

# 点源效率函数确定大体积样品的 HPGe 探测器 $\gamma$ 射线峰效率

田自宁, 张 洋, 贾明雁, 申茂泉, 雷 震

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 利用 HPGe  $\gamma$  谱仪, 用  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$  混合点源分别测量样品在 5 个高度上、不同剖面、不同位置的全能峰效率, 通过最小二乘拟合确定了点源峰效率函数的拟合参数, 用该点源效率函数对  $\phi 75\text{ mm}\times 25\text{ mm}$  的土壤样品的半径和高度数值积分计算可得到 59.54、661.66、1 173.2、1 332.5 keV  $\gamma$  射线全能峰效率。将点源效率函数数值积分计算的体源全能峰效率与实测标准体源全能峰效率以及 LabSOCS 无源效率刻度结果进行比较, 相对偏差在 10% 内符合, 说明该点源效率函数参数确定方法是正确的。同时, 该点源效率函数在计算任意几何形状的样品得到了应用, 积分计算了球状样品的探测效率, 并与 LabSOCS 无源效率刻度结果进行比较, 两者相对偏差在 10% 内符合。

**关键词:** 点源效率函数; 全能峰效率; 体源全能峰效率

中图分类号: TL81 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0439-06

## Point Source Function to Determine HPGe Detector $\gamma$ -ray Peak Efficiency for Large Volume Samples

TIAN Zi-ning, ZHANG Yang, JIA Ming-yan, SHEN Mao-quan, LEI Zhen

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Based on HPGe  $\gamma$  spectrometers, the full energy peak efficiencies at different height sample radius were obtained by the  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  mixed point sources, and the function parameters about the full energy peak efficiencies of point sources based on radius and height were fixed. The 59.54, 661.66, 1 173.2, 1 332.5 keV  $\gamma$ -ray's detection efficiencies of  $\phi 75\text{ mm}\times 25\text{ mm}$  sample were obtained, based on integrality radius and height of point sources. The detection efficiencies integrality by point sources function were consistent with the results of standard source and LabSOCS in 10%. Therefore, the calibration method of standard source is feasible. And this method was applied in calculating any shape sample. The integrality sphere source's detection efficiency was consistent with the results of LabSOCS in 10%.

**Key words:** function of point source; full energy efficiencies of sources; full energy efficiencies of stander sources

在放射性测量中, 确定 HPGe 探测器对放射源的探测效率<sup>[1]</sup>是其关键一环, 大多是以体

源为例开展的。在实际工作中可能会遇到各种几何形状的体源, 不可能对每种形状体源都制作标

收稿日期: 2010-05-13; 修回日期: 2010-07-23

作者简介: 田自宁 (1980—), 男, 新疆精河人, 工程师, 硕士, 核技术及应用专业

准源进行相对法测量。由于点源制作相对简单,因此在有些情况下可用点源模拟刻度不同质量的体源效率。目前,国内针对HPGe探测器点源效率函数及其参数的确定<sup>[2]</sup>有一定研究,主要用不同高度体源进行效率刻度实验以确定其函数参数,缺点是制作标准体源工作量和经济成本都很大,以及体源存在不均匀问题,会引入误差;优点是数据处理过程较简,减小了一部分计算误差。因此,本文使用点源对不同高度样品进行效率刻度研究。通过对点源在不同高度样品的不同半径上进行效率刻度,确定点源峰效率随样品高度和半径变化的函数参数,对点源效率函数进行数值积分确定了 $\phi 75\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 体源以及半径为3.75 cm的球状体源的峰效率值,并与LabSOCS无源效率刻度结果和实测值进行比较。

## 1 基本原理

对某一 $\gamma$ 射线能量 $E_\gamma$ ,不同高度点源效率随半径的变化如图1所示<sup>[3]</sup>。通常所用的体源多为圆柱状样品,可把它视作点源的集合。假定圆柱状源的几何位置与圆柱形HPGe探测器在同一轴上,则装样容器内的点源位置可用柱坐标(半径 $r$ 、角度 $\theta$ 、高度 $h$ )来表示(图2)。

