状[J]. 盐湖研究, 2023, 31(2): 71-80.
- Li Yan, Wang Min, Zhao Youjing, et al. Extraction technology and development status of lithium resources from salt lake brine [J]. Salt Lake Research, 2023, 31(2): 71-80.
- [6] 王小敏. 盐湖卤水中提取锂离子的研究[D]. 福建师范大学, 2008.
- Wang Xiaomin. Study on extraction of lithium ion from salt lake brine [D]. Fujian Normal University, 2008.
- [7] 曾小毛, 樊磊. 高镁锂比盐湖老卤萃取提锂工艺研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(6): 95-96.
- Zeng Xiaomao, Fan Lei. Study on extraction technology of lithium from salt lake brine with high Mg-Li ratio [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2017, 37(6): 95-96.
- [8] 赵旭, 张琦, 武海虹, 等. 盐湖卤水提锂[J]. 化学进展, 2017, 29(7): 796-808.
- Zhao Xu, Zhang Qi, Wu Haihong, et al. Extraction of lithium from salt lake brine [J]. Progress in Chemistry, 2017, 29(7): 796-808.
- [9] 姜鹏飞, 周文龙, 杜国山, 等. 萃取法提取盐湖卤水中硼及其机理研究[J]. 有色设备, 2025, 39(6): 55-61.
- Xian Pengfei, Zhou Wenlong, Du Guoshan, et al. Experiment and mechanism study on extracting boron from salt lake brine by extraction method [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(6): 55-61.
- [10] 丁志海, 靳彩颖, 毛新宇. 我国盐湖卤水提锂工程化现状及存在问题[J]. 引文版: 工程技术, 2016(3): 40.
- Ding Zhihai, Jin Caiying, Mao Xinyu. Present situation and existing problems of lithium extraction from salt lake brine in China [J]. Citation Edition: Engineering Technology, 2016(3): 40.
- [11] 叶流颖, 曾德文, 陈驰, 等. 卤水提锂吸附剂应用研究进展[J]. 无机盐工业, 2019, 51(3): 16-19.
- Ye Liuying, Zeng Dewen, Chen Chi, et al. Research progress in application of adsorbents for lithium extraction from brine [J]. Inorganic Salt Industry, 2019, 51(3): 16-19.
- [12] 钟辉, 周燕芳, 殷辉安. 卤水锂资源开发技术进展[J]. 矿产综合利用, 2003(1): 23-28.
- Zhong Hui, Zhou Yanfang, Yin Huian. Technical progress of lithium resources development in brine [J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2003(1): 23-28.
- [13] 张建锋, 吴辉勇, 杨良嵘. 盐湖卤水萃取法提锂的研究进展[J]. 应用化学, 2024, 41(6): 800-812.
- Zhang Jianfeng, Wu Huiyong, Yang Liangrong. Research progress of extracting lithium from salt lake brine [J]. Applied Chemistry, 2024, 41(6): 800-812.
- [14] 王静. 青海盐湖提锂难题攻克[J]. 新疆有色金属, 2002(3): 58-58.
- Wang Jing. Solving the problem of lithium extraction in Qinghai Salt Lake [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2002(3): 58-58.
- [15] 中国有色金属工业协会. 中国锂工业发展报告 2023[R]. 北京: 中国有色金属工业协会, 2023.
- China Nonferrous Metals Industry Association. China Lithium Industry Development Report 2023 [R]. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Association, 2023.
- [16] 何力, 陈儒庆, 徐运海, 等. 用吸附法从察尔汗盐湖卤水中提取锂[J]. 湿法冶金, 2003, 22(3): 118-128.
- He Li, Chen Ruqing, Xu Yunhai, et al. Extraction of Lithium from Chaerhan Salt Lake Brine by Adsorption [J]. Hydrometallurgy, 2003, 22(3): 118-128.
- [17] 肖小玲, 戴志锋, 祝增虎, 等. 吸附法盐湖卤水提锂的研究进展[J]. 盐湖研究, 2005, 13(2): 66-69.
