

# 积分中值定理在放射性氙样品 $\gamma$ 谱效率 刻度技术中的应用

田自宁<sup>1)2)</sup> 欧阳晓平<sup>1)2)†</sup> 曾鸣<sup>1)</sup> 成智威<sup>1)2)</sup>

1) (清华大学工程物理系, 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084)

2) (西北核技术研究所, 辐射探测研究中心, 西安 710024)

(2012年12月19日收到; 2013年3月30日收到修改稿)

在实验室 HPGe 探测器测量分析氙气样品过程中需要用到相对方法进行分析, 然而由于放射性氙同位素半衰期较短, 制作相应的标准气体比较难, 给谱仪系统刻度带来困难. 针对该问题, 提出使用混合面源模拟刻度四种氙同位素气体源的效率, 并提出将积分中值定理应用到面源刻度实验过程, 大大简化了中间流程, 提高了测量的准确性. 利用氙分离纯化系统在高氙环境下采集样品, 获得了天然放射性  $^{133}\text{Xe}$  气体  $\gamma$  谱, 通过计算得到其活度浓度. 积分中值位置处的混合面源刻度结果和气体源刻度结果一致, 说明本文提出的面源刻度技术及积分中值定理的思想在 HPGe 探测器效率刻度测量分析中是有效可行的.

**关键词:** 面源, 无源效率刻度软件, 效率刻度

**PACS:** 29.30.Kv, 29.40.Wk, 29.25.Rm

**DOI:** 10.7498/aps.62.162902

## 1 引言

全面禁止核试验条约主要使用放射性核素监测 (radionuclide monitoring) 来履约和监测各种核试验. 在一次核爆中将会大量产生四种放射性氙同位素:  $^{131\text{m}}\text{Xe}$  ( $t_{1/2} = 11.84$  d),  $^{133}\text{Xe}$  ( $t_{1/2} = 5.243$  d),  $^{133\text{m}}\text{Xe}$  ( $t_{1/2} = 2.19$  d),  $^{135}\text{Xe}$  ( $t_{1/2} = 9.14$  h). 这些核素由于其半衰期较长, 在核爆几天内比较容易被探测到, 它们的特征  $\gamma$  射线分别为 163.9, 81.0, 233.3, 249.8 keV, 其中重点关注的核素为  $^{133}\text{Xe}$  气体<sup>[1,2]</sup>.  $^{133}\text{Xe}$  本底变化范围比较大, 从小于  $1 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$  到几百  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ , 在北半球一般为几个  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ , 国际上一般测量  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  的特征  $\gamma$  射线, 其 MDC (the minimum detectable activity concentrations) 小于  $1 \text{ mBq}/\text{m}^3$ <sup>[3]</sup>.

目前, 放射性核素惰性气体监测使用三种探测技术: 电子-光子符合 ( $\beta$ - $\gamma$  符合)<sup>[4]</sup>, 高分辨率的  $\gamma$  谱仪 (HPGe 探测器)<sup>[3,5,6]</sup>, 大体积气体正比计数管<sup>[7]</sup>.  $\gamma$  谱仪系统使用低能效率高的平板或同轴型

HPGe 探测器, 其出色的能力分辨率决定了它对于弱  $\gamma$  能峰具有非常高的灵敏度<sup>[8]</sup>, 可直接用于氙同位素四种核素的测量. 放射性氙全能峰的效率刻度一般有四种方法: 1) 制作放射性氙同位素标准刻度源进行效率刻度, 这种方法的优点是使其与样品形状相同, 缺点是由于氙同位素半衰期较短, 对源的活度要求非常高; 2) 使用认证过的发射多种 X- $\gamma$  射线混合源, 做成样品形状或点源, 使用这些源刻度得到的效率曲线可以计算未知氙的探测效率; 3) 使用蒙特卡罗模拟来获得探测效率, 利用 MCNP4B 程序提供的 F8 卡直接计算  $\gamma$  能谱的效率<sup>[9]</sup>, 该方法需要知道探测器特性的全面知识, 尤其是锗晶体对射线的灵敏体积, 生产厂家一般不提供晶体死层信息, 用户需要对晶体死层进行评估<sup>[10]</sup>; 4) 使用点源效率函数<sup>[10-12]</sup> 或半经验公式<sup>[13]</sup> 进行 HPGe 探测器的效率刻度, 点源效率函数法使用点源测量, 相对面源来说, 测量过程较为烦琐, 测量精度不够高.