设样品的体积为 $V$ ,高度为 $H$ ,截面积为 $S$ ,对该样品,能量为 $E_\gamma$ 的 $\gamma$ 射线峰效率 $\varepsilon_V^P(E_\gamma, H)$ ,可由体积元(点源)的 $\gamma$ 峰效率 $\varepsilon_p^P(E_\gamma, r, \theta, h)$ 积分求得:

$$\varepsilon_V^P(E_\gamma, H) = \frac{1}{V} \int_0^H \int_0^R \int_0^{2\pi} r \varepsilon_p^P(E_\gamma, r, \theta, h) d\theta dr dh \quad (1)$$

由于体源和探测器均是轴对称的且同轴, $\varepsilon_p^P$ 与 $\theta$ 无关,则:

$$\varepsilon_V^P(E_\gamma, H) = \frac{1}{V} \int_0^H \int_0^R 2\pi r \varepsilon_p^P(E_\gamma, r, h) dr dh \quad (2)$$

所用的体源若为球状源,假定球状源的几何位置与圆柱形HPGe探测器在同一个轴上,则装样容器内的点源位置可用球坐标( $r$ 、 $\theta$ 、 $\phi$ )来表示(图3)。

对该样品,能量为 $E_\gamma$ 的 $\gamma$ 射线峰效率 $\varepsilon_V^P(E_\gamma, H)$ ,可由体积元(点源)的 $\gamma$ 峰效率

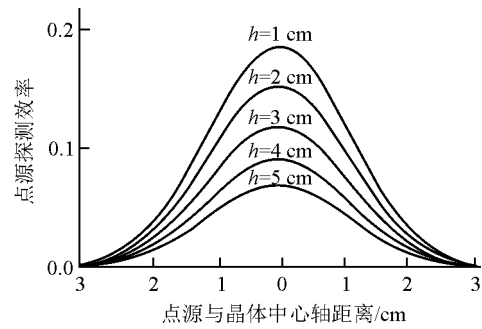


图1 HPGe  $\gamma$  探测器对点源的探测效率

Fig. 1 Efficiency of HPGe  $\gamma$  detector to point source

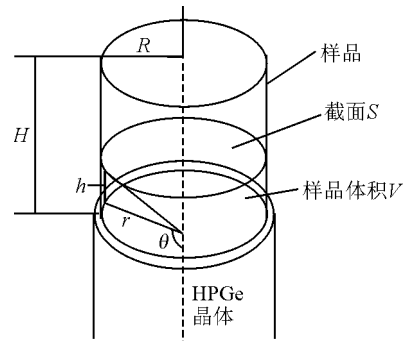


图2 圆柱状样品和HPGe  $\gamma$  探测器的几何配置

Fig. 2 Geometry of cylinder sample and HPGe  $\gamma$  detector

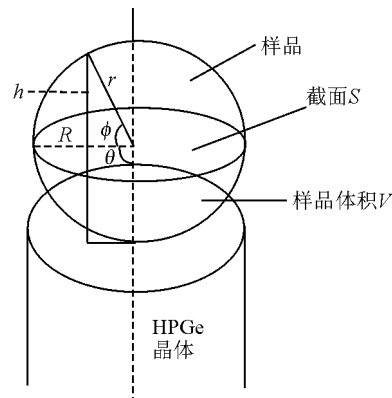


图3 球状样品和HPGe  $\gamma$  探测器的几何配置

Fig. 3 Geometry of isphere sample and HPGe  $\gamma$  detector

$\varepsilon_p^P(E_\gamma, r, \theta, \phi)$  积分求得:

$$\varepsilon_p^P(E_\gamma, R) = \frac{1}{V} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^R \sin \phi r^2 \varepsilon_p^P(E_\gamma, r', \theta, \phi) dr d\phi d\theta \quad (3)$$

