doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.021
引用格式：李富宇，张笑盈，宋安安，冯孟黎. 退役锂离子电池资源化：技术、挑战与趋势[J]. 矿冶，2026，35(2)：344-356.
LI Fuyu, ZHANG Xiaoying, SONG An'an, FENG Mengli. Resource recovery from spent lithium-ion batteries: technologies, challenges, and trends[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 344-356.

退役锂离子电池资源化：技术、挑战与趋势

李富宇[1,2] 张笑盈[1] 宋安安[1] 冯孟黎[3]
（1. 昆明冶金高等专科学校新能源关键材料协同创新中心，昆明 650300；
2. 昆明理工大学 设计研究院有限公司，昆明 650032；
3. 昆明精粹工程技术有限公司，昆明 650056）

摘 要：全球气候变暖持续加剧，减少温室气体排放与推动能源清洁化转型已成为全球共识与紧迫议题。锂离子电池（LIB）凭借其高能量密度、长循环寿命等优势，在电动汽车及储能领域获得广泛应用，但其大规模应用也导致退役电池数量激增，回收处理面临严峻挑战。退役LIBs富含锂、镍、钴等战略金属，具备显著的资源价值与回收潜力。然而，现有主流回收工艺（如火法冶金、湿法冶金）普遍存在能耗高、污染重、经济性依赖金属价格等瓶颈，难以满足绿色低碳与资源循环的发展需求。为此，开发高效、环境友好且经济可行的新一代回收技术已成为当前研究热点。近年来，预处理无氟化与智能化、有机酸/生物浸出、低共熔溶剂及直接再生等绿色替代工艺不断涌现，推动回收技术向绿色化、精细化与闭合循环方向发展。本文系统综述退役LIBs回收技术现状，涵盖预处理、正极金属资源化回收（火法、湿法、直接再生）等关键环节，并对不同方法进行比较分析。在此基础上，探讨当前研究在反应机理、溶剂循环、规模化放大等方面存在的不足，以及产业化进程中面临的拆解分选、成本控制、标准缺失等挑战。最后，从技术突破等角度展望未来发展路径，旨在为推动LIBs回收技术创新与产业可持续发展提供系统性参考。

关键词：废旧锂离子电池；回收技术；资源化；预处理；正极金属回收；直接再生；绿色冶金；产业化挑战
中图分类号：TQ460.6+4 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）02-0344-13

Resource recovery from spent lithium-ion batteries: technologies, challenges, and trends

LI Fuyu[1,2] ZHANG Xiaoying[1] SONG An'an[1] FENG Mengli[3]
(1. Collaborative Innovation Center for New Energy Key Materials of Kunming Metallurgy College, Kunming 650300, China;
2. Design and Research Institute Co. Ltd., Kunming University of Science and Technology, Kunming 650032, China;
3. Kunming Essence Engineering Technology Co., Ltd., Kunming 650056, China)

Abstract: The continuous intensification of global warming has made reducing greenhouse gas emissions and promoting the transition to clean energy a global consensus and an urgent priority. Lithium-ion batteries (LIBs) have been widely adopted in electric vehicles and energy storage systems due to their advantages such as high energy density and long cycle life. However, their large-scale deployment has led to a surge in the number of spent batteries, posing severe challenges for recycling and treatment. Spent LIBs are rich in strategic metals like lithium, nickel, and cobalt, holding significant resource value and recovery potential. Nevertheless, existing mainstream recycling processes (e.g., pyrometallurgy, hydrometallurgy) commonly suffer from bottlenecks such as high energy consumption, heavy pollution, and economic dependence on metal prices, making it difficult to meet the

收稿日期：2025-09-19 **修回日期：**2025-11-16 **录用日期：**2025-12-04
基金项目：昆明冶金高等专科学校博士科研启动基金资助项目(Xxrcxm202301)；云南省重大科技专项计划项目(202302AB080012)
第一作者：李富宇，硕士，主要从事有色金属冶金研究。E-mail：ecmlfy@sohu.com
通信作者：张笑盈，博士，高级工程师；E-mail：zhangxiaoying83@163.com
©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

development demands of green, low-carbon practices and resource circulation. Therefore, developing efficient, environmentally friendly, and economically viable next-generation recycling technologies has become a current research focus. In recent years, green alternative processes such as fluorine-free and intelligent pretreatment, organic acid/biological leaching, deep eutectic solvents, and direct regeneration have been emerging one after another, driving the development of recycling technologies toward greenization, refinement and closed-loop circulation. This paper systematically reviews the current status of recycling technologies for spent lithium-ion batteries (LIBs), covering key links such as pretreatment and resource recovery of cathode metals (pyrometallurgy, hydrometallurgy, and direct regeneration), and conducts comparative analysis on different methods. On this basis, it discusses the existing shortcomings in current research, such as reaction mechanisms, solvent recycling, and scale-up challenges, as well as the practical industrial obstacles like disassembly and sorting, cost control, and lack of standards. Finally, the future development pathways are prospected from the perspectives of technological breakthroughs and other aspects, aiming to provide a systematic reference for promoting the innovation of LIBs recycling technologies and the sustainable development of the industry.

Key words: spent lithium-ion batteries; recycling technology; resource recovery; pretreatment; cathode metal recovery; direct regeneration; green metallurgy; industrialization challenges

随着世界经济的快速发展，全球能源消耗持续增长，二氧化碳（CO_2）排放量随之攀升，导致全球气候变暖不断加剧[1]。据预测，若不加干预，本世纪末地表平均气温将较工业化前水平显著升高[2]。化石燃料的广泛使用是这一危机的主要成因，推动能源结构清洁化与终端用能电气化转型成为关键应对策略。在此背景下，汽车产业正加速向电动化迈进[3]，而作为其核心的电池技术，也正经历从液态锂离子电池向更高性能固态电池的关键转变[4]。

锂离子电池（LIBs）凭借其高能量密度、长循环寿命等优势，已成为当前电动汽车和储能系统的主流选择，并广泛应用于消费电子、航空航天等诸多领域[5]。根据正极材料体系的不同，商业化LIBs主要涵盖磷酸铁锂（LFP）、钴酸锂（LCO）和三元镍钴锰酸锂（NCM）等类型。随着电动汽车保有量的激增，首批动力电池已进入退役期，预计到2030年，中国待回收的电池废弃物总量将达数十万吨规模[6]，大规模、高效化的回收处理势在必行。退役LIBs并非简单的固体废物，而是蕴含锂、镍、钴、铜、铝等有价金属的“矿山”。全球锂资源储量有限，且分布不均，而未来电动汽车产业对锂、钴、镍等关键金属的需求将呈指数级增长，可能远超现有探明储量[7-9]。因此，高效回收LIBs中的有价资源，对于保障国家战略资源安全和缓解原生矿产资源开采压力具有重要意义。

为应对这一挑战，LIBs回收技术已成为全球研发与产业化的热点。目前，以预处理、湿法冶金和火法冶金为核心的传统回收工艺已实现初步工业化应用，并证明了其技术可行性[10-12]。例如，部分领先企业通过湿法冶金工艺，已能实现电池级金属盐的再生，用于制造新电池正极材料；预测显示，至2050年，美国电动汽车电池所需原料中，回收来源的钴、锂、镍将贡献显著比例[13]。然而，现有主流工艺仍普遍面临流程长、能耗高、二次污染风险及经济性依赖于金属价格波动等瓶颈。因此，开发高效、环境友好且成本可控的下一代绿色回收技术，已成为行业突破的关键方向。在此背景下，本文旨在系统综述退役LIBs资源化回收的全链条技术进展。文章将首先阐述预处理环节的技术及其进展；进而重点评述正极材料资源化的多种技术路径，包括火法冶金、湿法冶金及其绿色改良工艺（如有机酸/生物浸出）、以及直接再生技术等，并对比其优缺点；最后，针对当前研究在绿色浸出机理、溶剂循环、产业放大等方面的空白，以及规模化应用中面临的自动化拆解、工艺稳定性、成本与标准等挑战进行深入探讨，以期为推动LIBs回收技术向绿色化、经济化转型，并最终构建高效的闭环循环体系提供前瞻性的思路与参考。

1 LIBs回收预处理

预处理是LIBs回收过程中的关键环节，预处理的首要目的是保障回收操作的安全性，同时减少污染物排放，并为后续高效回收有价值组分奠定基础。如图1所示，预处理通常主要包括放电、拆解和分离等步骤[14,15]。

