

丁二酸与过氧化氢协同作用在废旧磷酸铁锂电池回收中的应用研究

杨鹏飞, 梁慧辰, 陆万里, 叶有明, 谢雪珍, 陈燕萌, 王小淑

(广西科技师范学院 化学与材料工程学院, 广西 来宾 546100)

摘要:废旧磷酸铁锂电池的回收对缓解资源短缺和降低环境污染具有重要意义。研究了用丁二酸/过氧化氢体系从废旧磷酸铁锂电池中回收锂, 考察了浸出过程中丁二酸浓度、过氧化氢添加量、液固体积质量比、浸出温度和时间对锂浸出率的影响, 并通过动力学分析和扫描电子显微镜(SEM)表征, 揭示了浸出机制。试验结果表明, 在丁二酸浓度 0.8 mol/L、过氧化氢添加量为 2%、液固体积质量比为 4 mg/1 mL、浸出温度 80 °C、浸出时间 40 min 最佳条件下, Li 浸出率达 98% 以上, 而 Fe 浸出率仅在 2% 以内。动力学分析结果表明, 浸出过程主要受内扩散控制。该体系具有高效性与可持续性, 可为实现废旧磷酸铁锂电池的绿色回收提供一种可行路径。

关键词:丁二酸; 过氧化氢; 有机酸; 废旧锂电池; 磷酸铁锂; 浸出; 锂

中图分类号:TF803.21; TF826.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2617(2026)03-0317-07

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.006

随着能源转型与可再生能源的发展, 锂离子电池因具有能量密度高、寿命长和安全性高等优势广泛应用于电动汽车、储能和便携式设备生产中^[1-3]。其中, 磷酸铁锂(LiFePO₄)电池因热稳定性好、成本低、环境友好而成为锂离子电池的主流产品之一^[4]。然而, 磷酸铁锂电池的大规模使用, 导致相应的废旧电池数量持续增加, 预计到 2030 年全球报废量将达数千万吨^[5], 若未对其加以有效回收, 不仅会造成锂、铁、磷等资源浪费, 还可能因金属离子和电解液泄漏给环境带来风险。因此, 针对磷酸铁锂电池开发高效、绿色的回收技术已成为资源循环和可持续发展的关键。目前, 针对废旧锂离子电池的回收方法主要包括物理法、火法冶金和湿法冶金等^[6]。物理法通过机械粉碎与分选可实现电池组分的初步分离, 但难以获得高纯度的目标产物^[7]; 火法冶金具有处理量大和工艺成熟的优点, 但存在能耗高、二次污染严重

等问题^[8]; 相比之下, 湿法冶金因其能耗低、条件温和、回收率高而受到广泛关注。传统湿法工艺大多采用无机强酸(如硫酸、盐酸、硝酸)作为浸出剂, 并辅以还原剂促进反应, 通常会引发腐蚀性强、环境风险高及处理成本高等问题, 难以满足未来绿色冶金的发展需求^[9-10]。因此, 开发新型的低毒、可降解、有选择性的浸出体系具有重要意义。

近年来, 有机酸因具有可再生和环境友好等优势得到了广泛关注与研究, 如枸橼酸、草酸和苹果酸等已应用于废旧钴酸锂电池、三元锂电池及磷酸铁锂电池正极材料的回收^[11-12]。这些有机酸既能提供质子促进金属溶解, 又能与金属离子配合, 提高浸出效率。此外, 在体系中加入温和氧化剂, 还有助于改善动力学条件, 加快浸出过程。过氧化氢作为一种温和的氧化剂, 氧化性强, 分解产物无害, 且能加速过渡金属价态转化, 因此在湿法冶金中得到了广泛应用。废旧磷酸铁锂的橄榄

收稿日期: 2025-12-23; 修订日期: 2026-01-19

基金项目: 2025 年广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2025KY0904); 2025 年度广西科技师范学院创新团队(GXKS2025QNTD15); 冶炼危废渣稀散金属高值化利用重点实验室(GXKSKYPT2025014); 广西科技师范学院青年基金项目(GXKS2025ZD021); 2024 年度广西科技师范学院校级创团队(GXKS2024QNTD12)。

第一作者简介: 杨鹏飞(1993—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为湿法冶金。

通信作者简介: 王小淑(1989—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为湿法冶金。E-mail: 360050592@qq.com。