针对  $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  四种核素探

† 通讯作者. E-mail: oyxp@yahoo.com

测效率日常刻度还没有很好解决的问题, 提出使用 LabSOCS 软件进行实验. 利用混合面源模拟氙气体源, 在实验过程中成功应用了积分中值定理, 很好地解决了氙气探测效率刻度问题. 使用混合面源可以定期对谱仪进行气体探测效率刻度, 为测量数据提供质量保证.

## 2 原理

放射源一般有点源、面源、体源三种, 使用较多的为点源和体源. 对于放射性测量来说, 点源和面源的效率刻度较为简单方便, 因为其几何尺寸变化不大, 而体源由于其几何尺寸较为多变, 体源内的吸收介质成分和密度变化较大, 对体源的刻度相对困难些, 而实验室测量的环境放射性样品大多为体源样品. 在放射性氙气  $\gamma$  谱测量中, 氙气样品就为体源样品, 将其置于 HPGe 晶体上方进行能谱测量, 通过 Genie 2000 能谱获取与分析软件得到关心核素特征全能峰峰计数, 根据下述样品活度的计算公式计算氙气样品的活度:

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

式中,  $N$  表示峰计数,  $A$  表示样品活度 (Bq),  $P_\gamma$  表示  $\gamma$  射线发射率,  $t$  表示测量时间,  $\epsilon_v$  表示氙气样品体源探测效率. 如图 1 所示, 实际测量的圆柱状气体样品高度为  $H$ , 混合 (含有多种放射性核素) 面源刻度放射性氙气体样品时, 将面源放置在高度等间隔增加的不同位置处, 测量其探测效率  $\epsilon_s$ , 通过对面源探测效率  $\epsilon_s$  与其高度  $h$  最小二乘曲线拟合得到关系  $\epsilon_s(h)$ , 则探测器对于整个体源样品的探测效率可表示为<sup>[2]</sup>

$$\epsilon_v = \frac{1}{H} \int_0^H \epsilon_s(h) dh. \quad (2)$$

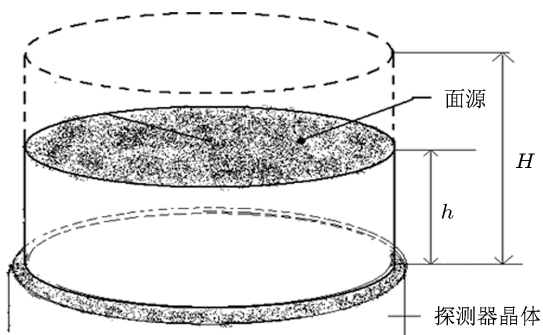


图 1 面源和 HPGe 探测器的几何形状

为了节省刻度时间和使用简便, 对 (2) 式可以使用积分中值定理进行简化处理. 微积分中积分中值定理为: 若函数  $f(x)$  在区间  $[a, b]$  上连续 (图 2), 这里规定  $b - a = H$ , 则在区间  $[a, b]$  内至少存在一个数  $\xi (a < \xi < b)$ , 使得

$$\frac{\int_a^b f(x) dx}{b-a} = f(\xi) \rightarrow \frac{\int_a^b f(x) dx}{H} = f(\xi). \quad (3)$$

设函数关系  $\epsilon_s(h)$  也在区间  $[a, b]$  上连续, 令  $a = 0, b = H$ , 则在区间  $[0, H]$  内至少存在一个数  $h_0 (0 < h_0 < H)$ , 应用 (3) 式得:

$$\frac{\int_0^H \epsilon_s(h) dh}{H} = \epsilon_s(h_0). \quad (4)$$

对比 (2) 式和 (4) 式, 等式 (2) 右边和等式 (4) 左边完全相同, 则等式 (2) 左边和等式 (4) 右边相等, 可以得出结论:

$$\epsilon_v = \epsilon_s(h_0), \quad (5)$$

即面源在区间  $[0, H]$  内至少存在一个数  $h_0 (0 < h_0 < H)$ , 使得面源探测效率与气体体源效率相等.

