 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i1.8966

Improvement of precise control technology for injection volume of lithium-ion batteries and its impact on battery performance

Shulin Dai

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

Abstract

Precise control of injection volume is a core process in the manufacturing of lithium-ion batteries, which directly determines the internal ion transport efficiency, interface stability, and electrochemical performance consistency of the battery. This article aims to address the problems of insufficient accuracy, poor environmental adaptability, and low process adaptability in traditional injection volume control technology. It systematically elaborates on the core requirements and control principles of lithium-ion battery injection technology, and deeply analyzes the correlation between injection volume and internal reaction mechanism of the battery. On this basis, an improvement plan for precise control technology of injection volume with "dynamic closed-loop feedback+multi parameter collaborative regulation" as the core is proposed. The core objectives and constraints of the technical improvement are clarified, the key technical improvement details are refined, and the prototype of the improved control device is developed. Through performance verification experiments, compare and analyze the differences between improved technology and traditional technology from the dimensions of electrochemical performance, cycle stability, and process adaptability. The experimental results show that the improved precise control technology for injection volume can effectively improve the capacity consistency, cycle life, and rate performance of batteries, significantly enhancing their adaptability to different specifications of batteries and complex manufacturing environments. The research results of this article provide important technical support and theoretical reference for the optimization and upgrading of the injection process in the manufacturing of lithium-ion batteries.

Keywords

core technology; Lithium ion battery; Electrochemical performance; cycle stability

锂离子电池注液量精准控制技术改进及其对电池性能的影响

戴树林

星恒电源（滁州）有限公司，中国·安徽 滁州 239001

摘　要

注液量精准控制是锂离子电池制造过程中的核心工艺环节，直接决定电池内部离子传输效率、界面稳定性及电化学性能一致性。本文针对传统注液量控制技术存在的精度不足、环境适应性差及工艺适配性低等问题，系统阐述锂离子电池注液工艺的核心要求与控制原理，深入分析注液量与电池内部反应机理的关联性。在此基础上，提出以“动态闭环反馈+多参数协同调控”为核心的注液量精准控制技术改进方案，明确技术改进的核心目标与约束条件，细化关键技术改进细节，并完成改进后控制装置的样机研发。通过性能验证实验，从电化学性能、循环稳定性及工艺适配性等维度，对比分析改进技术与传统技术的差异。实验结果表明，改进后的注液量精准控制技术可有效提升电池的容量一致性、循环寿命及倍率性能，显著增强对不同规格电池及复杂制造环境的适配能力。本文的研究成果为锂离子电池制造过程中注液工艺的优化升级提供重要的技术支撑与理论参考。

关键词

核心工艺；锂离子电池；电化学性能；循环稳定性

1 引言

在新能源产业快速发展的背景下，锂离子电池凭借能量密度高、循环寿命长、无记忆效应等显著优势，已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[1]。

本文以锂离子电池注液量精准控制为核心，首先阐述了注液工艺及控制原理基础，明确了注液量与电池内部反应的关联机理；然后设计基于动态闭环反馈与多参数协同调控的技术改进方案，完成样机研发；最后通过性能验证实验，验证改进技术的优越性及工艺适配性，为注液工艺的优化提供理论与技术支撑。

【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。

2 锂离子电池注液工艺及控制原理基础

2.1 锂离子电池注液工艺核心要求

锂离子电池注液工艺的本质要求，在特定的工艺条件下，将定量的电解液均匀，稳定地注入电池壳体内，使电解液充分浸润电极材料，填充充电极与隔膜之间的孔隙，为锂离子的高效传输创造良好的条件。电解液的注液量偏差影响电池的电化学性能，如果注液量不够，电极活性物质无法充分参与反应，导致电池容量降低，内阻增大；如果注液量太多，电池封装后内部压力过大，容易造成电解液泄漏，电池壳体变形，甚至在循环过程中因电解液分解产生气体导致胀气，影响电池安全性。一般情况下，对于动力锂离子电池，注液量的偏差控制在 ±1% 以内，以确保电池批次间的性能一致性。注液均匀性：电池壳体内电解液分布均匀，不出现局部电解液富集或匮乏。由于电极材料是多孔结构，电解液要通过渗透作用将孔隙填满，若注液不均匀，造成部分区域电极材料的浸润不能充分进行，形成“死体积”，降低活性物质的利用率；同时，由于局部电解液不足，使离子传输阻力增大，产生极化现象，影响电池的倍率性能 [2]。

