

层析 γ 扫描中的探测效率刻度

张全虎¹, 杨道军¹, 何彬¹, 李泽², 顾忠茂², 钱绍钧²

(1. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025;

2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:探测效率刻度技术是层析 γ 扫描测量中最重要的技术之一。本工作研究用蒙特卡罗方法刻度层析 γ 扫描系统探测效率的方法。对 $3 \times 3 \times 3$ 体素组成的样品模型, 用蒙特卡罗软件计算了层析 γ 扫描测量装置的探测效率矩阵。在实验室层析 γ 扫描原型装置上, 实验研究了层析 γ 扫描测量装置的探测效率。对两者进行了比较, 相对偏差绝对值小于 5%。研究结果表明了蒙特卡罗方法刻度层析 γ 扫描测量装置探测效率的可行性。

关键词:层析 γ 扫描; 探测效率刻度; Monte-Carlo 方法

中图分类号: O572

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)11-1043-05

Calibration of Detection Efficiency in Tomographic Gamma Scanning

ZHANG Quan-hu¹, YANG Dao-jun¹, HE Bin¹, LI Ze², GU Zhong-mao², QIAN Shao-jun²

(1. *The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China;*

2. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: The calibration technique of detection efficiency is one of the most important techniques in tomographic gamma scanning (TGS) method. The calibration of detection efficiency with Monte-Carlo method was proposed. For a $3 \times 3 \times 3$ TGS model, all 972 efficiency matrix elements were calculated by Monte-Carlo code. The experimental calibration of detection efficiency in TGS prototype was conducted. The calculated values fit the experimental data very well with relative deviation less than 5%. The results show that Monte-Carlo method used to obtain TGS efficiency is feasible and reliable.

Key words: tomographic gamma scanning; detection efficiency calibration; Monte-Carlo method

层析 γ 扫描^[1-2] (TGS) 技术是无损分析技术中最先进的分析技术之一, 它专用于准确定

量测量桶装中、高密度非均匀分布介质中的放射性 γ 核素及其含量, 是核设施中可回收物以

及核废料测量分析的主要方法。

TGS 技术最先由洛斯阿拉莫斯国立实验室于 20 世纪 90 年代初期^[1], 在断层 γ 扫描 (SGS) 技术的基础上发展起来。随后, 其他实验室也开展了这一技术的研究。随着我国核工业的发展, 依据核材料衡算管理制度的要求和放射性废物管理和处置规定, 中国原子能科学研究院于 1997 年跟踪国外核保障技术的发展趋势, 开始对 TGS 技术进行研究, 迄今已研制成功实验室 TGS 装置。在 TGS 技术研究过程中, 探测效率刻度技术、透射图像重建技术^[3-4] 和发射图像重建技术是 3 个关键的核心技术^[5]。探测效率刻度技术如同常规能谱测量是一必须要做的最基本的工作。探测效率刻度的准确与否直接影响测量结果的准确度。TGS 测量与常规 γ 能谱测量不同的是 TGS 探测效率的刻度极为困难。对于 $10 \times 10 \times 16$ 体素组成的 TGS 样品, 探测效率矩阵元的数量级约为 10^7 。对于如此庞大的探测效率矩阵, 采用常规 γ 能谱刻度的实验方法刻度几乎不可能, 也不现实。本工作研究采用 Monte-Carlo (MC) 技术刻度 TGS 探测效率的方法。

1 层析 γ 扫描刻度模型及扫描测量方式^[5]

1.1 层析 γ 扫描刻度模型

TGS 刻度测量采用 $3 \times 3 \times 3$ 体素组成模型 (图 1), 即测量模型分为 3 层, 每层体素数为 3×3 , 每一体素的尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 。

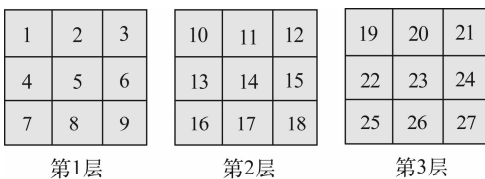


图 1 体素组成模型

Fig. 1 Voxel composition model

扫描测量时, 首先将测量模型分为 3 层, 顺序为第 1 层 \rightarrow 第 2 层 \rightarrow 第 3 层。然后在每层内进行二维扫描测量: 平移和旋转。对每一层, 探测器水平移动 3 个测量位置。对每一测量位