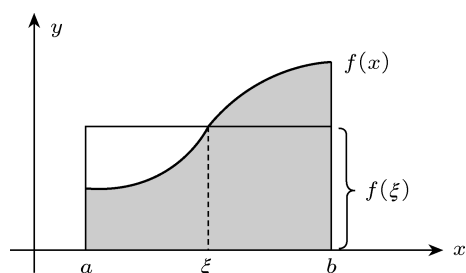


图 2 积分中值定理

因此效率刻度的关键是先通过 (2) 式积分获得气体体源探测效率  $\epsilon_v$ , 再通过 (5) 式, 解方程得到  $h_0$ . 面源在  $h_0$  位置的探测效率就等于气体样品的探测效率, 在以后的日常刻度过程中, 只需将面源放置该位置刻度即可, 而不需再放置不同高度进行积分刻度了. 由于在氙同位素测量中, 重点关注的核素为  $^{133}\text{Xe}$  (81.0 keV), 因此重点对该核素的 81.0 keV  $\gamma$  射线能量进行了积分中值的研究, 通过应用积分中值定理可得到所需的高度值  $h_0$ .

## 3 LabSOCS 模拟实验

### 3.1 仪器设备

氙仪器设备包括: 取样单元、纯化单元、样

品盒及测量仪器, 测量仪器为 Canberra 公司生产的 Ultra-Low Background  $\phi 70\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  BE3830 P 型 HPGe 探测器, 相对效率为 35.6%, 对  $^{60}\text{Co}$  的 1332.5 keV  $\gamma$  射线的能量分辨率为 1.79 keV. 铅屏蔽体厚度为 16.5 cm, 20—1500 keV 的积分本底计数率为 0.95 cps. 使用 Canberra 公司的 DSA1000 多道谱仪 (8192 道) 和 Genie2000 能谱获取与分析软件进行能谱获取与处理, 该软件能够自动计算峰面积及其统计涨落, 同时 Genie2000 带有 Canberra 公司开发的无源效率刻度软件 (LabSOCS). 样品盒为直径 46.8 mm, 高 5.8 mm 圆柱形, 侧壁材料为不锈钢材质 (密度  $7.86\text{ g/cm}^3$ ), 厚 12.6 mm, 样品盒底为 1.3 mm 厚碳纤维 (密度  $1.39\text{ g/cm}^3$ ).

### 3.2 模拟实验方法

无源刻度软件 LabSOCS 是法国堪培拉公司 (Canberra Industries) 与美国 Los Alamos 国家实验室共同开发的产品. 美国和德国等一些研究机构曾对无源效率刻度方法与传统的有源效率刻度技术进行了验证实验研究, 结果表明测量相同样品得到的分析结果是一致的, 该软件是谱分析系统软件“Genie-2000”的一部分. LabSOCS 应用的 Ge 探头参数是结合 NIST (National Institute of Standards and Technology) 可溯源和 MCNP 蒙特卡罗模型表征得到的. 因此其实质是用蒙特卡罗方法进行模拟计算各种数学几何模型样品源效率, 计算时只需要输入样品源及晶体几何尺寸、相对位置、材料等参数. 根据样品源的尺寸使用 LabSOCS 软件构建一个等直径虚拟的标准面源, 建立的面源计算模型如图 3 所示.

