退役磷酸铁锂电池选择性浸出提锂及制备磷酸锂试验研究①

董战[1,2,3]，姚鲁帅[1,2,3]，黎倩文[1,2,3]，熊庆[1,2,3]，李恩昊[1,2,3]，林辉阳[1,2,3]，刘子帅[1,2,3]

（1.战略金属与矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室，江西 赣州 341000；2.江西理工大学 资源与环境工程学院，江西 赣州 341000；3.宜春江理锂电新能源产业研究院，江西 宜春 336000）

摘　要：以退役磷酸铁锂电池为研究对象，开展选择性浸出提锂及制备高纯磷酸锂的研究。结果表明，采用硫酸-过氧化氢浸出、中和除杂、磷酸钠沉淀的联合工艺，在硫酸浓度 0.3 mol/L、过氧化氢用量 0.50 mL/g、液固比 8 mL/g、常温浸出条件下，锂浸出率达 98.07%、铁浸出率仅 0.28%，实现了锂和铁的选择性浸出分离；选择性浸出液经氢氧化钠中和除杂后，在沉淀初始 pH＝10.5、磷酸钠与锂物质的量比 1∶1、沉淀温度 90 ℃、沉淀时间 60 min 条件下，锂沉淀率为 96.64%，并制备了锂含量 16.16%的高纯磷酸锂产品，实现了退役磷酸铁锂电池中锂的高效回收。

关键词：磷酸铁锂电池；废旧电池；提锂；选择性浸出；化学沉淀；磷酸锂；净化除杂；硫酸浸出

中图分类号：TF111；X75　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.025

文章编号：0253-6099（2025）06-0140-06

Experimental Study on Extraction of Lithium from Spent Lithium Iron Phosphate Batteries by Selective Leaching and Preparation of Lithium Phosphate

DONG Zhan[1,2,3], YAO Lushuai[1,2,3], LI Qianwen[1,2,3], XIONG Qing[1,2,3], LI Enhao[1,2,3], LIN Huiyang[1,2,3], LIU Zishuai[1,2,3]

(1. *Jiangxi Provincial Key Laboratory of Low-Carbon Processing and Utilization of Strategic Metal Mineral Resources, School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou* 341000, *Jiangxi, China*; 2. *School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou* 341000, *Jiangxi, China*; 3. *Yichun Lithium New Energy Industry Research Institute, Jiangxi University of Science and Technology, Yichun* 336000, *Jiangxi, China*)

Abstract: Spent lithium iron phosphate batteries were taken in a research on lithium extraction by selective leaching process and preparation of high-purity lithium phosphate. It is shown that by adopting a process consisting of leaching with sulfuric acid and hydrogen peroxide, neutralization for impurity removal, and precipitation with sodium phosphate, the lithium leaching rate can reach 98.07% and the iron leaching rate is just 0.28%, after leaching at room temperature with sulfuric acid at a concentration of 0.3 mol/L, hydrogen peroxide at a dosage of 0.50 mL/g, and liquid-solid ratio of 8 mL/g, showing that separation of lithium and iron can be actualized by selective leaching. Then, after the leachate is neutralized with sodium hydroxide for removing impurities, and subjected to precipitation process at a temperature of 90 ℃ for 60 min, with an initial pH of 10.5, sodium phosphate and lithium in a molar ratio of 1∶1, the lithium precipitation rate reaches 96.64%, and a high-purity lithium phosphate product with a lithium content of 16.16% is prepared. It is concluded that by adopting such process, lithium can be efficiently recovered from spent lithium iron phosphate batteries.

Key words: lithium iron phosphate battery; spent battery; lithium extraction; selective leaching; chemical precipitation; lithium phosphate; purification and impurity removal; leaching sulfuric acid

① **收稿日期**：2025-05-30
基金项目：江西省自然科学基金面上项目（20242BAB25242）；战略金属与矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室项目（2023SSY01041）；江西省大学生创新创业训练计划项目（S202410407071，S202410407073）
作者简介：董战（2001—），男，江苏徐州人，硕士研究生，主要研究方向为锂钽铌等稀有金属综合回收。E-mail：2303912011@qq.com
通信作者：刘子帅（1987—），男，江西万年人，博士，副教授，主要从事战略性矿产资源及其二次资源综合利用研究。E-mail：liuzishuai87@126.com

