

锂电池极片辊压工艺变形分析

国思茗, 朱鹤

(黑龙江省科学院自动化研究所, 哈尔滨 150090)

摘要: **目的** 减小锂离子电池正负极片厚度的不一致性。**方法** 以锂离子电池正负极片辊压工艺为研究对象, 通过理论分析的方法, 针对不同压力、不同截面的压辊在工艺变形过程中的挠曲变形和弹性变形进行探讨, 并分析不同变形对极片厚度不一致性的影响。同时, 对在企业中广泛应用的热压工艺进行分析。**结果** 正负极片在不同压力下均会发生挠曲变形和弹性变形, 前者增加了厚度不一致性, 随着压力的增加, 挠曲变形程度增大; 在辊压工艺中, 尽量将极片中心线和压辊中心线对齐, 两者有偏移会增加挠曲变形, 从而增加极片厚度的不一致性, 两者偏移距离越大, 挠曲变形也随着增加; 此外, 压辊直径、压辊弹性模量, 以及极片宽度等因素也会影响挠曲变形。**结论** 辊压工艺中, 可以从压辊角度进一步提高极片厚度的均匀性。

关键词: 辊压/轧制; 锂离子电池; 极片; 挠曲变形; 挠度

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.036

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)05-0225-05

Rolling Deformation of Lithium Battery Electrode

GUO Si-ming, ZHU He

(The Institute of Automation, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150090, China)

ABSTRACT: The paper aims to reduce the thickness inconsistency of positive and negative electrodes of lithium ion batteries. The rolling process on anode and cathode electrode of lithium ion battery was studied theoretically. The flexure deformation and elastic deformation of roller with different pressure and sections were discussed; and different effects of deformation on the thickness inconsistency were analyzed. The hot-pressing technology which was widely used in enterprises was also analyzed. The flexure deformation of positive and negative electrodes under different pressure would increase the thickness inconsistency, while elastic deformation would not. With the increase of pressure, the degree of deflection of the roller increased. The center line of the roller and that of the electrode should be in a line in rolling. The deviation of them would increase the deflection, and thus lead to thickness inconsistency of the electrode. In addition, the roller diameter, elastic modulus, and the width of the electrode, etc. would affect the flexure deflection. In the rolling process, the thickness uniformity of the electrode can be further improved from the pressing roller.

KEY WORDS: rolling; lithium ion battery; electrode; flexure deformation; deflection

锂离子电池一直是新能源领域最为活跃的一个分支, 随着国家对新能源领域支持力度的不断加大^[1-3], 锂离子电池的应用范围也越来越广, 除手机、笔记本等电子产品外, 还广泛应用到电动汽车、大型动力电源以及储能领域中, 这就需要将单个的锂离子

电池组合使用, 相应地, 对电池的一致性要求也越来越高^[4]。影响锂离子电池一致性的因素很多, 包括正负极材料、生产技术和工艺、使用过程中的衰减率、内阻变化以及自放电率等等, 一致性控制不好, 会很大程度上影响电池组性能发挥和循环寿命, 甚至还有

收稿日期: 2017-07-31

作者简介: 国思茗(1985—), 男, 助理研究员, 主要研究方向为铝合金材料成形及控制技术、锂离子电池工艺。

可能引发着火、爆炸等安全问题^[5]。

在锂离子电池生产工艺中,包括搅拌、涂布、辊压、裁片、卷绕、封装/注液、化成、分组等大小40多个工序,工艺繁琐,控制点众多^[6-7],截至目前,国家还没有相关的行业和国家标准出台,不同生产厂家由于工艺和设备能力不一致,所生产电池在容量、循环等方面性能不一致,甚至同一个厂家不同时期的产品也很难达到一致,给新能源汽车的安全埋下隐患。其中极片的辊压工艺,是极片加工的最后一个工序,决定着正负极极片的最终压实密度和孔隙率,对锂离子电池的容量和衰减有着决定性的影响。其实该压辊工艺和金属材料成形中的轧制工艺是相同的,只是压制材料不同,前者是锂离子电池用正负极片,而后者通常是以各种金属为加工对象^[8-12]。比较而言,极片压辊工艺对精度的要求要比金属轧制更高,尤其是随着新能源汽车等对锂离子电池容量和衰减一致性的要求不断提高,正负极极片的厚度也受到了越来越多技术人员的关注^[13-15]。

现有文献主要着重于解决压实厚度的最终结果,以及压实厚度对极片孔隙率和导电能力的影响,而对压辊工艺和厚度不一致性之间的关系鲜有介绍。文中基于一定正负极材料涂布厚度及压实密度,针对现有辊压设备规格、压辊材料性能等各种参数,对辊压机在辊压过程中的变形进行分析,解释现有辊压工艺中不同工艺参数对极片压实厚度的影响。