1.1 放电

放电是LIBs回收预处理中释放残余电荷的关键第一步。若残余电荷未有效释放，电池阴阳极间存

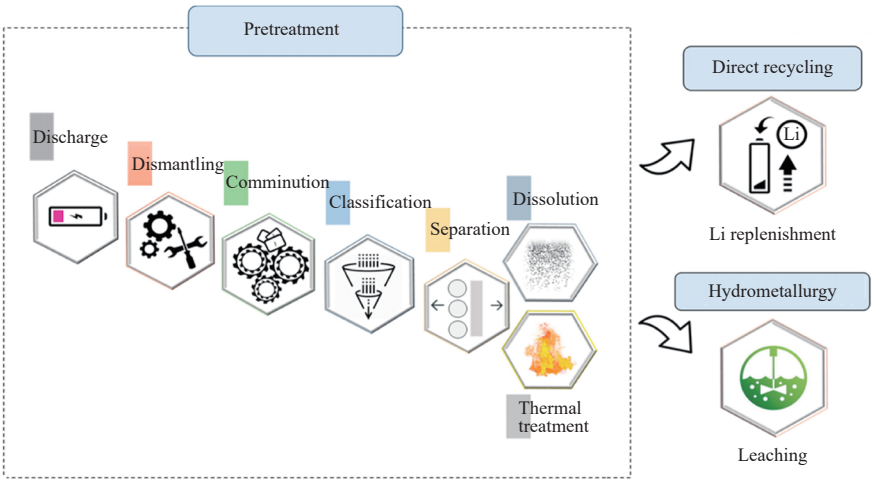


图1 LIBs回收预处理过程[14]

Fig. 1 Pretreatment process during the LIBs recycling[14]

在短路风险，在后续拆解过程中也可能引发爆炸等安全事故[16,17]。目前常用的放电介质为导电盐溶液（图2(a)）。例如，采用1 mol·L^{-1} NaCl溶液可实现较高的放电效率且成本低廉[18]。然而，Cl^-会加速电池铁质外壳的腐蚀，增加回收过程的污染风险。因此，使用1 mol·L^{-1} Na_2SO_4溶液进行放电，不仅效率高、过程温和，还能有效抑制剧烈的电化学反应和有机电解液泄漏（图2(b)），从环境影响角度看，这是一种更清洁的放电方案[18]。

1.2 拆解

机械破碎法因其处理效率高、自动化程度高，已成为当前废旧LIBs拆解的主流技术。相比之下，人工拆解不仅成本较高，还可能使操作人员暴露于有害气体中，存在健康隐患[19]。机械破碎法主要分为湿法破碎和干法破碎。湿法破碎通常采用水介质刀片式破碎机[20]。与干法破碎相比，湿法破碎所得颗粒粒径相对均匀，并能较好地保持电极材料的原始结构（图2(c)）。然而，这个过程受到用水量和废水产生问题的限制。此外，由于水中的铜箔和铝箔过度破碎，湿法回收的产品中的杂质通常高于干法回收的杂质，这不利于后续的回收过程[21]。干法破碎则被认为是一种更具优势的方法，因其能实现更有效的选择性破碎，该技术的特点在于将破碎过程与初步材料分离相结合。此外，水电解分离法也可用于实现集流体与电极活性材料的有效分离。与传统机械破碎方法不同，此方法能获得洁净的集流体表面（残留活性材料极少），从而较好地保持集流体的原始尺寸和完整性[22]。

1.3 分离

由于不同正极材料的密度差异显著，LIBs可通过机械分离方法实现集流体与正极活性材料的有效分离[23]。在实施机械分离之前，通常需进行热解等预处理以去除黏结剂。该分离操作旨在将废旧LIBs拆解为各主要组分，从而为后续高效回收有价金属奠定基础。

1.3.1 集流体分离

优先分离集流体铝箔可提高有价金属回收效率，并简化整个工艺流程[24]。剪切破碎和冲击破碎也可用于电极材料的解离，但会造成铝箔的过度破坏[25]。经过500 ℃加热20 min的预处理并进行研磨后，黏结剂温度达到转变温度并随之失效，铝箔的剥离效率从19.97%增加到58.89%。这有效解决了常温下研磨过程的非选择性及铝箔破坏问题[25]。利用环保高效溶剂DES（ChCl-EG）在微波辅助下快速降解黏合剂PVDF的策略，可实现正极材料中铝箔的完全分离，同时黏结剂被转化为可被吸附的小分子[26]。该方法具有效率高、操作简单、回收率高等显著优势。研究表明利用铝箔与聚偏氟乙烯（PVDF）之间相对较弱的结合力，在3 g·L^{-1}硫酸钠溶液中施加10 V电压，可实现铝箔的电化学剥离，从而使正极材料从洁净的铝箔上分离[27]。

1.3.2 黏结剂分离

黏结剂的分离方法主要包括固相热化学法、溶液化学法及溶剂溶解法等。作为固相热化学法的一种，熔盐分离法具有工作温度范围宽、热导率高、材料成本低等优点。采用LiOAc-$LiNO_3$熔盐体系可在300 ℃下熔化PVDF黏结剂，该方法避免了腐蚀性化学品，并最大限度地减少了回收产品的颗粒团聚。与钠盐体系或直接煅烧法相比，LiOAc-$LiNO_3$熔盐体系可防止反应温度过高或锂进一步损失，并最大限度地减少晶体结构和形貌变化[28]。另一种固相热化学

法–高压脉冲放电法，则利用瞬时高能脉冲释放的能量实现金属与非金属材料的分离。在高压脉冲作用下，PVDF黏结剂失去黏性，从而实现铝箔的剥离[29]。尽管该方法的分离效率较高，但其高昂成本限制了其大规模工程应用。溶液化学法通过调控溶液环境（如酸/碱反应、芬顿氧化、电化学氧化等）促使黏结剂分离。近年来，芬顿氧化法因其相较于常规酸、碱及氧化溶液反应具有污染小、效率高的优势，已被应用于分解PVDF[30]。研究表明，芬顿氧化可有效去除LCO电池正极活性材料及石墨负极表面的PVDF黏结剂[31]。此外，在超声空化辅助下，芬顿试剂产生的羟基自由基能显著提高与PVDF的接触面积及剥离速率[32]。溶剂溶解法则利用有机溶剂、低共熔溶剂（DES）或超临界流体等溶解PVDF[33]。其中，超临界二氧化碳（SC-CO_2）因能耗低、无二次污染、不易燃且易达到超临界状态等优点备受关注。当SC-CO_2与助溶剂（如二甲基亚砜，DMSO）联用时，可构建高效体系用于PVDF的萃取分离。综上所述，相较于传统热解或焚烧法处理黏结剂，当前发展的PVDF分离技术（熔盐、高压脉冲、芬顿氧化、溶剂溶解等）显著降低了氟化气体的排放风险，并逐步向无害化、资源化及高效化方向发展。

1.3.3 正极活性材料分离

铝箔集流体分离后，正极活性材料与石墨的有效分离是废旧LIBs回收的关键步骤之一。机械摩擦分离法利用摩擦作用，实现废LIBs中正极集流体和正极活性物质的有效分离。与传统的分离技术相比，该技术具有能耗低、作简单、可控性好、环保等优点[34]。浮选法则广泛用于分离负极石墨材料，其原理基于石墨与金属材料表面亲水/疏水性质的差异。然而，在实际应用中，电极材料表面残留的黏结剂和电解液会显著削弱这种疏水性差异，降低浮选选择性。因此，石墨的有效浮选分离通常在黏结剂去除步骤之后进行[35]。此外，大量锂残留在石墨的嵌入层中，浮选过程中易发生锂离子溶出。这不仅会降低分离所得石墨的纯度，溶出的锂离子还可能干扰后续正

