退役磷酸铁锂电池回收中铁铝分离技术研究进展①

罗碧云[1,2]，颜群轩[1]，谭群英[1]，陈嘉鑫[1]，黄秀娇[1]，徐斌[2]
（1.湖南金凯循环科技有限公司，湖南 衡阳 421800；2.中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘　要：根据当前退役磷酸铁锂（LFP）电池回收过程中铝杂质脱除路径，将其划分为“分离分选脱除常量铝”与“湿法冶金去除痕量铝”两大环节，综合评述了各新兴技术在除杂效率、选择性、铝残留量、经济性及环境影响等方面的优劣，并展望了未来技术研究方向，以期为退役 LFP 材料高值化利用与产业绿色转型提供理论支撑。

关键词：磷酸铁锂；回收；铁铝分离；深度除铝；资源循环；退役电池；正极材料；除杂
中图分类号：X705；TM911　　**文献标志码**：B　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.040
文章编号：0253-6099（2026）03-0261-07

Progress in Iron-Aluminum Separation Technologies in Spent Lithium Iron Phosphate Battery Recycling

LUO Biyun[1,2], YAN Qunxuan[1], TAN Qunying[1], CHEN Jiaxin[1], HUANG Xiujiao[1], XU Bin[2]
(1.*KeyKing Recycling Technology Co., Ltd., Hengyang* 421800, *Hunan*, *China*; 2.*School of Minerals Processing and Bioengineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: Based on the existing removal routes of aluminum impurities during the recycling of spent lithium iron phosphate (LFP) batteries, the recycling process is divided into two major stages: removal of a large amount of aluminum via separation and sorting, and elimination of trace aluminum by hydrometallurgical process. This paper comprehensively reviews the advantages and disadvantages of various emerging technologies in terms of impurity removal efficiency, selectivity, residual aluminum content, economic performance and environmental impact. The future research trends are also prospected, for providing theoretical basis for the high-value utilization of spent LFP materials and green transformation of the industry.

Key words: lithium iron phosphate (LFP); recycling; iron-aluminum separation; deep aluminum removal; resource recycling; spent battery; cathode material; impurity removal

在全球能源结构转型与碳中和目标持续推进的背景下，新能源汽车产业呈现爆发式增长，磷酸铁锂（$LiFePO_4$，LFP）电池凭借其高安全性、长循环寿命和低成本的显著优势[1]，已成为动力电池领域的核心电池种类之一。《2025 年中国新能源汽车动力电池退役预测成果》数据显示，未来 5 年，磷酸铁锂电池退役量在总退役电池量中的占比将超过 50%[2]，因此实现退役磷酸铁锂电池的高效回收与资源化利用，对保障关键金属资源供给、推动绿色低碳循环经济发展具有重大战略意义。

在退役磷酸铁锂电池的回收流程中，预处理环节普遍采用拆解-破碎-物理分选等手段，尽管可实现正极材料与铝集流体的高效解离与主体分离，但仍难以彻底脱除微量铝粉、石墨及黏结剂等夹杂物。这些残留杂质随正极粉体同步进入后续湿法冶金工序，成为影响回收产品纯度与工艺稳定性的关键因素之一。在湿法冶金回收 LFP 粉料的过程中，铁和铝通常以三价离子（Fe^{3+}和 Al^{3+}）形式共存于浸出液中，两者离子半径相近、水解 pH 值区间高度重叠，且两者磷酸盐化合物的溶度积常数极为接近，导致共沉淀现象显著，常规化学沉淀法难以实现铁铝的高效选择性分离[3]。更为复杂的是，工业浸出液中 Al 浓度受电池拆解程度、

① **收稿日期**：2025-12-20
基金项目：中南大学研究生科研创新项目（1053320232380）
作者简介：罗碧云（1996—），女，安徽黄山人，博士研究生，主要研究方向为湿法冶金分离纯化、含锂废料的综合回收与材料再生。E-mail：340415198@qq.com
通信作者：颜群轩（1982—），男，湖南邵阳人，博士，主要研究方向为冶金物理化学及锂资源综合利用。E-mail：93897030@qq.com

破碎分选效率及原料批次差异影响而波动,进一步放大了分离工艺参数设计与控制难度。研究表明,Al 杂质一旦进入磷酸铁前驱体,将以 AlO_6 八面体形式嵌入 $LiFePO_4$ 橄榄石晶格,诱发晶格畸变并阻塞一维 Li^+ 扩散通道,导致可逆容量及容量保持率的衰减[4]。目前,行业标准要求电池级磷酸铁中铝含量低于 0.03%,头部企业更是提出铝含量不超过 0.01%的严苛标准。然而,受限于铁铝选择性低、除铝流程冗长、试剂成本陡增及全元素耦合回收难等现实瓶颈,多数回收企业被迫退化为“提锂弃铁磷”的片面路线,致使富含 Fe/P 的浸出残渣被当作固体废物堆弃,造成资源浪费与环境隐患[5]。铁铝深度分离已成为退役磷酸铁锂电池闭路循环与全组分高值化回收的关键技术瓶颈,亟须开发具备高选择性、耐波动、低损耗的铝深度脱除技术,以支撑磷酸铁锂闭环回收的高纯化需求。

