动力电池绿色回收工艺现存痛点及改进方案

刘　隔　谢育波　宋义超
机械工业第六设计研究院有限公司　河南　郑州　450000

摘　要：退役动力电池回收兼具资源安全与环保意义。本文梳理物理预处理、火法冶金、湿法冶金与直接再生四类主流工艺特征，剖析来料一致性差、拆解自动化不足、冶金能耗高与三废压力大、低值组分资源化低、绿色管控缺失等痛点，提出智能分选拆解、低共熔溶剂浸出、火法—湿法耦合、全组分回收及三废协同与碳足迹核算等改进方案，为工艺绿色化升级提供参考。

关键词：动力电池；绿色回收工艺；现存痛点；改进方案

引言：新能源汽车快速扩张带动动力电池装机量攀升，退役电池规模化来临，其回收关乎钴、镍、锂等战略金属供给安全与生态环境。绿色回收工艺以低能耗、低排放、高资源利用率为目标，是产业可持续发展的关键。然而现有工艺在预处理、冶金提取、资源化利用与过程管控等环节仍存明显短板，制约回收体系高效运行。本文梳理主流工艺特征，分析现存痛点并提出改进方案，以期为回收工艺优化与产业化推广提供借鉴。

1 动力电池主流绿色回收工艺及工艺特征

1.1 物理预处理工艺

（1）退役电池须先经放电消除残余电量，避免拆解破碎时短路起火。化学放电以盐溶液浸没电池，物理放电则通过导电介质或外部电路耗能。放电后经拆解分离模组、外壳与线束，再破碎筛分获得含正负极活性物质的“黑粉”，并通过磁选、风选或涡电流分选分离铜铝集流体。（2）物理法优势在于流程短、无化学试剂引入、能耗相对可控，且能保留集流体与黑粉的物理形态，为后续火法、湿法或直接再生提供合格给料。适用于各类电池体系的通用预处理，尤其适合磷酸铁锂等低价值电池的预富集[1]。（3）预处理受安全与环保双重约束：放电须使电压降至安全阈值以下，破碎需在惰性气氛或水喷淋条件下抑制锂反应与粉尘爆炸，含氟电解液挥发物须捕获处理。

1.2 火法冶金回收工艺

（1）高温冶炼将预处理产物或整电池投入熔炼炉，在高温还原气氛下使金属氧化物还原为钴、镍、铜等合金相，锂、铝、锰等则进入熔渣。有机物燃烧供热，塑料与电解液充当还原剂与燃料。（2）资源回收特点为流程简短、对物料适应性广，可处理混合体系与复杂结构电池，金属回收率可达80%~95%。但锂主要富集于渣中，需额外渣处理工序才能回收，且合金后续仍需湿法精炼。（3）污染物与能耗特征突出：熔炼温度高、能耗大，有机物燃烧可能产生二噁英与含氟废气，须配置急冷与碱液洗涤系统。渣量大且含锂，处置不当造成锂资源损失。

1.3 湿法冶金回收工艺

（1）核心流程为酸浸—萃取—沉淀：黑粉用硫酸与双氧水浸出，使锂、钴、镍、锰转入溶液；经压滤除石墨渣后，以P204、P507等萃取剂逐级分离锰、钴、镍，铜可先经萃取电积回收；锂则通过MVR蒸发浓缩后以碳酸钠沉淀为碳酸锂。（2）湿法金属回收率高，钴镍锰浸出与萃取效率普遍可达95%以上，产品纯度高，适合三元电池的高值化回收，是目前工业化主流路线。（3）废水与固废产生量大：酸浸废气、萃取废液、含盐废水须经中和沉淀与生化处理；除铁铝渣、铜渣、钙渣等固废需合规处置。流程长、试剂消耗多，环保设施投资占比高[2]。

1.4 正极材料直接再生工艺

（1）基于退役正极材料仅发生锂流失与结构轻度畸变的事实，通过固相补锂、水热补锂或熔盐修复等方式，将缺失的锂定向回填至晶格，恢复层状或橄榄石结构，使材料电化学性能再生。（2）短流程优势显著：省去浸出与分离环节，能耗与试剂消耗大幅低于湿法，修复后磷酸铁锂成本较湿法工艺可降低约40%，且保留原有材料价值，碳排放强度更低。（3）工业化限制在于对来料纯度要求苛刻：破碎分选引入的碳残留、粘结剂与铜铝碎屑会劣化再生材料性能，需高精度分选配套。同时，严重结构退化或混杂体系的电池难以适用，工艺通用性受限，目前规模化案例集中于磷酸铁锂单一体系。

