

基于多角度 X 射线投影的叠片电池极片 包覆值测量

李丹宇

(广东正业科技有限公司, 东莞 523000)

摘要: 提出一种利用多角度 X 射线投影测量叠片型锂电池阴阳极片之间最小包覆值的方法, 通过对叠片电池进行平移和旋转, 对电池 4 个角分别投影, 并利用投影长度计算电池阴极片顶点到对应阳极片边缘的最小距离。与同类检测方法比较, 检测过程中, 无需测量电池旋转角度的具体值, 所需角度信息可由投影计算得出, 有效避免了由角度控制不精确引起的误差。该方法检测效率高, 成本低, 作为传统 X 射线投影检测到 CT 在线检测间的过渡方案, 更符合实际现阶段工业生产的需求。

关键词: 无损检测; X 射线; 叠片电池; 锂电池检测

中图分类号: TH741; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)06-0057-05

Measurement of interlaminar misalignment of laminated battery based on multi angle X-ray projections

LI Danyu

(Guangdong Zhengye Technology Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: A method to measure the misalignment between cathode layers and anode layers of a laminated lithium battery was proposed by using multi angle X-ray projections. By translating and rotating the laminated battery, X-ray radiographs were taken from its four corners respectively. The length of the projection was used to calculate the minimum distance from the vertex of the cathode layer to the edge of the corresponding anode layer. In this method, the rotation angle of the battery was arbitrary, effectively reducing the error caused by inaccurate angle control during determination. Besides, this method was economic and efficient. As a transition technique from traditional X-ray radiography to online CT, it was more in line with the actual needs of industrial production at current stage.

Key words: nondestructive testing; X-ray; laminated battery; lithium battery testing

作为电动汽车的重要组成部分, 非常有必要对动力电池进行检测。锂电池由薄片状的正极、隔膜和负极三层材料组成, 按照制程工艺, 可分为卷绕型锂电池和叠片型锂电池。卷绕型锂电池由电芯材料卷绕而成, 工艺成熟, 价格低廉, 但是性能逊色于叠片电池^[1]。叠片电池是将连续隔膜 Z 字型折叠, 并将正极、负极材料切片夹在隔膜中间。叠片电池

的内阻更低, 空间利用率更高, 能量密度更高, 但是生产控制工艺较为复杂, 分切繁琐, 合格率低, 因此在生产下游对叠片电池进行合格检测就尤为重要^[2]。

使用 X 射线源对锂电池进行图像检测, 能够在无损条件下检测电芯内部缺陷, 是常用的锂电池检测手段。对于层间结构较为紧密的卷绕型电池, 一般采用传统二维 X 射线对电芯边缘进行投影, 通过分辨层间正负极边缘线条达到检测目的^[3-4]。而叠片电芯在加工过程中, 相互独立的阴阳极片材料轮流放置在隔膜之间, 电池层间结构较为松散, 极片之

收稿日期: 2022-11-04

作者简介: 李丹宇(1993—), 女, 博士, 主要研究方向为无损检测及 X 射线成像

通信作者: 李丹宇, ld65@zhengyee.com

间的相对位置也不固定,使得传统 X 射线二维投影无法准确测量阴极片与阳极片之间的最小距离,增大了检测难度^[5]。

为了实现叠片电池极片包覆值的测量,工业上改进了传统 X 射线投影测量方法。该方法对叠片电池的 4 个角进行一定角度的投影,根据阴阳极片投影长度的差值可以估算电池阴阳极片错位是否在合格范围内,但无法直接得出阴阳极片错位距离(包覆值)及各层相对角度。使用 X 射线投影结合称重法能够检测裸电芯片数是否合格,但是无法进一步识别极片缺陷^[6]。对叠片电池进行两次角度互余的投影可计算出阴阳极片错位距离(包覆值),但对角度控制精度要求非常高^[7]。此外,工业 CT 检测虽然能够对电池内部全方位成像^[8],但是成本较高,并且受到检测速度的限制,一般不用于自动化全检而用于抽检。