磷酸铁锂电池广泛应用于电动汽车、储能系统等领域。随着我国新能源汽车产业快速发展,磷酸铁锂电池退役量正不断增加[1-2]。截至 2024 年底,中国锂电池储能电站装机规模占新型储能装机规模的 98%,其中绝大部分为磷酸铁锂电池[3]。预计到 2025 年,中国退役动力电池将达到 137.4 GWh,需要回收的退役电池将达到 96 万 t[4]。因此,退役磷酸铁锂电池的高效回收和再利用对节约矿产资源具有重要意义。

退役磷酸铁锂电池回收技术主要包括物理分离、化学还原和水解等方法[5-7],这些方法各有优劣势,生产应用具有一定局限性[8-11]。选择性浸出提锂技术是近年来开发的一种退役磷酸铁锂电池高效回收方法,其应用广泛[12-13]。该技术通过特定的化学反应条件,选择性提取退役磷酸铁锂电池中的锂元素,同时减少其他杂质的溶出[14],具有浸出液杂质离子少、中和试剂成本低等优点[15]。

近年来,选择性浸出提锂技术正逐步成为退役磷酸铁锂电池回收主流工艺[16],但现有研究集中于高效提锂,对于锂浸出液仍采用传统的净化除杂、蒸发浓缩等工艺制备碳酸锂[17],尽管可实现锂的高效回收,但碳酸锂制备工艺流程长,且蒸发浓缩成本高。为此,本文开展一种退役磷酸铁锂电池选择性提锂及制备高纯磷酸锂的研究,通过硫酸-过氧化氢浸出、氢氧化钠中和除杂、磷酸钠沉淀的联合工艺,使锂以磷酸锂形式回收,大幅缩短锂回收工艺流程,实现退役磷酸铁锂电池的高效回收。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验原料为江西宜春某企业提供的退役磷酸铁锂电池,已经过预处理和铝箔分离。对退役磷酸铁锂电池进行研磨处理,使粉末粒径小于 0.074 mm。退役磷酸铁锂电池主要化学成分如表 1 所示。该物料 Fe、P、Li 含量分别为 28.56%、17.31%和 3.14%,具有较高的回收价值。图 1 为退役磷酸铁锂电池 XRD 图谱,由图 1 可知,该退役磷酸铁锂电池主要物相为 $LiFePO_4$,含少量 SiO_2杂质。

表 1　退役磷酸铁锂电池主要化学成分(质量分数)

Table 1　Chemical composition of spent lithium iron phosphate battery　%

Fe	P	Li	Al	SiO_2
28.56	17.31	3.14	1.23	3.68

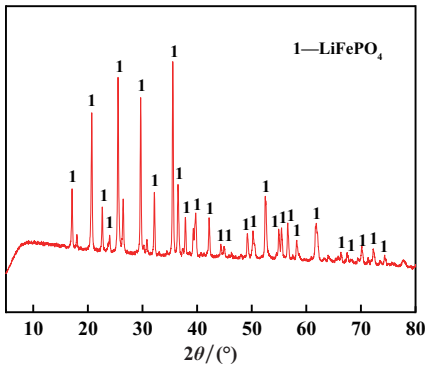


图 1　退役磷酸铁锂电池 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of spent lithium iron phosphate battery

1.2　操作方法

浸出、中和除杂、化学沉淀等反应均使用集热式恒温搅拌器完成。

每次称取 10 g 磷酸铁锂废料,置于 200 mL 烧杯中,放入转子后加入一定量硫酸和过氧化氢混合均匀,加热搅拌浸出。为避免水分蒸发损失,每次试验都使用塑料薄膜对烧杯进行密封,并留一个通气孔。反应结束后立即进行固液分离,得到浸出液和浸出渣。对浸出液和浸出渣分别进行分析检测,计算浸出率,分析反应机理。

