《原子核物理评论》
www.npr.ac.cn Nuclear Physics Review
Started in 1984

基于虚拟刻度原理对放射性体源效率刻度方法的发展

许丰　郭建友　於国兵　徐平　张建

Development of Efficiency Calibration Method for Radioactive Volume Sources Based on Virtual Calibration Principle

XU Feng, GUO Jianyou, YU Guobing, XU Ping, Zhang Jian

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2021087

引用格式:
许丰, 郭建友, 於国兵, 徐平, 张建. 基于虚拟刻度原理对放射性体源效率刻度方法的发展[J]. 原子核物理评论, 2022, 39(3):352–358. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021087
XU Feng, GUO Jianyou, YU Guobing, XU Ping, Zhang Jian. Development of Efficiency Calibration Method for Radioactive Volume Sources Based on Virtual Calibration Principle[J]. Nuclear Physics Review, 2022, 39(3):352–358. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021087

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用MCNPX模拟研究不同中子源对有源符合中子法的影响
Study on the Influence of Different Neutron Source on the Active–well Neutron Coincidence Method by MCNPX
原子核物理评论. 2021, 38(2): 196–202　https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021003

基于粒子滤波和人工势场法的放射源搜寻方法
Search Method of Radioactive Source Based on Particle Filter and Artificial Potential Field
原子核物理评论. 2020, 37(4): 867–874　https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020030

医用加速器装置的离子源进气系统控制
Design of Ion Source Gas Control Used in Heavy Ion Medical Machine
原子核物理评论. 2019, 36(4): 441–446　https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.441

BC501A中子探测器的能量刻度及其在聚乙烯中子学积分实验中的应用
Electron Energy Calibration of BC501A Neutron Detector and Its Application in the polythene Neutronics Integral Experiment
原子核物理评论. 2017, 34(3): 586–590　https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.586

上海激光康普顿散射伽马源的发展和展望
Development and Prospect of Shanghai Laser Compton Scattering Gamma Source
原子核物理评论. 2020, 37(1): 53–63　https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019043

固态同位素 β 源选择对直充式核电池性能的影响
Influence of Solid Beta Sources Selection on Direct Charge Nuclear Battery
原子核物理评论. 2019, 36(2): 184–189　https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.184

文章编号: 1007-4627(2022)03-0352-07

基于虚拟刻度原理对放射性体源效率刻度方法的发展

许 丰[1], 郭建友[1,†], 於国兵[2], 徐 平[3], 张 建[4]

(1. 安徽大学物理与光电工程学院，合肥 230601；
2. 安徽省生态环境保护厅辐射环境监督站，合肥 230071；
3. 中国科学技术大学核科学技术学院，合肥 230027；
4. 成都理工大学核技术与自动化工程学院，成都 610059)

摘要: 采用蒙特卡罗模拟计算的方法，标定能够适用于不同HPGe探测器上的体源虚拟点源位置，需要对点源、体源的探测效率进行模拟计算。通过 ^{241}Am、^{137}Cs、^{60}Co 点源和体源研究了 HPGe 晶体尺寸、类型对它们的虚拟点源位置的影响，模拟结果表明 ^{241}Am 虚拟点源位置随着探测器尺寸、类型的不同呈现明显的差异性，说明虚拟刻度原理对于探测器表面的小体积样品测量在低能区间是不可取的，最后采用 ^{137}Cs、^{60}Co 源得出体源高度与虚拟点源位置的半经验公式。通过实验室两台 HPGe 探测系统对尺寸 Φ70 mm×65 mm 标准土壤体源的探测效率进行计算，与模拟探测效率值、虚拟点源效率表征结果对比分析，验证了拟合一组表征虚拟点源位置的半经验公式是可行的。实验结果表明，对γ能量区间在 300~2 000 keV 进行体源的虚拟刻度时，选择可靠的定标源即可建立体源和虚拟点源位置的关系。这为解决监测工作中样品与探测器之间重复进行探测效率校准的问题提供了新的途径。

关键词: 虚拟点源；效率刻度；LabSOCS；体源
中图分类号: TL81　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.39.2021087

1 引言

γ辐射探测仪器在环境放射性监测、出入境检验检疫、核应急等诸多领域有着广泛的应用。日常监测分析中也会碰到大量的体源样品，由于体源的几何形状不一以及介质本身自吸收系数的影响，致使探测效率随体源与探测器之间的空间位置的变化而有所差异。这就意味着在实际工作中需要对各类样品与探测器之间重复进行探测效率校准，成本高昂且耗时费力。随着蒙特卡罗方法的发展，基于无源效率刻度方法对放射源的探测效率计算逐步发展起来，相对于制作标准源模型，无源效率刻度方法的优势在于方便快捷，可以根据体源形状计算出探测效率，然而其缺点在于对探测器内部参数、样品的组成成分等信息仿真不够精确。

