

废旧锂电池回收中萃取剂的研究应用进展

谭鑫^{1,2*}, 李涵新^{1,2}, 王维^{1,2}, 侯希明^{1,2}, 章梦琴^{1,2}

(1. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410007;

2. 锂离子电池及材料智能制造先进技术湖南省工程研究中心, 湖南 长沙 410007)

摘要:从萃取剂的基础研究到工业应用的演进脉络出发,系统梳理与评述了废旧锂电池回收行业锂萃取工艺的研究与应用进展。探讨不同类别萃取体系的作用机理、性能特点,总结当前研究的主流趋势与核心挑战,并展望未来发展方向,以为废旧锂电池绿色高效回收技术的发展提供参考。

关键词:锂; 选择性; 萃取剂; 萃取分离; 锂电池回收

中图分类号: TM912.9; X705

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)07-0056-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.011

Research and application progress of extractants in spent lithium-ion battery recycling

TAN Xin^{1,2*}, LI Han-xin^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, HOU Xi-ming^{1,2}, ZHANG Meng-qin^{1,2}

(1. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China;

2. Hunan Engineering Research Center for Advanced Technology of Intelligent Manufacturing of Lithium-ion

Batteries and Materials, Changsha 410007, China)

Abstract: This paper systematically reviews and evaluates the research and application progress of lithium extraction processes in the spent lithium-ion battery recycling industry, tracing the evolutionary path from fundamental studies on extractants to industrial implementation. Furthermore, it discusses the underlying mechanisms and performance characteristics of different extraction systems, summarizes the prevailing research trends and core challenges, and outlines future development directions. This review aims to provide a reference for the advancement of green and efficient recycling technologies for spent lithium-ion batteries.

Key words: lithium; selectivity; extractant; extraction separation; spent lithium-ion battery recycling

锂被称为 21 世纪“白色石油”,是全球新能源汽车动力电池及大规模储能系统的核心战略资源。随着全球能源结构清洁化转型,锂离子电池消费量持续激增,随之产生的大量废旧电池已成为一座亟待开发和解决的“城市矿山”。据估算,到 2030 年全球废旧锂电池的累计退役量将超过百万吨级^[1],高效回收其中的有价金属,特别是锂元素,对于保障资源安全、减少环境污染及推动循环经济发展具有至关重要的意义。相较于传统的矿石与盐湖卤水提锂,从成分复杂、干扰离子众多的废旧电池浸出液中选择性回收锂,面临着复杂离子体系分离选择性要求高、工艺流程复杂、二次污染风险大等诸多挑战。行业中主流传统的沉锂湿法工艺能够取得较高的资源回收率,但仍面临流程复杂、能耗高、酸碱消耗高等问题,而溶剂萃取法因处理能力大、分离效率高、

选择性可调、易于连续化与规模化操作等特点,被众多企业和高校学者认为是实现废旧电池中锂资源高效回收最具前景的技术手段之一^[1-2]。

本综述基于锂萃取试剂的基础研究到其工业应用的演进脉络,系统梳理与评述废旧锂电池回收领域中各类锂萃取剂的研究与应用进展,总结当前研究的主流趋势与核心挑战,并探讨和展望未来技术改进与发展方向。

1 传统萃取体系的研究与应用

废旧锂电池回收领域的萃取工艺研究早期很大程度借鉴了成熟的盐湖卤水提锂技术,其中以磷酸三丁酯(TBP)为基础的协萃体系和有机磷类酸性萃取剂构成了最传统主流的技术路线。

TBP-FeCl₃ 协萃体系是研究最为广泛,也是最

收稿日期: 2026-03-04; 修回日期: 2026-05-06

基金项目: 中国机械工业集团有限公司重大科研专项(ZDZX2025-06); 湖南省重点专题(长沙建设全球研发中心城市领军团队)(2024RC5001)

作者简介: 谭鑫(1986-),男,博士,高级工程师,研究方向为新能源锂电池、电池材料、废旧锂电池资源综合利用工程技术,通讯联系人, tanxin@cmie.cn。

