

闪蒸焦耳加热技术在废旧锂离子电池回收与再生中的机制、应用与前景

王丽¹, 祁曼¹, 任澍阳¹, 赵亚文¹, 孙茹宇¹, 吕永利², 兰申玉¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 257000, 山东东营)

摘要: 随着全球锂离子电池(LIBs)需求的增长,大量废旧电池的回收与再生成为解决资源短缺和环境污染的关键挑战。传统的回收方法,如火法冶金和湿法冶金,虽然能够实现有价金属的回收,但普遍存在能耗高、化学试剂消耗大及环境污染严重等问题。闪蒸焦耳加热(FJH)技术作为一种新兴的回收策略,通过瞬时高温加热,可以实现废旧电极材料的分离与再生,具有高效、低环境负荷的优势。综述了FJH技术的原理及其在废旧电池回收中的应用,系统总结其在有价金属回收、石墨负极再利用及正极材料再生等方面的研究进展。评估了FJH技术的经济效益和环境影响,分析其在规模化应用、材料适配性等方面的优势与挑战。随着电池技术的发展和回收需求的增加,FJH技术有望成为一种高效、环保且经济可行的废旧电池回收与再生方案,推动新能源电池产业向绿色循环方向发展。

关键词: 闪蒸焦耳加热;锂离子电池;回收与再生

中图分类号: X705 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202603006 **文章编号:** 0253-987X(2026)03-0055-12

Mechanism, Application, and Prospects of Flash Joule Heating Technology in Recycling and Regeneration of Spent Lithium-Ion Batteries

WANG Li¹, QI Man¹, REN Shuyang¹, ZHAO Yawen¹, SUN Ruyu¹,

LÜ Yongli², LAN Shenyu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shengli Oilfield Branch, China Petroleum & Chemical Corporation, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: With the increasing global demand for lithium-ion batteries (LIBs), the recycling and regeneration of the vast number of spent batteries have become key challenges in addressing resource shortages and environmental pollution. Conventional recycling methods, such as pyrometallurgy and hydrometallurgy, can recover valuable metals but often suffer from concerns such as high energy consumption, heavy reliance on chemical reagents, and environmental contamination. As an emerging recycling strategy, flash Joule heating (FJH) technology utilizes instantaneous high-temperature heating to achieve separation and regeneration of spent electrode materials, offering high efficiency and low environmental impact. This paper reviews the principles of FJH and its

收稿日期: 2025-05-01。

作者简介: 王丽(1986—),女,副教授,博士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52474443)。

网络出版时间: 2025-09-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250922.1009.010>

applications in recycling spent batteries, systematically summarizes recent progress in valuable metal recovery, graphite anode reuse, and cathode material regeneration, and evaluates the economic feasibility and environmental implications of FJH technology. Advantages and challenges related to large-scale implementation and material compatibility are also analyzed. With the ongoing advancement of battery technology and growing recycling demands, FJH technology is expected to emerge as an efficient, environmentally friendly, and economically viable solution for recycling and regenerating spent batteries, thereby promoting the transition of the new-energy battery industry toward a circular and sustainable future.

Keywords: flash Joule-heating; lithium-ion batteries; recycling and regeneration

随着全球能源结构加速转型,可再生能源加速发展,锂离子电池(LIBs)因其高能量密度和长循环寿命^[1],在电动汽车、储能系统和消费电子等领域得到广泛关注。然而,LIBs市场的大幅度扩张,大量退役电池的回收与再生已成为全球关注的焦点^[2]。国际能源署(IEA)预测,到2030年,全球电动汽车保有量将突破3亿辆,动力电池退役量将达每年1100万t,累计废弃LIBs总量超过200万t^[3]。若不能有效回收,不仅会导致有价金属资源(如锂、钴、镍、锰等)的浪费,还可能对环境和人类健康构成极大的危害^[4]。因此,开发一种高效、环保、经济可行的回收技术对于实现资源的可持续利用和减少对环境的污染至关重要。

目前,传统的电池回收工艺主要包括火法冶金和湿法冶金^[5]。火法冶金通过高温熔炼回收有价金属,但能耗较高,易排放有毒气体^[6],同时锂的回收率较低。湿法冶金利用酸浸或溶剂萃取,可有效回收大部分金属,但存在废液排放的问题,增加了环境治理的难度^[7]。此外,传统的方法在回收过程中可能会导致正极材料结构的破坏,使其难以再直接利用。目前回收和再生石墨的方法包括化学处理和热处理^[8]。酸浸处理是化学处理中常用的一种方法,可用于去除石墨中的杂质,例如固态电解质界面(SEI)、黏合剂和残留电解液。然而,该方法过程繁琐,而且会产生酸性废水,造成环境污染^[9-10],并且在处理过程中往往会破坏石墨的晶体结构,使其难以循环使用。因此,开发一种高效、低能耗、低污染、可直接再生电极材料的回收技术是当前研究的重点。

近年来,闪蒸焦耳加热(FJH)技术因其瞬时高温、超快升降温速率、无需消耗化学试剂等特点,成为废旧LIBs回收与再生的创新策略。FJH技术通过短时高能电脉冲,使材料内部的电阻发热,在毫秒时间内可达到3000K以上^[11]。在这种剧烈的温度梯度下,电极材料会经历快速热解、结构重构和化学

反应,从而实现特定组分的高效分离和材料的修复与功能化^[12],同时避免了传统回收方法长时间高温处理带来的副反应。因此,将FJH技术应用于LIBs回收领域具有广泛前景。可用于有价金属元素、石墨负极再利用以及正极材料的直接再生等。

本文综述了FJH技术在废旧LIBs回收与再生领域中的应用进展,首先介绍了FJH技术的基本原理和回收与再生废旧LIBs电极材料的机制,然后详细探讨了其在石墨负极回收、正极材料再生及有价金属元素回收方面的应用,并从经济与环境影响的角度评估了其潜在优势。本文对FJH技术在工业化与规模化、新型电极材料的回收和再生材料的性能等方面的挑战进行总结,并展望了未来发展方向。随着电池技术的迭代,FJH技术有望成为LIBs回收体系中的重要环节,为构建高效、低碳、绿色环保的回收体系提供参考。

1 闪蒸焦耳热技术

1.1 基本原理

闪蒸焦耳加热是一种基于“焦耳定律”的高温热处理技术,遵循以下能量传递公式

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

式中: Q 为电阻发热产生的热量; I 为电流强度; R 为体系电阻; t 为脉冲时间^[13]。FJH技术利用短时间强电流脉冲驱动目标材料产生电阻加热,在毫秒级时间内将温度迅速提升至2000~3000K,从而改变材料的微观结构、促进材料相变,并实现高效分解或还原。

FJH装置主要由闪光室、真空阀、二极电感器、电容器组和电压指示器组成^[14],通过调节电极间电容器电压,实现对闪光室温度和加热持续时间的精确控制,并利用黑体辐射光谱(波长为600~1100nm)测量温度。该技术利用电容器驱动的高压瞬时放电对置于电极间的石英或陶瓷管中样品进行快速加