石型结构稳定、Fe—O 与 P—O 键能高,导致其锂浸出动力学缓慢、选择性浸出困难,因此相较于钴酸锂电池和三元锂电池的回收更具有挑战性。目前,有关磷酸铁锂电池的相关研究有限,已有研究多集中在工艺参数优化方面,而对反应机制及界面过程的系统认识仍显不足。

丁二酸是一种低毒、易降解的二元有机酸,兼具较强配合能力和良好溶解性,已在部分金属氧化物的浸出研究中展现出良好的应用潜力^[13];但目前有关其在废旧磷酸铁锂浸出领域的研究报道较少,相关作用机制也尚未得到系统阐明。丁二酸分子结构中含有两个羧基,可在反应过程中持续提供质子,并与金属离子形成稳定配合物,降低反应能垒,从而促进锂的释放。若将丁二酸与过氧化氢协同使用,可通过质子供给、配合作用及氧化还原过程的耦合作用,在温和条件下实现磷酸铁锂中锂的高效选择性浸出。目前,关于丁二酸/过氧化氢体系在废旧磷酸铁锂浸出过程中动力学行为、界面反应特征及材料结构演变的研究仍较为缺乏,开展系统的试验研究与机制分析十分必要。因此,试验研究了以丁二酸/过氧化氢体系为浸出剂,从废旧磷酸铁锂电池中回收锂。系统考察了丁二酸浓度、过氧化氢添加量、液固体积质量比、浸出温度和时间等关键因素对锂浸出率的影响。通过动力学建模与扫描电子显微镜(SEM)表征,揭示了浸出过程中可能的控制步骤与反应机制。旨在为磷酸铁锂电池的资源化回收提供一种高效、环保的浸出方法,从而进一步推动废旧锂电池回收产业的绿色可持续发展。

1 试验部分

1.1 试验原料、试剂与仪器

试验原料:废旧磷酸铁锂电池,来自深圳卓能新能源股份有限公司,氯化钠溶液放电处理后,通过手动拆解等方法进行预处理,得到正极材料样品。由 X 射线衍射(XRD)分析结果(图 1)可知,该正极材料样品的衍射峰与磷酸铁锂的标准卡片谱图一致。

试验试剂:丁二酸,购自山东科源生化有限公司;过氧化氢(30%),购自成都金山化学试剂有限公司。所有试剂均直接使用,无须提纯。

主要仪器:原子吸收分光光度计,日本,AAS-6300CF 型;X 射线衍射仪(XRD),日本,Ultima IV 型;

场发射扫描电镜(SEM),捷克,MIRALMS 型。

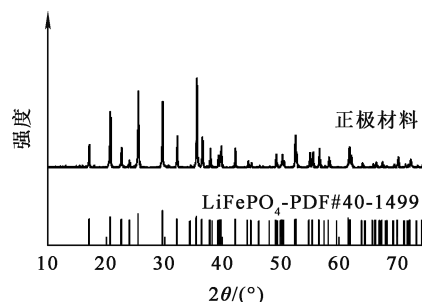


图 1 LiFePO₄ 正极材料 XRD 图谱

Fig. 1 XRD spectrum of LiFePO₄ cathode material

1.2 试验原理与方法

在丁二酸/过氧化氢体系中,磷酸铁锂的浸出过程主要依赖于丁二酸的离子交换作用和过氧化氢的氧化协同作用:丁二酸在溶液中解离产生 H⁺,与晶格中的 Li⁺ 发生交换,使 Li⁺ 从橄榄石骨架中释放并进入溶液,同时羧基对锂具有配合作用,降低自由 Li⁺ 活度并推动反应持续进行;与此同时,过氧化氢作为温和氧化剂,将晶格内的 Fe²⁺ 部分氧化为 Fe³⁺,形成热力学更稳定的 FePO₄。由于 FePO₄ 在丁二酸溶液中溶解度极低,铁得以稳定留在固相中,从而实现锂的选择性浸出。