早实现工业应用的体系之一。其核心机理在于,在高氯离子浓度的水相中, Fe^{3+} 与 Cl^- 形成稳定的 $[\text{FeCl}_4]^-$ 配阴离子,该阴离子与 Li^+ 通过静电作用形成离子对型配合物 LiFeCl_4 ,随后被 TBP 分子中的 $\text{P}=\text{O}$ 基团通过溶剂化作用萃取进入有机相。针对废旧电池浸出液(通常为硫酸体系)氯离子浓度低的特点,赵天瑜等^[3]通过额外添加氯化钠将浸出液中的 Cl^- 浓度调整至 250 g/L 以上,该体系对锂的单级萃取率可达 75%,而对 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 等共存阳离子的萃取率较低,实现了锂与镍、钴、锰的有效分离。尽管像 TBP 这样的中性磷酸酯对锂具有良好的选择性和亲和力,但该体系在应用中暴露出反萃需用高浓度盐酸、TBP 在水相中有一定溶解损失、长期运行对设备有一定腐蚀性等问题。

为了克服上述缺陷,研究者们从共萃剂、添加剂和协萃剂等多角度对该体系进行了优化。苏慧^[4]引入酸性磷类萃取剂 P507 构建 TBP/P507- FeCl_3 三元协同体系,反萃阶段利用 P507 对 Fe^{3+} 更强的络合能力,将 $[\text{FeCl}_4]^-$ 结构破坏,使 Li^+ 被纯水或低酸溶液反萃,而 Fe^{3+} 则以 $\text{FeCl}_2\text{L}\cdot(\text{HL})\cdot 2\text{TBP}$ (L 为 P507 阴离子)的形式保留在有机相中,反萃剂从高浓度酸变成水,大大降低了运行成本和环境风险。Li 等^[5]将正辛醇、乙酸乙酯、乙酸丁酯、甲基异丁基酮等多种有机协萃剂引入 TBP- FeCl_3 体系,系统研究了有机协萃剂浓度、总有机萃取剂用量、相比等对锂萃取效果的影响,结果表明该混合萃取体系对锂具有显著协同萃取优势。

另一类重要的传统萃取剂是有机磷类酸性萃取剂,如 P204(二-(2-乙基己基)磷酸)、P507、Cyanex 272 等^[6]。它们主要通过阳离子交换机理与金属离子结合,对 2 价及更高价态的金属离子具有更强的亲和力。因此,这类萃取剂在废旧锂电池回收中主要用于“除杂”而非“提锂”,即优先将浸出液中的 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 等杂质离子萃取分离,使锂富集于萃余液中。刘凯等^[7]采用 Cyanex 302 从废旧三元材料浸出液中萃取铁和铜,萃取率均大于 99.9%,而对锂的萃取率低于 0.003%,展现了极佳的选择性。李歆等^[8]的研究则表明,P227[二-(2-乙基己基)次磷酸]在从富锂溶液中深度脱除微量 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 时,表现出比 P204 更优的选择性,锂损失率可控制在 2.09%以内。

