

磷酸铁锂废旧电池自动拆解中极片分离工艺优化

方波

国电投远达催化剂有限公司 重庆 南岸 400000

【摘要】：磷酸铁锂废旧电池自动拆解过程中，极片分离工艺的稳定性与高效性直接决定资源回收质量与产业经济效益。针对当前极片分离存在的分离不彻底、杂质混入率高、设备损耗严重等问题，从工艺参数匹配、设备结构改进、预处理协同作用三个维度探索优化路径，明确工艺优化的核心方向为提升分离精准度与降低过程能耗。通过整合工艺环节的协同调控策略，实现极片分离效率与纯度的同步提升，为磷酸铁锂废旧电池自动拆解产业的规范化、高效化发展提供技术支撑。

【关键词】：磷酸铁锂废旧电池；自动拆解；极片分离；工艺优化；资源回收

DOI:10.12417/3041-0630.26.04.026

磷酸铁锂电池在新能源领域的广泛应用，推动废旧电池回收产业迎来快速发展机遇。极片作为废旧磷酸铁锂电池中核心的资源载体，其分离效果直接影响正极材料、负极材料等有价值成分的回收效率与再生品质。自动拆解模式下，极片分离工艺易受电池型号差异、极片粘结强度、拆解环境波动等多重因素影响，导致现有工艺难以适配规模化回收需求，制约产业升级进程。厘清极片分离工艺的核心症结，探索针对性的优化方案，既是破解当前自动拆解效率瓶颈的关键举措，也是推动废旧电池资源循环利用体系完善的重要支撑，为后续工艺优化研究搭建核心框架。

1 磷酸铁锂废旧电池自动拆解中极片分离工艺现状及核心问题

磷酸铁锂废旧电池自动拆解的极片分离主要采用机械破碎-筛分分离与热解-机械剥离两种模式。前者通过破碎与筛分的粒径差异实现分离，因效率高、成本低广泛应用于中小型企业，但易因破碎力度失控导致极片过度粉碎，增加后续分选难度；后者经热解去除粘结剂后机械剥离，适配极片完整性需求，却存在热解温度难调控问题，过高易致材料氧化、过低则粘结剂破除不彻底^[1]。自动拆解场景下，极片分离受三大核心因素制约：电池单体在极片厚度、粘结剂特性等方面的差异，使固定工艺参数难以精准适配；拆解线设备协同不足易引发物料堆积，影响分离连续性；预处理不规范则导致电解液等杂质混入，降低极片纯度并磨损设备。极片分离的纯度与完整性直接影响后续回收，纯度不足会增加药剂消耗、降低回收率，完整性受损则造成资源浪费并提升环保成本，而优质分离效果可缩短工艺链、降低成本，提升产业效益。

2 磷酸铁锂废旧电池极片分离预处理工艺优化方向

2.1 废旧电池精准放电与安全去壳工艺优化

精准放电与安全去壳是极片分离预处理的核心环节，其工艺优化重点在于提升安全性与适配性。精准放电工艺优化需针

对不同剩余电量的磷酸铁锂废旧电池，采用梯度恒流放电模式，通过实时监测电池电压变化，动态调整放电电流，避免因过放电产生热失控风险，同时确保电池内部剩余电量完全释放，防止后续拆解过程中发生短路燃烧^[2]。安全去壳工艺优化则需结合电池外壳材质（铝合金、钢壳）与结构特点，采用机械剪切与激光切割相结合的方式，通过精准定位外壳接缝处，控制切割深度与速度，避免切割过程中损伤内部极片。在去壳环节增设负压除尘装置，及时收集外壳切割产生的金属碎屑与粉尘，提升预处理环境的清洁度。

