

特约专栏

锂电池回收产出的碳酸锂制备单水氢氧化锂 工艺分析与探讨

夏 星, 王奉刚, 陈 坚, 谢美求

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘 要: 锂元素的回收是电池回收工艺中的关键步骤, 目前一般采用湿法浸出技术将有价元素从锂电池黑粉中转移到溶液中, 然后经过除杂净化得到精制的硫酸锂溶液, 加入碳酸钠制备成工业级碳酸锂或者碳酸锂粗品, 再经精制除杂得到碳酸锂产品返回电池生产过程。随着氢氧化锂市场需求的提高, 如何将碳酸锂经济高效地转化为氢氧化锂也成为重要环节。针对电池回收产生的工业级碳酸锂转化为氢氧化锂的工艺过程, 详细分析了不同工艺路线的原料选择、工艺过程、产品及副产品产出以及能源消耗等关键因素, 通过对比不同工艺路线的优劣势, 总结出不同企业状态适用的工艺路线, 旨在为优化生产流程、提高回收产业链附加值提供有价值的参考。研究结果将有助于指导电池回收企业在选择氢氧化锂生产工艺时作出决策, 同时也为盐湖提锂和矿石提锂产生的碳酸锂生产氢氧化锂提供借鉴。

关键词: 废旧锂离子电池; 电池回收; 碳酸锂; 单水氢氧化锂; 制备工艺

中图分类号: TF803; TQ09 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)05-0392-06

引用格式: 夏星, 王奉刚, 陈坚, 等. 锂电池回收产出的碳酸锂制备单水氢氧化锂工艺分析与探讨[J]. 中国材料进展, 2024, 43(5): 392-397.

XIA X, WANG F G, CHEN J, *et al.* Analysis and Exploration of the Process for Preparing Lithium Hydroxide Monohydrate from Recycled Lithium Carbonate from Batteries[J]. Materials China, 2024, 43(5): 392-397.

Analysis and Exploration of the Process for Preparing Lithium Hydroxide Monohydrate from Recycled Lithium Carbonate from Batteries

XIA Xing, WANG Fenggang, CHEN Jian, XIE Meiqiu

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, China)

Abstract: The recovery of lithium is a crucial step in battery recycling. Currently, wet leaching technology is commonly employed to extract valuable elements from the black powder. This process involves impurity removal and purification, resulting in a refined lithium sulfate solution. Carbonic acid is subsequently added. Sodium is used to produce either industrial-grade lithium carbonate or crude lithium carbonate. The resulting lithium carbonate undergoes further refinement to remove impurities, creating a product suitable for battery production. Given the growing demand in the lithium hydroxide market, the cost-effective and efficient conversion of lithium carbonate to lithium hydroxide has become increasingly important. This study centers on the conversion process, transforming lithium carbonate obtained from battery recycling into lithium hydroxide. The analysis covers critical factors, including raw material selection, process routes, product and byproduct yields, and energy consumption across various process options. Through a comparison of advantages and disadvantages, suitable process routes for different company states were summarized, aims to offer valuable insights for optimizing production and adding value to the recycling industry chain. This study can serve as guidance for battery recycling companies when choosing lithium

hydroxide production methods. Furthermore, it serves as a reference for producing lithium hydroxide from lithium carbonate obtained via extraction from salt lakes and ores.

Key words: discarded lithium-ion batteries; battery recycling; lithium carbonate; monohydrate lithium hydroxide; preparation process

收稿日期: 2023-08-31 修回日期: 2023-11-15

基金项目: 湖南省十大科技攻关项目(2023GK1070)

第一作者: 夏 星, 女, 1983 年生, 高级工程师,

Email: 67647765@qq.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202308033

1 前言

废旧锂离子电池经拆解、破碎、分选后得到正负极混合的黑色粉末,俗称“黑粉”。黑粉中含有大量的有价金属元素,如锂、钴、镍等。为了回收这些有价值的金属并减少环境污染,通常会对黑粉进行处理,其中的锂主要制备成碳酸锂产品销售至电池材料制备端。