2 新型萃取剂分子设计与应用

随着对锂离子配位化学和分离机理的深入研

究,以及绿色化学理念的兴起,研究焦点逐渐转向设计与合成对锂离子具有本征高选择性的新型功能分子及环境友好的绿色溶剂体系。

β -二酮及其衍生物是一类经典的锂螯合萃取剂,如 HTTA、LIX 54 等。它们通过烯醇式结构中的氧原子与锂离子形成稳定的螯合环。张健^[9]开展了 LIX54/TRPO(三烷基氧化膦)协同萃取体系的研究,证实萃合物组成为 $\text{Li}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{A}\cdot\text{TRPO}$ (A 为 LIX54 阴离子),中性磷协萃剂 TRPO 的加入极大地提高了螯合物在有机相中的溶解度和稳定性。何卓^[10]应用该体系处理废旧锂电池回收产生的含锂硫酸钠溶液,在优化条件下锂的单级萃取率超过 98%,锂钠分离系数高达 1.578,并成功进行了连续运转试验,证明了其工业可行性。为了克服 β -二酮类萃取剂需要强碱性环境的缺点,何方等^[11]通过理论计算(分子表面静电势和吉布斯自由能变)指导,设计开发了含有强吸电子基团($-\text{NO}_2$ 、 $-\text{CF}_3$)的新型 β -二酮萃取剂 IPE-23,在碱性条件下($\text{pH}\approx 11.3$)对锂仍保持高萃取率(97%)和优异的锂钠分离性能(分离系数 423.85),同时降低了萃取剂的水相溶损。

大环冠醚类分子因特定的空腔尺寸,对碱金属离子具有特别的识别能力。例如,14-冠-4 衍生物的空腔与锂离子水合半径相匹配,根据量子化学计算其理论上对锂具有极高选择性,该骨架结构已经成为锂提取与分离领域众多新型衍生物的基础。然而,Gohil 等^[12]的研究指出,冠醚分子在固-液萃取时对锂的选择性很高,但在液-液萃取中,由于锂离子具有较大的水合能,从水相进入疏水有机相的脱溶剂过程能垒很高,导致实际萃取率大幅下降。Torrejos 等^[13]将二苯并-14-冠-4-醚(DB14C4)进行功能化修饰得到了一种兼具高锂萃取性能与良好稳定性的载体系统(DB14C4-C18-COOH)。研究表明,该 DB14C4-C18-COOH 能与锂离子之间形成 1:1 配位模式。在室温条件下,该萃取体系对低浓度锂离子表现出优异的选择性萃取能力,锂/钠分离因子达 1 954,锂/钾分离因子为 138。

Sadamatsu 等^[14]合成了一系列带有丙基和/或乙酸基团的对叔辛基杯[4]芳烃衍生物并研究了其对 Li^+ 的萃取能力和 Li/Na 选择性。结果表明,只有三丙基-单乙酸衍生物对 Li^+ 具有良好的选择性,而其他带有多个乙酸基团的衍生物在单一金属体系中则对 Na^+ 的选择性高于 Li^+ 。该研究结果关键在于阐明了通过调控杯芳烃衍生物的结构可以精确调控

其对不同碱金属离子的选择性。

多项研究总结了通过螯合剂与超临界二氧化碳联用提取铜、铅等金属的方法^[15]。例如, Ruttinger 等^[15]在超临界二氧化碳存在下,采用 14-冠-4 醚与酸性萃取剂的组合,从含锂、镁、钠混合物的溶液中提取锂。在此条件下,锂的提取效率最高可达 30%,但钠和镁的提取率分别为 27% 和 52%。初步研究表明超临界二氧化碳在锂提取中具有潜在应用价值。

3 离子液体绿色溶剂体系

为克服传统挥发性有机溶剂 (VOCs) 带来的环境与安全问题,研究人员开始探索离子液体 (ILs) 和低共熔溶剂 (DESs) 等新型材料作为绿色、可设计的萃取介质。

离子液体基萃取体系不仅可降低挥发性有机溶剂的使用,其阴阳离子结构的可设计性还允许将萃取功能基团直接嵌入其中,形成“功能化离子液体”。Wang 等^[16]合成了 4 种以三烷基甲基铵 ($[A336]^+$) 为阳离子的二酮类功能离子液体,并开发了由该离子液体与三烷基氧磷 (TRPO) 组成的协同萃取体系,将锂的适用 pH 窗口拓宽至 1.26 ~ 10.17,萃取率也高于传统 HTTA 体系。康锦等^[17]制备了磷酸二丁酯功能化离子液体 $[Bmim][DBP]$,利用其温控相变特性,实现了“均相萃取-酸化分相”的智能过程,避免了协萃剂的使用和第三相的产生。

