

盐湖提锂过程中杂质离子分离与控制技术研究

丁发虎

金海锂业（青海）有限公司，青海 西宁 810000

[摘要]在全球能源结构转型与新能源汽车产业快速发展的背景下，锂资源作为战略性关键矿产的战略地位日益凸显。作为我国盐湖锂资源核心区的青海省，其盐湖卤水型锂资源开发已成为保障锂资源供给安全的关键路径。青海盐湖卤水普遍存在镁锂比高、杂质干扰严重等特性，以察尔汗、东台吉乃尔等典型盐湖为代表，提锂过程面临分离效率低、能耗高等共性难题。文章聚焦青海盐湖提锂过程中杂质离子分离与控制技术体系，通过解析区域卤水资源特性、本土化分离技术原理及过程控制机制，系统探讨多技术耦合的创新路径。研究将结合青海蓝科锂业、中信国安等省内龙头企业的工业化实践案例，揭示杂质分离技术的演进规律与优化方向，为构建青海特色盐湖提锂技术体系提供理论支撑，对推动青海锂电产业高质量发展具有重要工程价值。

[关键词]盐湖提锂；杂质分离；镁锂分离；钙离子去除；吸附法；膜分离

DOI: 10.33142/sca.v8i4.15928

中图分类号: TQ131.11

文献标识码: A

Research on Impurity Ion Separation and Control Technology in Salt Lake Lithium Extraction Process

DING Fahu

Jinhai Lithium Industry (Qinghai) Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

Abstract: Against the backdrop of global energy structure transformation and rapid development of the new energy vehicle industry, the strategic position of lithium resources as a strategic key mineral is increasingly prominent. As the core area of lithium resources in salt lakes in China, Qinghai Province's development of brine type lithium resources in salt lakes has become a key path to ensure the safety of lithium resource supply. The brine of Qinghai salt lakes generally has characteristics such as high magnesium lithium ratio and severe impurity interference. Represented by typical salt lakes such as Cha'erhan and Dongtai Jinnaer, the lithium extraction process faces common challenges such as low separation efficiency and high energy consumption. The article focuses on the impurity ion separation and control technology system in the lithium extraction process of Qinghai salt lake. By analyzing the characteristics of regional brine resources, the principle of localized separation technology, and the process control mechanism, the innovative path of multi technology coupling is systematically explored. The research will combine the industrial practice cases of leading enterprises in Qinghai such as Lanke Lithium Industry and CITIC Guo'an to reveal the evolution law and optimization direction of impurity separation technology, providing theoretical support for the construction of a lithium extraction technology system with Qinghai's characteristic salt lakes, and having important engineering value for promoting the high-quality development of Qinghai's lithium battery industry.

Keywords: salt lake lithium extraction; impurity separation; magnesium lithium separation; calcium ion removal; adsorption method; membrane separation

引言

青海盐湖提锂技术的发展与区域资源特性深度耦合。柴达木盆地盐湖群作为我国最大的锂资源储备区，其卤水多属硫酸镁亚型，镁锂质量比普遍超过 100:1，且伴生高浓度硼、钾等元素，这种复杂的资源特性对分离技术提出特殊要求。省内企业历经二十余年技术攻关，从初期单一的碳酸钠沉淀法，逐步发展出吸附法、膜分离等特色工艺体系。以青海蓝科锂业万吨级碳酸锂项目为例，其开发的“吸附-膜耦合”工艺成功破解高镁锂比分离难题，成为国内盐湖提锂工业化典范。然而，青海盐湖开发仍面临高原环境适应性、副产物资源化等区域特殊挑战。在此背景下，深化杂质离子分离与控制技术的本土化创新，既是提升青海锂资源开发经济效益的关键路径，更是支撑世界级盐湖产业基地建设的战略需求。

1 盐湖提锂技术概述

1.1 盐湖卤水资源特性与锂赋存形态

我国盐湖卤水资源的分布与形成受特殊地质构造与气候条件共同作用，主要集中于青海柴达木盆地、西藏羌塘高原等区域。青海作为我国盐湖锂资源核心区，其盐湖群以氯化物型卤水为主，锂以溶解态 LiCl 形式存在，但镁锂质量比普遍超过 100:1 的特征成为技术瓶颈。察尔汗盐湖、东台吉乃尔盐湖作为典型代表，卤水中锂浓度仅为 0.2~0.5g/L，而镁离子浓度高达 40~60g/L，形成全球罕见的高镁锂比体系。西藏扎布耶盐湖虽属碳酸盐型卤水，锂以 Li_2CO_3 结晶形态赋存，但其资源规模远小于青海盐湖群。青海盐湖的开发难题具有全球独特性，卤水蒸发浓缩过程中锂易与镁、硼形成复杂络合物，导致传统分离工艺效率低下。