所有浸出试验均在圆底烧杯中进行。先称取 500 mg 样品放入 100 mL 圆底烧瓶中,再按照一定固液质量体积比分别加入一定浓度的丁二酸溶液与过氧化氢,之后将烧瓶置于磁力搅拌的恒温水浴中,待温度升至设定值后,开始浸出反应。待反应结束后,固液分离,滤渣和滤液送分析,测定 Li 和 Fe 浓度。同时,另称取 500 mg 样品进行微波消解处理,测定样品中 Li 或 Fe 元素总含量,作为浸出率计算的基准。Li 或 Fe 元素浸出率计算公式如下:

$$x_B = \frac{\rho_B}{\rho_{B0}} \times 100\%$$

式中: x_B —Li 或 Fe 浸出率,%; ρ_B —滤液中 Li 或 Fe 元素质量浓度,μg/mL; ρ_{B0} —LiFePO₄ 正极材料被消解后 Li 或 Fe 元素质量浓度,μg/mL。

用原子吸收分光光度计测定不同条件下滤液中 Li 和 Fe 浓度;采用 X 射线衍射仪分析了固体粉末样品晶体结构,数据采集的衍射角(2θ)范围为 5°~80°,扫描速度为 2°/min;通过场发射扫描电镜分析样品表面形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 各因素对锂浸出率的影响

2.1.1 丁二酸浓度的影响

在过氧化氢添加量(相对于丁二酸溶液的体积,下同)为 2%、浸出时间 1 h、浸出温度 80 ℃、固液质量体积比为 4 mg/1 mL 条件下,丁二酸浓度对 Li 浸出率的影响如图 2 所示。

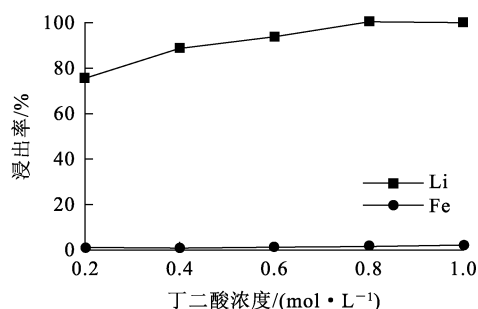


图 2 丁二酸浓度对锂浸出率的影响

Fig. 2 Effect of succinic acid concentration on leaching rate of Li

由图 2 看出:丁二酸浓度由 0.2 mol/L 增至 0.8 mol/L 时, Li 浸出率持续上升;当丁二酸浓度高于 0.8 mol/L 时, Li 浸出率基本趋于稳定,无明显变化;而 Fe 浸出率随丁二酸浓度增大仅有轻微波动,且低于 2%,表明丁二酸/过氧化氢体系对 Li 具有良好的选择性。这一趋势说明,增大丁二酸浓度可显著增强溶液中 H⁺ 和丁二酸配体的有效浓度,有利于 Li⁺ 的脱出与配合,同时在浓度考察范围内,对磷酸铁骨架中 Fe 的溶解作用极弱,从而实现了 Li 的选择性浸出。综合考虑浸出效果与经济性,选取 0.8 mol/L 作为后续试验中丁二酸浓度。

2.1.2 过氧化氢添加量的影响

在丁二酸浓度 0.8 mol/L、浸出温度 80 ℃、浸出时间 1 h、固液质量体积比为 4 mg/1 mL 条件下,添加量对 Li 浸出率的影响如图 3 所示。可以看出,过氧化氢对 Li 的浸出呈先显著升高后趋于平稳趋势:过氧化氢添加量由 0% 增至 2% 时, Li 浸出率由 82% 快速提升至 100% 左右;过氧化氢添加量进一步增大时, Li 浸出率基本无明显变化;随过氧化氢添加量增大, Fe 浸出率虽呈小幅升高趋势,但始终低于 2%。这主要是因为加入适量过氧化氢可增强体系氧化/活化作用,促

进 Li 从晶格中释放并进入溶液,且当过氧化氢添加量大于 2% 时,浸出过程接近平衡。综合考虑浸出效果、对锂的选择性与药剂利用率等,确定过氧化氢添加量以 2% 为宜。