热,可在大气或真空中运行^[15]。FJH 技术已广泛应用于石墨烯的合成^[16]、相位调控及亚稳态材料制备^[17-18]等领域。

1.2 FJH 技术的机理

在废旧锂离子电池中,负极石墨常残留黏结剂、SEI 层及嵌锂,影响其再利用^[19]。FJH 技术通过瞬时高温(温度高于 3 000 K)和快速升温(速度大于 $10^4 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$),可使低稳定性的黏结剂(温度低于 600 K)和 SEI 层残留物(如 LiF 、 Li_2CO_3 等,挥发或分解温度低于 1 700 K)^[20],在快速升温过程中分解或升华,并同步脱除嵌锂,实现石墨深度净化。高温可修复层间缺陷并重建晶体结构,显著提升其电化学性能,使再生石墨性能接近甚至优于商用石墨。在电场与高温的协同作用下,导电剂(SP)与残余碳源发生裂解反应,原位生成片状或卷曲石墨烯,均匀包覆于石墨表面。这种自生碳包覆结构不仅增强了材料的导电性,还提高了其循环稳定性与倍率性能,部分性能甚至优于商用石墨烯^[21]。

FJH 技术同样适用于多种类型正极材料的高效修复与再利用,典型过程包括杂质去除、金属氧化物还原、补锂修复与导电性增强等环节。在 FJH 过程中,正极中的黏结剂、正极电解质界面(CEI)与导电碳会在高温下迅速分解,而其他金属杂质则可通过磁选手段实现有效分离,从而大幅提升材料纯度。对于因锂流失而导致性能退化的材料,FJH 工艺可与固态补锂过程(如沉积 Li_2O 、混合 Li_2CO_3 等)相结合,在不引入液相环境的前提下实现锂含量的恢复。FJH 所带来的瞬时高温-骤冷循环有助于修复正极材料内部因循环老化形成的微裂纹,并优化层状结构的完整性,从而提高其结构稳定性与锂离子扩散能力。在磷酸铁锂(LiFePO_4 , LFP)本身电导率较低的体系中,FJH 技术亦表现出良好的适配性。通过预先引入适量导电碳材料,可实现材料的快速升温与均匀自加热反应,为非导电体系提供有效处理路径^[22]。

FJH 技术在有价金属回收方面展现出多重优势,主要依赖于碳热还原、选择性升华及热冲击增强浸出动力学等机制协同作用。高温下,过渡金属氧化物(如 Co_3O_4 、 NiO_2)可迅速还原为低价态或金属单质^[23],极大地提高了金属提取的效率。同时,锂元素以挥发形式分离回收,如 Li_2O 在温度约 1 600 K 条件下升华,随后经冷凝系统转化为易于再利用的 Li_2CO_3 。此外,FJH 的超高温热处理显著提升了黑粉中金属元素的浸出动力学。与传统酸浸法相比,经 FJH 预处理后的材料在 1.0 mol/L HCl 溶液中

浸出的速率提高约 1 000 倍,金属回收率提升至 286%,显著优于未处理样品^[24]。这表明 FJH 是一种高效的热处理技术,为金属回收过程提供了有力的前处理手段。

2 FJH 技术在废旧锂电池回收与再生中的应用

废旧锂电池的回收工艺通常包括放电拆解、电解液提取、电极材料与金属箔分离以及材料再生等核心步骤^[25]。首先,通过放电释放参与电荷并拆解电池;随后回收电解液;接着分离负极铜箔和正极铝箔,以及电极材料与隔膜;最终获得的活性材料可再生用于新电池制造,实现资源高值化利用^[26]。

2.1 FJH 技术对石墨负极的回收与再生

石墨负极的回收与再生对资源循环利用和环境保护具有重要意义。然而,现有的回收工艺仍面临诸多挑战:①难以去除惰性黏结剂和损坏的 SEI 层^[27];②回收石墨电极的电化学性能恢复困难;③缺乏快速、低成本的回收技术,仍依赖酸/碱处理^[28-29]或繁琐的回收步骤。石墨负极的破坏机制主要涉及溶剂插层剥离、枝晶形成或 SEI 层增厚等因素^[30]。FJH 技术凭借其超快速加热和可控的高温分解特性,在石墨回收与再生领域具有独特优势。

2.1.1 FJH 技术的核心作用机制

在 FJH 处理过程中,SEI 层、嵌锂、黏结剂及其他杂质在超快速升温下被迅速去除,材料内部的层间缺陷在高温作用下得到修复,并恢复为结晶度更高的有序层状结构,同时导电剂和黏合剂的热解产物能在电场诱导下原位转化为片状或弯曲石墨烯,并覆盖在石墨表面,从而显著提升导电性。

这一系列过程得益于 FJH 技术所产生的超高温(高于 1 873.15 K),该温度能促进黏合剂和 SEI 层残留的完全分解并去除嵌锂,实现石墨结构重组^[31]。研究表明,随着能量输入增加,黏结剂去除得更彻底,石墨分散性得到改善,表明高电击能量有利于黏结剂的碳化和其他成分的气化。SEI 中低沸点成分被去除,导电剂释放的无定形碳促进了类石墨烯薄片层结构的形成。尽管热解过程中会产生一定的碳残留,但这产物在高温下促进碳原子的重新排列,自由碳基团填充石墨层间的孔隙,形成与石墨烯结构高度一致的碳晶格,从而修复石墨在充放电循环后产生的结构缺陷。无定形碳在 FJH 过程中快速石墨化并包覆石墨,进一步提升导电性^[32]。同时,SP 颗粒的核心区域在缓慢的热缺陷

退火作用下促使折叠石墨烯的生成,并结合到石墨表面,增强再生石墨的电子传输能力。FJH 放电设备和废石墨电极材料再生示意图^[32]如图 1 所示,基于 FJH 放电设备,在恒压和空气环境下,仅 0.1 s 即可实现石墨的快速再生。再生石墨显示出与商业石墨几乎相同的电化学特性,在 1 C 倍率下质量比容量可达 $350 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$,且在 500 次循环后容量保持率高达 99%。

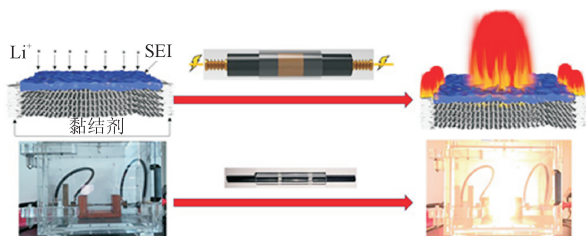


图 1 FJH 放电设备和废石墨电极材料再生示意图^[32]

Fig. 1 Schematic illustration of FJH discharge equipment and regeneration of spent graphite electrode materials^[32]

