

基于无源效率刻度方法的实验室 γ 谱仪测量样品尺寸优化设计成智威^{1,2}, 申茂泉², 殷经鹏², 杨文静², 田自宁^{1,2}中图分类号: TL817⁺.2 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2013)05-0616-02

【摘要】 目的 实验室 HPGe γ 谱仪测量样品的几何尺寸优化设计, 针对一定质量的样品, 给出探测效率最高时样品的尺寸。方法 基于无源效率刻度方法, 计算出不同几何尺寸下的实验室 HPGe γ 谱仪对圆柱形聚乙烯盒封装的 1 500 g 土壤样品的探测效率, 作探测效率与样品盒直径的关系曲线, 求出探测效率最大时的直径范围。另外采集野外未受人为干扰的表层土壤分装在不同尺寸的聚乙烯盒内进行测量验证。结果 计算结果与实验测量值相吻合, 表明计算的效率曲线可靠, 对曲线进行多项式拟合后得出了最大效率处的几何尺寸。结论 基于无源效率刻度方法可以较方便可靠地对实验室 HPGe γ 谱仪测量样品的几何尺寸进行优化设计。

【关键词】 无源效率刻度; 实验室 HPGe γ 谱仪; 优化设计

实验室 γ 谱仪测量中, 探测效率的确定是重要的环节之一。国内外大多数实验室普遍采用标准物质制成若干放射性标准源, 然后进行测量而得到, 该方法存在的优点是测量数据可以溯源到国家认可的标准计量部门, 但测量时要求样品在几何尺寸、材质或密度与标准源相同或相近, 因而针对不同的样品需要制备相应的标准源, 在实际工作中需花费大量的人力、时间和经费, 尤其是在核应急监测等需要快速提供数据的工作中, 采用该方法就显得十分不方便。为解决这种难题, 实验室 γ 谱仪供应商针对所提供的特定探测器相继开发了无源效率刻度软件, 如美国的 CANBERRA 公司开发了 LabSOCS 软件^[1]。无源效率刻度采用 MCNP 蒙特卡罗方法进行计算, 因为厂家能够准确地描述探测器的内部构造, 并且利用各种放射性标准源进行检定, 所以其刻度结果在一定的不确定度范围内是可信的。国内利用无源效率刻度 LabSOCS 软件开展了大量的研究和实际应用工作, 主要用于探测效率计算、刻度结果的可靠性检验、样品自吸收因子的计算等工作^[2-6]。巨凌军等曾研究过利用无源效率刻度方法在实验室 γ 谱仪测量中最佳样品尺寸的问题^[2], 但未进行实验验证。笔者应用无源效率刻度方法, 对一定质量的土壤样品在不同几何尺寸下的探测效率进行计算, 找出最佳的探测效率, 从而对测量样品的几何尺寸进行优化设计, 避免制备大量放射性标准物质, 大大减少了工作量, 同时也减少了放射性废物的产生; 另外, 取野外未受人为干扰的表层土壤样品, 装入不同尺寸的圆柱形

聚乙烯盒中进行实验室 γ 谱仪测量, 对计算结果的可靠性进行了检验。

1 实验器材和方法

1.1 实验器材 美国 CANBERRA 公司生产的实验室 HPGe γ 谱仪系统一套^[1], 由低本底 HPGe 探测器、747 型 10 cm 厚低本底铅屏蔽室、DSA 1000 多道分析器、Genie 2000 谱采集与分析软件、LabSOCS 无源效率刻度软件、计算机等组成。由中国原子能科学研究院国防科工委放射性计量一级站提供的含 ^{137}Cs 、 ^{226}Ra 、 ^{238}U 的模拟土壤标准源各一个, 其几何尺寸为直径 75 mm 高 25 mm; 含 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的点源一个。不同尺寸的圆柱形聚乙烯盒若干; 不锈钢托盘若干; 电子天平一台; 塑料袋若干; 直尺一把; 40 目分样筛一套; 其他取样和制样工具等。

