LIX984N-C 萃取分离硫酸体系中铜的研究①

张志兵[1]，刘威[1]，王振银[1]，李贺[1]，刘卫平[2]，李相良[1]，沈金灵[1]，王伟[1]
（1.北方矿业有限责任公司，北京 100053；2.中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘　要：采用相比变化法绘制了 15%LIX984N-C 有机相体系下的铜萃取等温线，基于迈克-齐力图解法确定萃取级数，并考察了影响铜萃取的关键因素。结果表明，15%LIX984N-C 有机相体系下最大饱和铜容量为 10.65 g/L，测试结果与产品指标参考值基本吻合。在料液铜质量浓度 8.4 g/L、相比 2∶1、15%LIX984N-C 有机相体系下，确定了 2 级连续萃取可满足生产要求，萃余液铜含量可控制在 0.2 g/L 以内，铜萃取率可达 97.86%以上。在萃取流比 2∶1、反萃流比 2∶1、反萃酸度 180 g/L、料液铜质量浓度 8 g/L、料液酸度 7 g/L 条件下，铜萃取率可达 98.51%，平均有机相净传递量为 2.72 g/L，验证了 LIX984N-C 萃取剂具备优异的综合萃取性能，可为铜湿法冶炼生产实践提供一定工艺参考。

关键词：铜；LIX984N-C 萃取剂；溶剂萃取；铜钴分离；相比变化法；迈克-齐力图解法
中图分类号：TF111.3　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.032
文章编号：0253-6099(2026)03-0214-05

Copper Extraction with LIX984N-C from Sulfuric Acid System

ZHANG Zhibing[1], LIU Wei[1], WANG Zhenyin[1], LI He[1], LIU Weiping[2], LI Xiangliang[1], SHEN Jinling[1], WANG Wei[1]
(1.*Norin Mining Co., Ltd., Beijing* 100053, *China*; 2.*School of Resources Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: The copper extraction isotherm of 15% LIX984N-C organic phase system was plotted via the phase ratio variation method. The number of extraction stages was determined by the McCabe-Thiele graphical method, and the key factors affecting copper extraction were investigated. The results show that the maximum saturated copper loading capacity of 15% LIX984N-C organic phase is 10.65 g/L, which is basically consistent with the reference value of product specifications. With feed copper mass concentration of 8.4 g/L and phase ratio of 2∶1, a two-stage continuous extraction in the 15% LIX984N-C organic phase can meet the production requirements, with the copper concentration in raffinate controlled below 0.2 g/L and the copper extraction efficiency exceeding 97.86%. Under the following conditions, including both the extraction flow ratio and stripping flow ratio at 2∶1, stripping acidity of 180 g/L, feed copper mass concentration of 8 g/L and feed acidity of 7 g/L, the copper extraction efficiency reaches 98.51% and an average net organic loading is 2.72 g/L. It is verified that LIX984N-C extractant possesses excellent comprehensive extraction performance, which can provide technical references for the practical production with copper hydrometallurgical process.
Key words: copper; LIX984N-C extractant; solvent extraction; copper-cobalt separation; phase ratio variation method; McCabe-Thiele graphical method

近年来，溶剂萃取-电积湿法炼铜工艺在全球铜冶炼行业得到广泛应用，国际铜研究小组(ICSG)统计数据显示，2024 年全球湿法炼铜产量突破 450 万 t，占全球铜总产量 22%[1-3]。例如，紫金矿业参与开发的刚果(金)卡莫阿-卡库拉铜矿采用湿法联合炼铜工艺，2023 年第 2 季度单季产铜10.4 万 t，创下全球单一企业湿法炼铜单季产量新高[4-5]。

刚果(金)铜钴资源丰富，其铜资源储量超 8 000 万 t，约占全球铜总储量 8%，2023 年该国铜产量达 284 万 t(约占全球铜产量 13%)，已跻身全球第二大产铜

① **收稿日期**：2025-12-28
基金项目：青海省科技厅重点研发与转化计划(2024-GX-C02)；北方矿业科研基金项目(YY-2020-10)
作者简介：张志兵(1985—)，男，江西抚州人，硕士，高级工程师，主要从事铜钴湿法冶炼工艺研发及生产管理工作。E-mail:zzb0815@126.com