- Xiao Xiaoling, Dai Zhifeng, Zhu Zenghu, et al. Research progress in extraction of lithium from salt lake brine by adsorption [J]. Salt Lake Research, 2005, 13(2): 66-69.
- [18] 周喜诚. 吸附法从盐湖卤水中提锂及制备碳酸锂的工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- Zhou Xicheng. Study on extraction of lithium from salt lake brine by adsorption and preparation of lithium carbonate [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [19] 柏春, 郭敏, 张慧芳, 等. 离子筛型锂吸附剂吸附法从盐湖卤水/海水中提锂的研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(3): 802-809.
- Bai Chun, Guo Min, Zhang Huifang, et al. Research progress of lithium extraction from salt lake brine/seawater by ion-sieve type lithium adsorbents [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(3): 802-809.
- [20] 陈亦力, 邵斌, 彭文娟. 铝系锂离子筛的合成方法及其在盐湖提锂领域的应用: CN202310775486[P]. 2025-06-03.
- Chen Yili, Shao Bin, Peng Wenjuan. Synthesis method of aluminum-based lithium ion sieve and its application in lithium extraction from salt lakes: CN202310775486 [P]. 2025-06-03.
- [21] 孙步云. 锰基锂离子筛的制备及提锂研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
- Sun Buyun. Preparation of manganese-based lithium ion sieve and study on lithium extraction [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [22] 纪志永, 郭文娟, 袁俊生, 等. 基于Li1.6Mn1.6O4的锂离子筛分步合成及其吸附性能研究[J]. 河北工业大学学报, 2014, 39(1): 45-49.
- Ji Zhiyong, Guo Wenjuan, Yuan Junsheng, et al. Step synthesis of lithium ion based on Li1.6Mn1.6O4 and its adsorption performance [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2014, 39(1): 45-49.

- [23] 袁俊生, 周俊奇, 纪志永. 尖晶石型 LiMn_2O_4 酸洗提锂机理研究[J]. 功能材料, 2012, 43(23): 3197-3200.
- Yuan Junsheng, Zhou Junqi, Ji Zhiyong. Study on the mechanism of leaching lithium from spinel LiMn_2O_4 [J]. Functional Materials, 2012, 43(23): 3197-3200.
- [24] 许惠. 富锂型锂锰氧化物及其锂离子筛的制备、性能及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Xu Hui. Preparation, properties and application of lithium-rich lithium manganese oxide and its lithium ion sieve [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [25] Weng D, Duan H, Hou Y, et al. Introduction of manganese based lithium-ion Sieve: A review [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2020, 30(2): 139-152.
- [26] 董听. 盐湖电化学提锂的锰酸锂电极构筑与性能研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2023.
- Dong Ting. Study on the construction and performance of lithium manganate electrode for electrochemical lithium extraction from salt lakes [D]. Wuhan: South-Central Minzu University, 2023.
- [27] 孙淑英, 张钦辉, 于建国. 尖晶石型 LiMn_2O_4 的水热合成及其锂吸附性能[J]. 过程工程学报, 2010, 10(1): 185-189.
- Sun Shuying, Zhang Qinhui, Yu Jianguo. Hydrothermal synthesis of spinel-type LiMn_2O_4 and its lithium adsorption performance [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(1): 185-189.
- [28] 陈昊冰. 粉体锰系锂离子筛吸附过程化学溶损影响因素及机理研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2023.
- Chen Haobing. Study on influencing factors and mechanism of chemical dissolution loss in adsorption process of manganese-based lithium ion sieve powder [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2023.
- [29] 董殿权, 王永顺, 房超. 多孔掺杂型钛系离子筛的制备及吸附性能[J]. 化工学报, 2017, 68(7): 2812-2817.
- Dong Dianquan, Wang Yongshun, Fang Chao. Preparation and adsorption properties of porous doped titanium ion sieve [J]. CIESC Journal, 2017, 68(7): 2812-2817.