2.1.2 FJH 在石墨连续化回收中的设备优化

尽管 FJH 方法高效可靠,但是多数实验是在石英管反应器的封闭环境中进行,限制了其连续。为此,有研究者开发了一种基于带电碳加热器的高温 FJH 工艺,用于连续回收含杂质的石墨负极材料,倾斜碳纸加热器的示意图^[33]如图 2 所示。在该工艺中,石墨粉末沿倾斜 50° 的碳加热器自上而下滚动,在此过程中杂质分解,去除杂质后的纯净粉末在倾斜加热器底部被收集,实现了持续回收利用。除了成功去除 SEI 层及黏结剂外,该工艺还能通过提高石墨的石墨化程度,并调节 002 晶面的层间间距以优化层状结构,从而促进碳层的有序堆叠与结构恢复。实验结果表明,该方法再生的石墨负极在 1 C 倍率时表现出约 $320 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高质量比容量,并在 500 次循环后容量保持率仍达 96%。

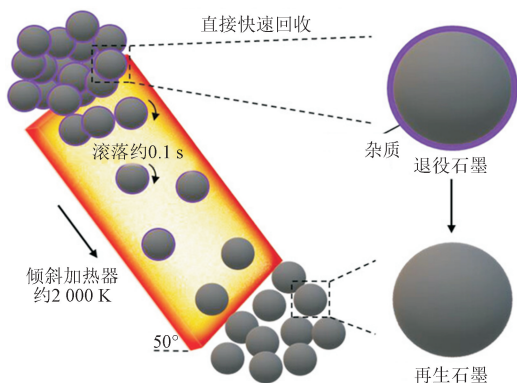


图 2 倾斜碳纸加热器的示意图^[33]

Fig. 2 Schematic of the sloped carbon paper heater^[33]

2.1.3 FJH 在混合废石墨再生中的应用

针对不同来源石墨在回收过程中存在物理差异大、与杂质组成差异较大、难以统一处理工艺的问题,有研究者尝试将来源不同的废石墨、拆卸的负极石墨和来自湿法冶金渣按质量 1:1:1 的比例混合后,通过 FJH 技术成功将其转化为性能均匀的高质量石墨^[34],图 3 给出了通过闪速焦耳加热对废石墨进行定向再生和升级再循环的示意图。实验结果表明,该方法再生的石墨在 0.1 C 倍率时的质量比容量为 $358 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$,100 次循环后的容量保持率为 94.83%。

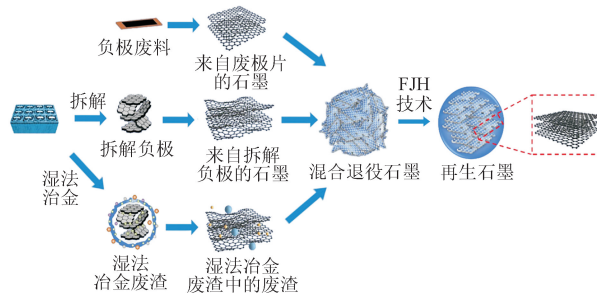


图 3 通过闪蒸加热将各种废石墨快速回收为具有均匀储能特性的闪蒸再循环示意图^[34]

Fig. 3 Schematic of flash upcycling of various spent graphite into a uniform energy-storage property via flash heating^[34]

2.1.4 基于缺陷靶向成核机制修复策略

除了去除 SEI 层及杂质,修复石墨结构缺陷也是提高再生石墨电化学能力的关键。最新研究中,研究者引入锡(Sn)作为纳米修复剂,利用 Sn 低熔点(231°C)及高结合能(5.84 eV/原子)在石墨缺陷处优先成核,有效修复废旧石墨的结构缺陷,增强嵌锂性能,提高石墨倍率性能和循环稳定性^[34]。通过闪速焦耳加热对废石墨进行定向再生和升级再循环的示意图^[35]如图 4 所示。FJH 处理后的再生石墨在 $0.2 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 的电流密度下循环 100 次后可达到 $458.9 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 的质量比容量,远高于商业石墨和其他回收石墨。

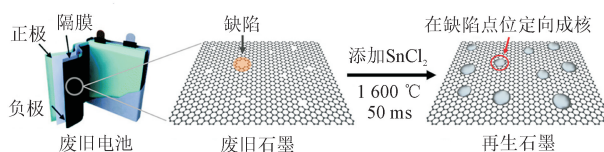


图 4 通过闪速焦耳加热对废石墨进行定向再生和升级再循环的示意图^[35]

Fig. 4 Schematic of targeted regeneration and upcycling of spent graphite via flash heating^[35]

2.1.5 FJH 在 SEI 结构重构中的应用

传统回收方法难以保留 SEI 及残留的活性锂,导致其难以再利用。研究者聚焦于 SEI 的重构,将 SEI 中松散的石墨转化为结构紧凑的再生石墨,其原理示意图^[36]如图 5 所示。利用 FJH 技术在 1 900 K、150 ms 的操作条件下将废旧石墨负极表面的松散、有机-无机混合 SEI 转化为致密且主要由无机成分(如 LiF 、 Li_2CO_3 、 Li_2O)组成的稳定 SEI,有效封存残余活性锂,有效提升再生石墨的电化学性能^[36]。相比于传统的高温煅烧、酸碱浸等方法,基于 FJH 的超快速热冲击诱导 SEI 无

机化-致密化重构策略避免了 SEI 层和活性锂的完全破坏,使再生石墨的初始库伦效率(CE)高达 104.7%,在 LiFePO_4 全电池中表现出 98.8% 的高初始库伦效率和 $309.4 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的能量密度,显著优于商用石墨及其他回收石墨负极,无需额外的预锂化处理。

为系统比较不同回收再生策略对废旧石墨电化学性能的影响,表 1 汇总了不同文献工艺条件及其电化学性能,对比分析了处理温度、时间和测试倍率对初始质量比容量和循环稳定性的影响,为再生工艺优化提供参考。

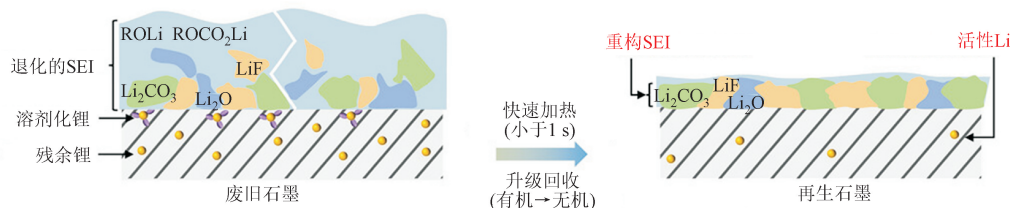


图5 松散 SEI 层废旧石墨至致密结构的再生石墨转化示意图^[36]

Fig. 5 Schematic illustration of transforming SEI-covered spent graphite into structurally compact regenerated graphite^[36]

表1 石墨回收与再生及相应性能的对比

Table 1 Summary of graphite recovery and regeneration and comparison of the corresponding electrochemical performance

回收再生策略	温度/K	时间/s	充放电倍率/C	循环次数	初始质量比容量/ ($\text{mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$)	容量保持率/%
FJH 技术超快再生石墨阳极 ^[32]	3 000	0.100	1.00	500	350.0	99.00
连续化回收 ^[33]	2 000	0.100	1.00	500	320.0	96.00
混合废石墨再生 ^[34]		0.005	0.10	100	358.0	94.83
SEI 结构重构 ^[36]	1 900	0.150	0.10	300		92.20
靶向成核修复 ^[35]	1 600	0.050	0.54	100	458.9	
光伏废石墨升级再生 ^[37]			2.00	1 000	413.0	90.10