针对上述问题,本文将磷酸铁锂回收过程中的铁铝分离技术系统划分为“分离分选除常量铝”与“湿法冶金除痕量铝”两大环节,全面综述各环节新兴技术,从除杂效率、元素选择性、铝残留量、经济性能及环境负荷等多维度进行对比分析,总结现有工艺优势与局限性,并对未来技术发展方向进行展望,以期为推动磷酸铁锂电池绿色回收与产业升级提供理论支撑和技术路径。

1 磷酸铁锂电池回收过程中铝的除杂难点

退役磷酸铁锂电池中核心的回收对象为正极材料中的磷酸铁锂,而磷酸铁锂通常由 PVDF 黏结剂附着于集流体铝箔之上,现行分离技术是利用密度与延展性差异实现铝箔与磷酸铁锂的宏观分离;所得正极粉中通常残留质量分数 1%~3%的铝屑,需采用湿法冶金工艺,根据元素化学性质差异深度除杂并进一步回收 Li、Fe、P。然而,物理分选受限于界面黏附,难以彻底剥离;湿法冶金工艺则因 Fe^{3+}/Al^{3+} 理化性质相似,难以深度除铝,造成回收的 $FePO_4$ 纯度难以达标。上述双重瓶颈构成了磷酸铁锂正极闭路循环的技术难点,具体分析如下。

1.1 物理性质相似性

磷酸铁锂正极材料密度 3.3~3.6 g/cm^3,但由于其中掺杂有导电碳、有机溶剂黏结剂等,其实际密度会偏低,而铝箔集流体为纯铝,密度为 2.7 g/cm^3[6]。在机械外力作用下,正极材料倾向于破碎成细颗粒,而铝箔则因具有良好的韧性而保持较大尺寸,再采用振动筛分、重选等方法即可初步实现铝的分离除杂。但由于实际破碎后的铝粉和正极活性材料在粒度和密度上均存在分布重叠,传统的物理分选方法难以高效分离。

1.2 化学性质相似性

在磷酸铁锂正极材料湿法回收过程中,通常采用“先浸出后除杂”的工艺流程。使用常规无机酸(如硫酸或盐酸)作为浸出剂时,锂、铁、铝、磷等元素往往发生同步溶出,形成包含多种金属离子的复杂溶液体系。该过程缺乏元素选择性,导致目标元素与杂质元素在浸出阶段即高度混合,难以通过后续沉淀实现有效分离。

铁、铝杂质深度分离的难点在于其在典型浸出液环境(多为磷酸盐介质)中具有高度相似的离子特性与沉淀行为。Fe^{3+}(离子半径 0.064 5 nm)与 Al^{3+}(离子半径 0.053 5 nm)均具有三价电荷和相近的离子半径,导致其水相化学行为极为相似,在水解倾向、配位能力及与常见萃取剂或沉淀剂的相互作用力方面差异不显著。两者的磷酸盐沉淀溶度积常数分别为:$K_{sp}(FePO_4 \cdot 2H_2O) = 9.91\times10^{-16}$,$K_{sp}(AlPO_4) = 9.84\times10^{-21}$,均属极难溶物质。在 pH 值调节过程中,磷酸铁与磷酸铝极易发生共沉淀,形成混杂沉淀相,从而难以通过常规 pH 值控制实现铁铝的有效分离。

在磷酸铁锂正极材料回收领域,铝杂质的去除是影响再生材料纯度和回收效率的关键环节。目前,锂电回收行业中对铝的脱除主要集中于两个阶段:一是在预处理环节通过物理分选方法去除常量铝(>1%),二是在湿法冶金过程中深度净化微量铝(<0.1%)。退役磷酸铁锂电池回收工艺流程如图 1 所示,其主要包括拆解破碎、分离分选、湿法浸出、分离纯化等核心工序。本文将分别综述分离分选工段与湿法冶金工段中所采用的不同除铝技术,并对其原理、效果及研究进展进行系统梳理与讨论。

