

Research on Optimization of Coating Process Parameters and Thickness Uniformity Control for Lithium-ion Battery Electrode Sheets

Shulin Dai

Xingheng Power (Chuzhou) Co., Ltd., Chuzhou, Anhui, 239001, China

Abstract

The energy density, cycle life, and safety performance of lithium-ion batteries are closely related to the uniformity of electrode thickness. The electrode coating process is the most critical step in the lithium-ion battery production process, and the parameter settings and process control of this step directly affect the uniformity of electrode thickness. Electrode consistency is the core guarantee of cell consistency. Excessive uniformity in electrode thickness can lead to issues such as poor consistency in battery capacity, voltage, and internal resistance, mismatched MP ratios between the positive and negative electrodes, lithium loss/reinsertion, and abnormal interface reactions, severely impacting the overall performance of the battery. This paper systematically studies the optimization of coating process parameters and online control strategies, aiming to improve the uniformity of electrode thickness in lithium-ion batteries. By considering the characteristics of actual production processes, it provides theoretical support and technical references for optimizing the electrode coating process in lithium-ion batteries, thereby enhancing production quality and efficiency.

Keywords

lithium-ion battery; coated electrode; uniform thickness; dual-circulation dispersion; online closed-loop control; single-factor experiment

锂离子电池极片涂布工艺参数优化与厚度均匀性控制研究

戴树林

星恒电源(滁州)有限公司, 中国·安徽滁州 239001

摘要

锂离子电池的能量密度, 循环寿命, 安全性能与极片厚度均匀性有着密切的关系, 极片涂布工艺是锂离子电池生产流程中最重要的一环, 极片涂布工艺的参数设置与过程控制直接影响极片厚度均匀性。极片一致性是电芯一致性的核心保证, 极片厚度过于均匀会导致电池容量, 电压, 内阻一致性差, 正负极MP比不一致, 虚锂/嵌锂, 界面反应异常等问题, 严重影响电池的综合性能。本文系统研究涂布工艺参数优化与在线控制策略, 以提升锂离子电池极片厚度均匀性为目标, 结合实际生产工艺特点。对锂离子电池极片涂布工艺优化, 提高锂离子电池生产质量与效率提供理论支撑与技术参考。

关键词

锂离子电池; 涂布极片; 均匀厚度; 双循环分散; 在线闭环控制; 单因素实验

1 引言

在新能源产业蓬勃发展的背景下, 锂离子电池以其能量密度高, 循环寿命长, 无记忆效应等突出优势, 广泛应用于电动汽车, 便携式电子设备, 储能系统等多个领域。随着锂离子电池性能要求的不断提高, 其生产工艺的精细化程度成为锂离子电池行业竞争的焦点^[1]。极片是锂离子电池的核心组件, 其负荷着活性物质的承载, 电子传导以及锂离子的脱嵌, 其质量直接决定着电池的综合性能。极片涂布工艺极片涂布是将活性物质浆料均匀涂覆在集流体(铜箔或铝箔)

表面的过程, 它直接影响极片的厚度分布, 活性物质负载量一致性等, 是锂离子电池生产的核心环节。其中极片厚度均匀性是衡量涂布质量的核心参数, 极片厚度偏差较大, 会使电池内部电流分布不均, 在充放电过程中出现局部过充、过放现象, 从而降低电池的能量密度与循环寿命, 严重时甚至引发热失控等安全隐患。

2 锂离子电池极片涂布工艺基础理论

2.1 极片涂布工艺原理与分类

电池生产工艺是生产各种电池的核心技术体系, 锂离子电池的生产工艺致力于提升电池性能, 重点解决容量衰减与循环寿命不足等关键问题。其核心结构包括外壳、极板、隔板等关键部件, 通过优化设计与制造工艺来保障电池质量

