

# 低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪效率校准研究

常钟泽 漆明森 程 瑛 许 苈 王 旭 洪永侠

(中国核动力研究设计院一所,成都 610005)

**摘 要** 简述了低本底  $\alpha$ 、 $\beta$  测量仪效率校准的基本原理,研究了自吸收和面积与探测效率的关系,评定了效率校准中的不确定度,并分析了效率在  $\alpha$ 、 $\beta$  样品测量中的应用。

**关键词** 低本底  $\alpha$ 、 $\beta$  测量仪 效率校准 自吸收 面积

## The Research of Efficiency Calibration of Low-background $\alpha$ , $\beta$ -measuring Instrument

CHANG Zhong-ze QI Ming-sen CHENG Ying XU Jin WANG Xu HONG Yong-xia

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610005)

**Abstract** This paper gives a sketch of the basic principle of low-background  $\alpha$ ,  $\beta$ -measuring instrument. It explores the relationship between the self-absorption, area and measuring efficiency. It gives out that the uncertain degree of efficiency calibration and analyses the application for the measuring of  $\alpha$ ,  $\beta$ -samples with efficiency.

**Key words** Low-background  $\alpha$ ,  $\beta$ -measuring instrument Efficiency calibration Self-absorption Area

## 1 引 言

低本底  $\alpha$ 、 $\beta$  测量仪具有测量灵敏度高、本底低、仪器长期稳定性好等特点,因此广泛用于环境样品、退役样品、核电站、反应堆、进出口商品、饮用水、医药卫生、同位素生产、生物样品等方面的弱  $\alpha$ 、 $\beta$  放射性测量,是一种不可或缺的常规测量手段<sup>[1]</sup>。

低本底  $\alpha$ 、 $\beta$  测量仪是相对测量装置,效率校准的准确度是保证测量装置量值准确可靠的重要前提,而效率与源的自吸收、被校样品尺寸等因素有关。本工作制备了不同尺寸的<sup>40</sup>K 标准源样品,分别对低本底  $\alpha$ 、 $\beta$  测量仪进行效率校准,研究了样品尺寸、自吸收等与探测效率的关系,为弱  $\beta$  放射性活度量值传递的准确可靠提供了计量保障。

## 2 测量设备

### 2.1 天平

天平选用 AG245 型电子微量天平,用于对标准物质进行称量,其主要技术指标如下:

- 测量范围:0.01mg ~ 41g;
- 允许误差极限:0.01mg。

### 2.2 低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪

低本底  $\alpha$ 、 $\beta$  测量仪采用 FJ-2600 中面积低本底测量仪,该测量仪主要用于测量微弱放射性样品中的  $\alpha$ 、 $\beta$  放射性强度,其主要技术指标如下:

- A 本底计数率不大于 0.4cpm,  $\beta$  本底计数率不大于 4cpm;

- $\beta$  高压: 2.8kV, 阈值: 3.0;
- 工作气体: 纯度为 99.99% 的甲烷, 流量: 约 20ml/min;
- 测量的基本误差:  $\leq \pm 15\%$ 。

### 2.3 样品托盘

样品托盘采用不锈钢托盘, 尺寸共 5 种, 分别为  $\Phi 24$ 、 $\Phi 30$ 、 $\Phi 38$ 、 $\Phi 44$  和  $\Phi 50$ 。

### 2.4 标准物质

采用分析纯 KCl 晶体, 比活度为 14.6Bq/g。

### 2.5 筛子

采用 100 目不锈钢筛, 孔径为 0.154mm。

### 2.6 烘箱

采用 DB-210SCB 型电热鼓风恒温干燥箱, 其主要技术指标如下:

- 温度范围: 10℃ ~ 300℃;
- 功率: 3kW。

### 2.7 无水乙醇

采用分析纯无水乙醇, 乙醇含量不小于 99.7%。

## 3 样品的制备

选取不锈钢样品托盘 12 个, 用普通水清洗, 烘干后用无水乙醇清洗, 晾干后用一次蒸馏水冲洗后, 烘干并编号。

将 KCl 晶体置于研钵中研磨, 经筛子过筛, 105℃ 烘烤 4 小时以上后, 反复称量、烘烤直至恒重。

将收集到的标准物质按所需质量通过筛子均匀地撒在不锈钢样品托盘中。

用以上方法制得两组样品, 共 12 个。

## 4 效率校准

### 4.1 校准原理

使用已知活度  $A$  的标准源对低本底  $\alpha, \beta$  测量仪进行活度效率校准。测量得到样品计数率为  $n$ , 本底计数率为  $n_b$ , 根据式(1)得到  $\beta$  活度探测效率  $\eta$

$$\eta = \frac{n - n_b}{A} \quad (1)$$

很多情况下我们还会采用另一种探测效率, 称之为表面发射率探测效率, 其计算公式(2)如下所示

$$\eta' = \frac{n - n_b}{q_{2\pi}} \quad (2)$$

式中:  $\eta'$  ——表面发射率探测效率;  $q_{2\pi}$  ——标准源表面发射率。

### 4.2 探测效率的应用

低本底  $\alpha, \beta$  测量仪是相对测量装置, 效率校准的准确度在保证测量仪量值准确可靠中至关重要。

在检测工作中, 当样品的尺寸与检定/校准所用标准源尺寸相当时, 用已经进行了效率校准的低本底  $\alpha, \beta$  测量仪对检测样品进行测量后, 可根据下式直接计算得出样品的总  $\beta$  活度

$$A = \frac{n - n'}{\eta}$$

式中:  $\eta$  ——活度效率。

同样, 如果采用表面发射率效率  $\eta'$ , 则

$$q_{2\pi} = \frac{n - n'}{\eta'}$$

$$A = q_{2\pi} / \varepsilon_s$$

式中:  $\varepsilon_s$  ——源效率,  $\varepsilon_s$  与射线能量、衬底材料和源结构等因素有关。GBT 14056.1-2008《表面污染测定 第一部分  $\beta$  发射体 ( $E_{\beta \max} 0.15\text{MeV}$ ) 和  $\alpha$  发射体》中推荐, 对  $\beta$  标准平面源  $\varepsilon_s = 0.5^{[2]}$ 。

当样品的尺寸与检定/校准所用标准源尺寸不同时, 用已经进行了效率校准的低本底  $\alpha, \beta$  测量仪对检测样品进行测量后, 样品的总  $\beta$  活度的计算也需进行自吸收修正与面积修正如下

$$A = \frac{n - n'}{\eta} k_c k_s$$

$$A = \frac{n - n'}{\eta' / \varepsilon_s} k_c k_s$$

式中,  $k_c$  ——自吸收修正因子;  $k_s$  ——面积修正因子。

### 4.3 样品活度及表面发射率的确定

准确称量 KCl 晶体的质量  $m$ , 已知 KCl 晶体比活度  $a$ , 根据下式计算得到样品总  $\beta$  活度  $A$

$$A = ma$$

式中:  $a$  ——KCl 晶体比活度, 14.6Bq/g。

对于标准源表面发射率  $q_{2\pi}$ , 可直接通过  $2\pi$  多丝正比计数器测定。

### 4.4 自吸收修正因子的确定

平面源的自吸收是源材料本身对自身发射的  $\beta$  辐射的吸收, 将导致计数率的显著降低, 从而影响活度效率校准。源材料质量厚度越大, 对计数率和效率

的影响越大。

用低本底  $\alpha, \beta$  测量仪对面积为  $\varphi 25$  而质量厚度不同的 7 个样品进行测量, 得到样品计数率, 按式

(1) 计算得到活度探测效率, 样品测量数据如表 1 所示。

表 1 样品效率校准测量数据

编号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>
计数率 ( $\text{min}^{-1}$ )	237.3	444.2	599.0	662.7	720.1	746.0	769.8
重复性 (%)	0.87	1.27	1.13	0.12	1.31	0.68	0.81
质量厚度 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.028	0.066	0.108	0.135	0.168	0.187	0.193
活度探测效率 (%)	0.494 87	0.392 91	0.323 19	0.285 71	0.248 81	0.231 55	0.232 20

