

# 废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液除杂及 同步回收 $\text{FePO}_4$ 研究<sup>①</sup>

赵雨婷<sup>1</sup>, 周自圆<sup>1</sup>, 刘志启<sup>1,2</sup>, 李娜<sup>2</sup>, 盛莉莉<sup>3</sup>

(1.安徽大学 化学化工学院, 安徽 合肥 230601; 2.安徽大学 绿色产业创新研究院, 安徽 合肥 230088; 3.青海省化工设计研究院有限公司, 青海 西宁 810008)

**摘要:**以废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液为原料,采用氧化-沉淀法回收铁、磷、锂元素。考察了沉淀过程中反应体系终点 pH 值、温度、氢氧化钠浓度、氢氧化钠滴加速度和过氧化氢与酸浸液的体积比对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响。结果表明:反应体系终点 pH 值 2.5、温度 75 °C、氢氧化钠浓度 1.5 mol/L、氢氧化钠滴加速度 7.7 mL/min、过氧化氢与酸浸液的体积比为 1:60 条件下,铁平均沉淀率 99.86%,磷平均沉淀率 98.23%,锂平均损失率仅 1.23%;在该条件下,铁和磷可以有效地从溶液中被去除,锂损失率较低;同时,铁、磷以磷酸铁形式回收利用,经 700 °C 热处理 5 h,所得磷酸铁元素组成符合行业标准。

**关键词:**磷酸铁锂; 酸浸液; 锂; 同步回收; 磷酸铁; 废旧电池; 正极材料

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.05.019

文章编号: 0253-6099(2024)05-0096-04

## Simultaneous Removal of Impurities and Recovery of $\text{FePO}_4$ from Acid Leaching Solution of Cathode Materials from Spent Lithium Iron Phosphate Batteries

ZHAO Yuting<sup>1</sup>, ZHOU Ziyuan<sup>1</sup>, LIU Zhiqi<sup>1,2</sup>, LI Na<sup>2</sup>, SHENG Lili<sup>3</sup>

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China; 2.Green Industry Innovation Research Institute, Anhui University, Hefei 230088, Anhui, China; 3.Qinghai Provincial Chemical Design and Research Institute Co., Ltd., Xining 810008, Qinghai, China)

**Abstract:** The acid leaching solution of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries was taken as raw material, and iron, phosphorus and lithium elements therein were recovered by adopting an oxidation-precipitation process. The effects of factors, including endpoint pH value of reaction system, reaction temperature, concentration of sodium hydroxide, dripping rate of sodium hydroxide, and the volume ratio of hydrogen peroxide to acid leaching solution, on the precipitation rates of iron and phosphorus and the loss of lithium during the precipitation process were all investigated. Results show that with the endpoint pH value of 2.5, temperature of 75 °C, sodium hydroxide with concentration of 1.5 mol/L, sodium hydroxide solution at a dripping rate of 7.7 mL/min, and hydrogen peroxide and acid leaching solution in a volume ratio of 1:60, the average precipitation rates of iron and phosphorus are 99.86% and 98.23%, respectively, and the average loss of lithium is just 1.23%. Under the above-mentioned conditions, iron and phosphorus in the solution can be effectively removed and recycled in the form of iron phosphate, presenting a lower loss rate of lithium. After 5 h-heat treatment at 700 °C, it is shown that the chemical composition of iron phosphate can meet the industrial standard.

**Key words:** lithium iron phosphate; acid leaching solution; lithium; simultaneous recovery; iron phosphate; spent battery; cathode material

① 收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(U20A200430); 青海省科技计划项目(2023-ZJ-752); 安徽大学科研启动经费(S020318008/001, S020318008/021); 非政府横向项目(企业委托技术开发)(2022340104006809, 2022340101002636)

作者简介: 赵雨婷(1999—), 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事废旧锂电池回收研究。E-mail: zyt6552@163.com