Othman 等^[18]采用基于脂肪酸的离子液体—油酸四乙酯从锂离子电池阴极浸出液中回收了钴、镍、锰和锂等贵金属,通过采用两阶段萃取工艺,可从镍和锂溶液中分离出超过 99% 的锰和钴。Zheng 等^[19]研究采用改性咪唑离子液体 ($[HO_2-CMMIM][NTf_2]$) 从废旧锂离子电池中选择性提取锂。试验结果表明经过 3 次萃取后,锂回收率可达到 92.5%。

低共熔溶剂 (DES) 由氢键供体和受体组成,合成更简便,成本更低且通常生物降解性更好。同时,DESs 具备化学可调性,能够实现针对特定应用的定制化设计。包括氢键供体和受体的选择、摩尔比、温度以及含水量的调控。薛柯^[20]的研究表明,由薄荷醇与月桂酸形成的疏水性 DES 对锂的萃取效率可达 80.69%。余柳莹^[21]系统筛选了 N8881Cl/DecA (甲基三辛基氯化铵/癸酸) 这一低黏度、高锂亲和力的 DES,并与 P204 组成协萃体系,提出了“两步法”策略以应对多价离子干扰,为从成分复杂的低

浓度溶液中选择性提锂提供了绿色新方案。

Tran 等^[22]将氯化胆碱与乙二醇配制的溶剂萃取剂 (DES) 用于从锂离子电池阴极材料中提取金属,浸出效率最高可达 99.3%。Hanada 等^[23]报道了采用由 HBTA/TOPO 或癸酸/TOPO 组成的疏水性低共熔溶剂,在抗坏血酸还原作用下,直接从废旧 LCO、NMC 等正极材料中浸出并同步萃取锂、钴等金属,浸出率超过 90%,随后通过草酸溶液实现金属的一步分离与回收,且 DES 可循环使用。Morina 等^[24]通过使用由氯化胆碱和乳酸组成的深共熔溶剂浸出多种锂离子电池正极活性材料中有价金属,在温和条件下可以实现两步金属回收浸出效率达 100%。Wang 等^[25]采用由氯化胆碱和乙二醇组成的 DES 脱附萃取系统,从锂离子电池中提取阴极金属,并通过共萃取与共沉淀法回收了锂、钴、镍及锰。除基于氯化物-氯化物的萃取溶剂 (DES) 外,还可设计基于有机酸的 DES 用于电池金属回收。Luo 等^[26]提出了一种由甜菜碱盐酸盐与乙二醇 (EG) 形成的 DES 体系,可有效浸出 NCM 中约 99% 的镍 (Ni)、钴 (Co)、锰 (Mn) 和锂 (Li)。

Lu 等^[27]采用弱酸性氧化剂 (OA) 基脱盐电解液 (DES),从 $LiCoO_2$ 中成功提取出约 96.1% 的锂和 96.3% 的钴。

目前采用离子液体等进行工业级锂分离的情况仍属罕见。仅少数典型案例包括索尔维公司开发的溶剂萃取技术“CYANEX® 936P”,以及特诺瓦先进技术公司 (TAT) 基于脉冲柱的连续工艺技术“LiSX™”用于从盐湖卤水中萃取锂^[2]。

4 萃取过程强化与工艺集成

传统的液-液萃取过程依赖于机械搅拌实现传质,存在萃取剂易乳化、溶损、传质效率受限等问题。近年来,将萃取与新型分离概念或外场强化技术相结合,成为提升过程效率和稳定性的重要研究趋势,尤其适用于处理低锂浓度、高杂质的废旧电池浸出液和沉锂母液。

膜萃取技术是将液体萃取剂与膜材料的分离选择性相结合的一种杂化过程。刘星凡等^[28]针对传统聚合物包容膜中萃取剂易流失的问题,创新性地通过紫外引发聚合,将含磷酸酯基团的单体 B2MP 化学键合到 PVDF-HFP 聚合物骨架中,制备了半互穿网络型锂萃取膜 (PSIPN-D)。该膜在 10 V 外加电压下,对锂的渗透系数达 $1.66 \mu m/s$,且连续 10 次循环性能未衰减,实现了萃取剂的“零流失”和高