针对上述问题，1971 年 Notea 等[1]提出虚拟点探测器模型的概念，该模型在处理γ探测器效率刻度的过程中，被国内外有关学者广泛使用。通过蒙特卡罗模拟的方法[2−3]或者神经网络算法[4]研究不同探测器的有效作用深度[5](Effective Interaction Depth, EID)，该模型可实现对均匀面源、体源的效率刻度计算[6−7]，此外也有学者利用该方法研究放射源的搜寻、定位等[8]，这都极大地推动了该技术的进展。近年来，国内学者在该领域也取得了不错的进展[9−10]，其中西北核技术所 Tian[11]将虚拟点探测器刻度技术推广到现场测量工作中，并由此提出了虚拟刻度原理。虚拟刻度原理在面源及体源的虚拟点源位置计算[12−13]、放射性热点以及污染区域范围估算等方面[14]取得了较为成功的应用，展现出其在就地测量中不依赖于探测器进行重复表征的一定优势。考虑到在实验室环境样品监测工作中，常常会遇到由于γ辐射探测器种类及晶体尺寸多样[15−16]，得到的效率曲线经验公式往往仅针对于所研究的特定探测器可以使用[17−18]，即使遇到此类测量场景，也常会由于实验采样不足而需要进行几何修正[19]。综上所述，由于γ辐射探测器种类及晶体尺寸多样，关于单台探测器的虚拟点源测量方法及经验公式是否适用多台仪器就显得尤为重要。

收稿日期: 2021-11-25；　**修改日期:** 2022-01-25
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11935001)
作者简介: 许丰(1996−)，男，安徽铜陵人，硕士研究生，从事辐射监测技术研究；E-mail: xufengid@sina.com
† **通信作者:** 郭建友，E-mail: Jianyou@ahu.edu.cn

本文基于虚拟刻度原理，将分别建立多台HPGe同轴型及平面型探测器仿真模型，对体源中γ放射性核素^{241}Am、^{137}Cs、^{60}Co的虚拟点源位置进行表征，研究体源虚拟源位置的表征结果对探测器类型、能量的依赖性。

2　原理及方法

2.1　虚拟刻度原理

使用γ辐射探测器测量时，可以认为是射线与探测器等效点之间的作用，因此对于不同能量的γ射线，在探测器中心轴线上存在唯一代表点位置，该位置为探测器的有效作用深度，即EID。然后通过反比平方定律去计算任意空间位置的点源探测效率，这一概念被称为虚拟点探测器模型。而对于单个放射性面源或放射性体源样品采用γ辐射探测器进行辐射测量时，根据虚拟点探测器原理同样也可以对放射源样品虚拟化，因此在探测器中心对称轴线上，也应该有一个唯一的代表点位置(X_p)，该位置的放射性点源全能峰探测效率与所对应的放射性体源或面源的探测效率相等，将这一虚拟化的点源叫做放射性面源或放射性体源的虚拟点源(Virtual Point Source, VPS)[11]。因此利用虚拟刻度原理对面源或体源探测效率刻度的关键是虚拟点源位置的确定，原理示意图如图1所示，X_{VPS}为半径为R、高度H体源的虚拟点源位置，$\varepsilon_P(X_{VPS})$为虚拟点源(VPS)的效率，$\varepsilon_V(H,R)$为体源效率，EID为探测器的有效作用深度，探测器端面中心为坐标轴原点。

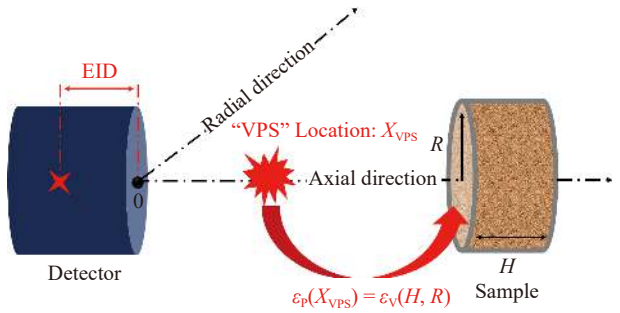

图 1　体源的虚拟点源刻度模型示意图(在线彩图)

2.2　虚拟点源(VPS)计算方法

本文以探测器端面中心处为坐标轴原点，将标准点源置于探测器表面对称轴上不同位置，获取其探测效率，然后采用指数函数拟合点源位置与探测效率的关系，具体函数形式如式(1)：

$$\varepsilon_P(x) = a e^{b \cdot X_P} + c_0, \tag{1}$$

式中：$\varepsilon_P(x)$表示点源在不同位置x时的探测效率；a、b表示拟合参数；c_0为指数函数常数项；X_P表示点源位置。然后将实验或理论计算得到的体源的探测效率$\varepsilon_V(H,R)$等于式(1)中应变量$\varepsilon_P(x)$，即可推出它的虚拟点源位置(X_{VPS})。虚拟点源位置(X_{VPS})计算公式如式(2)：

$$X_{VPS} = \frac{1}{b}\ln\left(\frac{\varepsilon_V(H,R) - c_0}{a}\right), \tag{2}$$

式中：下标V表示体源；$\varepsilon_V(H,R)$表示为体源探测效率，可以通过实验或模拟方法得到体源的探测效率。值得注意的是，日常辐射监测中由于标准体源的尺寸一般为标称，因此R为定值，而对于实际采样过程中，常常会遇到采样量不足导致几何高度不一致的情况，因此本文仅考虑体源高度H即可。最后计算出体源不同几何高度时虚拟点源位置，通过指数函数拟后，分析虚拟点源位置与体源高度的关系：

