

^{85}Kr 测厚源在锂电池极片面密度测量的应用

白云飞¹, 梁斌斌², 彭怡刚², 葛 铮¹

(1. 开封市测控技术有限公司, 开封 475000;

2. 原子高科股份有限公司, 北京 102413)

摘要:为满足 ^{85}Kr 测厚源在新能源锂电行业的应用,对测厚源在锂电池极片面密度测量方面开展应用研究。比较分析不同规格的 ^{85}Kr 测厚源的源窗材料、源窗厚度、活性区尺寸以及活度大小对 β 射线输出量的影响,完成在锂电池极片实际生产过程中, ^{85}Kr 测厚源 β 射线吸收值的定量标定、温度补偿标定、极片位置补偿标定以及源活度衰减补偿标定,获得极片面密度与 β 射线吸收值关系曲线,以及极片面密度与温度、极片位置及源活度衰减关系。结果表明,厚度25 μm 钛窗,活性区底面积大且高度低,装载活度18.5 GBq的 ^{85}Kr 测厚源具有较大的 β 射线输出量,重复测量精度0.02%; β 射线透射极片后的衰减吸收值与极片面密度的定量线性相关度达0.999;经监控测量间隙的空气温度,可补偿空气密度变化对 β 射线吸收的影响;极片距离探测器的位置变化与测量面密度呈线性关系,通过测量位置变化实现对测量值的补偿;至少每5 d修正一次空气零点 I_0 ,以补偿 ^{85}Kr 测厚源活度衰减引起的测量系统偏差。 ^{85}Kr 测厚源的使用效果能够满足锂电池超级智能制造产线的实际应用需求。

关键词: ^{85}Kr 测厚源; 面密度; 锂电池

中图分类号: TL929

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2025)01-0068-07

doi: 10.7538/tws.2024.youxian.069

^{85}Kr Thickness Gauge Source in Measuring the Areal Density of Lithium Battery Electrodes

BAI Yunfei¹, LIANG Binbin², PENG Yigang², GE Zheng¹

(1. Kaifeng Measurement and Control Technology Co., Ltd., Kaifeng 475000, China;

2. Atom High Tech Co., Ltd., Beijing 102413, China)

Abstract: In order to meet the widespread application of ^{85}Kr thickness gauge sources in the new energy lithium battery industry, an application study was conducted on the thickness gauge's use in measuring the coating areal density of lithium battery electrodes. The influence of the source window material, thickness, active area, and activity size on the beta ray output of different specifications of ^{85}Kr thickness gauge was compared and analyzed. The quantitative calibration, temperature compensation calibration, position compensation calibration, and source activity decay compensation calibration of the ^{85}Kr thickness gauge's beta ray absorption value in the actual production process of lithium battery electrodes were completed. The relationship curve between the areal density of the electrode and the beta ray absorption value was obtained, as well as the relationship between the surface density of the electrode and temperature, position, and source activity decay. The research

results show that The ⁸⁵Kr thickness gauge source with a thickness of 25 μm titanium window, a large bottom area and low height of the active zone, and a loading activity of 18.5 GBq has a large betaray output, and the repeatable measurement precision is 0.02%; The linear correlation between the attenuated absorption value of the beta ray after the transmission pole piece and the areal density is 0.999. Measuring the air temperature of the gap compensates for the effect of changes in air density on beta ray absorption. The position change of the pole piece distance detector is linearly related to the measured areal density, compensates for the measured areal density by measuring the position of electrodes. Correct I_0 at least every 5 days to compensate for the deviation of the measurement system caused by the activity attenuation of the ⁸⁵Kr thickness gauge source. The thickness gauge using ⁸⁵Kr as the radiation source can meet the actual application needs of the super intelligent manufacturing line of lithium-ion batteries.