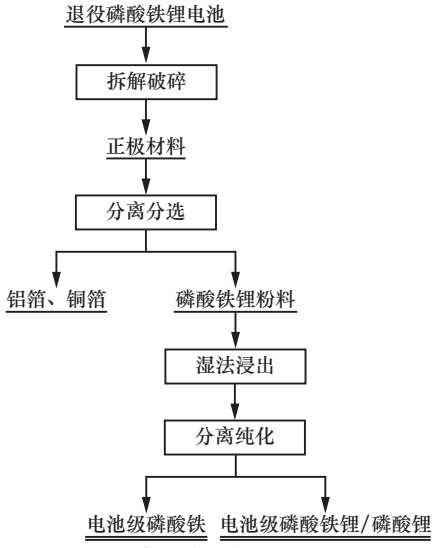


图 1 退役磷酸铁锂电池回收工艺流程

Fig. 1 Flowchart of recycling process for spent lithium iron phosphate batteries

2　分离分选去除常量铝

在退役磷酸铁锂电池回收过程中,预处理对缓解后续回收压力以及降低整体回收成本至关重要。在分选之前,可采用氧化焙烧、有机溶剂[如 N-甲基吡咯烷酮(NMP)、二甲基甲酰胺(DMF)等]洗涤或超声波处理等手段促进正极粉料从铝箔上剥离[7],提高后续分离分选的效果和效率。

2.1　筛分分选

筛分分选工艺是一种根据正极活性物质与铝箔在延展性和脆性上存在显著差异,通过控制破碎条件和选择合适粒径的筛网,依据粒度差异实现两者有效分离的工艺技术。筛分分选工艺流程如图 2 所示。

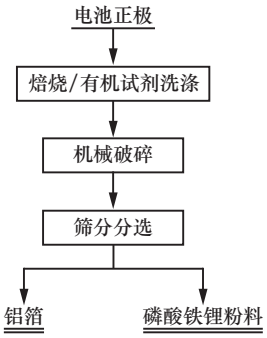


图 2　筛分分选工艺流程

Fig. 2　Flowchart of screening process

多项专利技术中使用了筛分分选工艺。例如,巴斯夫公司的专利[8]中提到,首先在惰性气氛下对退役磷酸铁锂电池进行机械破碎,防止电池在粉碎过程中短路自燃;随后通过氧化焙烧去除残留的黏结剂;最后利用筛分工艺获得铝含量低于 0.2%的高纯度磷酸铁锂粉体。类似地,中国专利也报道了多种预处理与物理分选相结合的方法:如使用有机溶剂溶解电极碎片中的黏结剂,弱化铝箔与活性材料间的黏附作用[9];采用回转窑预热-焙烧消除黏结剂,再经破碎和筛分实现磷酸铁锂活性物质与铝粉、铜粉的分离,分离出的金属粉末可通过熔炼工艺进行资源化回收[10]。筛分分离流程简单、成本较低且环境友好,在工业预处理中普遍应用。

2.2　气流分选

气流分选工艺流程如图 3 所示。

文献[11]采用气流分选分离回收退役正极材料中的 $LiFePO_4$ 活性物质、铜粉和铝粉:先以 3.3 m/s 的气流速度优先分离得到纯度为 97.0%的正极材料,然后以 1.7 m/s 的气流速度分离获得纯度分别为 97%和 96%的铜粉和铝粉。每千克废料的处理能耗约为 0.033 kWh,折合每块动力电池回收成本约 0.01 美元。

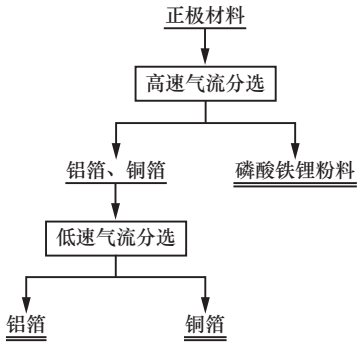


图 3　气流分选工艺流程

Fig. 3　Flowchart of pneumatic separation process

颗粒大小对气流分选的影响显著,随着颗粒尺寸减小,最优分离空气量下降。文献[12]设计粒度分级气流分选技术以获得回收率和纯度更高的产品,其中铜和铝回收率分别达到 92.08%和 96.68%。气流分选工艺操作简单、成本低廉、分离高效,在回收行业中应用广泛。

2.3　静电分选

静电分选无需额外添加化学试剂,几乎无二次污染物排放,且能同步分离多种有价组分,是绿色高效预处理退役磷酸铁锂电池正极粉料的重要研究方向之一。静电分选工艺流程如图 4 所示。文献[13]系统研究了机械破碎-静电分选工艺对退役 $LiFePO_4$ 正极材料的高效回收,结果表明,在静电极电压 30 kV、接地转子转速 60 r/min、物料粒径 0.4~0.8 mm 时,铝粉、铜粉与 $LiFePO_4$ 活性物质的分离效率达到最优;经三级静电分选,三者的回收率分别达到 95.7%、92.4%与 97.5%。相较于预处理工艺,静电分选可在单次流程中实现 3 种目标组分的高效分离,显著降低了能耗与二次污染风险。