2.2 电芯预破碎粒度调控工艺改进

电芯预破碎需遵循“预理解离-分相分离-精准破碎”逻辑，而非直接破碎：先通过氮气保护下的两级破碎（氧含量 $\leq 2\%$ ）实现电芯初步解离，第一级双轴撕碎机将电芯破碎至20-40mm片状物料，使外壳、极片、隔膜初步分离；随后通过气流分选（风速8-10m/s）分离出外壳（重质组分）与极片-隔膜混合物（轻质组分）；再对混合物进行磁选除铁（磁场强度0.8T），去除金属杂质后，再通过专用分选设备利用正极、负极与隔膜在密度、介电常数上的差异，实现三者的高效分离，分离后的正极、负极分别进入后续破碎工序，隔膜则单独收集回收，单独对正极进行三级破碎调控粒度。优化工艺参数：一级颚式破碎间隙5mm，得到5-10cm块状正极；二级辊式破碎转速300r/min，间隙1.5mm，破碎至1-3cm；三级冲击破碎采用变频控制，根据正极片厚度（0.1-0.3mm）调整转速400-600r/min，最终通过振动筛分（筛网孔径0.5mm）控制正极颗粒粒度0.1-0.5mm，不合格颗粒返回三级破碎，筛分效率达95%。全程采用循环冷却水控温（设备温度 $< 60^\circ\text{C}$ ），避免电解液挥发（沸点120-150 $^\circ\text{C}$ ）与材料氧化。

2.3 预处理工艺参数的协同匹配策略

预处理工艺参数的协同匹配需围绕放电电流、放电时间、切割速度、破碎间隙等关键参数展开，通过构建参数协同调控体系，实现各环节工艺参数的精准适配。在参数匹配过程中，

以电池型号、剩余电量、电芯厚度为输入变量，建立预处理参数数据库，根据不同输入变量自动匹配最优放电参数与破碎参数。对于厚电芯、高剩余电量的废旧电池，采用较低放电电流、较长放电时间，配合较大破碎间隙与较慢切割速度；对于薄电芯、低剩余电量的废旧电池，则采用较高放电电流、较短放电时间，减小破碎间隙与提升切割速度。通过实时监测预处理后物料的温度、粒度、安全性等指标，动态微调工艺参数，确保预处理效果稳定可靠，为后续极片分离环节提供优质原料。

3 自动拆解中极片分离核心工艺参数优化

3.1 机械分离模式下破碎力度与转速优化

基于极片粘结强度差异，采用“力度-转速”协同调控策略。通过万能试验机测定不同 SOH 极片的粘结强度：SOH 100%新电池极片粘结强度为 0.8-1.0MPa，SOH 70%退役电池为 0.3-0.5MPa。针对高粘结强度极片 (>0.6MPa)，调整破碎机锤头重量至 8kg、击打频率 20Hz，同时降低转速至 250r/min，延长物料停留时间至 8s，确保粘结剂与集流体初步分离；针对低粘结强度极片 (<0.6MPa)，将锤头重量降至 5kg、击打频率 15Hz，转速提升至 350r/min，避免极片过度粉碎。在破碎设备内部增设聚氨酯缓冲衬板，厚度 10mm，可降低锤头与物料的刚性撞击力 30%，极片完整率提升至 85%以上。某规模化回收线应用该参数后，机械分离效率从 4.5t/h 提升至 6.2t/h，单位设备损耗成本降低 18%。

3.2 热解辅助分离中温度与时间调控

热解辅助分离工艺中，温度与时间的精准调控是破除极片粘结剂、实现高效分离的关键。温度调控需根据粘结剂的热分解温度范围，采用分段升温模式，第一阶段升温至 200-300℃，去除极片表面的电解液与水分；第二阶段升温至 400-500℃，使粘结剂充分分解挥发；第三阶段降温至 150-200℃，避免高温下极片材料氧化。时间调控需配合温度变化，在每个升温阶段设置合理的保温时间，确保电解液、水分及粘结剂充分去除，同时避免保温时间过长导致能源浪费与极片性能损伤。热解过程中需通入惰性保护气体，防止极片材料氧化，同时增设尾气处理装置，对热解产生的有害气体进行净化处理，降低环境污染。尾气处理采用蓄热式催化燃烧 (RCO) 工艺处理热解及破碎过程中产生的 VOC 气体，该工艺通过蓄热体回收燃烧热量，实现 VOC 气体的高效氧化分解 (去除率 ≥95%)，同时降低尾气处理能耗，处理后的达标气体高空排放。

3.3 分离介质与物料配比参数优化

分离介质与物料配比参数优化旨在提升极片与其他组分的分离精准度，减少杂质混入。分离介质的选择需根据极片与杂质的密度、表面特性差异，采用气流分选与重力分选相结合的复合介质体系。气流分选介质选用干燥压缩空气，通过调整