1 工艺介绍及简化

通常情况下,涂布烘干后的电极极片以卷绕的形式储存。辊压之前,极片开卷,极片辊压设备结构见图1,将极片以一定的张力送入辊压机的上辊和下辊之间,其中上辊是固定不动,下辊在液压缸的作用下,缓慢向上运动,和上辊共同作用,将极片压制成预先设计的厚度。在压辊的两端,分别设计安装了2个楔块,可以防止压辊在沿轴向方向上的运动和变形,增加设备的稳定性。

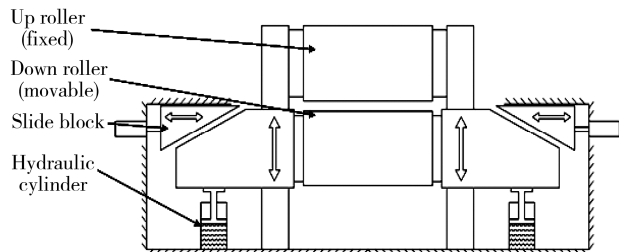


图1 极片辊压设备结构
Fig.1 Structure of rolling mill for electrode

在辊压的过程中,为了将正负极极片压制到合适的厚度,通常情况下需要辊压力较大,该辊压力的反作用力会作用在压辊上,并通过压辊的轴承传递到设

备整体结构上,从而可以将压辊看作一个简支梁问题,由于楔块的存在,不考虑沿压辊轴线长度方向上的变形,只考虑在铅垂方向上压辊由于受到极片反作用力的弹性变形和挠曲变形。

2 分析过程及讨论

2.1 载荷左右对称分布

以下辊为例,先来分析辊压载荷在压辊中间左右对称分布的情况,其受力情况见图2。极片宽度为 b ,在辊压过程中,极片的中心线与压辊中心线重合,极片边缘在左右两侧距离压辊边缘距离均为 a ,压辊总长度为 l ,辊压极片反作用力为 p ,均匀作用在下压辊上,方向垂直向下,最大挠度 $f_{\max}$ 的计算见式(1)。

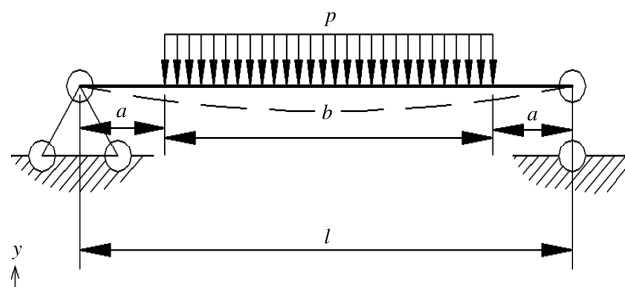


图2 载荷对称分布简支梁受力
Fig.2 Force of load symmetry

$$f_{\max} = pbl^3(8 - \frac{4b^2}{l^2} + \frac{b^3}{l^3}) / 384EI \quad (1)$$

式中: $f_{\max}$ 为最大挠度(mm); p 为均布载荷(N/m); E 为材料弹性模量(GPa); I 为压辊转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

对压辊,转动惯量 I 的计算见式(2)。

$$I = \pi D^4 / 64 \quad (2)$$

以企业生产线上比较常见的直径为 $D=800$ mm,长度为800 mm的压辊为例,极片宽度 $b=480$ mm,极片辊压前后厚度分别为0.24 mm和0.12 mm;极片和压辊之间的接触情况见图3。可以看出,在压辊和极片之间接触圆弧长度为6.93 mm。

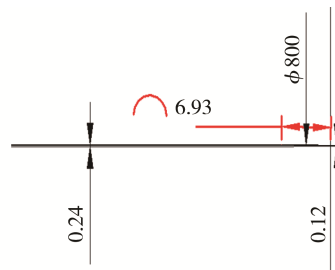


图3 压辊与极片接触弧长计算
Fig.3 Calculation of arc between the roller and the electrode

以负极极片辊压工艺为例,辊压压力为30 t,均布载荷 $q=367\,500$ N/m,压辊一般采用9Cr2Mo合金钢材料,其弹性模量 E 为210 GPa,将上述数据带入

