

# 退役动力锂电池工业化回收全链条处理方案研究

张永禄<sup>1</sup> 薛军<sup>2</sup> 夏宇<sup>3\*</sup> 陈运启<sup>1</sup> 缪巍<sup>1</sup> 陈则良<sup>1</sup>

1. 中城院(北京)环境科技股份有限公司 北京 100120

2. 内蒙古蒙西鄂尔多斯铝业有限公司 内蒙古鄂尔多斯 017000

3. 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院 内蒙古呼和浩特 010051

**摘要:** 针对退役动力锂电池规模化回收的行业痛点,本研究创新性构建“智能拆解—组分提纯—材料再生”全链条工业化处理体系,形成带电破碎预处理、梯度热解分选与锂定向浸出等关键技术。保障了有价金属的高效分离回收,并解决了磷酸铁锂电池中锂回收率低的核心难题,为破解行业经济性与环保性矛盾,推动动力电池资源闭环与产业低碳发展提供了系统化的技术范式和工程路径。

**关键词:** 新能源汽车;退役动力锂电池;工业化回收;梯次利用;再生利用

## 引言

国家政策驱动下,中国新能源汽车产业呈现持续高速发展态势。截至2024年,我国已连续十年保持新能源汽车产销量全球领先地位,市场占有率突破60%。自2021年产业进入规模化扩张阶段以来,年度销量实现突破性增长,2024年终端零售量攀升至1286.6万辆,彰显全球新能源汽车市场主导地位<sup>[1]</sup>。

新能源汽车产业的高速迭代催生动力电池资源化回收技术创新与产业升级。作为核心组件,动力电池占整车制造成本的30%–40%,其全生命周期价值管理已成为新能源产业链的关键环节。当锂电池容量衰减至标称值的70%–80%时即触发退役阈值,车规级动力电池有效服役周期一般为5–8年,其中高频运营的公共领域车辆因充放电负荷差异,电池服役周期通常压缩至2–4年。

退役动力锂电池蕴含显著战略价值。三元锂电池可回收锂(2%–5%)、镍(5%–12%)、钴(5%–20%)、锰(7%–10%)等金属,元素富集度较原生矿产提升3–5倍。磷酸铁锂电池锂含量达4.30%<sup>[2]</sup>。在我国锂(72%)、钴(95%)、镍(92%)资源高度依赖进口的约束条件下,构建闭环式再生利用体系对保障关键材料供应链安全具有战略意义。

当前退役动力锂电池回收产业生态呈现多元主体并存的碎片化格局,技术水平参差不齐。在工业化处理环节,普遍存在污染物排放失控、正极材料解离能力不足、战略金属综合回收率偏低等瓶颈,特别是三元材料与磷酸铁锂电池在

杂质分选精度和元素富集度控制方面存在固有缺陷。这些系统性工艺短板与产业规模化发展要求形成结构性矛盾。本研究基于退役动力锂电池工业化回收领域多元工艺路线的技术特征,创新构建工艺组合优化模型,提供从电池拆解到金属提纯的集成化技术框架,形成适配不同电池类型的全链条标准化处理方案,推动退役动力锂电池资源化回收产业的规范化和可持续发展。

## 1 退役动力锂电池工业化回收难点

### 1.1 放电环节

作为产线预处理的核心环节,当前工业级放电工艺普遍采用静态浸泡式氯化钠溶液(5–15wt%)进行深度放电。但受限于电化学极化效应与浓差扩散限制,放电周期通常长达72–96h。同时需配置大型放电池并配套酸性废气洗涤塔以去除放电产生的PF<sub>5</sub>、HF等气体,显著提升产线运行成本。

### 1.2 检测环节

退役锂电池工业化检测仍以循环充放电为核心模式,依托多通道测试系统,通过恒流–恒压模式的电压衰减分析实现容量测定与分级。单次检测周期长达8–12h,导致检测工序成为产能提升的关键阻滞点。