置, 扫描平台旋转 4 个角度 (0° 、 45° 、 90° 、 135°)。每旋转 1 个角度测量 1 次。1 个测量模型共测量 36 次。图 2 示出扫描第 1 层时探测器的 3 个平移测量位置。图 3 示出 1 个平移测量点扫描平台旋转的 4 个角度。

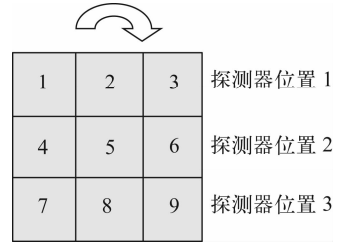


图 2 探测器的 3 个水平测量位置
Fig. 2 Three horizontal measuring positions of detector

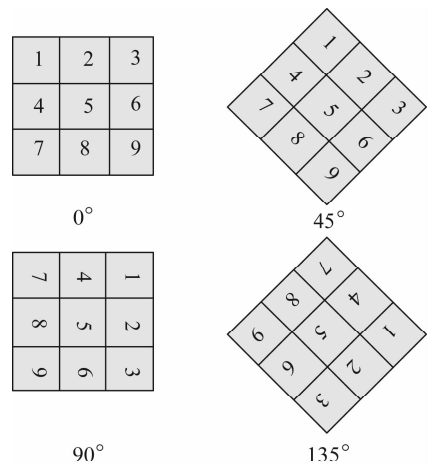


图 3 样品旋转 4 个角度示意图

Fig. 3 Four rotation angles of sample

1.2 层析 γ 扫描测量系统效率矩阵独立矩阵元的确定

对于 $3 \times 3 \times 3$ 体素组成模型, 在前述扫描方式下, 探测效率矩阵共有 972 个矩阵元。按射线源所在的位置和探测器所在的位置, 将 972 个矩阵元化分为 9 个大区, 每个大区用 1 个矩阵表示, 这样, 效率矩阵便划分为 9 个子矩阵, 每个子矩阵包含 108 个矩阵元。经对称性分析, 对于该体素组成的模型, 探测效率矩阵独立的矩阵元共有 66 个, 由这 66 个矩阵元构成了 972 个矩阵元的探测效率矩阵。

2 层析 γ 扫描探测效率的 MC 计算^[5-7]