2 动力电池绿色回收工艺现存痛点分析

2.1 前端预处理环节痛点

（1）退役电池来源分散，多厂家、多型号、多化学体系及不同服役工况导致荷电状态、外壳结构、模组连

接方式差异显著，来料一致性差。现有人工目检与简易电性能检测难以快速准确判定健康状态与残值，分选效率低、误判率高，波及后续破碎、浸出与再生工序稳定性，增大工艺参数调控难度。（2）拆解人工占比偏高，模组拆分、线束剪除、壳体分离依赖人工，劳动强度大，作业人员长期面临带电体、电解液泄漏与机械伤害风险。自动化拆解装备不成熟，通用性与柔性不足，难以适应多规格电池差异化拆解需求，设备投资回收周期长，制约规模化推广与本质安全提升[3]。（3）残电管控是预处理安全核心难点。放电不彻底易在破碎环节引发短路、起火乃至热失控，过度放电则延长处理周期、降低产能。热失控早期预警手段有限，粉尘爆炸、含氟气体逸出等风险难以完全消除，安全防护与应急设施投入大，成为制约预处理连续化运行的关键约束。

2.2 冶金提取工艺技术瓶颈

（1）火法工艺熔炼温度高、能耗大，锂主要进入熔渣而难以经济回收，锂元素损失显著，资源回收结构失衡。含氟电解液与塑料燃烧产生的含氟废气、二噁英须经急冷与多级洗涤治理，环保设施投资与运行成本高，进一步压缩盈利空间，也增加了达标排放的不确定性。（2）湿法工艺酸浸与萃取环节酸碱药剂消耗量大，产生大量含盐废水以及磷铁渣、除杂渣等固废。废水深度处理与固废合规处置成本高，若管控不当存在二次污染风险。环保压力与处置成本叠加，成为湿法企业扩产与连续运行的重要制约因素。（3）三元电池与磷酸铁锂体系在浸出体系、分离顺序与产品形态上差异明显，难以共用一套工艺装备。现有产线多为单一体系专用设计，体系切换成本高、柔性处理能力不足，难以应对来料体系波动与市场结构变化，制约了回收企业的抗风险能力。

2.3 资源利用与经济性痛点

（1）回收关注点集中于钴、镍、锂等高价金属，隔膜、负极石墨、电解液等低值组分资源化程度低，多作为废渣或焚烧处置，造成碳质资源与有机组分的浪费，全组分高值化利用体系尚未建立，资源利用率整体偏低。（2）再生材料受来料杂质、工艺波动影响，纯度与批次稳定性不足，难以稳定达到动力电池级准入要求，高值化回用渠道受限，部分再生料只能降级流向低端市场，再生材料的市场认可度与溢价能力不足。（3）回收成本受金属价格、药剂价格与环保投入多重影响，波动较大。磷酸铁锂中可回收金属价值低，而预处理与环保成本刚性，回收盈利困难，企业积极性不足，影响回收体系的可持续运行。

2.4 生产过程绿色管控短板

（1）废水、废气、废渣多分单元治理，缺乏协同治理与系统优化，治理设施重复建设、运行效率不高，跨介质污染转移风险依然存在，全过程绿色管控体系尚未形成闭环。（2）工艺过程在线监测点位不足，污染物排放多依赖离线采样与定期检测，难以实现实时预警与动态调控，异常排放发现滞后，难以支撑精细化环境管理与工艺参数联动优化。（3）全生命周期碳足迹核算与管控体系缺失，回收各环节能耗、物耗与排放数据未系统归集，绿色工艺的减碳效益难以量化与认证，不利于绿色回收产品的市场溢价与政策激励落地。

3 动力电池绿色回收工艺改进方案

3.1 前端预处理工艺优化方案

（1）针对退役电池品类混杂、一致性差的难题，构建基于快速无损检测与智能算法的分类评估体系。X射线荧光光谱可在不解体条件下依据特征元素峰强度快速判别正极体系类型，结合机器学习多变量分析实现来料在线分流。人工智能视觉识别与预测模型可进一步关联电池外观特征与老化状态，辅助残值分级，为后续工艺路线选择提供可靠输入。（2）推进模块化自动化拆解与低温破碎干式分选工艺改进。六轴机器人配合视觉识别可在数十秒内完成模组定位、切割与分离，拆解自动化率可提升至90%以上。破碎环节推广惰性气氛保护下的带电破碎或低温热解组合，在无氧条件下直接破碎并分解粘结剂与电解液，规避盐水放电产生的大量废水。分选环节采用风选、磁选与涡电流多级组合，实现铜铝集流体、隔膜与黑粉的高效分离[4]。（3）建立电池残能分级管控与热失控主动防控联动机制。依据来料荷电状态划分风险等级，高残能电池优先进入可调负载受控放电通道。破碎工段配置温度传感与急冷喷淋联动系统，同步设置可燃气体检测与惰化保护，形成残能管控—温度监测—应急响应的闭环安全防线。

3.2 核心提取工艺绿色化改进

（1）以低共熔溶剂替代传统强酸浸出体系。低共熔溶剂通过质子攻击破坏晶格氧键、还原高价金属并配位稳定溶解离子，实现正极材料的选择性浸出，氯化胆碱-乙二醇体系对三元材料浸出效率可达近100%。其挥发性低、可生物降解，显著降低酸碱消耗与废水含盐量。当前需重点攻克黏度大导致传质受限、溶剂循环稳定性不足等放大瓶颈。（2）构建火法—湿法耦合短流程。火法段采用还原熔炼将钴、镍、铜富集为合金相，所得熔渣转入湿法段以稀酸选择性浸出锂，弥补传统火法锂进入渣相后回收困难的结构性缺陷。耦合工艺兼顾火法对混合来料适应性强与湿法锂回收率高的双重优势，减少全