气流速度，使极片 (轻质组分) 与金属碎屑 (重质组分) 实现初步分离；重力分选介质选用水基分选液，通过调整分选液密度，进一步分离极片中混入的细小杂质。物料配比优化需控制进入分离设备的物料浓度，避免物料浓度过高导致分离通道堵塞，影响分离效率；同时避免物料浓度过低导致能源浪费。通过设置物料浓度监测装置，实时反馈物料流量，动态调整进料速度，确保分离介质与物料的最优配比，提升极片分离纯度。

4 极片分离工艺配套设备结构改进

4.1 高效破碎分离一体化设备结构设计

研发立式破碎分离一体化设备，整合“预分离-破碎-分选”三大功能，设备处理量达 8t/h，空间利用率提升 40%。设备设计遵循电池制作的逆过程逻辑，模拟极片、隔膜逐层包裹的反向操作，实现从外到内逐层“剥离式”分离：上部设进料口与预分离腔，内置柔性气流分选装置，利用隔膜质地轻薄、与极片粘聚力弱的特性，通过温和气流牵引实现隔膜的优先剥离与分离，完成第一层“拆解”；中部为分级剥离腔，替代传统破碎结构，采用弧形锤头 (曲率半径 50mm) 与可调节弹性辊轴组合结构，锤头与辊轴呈反向联动，以适配极片层叠厚度的力度进行柔性碾压与剥离，破除极片间的粘聚力，实现正极、负极极片的分层分离，完成第二层“拆解”；下部为复合分选腔，集成振动筛分 (筛网孔径可自动调节，范围 0.5-3cm) 与重力分选模块，对分层剥离后的正负极片、微量金属杂质进行精准分拣，最终分别从不同出料口排出，实现全程逐层分离的闭环操作^[4]。设备采用 PLC 联动控制系统，实现进料、预分离、破碎、分选、出料的同步运行，参数响应延迟 ≤3s。

4.2 自适应分选装置的研发与应用改进

开发红外识别-智能调控自适应分选装置，核心由红外传感器、控制系统、弹性筛网组件组成。红外传感器 (检测精度 0.1mm) 实时采集极片厚度 (0.1-0.5mm)、宽度 (5-20cm)、材质等参数，传输至控制系统后，与预设参数库 (覆盖 10 种主流磷酸铁锂电池极片参数) 匹配，自动调整筛网孔径 (0.5-3cm)、气流速度 (12-20m/s)、分选角度 (15° -30°)。

装置采用聚氨酯弹性筛网，厚度 8mm，可降低极片与筛网的刚性撞击力，极片损伤率从 15%降至 5%；增设脉冲反吹装置 (压力 0.6MPa，频率 30s/次)，及时清理筛网堵塞物料，分选通道畅通率保持 99%以上。应用该装置后，不同型号极片的分选精度均提升至 95%以上，解决了传统装置适配性差的痛点。

4.3 设备耐磨与防腐性能强化改进

设备耐磨与防腐性能强化改进是提升设备使用寿命、降低运行成本的关键。在破碎腔、分选通道等与物料直接接触的部位，采用高硬度耐磨合金材料进行衬里处理，增强设备耐磨

性，减少物料冲击造成的损耗。对于热解辅助分离设备的高温区域，采用耐高温陶瓷材料与不锈钢复合结构，提升设备耐高温性能。针对电解液、热解产物等腐蚀性介质，在设备接触部位采用耐腐蚀涂层，如聚四氟乙烯涂层，增强设备防腐能力。定期对设备易损部件进行检测与更换，建立设备维护保养体系，确保设备长期稳定运行。设备性能的强化改进，能够降低设备故障发生率，提升极片分离工艺的连续性^[5]。

5 极片分离工艺优化效果验证及工艺保障措施

5.1 极片分离工艺优化效果的多维度验证方法

以某 1000t/a 磷酸铁锂废旧电池回收项目为案例，采用“多指标同步验证”方法：分离纯度通过 ICP-MS 检测，极片杂质含量从 8.5%降至 1.8%；分离效率统计单位时间产量，从 30kg/h 提升至 50kg/h；资源回收率通过湿法冶金验证，锂回收率从 58%提升至 90.5%，正极粉回收率达 96%。辅助指标显示，设备能耗从 80kWh/t 降至 54kWh/t，连续运行稳定性达 99%，验证了优化方案的可行性。