由于球状体源和探测器均是轴对称的且同轴, $\varepsilon_p^P$ 与 $\theta$ 无关,即不随 $\theta$ 而变化。则:

$$\varepsilon_V^p(E_\gamma, R) = V^{-1} \cdot \int_0^\pi \int_0^R 2\pi r^2 \sin \phi \varepsilon_p^p(E_\gamma, r', \phi) dr d\phi \quad (4)$$

点源的探测效率只与其高度和距轴的半径有关，用球的半径  $r'$  和  $\phi$  表示为：

$$h = R + r' \cos \phi \quad (5)$$

$$r = r' \sin \phi \quad (6)$$

因此，将式 (5)、(6) 代入  $\varepsilon_p^p(E_\gamma, r, h)$  中可得  $\varepsilon_p^p(E_\gamma, r', \phi)$ 。

对于一定高度  $h$ ，点源效率与  $r$  之间的关系用高斯函数拟合，高斯峰址在  $r=0$  处，则可得表达式<sup>[4]</sup>：

$$\varepsilon_p^p(E_\gamma, r', h) = \varepsilon_p^p(E_\gamma, r=0, h) \cdot \exp\left[-2.773 \frac{r^2}{\Gamma(h)^2}\right] \quad (7)$$

式中： $\varepsilon_p^p(E_\gamma, r', \phi)$  为探测器对点源的探测效率； $\varepsilon_p^p(E_\gamma, r=0, h)$  为  $r=0$  时的峰效率； $\Gamma(h)$  为高斯函数的半高宽； $E_\gamma$  为  $\gamma$  射线的能量； $r$  为点源到探测器轴线的距离； $h$  为点源到探测器上表面的距离。

因此，问题的关键是确定点源效率函数  $\varepsilon_p^p(E_\gamma, r, h)$ ，其实验方法是用点源以  $E_\gamma$ 、 $r$ 、 $h$  为参数测定效率数据点，通过拟合方法确定合适的函数  $\varepsilon_p^p(E_\gamma, r, h)$ ，然后进行数值积分，从而得到体源的  $\varepsilon_V^p(E_\gamma, H)$ 。

能量为 59.54 keV 时，高斯函数的半高宽  $\Gamma(h)$  与点源高度关系用下面的半经验公式进行曲线拟合较合适：

$$\Gamma(h) = \frac{1}{a_1 h^2 + a_2 h + a_3} \quad (8)$$

能量为 661.66 和 1 173.2 keV 时，高斯函数的半高宽  $\Gamma(h)$  与点源高度的关系可用下面的半经验公式拟合：

$$\Gamma(h) = a_4 e^{a_5 h} \quad (9)$$

式中： $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  和  $a_5$  是待定系数，可由点源峰效率的实验值和高度根据最小二乘法拟合得到。

对于  $r=0$  时的峰效率  $\varepsilon(E, r=0, h)$ ，可

用下面的半经验公式<sup>[5-7]</sup>表示：

$$\varepsilon(E, r=0, h) = \frac{1}{a_6 h^2 + a_7 h + a_8} \quad (10)$$

式中  $a_6$ 、 $a_7$ 、 $a_8$  是待定系数，可由  $r=0$  时的点源峰效率实验值和高度根据最小二乘法拟合得到。

## 2 实验

### 2.1 实验仪器

测量采用 CANBERRA 公司生产的同轴型低本底 (LB) HPGe  $\gamma$  谱仪。该仪器的主要参数和性能指标如下：晶体尺寸  $\phi 70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ；相对效率 34.4%；对  $^{60}\text{Co}$  的 1 332.5 keV  $\gamma$  射线的能量分辨率为 1.70 keV，峰康比为 61 : 1；屏蔽室为 747 型低本底屏蔽室，20~1 500 keV 的积分本底计数率为  $1.6 \text{ s}^{-1}$ 。多道谱仪 (8 192 道) 的型号为 DSA1000，使用 Genie2000 “Gamma Acquisition & Analysis” 软件进行能谱的获取与处理。实验所用的标准点源和标准体源信息列于表 1、2。