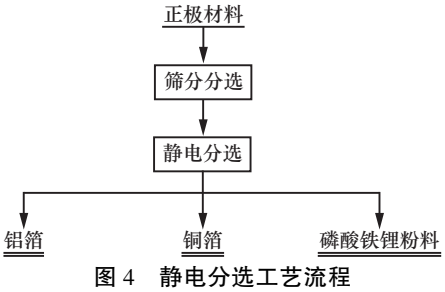


图 4　静电分选工艺流程

Fig. 4　Flowchart of electrostatic separation process

然而,静电分选的有效粒度范围主要集中于 0.2~2 mm;粒度过细(<0.2 mm)易导致颗粒间黏附、荷电不足,而粒度过粗(>2 mm)则因惯性过大而降低分选精度。在实际应用中,退役电池的正极材料可能因腐蚀或粉化导致部分颗粒过细,而铝箔延展性良好,破碎

后易形成较大颗粒,导致物料粒度偏离理想范围,进而削弱分选效率与纯度。

2.4 磁选

磁选分离主要基于物料间磁化率的差异。在该体系中,铝为抗磁性物质,磁化率极低,而磷酸铁($FePO_4$)为顺磁性物质,在强磁场中可被磁化并受到磁力作用。因此,在高梯度磁场环境下,磷酸铁颗粒被吸附至磁介质表面,而铝粉因无磁性仍保留在非磁性产物中,从而实现两者的物理分离。

文献[14]创新性地提出先机械活化浸出后磁选的回收方法,采用磷酸+过氧化氢机械活化浸出工艺选择性浸出含铝杂质的正极材料中 99.5%的锂,而铝则仍保留单质形态;后续再以 7 次磁分离循环,成功分离提锂后铁磷渣中的铝粉和磷酸铁,分选后磷酸铁的纯度和回收率分别达到了 99.0%和 97.6%。机械活化浸出-磁选回收工艺流程如图 5 所示。

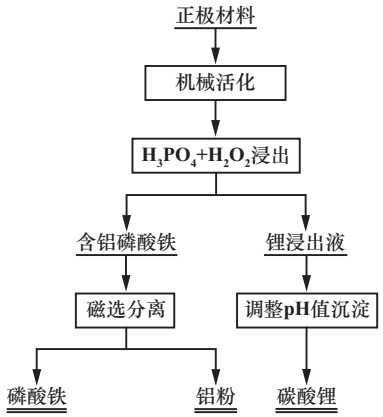


图 5 机械活化浸出-磁选回收工艺流程

Fig. 5 Flowchart of mechanical activation leaching and magnetic separation process

3 湿法冶金除痕量铝

3.1 酸浸法

酸浸法的原理是利用铁、铝化合物在特定酸介质中的溶解性差异或反应活性顺序,实现铝的选择性溶出,同时使铁化合物尽可能以固态形式存留于渣中,从而达到元素分离的目的。酸浸法工艺流程如图 6 所示。文献[15]提出采用浓度 0.1~1 mol/L 的硫酸溶液,在 40~80 ℃条件下处理正极材料,可有效选择性溶出铝杂质,而铁损失率较低。文献[16]提出了一种两段式 HNO_3-H_3PO_4 混酸浸出工艺,通过精确控制混酸浓度、配比及浸出条件,成功实现了从提锂后铁磷渣中选择性分离铝杂质;除铝后的铁磷渣经后续溶解-沉淀纯化,可制备出符合电池级标准的磷酸铁产品。此外,文献[17]以 0.2 mol/L 的硝酸为浸出剂,在液固比 10∶1、温度 70 ℃、浸出时间 8.0 h 的优化条件下,实现了铝的高选择性浸出,铝和铁浸出率分别为 96.3%和 3.92%,显示出优异的分离效果。

