

# 废旧磷酸铁锂电池正极材料回收的研究进展

李 雪, 陈 功\*, 汪渝涵, 杨常委  
(沈阳工业大学化工装备学院, 辽宁 辽阳 111000)

**摘要:**对磷酸铁锂电池正极材料回收方法的研究进展进行梳理,系统总结了湿法冶金、火法冶金、深共晶溶剂(deep eutectic solvents, DES)、直接再生法、电化学法以及机械化学法的优势及缺陷。分析表明,湿法虽然回收效率高技术成熟,但废液处理成本高且对环境造成污染;DES和直接再生法因绿色高效的工艺增强了经济可行性;机械化学法虽可在温和条件下实现高效提取,但反应周期长以及研磨污染限制了规模化应用。经济分析表明,绿色浸出工艺和高效复合联用技术以及利用人工智能实现人机协作的自动化模式是锂电池回收领域未来的可持续发展方向。

**关键词:**湿法回收;火法回收;废旧磷酸铁锂电池;深共晶溶剂;直接再生

中图分类号:TK02;X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)10-0052-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.010

## Research progress on recycling of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries

LI Xue, CHEN Gong\*, WANG Yu-han, YANG Chang-wei

(School of Chemical Equipment, Shenyang University of Technology, Liaoyang 111000, China)

**Abstract:** This paper reviews recent advances in recycling technologies for  $\text{LiFePO}_4$  cathode materials. The advantages and limitations of hydrometallurgical, pyrometallurgical, deep eutectic solvent (DES), direct regeneration, electrochemical, and mechanochemical methods are systematically summarized. The results indicate that although hydrometallurgical processes are technologically mature and offer high recovery efficiencies, they suffer from high wastewater treatment costs and environmental burdens. In contrast, DES-based approaches and direct regeneration methods enhance economic feasibility owing to their green and efficient processes. Mechanochemical methods can achieve efficient extraction under mild conditions; however, their large-scale application is limited by long reaction cycles and contamination associated with the grinding process. Finally, economic analysis suggests that green leaching processes, highly efficient hybrid technologies, and automated human-machine collaborative modes enabled by artificial intelligence represent promising directions for the sustainable development of lithium-ion battery recycling.

**Key words:** hydrometallurgical recovery; pyrometallurgical recovery; spent  $\text{LiFePO}_4$ ; deep eutectic solvents; direct regeneration

随着化石能源和矿产资源的持续消耗,新能源汽车的快速发展已成为缓解能源与环境压力的重要途径。然而,锂离子电池设计寿命通常为 5~8 a,早期投放市场的动力电池正陆续进入退役阶段<sup>[1]</sup>。在多种动力电池体系中,磷酸铁锂电池(lithium iron phosphate battery, LFP)因安全性高、循环稳定性好及成本优势,被广泛应用于新能源汽车和储能领域<sup>[2]</sup>。到 2030 年,全球动力及储能电池回收市场规模预计超过 1 000 GWh,其中 LFP 电池占比约为 58%<sup>[3]</sup>。当前退役的锂离子电池以 LFP 电池为主,2025 年退役电池电量为 24.1 GWh,未来仍将占据较高比例。大量退役电池若处置不当,将对环境造成潜在风险;与此同时,其正极材料中富含价金属,具备显著的资源回收价值。通过高效回收与再

生,不仅可减少环境污染,还可缓解关键金属资源短缺,降低电池制造成本,对推动锂电池产业的绿色与可持续发展具有重要意义。废旧 LFP 电池回收工艺通常包括预处理和深度处理 2 个阶段。预处理主要涉及放电、拆解和破碎等过程,而深度处理则以冶金回收和直接再生为主要技术路线。冶金回收以湿法工艺和火法工艺为代表,主要目标是回收锂、铁、磷等金属元素;直接再生技术则通过修复材料结构和补充活性锂,实现正极材料性能的恢复。近年来,深共晶溶剂(deep eutectic solvent, DES)因环境友好性和良好的选择性浸出能力,在废旧 LFP 回收领域受到广泛关注。此外,电化学法、机械化学法等新兴技术也成为研究热点。重点分析湿法冶金、火法冶金、深共晶溶剂、直接再生、电化学及机械化学等方