【作者简介】戴树林(1988-), 男, 中国安徽宁国人, 本科, 工程师, 从事机械工程研究。

与可靠性。锂离子电池的生产工艺主要包括正负极片的制备,电芯的成型,化成分容,其正负极的基材采用铝箔基材,在锂离子电池生产中,极片需经过制浆、涂布、辊压及分切等多道工序,其厚度与毛刺作为关键指标需被严格控制。随后,电芯通过卷绕或叠片工艺进行组装,并在分容环节使用精度达万分之五的电流传感器,以精确检测其容量。极片涂布工艺的核心原理是借助涂布设备的动力作用,将制备好的活性物质浆料以特定厚度均匀涂覆在集流体表面,经干燥、辊压等后续工序形成具有一定力学性能与电化学性能的极片。浆料在涂覆过程中需满足流动性、稳定性及附着性要求,确保涂覆后极片无漏涂、划痕、鼓泡等缺陷。根据涂布方式的不同,极片涂布工艺可分为刮刀涂布、狭缝挤压涂布、逗号刮刀涂布、喷涂涂布等多种类型^[2]。

2.2 涂布过程中的关键物理化学现象

在狭缝挤压涂布过程中,浆料在压力作用下通过喷嘴狭缝时会发生复杂的流动变形,形成速度梯度分布。若浆料流动不均匀,会导致涂覆在集流体表面的浆料量出现波动,进而引发极片厚度偏差。浆料流动特性主要取决于其粘度、剪切速率等参数,当剪切速率不同时,浆料黏度会有不同变化规律,即剪切变稀或剪切增稠特性,这种特性直接影响浆料在喷嘴内的流动稳定性。此外,浆料内部各组分之间的界面张力也影响浆料的稳定性,界面张力失衡,容易发生颗粒团聚、分层等现象,导致涂覆后极片出现密度不均,间接影响厚度均匀性^[3]。

2.3 影响极片厚度均匀性的关键因素分析

浆料特性是影响厚度均匀性的基础因素,主要包括浆料黏度、固含量、触变性和稳定性。其中,分散均匀性是浆料制备的核心要求,被誉为“化工之魂”,直接决定浆料后续涂布效果。实际生产中采用双循环分散系统保障浆料分散质量:浆料经计量匹配后进入高速分散机初步分散,随后输送至A罐;A罐内浆料反向回流至高速分散机再次分散,完成二次分散后输送至B罐,A罐与B罐可实现循环分散,直至浆料达到均匀标准。分散均匀性的核心评价指标为:在固含量保持不变的情况下,浆料经多次循环(10-12圈)后黏度稳定无波动,此时判定浆料分散均匀。浆料黏度直接决定其流动阻力,黏度过高会导致浆料在喷嘴内流动困难,易出现堵塞现象,造成涂覆量波动;黏度过低则会导致浆料流动性过强,涂覆后易出现流挂,影响厚度控制^[4]。

2.4 极片厚度均匀性的评价指标与检测方法

为精准衡量极片厚度均匀性,需建立科学的评价指标体系,并采用可靠的检测方法获取厚度数据。目前,行业内常用的评价指标主要包括厚度平均值、厚度极差、厚度标准差及变异系数(CV值)。厚度平均值反映极片的整体厚度水平,是判断是否满足设计要求的基础指标;厚度极差是指同一极片上最大厚度与最小厚度的差值,直观反映厚度波动的最大范围;厚度标准差与变异系数则从统计角度量化厚度

分布的离散程度,其中变异系数为标准差与平均值的比值,可消除厚度平均值对离散程度的影响,更适用于不同厚度规格极片的均匀性对比。一般而言,动力锂离子电池极片的厚度变异系数需控制在1%以内,以确保电池性能的一致性^[5]。

3 涂布工艺参数对极片厚度均匀性影响的单因素实验研究

3.1 实验方案设计

3.1.1 实验材料与设备

正极活性物质为磷酸铁锂,负极活性物质为石墨。正极浆料固含量控制在60%~65%,负极浆料固含量控制在50%~55%;正极浆料黏度控制在8000~12000 mPa·s,负极浆料黏度控制在6000±2000 mPa·s。浆料经双循环分散系统处理后,通过除磁与过滤系统去除杂质。工业级狭缝挤压涂布机,配备日本冰神高精度螺杆泵与定制化高精度模头,可实现涂布速度、喷嘴间隙、浆料压力的精准调节。