$$X_{VPS} = A \cdot e^{B \cdot H} + C, \tag{3}$$

式中：X_{VPS}表示不同尺寸的体源对应的虚拟点源位置；A、B、C为拟合参数；H为体源高度。

3　结果与讨论

3.1　体源的虚拟点源(VPS)位置标定过程

3.1.1　点源位置与探测效率的关系

探测效率的模拟计算采用无源效率刻度软件LabSOCS，该软件是由法国Canberra公司与美国Los Alamos国家实验室共同开发的产品，国内外学者或机构将该软件与传统的有源效率刻度技术进行对比研究，结论表明与传统方法的分析结果一致[20]，LabSOCS主要原理是通过建立MCNP模型，用一系列可溯源的多能量点源在多个位置对探测器进行验证以及仿真模型的优化[21]。考虑到测量工作中的实际需求，本工作分别模拟了四种同轴型探测器，晶体直径分别为Coaxial-1: Φ50.00 mm×48.05 mm、Coaxial-2: Φ60.06 mm×45.28 mm、Coaxial-3: Φ70.00 mm×60.00 mm、Coaxial-4: Φ81.06 mm×65.94 mm；三种平面型HPGe探测器，晶体直径分别为Planar-1: Φ59.94 mm×19.58 mm、Planar-2: Φ69.98 mm×25.18 mm、Planar-3: Φ78.44 mm×30.66 mm，然后分别模拟探测器轴线上方不同位置处^{241}Am(59 keV)、^{137}Cs(661.66 keV)、^{60}Co(1 332.49 keV)点源的探测效率。LabSOCS软件对点源仿真模型如图2所示，吸收介质层厚度$d_{4.1}$=0，$d_{5.1}$=0，源到探测器表面距离$d_{6.1}$=5, 15, ..., 65 mm，模拟计算过程中统计误差小于2%。

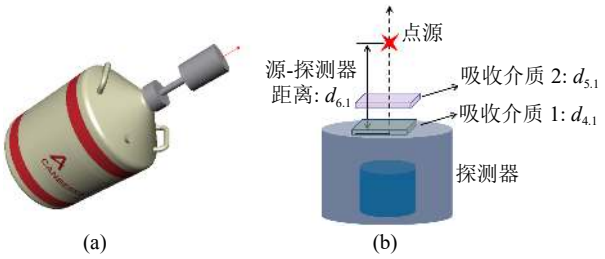

图 2　LabSOCS 点源仿真计算示意图(在线彩图)

(a) 为 LabSOCS 软件构建的点源模型；(b) 为点源计算模型的参数示意图。

结合多种尺寸及类型的无源表征文件，我们模拟计算了点源在不同位置处(点源与探测器端面中心处距离为 X_P，单位为 mm)探测器对 ^{241}Am、^{137}Cs、^{60}Co 的探测效率，结果图 3 所示。

通过图 3 可以看出，点源探测效率随着轴向位置变化呈现明显的指数变化规律，同时结合文献[11]，本实验选取式(1)对 ^{241}Am、^{137}Cs、^{60}Co 点源探测效率进行拟合，拟合的详细参数 a、b、c_0 以及拟合优度 R^2 如表 1 所列。

3.1.2　体源高度与探测效率关系

体源仿真模型采用实验室常见的核素均匀分布的固体样品，体源介质为标准土壤，元素占比分别为 Si: 32.7 %、Al: 13.2 %、Fe: 3.4 %、O: 50.6 %，密度

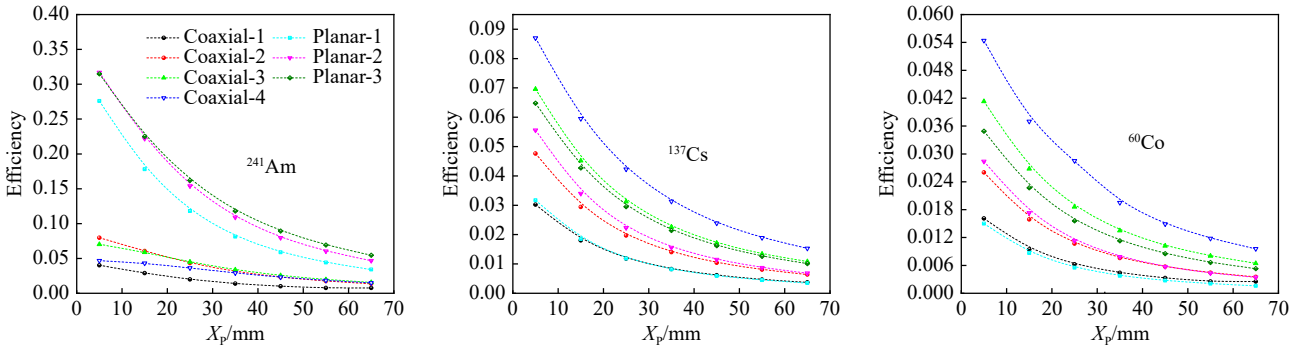

图 3　点源在探测器轴线上方不同位置的探测效率(虚线为指数函数拟合) (在线彩图)

