

锂电池极片辊压成形过程中的压实密度影响因素和分析

薛冰军 刘振州

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054001

[摘要]在锂电池极片辊压成形时,压实密度是电池性能的关键影响因素之一,通过系统分析不同材料性质、辊压工艺参数和环境因素来探索它们对压实密度的影响规律。实验发现,材料的颗粒分布、黏度、湿度等直接影响极片压实效果,辊压工艺里辊速、辊距、辊压压力调整能显著改变压实密度且优化工艺条件利于提升电池能量密度和循环稳定性,环境温度和湿度变化也会在一定程度上影响成形质量,这一研究给锂电池极片生产工艺优化提供科学依据以促使电池生产效率提高性能改善。

[关键词]锂电池极片; 辊压成形; 压实密度; 工艺参数; 环境因素

DOI: 10.33142/ect.v3i8.17519

中图分类号: TM912

文献标识码: A

Factors and Analysis of Compaction Density in the Roll Forming Process of Lithium Battery Electrode Sheets

XUE Bingjun, LIU Zhenzhou

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054001, China

Abstract: In the roll forming process of lithium battery electrode sheets, compaction density is one of the key influencing factors on battery performance. By systematically analyzing different material properties, roll forming process parameters, and environmental factors, the influence of these factors on compaction density is explored. Experiments have found that the particle distribution, viscosity, humidity, and other factors of the material directly affect the compaction effect of the electrode sheet. Adjusting the roller speed, roller distance, and roller pressure in the rolling process can significantly change the compaction density and optimize the process conditions to improve the energy density and cycling stability of the battery. Changes in environmental temperature and humidity can also affect the forming quality to a certain extent. This study provides a scientific basis for optimizing the production process of lithium battery electrode sheets to promote the improvement of battery production efficiency and performance.

Keywords: lithium battery electrode sheet; roll forming; compaction density; process parameters; environmental factors

引言

新能源技术核心的锂电池在电动汽车、储能系统等应用领域应用广泛且电池性能直接取决于极片质量,在生产过程里极片的辊压成形工艺极为关键且压实密度是影响电池容量、循环寿命和热稳定性的关键要素,如何合理调节辊压工艺、优化材料特性、控制环境条件来提高压实密度已变为行业重点关注的问题,探索这些影响因素的内在规律可使锂电池生产效率得以提升、电池性能也能显著改善进而推动锂电池在更多领域的应用,深入剖析辊压成形时压实密度的影响因素对优化锂电池生产工艺有着重要的现实意义。

1 锂电池极片辊压成形工艺原理

1.1 辊压成形的基本概念

辊压成形工艺靠压力让极片材料经两辊间的狭窄间隙被压缩从而提高其密度并规范形状。锂电池极片原料(活性材料、导电材料、黏结剂等都在其中)需先混合均匀制成浆料或者糊状物再用涂布工艺涂覆到金属箔基底上由辊压设备里的两辊或者多辊压机来成形,辊压成形要精确控制辊距、辊速等参数以使极片成形时厚度和密度达到期望值为后续电池制造工艺提供理想的极片。

辊压过程重点在于用高压压实极片材料,间歇性或连续性辊压设备常被采用,精确控制压力、辊距就能调节极片压实程度,并且压实密度增加时,极片机械强度跟着提升,这对电池充放电性能、循环稳定性有着深远影响,辊压成形不只是物理成形过程,也是影响电池性能的重要环节。

1.2 辊压成形中的主要工艺参数

辊压成形时,极片压实密度受工艺参数调控影响很大,辊速即辊压机里辊子的转动速度,它直接关系到极片通过辊压间隙的时间,辊速快时极片受压时间就短,从而能减少因过度压实产生的材料应力不均,而辊速慢时成形时间就长,材料压实会更均匀,压实密度的均匀性也就提高了。如图1所示。

辊压机两辊之间的距离即辊距,辊距的调节会直接影响压实密度的变化,辊距小则压实密度高,但若过小材料可能被过度压缩从而产生裂纹或者脱落,辊距大则压实密度或许不足进而影响电池的循环性能,辊压压力也是关键因素,高压力能增加极片的压实密度,但要注意压力过高材料可能破损或者变形从而影响电池的可靠性。

1.3 极片压实密度的定义与测量方法

极片辊压时的单位体积质量即极片的压实密度，一般靠极片质量和体积的关系来界定，压实密度是评估极片成形质量的重要指标，其高低直接关系到电池的能量密度、功率密度和使用寿命，压实密度高些往往孔隙率就小些，从而能提高极片的导电性能和电池的循环稳定性。