检测设备:在线激光测厚仪(测量范围0~500μm,测量精度±0.1μm,响应时间≤1ms)、在线面密度仪。在线检测频率为100 Hz,离线检测选取极片不同位置10个测点,取平均值作为最终厚度数据。

3.1.2 实验设计

实验采用单因素变量法,固定其中两个参数,改变第三个参数,探究各参数对极片厚度均匀性的影响。鉴于行业涂布速度普遍在60~80 m/min的范围内,为进行详细的工艺研究,本实验选取了5~25 m/min作为基准区间,并设置了5、10、15、20、25 m/min五个水平进行对比分析。喷嘴间隙:50~70μm,设置50μm、55μm、60μm、65μm、70μm五个水平;浆料压力:0.3~0.7 MPa,设置0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa、0.6 MPa、0.7 MPa五个水平。每个实验条件下连续涂布3卷极片,每卷极片随机选取10个检测点,采集厚度数据,计算厚度变异系数(CV值),以CV值作为厚度均匀性的评价指标。

3.2 关键工艺参数对厚度均匀性的影响分析

在低速涂布(5~10 m/min)阶段,涂布的一致性和稳定性表现良好,尽管效率较低。然而,随着涂布速度的提高,涂层的厚度变异系数会逐渐减小,均匀性也会相应提升。但在高速涂布时,涂覆不均匀的现象可能会出现。这是因为低速时浆料在喷嘴内的流动速度较慢,易出现流动不稳定现象,且集流体运行过程中易受微小振动影响,导致涂覆量波动;随着速度提高,浆料流动逐渐稳定,集流体运行的稳定性也相应提升,厚度波动减小。当涂布速度达到15 m/min时,厚度变异系数达到最小值,均匀性最优。继续提高速度(15~25 m/min)后,厚度变异系数逐渐增大,均匀性下降。

3.3 各参数影响显著性初步判断

计算结果显示,各参数对厚度均匀性的影响由大到小依次为:喷嘴间隙>涂布速度>浆料压力。喷嘴间隙的极差

最大(0.85%),说明其对厚度均匀性影响最为显著,这是由于喷嘴间隙直接涂覆层的基准厚度,其加工精度与均匀性直接影响沿宽度方向的厚度分布,间隙偏差难以通过其他参数调整进行补偿。涂布速度的极差次之(0.52%),其影响主要通过改变浆料涂覆量与流动稳定性实现,速度波动会直接引起厚度周期性偏差,但可通过优化传动系统稳定性缓解。浆料压力的极差最小(0.23%),说明其对厚度均匀性的影响相对较弱,因为压力主要通过调节流出量控制厚度,在合理范围内可通过压力控制系统实现精准调节,波动较小。

4 极片厚度均匀性的在线控制策略研究

4.1 在线厚度检测系统构建

检测单元采用双激光测厚仪与在线面密度仪组合方案。双激光测厚仪对称布置在极片上下两侧,通过波长650 nm的半导体激光源同步发射激光照射极片表面,接收反射光信号并转换为电信号,实现厚度实时测量。激光测厚仪测量范围0~500 μm ,测量精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$,响应时间 $\leq 1\text{ms}$,满足高速涂布过程的实时检测要求。在线面密度仪与激光测厚仪同步工作,通过检测涂覆层质量分布,辅助判断厚度均匀性,形成互补检测。为实现极片全宽度覆盖检测,将双激光测厚仪与面密度仪安装在可沿极片宽度方向移动的滑台上。滑台移动速度根据涂布速度动态调整,确保在极片运行过程中完成多次往复扫描,检测覆盖率达到100%。