表 1 标准点源信息

Table 1 Information of point source

核素	斑径 $\phi/\text{mm}$	活度/Bq	不确定度/% ( $k=2$ )	活度参 考日期
$^{241}\text{Am}$	3.0	589.2	2.1	2009.09.11
$^{137}\text{Cs}$	3.0	469.7	2.1	2009.09.11
$^{60}\text{Co}$	3.0	360.1	2.2	2009.09.11

注：中国原子能科学研究院制作

表 2  $\phi 75 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  标准体源信息

Table 2 Information of  $\phi 75 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  standard source

核素	源净质量/g	活度/Bq	活度参 考日期	不确定度/% ( $k=2$ )
$^{241}\text{Am}$	158.3	3 380	2003.3.27	5.4%
$^{137}\text{Cs}$	158.4	1 164	2003.3.27	4.0%
$^{60}\text{Co}$	158.2	1 023	2003.3.27	4.0%

注：国防科工委放射性计量一级站制作

用表 1 中的点源对谱仪进行能量刻度，用表 2 中的标准体源对谱仪进行效率刻度。

## 2.2 样品制备与测量

标准体源的成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的混合物, 其含量(质量分数)分别为 70%、25%和 5%。根据该成分配置“空白”土壤样品(不含人工放射性核素), 并制作与标准体源直径和密度( $1.44 \text{ g/cm}^3$ )相同的 5 个样品, 高度分别为 5、10、15、20、25 mm。在样品半径方向上, 从轴中心到边缘 6 等分, 并编号为 0、1、2、3、4、5。将样品测量点编号采用  $P$ - $N$  形式,  $P$  表示样品高度, mm;  $N$  表示点源从样品中心开始依次沿半径等分的编号。在不同高度上, 将点源分别放置在设定的各测量点进行测量。谱数据采集的结束条件为感兴趣的全能峰计数统计涨落  $< 0.5\%$ 。

## 3 数据结果与分析

通过 Genie2000 能谱获取与分析软件得到所关心核素能峰的全能峰计数, 并按照下述点源探测效率的计算式(11)计算点源探测效率:

$$\varepsilon(r_i) = N / (AP_\gamma t) \quad (11)$$

式中:  $N$  为峰计数;  $A$  为点源活度, Bq;  $P_\gamma$  为  $\gamma$  射线发射率;  $t$  为测量时间。探测效率列于表 3。

利用本文中介绍的原理及数据处理方法和表 2 中的实验数据, 对式(8)、(9)、(10)中的待定参数进行拟合, 结果列于表 4, 相关系数  $R^2 > 0.992$ 。

利用表 4 中的点源效率函数参数拟合的结果, 根据式(7), 对  $R=3.75 \text{ cm}$ 、 $H=2.5 \text{ cm}$  的标准圆柱形体源进行积分, 求得的 LB 探测器对圆柱形体源中各核素的探测效率列于表 5。

表 3 点源探测效率实验数据

Table 3 Experiment data of point source efficiencies

样品 编号	$10^4 \varepsilon(r_i)$			
	59.54 keV	661.66 keV	1 173.2 keV	1 332.5 keV
5-0	488	178	114	105
5-1	476	175	114	103
5-2	437	166	110	99
5-3	387	153	101	91
5-4	311	134	90	81
5-5	255	119	81	72
10-0	690	225	144	128
10-1	682	220	139	125
10-2	619	206	131	118
10-3	519	185	119	108
10-4	412	159	105	94
10-5	327	137	94	84
15-0	1 005	288	177	159
15-1	983	282	174	157
15-2	902	264	164	147
15-3	783	237	149	33
15-4	597	198	127	116
15-5	434	165	108	97
20-0	1 396	352	210	187
20-1	1 371	345	208	186
20-2	1 280	326	197	177
20-3	1 121	294	179	159
20-4	902	256	159	142
20-5	598	200	128	116
25-0	1 833	402	237	209
25-1	1 810	397	235	208
25-2	1 698	369	221	196
25-3	1 472	331	201	177
25-4	1 136	276	170	152
25-5	852	232	146	129