2.2 FJH 技术对正极材料的回收与再生

2.2.1 正极材料与铝箔的高效分离

LIBs 正极材料通常通过聚偏二氟乙烯(PVDF)黏结剂附着在铝箔集流体上。传统直接回收法多采用 N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)等有机溶剂清洗,并辅以低温煅烧去除黏结剂和碳添加剂,过程成本高、耗时长且污染严重。相比之下,FJH 技术利用约 3 000 K 的瞬时高温使 PVDF 熔化并热解,降低其黏附性,PVDF 与铝箔热膨胀系数的差异产生热应力,促进二者快速分离。研究表明,该方法能快速有效对磷酸铁锂和三元锂电池(NCM)正极材料在短时间内实现高效剥离,且不会破坏铝箔的完整

性,使其能够直接被回收再利用。更为重要的是,FJH 处理过程中不会改变正极材料的微观结构和晶体形态,为后续直接再生提供了良好的基础。在 3.0 KV 脉冲电压作用下,磷酸铁锂(LiFePO_4 , LFP)电池的正极材料能够完全从铝箔上剥离,分离效率和材料纯度分别达到了 99.0% 和 99.7%^[38],为进一步的金属回收及直接再生奠定了基础。

2.2.2 高纯度正极材料回收

在实现高纯度正极材料回收方面,无溶剂、无水参与的闪蒸回收技术引起广泛关注^[39]。如图 6 所示,该技术结合了 FJH 技术与磁选分离工艺,辅以固态再锂化过程,可实现对废旧正极材料的高效分

选与再利用^[40]。在 FJH 过程中,材料被瞬间加热至约 2 500 K 的高温环境,铝、铜等金属杂质被蒸发,黏结剂和 CEI 层等其他惰性杂质则被热分解。磁性分离技术可以有效去除大部分非磁性的导电碳等杂质,保留结构完整的磁性正极颗粒。由于该过程具备极高的加热速率,能够在有效去除杂质的同时最大程度地保持正极材料的三维结构和颗粒形貌。实验结果表明,该技术对多种正极材料(如 LiCoO₂、NCM 等)均展现良好的适用性。

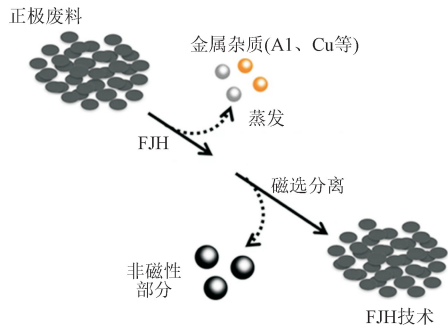


图 6 快速焦耳蒸发-磁分离协同除杂流程示意图^[40]

Fig. 6 Schematic illustration of the rapid Joule evaporation-magnetic separation synergistic impurity-removal process^[40]

2.2.3 正极材料的直接再生

除高纯度回收外,FJH 还在正极材料的直接再生方面展现出重要的潜力。针对正极材料在使用过程中因结构退化、电化学性能下降而难以直接复用的问题,研究者提出了一种基于 FJH 的超快修复技

术,实现了由材料“回收”向“再生”的关键转变^[41]。以退役 LiCoO₂ 为研究对象,通过控制高温脉冲处理时间,揭示了材料结构演变与热处理参数之间的关系。研究表明,在约 3 000 K 的条件下,仅需 8 s 的短时处理即可实现 Co₃O₄ 尖晶石结构向具有三方晶系 R $\bar{3}$ m 空间群的层状结构逆转变,显著提升其电化学性能。初始放电质量比容量达 133.0 mA·h·g⁻¹,在 4 C 倍率下仍能保持 99.7 mA·h·g⁻¹ 的高质量比容量。同时,也显现出良好的循环稳定性,在 0.1 C 倍率下进行 300 次循环后仍可维持 100.0 mA·h·g⁻¹ 的放电质量比容量。在此基础上,该研究还提出了一种适用于工业化放大的卷对卷超快速再生处理方案。通过集成带状脉冲加热器与传送系统,将单次处理时间压缩至 5 s 以内,整体处理能力提升。

2.2.4 有价金属元素的回收

废旧锂离子电池尤其是正极材料中富含锂(Li)、钴(Co)、镍(Ni)和锰(Mn)等有价金^[42],金属约占电池质量的 30%^[43],具有较高的经济价值。目前已有多种回收策略来收集废锂电池中的有价金属,包括火法冶金^[44]、湿法冶金^[45]、生物冶金^[46]和电化学萃取^[47]等,表 2 汇总了不同有价金属回收方法的控制温度、气氛条件、处理时间、金属回收率等。综合对比结果表明,FJH 技术兼具快速、高效、适配性强的特点,可以实现高纯度金属的回收,在性能、效率及环境影响等方面均优于其他工艺^[48]。

表 2 废旧锂离子电池不同有价金属回收方法的对比

Table 2 A comprehensive comparison of various methods for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries

回收方法	控制温度/K	气氛条件	处理时间	金属回收率
火法冶金 ^[49]	大于 1 473.15	惰性或还原性气体	长(4~8 h)	高(Li 差, Ni/Co 好)
湿法冶金 ^[50]	333.15~373.15	通常为氧化环境	中等(6~24 h)	高(90%~99%,选择性良好)
生物冶金 ^[51]	298.15~313.15	需控制 pH 与溶解氧	极长(5~15 d)	中等(60%~90%,依赖菌种)
电化学萃取 ^[52]	298.15~353.15	惰性电解液	中等(3~6 h)	高(大于 90%,选择性强)
FJH 技术 ^[53]	大于 2 273.15	空气或惰性气体	极短(小于 1 s)	高(大于 90%,多金属适应性强)

为了实现对不同类型正极材料的高效回收和复锂再生,有研究者提出“FJH 技术-磁性分离除杂-固态复锂再生”的耦合工艺的策略^[54],FJH 技术对黑粉的活化机制^[54]如图 7 所示,FJH 技术对黑粉的瞬态热活可显著提升其后续酸浸行为。该耦合工艺在约 2 500 K 的高温下对废旧正极材料进行处理,使金属杂质被蒸发,黏结剂和 CEI 等其他惰性杂质被分解。产物经由磁性分离,被分为磁性部分和非磁性部分,其中磁性部分主要保留了正极材料的核心

结构,而非磁性部分包括导电碳、黏合剂及其他杂质。研究者对非磁性部分进行重复 FJH 处理,以进一步回收其中有价金属。经 FJH 技术处理后,材料发生重构,比表面积提高约 115%,纳米孔数明显增加,从而增大了可浸出反应界面并改善酸溶液的润湿与传质条件,进而加快金属浸出动力学并提升回收效率。FJH 处理后 LCO 与 NMC 材料中各金属元素的回收率^[40]如图 8 所示。该方法在回收废旧 LiCoO₂ (LCO)与 LiNi_xMn_yCo_zO₂ (NMC)等材料时