国[6-8]。同时该国钴资源储量高达 600 万 t,约占全球钴总储量 55%,是全球钴市场最重要的原料供应地[9]。

刚果(金)铜钴资源主要以铜钴共生型氧化矿与硫化铜钴矿的形式存在,其冶炼工艺分为 2 类:① 磨矿-搅拌浸出-萃取-电积;② 浮选-焙烧-水淬-萃取-电积。铜组分萃取分离完成后,剩余含钴萃余液经除杂、沉钴、浆化洗涤、压滤、闪蒸干燥等工序,可制备粗制钴盐系列产品[10-11]。

本文以刚果(金)某铜钴矿为研究对象,开展硫酸体系下采用 LIX984N-C 铜萃取剂实现铜钴分离的生产实践及相关工艺技术研究,表征并测定 LIX984N-C 萃取剂相关萃取性能,确定优化萃取工艺参数,可为类似铜钴矿山提供参考。

1　试验原料、设备与方法

1.1　试验原料

试验所用萃取剂 LIX984N-C 购自德国巴斯夫公司(BASF)。在实际工业生产应用中,需同步添加一定比例煤油稀释剂将其稀释至合适浓度才能正常使用,本文萃取剂配制浓度(体积分数)均为 15%(浓缩型)。

试验原料为刚果(金)某铜钴矿,经磨矿、搅拌浸出等生产工序处理,得到含铜、钴、铁、锰等主要金属离子的硫酸盐溶液。用于萃取分离的硫酸盐溶液主要成分见表 1。本文主要研究硫酸盐溶液中铜的萃取分离。

表 1　硫酸盐溶液主要成分

Table 1　Main components of sulfate solution　　g/L

Cu	Co	Fe	Mn	Al	Si	H_2SO_4
8.40	2.25	0.973	1.05	0.506	0.094	7.04

铜钴萃取分离后,采用硫酸质量浓度 180 ~ 190 g/L 的电积贫液对洗涤后的负载有机相进行反萃处理,将有机相中富集的铜离子洗脱至水相,制得电积富液,供后电积工序制备阴极铜,用于反萃的电贫液主要化学成分见表 2。

表 2　电贫液主要化学成分

Table 2　Chemical composition of barren solution　　g/L

Cu	Co	Fe	Mn	Ni	Si	H_2SO_4
38.17	0.634	1.275	0.148	0.015	0.027	184.35

1.2　试验仪器

主要试验仪器包括小型连续萃取模拟装置(MS841-2700L)、电热鼓风干燥箱(GZX-9070MBE)、梨形分液漏斗、数显 pH 酸度计(PHS-3C)、电子天平(New Classic ML)、X 射线荧光光谱分析仪(Varioskan LUX680)、火焰原子吸收分光光度计(BH2101S)、电感耦合等离子体光谱仪(ICAP7000)等。

1.3　试验方法及原理

试验采用相比变化法,设定萃取相比(O/A)范围为 10∶1~1∶10。量取多份体积为 100 mL 的 15% LIX984N-C 有机萃取液,分别与不同体积的新鲜浸出料液置于分液漏斗中进行充分混合振荡,直至萃取平衡,各组试验维持平衡 pH 值恒定。根据萃取平衡后两相中铜金属浓度绘制萃取等温线,结合萃取等温线(有机浓度 15%),利用迈克-齐力图解法确定当前生产模式下所需的最少萃取级数。

利用小型连续萃取模拟装置,结合现场萃取生产工艺条件实际运行需求,采用“2 级萃取+2 级反萃+1 级洗涤”的连续萃取运行试验模式,分别对影响铜萃取的主要相关因素进行考察,以获取铜萃取生产运行的优化工艺参数。

2　试验结果及讨论

2.1　萃取平衡等温线的绘制

按照 1.3 节试验方法开展试验,结合试验数据绘制萃取平衡等温线,结果见图 1。由图 1 可知,靠近原点附近等温线几乎为一条直线,此时有机相过剩,两相铜离子质量浓度均较低;随着平衡水相铜质量浓度增大,对应的平衡有机相铜质量浓度同步增大,曲线逐渐趋于平缓。作平缓段水平切线可确定萃取剂饱和载铜容量,经测定,15% LIX984N-C 有机相铜饱和容量为 10.65 g/L,与产品标定指标基本一致。