表 1　点源位置(X_P)与探测效率关系曲线拟合

核素	探测器编号	c_0	α	b	R^2
^{241}Am(59.54 keV)	Coaxial-1	3.41×10^{-3}	4.57×10^{-2}	-4.10×10^{-2}	1.00
	Coaxial-2	6.46×10^{-4}	9.31×10^{-2}	-3.11×10^{-2}	1.00
	Coaxial-3	-9.58×10^{-3}	8.97×10^{-2}	-2.02×10^{-2}	0.99
	Coaxial-4	8.02	−7.97	7.09×10^{-5}	0.98
	Planar-1	2.08×10^{-2}	3.24×10^{-1}	-4.81×10^{-2}	1.00
	Planar-2	1.82×10^{-2}	3.65×10^{-1}	-3.94×10^{-2}	1.00
	Planar-3	2.36×10^{-2}	3.51×10^{-1}	-3.73×10^{-2}	1.00
^{137}Cs(661.66 keV)	Coaxial-1	4.65×10^{-3}	1.65×10^{-2}	-3.22×10^{-2}	1.00
	Coaxial-2	8.21×10^{-3}	2.79×10^{-2}	-3.30×10^{-2}	1.00
	Coaxial-3	1.29×10^{-2}	4.26×10^{-2}	-3.17×10^{-2}	1.00
	Coaxial-4	1.71×10^{-2}	5.66×10^{-2}	-3.04×10^{-2}	1.00
	Planar-1	5.09×10^{-3}	1.89×10^{-2}	-3.51×10^{-2}	1.00
	Planar-2	9.73×10^{-3}	3.47×10^{-2}	-3.50×10^{-2}	1.00
	Planar-3	1.27×10^{-2}	4.30×10^{-2}	-3.28×10^{-2}	1.00
^{60}Co(1 332.49 keV)	Coaxial-1	2.12×10^{-3}	1.90×10^{-2}	-6.24×10^{-2}	1.00
	Coaxial-2	2.89×10^{-3}	3.02×10^{-2}	-5.44×10^{-2}	1.00
	Coaxial-3	4.75×10^{-3}	4.64×10^{-2}	-4.84×10^{-2}	1.00
	Coaxial-4	5.03×10^{-3}	5.99×10^{-2}	-3.98×10^{-2}	1.00
	Planar-1	1.39×10^{-3}	1.83×10^{-2}	-6.00×10^{-2}	1.00
	Planar-2	2.64×10^{-3}	3.37×10^{-2}	-5.44×10^{-2}	1.00
	Planar-3	3.82×10^{-3}	3.94×10^{-2}	-4.82×10^{-2}	1.00

1.43 g/cm^3。根据应急监测标准中对环境样品γ核素测量的要求[22]，建议样品尺寸为Φ70 mm×65 mm，因此实验研究的固体放射性体源直径 D=70 mm；样品盒材质为聚乙烯，厚度2.5 mm，密度0.91 g/cm^3。计算样品探测效率时，体源直径不变，改变体源高度，高度调整范围为5~65 mm，变化梯度10 mm，样品贴近探测器表面，与探测器同轴放置，通过LabSOCS软件计算上述样品源的探测效率，分别得到不同体源高度下γ核素^{241}Am、^{137}Cs、^{60}Co的探测效率值。LabSOCS软件对圆柱体源的几何配置图如图4，吸收介质层厚度 $d_{4.1}$=0，$d_{5.1}$=0，$d_{1.1}$=2.5 mm，$d_{2.1}$=2.5 mm，材质为聚乙烯，$d_{1.2}$=70 mm，$d_{3.1}$=5, 15…, 65 mm，放置于探测器表面($d_{6.1}$=0)，样品材质为上述描述的标准土壤，模拟计算过程中统计误差小于2%。

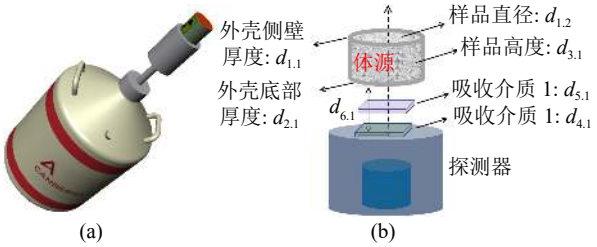

图 4　LabSOCS软件对圆柱体源构建的几何模型(在线彩图)

(a)为LabSOCS软件构建的柱状体源模型；(b)为体源计算模型的参数示意图。

通过上述参数设置，结合四种同轴型探测器、三种平面探测器的仿真计算模型，通过LabSOCS模拟计算得到体源样品中^{241}Am、^{137}Cs、^{60}Co的探测效率[$\varepsilon_V(H,R)$]，体源高度区间为5~65 mm，直径 D=70 mm。具体计算数据如表2所列。