### 1.3 拆解环节

当前工业化拆解体系虽引入人机协同模式,但受限于电池型号碎片化(超5000种)与非标结构(螺丝/胶粘/焊接混用占比超90%),实际仅能实现半自动化作业。拆解过程需配置多工位切割系统与动态分选装置,导致全流程自

动化率仅达 40%–60%。因此，国内 70%–80% 企业仍采用人工拆解，但人工处理过程中难以做到全密闭处理，由于锂电池的高能量密度特性，拆解过程易引发电解液泄漏、金属粉尘扩散和有机废气逸散等问题，造成工人职业暴露风险不可避免地超标 3–5 倍，安全环境问题堪忧。

#### 1.4 剥离环节

锂电池中高价值金属元素（Li、Ni、Co 等）主要以纳米级层状氧化物形式嵌合于正极集流体表面，规模化回收需构建精确的解构–剥离体系。工业级处理普遍采用全组分破碎工艺耦合多级振动筛分，但存在材料解离不完全导致正极活性物质与铝箔基底裹挟问题。

#### 1.5 磷酸铁锂回收

当前工业化回收体系仍依赖全组分浸出工艺，但磷酸铁锂正极材料中仅锂元素具备回收经济性，其层状橄榄石结构在硫酸浸出阶段会同步释放  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ，导致后续锂铁分离效率  $< 68\%$ 。当前工业碳酸锂市场报价已跌破 6 万元/吨（2025 年 6 月数据），而磷酸铁锂再生成本中浸出试剂占比  $> 45\%$ 、中和沉淀工序需消耗  $> 2.3$  吨/吨碳酸锂当量的 NaOH 试剂，致使再生碳酸锂完全成本  $> 12$  万元/吨，较原生锂辉石提锂成本倒挂超 100%。亟待构建新型选择性提锂技术体系，降低磷酸铁锂回收成本，重点突破铁元素原位稳定化、锂元素定向迁移等核心工艺，开发兼具经济性与普适性的万吨级工业化解决方案。

### 2 退役动力锂电池全破碎热解方案

#### 2.1 概述

退役动力锂电池全破碎热解处理是基于多级剪切破碎工艺的迭代技术。本研究基于国内外工业级工程案例，集成开发适配规模化回收的全链条处理工艺方案（图 1）。该方案深度融合当前工业化回收装备技术，通过模块化产线设计实现全流程优化。工艺体系通过“智能拆解–带电破碎–热解分选–湿法回收”联动机制，可将锂回收率提升至 90% 以上，杂质铝含量稳定控制在 1.5% 以内，显著优于行业基准水平。



图 1 退役动力锂电池工业化回收工艺流程图

#### 2.2 预处理方案

##### (1) 智能拆解

退役动力锂电池工业化回收以 PACK 包智能拆解为起点，通过干式清洗除尘、残荷电检测及绝缘耐压测试构建预处理体系，采用可控脉冲放电技术将余能回馈至厂区微电网。拆解工序依托智能分选系统精准剥离汇流排、防护组件及电池管理系统（BMS），获取单体电芯后经多维度性能评估，达标模组（容量  $\geq$  标称值 60%）进入储能系统重组，失效单体（容量保持率  $< 40\%$ ）导入闭式破碎产线。

##### (2) 带电破碎

不合格产品经封闭式负压传送系统导入破碎工段，在氮气保护下实施带电破碎，通过四级剪切破碎系统（双轴撕碎→锤式破碎→齿辊精碎→涡流解离）逐级解构，同步完成电芯高效解离和壳体剥离。

##### (3) 高温热解

破碎后物料通过气密式螺旋输送系统导入多梯度升温热解炉，在氮气保护与动态温控（450℃–550℃）条件下实施连续热解。首段 450℃ 工况实现隔膜 PE/PP 组分解聚，中段 500℃ 定向裂解  $\text{LiPF}_6$  电解液（式 1），末段 550℃ 定向分解聚偏氟乙烯（PVDF）粘结剂（式 2），实现金属集流体无损分离。

