废旧电池自动化拆解回收生产线工艺优化

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

摘　要：废旧电池预处理、自动化拆解、破碎分选与生产线智能控制构成连续工艺链条。入厂识别、残余电量处理与拆解前评估为后续工序提供状态依据，拆解顺序、动作路径与安全联锁保障作业稳定，破碎粒度、热处理参数及分选组合决定物料解离与产物品质。本文围绕数据采集、控制逻辑、故障诊断和调度流转，讨论工序衔接中的参数修正与风险隔离。批次追溯与闭环调整提升异常分流效率。设备状态与物料状态同步记录后，工艺边界更清晰，运行连续性和回收过程可控性得到改善。

关键词：废旧电池；预处理；自动化拆解；破碎分选；智能控制

引言：工艺优化需要把状态识别、能量处置、拆解动作、破碎分选和智能控制放在连续链条中审视。识别与评估结果进入拆解参数库，拆解顺序和安全联锁随物料状态调整，破碎粒度与热处理参数按解离要求修正，分选组合依据产物检测结果优化。数据采集覆盖关键工位，控制逻辑保留异常退出路径，故障诊断与调度流转减少堵料和混料。批次追溯、在线监测和闭环调整使异常物料及时分流，设备状态与物料状态保持同步。工艺边界清晰后，运行连续性和回收过程可控性具备改善条件。

1 废旧电池预处理工艺优化

1.1 电池入厂识别与分类方法

入厂识别要把信息核对和状态检测放在连贯流程里，先登记来源、批次、标称类型和外观信息，再通过标签读取和图像识别确认电池类别。实际做起来不能只看标识，还要测开路电压、内阻和容量特征，结合外壳形态与接口结构判断化学体系和可处理范围。分类时按电压区间、结构完整性和残余风险分级，异常电池单独隔离，数据同步写入追溯记录。识别设备要定期校准，检测节拍与卸货、暂存、转运衔接，避免混料和重复检测。人员操作要固定动作，异常复判有明确判据。

1.2 残余电量安全处理工艺优化

残余电量处理要先把风险降下来，再谈效率。工艺上根据入厂分级结果选择负载放电或电阻放电，设置分段电流和电压终止点，放电过程中持续监测端电压、温度和回路状态，出现反接、过温或电压异常立即切断。实际做起来，放电参数不能只按固定参数运行，要按电池类型和状态自适应调整，缩短高电量电池的静置时间，控制低电量电池的过放风险。放电负载和连接件要满足连续运行，接触电阻保持稳定，热量及时导出。放电后的电池进入稳定暂存，记录电压回落和温度变化。尾气、废液和粉尘按工序收集，避免交叉污染。

1.3 外壳拆解前检测与状态评估

拆解前检测要回答能不能拆、先拆哪里、用什么防护。先做外观检查，确认变形、腐蚀、渗漏和连接件松动情况，再测绝缘电阻、开路电压、内阻和表面温度，结合入厂分类记录判断内部短路和热失控风险。实际做起来，检测顺序要固定，先非接触检测再接触检测，异常信号要复测并隔离。状态评估按结构完整性、电气安全性和残余能量划分等级，给出拆解顺序、工具选择和防护要求[1]。检测数据要能追溯到单体或模组，图像和测量结果同步保存。

1.4 预处理工序自动化控制策略

自动化控制要把识别、检测、放电和拆解前暂存串起来，核心是传感检测、逻辑联锁和参数自适应。产线通过视觉、称重、电压内阻检测和温度监测获取状态，控制单元按分类结果分配工位和工艺参数，机器人完成搬运、定位和辅助拆解。实际做起来，节拍协调比单机速度更重要，堵料、混料和异常电池要能被及时识别并分流。关键工位设置联锁和急停，故障诊断记录到追溯系统，参数调整保留版本。自动化不能过度追求无人，人机协同工位要保留复判和异常处置。数据采集要连续，控制策略根据检测结果动态修正。

2 自动化拆解工艺优化

2.1 拆解作业顺序优化方法

拆解作业顺序优化得先把状态评估结果用起来，按能量隔离、结构可及性和风险等级排先后。实际做起来不能只按固定工位顺序走，要先断电气连接和采样线束，再处理紧固件与导热结构，最后进入模组和电芯分离。顺序安排要兼顾可逆拆解和异常分流，高风险单体先隔离，不进入连续节拍。串行与并行工位要按检测结

果动态调整，避免前道等待和后道堆料。拆解动作要留出复检节点，关键连接拆开后复测电压和温度，确认稳定再往下走[2]。顺序优化还要把工具切换和物料转运算进去，减少无效动作。数据回写到追溯记录，下一批次按实际状态修正顺序。