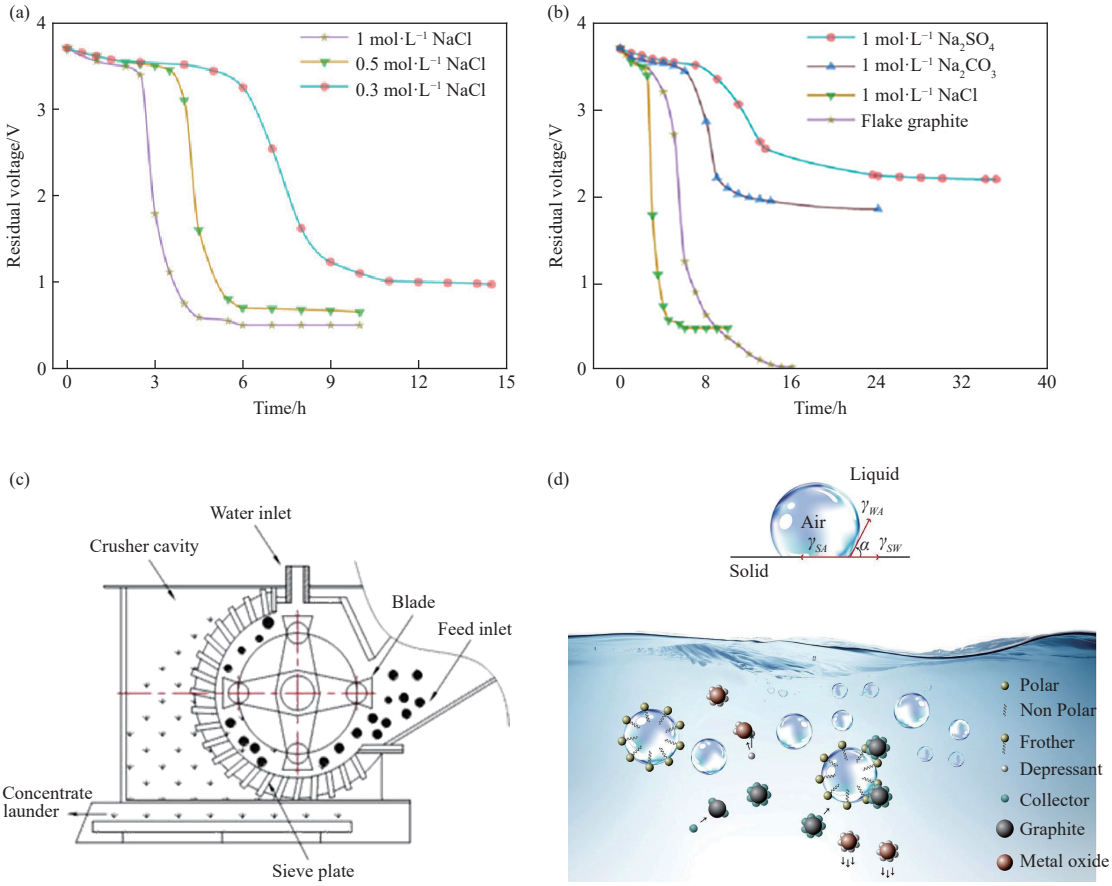


图2 (a)三种浓度的NaCl溶液放电效率比较[18]；(b)不同放电介质的最佳放电效率比较[18]；(c)水介质刀片式破碎机示意图[21]；(d)泡沫浮选示意图[37]

Fig. 2 (a) Comparison of the discharge efficiency of three concentrations of NaCl solution[18]; (b) Comparison of the best discharge efficiency of different discharge media[18]; (c) Schematic diagram of water medium blade crusher[21]; (d) Schematic diagram of foam flotation[37]

极活性材料的回收效率[36]。因此，浮选前进行清洁处理以去除石墨中嵌入的锂至关重要。为提升分离效果，可采用苛化处理的可溶性淀粉进行选择性吸附预处理，再结合泡沫浮选（图2(d)）[37]。但该工艺存在锂流失问题：电解液中的锂易以离子形式溶于水相。针对此缺点，研究表明含锂废水可通过标准电渗析（ED）和双极膜电渗析（BPED）两种电渗析方法富集锂离子，从而实现锂的选择性沉淀回收[38]。焙烧–浮选联合工艺可有效解决黏结剂残留和锂流失问题。在400 ℃下焙烧1 h，可高效去除黏结剂和残留电解液，同时确保石墨无明显损失。此预处理显著增强了正负极材料间的可浮性差异，从而提高后续浮选效率[39]。综上所述，浮选技术因其成本低廉、操作简便且无剧烈化学反应等特点，在LIBs回收领域具有广阔的应用前景。

2 正极金属资源化回收技术路径

LIBs正极活性材料含有多种有价金属组分，其复杂成分决定了需采用多级分离工艺以实现不同金属的选择性回收。目前，火法冶金和湿法冶金仍是实现正极金属浸出的主要技术路线。此外，将火法与湿法工艺相结合的处理策略也展现出高效的金属回收潜力。近年来，碳热还原法、低共熔溶剂法等新型分离技术的提出，进一步完善了正极金属资源化回收的技术体系[40]。

2.1 火法冶金技术

火法冶金是当前大型电池回收企业广泛采用的核心工艺之一。其在废旧LIBs回收中的关键作用之一，是在金属回收前彻底去除黏结剂。GAO等[41]提出，焙烧温度需严格控制，温度过高可能导致石墨氧化，进而影响后续浮选效率。然而，传统火法工艺会释放氟化氢（HF）等有毒气体及有机挥发物，存在环境污染风险。火法冶金的另一核心功能是将正极活性材料转化为金属氧化物或金属。该过程主要分为常规火法冶金和碳热还原（CTR）法。CTR工艺通过在焙烧过程中添加碳质还原剂实现。还原剂不仅参与金属氧化物的还原反应，还能促进黏结剂和残留电解液的热解转化，从而强化整个还原过程。以碳为还原剂为例：加热初期，黏结剂与电解液率先发生热解转化；随着温度持续升高，碳与正极活性材料发生还原反应，生成金属氧化物及碳酸盐。MEI等[42]通过实验记录发现，LCO正极材料可被还原为CoO、Li_2O和Li_2CO_3等产物（图3(a)）。类似地，ZHOU等[43]通过研究证实，LMO正极材料则被还原为MnO和Li_2CO_3等（图3(b)）。若进一步提高温度，这些金属氧化物可被进一步还原为相应的纯金属，完成整个碳热还原过程。与常规火法冶金相比，CTR工艺具有显著优势：其所需工作温度相对较低（通常800~1 000 ℃），且能获得更高的金属回收率与产物纯度。

2.1.1 焙烧还原工艺

焙烧法作为火法冶金的关键技术，利用热能与还原剂实现废旧LIBs中有价金属（如Co、Ni、Mn、Li）的分离与回收[44]。WEI等[45]研究表明：以LIBs废膜等为还原剂时，镍钴锰酸锂（NCM523）正极材料约在450 ℃开始还原，逐步转化为CoO、NiO和MnO，且转化率随温度升高显著提升。采用NH_3在无氧条件下焙烧LCO电池，产物为Co、Li_2CO_3与石墨的混合物，后续可通过湿式磁选分离铁磁性钴[46]；FENG等[47]则提出，利用生物质废弃物作还原剂，则兼具资源化利用与减少污染的优势。然而，焙烧法仍面临产物含杂质需深度净化，以及可能释放HF、CO_2等气体，需配套高效收集净化系统的挑战。

2.1.2 选择性挥发工艺

QU等[48]研究表明，在优化工艺条件下（以铜渣为助熔剂，并添加$CaCl_2$），可实现氯化锂（LiCl）的高效挥发，挥发率可达96.87%。挥发收集的LiCl可进一步通过沉淀转化反应制备Li_2CO_3实现循环利用。与传统火法冶金工艺不同，此方法是针对锂元素的定向回收。然而，其反应条件相对苛刻，目前难以实现大规模工业应用，相关系统性研究也较为缺乏。尽管如此，该方法展现出潜力，未来仍值得深入探索。

2.1.3 焦耳热闪蒸技术

焦耳热闪蒸法（FJH）因其制备合金纳米材料的能力而备受关注[49]。该方法将金属盐负载于碳载体上，在高温和液态金属催化下，颗粒发生分裂并生成多种金属混合物，随后经冷却获得多金属纳米颗粒[49]。此方法也已应用于LIBs的火法冶金回收。SHEN等[50]通过FJH可获得金属氧化物或金属单质。与CTR相比，具有温度分布均匀、升降温速率快、反应时间短等优势。在FJH工艺中，以碳为还原剂，$LiNi_xCo_yMn_zO_2$首先分解，随后被还原为金属单质或低价金属氧化物，之后再进行浸出处理。FJH具备低能耗和大规模应用的潜力，因此可能成为一种新兴的火法冶金方法。