在锂离子电池材料的制备过程中,煅烧工序是关键步骤之一,其中原料的选择对电池性能产生重要影响。特别是高镍三元材料,许多研究表明该材料在烧结过程中温度不得高于 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],这导致采用碳酸锂原料时烧结温度过低,可能造成分解不完全^[2](常压下,碳酸锂分解温度为 $1283.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]),进而影响电池性能。氢氧化锂具有较低的熔点和更好的振实密度,这对于电池的充放电性能具有积极影响。因此,高镍三元材料制备中常使用氢氧化锂作为原料。不仅如此,在制备磷酸铁锂产品时,采用氢氧化锂通过水热法制备的方法也逐渐被广泛采用^[4]。当前国内氢氧化锂的原料来源相较于碳酸锂更为单一,主要以锂辉石精矿为原料^[5]。电池回收市场份额的逐步加大,促使更多工厂关注将碳酸锂进一步加工转化为氢氧化锂产品的工艺流程。

本文针对采用电池回收产生的碳酸锂转化为氢氧化锂的工艺过程,详细分析了不同工艺路线的原料选择、工艺过程、产品及副产品产出以及能源消耗等关键因素,通过对比不同工艺路线的优劣势和适用场景,旨在为优化生产流程、提高回收产业链附加值提供有价值的参考。

2 工艺路线

从国内氢氧化锂生产厂家公开的环境影响报告书看,碳酸锂制备氢氧化锂的方法主要包括苛化法和双极膜电解法^[6-12]。在苛化法中,根据原料和氢氧根来源的不同,进一步分为碳酸锂石灰苛化法和硫酸锂氢氧化钠苛化法这2种主要工艺。

2.1 碳酸锂石灰苛化法

碳酸锂石灰苛化法是一种常用于生产电池级氢氧化锂的方法。在这一工艺中,将碳酸锂溶液与石灰溶液加热,反应生成氢氧化锂与碳酸钙的混合溶液。通过过滤去除碳酸钙沉淀,可以获得氢氧化锂溶液^[13]。接下来,氢氧化锂溶液经过一系列处理步骤,包括除杂净化、蒸发浓缩、结晶、离心过滤、干燥、粉碎和包装,最终得到电池级氢氧化锂产品。

碳酸锂石灰苛化法作为一种主要的制备氢氧化锂的方法,广泛应用于工业生产。以下将对碳酸锂石灰苛化法的主要内容进行介绍。

2.1.1 原辅材料

原料:碳酸锂。

主要辅料:精制氢氧化钙、高纯水。

2.1.2 工艺流程

碳酸锂石灰苛化法工艺流程图见图1。

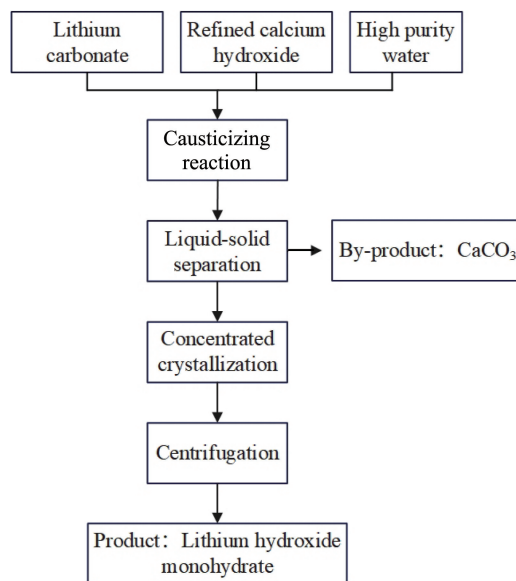
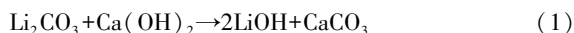