笔者提出了一种针对叠片电池阴阳极片错位的 X 射线投影检测方法,该方法能够通过多次投影,在不依赖投影角度的情况下精确测量方形叠片电池阴阳极片间错位的最小值,并通过试验验证了检测的准确度。

1 多角度投影几何模型

1.1 叠片电池几何模型及坐标系选择

X 射线图像检测叠片电池的主要目的是确定相邻阴极片与阳极片边缘的相对距离(包覆值)大于安全值,即保证电池内部不短路。叠片电池结构可简化为如图 1 所示结构,矩形 ABCD 为阳极片,中心点为 P,长和宽分别为 w_a 和 h_a ($w_a \geq h_a$);矩形 EFGH 为阴极片,中心为 O,长和宽分别为 w_c 和 h_c ($w_c \geq h_c$)。 φ_a ($0 < \varphi_a \leq 90^\circ$) 和 φ_c ($0 < \varphi_c \leq 90^\circ$) 分别为阳极片 ABCD 和阴极片 EFGH 对角线夹角。阴极片角 E、F、G 和 H 到对应阳极片边的距离为包覆值的最小值(δx 和 δy),以此作为判断包覆值是否在安全范围内的依据。

笔者通过平移,旋转再平移叠片电池,对电池的 4 个角分别进行 X 射线投影,并通过几何关系计算电池的最小包覆值。以阴极片 EFGH 中心 O 为原点,X 射线投影方向为 y 轴建立如图 2 所示坐标系 xOy ,虚线坐标系 $x'Oy'$ 为电池旋转后坐标系。

具体测量步骤如下:① X 射线对电池角 A 投影;② 沿垂直于射线方向(x 轴方向)平移电池 s_1 距离,对电池角 C 投影;③ 旋转电池,对电池角 B

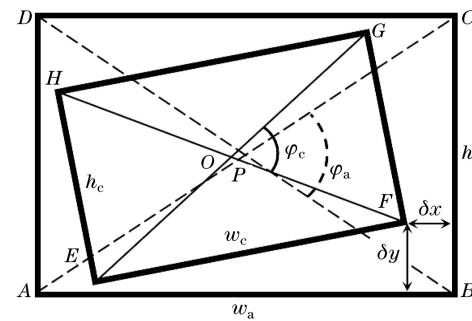


图 1 叠片电芯阴阳极片结构示意

投影;④ 再次沿垂直于射线反向平移电池 s_2 距离,对电池角 D 投影;⑤ 根据投影图像计算 4 个角对应的包覆值。

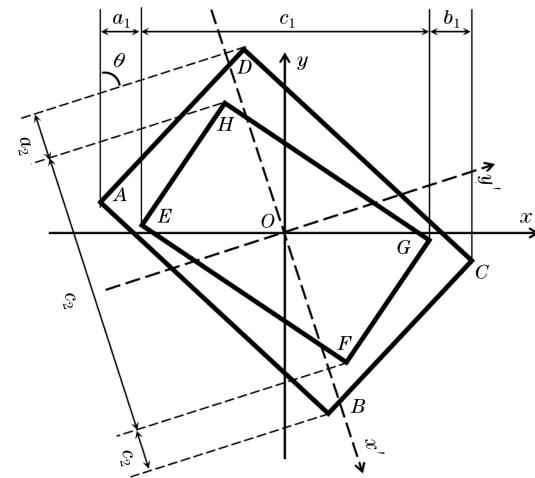


图 2 X 射线投影坐标系示意

在 4 次投影中,角 A、角 C、角 D 和角 B 对应的阴阳极片投影端点的错位距离依次为 a_1 、 b_1 、 a_2 和 b_2 ,根据旋转前后阴极片与坐标系的相对位置,计算旋转角度 θ ,旋转角公式及其适用条件如表 1 所示。