2.2 湿法冶金技术

湿法冶金是一种利用酸浸、碱浸等方法进行金

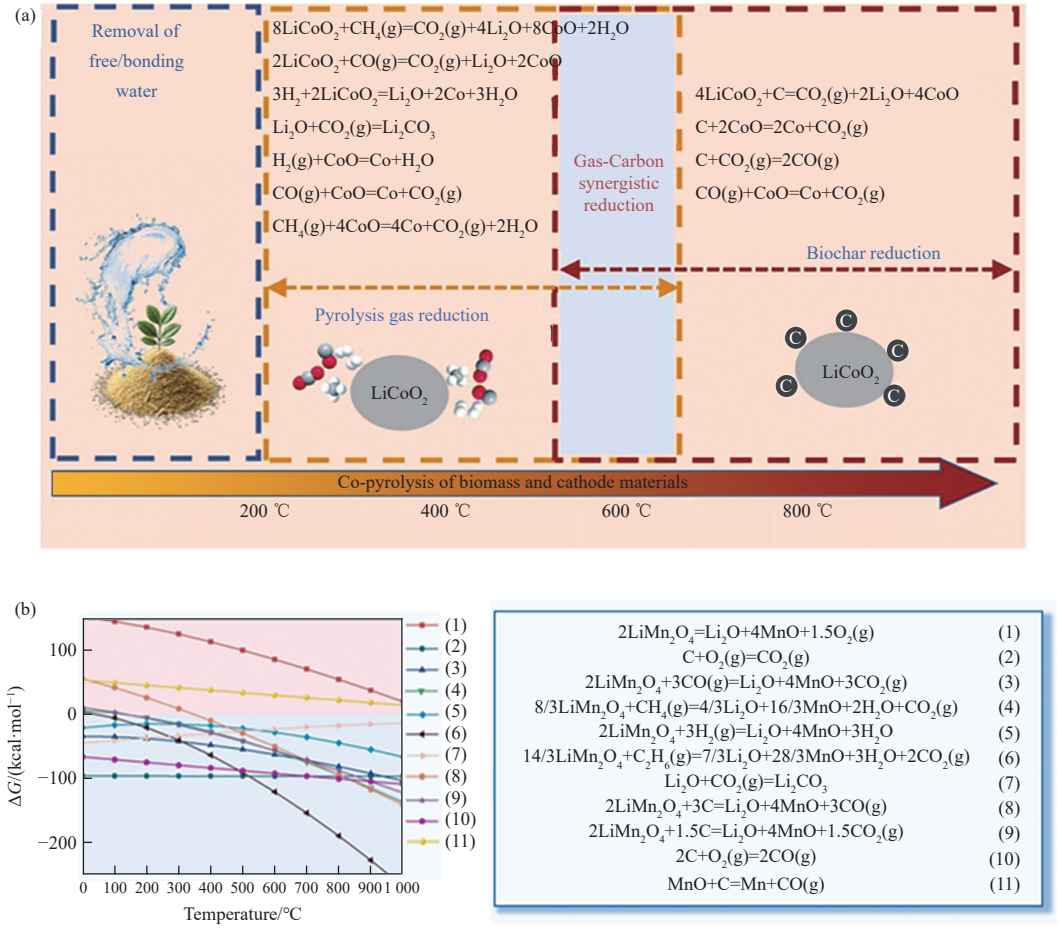


图3　(a) $LiCoO_2$热还原示意图[42]; (b) $LiMn_2O_4$热还原示意图[43]

Fig. 3　(a) $LiCoO_2$ thermal reduction diagram[42]; (b) $LiMn_2O_4$ thermal reduction diagram[43]

属溶解的高效方法，与火法冶金相比，湿法冶金回收LIBs具有回收率高、纯度高、温室气体排放少等优点，对环境更加友好，具有良好的发展前景[51]。

2.2.1　酸浸

LIBs正极活性材料中高价态金属（如Mn^{4+}、Co^{3+}）的浸出需还原剂辅助。传统无机强酸体系（HCl/HNO_3/H_2SO_4-H_2O_2）虽成熟高效[52]，但面临NO_2污染、设备腐蚀等问题；磷酸（H_3PO_4）体系作为清洁替代方案，兼具浸出与共沉淀功能，可同步回收LFP和NCM电池并生成$FePO_4$及含Li^+/Ni^{2+}/Co^{2+}/Mn^{2+}浸出液[53]。有机酸浸出因绿色、选择性好而兴起。草酸作为一种广泛使用的浸出剂，也被用于回收LIBs。草酸锂与草酸钴溶解度的差异有助于实现两种金属的选择性分离[54,55]；葡萄糖酸是一种无毒的弱有机酸，易溶于水。由于其对金属离子的复杂作用，可用作浸出剂。以H_2O_2为还原剂，金属离子的回收率可达98%以上[56,57]。无机酸与有机酸浸出率均可达>95%，但存在互补短板：前者伴生污染且选择性差[58]，后者因酸性弱导致用量大、耗时长[59]。硫酸-丙二酸共浸出体系结合了两者优势：正极材料先与硫酸反应，在消耗一定量硫酸后，丙二酸与金属发生浸出和络合反应。与单一硫酸或丙二酸浸出体系不同，混合酸体系的浸出产物中无明显未反应物。H_2O_2是酸浸体系中常用的还原剂，但由于其易分解，仍无法达到理想的还原效果。近年来，多种新型还原剂被引入，如纤维素、蔗糖和葡萄糖，它们具有良好的还原特性和浸出效果。在硫酸浸出中，使用纤维素、蔗糖和葡萄糖时，Li的回收率分别可达100%、100%和96%，Co的回收率分别可达54%、96%和98%[60]。银杏叶提取物（GKB）被用作硫酸浸出体系中的还原剂，将NCM电池正极还原为硫酸盐。GKB中的羟基起主要还原作用，其自身被氧化为醛基和羧基[61]。该过程已被证明是一种新型环保技术。此外，基于废物再利用理念，新型还原剂被开发出来。抗生素菌渣是一种生物质废物。其代谢产物草酸钙（CaC_2O_4）和还原糖可协同还原LIBs正极材料。尽管浸出液中高浓度的Ca^{2+}使相分离困难，但抗生素菌渣可将负极石墨再生为富碳材料[62]。

2.2.2 碱浸

相较于酸浸的腐蚀性与污染风险，碱浸法凭借其选择性优势成为重要替代工艺[63]，主要分为两类：1）OH^-选择性浸出：利用碱性溶液（如5% NaOH，固液比0.1 g·mL^{-1}）高效溶解铝及其氧化物，浸出率达99.9%[64]；2）氨浸法：通过络合反应选择性提取金属，典型体系如NH_3-$(NH_4)_2CO_3$-Na_2SO_3，氨浸出会导致Ni、Co和Li的选择性浸出，而不会浸出沉淀为$(NH_4)_2Mn(SO_3)_2 \cdot H_2O$，有利于进一步分离纯化[65]。

2.2.3 低共熔溶剂浸出技术

低共熔溶剂（DES）是由氢键受体（HBA）与供体（HBD）构成的绿色溶剂，凭借高生物降解性、热稳定性及对金属氧化物的高效选择性（图4(a)）[66,67]，近年被应用于LIBs回收。CAO等证实，氯化胆碱（ChCl）-乳酸（LAC）DES实现93%金属锂的回收率并证实低共熔溶剂循环可行性（图4(b)）[68]，其中LAC通过增强氯化物活性与金属离子相互作用，从而提升还原能力；LIU等发现，盐酸甜菜碱（BeCl）-甲酸（FA）DES实现93%金属锂的回收率，高价金属被FA还原，而氯离子作为亲核试剂进入金属中心，形成$[MCl_4]^{2-}$，加速过渡金属氧化物溶解（图4(c)）[69]；CHENG等[70]指出，DES存在的高黏度问题，可通过水基配方（如ChCl-OA-H2O DES）解决（图4(d)）。尽管DES具备优异选择性、循环稳定性，其高温（>80 ℃）与长时（>12 h）浸出要求仍制约发展[71]，未来需开发中温高效浸出试剂突破局限。

