

基于蒙卡模拟的分段 γ 扫描无源效率刻度方法*

郑洪龙¹, 庾先国², 苟家元¹, 吴耀¹, 左伟¹, 郭雨非¹,
何琳¹, 刘艳芳¹, 黄聪¹, 阳林锋¹, 刘伟¹

(1. 中国核动力研究设计院 第一研究所, 成都 610005;

2. 西南科技大学 核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 针对 200 L 核废物桶分段 γ 扫描 (SGS) 过程中的效率刻度问题, 提出了一种效率刻度函数模型, 采用 MCNP 程序计算不同基质密度和 γ 射线能量条件下的离散断层效率, 经过多元非线性回归获取函数参数, 从而建立效率刻度函数, 实现核废物桶 SGS 断层效率刻度。对核废物桶样品进行实验分析, 结果表明: 对于桶内基质分别为密度 $0.310 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的硅酸铝、密度 $0.595 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的木质纤维, 桶内核素分别为活度 $3.110 \times 10^5 \text{ Bq}$ 的点源 ^{137}Cs 、活度 $1.371 \times 10^5 \text{ Bq}$ 的点源 ^{60}Co , 在桶内仅有单个点源存在的核素分布极端不均匀情况下, 桶内核素活度重建误差在 $-37.68\% \sim 31.52\%$ 范围内。本文的方法能够准确有效实现核废物桶 SGS 断层效率矩阵计算, 并确定核废物桶内放射性核素活度, 满足实际检测要求。

关键词: 核废物桶; 分段 γ 扫描; 蒙特卡罗; 效率刻度; 函数; MLEM 算法

中图分类号: TL814

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190416

A passive efficiency calibration method with Monte Carlo simulation in segmented gamma scanning

Zheng Honglong¹, Tu Xianguo², Gou Jiayuan¹, Wu Yao¹, Zuo Wei¹, Guo Yufei¹,
He Lin¹, Liu Yanfang¹, Huang Cong¹, Yang Linfeng¹, Liu Wei¹

(1. *Sichuan Engineering Laboratory for Nuclear Facilities Decommissioning and Radwaste Management,*

Sub-institute of Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610005, China;

2. *Fundamental Science on Nuclear Wastes and Environmental Safety Laboratory,*

Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In this work, an efficiency calibration function model is presented to calculate the efficiency of segment in segmented gamma scanning (SGS) for 200 L nuclear waste drum. Discrete SGS efficiencies are simulated with MCNP for different densities and gamma ray energies. Parameters of function are determined by using multivariate nonlinear regression method with the efficiencies. The SGS efficiency calibration function is constructed to calculate the efficiency matrix. Aluminum silicate with density of $0.310 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, wood fiber of $0.595 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, point sources ^{137}Cs with activity of $3.110 \times 10^5 \text{ Bq}$ and ^{60}Co of $1.371 \times 10^5 \text{ Bq}$ are used to construct samples of drum for SGS analysis. Result shows: for the extremely heterogeneous radioisotope distribution of only a point source placed at 8 different positions in the drum, errors of reconstructed activities are $-37.68\% \sim 31.52\%$. Overall, the reconstructed activity is in agreement with the true activity. This method effectively and accurately achieves SGS efficiency calculation and reconstruction of activity.

Key words: nuclear waste drum; segmented gamma scanning; Monte Carlo; efficiency calibration; function; MLEM algorithm

随着我国核能与核技术在能源、军事、医学等领域的应用日益广泛, 核燃料厂、核电站和军用设施等每年产生大量的桶装核废物^[1-2]。依据国家核安全标准, 对于不同放射性等级的桶装核废物, 必须对桶内放射性核素的种类和活度进行测定^[3-4]。分段 γ 扫描技术 (SGS), 因其具有非破坏性、快速性等诸多优点, 特别适合低、中放核废物

* 收稿日期: 2019-10-29; 修订日期: 2019-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41874213, 41604154)

作者简介: 郑洪龙 (1989—), 男, 博士, 助理研究员, 从事核辐射探测方法研究; zhenghswust@126.com。

通信作者: 庾先国 (1965—), 男, 博士, 教授, 从事核技术及应用研究; tuoxg@cdu.edu.cn。

检测,在桶装核废物检测领域应用最为广泛^[5-7]。在 SGS 技术中,效率刻度结果直接影响活度检测准确性,常见的 SGS 效率刻度方法主要有实验效率刻度法^[8-9]、无源效率刻度法^[10-12]和壳状源刻度法^[13-15]。在整个核工业体系中,不同核设施产生的放射性废物种类繁多,待测样品的尺寸、形状、基质密度、放射性核素分布差别大,实验刻度方法和壳状源刻度法,其所必需的技术基础给这两种方法应用带来较大限制。蒙特卡罗方法具有节约时间和成本、简便及准确度高优点,基于该方法的 MCNP 程序能较好地应用于光子输运问题研究^[16]。本文采用 MCNP 程序建立 SGS 系统物理模型,计算了在不同基质密度和不同 γ 射线能量条件下的核废物桶 SGS 断层效率,建立了一种效率刻度函数模型,完成了 SGS 系统的无源效率刻度。在团队自行研制的实验装置上开展核废物桶模拟样品的 SGS 扫描实验,带入效率刻度矩阵,结合极大似然期望最大化算法(MLEM)算法,最终重建桶内核素¹³⁷Cs 和⁶⁰Co 的活度,并进行了误差分析和准确性的评判。