图1 碳酸锂石灰苛化法工艺流程图

Fig. 1 Process flowchart of lithium carbonate lime-soda

(1)苛化反应:将精制石灰乳与碳酸锂以物质的量的比 $1.08:1$ 混合,加热至沸腾并强力搅拌,苛化约 30 min ^[14],反应如式(1):



(2)固液分离:过滤除去不溶性的残渣,分离后可得到质量分数约 3.5% 的氢氧化锂溶液^[15]。

(3)浓缩结晶:将母液减压浓缩、结晶、干燥,得到单水氢氧化锂。

(4)成品制备:单水氢氧化锂经粉碎、筛分、除磁和包装得到电池级微粉单水氢氧化锂。

2.1.3 主副产品

主产品:微粉型电池级单水氢氧化锂。

副产品:精制碳酸钙(可以延伸生产加工为精制氢氧化钙并得到新的副产物二氧化碳,收集后制造如液体二氧化碳或者干冰等)。

2.2 硫酸锂氢氧化钠苛化法

硫酸锂氢氧化钠苛化法是一种用于生产电池级氢氧化锂的工艺。该方法将碳酸锂通过高纯硫酸酸化,得到硫酸锂溶液。然后根据溶液中的锂含量,加入适量的氢氧化钠溶液,在低温下冻结结晶,析出芒硝(十水硫酸钠),然后通过离心分离和深度除杂,经强制蒸发,制得单水氢氧化锂产品^[16]。同时,芒硝还可进一步生产元明

粉(无水硫酸钠)。

2.2.1 原辅材料

原料: 碳酸锂。

主要辅料: 高纯硫酸、高纯氢氧化钠、高纯水。

2.2.2 工艺流程

以碳酸锂为原料, 采用硫酸锂苛化冷却结晶法生产电池级氢氧化锂。主要工艺流程如图 2。

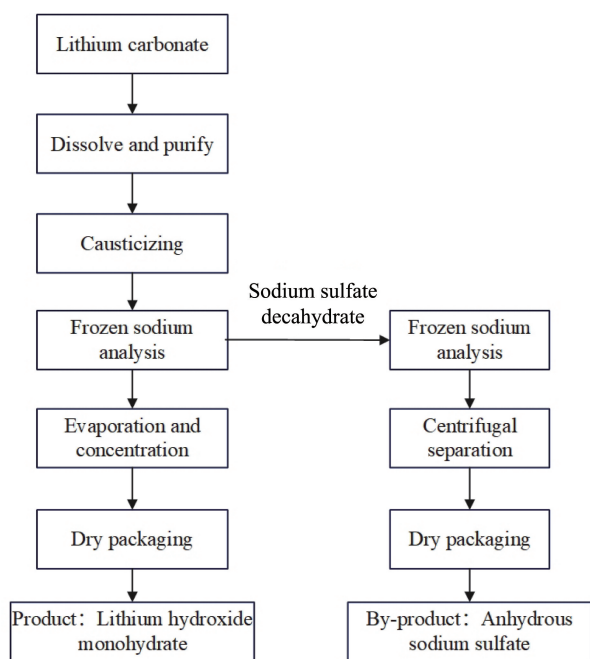


图 2 硫酸锂氢氧化钠苛化法工艺流程图

Fig. 2 Schematic diagram of the lithium sulfate-sodium hydroxide leaching process flow