如图 3 中所示, 软件输入的参数有:  $d_{1,2}$  表示面源直径,  $d_{6,1}$  表示面源距晶体的距离,  $d_{5,1}$  和  $d_{4,1}$  都表示吸收层. 面源模拟 Xe 气体实验时输入  $d_{1,2} = 46.8\text{ mm}$ , 面源与晶体之间的材料按空气介质设置, 密度为  $0.0012\text{ g/cm}^3$ ; 射线能量 ( $E_\gamma$ ) 设置为 46.5 keV ( $^{210}\text{Pb}$ ), 59.54 keV ( $^{241}\text{Am}$ ), 84.25 keV ( $^{170}\text{Tm}$ ), 221.6 keV ( $^{109}\text{Cd}$ ), 122.1 keV ( $^{57}\text{Co}$ ), 165.9 keV ( $^{139}\text{Ce}$ ), 72.87 keV, 279.2 keV ( $^{203}\text{Hg}$ ), 514.0 keV ( $^{85}\text{Sr}$ ), 661.6 keV ( $^{137}\text{Cs}$ );  $d_{6,1}$  分别取 2.3, 3.0, 4.0, 5.13, 6.0, 7.0, 8.1 mm; 输入  $d_{4,1} = 1.3\text{ mm}$ ; 设置吸收材料为碳介质, 密度为  $1.39\text{ g/cm}^3$ , 其计算结果见表 1 所示. 同时, 需要对实际氙气样品建立计算模型, 以便对面源模拟结果进行检验. 实际的氙气样品计算模型如图 4 所示.

根据图 4 中所示, 软件输入的参数  $d_{1,2}$ ,  $d_{1,1}$ ,  $d_{3,1}$ ,  $d_{2,1}$ ,  $d_{6,1}$ , 分别表示样品直径、样品盒侧壁厚、样品高度、样品盒底厚, 距晶体距离. 模拟  $^{133}\text{Xe}$  核素标准气体源输入的参数为  $d_{1,2} = 46.8\text{ mm}$ ,  $d_{1,1} = 12.6\text{ mm}$ ,  $d_{3,1} = 5.8\text{ mm}$ ,  $d_{2,1} = 1.3\text{ mm}$ ,  $d_{6,1} = 1\text{ mm}$ . 样品盒材料为不锈钢材质 (密度  $7.86\text{ g/cm}^3$ ), 样品盒底为碳纤维 (密度为  $1.39\text{ g/cm}^3$ ), 吸收介质按空气设置即可, 密度为  $0.0012\text{ g/cm}^3$ . 射线能量 ( $E_\gamma$ ) 设置同上述  $^{133}\text{Xe}$  为 81.0 keV, 计算结果如表 1 所示.

