

锂电池极耳缺陷引发的失效分析及自动化检测方法研究 ——以 LJ 双通道检测设备为例

李立

安脉盛智能技术（广东）有限公司，广东 佛山 518000

DOI:10.61369/EPTSM.2026040013

摘 要： 锂电池作为新能源产业的核心储能部件，其安全性与可靠性直接决定终端产品性能。极耳作为锂电池内外能量传输的关键接口，其缺陷易引发电池起火、鼓包等失效问题。基于该设备的检测原理，优化自动化检测流程中的图像采集、特征提取及缺陷识别算法。实验表明，优化后的检测方法对极耳缺陷识别准确率达98.7%，检测效率较传统方法提升40%，为锂电池极耳质量管控提供高效技术支撑，对推动锂电池制造行业质量升级具有重要意义。

关 键 词： 锂电池极耳缺陷；失效；自动化检测

Research on Failure Analysis and Automated Detection Methods for Defects in Lithium Battery Tabs: A Case Study of the LJ Dual-Channel Detection Equipment

Li Li

Anmaisheng Intelligent Technology (Guangdong) Co., Ltd., Foshan, Guangdong 518000

Abstract： As the core energy storage component in the new energy industry, the safety and reliability of lithium batteries directly determine the performance of end products. The tabs, serving as the crucial interface for energy transfer both inside and outside the lithium battery, are prone to defects that can lead to battery failures such as fires and bulging. Based on the detection principles of this equipment, the image acquisition, feature extraction, and defect recognition algorithms in the automated detection process have been optimized. Experiments demonstrate that the optimized detection method achieves a defect recognition accuracy rate of 98.7% for lithium battery tabs, with a 40% improvement in detection efficiency compared to traditional methods. This provides efficient technical support for quality control of lithium battery tabs and holds significant importance for promoting quality upgrades in the lithium battery manufacturing industry.

Keywords： lithium battery tab defects; failure; automated detection

引言

全球能源转型背景下，锂电池凭借高能量密度、长循环寿命等优势，广泛应用于新能源汽车、储能电站等领域。然而，锂电池安全事故频发，据统计，35%以上的事与极耳缺陷直接相关。极耳连接电池内部电芯与外部电路，其制造过程中的微小缺陷的缺陷，在充放电循环中会不断恶化，最终导致电池失效。传统人工检测极耳缺陷存在效率低、漏检率高的问题，难以满足大规模生产需求。LJ双通道检测设备作为新型自动化检测装备，具备双工位并行检测能力，但现有检测方案对复杂缺陷的识别精度有待提升。

一、工程概况

本研究依托某新能源科技有限公司的锂电池生产线升级项目，该项目核心目标为通过引入自动化检测技术，将极耳缺陷导致的电池不良率从2.3%降至0.5%以下。项目涉及的锂电池为方形三元锂电池，容量200Ah，极耳采用1060铝合金材质，厚度0.2mm，宽度8mm，生产节拍为300只/小时。为匹配生产效

率，项目引入3台LJ双通道检测设备，构建“多设备并行+数据联网”的检测体系。LJ设备集成高清工业相机、激光轮廓传感器及AI识别模块，可同时实现极耳外观与尺寸的双重检测。工程现场需解决检测设备与生产线的无缝对接、检测参数与极耳工艺的匹配等问题，通过现场调试与参数优化，设备已实现与生产线的协同运行，为后续失效分析及检测方法优化提供了真实的工程数据支撑。

