

# 放射性活度计灵敏度曲线测量及应用

姚顺和<sup>1</sup>, 汪建清<sup>1</sup>, 李景修<sup>2</sup>, 郭晓清<sup>1</sup>, 姚艳玲<sup>1</sup>

(1. 中国原子能科学研究院 计量测试部, 北京 102413;

2. 北京市通想高技术开发公司, 北京 100085)

**摘要:**利用已有标准样品的活度值和放射性活度计测量得到的电流值,在不同能量段对核素分段构造函数,拟合出灵敏度曲线。然后利用灵敏度曲线函数计算出待测核素的电流活度比,从而很好地解决了HD-175型放射性活度计的刻度问题。

**关键词:**HD-175型放射性活度计;电流活度比;灵敏度曲线

中图分类号:TL816

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2007)04-0480-04

## Sensitivity Curve Measurement and Application of Radioactivity Meter

YAO Shun-he<sup>1</sup>, WANG Jian-qing<sup>1</sup>, LI Jing-xiu<sup>2</sup>, GUO Xiao-qing<sup>1</sup>, YAO Yan-ling<sup>1</sup>

(1. *China Institute of Atomic Energy, P.O. Box 275-20, Beijing 102413, China;*

2. *Beijing Tongxiang High-Tech Development Co. LTD., Beijing 100085, China*)

**Abstract:** The paper describes the sensitivity curve measurements and applications for radioactivity meter. The energy-dependent sensitivity curve is established with the activity of standard sources and their corresponding current by constructing functions subsection. Thus the current-activity ratio is acquired from the sensitivity curve and the calibration of radioactivity meter is solved satisfactorily.

**Key words:** HD-175 radioactivity meter; current-activity ratio; sensitivity curve

以 $4\pi\gamma$  高压电离室为探测器的放射性活度计因具有使用方便、重复性高、长期稳定性好及量程范围宽等特点而被广泛采用,尤其是在同位素生产和医疗卫生部门得到了广泛应用。活度计的校准很繁杂,若活度计产品性能有很好的一致性,能刻度出1条可供所有产品使用的效率曲线,则可简化工作量。

有关活度计的校准,已做过很多研究<sup>[1-3]</sup>。Arata Suzuki等<sup>[1]</sup>对电离室灵敏度曲线做过仔

细研究,通过对几种标准源能量或进行平均或采取扣除等方法得到单能射线的灵敏度值,并给出了灵敏度曲线。本工作研究通过分段构造函数方法来拟合灵敏度曲线,并利用灵敏度函数计算核素的电流活度比,以期解决活度计的校准。

本工作是应北京市通想高技术开发公司的委托对其产品HD-175型放射性活度计进行校准工作的一部分。HD-175型放射性活度计的

微电流测量系统采用电流型放大器,其稳定性优良。该活度计采用铝作阱壁材料,因铝材密度低、低能 $\gamma$ 射线质量吸收系数小,因而可通过增大阱壁厚度来提高加工精度,使得产品性能的一致性和低能特性得到改善。

## 1 基本原理<sup>[2]</sup>

### 1.1 活度与电流的关系

放射性活度计是通过探测核素由激发态退激到基态的过程中所发射的 $\gamma$ 射线、 $X$ 射线在电离室中产生的电离电流来确定待测样品的活度。其中,一部分 $\gamma$ 射线与电离室壁作用产生高能电子,某些高能电子损失一些能量后进入灵敏区;此外,还有一部分 $\gamma$ 射线直接进入电离室灵敏区与工作气体发生相互作用而产生高能电子。这两部分高能电子又使灵敏区中的气体电离而形成大量离子对,在外加电场的作用下,离子对向两极漂移形成电离电流。设核素 $X$ 的活度为 $A_X$ ;衰变放出 $m$ 种 $\gamma$ 射线,其能量分别为 $E_j(j=1,2,\dots,m)$ ;相应能量下 $\gamma$ 射线发射几率为 $Y_j$ ; $\Omega$ 为电离室对放射源所张的立体角; $\epsilon(E_j)$ 是能量为 $E_j$ 的 $\gamma$ 射线被电离室探测到的部分占照射到电离室上的平均份额;被探测到的 $\gamma$ 射线,其能量一部分用于在灵敏体积中产生了离子对,另一部分则损失到电离室壁上, $\xi(E_j)$ 是产生离子对的能量占被探测到的 $\gamma$ 射线总能量的平均份额。活度为 $A_X$ 的核素 $X$ 在活度计中输出电流 $I_X$ 由下式决定:

$$I_X = \frac{2e}{\epsilon_0} \sum_{j=1}^m A_X Y_j \frac{\Omega}{4\pi} \epsilon(E_j) \xi(E_j) E_j \quad (1)$$