表现出优异性能,整体金属回收率高达 98.0%,其中 Li 和 Co 的平均回收效率分别达到了 96.3% 和 94.2%。对于 NMC 废料、Li、Ni 和 Mn 的回收率分别达到了 95.0%、96.8%、96.5% 和 94.0%。

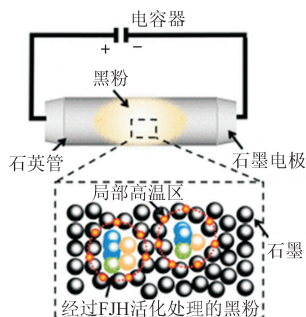
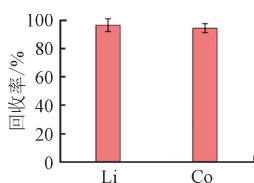
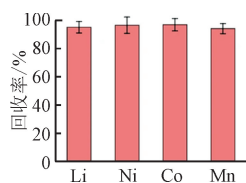


图7 FJH 技术对黑粉的活化机制^[54]

Fig. 7 Enhancement of the activation mechanism^[54]



(a) LCO(FJH-LCO) 铁磁性部分中 Li 和 Co 的回收率



(b) NMC(FJH-NMC) 铁磁性部分中 Li、Co、Ni 和 Mn 的回收率

图8 FJH 处理后 LCO 与 NMC 材料中各金属元素的回收率^[40]

Fig. 8 Recovery ratios of metal elements in FJH-treated LCO and NMC materials^[40]

研究表明,FJH 本身可显著增强黑粉材料的浸出活性。在数秒内将电池正负极构成的黑粉快速加热至 2 100 K 以上,可有效分解 SEI 层和杂质,并显著加快后续酸浸过程中金属浸出速度^[54]。实验结果表明,在 0.01 mol/L 的 HCl 溶液中浸出时,经过 FJH 活化处理可使锂和过渡金属的浸出动力学提高约 1 000 倍,总回收率可达 98%。石墨在高温下作为还原剂与部分过渡金属氧化物发生碳热还原,生成价态更低的氧化物或金属单质,从而降低其结构稳定性并提高后续浸出过程的溶出速率,利于金属的溶解与提取,同时,快速升温过程可显著降低锂等挥发性金属的扩散损耗^[23]。FJH 活化过程对

不同正极化学组成、结构及使用老化程度的电池黑粉呈现出良好的适应性。

2.3 FJH 技术对废旧锂电池回收与再生的优势

在负极材料回收环节中,FJH 快速热处理过程可以有效去除石墨表面残留的黏结剂、电解质副产物及杂质,而不会破坏石墨主体结构。相比于火法处理过程中容易造成颗粒表面团聚和石墨结构破坏,FJH 能更好地保持材料结构的完整性。与湿法回收中依赖化学试剂浸出相比,FJH 全过程不涉及液体试剂的使用,避免了废液处理的问题,更具环保性。FJH 处理后的石墨表现出更高的质量比容量和循环稳定性,不仅实现了回收,也实现了废旧电池性能的再生。除此之外,该方法具备处理时间短、能耗低的特点,同时简化了工艺流程,降低了人力与设备的成本。FJH 回收负极材料的经济成本可比湿法降低 68%,碳排放减少约 79%,有显著的资源环境优势。此外,FJH 技术对不同老化程度和来源的石墨具有良好的统一处理能力,可以结合模块化拆解和连续处理系统,实现规模化操作,进一步增强其在实际工业中的可行性。

除在负极材料回收中展现出快速、高效和环境友好的突出优势外,FJH 在废旧锂电池正极材料的回收中同样具有显著的潜力。与负极材料的单一组分结构不同,废旧正极材料呈现出多金属、多晶型和多杂质的复杂体系,对回收工艺的选择性有更高的要求。FJH 技术通过毫秒级的高温热处理,不仅能实现黏结剂和 CEI 层等杂质快速热解与去除,同时可通过诱导材料结构转化和选择性还原反应,实现有价金属组分的有效分离与活性重构。在典型的“FJH 回收—分离—固态再锂化”流程中,石墨负极可作为导电材料,提升整体热效应与材料均匀性,再合成过程能够有效恢复正极材料的晶体结构与电化学性能。

综上所述,FJH 技术不仅在负极材料回收中展现出结构完整性与操作便利性,也在正极材料的高效分离与功能恢复方面具有广泛适用性,为推动锂电池全组分绿色回收循环利用体系提供了一种可能。

3 环境与经济评估

在电池产业可持续转型进程中,回收技术的全生命周期评估(LCA)和技术经济分析(TEA)已逐渐成为衡量技术成熟度的核心评价指标^[55]。对于废旧锂离子电池的再生利用,不仅有助于构建资源

循环体系,还能显著降低环境污染风险,推动绿色低碳发展。

目前,GREET 2020 和 EverBatt 2020 等模型已被广泛用于电池回收路径的生命周期评估^[56]。研究者利用该方法对废旧锂电池正极材料的闪蒸回收过程进行系统性 LCA 评估^[40]。该回收路径涵盖的过程包括:从约 1 kg 的废旧锂离子电池中收集各类中间产物,并以其作为前驱体,在工厂中合成 0.35 kg 的正极材料。评估结果表明,与火法回收和湿法回收相比,闪蒸回收技术避免了浓盐酸的使用,并将用水量和能耗分别减少约 83% 和 62%,从而在环境与经济两方面均表现出优势,温室气体排放降低了 72%,成本降低了 58%。若与火法冶金对比,闪蒸回收技术可减少约 80% 的水耗、67% 的能

耗和 82% 的碳排放,并带来约 41% 的成本下降,显著降低了整体环境足迹。

研究者应用 EverBatt 2020 模型对废旧锂离子电池石墨负极的直接回收技术进行了经济性与环境双重评估^[36],如图 9 所示。与传统回收工艺中普遍存在的高温熔炼与酸碱浸过程相比,该直接再生方法无需使用任何溶剂便可实现废旧石墨的高效修复与再利用,展现出良好的绿色应用潜力。图 9(b)~图 9(f)展示了原始材料、湿法回收石墨与该快速直接再生法在制备 1 kg 石墨时的成本、收益、利润、能耗、温室气体排放量以及用水量对比。与湿法回收路线相比,该方法的回收成本降低约 68%、能耗降低约 79%、温室气体排放减少约 91%,用水量完全为零,在环境友好性与资源效率方面优势显著。