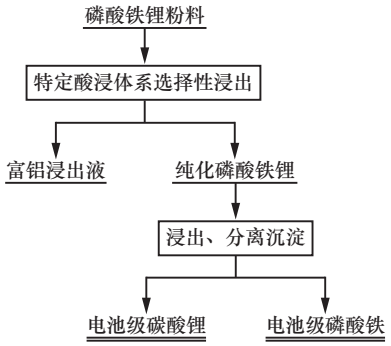


图 6 酸浸法工艺流程

Fig. 6 Flowchart of acid leaching process

3.2 碱浸法

碱浸法是传统除铝技术之一,即利用铝的两性特点,将正极粉料中的铝选择性溶解为 AlO_2^- 而实现除杂。碱浸法工艺流程如图 7 所示。文献[18]认为碱浸反应中产生的氢气扩大了铝箔与正极材料之间的界面,可增强聚偏氟乙烯裂解而促进铝与正极粉料的分离,最终可实现 98.6%的铝去除率及 97.8%的锂回收率。文献[19]采用碱浸处理的方式,将正极粉料铝含量降至 0.02%。文献[20]使用 1 mol/L 稀碱,在 200 ℃下采用高温水热工艺有效除去了废旧正极物料中 99%的氟以及 62%的铝,锂损失率仅 1.9%。基于传统碱浸法技术,专利 CN111370801A 提出利用熔融态的强碱除铝,不仅可以利用 Al 与强碱间的反应形成偏铝酸钠,同时可以利用高温使得导电炭等杂质分解,焙烧后的粉末经水浸、过滤等操作即可得到杂质含量低于 50×10^{-6} 且纯度高于 99%的磷酸铁锂粉末。

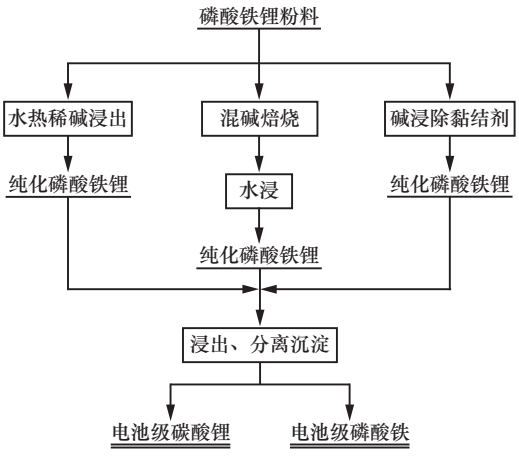


图 7 碱浸法工艺流程

Fig. 7 Flowchart of alkaline leaching process

碱浸除杂技术简单,设备和操作相对成熟,在产业化中应用广泛。由于磷酸铁锂中锂、磷元素在碱性环境中稳定性较差,容易发生非目标金属溶出,导致回收率下降;同时,体系中生成的铁基化合物对铝可能存在吸附作用,造成铝的去除不彻底。这些因素共同导致该工艺普遍存在除铝深度有限及锂、磷损失较大的问题,限制了其在高纯度回收再生材料制备中的广泛应用。

3.3　络合法

络合法是湿法除杂中一种重要的分离策略,其核心在于利用特定络合剂与铝离子(Al^{3+})优先形成稳定的络合物,与铁磷元素分别进入不同的物相而实现分离。文献[3]提出了一种通过 F 介导的配体差异分离方法,在 150 ℃高温水热条件下,通过将酸浸液 pH 值精确调控至 0.9,促使 Al^{3+} 与 F^- 结合生成稳定的水溶性络阴离子$[AlF_5]^{2-}$,而 Fe^{3+}则优先与 PO_4^{3-}结合形成结晶性良好的铁磷酸盐固体。在氟离子的定向调控下,铝得以深度去除,最终所得的磷酸铁产品中铝杂质含量低于 0.03%,满足电池级磷酸铁的质量标准。专利 CN114920226A[21] 也公开类似思路,将磷酸铁锂电池提锂后的磷铁渣与氟盐混合,在 150~250 ℃下焙烧转化为铝和铜的氟化物,然后在 60~90 ℃水浸,形成溶于水的络合物,通过固液分离除去铜铝杂质得到纯化的磷铁渣。专利 CN113880063A[22] 采用吡啶甲酸类化合物、喹啉甲酸类化合物和异喹啉-3-甲酸类化合物作为除铝剂,与磷铁渣和酸反应形成溶解度不同的金属有机络合物,放大铁、铝溶解度差异,优先沉淀铝杂质,提高磷酸铁的纯度和收率。

络合法具有反应选择性高、除杂深度好、产品纯度高等优点,特别适用于微量铝的脱除。然而,该方法也面临络合剂成本较高、可能引入其他杂质以及后续废液中络合剂回收处理等问题。因此,开发高效、低成本且环境友好的新型络合体系,仍是该技术走向大规模工业应用的关键研究方向。络合法相关工艺流程如图 8 所示。