Key words: ⁸⁵Kr thickness gauge source; areal density; lithium battery

锂电池极片的涂布面密度(质量厚度)与锂电池的容量一致性和安全性密切相关,极片面密度的在线测量是锂电池涂布工序中重要的质量控制环节。⁸⁵Kr测厚源安装在面密度测量仪上,在扫描架运动机构的驱动下与射线探测器同步往复扫描涂布极片,基于射线透射衰减检测的原理实现动态实时测量。

王云辉等^[1]介绍了 β 射线测重技术在锂离子动力电池涂布机面密度闭环控制中的应用,显著提高了电池容量的一致性,生产的74 Ah方形动力电池最大容量偏差104 mAh。彭怡刚等^[2]为了指导⁸⁵Kr测厚源的制备,研究了两种材质、两种活性区、两种气体丰度的同活度测厚源的 β 射线输出,提出制备⁸⁵Kr测厚源时为提高输出,优先采用钛材质、小活性区、高丰度的原料。

不同于造纸、塑料薄膜等行业的测厚应用,锂电池极片是高价值材料膜片,有连续、条纹、斑马等多种涂布形式。动力锂电池头部企业为了制造高容量、高一致性的极片,提升涂布良率和效率,建立了智能超级拉线PSL:极片的涂布面密度由300 g/m²增厚至700 g/m²;涂布速度由0.6 m/s提升至2 m/s;涂布公差带由 ± 6 g/m²收窄至 ± 4 g/m²;测量位置处的极片温度约100 $^{\circ}\text{C}$ 。涂布生产工艺要求面密度测量仪的扫描速度由0.2 m/s提高至0.7 m/s,对极片横向分区的最小测量宽度由40 mm缩窄至20 mm,测量值需实时反馈给涂布机用于极片横向和纵向的涂布闭环调节,面密度测量仪的测量精度应优于0.1%,测量重复性P/T指标(6倍的测量标准差/

涂布公差带)优于10%。而面密度测量仪的测量精度与射线发生器的射线输出量的多少、探测器的探测效率的高低、测量时间的长短以及测量系统的补偿性能等因素密切相关。作为 β 射线发生器的⁸⁵Kr测厚源是极片面密度测量仪的核心器件,其与射线探测器同步运动扫描极片,在极片高速涂布、瞬时短时间测量、超厚极片检测、窄公差带、高温环境的工况条件下,⁸⁵Kr测厚源应具有较大的 β 射线输出量,合适的活性区规格,能适应高温高速的环境保持稳定的输出量,满足锂电池极片高精度测量的需求。本研究对锂电行业用⁸⁵Kr测厚源的规格选择、射线定量标定,测量间隙内空气温度和极片位置变化对 β 射线影响的补偿、源活度衰减补偿等具体的实际应用进行分析研究,拟为⁸⁵Kr测厚源在锂电池超级智能制造产线的应用提供参考。

1 研究方法

1.1 测试装置

⁸⁵Kr测厚源的测试装置示意图示于图1。

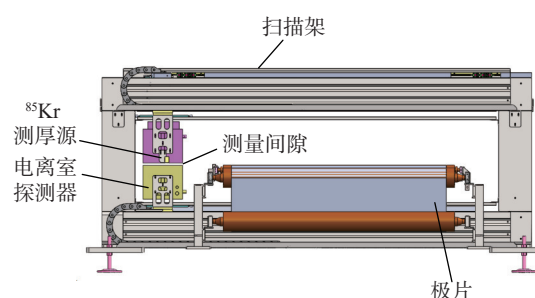


图1 ⁸⁵Kr测厚源的测试装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the test setup of the ⁸⁵Kr thickness gauge source

^{85}Kr 测厚源安装在BCH-25100型面密度测量仪扫描架上, β 射线探测器为薄窗型电离室,射线入射窗采用钛材料,直径40 mm,厚度25 μm ; ^{85}Kr 测厚源与电离室探测器之间的空气柱高度50 mm。

1.2 测试工况

锂电池厂负极片涂布生产线,浆料螺杆泵泵速50 r/min;极片标准面密度规格355 g/m^2 ,公差带 $\pm 4 \text{ g}/\text{m}^2$;被测极片涂布速度1 m/s;测量位置在隧道烘箱末端后约3 m处,此时极片表面温度约100 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 测量原理

在“窄束”条件下, β 射线透射极片后的吸收衰减近似符合指数规律^[3]:

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho d} \quad (1)$$

式中: I_0 为透射前的射线强度; I 为透射极片后的射线强度; ρd 为极片面密度, g/cm^2 ; μ_m 为质量吸收系数, cm^2/g 。 I_0 和 I 由 β 射线探测器在空气零点和极片处测量得到; β 射线透射物质的质量吸收系数 μ_m 正比于透射物质的 Z/A ^[3], Z 和 A 分别为透射物质的原子序数和原子量。负极片的涂层石墨和基材铜箔对 β 射线的质量吸收系数 μ_m 基本相当。 ^{85}Kr 的 β 射线质量吸收系数可由经验公式(2)^[3]确定:

$$\mu_m = 22E_{\max}^{-4/3} \quad (2)$$

式中: E_{\max} 为 ^{85}Kr 的 β 射线的最大能量,0.672 MeV;估算 ^{85}Kr 的 β 射线质量吸收系数 $\mu_m=37.38 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。当公式(1)中的 $\mu_m \rho d=1\sim 2$ 时,测量系统具有较高的测量灵敏度和较低的射线统计涨落误差^[4],所以由公式(1)计算 ^{85}Kr 测厚源适合测量的锂电池负极片面密度 ρd 范围为150~800 g/m^2 。但是由于 β 射线的散射影响,理想的“窄束”条件不再成立,需要对面密度测量仪进行取样标定以确定测量关系。 I_0 和 I 可由 β 射线探测器得到,由公式(1)经自然对数运算后,得到 β 射线的透射吸收值: $\ln(I_0/I)$,该吸收值与标定极片的称重值 ρd 经回归拟合得到如下极片面密度的测量公式:

$$\rho d = k \cdot \ln(I_0/I) + b \quad (3)$$

式中: $\ln(I_0/I)$ 为极片对 β 射线的衰减吸收值; k 、 b 为标定系数斜率与截距,需由标定实验得到。

1.4 测厚源规格选择

市场上 ^{85}Kr 测厚源的材质、活性区尺寸、活度、制备工艺不同,导致射线输出量大小不一。使用同一个 β 射线探测器,在源和探测器的测量几何条件不变情况下,测试不同的 ^{85}Kr 测厚源,对测厚源的源窗材质、源窗厚度,活性区形状,装载活度等进行比较,在兼顾应用成本、辐射防护安全的前提下,应从源窗、活性区、活度等方面优先选用 β 射线输出量较大的 ^{85}Kr 测厚源以保证测量精度。

1.4.1 源窗 ^{85}Kr 测厚源的源窗材料有钛和不锈钢两种材质,窗厚度 d 也有25 μm 和50 μm 两种规格。源窗对 β 射线同样具有衰减吸收作用, β 射线透射窗后的透射率由公式(1)的 I/I_0 计算,其中窗材料的密度 $\rho_{\text{钛}}=4.5 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_{\text{不锈钢}}=7.8 \text{ g}/\text{cm}^3$, ^{85}Kr 测厚源 β 射线的质量吸收系数 $\mu_m=37.38 \text{ cm}^2/\text{g}$,计算不同窗材料和窗厚度的 β 射线透射率。

1.4.2 活性区 ^{85}Kr 测厚源的活性区有圆柱形、窄条形等规格, β 射线的输出量与活性区内 ^{85}Kr 气体的容量, β 粒子的自吸收效应及输出张角有关^[5]。在相同的测试条件下,使用同一个 β 射线电离室探测器对不同活性区,活度均为18.5 GBq的 ^{85}Kr 测厚源进行 β 射线输出量评估(已经折算了半衰期的影响)。

1.4.3 装载活度 ^{85}Kr 测厚源的装载活度 A 一般为3.7~37 GBq,选择合适的源活度可以实现较高的应用性价比。将同一型号但装载活度不同的 ^{85}Kr 测厚源安装在图1所示的测试装置上,设置单次测量时间10 ms,共6000次重复测量同一极片。测量系统对电离室探测器的输出电压信号 I 采样,并计算不同源活度的重复测量相对标准偏差。

1.5 产线测试内容

1.5.1 定量标定 在负极产线正常涂布生产条件下,将浆料螺杆泵泵速上下调节,单次步进2 r/min,形成5~7处不同涂布重量的极片区,经面密度测量仪扫描测量后,由 $\phi 100 \text{ mm}$ 取样器裁剪取样,使用岛津AUW120型十万分之一分辨率的精密天平称重,得到取样样片的重量值,即极片的称重面密度。拟合极片称重面密度与射线吸收值 $\ln(I_0/I)$ 的定量关系,确定测量公式(3)中的标定系数 k 、 b 值。

1.5.2 温度与极片位置补偿 通过微调极片带的收卷速度,收卷张力改变,监控面密度测量仪测量间隙内极片温度和高低位置的改变与测量面密度的关系确定温度补偿和位置补偿。