表 1 旋转角公式及其适用条件

旋转前 E 所在 xOy 象限	旋转后 H 所在 $x'Oy'$ 象限	旋转角 θ
2	2	$\theta = \varphi_c + \alpha - \beta$
2	3	$\theta = \varphi_c + \alpha + \beta$
3	2	$\theta = \varphi_c - \alpha - \beta$
3	3	$\theta = \varphi_c - \alpha + \beta$

其中

$$\alpha = \arccos \frac{c_1}{\sqrt{h_c^2 + w_c^2}} \quad (1)$$

$$\beta = \arccos \frac{c_2}{\sqrt{h_c^2 + w_c^2}} \quad (2)$$

1.2 端点坐标计算

在坐标系 xOy 下 E 点坐标为

$$E(-c_1/2, y_E) \quad (3)$$

式中: y_E 为 E 点 y 轴坐标。

E 点绕 O 顺时针旋转 φ_c 得到 H , 根据旋转关系得到 H 坐标, 即

$$H\left(y_E \sin \varphi_c, y_E \cos \varphi_c + \frac{c_1}{2} \sin \varphi_c\right) \quad (4)$$

将 H 逆时针旋转 θ 得到 xOy 下坐标 H^* , 即

$$\begin{cases} x_{H^*} = y_E \sin(\varphi_c - \theta) - \frac{c_1}{2} \cos(\varphi_c - \theta) \\ y_{H^*} = y_E \cos(\varphi_c - \theta) + \frac{c_1}{2} \sin(\varphi_c - \theta) \end{cases} \quad (5)$$

其坐标值与 $x'Oy'$ 下 H' 坐标值相同, 联立(4)和(5)可得 E 点 y 轴坐标, 即

$$y_E = \frac{\cos(\varphi_c - \theta) - c_2}{2 \sin(\varphi_c - \theta)} \quad (6)$$

同样, 通过矩形顶点的对称关系即可求得 E, F, G, H 坐标。

阳极片中心坐标几何关系如图 3 所示, 根据相似三角形关系可求得阳极片中心点 P 点坐标, 即

$$\begin{cases} x_P = \frac{b_1 - a_1}{2} \\ y_P = \frac{(b_1 - a_1) \cos \theta - a_2 + b_2}{2 \sin \theta} \end{cases} \quad (7)$$

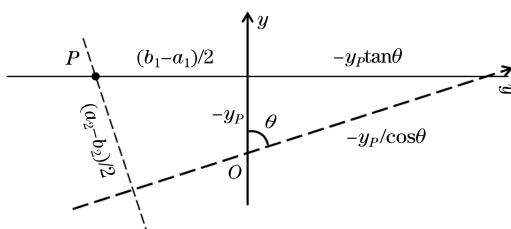


图 3 阳极片中心坐标几何关系

xOy 坐标系下 A 点坐标为

$$A(-a_1 - c_1/2, y_A) \quad (8)$$

$x'Oy'$ 坐标系下, D' 坐标为:

$$D'(-a_2 - c_2/2, y_{D'}) \quad (9)$$

A 点绕 P 顺时针旋转 φ_a 得到 D 点坐标, 即

$$\begin{cases} x_D = (x_A - x_P) \cos \varphi_a + (y_A - y_P) \sin \varphi_a + x_P \\ y_D = (y_A - y_P) \cos \varphi_a - (x_A - x_P) \sin \varphi_a + y_P \end{cases} \quad (10)$$

将 D 逆时针旋转 θ 得到 xOy 下 D^* 坐标, 与 $x'Oy'$ 下 D' 坐标相同, 即

$$\begin{cases} x_{D^*} = (y_A - y_P) \sin(\varphi_a - \theta) + x_P \cos \theta \\ \quad + (x_A - x_P) \cos(\varphi_a - \theta) - y_P \sin \theta \\ y_{D^*} = (y_A - y_P) \cos(\varphi_a - \theta) + x_P \sin \theta \\ \quad - (x_A - x_P) \sin(\varphi_a - \theta) + y_P \cos \theta \end{cases} \quad (11)$$