将浸出液置于加入转子的烧杯中,缓慢滴加氢氧化钠溶液(400 g/L),调节溶液 pH = 9,中和反应结束后,过滤并用少量蒸馏水洗涤中和渣,得到中和后液和中和渣;将中和后液置于加入转子的烧杯中,加入氢氧化钠溶液除杂,过滤白色沉淀得到净化后液;向净化后液加入磷酸钠粉末,在给定温度和时间下搅拌,反应结束冷却至室温再进行固液分离,得到沉淀后液和磷酸锂粗产品。对磷酸锂粗产品进行洗涤、烘干,得到磷酸锂产品。对沉淀后液和磷酸锂产品分别进行分析检测,计算沉淀率,分析产品质量。

2　试验结果与讨论

2.1　退役磷酸铁锂电池选择性浸出及机理研究

2.1.1　硫酸浓度对锂和铁浸出率的影响

体积分数 30%的过氧化氢用量(相较于磷酸铁锂)0.50 mL/g、浸出温度 60 ℃、浸出时间 120 min 和液固比 10 mL/g 条件下,考察了硫酸浓度对锂和铁浸出率的影响,结果见图 2。由图 2 可知,硫酸浓度对锂浸出率影响较大,对铁浸出率影响较小。体系中硫酸浓度 0.1 mol/L 时,锂和铁浸出率分别为 61.58%和 0.29%;硫酸浓度增至 0.3 mol/L,锂浸出率提高至 98.07%,铁浸出率几乎不变;硫酸浓度继续增至 0.5 mol/L,锂浸出率

基本不变,铁浸出率反而有所提高。确定适宜的硫酸浓度为 0.3 mol/L。

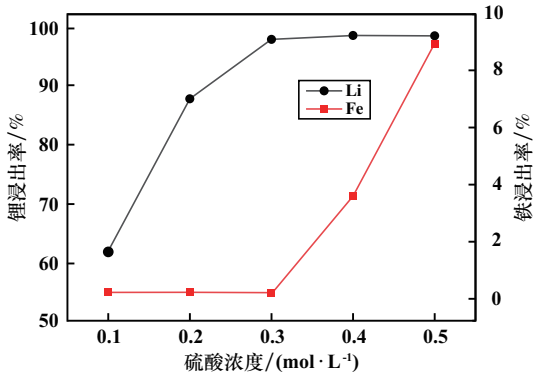


图 2 硫酸浓度对锂和铁浸出率的影响

Fig. 2 Effect of sulfuric acid concentration on leaching rates of Li and Fe

2.1.2 过氧化氢用量对锂和铁浸出率的影响

硫酸浓度 0.3 mol/L,其他条件不变,考察了氧化剂过氧化氢用量对锂和铁浸出率的影响,结果见图 3。由图 3 可知,不加过氧化氢时,锂浸出率为 62.95%,铁浸出率为 37.18%。加入过氧化氢后,锂浸出率显著提高,铁浸出率显著降低。过氧化氢的加入对提升锂选择性浸出效果非常显著。过氧化氢用量超过 0.50 mL/g 后,体系锂、铁的浸出已达平衡,浸出率基本保持不变。确定适宜的过氧化氢用量为 0.50 mL/g。

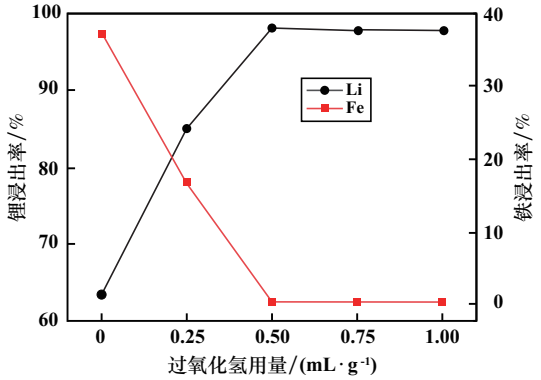


图 3 过氧化氢用量对锂和铁浸出率的影响

Fig. 3 Effect of hydrogen peroxide dosage on leaching rates of Li and Fe

对不同过氧化氢用量条件下所得浸出渣进行 XRD 分析,结果见图 4。结果表明,不加过氧化氢时,浸出渣主要成分为 $FePO_4$ 和未溶解的 $LiFePO_4$,磷酸铁锂溶解不充分,此时锂浸出率低,铁溶出率高。随着过氧化氢的加入,$LiFePO_4$ 相逐渐变弱,锂浸出率逐步提高,铁浸出率逐步降低,表明 $LiFePO_4$ 逐步溶解;过氧化氢用量 0.50 mL/g 时,$LiFePO_4$ 相完全消失,只有 $FePO_4$ 相,此时锂浸出率达到 98.07%,铁浸出率仅 0.28%。