1 核废物桶 SGS 活度重建原理

在核废物桶 SGS 扫描过程中,通过匀速旋转核废物桶,实现桶内基质和放射性核素等效均匀分布,以桶内基质和放射性核素均匀分布为基础,进行效率刻度和核素活度计算。整个核废物桶被均匀分为 N 层,如图 1 所示。每一断层的活度值为 $A_j(j=1, 2, \dots, N)$,通过探测器系统对 N 个断层的全部探测,完成整个核废物桶的检测。当探测器正对第 j 层进行探测时,探测区域覆盖了第 $j, j+1, j-1$ 等多层样品,因此 SGS 活度重建方程如方程式(1)所示。

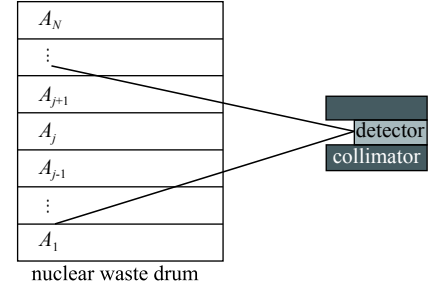


Fig. 1 SGS measurement of nuclear waste drum

图 1 核废物桶 SGS 检测原理

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11}(E) & \varepsilon_{12}(E) & \cdots & \varepsilon_{1j}(E) & \cdots & \varepsilon_{1N}(E) \\ \varepsilon_{21}(E) & \varepsilon_{22}(E) & \cdots & \varepsilon_{2j}(E) & \cdots & \varepsilon_{2N}(E) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varepsilon_{i1}(E) & \varepsilon_{i2}(E) & \cdots & \varepsilon_{ij}(E) & \cdots & \varepsilon_{iN}(E) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varepsilon_{N1}(E) & \varepsilon_{N2}(E) & \cdots & \varepsilon_{Nj}(E) & \cdots & \varepsilon_{NN}(E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(E) \\ A_2(E) \\ \vdots \\ A_j(E) \\ \vdots \\ A_N(E) \end{bmatrix} = \frac{1}{f(E) \cdot t} \begin{bmatrix} n_1(E) \\ n_2(E) \\ \vdots \\ n_i(E) \\ \vdots \\ n_N(E) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A(E) = \sum_{j=1}^N A_j(E) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{ij}(E)$ 为探测器在第 i 层位置对第 j 层样品的探测效率; i 为探测器所在位置序号 ($1 \leq i \leq N$); j 为样品层位置序号 ($1 \leq j \leq N$); $A_j(E)$ 为第 j 层样品的活度; $n_i(E)$ 为第 i 层位置的探测器全能峰净计数; $A(E)$ 为整个核废物桶的单一核素活度; N 为桶的总分层数。采用目前公认的性能优良的 MLEM 算法对方程式(1)进行求解,得到各个断层活度值 $A_j(E)$ 。令 p_i 表示扫描投影的观测值,即

$$p_i(E) = \frac{n_i(E)}{f(E) \cdot t} \quad (3)$$

MLEM 算法求解方程式(1)的迭代格式为

$$A_j^{(k+1)} = \frac{A_j^{(k)}}{\sum_{i=1}^N \varepsilon_{ij}} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{ij} \frac{p_i}{\sum_{l=1}^N \varepsilon_{il} A_l^{(k)}} \quad (4)$$

式中: k 为迭代次数; $A_j^{(k)}$ 表示经过 k 次迭代后的活度值; p_i 表示扫描投影的观测值; ε_{ij} 表示断层探测效率。

2 SGS 无源效率刻度方法

2.1 HPGe 探测器模型

本文选用 P 型电制冷同轴 HPGe 探测器,探测器偏压 2600 V,能量响应范围 4 keV~10 MeV。HPGe 探测器结构参数: Ge 晶体为 $\phi 70 \text{ mm} \times 82.6 \text{ mm}$, Cu 冷指为 $\phi 9 \text{ mm} \times 69 \text{ mm}$,前端死层 Li 厚度为 0.015 mm,侧边死层 Li 厚度为 0.7 mm,内死层 B 厚度为 0.3 μm ,前端 Al 层厚度为 0.03 mm,侧边 Al 层厚度为 1.5 mm,前端碳纤维外壳厚度为