通信作者: 周自圆(1991—), 女, 江西兴国人, 博士, 助理研究员, 主要从事锂资源开发利用研究。E-mail: 20402@ahu.edu.cn

刘志启(1983—), 男, 安徽太和人, 博士, 教授, 主要从事资源综合利用研究。E-mail: lkeyi@126.com

随着“双碳”目标的提出,世界各国加快了新能源产业发展的步伐。近年来,由于我国政策的大力支持,新能源汽车产业技术不断发展进步,我国已成为全球新能源汽车产业的产销大国<sup>[1-2]</sup>。2015年我国首批新能源汽车上市,锂离子电池的典型使用寿命为5~8年,现已迎来退役潮。据统计,2021年国内累计退役锂离子电池约32万吨,2025年将迎来首批大规模退役高峰,预计约78万吨<sup>[3-4]</sup>。废旧磷酸铁锂电池正极材料中含有大量锂、铁、磷等资源,如果能合理回收、利用废磷酸铁锂电池正极材料,将能大大减少电池报废带来的污染和资源浪费,同时缓解我国近年来正面临的锂资源短缺状况。因此,进行针对废旧磷酸铁锂电池正极材料资源化回收的研究具有现实意义<sup>[5-8]</sup>。

采用湿法浸出技术处理废旧磷酸铁锂电池正极材料,能够便捷地从中提取有价值金属元素<sup>[9-10]</sup>。其中硫酸是一种常用的酸性浸出剂<sup>[11-14]</sup>,在适宜的实验参数下,锂浸出率高达98%<sup>[15]</sup>,但硫酸浸出过程不具有选择性,在锂高浸出率的同时,酸浸液中会含有很多铁、磷等元素<sup>[16]</sup>。目前,针对酸浸液除杂和元素同步回收的研究相对有限,需要开发一种获得纯净的富锂溶液的同时将其他元素转变为有价值产品的工艺。

本文采用氧化-沉淀方法处理废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液,以磷酸铁形式回收其中的铁和磷,以富锂滤液形式回收锂,并优化了实验条件,优化条件下所得磷酸铁组成符合HG/T 4701—2021<sup>[17]</sup>要求,产物可作为电池级磷酸铁前驱体。

## 1 实验

### 1.1 实验原料及仪器

实验所用原料为安徽某公司提供的废弃磷酸铁锂电池正极材料经硫酸浸出所得酸浸液,其具体成分见表1。

表1 废弃磷酸铁锂电池正极材料酸浸液组成 g/L

Li	Fe	P	Na	Mg	Ca	K	Cu	Al
4.11	24.96	14.11	4.24	0.03	0.11	0.53	0.01	0.12

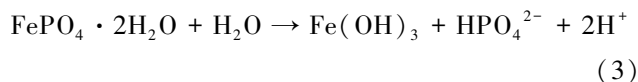
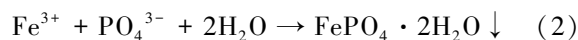
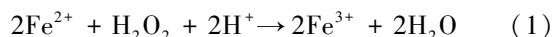
主要试剂包括氢氧化钠、30%双氧水,均为分析纯;实验用水为超纯水。

实验仪器包括集热式恒温加热磁力搅拌器、蠕动泵、pH计、马弗炉等。

### 1.2 实验原理及方法

酸浸液中铁主要以 Fe<sup>2+</sup> 形式存在,需使用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 将其氧化为 Fe<sup>3+</sup>(反应(1))。调整溶液 pH 值后 Fe<sup>3+</sup>

可以与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 结合生成 FePO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 沉淀(反应(2))。当工艺条件不合适时,淡黄色的 FePO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 易转化为红褐色的 Fe(OH)<sub>3</sub>(反应(3))。



取50 mL酸浸液于250 mL烧杯中,在集热式恒温加热磁力搅拌器中进行加热搅拌。使用蠕动泵向烧杯中滴加过氧化氢,滴加结束后向其中滴加氢氧化钠溶液用于调节溶液 pH 值。调整 pH 值后陈化30 min,过滤得到磷酸铁与富锂滤液,检测富锂滤液中各元素质量浓度。

通过改变过程中各工艺条件探究其对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响。对磷酸铁使用超纯水多次洗涤,将洗涤后的磷酸铁置于烘箱中85℃下烘干12 h,然后在马弗炉中700℃下热处理5 h,对其进行分析测试。

### 1.3 表征方法

采用原子吸收分光光度计检测富锂滤液中锂和铁质量浓度,采用等离子体发射光谱仪检测磷和其他元素质量浓度。采用梅特勒便携式 pH 计测试实验过程的 pH 值。采用 X 射线衍射仪检测固体物相组成。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 沉淀条件对铁、磷沉淀率及锂损失率的影响