LiPF<sub>6</sub> 分解:  $LiPF_6 = LiF + PF_5 \uparrow$  (1)

PVDF 分解:

$[-CF_2-CH_2-]_n = HF \uparrow + C(\text{热解残碳}) + R(\text{氟苯}) \uparrow$  (2)

高温热解烟气 (450 ± 20℃) 主要含 C<sub>3</sub>-C<sub>5</sub> 烯烃、C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>

酯类及氟化氢等 VOCs 组分, 需经二次燃烧处理达标排放。烟气导入二燃室, 依据 3T+1E 焚烧控制原则: 温度场维持 1100-1200℃, 停留时间 ≥ 2.5s。燃烧系统采用天然气分级补燃技术, 出口烟气温度稳定于 900 ± 30℃, 实现二噁英分解率 > 99.9% 与 VOCs 去除率 ≥ 99.5%。

为阻断二噁英合成路径, 二燃室后配置多级急冷系统: 高温烟气经双流体雾化喷嘴逆流急冷, 在 1.5 秒内骤降至 180℃。急冷塔配备双泵联动冗余系统与液位实时监控模块, 确保冷却水持续供给。除尘段采用布袋除尘系统, 同步集成碱性吸附剂喷射装置, 实现氟化氢协同捕集。脱氟工序配置三级钠碱循环系统, 通过 CaO 置换再生 NaOH, 最终烟气二噁英排放浓度 ≤ 0.1ng TEQ/m<sup>3</sup>。

#### (4) 多级筛分

经高温热解处理的电池破碎产物主要由铁 / 铝外壳、铜箔、铝箔及正负极活性材料粉末构成。破碎料经密闭式输送系统导入高频振动筛, 实现电极材料粉体的初步筛分。随后通过磁选工艺高效分离外壳残片、极耳镍片等铁磁性组分, 剩余铜箔、铝箔与极粉混合料则进入后续精细化分选工段。

铜箔、铝箔及其表面附着的极粉经低浓度酸液浸出处理, 实现极粉与集流体的选择性剥离。剥离后的铜箔、铝箔经高频振动筛分实现与极粉浆料的初步分离, 极粉浆料导入板框压滤系统完成固液分离, 所得极粉滤饼进入后续处理工段, 浸出母液经溢流澄清后返回循环槽重复利用, 并按工艺周期定量排放至废水处理单元进行深度净化。

经分选获得的铜箔、铝箔经多级逆流清洗及梯度热风干燥预处理后, 进入多光谱智能色选系统, 通过金属表面反射光谱特征差异实现铜 / 铝箔的智能甄别, 分选纯度 ≥ 99.9%。

### 2.3 深度处理方案

#### 2.3.1 三元锂电池回收工艺方案

##### (1) 浸出

针对预处理车间产出的黑粉湿料, 采用分阶强化浸出工艺。首次浸出采用 10g/L 稀硫酸实现金属活性位点选择性解离, 二次浸出切换至 80g/L 酸浸体系, 通过蒸汽热交换系

统精确控温 75 ± 2℃, 配合顶置式变频搅拌系统实现固液微界面高效传质。搅拌过程中分批注入 60% 工业级过氧化氢溶液, 通过 pH 在线监测系统精准调控终点值至 2.0, 6 小时动态反应周期内金属浸出率可提升至 98.5% 以上。

浸出过程同步启动封闭式尾气治理系统, 采用湍流接触式多级碱洗塔实现含氟废气净化, 氟化物捕集效率 ≥ 99.8%。浸出浆料经板框压滤系统分离后, 富含价金属的浸出液泵送净化单元, 酸不溶石墨渣经三级逆流洗涤至中性, 洗涤母液与压滤液通过循环模块实现浸出剂闭路回用。过程主要反应如 (式 3), 其中 M=Ni<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>:



##### (2) 净化

净化过程主要用于去除浸出液中的铁、铝、铜等杂质。首先, 通过注入氢氧化钠溶液调控浸出液 pH 至 5.5 ± 0.2, 实现 Fe<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> 水解共沉淀, 经精密压滤分离后, 滤液导入还原反应釜。在 80℃ 恒温条件下, 定量投加硫代硫酸钠 (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 进行选择还原, Cu<sup>2+</sup> 与 S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup> 络合生成 CuS 沉淀, 同步实现 Mn<sup>4+</sup> → Mn<sup>2+</sup>、Co<sup>3+</sup> → Co<sup>2+</sup>、Ni<sup>3+</sup> → Ni<sup>2+</sup> 的价态调控。净化液经板框压滤系统分离出铜渣, 滤液输送至萃取工段。

##### (3) 溶液萃取

溶液萃取主要通过构建有机相 - 水相两相体系, 利用目标组分在萃取剂与料液相间的分配系数差异实现选择性迁移。以三元锂电池废料浸出液中硫酸锰萃取为例, 在 pH 2.0-2.5 的硫酸介质中, P204 (二 (2- 乙基己基) 磷酸酯) 与 Mn<sup>2+</sup> 通过配位交换形成疏水性络合物, 经三级逆流萃取实现锰离子选择性萃入有机相, 萃余液中锰残留量 ≤ 0.1g/L, 萃取率 ≥ 99%, 同时锂、钴、镍等金属的共萃率 ≤ 0.5%。

基于萃取方程 (2RH + Mn<sup>2+</sup> ⇌ R<sub>2</sub>Mn + 2H<sup>+</sup>) 的可逆反应解析: 式中 RH 代表 P204 萃取剂分子。正向萃取过程中, RH 通过双官能团配位与 Mn<sup>2+</sup> 结合生成疏水性络合物 R<sub>2</sub>Mn, 推动锰离子从水相向有机相迁移; 逆向反萃过程则通过提高 H<sup>+</sup> 浓度促使络合物解离, 实现 Mn<sup>2+</sup> 的定向释放与 RH 再生<sup>[3]</sup>。

##### (4) 硫酸锰产品

净化液经 P204- 煤油协同萃取体系处理, 在 pH 2.0-2.5 硫酸介质中通过三级逆流萃取选择性迁移 Mn<sup>2+</sup>, 负载锰有机相采用 20-25% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 三级反萃获得硫酸锰富集液, 萃余液转至 P507 (2- 乙基己基磷酸单 2- 乙基己基酯) 体系进

行钴镍分离。硫酸锰溶液经深度净化与板框压滤后，酸不溶渣返回浸出工段实现浸出剂再生，净化滤液通过真空蒸发结晶制备工业级一水硫酸锰。

#### (5) 硫酸钴产品

基于 P507- 醋酸缓冲体系 (pH 5.0-5.5) 从锰萃余液中定向萃取钴，钴离子通过双齿配位反应 ( $\text{Co}^{2+} + 2(\text{HA})_2 \rightleftharpoons \text{CoA}_2(\text{HA})_2 + 2\text{H}^+$ ) 进入有机相，镍共萃率  $< 10\%$ 。负载钴有机相经三级逆流反萃得硫酸钴溶液，反萃率  $\geq 99\%$ 。溶液通过加压热结晶 (120-200℃) 制备一水硫酸钴。

#### (6) 硫酸镍产品

钴萃余液采用皂化 P204 萃取体系在 pH 2.5-3.5 硫酸介质中通过三级逆流萃取选择性迁移镍离子，同时抑制镁共萃。负载镍有机相经三级逆流反萃获得硫酸镍富集液，反萃率  $\geq 99.5\%$ 。富集液通过 MVR 梯度蒸发结晶系统 (60-80℃) 制备工业级六水硫酸镍。