0.9 mm, 侧边碳纤维外壳厚度为 1.6 mm, MCNP 建模如图 2 所示。

2.2 断层效率的蒙特卡罗模拟

核废物桶容量为 200 L, 桶直径为 560 mm, 桶壁为 2 mm 的 Fe。桶内填充材料: (1) 硅酸铝, 密度范围为 $0.1 \sim 1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; (2) 木质纤维, 密度范围为 $0.1 \sim 1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。核废物桶被纵向分为 8 层, 每层厚度为 100 mm, 基质材料均匀分布。桶内核素发射 γ 射线能量范围为 $0.2 \sim 1.8 \text{ MeV}$, 单个断层中的核素是均匀分布的。

探测器屏蔽器长度为 150 mm, 厚度为 50 mm (包括内层 Cu 厚 5 mm, 中层 Pb 厚 38 mm, 外层 Fe 厚 7 mm)。探测器准直材料为 Pb, 厚度为 50 mm, 准直空间 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。整个系统由核废物桶和探测器部分组成, 探测器准直器前端到核废物桶表面距离为 205 mm。采用 MCNP 程序进行物理建模, 核废物桶 SGS 效率计算模型如图 3 所示。

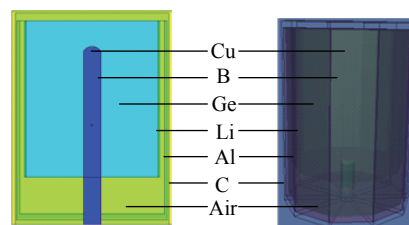


Fig. 2 MCNP model of an HPGe detector

图 2 HPGe 探测器 MCNP 模型

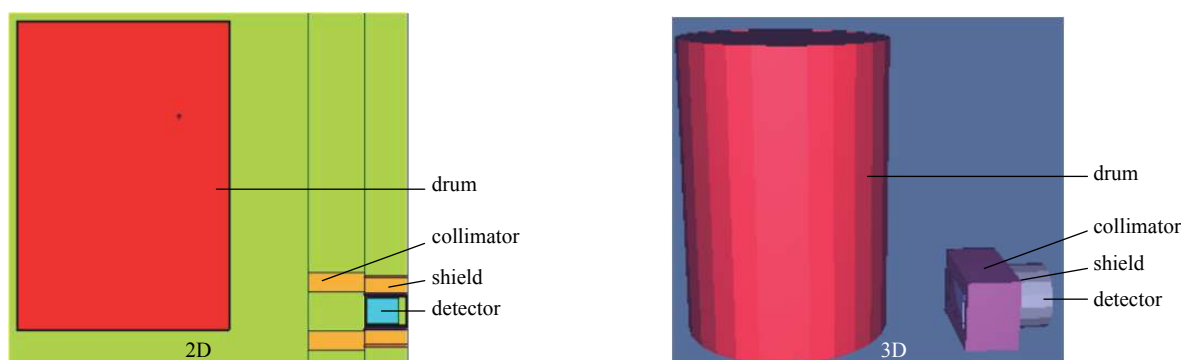


Fig. 3 Calculation model of SGS efficiency

图 3 SGS 效率计算模型

为了获得方程式(1)中的效率矩阵, 对于同一种基质和 γ 射线, 需要计算每层样品独自具有放射性时, 探测器在各层位置的探测效率, 总共需要计算 $8 \times 8 = 64$ 个效率值。在实际计算中存在对称性, 例如放射性样品在第 4 层位置、探测器在第 3 层位置时的效率值和放射性样品在第 3 层位置、探测器在第 4 层位置时的效率值相同。探测器位置层数和放射性样品位置层数间隔 (以下称层数间隔) 超过 2 层, 放射性样品层不在探测器视野范围, 探测器计数即为零。因此, 只需计算它们在不同相对层数间隔 (0, 1, 2 层) 的 3 种情况即可。通过 MCNP 程序对 SGS 断层效率的计算, 得到了断层效率随基质密度、 γ 射线能量的关系分布, 如图 4 所示。

图 4(a)~(c) 中桶内基质材料为硅酸铝, 图 (d)~(f) 中桶内基质材料为木制纤维, 基质密度分别为 0.1, 0.2, ..., $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, γ 射线能量分别为 0.2, 0.4, ..., 1.8 MeV , 总共 90 个离散点的断层效率模拟值。从图 4 可以看出: (1) 断层效率随基质密度增大而减小, 基质对 γ 射线自吸收越来越强; (2) 断层效率随 γ 射线能量增大而减小, γ 射线在探测器晶体中沉积能量越来越弱; (3) 断层效率随层数间隔增大而减小, 探测立体角变小且探测距离增大; (4) 探测器与断层样品相隔 0, 1, 2 层, 硅酸铝断层效率和木制纤维断层效率的相关系数分别为 0.999 1, 0.999 3, 0.998 5, 说明不同基质桶内填充、同一种 γ 射线能量下, 基质密度相同时, 断层效率相当, 即宏观表现出基质密度和 γ 射线能量为断层效率的主要影响因素, 而基质成分影响并不大。