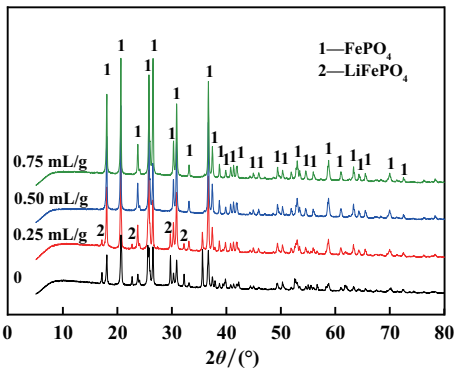


图 4 不同过氧化氢用量条件下所得浸出渣 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of leaching residues generated by different hydrogen peroxide dosages

磷酸铁锂与硫酸发生如下反应[18]:

$$2LiFePO_4 + 3H_2SO_4 = Li_2SO_4 + 2FeSO_4 + 2H_3PO_4 \quad (1)$$

在该反应中,$LiFePO_4$ 与 H_2SO_4 物质的量比为 2∶3。不加过氧化氢时,硫酸用量不足以溶解 $LiFePO_4$,同时产生的 Fe^{2+} 与 PO_4^{3-} 不会形成沉淀物。随着过氧化氢的加入,反应平衡被改变,溶液中的 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+},从而生成 $FePO_4$ 沉淀[式(2)]。此时 $LiFePO_4$ 与 H_2SO_4 物质的量比为 2∶1,此时添加的硫酸足够溶解 $LiFePO_4$。因此,不加或少量添加过氧化氢时,锂浸出率较低,铁浸出率较高;而过氧化氢足量时,锂浸出率达到 98%以上,而铁浸出率仅 0.28%,实现了锂和铁的选择性浸出分离。

$$2LiFePO_4 + H_2SO_4 + H_2O_2 = Li_2SO_4 + 2FePO_4\downarrow + 2H_2O \quad (2)$$

2.1.3 浸出温度对锂和铁浸出率的影响

过氧化氢用量 0.50 mL/g,其他条件不变,考察了浸出温度对锂和铁浸出率的影响,结果如图 5 所示。

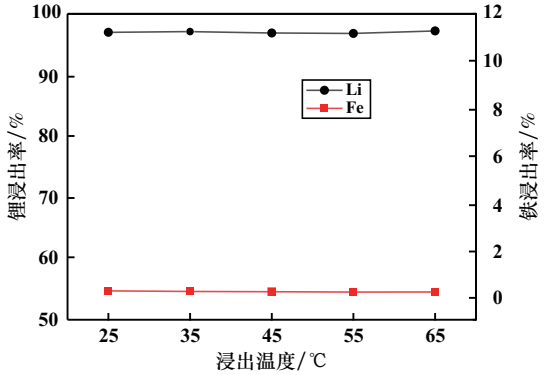


图 5 浸出温度对锂和铁浸出率的影响

Fig. 5 Effect of leaching temperature on leaching rates of Li and Fe

由图 5 可知,浸出温度对锂和铁浸出率影响不大。考虑到升高温度会增加浸出成本,而对锂浸出率无明显影响,浸出试验只需在常温下进行。

2.1.4　液固比对锂和铁浸出率的影响

常温下浸出,其他条件不变,考察了液固比对锂和铁浸出率的影响,结果见图 6。由图 6 可见,随着液固比增大,锂浸出率逐渐增大,铁浸出率逐渐降低。液固比超过 8 mL/g 后,锂和铁浸出率均无明显变化。确定适宜的液固比为 8 mL/g,此时锂和铁浸出率分别为 98.07%和 0.28%。