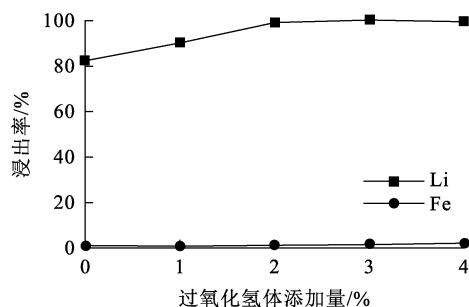


图 3 过氧化氢添加量对锂浸出率的影响

Fig. 3 Effect of hydrogen peroxide volume fraction on leaching rate of Li

2.1.3 固液质量体积比的影响

在丁二酸浓度 0.8 mol/L、浸出温度 80 ℃、浸出时间 1 h、过氧化氢添加量为 2% 条件下,固液质量体积比对 Li 浸出率的影响如图 4 所示。

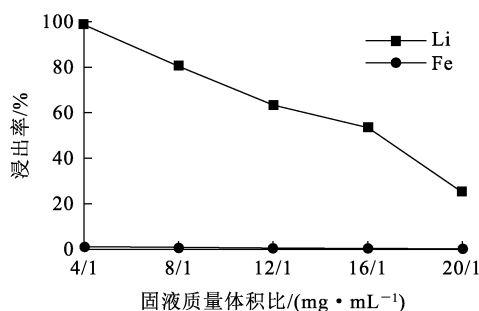


图 4 固液质量体积比对锂浸出率的影响

Fig. 4 Effect of solid mass to liquid volume ratio on leaching rate of Li

由图 4 看出,固液质量体积比对 Li 浸出率影响显著:固液质量体积比由 4 mg/1 mL 增至 20 mg/1 mL, Li 浸出率由 100% 降至 25%;随固液质量体积比增大, Fe 浸出率始终维持在极低水平且变化很小,说明该体系对 Fe 的抑制溶解能力较稳定,选择性较好。固液质量体积比增大意味着单位质量物料对应的丁二酸与过氧化氢相对投加量减少,酸耗更大,氧化剂消耗更快,使有效反应物浓度与浸出驱动力下降;同时固含量升高会使浆体传质条件变差,增大扩散阻力,导致颗粒易团聚或表面被产物覆盖,进一步降低 LiFePO₄

的界面反应与溶出速率。因此,为保证锂的浸出选择性,确定固液质量体积比以 4 mg/1 mL 为宜。

2.1.4 浸出温度的影响

在丁二酸浓度 0.8 mol/L、浸出时间 1 h、过氧化氢添加量为 2%、固液质量体积比为 4 mg/1 mL 条件下,浸出温度对 Li 浸出率的影响如图 5 所示。

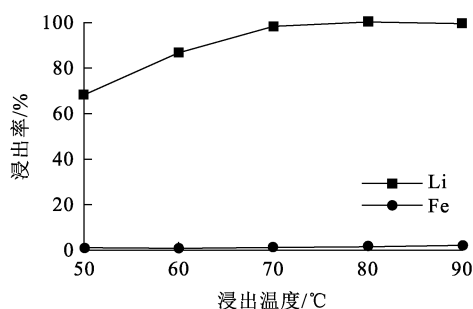


图 5 浸出温度对锂浸出率的影响

Fig. 5 Effect of leaching temperature on leaching rate of Li

由图 5 看出:温度由 50 °C 升至 70 °C 时,Li 浸出率由 68% 快速提升至 98%,表明升温显著强化了 LiFePO_4 的界面反应与传质过程;当温度进一步升至 80 °C 时,Li 浸出率接近 100%,继续升温变化不大,说明浸出已接近平衡;Fe 浸出率在整个温度考察范围内仅呈轻微上升趋势,但始终低于 2%,说明丁二酸/过氧化氢体系在升温条件下仍能保持对 Fe 的有效抑制,从而体现出较好的选择性浸出特征。综合考虑浸出效率与能耗/药剂利用率,确定浸出温度以 80 °C 为宜。

2.1.5 浸出时间的影响

在丁二酸浓度 0.8 mol/L、浸出温度 80 °C、过氧化氢添加量为 2%、固液质量体积比为 4 mg/1 mL 条件下,浸出时间对 Li 浸出率的影响如图 6 所示。可以看出:浸出时间由 10 min 延长至 40 min 时,Li 浸出率由 80% 快速升高至 96%;继续延长浸出时间至 60 min,Li 浸出率升幅明显减缓并趋于稳定,表明该体系中 Li 的浸出在反应前期主要受界面反应与传质过程控制;与此同时,Fe 浸出率仅有轻微上升,但均在浸出时间考察范围内始终低于 2%,说明丁二酸/过氧化氢体系在延长浸出时间条件下,仍能有效抑制 Fe 溶解,并保持对