式(1), 可以计算出最大挠度 $f_{\max}$ 为 $0.371 \mu\text{m}$ 。

正积极片辊压工艺, 压力一般为 100 t , 均布载荷 $q=1\,225\,000 \text{ N/m}$, 将数据带入式(1), 可以计算出最大挠度 $f_{\max}$ 为 $1.238 \mu\text{m}$ 。可以说, 在极片辊压过程中, 挠曲变形是必然的, 而且随着辊压力的增加, 挠曲变形程度也越大, 正积极片的挠曲变形大于负极极片, 挠曲变形的最大值出现在压辊中线位置, 换句话说, 极片中间位置的厚度是最薄的。同时, 压辊直径的增加, 可以使其界面的转动惯量增加, 从而减小挠曲变形; 在压辊材料方面, 可以选择弹性模量相对较大的材料, 弹性模量越大, 一定工艺条件下, 挠曲变形也会变得越小。

2.2 载荷左右非对称分布

在生产实际生产过程中, 极片中心线和压辊中心线很难完全重合, 总会有一定的偏差。载荷非对称分布简支梁受力情况见图4, 假定极片左侧边缘距离压辊左侧距离为 a , 极片中心线距离压辊左侧距离为 a_1 , 极片中心线距离压辊右侧距离为 a_2 。

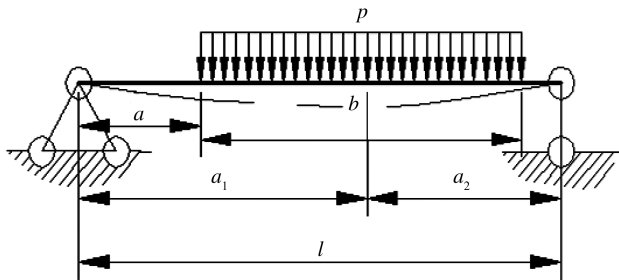


图4 载荷非对称分布简支梁受力
Fig.4 Force of asymmetric load

假定极片中心线和压辊中心线距离偏离了 50 mm , 其他数据仍然采用对称分布载荷的数据, 则在图4中, 可以算出 $a=210 \text{ mm}$, $a_2=350 \text{ mm}$, 将各种数据带入式(3), 可以计算出最大挠度 $f_{\max}$, 其中, $x = (a + \frac{ba_2}{l})$, 负极极片为 $0.385 \mu\text{m}$, 正积极片为 $1.281 \mu\text{m}$, 均较载荷左右对称分布挠度有了增加。与载荷对称结果比较, 负极和正极的非对称载荷造成挠曲增加约 3.8% 和 3.5% 。

$$f_{\max} = pba_2 / 24EI \left[(4I - \frac{4a_2^2 - b^2}{l})x - 4x^3 / I + \frac{(x-a)^4}{6a^3} \right] \quad (3)$$

极片中心与压辊中心的偏移, 造成了极片辊压挠曲变形进一步增加, 且随着偏移距离的增加, 挠曲变形的程度也会不断扩大。同时, 从挠曲变形的计算公式(包括式(1)和式(3))上也可以看出, 辊压极片的宽度对挠曲变形也有影响, 两者呈正比关系, 即极片宽度 b 越大, 会造成挠曲变形也相应地越大, 极片中心与

压辊中心重合时, 挠曲变形最小。

2.3 电磁压辊挠性变形分析

越来越多的企业采用高温精密辊压机, 这种热压工艺, 不同于室温冷压工艺, 可以提高压机速度, 从而提高生产效率, 并使得在同样的压缩比下, 所需压力比冷压下降 $40\% \sim 50\%$, 并在一定程度上优化了极片内部微观结构, 提高了电池容量。

电磁加热是高温压辊加热的一种方式。电磁加热压辊截面见图5, 可以看出, 压辊截面是一体、空心的, 外径为 D , 内径为 d 。这种结构的压辊, 其转动惯量 I 与实心压辊是不同的, 转动惯量 I 的计算见式(4)。

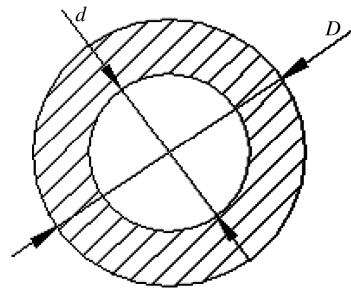


图5 电磁加热压辊截面
Fig.5 Section of electromagnetic heating roller

$$I = \pi(D^4 - d^4) / 64 \quad (4)$$

式中: D 为空心压辊外径(mm); d 空心压辊内径(mm)。

将式(4)与表征实心压辊的式(2)进行比较, 可以知道, 在相同外径的情况下, 其转动惯量更小, 且内部空心的直径越大, 转动惯量变小的程度也越大。最大挠度 $f_{\max}$ 与压辊的转动惯量 I 成反比关系, 同样以前述尺寸带入, 假定内径 d 为 600 mm , 则可以得到最大挠度 $f_{\text{空心}}$ 为 $1.428f_{\text{实心}}$, 即如果在辊压工艺中采用空心电磁加热压辊, 则会增加压辊的最大挠曲变形, 增加幅度可达到 42.8% 。