收稿日期:2025-12-26;修回日期:2026-08-03

基金项目:辽宁省科技计划联合计划(自然科学基金-面上项目)(2024-MSLH-345);沈阳工业大学高校基本科研项目(LJ212410142136)

作者简介:李雪(2001-),女,硕士生;陈功(1984-),男,博士,副教授,研究方向为熔盐电化学冶金、冶金过程强化、固废资源回收利用,通讯联系人,chengong072@163.com。

法的技术优势和局限性,并结合经济成本分析,对未来高效、绿色和智能化回收技术的发展方向进行展望以及为后来的研究者提供系统的理论指导。

## 1 废旧磷酸铁锂电池回收及预处理

### 1.1 废旧磷酸铁锂电池结构

废旧 LFP 电池主要由正极、负极、集流体、电解质、隔膜及外壳等部分组成。正极通常为涂覆磷酸铁锂和聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 黏结剂的铝箔,负极为涂覆碳基材料等活性物质的铜箔;电解液一般由六氟磷酸锂( $\text{LiPF}_6$ )溶解于碳酸酯类有机溶剂中组成;隔膜多采用聚丙烯或聚乙烯材料以防止电极短路,外壳通常为铝合金等金属材料<sup>[4]</sup>。废旧磷酸铁锂电池结构示意图如图 1 所示。

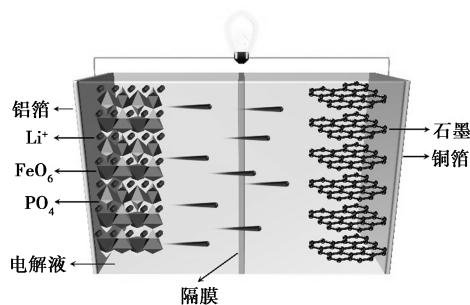


图 1 废旧磷酸铁锂电池结构示意图

### 1.2 预处理

废旧锂离子电池 (lithium ion battery, LIBs) 预处理过程通常包括放电、拆解、破碎等环节<sup>[5]</sup>。为了避免在处理过程中发生爆炸的危险,使用过的 LFP 首先通过完全放电剩余的存储能量来停用。放电方式可分为电放电和溶液放电。溶液放电时,将电池浸没于酸、碱溶液中,通过化学反应加速放电,同时溶液对电池外壳的腐蚀也有助于放电过程,其残留电压通常更低。在溶液放电方法中,盐溶液由于高性能和安全操作被广泛应用<sup>[6]</sup>。拆解废旧 LFP 电池有人工拆解和机械拆解 2 种方法。人工拆解虽然细致但耗时费力,机械拆解能避开有毒物质及电解液对工作人员的危害。然而电池是在各种设备中生产和使用,其结构和材料也没有统一标准,使得电池自动化预处理变得困难,智能拆分系统需要完成对废旧电池的类型、尺寸等的分类<sup>[7]</sup>。但是最近有研究表明,传感器集成系统以及机械设计方面已经在拆除核工业装备方面取得了实际成果<sup>[8]</sup>。综上所述,开发智能化的人机协作拆解技术,对于提升拆解效率和操作安全性都至关重要。实现废旧 LFP 电

池拆解过程的自动化和智能化是一个重要发展方向,这将会减少人力资源和时间的浪费。

## 2 废旧磷酸铁锂电池正极材料有价金属回收

### 2.1 火法回收

火法冶金即在高温下将电池中的有价金属转化为合金<sup>[9]</sup>。此技术可以分为直接焙烧与辅助焙烧 2 类,然而直接焙烧一般要求超过 1 000℃ 的高温,因此能耗较高。Wen 等<sup>[10]</sup>在焙烧过程中,以  $\text{NaHSO}_4$  为添加剂,在 LFP 和  $\text{NaHSO}_4$  的摩尔比为 1.00 : 1.25、温度 400℃、时间 5 h 的条件下,锂的浸出率达到 99.08%。然而,火法冶金过程存在有毒气体 (氟化氢、含氯有毒物、硫氧化物等) 排放、能耗高的问题。因此,降低能耗或减少有毒气体排放是火法冶金未来的发展方向。

