

Current situation of lithium extraction process and environmental protection transformation strategy

Yanhong Ding Qingchao Wu Zheng Tang Haifeng Xu Yingjie Shi

College of Materials Science and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412007, China

Abstract

As a key raw material for lithium carbonate production, the efficient extraction technology of spodumene is crucial for the development of new energy industries. The current mainstream sulfuric acid process relies on high-temperature roasting to achieve mineral structure transformation. Although it has advantages such as high extraction rates and mature technology, it faces issues like high energy consumption and difficult waste residue treatment. Other processes, due to limitations in energy consumption, pollution, or economic viability, have a narrower application range. This paper systematically compares the techno-economic performance of mainstream processes, focusing on the resource utilization path of sulfuric acid process waste residues, and explores the potential of the “low-temperature alkali activation-precise acid leaching” new process. The aim is to provide theoretical support and industrial direction for the sustainable development of lithium resources. Future technological development should focus on process optimization and resource recycling, promoting the transformation of the lithium battery industry towards greener and more sustainable directions through multi-technology synergy and high-value utilization of waste residues.

Keywords

spodumene; lithium slag treatment; environmental protection process; efficient lithium extraction

锂辉石提锂工艺现状与环保转型策略

丁燕鸿 吴清超 唐政 徐海峰 史英杰

湖南工业大学材料科学与工程学院, 中国·湖南株洲 412007

摘要

锂辉石作为碳酸锂生产的关键原料, 其高效提取技术对新能源产业发展至关重要。当前主流的硫酸法工艺依赖高温焙烧实现矿物结构转化, 虽具备提取率高、工艺成熟等优势, 但面临能耗高、废渣处理困难等问题, 其他工艺因能耗、污染或经济性限制, 应用范围较窄。本文系统对比主流工艺的技术经济性, 聚焦硫酸法废渣资源化路径, 并探讨“低温碱活化-精准酸浸”新型工艺的潜力, 旨在为锂资源可持续开发提供理论支撑与工业化方向。未来技术发展应聚焦工艺优化与资源循环, 通过多技术协同与废渣高值化利用, 推动锂电产业向绿色、可持续方向转型。

关键词

锂辉石; 锂渣处理; 环保工艺; 高效提锂

1 引言

锂辉石的主要成分是 $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, 因其较高品位成为多数锂盐企业的原矿选择。其中的锂以硅酸盐形式存在, 在常规条件下通常以 α 相形式存在, 具有紧密稳定的晶格排列和突出的化学惰性, 对绝大多数酸碱溶液均表现出显著抗蚀性, 这种特殊的物化稳定性导致 α 相锂辉石难以直接进行锂元素的工业化提取, 现行工业生产普遍采用热活化改性工艺, 通过持续高温焙烧促使矿物发生晶型转变, 使其重构为具有开放结构的 β 相锂辉石。这种相变过程有效增强了矿物晶格的可渗透性, 显著提升后续酸浸、沉锂工序的反应

效率, 为锂资源的高效提取和高纯度碳酸锂的制备创造必要的前驱条件。当前锂辉石提锂工艺已在行业内形成较为完备的技术体系, 但环保法规日趋严格, 相关生产技术正面临绿色化、高效化的升级需求, 锂辉石作为重要的锂资源, 其高效利用对保障锂资源供应至关重要。

2 工艺对比分析

常见的提锂工艺有硫酸法、石灰石法、氯化焙烧法、硫酸盐焙烧法、纯碱压煮法。各工艺优缺点如表 1 所示。

从当前锂辉石提锂工艺的技术成熟度、工业化应用及经济效益来看, 硫酸法仍是短期内最具优势的主流工艺, 目前主要从能耗、锂提取率以及废渣处理三方面进行优化, 持续改进的潜力较大。其他工艺虽各有特色, 但受限于环保风险、技术复杂性或经济性不足尚未实现大规模工业化生产^[1],

【作者简介】丁燕鸿 (1968–), 女, 中国湖南攸县人, 博士, 高级工程师, 从事新能源材料研究。

需要进一步优化，其中石灰石法因烧结温度过高、锂提取率低及废渣难利用已逐渐被淘汰；氯化焙烧法虽锂提取率较高，但存在氯气等有毒气体排放和氯化锂收集难题，未来或转向锂云母提锂^[2]；硫酸盐法通过硫酸钾替代硫酸减少硫污染（硫酸法使用浓硫酸在高温条件下易分解为 SO₃，进一步与水蒸气结合形成酸雾），但由于硫酸盐成本较高并且在反