- [30] 路青强, 陈琳琳, 巢艳红, 等. 钛系锂离子筛用于盐湖提锂的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(1): 1-12.
- Lu Qingqiang, Chen Linlin, Chao Yanhong, et al. Research progress of lithium extraction from salt lakes by titanium-based lithium ion sieve [J]. Progress in Chemical Industry, 2021, 40(1): 1-12.
- [31] 潘鑫, 曾文文, 何周坤, 等. 钛系锂离子筛盐湖提锂的研究进展[J]. 云南化工, 2019, 46(2): 25-32.
- Pan Xin, Zeng Wenwen, He Zhoukun, et al. Research progress of lithium extraction from titanium-based lithium ion sieve for salt lake [J]. Yunnan Chemical Industry, 2019, 46(2): 25-32.
- [32] 郭智锋, 陈进, 周雯雯, 等. 钛基锂离子筛纳米材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(10): 1-6.
- Guo Zhifeng, Chen Jin, Zhou Wenwen, et al. Research progress of titanium-based lithium ion sieve nanomaterials [J]. New Chemical Materials, 2024, 52(10): 1-6.
- [33] 王舒磊. 高性能钛氧化物锂离子筛的制备及其吸附机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- Wang Shulei. Preparation and adsorption mechanism of high-performance titanium oxide lithium ion sieve [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [34] 杨贵翔. 钛基锂离子筛的制备及改性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- Yang Guixiang. Study on preparation and modification of titanium-based lithium ion sieve [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [35] 郭佳明, 刘明言, 吴强, 等. 硝酸锂改性钛系离子筛的制备及其吸附性能[J]. 化工学报, 2020, 71(2): 879-888.
- Guo Jiaming, Liu Mingyan, Wu Qiang, et al. Preparation of lithium nitrate-modified titanium-based ion sieve and its adsorption performance [J]. CIESC Journal, 2020, 71(2): 879-888.
- [36] 卢侠, 陈伟鑫. 钛酸锂负极的相分离机制[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(4): 1-16.
- Lu Xia, Chen Weixin. Phase separation mechanism of lithium titanate anode [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(4): 1-16.
- [37] 张丽芬, 陈白珍, 石西昌, 等. 偏钛酸型锂吸附剂的合成及吸附性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1849-1854.
- Zhang Lifeng, Chen Baizhen, Shi Xichang, et al. Synthesis and adsorption performance of metatitanic acid-type lithium adsorbents [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1849-1854.
- [38] Wei S, Wei Y, Chen Tao, et al. Porous lithium ion sieves nanofibers: General synthesis strategy and highly selective recovery of lithium from brine [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122407.
- [39] 李彦乐, 刘宜林, 霍俊杰, 等. 层状结构铝系吸附剂在盐湖提锂领域的研究[J]. 化工学报, 2023, 74(12): 4777-4791.
- Li Yanle, Liu Yilin, Huo Junjie, et al. Study on layered aluminum adsorbent for lithium extraction from salt lake [J]. CIESC Journal, 2023, 74(12): 4777-4791.
- [40] 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.
- Li Jie, Xiong Xiaobo. Research status and prospect of lithium extraction from salt lake brine with aluminum adsorbent [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2010, 42(10): 9-11.
- [41] 郝勇, 马瑞瑞, 田元立, 等. 锂离子筛在盐湖卤水提锂中的研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(2): 494-498.
- Hao Yong, Ma Rui Rui, Tian Yuanli, et al. Research progress of

- lithium ion sieve for lithium extraction from salt lake brine [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(2): 494-498.
- [42] Mu B, Deng X, Zhu C, et al. Preparation of composites of lithium-aluminum layered double hydroxides and biochar and their performance in lithium extraction from aqueous media [J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 320: 100843.
- [43] 段曼华, 程丹, 高倩, 等. 锂离子筛吸附材料的研究进展 [J]. 功能材料, 2023, 54(2): 72-81.