### 2.2 湿法回收

湿法回收是一种通过湿法冶金技术,从废旧 LFP 正极材料中提取锂、铁、磷等有价金属的方法<sup>[11]</sup>。湿法回收工艺具有选择性高、金属回收效率高且能耗低的优点,所以它是回收废  $\text{LiFePO}_4$  电池首选方法。湿法浸出过程选用的无机酸浸出剂主要有硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )、磷酸 ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )、盐酸 ( $\text{HCl}$ ) 等,有机酸浸出剂主要有柠檬酸 ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ )、乙酸 ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ )、甲酸 ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ ) 和草酸 ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ ) 等。范西宁等<sup>[12]</sup>以硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 为浸出剂、双氧水为氧化剂,通过控制  $\text{H}_2\text{SO}_4$  用量、双氧水用量、浸出温度和浸出时间研究对锂浸出率的影响。得出在最优条件下锂元素的浸出率可达 97.12%。盛莉莉等<sup>[13]</sup>以盐酸为浸出剂,双氧水为氧化剂,得出在盐酸浓度 1.5 mol/L、浸出温度 30℃、固液比为 1:20 和双氧水用量 1.6 mol/L 条件下,浸出时间 1 h,所得锂浸出率为 98.69%。谢玉昆等<sup>[14]</sup>采用磷酸为浸出液,当磷酸浓度为 3.41 mol/L,固液比为 1:5,搅拌速度为 500 r/min 条件下,温度 70℃,浸出时间 3 h,得到的锂浸出率为 94.16%。Li 等<sup>[15]</sup>研究表明,草酸对锂和铁的浸出率分别为 98% 和 92%。此外,有机酸与氧化剂的结合也能有效浸出材料中的锂。Wang 等<sup>[16]</sup>通过优化浸出工艺参数,在丙酮酸 ( $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$ ) 浓度为 3.0 mol/L,过氧化氢添加量为 2 mL,固液比为 1:10,反应温度 80℃,反应时间 0.33 h 的条件下,锂的浸出率达到 96.56%。Hu 等<sup>[17]</sup>采用焦硫酸钾 ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ ) 作为浸出剂,在最优条件下得到 98.33% 的锂浸出率,铁的浸出率保持在 0.5% 以下,实现了锂的选择性浸出。回收废旧 LFP 时,在不同

浸出体系下,锂的浸出率如表 1 所示。

表 1 废旧 LFP 湿法回收的锂浸出率

| 浸出剂                                                          | 时间/h | 温度/℃ | 固液比    | 锂浸出率/% |
|--------------------------------------------------------------|------|------|--------|--------|
| $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ [12]          | 1.00 | 25   | 1:3    | 97.12  |
| $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2$ [13]                     | 1.00 | 30   | 1:20   | 98.69  |
| $\text{H}_3\text{PO}_4$ [14]                                 | 3.00 | 70   | 1:5    | 94.16  |
| $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ [15] | 1.00 | 80   | 1:16.7 | 98.00  |
| $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ [16] | 0.33 | 80   | 1:10   | 96.56  |
| $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}_2$ [17] | 1.00 | 60   | 1:100  | 98.33  |

综上所述,采用湿法回收工艺处理废旧 LFP 正极材料时,锂浸出率均超过 90%。和有机酸体系比较,无机酸作为浸出剂会伴随大量酸性废液的产生,对环境造成严重污染。因此,在研究废旧 LFP 正极材料湿法回收的方法时,应探索环境友好型、工艺流程简单且具有经济可行性的绿色回收技术。