表 2　不同尺寸及类型探测器对不同高度体源(D=70 mm)的探测效率 $\varepsilon_V(H,R)$ 计算值

核素	探测器编号	H / mm						
		5	15	25	35	45	55	65
^{241}Am(59.54 keV)	Coaxial-1	1.63×10^{-2}	1.22×10^{-2}	9.43×10^{-3}	7.55×10^{-3}	6.22×10^{-3}	5.24×10^{-3}	4.51×10^{-3}
	Coaxial-2	4.23×10^{-2}	3.11×10^{-2}	2.39×10^{-2}	1.90×10^{-2}	1.56×10^{-2}	1.32×10^{-2}	1.13×10^{-2}
	Coaxial-3	4.42×10^{-2}	3.27×10^{-2}	2.53×10^{-2}	2.02×10^{-2}	1.66×10^{-2}	1.40×10^{-2}	1.21×10^{-2}
	Coaxial-4	3.52×10^{-2}	2.66×10^{-2}	2.08×10^{-2}	1.68×10^{-2}	1.39×10^{-2}	1.17×10^{-2}	1.01×10^{-2}
	Planar-1	1.52×10^{-1}	1.05×10^{-1}	7.83×10^{-2}	6.14×10^{-2}	4.99×10^{-2}	4.19×10^{-2}	3.59×10^{-2}
	Planar-2	2.02×10^{-1}	1.39×10^{-1}	1.04×10^{-1}	8.13×10^{-2}	6.61×10^{-2}	5.54×10^{-2}	4.74×10^{-2}
	Planar-3	2.17×10^{-1}	1.51×10^{-1}	1.13×10^{-1}	8.91×10^{-2}	7.27×10^{-2}	6.11×10^{-2}	5.23×10^{-2}
^{137}Cs(661.66 keV)	Coaxial-1	1.87×10^{-2}	1.47×10^{-2}	1.20×10^{-2}	1.00×10^{-2}	8.59×10^{-3}	7.48×10^{-3}	6.60×10^{-3}
	Coaxial-2	3.20×10^{-2}	2.50×10^{-2}	2.04×10^{-2}	1.71×10^{-2}	1.47×10^{-2}	1.28×10^{-2}	1.13×10^{-2}
	Coaxial-3	4.94×10^{-2}	3.91×10^{-2}	3.21×10^{-2}	2.71×10^{-2}	2.33×10^{-2}	2.04×10^{-2}	1.81×10^{-2}
	Coaxial-4	6.59×10^{-2}	5.26×10^{-2}	4.35×10^{-2}	3.68×10^{-2}	3.18×10^{-2}	2.78×10^{-2}	2.47×10^{-2}
	Planar-1	2.10×10^{-2}	1.61×10^{-2}	1.29×10^{-2}	1.07×10^{-2}	9.07×10^{-3}	7.86×10^{-3}	6.90×10^{-3}
	Planar-2	3.90×10^{-2}	3.00×10^{-2}	2.41×10^{-2}	2.01×10^{-2}	1.71×10^{-2}	1.48×10^{-2}	1.31×10^{-2}
	Planar-3	4.94×10^{-2}	3.87×10^{-2}	3.16×10^{-2}	2.66×10^{-2}	2.28×10^{-2}	1.99×10^{-2}	1.76×10^{-2}
^{60}Co(1 332.49 keV)	Coaxial-1	1.04×10^{-2}	8.26×10^{-3}	6.81×10^{-3}	5.76×10^{-3}	4.98×10^{-3}	4.79×10^{-3}	3.87×10^{-3}
	Coaxial-2	1.82×10^{-2}	1.45×10^{-2}	1.19×10^{-2}	1.01×10^{-2}	8.69×10^{-3}	7.63×10^{-3}	6.77×10^{-3}
	Coaxial-3	3.07×10^{-2}	2.47×10^{-2}	2.05×10^{-2}	1.74×10^{-2}	1.51×10^{-2}	1.33×10^{-2}	1.19×10^{-2}
	Coaxial-4	4.29×10^{-2}	3.47×10^{-2}	2.89×10^{-2}	2.47×10^{-2}	2.15×10^{-2}	1.90×10^{-2}	1.69×10^{-2}
	Planar-1	1.01×10^{-2}	7.82×10^{-3}	6.33×10^{-3}	5.29×10^{-3}	4.53×10^{-3}	3.94×10^{-3}	3.48×10^{-3}
	Planar-2	2.05×10^{-2}	1.59×10^{-2}	1.29×10^{-2}	1.09×10^{-2}	9.31×10^{-3}	8.12×10^{-3}	7.18×10^{-3}
	Planar-3	2.73×10^{-2}	2.17×10^{-2}	1.79×10^{-2}	1.51×10^{-2}	1.31×10^{-2}	1.15×10^{-2}	1.02×10^{-2}

3.1.3　虚拟点源位置与体源高度关系

将表1中点源位置效率函数关系的拟合参数代入式(1)，结合表2中标准土壤体源的探测效率模拟计算值，可以联立求解该类体源的虚拟点源位置，具体过程由式(2)分析得到。最后针对上述常见晶体类型及尺寸的探测器，绘制其体源高度与虚拟点源位置的关系图，结果如图5所示。

从图5可以看出，对^{241}Am、^{137}Cs、^{60}Coγ射线进行虚拟点位置计算，对于低能γ射线，^{241}Am(59.54 keV)的虚拟点位置与探测器尺寸、类型相关性最大，且随体

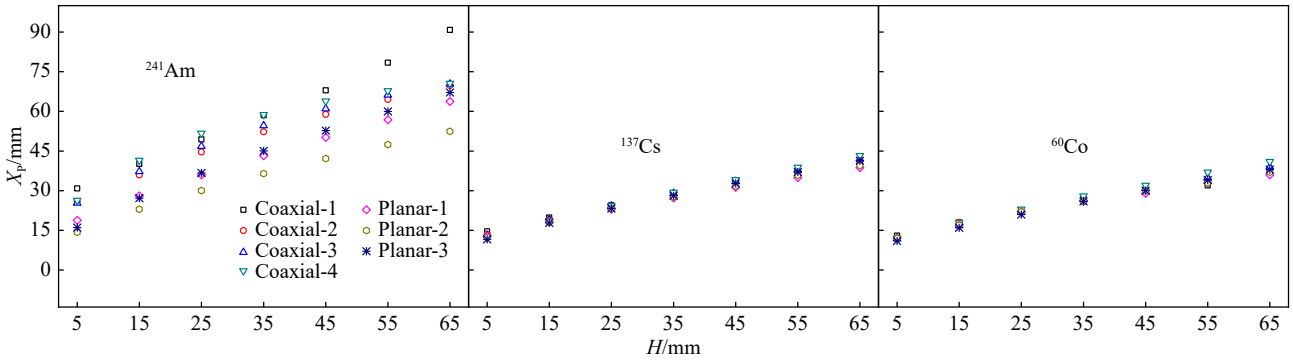

图 5　不同尺寸及类型的探测器对体源虚拟点位置的比较(在线彩图)