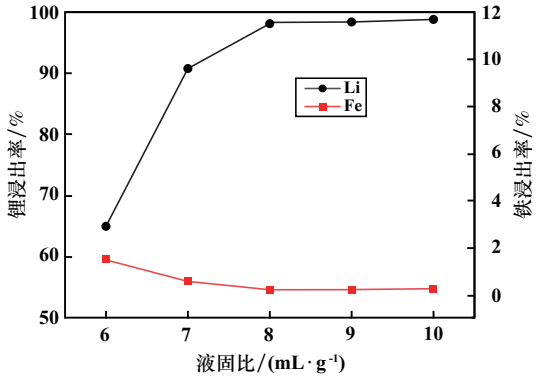


图 6　液固比对锂和铁浸出率的影响

Fig. 6　Effect of liquid-solid ratio on leaching rates of Li and Fe

2.2　浸出液净化除杂试验

根据单因素实验确定退役磷酸铁锂电池选择性浸出的优化条件为:硫酸浓度 0.3 mol/L、过氧化氢用量 0.50 mL/g、液固比 8 mL/g、常温。在该条件下进行浸出试验,并测定浸出液主要化学成分,结果见表 2。结果表明,浸出液 pH 值为 1.5,杂质离子铝含量较高,其他杂质含量均较低。为了减少杂质对后续锂产品沉淀的影响,对浸出液进行中和除杂,向浸出液中缓慢滴加氢氧化钠溶液 400 g/L,控制终点 pH 值为 9.0,中和反应结束后,再固液分离,得到净化后液,其主要化学成分分析结果亦列于表 2 中。结果表明,净化后液杂质离子浓度均较低,达到锂产品沉淀要求。

表 2　浸出液和净化后液主要化学成分

Table 2　Chemical compositions of leaching solution and purified solution　　g/L

溶液种类	Li	Al	Fe	Ca	Mg	Si
浸出液	4.12	1.45	0.065	0.005	0.005	0.07
净化后液	4.06	0.005	0.001	0.001	0.001	0.005

2.3　磷酸锂沉淀试验

根据文献资料,20 ℃时,磷酸锂溶度积常数为 2.37×10^{-4}、100 g 水中的溶解度为 3.821×10^{-2} g,碳酸锂溶度积常数为 1.7×10^{-3}、100 g 水中的溶解度为 1.33 g。根据碳酸锂沉淀生产实践经验,碳酸锂沉淀时溶液锂质量浓度需达 15 g/L 以上,需要大量蒸发浓缩才能实现锂的高效沉淀。磷酸锂的溶解度和溶度积均较低,在较低浓度下即可实现锂的高效沉淀。因此,本文以净化后液为研究对象进一步开展磷酸锂沉淀试验。

2.3.1　溶液初始 pH 值对锂沉淀率的影响

固定磷酸钠与锂物质的量比为 1∶1,在沉淀温度 90 ℃、沉淀时间 90 min 条件下,研究了溶液初始 pH 值对锂沉淀率的影响,结果见图 7。由图 7 可知,随着溶液 pH 值增大,锂沉淀率逐渐增大;溶液 pH 值超过 10.5后,锂沉淀率增幅变缓。确定适宜的锂沉淀溶液 pH 值为 10.5。

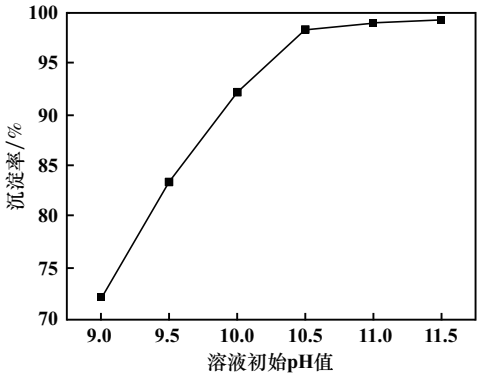


图 7　溶液初始 pH 值对锂沉淀率的影响

Fig. 7　Effect of initial solution pH on precipitation rate of Li

2.3.2　磷酸钠用量对锂沉淀率的影响

溶液初始 pH 值为 10.5,其他条件不变,研究了磷酸钠用量对锂沉淀率的影响,结果见图 8。由图 8 可知,随着磷酸钠用量增大,锂沉淀率逐渐增大。磷酸钠与溶液中锂离子物质的量比为 1∶3时,磷酸钠用量不足,锂沉淀率仅 84.06%;磷酸钠与锂离子物质的量比提高至1∶1时,锂沉淀率为 98.35%;进一步增大磷酸