联立式(9),(11)可得 A 点坐标

$$y_A = y_P - \frac{a_2 + c_2/2 + x_P \cos \theta - y_P \sin \theta}{\sin(\varphi_a - \theta)} + \frac{(x_P - x_A)}{\tan(\varphi_a - \theta)} \quad (12)$$

通过矩形顶点的对称关系可求得 A, B, C, D 坐标。综上, 各角所对应的最小包覆值可通过各点坐标简单计算得到。

2 试验设计

根据常见动力叠片锂电池尺寸, 将厚度为 0.5 mm 的薄钢片分别裁剪为 200 mm×95 mm(长×宽, 下同)和 201.5 mm×96.5 mm 的矩形(尺寸公差小于 0.25 mm), 作为电池阴极片和阳极片进行组合, 然后进行试验。将一个阴极片与一个阳极片固定, 作为一组极片, 再将若干组极片叠放后同时进行投影, 叠片电池多角度投影过程如图 4 所示。在固定阴极片与阳极片时, 分成以下两种情况: ① 阴阳极片中心对准且边缘平行; ② 阴阳极片间有角度偏差及中心偏移。

准确测量各层最小包覆值, 若测量值小于安全值, 则电池有短路的风险, 为不合格产品。实际工业生产中, 要求包覆值测量尺寸与实际尺寸的误差在 0.1 mm 以内。此外, 在不改变极片间位置的情况下, 笔者变换投影角度和平移距离重复进行试验, 以检验算法的一致性。

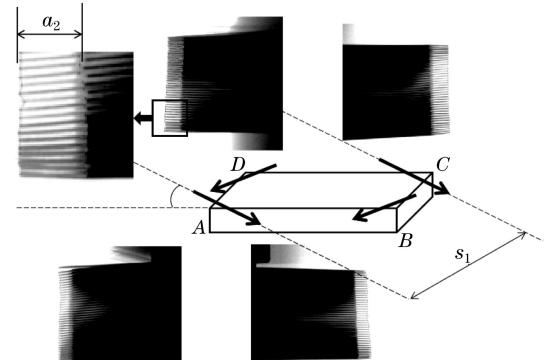


图 4 叠片电池多角度投影过程示意

按前上述实施步骤得到电池 4 个角的投影, 还需通过对角投影与对应平移距离, 计算对角两端点实际投影长度。对角端点间实际投影长度如图 5 所示, 可以通过极片投影端点在投影图像中的位置计算阴极片对角端点之间的实际投影长度 c_1 和 c_2 , 即

$$\begin{aligned} c_1 &= \sqrt{c_v^2 + (s_1 + q_1 + q_2)^2} \\ c_2 &= \sqrt{c_v^2 + (s_2 + q_1 + q_2)^2} \end{aligned} \quad (13)$$

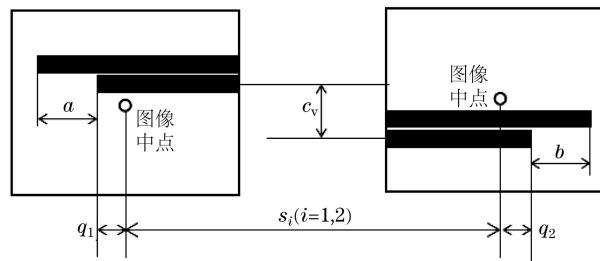


图 5 对角端点间实际投影长度示意

使用管电压为 70 kV, 管电流为 150 mA 的 X 射线机和平板接收器进行拍摄, 并通过针规对投影图像的放大倍率进行标定。

将一组极片水平放置, 用光学显微镜对其 4 个角分别成像并进行尺寸标定; 若阴极片遮挡阳极片边缘, 则使用 X 射线替代可见光, 在大倍率下对其 4 个角分别进行垂直投影并进行尺寸标定, 直接测量极片各角最小包覆值 δ_x 和 δ_y , 并以此作为真实值检测文章算法的准确性。

