

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.060

卷绕电芯负极片褶皱成因分析及扼制应用研究

闫照锋, 魏永超, 潘禹良

(洛阳储变电系统有限公司, 河南 洛阳 471934)

摘 要:卷绕是锂离子电池制造的一个关键过程,将正负极片和隔膜结合在一起,电芯负极片褶皱会造成正负极片和隔膜全部报废,对制造成本、电池性能和安全性有很大的影响。通过对褶皱成因分析,从预卷、张力、冷压 3 个主要方面展开扼制研究。结果表明:合理入料夹辊与并膜辊压力、相对少的预卷圈数、足够大的冷压压力以及隔膜小张力大梯度,可扼制褶皱产生。该研究结论通过生产实践验证,能改善电芯品质,提高生产效率,降低报废率,具有一定的应用前景。

关键词:锂离子电池;褶皱;成因;张力;冷压压力;预卷

中图分类号:TB497 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0311-04

Factor Analysis and Control Application Research on Wrinkling of Negative Plate of Winding Battery Cell

YAN Zhaofeng, WEI Yongchao, PAN Yuliang

(Luoyang Storage and Transformation Systems Co., Ltd., Luoyang 471934, China)

Abstract: Winding is a key process in the manufacturing of lithium ion battery, which combines the positive and negative electrode plates with the diaphragm, and the fold of the negative electrode plate of the cell may cause the scrapping of both positive and negative electrode plates and diaphragms, significantly affecting manufacturing costs, battery performance and safety. The paper analyzes the cause of folding, and studies the suppression from three main aspects: pre-winding, tension and cold pressing. The conclusion is that the folding can be restrained by reasonable feeding pressure, relatively small pre-winding number, sufficiently large cold pressure and small tension gradient of diaphragm. Production practices verify that the research can improve cell quality, increase production efficiency reduce scrap rate, and has certain application prospects.

Keywords: lithium ion battery; folding; cause; tension; cold pressing pressure; preroll

0 引言

叠片锂电池工艺复杂、极片断面毛刺多、效率低,而卷绕生产速度快,连续性好,对设备要求低,电池一致性更容易控制^[1]。由于卷绕张力始终与极片行进方向平行,极片无法产生横向张力^[2],正负极片和隔膜在传输过程中会出现偏移,要对极片出现的偏差进行纠正,检测材料的性能^[3];同时电芯内部极片无支撑结构,极片在冷热压的时候为自由状态,褶皱问题随机发生,会导致电池短路、开路等,引起爆炸等安全事故。如何解决卷绕电芯内部极片褶皱问题成为电芯制造业的技术难题,亟待解决。

本文针对电芯卷绕过程中负极片褶皱现象进行长达 10 年跟踪研究,从卷绕过程、设备结构、电芯受力等方面分析产生褶皱原因^[4],通过对极片隔膜张力、冷热压压力、预卷参数等方面进行研究^[5],同时完成 300 万支电芯生产交付。褶皱问题

的解决,对提高电芯质量、降低报废率具有深远影响。

1 褶皱成因分析

卷绕电芯内部有 2 圈预卷隔膜,正负极片同时插入,负极片比正极片长 5 mm,完成设定长度卷绕后,卷针抽出,冷压机构对电芯进行预压,热压机对电芯压至工艺要求厚度^[6]。卷绕过程中,张力会使隔膜在走带方向被拉长,如果收缩量过大会使得隔膜严重挤压极片,导致电芯发生变形,拆解热压后电芯如图 1 所示,褶皱发生在内层第 2 折或者第 3 折,靠近卷针两端位置,沿着卷针方向。



图 1 褶皱示例

第一作者简介:闫照锋(1984—),男,河南洛阳人,工程师,硕士,研究方向为机械设计、设备创新等,yanzhaofeng19@126.com。

负极采用 $6\ \mu\text{m}$ 铜箔,极片总厚度 $70\ \mu\text{m}$,负极卷首到并膜辊距离 $60\ \text{mm}$,并膜辊到负极入料夹辊距离 $90\ \text{mm}$,入料夹辊至纠偏辊之间距离 $180\ \text{mm}$,卷首第一折长度 $80\ \text{mm}$,如果褶皱出现在第2折,出现位置在距卷首 $90\ \text{mm}/160\ \text{mm}$ 地方;如果出现在第3折,出现在距卷首 $180\ \text{mm}/240\ \text{mm}$ 地方。

卷绕过程:正负极入料—并膜辊移动到夹紧位—预卷隔膜—入料夹辊闭合—正负极料进入卷针—入料夹辊打开—正常卷绕—切断翻转—换工位开始卷绕^[7-9]。图2为卷绕电芯结构图,虚线代表负极片,隔断线代表正极片,直线代表隔膜,电芯内层负极距边缘 $5\ \text{mm}$,其为自由态、可延展、不会褶皱;第2折在重力作用下,极片为平铺态,褶皱少;第3折缺少支撑,外力作用时,两侧隔断、无法延伸,褶皱较多;由于内层支撑,第4折极片与隔膜彼此贴合平整,外力作用时,无褶皱发生。