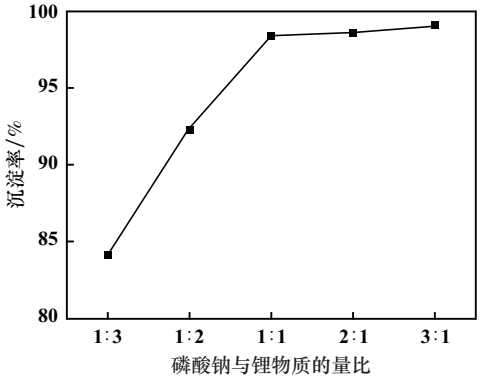


图 8　磷酸钠用量对锂沉淀率的影响

Fig. 8　Effect of sodium phosphate dosage on precipitation rate of Li

钠用量,锂沉淀率增幅不明显。确定适宜的磷酸钠与锂物质的量比为 1∶1。

2.3.3 沉淀温度对锂沉淀率的影响

磷酸锂溶解度与温度成正比,因此沉淀温度对沉淀率有重要影响。磷酸钠与锂物质的量比 1∶1,其他条件不变,研究了沉淀温度对锂沉淀率的影响,结果见图 9。由图 9 可知,随着沉淀温度升高,锂沉淀率不断提升。沉淀温度 60 ℃时,锂沉淀率为 82.13%;沉淀温度上升至 90 ℃时,锂沉淀率为 98.07%;进一步升高沉淀温度,锂沉淀率增幅较小。确定适宜的沉淀温度为 90 ℃。

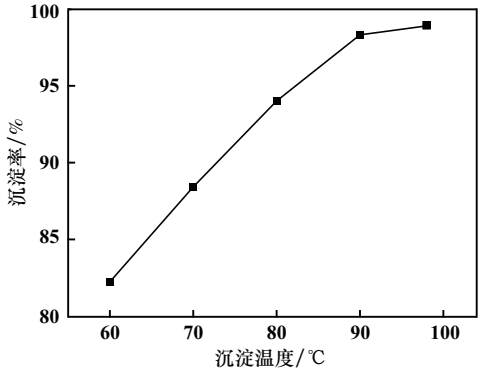


图 9 沉淀温度对锂沉淀率的影响

Fig. 9 Effect of temperature on precipitation rate of Li

2.3.4 沉淀时间对锂沉淀率的影响

沉淀温度 90 ℃,其他条件不变,研究了沉淀时间对锂沉淀率的影响,结果见图 10。由图 10 可知,随着沉淀时间延长,锂沉淀率逐渐增大。沉淀时间30 min 时,锂沉淀率仅 86.20%;沉淀时间 60 min 时,锂沉淀率达 96.64%;进一步延长沉淀时间,锂沉淀率提高不明显。确定适宜的沉淀时间为 60 min。

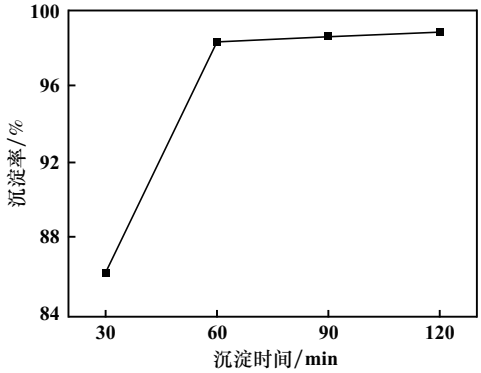


图 10 沉淀时间对锂沉淀率的影响

Fig. 10 Effect of time on precipitation rate of Li

2.3.5 磷酸锂产品表征

根据单因素实验确定磷酸锂沉淀的适宜条件为:沉淀初始 pH 值 10.5、磷酸钠与锂物质的量比 1∶1、沉淀温度 90 ℃、沉淀时间 60 min。对该条件下获得的磷酸锂产品进行洗涤、烘干,再进行 XRD 表征,结果见图 11。结果表明,该产品与磷酸锂 PDF 卡片(01-087-0039)完全吻合。