2.3 刻度函数模型及参数

根据 MCNP 程序模拟计算, 确定不同能量 γ 射线在不同密度的硅酸铝、木质纤维样品中的断层效率分布, 即图 4 中的效率值。采取逐步多次拟合方法, 由最小拟合误差得到较优的拟合公式, 最终确定采用式(5)作为效率刻度函数模型, 进行多元非线性回归, 建立断层效率 ε 与基质密度 ρ , γ 射线能量 E 的关系, 即

$$\varepsilon(E, \rho, a_i) = \exp[a_1 + a_2 \ln(E) + a_3 \rho + a_4 \ln^2(E) + a_5 \ln(\rho) \ln(E) + a_6 \rho^{1/5}] \quad (5)$$

式中: a_i ($i=1, 2, \dots, 6$) 为待定参数。结合图 4 中的断层效率值和式(5), 拟合得到回归参数及相关系数 R^2 , 如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 采用式(5)作为效率刻度函数模型, 拟合相关系数 R^2 均接近于 1, 拟合效果好。在硅酸铝、木

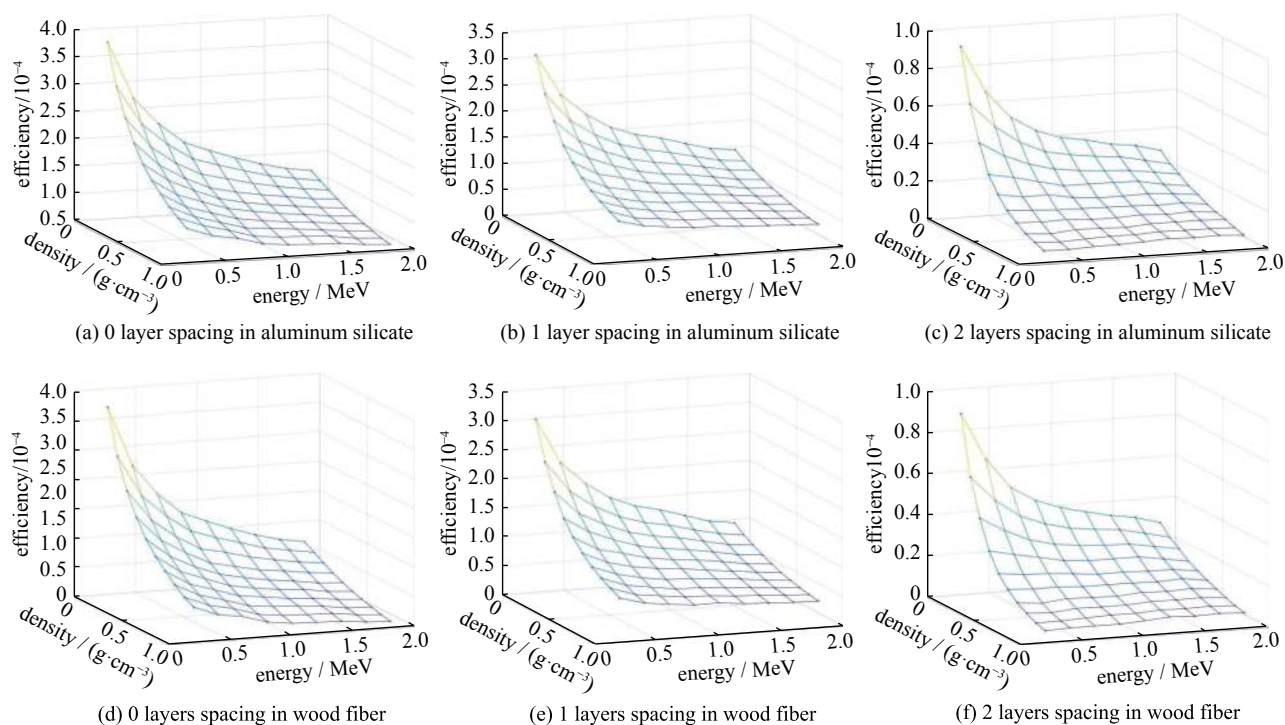


Fig. 4 Distribution of segment efficiency

图4 断层效率分布

表1 效率刻度函数参数

Table 1 Parameters of efficiency function

calibrating material	spacing	parameter						R^2
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	
aluminum silicate	0 layer between detector and segment	-8.214	-0.322	-0.681	-0.034	0.101	-0.601	0.998
	1 layer between detector and segment	-8.376	-0.303	-0.870	-0.051	0.110	-0.564	0.998
	2 layers between detector and segment	-10.094	-0.015	-2.014	-0.014	0.224	0.346	0.996
wood fiber	0 layer between detector and segment	-8.152	-0.312	-0.676	-0.031	0.102	-0.713	0.999
	1 layer between detector and segment	-8.341	-0.293	-0.888	-0.047	0.111	-0.637	0.998
	2 layers between detector and segment	-10.052	0.011	-2.098	-0.015	0.231	0.276	0.996