### 2.3 深共晶溶剂

深共晶溶剂(DES)是近年来出现的一类新型绿色分离溶剂,通常由氢键受体(HBA)和氢键供体(HBD)按照精确的摩尔比混合而成,从而形成熔点

明显低于其单个组分的共晶混合物[18]。可以在低腐蚀性和使用环境友好的化学品的条件下选择性和高效地浸出 LFP 正极最主要成分如锂、铁。Lin 等[19]提出一种利用氯化胆碱( $\text{C}_5\text{H}_{14}\text{ClNO}$ )和二水合草酸( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )组成的 DES 回收废旧 LFP 的方法,在温和条件下( $106^\circ\text{C}$ , 110 min, 固液比为 1:50),利用响应面法对工艺进行优化,最终锂的浸出率为 95.3%,铁的浸出率为 85.2%。Wang 等[20]以乳酸(EG)为氢键受体,乙二醇(LA)为氢键供体并加入水作稀释合成 DES,在室温下该溶剂对 LFP 正极材料在 4 min 内实现了超过 99.98% 的分离效率。图 2(a)展示了 LA 和 EG 通过氢键形成 DES;图 2(b)中 DES 与铝箔之间的反应导致  $\text{Al}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_3$  形成致密的钝化层,铝箔表面生成了  $\text{Al}(\text{LA})_3$ ,抑制进一步腐蚀;图 2(c)中 DES 与 PVDF 形成氢键,使正极表面的 PVDF 失活。DES 配方可以在保持  $\text{FePO}_4$  (阴极再合成的关键前驱体)结构完整性的同时获得具有竞争力的锂浸出率。但目前 DES 在 LFP 回收中主要存在浸出时间长、溶剂黏度和热敏性使系统设计复杂化等问题,因此有必要优化 DES 的配方。

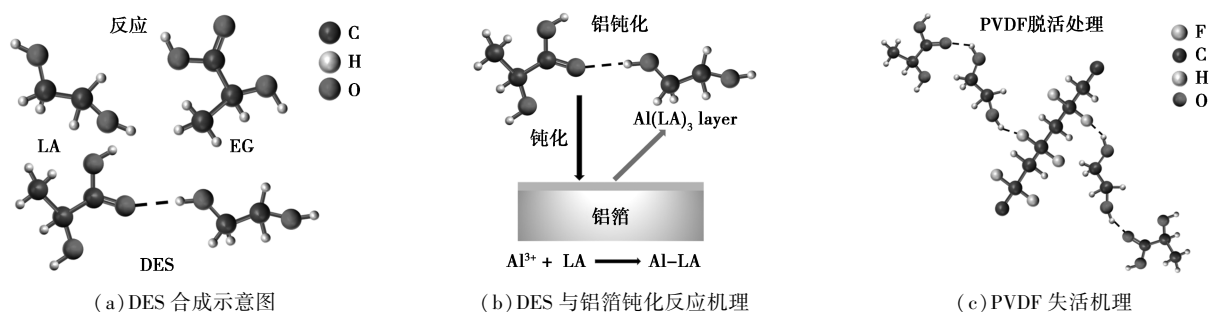


图 2 DES 的形成及其与铝箔、PVDF 作用机理示意图

### 2.4 电化学法

电化学法借助对电压、电流及电解质的调控,溶解或沉积特定元素,从而选择性浸出某种元素[21]。王子璇等[22]采用磷酸体系电解和分步沉淀的方法,制备二水合磷酸铁和磷酸锂。结果表明,电解电压为 2.5 V,磷酸电解液浓度为 0.6 mol/L,先浸泡 1 h 后再电解 0.5 h,得到锂的浸出率为 95.6%,铁的浸出率为 91.3%。Zhu 等[23]将混合粉末固定在阳极载体上,作为多孔阳极参与电解。结果表明,在 1.9 V 电压、25℃ 条件下,锂和铁浸出率分别为 92.72%、0.12%。与湿法冶金相比,电化学法无需添加化学试剂,凸显环保优势。但高能耗增加了成本,限制大规模应用。有望与湿法和火法等方法形成高效复合联用技术,即在传统废旧电池回收技术基础上,结合多种回收方法优点衍生出新型技术,共同构建可持