#### 2.1.1 反应体系终点 pH 值

使用1 mol/L 氢氧化钠调节溶液 pH 值,在反应温度60℃、氢氧化钠滴加速度3.3 mL/min、过氧化氢与酸浸液体积比为1:10条件下,探究了反应体系终点 pH 值对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响,结果如图1所示。由图1可知,随着反应体系终点 pH 值升高,铁和磷沉淀率先升高后趋于平稳,锂损失率先升高后降低。随着体系 pH 值升高,Fe<sup>3+</sup> 与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 结合形成 FePO<sub>4</sub>,铁和磷沉淀率逐渐上升,在 pH=2.5 时反应基本完成。结合 LiFePO<sub>4</sub>-FePO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O 体系的 E-pH 图<sup>[18]</sup>,反应体系 pH 值低于6时,Fe<sup>3+</sup> 优先与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 结合形成 FePO<sub>4</sub> 沉淀,此时锂以 Li<sup>+</sup> 形式存在于溶液中,无法与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 结合形成沉淀,由此可以实现锂与铁、磷的分离;继续增大 pH 值,FePO<sub>4</sub> 转化为 Fe(OH)<sub>3</sub>、Li<sup>+</sup> 转化为 Li<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>。为了保证磷酸铁的纯度、避免过多引入氢氧化钠,综合考虑铁、磷沉淀率和锂损失率,适宜的反应体系终点 pH 值为2.5。

#### 2.1.2 反应温度

反应体系终点 pH 值2.5,其他条件不变,探究了

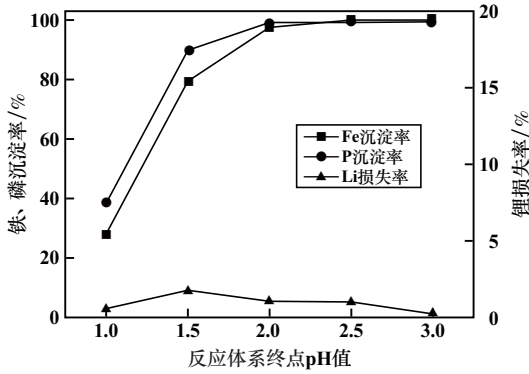


图1 反应终点 pH 值对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响

反应温度对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响,结果如图2所示。由图2可知,随着反应温度升高,铁沉淀率先小幅增加后达到平衡,60℃时铁沉淀率99.77%,磷沉淀率逐渐减小后达到平衡,75℃时磷沉淀率98.27%。锂损失率先减小后几乎不变,75℃时达到锂损失率最低,约1.5%。磷酸铁沉淀对杂质离子的吸附是放热过程,温度升高可以减少对杂质的吸附<sup>[19]</sup>,升高反应温度在一定程度上可以减少锂的损失。综合考虑,反应温度选择75℃。

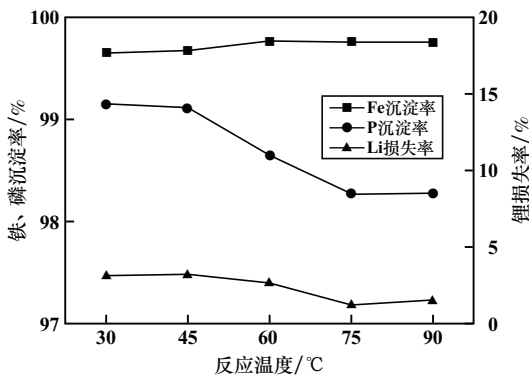


图2 反应温度对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响

### 2.1.3 氢氧化钠浓度

反应温度75℃,其他条件不变,探究了氢氧化钠浓度对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响,结果如图3所示。由图3可知,随着氢氧化钠浓度升高,铁沉淀率逐渐增大,磷沉淀率整体降低,锂损失率逐渐增大。高浓度的氢氧化钠会使局部pH值迅速增大,导致局部迅速生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,磷沉淀率降低,锂也迅速被夹带在沉淀中造成损耗。为了防止低浓度氢氧化钠导致溶液被稀释后锂浓度过低而影响后续沉锂操作,选择氢氧化钠浓度1.5 mol/L。

### 2.1.4 氢氧化钠滴加速度

氢氧化钠浓度1.5 mol/L,其他条件不变,探究了氢氧化钠滴加速度对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响,