质纤维分别填充桶时,相同间隔层数的拟合参数也非常近似,因此实验分析中,两种刻度函数参数均可作为效率刻度而使用。

3 实验

3.1 核废物桶样品 SGS 实验测量

在团队自行研制的 SGS 装置上进行实验分析,实验测量如图 5 所示,系统各部分结构参数与上述建模数据相同。实验采用密度为 $0.310 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的硅酸铝、密度为 $0.595 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的木质纤维作为基质材料,放射源采用实验室标准点源 ^{137}Cs (活度为 $3.110 \times 10^5 \text{ Bq}$) 和 ^{60}Co (活度为 $1.371 \times 10^5 \text{ Bq}$)。分别将点源单独置于桶内基质的不同位置处,如图 6 所示,总共 8 个位置,1~4 号在桶中心,高度依次为 50, 150, 250, 350; 4~8 号在同一高度,偏移桶中心距离依次为 0, 65, 115, 175, 220, 单个 γ 能谱测量时间为 300 s。

3.2 效率刻度矩阵与活度重建

根据桶内核素发射 γ 射线能量分别为 0.662, 1.173, 1.332 MeV, 基质密度为 $0.310 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的硅酸铝、密度为 $0.595 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的木质纤维,带入效率刻度函数得到效率矩阵 $\varepsilon_{ij}[8 \times 8]$ 。由于上述两种刻度函数参数均可作为效率刻度而使用,本文采用硅酸铝作为基质条件下得到的函数参数进行断层效率刻度,计算得到的效率刻度矩阵如图 7 所示。

根据图 7 中的效率刻度矩阵 $\varepsilon_{ij}[8 \times 8]$,采用 MLEM 算法求解活度重建方程式(1),得到了每一个断层的活度 $A_j[8 \times 1]$,由式(2)计算得到桶内单种核素的总活度,分析结果如表 2 所示。其中 1#~8#分别对应图 6 中 1~8 号位