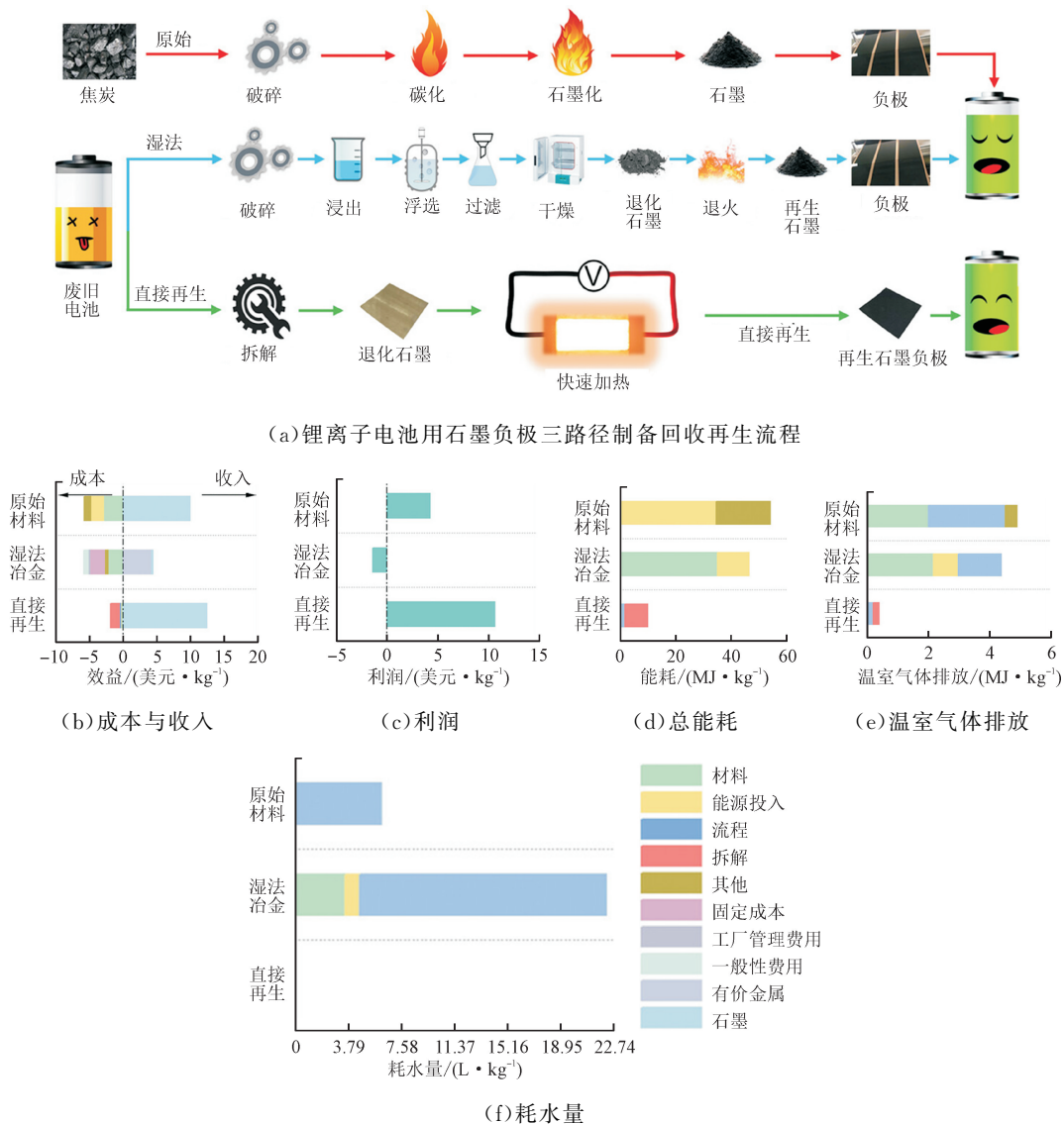


图 9 石墨负极直接回收再生流程及经济和环境分析^[36]

Fig. 9 Economic and environmental analysis of direct recycling of graphite anodes^[36]

4 FJH 技术的局限性

4.1 工业化与规模化

目前,FJH 技术仍处于实验室研究和小试阶段,尚未实现大规模商业化应用。尽管在某些领域,如石墨烯制备方面,该技术已经实现吨级生产^[57],但在废旧电池回收行业,仍需要进一步验证工业可行性。FJH 技术依赖大功率脉冲电源和惰性气氛反应设备以实现毫秒级超高温环境,然而高昂的设备投资与规模化连续运行的稳定性尚未突破。废旧电池组分复杂且来源广泛,如何在工业化条件下确保不同批次废料在 FJH 处理后的回收率和产物质量一致仍是难题。现有的 FJH 处理方式主要基于间歇式批量操作,而要实现工业规模的高效回收,需要开发连续进料和脉冲放电循环工艺,以提高处理效率并降低单位成本^[21]。关于能耗问题,尽管 FJH 整体能耗低于火法冶金,但在工业化过程中仍需要优化瞬时高功率电流的利用方式,降低损耗,提高整体能源的利用率。

总体而言,突破工业化与规模化瓶颈需要推进工程化装备开发与预处理标准化,并通过中试实验在接近真实工况下积累能耗、产率、产品一致性及安全环保等关键数据,为工艺放大与工程应用提供依据。

4.2 新型材料的回收与再生多种材料同步回收

随着新一代电池材料体系的迭代,FJH 技术在保持传统锂离子电池回收优势的同时,其工艺的适用性也面临多维度的技术挑战。固态电池的规模化应用将显著改变废旧电池组分的结构,硫化物/氧化物固态电解质与锂金属负极的引入不仅加剧了材料体系的复杂性,更衍生出新的工艺风险,硫化物电解质在高温处理中可能释放硫化氢等剧毒气体^[58],这对 FJH 工艺的温度控制和安全防护提出了更高的要求。

在实际回收中,不同种类的正极材料可能混合在一起,而 FJH 在直接再生正极材料时要求材料种类单一,以避免不同组分的相互影响。因此,亟需开发精准高效的物料分选技术作为工艺前置支撑,以提高再生材料的质量和一致性。锂电池负极材料的革新也给 FJH 技术带来压力,例如,高硅负极在高温处理中的氧化倾向及相变行为可能破坏石墨回收产物的结构完整性,这要求系统研究新型复合材料在闪蒸焦耳热效应下物相演变规律。面对电池技术生态的持续演进,FJH 技术需要构建更包容的回收

系统,才能实现技术通用性与经济性的动态平衡。

4.3 材料性能与应用测试

FJH 技术在回收电池材料时,能否确保再生材料的电化学性能达到新材料标准,是其在实际应用中的关键挑战。当前研究结果表明,FJH 处理后的正极材料(如 LiCoO_2) 锂化后电化学性能接近新商业材料,显示出良好的循环稳定性和质量比容量,然而长期循环测试数据较少,再生材料在电池中的长期稳定性、容量保持率 and 安全性仍需要更大规模的产业验证。在大规模生产时,不同批次的回收材料可能会存在微观结构的差异,这可能导致电池性能的波动,需要进一步优化 FJH 工艺的温度控制、补锂效率和杂质去除能力,以确保批量生产时的材料均匀性。为保证再生材料应用于高能量密度电池时的安全隐患,需要对再生材料在实际电池系统中的热稳定性、电解液相容性及充放电过程中的界面反应进行深入研究。