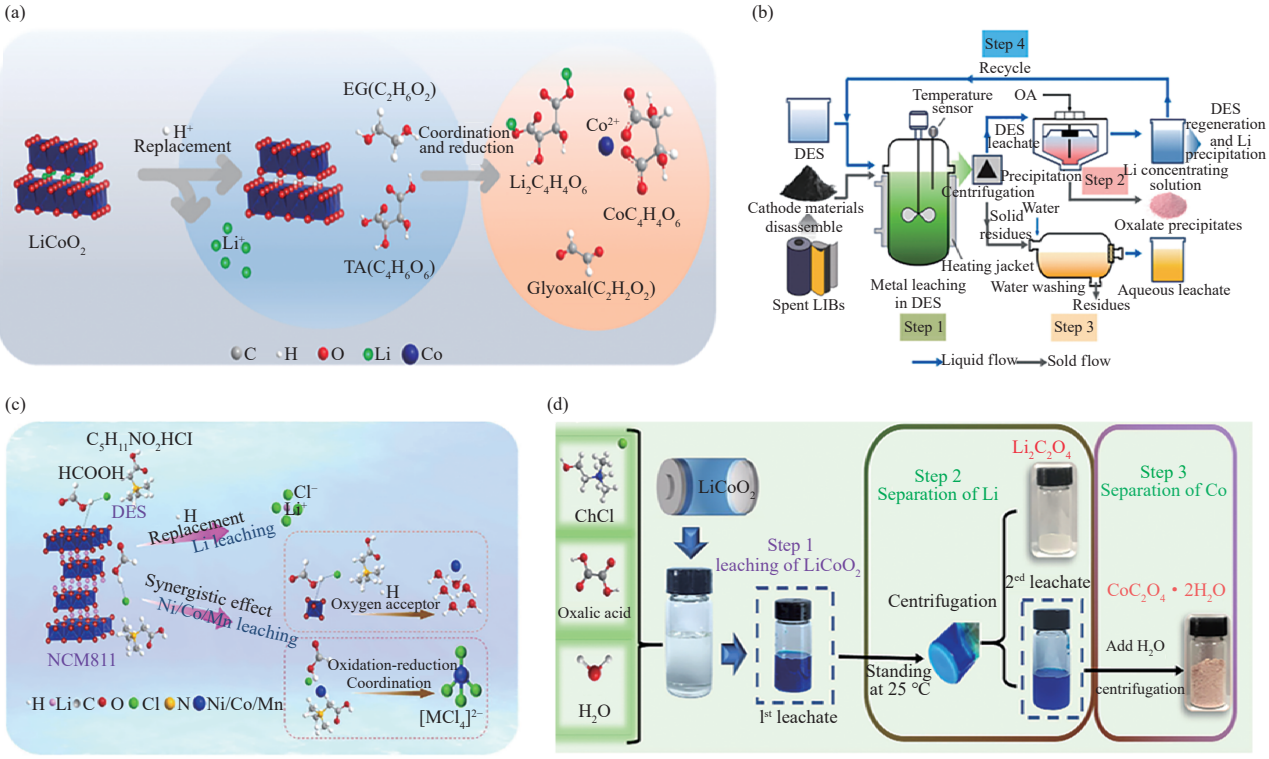


图4 (a) EG-TA DES中Li和Co的原位选择性浸出和分离机理的示意图[66]；(b) ChCl-LAC DES中NCM811的回收示意图[68]；(c) BeCl-FA DES中NCM811正极材料浸出金属的过程示意图[69]；(d) ChCl-OA-H_2O DES中LCO的回收示意图[70]

Fig. 4 (a) schematic diagram of in-situ selective leaching and separation mechanism of Li and Co in EG-TA DES[66]; (b) schematic diagram of recovery of NCM811 in ChCl-LAC DES[68]; (c) schematic diagram of leaching process of NCM811 cathode material in BeCl-FA DES[69]; (d) schematic diagram of recovery of LCO in ChCl-OA-H_2O DES[70]

2.3 直接再生技术

随着电池产能扩张，正极材料需求激增，兼具经济性与环保性的再生技术备受关注。其核心包括金属盐按固定比例烧结（浸出金属盐固相反应重构）与直接再生修复（补锂及结构缺陷修复）[72]。如通过H_2SO_4-H_2O_2体系快速选择性浸出锂，然后通过碳热还原法将回收的$FePO_4$和Li_2CO_3按摩尔比为2.1∶1用于再合成LFP正极材料（图5(a)）[73]。以及废NCM选择性转型为Li_2CO_3/$MnSO_4$/镍钴硫化物，按固定比例配比，在氧气气氛下焙烧获得电化学性能优异的三元材料（图5(b)）[74]。该闭环工艺通过保障原材料可持续供应，具有良好的经济效益与资源循环效益。直接再生法基于废旧LIBs正极材料老化后晶体结构完整性得以保持的特性，通过补锂或缺陷修复直接恢复电

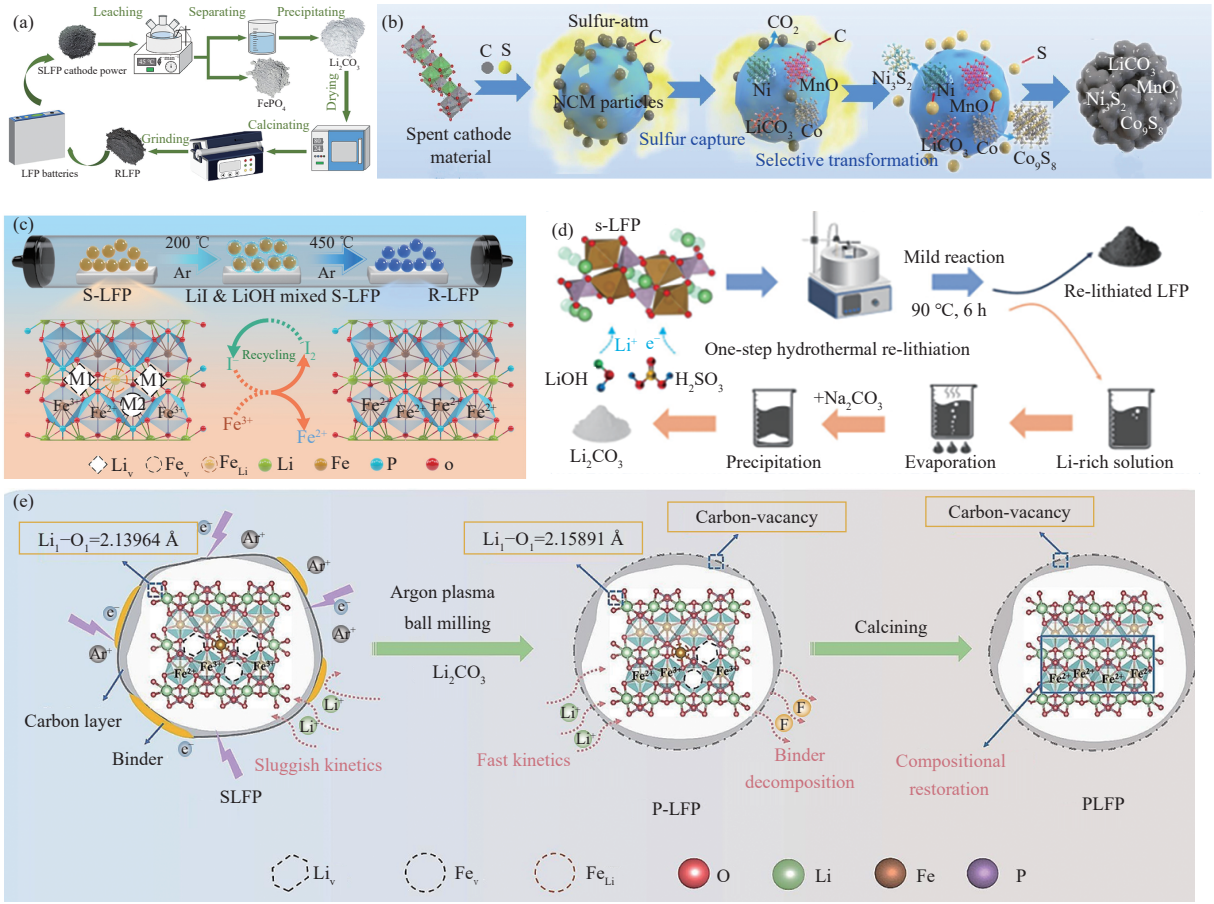


图5　各类再生方法：(a)碳热还原法[73]；(b)选择性硫化法[74]；(c)共晶熔融再生法[76]；(d)水热再生法[77]；(e)氩等离子活化再生法[78]

Fig. 5　Various regeneration methods: (a) carbothermal reduction method[73]; (b) Selective vulcanization[74]; (c) Eutectic melting regeneration method[76]; (d) Hydrothermal regeneration method[77]; (e) Argon plasma activation regeneration method[78]