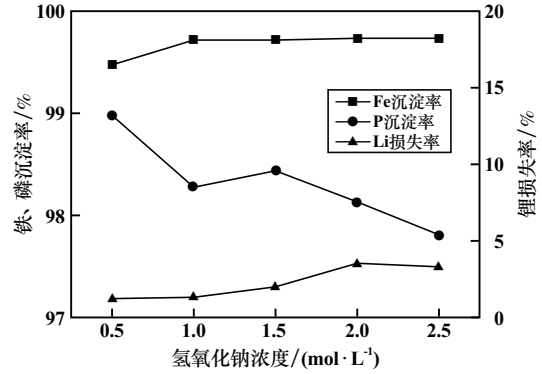


图3 氢氧化钠浓度对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响

结果如图4所示。由图4可知,随着氢氧化钠滴加速度加快,铁和磷沉淀率变化幅度较小,锂损失率变化规律不强。综合考虑反应时间及铁、磷沉淀率和锂损失率,选择氢氧化钠滴加速度7.7 mL/min。

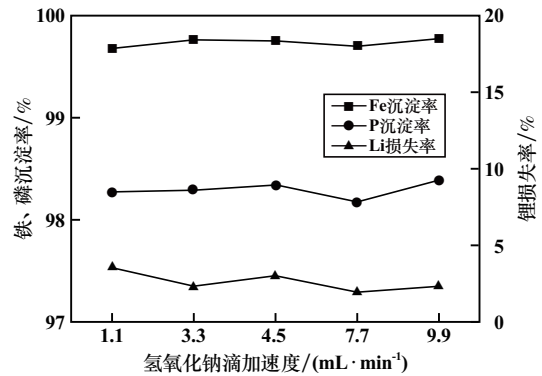


图4 氢氧化钠滴加速度对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响

### 2.1.5 过氧化氢用量

氢氧化钠滴加速度7.7 mL/min,其他条件不变,探究了过氧化氢与酸浸液体积比对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响,结果如图5所示。随着过氧化氢用量减少,铁、磷沉淀率和锂损失率均逐渐减少,过氧化氢与酸浸液体积比1:60后铁沉淀率和锂损失率大幅度下降。过氧化氢为氧化剂,可将酸浸液中 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化为

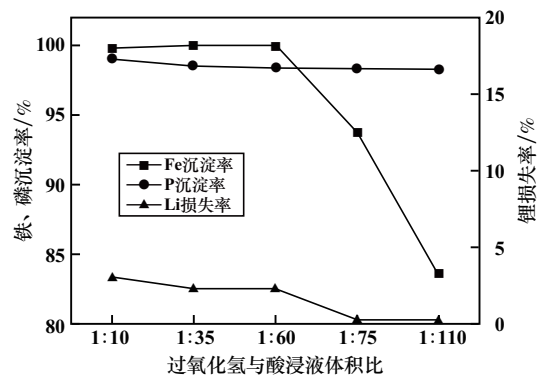


图5 过氧化氢与酸浸液体积比对铁、磷沉淀率和锂损失率的影响

Fe<sup>3+</sup>,过氧化氢与酸浸液体积比小于 1:60 时,无法充分氧化溶液中的 Fe<sup>2+</sup>,铁沉淀率下降。综合考虑,选择过氧化氢与酸浸液体积比为 1:60。

## 2.2 优化条件实验

根据单因素实验,确定优化条件为:反应体系终点 pH 值 2.5、温度 75 ℃、氢氧化钠浓度 1.5 mol/L、氢氧化钠滴加速度 7.7 mL/min、过氧化氢与酸浸液体积比 1:60。在此条件下进行了 3 组重复实验,结果见表 2。优化条件下,铁平均沉淀率为 99.86%,磷平均沉淀率为 98.23%,锂平均损失率为 1.23%。

表 2 优化条件下铁、磷沉淀率和锂损失率

实验编号	Fe 沉淀率/%	P 沉淀率/%	Li 损失率/%
1	99.90	98.26	1.34
2	99.80	98.24	1.27
3	99.87	98.20	1.08
平均	99.86	98.23	1.23

富锂滤液中 Li、Fe、P 质量浓度分别为 2.63 g/L、0.025 g/L、0.072 g/L。可见铁与磷去除效果很好,铁、磷质量浓度均在 0.1 g/L 以下,锂质量浓度超过 1 g/L,达到了沉淀磷酸锂的要求,便于后续处理。

## 2.3 磷酸铁表征

图 6 为热处理前后磷酸铁的 XRD 图谱。从图 6

可以看出,热处理前磷酸铁没有明显的衍射峰,在 20°~30°间出现一个馒头峰,由此判断该滤渣为无定形非晶态<sup>[20]</sup>。700 ℃热处理 5 h 后,其与标准磷酸铁衍射峰的 PDF 卡片(FePO<sub>4</sub>,PDF#77-0094)基本一致,且与(100)、(012)、(104)等晶面一一对应,衍射峰强度高,峰形尖锐,说明热处理后样品为结晶状态良好的 FePO<sub>4</sub>。