- Duan Manhua, Cheng Dan, Gao Qian, et al. Research progress of lithium ion sieve adsorption materials [J]. Functional Materials, 2023, 54(2): 72-81.
- [44] 邢红, 杨建育. 电渗析对锂离子中间产品液分离及浓缩性能的影响研究 [J]. 化工管理, 2022, 3: 143-146.
- Xing Hong, Yang Jianyu. Study on the effect of electrodialysis on the liquid separation and concentration performance of lithium-ion intermediate products [J]. Chemical Management, 2022, 3: 143-146.
- [45] 李书国. 超滤膜的污染原因及清洗方法 [J]. 食品科学, 1999, 2: 28-30.
- Li Shuguo. Pollution causes and cleaning methods of ultrafiltration membrane [J]. Food Science, 1999, 2: 28-30.
- [46] 孙燕, 马向东, 陈马超, 等. 面向高镁锂比盐湖提锂的荷正电复合纳滤膜构筑策略 [J]. 膜科学与技术, 2025, 42(7): 3691-3704.
- Sun Yan, Ma Xiangdong, Chen Machao, et al. Construction strategy of positively charged composite nanofiltration membrane for extracting lithium from salt lakes with high magnesium-lithium ratio [J]. Membrane Science and Technology, 2025, 42(7): 3691-3704.
- [47] Kumar R, Choi K, Khan M. Sustainable lithium extraction from liquid ores using membrane-based technologies: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2025, 23: 1569-1660.
- [48] Ramesh K, Kung-Won C, Moonis A, et al. Sustainable lithium extraction from liquid ores using membrane-based technologies: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2025, 23: 1569-1660.
- [49] 黄浩, 刘怡萍, 宋小鹏, 等. 盐湖卤水中镁/锂分离和锂提取技术的研究进展 [J]. 化工技术与开发, 2024, 53(12): 40-44.
- Huang Hao, Liu Yiping, Song Xiaopeng, et al. Research progress of magnesium/lithium separation and lithium extraction technology in salt lake brine [J]. Chemical Technology and Development, 2024, 53(12): 40-44.
- [50] 时东, 彭小五, 张利诚, 等. 含锂卤水中锂资源高效利用与绿色分离的新型萃取体系 [J]. 盐湖研究, 2019, 26(4): 1-10.
- Shi Dong, Peng Xiaowu, Zhang Licheng, et al. A new extraction system for efficient utilization and green separation of lithium resources in lithium-containing brine [J]. Salt Lake Research, 2019, 26(4): 1-10.
- [51] An S, Li Z, Wang X, et al. Synthesis of [100]-only LiFePO₄ nanosheets for efficient electrochemical lithium extraction from low-grade brines [J]. Nat Water, 2025, 3: 1449-1458.
- [52] 王坤, 王毅霖, 胡景泽, 等. 电化学提锂技术研究进展 [J]. 现代化工, 2025, 45(S1): 59-63.
- Wang Kun, Wang Yilin, Hu Jingze, et al. Research progress of electrochemical lithium extraction technology [J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(S1): 59-63.
- [53] Zhang L, Zhang T, Zhao Y, et al. Doping engineering of lithium-aluminum layered double hydroxides for high-efficiency lithium extraction from salt lake brines [J]. Nano Res. 2024, 17(3): 1646-1654.
- [54] Huo J, Hai C, Sun Y, Dong S, et al. Synthesis of green, highly stable, high-magnesium lithium-aluminum layered double hydroxide adsorbents for lithium extraction from brines [J]. Desalination, 2025, 609: 118897.
- [55] 马骏洲, 王邹彪, 姚浩然, 等. 多孔钛系锂离子筛的制备和吸附过程研究 [J]. 2025(2): 156-166.
- Ma Junzhou, Wang Zoubiao, Yao Haoran, et al. Preparation and adsorption process of porous titanium-based lithium ion sieve [J]. 2025(2): 156-166.