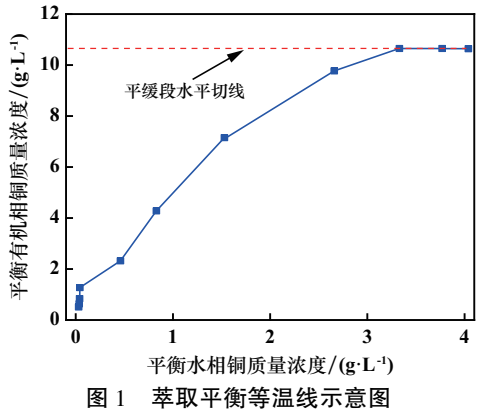


图 1　萃取平衡等温线示意图

Fig. 1　Schematic diagram of extraction equilibrium isotherm

2.2　萃取级数的确定

在料液铜质量浓度 8.4 g/L、萃取相比 2∶1、15% LIX984N-C 有机萃取液条件下,结合图 1 并利用迈克-

齐力图解法[12]，绘制萃取级数示意图，结果见图 2。由图 2 可知，以萃取相比倒数为斜率作萃取操作线，其方程为函数 $Y=0.5X$，以初始料液铜质量浓度 8.4 g/L 为起点作横轴的垂线与操作线交于 A 点，过 A 点作水平线与等温线交于 B 点，再过 B 点作横轴的垂线与操作线交于 C 点，C 点横坐标对应值即为经过第 1 级萃取后萃余液含铜量，每完成这样一个“台阶”即完成了一级萃取过程。经过第 2 级萃取后，萃余液铜质量浓度已降低至 0.18 g/L。综合比较分析，只需要设计 2 级铜萃取就能实现萃余液铜质量浓度低于 0.2 g/L，此时铜萃取率达到 97.86%，基本满足生产工艺实际要求。

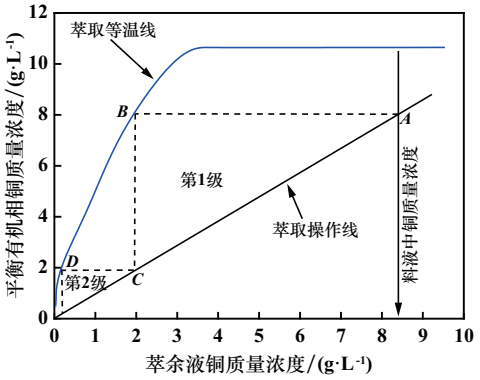


图 2 萃取级数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of extraction stages

2.3 铜萃取主要影响因素

2.3.1 料液酸度

萃取流比 2∶1、反萃流比 1.82∶1、料液铜浓度 8.4 g/L、反萃酸度 190 g/L 条件下，考察了料液酸度对铜萃取的影响，结果见图 3。由图 3 可知，随着料液酸度升高，铜萃取率和有机相净传递量均减小，表明料液酸度是影响铜萃取率的关键因素。在实际生产中，在保证合适的矿石浸出率情况下应控制入萃料液酸度，避免酸度过高，从而影响铜萃取率。综合比较分析并结合生产实际，料液酸度控制在 7 g/L 左右为宜。

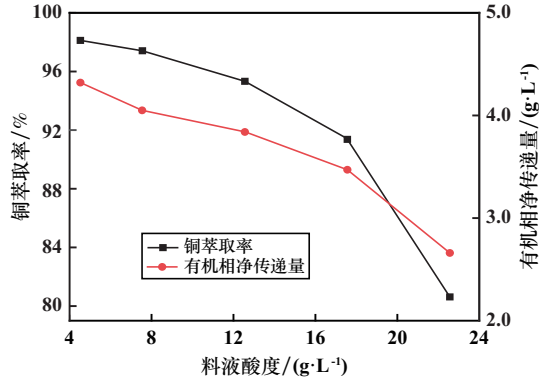


图 3 料液酸度对铜萃取的影响

Fig. 3 Effect of solution acidity on Cu extraction

2.3.2 料液铜质量浓度

料液酸度 7 g/L，其他条件不变，考察了料液铜质量浓度对铜萃取的影响，结果见图 4。由图 4 可知，随着料液铜质量浓度增加，铜萃取率下降。在一定萃取条件下，萃取反应中铜离子在有机相与水相的分配比接近定值，萃余液铜质量浓度亦随着料液铜质量浓度升高而逐渐升高。随着料液铜质量浓度升高，有机相净传递量也逐渐下降，导致铜萃取率下降。综合分析，料液铜质量浓度选用 8 g/L。