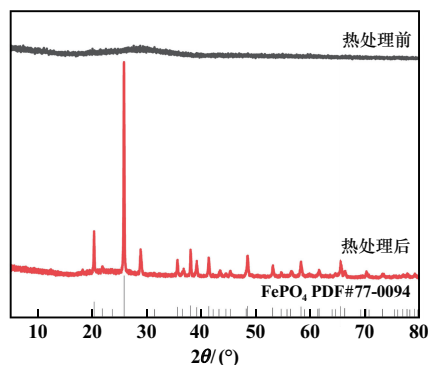


图 6 热处理前后磷酸铁的 XRD 图谱

热处理后 FePO<sub>4</sub> 化学成分分析结果见表 3。表 3 中同时也列出了 HG/T 4701—2021 行业标准。由表 3 可知,热处理后 FePO<sub>4</sub> 中各组分质量分数均符合行业标准,可作为电池级磷酸铁前驱体。

表 3 热处理后 FePO<sub>4</sub> 化学成分分析结果(质量分数)

产品名称	Fe	P	Ca	Mg	Na	K	Cu	Zn	Mn	Al	%
回收产品	35.88	20.73	0	0.002	0.012	0.02	0	0	0	0.05	
行业标准	35.7~36.7	20.0~21.1	≤0.01	≤0.06	≤0.02	≤0.02	≤0.003	≤0.015	≤0.1	≤0.05	

## 3 结 论

1) 采用氧化-沉淀法回收废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液中的铁、磷、锂,优化后的沉淀工艺条件为:反应体系终点 pH 值 2.5、温度 75 ℃、氢氧化钠浓度 1.5 mol/L、氢氧化钠滴加速度 7.7 mL/min、过氧化氢与酸浸液体积比 1:60。在此条件下铁平均沉淀率 99.86%,磷平均沉淀率 98.23%,锂平均损失率仅 1.23%。

2) 滤渣经 700 ℃热处理 5 h 后形成结晶状态良好的 FePO<sub>4</sub>。

3) FePO<sub>4</sub> 各组分符合行业标准。富锂滤液中铁与磷被有效去除,可作为电池级磷酸铁前驱体。

## 参考文献:

[1] 邓鑫涛. 动力电池回收全产业链分析[J]. 资源再生, 2023(3):

40-48.

- [2] 张淑英,李天钰. 中国新能源汽车动力电池报废量预测与对策建议——基于蒙特卡洛模拟的测算[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(6): 101-105.
- [3] 刘宜,尚闯,谭刚,等. 动力锂离子电池规范回收利用的效益及对策[J]. 电池, 2023, 53(6): 664-667.
- [4] 王天雅,宋端梅,贺文智,等. 废弃动力锂电池回收再利用技术及经济效益分析[J]. 上海节能, 2019(10): 814-820.
- [5] 吴颖超,杜进桥,田杰,等. 废旧磷酸铁锂正极材料的硫酸熟化-水浸工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 116-120.
- [6] 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.
- [7] 乔延超,邓浩臻,阮丁山,等. 废旧三元锂电池回收中间产物铝渣的资源化研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6): 100-104.
- [8] 牛飞,徐文彬,谭杰,等. 废旧磷酸铁锂电池再生及湿法回收技术研究进展[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6): 146-152.
- [9] 吴越,裴锋,贾璐路,等. 从废旧磷酸铁锂电池中回收铝、铁和锂[J]. 电源技术, 2014, 38(4): 629-631.

(下转第 104 页)

- 究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3): 92-94.
- [7] 董馨予, 王海峰, 贺跃, 等. 电解锰渣的浸出毒性分析及无害化处理[J]. 无机盐工业, 2023, 55(5): 85-90.
- [8] 马先杰, 陈森, 陈兰兰, 等. 贵州典型电解锰企业锰渣重金属污染特征及对植物种子萌发和生长的影响[J]. 科技通报, 2019, 35(8): 190-196.
- [9] 蒋勇, 文梦媛, 贾陆军. 电解锰渣的预处理及对水泥水化的影响[J]. 非金属矿, 2018, 41(3): 49-52.
- [10] WU J F, SONG M S, XU X H, et al. Prospects and advances of comprehensive utilization of electrolytic manganese residue[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(7): 2645-2652.
- [11] 程淑君, 陶宗硕, 施学宝. 锰渣作水泥混合材的应用研究[J]. 中国建材科技, 2019, 28(4): 48-49.
- [12] 熊玉路, 徐子豪, 李英杰, 等. 惰性气氛下电解锰渣高温还原焙烧脱硫[J]. 化工进展, 2021, 40(增刊1): 319-325.
- [13] 王勇. 电解锰渣作水泥混合材的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(5): 78-80.
- [14] LI C X, ZHONG H, WANG S, et al. Reaction process and mechanism analysis for CaS generation in the process of reductive decomposition of  $\text{CaSO}_3$  with coal[J]. Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 50: 173-181.
- [15] ZHENG S C, NING P, MA L P, et al. Reductive decomposition of phosphogypsum with high-sulfur-concentration coal to  $\text{SO}_2$  in an inert atmosphere[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2011, 89(12): 2736-2741.
- 引用本文: 陈沪飞. 电解锰渣中高温焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5): 100-104.