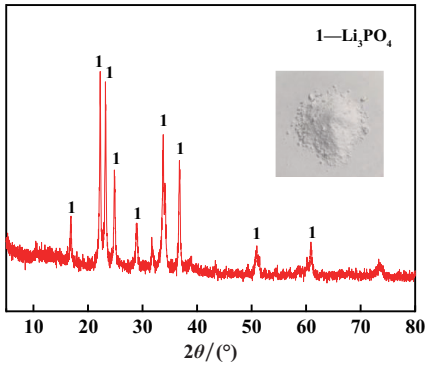


图 11 磷酸锂产品 XRD 图谱和产品照片

Fig. 11 XRD pattern and photograph of lithium phosphate product

磷酸锂产品主要化学成分分析结果见表 3。结果表明,该磷酸锂产品杂质较少,纯度较高,达到了 YS/T 637—2022《磷酸锂》中 Li_3PO_4-4 产品质量标准。

表 3 磷酸锂产品主要化学成分分析(质量分数)

Table 3 Chemical composition of lithium phosphate product %

项目	Li	Al	Fe	Na	Ca	Mg	Si	SO_4^{2-}
磷酸锂产品	16.16	0.005	<0.001	0.22	0.002	<0.001	0.005	0.58
行业标准 Li_3PO_4-4	≥15.42	≤0.01	≤0.01	≤1.0	≤0.035	≤0.01	≤0.01	≤1.5

3 结论

1) 退役磷酸铁锂电池锂含量达 3.14%,具有较高的回收价值。采用选择性浸出、氢氧化钠溶液中和除杂、磷酸钠沉淀等工艺对其中的锂进行回收,最终锂以磷酸锂产品形式得到高效回收。

2) 硫酸+过氧化氢浸出体系可较好地实现锂和铁的选择性浸出与分离。在硫酸浓度 0.3 mol/L、过氧化氢用量 0.50 mL/g、液固比 8 mL/g 和常温条件下浸出,锂浸出率达 98.07%、铁浸出率仅 0.28%。在浸出过程中,溶出的 Fe^{2+}被过氧化氢氧化为 Fe^{3+}而与 PO_4^{3-}结合生成 $FePO_4$沉淀,锂仍以 Li^+形式保留在溶液中,从而实现锂和铁的选择性浸出分离。

3) 浸出液采用氢氧化钠中和除杂后,在沉淀初始 pH 值 10.5、磷酸钠与锂物质的量比 1∶1、沉淀温度 90 ℃、沉淀时间 60 min 条件下,锂沉淀率达 96.64%,

并制备了锂含量为 16.16%的高纯磷酸锂产品。

参考文献(References):

[1] 张恒,李海浩,王梦娇,等. 退役动力电池材料再生利用综述[J]. 电池, 2022,52(1):105-109.
ZHANG Heng, LI Haihao, WANG Mengjiao, et al. Review on the regeneration and utilization of retired power battery[J]. Battery Bimonthly, 2022,52(1):105-109.

[2] 赵雨婷,周自圆,刘志启,等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液除杂及同步回收 $FePO_4$ 研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):96-99.
ZHAO Yuting, ZHOU Ziyuan, LIU Zhiqi, et al. Simultaneous removal of impurities and recovery of $FePO_4$ from acid leaching solution of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):96-99.

[3] 颜群轩,罗碧云,陈嘉鑫,等. 废旧磷酸铁锂电池可持续回收技术研究进展[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):174-177.
YAN Qunxuan, LUO Biyun, CHEN Jiaxin, et al. Progress in sustainable recycling of spent $LiFePO_4$ batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):174-177.

[4] 刘孟杰,范广新,尹金佩,等. 从废旧磷酸铁锂中选择性提锂制备碳酸锂的工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):106-109.
LIU Mengjie, FAN Guangxin, YIN Jinpei, et al. Selective recovery of lithium from waste lithium iron phosphate for preparation of lithium carbonate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):106-109.

[5] GONG R, LI C C, MENG Q, et al. A sustainable closed-loop method of selective oxidation leaching and regeneration for lithium iron phosphate cathode materials from spent batteries[J]. Journal of Environmental Management, 2022,319:115740.