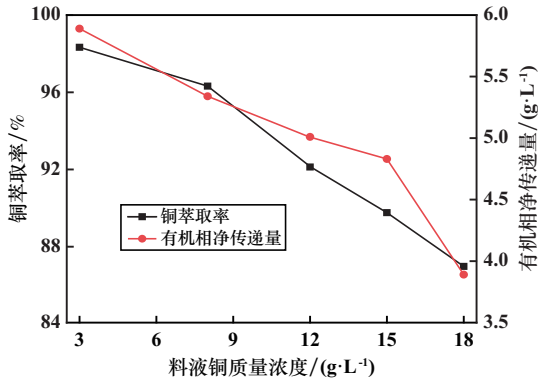


图 4 料液铜质量浓度对铜萃取的影响

Fig. 4 Effect of copper concentration in solution on Cu extraction

2.3.3 萃取流比

料液铜质量浓度 8 g/L，其他条件不变，考察了萃取流比对铜萃取的影响，结果见图 5。由图 5 可知，铜萃取率随着萃取流比增大而升高，有机相净传递量随着萃取流比增大而降低。这是因为随着萃取流比升高，萃取反应中待萃铜离子周围的目标萃取剂分子数有所增加，有机萃取能力增强，铜离子被萃上来的概率大大增加，铜萃取率呈逐渐上升趋势。此外，随着萃取流比升高，参与萃取的有机相占比逐渐增加，每个萃取官能团获取铜离子的概率减小，有机相的相对萃取饱和度下降，从而导致有机相净传递量逐步降低。因此，萃取流比选用 2∶1为宜。

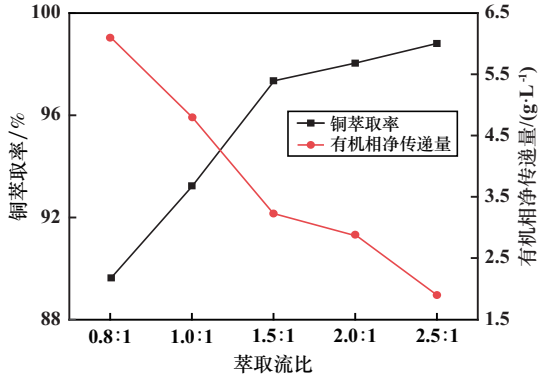


图 5 萃取流比对铜萃取的影响

Fig. 5 Effect of extraction flow ratio on Cu extraction

2.3.4　反萃液酸度

萃取流比 2∶1，其他条件不变，考察了反萃液酸度对铜萃取的影响，结果见图 6。由图 6 可知，有机相净传递量和铜萃取率均随着反萃液酸度升高而增大；当反萃液酸度超过 180 g/L 后，有机相净传递量和铜萃取率的增幅较小。反萃液酸度的增大有利于提高铜萃取率，但考虑到反萃液酸度过高，在电富液气浮除油过程中会产生大量酸雾，恶化岗位操作环境，同时过高的反萃液酸度也会加速萃取剂的降解速率，因此，反萃液酸度选用 180 g/L。

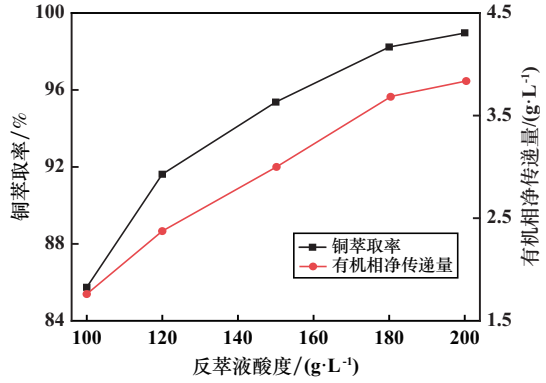


图 6　反萃液酸度对铜萃取的影响

Fig. 6　Effect of acidity of stripping solution on Cu extraction

2.3.5　反萃流比

反萃液酸度 180 g/L，其他条件不变，考察了反萃流比对铜萃取的影响，结果见图 7。由图 7 可知，铜萃取率和有机相净传递量均随着反萃流比增大而减小。这是因为反萃流比越小，反萃液的相对流量越大，对负载有机相的反萃效果越好，进而提高反萃后有机相萃取铜的能力和有机相净传递量。考虑到实际生产中需维持反萃富液较高铜浓度及反萃液输送泵能力有限，反萃流比选用 2∶1。