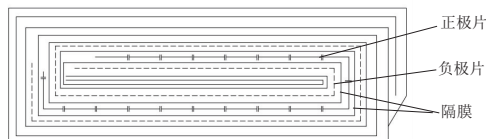


图2 卷绕电芯结构

2 褶皱扼制应用研究

通过对褶皱成因分析,发生的部位在预卷附近;卷绕张力会使隔膜在走带方向被拉长,收缩量过大会使得隔膜严重挤压极片,导致电芯发生变形;冷热压是对卷绕完后电芯的成型。文中应用研究主要从预卷优化研究、冷压方案论证、张力分析三个方面进行。

2.1 预卷优化研究

褶皱对应设备位置为入料夹辊与纠偏辊之间,入料夹辊为单向转动辊,卷绕过程中纠偏夹辊也处于闭合状态,料带只会往卷针方向送料,张力真正作用是在纠偏辊之后的料带。纠偏辊是在料带位移较大时候发生作用,可通过调整整体料线,减少纠偏辊对电芯作用^[10]。预卷时,纠偏辊与入料夹辊都处于闭合状态时,中间处于隔断状态,纠偏发生在此过程,料带会发生扭曲。入料夹辊在完成预卷长度后松开,入料夹辊与纠偏辊压力调整以及预卷长度变化,会造成隔断料带长度变化,因此本文从这两个方面进行深入研究。

入料夹辊与纠偏辊气缸压力分别调整为 $0.2\ \text{MPa}$ 、 $0.3\ \text{MPa}$ 、 $0.4\ \text{MPa}$ 、 $0.5\ \text{MPa}$,试验组别 16

组,每组样本量为 10 支。由于极片厚度薄,辊压厚度偏差为上限或下限时,压力为 $0.5\ \text{MPa}$,极片过辊时表现为波浪,纠偏辊动作频繁,卷出电池不良品;压力为 $0.2\ \text{MPa}$,夹辊夹不紧,料带出现飞带。通过拆解试验电芯,当纠偏夹辊压力 $0.3\ \text{MPa}$ 、入料夹辊压力为 $0.3\ \text{MPa} \sim 0.4\ \text{MPa}$ 时,电芯状态正常。

预卷即将头部正负极料带、隔膜卷到卷针上。预卷长度越少,入料夹辊和纠偏辊之间隔断长度越短,对电芯影响越小。预卷长度从 $320\ \text{mm}$ 调整至 $80\ \text{mm}$,结果如表1所示。预卷长度为 $320\ \text{mm}$ 和 $240\ \text{mm}$ 时,50%电芯褶皱;长度为 $160\ \text{mm} \sim 96\ \text{mm}$ 时,均无褶皱;长度为 $80\ \text{mm}$ 时,出现飞带。即预卷长度越小越好,故设定值为 $96\ \text{mm/s}$ 。

表1 预卷参数试验

预卷长度/mm	电芯状态	样本量/个
320	褶皱	30
240	褶皱	30
160	轻微	30
144	无褶皱	100
128	无褶皱	100
112	无褶皱	100
96	无褶皱	100
80	飞带	10

2.2 冷压方案论证研究

卷绕完的电芯进行冷压成型,后进行 $5\ 000\ \text{kg}$ 热压,二者均为平面挤压^[11]。通过拆解冷压后的电芯,极片平整,状态正常,热压后部分会出现褶皱。冷压压力为 $250\ \text{kg}$,而热压压力为 $5\ 000\ \text{kg}$,冷压后负极片形变可逆,热压时极片变形位置与冷压不一致,即相对位置发生偏移,会导致褶皱发生。

设计新的冷压机构^[12]如图3所示,电池通过传送带到上下压板中间,增压缸对上压板施加压力,上下各放置一个硅胶垫,使得机械压力分布均匀^[13]。缸径越大,冷热压作用力越接近,电芯变形越趋于一致,但压力过大会造成极片断裂。有研究提出电池加压最优压力值^[14],冷压验证按照表2进行。可以看出,随着冷压压力增大,极片发生不可逆变形,保证极片冷热压时受力位置一致,当缸径为 $300\ \text{mm}$ 、压力为 $0.6\ \text{MPa}$ 时,拆解电芯内部负极片断裂,其他组别验证均正常。对产线设备进行改造,选择缸径 $250\ \text{mm}$ 、气压力 $0.6\ \text{MPa}$ 、冷压受力约 $1\ 500\ \text{kg}$ 、热压压力 $5\ 000\ \text{kg}$ 时,冷热

压使极片变形位置一致,产品性能符合工艺要求。

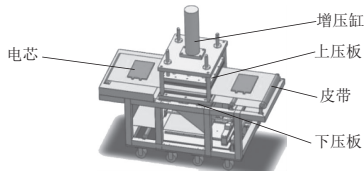


图3 冷压机构

表2 冷压方案表

缸径/mm	气压/MPa		备注
	0.5	0.6	
100	200 kg—褶皱	245 kg—褶皱	设备自带
180	640 kg—轻微	770 kg—轻微	设备改造
200	790 kg—轻微	950 kg—正常	设备改造
250	1 227 kg—正常	1 473 kg—正常	设备改造
300	1 767 kg—正常	2 121 kg—正常	设备改造

