

大气颗粒物滤材样品探测效率的模拟计算

张新军, 王世联, 王 军, 樊元庆, 李 奇, 贾怀茂

(禁核试北京国家数据中心和北京放射性核素实验室, 北京 100085)

摘要:在简要介绍全面禁止核试验条约(CTBT)组织临时技术秘书处(PTS)组织的2003年度大气颗粒物样品国际比对的基础上,对此次比对活动中使用的高纯锗探测器系统、样品几何形状和屏蔽情况进行了详细描述。采用蒙特卡罗程序模拟计算了高纯锗探测器测量滤材样品条件下的峰效率和总效率,模拟计算结果与PTS提供的参考值分别在3.5%和6.5%内符合,为准确定量分析样品中核素的含量奠定了基础。

关键词:全面禁止核试验条约;蒙特卡罗方法;峰效率;总效率

中图分类号:TL816.4

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)S0-0303-04

Efficiency Simulation of Atmospheric Particle Filter Sample

ZHANG Xin-jun, WANG Shi-lian, WANG Jun, FAN Yuan-qing, LI Qi, JIA Huai-mao
(CTBT Beijing National Data Centre and Radionuclide Laboratory, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the process of 2003 Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) intercomparison of atmospheric particle filter sample that organized by the organization, the structure of HPGe detector and the geometry of sample used in the comparison were described in detail. The peak efficiency and total efficiency of the filter sample were simulated by using the MCNP. The simulation results are agreed with referenced values in 3.5% and 6.5%, respectively. This work makes quantitative analysis of sample more accurate.

Key words: Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty; Monte-Carlo method; peak efficiency; total efficiency

作为对全面禁止核试验条约(CTBT)国际监测系统(IMS)放射性核素实验室高分辨 γ 能谱分析熟练程度检验计划的组成部分,CTBT组织临时技术秘书处(PTS)对2003年度放射性核素实验室颗粒物样品进行了国际比对^[1]。

2003年度,CTBT筹委会组织进行颗粒物滤材样品国际比对分析的对象是模拟 γ 能谱,

要求根据提供的探测器、样品和屏蔽体的几何描述得到测量系统的峰效率和总效率,据此对识别出的核素进行准确分析。比对样品谱是根据瑞典国防研究中心于1980年10月27日在瑞典中部收集的颗粒物中核试验沉降物的HPGe γ 能谱数据,利用国际数据中心(IDC)开发的蒙特卡罗模拟软件VGSL^[2](virtual gam-

ma spectroscopy laboratory) 模拟产生。为准确计算样品谱中各核素的活度, 利用 MCNP 模拟计算高纯锗探测器系统 PTE2003_001 的峰效率和总效率, 并与 PTS 提供的参考值进行比较。

1 系统描述

HPGe 探测器系统由 PTE2003_001 HPGe 探测器、铅屏蔽室和滤材样品 3 部分组成。

1.1 HPGe 探测器

HPGe 探测器的结构示于图 1。高纯锗晶体大小为 $\phi 74 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, 封装在一圆柱形铜壳内, 铜壳顶部开口, 侧壁厚 0.5 mm。在铜壳外部有外径为 83 mm、内径为 80 mm 的镁壳, 镁壳顶部厚 1.5 mm, 与高纯锗晶体的距离为 4.5 mm。高纯锗晶体内部存在与晶体同轴、直径为 12 mm、高为 58 mm 的空腔, 用于插放冷指。

1.2 铅屏蔽室

屏蔽室内腔为 $\phi 240 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$ 的圆

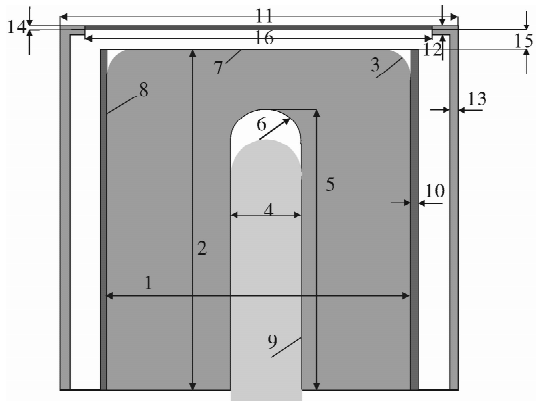


图 1 HPGe 探测器的几何示意图

Fig. 1 Geometry illustration of HPGe detector

- 1——晶体直径, 74 mm; 2——晶体长度, 70 mm;
- 3——晶体顶端边缘曲率半径, 5 mm;
- 4——空腔直径, 12 mm; 5——空腔长度, 58 mm;
- 6——空腔顶部曲率半径, 6 mm; 7——顶部死层, 1 200 μm ;
- 8——外壁死层, 1 200 μm ; 9——内壁死层, 3 μm ;
- 10——晶体支架径向厚度, 0.5 mm; 11——探测器上表面外直径, 83 mm; 12——探测器外壳(上), 1.5 mm;
- 13——探测器外壳(侧), 1.5 mm; 14——入射窗厚度, 1.5 mm; 15——入射窗到晶体表面的距离, 4.5 mm;
- 16——入射窗直径, 78 mm