2.2 拆解设备动作路径与参数优化

设备动作路径与参数优化要围绕定位准确、接触可控和节拍稳定展开。路径规划先依据视觉和测距结果建立作业空间，避开线束、管路和外壳薄弱区，工具进入和退出保持固定姿态。实际做起来，速度和加速度不能全程一个值，接近接触面要降速，分离阶段按力反馈修正进给。夹持力和工具扭矩要按连接件状态设定，接触力超限立即回退。路径仿真和空跑校验要放在换型前，碰撞检测覆盖工具、工件和防护结构。参数库按电池类型和连接方式分组，运行中根据检测结果做小步修正，修正幅度留记录。关键轴和末端执行器定期标定，路径偏差超限就停机复判。

2.3 模组与电芯分离工艺改进

模组与电芯分离工艺改进要先识别连接和固定方式，再选分离动作。实际做起来，不能只盯着拆得快，得把绝缘、热管理和结构变形一起管住。分离前确认母线、采样线和导热件的状态，按先解除约束再分离的顺序走。夹持要避开发热和薄弱区域，工具接触面保持清洁，切割和剥离产生的粉尘、碎屑要及时收集。分离判据不只看位置到位，还要看电压、温度和绝缘电阻是否稳定。柔性工装要适应不同模组尺寸，定位面定期校验。分离后的电芯和模组分别进入暂存，状态数据同步记录。异常粘连和变形件不强行分离，转人工复判。

2.4 拆解过程安全防护机制设计

拆解过程安全防护机制设计要按风险分级做联锁和隔离。实际做起来，不能只靠防护罩，得把温度、烟雾、电压和门禁信号都接进控制逻辑。高风险工位设置独立急停和区域断电，异常时先切断能量再处理工件。防火防爆措施要覆盖粉尘、电解液和可燃气体积聚场景，通风和监测保持连续运行。人员权限按工位分配，进入拆解区要经过状态确认，手动模式限制动作速度。设备联锁要防止带压、带电和带载开门，故障复位前必须完成现场确认[3]。异常电池和拆解残件分区暂存，转运路线避开人员密集区。控制记录保存动作、报警和处置结果，便于追溯。

3 破碎与分选工艺优化

3.1 电池单体破碎粒度控制优化

破碎粒度控制要按后续分选需要的解离程度定目标粒级，不能只追求细度。入料前核对单体状态和批次差异，破碎段采用分级给料和筛分返料，控制破碎比和过粉碎。实际做起来，转速、给料量、筛网尺寸和循环负荷要联动调整，在线测粒度，偏粗就回流，偏细就降低负荷。破碎腔温度和粉尘要连续监测，防止物料黏附和堵料。刀片或锤头磨损定期检查，间隙变化会改变粒度分布。不同体系电池分开破碎，避免混料影响后续分选。粒度数据写入批次记录，参数按物料状态小步修正。筛分效率下降时先查筛网和给料状态，再调破碎参数。返料循环量保持稳定，过粉碎比例超限就降低破碎强度。粒度分布检测结果和破碎参数对应保存，换型前先空跑验证。

3.2 热解或低温处理工艺参数优化

热处理参数要围绕物料组成和后续分选要求确定，温度、升温速率、停留时间和气氛是核心。实际做起来，不能只看设定温度，要测炉内实际温度和物料温度，分段升温，避免局部过热。热解段控制挥发分析出速率，尾气及时导出并监测，防止可燃气体积聚。低温处理段控制降温速率和气氛露点，减少氧化和结块。进料量、物料粒度和炉膛填充率要匹配，避免料层过厚导致受热不均。出炉物料冷却后检测残碳、含水率和脆性，异常批次回流调整。热解渣和冷凝产物分别收集，防止交叉污染。参数调整保留版本，和在线监测数据对应。炉膛压力保持微负压，密封件定期检查[4]。尾气处理前后压差超限就停机排查。物料停留时间按料层厚度修正，升温曲线按实际温度回写。冷却段风量和物料厚度匹配，出炉温度稳定后再进入分选。

3.3 金属与非金属物料分选工艺优化

分选要把物料按粒级和物性分开，磁选、涡电流、密度和静电等方式组合使用。实际做起来，先做筛分分级，窄粒级进入对应分选单元，避免粗细混选降低效率。磁选强度、给料厚度和带速要匹配，涡电流分选控制转速和物料分散状态，密度分选保持介质稳定。风选风量和风速按粒级调整，防止轻物料夹带和重物料误入。在线检测金属品位和非金属夹杂，分选产物分别称重和取样。设备间隙、电极和介质定期清理，防止积料影响分选。难分物料返回前道再解离，不硬分。参数按批次记录，异常时先查给料和筛分状态。分选前物料含水率要控制，含水率偏高就先干燥。各分选单元给料厚度保持均匀，带速和风量联锁调整。