化学性能[75]；主流工艺包括：1)共晶熔融再生，碘化锂(LiI)-氢氧化锂(LiOH)二元熔融锂盐体系使锂能够与脱锂的磷酸铁锂颗粒充分相互作用，从而克服了固态烧结方法相关的修复不均匀问题，再生材料的电化学性能，包括循环稳定性、离子电导率、放电能力和倍率能力，都得到了全面增强(图5(c))[76]；2)水热再生，采用亚硫酸(H_2SO_3)为还原剂、LiOH为锂源的水热再生体系，在90 ℃条件下实现废旧磷酸铁锂($LiFePO_4$)的高效再生，产物质量损失率仅3.1%。再生后的$LiFePO_4$电池可恢复初始容量的29%，并展现优异的容量保持率(98.9%)(图5(d))[77]；3)氩等离子活化再生，该方法通过氩等离子球磨技术实现双重效应：有效分解电极表面残留黏结剂，并诱导碳层空位构建，显著拓宽锂离子补偿通道；经等离子预处理后，在后续煅烧阶段高效促进Fe^{3+}向Fe^{2+}转化，完成废旧LFP材料的结构再生(图5(e))[78]。对比研究表明：水热法因液相均匀传质特性，在材料纯度与电容保持率上显著优于固态再生路径。

直接再生法的发展仍面临三重障碍[79]：1)杂质离子(如Al^{3+}、Cu^{2+})干扰锂离子脱嵌过程，显著降低充放电效率；2)回收过程引入的铁杂质在充电时易引发铁枝晶生长，导致电池短路风险增加；3)废旧NCM材料表面生成的尖晶石相($Li_xNi_xMn_{3-x}O_4$)因强静电排斥效应阻碍锂离子传输，大幅增加补锂难度。

2.4　不同回收技术路径的比较分析

如图6所示，整个回收流程始于预处理阶段，旨在安全、高效地实现电池各组分的分离。此后，根据回收目标与物料特性，可选择火法冶金、湿法冶金或直接再生等核心工艺路径，最终实现有价金属提取或正极材料再生。如图7所示，不同回收方法在技术路线、经济性及环境影响等方面均存在显著差异，各有其明确的优势与局限性。

火法冶金工艺成熟、流程相对简单，且对废旧电池的分类与预处理要求较低，已在实际工业中得到应用。然而，该方法对钴、镍等高值金属的选择性回

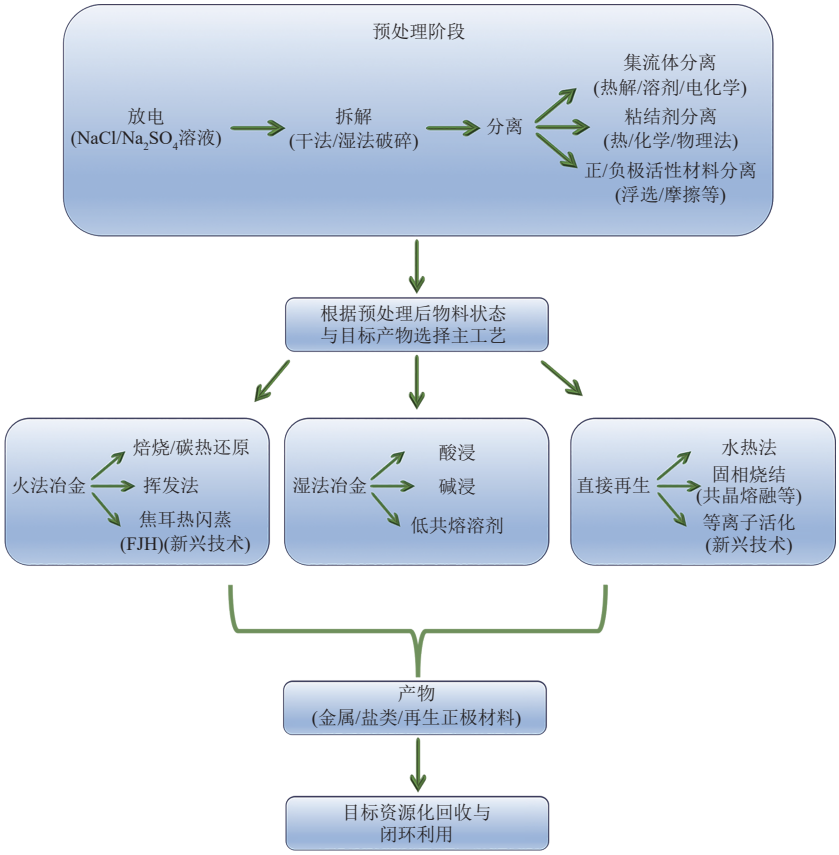


图6　退役锂离子电池资源化回收技术路线图

Fig. 6　Technical roadmap for the resource recycling of spent lithium-ion batteries

技术方法	技术成熟度	环境因素		能耗	总成本	收益
		全球变暖	空气/水污染			
火法冶金	★★★★★	★	★	★	★	★★★★
湿法冶金	★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★★
直接再生	★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★★★



图7　不同锂离子电池回收方法的比较

Fig. 7　Comparison of different LIB recycling methods

收能力较弱，且能耗较高。过程中塑料与电解液等组分的焚烧可能产生有害排放，带来环境污染风险，后续尾气处理也增加了生产成本。

湿法冶金可高效回收电池中的绝大多数有价金属，产品纯度较高，整体能耗低于火法。但其工艺流程复杂，通常依赖强酸等腐蚀性试剂，易产生酸性废水、有毒气体及固体残渣，环保压力较大。近年来，有机酸浸出因其环境友好性和良好还原性受到关注，有助于提升金属浸出效率，但仍面临成本高、反应速率慢、规模化困难等挑战。

直接再生法在低温条件下修复正极材料，能耗显著低于火湿法工艺，兼具经济效益与碳减排潜力。但其技术尚不成熟，对原料一致性要求严苛，处理流程复杂，且一般仅适用于特定化学组成的电池。目前该技术大多处于实验室研究阶段，距离规模化工业应用仍有较大距离。

3　结论与展望

随着废旧锂离子电池（LIBs）数量激增，其回收技术正朝着绿色化、经济化的方向转变。当前，预处理工艺日益注重无氟化与可循环化，新型拆解与分选技术显著提升了关键组分的分离效率和回收纯度；而火法冶金与湿法冶金作为主流工业化路径，虽已实现规模化应用，但仍面临资源综合利用率低、能耗

高、二次污染等共性瓶颈。为突破上述制约，火法衍生工艺（如挥发法、碳热休克法）、有机酸/生物浸出、低共熔溶剂等绿色替代技术快速发展，其中生物浸出以其环境友好性和可持续性展现出潜力，选择性浸出则因高效分离有价金属而备受关注。

新型绿色回收方法的创新性突出体现在其反应机制上：有机酸与低共熔溶剂通过配位/络合作用及氢键网络，在温和条件下实现金属的高选择性浸出；直接再生技术则借助外场辅助与液相传输，有效修复正极材料的体相结构，推动材料闭环循环。然而，这些前沿方法仍存在若干关键科学问题与技术空白：绿色浸出剂的反应动力学缓慢，微观作用机理尚未完全阐明；溶剂循环利用技术及全生命周期成本分析体系欠缺；直接再生对原料一致性要求高，而快速检测与精细分类标准仍不完善；从实验室工艺到连续、稳定、可扩试的工程系统研究明显不足。

产业化层面，回收技术规模化应用面临系统性挑战：大规模处理场景下，电池包的自动化拆解与精准分选是后续工艺稳定运行的前提；实验室工艺在放大过程中常遭遇设备腐蚀、溶剂损耗、产物一致性控制等工程难题；传统火法与湿法工艺设备投资大、运行成本高；规模化生产需稳定充足的废电池供应，而当前回收体系仍不健全、供应链松散；此外，下游企业对再生材料的性能一致性和长期可靠性仍存疑虑，制约其市场化应用。

展望未来，退役LIBs回收产业的发展亟需技术创新、标准构建与体系协同多轮驱动。技术层面，应重点攻关低成本绿色工艺、智能化分选装备、浸出剂循环利用及直接再生一致性控制等关键环节；标准与政策层面，需加快构建电池追溯体系、回收网络规范、再生材料认证标准，以保障原料供应稳定与行业有序发展。只有通过技术突破、标准完善与产业链协同，才能真正构建高效、绿色、可持续的锂离子电池资源闭环循环体系，为能源清洁转型与资源安全保障提供坚实支撑。

参考文献

[1] XU D Y, SHERAZ M, HASSAN A, et al. Financial development, renewable energy and CO_2 emission in G7 countries: New evidence from non-linear and asymmetric analysis[J]. Energy Economics, 2022, 109: 105994.