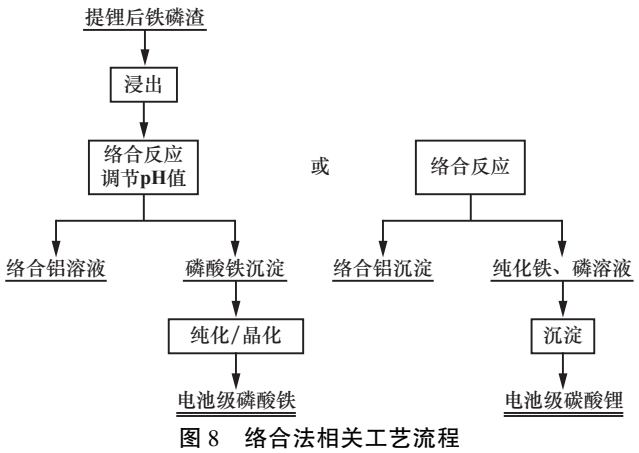


图 8　络合法相关工艺流程

Fig. 8　Flowchart of complexation process

3.4　溶剂萃取法

溶剂萃取法是一种基于有机萃取剂对不同金属离子存在选择性络合与分配差异的分离技术,在湿法冶金中广泛应用于杂质元素的深度去除。在磷酸铁锂回收过程中,通过优选萃取剂和调控萃取条件,溶剂萃取法可实现铝离子与铁、锂等有价金属的高效分离。溶剂萃取法工艺流程如图 9 所示。

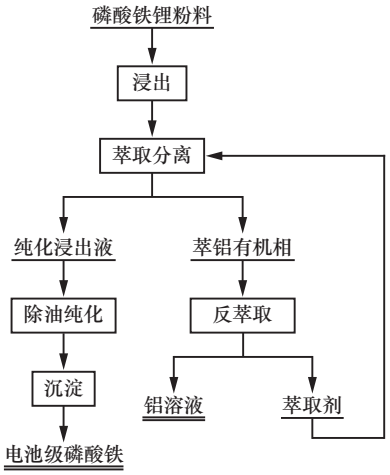


图 9　溶剂萃取法工艺流程

Fig. 9　Flowchart of solvent extraction process

文献[23]报道了一种典型的硫酸浸出-溶剂萃取联合工艺:首先采用硫酸对废弃 $LiFePO_4$/C 物料进行浸出,使超过 99.5%的有价金属转入溶液;随后以二-(2-乙基己基)磷酸(D2EHPA)为萃取剂,在优化条件下对浸出液中的铝进行选择性萃取,铝萃取率可达 96.4%,而铁共萃率低于 1.1%,表现出优异的选择性。经萃取净化后,从水相残渣中得到的铁磷酸盐产品中铝质量分数仅为 0.007%,符合电池级 $FePO_4$ 的纯度要求。

溶剂萃取法因选择性好、操作连续性强和回收率高等优点,在微量铝深度脱除方面显示出显著优势。然而,该技术也面临着试剂成本高、除杂工序长、除杂后液需要除油、萃取剂易于乳化等若干挑战,这些因素共同制约了溶剂萃取技术在工业规模回收过程中的推广与应用。

3.5　化学沉淀法

化学沉淀法的原理是利用铝离子(Al^{3+})在不同溶液体系中特定 pH 值条件下生成沉淀的溶度积常数差异,将铝选择性沉淀后通过简单过滤方式将其从溶液中分离。化学沉淀法工艺流程如图 10 所示。

与三价铁(Fe^{3+})相比,二价铁(Fe^{2+})与 Al^{3+} 的溶度积常数差异更为显著,因此在相关工艺设计中常优先考虑将 Fe^{3+}还原为 Fe^{2+},以增强分离选择性。专利 CN114934177A[24] 公开的选择性深度除铝铜方法中,

采用不溶于水的pH值调节剂(如铁粉、氧化亚铁或氢氧化亚铁)将磷酸铁锂浸出液pH值精确控制至3.5,使铝和铜分别以磷酸铝和磷酸铜的形式沉淀析出,最终通过过滤实现杂质脱除。文献[25]成功地通过碳还原技术实现了对Fe^{3+}和Al^{3+}沉淀区的分离强化,通过碳介导,Fe^{3+}完全还原为Fe^{2+},并在pH=4的条件下使铝的沉淀率高达99.4%,且最终产物中铝含量低至0.001 75%,符合电池级产品标准。文献[26]提出热增强型pH值诱导水热策略,在初始pH=0.9、150 ℃的水热条件下,实现了98.67%的高$FePO_4$沉淀率,且$FePO_4$中的镍、钴、锰质量分数均低于0.01%,铝质量分数低于0.056%,展现出良好的综合纯化效果。

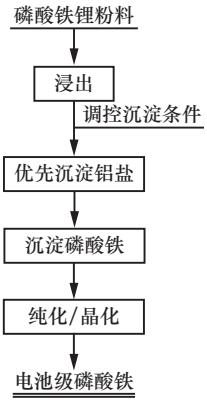


图10 化学沉淀法工艺流程

Fig. 10 Flowchart of precipitation separation process

尽管化学沉淀法具有显著的经济与技术优势,其在处理成分复杂的实际浸出液时仍面临挑战,如共存离子干扰、沉淀剂选择性有限以及共沉淀导致有价元素损失等。因此,未来研究需致力于开发新型绿色沉淀工艺体系,并探索与絮凝、晶化等强化分离技术联用的可行性,以进一步提升除铝效率与产品纯度。