(1) 硫酸锂氢氧化钠苛化法的主要工艺流程

溶解: 碳酸锂与硫酸反应生成硫酸锂溶液。

净化: 对硫酸锂溶液进行净化处理, 去除杂质。

苛化: 在硫酸锂溶液中加入适量的氢氧化钠溶液, 产生转化液。

冷冻析钠: 在低温下, 将芒硝析出并与氢氧化锂液体分离。

蒸发: 对转化液进行蒸发浓缩, 得到单水氢氧化锂。

烘干、包装: 对得到的单水氢氧化锂进行烘干、包装。

(2) 副产品生产流程

蒸发浓缩: 将苛化冷冻工序析出的十水硫酸钠加水溶解成硫酸钠溶液, 经管道输送至 MVR 蒸发器蒸发并结晶。

离心分离: 蒸发后的浆料输送到离心机分离得到硫酸钠母液和湿的硫酸钠固体。

干燥包装: 湿的硫酸钠进入流化床干燥器, 热风炉提供的热风直接通入干燥器内, 与物料充分接触后干燥,

得到无水硫酸钠(元明粉), 后送至包装工序包装。

2.2.3 主副产品

主产品: 电池级单水氢氧化锂。

副产品: 元明粉。

2.3 硫酸锂双极膜电解法

硫酸锂双极膜电解法, 也称为电渗析(ED)工艺, 是一种电化学分离技术, 利用直流电场下的离子迁移现象, 在阴阳离子交换膜的作用下, 实现带电介质与不带电介质的有效分离^[17]。先将碳酸锂用硫酸酸化, 得到硫酸锂溶液, 再以硫酸锂溶液为阳极电解液、水为阴极电解液置于电解槽中电解, 在阴极室可获得一定质量分数的氢氧化锂溶液, 同时在阳极室可得到硫酸溶液^[18]。硫酸锂双极膜电解法制备氢氧化锂工作原理见图 3。

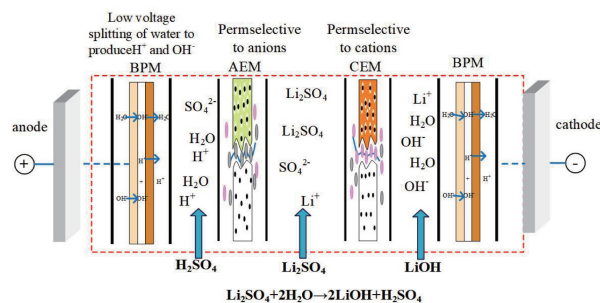


图 3 硫酸锂双极膜电解法工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of lithium sulfate bipolar membrane electrolysis method

2.3.1 原辅材料

原料: 碳酸锂。

主要辅料: 高纯硫酸、高纯氢氧化钠、高纯水。

2.3.2 工艺流程

以碳酸锂为原料, 采用电解法制备氢氧化锂, 工艺流程如图 4。

(1) 预处理系统

预处理系统的主要目标是对进水进行碳酸锂溶解、过滤和除杂处理, 以满足双极膜电渗析工艺的要求。进水要在水温 25~40℃ 的条件下进行处理, 并满足多项指标, 如总悬浮固体(total suspended solid, TSS)需低于 0.1 mg/L, 含有二价及二价以上阳离子(如 Ca, Mg)的总量需小于 0.3 mg/L, SiO₂ 含量低于 40 mg/L, 黏度要求不超过水的 10 倍(即标准大气压、20℃ 条件下, 10 mPa·s), 同时不含有特定物质, 如磺酸类、丙酮、四氢呋喃、脂等, 以及强氧化性和强还原性物质。此外, 絮凝物质也不应存在。预处理工序需要根据碳酸锂的来源、批次和生产工艺, 进行深度除杂处理, 包括深度除有机物、螯合树脂除阳离子、精滤除固体和絮状物质等步骤, 以确保溶液质量。精滤液将进入后续的双极膜系统。