二、锂电池极耳缺陷引发的失效分析

（一）极耳裂纹缺陷的失效机理及影响

极耳裂纹缺陷虽初期尺寸微小，但在锂电池充放电循环过程中，会因应力集中效应不断扩展，最终引发电池失效，其失效机理可分为机械应力恶化与电化学腐蚀加速两个阶段。在机械应力恶化阶段，锂电池充放电时电芯会发生膨胀与收缩，极耳作为连接部件需承受反复的拉伸与压缩应力，裂纹处的截面面积减小，应力集中系数显著升高，导致裂纹以0.005–0.01mm/循环的速度扩展。当裂纹扩展至极耳宽度的1/3以上时，极耳的导电截面积大幅降低，电阻急剧增大，充放电过程中产生大量焦耳热，形成局部高温区。进入电化学腐蚀加速阶段，局部高温会破坏极耳表面的氧化膜，电解液中的氟化物等腐蚀性成分与极耳金属发生化学反应，生成可溶性的金属化合物，进一步扩大裂纹尺寸。当裂纹贯穿极耳时，会导致电池内部断路，出现充放电中断现象；若裂纹未完全贯穿，高温可能引发电解液分解，产生气体，导致电池鼓包，严重时引发起火爆炸事故。

（二）极耳虚焊缺陷的失效路径及危害

极耳虚焊缺陷是指极耳与电芯极片之间的连接强度不足，存在微小间隙，其失效路径主要通过接触电阻增大、局部过热及连接失效三个环节逐步推进。虚焊处的接触电阻通常为正常焊接的5–10倍，在电池充放电过程中，根据焦耳定律 $Q=I^2Rt$ ，接触电阻的增大导致局部发热量急剧增加，使虚焊区域温度快速升至120–150℃。高温环境会加速极耳与极片接触界面的氧化反应，生成高电阻的氧化层，进一步增大接触电阻，形成“电阻增大–发热加剧”的恶性循环。随着循环次数的增加，虚焊处的连接强度不断下降，当受到电芯膨胀产生的机械力作用时，极易发生连接断裂，导致电池内部开路。

（三）极耳变形缺陷的失效影响及机制

极耳变形缺陷主要表现为折弯角度异常、表面凸起或扭曲，其对锂电池的失效影响主要体现在装配密封性下降与电流分布不均两个方面，具体失效机制与变形程度密切相关。当极耳折弯角度偏差超过 $\pm 3^\circ$ 时，在电池封装过程中，极耳无法与盖板的极柱精准对接，导致封装间隙增大，电池的密封性下降，电解液易从间隙中渗漏。电解液渗漏不仅会导致电池容量衰减，还会腐蚀电池外壳及周边部件，引发接触不良等问题。若极耳出现表面凸起或扭曲变形，其与极柱的接触面积会减小，导致电流在极耳表面的分布不均，形成局部电流密度过高区域。过高的电流密度会加速极耳的电化学腐蚀，使极耳表面生成氧化膜，增大导电电阻，充放电过程中产生的热量集中在该区域，导致局部温度升高。当温度超过电解液的分解温度（通常为180–200℃）时，电解液会剧烈分解，产生大量气体，导致电池鼓包，若鼓包过程中极耳与极柱的连接被破坏，会进一步引发电池开路失效。

（四）极耳焊穿缺陷的失效模式及后果

极耳焊穿缺陷是指焊接过程中因功率过高导致极耳出现穿孔，其失效模式主要为电解液泄漏与内部短路，失效后果具有突发性与严重性。极耳焊穿后形成的穿孔直径通常在0.1–0.3mm，

虽初期可能被焊渣或极片材料部分封堵，但在锂电池充放电循环过程中，电芯的膨胀与收缩会使穿孔处的封堵物脱落，形成贯通极耳的通道。电解液会通过该通道缓慢渗漏，一方面导致电池内部电解液量减少，离子传导能力下降，电池容量大幅衰减，循环寿命缩短至设计寿命的50%以下；另一方面，渗漏的电解液会腐蚀极耳周边的绝缘部件，如隔膜，当隔膜被腐蚀破损后，正极与负极的活性物质直接接触，引发电池内部短路。内部短路瞬间会产生巨大的电流，使电池温度在数毫秒内升至300℃以上，引发热失控反应，导致电池起火、爆炸。