Li 的高浸出选择性。综合考虑浸出效率与时间成本,确定浸出时间以 40 min 为宜。

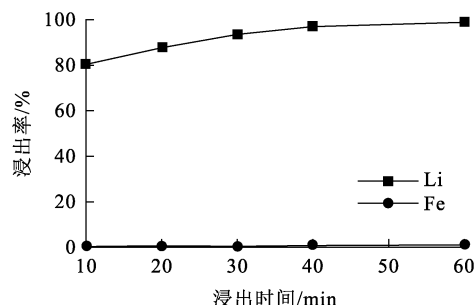


图 6 浸出时间对锂浸出率的影响

Fig. 6 Effect of leaching time on leaching rate of Li

2.2 浸出前、后的表征

2.2.1 SEM 表征

磷酸铁锂正极材料样品浸出前、后的 SEM 表征结果如图 7 所示。可以看出:浸出渣表面结构相对致密且完整,样品整体颗粒尺寸分布和形貌特征较浸出前未发生显著变化,且未观察到明显的颗粒破碎、结构塌陷或层状剥离现象。这表明该体系对磷酸铁锂电池中的锂具有良好的浸出选择性,在促使晶格中锂离子释放过程中,不会对磷酸铁骨架结构造成破坏,进而确保了浸出产物保持橄榄石型 FePO_4 的结构完整性,为浸出后材料的再利用提供了结构基础。

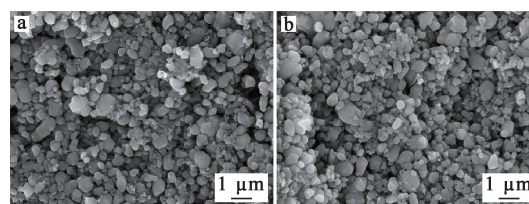


图 7 浸出前(a)、后(b)正极材料的 SEM 表征结果

Fig. 7 SEM characterization results of cathode materials before (a) and after (b) leaching

2.2.2 XRD 表征

浸出渣的 XRD 表征结果如图 8 所示。可以看出:浸出渣的 XRD 衍射峰与标准 FePO_4 (PDF # 97-009-2199) 基本一致,说明浸出渣主要为 FePO_4 ,磷酸盐骨架结构仍保持稳定;图谱中未出现明显的新杂质峰,表明丁二酸/过氧化氢体系以选择性脱锂为主,没有引起明显的骨架溶解或副产物生成。这表明该体系能够在保

持磷酸铁骨架稳定的前提下实现选择性脱锂,并使锂在温和条件下得到高效浸出,也进一步说明过氧化氢协同促进锂迁出具有一定应用潜力。该结论可为后续工艺优化与锂资源高效回收提供借鉴。

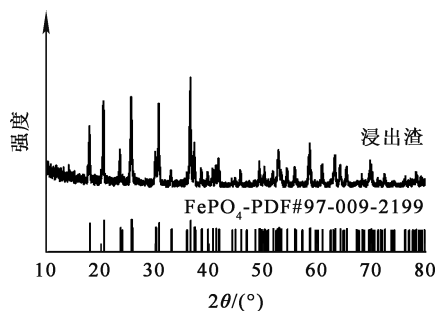


图 8 浸出渣的 XRD 图谱

Fig. 8 XRD pattern of leaching residue

2.3 浸出机制分析

明确反应的速率控制环节是阐明浸出机制的重要前提。借助湿法冶金动力学模型的分析,可系统揭示浸出反应的本质行为与演化特征。在固-液浸出体系中,反应过程通常可由不同控制机制加以描述,主要包括外扩散控制、内部扩散控制、化学反应控制及混合控制模型,方程如下^[14]:

外扩散控制模型:

$$x = k_1 t$$

内扩散控制模型:

$$1 - \frac{2}{3}x - (1-x)^{\frac{2}{3}} = k_2 t$$

化学反应控制模型:

$$1 - (1-x)^{\frac{1}{3}} = k_3 t$$

混合控制模型:

$$(1-x)^{-\frac{1}{3}} - 1 + \frac{1}{3} \ln(1-x) = k_4 t;$$

式中: x —Li 浸出率,%; k_1 —外扩散模型速率常数, min^{-1} ; k_2 —内扩散模型速率常数, min^{-1} ; k_3 —化学反应控制模型速率常数, min^{-1} ; k_4 —混合控制模型速率常数, min^{-1} ; t —浸出时间,min。