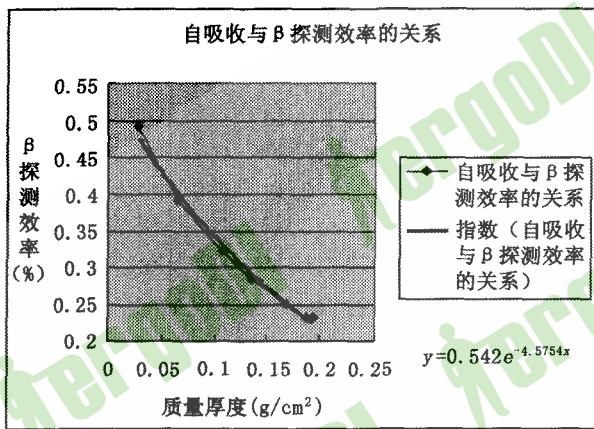


图 1 自吸收与活度探测效率关系图

如图 1 所示, 将表 1 的结果用最小二乘法按指数拟合, 得到式(3)

$$\varepsilon = 0.542e^{-4.5754m} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon$ ——对应于质量厚度为  $m$  时的活度探测效率; 0.542——质量厚度为 0 (无自吸收) 时的活度探测效率; 4.5754——吸收系数;  $m$ ——质量厚度,  $\text{g}/\text{cm}^2$ 。

则

$$k_c = e^{4.5754m}$$

当质量厚度为  $200\text{mg}/\text{cm}^2$  时,  $k_c = 2.197$ ;

当质量厚度为  $300\text{mg}/\text{cm}^2$  时,  $k_c = 3.946$ ;

当质量厚度为  $400\text{mg}/\text{cm}^2$  时,  $k_c = 6.235$ 。

#### 4.5 面积修正因子的确定

在进行探测效率测试中, 因放射源尺寸的不同, 致使源对探测器构成的几何因子不同, 几何因子是决定探测效率的主要因素之一。效率校准时所用标准源的活性区的面积应与探测器灵敏面积相当, 此

时几何因子为 1; 否则应根据放射源的尺寸对几何因子进行修正<sup>[3]</sup>。

用低本底  $\alpha, \beta$  测量仪对质量厚度为  $0.094\text{g}/\text{cm}^2$  而面积不同的 5 个样品进行测量, 得到样品计数率, 按式(1) 计算得到活度探测效率, 样品测量数据如表 2 所示。

表 2 样品效率校准测量数据

编号	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>	10 <sup>#</sup>	11 <sup>#</sup>	12 <sup>#</sup>
计数率 ( $\text{min}^{-1}$ )	138.6	214.5	336.9	448.5	545.6
重复性 (%)	2.30	0.79	0.49	0.68	1.63
表面半径 (mm)	12	15	19	22	25
活度探测效率 (%)	0.370 98	0.370 78	0.361 80	0.357 05	0.337 62

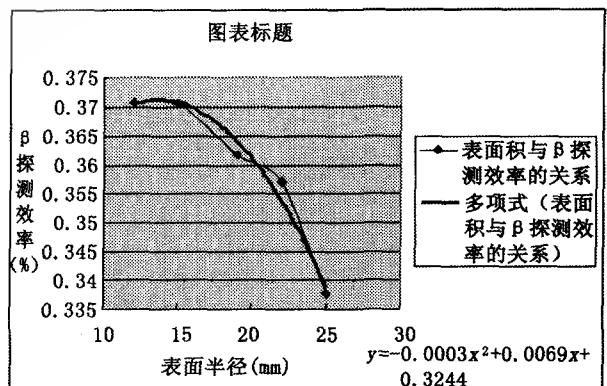


图 2 面积与计数率关系图

如图2所示,将表2的结果用最小二乘法按二项式拟合,得到式(4)

$$\varepsilon' = -0.0003x^2 + 0.0069x + 0.3244 \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon'$ ——对应于表面半径为  $x$  且质量厚度一定时的活度探测效率;  $x$ ——样品表面半径, mm。