（五）多缺陷耦合下的失效叠加效应

在实际生产过程中，极耳可能同时存在多种缺陷，如裂纹与虚焊、变形与焊穿等，多缺陷耦合会产生失效叠加效应，使电池的失效风险远高于单一缺陷。变形与焊穿耦合时，变形导致的电流分布不均会使焊穿处的局部电流密度进一步升高，加速电解液的渗漏与隔膜的腐蚀，使电池发生内部短路的时间从单一焊穿缺陷的200次循环缩短至80–100次循环。多缺陷耦合还会导致失效模式的复杂化，如某电池同时存在裂纹、虚焊与变形缺陷，其失效过程表现为：虚焊引发局部高温→加速裂纹扩展→变形导致电流分布不均→裂纹贯穿极耳引发开路→开路前的高温腐蚀隔膜→最终出现开路与短路并存的复合失效模式。这种复合失效模式增加了失效分析的难度，也使电池的安全风险大幅提升。

三、锂电池极耳缺陷的自动化检测方法优化

（一）基于LJ设备的图像采集系统优化

图像采集系统是LJ双通道检测设备实现极耳外观缺陷识别的基础，针对原有系统存在的光照不均、图像模糊等问题，从光源配置、相机参数及采集流程三个方面进行优化。在光源配置上，将原有单一环形光源改为“环形光源+同轴光源”的组合光源系统，环形光源提供均匀的漫射光，消除极耳表面的反光干扰，同轴光源增强极耳表面纹理与缺陷的对比度，使裂纹、污渍等缺陷更清晰可见。相机参数优化方面，通过现场实验确定最佳参数组合：分辨率设置为1200万像素，帧率调整为30fps，曝光时间控制在10–15 μs ，同时引入自动对焦功能，确保极耳在不同位置时均能获得清晰图像。采集流程优化上，采用“多角度同步采集”模式，在每个检测工位设置3台高清相机，分别从正面、侧面及45°角采集极耳图像，避免因拍摄角度单一导致的缺陷漏检。优化后的图像采集系统，极耳缺陷图像的信噪比从原来的25dB提升至42dB，裂纹缺陷的清晰度提升3倍，为后续的缺陷识别提供了高质量的图像数据支撑。经测试，图像采集的稳定性达到99.5%，满足生产线的连续运行需求。

（二）极耳缺陷特征提取算法改进

针对传统特征提取算法对微小缺陷与复杂缺陷识别能力不足的问题，结合LJ设备的图像数据特点，提出基于改进Canny算子与Hu矩的特征提取算法。首先，对采集到的图像进行预处理，采用高斯滤波算法去除图像噪声，滤波核大小设置为 5×5 ，标准差取0.8，有效降低噪声干扰的同时保留缺陷细节；再通过自适应

阈值分割算法，根据极耳不同区域的灰度值特点自动调整分割阈值，实现极耳区域与背景的精准分离。在缺陷边缘提取阶段，改进 Canny 算子通过引入梯度方向加权因子，解决传统算子对弱边缘响应不足的问题，将边缘检测的准确率从82%提升至95%，可有效提取宽度仅0.01mm的微小裂纹边缘。在特征参数提取上，除传统的面积、周长等几何特征外，引入 Hu 矩特征与纹理特征参数，Hu 矩特征可描述缺陷的形状特性，不受平移、旋转及缩放的影响，纹理特征参数通过灰度共生矩阵计算获得，可有效区分污渍与正常表面。改进后的特征提取算法可提取12维特征参数，全面表征极耳缺陷的特性，为后续的缺陷识别提供充足的特征信息。

（三）基于 AI 的缺陷识别模型构建

依托 LJ 设备的数据处理系统，构建基于改进 YOLOv5 的极耳缺陷识别模型，提升对多种缺陷的快速识别能力。模型构建分为数据集建立、网络结构改进及模型训练三个步骤。数据集建立方面，收集生产线中的极耳缺陷图像10万张，涵盖裂纹、虚焊、变形等7类常见缺陷，对图像进行数据增强处理，包括旋转、缩放、翻转及添加噪声等，将数据集规模扩充至30万张，按7:2:1的比例分为训练集、验证集与测试集。网络结构改进上，在 YOLOv5 的主干网络中加入注意力机制模块，增强模型对缺陷区域的关注，同时减小网络的下采样率，保留更多的图像细节信息，提高对微小缺陷的识别能力。模型训练过程中，采用自适应学习率策略，初始学习率设置为0.001，随着训练轮次的增加逐步衰减，训练批次大小设为32，共训练100个轮次。训练完成后的模型，在测试集上的识别准确率达98.7%，较传统 YOLOv5 模型提升4.2%，对裂纹、焊穿等微小缺陷的识别准确率提升尤为明显，达97.3%。模型的识别速度为30帧/秒，可满足 LJ 设备双工位并行检测的实时性要求。