式中: $\epsilon_0$ 为在电离室气体中产生每个离子对所需的平均能量; $e$ 为1个电子的电荷; $\epsilon(E_j)$ 可通过 $\gamma$ 射线吸收规律计算,但 $\xi(E_j)$ 是一很难计算的函数。

### 1.2 灵敏度

对于某放射性核素 $X$ ,如果衰变产生1个能量为 $E_j$ 的单能 $\gamma$ 光子,则定义每 $3.7 \times 10^{10}$  Bq的核素 $X$ 在活度计中产生的电离电流与 $3.7 \times 10^{10}$  Bq的 $^{60}\text{Co}$ 源在同一活度计中产生的电离电流之比为活度计对核素 $X$ 的灵敏度,用 $S(E_j)$ 表示。由式(1)可得:

$$S(E_j) = \frac{\epsilon(E_j) \xi(E_j) E_j}{\epsilon(E_1) Y_1 \xi(E_1) E_1 + \epsilon(E_2) Y_2 \xi(E_2) E_2} \quad (2)$$

式中:分母部分为活度计对 $^{60}\text{Co}$ 源能量分别为1 173.2和1 332.5 keV的 $\gamma$ 射线的探测效率,对特定的活度计为一常数。灵敏度 $S(E_j)$ 为活度计对能量为 $E_j$ 、 $P_\gamma=100\%$ 的单能 $\gamma$ 射线的探测效率与 $^{60}\text{Co}$ 的探测效率之比。

### 1.3 电流活度比

任何待测核素 $X$ 的电流活度比定义为:

$$F_X = \frac{I_X}{A_X} \quad (3)$$

通常,活度计测量出的是电流,只有知道了电流活度比 $F_X$ ,才能把测量到的电流转换成活度。利用式(1)、(2)可得到:

$$F_X = F_{^{60}\text{Co}} \sum_{j=1}^m S(E_j) Y_j \quad (4)$$

式中, $F_{^{60}\text{Co}}$ 为 $^{60}\text{Co}$ 源电流活度比。

只要测定出活度计的灵敏度曲线 $S(E_j)$ ,利用式(4)即可计算出任何已知衰变信息的核素的电流活度比 $F_X$ ,从而计算出核素的活度。

## 2 标准源

### 2.1 标准放射源

所用标准源大部分为中国原子能科学研究院同位素研究所提供的放射性溶液。经该所的HPGe $\gamma$ 谱仪标准装置进行核纯分析,确保放射性溶液满足GB/T 10256—1997关于光子辐射核素的杂质含量 $\leq 0.1\%$ 的要求;利用 $4\pi\beta$ - $\gamma$ 符合测量标准装置、 $4\pi X(\text{PPC})$ - $\gamma$ 符合测量标准装置等准确测定其比活度;然后采用BIPM推荐的玻璃安瓿瓶(外径 $(16.5 \pm 0.3)$  mm,壁厚 $(0.6 \pm 0.1)$  mm)进行封装,溶液的取样量控制在 $(3.6 \pm 0.2)$  g范围内。

此外,还利用了1997年国防科工委放射性计量一级站组织全国比对的 $^{134}\text{Cs}$ 标准溶液、日本原子能研究所(JARI)的标准溶液和英国放射化中心的用于装置稳定性、重复性监测的 $^{226}\text{Ra}$ 密封标准源。

### 2.2 校准结果

表1列出2003年至2004年对北京通想高技术开发公司的HD-175型活度计的校准结果。其中, $F_{X_0}$ 是经过实验测量并根据式(3)计算而得到的电流活度比。

表1 HD-175型活度计(No.1)电流活度比

Table 1 Current-activity ratio of HD-175 radioactivity meter(No.1)