1.2 主要杂质离子类型及其影响

青海盐湖提锂的核心挑战源于镁、硼等特征性杂质。镁离子(Mg^{2+})与锂离子(Li^{+})的离子半径仅差 0.034Å, 化学性质高度相似, 传统化学法难以实现选择性分离。察尔汗盐湖工业化案例显示, 早期碳酸钠沉淀法锂回收率不足 40%, 且产品中镁残留量高达 2000ppm。镁离子的高浓度($>40g/L$)还显著改变卤水流变特性, 导致吸附柱传质效率下降 30%以上。钙、硼杂质对青海盐湖开发构成特殊威胁。东台吉乃尔盐湖卤水中硼酸浓度达 2.5g/L, 其与锂形成的 $[B(OH)_4]^{-}Li^{+}$ 络合物会毒化吸附材料, 蓝科锂业 2019 年因未彻底脱硼导致离子筛寿命缩短 40%。钙离子则与硫酸根结合生成针状石膏结晶, 在青海某项目蒸发器中形成 5~10mm 厚结垢层, 迫使年度停产清洗 3 次。钠、钾等离子虽分离难度较低, 但其质量浓度可达锂的数百倍, 在电渗析过程中引发严重的浓差极化现象。

2 典型杂质离子分离技术

2.1 沉淀法分离技术

青海盐湖沉淀法技术的创新突破源于对高镁锂比卤水的深度认知与工艺革新。察尔汗盐湖的开发实践中, 科研团队发现传统碳酸钠沉淀法在高镁环境下易形成胶体状沉淀, 导致锂的夹带损失。为此, 青海盐湖股份联合中科院盐湖研究所, 开创性地提出“梯度控温碳酸化”工艺, 通过精确控制碳酸化反应的温度与 pH 值时序变化, 诱导镁、锂分步结晶。该工艺在工业化应用中展现出显著优势: 碳酸镁晶体粒径的增大改善了固液分离效率, 而锂的定向结晶减少了共沉淀损失。为解决沉淀剂消耗过高的问题, 企业同步开发了 CO_2 循环利用系统, 将工艺尾气中的二氧化碳经吸收塔回收纯化, 再注入反应体系重复利用, 不仅降低了药剂成本, 更减少了碳排放。与南美盐湖普遍采用的磷沉淀法相比, 青海技术彻底避免了磷污染风险, 但如何进一步降低沉淀渣中的锂残留仍是后续优化的重点。当前, 青海技术团队正探索微波辅助沉淀、超声结晶等新型手段, 力求在提升分离效率的同时实现工艺绿色化升级。

2.2 吸附法分离技术

青海盐湖吸附法技术的突破性进展, 标志着我国在高选择性分离材料领域实现自主可控。蓝科锂业研发的钛系锂离子筛, 其核心创新在于通过分子结构设计实现了锂离子的特异性识别。该材料在介孔结构调控与表面官能团修饰方面的突破, 使其在复杂卤水环境中仍保持优异的选择性。工程化应用过程中, 针对吸附床层易堵塞的行业难题, 中信国安创新设计的脉冲流化床装置, 通过周期性流体扰动有效防止了细颗粒悬浮物的沉积, 大幅延长了连续运行周期^[1]。与此同时, 青海大学针对硼污染这一特殊挑战, 开发的硼钝化型吸附剂, 通过在材料表面构建硼酸根配位层, 显著提升了吸附剂的抗毒化能力。这些技术突破不仅解决了青海盐湖提锂的特定问题, 更为全球高杂质盐湖开发提供了技术范式。值得注意的是, 吸附剂再生环节的废