4 结论与展望

1) 在目前行业背景下,辅以粒度分级的多级气流分选及静电分选工艺均可较大程度上缓解后续湿法回收的除杂压力;湿法回收技术中碱浸法凭借其技术成熟度和成本优势,仍是当前工业化应用的首选,但常温常压下绿色高选择性络合除铝的未来应用前景更佳。

2) 未来的研究将集中于以下三个方面。① 预处理智能化与精细化。现有的分选技术往往受粒度影响显著,可先进行粒度分级从而更加精细化地调节并匹配相应的最优分离工艺,进一步提高分选步骤的分离效果,提升整体回收效率。随着AI的发展,退役电池的智能拆解、无损精细拆解也是未来的关键发展方向,这将大大减少后续湿法回收的压力,无损拆解的退役材料也将更有望通过直接修复技术而实现再生。② 试剂环保化、流程精简化。推进当前磷酸铁锂回收产业中铁、磷回收的关键是以低成本、短流程实现废料中铝的选择性脱除。因此,未来湿法除杂步骤将集中在开发更高效、流程精简、成本低廉的除杂试剂及分离技术上。③ 除杂再生整体化。目前回收再生过程包括拆解分选、湿法冶金、材料合成3个步骤,如何将3个步骤的工艺进行整体优化也是重要的研究方向。如开发绿色正向改性的除杂试剂,在除杂的同时对再生材料进行改性优化;精细化分离分选技术,未分选出的杂质经直接再生技术转化为正向改性掺杂相,从而获得性能良好的改性再生材料。

参考文献(References):

[1] 李志华. 通信用磷酸铁锂电池的节能减排应用[J]. 通信电源技术, 2012,29(增刊1):96-98.
LI Zhihua. The energy conservation and emission reduction application of lithium iron phosphate batteries for communication[J]. Telecom Power Technology, 2012,29(S1):96-98.

[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] HAN F, XIE Y H, QU L, et al. Fluoride ion-mediated differential coordination separation of Al(Ⅲ) and Fe(Ⅲ) for regeneration of low-aluminum, high-purity battery-grade iron phosphate[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025,221:108404.

[4] KAPAEV R, NOVIKOVA S, KULOVA T, et al. Conductivity and electrochemical behavior of $Li_{1-x}Fe_{1-2x}(MⅡMⅢ)_xPO_4$ with olivine structure[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2015,19(9):2793-2801.

[5] CUI K, ZHAO M C, LI Y R, et al. Recycling of spent lithium iron phosphate batteries: Research progress based on environmental protection and sustainable development technology[J]. Separation and Purification Technology, 2025,354:128982.

[6] BAI Y X, ZHU H B, ZU L, et al. Eddy current separation of broken lithium battery products in consideration of the shape factor[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2023,25(4):2262-2275.

[7] LUO B Y, XU B, YAN Q X, et al. Advances and challenges in recycling spent $LiFePO_4$ batteries[J]. Separation and Purification Technology, 2025,362:131780.

[8] RANG M W W, DUCHARDT M, ZIESCHANG A M C, et al. LFP battery recycling plant and process: WO2024094725AI[P]. 2024.

[9] 刘志远. 一种废旧磷酸铁锂电池综合回收的方法:CN101847763A[P]. 2022-05-31.

LIU Zhiyuan. A comprehensive recycling method for spent lithium iron phosphate batteries: CN101847763A[P]. 2022-05-31.

[10] 李艳,田杰,杜进桥,等. 磷酸铁锂电池正极片的回收处理方法: CN112661130A[P]. 2021-04-16.
LI Yan, TIAN Jie, DU Jinqiao, et al. Recycling and treatment methods for the cathode sheets of lithium iron phosphate batteries: CN112661130A[P]. 2021-04-16.

[11] BI H J, ZHU H B, ZU L, et al. Pneumatic separation and recycling of anode and cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries[J]. Waste Management & Research, 2019,37(4):374-385.

[12] ZHU X S, ZHANG C Y, FENG P, et al. A novel pulsated pneumatic separation with variable-diameter structure and its application in the recycling spent lithium-ion batteries[J]. Waste Management, 2021,131:20-30.

[13] ZHU H B, BAI Y X, ZU L, et al. Separation of metal and cathode materials from waste lithium iron phosphate battery by electrostatic process[J]. Separations, 2023,10(3):220.