(1) 温度补偿

在高速涂布产线中,被测高温极片所释放的大量热量在测量仪的测量空间聚集,放射源与探测器之间的射线路径空气柱受到高温极片的热传导,导致空气密度降低,空气柱的质量厚度随之发生变化^[6]。基于 β 射线的透射物质的衰减特性,空气对⁸⁵Kr测厚源 β 射线的质量衰减系数与石墨基本相当,在高温条件下 β 射线透射空气的衰减量将减少引起了测量值漂移。标准大气压下空气密度的计算公式(4)如下:

$$\rho_{\text{空气}} = 1.293 \times \frac{273.15}{T + 273.15} \quad (4)$$

式中: T 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

放射源与探测器间的空气柱为 50 mm, 随着极片不断散热, 空气柱温度由室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 45 $^{\circ}\text{C}$, 此时由公式(4)计算测量间隙空气柱的面密度下降约 3.7 g/m^2 。所以若无空气温度修正补偿, 则测量仪的极片面密度测量值会出现系统性偏差^[7]。为了监控空气柱温度, 在放射源源仓和探测器分别设置非接触、快时间响应的红外热电堆传感器, 监控极片上下两侧的空气温度 T , 快速计算空气面密度 $d_{m\text{空}}$ 。补偿面密度 $\Delta d_{\text{空}}$ 为:

$$\Delta d_{\text{空}} = K * d_{m\text{空}}^{[11]} \quad (5)$$

式中: $d_{m\text{空}}$ 为空气柱面密度变化值, g/m^2 ; K 为温补系数。

(2) 极片位置补偿

在极片高速涂布过程中, 由于极片带收卷张紧力的变化, 被测极片在面密度测量仪测量间隙内的会产生高低位置移动。极片与探测器的垂直距离发生变化, 即 β 射线测量的几何因素发生了改变。 β 射线是负电子流, 通过物质时, 受原子核库伦场的作用而发生弹性散射^[8-9]。在被测极片几何因素不固定时, β 射线弹性散射的物理作用会引起测量仪的测量误差。

位置补偿面密度 $\Delta d_{\text{位}}$ 的计算公式如下所示:

$$\Delta d_{\text{位}} = -16.40 * \Delta h + 2.53 \quad (6)$$

式中: Δh 为实测极片距离与标准极片距离的差

值, mm。

1.5.3 源活度衰减补偿 利用面密度测量仪长时间连续跟踪无被测极片位置处的零点信号值, 确定⁸⁵Kr测厚源的活度衰减对测量系统偏差的影响。

⁸⁵Kr测厚源的半衰期 $T_{1/2}$ 为 10.7 a, ⁸⁵Kr测厚源的活度随着使用时间的增长按照指数规律衰减, 伴随着 β 射线输出量的衰减, 除统计涨落引起的测量随机误差增大外, 还会引起测量系统的系统误差增大, 由放射源衰变引起的测量系统误差^[10] 为:

$$\gamma_A = \frac{\Delta A}{A} = \frac{A - Ae^{-\lambda t}}{A} = 1 - e^{-\lambda t} \quad (7)$$

式中: λ 为衰变常数, a^{-1} ; t 为放射源使用时间, a。

1.6 评价方法

装有⁸⁵Kr测厚源的极片面密度测量仪经定量标定及温度、位置、零点等修正补偿后, 极片面密度的测量结果可由公式(8)确定:

$$\rho d = K \left(\ln \frac{I_0}{I} \right) + B + \Delta d_{\text{空}} + \Delta d_{\text{位}} \quad (8)$$

应用上述测量公式, 使用 T00741 类型、活度 18.5 GBq 规格的⁸⁵Kr测厚源扫描测量极片。为评估测量效果, 对测量完毕的极片带复卷, 在极片带的卷首、卷中、卷尾的 14 处位置裁剪若干组样品称重并与测量记录值比对。

2 结果与分析

2.1 β 射线输出量比较

2.1.1 源窗 不同⁸⁵Kr源窗的 β 射线透射率结果列于表 1。从表 1 可得, 25 μm 钛窗具有较高的射线透射率, 约是 50 μm 不锈钢窗的 3 倍, 但是薄窗型⁸⁵Kr测厚源的制备难度较高、窗焊接工艺复杂^[11], 源的制造成本较高, 而且在高速、高温的环境中应用需格外注意放射性气体泄露的风险。所以为了发挥面密度测量仪的测量性能, 应利用⁸⁵Kr测厚源的活度, 在成本允许的条件下优先选择安全等级高于 C33322, 安全使用期限不少于 10 a, 透射衰减损失较少, 射线输出量大的 25 μm 厚度的钛窗⁸⁵Kr测厚源。