源深度的延长，探测器表征的虚拟点位置差异逐渐增加，具体表现为 H_v=5 mm 时，标准偏差 σ=6.16；H_v=65 mm 时，σ=11.43。对于中高能 γ 射线，^{137}Cs(661.66 keV)、^{60}Co(1 332.49 keV) 的虚拟点位置则与探测器相关性不大，且随着深度的变化，其位置表征结果在各探测器上仍趋于一致，具体表现为 H_v=5 mm 时，标准偏差 σ=0.97, 0.82；H_v=65 mm 时，σ=1.50, 1.45。这一差异，主要是由于低能区射线线衰减系数较大，受射线在探测晶体中衰减距离的影响明显，若适当增加样品距离会降低这种差异性。而对于实验室日常测量工作，环境样品一般贴近于探测器表面的情况，低能射线使用虚拟刻度原理需要根据探测器的类型、尺寸进行再次表征，而对于中高能射线是不再需要的。最后对图 5 中不同能量、晶体尺寸、体源高度得到的虚拟点源计算结果取平均值，拟合得到体源高度与虚拟点源位置 (X_{VPS}-H) 的半经验公式，如图 6 所示，图中误差棒为上述谱仪系统对体源的虚拟点源位置计算结果的均值与各探测器上的计算结果之间的均方差。

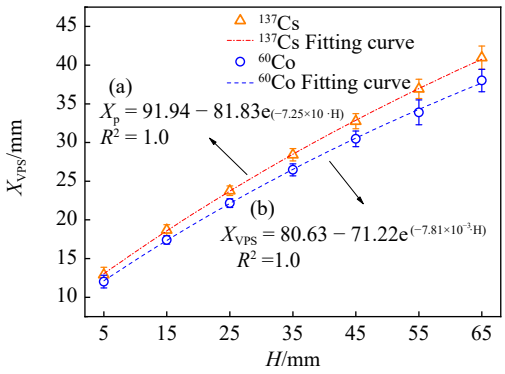

图 6　体源的虚拟源位置关系拟合(在线彩图)

3.2　虚拟点源(VPS)半经验公式的实验验证

为了验证上述方法得到的经验公式在快速效率刻度中的可行性，我们通过两套 Canberra 公司生产的 HPGe 谱仪测量系统开展实验验证工作，一套为同轴 P 型 HPGe 探测器系统，型号 GC4019，对 ^{60}Co 的 1 332.49 keV 的能量分辨率为 1.78 keV，相对探测效率为 41.80%；另一套为低本底 (Ultra-Low Background) 宽能型 HPGe 探测器系统，型号 BE5030，能量分辨率为 1.619 keV，相对探测效率为 47.3%。模拟计算中选取上述两套测量系统配套的蒙特卡罗方法表征过的探头文件，将表征探头导入商用无源效率刻度软件 LabSOCS 中构建仿真计算模型。实验测量以及模拟计算均采用国标规定尺寸 Φ70 mm×65 mm[22](活度信息：^{49}K 1 681.9 Bq、^{232}Th 641.0 Bq、^{238}U 978.8 Bq、^{226}Ra 961.5 Bq) 的标准源，标准源介质为模拟土壤，为 CuO(150 g)、SiO_2(110 g) 混合搅拌制备，密度为 1.74 g/cm^3。在 300~1 000 keV 区间内采用图 6 中的公式 (a) 标定，对 1 000~2 000 keV 区间采用图 6 中的公式 (b) 标定。模拟及实验过程中的分析核素为：^{228}Ac(338.32 keV)、^{214}Bi(609.32 keV)、^{228}Ac(911.20 keV)、^{234m}Pa(1 001.10 keV)、^{40}K (1 460.75 keV)、^{214}Bi(1 764.49 keV)。图 7 为 Φ70 mm×65 mm 在两套 HPGe 谱仪系统 (GC4019、BE5030) 上的测试能谱。

通过图 7 的谱图分析计算，得到了 Φ70 mm×65 mm 标准体源在探测器 GC4019、BE5030 上的效率实验值，探测效率实验值的计算方法为 $\varepsilon=n/(\eta Ak)$，n 该 γ 特征能

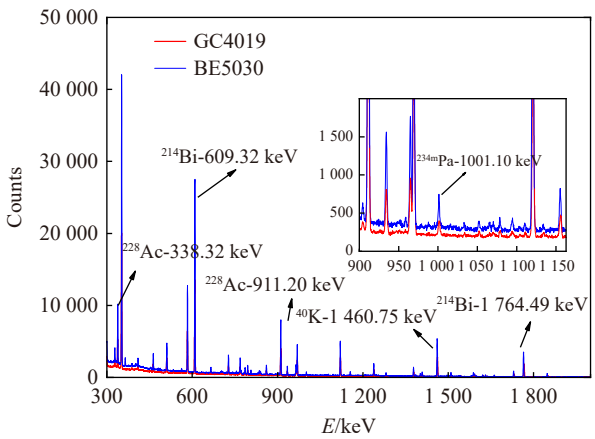

图 7　尺寸 Φ70 mm×65 mm 标准体源的实验测试能谱(在线彩图)