2.2 传统注液量控制技术及原理

重量法是根据注液前后电池的重量变化对注液量进行精确地测量。其核心原理是根据设定的注液量计算出电池注液后的目标重量，在注液过程中，首先对未注液电池进行称重，不合格品自动剔除。合格电芯与注液壶密封匹配并锁定，经密封检测不合格的将被剔除。电解液通过高精度陶瓷泵按体积计量后注入注液壶，在锁定状态下与电芯一同进入钟罩，通过正负压循环促进电解液快速渗入。首次注液量为总注液量的 90%–95%，若仅注入 30%–40%，将导致极片浸润不足，形成死体积，增加极化，严重影响电池性能和化成质量。重量法控制精度主要取决于称重传感器的精度，目前常用的高精度称重传感器的精度可达 0.1mg，理论上能满足较高精度的注液需求 [3]。称重过程容易受到外界干扰，注液过程中电解液容易附着在注液嘴或者电池壳体表面而造成称重数据的偏差；同时车间内的气流、振动等因素也会影响称重传感器的测量精度。二是重量法注液效率不高，在注液的过程中不断地进行称重检测，为了保证测量精度，注液速度不宜太快，否则会因电解液的动态冲击力造成称重数据的波动；而且每一次的注液都需要等待称重数据稳定后才能进行下一次操作，延长了单电池的注液周期。

2.3 注液量与电池内部反应的关联性机理

电解液是锂离子传输介质，其在电池中的分布状态决定了离子传输通道的完整性。当注液量大且分布均匀时，电解液能充分填充充电极与隔膜之间的孔隙，形成连续的离子传输通道，锂离子可以在电极间自由迁移，离子传输阻力小；当注液量不足时，电解液无法填充部分孔隙，形成离子传输通道断裂，锂离子需绕过未填充区域进行迁移，增加了传输路径长度，导致离子传输阻力变大。同时，电解液的浓度影响离子迁移速率，注液量过多，会导致电解液浓度稀释，尽管离子传输通道充足，但单位体积内的锂离子数量减少，可能导致大电流放电时离子供给不足；注液量不足，会导致电解液浓度过高，黏度增大，离子迁移速率降低 [4]。

3 锂离子电池注液量精准控制技术改进方案设计

3.1 技术改进的核心目标和约束条件

结合传统注液量控制技术的局限性以及锂离子电池制造对注液工艺的更高要求，在实际生产约束条件下，本次技术改进的核心目标是通过两次注液工艺设计与精准计量控制，提高注液精度、工艺适配性及运行稳定性，同时强化动态适应性。注液精度目标为总注液量偏差控制在 ±0.2% 以内，较传统技术 ±0.5% 的偏差范围精度提升 60%。该目标依据高端动力锂离子电池性能一致性要求设定，±0.2% 以内的偏差可确保电池批次间容量差异小于 1%，满足电动汽车动力系统一致性的严苛需求。

3.2 改进方案总体设计思路

该电池注液系统采用“两次注液 + 精准计量 + 负压正压循环”的核心架构，区别于传统单参数控制或依赖环境参数的调控模式，通过“机械对位 - 计量注液 - 化成反应 - 称重补正 - 二次注液”的全流程闭环实现精准控制。首次注液聚焦化成所需电解液的精准注入：通过定制化机械定位结构保障注液壶与电池的同轴对位精度，误差控制在 ±0.1mm；由高精度计量泵精确计量化成所需电解液后注入注液壶，随后注液壶与电池同步进入钟罩腔体，通过 3 次负压（-0.09MPa）与正压（0.1MPa）循环，将电解液高效且均匀注入电芯，注液效率提升显著且易控精度。首次注液后进入化成工序生成 SEI 膜，此过程会消耗部分电解液。

3.3 关键核心技术改进细节

两次注液工艺的流程设计与精准匹配是提升系统精度的核心，重点优化机械对位、计量控制及差量补正三大关键环节。机械对位环节采用“导向轴 + 视觉辅助”双重定位结构，导向轴保证初步对位，工业相机实时采集电池与注液壶对位图像，偏差数据反馈至伺服电机进行微调，确保注液口与电池注液孔精准贴合，避免注液过程中出现泄漏损耗。计量控制环节选用定制化双柱塞伺服计量泵，流量调节精度达 0.01ml/min，配合 ±0.01MPa 压力传感器实时监测注液压力，当压力波动超阈值时立即调整泵体转速，保障单次注液计量误差小于 ±0.1%。

3.4 改进后控制装置的样机研发与参数设定

硬件选型与集成围绕两次注液工艺需求展开，核心部件聚焦精准性与稳定性。主控制器选用西门子 S7-1500 系列 PLC，具备高速数据处理能力，可同步处理对位检测、计量控制及称重数据，响应周期小于 10ms；称重模块采用梅特勒 - 托利多高精度型号，量程 0-5kg、精度 0.05mg，确保

重量数据采集精准；伺服电机选用松下 A6 系列，额定转速 3000rpm、控制精度 0.001rad，保障机械对位与计量泵运行的精准性。硬件集成采用模块化设计，将机械定位模块、计量注液模块、称重检测模块分别集成独立单元，通过标准化接口连接，便于后期维护升级。