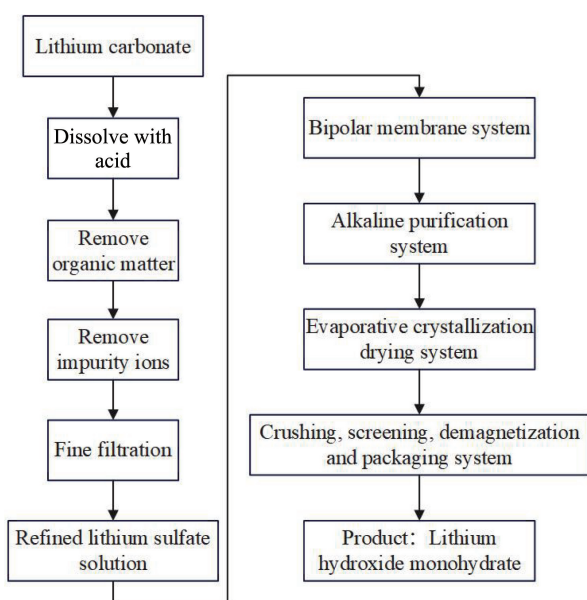


图4 硫酸锂双极膜电解法制备氢氧化锂工艺流程图

Fig. 4 Schematic diagram of lithium hydroxide preparation by lithium sulfate bipolar membrane electrolysis method

(2) 双极膜系统

该系统主要处理经过预处理的硫酸锂溶液。在离子交换工艺的处理下，硫酸锂溶液中二价及二价以上阳离子总量被控制在 $\leq 0.3 \text{ mg/L}$ 。这样处理后的滤液将进入双极膜电渗析系统。双极膜电渗析系统的核心是通过双极膜的作用，使得离子在直流电场的作用下产生定向迁移。用阳离子膜将阳极电解液和阴极电解液隔开，控制

电解电压为 $3\sim 6 \text{ V}$ ，电流密度为 $1\sim 100 \text{ A/dm}^2$ ^[19]。在该系统中，吸附后的尾液经处理产生酸液和碱液，其中碱液为氢氧化锂溶液，酸液为硫酸。碱液中的氢氧化物离子浓度为 2 mol/L ，酸液中的氢离子浓度也为 2 mol/L 。稀盐水和酸液分别返回前端的碳酸锂溶解工艺，而氢氧化锂则进入后续的处理工序。

(3) 碱提纯系统

碱提纯系统的目标是控制氢氧化锂中硫酸根离子的含量，使系统出水中的硫酸根含量不超过 50 mg/L 。

(4) 蒸发结晶系统

该系统将经过碱提纯的氢氧化锂溶液进行蒸发浓缩和结晶处理。通过这一过程，湿的单水氢氧化锂晶体被离心分离，然后经过干燥，得到干燥的单水氢氧化锂晶体。

(5) 粉碎-筛分-除磁-包装系统

干燥的单水氢氧化锂晶体将通过气流磨进行粉碎，以得到微粉型的单水氢氧化锂晶体，并进行闭路筛分。最终，通过除磁处理和包装工序，获得微粉型电池级单水氢氧化锂成品。

2.3.3 主副产品

主产品：微粉型电池级单水氢氧化锂。

副产品：二氧化碳可以做副产物回收，如液体二氧化碳或者干冰等。

3 指标对比

将实际生产中不同工艺路线厂家的数据换算成年产1万吨氢氧化锂产能的主要技术指标，列于表1。

表1 生产指标对比(1万吨/年产品)

Table 1 Production performance comparison (10^4 t/a of product)