量计数率，η 为射线发射强度，k 为衰变修正因子，A 为点源活度，ε 为探测效率实验计算值。同时采用模拟方法，获得上述体源的效率计算值，模型建构方法参照图 4 所示。虚拟刻度方法中虚拟源位置结合图 6 可以给出：300 ~1 000 keV 区间内，尺寸Φ70 mm×65 mm 的虚拟源位置为 40.9 mm，1 000 ~2 000 keV 区间内虚拟源位置为 37.8 mm，将实验与模拟计算的结果整理如图 8 所示。

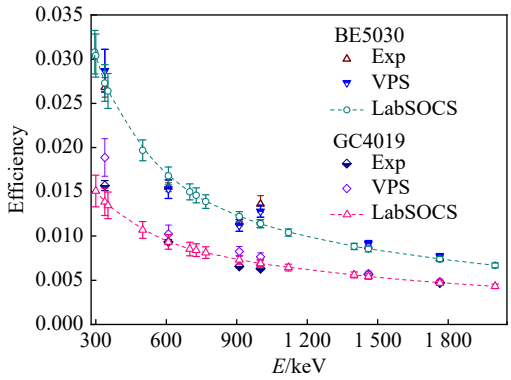

图 8　虚拟源刻度方法对体源效率刻度实验验证结果对比 (Exp:体源探测效率实验测量值；VPS:虚拟点源效率刻度值；LabSOCS:软件对体源模拟计算值) (在线彩图)

从图 8 可以看出，采用 ^{137}Cs、^{60}Co 点源分别标定 300~1 000 keV、1 000~2 000 keV 能区的虚拟点源位置，VPS 刻度方法得到的探测效率与体源模拟效率和实验值基本一致。同时，图 8 中对 ^{228}Ac 的 338.32 keV 实验结果偏差较大，BE5030 探测器上，体源实验计算结果与虚拟源计算值在 338 keV 偏差达到 11.2%；GC4019 探测器上，在 338 keV 两者偏差达到 18.4%。低能区出现较大偏差的原因主要有如下两个方面：(1) 选取 ^{137}Cs 作为 300~1 000 keV 能区定标源对于低能段效果稍差，今后可对该能段再进行细分，将有利于改善效率刻度精度；(2) 虚拟点源位置的点源效率由模拟计算得到，然后对多套系统上的计算结果进行均值化处理，而该方法的前提是仿真计算模型的准确性，但实际情况是探测器内部死层等参数未知 (值得注意的是，型号 GC4019 探测器购置于 2005 年 3 月，型号 BE5030 探测器购置于 2020 年 1 月，表征文件探头与 GC4019 的差异性会更大)。在利用 VPS 刻度方法对效率计算的过程中，分别采用 ^{137}Cs(661.66 keV)、^{60}Co(1 332.49 keV) 标定 300 ~1 000 keV、1 000 ~2 000 keV 能区的虚拟点源，这从理论上来说是存在误差的，但图 8 中 VPS 结果与 LabSOCS 模拟和实验结果的一致性也说明该误差是比较小的。综上所述，通过对虚拟点源位置的比较、对能区的效率刻度等研究，表明虚拟源的位置具有不依赖于特定的探测器进行重复表征的优势，选取合适的点源用于表征一定能区范围的探测效率也是可行的，可以适用于放射性监测中的放射源测量工作。由于本文着重论述实验室测量工作，样品一般均是贴合探测器表面测量，今后如果能通过实际混合点源对源项虚拟点源位置进行表征效果将更好，有利于提高虚拟源原理对源项效率刻度的精确度。

4　总结

本文通过将 ^{137}Cs、^{60}Co 点源分别作为 300 ~1 000 keV 能区、1 000~2 000 keV 能区虚拟点源位置的标定源，提出了适用于 300 ~2 000 keV 能区的虚拟点源位置半经验公式。对于体源的虚拟点位置进行多方面研究，通过模拟计算点源及体源探测效率得到的数据为计算基础，比较了多种晶体尺寸的 HPGe 探测器上体源虚拟点位置关系，得出探测器类型的改变，对于体源中高能 γ 射线的虚拟点位置表征结果影响不大。最后拟合给出了体源高度与其虚拟点位置的半经验关系式，模拟和实验结果表明该计算方法在 300 keV 以上能区可广泛适用于多种类型的探测器，为辐射环境应急监测的准确、快速效率刻度提供一条新的途径。

在今后的样品测量工作中，可以使用合适的标准点源，如本文 ^{137}Cs、^{60}Co 表征出一组虚拟点源的位置经验公式，用点源替代标准面源或者标准体源进行探测效率刻度，从而避免了体源批量制作、放射性废物处理困难、运输及携带不便等诸多问题，同时对日常辐射环境监测工作具有参考价值，并具有一定应用前景。