[6] LI H Y, YE H, SUN M C, et al. Process for recycle of spent lithium iron phosphate battery via a selective leaching-precipitation method[J]. Journal of Central South University, 2020,27(11):3239-3248.

[7] JI G J, OU X, ZHAO R R, et al. Efficient utilization of scrapped $LiFePO_4$ battery for novel synthesis of $Fe_2P_2O_7/C$ as candidate anode materials[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021,174:105802.

[8] 林辉阳,刘子帅,黎文庆,等. 钕铁硼油泥稀土和铁同步浸出与分步提取研究[J]. 有色金属科学与工程, 2024,15(1):130-138.
LIN Huiyang, LIU Zishuai, LI Wenqing, et al. Research on simultaneous leaching and stepwise extraction of rare earth and iron from Nd-FeB sludge[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024,15(1):130-138.

[9] 胡国琛,胡年香,伍继君,等. 锂离子电池正极材料中有价金属回收研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(11):3320-3343.
HU Guochen, HU Nianxiang, WU Jijun, et al. Research progress in recovery of valuable metals in cathode materials for lithium-ion batteries[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(11):3320-3343.

[10] SHANGGUAN E B, FU S Q, WU S Q, et al. Evolution of spent $LiFePO_4$ powders into $LiFePO_4/C/FeS$ composites: A facile and smart approach to make sustainable anodes for alkaline Ni-Fe secondary batteries[J]. Journal of Power Sources, 2018,403:38-48.

[11] ZHAO Y, PENG L L, LIU B R, et al. Single-crystalline $LiFePO_4$ nanosheets for high-rate Li-ion batteries[J]. Nano Letters, 2014,14(5):2849-2853.

[12] XU Z R, GAO L B, LIU Y J, et al. Review: Recent developments in the doped $LiFePO_4$ cathode materials for power lithium ion batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2016,163(13):A2600-A2610.

[13] 马博,邹建中,户建平,等. 锂离子电池钴、镍、锰的湿法冶金回收进展[J]. 电池, 2025,55(5):998-1003.
MA Bo, ZOU Jianzhong, HU Jianping, et al. Progress in hydrometallurgical recycling for cobalt, nickel and manganese in Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2025,55(5):998-1003.

[14] 刘庆生,喻修远,肖浩,等. 磷酸铁锂电池废料提锂尾渣的回收及磷酸铁的制备[J]. 稀有金属与硬质合金, 2022,50(4):17-23.
LIU Qingsheng, YU Xiuyuan, XIAO Hao, et al. Recovery of lithium-extracted tailings from lithium iron phosphate battery waste and preparation of iron phosphate[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2022,50(4):17-23.

[15] LI H, XING S Z, LIU Y, et al. Recovery of lithium, iron, and phosphorus from spent $LiFePO_4$ batteries using stoichiometric sulfuric acid leaching system[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017,5(9):8017-8024.

[16] 李银兵,赵晨渤,李东山,等. 磷酸铁锂锂离子电池回收技术的进展[J]. 电池, 2025,55(5):1004-1011.
LI Yinbing, ZHAO Chenbo, LI Dongshan, et al. Progress in recycling technology of lithium iron phosphate Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2025,55(5):1004-1011.

[17] 张欣瑞,李艳红,金列群,等. 磷酸铁锂锂离子电池各阶段回收对比[J]. 电池, 2025,55(5):1012-1019.
ZHANG Xinrui, LI Yanhong, JIN Liequn, et al. Comparison of recycling in each stage of lithium iron phosphate Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2025,55(5):1012-1019.

[18] 周吉奎,刘牡丹,刘勇,等. 硫酸-双氧水浸出废弃磷酸铁锂中锂的实验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):79-81.
ZHOU Jikui, LIU Mudan, LIU Yong, et al. Experimental study on leaching of lithium from waste lithium iron phosphate with sulfuric acid and hydrogen peroxide[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(6):79-81.

引用本文:董战,姚鲁帅,黎倩文,等. 退役磷酸铁锂电池选择性浸出提锂及制备磷酸锂试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):140-145.
DONG Zhan, YAO Lushuai, LI Qianwen, et al. Experimental study on extraction of lithium from spent lithium iron phosphate batteries by selective leaching and preparation of lithium phosphate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):140-145.