2.4 油路加热压辊挠性变形分析

采用高温油对压辊加热是另外一种常见的加热方式, 一般采用在压辊内部设置油路, 通过保持恒定温度的油对压辊进行加热, 再利用一定温度的压辊对正负极片压实。为保持整个压辊温度的均匀性, 油路的设计一般为环形结构, 并在轴心线上设置一个内径稍大的孔, 作为高温油的回路, 油路加热压辊截面见图6。这种截面的转动惯量没有现成的公式可以计算, 但可以根据转动惯量的定义, 采用相关软件进行计算, 很显然, 这种有多个圆孔的压辊截面, 其转动惯量也是会小于实心截面压辊的。其减小的幅度, 与所设计的油路尺寸、位置等多种因素有关。

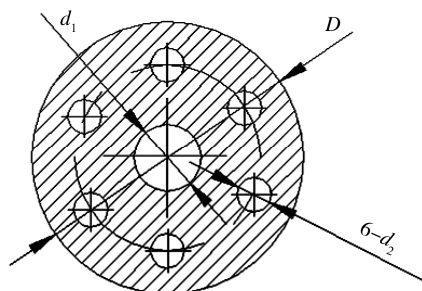


图6 油路加热压辊截面
Fig.6 Section of oil heating roller

在这种环形油路的压辊工艺中,由于压辊转动惯量变小,在一定的辊压压力作用下,其最大挠曲变形 $f_{\max}$ 将会增加,但同时,由于是高温辊压工艺,正极或者负极材料在较高的温度下进行变形,同样的压实密度下,所需的辊压力会变小,从而压辊的挠曲变形也会成比例减小。最终的挠曲变形,其增加或者减小,要取决于多种综合因素。

在正负极极片辊压工艺中,压力很大,尤其是正极材料,为了达到合适的压实密度,压力可以高达百吨,在这么大的作用力下,压辊发生弹性变形是必然的,塑性变形也不是不可能的,下面探讨这个问题。

以直径为 $\Phi 800$ mm,长度 l 为800 mm的压辊为例,其他数据也相同,根据图3可知,压辊与极片的接触面积为一个弧面,弧长为6.93 mm,则可以算出正极极片压强约为175 MPa,负极极片压强约52.5 MPa,均未达到压辊材料(一般为合金钢)的塑性屈服点,即在工艺过程中,仅仅有弹性变形发生。弹性模量按210 MPa进行计算,则正负极弹性变形分别为0.83 μm 和0.25 μm 。需要指出的是,这种弹性变形,是沿压辊和极片接触面均匀分布的,不会增加极片厚度的不一致性,而压辊的挠曲变形,则随着极片边缘向极片中心线的过渡,挠曲变形从0增加至最大值 $f_{\max}$,则这种挠曲变形是造成极片厚度不一致性的根本原因。

3 结论

压辊的挠曲变形是造成锂离子电池正负极片厚度不一致性的根本原因,影响该不一致性的因素很多。

1) 压力越大,挠曲变形也越大,极片厚度不一致性增加;压辊直径越大,由于转动惯量大,挠曲变形小,但压辊直径大,会增加压辊与极片的接触面积,为了一定的压实密度,则需要相应提高设备压力,又一定程度上增加了挠曲变形;压辊材料对挠曲和弹性变形的影响主要体现在弹性模量上,模量越大,2种变形越小;极片宽度也会影响挠曲变形,极片宽度越大,挠曲变形也越大;在辊压工艺中,尽量将极片中

心线和压辊中心线对齐,两者有偏移会增加挠曲变形,从而增加极片厚度的不一致性,两者偏移距离越大,挠曲变形也随着增加。

2) 电磁感应空心压辊,相比同样外径的实心轴,挠度变形增加;油回路压辊,也会增加挠曲变形,同时压辊温度升高后,又会影响压辊的弹性模量,并进而影响挠曲变形。

3) 在辊压过程中,一定有弹性变形发生,尤其正极材料,弹性变形较大,但这种弹性变形不会增加极片厚度的不一致性。

参考文献:

- [1] ZHANG L, FU J, ZHANG C. Mechanical Composite of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂/Carbon Nanotubes with Enhanced Electrochemical Performance for Lithium-Ion Batteries[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 376—342.
- [2] RAJAMMAL K, SIVAKUMAR D, DURAIASMY N, et al. Na-doped LiMnPO₄ as an Electrode Material for Enhanced Lithium Ion Batteries[J]. Bulletin of Materials Science, 2017, 4(1): 171—175.
- [3] LI J, LI S, HUANG S, et al. Synthesis and Electrochemical Properties of LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ Cathode Materials with Cr³⁺ and F⁻ Composite Doping for Lithium-Ion Batteries[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 414—420.
- [4] 罗雨, 王耀玲, 李丽华, 等. 锂电池制片工艺对电池一致性的影响[J]. 电源技术, 2013, 37(10): 1757—1759.
LUO Yu, WANG Yao-ling, LI Li-hua, et al. Influence of Lithium Battery Process on Battery Uniformity[J]. Power Technology, 2013, 37(10): 1757—1759.
- [5] 畅青俊, 刘林菲, 马志华, 等. 锂离子电池极片的改性方案综述[J]. 河南化工, 2016, 33: 15—17.
CHANG Qing-jun, LIU Lin-fei, MA Zhi-hua, et al. Review of Modification Schemes for Lithium Ion Battery Electrode[J]. Henan Chemical Industry, 2016, 33: 15—17.
- [6] 裴敬龙. 锂离子电池正极片辊涂存在的问题及解决措施[J]. 新疆有色金属, 2012(S2): 112—113.
PEI Jing-long. Problems and Solutions of Roll-Coating of Positive Electrode for Li-ion Battery[J]. Xinjiang Non-ferrous Metals, 2012(S2): 112—113.
- [7] 崔巍, 唐致远, 李中延. 锂离子电池制片过程中辊压工序的若干问题[J]. 广东化工, 2009, 36(8): 93—118.
CUI Wei, TANG Zhi-yuan, LI Zhong-yan. Some Problems in Rolling Procedure in the Li-ion Battery Manufacture[J]. Guangdong Chemical Industry, 2009, 36(8): 93—118.
- [8] 王胜刚, 孙森, 龙康. 纳米晶304不锈钢板材的深度轧制技术及其力学与腐蚀性能研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(3): 1—7.
WANG Sheng-gang, SUN Miao, LONG Kang. The

- Progress on Mechanical and Corrosion Properties of Nanocrystalline 304 Stainless Steel Plate Produced by Severe Rolling Technique[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(3): 1—7.
- [9] 曹富荣. Mg-Li 系合金超塑性研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(3): 8—12.
CAO Fu-rong. Superplasticity of Mg-Li System Alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(3): 8—12.
- [10] 吴维, 曹洪志, 欧昊, 等. 无取向硅钢冲裁回弹影响因素分析[J]. 精密成形工程, 2017, 9(2): 50—54.
WU Wei, CAO Hong-zhi, OU Hao, et al. Influence Factors of Blanking Springback in Non-oriented Silicon Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(2): 50—54.
- [11] 蒋伟, 周涛, 宋登辉, 等. AZ31 镁合金轧制-剪切-弯曲变形工艺数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(5): 121—125.
JIANG Wei, ZHOU Tao, SONG Deng-hui, et al. Numerical Simulation of Rolling-Shearing-Bending Deformation Process for AZ31 Magnesium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 8(5): 121—125.
- [12] 陈增奎, 周卫卫, 范新忠, 等. 7055 高强铝合金大型环件轧制技术研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(4): 16—20.
CHEN Zeng-kui, ZHOU Wei-wei, FAN Xin-zhong, et al. Rolling Process of 7055 Aluminum Alloy Large Annulus of High Strength[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(4): 16—20.
- [13] 徐昊, 陈文琳, 高妍. 不同变形方式下稀土微合金化 7085 铝合金的组织与性能研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(2): 8—11.
XU Hao, CHEN Wen-lin, GAO Yan. Effect of Rare Metals on Microstructure and Properties of 7085 Aluminum Alloy under Different Deformations[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(2): 8—11.
- [14] 胡东, 周涛, 杨朝, 等. 轧制变形程度对 AZ31 镁合金板材组织与性能的影响[J]. 精密成形工程, 2016, 8(2): 12—14.
HU Dong, ZHOU Tao, YANG Chao, et al. Effect of Rolling Deformation Degree on Microstructure and Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheets[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(2): 12—14.
- [15] 杨朝, 周涛, 冯涛, 等. 轧制导入角对 AZ31 镁合金薄板头部翘曲的影响[J]. 精密成形工程, 2016, 8(2): 43—46.
YANG Chao, ZHOU Tao, FENG Tao, et al. Effect of Rolling Import Angle on Head Bending of AZ31 Magnesium Alloy Sheet[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(2): 43—46.