核素	校准日期	活度标准值 $A_X/\text{kBq}$	输出电流 $I_X/\text{pA}$	电流活度比 $F_{X0}/(\text{pA} \cdot \text{MBq}^{-1})$
$^{22}\text{Na}^{1)}$	2003-07-04	378.4	6.065	16.027
$^{54}\text{Mn}^{1)}$	2003-07-04	402.0	2.577	6.392
$^{133}\text{Ba}^{1)}$	2003-07-04	445.7	4.502	10.101
$^{241}\text{Am}^{1)}$	2003-07-04	787.0	1.502	1.909
$^{137}\text{Cs}^{1)}$	2003-07-04	464.2	2.318	4.994
$^{60}\text{Co}^{1)}$	2003-07-04	805.5	13.811	17.146
$^{88}\text{Y}^{1)}$	2004-03-04	470.7	8.266	17.563
$^{134}\text{Cs}^{2)}$	2003-07-04	471.7	5.918	12.547
$^{152}\text{Eu}^{3)}$	2003-07-04	1 448.5	18.522	12.787
$^{125}\text{I}^{4)}$	2004-04-07	1 160.8	4.871	4.196
$^{137}\text{Cs}^{5)}$	2004-04-19	3 850.7	18.593	4.829
$^{60}\text{Co}^{5)}$	2004-04-19	1 910.3	32.756	17.147
$^{88}\text{Y}^{5)}$	2004-04-19	1 139.2	19.649	17.248
$^{57}\text{Co}^{5)}$	2004-04-19	2 009.9	5.613	2.792
$^{139}\text{Ce}^{5)}$	2004-04-19	1 177.9	7.554	6.413

注:1) 该源为中国原子能科学研究院同位素所提供的安瓿瓶溶液

2) 该源为英国放化中心标准源

3) 该源为1997年国防科工委放射性计量一级站组织全国比对安瓿瓶溶液

4) 该源为外单位活度计送检带来的标准源

5) 该源为日本原子能研究所的安瓿瓶标准溶液,量值为我站 $\gamma$ 核素活度标准装置测量结果

### 3 灵敏度曲线

#### 3.1 曲线处理方法

首先利用现有标准样品的活度量值和电离电流的测量结果计算出电流活度比的实验值  $F_{X0}$ ;然后利用单能核素(如 $^{54}\text{Mn}$ 等)和 $^{60}\text{Co}$ 平均能量下灵敏度曲线的形状分段构造出函数式;再利用计算机调整函数中的参数使各函数段连续;最后用此函数计算每个标准源的电流活度比  $F_X$ ,并与  $F_{X0}$  进行比较。若某核素电流活度比  $F_X$  与实验值  $F_{X0}$  相差较大,则分析该核素能量与强度对电流活度比  $F_X$  的贡献,估计不理想函数段,从而调整该段的参数,重复上述过程,直到计算出的  $F_X$  与  $F_{X0}$  之间的偏差最小为止。由于所用的核素基本上都是发射多个能量 $\gamma$ 射线和X射线的核素, $F_X$ 是能量的多元函数,因此,分段构造出的函数不一定是惟一的,有一定的任意性。只有测量大量的各个能量段上的核素,经过反复拟合才可得到接近实际的曲线。

#### 3.2 灵敏度曲线和电流活度比计算值

图1是利用12个标准核素测量值拟合出的灵敏度曲线  $S(E)$ 。定义 $^{60}\text{Co}$ 的灵敏度恒为100%。

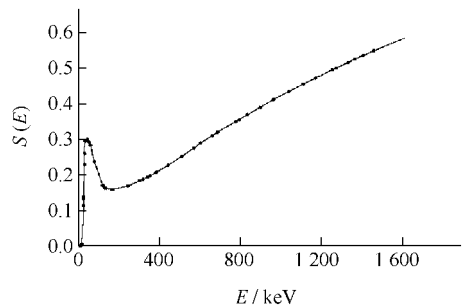


图1 灵敏度  $S(E)$  随能量  $E$  变化曲线

Fig. 1 Energy-dependent sensitivity curve  $S(E)$

当 $\gamma$ 射线的能量低于200 keV后,灵敏度随着能量的降低迅速升高,这是由低能 $\gamma$ 射线和X射线在灵敏区气体里的吸收截面快速增大而引起。当 $\gamma$ 射线的能量为约44 keV时,吸收截面增强和电离室并壁对 $\gamma$ 射线的吸收作用两种效应几乎相等,随着能量继续降低,并壁的吸收作用迅速增大,使灵敏度快速降至零。