尽管 FJH 技术优势显著,但在规模化工工艺与装备、材料体系适配、生命周期评价以及再生材料性能一致性验证方面仍存在瓶颈。未来的研究应着重解决这些问题,以推动 FJH 成为更加成熟和可持续的电池回收技术,最终实现锂离子电池材料的闭环回收与绿色循环利用。

5 总结和展望

闪蒸焦耳热技术作为一种新兴的电池回收与再生策略,在提升回收效率、降低能耗、减少环境污染等方面展现出显著优势。本文综述了 FJH 技术的基本原理,并详细探讨了其在有价金属元素回收、石墨负极再生和正极材料再生方面的应用进展。FJH 技术可在无需外加化学试剂的条件下实现高效金属回收,并在一定程度上保持电极材料的结构完整性,从而有助于提升再生材料的电化学性能。相较于传统工艺,FJH 技术具有流程短、能耗低、化学品投入与二次污染风险小等优势,因此为废旧电池回收提供了一条更具低碳化与清洁化特征的资源化路径。

尽管 FJH 技术在实验室研究和小规模试验中表现出色,其工业化和规模化应用仍面临挑战。FJH 技术的适用性和回收策略需要进一步拓展。未来可借助人工智能和机器学习优化 FJH 的参数设定,以提高再生材料质量的可预测性和稳定性^[59]。

在资源循环利用和碳中和目标的推动下,电池回收产业将成为新能源产业链中不可或缺的一环。FJH 技术以其高效、环保、经济可行的特点,有望成

为未来电池回收的主流方法。然而,仍需进一步完善产业技术体系,开发适用于大规模处理的自动化FJH回收系统,并加强对再生材料的电化学性能评估和长期稳定性研究。随着工艺优化、政策支持和市场需求增长,FJH技术有望在废旧电池资源化利用中提供一种低化学品投入、短流程的回收选项,并在一定条件下减少污染物排放与处理环节。

参考文献:

- [1] 杨续来,袁帅帅,杨文静,等. 锂离子动力电池能量密度特性研究进展 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(6): 239-254.
YANG Xulai, YUAN Shuaishuai, YANG Wenjing, et al. Research progress on energy density of li-ion batteries for EVs [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(6): 239-254.
- [2] 巫春玲,徐晨峰,张湧,等. 退役动力锂离子电池分选方法研究综述 [J]. 电气工程学报, 2025, 20(2): 310-322.
WU Chunling, XU Chenfeng, ZHANG Yong, et al. Review of research methods on sorting of power lithium-ion retired batteries [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(2): 310-322.
- [3] IEA. Global EV outlook 2023: catching up with climate ambitions [EB/OL]. (2023-04-26) [2025-02-16]. <https://doi.org/10.1787/cbe724e8-en>.
- [4] MA Xiaotu, AZHARI L, WANG Yan. Li-ion battery recycling challenges [J]. Chem, 2021, 7(11): 2843-2847.
- [5] LIU Chunwei, LIN Jiao, CAO Hongbin, et al. Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: a critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 801-813.
- [6] WANG Rui, BULATI A, ZHAN Lu, et al. Complicated pollution characteristics (particulate matter, heavy metals, microplastics, VOCs) of spent lithium-ion battery recycling at an industrial level [J]. Science of the Total Environment, 2025, 962: 178406.
- [7] PAUL S, SHROTRIYA P. Efficient recycling processes for lithium-ion batteries [J]. Materials, 2025, 18(3): 613.
- [8] MARKEY B, ZHANG Minghao, ROBB I, et al. Effective upcycling of graphite anode: healing and doping enabled direct regeneration [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(16): 160511.
- [9] YANG Jingbo, FAN Ersha, LIN Jiao, et al. Recovery and reuse of anode graphite from spent lithium-ion batteries via citric acid leaching [J]. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(6): 6261-6268.
- [10] MA Xiaotu, CHEN Mengyuan, CHEN Bin, et al. High-performance graphite recovered from spent lithium-ion batteries [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(24): 19732-19738.
- [11] LUONG D X, BETS K V, ALGOZEEB W A, et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis [J]. Nature, 2020, 577(7792): 647-651.
- [12] CHENG Le, YEUNG C S, HUANG Libei, et al. Flash healing of laser-induced graphene [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 2925.
- [13] WEBB K R. James Prescott joule and the unit of energy [J]. Nature, 1943, 152(3864): 602.
- [14] LUONG D X, BETS K V, ALGOZEEB W A, et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis [J]. Nature, 2020, 577(7792): 647-651.
- [15] LI Jiaqi, LUO Laiyu, WANG Siyu, et al. Recent advances in joule-heating synthesis of functional nanomaterials for photo and electrocatalysis [J]. PhotoMat, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/phmt.14>.
- [16] LIU Xinjuan, LUO Hongchao. Preparation of coal-based graphene by flash joule heating [J]. ACS Omega, 2024, 9(2): 2657-2663.
- [17] MÉNDEZ-ROMÁN J A. Metastable 2D materials synthesized with flash Joule heating [J]. MRS Bulletin, 2021, 46(4): 304-304.
- [18] CHEN Weiyin, WANG Zhe, BETS K V, et al. Millisecond conversion of metastable 2D materials by flash joule heating [J]. ACS Nano, 2021, 15(1): 1282-1290.
- [19] LIBICH J, MÁCA J, VONDRÁK J, et al. Irreversible capacity and rate-capability properties of lithium-ion negative electrode based on natural graphite [J]. Journal of Energy Storage, 2017, 14(Part 3): 383-390.
- [20] NIST. NIST chemistry WebBook [EB/OL]. (2025-03-26) [2025-04-17]. <https://doi.org/10.18434/T4D303>.
- [21] YUAN Jiahui, ZHANG Yizi, CHEN Fuzhou, et al. An overview of joule heating in energy storage materials and applications [J]. Journal of Materials Chemistry: C, 2024, 12(37): 14729-14753.
- [22] ZHANG Hao, SONG Yaduo, ZHAO Jiale, et al. Kinetics dominated, interface targeted rapid heating for battery material rejuvenation [J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(13): 2404838.
- [23] HU Xianfeng, MOUSA E, TIAN Yang, et al. Recovery of Co, Ni, Mn, and Li from Li-ion batteries by smelting reduction: part I a laboratory-scale study [J].