3.4 分选产物纯度与回收率提升措施

纯度和回收率要同步管，不能只追一个指标。实际做起来，先做物料平衡，按粒级和产物统计给料、精料、

尾料和损失，找出跑损环节。破碎解离度不足就返回再解离，分选给料不均就调整筛分和分散状态。磁选、涡电流和密度分选的参数按产物检测结果小步修正，精料夹杂超限就降低给料负荷或增加精选次数。尾料再选要控制循环量，避免无效循环。在线取样和离线检测结合，关键产物按批次留样。设备清理和换型防混料，产物包装前复检。异常批次隔离复判，不直接混入合格料。数据回写到工艺参数库，形成闭环调整。精料纯度波动时先查给料粒级和分选负荷，再调介质或风量。

4 生产线自动化与智能化控制优化

4.1 生产线数据采集与监控体系

数据采集得先把测点布全，再谈数据能不能用。产线上按工序设置电压、电流、温度、振动、称重、粒度和位置检测，采集频率按工艺节拍和信号变化速度分别设定，关键工位连续采集，辅助工位按批次采集。实际做起来，不能只堆传感器，得把数据清洗和异常标记做在前头，空值、跳变和重复记录及时处理。边缘端完成预处理和短期缓存，中心端负责追溯和趋势分析，接口统一后各工位数据能对上批次和单体。监控界面按工序显示实时状态、报警和联锁结果，阈值分级设置，超限先提示再联锁。数据存储保留原始值和修正记录，查询权限按岗位分配。

4.2 关键工序自动控制逻辑设计

控制逻辑要按工序风险和执行顺序设计，识别、放电、拆解、破碎和分选各有联锁条件。实际做起来，不能只写启动停止，得把允许条件、互锁关系和异常退出路径理清楚。顺序控制保证前道完成并确认后才放行后道，闭环调节用在温度、给料量和分选参数上，设定值与反馈值偏差超限就降速或暂停[5]。模式切换分自动、手动和检修，切换前确认工件状态和门禁信号。急停和区域断电独立于普通逻辑，复位必须现场确认。参数自适应按检测结果小步修正，修正幅度和次数留记录，防止频繁调整。控制程序版本管理，修改后先空跑验证再上线。

4.3 设备故障诊断与运行状态监测

故障诊断要把状态监测和趋势判断结合起来，不能等停机再查。实际做起来，振动、温度、电流、压力和流量信号连续采集，按设备类型设定基线，偏差扩大就提示检查。诊断模型先做阈值报警和趋势分析，再结合动作周期和负载变化判断异常部位。关键轴、电机、液压站和风机设置冗余测点，信号不一致时自动标记。维护提示按运行时长和状态偏差生成，易损件更换记录进设备档案。故障发生后保存前后时间段数据，便于复判。诊断结果分注意、警告和停机3级，警告级允许降速运行，停机级直接切断动力。

4.4 生产调度与物料流转优化

调度要把批次、工位负荷和物料状态放在一张图上管。实际做起来，不能只看总产量，得按工序节拍和缓存容量分配任务，前道异常时后道及时降载或转暂存。物料流转按批次绑定追溯信息，入料、在制、暂存和产物分别记录位置和状态，输送路径避开拥堵工位。调度优先级按交期、风险等级和设备状态综合确定，高风险物料单独排程。缓存区设置上下限，超限报警并调整上游给料。转运设备任务分配考虑距离和等待时间，空载和重载路径分开规划。异常物料分流不占用主通道，返料和尾料按计划回炉或外排。调度指令下发后确认执行状态，未确认不进入下一节拍。

结束语：工艺优化需要把状态识别、能量处置、拆解动作、破碎分选和智能控制放在连续链条中审视。识别与评估结果进入拆解参数库，拆解顺序和安全联锁随物料状态调整，破碎粒度与热处理参数按解离要求修正，分选组合依据产物检测结果优化。数据采集覆盖关键工位，控制逻辑保留异常退出路径，故障诊断与调度流转减少堵料和混料。批次追溯、在线监测和闭环调整使异常物料及时分流，设备状态与物料状态保持同步。工艺边界清晰后，运行连续性和回收过程可控性具备改善条件。

参考文献

[1]陈斌斌,钟思佳,彭梁武.废旧锂离子电池回收预处理技术研究进展[J].稀有金属与硬质合金,2026,54(2):146-155,177.

[2]汪磊,赵冬梅,何燕,等.废旧锂电池外壳拆解设备研究设计[J].山东工业技术,2024(2):70-75.

[3]高杨,魏坤,杨正群,等.废旧铅酸蓄电池拆解作业装置的改进[J].今日制造与升级,2023(2):60-61.

[4]冯壮.一种干电池回收处理装置的设计[J].山东工业技术,2023(1):124-127.

[5]史兴龙,丁文捷.废旧铅酸蓄电池打孔控制系统的研究[J].宁夏工程技术,2022,21(1):80-83.