Process scheme	Lithium carbonate lime causticization process	Lithium sulfate sodium hydroxide addition process	Lithium carbonate bipolar membrane electrodialysis
Raw materials	Lithium carbonate; 8941.11 t	Lithium carbonate; 8941.11 t	Lithium carbonate; 8941.11 t
Auxiliary materials	Refined calcium hydroxide; 9489.61 t	High-purity sulfuric acid; 11 622 t, high-purity sodium hydroxide; 9487 t	Sulfuric acid; 120 t (recycling)
By-products	Calcium carbonate; 12 823.8 t	Sodium sulfate; 16 840 t	Carbon dioxide; 5273 t
By-product treatment	Waste or sale	Anhydrous sodium sulfate, sale	Liquid CO_2 or dry ice, sale
Lithium concentration	6.45% (primary evaporation crystallization mother liquor)	6%~9%	4.23% (electrodialysis yields lithium hydroxide solution)
Main equipment for each process	Causticization reactor, centrifuge, lime rotary kiln system	Causticization reactor, MVR evaporation system, deep freeze centrifuge	Resin exchange system, bipolar membrane system, MVR evaporation system, centrifuge
Energy consumption	450 kg of standard coal per ton of product	Electricity: 12 000 (kW·h)/t, Steam: 9 t/t	Electricity: 10 000 (kW·h)/t, Steam: 8 t/t
Water usage	208 000 t	~208 000 t	6438 t
Wastewater generation	20 000 t	22 000 t	14 000 t
Reference enterprises	Yunwei Lithium Co., Ltd.	Jiangmen Fangyuan Lithium Energy Technology Co., Ltd.	Jiangxi Jinhui Lithium Co., Ltd.

根据上述数据,各工艺特点见表 2。

表 2 3 种工艺主要指标特点对比

Table 2 Comparison of key characteristics among the three processes

Project	Lithium carbonate lime causticization process	Lithium sulfate sodium hydroxide causticization process	Lithium sulfate bipolar membrane electrodialysis process
Technology maturity	High	High	High
Product stability	Medium	Medium	High
Production cycle	Medium	Long	Short
Process complexity	High	High	Medium
Automation level	Medium	Medium	High
Investment cost	Medium	Medium	High
Operating cost	Medium	High	Low
Maintenance cost	Medium	High	Medium
Management cost	Medium	Medium	Low

4 结 语

碳酸锂石灰苛化法和硫酸锂双极膜电解法分别在成本和环保方面具有相对优势,需要综合考虑投资、成本、资源利用等因素进行权衡和选择。当综合考虑 3 种方案的技术特点时,可以得出以下比较。

(1) 碳酸锂石灰苛化法:技术成熟度高,工艺可靠,在国内外得到广泛应用。副产品精制碳酸钙可深加工得到其他有用产物,资源综合利用效益较高。初期主体设备投资较小,但占地较大。后期生产成本较高,可能涉及较多的辅助工序和投入。

(2) 硫酸锂氢氧化钠苛化法:适用于含锂矿石提取硫酸锂溶液的工艺,省去了碳酸锂制备工序。初期主体设备投资较低,但可能需要辅助设施来处理产生的硫酸钠。生产成本相对较低,但仍然可能有一些副产物的处理问题。

(3) 硫酸锂双极膜电解法:技术较新且先进,被认为是制备氢氧化锂的最先进方法之一。能耗低、生产成本小、无污染,具有较高的环保性。初期主体设备投资较高,但占地较小,无需钙系产物循环工艺,辅助工程投资小。后期生产成本较低,副产物较少,但要考虑电解设备运维和维护成本。