用 MC 程序计算了 TGS 装置的探测效率。测量装置布局示意图如图 4 所示,准直器结构及参数如图 5 所示。

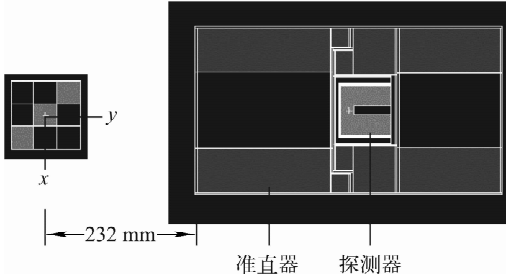


图 4 TGS 装置效率计算布局

Fig. 4 Configuration of TGS in efficiency calculation

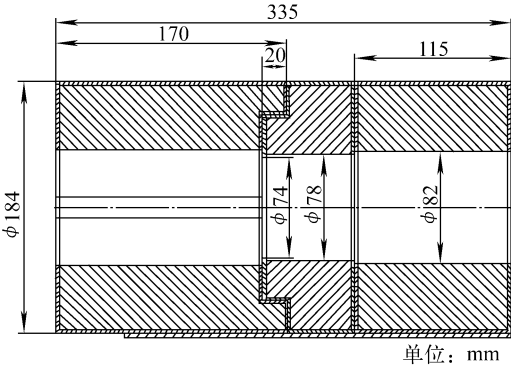


图 5 准直器结构及参数

Fig. 5 Structure and parameter of collimator

在旋转角 0° 、 45° 时,27 个放射源的位置坐标列于表 1,放射源位于体素中心。

表 1 旋转 0° 和 45° 时 27 个源的坐标

Table 1 Coordinates of 27 sources at rotated angle 0° and 45°

体素编号 (源位)	不同旋转角度下的坐标(x, y, z)/cm	
	0°	45°
1	(-vl, -vl, vl)	(-dia, 0, vl)
2	(-vl, 0, vl)	(-dia/2, dia/2, vl)
3	(-vl, vl, vl)	(0, dia, vl)
4	(0, -vl, vl)	(dia/2, -dia/2, vl)
5	(0, 0, vl)	(0, 0, vl)
6	(0, vl, vl)	(dia/2, dia/2, vl)
7	(vl, -vl, vl)	(0, -dia, vl)
8	(vl, 0, vl)	(dia/2, -dia/2, vl)
9	(vl, vl, vl)	(dia, 0, vl)
10	(-vl, -vl, 0)	(-dia, 0, 0)
11	(-vl, 0, 0)	(-dia/2, dia/2, 0)
12	(-vl, vl, 0)	(0, dia, 0)
13	(0, -vl, 0)	(-dia/2, -dia/2, 0)
14	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)
15	(0, vl, 0)	(dia/2, dia/2, 0)
16	(vl, -vl, 0)	(0, -dia, 0)
17	(vl, 0, 0)	(dia/2, -dia/2, 0)
18	(vl, vl, 0)	(dia, 0, 0)
19	(-vl, -vl, -vl)	(-dia, 0, -vl)
20	(-vl, 0, -vl)	(-dia/2, dia/2, -vl)
21	(-vl, vl, -vl)	(0, dia, -vl)
22	(0, -vl, -vl)	(-dia/2, -dia/2, -vl)
23	(0, 0, -vl)	(0, 0, -vl)
24	(0, vl, -vl)	(dia/2, dia/2, -vl)
25	(vl, -vl, -vl)	(0, -dia, -vl)
26	(vl, 0, -vl)	(dia/2, -dia/2, -vl)
27	(vl, vl, -vl)	(dia, 0, -vl)

注: vl=5 cm, dia= $\sqrt{2}$ vl

探测器在第 1 层,放射源分别在第 1、2、3 层不同体素位置时,探测效率矩阵 \mathbf{A}_{eff} 、 \mathbf{B}_{eff} 、 \mathbf{C}_{eff} 的 MC 计算结果如下:

$$\mathbf{A}_{\text{eff}} = 10^{-3} \begin{pmatrix} 0.144 & 1 & 0.183 & 3 & 0.237 & 4 & 0.140 & 7 & 0.169 & 9 & 0.210 & 3 & 0.054 & 9 & 0.043 & 0 & 0.022 & 0 \\ 0.176 & 4 & 0.219 & 8 & 0.244 & 9 & 0.155 & 5 & 0.169 & 9 & 0.070 & 9 & 0.131 & 2 & 0.088 & 3 & 0.012 & 1 \\ 0.237 & 4 & 0.210 & 3 & 0.022 & 0 & 0.183 & 3 & 0.169 & 9 & 0.043 & 0 & 0.144 & 1 & 0.140 & 7 & 0.054 & 9 \\ 0.244 & 9 & 0.070 & 9 & 0.012 & 1 & 0.219 & 8 & 0.169 & 9 & 0.088 & 3 & 0.176 & 4 & 0.155 & 5 & 0.131 & 2 \\ 0.140 & 7 & 0.169 & 9 & 0.210 & 3 & 0.144 & 1 & 0.183 & 3 & 0.237 & 4 & 0.140 & 7 & 0.169 & 9 & 0.210 & 3 \\ 0.117 & 2 & 0.214 & 9 & 0.268 & 9 & 0.154 & 8 & 0.183 & 3 & 0.214 & 9 & 0.129 & 2 & 0.154 & 8 & 0.117 & 2 \\ 0.210 & 3 & 0.237 & 4 & 0.210 & 3 & 0.169 & 9 & 0.183 & 3 & 0.169 & 9 & 0.140 & 7 & 0.144 & 1 & 0.140 & 7 \\ 0.268 & 9 & 0.214 & 9 & 0.117 & 2 & 0.214 & 9 & 0.183 & 3 & 0.154 & 8 & 0.117 & 2 & 0.154 & 8 & 0.129 & 2 \\ 0.054 & 9 & 0.043 & 0 & 0.022 & 0 & 0.140 & 7 & 0.169 & 9 & 0.210 & 3 & 0.144 & 1 & 0.183 & 3 & 0.237 & 4 \\ 0.012 & 1 & 0.070 & 9 & 0.244 & 9 & 0.088 & 3 & 0.169 & 9 & 0.219 & 8 & 0.131 & 2 & 0.155 & 5 & 0.176 & 4 \\ 0.022 & 0 & 0.210 & 3 & 0.237 & 4 & 0.043 & 0 & 0.169 & 9 & 0.183 & 3 & 0.054 & 9 & 0.140 & 7 & 0.144 & 1 \\ 0.244 & 9 & 0.219 & 8 & 0.176 & 4 & 0.070 & 9 & 0.169 & 9 & 0.155 & 5 & 0.012 & 1 & 0.088 & 3 & 0.131 & 2 \end{pmatrix}$$