参考文献：

[1] NOTEA A. Nucl Instr and Meth, 1971, 91(3): 513.
[2] MAHLING S, ORION I, ALFASSI Z B. Nucl Instr and Meth A, 2006, 557(2): 544.
[3] HUYNH D C, LE T N T, NGUYEN V H, et al. Applied Radiation and Isotopes, 2020, 162: 109179.
[4] SEDIGHEH S, ZAHRA M, MEHROOSH K, et al. Scientific Research Journal, 2020, 17(1): 15.
[5] TIAN Zining, LIU Wenbiao, CHEN Wei, et al. High Power Laser And Particle Beams, 2018, 30(3): 0340011. (in Chinese)
(田自宁, 刘文彪, 陈伟, 等. 强粒子与激光束, 2018, 30(3): 0340011.)
[6] DEBERTIN K, HELMER R G. Nucl Instr and Meth, 1989, 44(2): 246.
[7] JULIO C A. Applied Radiation and Isotopes, 2008, 66(8): 1123.
[8] BYUN J I, CHOI H Y, YUN J Y. Applied Radiation and Isotopes, 2010, 68(2): 370.
[9] NIE Peng, NI Bangfa, TIAN Weizi, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(2): 206. (in Chinese)

(聂鹏, 倪邦发, 田伟之, 等. 原子能科学与技术, 2010, 44(2): 206.)
[10] XIONG Wenbin, QIU Chunhhua, DUAN Tianying, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(8): 999. (in Chinese)
(熊文彬, 仇春华, 段天英, 等. 原子能科学与技术, 2011, 45(8): 999.)
[11] TIAN Zining. The Reasearch on Radioactive Volume Source-less Efficiency Calibration Technology Based on the Virtual Source Theory[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
(田自宁. 基于虚拟源原理的放射性体源无源效率刻度技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.)
[12] TIAN Zining, OUYANG Xiaoping, LIU Linyue. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2015, 304: 905.
[13] TIAN Zining, CHEN Wei, HAN Bin, et al. Acta Phys Sin, 2016, 65(6): 062901. (in Chinese)
(田自宁, 陈伟, 韩斌, 等. 物理学报, 2016, 65(6): 062901.)
[14] TIAN Zining, OUYANG Xiaoping, CHEN Wei, et al. Acta Phys Sin, 2019, 68(23): 232901. (in Chinese)
(田自宁, 欧阳晓平, 陈伟, 等. 物理学报, 2019, 68(23): 232901.)
[15] DONG Rukun, WU Shaohua, WANG Ke, et al. Infrared Technology, 2021, 43(5): 510. (in Chinese)
(董汝昆, 吴绍华, 王柯, 等. 红外技术, 2021, 43(5): 510.)
[16] BAI Erjuan, ZHENG Zhipeng, GAO Dexi, et al. Nuclear Physics Review, 2016, 33(1): 52. (in Chinese)
(白尔隽, 郑志鹏, 高德喜, 等. 原子核物理评论, 2016, 33(1): 52.)
[17] LUO Qi, HU Shiping, SUN Huibin, et al. Nuclear Techniques, 2011, 34(12): 901. (in Chinese)
(罗奇, 胡世鹏, 孙慧斌, 等. 核技术, 2011, 34(12): 901.)
[18] CHEN Zhilin, SONG Guoyang, MU Long, et al. Chinese Physics C, 2010, 34(5): 560. (in Chinese)
[19] YU Senbiao, JIANG Ranrong. Radiation Protection, 1998, 18(4): 314. (in Chinese)
(俞森标, 姜让荣. 辐射防护, 1998, 18(4): 314.)
[20] VENKATARAMAN R, BRONSON F. Nucl Instr and Meth, 1999, 422(1-3): 450.
[21] VENKATARAMAN R, BRONSON F, Atrashkevich V, et al. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2005, 264(1): 213.
[22] HJ 1127-2020 Technical Specification for γ Nuclide Measurement of Environmental Samples in Emergency Monitoring[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020.
(HJ 1127-2020 应急监测中环境样品γ核素测量技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.)

Development of Efficiency Calibration Method for Radioactive Volume Sources Based on Virtual Calibration Principle

XU Feng[1], GUO Jianyou[1,†], YU Guobing[2], XU Ping[3], Zhang Jian[4]

(*1. School of Physics and Optoelectronics and Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China*;
2. Radiation Environment Supervision Statio, Anhui Provincial Department of Ecology and Environment Protection, Heifei 230071, China;
3. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
4. School of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Using the Monte Carlo simulation method, the virtual point source position of the volume source for different HPGe detectors can be quickly obtained. In the calculation, it is necessary to simulate the detection efficiency of the point source and the volume source. The effects of the size and type of HPGe crystals on their virtual point source positions were investigated through ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{60}Co point sources and volume sources. The simulation results show that the virtual point position of the ^{241}Am source presents obvious differences. In the low energy range, the VPS calibration method is not valid in the measurement of small-volume samples of the surface of the detector. Finally, the semi-empirical formula for the height of the volume source and the position of the virtual point source is obtained by using the ^{137}Cs and ^{60}Co sources. In the test measurement, the detection efficiency of two types of HPGe detectors was calibrated using the standard soil source of the size of 70 mm×65 mm. Compared with the simulated detection efficiency curve and the calculation results of virtual point source efficiency, the validity of the semi-empirical formula was verified. In the gamma energy range of 300~2 000 keV, the relationship between the position of the volume source and the virtual point source can be established through a suitable radioactive source. This study provides a new approach in the radiation measurement to avoid the repeated detection efficiency calibration in detectors.

Key words: virtual point source; efficiency calibration; LabSOCS; volume source

Received date: 25 Nov. 2021; **Revised date:** 25 Jan. 2022

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11935001)

† **Corresponding author:** GUO Jianyou, E-mail: Jianyou@ahu.edu.cn