2.1.2 活性区 不同活性区规格的⁸⁵Kr测厚源探测器的输出信号列于表 2。从表 2 的射线探测器的实测信号值可以看出, ⁸⁵Kr测厚源活性区的面积及高度与 β 射线的输出量密切相关,

表 1 不同⁸⁵Kr源窗的β射线透射率
Table 1 β-ray transmittance of different ⁸⁵Kr source windows

窗厚度	源窗材料	β射线透射率/%
25	钛窗	65.7
	不锈钢窗	48.2
50	钛窗	43.1
	不锈钢窗	23.3

表 2 不同活性区规格的⁸⁵Kr测厚源
Table 2 ⁸⁵Kr thickness gauge source with different active region specifications

源标号	活性区形状	活性区底面积/mm ²	活性区高度/mm	探测器信号/V
A056	圆柱	44	9	1.553
T00741	圆柱	314	5	2.070
TB00137	窄条	122	12	0.989

对于同样装载活度的圆柱形⁸⁵Kr测厚源,活性区底面积大且高度低的T00741号源的β射线输出量较大。⁸⁵Kr测厚源的活性区选择与极片涂布类型有关:对于动力电池极片连续涂布的应用场合,工艺过程更关心较大区域的连续涂布区面密度测量值,所以可以选择活性区底面积大的T00741类型的圆柱形测厚源以获得较大的β射线输出量;对于消费锂电池极片条纹涂布或有涂布边缘削薄区测量需求的场合,被测区域的宽度只有6~20 mm,甚至小于多数圆柱形⁸⁵Kr测厚源的活性区直径,此时可选择窄条类型活性区的测厚源以获得较为理想的小射线测量斑用于小区域涂布测量目的,但是窄条形测厚源的活性区底面积小且存在源自吸收效应,其射线输出量较小,需要配套高探测效率、低噪声的射线探测器以降低信号统计涨落。

2.1.3 装载活度 不同活度测厚源的测量结果列于表3。为了满足极片涂布测量系统要求的重复测量精度(2倍相对标准差)小于0.08%的要求,由表3的测量结果可得,面密度测量仪应选择装载活度11.1 GBq以上的⁸⁵Kr测厚源。考

表 3 不同活度测厚源的测量结果
Table 3 Measurement results of Krypton-85 thickness gauge source with different activities

源活度A /GBq	信号值I/V	2倍相对标准差/%
7.40	0.430	0.11
11.1	1.344	0.06
18.5	2.317	0.02

虑到⁸⁵Kr的半衰期以及涂布系统进一步提升涂布速度或生产更厚极片的可能,实际应用中优选18.5 GBq的⁸⁵Kr测厚源,同时应注意加强使用时的辐射防护。

2.2 生产线测试效果

2.2.1 定量标定 标定是为了确定⁸⁵Kr测厚源β射线的透射极片后的衰减吸收与极片面密度的定量关系。由生产线测试的标定实验得到面密度称重值与β射线的吸收衰减,结果列于表4。

表 4 标定数据
Table 4 Calibration data

极片称重面密度/(g·m ⁻²)	β射线衰减吸收值
348.5	0.418
351.5	0.421
354	0.424
359.2	0.43
363.6	0.435
368.2	0.44

由表4的标定数据经回归分析计算,极片面密度与⁸⁵Kr的β射线衰减系数的线性相关度 $R^2=0.9997$,呈显著的线性关系,由线性拟合得到公式(3)的标定系数:斜率 $k=885.36$,截距 $b=-21.434$ 。

2.2.2 温度补偿 温度补充系数K由高温条件下内标样的标准值和测量值比对得到。在极片正常涂布过程中,随着生产时间延长,正常涂布区的空气温度逐渐上升至45℃左右,测量系统监控间隙内空气柱的温度差得到面密度差值以计算补偿值,补偿效果示于图2。经补偿后,8 h连续运行,面密度测量值的极差小于0.5 g/m²。