[2] HUANG J Y, LI Q X, SONG Z Y. Historical global land surface air apparent temperature and its future changes based on CMIP6 projections[J]. Science of the Total Environment, 2022, 816: 151656.

[3] ZHANG J J. Energy access challenge and the role of fossil fuels in meeting electricity demand: promoting renewable energy capacity for sustainable development[J]. Geoscience Frontiers, 2024, 15(5): 101873.

[4] DONG H B, GAO X, ZHU J Y, et al. What's next for batteries? A radical rethink of battery technology development for transportation and grid applications[J]. Materials Today Energy, 2025, 50: 101864.

[5] HASAN M M, HAQUE R, JAHIRUL M I, et al. Advancing energy storage: the future trajectory of lithium-ion battery technologies[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 120: 116511.

[6] ALI A, AL BAHRANI M, AHMED S, et al. Sustainable recycling of end-of-life electric vehicle batteries: EV battery recycling frameworks in China and the USA[J/OL]. Recycling, 2025, 10(2): 68.https: //doi.org/10.3390/recycling10020068.

[7] 邓超群，王海北，周起帆，等. 废旧锂离子电池中有价金属回收研究现状[J]. 矿冶, 2021, 30: 109-118.
DENG C Q, WANG H B, ZHOU Q F, et al. Research status of valuable metal recovery of spent lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30: 109-118.

[8] CALISAYA-AZPILCUETA D, HERRERA-LEON S, CISTERNAS L A. Current and future global lithium production till 2025[J]. The Open Chemical Engineering Journal, 2020, 14: 36-51.

[9] XIA Q F, MANBERGER A, DU D B. Long on expectations, short on supply: regional lithium imbalances and the effects of trade allocations by China, the EU, and the USA[J]. Cell Reports Sustainability, 2025, 2(6): 100404.

[10] LI P, LUO S, ZHANG L, et al. Progress, challenges, and prospects of spent lithium-ion batteries recycling: a review[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 89: 144-171.

[11] 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.

[12] KOVACEVIC A, TOLAZZI M, SANADAR M, et al. Hydrometallurgical recovery of metals from spent lithium-ion batteries with ionic liquids and deep eutectic solvents[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4): 113248.

[13] DONG C K, LIU C G, QIN Z L, et al. A comprehensive overview of decommissioned lithium-ion battery recycling: towards green and economical[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354: 128929.

[14] KIM S, BANG J, YOO J, et al. A comprehensive review on

the pretreatment process in lithium-ion battery recycling[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294: 126329.

[15] 曹威威, 阙川杰, 姚佳乐, 等. 废旧锂离子电池回收预处理研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(6): 2085-2102.
CAO W W, QUE C J, YAO J L, et al. Research progress on recycling pretreatment of waste lithium-ion batteries[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(6): 2085-2102.

[16] KANG F, ZHAO Y J, LIU Y Q, et al. Discharge pathways and ddeactivation mechanisms of retired lithium-ion batteries[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13(16): 5985-5995.

[17] 苏勇, 卢世杰, 周宏喜, 等. 废旧锂离子电池化学放电试验研究[J]. 矿冶, 2021, 30: 90-94, 106.
SU Y, LU S J, ZHOU H X, et al. Experimental study on chemical discharge of waste power lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30: 90-94, 106.

[18] WANG H, QU G R, YANG J Q, et al. An effective and cleaner discharge method of spent lithium batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 54: 105383.

[19] YAN B, MA E, WANG J W. Research on the high-efficiency crushing, sorting and recycling process of column-shaped waste lithium batteries[J]. Science of the Total Environment, 2023, 864: 161081.

[20] ZHANG T, HE Y Q, GE L H, et al. Characteristics of wet and dry crushing methods in the recycling process of spent lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2013, 240: 766-771.

[21] YU W H, GUO Y, XU S M, et al. Comprehensive recycling of lithium-ion batteries: Fundamentals, pretreatment, and perspectives[J]. Energy Storage Materials, 2023, 54: 172-220.

[22] YANG F Z, CHEN X L, QU G, et al. Electrode separation via water electrolysis for sustainable battery recycling[J]. Nature Sustainability, 2025, 8(5): 520-529.

[23] KOECH A K, MWANDILA G, MULOLANI F, et al. Lithium-ion battery fundamentals and exploration of cathode materials: a review[J]. South African journal of chemical engineering, 2024, 50: 321-339.

[24] LI C X, KOU P F, WEN H, 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.

[25] JIANG S Q, NIE C C, SHI S X, et al. Enhancements of dissociation of electrode materials in spent lithium-ion batteries by low-temperature heating pretreatment[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170: 908-920.

[26] LI P W, XU H Y, LUO S H, et al. Green and non-destructive separation of cathode materials from aluminum foil in spent lithium-ion batteries[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 338: 126625.

[27] WANG M M, LIU K, YU I D, et al. Challenges in recycling spent lithium-ion batteries: Spotlight onpolyvinylidene fluoride removal[J]. Global Challenges, 2023, 7(3): 2200237.

[28] JI Y, JAFVERT C T, ZYAYKINA N N, et al. Decomposition of PVDF to delaminate cathode materials from end-of-life lithium-ion battery cathodes[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 367: 133112.

[29] YAMASHITA T, SAKUGAWA T, AKIYAMA H, et al. Metal-coated plastics recycling by pulsed electric discharge[J]. Waste Management, 2019, 89: 57-63.

[30] LU D N, SHA S, LUO J Y, et al. Treatment train approaches for the remediation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): a critical review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 386: 121963.

[31] HE Y Q, ZHANG T, WANG F F, et al. Recovery of $LiCoO_2$ and graphite from spent lithium-ion batteries by Fenton reagent-assisted flotation[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143: 319-325.

[32] CHEN X P, LI S Z, WANG Y, et al. Recycling of $LiFePO_4$ cathode materials from spent lithium-ion batteries through ultrasound-assisted Fenton reaction and lithium compensation[J]. Waste Management, 2021, 136: 67-75.

[33] WEI G, LIU Y, JIAO B, et al. Direct recycling of spent Li-ion batteries: challenges and opportunities toward practical applications[J]. iScience, 2023, 26(9): 107676.

[34] LIN K Y, WU Y S, SHEN Y, et al. Separation cathode materials from current collectors of spent lithium-ion battery through low-energy mechanical friction technology[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 208: 107700.

[35] MA X X, WANG H F, XIE W N, et al. Research progress in froth flotation for recycling of spent lithium-ion batteries[J]. Minerals Engineering, 2025, 227: 109275.

[36] HAN S J, XU L, CHEN C, et al. Recovery of graphite from spent lithium-ion batteries and its wastewater treatment application: a review[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 330: 125289.

[37] ZHONG X H, MAO X H, QIN W Q, et al. Facile separation and regeneration of $LiFePO_4$ from spent lithium-ion batteries via effective pyrolysis and flotation: an economical and eco-friendly approach[J]. Waste Management, 2023, 156: 236-246.

[38] HYDER A H M G, NURAENI B, GALLAGHER S M, et al. Lithium recovery and conversion from wastewater produced by recycling of Li-ion batteries via two-stage electrodialysis[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13(12): 4651-4660.

[39] NAZARI S, LI J L, KHOSHDAST H, et al. Effect of roasting pretreatment on micro-nanobubble-assisted flotation of spent lithium-ion batteries[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 2113-2128.

[40] 代云, 邓朝勇, 吴浩. 碳热还原—浸出法回收废旧锂电池中的镍、钴、锰[J]. 矿冶, 2021, 30: 24-29, 46.
DAI Y, DENG C Y, WU H. Recovery of Ni, Co and Mn from materials lithium ion batteries by carbothermal reduction and leaching method[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30: 24-29, 46.

[41] GAO X S, WU M, ZHAO G J, et al. Recycling technologies of spent lithium-ion batteries and future directions: a review[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35(1): 271-295.

[42] MEI Z F, GAO F Y, LIU S, et al. Fast pyrolysis-driven recycling of spent $LiCoO_2$ batteries: Synergistic reduction effects of biochar and pyrolysis gas[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(3): 116754.

[43] ZHOU F Y, MA J Y, WANG H Y, et al. Revealing the delithiation process of spent $LiMn_2O_4$ and $LiNi_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}O_2$ batteries during the biomass-assisted gasthermal and carbothermal reduction[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 477: 135304.