1.2 实验方法

1.2.1 无源效率计算 运行 CANBERRA 公司提供的 LabSOCS 无源效率刻度软件, 在软件中输入相应的探测器型号、样品盒尺寸、材质、土壤样品的尺寸、密度以及组成等关键参数, 参数输入界面如图 1 所示^[1]。其中土壤组成是质量比为 70% 的 SiO_2 、25% 的 Al_2O_3 和 5% 的 Fe_2O_3 , 选择所关注的 γ 射线能量为 63.3 keV、186 keV 和 661.66 keV。改变聚乙烯盒和土壤样品的尺寸, 由 LabSOCS 无源效率刻度软件计算后, 可得到不同尺寸下的所关注能量的探测效率。

1.2.2 实验测量 在野外采集未受到人为破坏的表层 (0~3 cm) 土壤样品 3 kg, 装入塑料袋, 送实验室, 置于托盘内自然晾干。过 40 目筛, 电子天平称 1 500 g 土壤样品装入塑料袋内待用。称 150 g 土壤样品装入

作者单位: 1 清华大学工程物理系, 北京 100084; 2 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

作者简介: 成智威 (1970-) 男, 江苏泰兴人, 汉族, 高级工程师, 清华大学工程物理系博士研究生, 从事辐射防护与环境保护工作。

直径 75 mm 高 25 mm 的圆柱形聚乙烯盒中,用胶带密封。

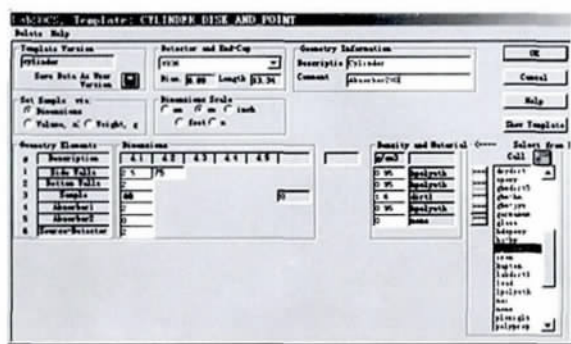


图 1 LabSOCS 无源效率刻度参数输入界面

用²⁴¹Am、¹³⁷Cs、⁶⁰Co 的点源对实验室 HPGe γ 谱仪进行能量刻度,用含¹³⁷Cs、²²⁶Ra、²³⁸U 的模拟土壤标准源分别进行效率刻度,然后对制备好的直径 75 mm 高 25 mm 圆柱形聚乙烯盒中的 150 g 土壤样品进行测量。用下式计算样品中的放射性比活度^[7]:

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot P_{\gamma} \cdot t \cdot m} \quad (1)$$

式中: A 为放射性核素的比活度, Bq/g; N 为 γ 射线的全能峰计数, cps; ε 为 γ 射线的探测效率, cps/Bq; P_{γ} 为 γ 射线的发射几率; t 为谱采集时间, s; m 为样品质量, g。

将 1 500 g 土壤样品装入直径 185 mm 高 68 mm 的圆柱形聚乙烯盒中,测量土壤样品的厚度并记录,密封后置于实验室 HPGe γ 谱仪的铅屏蔽室内,位于探测器正上方距前端面 12 mm 处,尽可能使圆柱形盒的中心轴与探测器的中心轴处于同一直线上,测量时间为 86 400 s。测量结束后,将该土壤样品依次装入直径 155 mm 高 68 mm、直径 110 mm 高 120 mm 的圆柱形聚乙烯盒中进行测量。不同几何尺寸下的探测效率由下式计算可得^[7]。

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot P_{\gamma} \cdot t \cdot m} \quad (2)$$

式中各参数同式 1,其中各核素的比活度与 150 g 土壤样品中的相等。

2 结果

应用 LabSOCS 无源效率刻度软件计算,实验室 HPGe γ 谱仪测量不同几何尺寸圆柱形聚乙烯盒中的 1 500 g 模拟土壤样品,得到所关注能量下的探测效率结果如表 1 所示,其中样品密度为 1.5 g/cm³。另外,三种不同尺寸圆柱形聚乙烯盒条件下的实验测量结果也列于表 1 中。