稳定性。张建锋等^[29]在综述中指出支撑液膜、乳状液膜等形式能够耦合萃取与反萃步骤,提高传质推动力。朱碧肖等^[30]采用离心溶剂萃取法从盐湖卤水中提取高纯氯化锂的工业化实践,也证明了先进萃取设备(如大流量离心萃取机)对于实现复杂体系高效多级分离的重要性。

电化学强化萃取是另一个重要的研究方向。刘星凡等^[28]的研究已经展示了电场对膜萃取传质的强化作用。中国科学院上海高等研究院与多所高校的联合综述指出,可以借鉴同位素分离中的化学交换原理,通过设计电化学循环来放大单级分离的驱动力,从而在热力学上实现极高的镁锂分离系数。Zhao 等^[31]设计的“夹层液膜电渗析”装置,将液膜与电渗析耦合,利用电场驱动锂离子定向迁移,成功将模拟卤水的镁锂比从 100 降至 2 以下。

废旧锂电池来源广泛,正极材料包括三元、磷酸铁锂、钴酸锂等多种体系,浸出液成分差异巨大,需要开发针对性的预处理技术与高效的工艺集成方案。对于成分相对简单的三元电池浸出液(富含 Li、Ni、Co、Mn),萃取工艺的核心是实现多金属的逐级分离。胡康等^[32]研究了双酮/磷酸酯混合体系,通过精确调控水相 pH,在同一套萃取系统中实现了钴、镍、锰的共萃取(萃取率均>99%)与锂的分离(锂留存于水相),为短流程回收提供了新思路。刘天池^[6]提出了一种基于 P227 萃取剂的“浸出-串级萃取-沉淀”一体化工艺,成功将三元浸出液中的锂、镍、钴、锰完全分离并分别转化为高纯产品。江志鹏^[33]使用微波辅助胆碱-甲酸 DES 从 LiCoO₂ 中浸出锂和钴。在最佳浸出条件下,钴和锂的浸出效率达到 100%。

对于磷酸铁锂电池,回收难点在于橄榄石结构的稳定性及锂的选择性浸出。Liu 等^[34]的研究聚焦于弱酸介质下的选择性提锂,采用 H₂O₂/CO₂ 或有机酸体系,实现了锂的高效浸出而铁磷渣留存。随后的萃取工段,采用 P204 在贫酸条件下操作,既能萃取锂又可实现有机酸的再生,体现了工艺集成的协同性。

当前我国在废旧锂电池资源湿法回收利用技术,尤其是产业应用环节,从工艺技术、装备到整个产业链环节在全球具有绝对优势,国机集团旗下中机国际工程设计研究院、合肥通用机械装备院与国内电池回收企业通过产学研合作,技术优势互补,发展形成了具有自身特色的成套装备技术,为国内不少废旧锂电池回收企业萃取成套工艺技术开发提供

了技术服务与支持,推动了国内废旧锂电池回收高效资源综合利用工程技术能力的提升。

5 结论

通过对锂萃取技术研究近 20 余年发展的系统梳理,可以清晰地看到该领域研究呈现出从借鉴盐湖技术到专用化设计、从单一体系优化到多技术耦合、从追求提取效率到兼顾绿色经济的演进趋势。现有研究的主要特点体现在:第一,以 TBP 和酸性磷类萃取剂为代表的传统体系机理已被深刻揭示,并通过引入新型协萃剂、优化反萃方式(如水反萃)持续改进,技术成熟度高,是当前工业应用的基石。第二,以 β -二酮衍生物、大环化合物、离子液体和低共熔溶剂为代表的新型功能分子与绿色溶剂体系通过分子设计从源头上提升对锂的选择性和环境友好性,代表了未来的技术发展方向。第三,以膜萃取、电化学强化等为代表的过程强化技术通过改变传质界面、引入外场,在提升分离效率、选择性方面展现出革命性潜力。第四,针对三元、磷酸铁锂等不同废料流的特性化、集成化工艺开发日益受到重视。