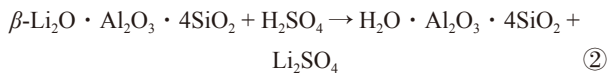
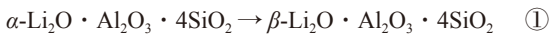
应中释放出硫酸盐本身所带的金属离子增加了杂质离子浓度，废液处理困难，适用性受限；纯碱压煮法以环保优势突出（副产物霞石可作建材，压煮反应通过纯碱介质进行，仅释放 CO₂），锂回收率超 90%，虽受制于高压设备成本与工艺复杂性，但在碳中和背景下潜力显著，在解决设备成本、密封及能耗问题后，有望成为下一代主流技术。

表 1 锂辉石提锂工艺对比

工艺	优点	缺点
硫酸法	a 高提取率 b 工艺成熟 c 硫酸酸浸时反应速度快	a 高能耗 b 设备存在腐蚀问题 c 废渣需处理
石灰石法	a 设备要求低 b 适用于低品位矿	a 锂提取率低 b 废渣量大且难处理。
氯化焙烧法	a 高提取率 b 适用性广，可用于多种含锂矿 c 工艺流程短	a 氯离子难以去除 b 氯化剂危害 c 氯化锂收集困难
硫酸盐焙烧法	a 不需要对矿石进行太多前处理 b 相对硫酸法工艺流程少，产生酸雾少	a 硫酸钾消耗过多，增加生产成本。 b 钾离子过多，除杂工序困难。
纯碱压煮法	a 高温高压条件下反应彻底，反应转化率高 b 纯碱作为反应剂，环境污染小	a 需要高压反应釜，设备投资大。 b 工序较为严苛。

3 硫酸法工艺流程与锂渣分析

硫酸法凭借高浸出率、工艺成熟度、资源综合利用和规模化生产优势，成为当今主流的锂辉石提锂制备工业级碳酸锂的方法，尤其在锂电产业快速发展的背景下，其高效、经济的特点更能满足市场对锂资源的迫切需求。硫酸法基本工艺流程为：（1）α 型锂辉石精矿在 1000℃ 左右进行转型焙烧，化学反应式如公式①所示，β 型锂辉石在冷却研磨后在 300℃ 左右进行酸化焙烧，化学反应式如公式②所示。（2）酸化焙烧后依次进行水冷冷却、浆化浸出、中和分离、精密过滤、多级除杂、浓缩后得到 Li₂SO₄ 完成液。（3）Li₂SO₄ 完成液进行离心分离、品浆调配、碳化、热分解、除磁后得到 Li₂CO₃ 成品。除上述工序外，Li₂SO₄ 完成液也可进行苛化、换热、结晶、重溶等流程制备氢氧化锂和元明粉等附属产品。



湖南永杉锂业有限公司在碳酸锂制备领域构建了完整的硫酸法工艺体系，其技术特征通过对锂渣的 XRD 物相分析得以验证。如图 1 所示，锂渣主要物相组成为硫酸钙、硅铝酸盐及二氧化硅，该物相分布特征表明硫酸法对锂辉石中锂元素的浸出效率达到工业应用标准。值得注意的是，尽管硫酸法在锂提取方面表现优异，但生产单吨碳酸锂伴生 8~10 吨酸性废渣的突出问题，已成为制约锂电行业可持续发展的关键瓶颈^[3]。针对这一技术瓶颈，永杉锂业提出创新性解决方案：在酸化压滤前段工序增设磁重选工段，或在渣库系统集成重选工艺。前者可使浸出渣料中金属杂质含量显著降低 70~80%，有效改善后续处理工序的物料特性；后者