表 4 点源效率函数参数拟合结果

Table 4 Fitting results of parameters in efficiency function

能量/keV	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
59.54	0.569	-1.384	7.736	-	-	2.959	-1.399	5.469
661.66	-	-	-	6.610	0.161	5.678	-1.332	24.09
1 173.2	-	-	-	7.176	0.153	8.410	-2.776	41.61

对圆柱形样品, 取  $R=3.75 \text{ cm}$ ,  $H=2.5 \text{ cm}$ , 对 LabSOCS 无源效率刻度软件中相关参数进行设定后, 由该软件模拟计算的体源探测效率结果列于表 5。

从表 5 对点源效率函数计算出的圆柱形标

准体源探测效率结果和 LabSOCS 无源效率模拟计算及实测的体源探测效率结果的比对分析中可看出, 除低能部分与实测值的相对偏差为  $-11.3\%$  外, 其他相对偏差小于  $10\%$ , 数据比较吻合, 说明本文中给出的点源效率函数及其参数

确定的方法是有效可行的。

表 5 圆柱形模型结果比较

能量/ keV	点源效率		LabSOCS	相对	相对
	函数计算 结果	实测值	无源效率 模拟结果	偏差/ %	LabSOCS 偏差/%
59.54	0.086	0.097	0.094	-11	-8.5
661.66	0.023	0.025	0.023	-8.0	0.0
1 173.2	0.015	0.014	0.014	7.1	7.1

利用表 4 中的点源效率函数参数拟合的结果及式 (7) 点源效率函数, 对密度为  $1.44 \text{ g/cm}^3$ 、半径为  $3.75 \text{ cm}$  的球状体源进行积分, 并与 LabSOCS 无源效率模拟结果进行比较, 结果列于表 6, LabSOCS 的计算模型如图 4 所示。

表 6 球状模型结果比较

能量/ keV	点源效率函 数计算结果	LabSOCS 无源效 率模拟结果	相对 偏差/%
59.54	0.034 0	0.037 6	-9.6
661.66	0.012 0	0.011 1	8.1
1 173.2	0.007 60	0.006 94	9.5

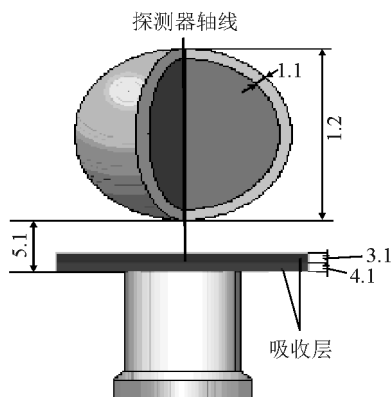


图 4 LabSOCS 球状模型几何配置及组成

Fig. 4 LabSOCS sphere model geometry and composer  
图中数字为对应软件界面需要输入的参数编号

从表 6 中可得出密度  $1.44 \text{ g/cm}^3$ 、半径  $3.75 \text{ cm}$  的球状体源点源效率函数积分结果, 与 LabSOCS 无源效率模拟结果进行比较, 两

者在 10% 内符合, 说明该点源效率函数可实现对  $1.44 \text{ g/cm}^3$  密度的任意形状样品的积分计算。

### 3 讨论

本文的点源效率函数主要存在以下优点:

1) 在没有标准体源的情况下可用点源效率函数直接积分计算体源效率; 2) 可以进一步计算任意形状和几何尺寸的样品的探测效率; 3) 由与理论计算及蒙卡计算存在晶体尺寸不确定<sup>[8-9]</sup>的因素, 点源效率函数不涉及晶体尺寸的问题, 因此不存在由于晶体尺寸不确定所带来的误差; 4) 点源刻度不存在源的均匀性问题, 而体源和面源都存在由均匀性引入的效率刻度误差, 因此点源刻度不会引入源均匀性误差。