压实密度的测量有直接测量法与间接测量法这两种，直接测量法会精确测定极片质量和体积以算出密度，电子天平、卡尺等是这种方法常用的仪器，间接测量法靠的是评估电池性能，从电池充放电曲线分析压实密度对电池性能的影响，压实密度的均匀性也是衡量成形工艺效果的重要标准，往往统计分析多个采样点的密度值来评估其一致性和稳定性，锂电池生产中，让压实密度均匀对提升电池整体性能非常关键。

2 压实密度影响因素分析

2.1 材料性质对压实密度的影响

极片辊压过程中材料黏度是重要影响因素之一，黏度高的浆料辊压时流动性差且很难均匀分布于极片表面，这或许会让压实密度不均匀，而材料黏度过低，压实过程中可能产生较多气泡和孔隙造成密度不足，辊压时得把黏度控制在 $1000 \sim 3000 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ 这一适当范围以确保材料在辊间均匀流动。

压实密度受颗粒大小的显著影响，较小颗粒比表面积较大，压实过程中孔隙易被其填充从而使密度得以提高，

而较大颗粒压实时可能无法充分填充孔隙，压实密度就会较低，要优化压实效果，应把颗粒粒径控制在 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ 之间且颗粒分布也要尽量均匀，防止出现大颗粒集中区域影响整体密度。

2.2 辊压工艺参数的影响

辊压成形过程中，辊速、辊距和辊压压力是最为关键的工艺参数，辊速快慢对材料通过辊压间隙的时间有直接影响进而影响极片压实效果，辊速较高时压实时间往往较短使得材料可能得不到充分压实从而压实密度较低，一般来说辊速控制在 $0.1 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 之间压实密度会比较理想。

控制压实密度时调整辊距很关键，辊距小会使材料压缩比加大从而提高压实密度，但辊距过小极片表面或许不平整且材料也许会破碎，理想的辊距一般在 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ 之间，辊压压力也很关键，压力高可有效提高压实密度，压力过大则材料受损且极片稳定性降低，不同材料性质下辊压力大多控制在 $50 \sim 150 \text{ MPa}$ 之间。

2.3 温度与湿度对辊压成形的影响

辊压成形过程中材料的流动性受环境温度和湿度的显著影响，高温环境下材料黏度会降低、流动性增强，这有助于材料更均匀地填充辊压间隙且压实密度也能提高，但温度过高时材料挥发性成分可能流失从而成形质量会受影响，辊压成形时温度在 $20 \sim 30^\circ \text{C}$ 这个范围一般能确保较好的成形效果。如图 2 所示。

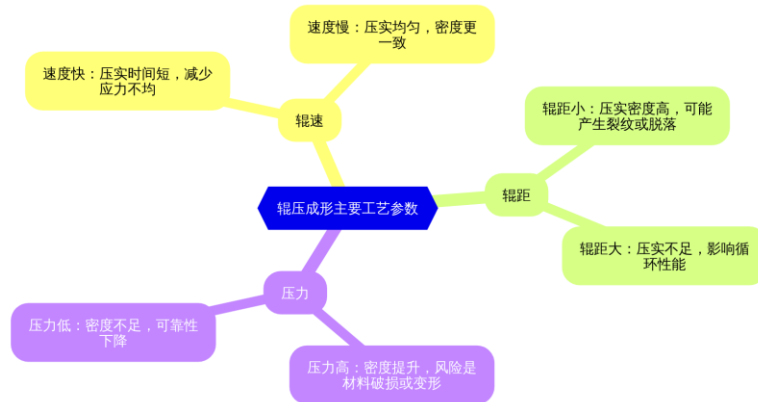


图 1 辊压成形中的主要工艺参数

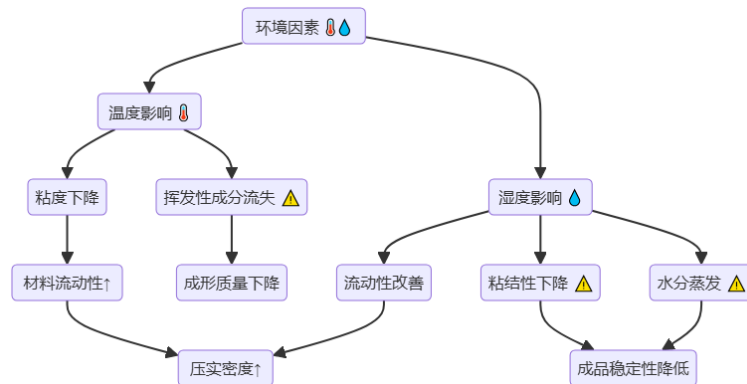


图 2 温度与湿度对辊压成形的影响

材料的流动性和压实密度同样受湿度的一定影响,湿度较高时浆料的流动性得以提高从而更容易进入辊压间隙且压实效果也会提高,要是湿度过高材料的黏结性可能降低或者出现水分蒸发的情况从而成品的稳定性就会受到影响,为保证成形过程的稳定性湿度一般控制在 40%~60%之间。