（四）LJ 设备检测参数的优化匹配

LJ 双通道检测设备的检测参数直接影响检测精度与效率，结合极耳的制造工艺特点与缺陷类型，通过正交实验法对检测参数进行优化匹配。选取激光轮廓传感器的扫描速度、测量精度、相机曝光时间及检测阈值作为正交实验的因素，每个因素设置3个

水平，以缺陷识别准确率、漏检率及检测效率作为评价指标。正交实验结果显示，激光轮廓传感器的扫描速度与检测阈值对检测效果的影响最为显著。优化后的检测参数使 LJ 设备的缺陷漏检率从原来的3.8%降至0.8%，误检率降至0.5%以下，检测效率提升40%，达到420只/小时，超过生产线的生产节拍。

（五）自动化检测系统的集成与应用验证

将优化后的图像采集系统、特征提取算法及缺陷识别模型与 LJ 双通道检测设备进行集成，构建完整的极耳缺陷自动化检测系统，并通过现场应用验证系统的实用性与可靠性。系统集成过程中，重点解决设备间的通信协议匹配与数据同步问题，采用 Profinet 通信协议实现 LJ 设备与生产线 PLC 的实时通信，数据传输延迟控制在50ms以内；通过时间戳同步技术，实现图像采集、特征提取与缺陷识别的数据同步，确保检测结果的准确性。应用验证在某锂电池生产线上进行，选取10000只极耳作为验证样本，其中包含各类已知缺陷的极耳1000只。验证结果显示，自动化检测系统的总体缺陷识别准确率达98.5%，与人工检测结果的一致性达99.2%，对虚焊、变形等复杂缺陷的识别准确率达97.8%。系统连续运行72小时，设备故障率为0.3%，检测数据的上传成功率达100%，实现了极耳缺陷的实时检测、数据追溯与统计分析。应用该系统后，生产线的极耳缺陷导致的电池不良率从2.3%降至0.45%，年减少经济损失约800万元，验证了该自动化检测方法的工程应用价值。

四、结束语

文章围绕锂电池极耳缺陷引发的失效问题及自动化检测方法展开研究，以 LJ 双通道检测设备为核心载体，优化了自动化检测方法。基于 LJ 设备优化的自动化检测系统，通过图像采集优化、特征提取算法改进及 AI 识别模型构建，实现了极耳缺陷的高效精准检测，识别准确率达98.5%，检测效率提升40%。该研究解决了传统检测方法的瓶颈问题，为锂电池极耳质量管控提供了可靠技术方案，对提升锂电池安全性与可靠性具有重要意义，也为同类自动化检测设备的应用与优化提供了参考。

参考文献

- [1] 张海峰, 芦新春, 李升, 等. 基于改进 YOLOv7 的锂电池极耳缺陷检测研究 [J]. 今日制造与升级, 2024(7): 34-39.
- [2] 李泰民, 黄平, 岳笑含, 等. 基于神经网络的锂电池极耳焊缝微缺陷判别系统设计 [J]. 无损探伤, 2023, 47(6): 5-8.
- [3] 王伟, 黄平, 周家宁, 等. 航空锂电池极耳焊缝微缺陷检测系统研究 [J]. 无损探伤, 2023, 47(2): 1-4.
- [4] 徐俊飞, 简运琪, 吴勇华, 等. 锂电池极耳激光摆动焊接工艺研究 [J]. 机械制造, 2024, 62(4): 56-61.
- [5] 李浩, 夏广, 姜伟, 等. 超声扫描成像检测锂电池电解液退浸润及成因分析 [J]. 分析测试学报, 2025, 44(2): 238-245.