如果面积按  $\varphi 50$  进行归一, 得到

$$k_{sp20/\varphi 50} = 1.175$$

$$k_{sp30/\varphi 50} = 1.165$$

$$k_{sp40/\varphi 50} = 1.107$$

#### 4.6 样品活度测量结果的不确定度评定

活度活度探测效率  $\eta$  的数学模型为

$$\eta = \frac{n - n_b}{A} k_c k_s$$

##### 4.6.1 输入量 $n$ 的不确定度 $u_1$ 评定

输入量  $n$  的不确定度主要来源于样品测量时计数统计引入的不确定度, 可以通过连续测量得到, 采用 A 类方法评定。

选用 FJ-2600 中面积低本底测量仪对标准源样品连续测量 6 次, 数据见表 3。

表3 标准源样品的计数统计测量数据

标准源 样品	计数率( $\text{min}^{-1}$ )					
$\beta$	721.1	728.8	737.3	711.2	721.7	733.4

用单次实验相对标准偏差表示计数统计引入的不确定度, 其计算公式如下

$$s = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x})^2}{j-1}} = 1.31\%$$

式中:  $s$ ——单次实验相对标准偏差;  $\bar{x}$ ——测量平均值;  $x_i$ ——单次测量值;  $j$ ——测量次数。

测量次数为 6 次, 测量结果采用平均值, 则输入量  $n$  的不确定度为

$$u_1 = \frac{1.31\%}{\sqrt{6}} = 0.54\%$$

##### 4.6.2 输入量 $n_b$ 的不确定度 $u_2$ 评定

输入量  $n_b$  的不确定度主要来源于仪器本底的统计涨落, 可以通过连续测量本底得到, 采用 A 类

方法评定,  $\beta$  本底计数测量结果见表 4。

表4 仪器本底测量结果

测量 名称	本底计数率( $\text{min}^{-1}$ )					平均值 ( $\text{min}^{-1}$ )	标准 偏差
$\beta$	5.8	5.2	4.8	4.4	6.2	5.29	0.14

用本底测量的标准偏差与  $\beta$  测量平均值减去本底平均值之差的比值表示本底计数统计涨落引入的不确定度, 数据处理如下

$$u_2 = \frac{0.14}{193.1 - 5.29} \times 100\% = 0.08\%$$

##### 4.6.3 输入量 $A$ 的不确定度的评定

输入量  $A$  的不确定度主要包括样品的比活度和称量引入的不确定度, 采用 B 类方法评定。

(1) 样品比活度的不确定度  $u_3$  的评定

分析纯 KCl 晶体的比活度为  $(14.6 \pm 0.2) \text{ Bq/g}$ , 则样品比活度的不确定度为

$$u_3 = \frac{0.2}{14.6} \times 100\% = 1.4\%$$

(2) 称量的不确定度  $u_4$  的评定

由 AG245 天平的检定证书可知, 在  $(0 \sim 41) \text{ g}$  范围内, 天平的极差为  $\pm \frac{1}{2} \sqrt{0.00011^2 + 0.00012^2}$

$\approx \pm 0.000081 \text{ g}$ , 其半区间宽度即为  $0.000081 \text{ g}$ , 在区间内认为服从均匀分布, 包含因子为  $\sqrt{3}$ 。因此, 天平的极差引入的不确定度为  $\frac{0.000081}{\sqrt{3}} \approx$