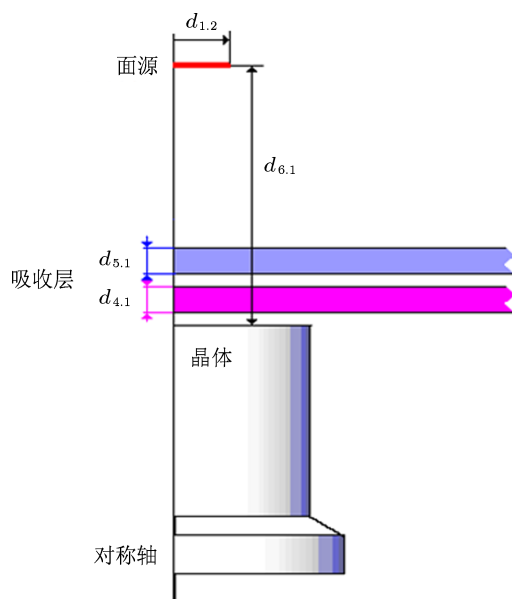


图 3 LabSOCS 面源模型几何配置及组成

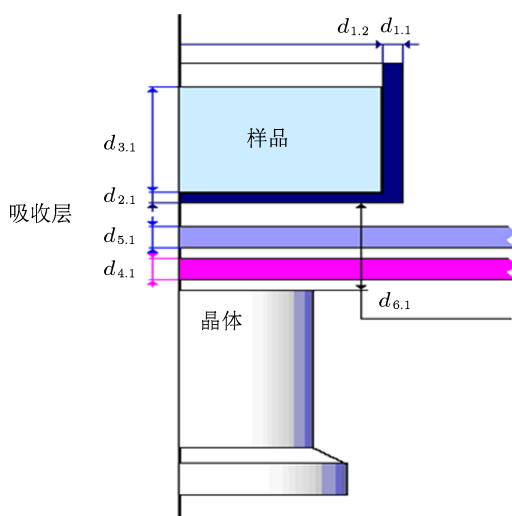


图 4 LabSOCS 圆柱模型几何配置及组成

表 1 中, 81.0 keV  $\gamma$  射线能量对应的探测效率标为斜体, 表示为插值得到. 再根据其对应的高度进行线性拟合, 如图 5 所示.

表 1 LabSOCS 模拟计算效率结果

$E_\gamma/\text{keV}$	$h/\text{mm}$							气体体源	相对偏差/%
	2.3	3.0	4.0	5.13	6.0	7.0	8.1		
46.50	0.258	0.251	0.241	0.231	0.223	0.215	0.206	0.224	3.1
59.54	0.257	0.250	0.240	0.230	0.222	0.214	0.205	0.224	2.5
72.87	0.255	0.248	0.238	0.228	0.220	0.212	0.203	0.223	2.0
81.00	0.251	0.244	0.234	0.224	0.216	0.208	0.199	0.221	1.1
84.25	0.250	0.243	0.234	0.223	0.216	0.208	0.199	0.220	1.5
122.10	0.226	0.220	0.210	0.201	0.194	0.186	0.178	0.199	0.72
165.90	0.188	0.182	0.175	0.166	0.161	0.154	0.148	0.166	0.35
221.60	0.145	0.141	0.135	0.129	0.124	0.119	0.114	0.128	0.22
279.20	0.116	0.112	0.107	0.102	0.0986	0.0946	0.0905	0.102	0.16
514.00	0.0621	0.0603	0.0576	0.0546	0.0525	0.0502	0.0479	0.0546	0.050
661.60	0.0483	0.0467	0.0444	0.0420	0.0403	0.0385	0.0368	0.0421	-0.19

注: 相对偏差 =  $(\epsilon_{5.13\text{mm}} - \epsilon_{\text{气体源}}) / \epsilon_{\text{气体源}}$

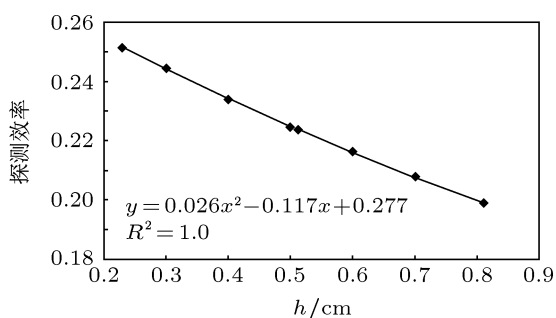


图 5 81 keV  $\gamma$  射线效率随高度变化的拟合曲线

根据图 5 中的曲线拟合结果可以得到  $\epsilon_s(h) = 0.026 \cdot h^2 - 0.117 \cdot h + 0.277$ , 带入 (2) 式, 对  $h$  其积分可得  $\epsilon_v = 0.224$ . 再根据 (5) 式解方程  $0.224 = 0.026 \cdot h^2 - 0.117 \cdot h + 0.277$  得出  $h_0 = 5.13 \text{ mm}$ , 根据这个高度进行 LabSOCS 面源模拟实验, 可得面源在  $h_0 = 5.13 \text{ mm}$  位置处的探测效率, 如表 1 中 5.13 mm 所对应的列. 氙四种同位素  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  的特征  $\gamma$  射线 81, 163.9, 233.3, 249.8 keV 的探测效率在该列的插值计算值分别为 0.224, 0.167, 0.126, 0.117, 而不需要再找标准气体源进行谱仪刻度了. 其与气体源的效率刻度曲线

比较如图 6 所示.