表 1 探测效率计算值和测量结果

直径 (mm)	样品厚度 (mm)	探测效率(cps/Bq)			数据来源
		63 keV	186 keV	661.66 keV	
357	10	0.0108	0.0113	0.00399	计算值
252	20	0.0153	0.0159	0.00560	计算值
206	30	0.0175	0.0181	0.00640	计算值
178	40	0.0182	0.0188	0.00670	计算值
160	50	0.0181	0.0187	0.00664	计算值
146	60	0.0177	0.0183	0.00649	计算值
135	70	0.0169	0.0174	0.00620	计算值
126	80	0.0163	0.0167	0.00593	计算值
119	90	0.0156	0.0159	0.00563	计算值
113	100	0.0149	0.0151	0.00534	计算值
108	110	0.0142	0.0143	0.00506	计算值
103	120	0.0136	0.0137	0.00481	计算值
185	37	0.0181	0.0188	0.00632	测量值
155	53	0.0182	0.0192	0.00627	测量值
110	105	0.0141	0.0158	0.00509	测量值

将表 1 中探测效率与聚乙烯盒直径的关系作曲线如图 2 所示。

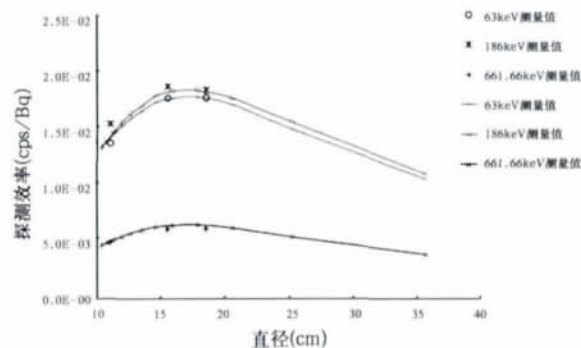


图 2 探测效率与聚乙烯盒直径的关系图

对三条曲线作 4 次多项式拟合后,对关系式进行求一阶导数,得到一阶导数值与直径的关系如图 3 所示。

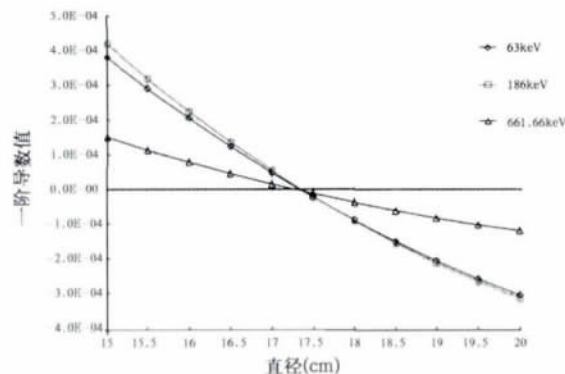


图 3 不同直径下的一阶导数值

3 讨论

从表 1 数据和图 2 关系曲线,可以看出基于无源效率刻度方法得到的不同尺寸样品的实验室 HPGe γ 谱仪探测效率和实验测量得到的数据相吻合,表明无源效率刻度方法在样品几何尺寸上的优化设计是可靠的。

体源近似屏蔽计算的两种方法

殷文娟¹, 吕 军²

中图分类号: R144.1 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2013)05-0618-02

【摘要】目的 解决体源的屏蔽计算。方法 采用模拟源计算方法和自吸收因子修正方法。结果 通过与 MCNP 程序计算结果进行比较,证明由两种模拟源计算方法得到的计算结果偏大,为保守估计。结论 这两种方法所得计算结果相同,在本质上是一种方法,同时也证明了所得到的自吸收因子公式的正确性。

【关键词】屏蔽计算;模拟源;自吸收因子;MCNP

在体源(即大体积放射源)的屏蔽计算中,如果对着接受体的源面积的长、宽都不超过源与接受体间的距离时,则可把体源近似为点源进行计算;而当上述条件不具备时,源介质的自吸收因素就是必须考虑的一个问题,可以有以下两种处理方法。

1 模拟源计算方法

体源计算中,当源厚度大于平均自由程并采用点源近似计算时,应采用一个模拟源,其体积等于平均自由程乘以源在接受体所在平面的投影面积,该平面垂直于接受体到源心的连线。以中放废液贮罐屏蔽计算为例,给定条件如下:

贮罐外形尺寸为直径 3 800 mm 高 5 000 mm,贮

罐中心与屏蔽层外表面的距离为 3 m。参考源项为:
 ^{137}Cs —— $1 \times 10^9 \text{ Bq/L}$; ^{60}Co —— $1 \times 10^8 \text{ Bq/L}$ 。照射量率常数: $\Gamma_{\text{Cs}} = 6.312 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; $\Gamma_{\text{Co}} = 2.503 \times 10^{-18} \text{ C} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [3]。源介质近似为水,则在水中的线性减弱系数为: $\mu_{\text{Cs}} = 8.957 \text{ m}^{-1}$; $\mu_{\text{Co}} = 6.413 \text{ m}^{-1}$ 。管理限值取 $H_{\text{lh}} = 100 \mu\text{Sv/h}$,设屏蔽介质为混凝土。

1.1 ^{137}Cs (0.662 MeV) 由 $\mu_{\text{Cs}} = 8.957 \text{ m}^{-1}$ 知,平均自由程 $\lambda = 0.1116 \text{ m}$,考虑源的自吸收之后,令 R 为圆柱体半径, H 为圆柱体高度,则模拟源的体积为 $V = \lambda \cdot 2R \cdot H = 2.1204 \text{ m}^3$,故近似源的活度为 $A_{\text{Cs}} = 2.1204 \times 10^{12} \text{ Bq}$ 。衰减倍数为:

$$K > \frac{1.4 \times 10^5 \times A_{\text{Cs}} \times \Gamma_{\text{Cs}}}{H_{\text{lh}} \times L^2} \approx 2.08 \times 10^2$$

查表:当 $K = 2 \times 10^2$ 时,屏蔽层厚度 $d = 49.3 \text{ cm}$;

作者单位:1 河北省辐射环境管理站,河北 石家庄 050091;2 中国核工程有限公司河北分公司,河北 石家庄 050011
作者简介:殷文娟(1981-),女,硕士,从事辐射环境监测管理工作。

从图 2 和图 3 中可以看出,对于我们使用的由 CANBERRA 公司生产的低本底实验室 HPG γ 谱仪,在测量 1 500 g 的土壤样品,采用圆柱形聚乙烯盒封装时,最佳几何尺寸为直径在 173 mm 和 174 mm 之间,当样品密度为 1.5 g/cm^3 时,此时样品厚度为 42 mm 左右。同理,应用无源效率刻度方法可以推广到其他基质材料、不同密度和质量样品的几何尺寸优化设计。

本文仅从保证探测效率最大这一单方面因素探讨了无源效率刻度方法在样品几何尺寸上的优化设计,实际实验室 HPG γ 谱仪测量工作中,还要多方面综合考虑本底谱中康普顿坪计数的影响、屏蔽室尺寸的限制、样品代表性、样品量及其密度等因素,来进行样品的最优化设计。

参考文献:

- [1] Genie2000 Customization Tools Manual [Z]. USA: CANBERRA, 2004.
- [2] 巨凌军,申茂泉,张洋,等. 无源效率刻度技术在 γ 谱仪分析中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 1: 39-43.
- [3] 曾奕,徐彬,陈立. 实验室无源效率刻度技术的准确性检验[J]. 四川环境, 2011, 6: 5-9.
- [4] 周程,王凤英,朱晓翔. 无源效率刻度方法的实验验证和分析[J]. 核技术, 2011, 8: 604-608.
- [5] 沈明,朱月龙,赵燕子. 环境辐射监测中 γ 谱仪无源效率刻度方法探讨[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 1: 116-121.
- [6] 陈立,马豪,曾志,等. 基于蒙特卡罗的 HPG γ 伽马谱仪无源效率刻度方法[J]. 强激光与粒子束, 2013, 1: 201-206.
- [7] 任天山,吴生财,等. 食物和环境样品中放射性核素的测量与评价[M]. 北京:原子能出版社, 1992: 45-61.

(收稿日期:2013-05-20)