通过图 2 所示的重选工艺流程，可实现贵金属钽铌的回收。

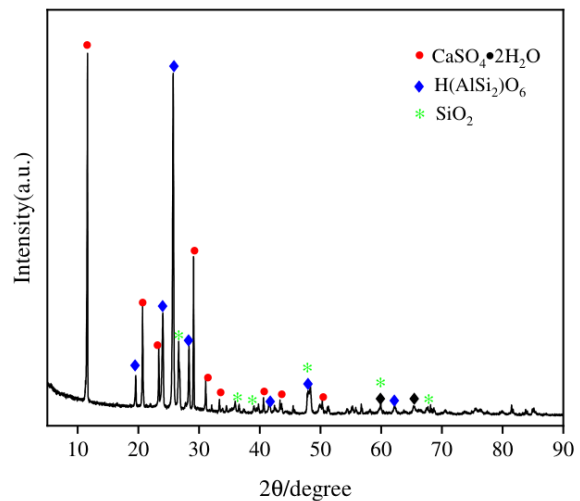


图 1 锂渣的 XRD 图谱

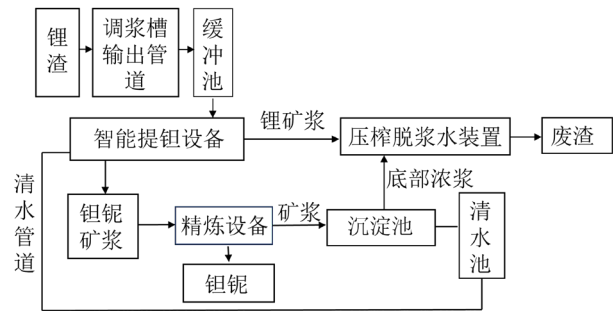


图 2 钽铌回收流程图

经 10 倍富集锂渣样品的 ICP 检测分析（表 2）与价值

评估,该工艺不仅提升了锂渣在制砖、水泥掺合料等建材领域的应用潜力,更通过有价金属回收创造了可观经济效益。这种“以废治废”的技术路径,在一定程度上既解决了传统废渣处置难题,又实现了资源梯级利用。通过采用马弗炉对锂渣进行高温溶解特性研究,在1000~1300℃范围内进行梯度升温实验,每个温度区间恒温15分钟以上以观察熔融状态。实验结果表明锂渣在1300℃时开始熔融,测定锂渣熔点能为工业熔炼及回收工艺提供关键参数支撑:一方面,通过精准温控可实现能源效率最大化并延长设备使用寿命;另一方面,为锂渣高附加值资源化利用(如耐高温建筑陶瓷、玻璃体复合材料开发)奠定科学基础。

表2 锂渣样品 ICP 测试结果

元素	样品浓度	单位	质量百分数 %
Ta	339	mg/kg	0.0339
Nb	185	mg/kg	0.0185

4 新型工艺的探讨

由于传统锂辉石提锂工艺中高温相变预处理的高能耗缺陷,氢氧化钠的常压直接浸出技术因其无需高温活化的特点已成为锂资源绿色提取领域的研究热点^[4,5]。未来研究中可能会提出一种“氢氧化钠低温定向活化-稀硫酸精准浸出”协同工艺:通过NaOH在300℃左右对 α 型锂辉石进行晶格靶向解离,选择性断裂Li-O-Si键并重构为水溶性Na-Li硅酸盐相,突破高温 β 相变的能量壁垒;后续采用低浓度硫酸即可实现锂离子高效浸出,其协同性源于NaOH预活化赋予的锂相高反应活性与硫酸质子对锂离子的特异性置换能力。该工艺通过“低温碱介导晶格重构 \rightarrow 温和酸控选择性浸出”的分子级调控,使综合能耗降低40%~60%,碳排放减少30%~40%,且适配低品位矿体(Li₂O < 1.5%)。其核

心创新在于通过碱-酸序贯作用实现锂的高效释放与杂质抑制,为锂辉石绿色提锂提供了“低能耗-低排放-高兼容性”的一体化解决方案,未来需进一步优化碱剂循环体系与硅铝副产物的功能性转化路径以推进工业化应用。

5 结语

随着全球新能源产业对锂资源需求的持续攀升,我国锂资源开发面临着技术升级与产业转型的双重挑战。在保障国家战略资源安全和践行绿色低碳发展的双重目标驱动下,当前亟需通过技术创新构建环境友好型提锂技术体系。提锂制备碳酸锂工艺的技术创新已成为学术界的研究热点,诸多新型提取技术不断涌现并取得重要突破。总之,开发一种环保、高效且适配于不同品位锂矿的提锂工艺不仅有利于突破进口资源依赖的产业瓶颈,更将推动我国锂电产业形成“低消耗-高产出-零废弃”的闭环式可持续发展模式,为新能源产业链注入绿色动能。

参考文献

- [1] 李强, 锂辉石提锂工艺方法综述 %J 化工管理, (2022) 147-149.
- [2] 简鹏, 周义朋, 柯平超, 龚慧纯, 贺广, 氯化焙烧-水浸法从富铷锂云母矿中提取Li、Rb %J 中国有色冶金, 53 (2024) 69-78.
- [3] X. Wang, H. Hu, M. Liu, Y. Li, Y. Tang, L. Zhuang, B. Tian, Comprehensive utilization of waste residue from lithium extraction process of spodumene, Minerals Engineering 170 (2021) 106986.
- [4] X. Li, Z. Zhou, K. Zhao, J. Liu, Z. Liu, An environment-friendly strategy for comprehensive recovery of Li, Al and Si from low-grade clay-type lithium ore, Chemical Engineering Journal 505 (2025) 159651.
- [5] H.C.S. Subasinghe, M. Rezaee, Direct lithium extraction from α -Spodumene using NaOH roasting and water leaching, Chemical Engineering Journal 505 (2025) 159661.