4.2 厚度均匀性偏差识别与预测

设定厚度偏差阈值为 $\pm 0.5\mu\text{m}$ (可根据生产需求调整),当在线检测系统采集的实时厚度数据与目标厚度值的差值超过阈值时,系统判定存在潜在偏差,立即触发预警信号。同时,面密度仪同步采集数据,若面密度偏差也超过设定阈值($\pm 1\%$),则进一步确认潜在偏差的真实性,避免单一设备误判。表现为厚度平均值整体偏离目标值,持续时间 $> 10\text{s}$,无明显周期性,主要由喷嘴间隙变化、浆料黏度漂移、固含量波动等因素引起;表现为厚度数据随时间呈周期性波动,波动周期与涂布速度、辊轴转速相关,主要由传动系统振动、辊轴偏心、涂布速度波动等因素引起;表现为厚度数据无规律波动,偏差值较小($< 0.3\mu\text{m}$)且持续时间短($< 2\text{s}$),主要由环境干扰、浆料中微小杂质、集流体表面微小缺陷等因素引起。当系统识别到潜在偏差时,自动关联双循环分散系统、螺杆泵、模头温度控制系统等设备的运行数据,辅助判断偏差原因。

4.3 在线闭环控制策略设计

以实时厚度偏差为输入,结合偏差类型与设备运行数据,通过调节涂布工艺参数实现偏差修正。控制系统采用

PLC控制器,响应时间 $\leq 50\text{ms}$,确保偏差修正的实时性。调节过程中,实时采集厚度数据与参数变化数据,形成闭环反馈,动态优化调节参数。由于系统性偏差主要由基准厚度偏移引起,采用“喷嘴间隙+浆料压力”协同调节方案。当识别到系统性正偏差(厚度偏厚)时,首先以 $1\mu\text{m}$ 为调节步长适当减小喷嘴间隙,同时监测厚度变化;若调节3步后偏差仍未消除,再以 0.01MPa 为调节步长降低浆料压力,直至厚度回归目标范围。当识别到系统性负偏差(厚度偏薄)时,反之增大喷嘴间隙与浆料压力。调节过程采用增量式调节方式,避免参数突变导致的厚度波动。

5 结论

本文围绕锂离子电池极片涂布工艺参数优化与厚度均匀性控制开展系统研究,结合实际生产工艺特点,通过理论分析、单因素实验及控制策略设计,明确了关键影响因素与控制方法,极片一致性直接决定电芯一致性,涂布不均匀会导致电池容量、电压、内阻一致性下降,引发正负极N/P比不匹配、界面反应异常等问题。浆料分散均匀性、涂布工艺参数、设备精度与环境因素共同影响厚度均匀性,其中双循环分散系统是保证浆料质量的关键,喷嘴间隙、涂布速度、浆料压力是影响厚度均匀性的核心工艺参数。单因素实验显示,各参数对厚度均匀性的影响呈显著性排序为喷嘴间隙 $>$ 涂布速度 $>$ 浆料压力。涂布效果最优的工艺参数组合是当正极浆料固含量控制在60%~65%、黏度控制在8000~12000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、负极浆料固含量控制在50%~55%、黏度控制在 $6000\pm 2000\text{mPa}\cdot\text{s}$;涂布速度15 m/min 、喷嘴间隙60 μm 、浆料压力0.5 MPa 为较优工艺参数组合,此时厚度变异系数最小。设计了“双检测设备+全宽度扫描+双重防护”的在线检测系统,采取“阈值判断+特征分析+设备联动”的偏差识别方法,建立“差异化调节+增量式反馈+横向精准控制”的闭环控制策略,可实现对系统性、周期性、随机偏差的精准修正,有效提高极片厚度的均匀性。

参考文献

- [1] 张长军,马俊,郭山国,张华瑾,张勇.锂离子电池极片辊压生产线的总体设计与研究[J].机电信息,2025,(17):57-59+63.
- [2] 李然,徐鹏,李晓琼,张振涛,赵炳贵,杨俊玲,王昱潭.锂离子电池极片干燥研究进展[J].电源技术,2025,49(07):1395-1407.
- [3] 王国栋,王东城,段伯伟,刘宏民.基于Kuhn屈服准则的锂离子电池极片辊压力建模与分析[J].中国机械工程,1-13.
- [4] 郎满权,杨军,张中春,彭建林,杨续来.锂离子电池极片狭缝式宽度涂布模头的设计优化[J].储能科学与技术,2025,14(06):2339-2351.
- [5] 司丽娜,吴奇峯,黄荣.锂离子电池极片辊压过程离散元数值模拟研究进展[J].电池工业,1-7.