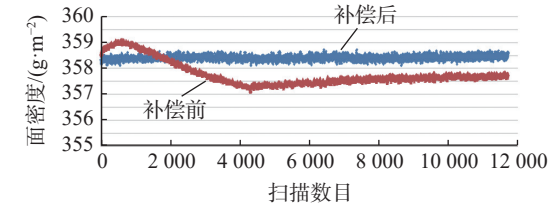


图 2 空气柱温度补偿前后的测量面密度
Fig.2 Mass thickness measurements before and after air density correction

2.2.3 极片位置补偿 极片与探测器的距离变化测量出的面密度值示于表5。经回归分析得到面密度测量值与极片距离探测器的位置高度有较好的线性关系,线性相关度 R^2 为0.998。以

极片距离探测器 12.5 mm 为标准位置,在射线探测器中增加激光位移传感器,激光位移传感器在扫描过程中给出待测极片与探测器的距离,面密度测量仪依据实测距离与标准距离的差值,计算出位置补偿面密度。补偿系数由表 5 给出的极片位置的标定数据拟合得到,斜率: -16.40, 截距: 2.53。

表 5 极片在不同位置处的测量值
Table 5 Measurements of the pole pieces
at different positions

极片与探测器的距离/mm	测量值/(g·m ⁻²)
4.5	486.83
6.5	463.40
9.5	411.55
12.5	357.34
14.5	325.03
16.5	293.17
18.5	263.74

调整测量间隙内的极片张力,极片在距离标准位置 ± 2 mm 范围内位置波动,依据拟合的定量关系进行面密度误差补偿,面密度测量值偏差由补偿前的 32 g/m² 减小至 2 g/m²,补偿前后的测量面密度示于图 3。安装射线探测器的入射窗准直器会减少散射射线的进入,改善位置误差效应。

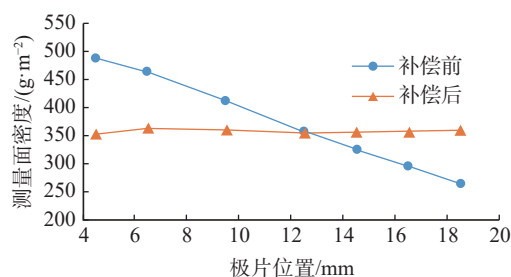


图 3 极片位置补偿前后的测量面密度

Fig.3 Mass thickness measurements before and after position correction

2.2.4 源活度衰减补偿 ⁸⁵Kr 测厚源的 λ 约为 0.0648 a^{-1} ,按照面密度测量仪系统偏差 γ_A 小于 0.1% 的要求计算, $t = 0.015 \text{ a} = 5 \text{ d}$,即为补偿活度衰减引起的系统偏差,至少需要每 5 d 补偿一次零点 I_0 。在面密度测量仪扫描运动过程中,完全可以利用⁸⁵Kr 测厚源移动出极片带两侧的时机实现空气零点测量,加快了修正频次。

2.3 比对结果

面密度测量值与称重值的比对结果示于图 4。对该组比对样数据分析:测量极差为 0.83 g/m^2 ,测量相对标准偏差为 0.08%。该台⁸⁵Kr 面密度测量仪的测量性能满足产线中极片面密度的测量需求。

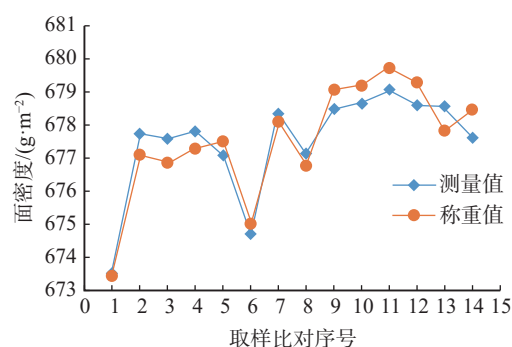


图 4 面密度测量值与称重值的比对

Fig.4 Comparison of measured data and weighed data

3 结论与展望

通过对不同规格⁸⁵Kr 测厚源的对比测试,在锂电池极片涂布面密度精密测量的场合较宜选用 25 μm 厚钛窗、活性区底面积大、装载活度 18.5 GBq 的⁸⁵Kr 测厚源。经定量分析,⁸⁵Kr 测厚源输出的 β 射线透射极片后的强度衰减吸收值与极片涂布面密度值具有高线性相关度,回归方程可作为面密度测量仪的标定公式。研究发现在涂布产线中极片的高温 and 位置移动工况会严重影响对⁸⁵Kr 的 β 射线测量,需要监控 β 射线传输路径内空气温度和极片位置的变化,由定量关系补偿面密度的测量误差。通过增加测量仪的空气零点测量频次可以有效修正⁸⁵Kr 测厚源的活度衰减引起的测量系统误差。经实际比对,应用⁸⁵Kr 测厚源的极片涂布面密度测量仪的测量精度优于 0.1%。