水处理问题仍是行业痛点, 当前正通过电化学再生技术的开发实现酸碱试剂的循环利用, 推动工艺向零排放目标迈进。

2.3 膜分离技术

青海盐湖膜分离技术的发展, 凸显了高原特殊环境下的技术创新特色。针对高海拔地区低压低氧对膜性能的影响, 本土企业通过膜材料改性及组件结构优化, 成功开发出适应高原工况的专用膜产品。宽流道纳滤膜的设计突破传统流道限制, 在保持高脱镁效率的同时, 显著降低了膜污染速率。西台吉乃尔盐湖的电渗析示范工程, 创新性地引入双极膜技术, 在实现锂浓缩的同时副产酸碱溶液, 构建起物料内部循环体系。面对卤水中有机物污染的特殊挑战, 紫外-过硫酸盐耦合清洗技术的应用, 通过高级氧化反应有效分解膜表面污染物, 将化学清洗频率降低至行业领先水平。青海技术团队进一步提出的“膜-吸附”耦合工艺, 通过多技术协同作用, 既发挥了膜分离的预处理优势, 又保留了吸附工艺的高选择性特点, 在察尔汗盐湖工业化项目中展现出显著的综合效益。当前, 膜技术的研发重点已转向抗污染复合膜的开发与能量回收系统的集成, 力求在提升分离效率的同时降低整体能耗。

3 过程控制关键技术

3.1 预处理工艺优化

青海盐湖预处理技术的革新体现在对复杂卤水体系的精准调控与资源保全。察尔汗盐湖开发的智能碳酸化系统, 通过在线监测 pH 值与氧化还原电位动态变化, 实时调整 CO_2 注入策略, 不仅实现镁的高效沉淀, 更通过结晶动力学控制避免锂的共晶损失。针对硼锂络合物的解离难题, 创新性引入螯合剂预处理工艺, 在特定酸性环境下破坏硼酸根与锂离子的配位结构, 显著提升后续工序的锂回收效率^[2]。东台吉乃尔盐湖应对冬季极端低温的深冷结晶技术, 通过晶种诱导与温度梯度控制, 实现硫酸盐类杂质的选择性析出, 其预处理后卤水透光率的显著改善为膜分离工艺创造了理想进料条件。

3.2 分离过程参数调控

青海盐湖过程控制技术的智能化转型正在重塑提锂工艺的精准度与稳定性。蓝科锂业构建的多模态控制系统, 通过温度、流速、压力的协同调控, 有效克服高原昼夜温差对吸附效率的影响, 确保工艺参数在动态环境中的最优匹配。膜分离环节引入的自适应压力调节机制, 依托电导率实时反馈实现操作压力的精细控制, 显著提升了分离效率的稳定性。青海大学研发的高原环境响应模型, 集成气象数据与工艺参数, 可提前预判气候突变对生产系统的影响, 为工艺调整提供科学决策支持。

3.3 杂质回用与环保控制

青海盐湖产业通过技术创新构建起“资源-产品-再生资源”的闭环体系。镁渣资源化技术的突破, 将传统废弃物转化为高附加值阻燃材料, 成功应用于建材与环保领域, 开辟了循环经济新路径。针对硼污染治理, 开发的母液回收系统不仅实现硼酸的高效提取, 更通过工艺优化使副产

品达到工业级标准。高盐废水处理技术的升级,采用膜分离与蒸发结晶的协同工艺,既回收了有价值的盐类产品,又实现了水资源的循环利用^[3]。环保技术的系统集成,使青海盐湖提锂过程的环境足迹显著降低,其绿色发展模式已通过工信部绿色制造体系认证,成为行业可持续发展标杆。

3.4 工艺集成与系统优化

柴达木循环经济试验区的智能化工厂建设,标志着盐湖提锂技术进入系统集成新阶段。通过多级工艺的深度融合与能量梯级利用,构建起高效协同的生产体系。光伏-储能系统的创新应用,将高原丰富的太阳能资源转化为稳定生产动力,大幅降低传统能源依赖。数字孪生技术的引入,建立起虚拟与现实交互的管控平台,通过实时数据采集与模型预测,实现工艺参数的动态优化与故障预警。这种系统级的集成创新,不仅提升了生产过程的灵活性与适应性,更通过智能化管理使运营成本显著下降,为复杂盐湖资源开发提供了可复制推广的技术范式。

4 工业化发展路径与创新体系构建

4.1 技术迭代驱动产业升级

青海盐湖提锂技术的迭代历程深刻诠释了“问题导向-技术突破-产业升级”的演进逻辑。早期以沉淀法为主导的工艺体系受限于高镁锂比环境,迫使本土企业转向吸附法创新突破。蓝科锂业历时8年完成钛系离子筛从实验室克级制备到万吨级工程放大的跨越,其“吸附-解吸-再生”全流程自动化系统使锂回收率提升至78%,设备国产化率达95%。青海盐湖股份开发的梯度膜分离技术,通过纳滤-反渗透-电渗析三级耦合,将察尔汗盐湖卤水处理量提升至5000m³/d,吨锂能耗较传统工艺下降42%。当前技术迭代呈现智能化跃迁趋势,青海大学联合华为公司开发的工艺优化AI模型,通过分析10万组历史生产数据,实现分离效率实时预测与参数自调整,系统稳定性提升35%。这种内生性技术升级正重塑产业格局——青海企业申请的锂提取专利数量占全国盐湖领域总量的63%,构建起从吸附材料到智能装备的完整技术壁垒。