综上所述,当初期投资额较小,希望快速生产盈利时,推荐碳酸锂石灰苛化法;而有较高的投资预算、对自动化需求较高的企业推荐硫酸锂双极膜电解法。

参考文献 References

- [1] 李翔,戴林杉,彭金星,等. 电池[J], 2022, 52(5): 497-501.
LI X, DAI L S, PENG J X, *et al.* Battery Bimonthly[J], 2022, 52(5): 497-501.
- [2] 刘少利,李辛. 汽车实用技术[J], 2018(13): 224-228.
LIU S L, LI X. Automobile Applied Technology[J], 2018(13): 224-228.
- [3] 保雪凡,邓志敢,魏昶,等. 有色金属科学与工程[J], 2023, 14(4): 467-472.
BAO X F, DENG Z G, WEI C, *et al.* Nonferrous Metals Science and Engineering[J], 2023, 14(4): 467-472.
- [4] DIMITRA V. Coatings[J], 2022, 12(10): 1-14.
- [5] 陈光辉,王中奎,罗宁川. 中国金属通报[J], 2020(5): 9-10.
CHEN G H, WANG Z K, LUO N C. China Metal Bulletin[J], 2020(5): 9-10.
- [6] 江西通安安全评价有限公司. 九江云威锂业有限公司年产 2 万吨电池级单水氢氧化锂和碳酸锂项目环境影响报告书[R/OL]. (2022-11-09) [2023-06-28]. <http://www.jxtaqpj.com/view5-1683.html>.
Jiangxi Tongan Safety Evaluation. Co., Ltd.. Environmental Impact Report of Jiujiang Yunwei Lithium Co., Ltd.'s Annual Production of 20 000 tons of Battery-Grade Lithium Hydroxide Monohydrate and Lithium Carbonate Project [R/OL]. (2022-11-09) [2023-06-28]. <http://www.jxtaqpj.com/view5-1683.html>.
- [7] 宜春市益鑫环保科技有限公司. 江西金辉锂业有限公司新建年产 2 万吨碳酸锂、0.5 万吨氢氧化锂、0.1 万吨铷钾盐及尾渣综合利用项目环境影响评价文件[R/OL]. (2022-06-09) [2023-06-28]. <http://jkq.yichun.gov.cn/yysjkq/gggs/202206/a96ea2cc3e9f46adb78598ccf06c96cd.shtml>.
Yichun Yixin Environmental Protection Technology Co., Ltd.. Environmental Impact Assessment Document for Jiangxi Jinhui Lithium Co., Ltd.'s New Comprehensive Utilization Project with an Annual Output of 20 000 tons of Lithium Carbonate, 5000 tons of Lithium Hydroxide, 1000 tons of Rubidium, Cesium Potassium Salt and Tailings [R/OL]. (2022-06-09) [2023-06-28]. <http://jkq.yichun.gov.cn/yysjkq/gggs/202206/a96ea2cc3e9f46adb78598ccf06c96cd.shtml>.
- [8] 江西星屹环保技术有限公司. 鸿宝精循万载高纯碳酸锂及氢氧化锂生产项目(一期)环境影响评价文件[R/OL]. (2023-07-20) [2023-06-28]. <http://www.wanzai.gov.cn/wzxrmzf/bmxxgkgs-gggr/202307/4d0b3d3d3690410a83665864f715d42e.shtml>.
Jiangxi Xingyi Environmental Protection Technology Co., Ltd.. Hongbao Jingxun Wanzai High Purity Lithium Carbonate and Lithium Hydroxide Production Project (Phase I) Environmental Impact Assessment Document [R/OL]. (2023-07-20) [2023-06-28]. <http://www.wanzai.gov.cn/wzxrmzf/bmxxgkgs-gggr/202307/4d0b3d3d3690410a83665864f715d42e.shtml>.
- [9] 广东智环创新环境科技有限公司. 江门芳源锂能科技有限公司年产 2.5 万吨高品质 NCA、NCM 三元前驱体和 6 千吨电池级单水氢