$B_{\text{eff}}=10^{-3}$	0.141 8	0.177 1	0.223 2	0.093 6	0.101 1	0.090 3	0.028 1	0.014 4	0.005 7
	0.152 3	0.192 1	0.080 6	0.143 9	0.101 1	0.018 1	0.093 0	0.044 2	0.004 6
	0.223 2	0.090 3	0.005 7	0.177 1	0.101 1	0.014 4	0.141 8	0.093 6	0.0281
	0.080 6	0.018 1	0.004 6	0.192 1	0.101 1	0.044 2	0.152 3	0.143 9	0.093 0
	0.093 6	0.101 1	0.090 3	0.141 8	0.177 1	0.223 2	0.093 6	0.101 1	0.090 3
	0.055 8	0.140 2	0.251 6	0.120 3	0.177 1	0.140 2	0.131 0	0.120 3	0.055 8
	0.090 3	0.223 2	0.090 3	0.101 1	0.177 1	0.101 1	0.093 6	0.141 8	0.093 6
	0.251 6	0.140 2	0.055 8	0.140 2	0.177 1	0.120 3	0.055 8	0.120 3	0.131 0
	0.028 1	0.044 2	0.004 6	0.143 9	0.101 1	0.018 1	0.152 3	0.192 1	0.080 6
	0.004 6	0.018 1	0.080 6	0.044 2	0.101 1	0.192 1	0.093 0	0.143 9	0.152 3
$C_{\text{eff}}=10^{-3}$	0.648 8	0.566 1	0.383 6	0.298 0	0.159 6	0.067 0	0.036 4	0.015 4	0.007 1
	0.459 9	0.403 5	0.039 9	0.595 2	0.158 6	0.016 4	0.350 5	0.051 4	0.007 4
	0.383 6	0.067 0	0.007 1	0.566 1	0.159 6	0.015 4	0.648 8	0.298 0	0.036 4
	0.039 9	0.016 4	0.007 4	0.403 5	0.158 6	0.051 4	0.459 9	0.595 2	0.350 5
	0.298 0	0.159 6	0.067 0	0.648 8	0.566 1	0.383 6	0.298 0	0.159 6	0.067 0
	0.056 6	0.191 9	0.282 4	0.435 9	0.566 1	0.191 9	0.643 6	0.435 9	0.056 6
	0.067 0	0.383 6	0.067 0	0.159 6	0.566 1	0.159 6	0.298 0	0.648 8	0.298 0
	0.282 4	0.191 9	0.056 6	0.191 9	0.566 1	0.435 9	0.056 6	0.435 9	0.643 6
	0.036 4	0.015 4	0.007 1	0.298 0	0.159 6	0.067 0	0.648 8	0.566 1	0.383 6
	0.067 0	0.383 6	0.067 0	0.159 6	0.566 1	0.159 6	0.298 0	0.648 8	0.298 0

3 MC方法刻度探测效率的实验验证

探测效率刻度验证实验在中国原子能科学研究院层析 γ 扫描原型装置上进行。实验验证MC效率刻度装置的结构参数及扫描方式与MC计算条件相同。

3.1 层析 γ 扫描试验装置的描述

TGS试验装置主要包括以下3部分。

1) 机械传动部分

机械传动装置的功能是使样品作平移、旋转、升降三维扫描运动,它由水平运动导轨、曲柄手摇水平丝杆、曲柄手摇垂直丝杆、垂直升降减速器、标有角度的旋转盘、垂直支架和U型铁板台面等构成。