本实验需注意以下主要问题: 1)  $1.0 \text{ mm}$  厚的样品盖会对低能  $\gamma$  射线探测效率引入较小误差, 可考虑进行修正; 2) 点源位置的准确控制会引入误差; 3) 点源活度的不确定度是本实验误差的主要来源。

用点源直接进行体源效率刻度方法存在以下缺陷: 1) 点源有一定直径 (一般  $\phi 3 \sim 5 \text{ mm}$ ), 对于近探测器测量, 就不能以“点”源对待; 2) 精确控制点源位置“点”的难度较大; 3) 该点源效率函数主要针对密度为  $1.44 \text{ g/cm}^3$  的样品, 对于不同密度的样品需考虑自吸收校正, 尤其对于低能  $\gamma$  射线。

### 4 结论

通过对放置在标准样品不同高度和不同半径处的标准点源测量, 以及对测量结果进行的数据处理和点源效率函数参数的拟合, 最终得到了所需的点源效率函数。并对求得的点源效率函数进行了圆柱形模型的积分, 同时还用 LabSOCS 无源效率软件模拟计算了该模型下的体源探测效率, 通过标准源的刻度得到了实测体源的探测效率, 三者结果在 10% 内符合较好。同时对该点源效率函数进行了推广应用, 积分计算了球状模型的探测效率, 并与 LabSOCS 计算结果在 10% 内符合。因此, 本文中给出的点源效率函数及其参数确定方法是有效可行的。

## 参考文献:

- [1] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1985: 344-345.
- [2] 王崇杰, 张爱莲, 吕建洲. HPGe  $\gamma$  探测器的点源效率函数及其参数确定[J]. 核技术, 2006, 29(1): 77-80.  
WANG Chongjie, ZHANG Ailian, LU Jianzhou. Efficiency function of HPGe  $\gamma$  detector to point sources and determination of its parameters[J]. Nuclear Techniques, 2006, 29(1): 77-80(in Chinese).
- [3] 高灿叶, 译.  $\gamma$  射线能谱分析[M]. 大连: 大连海运学院出版社, 1991: 110-113.
- [4] 庞巨丰.  $\gamma$  能谱数据分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1990: 318-327.
- [5] 屈国普, 龚学余, 金杰坤. NaI (TI) 晶体对面源全能峰效率刻度的点源模拟法[J]. 核电子学与探测技术, 1999, 19 (4): 311-313.  
QU Guopu, GONG Xueyu, JIN Jiekun. The peak efficiency calibration of plat source for NaI(Tl) detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1999, 19(4): 311-313(in Chinese).
- [6] 俞森标, 姜让荣. HPGe  $\gamma$  谱仪对体源的效率与源高度近似关系的验证[J]. 辐射防护, 1998, 18(4): 314-318.  
YU Senbiao, JIANG Randrong. Test of the relation of source height via volume efficiency with HPGe  $\gamma$  spectrometry[J]. Radiation Protection, 1998, 18(4): 314-318(in Chinese).
- [7] 何宗慧. 环境样品自吸收校正因子的计算和实验测定[J]. 辐射防护, 1990, 10 (5): 351-362.  
HE Zonghui. Calculation and experiment measurement of environment sample correction of self-absorption[J]. Radiation Protection, 1990, 10(5): 351-362(in Chinese).
- [8] BOSON J, AGREN G, JOHANSSON L. A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations [J]. Nucl Instrum Methods A, 2008, 587: 304-314.
- [9] 张斌全, 马吉增, 程建平, 等. 蒙特卡罗方法计算用于低能光子测量的高纯锗探测器的效率[J]. 核电子学与核技术, 2005, 25 (3): 274-277.  
ZHANG Binquan, MA Jizeng, CHENG Jianping, et al. Calculation of the detection efficiency of an HPGe detector in low energy photo measurement with Monto Carlo method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, 25(3): 274-277(in Chinese).