4 注液量精准控制技术性能验证试验

4.1 实验设计方案

为验证改进后注液量精准控制技术的性能优越性，设计多维度的性能验证实验，实验以传统重量法注液系统为对照组，以改进后的注液系统为实验组，通过对比分析两组系统的注液精度、电池性能及工艺适配性，全面评估改进技术的效果。实验对象选取三种不同规格的锂离子电池，分别为方形磷酸铁锂电池（容量 50Ah）、圆柱三元锂电池（容量 5Ah）及软包三元锂电池（容量 20Ah），每种规格电池各选取 100 只作为实验样本，随机分为两组，每组 50 只，分别采用实验组与对照组系统进行注液。实验所用电解液为对应电池类型的常用电解液，方形电池电解液为磷酸铁锂专用电解液，圆柱与软包电池为三元专用电解液，电解液初始粘度为 8mPa·s（25℃），密度为 1.2g/cm³。实验设备包括改进后注液量精准控制样机、传统重量法注液设备、高精度电池性能测试系统、环境试验箱、激光测厚仪及内阻测试仪等。

4.2 改进技术与传统技术的性能对比实验

注液精度与稳定性实验结果显示，改进后的注液系统在不同工况条件下均表现出更高的注液精度与稳定性。在标准工况下，实验组注液量偏差率平均值为 0.12%，标准差为 0.05%，变异系数为 41.7%；对照组注液量偏差率平均值为 0.45%，标准差为 0.18%，变异系数为 40.0%。在低温高湿工况下，实验组注液量偏差率平均值为 0.15%，标准差为 0.06%，变异系数为 40.0%；对照组注液量偏差率平均值为 0.62%，标准差为 0.25%，变异系数为 40.3%。在高温低湿工况下，实验组注液量偏差率平均值为 0.14%，标准差为 0.05%，变异系数为 35.7%；对照组注液量偏差率平均值为 0.58%，标准差为 0.22%，变异系数为 37.9%。显著性差异检验结果表明，在三种工况下，实验组与对照组的注液量偏差率均存在显著性差异（$P < 0.05$），实验组的注液精度显著高于对照组，且实验组在不同工况下的注液偏差波动更小，表现出更强的环境适应性。

4.3 改进技术的工艺适配性试验

工艺适配性实验通过更换不同规格电池（方形 50Ah、圆柱 5Ah、软包 20Ah）和调整生产节奏（正常节奏：10 秒 / 只、加速节奏：8 秒 / 只），测试两组系统的参数调整时间、注液合格率及生产效率，以评估其适配能力。参数调整时间方面，当从方形电池切换至圆柱电池时，实验组通过调用预设参数方案，平均调整时间为 3.2 分钟；对照组需手动调整注液压力、速度、称重阈值等多个参数，平均调整时间为 18.5 分钟。当从圆柱电池切换至软包电池时，实验组平均调整时间为 3.5 分钟；对照组平均调整时间为 20.1 分钟。在加速生产节奏工况下，实验组注液周期缩短至 8 秒 / 只时，注液量偏差率仍能维持在 ±0.25% 以内，注液合格率为 99.8%；对照组在注液周期缩短至 8 秒 / 只时，注液量偏差率扩大至 ±0.85%，注液合格率降至 92.3%。这表明改进后的注液系统通过预设参数库和快速自适应调整功能，显著提升了对不同规格电池的适配速度，同时在加速生产节奏时仍能保证较高的注液质量，满足大规模量产的效率需求。

5 结论

注液量通过影响离子传输通道完整性、SEI 膜稳定性、活性物质利用率及热效应分布，对电池容量、循环寿命、倍率性能及安全性产生决定性影响。传统注液技术因无法动态适配多因素干扰，导致注液偏差较大，进而制约了电池性能提升。提出了“动态闭环反馈+多参数协同调控”的改进方案，构建了“感知—分析—决策—执行”全流程控制体系。采用多参数融合感知技术，实现了对环境、电池、电解液及过程参数的实时精确采集；采用“模型预测 + 模糊控制”复合算法，提高了系统的动态调控能力；精良的高精度计量执行机构和防干扰设计保证了注液操作的精确性和稳定性。所研制的改进装置样机实现了核心性能目标，注液量偏差 < ±0.2%，单电池注液周期≤ 10s，可与 15-35℃、30%~70%RH 环境及 10Ah-100Ah 不同规格电池适配，参数调整时间≤ 5min，连续 72h 运行不合格品率≤ 1%，满足生产约束条件。未来研究还可拓宽注液工艺与前序极片制备，后序化成工艺的协同优化，探索人工智能算法在注液参数预测上的应用，实现更高精度，更智能的注液控制，推动锂离子电池性能向更高水平突破。

参考文献

[1] 杨子芊,田雨来,王雪婷,戴一鸣,刘彭薇,沈朝烨,张济明,周志俊.某锂电池企业生产线职业性有害因素调查[J].上海预防医学,1-12.

[2] 任彦博,韩龙飞.锂电池生产企业火灾防控要点研究[J].工业安全与环保,1-7.

[3] 毛冲,杨海钊,王霹霹,杨梓颢,刘全兵,黄秋洁.锂离子电池快充电解液研究进展[J].电源技术,2025,49(06):1084-1099.

[4] 宋婉静,张晓昱.锂离子电池产业的成本与前景分析[J].电池,2025,55(01):141-145.

[5] 杨彩凤.锂离子电池化成分容工艺分析及设备能力提升[J].时代汽车,2024,(24):112-115.