[14] NIU S X, LIANG P W, ZHANG Z C, et al. Selective leaching and magnetic separation for efficient recovery of lithium and iron phosphate from aluminum-contaminated cathode materials of spent $LiFePO_4$ batteries[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 372:133350.

[15] 郑铁江,蒋国强,曹圣平,等. 一种由废旧磷酸铁锂电池制备磷酸铁锂正极材料的方法:CN111009660A[P]. 2020-04-14.
ZHENG Tiejiang, JIANG Guoqiang, CAO Shengping, et al. A method for preparing lithium iron phosphate cathode material from spent lithium iron phosphate batteries: CN111009660A[P]. 2020-04-14.

[16] 胡晓倩,李玲,时振栓,等. 一种回收磷酸铁锂提锂渣的方法: CN118145611A[P]. 2024-06-07.
HU Xiaoqian, LI Ling, SHI Zhenshuan, et al.A method for recovering lithium from spent lithium iron phosphate batteries: CN118145611A[P]. 2024-06-07.

[17] 黄锫齐,李立平,肖炜彬,等. 废旧磷酸铁锂正极粉脱锂后的磷铁渣经硝酸浸出除铝的研究[J]. 化工技术与开发, 2023(4):66-70.
HUANG Kengqi, LI Liping, XIAO Weibin, et al. Study on removal of aluminum from ferrous phosphate slag after lithium removal from waste lithium iron phosphate cathode powder by nitric acid leaching[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2023(4):66-70.

[18] HAN F, ZHOU L, FANG D F, et al. Alkali-enhanced polyvinylidene fluoride cracking to deeply remove aluminum impurities for regeneration of battery-grade lithium iron phosphate[J]. Chemical Engineering Journal, 2024,483:148973.

[19] 黄开良,温武深,黄乐,等. 从退役磷酸铁锂电池拆解极粉回收电池级磷酸铁研究[J]. 当代化工研究, 2023(2):28-30.
HUANG Kailiang, WEN Wushen, HUANG Le, et al. Research on recovery of battery grade iron phosphate from retired lithium iron phosphate battery dismantling pole powder[J]. Modern Chemical Research, 2023(2):28-30.

[20] 王鑫. 废旧磷酸铁锂电池正极材料的除杂与再生研究[D]. 镇江:江苏大学, 2024.
WANG Xin. Research on purification and recycling of cathode materials from used lithium iron phosphate batteries[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024.

[21] 陈涛,廖财斌,王跃林,等. 磷酸铁锂电池提锂后磷铁渣的除铝、铜杂质的方法:CN114920226A[P]. 2022-08-19.
CHEN Tao, LIAO Caibin, WANG Yuelin, et al. The method for removing aluminum and copper impurities from the iron-phosphate slag after extracting lithium from lithium-ion batteries: CN114920226A[P]. 2022-08-19.

[22] 李立平,黄锫齐,谭泽,等. 废旧磷酸铁锂提锂后磷铁渣的除铝方法及电池级磷酸铁的制备方法:CN113880063A[P]. 2022-01-04.
LI Liping, HUANG Jianji, TAN Ze, et al.Method for removing aluminum from phosphor-iron slag after extracting lithium from spent lithium iron phosphate and method for preparing battery-grade lithium iron phosphate: CN113880063A[P]. 2022-01-04.

[23] WU Y, ZHOU K G, ZHANG X K, et al. Aluminum separation by sulfuric acid leaching-solvent extraction from Al-bearing $LiFePO_4/C$ powder for recycling of Fe/P[J]. Waste Management, 2022,144: 303-312.

[24] 倪振松,陈敬波,许长威,等. 一种废旧磷酸铁锂回收过程中选择性深度除铝铜的方法:CN114934177A[P]. 2022-08-23.
NI Zhensong, CHEN Jingbo, XU Changwei, et al.A method for selectively and deeply removing aluminum and copper during the recycling process of spent lithium iron phosphate: CN114934177A[P]. 2022-08-23.

[25] FENG Y F, YANG L M, YANG G, et al. Carbon-mediated iron valence state transformation for deep aluminum removal toward battery-grade $FePO_4$ recycling[J]. Separation and Purification Technology, 2025,371:133417.

[26] XIE Y H, ZHANG F, XIANG S Y, et al. Thermal-enhanced deep removal of multiple impurities upon pH induction towards selective regeneration of high-purity iron phosphate[J]. Chemical Engineering Journal, 2025,515:163476.

引用本文:罗碧云,颜群轩,谭群英,等. 退役磷酸铁锂电池回收中铁铝分离技术研究进展[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):261-267.

LUO Biyun, YAN Qunxuan, TAN Qunying, et al. Progress in iron-aluminum separation technologies in spent lithium iron phosphate battery recycling[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):261-267.