机械传动装置通过手摇水平丝杆传动并控制透射源与探测器同步水平移动,以达到水平方向精确扫描样品的目的;通过手摇带减速器的垂向丝杆传动并控制样品旋转平台上下升降运动。手动旋转平台,通过目测指针指向固定在旋转平台上的不锈钢角度刻度盘。

2) 透射结构部分

透射装置由透射源和铅准直器构成。准直孔截面为圆形,其直径为0.6 cm,深度为14.5 cm。

3) 测量部分

测量装置由后准直器、HPGe探测器、DSPEC数字多道谱仪、计算机组成。HPGe探测器型号为GR3019。

3.2 探测效率刻度的验证实验

在TGS探测效率刻度实验中,将3个放射源分别放置在有代表性的体素中心位置上,用前述TGS原型装置对源进行探测效率测量。

实验时,放射源安放在有机玻璃支架上,插在专门设计的样品平台上的小孔里。根据源所在层数和位置的不同,用长度相差5 cm的3个有机玻璃支架,分别放在不同位置,代表3层不同体素的中心位置,对应体素组成模型各体素的中心位置,构造TGS透射测量体素组成模型。移动有机玻璃支架的位置,对应于放射源在不同的体素。探测器位于不同的平移位置,顺时针分别旋转样品台4个角度。通过扫描测量,可得到探测器各不同位置对源的探测效率。

3.3 探测效率实验和 MC 刻度值的比较

就 TGS 探测器对放射源 ^{60}Co 的探测效率进行了刻度实验。刻度实验的 γ 能谱数据用 Gammavision32 能谱处理软件进行处理。处理后的数据再用放射源活度的标准值和核素的分支比进行计算。表 5 列出 HPGe 探测器对 ^{60}Co 放射源、 γ 能量为 1.332 MeV 的探测效率刻度的实验值和 MC 模拟探测效率刻度测量的计算值,并将两值进行比较。

表 5 探测效率实验刻度值与 MC 模拟刻度计算值的比较

Table 5 Comparison between experimental calibrated and MC simulated calculated detection efficiencies

源位	探测效率 实验值/%	探测效率 MC 计算值/%	相对 偏差/%
S1221	0.013 44	0.014 07	-4.67
S2221	0.016 38	0.016 99	-3.72
S3221	0.019 60	0.021 03	-7.29
S4221	0.013 96	0.014 41	-3.22
S5221	0.017 76	0.018 33	-3.21
S6221	0.022 82	0.023 74	-4.07
S1222	0.010 96	0.011 72	-6.97
S2222	0.020 68	0.021 49	-3.91
S7222	0.012 89	0.012 92	-0.24
S3122	0.023 96	0.025 16	-5.04
S5122	0.016 95	0.017 45	-2.95
S1121	0.009 28	0.009 36	-0.91
S3121	0.009 05	0.009 03	0.26
S6121	0.021 55	0.022 32	-3.59

注:源位 SABCD 表示源位编号为 A,源所在的层数为 B,探测器水平扫描位置为 C,旋转角度编号为 D

4 结论

应用 MC 方法对层析 γ 扫描中探测效率的刻度进行了模拟研究,并实验验证了部分计算结果,两者相对偏差的绝对值均小于 5%,表明了 MC 方法的可行性和可靠性。

感谢中国原子能科学研究院吕峰、隋洪志、吕钊、凌玉德研究员以及赵学军等对本工作的帮助和支持。

参考文献:

- [1] ESTEP R J, PRETTYMAN T H, SHEPPARD G. Tomographic gamma scanning to assay heterogeneous radioactive waste[J]. Nuclear Science and Engineering, 1994, 118: 145-152.
- [2] CAMP D C, MARTZ H E, ROBERSON G P, et al. Nondestructive waste-drum assay for transuranic content by gamma-ray active and passive computed tomography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, 495: 69-83.
- [3] KAK A C, SLANEY M. Principles of computerized tomographic imaging[M]. New York: IEEE Press, 1987.
- [4] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [5] 张全虎. 层析 γ 扫描(TGS)重建技术的研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2003.
- [6] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京: 原子能出版社, 1996: 1-137.
- [7] 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法在粒子输运中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1980.