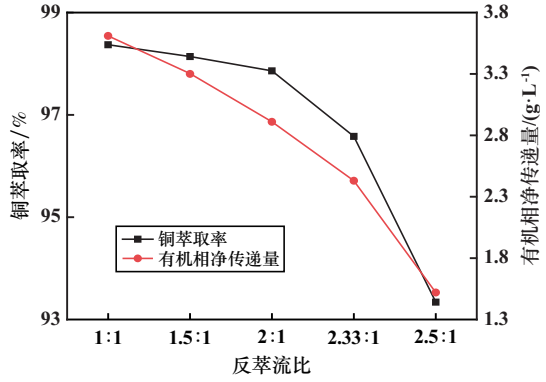


图 7　反萃流比对铜萃取的影响

Fig. 7　Effect of stripping flow ratio on Cu extraction

2.4　优化条件下铜萃取性能研究

由上述单因素实验考察结果可知，优化工艺条件为：萃取流比 2∶1、反萃流比 2∶1、反萃酸度 180 g/L、料液铜质量浓度 8 g/L、料液酸度 7 g/L。利用小型连续萃取模拟装置对该优化工艺条件进行考察验证，以评估其对铜萃取率及有机传递量提升的影响，结果见表 3。由表 3 可知，优化条件下铜萃取率均保持在 98.31%及以上，平均值达 98.51%，同时有机相净传递量平均值达 2.72 g/L，表明 LIX984N-C 综合萃取性能较为优异。

表 3　优化条件下的铜萃取率及有机相净传递量

Table 3　Copper extraction efficiency and net loading of organic phase under optimized conditions

实验次数	铜萃取率/%	有机相净传递量/(g·L^{-1})
1	98.47	2.72
2	98.31	2.65
3	98.76	2.78
平均值	98.51	2.72

3　结论

1）利用相比变化法作出了 15%LIX984N-C 有机萃取液的萃取等温线，并测得该条件下有机相最大铜饱和容量为 10.65 g/L，与产品指标参考值基本相符。

2）采用迈克-齐力图解法可知，在料液铜质量浓度 8.4 g/L、相比 2∶1、15%LIX984N-C 有机相体系下，只需经过 2 级萃取就能实现萃余液含铜 0.2 g/L 以下，铜萃取率 97.86%以上。

3）优化萃取工艺条件为：萃取流比 2∶1、反萃流比 2∶1、反萃酸度 180 g/L、料液铜质量浓度8 g/L、料液酸度 7 g/L，在此条件下，平均铜萃取率达 98.51%，平均有机相净传递量达 2.72 g/L，LIX984N-C 具有较为优异的综合萃取性能。

参考文献（References）：

[1]　王朝华，徐志刚，邹潜，等. 从低铜高铁料液中选择性萃取铜铁试验研究[J]. 湿法冶金，2018，37(4)：298-301.
WANG Chaohua，XU Zhigang，ZOU Qian，et al. Selective solvent extraction of copper and iron from leaching solution with low copper-high iron[J]. Hydrometallurgy of China，2018，37(4)：298-301.

[2]　柳林，王威，刘红召，等. 萃取法从废旧线路板酸浸液中回收铜的试验研究[J]. 矿冶工程，2025，45(3)：158-162.
LIU Lin，WANG Wei，LIU Hongzhao，et al. Experimental study on recovering copper from acid leachate of waste circuit boards by solvent extraction[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(3)：158-162.

[3] 谢琼华. 羟肟萃取剂失效分析与再生研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2023.
XIE Qionghua. Failure analysis and regeneration of hydroxy oxime extractants[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2023.

[4] 伏晓丹,张海宝,陈燕杰,等. 某低品位氧化铜矿堆浸液萃取铜的试验研究[J]. 江西冶金, 2024,44(1):43-47.
FU Xiaodan, ZHANG Haibao, CHEN Yanjie, et al. Experimental research on extraction of copper from heap leaching solution of a low-grade oxide copper oxide ore[J]. Jiangxi Metallurgy, 2024,44(1):43-47.

[5] 刘晓荣,申君辉,刘妍君,等. 羟肟萃取剂 LIX984N 酸解和铜萃取分相性能[J]. 中国有色金属学报, 2017,27(4):818-824.
LIU Xiaorong, SHEN Junhui, LIU Yanjun, et al. Degradation of oxime extractants LIX984N under impact of acid solution and phase disengagement of copper solvent extraction[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,27(4):818-824.