流程能耗与锂元素损失。（3）正极材料直接再生定向修复工艺优化。针对磷酸铁锂，采用电/热耦合场策略促进声子离域化，加速锂空位回填与Li-Fe反位缺陷修复，在700℃下仅需5秒即可完成缺陷修复，能耗与温室气体排放显著低于传统固相烧结。该工艺省去浸出—分离—再合成环节，但须配套高精度分选以控制来料杂质，当前优先在磷酸铁锂单一体系推进规模化验证。

3.3 全组分资源化与经济性提升方案

（1）构建电解液、隔膜、负极同步回收路线。拆解环节采用密闭控温环境收集电解液挥发组分，经冷凝提纯后回用；隔膜通过风力分选从破碎物料中分离，经清洗干燥后降级利用；负极石墨经筛分与热处理去除残留粘结剂后可回用于储能电池或作为再生石墨产品。全组分回收需在预处理阶段即建立精细化物料流向设计，避免低值组分在混合破碎中被稀释或污染。（2）磷铁渣与浸出渣高值化利用。磷酸铁锂提锂渣中富含铁、磷资源，可通过酸浸—选择性沉淀制备电池级磷酸铁，铁浸出率可达97%以上，进而作为前驱体合成钠离子电池正极材料，实现铁磷元素闭环回用。该路线将固废从处置负担转化为可销售产品，显著改善磷酸铁锂回收的整体经济性[5]。（3）通过工艺参数精细优化降低药剂与能耗成本。浸出环节以响应面法优化酸浓度、液固比、温度与时间组合，在保证浸出率前提下压缩酸耗；萃取环节提高萃取剂再生效率与循环次数。再生材料品质管控前移至预处理分选精度与浸出液净化深度，以批次稳定性为核心指标建立工艺窗口，提升再生料进入动力电池供应链的准入能力。

3.4 绿色闭环管控体系构建

（1）建立三废协同处理与水资源循环回用系统。将破碎废气、浸出酸雾与热解尾气纳入统一收集管网，经碱洗、活性炭吸附与催化燃烧组合工艺分质处理；废水按含盐量与重金属浓度分流，高盐废水经膜浓缩与蒸发结晶回收工业盐，冷凝水回用于清洗与喷淋工序，形成梯级利用的水循环网络。固废按渣型分类，磷铁渣与除杂渣分别对接高值化利用与合规处置通道。（2）部署生产在线监测与数字化工艺闭环控制系统。在破碎、浸出、萃取、沉淀各工段设置pH、温度、流量与特征污染物在线传感器，数据接入中央控制平台，实现工艺参数实时反馈调节与异常工况预警。建立批次物料追溯码，将前端分选结果与后端工艺参数、产品质量数据关联，形成“来料特征—工艺调控—产品品质”的数字化闭环，支撑柔性生产与精准质控。（3）构建回收全流程碳减排核算与管控方案。依据生命周期评价方法，归集各工段能耗、物耗与运输排放数据，建立本土化碳排放因子数据库，量化绿色工艺相对于传统路线的减碳效益。优先在直接再生与低共熔溶剂浸出等短流程工艺中开展碳足迹认证试点，将减碳量转化为再生材料的绿色溢价依据，对接欧盟新电池法碳足迹声明要求，提升回收产品的市场竞争力。

结束语

动力电池绿色回收是资源循环与低碳转型的重要环节。本文围绕主流工艺特征，揭示预处理一致性差、冶金能耗与环保压力大、低值组分资源化不足、绿色管控不健全等痛点，提出智能分选拆解、低共熔溶剂浸出、火法—湿法耦合、全组分回收及三废协同与碳足迹核算等改进路径。未来需强化工艺协同与数字化管控，推动短流程低排放技术规模化验证，完善标准与政策激励，促进回收产业高质量可持续发展。

参考文献

[1]王玥,郑晓洪,陶天一,等.废锂离子电池正极材料中锂元素选择性回收的研究进展[J].化工进展,2022,11(08):95-98.

[2]杨涵婧.我国新能源汽车动力电池回收的生产者责任延伸制度之适用困境与完善路径[J].资源再生,2021,16(12):39-42.

[3]郝硕硕,董庆银,李金惠.基于成本核算的废旧动力电池回收模式分析与趋势研究[J].中国环境科学,2021,41(10):474-478.

[4]张邦胜.2020年废旧动力电池回收市场分析[J].中国资源综合利用,2020,38(12):102-105.

[5]汪广丰.新能源汽车退役动力电池回收利用存在问题与对策[J].城乡建设,2021,7(19):48-49.