#### (7) 沉锂及 MVR 蒸发

采用碳酸钠梯度沉淀法对镍萃余液实现锂钠高效分离。在 pH 10.5-11.0、温度 90-95℃ 条件下，按 Li:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 摩尔比 1:1.05 投加碳酸钠溶液，通过晶种诱导结晶机制，锂主要以  $\beta$  型碳酸锂形式进行选择性的沉淀，锂沉淀率  $\geq 98.5\%$ 。

此段过程主要反应 (式 4)：

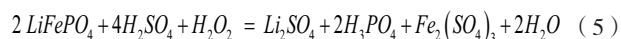


沉淀母液经 MVR 五效蒸发系统浓缩结晶，得到无水硫酸钠，蒸发冷凝水回用于萃取段洗涤工序。蒸发残渣及浓缩母液通过管道化输送返回浸出工段，进行浸出剂循环再生，物料回用率  $\geq 92\%$ 。

### 2.3.2 磷酸铁锂电池回收工艺方案

#### (1) 浸出

磷酸铁锂黑粉湿料的工业浸出与三元锂浸出工艺类似，主要反应如 (式 5)：



#### (2) 磷酸铁产品

工艺一：沉淀-煅烧工艺。浸出液经氢氧化钠溶液精准调节至 pH 1.5-2.0，触发磷酸根净化反应， $\text{PO}_4^{3-}$  与  $\text{Fe}^{3+}$  通过羟基磷酸铁络合沉淀机制高效脱除 (Fe/P 脱除率  $\geq 99.8\%$ )，同步加入阴离子表面活性剂 (如十二烷基硫酸钠) 抑制颗粒团聚。沉淀体系在 80℃ 恒温搅拌下反应 2-3 小时，形成含水无定型磷酸铁，经三级逆流洗涤至洗涤水电

导率  $< 50\text{ms/cm}$ ，再通过阶梯煅烧工艺 (200-300℃ 脱水 2-5h + 550-775℃ 转晶 1-4h) 制备  $\alpha$  单斜晶系磷酸铁。

工艺二：在  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  条件下，按固液比 1:12.5-1:33 (g/mL) 向浸出液中投加 30wt% 磷酸溶液，同步引入 0.05mol/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  氧化剂实现  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  的完全转化。经晶化陈化 0.5-2 小时后，获得无定型磷酸铁沉淀物。采用三级逆流洗涤实现产物中性化，最终得到高结晶度磷酸铁前驱体。

#### (3) 沉锂及 MVR

首先采用氢氧化钠溶液分阶段调节体系 pH 至 6.0-8.0，通过  $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$  羟基氧化物共沉淀实现重金属深度脱除。净化液引入 0.1-1% 硫酸钙，在 60-80℃ 搅拌条件下与  $\text{PO}_4^{3-}$  形成  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_3\text{OH}$  共晶沉淀。深度净化液经多级精密压滤后，采用碳酸钠梯度结晶 (pH 10.5-11.0、晶种添加量 0.5g/L) 制备电池级碳酸锂。母液经钠盐再生模块回用于浸出工序，钙磷渣经 800℃ 煅烧制备高纯磷酸钙副产品，实现全流程物料闭路循环。

### 3 退役动力锂电池精细化拆解方案

#### 3.1 概述

退役动力锂电池全破碎热解方案虽具规模化适配优势，但存在全组分处理引发的系统效能瓶颈：当前退役锂电池工业级热解设备单线处理量为 2-3t/h，而全破碎工艺导致热解段需承载约 2.78t/h 级物料通量 (以 20000t/a 处理规模计)，热解处理和污染控制负荷偏高；湿法冶金段因正负极活性材料与集流体碎片形成异质固溶体，需额外增加 3-5 级酸碱交替处理工序 (药剂消耗量增加 35%)。同时该方案尚未构建隔膜定向解聚与电解液组分捕集的技术路径，导致全流程资源化率劣化至 80-83%。