2.4 极片厚度和质量控制

极片的压实密度直接受其厚度影响,辊压时不同厚度的极片压实效果不同且辊压较厚极片时材料受压不均,压实密度易较低,辊压前往往往得合理控制厚度,通常极片厚度需控制在 50~150 μm 之间以确保压实效果均匀。

生产过程里质量控制非常重要,尤其是极片厚度控制。采用高精度在线测量仪器(像激光测量仪器、在线厚度传感器之类的)就能实时监控极片厚度以保证成品达到设计要求,若有自动化控制系统则能精确调节辊距和辊压压力,进一步优化压实密度。质量控制时要定期取样检测极片密度均匀性,用气体排放法或者阿基米德法测定其体积和质量,这样每一批次产品质量才稳定。

3 实验研究与结果分析

3.1 实验设计与方法

高纯度 LiCoO_2 被实验选作正极材料,再结合导电炭黑与聚合物黏结剂制成符合锂电池极片的浆料,用涂布机把浆料涂覆于铝箔基底上且厚度大概 50 μm ,实验采用单辊辊压设备,其辊宽 150mm、辊速在 0.1~1.0m/s 之间、辊距为 0.1~0.3mm,由于要研究辊压工艺对压实密度的影响,设置不同的辊速(0.1、0.5、1.0m/s)、辊距(0.1、0.2、0.3mm)和辊压压力(50、100、150MPa)来做实验,并且每组实验都重复三次以确保数据可靠可比。

实验里,不同工艺参数组合下的极片样品被拿来测压实密度测试,通过气体排放法测定极片的体积和质量来算出各组样品的压实密度,并且在实验过程中也测量了每组样品的机械强度以分析压实密度对极片性能的影响,用高精度电子天平(精度 0.0001g)和卡尺(精度 0.01mm)进行实验数据的采集和分析。

3.2 实验结果与分析

在不同工艺参数条件下,获得的压实密度结果如下表 1 所示:

表 1 不同工艺参数条件压实密度

辊速 (m/s)	辊距 (mm)	辊压压力 (MPa)	压实密度 (g/cm^3)
0.1	0.1	50	2.1
0.5	0.1	50	2.3
1.0	0.1	50	2.4
0.5	0.2	100	2.5
0.5	0.3	150	2.6

实验数据表明,辊速增加时压实密度会逐渐增加,这意味着辊速较高有利于材料在辊压时流动和填充从而提

高压实密度,辊压压力大些、辊距小些对压实密度的提升作用也很明显,辊距 0.2mm、辊压压力 150MPa 的时候压实密度能达到 $2.6\text{g}/\text{cm}^3$ 为最高,辊压压力和辊距是影响压实密度的关键因素,适当把压力增大、辊距减小材料的压实效果就能有效提高。

对不同工艺参数下的数据加以统计分析,得出了优化工艺的结论:适当提高辊速、辊压压力并缩小辊距范围是提高压实密度的有效手段。

3.3 实验数据的误差分析

实验数据可能出现误差,这误差的来源有材料均匀性、设备精度、操作人员误差以及环境因素等,材料方面其黏度和颗粒分布或许会让样品辊压时分布不均从而影响压实密度,得保证每批次浆料混合均匀且操作流程要标准化,再说设备,实验用设备精度也会左右结果,辊压机辊距调节精度($\pm 0.01\text{mm}$)和压力调节精度($\pm 5\text{MPa}$)可能造成偏差,要减少这种误差就得定期校准设备让精度合格。

实验结果也会在一定程度上受环境温度和湿度变化的影响,温度高或湿度低时,浆料流动性可能改变从而影响成形质量,因此要减少这种影响,实验需在恒温且湿度稳定的环境中进行;操作人员测量极片体积和质量时会有人为因素影响,如读数有误差或仪器使用不当,采集数据时要保证设备精准且对测量结果进行多次校准和确认以提高实验结果的可靠性。