尽管取得了显著进展,该领域仍存在一些关键的不足与空白。首先,面向废旧电池浸出液极端复杂体系的特效萃取剂仍显匮乏,许多高性能萃取剂在实际料液中受共存离子干扰严重。其次,萃取过程的绿色化与经济性平衡尚未完全解决,一些离子液体、低共熔溶剂成本仍偏高,而一些高效体系的反萃剂或洗涤剂消耗量巨大,产生二次废液。再次,从实验室到产业化应用的桥梁尚未完全贯通,许多新颖的强化技术缺乏系统的工程学研究。最后,对萃取剂循环使用中的降解机理、毒性评估及最终处置方案的研究相对薄弱,全生命周期的环境风险评价体系有待建立。

本课题组将在以下几个方向继续深化与拓展:第一,开发智能响应型萃取材料,实现萃取-反萃过程的智能切换,进一步简化工艺。第二,深化多尺度模拟与人工智能辅助的分子设计,加速高选择性萃取剂的发现。第三,推动“萃取+”深度耦合技术的工程化研究,构建更紧凑、高效的锂回收单元。第四,建立面向废旧电池回收的萃取剂性能标准化评价数据库与全生命周期评估模型。通过这些方向的持续攻关,溶剂萃取技术有望在废旧锂电池这一庞大的城市矿山开发中扮演更加核心和绿色的角色。