- [56] 刘孝燕, 扎西措, 常立坤, 等. 盐湖提锂锰系离子筛结构调控与放大成型研究进展 [J]. 化学通报, 2025(10): 1054-1064.
- Liu Xiaoyan, Zha Xicuo, Chang Likun, et al. Research progress on structural regulation and amplification of lithium-manganese ion sieve in salt lake [J]. Chemical Bulletin, 2025(10): 1054-1064.
- [57] 赵海祥, 赵颖, 孙淑英. PVC-MnO₂ 锂离子筛膜制备与提锂性能研究 [J], 化学工业与工程, 2023, 40(3): 130-140.
- Zhao Haixiang, Zhao Ying, Sun Shuying. Study on preparation and lithium extraction performance of PVC-MnO₂ lithium ion sieve membrane [J], Chemical Industry and Engineering, 2023, 40(3): 130-140.
- [58] 赖信可, 庄烨, 赵亚飞. 偏钛酸型钛锂离子筛离子掺杂改性研究进展 [J]. 广州化工, 2024, 52(18): 18-23.
- Lai Xinke, Zhuang Ye, Zhao Yafei. Research progress of ion doping modification of metatitanic titanium lithium ion sieve [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(18): 18-23.

Review on the mechanism and principle of lithium extraction technology from salt lakes

Wang Hao¹, Cai Shengji², Liu Shiping², Yao Jianming¹

(1. China ENFI Engineering Corporation. , Beijing 100038, China;

2. Qinghai Huixin New Material Technology Co. , Ltd. , Golmud 816099, China)

Abstract: More than 70% of the world's lithium resources exist in the form of salt lake brine, and the characteristics of high magnesium-lithium ratio and complex impurity components put forward strict requirements for the selectivity and separation efficiency of lithium extraction technology. This paper focuses on the technology of extracting lithium from salt lake with high Mg:Li ratio ($\text{Mg:Li} > 500$). In view of the problems of poor selectivity and difficult separation in the traditional technology of extracting lithium from salt lake with high Mg:Li ratio (chemical precipitation method and solvent extraction method), this paper deeply analyzes the emerging technologies of ion sieve adsorption, membrane separation method and coupling lithium extraction from the aspects of molecular action mechanism, crystal structure change and ion migration law, and introduces their application. Ion sieve adsorption is the mainstream technology in the field of extracting lithium from salt lakes at present. Among them, aluminum ion sieve has been industrialized, while manganese ion sieve and titanium ion sieve are still in the stage of laboratory and pilot test. However, due to their excellent saturated adsorption capacities ($30 - 35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $15 - 25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, while aluminum ion sieve is only $3 - 5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), aluminum ion sieve has been widely used. Lithium ion selective membrane method is a special technology for extracting lithium from salt lakes with high magnesium-lithium ratio, which has the advantages of continuous operation and no secondary pollution, but the flux and stability of membrane materials restrict its industrial application. Coupled lithium extraction technology includes adsorption-membrane separation coupling technology, high gravity enhanced extraction coupling technology, electrochemical intercalation-deintercalation (IDI) lithium extraction technology, etc., which has the advantages of strong adaptability, high comprehensive benefit and flexible adjustment of process parameters, and is an important development direction of lithium extraction technology in salt lakes with high magnesium-lithium ratio in the future. The adsorption capacity and cycle stability of ion sieve adsorbents can be improved by means of material modification, morphology control and composite modification. In the future, with the research and development of new adsorbents and membrane materials, the optimization of coupling process and the application of intelligent technology, the lithium extraction technology from salt lakes with high magnesium-lithium ratio will achieve leap-forward development, providing a solid resource guarantee for the sustainable development of global new energy industry.

Key words: lithium extraction from salt lakes; high magnesium-to-lithium ratio; ion-sieve adsorption method; membrane separation method; coupled lithium extraction technology; mechanism of action; ion migration; crystal structure