[6] 徐志刚. 新型萃取体系分离提取钴镍铜的性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
XU Zhigang. Study on the separation and extraction performance of cobalt, nickel and copper with the new extraction systems[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[7] 杨玮,王倩,王刚. 刚果(金)某氧化铜钴矿浸出试验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):75-77.
YANG Wei, WANG Qian, WANG Gang. Leaching test of a copper-cobalt oxide ore in Congo(DRC)[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(6):75-77.

[8] 巨金荣. 大洋富钴结壳硫酸铵焙烧-水浸综合回收有价金属的研究[D]. 北京:北京科技大学, 2025.
JU Jinrong. Comprehensive recovery of valuable metals from oceanic cobalt-rich crusts by ammonium sulfate roasting-water leaching[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2025.

[9] 张志兵,石玉臣,张骄,等. 刚果(金)某铜钴矿粗制氢氧化钴浆化洗涤工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):119-121.
ZHANG Zhibing, SHI Yuchen, ZHANG Jiao, et al. Experimental research on pulping and washing process for crude cobalt hydroxide from copper-cobalt ore in DRC[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(6):119-121.

[10] 顾晓薇,胥孝川,王青,等. 世界铜资源格局[J]. 金属矿山, 2015(3):8-13.
GU Xiaowei, XU Xiaochuan, WANG Qing, et al. The world pattern of copper resource[J]. Metal Mine, 2015(3):8-13.

[11] 李凤,汤启明,阳启华,等. 影响铜萃取剂稳定性的因素研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(9):10-12.
LI Feng, TANG Qiming, YANG Qihua, et al. Influence factors on stability of copper extractant[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(9):10-12.

[12] 张启修,张贵清,唐瑞仁,等. 萃取冶金原理与实践[M]. 长沙:中南大学出版社, 2014.
ZHANG Qixiu, ZHANG Guiqing, TANG Ruiren. Fundamentals and practice of solvent extraction in hydrometallurgy[M]. Changsha: Central South University Press, 2014.

引用本文:张志兵,刘威,王振银,等. LIX984N-C 萃取分离硫酸体系中铜的研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):214-218.
ZHANG Zhibing, LIU Wei, WANG Zhenyin, et al. Copper extraction with LIX984N-C from sulfuric acid system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):214-218.

(上接第213页)

[5] 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.

[6] 江洋,彭长宏,陈伟,等. 废旧磷酸铁锂粉料综合回收中试研究[J]. 化工学报, 2024,75(6):2353-2361.
JIANG Yang, PENG Changhong, CHEN Wei, et al. Pilot study on comprehensive recycling of waste lithium iron phosphate powder[J]. CIESC Journal, 2024,75(6):2353-2361.

[7] 张津榕,彭长宏,林金秀,等. 废旧磷酸铁锂浸出工艺的优化及宏观动力学[J]. 化工进展, 2024,43(11):6504-6513.
ZHANG Jinrong, PENG Changhong, LIN Jinxiu, et al. Optimization of leaching conditions and macroscopic kinetics of spent $LiFePO_4/C$ powder[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024,43(11):6504-6513.

[8] 刘慧勇,杨茜,傅云晗,等. 空气—双氧水联合氧化工艺选择性浸出废磷酸铁锂材料中的锂[J]. 化工环保, 2024,44(2):235-241.
LIU Huiyong, YANG Xi, FU Yunhan, et al. Selective extraction of lithium from spent lithium iron phosphate material by combined oxidation with air and hydrogen peroxide[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2024,44(2):235-241.

[9] 王朵朵,荆乾坤,张家靓,等. 磷酸铁锂正极废料选择性提锂制备电池级碳酸锂[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(9):63-70.
WANG Duoduo, JING Qiankun, ZHANG Jialiang, et al. Preparation of battery grade lithium carbonate by selective extraction of lithium from waste lithium iron phosphate cathode[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(9):63-70.

[10] 杨希峰,何京恩,法芸,等. 废旧锂电池有价金属的有机酸浸出动力学研究[J]. 电源技术, 2023,47(8):997-1001.
YANG Xifeng, HE Jing'en, FA Yun, et al. Study on organic acid leaching and kinetics of valuable metals from spent lithium batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023,47(8):997-1001.

引用本文:吴占新,李武斌,李勇,等. 废旧磷酸铁锂电池酒石酸浸出研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):210-213.
WU Zhanxin, LI Wubin, LI Yong, et al. Tartaric acid leaching of spent lithium iron phosphate batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):210-213.