参考文献

- [1] Qiao W Y, Zhang R, Wen Y K, *et al.* Green solvents in battery recycling: Status and challenges [J]. *Journal of Material Chemistry A*, 2024, 12(19): 11235–11265.
- [2] Kanagasundaram T, Murphy O, Haji M N, *et al.* The recovery and separation of lithium by using solvent extraction methods [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2024, 509: 215727.
- [3] 赵天瑜, 宋云峰, 李永立, 等. 萃取法从废旧锂离子电池正极材料浸出液中提取锂 [J]. *有色金属科学与工程*, 2019, 10(1): 49–53.
- [4] 苏慧. 多组分协同溶剂萃取体系应用于高镁盐湖卤水提锂的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2021.
- [5] Li H, Li L, Peng X, *et al.* Selective recovery of lithium from simulated brine using different organic synergist [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019, 27: 335–340.
- [6] 刘天池. 基于新型萃取剂 P227 的重稀土、钴镍及锂萃取分离的应用基础研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [7] 刘凯, 何喜红. 用 Cyanex 302 萃取废三元正极材料浸出液中铜试验研究 [J]. *湿法冶金*, 2024, 43(1): 67–73.
- [8] 李歆, 潘翠翠, 崔靖, 等. 磷酸三丁酯、4-甲基-2-戊酮对铝锂溶液中锂的萃取行为 [J]. *化学分析计量*, 2024, 33(3): 94–98, 104.
- [9] 张健. 螯合协同体系锂萃取机制及在西藏盐湖提锂中的应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2022.
- [10] 何卓. 从含锂硫酸钠溶液中协同萃取分离锂钠的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [11] 何方, 许高洁, 裴翔, 等. IPE-23 萃取剂在含锂废液中回收锂的应用 [J]. *化工进展*, 2024, 43(S1): 627–639.
- [12] Gohil H, Chatterjee S, Yadav S, *et al.* An ionophore for high lithium loading and selective capture from brine [J]. *Inorganic Chemistry*, 2019, 58(11): 7209–7219.
- [13] Torrejos R E C, Nisola G M, Song H S, *et al.* Liquid-liquid extraction of lithium using lipophilic dibenzo-14-crown-4 ether carboxylic acid in hydrophobic room temperature ionic liquid [J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 164: 362–371.
- [14] Sadamatsu H, Hanada T, Morisada S, *et al.* Comprehensive comparison of alkali metal extraction with a series of calix[4] arene derivatives with propyl and/or acetic acid groups [J]. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 2016, 84(1): 87–97.
- [15] Ruttinger A W, Palsdottir A, Tester J W, *et al.* A quantitative metric for the design of selective supercritical CO₂ extraction of lithium from geothermal brine [J]. *ChemSusChem*, 2019, 12: 3532–3540.
- [16] Wang J, Yang S, Zhang X, *et al.* Extraction mechanism of lithium from the alkali solution with diketone-based ionic liquid extractants [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(9): 11581–11589.
- [17] 康锦, 秦宏伟, 成怀刚, 等. 磷酸酯功能化离子液体萃取剂的相变萃取提锂机理研究 [J]. *当代化工研究*, 2023, (20): 87–90.
- [18] Othman E A, Vanderham A G J, Miedema H, *et al.* Understanding and improving the kinetics of Li⁺ separation and conduction in a liquid membrane electro dialyzer [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 252: 117435.
- [19] Zheng H, Huang J, Dong T, *et al.* Equilibrium study on the recovery of lithium from spent lithium-ion batteries by solvent extraction [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 41: 246–251.
- [20] 薛柯. 低共熔溶剂萃取体系的构建及其萃锂性能的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2024.
- [21] 余柳莹. 低黏度高锂离子亲和力低共熔溶剂的筛选及其在海水萃锂中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [22] Tran M K, Rodrigues M T F, Kato K, *et al.* Deep eutectic solvents for cathode recycling of li-ion batteries [J]. *Nature Energy*, 2019, 4(4): 339–345.
- [23] Hanada T, Goto M. Synergistic deep eutectic solvents for lithium extraction [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(5): 2152–2160.
- [24] Morina R, Callegari D, Merli D, *et al.* Mechanochemical route for na-b-h-f compounds with high ionic conductivity [J]. *ChemSusChem*, 2022, 15: e202102080.
- [25] Wang K, Hu T, Shi P, *et al.* Selective extraction of lithium from spent lithium-ion batteries by using a benign deep eutectic solvent [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 10: 1149–1159.
- [26] Luo Y, Yin C, Ou L, *et al.* Highly efficient dissolution of the cathode materials of spent Ni-Co-Mn lithium batteries using deep eutectic solvents [J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(17): 6562–6570.
- [27] Lu Q, Chen L, Li X, *et al.* Sustainable and convenient recovery of valuable metals from spent li-ion batteries by a one-pot extraction process [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9: 13851–13861.
- [28] 刘星凡, 孟晓荣. 磷酸酯基半互穿网络膜对 Li(I) 的电萃传质研究 [J]. *膜科学与技术*, 2025, 45(6): 61–69.
- [29] 张建锋, 吴辉勇, 杨良嵘. 盐湖卤水萃取法提锂的研究进展 [J]. *应用化学*, 2024, 41(6): 800–812.
- [30] 朱碧肖, 张德友, 陈崔龙. 离心溶剂萃取法提取盐湖卤水中高纯氯化锂的研究 [J]. *流体机械*, 2018, 46(9): 55–58.
- [31] Zhao Z, Liu G, Jia H, *et al.* Sandwiched liquid-membrane electro dialysis: Lithium selective recovery from salt lake brines with high Mg/Li ratio [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 596: 117685.
- [32] 胡康, 张利诚, 马春梅, 等. 双酮/磷酸酯萃取体系从废旧锂电池正极浸出液中分离有价元素试验研究 [J]. *湿法冶金*, 2025, 44(4): 467–475.
- [33] 江志鹏. 弱酸体系下废旧磷酸铁锂的选择性提锂研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [34] Liu M, Ma W, Zhang X, *et al.* Recycling lithium and cobalt from libs using microwave-assisted deep eutectic solvent leaching technology at low-temperature [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 289: 126466. ■