续的电池回收体系。

### 2.5 机械化学法

机械化学法(mechanochemical, MC)是一种利用机械能,通过剪切、研磨、挤压和冲击等机械措施,诱导化学反应的技术[24]。Yang 等[25]使用乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)作为研磨剂,再以低浓度  $\text{H}_2\text{SO}_4$  从废旧 LFP 中提取铁与锂,浸出率分别达到 98% 和 95%。EDTA-2Na 虽能高效螯合金属离子,但同时也存在价格昂贵和操作过程复杂尤其是浸出与活化分离等问题,故研究者们找出了更经济高效的方法。Fan 等[26]使用了更环保的替代品草酸,将草酸粉末和 LFP 共球磨,同时加入磷酸破坏 LFP 的结构(反应机理如图 3 所示)。在转速 500 r/min、球磨时间 2 h、球与粉的质量比为 20:1 时,锂和铁的浸出率分别是 99% 和 94%。机械化学法无需高温或

者强酸就可以高效浸出金属,相较于其他方法具有能耗低和环保性好等优点,但同时存在对设备磨损严重、操作条件严苛、成本高等问题,从而限制大规模应用。

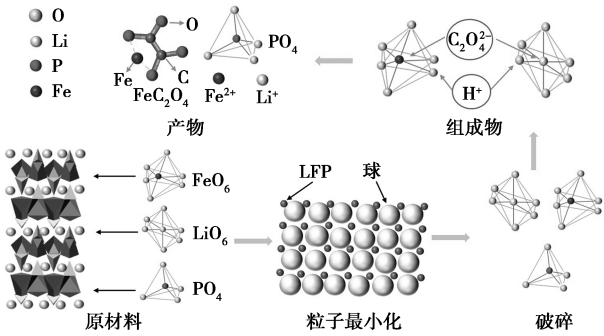


图3 利用草酸从废旧 LFP 中回收锂和铁的过程

3 直接再生技术

由于 LFP 稳定的橄榄石结构保证了锂脱嵌的可逆性,所以直接向正极补充活性锂和其他损失的元素可以恢复电化学性能。直接再生法是一种直接修复阴极材料和结构的方法,主要包括固相烧结法和水热法 2 种方法。固相烧结法一般指高温固相合成,按化学计量比,向回收产物中添加缺失的金属元素,经过混合后焙烧,使得缺失的金属元素重新嵌入 LFP 晶格<sup>[27]</sup>。Yu 等<sup>[28]</sup>采用固相烧结法利用铝杂质取代橄榄石结构中的部分阳离子位点,经铝掺杂再生的 LFP 表现出优异的电化学性能。固相法避免了使用大量的酸碱等化学试剂,能有效恢复材料结构和电化学活性,但 LFP 在热处理过程中会产生氟化氢等有毒气体,将对操作人员的安全造成威胁。为了克服固态焙烧过程中产生有毒气体的缺点,采用水热法在废 LFP 中采用溶液介质补充锂。水热法是指在特制的密闭反应容器(高压釜)中,以水为主要反应介质,通过加热创造高温高压的反应环境,在超临界状态下合成电极材料的方法。Jing 等<sup>[29]</sup>在最优反应条件下经进一步水热法再生的 LFP 具有优异的放电性能,容量保持率达到 98.6%。与复杂的固相烧结法相比,水热法反应条件温和且工艺流程简单,锂、铁、磷等有价值金属元素回收率高,有效降低能源损耗。然而水热法需要专门的设备,如高压灭菌器或其他耐压容器以承受高温高压条件,这也限制了其广泛应用。

4 经济成本分析

结合相关文献和市场报告,对 LFP 正极材料回

收进行经济分析,针对目前最主要的几种方法进行评估。LFP 电池回收的经济可行性取决于一系列成本投入,包括预处理费用、化学品消耗、设备折旧和维护以及劳动力成本。由于高温操作以及熔炉基本设施,火法冶金加工材料总成本为 26.8~44.4 元/kg。湿法冶金的成本分配更均衡,但化学和废物处理导致 26.0~42.2 元/kg 费用。直接再生法能源需求和化学品消耗显著降低,总费用低至 14.8~25.3 元/kg,且工艺简单。通过对比,直接再生法回收具有显著成本优势(表 2)<sup>[30]</sup>。