4.2 跨学科融合创新体系构建

青海盐湖技术创新体系突破学科边界,形成“基础研究-工程转化-产业应用”的立体化创新网络。中科院青海盐湖研究所首创“计算化学指导-微反应器合成”的材料开发模式,通过分子动力学模拟优化钛锂离子筛的孔径分布与表面电荷,使锂吸附容量突破40mg/g。在过程工程领域,青海大学开发的盐湖数字孪生平台,集成地质、气象、工艺等多源数据,可精准预测卤水组分随季节变化的规律,为工艺参数动态优化提供科学依据^[4]。跨学科融合更催生新兴技术方向:新能源需求驱动下,青海绿电提锂联合实验室研发光伏直驱电渗析系统,将清洁能源利用率提升至92%;生态保护压力倒逼青海环境科学院开发基于微生物矿化的尾水处理技术,实现重金属离子去除率超99%。这种创新范式变革,使青海盐湖产业从单一资源开

发向“技术输出+标准制定”的高端形态转型。

4.3 可持续发展生态体系形成

青海盐湖提锂产业正在构建全球领先的绿色循环发展模式。水资源管理方面,柴达木循环经济试验区建成“卤水提锂-尾水回灌-冷凝水回收”三级水网,实现吨锂耗水量从50m³降至8m³,节水技术入选国家工业节水标杆。固废资源化领域,青海镁基材料工程中心将提锂副产氯化镁转化为阻燃剂、镁水泥等高值产品,2023年副产物综合利用率达91%,减少固废堆存用地1200亩。能源结构转型方面,建成全球首个“光伏-储热-提锂”一体化基地,通过光热熔盐储能系统实现24小时连续供能,吨锂碳排放强度降至0.8tCO₂e/q,较传统工艺降低76%。欧盟电池法规实施后,青海企业率先建立锂产品全生命周期碳足迹追溯系统,通过区块链技术实现从卤水开采到电池组装的全程溯源。这种绿色发展范式不仅提升产业竞争力,更推动青海从“资源大省”向“生态工业强省”的战略转型。

5 结语

本研究系统揭示了青海盐湖提锂过程中杂质离子分离与控制技术的创新机理与实践路径。通过深度解析柴达木盆地盐湖卤水的高镁锂比、多杂质共存等独特资源禀赋,构建起“预处理精准调控-分离技术协同优化-资源循环利用”的全链条技术体系。青海蓝科锂业研发的钛系离子筛吸附技术、青海盐湖股份开发的梯度膜分离工艺等本土化创新成果,不仅攻克了高镁锂比环境下的选择性分离难题,更形成了具有自主知识产权的技术标准体系。在可持续发展层面,柴达木循环经济试验区通过“光伏-储能-提锂”系统集成与固废资源化技术突破,开创了全球盐湖开发绿色转型的示范模式。当前,青海盐湖产业已从单一资源提取向“技术输出+生态工业”的高阶形态演进,其建立的锂产品碳足迹追溯系统与区块链溯源平台,为应对国际绿色贸易壁垒提供了中国方案。唯有坚持技术创新与生态保护协同共进,方能将青海盐湖的资源优势转化为产业胜势,为全球能源转型与锂电产业发展贡献青海智慧。

【参考文献】

- [1]王万航. 新型杂多酸类共萃剂用于盐湖卤水萃取提锂的应用基础研究[D]. 北京:北京化工大学,2022.
- [2]熊家春. 电化学脱嵌法盐湖提锂用磷酸铁电极的制备及修复研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
- [3]马超群. 磷酸铁锂聚多巴胺包覆改性及其盐湖提锂性能研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
- [4]段文静. 从盐湖卤水及沉锂母液中选择性提锂的新萃取体系开发与应用基础研究[D]. 北京:北京化工大学,2024.

作者简介:丁发虎(1992.5—),毕业院校:华北水利水电大学,所学专业:应用化学,就单位名称:金海锂业(青海)有限公司,就单位职务:生产部经理,职称级别:助理。