柱, 由里向外分别为厚 1 mm 的铜、2 mm 的锡、100 mm 的铅、5 mm 的不锈钢。探测器上表面与屏蔽体内壁下底的距离为 180 mm。屏蔽室的结构示于图 2。

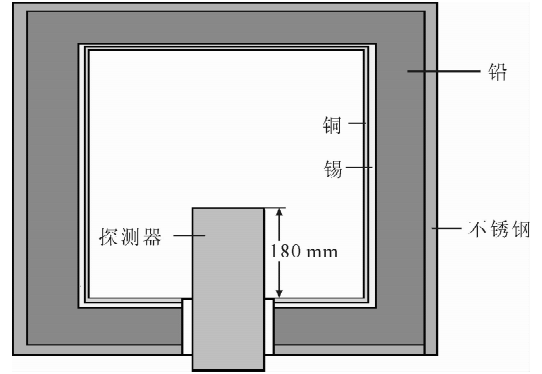


图 2 屏蔽室的结构

Fig. 2 Structure of shielding

1.3 样品描述

比对样品的基材是玻璃纤维, 压制成 $\phi 77 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的圆柱体, 置于 $84 \text{ mm} \times 82 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 长方体样品盒中, 样品盒侧壁和底厚均为 0.55 mm, 无上盖。样品盒通过样品支架固定于探测器表面上方 2.3 mm 处, 样品架的侧壁厚 30 mm, 底厚 30 mm。图 3 示出了样品、样品盒、样品支架的横剖图和横断面。

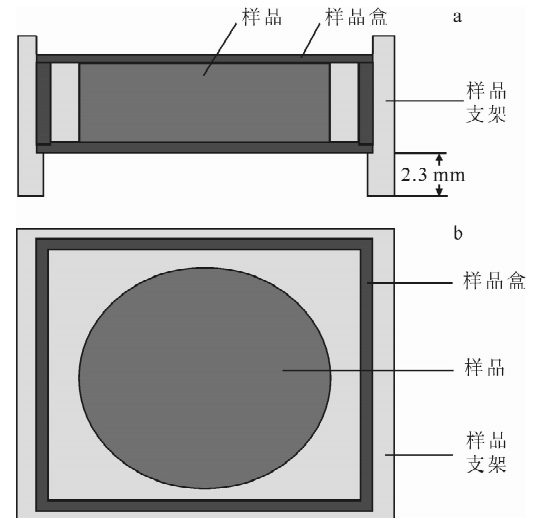


图 3 样品、样品盒、样品支架的横剖图(a)和横断面(b)

Fig. 3 Sample, container and sample

holder cross section (a) and horizontal section (b)

2 计算模型的建立

MCNP 是多功能蒙特卡罗中子-光子耦合输运程序,它提供了多种源分布,可处理任意三维几何结构的问题,具有较强的通用性^[3],是探测器效率模拟的常用工具^[4]。使用 MCNP 软件模拟计算探测器效率时首先要建立计算模型,对探测器、样品源、屏蔽体以及它们之间的几何关系进行详细的描述。计算模型要尽可能反映探测器的实际结构,同时考虑到计算的复杂性,忽略次要因素是必要的。建模中对探测器晶体内部的冷却棒做了简化处理。图 4 是使用 MCNP 软件的绘图功能绘制的模型示意图。样品是各向同性的圆柱形体源,即采用均匀分布抽样确定 γ 射线在样品中的产生位置,并将发射方向视为各向同性。

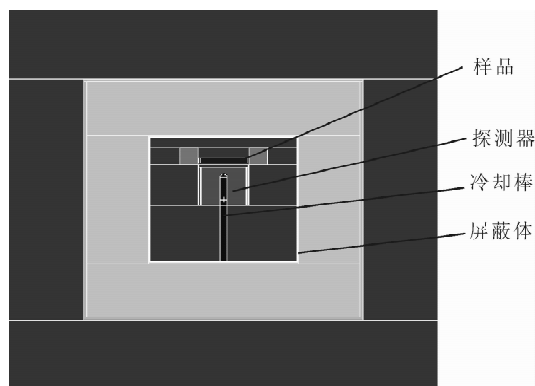


图 4 计算模型的几何示意图

Fig. 4 Geometry illustration of model

3 计算结果

模拟计算出的峰效率和总效率与实验值的比较列于表 1、2。从计算结果可看出,峰效率的计算值与实验值在 3.5% 内符合,总效率与参考值在 6.5% 内符合。为直观,峰效率和总效率曲线的比较分别标绘于图 5。