- Journal of Power Sources, 2021, 483: 228936.
- [24] CHEN Weiyin, CHEN Jinhang, BETS K V, et al. Battery metal recycling by flash joule heating [J]. Science Advances, 2023, 9(39): eadh5131.
- [25] BAI Yaocai, MURALIDHARAN N, SUN Y K, et al. Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: concept of battery identity global passport [J]. Materials Today, 2020, 41: 304-315.
- [26] BISWAL B K, ZHANG Bei, TRAN P T M, et al. Recycling of spent lithium-ion batteries for a sustainable future: recent advancements [J]. Chemical Society Reviews, 2024, 53(11): 5552-5592.
- [27] CHUNG H, KIM J, BAE Y S, et al. Predictive modeling of lithium-ion battery degradation: Incorporating SEI layer growth and mechanical stress factors [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(11): 6157-6167.
- [28] TAN D H S, CHEN Yuting, YANG Hedi, et al. Carbon-free high-loading silicon anodes enabled by sulfide solid electrolytes [J]. Science, 2021, 373(6562): 1494-1499.
- [29] JIANG Lili, YAN Chong, YAO Yuxing, et al. Inhibiting solvent co-intercalation in a graphite anode by a localized high-concentration electrolyte in fast-charging batteries [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(7): 3402-3406.
- [30] HAN Bing, ZOU Yucheng, XU Guiyin, et al. Additive stabilization of SEI on graphite observed using cryo-electron microscopy [J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(9): 4882-4889.
- [31] YANG Dan, YANG Ying, DU Haoran, et al. An efficient recycling strategy to eliminate the residual "impurities" while heal the damaged structure of spent graphite anodes [J]. Green Energy & Environment, 2024, 9(6): 1027-1034.
- [32] DONG Shu, SONG Yali, YE Ke, et al. Ultra-fast, low-cost, and green regeneration of graphite anode using flash joule heating method [J]. EcoMat, 2022, 4(5): e12212.
- [33] LI Tangyuan, TAO Lei, XU Lin, et al. Direct and rapid high-temperature upcycling of degraded graphite [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(43): 2302951.
- [34] SHANG Zhen, ZHANG Naizhe, YING Zhiwen, et al. Direct regeneration and flash upcycling of mixed spent graphite with a uniform energy-storage property [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 505: 159132.
- [35] CHENG Zhiheng, LUO Zhiling, HAO Zhang, et al. Targeted regeneration and upcycling of spent graphite by defect-driven tin nucleation [J]. Carbon Energy, 2024, 6(4): e395.
- [36] JI Yongsheng, ZHANG Hao, YANG Dan, et al. Regenerated graphite electrodes with reconstructed solid electrolyte interface and enclosed active lithium toward >100% initial coulombic efficiency [J]. Advanced Materials, 2024, 36(19): 2312548.
- [37] XIONG Ananjiao, WANG Yanfeng, LU Jijun, et al. Upcycling of photovoltaic waste graphite into high performance graphite anode [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 685: 555-564.
- [38] LI Chengxiang, KOU Pengfei, WEN Hong, et al. Efficient and environmentally friendly separation and recycling of cathode materials and current collectors for lithium-ion batteries by fast Joule heating [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 990: 174446.
- [39] CHEN Weiyin, CHENG Yi, CHEN Jinhang, et al. Nondestructive flash cathode recycling [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 6250.
- [40] CHEN Weiyin, CHENG Jinhang, BETS K V, et al. Battery metal recycling by flash joule heating [J]. Science Advances, 2023, 9(39): eadh5131.
- [41] YIN Yunchao, LI Chao, HU Xueshan, et al. Rapid, direct regeneration of spent LiCoO₂ cathodes for li-ion batteries [J]. ACS Energy Letters, 2023, 8(7): 3005-3012.
- [42] 胡坤, 宋小鹏, 贾贵斌. 锂电池废旧正极材料回收方法的研究进展 [J]. 化工技术与开发, 2024, 53(12): 52-56.
- HU Kun, SONG Xiaopeng, JIA Guibin. Research progress on recycling methods of spent cathode materials for lithium batteries [J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2024, 53(12): 52-56.
- [43] SALVATIERRA R V, CHEN Weiyin, TOUR J M. What can be expected from "anode-free" lithium metal batteries? [J]. Advanced Energy and Sustainability Research, 2021, 2(5): 2000110.
- [44] MAKUZA B, TIAN Qinghua, GUO Xueyi, et al. Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: a comprehensive review [J]. Journal of Power Sources, 2021, 491: 229622.
- [45] VAN BEEK C B, YILMAZ E, BOOM D H A. Sustainable hydrometallurgical LFP battery recycling: electrochemical approaches [J]. ChemSusChem, 2025, 18(11): e202402699.
- [46] SUN Mingxing, WANG Yutao, HONG Jinglan, et al. Life cycle assessment of a bio-hydrometallurgical treatment of spent ZnMn batteries [J]. Journal of

- Cleaner Production, 2016, 129: 350-358.
- [47] WATSON B, CARLSON B, SMIRNOVA A. Innovative methodology for advanced battery recycling research demonstrated with electrochemical extraction [J]. Journal of Power Sources, 2024, 594: 234025.
- [48] 王乔, 李海英, 汪小琪, 等. 废旧锂离子电池正极材料有价金属回收研究进展 [J]. 化学通报, 2024, 87(4): 441-448.
- WANG Qiao, LI Haiying, WANG Xiaoqi, et al. Research progress in valuable metal recovery from cathode materials of used Lithium-Ion batteries [J]. Chemistry, 2024, 87(4): 441-448.
- [49] CORNELIO A, ZANOLETTI A, BONTEMPI E. Recent progress in pyrometallurgy for the recovery of spent lithium-ion batteries: a review of state-of-the-art developments [J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2024, 46: 100881.
- [50] QIAO Wenyuan, ZHANG Ren, WEN Yikai, et al. Green solvents in battery recycling: status and challenges [J]. Journal of Materials Chemistry: A, 2024, 12(19): 11235-11265.
- [51] NASERI T, POURHOSSEIN F, MOUSAVI S M, et al. Manganese bioleaching: an emerging approach for manganese recovery from spent batteries [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2022, 21(2): 447-468.
- [52] ZHAO Jingjing, ZHOU Fengyin, WANG Hongya, et al. Coupling electrochemical leaching with solvent extraction for recycling spent lithium-ion batteries [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(38): 16803-16814.
- [53] YU Haoxuan, HUANG Meiting, LI Yifeng, et al. Toward joule heating recycling of spent lithium-ion batteries: a rising direct regeneration method [J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 105: 501-513.
- [54] CHEN Weiyin, CHEN Jinhang, BETS K V, et al. Battery metal recycling by flash joule heating [J]. Science Advances, 2023, 9(39): eadh5131.
- [55] REY I, VALLEJO C, SANTIAGO G, et al. Environmental impacts of graphite recycling from spent lithium-ion batteries based on life cycle assessment [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(43): 14488-14501.
- [56] DAI Qiang, SPANGENBERGER J, AHMED S, et al. EverBatt: a closed-loop battery recycling cost and environmental impacts model [EB/OL]. (2025-04-01) [2025-04-09]. <https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/07/153050.pdf>.
- [57] WU Danna, SHENG Jian, LU Haigang, et al. 100-gram batch production of graphene using high-power rapid joule heating method [EB/OL]. (2024-09-26) [2025-03-06]. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-0c0lk>.
- [58] REN Dongsheng, LU Languang, HUA Rui, et al. Challenges and opportunities of practical sulfide-based all-solid-state batteries [J]. eTransportation, 2023, 18: 100272.
- [59] WYSS K M, LUONG D X, TOUR J M. Large-scale syntheses of 2D materials: flash joule heating and other methods [J]. Advanced Materials, 2022, 34(8): e2106970.

(编辑 武红江)