Fig. 5 SGS experimental measurement
图 5 SGS 实验测量

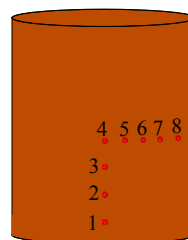


Fig. 6 Positions of point source in the drum
图 6 点在桶中位置变化

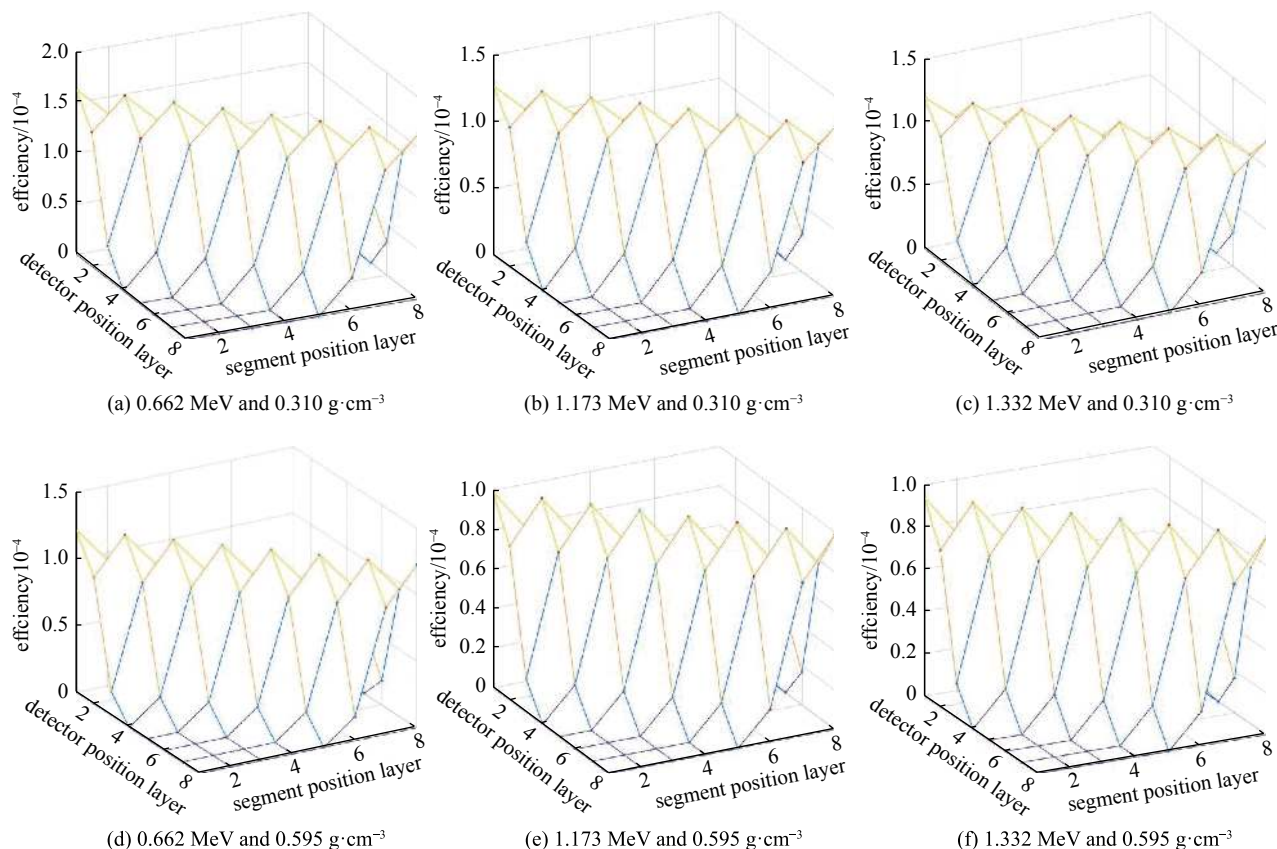


Fig. 7 Efficiency matrices (aluminum silicate sample)
图 7 效率矩阵

表 2 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 核素的重建活度和误差

Table 2 Reconstructed activities and errors of ^{137}Cs and ^{60}Co

samples No.	activity in aluminum silicate/Bq(error/%)			activity in wood fiber/Bq		
	0.662 MeV	1.173 MeV	1.332 MeV	0.662 MeV	1.173 MeV	1.332 MeV
1#	$2.869 \times 10^5(-7.74)$	$1.479 \times 10^5(7.89)$	$1.403 \times 10^5(2.33)$	$1.938 \times 10^5(-37.68)$	$1.119 \times 10^5(-18.35)$	$1.102 \times 10^5(-19.54)$
2#	$3.025 \times 10^5(-2.74)$	$1.591 \times 10^5(16.08)$	$1.532 \times 10^5(11.77)$	$2.138 \times 10^5(-31.25)$	$1.265 \times 10^5(-7.68)$	$1.197 \times 10^5(-12.6)$
3#	$3.096 \times 10^5(-0.46)$	$1.646 \times 10^5(20.08)$	$1.512 \times 10^5(10.32)$	$2.235 \times 10^5(-28.15)$	$1.273 \times 10^5(-7.09)$	$1.211 \times 10^5(-11.64)$
4#	$3.079 \times 10^5(-0.99)$	$1.468 \times 10^5(7.07)$	$1.396 \times 10^5(1.79)$	$2.129 \times 10^5(-31.56)$	$1.239 \times 10^5(-9.6)$	$1.199 \times 10^5(-12.48)$
5#	$3.134 \times 10^5(0.78)$	$1.582 \times 10^5(15.39)$	$1.513 \times 10^5(10.36)$	$2.199 \times 10^5(-29.3)$	$1.265 \times 10^5(-7.64)$	$1.215 \times 10^5(-11.34)$
6#	$3.243 \times 10^5(4.29)$	$1.640 \times 10^5(19.61)$	$1.568 \times 10^5(14.34)$	$2.474 \times 10^5(-20.44)$	$1.347 \times 10^5(-1.7)$	$1.302 \times 10^5(-4.93)$
7#	$3.445 \times 10^5(10.78)$	$1.739 \times 10^5(26.81)$	$1.640 \times 10^5(19.66)$	$2.972 \times 10^5(-4.43)$	$1.567 \times 10^5(14.35)$	$1.463 \times 10^5(6.81)$
8#	$3.680 \times 10^5(18.32)$	$1.803 \times 10^5(31.52)$	$1.745 \times 10^5(27.24)$	$3.579 \times 10^5(15.07)$	$1.794 \times 10^5(30.97)$	$1.708 \times 10^5(24.65)$
9#	$3.316 \times 10^5(6.63)$	$1.646 \times 10^5(20.07)$	$1.572 \times 10^5(14.68)$	$2.670 \times 10^5(14.13)$	$1.442 \times 10^5(5.28)$	$1.377 \times 10^5(0.54)$