表 2 LFP 回收方法的成本比较 元/kg

| 成本构成部分        | 火法冶金      | 湿法冶金      | 直接再生法     |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 能源(运营成本)      | 10.6~17.6 | 5.6~8.4   | 2.8~5.6   |
| 化学品(运营成本)     | 1.4~3.5   | 5.6~10.6  | 1.4~2.8   |
| 劳工与运营(运营成本)   | 5.6~8.4   | 4.9~7.0   | 3.5~5.6   |
| 设备与折旧(资本支出)   | 8.5~12.7  | 7.0~10.6  | 5.6~8.4   |
| 废物处理与处理(运营成本) | 0.7~2.1   | 2.8~5.6   | 1.4~2.8   |
| 总费用           | 26.8~44.4 | 26.0~42.2 | 14.8~25.3 |

5 结论与展望

系统综述了废旧 LFP 电池正极材料回收技术的研究进展,并对不同方法的技术特征与经济可行性进行了对比分析。现有回收路线在回收效率、环境影响及成本控制方面各具优势,但尚未形成同时兼顾高效率、低能耗与环境友好性的通用解决方案。火法回收技术工艺成熟,已实现工业化应用,但高能耗及有毒气体排放限制了进一步推广。湿法回收因浸出效率高而被广泛研究,但酸性浸出体系带来的废液处理和环境风险仍是主要瓶颈。相比之下,深共晶溶剂(DES)在选择性浸出和绿色化方面展现出明显优势,但体系黏度高、浸出时间长及规模化经济性仍有待优化。直接再生技术能够在保留 LFP 晶体结构的前提下恢复材料电化学性能,其中固相烧结法适于规模化生产,而水热法在温和条件下表现出更高的结构均衡性,但设备成本和操作复杂性限制了工业应用。电化学法和机械化学法在减少化学试剂消耗方面具有潜力,但设备放大、能耗控制以及过程稳定性仍需进一步突破。机械化学法虽可在温和条件下实现高效提取,但反应周期长及研磨污染限制规模化应用。综合经济分析表明,直接再生技术在成本控制方面具有明显优势,而绿色浸出体系与多工艺协同集成有望进一步提升整体经济性与资源利用效率。未来研究应重点关注绿色高选择性浸