为阐明浸出反应的速率控制机制,对体系进行了系统的动力学研究。在优化条件下,考察了不同浸出温度及浸出时间对浸出行为的影响,并采用上述动力学模型对试验数据进行拟合分析,结果如图9~11所示。

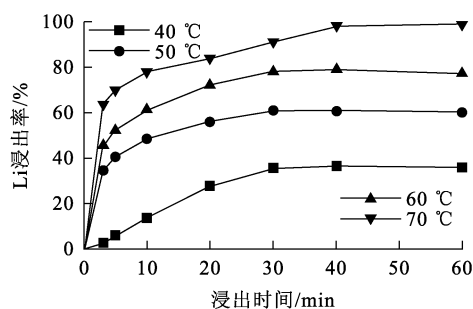


图 9 不同温度下 Li 浸出率随时间的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of leaching rate of Li with time at different temperatures

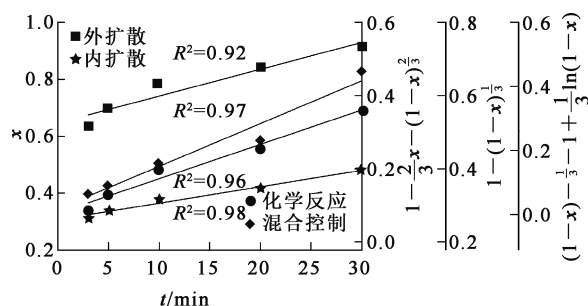


图 10 80 °C 下不同动力学模型的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of different kinetic models at 80 °C

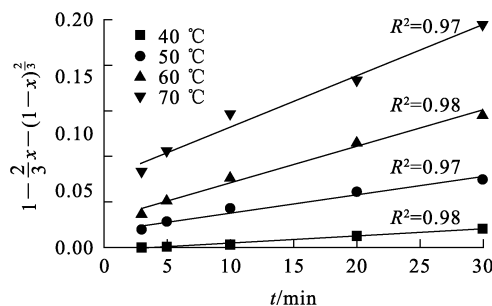


图 11 40~70 °C 下内扩散动力学模型拟合曲线

Fig. 11 Fitting curves of internal diffusion kinetics model at 40—70 °C

由图 9 可知,随反应时间延长,浸出率持续升高,且升高反应温度也能显著促进浸出进行。这主要归因于温度升高能增强溶质在固-液界面及颗粒内部的传质能力,并加快相关反应速率。进一步对比 80 °C 下不同动力学模型的拟合结果可知,内扩散控制模型拟合相关系数达 0.98(图 10),明显优于化学反应控制、外扩散控制及混合控制模型,表明浸出过程主要受内扩散模型控制。此外,在不同温度条件下,内扩散模型的拟合相关系数均高于 0.97(图 11),进一步证明该模型能合

理、稳定地描述该协同浸出体系的浸出动力学特征。

3 结论

以丁二酸/过氧化氢协同体系为浸出剂可从废旧磷酸铁锂电池正极材料中选择性浸出锂。在丁二酸浓度 0.8 mol/L、过氧化氢添加量为 2%、固液质量体积比为 4 mg/1 mL、浸出温度 80 °C、浸出时间 40 min 最佳条件下,锂浸出率超过 98%,而铁浸出率低于 2%,浸出效果较好。动力学分析结果表明,浸出过程主要受内扩散模型控制,表明锂离子的传质行为在反应中起主导作用。SEM 表征结果进一步证实,浸出前后材料的颗粒形貌和整体结构基本保持稳定,磷酸铁骨架未发生明显破坏。综上,丁二酸/过氧化氢协同体系在实现磷酸铁锂中锂的高效、选择性和结构保持型浸出方面具有显著优势,可为废旧磷酸铁锂电池的绿色回收提供了一种可行的技术路径。

参考文献:

- [1] KHAN F M N U, RASUL M G, SAYEM A S M, et al. Maximizing energy density of lithium-ion batteries for electric vehicles: a critical review[J]. *Energy Reports*, 2023, 9 (Sup. 11): 11-21.
- [2] YANG Q, SU Y, WANG X, et al. Emerging strategies for sustainable holistic recycling of spent lithium-ion batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 318. DOI: 10. 1016/J. CES. 2025. 122238.
- [3] ZHANG J Y, HUANG H N, ZHANG G Q, et al. Cycle life studies of lithium-ion power batteries for electric vehicles: a review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 93. DOI: 10. 1016/J. EST. 2024. 112231.
- [4] XU Y, QIU X, ZHANG B, et al. Start from the source: direct treatment of a degraded LiFePO_4 cathode for efficient recycling of spent lithium-ion batteries[J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(19): 7448-7457.
- [5] FENG C, OUYANG X, HUANG R, et al. Enhanced redox capacity and hydrogen bonding interactions for efficient metal recovery from spent batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(29). DOI: 10. 1002/ADFM. 202424615.
- [6] 黄运正, 李亮, 刘煦晴, 等. 资源化回收利用废旧锂离子电池技术[J]. *现代化工*, 2025, 45(9): 44-48.
HUANG Yunzheng, LI Liang, LIU Xuqing, et al. Technologies for recycling spent lithium-ion batteries [J]. *Modern Chemical Industry*, 2025, 45(9): 44-48.
- [7] LI X L, ZHU X N, LI X G, et al. Recent advances in the extraction of critical metals from spent lithium-ion batteries: challenges and solutions: a review [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 376. DOI: 10. 1016/J. SEP-PUR. 2025. 134070.
- [8] LEE J, PARK K W, SOHN I, et al. Pyrometallurgical recycling of end-of-life lithium-ion batteries [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2024, 31(7): 1554-1571.
- [9] LUO Y, OU L M, YIN C Z. Extraction of precious metals from used lithium-ion batteries by a natural deep eutectic solvent with synergistic effects [J]. *Waste Management*, 2023, 164: 1-8.
- [10] ZHANG Z, SHI H, DUAN Y, et al. In situ regeneration of spent lithium-ion batteries using fluorine-doped reconfigurable phase-change layers [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 655. DOI: 10. 1016/j. jpowsour. 2025. 237930.
- [11] KUMAR VINAYAK A, MAJID M, XIA L, et al. Critical review of acid leaching for recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries [J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2025, 8(1). DOI: 10. 1007/s41918-025-00266-9.
- [12] JIANG S Q, LI X G, ZHOU W T, et al. Enhanced green leaching of spent lithium-ion batteries: pyrolysis pretreatment combined with eco-friendly citric acid and ascorbic acid [J]. *Colloids and Surfaces: A*, 2024, 687. DOI: 10. 1016/J. COLSURFA. 2024. 133492.
- [13] LI Y, XUE N, LI Z, et al. Kinetics and mechanism of ultrasonic-enhanced succinic acid leaching of zinc from metallurgical sludge [J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 318. DOI: 10. 1016/j. ces. 2025. 122238.
- [14] YANG P F, ZHOU L X, ZENG J, et al. Sustainable recovery of cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries using water-based deep eutectic solvents [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 14(1). DOI: 10. 1016/J. JECE. 2025. 120726.

Application of Synergistic Effect of Succinic Acid and Hydrogen Peroxide in Recycling of Spent Lithium Iron Phosphate Batteries

YANG Pengfei, LIANG Huichen, LU Wanli, YE Youming, XIE Xuezheng, CHEN Yanmeng, WANG Xiaoshu
(College of Chemistry and Materials Engineering, Guangxi Science and Technology Normal University,
Laibin 546100, China)

Abstract: Recycling spent LiFePO_4 batteries is crucial for mitigating resource shortages and lowering environmental pollution. Leaching lithium from the spent LiFePO_4 batteries using succinic acid-hydrogen peroxide system was investigated. The effects of succinic acid concentration, hydrogen peroxide volume fraction, solid mass to liquid volume ratio, leaching temperature and time on lithium leaching rate were examined. The leaching mechanism was further clarified through kinetic analysis and SEM. The results indicate that under the optimal leaching conditions of succinic acid of 0.8 mol/L, hydrogen peroxide of 2%, solid mass to liquid volume ratio of 4 mg/1 mL, leaching temperature of 80 °C, and time of 40 min, the conditions, lithium leaching rate is more than 98%, while iron leaching rate is less than 2%. Kinetic analysis reveals that the leaching process is primarily diffusion-controlled. Overall, these findings demonstrate that the synergistic succinic acid-hydrogen peroxide system offers high efficiency and sustainability in LiFePO_4 leaching, providing a feasible route for the green recycling of spent LiFePO_4 batteries.

Key words: succinic acid; hydrogen peroxide; organic acid; spent lithium batteries; LiFePO_4 ; leaching; lithium