- 氧化锂建设项目环境影响报告书[R/OL]. (2023-08-23) [2023-08-28]. http://www.jiangmen.gov.cn/bmpd/jmssthjj/zdlyxxgk/jxmhjyxpjxx/jxmhpspslgg/content/post_2922089.html.
- Guangdong Zhihuan Innovation Environmental Technology Co., Ltd. Jiangmen Fangyuan Lithium Energy Technology Co., Ltd. Environmental Impact Report on the Annual Production of 25 000 tons of High-Quality NCA, NCM Ternary Precursors and 6 000 tons of Battery-Grade Monohydrate Lithium Hydroxide Construction Project [R/OL]. (2023-08-23) [2023-08-28]. http://www.jiangmen.gov.cn/bmpd/jmssthjj/zdlyxxgk/jxmhjyxpjxx/jxmhpspslgg/content/post_2922089.html.
- [10] 四川锦美环保股份有限公司. 四川迪信新能源有限公司(四川万邦胜辉新能源科技有限公司全资子公司)2万吨电池级氢氧化锂生产线建设项目环境影响报告书[R/OL]. (2021-06-03) [2023-08-28]. <http://scusne.com/newsinfo/1543956.html>.
- Sichuan Jinmei Environmental Protection Co., Ltd. Sichuan Dixin New Energy Co., Ltd. (A Wholly-Owned Subsidiary of Sichuan Wanhong Shenghui New Energy Technology Co., Ltd.) Environmental Impact Report of the 20 000 tons Battery-Grade Lithium Hydroxide Production Line Construction Project[R/OL]. (2021-06-03) [2023-08-28]. <http://scusne.com/newsinfo/1543956.html>.
- [11] 四川省工业环境监测研究院. 宜宾市伟能锂业科创有限公司一期年产2.5万吨电池级氢氧化锂项目环境影响报告[R/OL]. (2022-06-10) [2023-08-28]. <https://m.jaxrm.com/content/62a2af8244a89>.
- Sichuan Industrial Environmental Monitoring Research Institute. Environmental Impact Report of Yibin Weineng Lithium Science and Technology Innovation Co., Ltd. Phase I Annual Production of 25 000 tons of Battery Grade Lithium Hydroxide Project[R/OL]. (2022-06-10) [2023-08-28]. <https://m.jaxrm.com/content/62a2af8244a89>.
- [12] 江西诺迪亚咨询服务有限公司. 江西云威新材料有限公司年处置20 000吨碳酸钙渣固废综合利用项目环境影响评价[R/OL]. (2021-09-07) [2023-08-28]. <http://www.fengxin.gov.cn/fxxmzf/xmhp/202109/abee645ad18d4440ba5a17f1d7010792.shtml>.
- Jiangxi Nordia Consulting Services Co., Ltd. Environmental Impact Assessment of the Comprehensive Utilization Project of Jiangxi Yunwei New Materials Co., Ltd.'s Annual Disposal of 20 000 tons of Calcium Carbonate Slag Solid Waste[R/OL]. (2021-09-07) [2023-08-28]. <http://www.fengxin.gov.cn/fxxmzf/xmhp/202109/abee645ad18d4440ba5a17f1d7010792.shtml>.
- [13] 霍立明, 张江峰, 董华波. 中国有色金属[J], 2009(17): 74-75.
- HUO L M, ZHANG J F, DONG H B. China Nonferrous Metals[J], 2009(17): 74-75.
- [14] 栗时伟. 新疆有色金属[J], 2011, 34(S2): 94-95.
- SU S W. Xingjiang Youse Jinshu[J], 2011, 34(S2): 94-95.
- [15] 宋士涛, 邓小川, 孙建之, 等. 海湖盐与化工[J], 2005(1): 32-35.
- SONG S T, DENG X C, SUN J Z, *et al.* Journal of Salt Science and Chemical Industry[J], 2005(1): 32-35.
- [16] 黄开成. 中氮肥[J], 2022(4): 74-76+80.
- HUANG K C. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress[J], 2022(4): 74-76+80.
- [17] 孔祥丹. 脱硫酸液氯离子脱除技术研究与应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- KONG X D. Research and Application of Chloride Ion Removal Technology for Desulfurization[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [18] 祝增虎, 李法强, 朱朝梁, 等. 无机盐工业[J], 2014, 46(8): 6-9.
- ZHU Z H, LI F Q, ZHU C L, *et al.* Inorganic Chemicals Industry[J], 2014, 46(8): 6-9.
- [19] 第四届全国膜分离技术在冶金工业中应用研讨会论文集[C]. 都江堰: 中国膜工业协会、中国有色金属学会, 2014: 82-86.
- Proceedings of the 4th National Symposium on the Application of Membrane Separation Technology in Metallurgical Industry[C]. Dujiangyan: China Membrane Industry Association, China Nonferrous Metals Society, 2014: 82-86.

(编辑 张雨明)