从图 6 中可以看出, 在距离晶体 5.13 mm 处的面源探测效率和气体体源的探测效率基本一致, 只是在低能 40—70 keV 差异较大些. 从表 1 中得出该能区它们的相对偏差在 2.0%—3.0% 之间, 81 keV 的相对偏差在 1.0%. 大于 100 keV 的射线, 相对偏差基本在 1.0% 以内, 说明该技术方法是有效可行的.

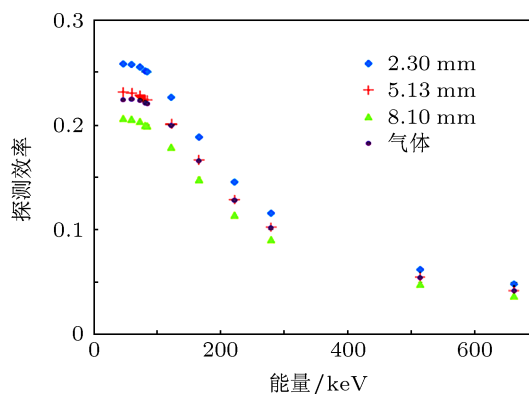


图 6 面源探测效率随射线能量及高度的变化曲线

表 2 LabSOCS 计算  $^{133}\text{Xe}$  (81.0 keV) 效率值比较

	面源模拟 $\epsilon_v$	面源 ( $h = 5.13 \text{ mm}$ )	$d_{1,1} = 0$	$d_{1,1} = 1.0 \text{ mm}$ , 聚乙烯	$d_{1,1} = 12.6 \text{ mm}$ , 不锈钢
—	0.224	0.224	0.225	0.225	0.221
相对偏差/%	1.2	1.1	1.9	1.8	—

注: 相对偏差表示各个计算值相对于壁厚 12.6 mm 不锈钢的气体效率值偏差

由表 2 可知, LabSOCS 模拟面源实验积分值与 LabSOCS 计算气体效率值的偏差在 1.2% 以内, 由于 LabSOCS 模拟不存在样品密度、样品成分、样品尺寸、实验操作、外部环境变化等不一致性引入的误差, 说明在理想情况下由面源模拟积分刻度引入的计算误差可控制在 1.0% 左右. 实际气体样品盒直径 46.5 mm, 壁厚 12.6 mm 的不锈钢, 晶体直径 70 mm, 样品放在距离晶体 2.3 mm 的上方位置, 该位置气体探测效率与 LabSOCS 计算无壁和壁厚 1.0 mm 聚乙烯情况下的效率值进行比较, 发现对于 81.0 keV 射线, 相对偏差在 2.0% 以内, 说明在样品直径小于晶体直径, 近距离测量时由不锈钢样品壁引入的效率损失在 2.0% 左右, 解决方法是扩大样品直径或者选择原子序数较低的材料制作. 在积分中值定理计算得出的  $h = 5.13$  mm 的位置, 面源效率值的相对偏差在 1.1%, 说明该积分中值定理可成功应用于面源刻度气体样品探测效率, 且是有效可行的.

#### 4 实验测量能谱

在空气中氡气浓度越高, 其周围环境中天然重核  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  的含量也越高, 由它们自发裂变产生的天然放射性氡气在空气中的浓度也就越高. 因此氡气样品的采集选择在大体积高氡环境下, 一般选择为无通风条件的岩洞内. 尤其是夏季环境温度越高, 从岩石中析出的氡气及氡子体越多, 岩洞内相对其他地方氡气含量较高, 从而越容易收集氡气, 该洞内氡的浓度变化范围为 30000—60000 Bq/m<sup>3</sup>. 自然界中空气中天然氡丰度为 0.087 ppm V (0 °C, 10<sup>5</sup>), 利用现有的氡分离纯化系统在洞内取样, 然后将样品放置在 HPGe 探测器进行能谱测量, 测量得到的  $\gamma$  能谱如图 7 所示.