置点核素点源单独存在时的活度重建结果, 9#是采用同一断层第4~8号位置点实验净峰面积数据的平均值(近似等效多核素点同时存在一个断层内)进行核素活度重建。

由表 2 的核素活度重建结果与误差分析可以看出: 1~3 号位置, 放射性核素纵向越接近桶中心层的位置, 探测器对核素发出的 γ 射线探测越充分, 重建核素活度逐渐增大; 4~8 号位置, 点源距离桶边缘越近时, 点源在探测器近端, 探测距离减小和介质衰减减弱, 共同导致探测器计数增大, 重建核素活度逐渐增大; 9#重建核素活度误差明显总体下降, 具有综合减小误差的能力, 说明断层多位置存在核素时, 重建活度值更加准确, 验证了桶内核素分布越均匀越符合 SGS 技术中旋转等效均匀假设, 误差越小。对于木质纤维样品中核素处在桶的中心轴上时, 活度重建值误差较大, 且往数值减小方向偏移, 主要原因是在效率模拟计算过程中, 相同的密度条件下, 探测器对于硅酸铝样品中 γ 核素的探测效率略高于木质纤维样品, 最终导致采用硅酸铝基质条件下的效率函数参数来计算木质纤维样品中的效率矩阵, 矩阵值有偏大趋势, 求解桶内核素活度值偏小。桶内核素活度重建误差在 $-37.68\% \sim 31.52\%$ 范围内, 核素单独存在于桶底面层或桶壁边缘时, 重建效果较差。总体而言, 该方法重建桶内核素活度准确有效。

3.3 刻度函数参数对重建活度的影响

为了探究刻度函数拟合参数对重建结果的敏感性分析, 将表 1 中两种不同基质条件下的效率刻度函数参数均用于效率刻度, 最终进行硅酸铝样品和木质纤维样品中 ^{137}Cs , ^{60}Co 核素的活度重建, 结果如图 8 所示, 图 (a) 为硅酸铝样品的活度重建结果, 图 (b) 为木质纤维样品的活度重建结果。在图标中, F1 表示采用表 1 中的硅酸铝基质刻度函数参数进行效率刻度, F2 表示采用表 1 中的木质纤维基质刻度函数参数进行效率刻度, 0.662, 1.173, 1.332 分别表示桶内出射 γ 射线能量为 0.662, 1.173, 1.332 MeV。

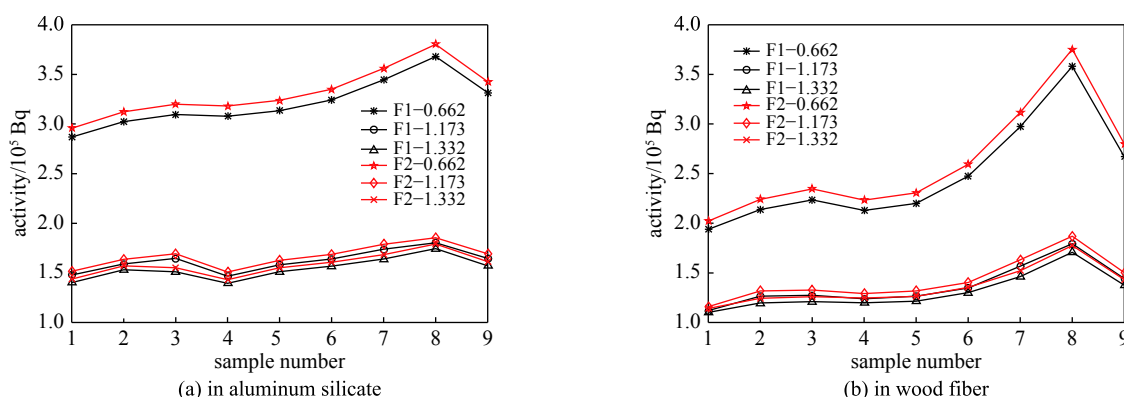


Fig. 8 Comparison of reconstructed activity with two sets of parameters (F1 and F2 represent parameters calibrated by aluminum silicate and wood fiber respectively, as shown in Table 1)

图 8 两种刻度函数参数下活度重建结果对比

从图 8 可以看出, 对于点源 ^{137}Cs , ^{60}Co 在硅酸铝样品和木质纤维样品中的 9 种不同位置分布情况, 选取不同的刻度函数参数对活度重建结果的计算略有影响。具体呈现为 F2 函数参数比 F1 函数参数条件下的重建活度值高, 主要原因是采用 F2 函数参数进行效率刻度时, 获得的效率矩阵值偏低, 导致相同实验测量数据时求解的活度值略有偏高。总体而言, 基于上述两种效率刻度函数而进行桶内核素活度重建的结果有效, 该两种刻度函数参数均可作为效率刻度而使用。

本次实验分析是在单个点源任意存在于桶内的不同高度和不同偏心距各个位置处, 属于核废物桶内核素分布的极端不均匀情况, 重建活度误差在小于 38% 范围内。前人的研究表明, 对于桶内核素为点源的极端情况, 分析误差范围一般是 $-80\% \sim 300\%$ ^[7], 该方法在一定程度上缩减了分析误差范围。实际核废物桶 SGS 分析过程中, 桶内一般是多处均有核素分布, 比本次实验更接近核素均匀分布的理想状态, 测量结果会更好。因此, 本文提出的方法能够实现 SGS 断层效率刻度, 并确定核废物桶内放射性核素含量, 可满足实际检测要求。