4 优化方案与工业应用建议

4.1 工艺优化建议

实验结果表明,优化辊压成形工艺首要靠调节辊速、辊距和辊压压力来精准把控压实密度,实验发现辊压压力大些、辊距小些对提升压实密度效果显著,实际生产建议采用精密可调的辊压设备,要保证辊距在 0.1~0.3mm、辊压压力适当加大(一般控制在 100~150MPa),并且辊速得保持在 0.5~1.0m/s,这样能让物料有充足时间通过辊压设备,防止辊速太快造成压实不均匀。

材料的预处理相当关键,控制原料的颗粒度和黏度就能有效提升压实密度,颗粒小些尤其有助于孔隙的更好填充从而让结构变得均匀,生产时得加强材料粒度分布的控制以保证颗粒平均粒径处于 10~40 μm 之间,并且优化浆料黏度让它保持在 1000~3000 $\text{MPa}\cdot\text{s}$ 之间,这样才能确保压实效果达到最佳。

4.2 压实密度与电池性能关系的优化

锂电池整体性能受压实密度影响很大,压实密度提高会使电池内部孔隙率降低且能量密度与充放电效率提高,要优化电池容量和循环稳定性就需让压实密度适中,压实密度过高会使材料脆性增加进而影响电池循环寿命,优化辊压成形工艺在提高压实密度的同时保持极片柔韧性就能避免材料过硬致使电池膨胀或破裂这种情况。

电池性能的关键还受压实密度均匀性的影响,压实密度均匀能有效防止电池局部有电解液滞留或者气泡形成,

可降低电池内阻、提高电性能,生产时得靠高精度质量控制手段确保每片极片压实密度一致来提升电池整体性能,而生产中的在线检测技术和自动化控制系统能对这事儿有效保障。

4.3 实际应用中的挑战与展望

在实际生产中,辊压成形工艺工业化应用的推进面临着不少技术挑战,由于辊压成形工艺中压实密度要精确控制,需要有高度精密的设备和技术来支持,这对设备的稳定性和控制精度提出了较高要求,并且大规模生产时设备的稳定性、效率和精度控制相当关键,而采用先进的自动化控制系统和在线质量检测设备就能对辊压过程实时监控调整,从而保证产品的一致性和质量。

在工业化应用中材料的处理和预处理工艺是难点,大规模生产时确保原材料一致性与浆料均匀性是提高压实密度和电池性能的关键,可引入高效混合和分散设备,精准控制原料加入量与混合时间以保证材料均匀,温度湿度等环境因素可能影响成形质量,工厂要有良好温湿度控制系统以确保成形工艺稳定。

技术不断发展,未来辊压成形工艺在电池生产里会被更广泛应用且高能量密度电池和大规模储能系统对其需求与日俱增,不断优化工艺参数并把智能制造和自动化控制结合起来,辊压成形工艺在提升锂电池性能、降低生产成本、提高生产效率方面会起到愈发重要的作用。

5 结语

分析锂电池极片辊压成形过程压实密度的影响因素

可揭示材料性质、辊压工艺参数、环境因素、极片厚度等对压实密度的显著影响。实验结果显示,适当调节辊速、辊距、辊压压力等工艺参数并优化材料的粒度和黏度有助于提高压实密度,进而改善锂电池的能量密度、循环稳定性、功率密度等性能。辊压成形工艺优化后电池整体性能提升且能为大规模生产提供高效、稳定的技术支持,不过实际生产中还面临设备精度、材料处理一致性、环境控制等技术难题。将来持续改进工艺技术并与自动化与智能化控制系统相结合,辊压成形工艺在锂电池制造中的作用会更重要,从而为电池性能提升和生产效率优化提供强劲动力。

[参考文献]

- [1]谢欣兵.锂电池极片辊压过程力学行为与结构研究[D].山西:太原科技大学,2024.
- [2]张俊鹏.锂离子电池极片辊压变形微结构演化与性能调控基础研究[D].秦皇岛:燕山大学,2023.
- [3]谢欣兵,杨凯悦,杜晓钟.锂电池极片辊压过程力学行为与结构[J].储能科学与技术,2024,13(5):1699-1706.
- [4]李敬一.电池极片辊压入口感应加热温度场研究[D].秦皇岛:燕山大学,2023.
- [5]吴涵.基于 EDEM 的锂电池极片辊压工艺分析与优化[D].石家庄:河北科技大学,2024.

作者简介:薛冰军(1981.9—)男,汉族,河北省邢台市宁晋县人,中级工程师,2012年6月毕业于河北工程大学机械设计及理论专业,硕士研究生,主要从事辊压机设计研究及辊压机的跨行业应用研究。