4 讨论

在模拟计算过程中,尽管存在着由于几何描述还不够十分准确、样品的均匀性与模拟过程中各项同性的假设间存在的差别以及实验效率标定本身存在的不确定度等原因,使得效率的模拟值与实验值存在一定偏差,但使用蒙特卡罗方法计算探测器系统的效率,还是能够得

表 1 峰效率的计算值与实验值的比较

Table 1 Comparison of calculated results and reference values for peak efficiency

能量/keV	峰效率		相对偏差/%
	计算值	实验值	
59.54	0.034 6	0.033 8	2.4
88.03	0.101 2	0.099 4	1.8
122.06	0.129 9	0.127 2	2.1
165.86	0.126 9	0.124 6	1.9
391.70	0.072 6	0.072 0	0.8
514.01	0.059 2	0.057 3	3.3
661.66	0.049 1	0.048 6	1.0
834.85	0.041 9	0.040 8	2.7
898.04	0.039 9	0.039 2	1.8
1 115.53	0.034 4	0.034 1	0.9
1 173.22	0.033 2	0.032 4	2.5
1 332.49	0.030 5	0.029 5	3.4
1 836.06	0.024 2	0.023 4	3.4

表 2 总效率的计算值与实验值的比较

Table 2 Comparison of calculated results and reference values for total efficiency

能量/keV	总效率		相对偏差/%
	计算值	实验值	
70	0.071 0	0.066 7	6.5
80	0.099 2	0.093 7	5.9
90	0.121 9	0.116 2	4.9
100	0.139 0	0.133 6	4.0
120	0.160 9	0.154 1	4.4
140	0.171 2	0.165 1	3.7
160	0.176 1	0.169 5	3.9
180	0.178 1	0.171 2	4.0
200	0.178 6	0.171 4	4.2
240	0.177 1	0.170 3	4.0
280	0.174 9	0.168 6	3.7
480	0.162 9	0.156 7	4.0
680	0.153 5	0.147 0	4.4
880	0.145 9	0.140 1	4.1
1 080	0.139 4	0.133 7	4.3
1 480	0.129 2	0.124 2	4.0
1 880	0.122 9	0.117 4	4.7
2 280	0.118 4	0.112 7	5.1

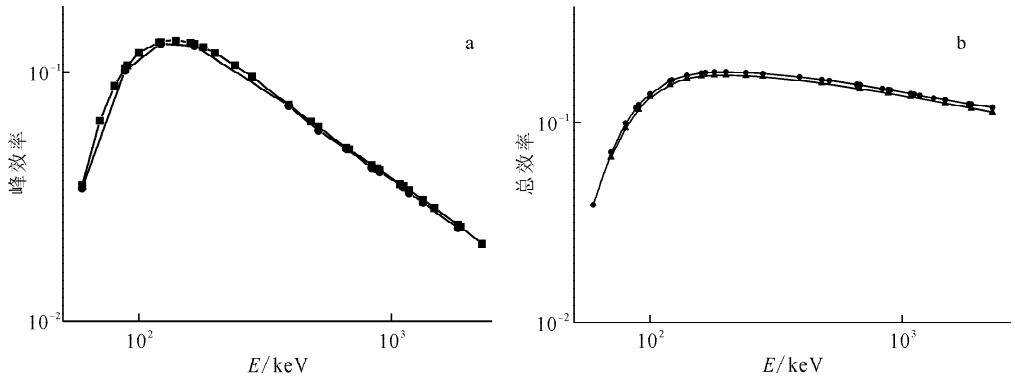


图5 高纯锗探测器的峰效率(a)和总效率(b)曲线

Fig. 5 Experimental and simulated peak efficiency (a) and total efficiency (b) of HPGe detector

a: ■——计算值, ●——实验值; b: ●——计算值, ▲——实验值

到较为理想的结果。因此,在今后 PTS 组织的国际比对活动中,可利用蒙特卡罗方法模拟计算与实验相结合的方法来标定高纯锗探测器的效率,弥补实验刻度点,有效地减少实验成本,提高工作效率。

参考文献:

- [1] KARHU P, de GEER L E, McWILLIAMS E, et al. Proficiency test for gamma spectroscopic analysis with a simulated fission product reference spectrum[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2006, 64: 1 334-1 339.
- [2] PLENTEDA R, de GEER L E. A virtual gamma

spectroscopy laboratory[C]//IRRMA-V-Fifth International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications. Editrice Compositori, Bologna: [s. n.], 2002: 261.

- [3] BRIESMEISTER J F. MCNP—A general Monte-Carlo *N*-particle transport code, LA-12625-M[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [4] KARAMANIS D. Efficiency simulation of HPGe and Si(Li) detectors in γ - and X-ray spectroscopy [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003, A505: 282-285.