3 试验结果及分析

3.1 极片中心对正试验结果

将 10 组阴阳极片(共 20 片)中心对正且保持边缘平行后用销钉固定, 以防试验过程中极片之间发生相对位移。共进行 5 组试验, 其中, 1、2、3 和 4 组试验投影角度不同, 4 和 5 组试验的投影角度相同。通过投影角度计算电池每一层 A、B、C 和 D 角对应的最小包覆值 δ_x 和 δ_y 。理论上, 阴极片的长和宽均比阳极片的长和宽小 1.5 mm, 即极片对正且平行情况下, 测得每层各角对应的包覆值 δ_x 和 δ_y 应均为 0.75 mm。但是极片尺寸在加工时和中心对正时存在误差, 所以电池不同层和不同角所对应的 δ_x 和 δ_y 会有所波动。在试验过程中, 极片之间的相对位置是固定的, 即使不同位置对应的 δ_x 和 δ_y 有差异, 但是在不同组的试验测量中, 电池同一层同一角所对应的 δ_x 和 δ_y 应相同。因此, 对 5 组数据对应位置的 δ_x 和 δ_y 求均值和标准差。各角各层的 δ_x 和 δ_y 标准差为 0.015~0.045 mm。均值的最大误差为 0.079 mm, 均值误差大于 0.05 mm 的情况占所有测量结果的 2.5%。第 4,5 组试验结果之间的差异与其他几组试验结果之间的差异没有明显区别, 表明投影角度的差异不会对测量结果产生明显影响。

在光学显微镜下测量第一层阴阳极片的真实包覆值并与投影计算结果进行对比, 结果如图 6 所示, 其上下区间为 5 组试验测量结果的标准差。可以看出, 测量值标准差为 0.014~0.043 mm, 与之前测得的

各层总体数据相吻合。测量数据的平均值与真实值之间的差异较小, 在标准差范围内。测量数据与真实值误差的最大值为 0.078 mm, 小于工业检测允许的误差 0.1 mm。

无论是真实数据还是测量数据, 整体均比理论值 0.75 mm 偏小, 笔者分析这是由极片尺寸误差造成的。精确测量第一层阴、阳极片尺寸, 分别为 200.247 mm \times 95.161 mm 和 201.712 mm \times 96.621 mm, 由其尺寸差值可以看出实际包覆值偏小, 这与测量结果一致。而不同角对应的包覆值小幅波动则是阴阳极片中心对正精确度和平行度有限造成的。

另外, 根据投影图像放大倍率的不同, 图像像素的实际尺寸为 0.03~0.06 mm, 分辨率的影响、投影长度的测量等也会引入一定误差, 影响包覆值的测量结果。

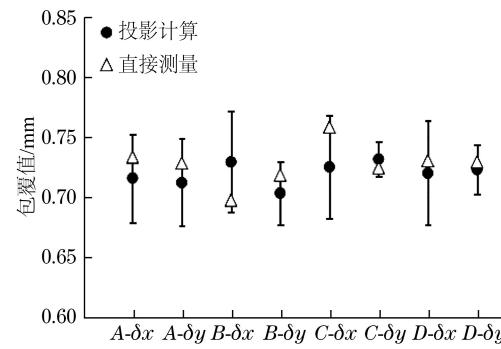


图 6 极片中心对正时最上层阴阳极片各角的包覆值结果对比(直接测量与投影计算)

3.2 极片错位试验结果

将两片相互错位的阴阳极片固定, 作为一组样品, 用以模拟叠片电池中层间错位的情况。用高倍率竖直 X 射线投影分别测量每组样品的实际包覆值后, 将 4 组样品(错位不相同)叠放, 作为电池模型, 对各角进行投影测量。共进行 5 组试验, 每组试验的拍摄角度均不相同, 对 5 组数据对应位置的 δ_x 和 δ_y 取均值和标准差, 并与实际测量结果相比较, 其中各位置对应的标准差均小于 0.043 mm。具体数据中, 计算值与实际测量结果的最大误差为 0.067 mm, 满足工业生产中误差小于 0.1 mm 的要求。与 3.1 节中心对正的结果相比较, 极片错位试验结果的标准差和最大误差均偏小。这是由于在极片错位试验中, 重新调整了放大倍率, 使投影图像像素的实际尺寸为 0.02~0.04 mm。投影图像分辨率提高后, 减小了投影长度测量的误差, 进而提高了包覆值的计算结果精度。