2.3 张力分析研究

张力控制是决定产品生产质量和产量的重要因素,机械张力控制简单可靠^[15],合理初始张力和张力梯度设置至关重要,能确保正极片、隔膜、负极片之间的平整。卷绕机大部分采用锥度张力,保持转矩不变,随着卷径变大,角速度降低,卷绕张力减小^[16],实现内外极片平整。

极片隔膜张力设置不合理,内松外紧,电芯会出现S形;内紧外松电芯会出现拱形。冷热压后,极片会发生明显形变。卷绕过程中,启动、制动频繁,且张力波动影响因素多,无法预测和预先消除,张力波动情况经常发生^[17]。极片张力设置大一点,使得极片与隔膜贴合相对平整,正负极片初始张力设定值为650 g,张力衰减梯度为-6 g/圈,电芯卷绕圈数为20圈,隔膜初始张力分别为200 g、180 g、150 g、120 g,张力梯度按照表3中6个方案进行,每种初始张力与一种方案取50支电池,共计1 200支电池^[19]。

表3 张力梯度 单位:g/圈

方案	张力梯度				
	段1	段2	段3	段4	段5
1	-3	-3	-3	-3	-3
2	-4	-4	-4	-4	-4
3	-3	-4	-5	-6	-7
4	-2	-2	-3	-3	-3
5	-2	-2	-4	-4	-4
6	-2	-2	-5	-5	-5

对卷出电芯拆解发现:初始张力为120 g,张力衰减梯度越大,电芯平整,隔膜错位大,6种方案均不满足工艺要求,但热压后电芯无褶皱;初始张力为200 g,隔膜整体对齐度良好,热压后拆解,褶皱电芯数量偏多,由于张力大,隔膜与极片贴合后,发生较大变形,极片也会发生回弹,冷热压会导致褶皱;初始张力为180 g和150 g,随着卷绕圈数增加,卷绕周长增加,张力衰减梯度需增大,保证内外圈张力一致,对齐度也可满足要求,推荐使用小初始张力,大张力衰减梯度。

3 结语

本文从褶皱产生的机制进行分析,在预卷调整、冷压试验论证、张力分析3个主要方面深入研究,同时进行批量生产验证,具有一定应用前景。减少卷绕内部负极片褶皱有效措施如下。

1) 纠偏夹辊压力0.3 MPa,入料夹辊压力0.3 MPa~0.4 MPa,预卷长度为96 mm,极片形成隔断长度越短,褶皱可消除。

2) 缸径越大,冷热压作用力越接近,电芯变形越趋于一致。对产线设备进行改造,选择缸径250 mm,在空气压力0.6 MPa下使用,冷压压力可达到1 500 kg。

3) 张力分析研究发现,极片初始张力相对大一点,隔膜初始张力分别为180 g和150 g。随着卷绕圈数增加,张力衰减梯度需增大,保证内外圈张力一致。推荐隔膜使用小初始张力,大张力衰减梯度。由于影响因素复杂多变,试验验证无法实现多因素叠加,给工业化生产带来不稳定因素,未来结合有限元仿真分析与实际控制工况,研究多因素对电芯和电池模组质量的影响是今后发展趋势^[19]。

参考文献:

[1] 闫国伟,方送生. 一种防止锂电池电芯卷绕褶皱的方法:CN110911762A[P]. 2020-03-24.

[2] 张宏远,滕玺,陈剑飞. 一种解决卷绕机卷绕超薄膜膜褶皱问题的方法:CN112093539A[P]. 2020-12-18.

[3] 黄振奎. 关于全自动锂电池卷绕机的设计分析[J]. 中国金属通报,2019(3):89-90.

[4] 汪浩. 方型锂电池卷绕系统纠偏控制算法的研究与实现[D]. 深圳:深圳大学,2017.

[5] 张宇鑫. 锂电池卷绕过程中集流体失效的力学分析及研究[D]. 太原:太原科技大学,2024.

[6] 吴学科,陈飞,阳如坤,等. 锂离子电池隔膜连续高速卷绕结构实现[J/OL]. 电池工业. (2024-11-22) [2025-04-14].<https://link.cnki.net/urlid/32.1448>.

- 收稿日期:2023-08-18

- [13] 郭子明. 基于激光雷达点云的目标识别与跟踪方法[J]. 照明工程学报, 2023, 34(5): 64-67.
- [14] CHARLES R Q, HAO S, MO K C, et al. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation [C] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 77-85.
- [15] QI C R, YI L, SU H, et al. PointNet: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space [J]. ArXiv e-Prints, 2017: arXiv: 1706. 02413.
- [16] ZHOU Y, TUZEL O. VoxelNet: end-to-end learning for point cloud based 3D object detection [J]. ArXiv e-Prints, 2017: arXiv: 1711. 06396.

- 收稿日期:2023-08-24