退役动力锂电池精细化拆解体系通过全组分定向解离与短流程再生，资源综合利用率可升至 92-95%。精细化拆解后仅需对正极片进行处理，产线处理压力大大减小。相比于全破碎热解工艺，精细化拆解工艺热解段压力释放约 70%，筛分段工艺简化约 30%，湿法段处理通量降低约 35%。

当前该工艺技术瓶颈在于工业级智能分选系统尚未突破多材质界面识别难题 (误判率  $\geq 15\%$ )，工业上仅能实现半自动处理 (自动化率仅达 32-38%)，仍主要依靠人工。拆解过程存在电解液挥发、有害气体释放及重金属粉尘扩散等安全隐患。因此，主要依靠人工的精细化拆解方案存在较

大局限性。但随多模态传感系统与数字孪生技术的深度集成，密闭式拆解车间与全自动分选产线已进入工程验证阶段，标志着精细化拆解目前正向工业化主流方案的实质性跨越。

具体工艺流程如图 2 所示。



图 2 退役动力电池工业化回收工艺流程图

### 3.2 预处理方案

精细化拆解通过集成多轴工业机器人集群与机器视觉引导系统，构建“电池包拆解—模组分离—单体解析”的全流程自动化产线，实现快速电芯健康度（SOH）检测与极组精密分选，全过程人工干预率 $<0.5\%$ 。拆解获取的卷芯经激光切割剥离后，可精准分选出正极片、负极片、隔膜、电解液及外壳，形成九大组分闭环再生体系（表 1）。

拆解出的正极片经破碎、热解处理（含铝箔与极粉）。热解工艺采用梯度温控策略定向脱除 PVDF 粘结剂，同步通过高梯度磁选（1.2–1.5T）实现铁质杂质深度去除。正极片经干法冲击剥离与多级振动筛分，实现正极活性物质与铝箔的高效解离，铝箔完整回收率 $\geq 98\%$ 。相较全破碎热解工艺，该方案具有三阶优势：铁杂质分离效率提升至 99.8%、筛分后物料铁含量 $\leq 0.005\%$ 免除额外除杂工序、热解体系隔绝隔膜/电解液介入使尾气苯系物浓度 $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ ，碳排放强度降低 62%。

表 1 锂电池九大组分工业化回收技术表

| 序号 | 组分分类  | 材料构成                      | 工业化回收技术                                     |
|----|-------|---------------------------|---------------------------------------------|
| 1  | 正极材料  | NCM/NCA/LCO/LFP 等         | 热解剥离→湿法冶金（酸浸/萃取）或直接修复                       |
| 2  | 负极石墨  | 人造/天然石墨                   | 物理筛分→高温提纯（ $\leq 1000^\circ\text{C}$ ）→表面重构 |
| 3  | 铝箔    | 高纯铝（正极集流体）                | 干法剥离→涡流分选→熔炼精制                              |
| 4  | 铜箔    | 高纯铜（负极集流体）                | 破碎筛分→密度分选→电解精炼                              |
| 5  | 隔膜    | PP/PE 多孔膜                 | 低温热解（ $<300^\circ\text{C}$ ）→催化裂解→单体再生      |
| 6  | 电解液   | LiPF <sub>6</sub> + 碳酸酯溶剂 | 超临界 CO <sub>2</sub> 萃取→分子蒸馏→锂盐再生            |
| 7  | 钢/铝外壳 | 铝合金/不锈钢结构件                | 磁选分质→熔融重铸                                   |
| 8  | 塑料组件  | ABS/PC 等工程塑料              | 破碎→密度分选→熔融挤出再造粒                             |
| 9  | 连接件   | 镍片/铜排/高压线束                | 激光切割→金属分选（磁选+涡流）                            |