5.2 规模化应用下的工艺稳定性保障措施

规模化应用下的工艺稳定性保障措施需围绕参数监控、设备维护、原料管控三个核心层面构建。参数监控层面，建立实时在线监测系统，对破碎力度、转速、热解温度、物料浓度等关键工艺参数进行 24 小时不间断监测，当参数出现波动时，控制系统自动发出预警并进行微调，确保参数稳定。设备维护层面，制定定期维护保养计划，对破碎设备、分选装置、输送设备等定期进行检修、润滑、更换易损部件，建立设备运行档案，记录设备运行状态与维护情况，提前预判设备故障。原料管控层面，建立废旧电池分类分级体系，对回收的磷酸铁锂废旧电池按照型号、剩余电量、破损程度进行分类，确保进入拆解线的原料特性统一，降低原料差异对工艺稳定性的影响。如图 1：

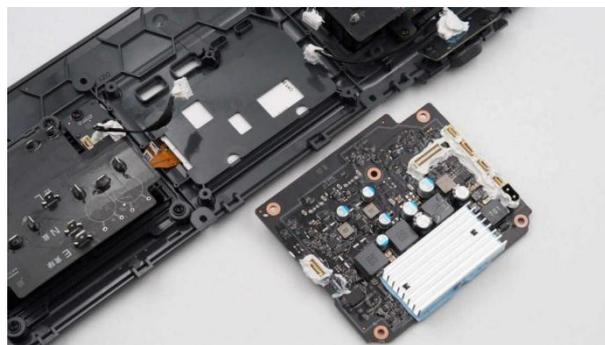


图 1 磷酸铁锂废旧电池拆解图

5.3 工艺优化后的环保与经济效益提升路径

工艺优化后的环保与经济效益提升路径需结合工艺特点与产业需求构建。环保效益提升方面，通过优化热解工艺参数，减少有害气体排放；增设高效除尘、除气装置，降低粉尘与废气污染；优化分离介质回收利用工艺，实现分选液、惰性气体的循环使用，减少资源消耗与废液排放。经济效益提升方面，通过提升极片分离纯度与效率，增加后续资源回收率，降低原料浪费；优化工艺参数与设备结构，降低设备能耗与维护成本；实现预处理、分离、后续回收环节的工艺协同，缩短回收链条，提升整体处理效率。通过规模化应用优化工艺，降低单位处理成本，提升产业竞争力，推动磷酸铁锂废旧电池回收产业的绿色可持续发展。

6 结语

本文围绕磷酸铁锂废旧电池自动拆解中极片分离工艺优化展开研究，明确了现有工艺存在的核心问题，从预处理工艺、核心参数、配套设备及保障措施等方面提出优化方向与具体策略。工艺优化通过多环节协同调控，可有效提升极片分离的纯度与效率，降低设备损耗与环保成本，为后续资源回收环节提供优质原料支撑。极片分离工艺的优化完善，对推动磷酸铁锂废旧电池自动拆解产业的规模化、规范化发展具有重要意义，也为废旧电池资源循环利用体系的构建提供了关键技术参考。同时，工艺优化通过系统引入尾气处理等环保措施，显著减少了拆解过程中的污染物排放，为产业的绿色发展提供了切实保障，体现了技术升级与环境效益的协同。

参考文献：

- [1] 魏润吉,杨思原,刘诚.废旧磷酸铁锂电池中有价元素回收的研究进展[J].矿业研究与开发,2025,45(10):22-32.
- [2] 周芳怡,张译友,闫姝璇,等.基于离子液体萃取体系从废旧磷酸铁锂电池中选择性回收锂[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2025,40(03):87-92.
- [3] 颜雪,唐雅琴,李俊华,等.废旧磷酸铁锂正极材料湿法回收及修复技术研究进展[J].有色金属(中英文),2025,15(11):2018-2027.
- [4] 唐鸿鹄,符义昕,刘晨,等.废旧磷酸铁锂与石墨磁选分离及修复再生[J].硅酸盐学报,2025,53(12):3600-3610.
- [5] 陈伟,俞欣怡,江洋.废旧磷酸铁锂电池正极材料回收技术研究进展[J/OL].环境工程学报,1-19[2025-12-19].