样品 1 极片错位时阴阳极片各角的包覆值结果

对比(直接测量与投影计算)如图 7 所示,其上下区间为 5 组试验测量结果的标准差。由图 7 可以看出,在极片错位的情况下,投影计算所得最小包覆值与实际测量结果基本一致。

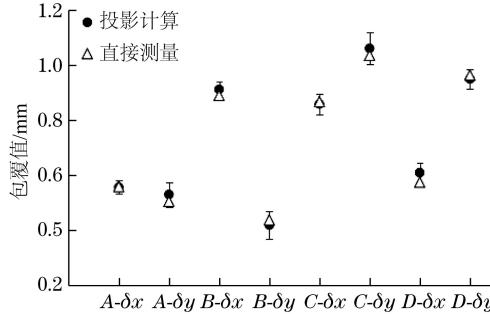


图 7 样品 1 极片错位时阴阳极片各角的包覆值结果
对比(直接测量与投影计算)

笔者通过投影计算包覆值时,需代入极片尺寸进行计算。在工业生产过程中,极片实际尺寸与标称尺寸往往存在误差。文章所使用的极片模型,标称尺寸与实际尺寸存在约 0.2 mm 的误差。将精确测量所得阴阳极片尺寸代入计算得到的包覆值,与原先计算结果进行比较(样品 1 数据比较结果见图 8),发现各角对应变化值小于 0.01 mm,影响并不明显。



图 8 样品 1 极片准确尺寸与标称尺寸代入计算得到的
包覆值结果比较

4 结论

(1) 所提方法通过对方形叠片电池的 4 个角

投影,能够准确计算出电池各层的实际最小包覆值。在阴阳极片对正和错位的情况下,计算结果与实际值的误差均在 0.08 mm 以内,小于 0.1 mm 的工业检测要求。

(2) 投影放大倍率的增大,能够提升投影图像分辨率。当图像分辨率从 0.03~0.06 mm 提高至 0.02~0.04 mm 后,包覆值测量结果之间的标准差和测量结果与实际值之间的误差均有所减小。

(3) 分别使用阴阳极片真实尺寸与标称尺寸(相差约 0.2 mm)代入计算,所得包覆值差异很小,表明该算法对极片尺寸的误差不是非常敏感。

参考文献:

- [1] SWIATOWSKA J, BARBOUX P. Lithium Battery Technologies[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [2] ZAMA K, KUMEUCHI T, ENOMOTO S, et al. Development of large-capacity laminated lithium ion rechargeable battery (high power type) [J]. Nec Technical Journal, 2006, 1: 68-72.
- [3] 闫欣, 郝万睿, 许德平, 等. 一种卷绕电池的质量检测方法: CN103925893B[P]. 2017-01-11.
- [4] 米勇, 曾祥进. 基于 X 光图像的锂电池正负极距离检测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(10): 72-80.
- [5] KOHNO K, KOISHIKAWA Y, YAGI Y, et al. Development of an Aluminum-laminated Lithium-ion battery for hybrid electric vehicle application [J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(1): 554-558.
- [6] 张志剑, 饶绍建, 李凡群, 等. 一种检测叠片裸电芯片数合格的方法: CN112393792A[P]. 2021-02-23.
- [7] 赵义, 路超. 叠片电芯的阴阳极膜片错位检测方法: CN103743361A[P]. 2018-02-27.
- [8] 王增勇, 汤光平, 李建文, 等. 工业 CT 技术进展及应用[J]. 无损检测, 2010, 32(7): 504-508.