$0.000047 \text{ g}$ , 又根据称量样品的质量为  $295.4 \text{ mg}$ 。因此得到称量  $u_4$  引入的标准不确定度  $u_4$

$$u_4 = \frac{0.000047}{0.2954} \times 100\% = 0.02\%$$

##### 4.6.4 修正因子 $k_c$ 的不确定度 $u_5$ 的评定

按下式计算各个质量厚度的自吸收系数偏差  $\delta$

$$\delta_i = (y_i' - y_i) / y_i \times 100\%$$

式中:  $y_i'$ ——样品为某一质量厚度时实际校准所得的探测效率;  $y_i$ ——代入某一质量厚度时, 经拟合公式计算得到的探测效率。

质量厚度在  $(20 \sim 200) \text{ mg/cm}^2$  的范围内, 自吸收系数最大偏差小于 4%, 在此区间内, 认为服从均



均匀分布,包含因子取 $\sqrt{3}$ ,则标准不确定度

$$u_5 = \frac{4\%}{\sqrt{3}} = 2.4\%$$

#### 4.6.5 修正因子 $k_s$ 的不确定度 $u_6$ 的评定

按下式计算不同面积修正因子的偏差 $\delta'$

$$\delta'_i = (z'_i - z_i) / z_i \times 100\%$$

式中, $z'_i$ ——样品表面对应于某一半径时实际校准所得的探测效率; $z_i$ ——代入某一表面半径时,经拟合公式计算得到的探测效率。

经计算,样品表面半径在(10~25)mm的范围内,修正因子 $k_s$ 最大偏差小于10%,在此区间内,认为服从均匀分布,包含因子取 $\sqrt{3}$ ,则标准不确定度

$$u_6 = \frac{10\%}{\sqrt{3}} = 5.8\%$$

探测效率测量结果标准不确定度汇总见表6。

## 5 结束语

本工作将 $^{40}\text{K}$ 制成不同尺寸的标准源样品,分别对低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪进行效率校准:质量厚度为200mg/cm<sup>2</sup>时,自吸收修正因子为2.197;质量厚度为300mg/cm<sup>2</sup>时,自吸收修正因子为3.946;质量厚度为400mg/cm<sup>2</sup>时,自吸收修正因子为6.235; $\varphi 20$ 面积相对于 $\varphi 50$ 的面积修正因子为1.175; $\varphi 30$ 面积相对于 $\varphi 50$ 的面积修正因子为1.165; $\varphi 40$ 面积

表6 探测效率测量结果不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度分量(%)
$u_1$	计数统计	0.54
$u_2$	本底修正	0.08
$u_3$	样品比活度	1.4
$u_4$	称量	0.02
$u_5$	自吸收修正	2.4
$u_6$	面积修正	5.8
合成标准不确定度		6.5

相对于 $\varphi 50$ 的面积修正因子为1.107。因此,需要对检定/校准以及检测结果进行自吸收修正和面积修正。

本工作对低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪的效率校准进行了深入的研究,为低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪的校准及应用提供了重要参数,为 $\beta$ 放射性样品活度量值传递的准确可靠提供了计量保障。

### 参考文献

- [1] 容超凡. 电离辐射计量[M]. 北京:原子能出版社, 2002.
- [2] GBT 14056.1-2008 表面污染测定. 第一部分.  $\beta$ 发射体( $E_{\beta\text{max}}0.15\text{MeV}$ )和 $\alpha$ 发射体[S].
- [3] JJG 853-93 低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪检定规程.

## 《计测技术》2011年第1期目次

基于RBF神经网络的微惯性测量组合标定双轨法D-InSAR形变测量的误差分析

渗透法标准湿度发生器中渗透管的研制

数字图像处理技术在表面划痕测量中的应用

基于PC104总线的ARINC429航空接口卡计

电容式传声器自由场互易校准数据处理系统设计

提高F-P腔精细度方法的研究

单翼迷宫式滴灌带流量均匀度性能测试系统

移相干涉技术用于运动姿态精密测量

某型教练机副翼拉杆应力水平测试分析

稳态数字散斑测量仪校准方法探讨

无线局域网测试系统研究

基于ASP.NET的计量器具管理系统的设计

CCD多光谱辐射测温技术的应用与发展

飞机机翼结冰计算方法与风洞试验研究概况

大电流充放电电源的电流不确定度评定

酸度计检定及维修探讨

影响罗茨气体流量计计量准确性的原因分析