表2列出了利用灵敏度函数  $S(E)$  计算的电流活度比  $F_X$  和采用标准源测量得到的电流活度比实验值  $F_{X0}$  以及两者之间的相对偏差。

表2 电流活度比实验值与灵敏度曲线计算值的比较

Table 2 Comparison of current-activity ratios for measured and calculated values from sensitivity curve

核素	标准源活度 $A_X/\text{kBq}$	电离电流 $I_X/\text{pA}$	电流活度比/ $(\text{pA} \cdot \text{MBq}^{-1})$		
			实验值 $F_{X0}$	计算值 $F_X$	相对偏差/%
$^{125}\text{I}$	1 160.8	4.870 9	4.196	4.076	2.8
$^{241}\text{Am}$	787.0	1.502 1	1.909	1.857	2.7
$^{57}\text{Co}$	2 009.9	5.612 4	2.792	2.836	1.5
$^{133}\text{Ba}$	445.7	4.502 0	10.101	9.903	2.0
$^{139}\text{Ce}$	1 177.9	7.554 1	6.413	6.413	0
$^{137}\text{Cs}$	3 850.7	18.593 1	4.829	4.917	1.8
$^{134}\text{Cs}$	471.7	5.919 3	12.547	12.428	0.9
$^{54}\text{Mn}$	402.0	2.569 7	6.392	6.402	0.1
$^{152}\text{Eu}$	1 448.5	18.521 7	12.787	12.854	0.5
$^{22}\text{Na}$	378.4	6.064 6	16.027	16.507	-2.9
$^{60}\text{Co}$	1 910.3	32.755 7	17.147	17.132	0.1
$^{88}\text{Y}$	1 139.2	19.648 8	17.248	17.463	-1.2

#### 4 结论

本工作测量了12个核素的标准溶液,利用标准核素测量值拟合出了HD-175型活度计的灵敏度曲线,利用灵敏度函数计算出了电流活度比。计算中用到的核素的 $\gamma$ 射线和X射线能量以及 $\gamma$ 射线发射几率取自2000年劳伦兹-伯克利国立实验室网站给出的资料,在计算中,12个标准核素的能量忽略了强度低于0.1%部分。这些核素的能量分布在2 000 keV之内各个函数段上。图1中只标出了强度较高的点。在灵敏度曲线拟合过程中发现,函数中参数的变化对电流活度比的变化敏感。电流活度比的实验值与利用曲线计算得到的结果之间的相对偏差在2.9%以内,这表明,本工作给出的灵敏度曲线已非常接近实际曲线。

从测量结果可以得到以下结论:

1) 实验测得的HD-175放射性活度计的灵敏度曲线形状与Arata Suzuki等给出的灵敏度曲线非常相似,这说明,HD-175活度计使用的电离室与Arata Suzuki等使用的电离室性能相似。

2) 从灵敏度曲线可以看出,HD-175活度计电离室低能探测限约为13 keV。在44 keV附近存在峰值,峰值的灵敏度为0.307;在

175 keV附近出现谷值,谷值的灵敏度为0.157 2。随着能量增加,灵敏度曲线呈弓形上升,约在 $^{60}\text{Co}$ 两个能量的平均值(1 252.9 keV)处灵敏度达到0.5,2 000 keV时灵敏度达到0.681 6。

3) 灵敏度曲线的测定为计算各种 $\gamma$ 放射性核素的电流活度比打下了基础,为各种 $\gamma$ 放射性核素的直接活度测量开辟了新途径。

#### 参考文献:

- [1] SUZUKI A, SUZUKI M N, WEIS A M. Analysis of a radioisotope calibrator[J]. Nuclear Medicine Technology, 1976, 4:193-198.
- [2] 汪建清.  $4\pi\gamma$  高气压电离室核素活度测量标准装置[J]. 原子能科学技术, 1994, 3:231-234. WANG Jianqing. The standard facility for nuclide activity measurement by  $4\pi\gamma$  high pressure ionization chamber[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1994, 3:231-234(in Chinese).
- [3] 褚晨, 韩旻晨.  $\gamma$  辐射核素放射性活度测量标准装置[J]. 原子能科学技术, 1994, 5: 444-450. CHU Chen, HAN Minchen. Standard apparatus for measuring activity of the  $\gamma$ -ray radionuclides [J]. Atomic Energy Science and Technology, 1994, 5:444-450(in Chinese).