图 7 中为 HPGe 探测器获得的  $\gamma$  谱, 测量时间 80000 s, 利用表 2 中  $h = 5.13$  mm 时, 面源效率值 0.224, 可计算出  $^{133}\text{Xe}$  的活度浓度值为  $1.6 \times 10^{-3}$  Bq·m<sup>-3</sup>, 合成标准不确定度为  $0.3 \times 10^{-3}$  Bq·m<sup>-3</sup>. 由于天然放射性氡活度浓度在空气中比较低, 再加上收集和测量仪器系统性能的限制,

因此样品中获得的放射性氡量较少, 导致峰计数统计涨落较大, 从而给出的结果不确定度较大.

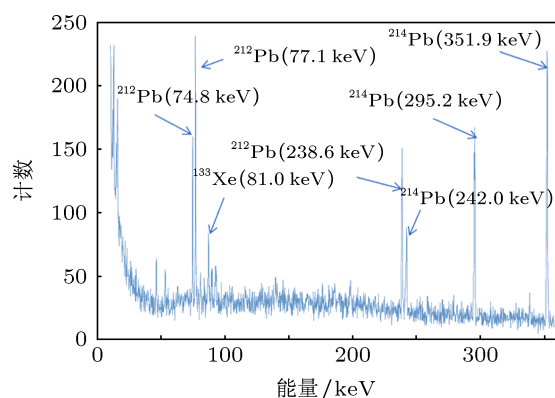


图 7 HPGe 测量的  $^{133}\text{Xe}$  气体  $\gamma$  谱

#### 5 结论

目前国际上区分核爆还是民用产生的放射性气体最为关键的技术依据就是四种放射性氡同位素的准确测量结果. 大气中获得的氡样品大部分需要实验室 HPGe 探测器进行能谱分析. 本文使用超低本底  $\gamma$  谱仪进行测量分析, 并使用 LabSOCS 模拟分析软件建立了氡气样品的探测效率计算模型, 提出了使用混合面源对氡放射性氡气进行效率刻度. 对混合面源刻度氡气样品时, 提出了利用积分中值定理的理论思想. 计算结果表明: 对于 81.0 keV 射线, 应用积分中值定理后, 面源在  $h = 5.13$  mm 位置处的探测效率与实际气体体源模拟的相对偏差为 1.1%, 说明积分中值定理可成功应用于面源模拟气体探测效率中. 同时可通过插值得到氡的其他三种同位素  $\gamma$  射线 163.9, 233.3, 249.8 keV 的探测效率. 该刻度方法通过一次固定位置测量就可以刻度四种氡同位素的探测效率, 大大节省了开支, 提高了工作效率. 通过在岩洞内采集样品, 处理得到氡气样品, 然后使用 HPGe 探测器进行测量, 得到了高氡环境下的天然放射性  $^{133}\text{Xe}$  气体  $\gamma$  谱,  $\gamma$  谱中能明显分辨天然  $^{133}\text{Xe}$  气体 81.0 keV 的能峰, 结合面源刻度得到的氡气探测效率值, 可以计算出  $^{133}\text{Xe}$  的活度浓度值.

- [1] Fontaine J P, Pointurier F, Blanchard X, Taffary T 2004 *J. Environ. Radioact* **72** 129
- [2] Stocki T J, Bean M, Ungar R K, Toivonen H, Zhang W, Whyte J, Meyer

- erhof D 2004 *Appl. Radiat. Isot.* **61** 231
- [3] Schulze J, Auer M, Werzi R 2000 *Appl. Radiat. Isot.* **53** 23
- [4] Zhang W, Mekarski P, Ungar K 2010 *Appl. Radiat. Isot.* **68** 2377