### 3.3 深度处理方案

精细化拆解方案在湿法冶金段仍采用三元锂电池全组分浸出模式，但其核心优势在于浸出前驱体为纯化正极活性物质（Ni/Co/Mn 含量 $\geq 99\%$ ），彻底消除负极石墨粉对浸出体系的干扰。针对磷酸铁锂电池回收的经济性瓶颈，该方案通过物料流重构实现工艺路径革新：①选择性浸出工艺采用硫酸/磷酸/柠檬酸耦合 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化体系，在 pH 2.0–3.5、60–80℃ 条件下触发  $\text{LiFePO}_4 \rightarrow \text{FePO}_4 + \text{Li}^+$  的热力学自发反应，锂选择性浸出率 $\geq 98\%$ ；②直接再生工艺对拆解所得 LiFePO<sub>4</sub> 进行缺陷修复与碳包覆改性，再生正极材料 0.2C 容量 $\geq 155\text{mAh}/\text{g}$ 。由此形成双轨技术路径——“拆解—选择性浸出”实现锂资源高效提取（回收成本 $<8$  万元/吨 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>），“拆解—直接再生”满足动力电池级材料再生需求（再生效率 $\geq 95\%$ ），整体工艺金属回收能耗较传统方案降低 62%。

### 4 结论及展望

本研究系统论证了退役动力电池工业化回收的全链条技术路径：现阶段主流全破碎热解工艺（TRL 8–9 级）依托 2–3t/h 级处理规模与 88–92% 高价值金属组分资源化率，仍是规模化处置的可行方案。精细化拆解工艺（TRL 6–7 级）通过智能解耦—组分定向回收技术，将铜箔直收率提升至 98%、铝箔直收率提升至 95%、电解液回收率突破 90%，虽处理通量暂处 1.0–1.5t/h 水平，但其“减量提质”特性更适配未来高值化再生需求。

基于产业发展阶段与经济性平衡，建议采取渐进式技术过渡策略：

(1) 近期过渡期 (2025–2027) : 保留全破碎热解工艺主体框架, 重点升级带电破碎预处理模块 (铁锂 / 三元电芯分选精度  $\geq 95\%$ ) 与热解尾气净化系统 (氟化物捕集率  $\geq 99\%$ ) , 同步试点精细化拆解关键单元 (如 X 射线引导的极组无损分离) ;

(2) 中期迭代期 (2028–2030) : 构建模块化产线架构, 通过数字孪生技术实现全破碎与精细化工艺的动态耦合 (处理成本优化率  $\geq 25\%$ ) , 重点突破  $\text{LiFePO}_4$  直接再生 (容量恢复率  $\geq 97\%$ ) 与电解液原位提纯 (DEC 纯度  $\geq 99.5\%$ ) 技术;

(3) 远期替代期 (2031–) : 完成全产业链智能化升级, 形成 “带电拆解 – 材料再生 – 电池重构” 的闭环体系, 使再生正极材料占比提升至 40%, 碳排放强度降至  $0.3\text{tCO}_2/\text{吨}$  材料 (现工艺  $1.8\text{tCO}_2/\text{吨}$ ) 。

#### 参考文献:

[1] Xue S, Xia Y, Wang J, et al. Comprehensive recycling of spent automotive lithium-ion batteries in China: full-chain processes and recycling strategies[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 106: 101–122.

[2] 彭准, 刘少葵, 刘勇奇, 等. 动力电池回收概况及发展前景展望 [J]. 广州化工, 2022, 50(22):27–29.

[3] Rao M, Zhang T, Li G, et al. Solvent extraction of Ni and Co from the phosphoric acid leaching solution of laterite ore by P204 and P507[J]. Metals, 2020, 10(4): 545.

**作者简介:** 张永禄 (1983–), 男, 工程师, 一级造价工程师, 监理工程师。研究方向: 固体废物处理与工程设计。

**通信作者:** 夏宇 (1993–), 男, 博士, 副教授, 博士生导师。研究方向: 退役动力锂电池综合利用、固废处理与资源化, 生物质废弃物循环利用。

**基金项目:** 中城环境企业自研项目 (ZCHJ2024001) 。