(上接第95页)

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2022[M]. 北京: 地质出版社, 2022.
- [2] 湛宏海, 邓红飞, 罗立群, 等. 炼铜炉渣选铜尾矿制备矿微粉[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4616-4623.
- [3] 王明细, 陈荣升, 罗立群, 等. 炼铜尾渣提取重介质产品的特性及矿物学分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(11): 109-114.
- [4] 王苗, 杨双平, 庞锦琨. 火法铜渣改质还原提铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(1): 98-101.
- [5] WANG H Y, SONG S X. Separation of silicon and iron in copper slag by carbothermic reduction-alkaline leaching process[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(8): 2249-2258.
- [6] 李小凡, 豆志河, 张延安, 等. 铜冶炼渣综合利用进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(4): 108-118.
- [7] 万新宇, 王锋, 高建军, 等. 铜渣还原-焙分过程中砷的行为特征[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 96-99.
- [8] 董鑫江, 左宗良, 杨涵奇, 等. 铜渣氧载体煅烧改性及氧化还原特性研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 107-111.
- [9] 张晓雪, 罗立群, 王洪阳. 铜渣碳热还原过程中铅锌脱离规律研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 379-386.
- [10] 住房和城乡建设部. 铁矿球团工程设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [11] 李彩霞, 任瑞晨, 刘健, 等. 有机物/膨润土复合球团粘结剂的研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 809-812.
- [12] 张元波, 欧阳学臻, 路漫漫, 等. 腐植酸改性膨润土在铁矿球团中的应用效果[J]. 烧结球团, 2018, 43(4): 27-32.
- [13] 蒋武锋, 李运刚, 赵利国, 等. 黏结剂对含碳球团还原的影响[J]. 钢铁研究学报, 2000(4): 1-4.
- 引用本文: 刘江, 罗立群, 刘成, 等. 铜渣尾矿团粒过程黏结剂筛选及黏结机理[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5): 89-95.

(上接第99页)

- [10] 伍德佑, 刘志强, 饶帅, 等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料回收利用技术的研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(10): 70-78.
- [11] 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.
- [12] 姚送送, 吴国庆, 王浩, 等. 磷酸铁锂电池粉选择性提锂工艺[J]. 电池, 2021, 51(5): 538-541.
- [13] 王猛, 张家靓, 陈永强, 等. 退役磷酸铁锂电池回收技术综述[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(5): 100-110.
- [14] LI H, XING S Z, LIU Y, et al. Recovery of lithium, iron, and phosphorus from spent  $\text{LiFePO}_4$  batteries using stoichiometric sulfuric acid leaching system[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(9): 8017-8024.
- [15] 付中梦, 巩勤学, 王杜, 等. 从废旧磷酸铁锂正极片中回收铁、锂[J]. 矿冶, 2020, 29(5): 104-107.
- [16] 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.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. 电池用磷酸铁: HG/T 4701—2014[S]. 北京: 化工出版社, 2015.
- [18] JING Q, ZHANG J, LIU Y, et al. E-pH diagrams for the Li-Fe-P- $\text{H}_2\text{O}$  system from 298 to 473 K; thermodynamic analysis and application to the wet chemical processes of the  $\text{LiFePO}_4$  cathode material[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(23): 14207-14215.
- [19] 韩梦莹. 电池级磷酸铁的制备工艺研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [20] ZHENG R, ZHAO L, WANG W, et al. Optimized Li and Fe recovery from spent lithium-ion batteries via a solution-precipitation method[J]. Rsc Advances, 2016, 6(49): 43613-43625.
- 引用本文: 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  $\text{FePO}_4$  研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5): 96-99.