使用⁸⁵Kr 测厚源的面密度测量仪以非接触式测量,直接给出面密度测量结果,在锂电产线具有普遍的应用。单条锂电池负极涂布产线至少需要单面和双面两台面密度在线测量仪,随着新能源锂电行业近年来爆发式的增长,⁸⁵Kr 测厚源的使用量巨大,仅锂电行业每年应用量就达数百枚。但是目前锂电池涂布工艺多样,通用外形规格的⁸⁵Kr 测厚源射线输出斑大,测量区域大,在窄条纹斑马涂布、间歇涂布、极片

两端削薄区等小区域,需要高分辨力测量的场合还不能达到满意的结果,需要根据涂布工艺制造相适应形状的 ^{85}Kr 测厚源,例如活性区横向宽度为4 mm或6 mm的矩形大活度测厚源,以更好的满足锂电池产线的需求。

参考文献:

- [1] 王云辉,孙青山,李松鞠. β 射线在锂离子电池生产中的应用[J]. 电池, 2018, 48(5): 347-349.
Wang Yunhui, Sun Qingshan, Li Songju. Application of β -ray online measurement technique in Li-ion battery production[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(5): 347-349 (in Chinese).
- [2] 彭怡刚,梁斌斌,王子默,等. ^{85}Kr 测厚源的输出性能研究[J]. 同位素, 2021, 34(2): 127-132.
Peng Yigang, Liang Binbin, Wang Zimo, et al. Research for output performance of the ^{85}Kr thickness gauge source[J]. Journal of Isotopes, 2021, 34(2): 127-132 (in Chinese).
- [3] 王其俊. 同位素仪表[M]. 北京: 原子能出版社, 1984: 15.
- [4] 刘以思. β 测厚仪[J]. 核电子学与探测技术, 1995, 15(3): 161-166.
Liu Yisi. β thickness gauge[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1995, 15(3): 161-166 (in Chinese).
- [5] 李钢,侯跃新,周东亮,等. 纸张定量检测中放射源强度的选择[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(5): 1189-1192.
Li Gang, Hou Yuexin, Zhou Dongliang, et al. Selection of intensity of radioactive source in measuring basic weight of paper[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(5): 1189-1192 (in Chinese).
- [6] 李念祖,宋德滨,吴国良,等. ZD-1型纸张定量监测及控制系统[J]. 核电子学与探测技术, 1988, 8(1): 13-17.
Li Nianzu, Song Debin, Wu Guoliang, et al. Model ZD-1 paper base weight measurement and control system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1988, 8(1): 13-17 (in Chinese).
- [7] 胡连华,李新平,汤伟. 采用 β 射线精确测量纸张定量的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(7): 869-872.
Hu Lianhua, Li Xinping, Tang Wei. The research on accurate measurement of paper basis weight by using beta ray[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(7): 869-872 (in Chinese).
- [8] 陈伯显,张智. 核辐射物理及探测学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011: 383.
- [9] 刘以思,谄大卫,周立业. γ 测厚仪的设计[J]. 核电子学与探测技术, 1996, 16(1): 28-32.
Liu Yisi, Mo Dawei, Zhou Liye. The design of γ thickness gauge[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1996, 16(1): 28-32 (in Chinese).
- [10] 曾庆德. 透射式同位素测厚仪原理及放射源的选择[J]. 哈尔滨科学技术大学学报, 1986(3): 62-68.
Zeng Qinde. The principle of transmissive isotope thickness measuring instrument and the selection of radiator[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 1986(3): 62-68 (in Chinese).
- [11] 梁斌斌,彭怡刚,王子默,等. ^{85}Kr 测厚源制备及焊接性能分析[J]. 同位素, 2022, 35(6): 519-524.
Liang Binbin, Peng Yigang, Wang Zimo, et al. The preparation and welding of ^{85}Kr thickness gauge source[J]. Journal of Isotopes, 2022, 35(6): 519-524 (in Chinese).