- [5] Petit G L, Jutier C, Gross P, Greiner V 2006 *Appl. Radiat. Isot.* **64** 1307
- [6] Stocki T J, Blanchard X, D'Amours R, Ungar R K, Fontaine J P, Sohier M, Bean M, Taffary T, Racine J, Tracy B L, Brachet G, Jean M, Meyerhof D 2005 *J. Environ. Radioact.* **80** 305
- [7] Xiang Y C, Gong J, Li W, Bian Z S, Hao F H, Wang H X, Wang Q, Xiong Z H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 784 (in Chinese) [向永春, 龚建, 李伟, 卞直上, 郝樊华, 王红侠, 王茜, 熊宗华 2008 物理学报 **57** 784]
- [8] Zhang N T, Lei X G, Zhang Y H, Zhou X H, Liu M L, Guo Y X, Fang Y D, Li S C, Zhou H B, Ding B, Wang H X, Wu X G, He C Y, Zheng Y 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 042901
- [9] Hao F H, Hu G C, Liu S P, Gong J, Xiang Y C, Huang R L, Shi X M, Wu J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3523 (in Chinese) [郝樊华, 胡广春, 刘素萍, 龚建, 向永春, 黄瑞良, 师学明, 伍钧 2005 物理学报 **54** 3523]
- [10] Qian N, Wang D Z, Bai Y F, Liu C, Zhang Y, Yang Y L 2010 *Nucl. Tech.* **33** 25 (in Chinese) [钱楠, 王德忠, 白云飞, 刘诚, 张勇, 杨永亮 2010 核技术 **33** 25]
- [11] Zhang H Q, Ni B F, Tian W Z, Wang P S, Huang D H, Zhang G Y, Liu C X, Xiao C J, Sun H C, Zhao C J 2010 *Nucl. Tech.* **33** 839 (in Chinese) [张海青, 倪邦发, 田伟之, 王平生, 黄东辉, 张贵英, 刘存兄, 肖才锦, 孙洪超, 赵常军 2010 核技术 **33** 839]
- [12] Tian Z N, Ouyang X P, Huang X L, Zhou C Y, Zhang Y, Shen M Q, Yang X Y 2011 *Nucl. Tech.* **34** 832 (in Chinese) [田自宁, 欧阳晓平, 英雄亮, 周崇阳, 张洋, 申茂泉, 杨晓燕 2011 核技术 **34** 832]
- [13] Nie P, Ni B F, Tian W Z 2010 *Nucl. Tech.* **33** 79 (in Chinese) [聂鹏, 倪邦发, 田伟之 2010 核技术 **33** 79]

# Application of mean value theorem of integrals in the efficiency calibration technology of radioactive xeon sample

Tian Zi-Ning<sup>1)2)</sup> Ouyang Xiao-Ping<sup>1)2)†</sup> Zeng Ming<sup>1)</sup> Cheng Zhi-Wei<sup>1)2)</sup>

1) (Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging of Ministry of Education, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Research Center for Radiation Detection, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 19 December 2012; revised manuscript received 30 March 2013)

## Abstract

The radioxenon from environmental samples is usually measured by the HPGe detector. The relative measurement method is used in the analysis process. However, the half-life of radioactive isotopes of xenon is too short to be used as a standard, so the calibration of the HPGe detector is difficult. In order to resolve this problem, the mixed disk sources are used to simulate the efficiencies of four radioactive xenon isotopes, and the mean value theorem of integrals is adopted, thereby improving the accuracy and simplifying the process. The samples are obtained by the xenon system under environment of high activity of radon, then the  $\gamma$  spectrum with regions of interest for  $^{133}\text{Xe}$  are obtained by the sample measurement. The activity of  $^{133}\text{Xe}$  is given by using the detection efficiency of disk source at a certain source-detector distance. The detection efficiency simulated by disk source is consistent with the detection efficiency of gas cell. Therefore, the simulated technology of disk source and mean value theorem of integrals are identified to be correct and effective.

**Keywords:** disk source, LabSOCS, efficiency calibration

**PACS:** 29.30.Kv, 29.40.Wk, 29.25.Rm

**DOI:** 10.7498/aps.62.162902

† Corresponding author. E-mail: oyxp@yahoo.com