出剂的开发、多技术复合联用工艺的构建,以及人工智能辅助的自动化拆解与过程优化,从而推动 LFP 电池回收向高效、低碳和智能化方向发展。

### 参考文献

- [1] Nie Y, Wang Y, Li L, *et al.* Literature review on power battery echelon reuse and recycling from a circular economy perspective[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(5): 4346.
- [2] Wu J, Zheng M, Liu T, *et al.* Direct recovery: A sustainable recycling technology for spent lithium-ion battery[J]. Energy Storage Materials, 2023, 54: 120–134.
- [3] 崔祥光, 闫珂, 刘贵清, 等. 废旧磷酸铁锂正极回收与利用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(8): 116–120, 143.
- [4] Ji H, Wang J, Ma J, *et al.* Fundamentals, status and challenges of direct recycling technologies for lithium ion batteries[J]. Chemical Society Reviews, 2023, 52(23): 8194–8244.
- [5] 王韵珂, 延卫, 万邦隆, 等. 废旧锂电池磷酸铁锂正极材料回收工艺研究进展[J]. 云南化工, 2022, 49(6): 1–6.
- [6] Zhou W, Fu D, Liu W, *et al.* Research progress on recycling technology of waste lithium iron phosphate power battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(6): 1854.
- [7] Yun L, Linh D, Shui L, *et al.* Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 136: 198–208.
- [8] Malleron N, Guerin M, Roulet D, *et al.* European collaborative efforts to achieve effective, safe, and cost-controlled dismantling of nuclear facilities[J]. European Physical Journal N (Nuclear Science & Technologies), 2023; 9.
- [9] Cui K, Zhao M C, Li Y, *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.
- [10] Wen Q, Liu Q. High-selective lithium extraction from spent LiFePO<sub>4</sub> by battery roasting-water leaching method[J]. JOM, 2023, (9): 3655–3662.
- [11] 刘超, 刘勇, 陈志强, 等. 某废旧锂离子动力电池混合电极粉末分选试验[J]. 有色金属工程, 2023, 13(11): 64–69.
- [12] 范西宁, 严新星, 陈欣, 等. 绿色高效回收废旧磷酸铁锂黑粉制备电池级碳酸锂[J]. 广东化工, 2025, 52(7): 14–17.
- [13] 盛莉莉, 周自圆, 陈安琪, 等. 盐酸-双氧水浸出废旧磷酸铁锂电池正极材料中锂的研究[J]. 盐湖研究, 2025, 33(1): 87–92.
- [14] 谢玉昆, 夏宇博, 宋刘斌, 等. 废旧磷酸铁锂电池回收工艺研究[J]. 电源技术, 2024, 48(10): 2000–2006.
- [15] Li L, Lu J, Zhai L, *et al.* A facile recovery process for cathodes from spent lithium iron phosphate batteries by using oxalic acid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 219–225.
- [16] Wang Y H, Wu J J, Hu G C, *et al.* Recovery of Li and Fe from spent lithium iron phosphate using organic acid leaching system[J]. Trans. Nonferrous Met Soc China, 2024, 34(336): 346.
- [17] Hu H, Yao Y, Meng X, *et al.* Selective lithium recovery and regeneration of LiFePO<sub>4</sub> from spent lithium-ion batteries: An efficient and green process[J]. Journal of Power Sources, 2025, 631: 236179.
- [18] Ebrahimi E, Kordloo M, Khodadadmahmoudi G, *et al.* Solvometallurgical recycling of spent LiNi<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub> (NCM) cathode material using ternary choline chloride-ethylene glycol-p-toluenesulfonic acid deep eutectic solvent[J]. Hydrometallurgy, 2023, 222: 106184.
- [19] Lin Y, Wang T, Gao C, *et al.* Direct and low-temperature regeneration of degraded LiFePO<sub>4</sub> cathodes at ambient conditions using green and sustainable deep eutectic solvent[J]. Advanced Science, 2025, 12(28): 2504683.
- [20] Wang T, Yu W, Chen G, *et al.* Lactic acid-ethylene glycol system driven materials stripping for efficient and eco-friendly recycling of spent LiFePO<sub>4</sub> cathode materials[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2026, 250: 98–107.
- [21] Zhao T, Mahandra H, Marthi R, *et al.* An overview on the life cycle of lithium iron phosphate: Synthesis, modification, application, and recycling[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 485: 149923.
- [22] 王子璇, 李俊成, 李金东, 等. 废磷酸铁锂正极材料资源化回收工艺[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 45–52.
- [23] Zhu G, Yu D, Meugang E F, *et al.* Powder electrolysis for direct selective lithium recovery from spent LiFePO<sub>4</sub> materials[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 199: 107828.
- [24] Fiss B G, Richard A J, Douglas G, *et al.* Mechanochemical methods for the transfer of electrons and exchange of ions: Inorganic reactivity from nanoparticles to organometallics[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(14): 8279–8318.
- [25] Yang Y, Zheng X, Cao H, *et al.* A closed-loop process for selective metal recovery from spent lithium iron phosphate batteries through mechanochemical activation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(11): 9972–9980.
- [26] Fan E, Li L, Zhang X, *et al.* Selective recovery of Li and Fe from spent lithium-ion batteries by an environmentally friendly mechanochemical approach[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(8): 11029–11035.
- [27] Forte F, Pietrantonio M, Pucciarmati S, *et al.* Lithium iron phosphate batteries recycling: An assessment of current status[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2021, 51(19): 2232–2259.
- [28] Yu H, Zhao D, Chen K, *et al.* A novel method to repair and upgrade spent LFP cathode material by inherent Al impurity doping[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 223: 108523.
- [29] Jing Q, Zhang J, Liu Y, *et al.* Direct regeneration of spent LiFePO<sub>4</sub> cathode material by a green and efficient one-step hydrothermal method[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(48): 17622–17628.
- [30] Azimi G, Zadeh A H M. Recycling of spent lithium iron phosphate batteries—a review of processes, economics, and carbon footprint[J]. Waste Management, 2026, 209: 115203. ■