[44] 郝娟, 葛竺艳, 王海锋, 等. 废旧过渡金属锂离子电池焙烧-优先提锂进展[J]. 过程工程学报, 2025, 25(8): 804-819.
HAO J, GE Z Y, WANG H F, et al. Progress in roasting-preferential lithium extraction of spent transition metal lithium-ion batteries[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2025, 25(8): 804-819.

[45] WEI N, HE Y Q, ZHANG G W, et al. Recycling of valuable metals from spent lithium-ion batteries by self-supplied reductant roasting[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: 117107.

[46] BARNWAL A, BAIS P, BALAKRISHNA M, et al. Recovery of llithium, cobalt, and graphite contents from black mass of LCO-based discarded Li-Ion batteries[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024, 41(6): 3517-3527.

[47] FENG S Y, YANG Z, MEN L J, et al. Efficient synergetic recycling of spent lithium-ion batteries and waste biomass based on segregated reduction roasting strategy[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 373: 133648.

[48] QU G R, WEI Y G, LIU C P, et al. Efficient separation and recovery of lithium through volatilization in the recycling process of spent lithium-ion batteries[J]. Waste Management, 2022, 150: 66-74.

[49] ZHANG W, WEI X, WU T, et al. Carbothermal shock enabled functional nanomaterials for energy-related applications[J]. Nano Energy, 2023, 118: 108994.

[50] SHEN A, ZHANG J L, CHEN Y Q, et al. Recycling spent lithium ion batteries by flash joule heating: preferential lithium recovery and Li-phase conversion mechanism under ultra-temperature[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 222: 108433.

[51] 陈立辉, 赖文斌, 罗奋强, 等. 废旧锂离子电池正极材料的湿法回收和再生技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(8): 2148-2165.
CHEN L H, LAI W B, LUO F Q, et al. A review on hydrometallurgy recycle and regeneration technology of cathode materials for spent lithium-ion batteries[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(8): 2148-2165.

[52] LEE C, ARBY D S, KIM C, et al. Hydrometallurgical process of spent lithium-ion battery recycling part. 1. Chemical leaching of valuable metals from cathode active materials: review and case study[J]. Hydrometallurgy, 2025, 235: 106494.

[53] ZHOU X Y, YANG W, LIU X J, et al. One-step selective separation and efficient recovery of valuable metals from mixed spent lithium batteries in the phosphoric acid system[J]. Waste Management, 2023, 155: 53-64.

[54] SALEEM U, BUVIK V, KNUUTILA H K, et al. Recovery of lithium from oxalic acid leachate produced from black mass of spent electric vehicle Li-ion batteries[J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2024, 20: 100648.

[55] CHAI X L, YU X H, SHEN Q F, et al. Study on green closed-loop regeneration of waste lithium iron phosphate based on oxalic acid system[J]. Waste Management, 2024, 181: 168-175.

[56] LERCHBAMMER R, GEROLD E, ANTREKOWITSCH H. Gluconic acid leaching of spent lithium-ion batteries as an environmentally friendly approach to achieve high leaching efficiencies in the recycling of NMC active material[J/OL]. Metals, 2023, 13(8): 1330.https: //doi.org/10.3390/met13081330.

[57] LERCHBAMMER R, GEROLD E, ANTREKOWITSCH H. High yield gluconic acid leaching and recovery of valuable metals from end-of-life lithium-ion batteries[J]. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2025, 12: 101271.

[58] TEMBO P M, WERNER R N, SUBRAMANIAN V. Application of a simple organic acid as a green alternative for the recovery of cathode metals from lithium-ion battery cathode materials[J]. Green Technologies and Sustainability, 2025, 3(1): 100135.

[59] LI P W, LUO S H, SU F X, et al. Optimization of synergistic leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries by the sulfuric acid-malonic acid system using response surface methodology[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(9): 11359-11374.

[60] CHEN X P, GUO C X, MA H R, et al. Organic reductants based leaching: a sustainable process for the recovery of

valuable metals from spent lithium ion batteries[J]. Waste Management, 2018, 75: 459-468.

[61] ZHU B W, ZHANG Y J, ZOU Y L, et al. Leaching kinetics and interface reaction of $LiNi_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}O_2$ materials from spent LIBs using GKB as reductant[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 300: 113710.

[62] MA Y Y, ZHOU X Y, TANG J J, et al. Reaction mechanism of antibiotic bacteria residues as a green reductant for highly efficient recycling of spent lithium-ion batteries[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 417: 126032.

[63] 龚海强, 彭德招, 欧星, 等. 碱性体系选择性回收废旧锂离子电池的研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(7): 1213-1221.
GONG H Q, PENG D Z, OU X, et al. Research progress on the alkaline-system selective recycling technology in spent lithium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(7): 1213-1221.

[64] YAO Y L, ZHU M Y, ZHAO Z, et al. Hydrometallurgical processes for recycling spent lithium-ion batteries: a critical review[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(11): 13611-13627.

[65] WANG H Y, LI Z F, MENG Q, et al. Ammonia leaching of valuable metals from spent lithium ion batteries in NH_3-$(NH_4)_2SO_4$-Na_2SO_3 system[J]. Hydrometallurgy, 2022, 208: 105809.

[66] YANG Z Y, TANG S J, HUO X T, et al. A novel green deep eutectic solvent for one-step selective separation of valuable metals from spent lithium batteries: bifunctional effect and mechanism[J]. Environmental Research, 2023, 233: 116337.

[67] 张正惠, 付飞娥. 低共熔溶剂回收废旧锂离子电池正极材料的研究进展[J]. 云南化工, 2025, 52(5): 1-6.
ZHANG Z H, FU F E. Research advances in using deep eutectic solvents for the recycling cathode materials from lithium-ion batteries[J]. Yunnan Chemical Technology, 2025, 52(5): 1-6.

[68] CAO C, YUAN Z W, LIU H, et al. Lactic-acid-based deep eutectic solvent for sustainable recovery of critical metals from spent lithium-ion batteries under mild conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 505: 145460.

[69] LIU C L, YU J X, HU J, et al. Ultra-low viscosity betaine hydrochloride-formic acid deep eutectic solvent for leaching critical metals from spent NCM lithium-ion batteries[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(3): 112586.

[70] CHENG M Q, HUA Y X, ZHANG Q B, et al. H_2O-balance-regulated cation–anion competitive coordination for selective elements extraction from spent lithium-ion batteries[J]. eScience, 2024, 4(6): 100275.

[71] LUO Y, YIN C Z, OU L M. Recycling of waste lithium-ion batteries via a one-step process using a novel deep eutectic solvent[J]. Science of the Total Environment, 2023, 902: 166095.

[72] 董恩华, 刘秉国, 苏文婷, 等. 废旧锂离子电池正极材料再生技术现状[J]. 矿冶, 2023, 32(1): 91-97, 114.
DONG E H, LIU B G, SU W T, et al. status of cathode material regeneration technology for waste lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(01): 91-97, 114.

[73] LIU R J, LIU Y X, LI J J, et al. A closed-loop process for rapid and selective lithium extraction and resynthesis from spent $LiFePO_4$ batteries[J/OL]. Molecules, 2025, 30(12): 2587. https: //doi.org/10.3390/molecules30122587.

[74] GU K h, GAO X s, CHEN Y x, et al. Closed-loop recycling of spent lithium-ion batteries based on selective sulfidation: an unconventional approach[J]. Waste Management, 2023, 169: 32-42.

[75] HUANG M T, WANG M, YANG L M, et al. Direct regeneration of spent lithium-ion battery cathodes: from theoretical study to production practice[J/OL]. Nano-Micro Letters, 2024, 16(1): 207.https: //doi.org/10.1007/s40820-024-01434-0.

[76] XIAO H R, ZENG C R, FAN F X, et al. A one-step low-temperature closed-loop eutectic salt strategy for direct regeneration of severely degraded $LiFePO_4$[J]. Energy Storage Materials, 2025, 77: 104183.

[77] JIANG Z Y, XU Z H, LI L, et al. Design principles for efficient hydrothermal relithiation of spent lithium iron phosphate[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(3): 4875-4883.

[78] LI Y Y, LIU Q F, YU W Q, et al. Direct regeneration of spent $LiFePO_4$ cathodes based on broaden of Li^+ compensation channels by argon plasma ball milling[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 370: 133059.

[79] WANG J, LI D Q, ZENG W H, et al. Degradation mechanism, direct regeneration and upcycling of ternary cathode material for retired lithium-ion power batteries[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 102: 534-554.