4 结 论

本文通过蒙特卡罗模拟计算断层效率离散数据, 结合所提出的函数模型, 建立效率刻度函数, 完成效率矩阵计算。实验结果表明, 对于单点源单独存在的极端不均匀分布情况, 活度重建误差在 $-37.68\% \sim 31.52\%$ 范围, 同时分析了两种刻度函数参数对桶内核素活度重建的影响。本文方法能够准确实现 SGS 断层效率刻度, 并确定核废物桶内放射性核素含量, 对低、中密度核废物桶 γ 无损检测具有一定的参考意义。考虑到实际核废物桶内放射性核

素不是均匀分布理想状态, SGS 检测原理本身带来的误差只能在一定程度上被降低, 而无法从根本上消除。基于 CT 原理的层析 γ 扫描(TGS)技术, 通过对核废物桶进行多角度、多位置的三维扫描, 可实现桶内放射性核素的定性、定量、定位分析, 对核素活度分析的准确度高, 而该方法分析效率低, 因此, 进一步研究具有良好分析效率的 TGS 技术是一条重要途径。

参考文献:

- [1] 刘哲, 张丽. γ 射线CT放射性废物桶检测技术综述[J]. CT理论与应用研究, 2014, 23(6): 1025-1040. (Liu Zhe, Zhang Li. Review of γ -ray CT for radioactive waste assay[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(6): 1025-1040)
- [2] 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. (Zhang Quanhu. Research of tomographic gamma scanning (TGS) reconstruction technique[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2003)
- [3] 莫继锋, 李美山, 张存平, 等. SGS技术在放射性固体废物整备检测中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(8): 950-953. (Mo Jifeng, Li Meishan, Zhang Cuning, et al. Application on the SGS technology in the measurement of radioactive solid waste conditioning[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2014, 34(8): 950-953)
- [4] 周志波. 桶装核废物快速检测方法研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2007. (Zhou Zhibo. Research on the analysis method for the fast measurement of nuclear waste with γ spectrum[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2007)
- [5] Parker J L. Use of calibration standards and the correction for sample self-attenuation in gamma-ray nondestructive assay[J]. Inorganic Organic Physical & Analytical Chemistry, 1984.
- [6] Prettyman T H, Reilly T D, Miller M C, et al. Advances in nuclear instrumentation for safeguards[R]. LA-UR-96-3757, 1996.
- [7] 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.
- [8] Hsue S T, Stewart J E. Guide to nondestructive assay standard preparation, criteria, availability and practical considerations[R]. La-13340-Ms, 2000.
- [9] 刘月恒, 屠荆, 仲云红. 环境样品测量中的一种自吸收校正方法研究[C]//全国第5届核仪器及其应用学术会议. 2005. (Liu Yueheng, Tu Jing, Zhong Yunhong. A method of self-sorption correction for environmental radioactive measurement[C]//Proceedings of the 5th National Conference on Nuclear Instrument & Its Application. 2005)
- [10] Bosko A, Geurkov G, Croft S, et al. Advanced approach for calibration of the segmented gamma scanner for the radioassay of drummed waste[C]//2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2006: 212-213.
- [11] Nakazawa D, Bronson F, Croft S, et al. The efficiency calibration of non-destructive gamma assay systems using semi-analytical mathematical approaches[C]//WM2010 Conference. 2010.
- [12] 易珂. 中低放射性废物活度无源 γ 测量实验及模拟计算研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (Yi Ke. Experimental study and simulation of the passive gamma measurement on low-and-intermediate-level radioactive waste[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009)
- [13] Liang J H, Jiang S H, Chou G T, et al. A theoretical investigation of calibration methods for radwaste radioactivity detection systems[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1996, 47(7): 669-675.
- [14] Bruggeman M, Gerits J, Carchon R. A minimum biased shell-source method for the calibration of radwaste assay systems[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1999, 51(3): 255-259.
- [15] 徐利军, 叶宏生, 张卫东, 等. 分段 γ 扫描装置校准用桶状标准源的设计[J]. 核技术, 2015, 38: 050502. (Xu Lijun, Ye Hongsheng, Zhang Weidong, et al. Design of reference radioactive source of waste drum used in calibration of segmented gamma scan device[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38: 050502)
- [16] 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, 2006. (Xu Shuyan. Application of Monte Carlo method in nuclear physics experiment[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2006)
- [17] Dung T Q. Calculation of the systematic error and correction factors in gamma waste assay system[J]. Annals of Nuclear Energy, 1997, 24(1): 33-47.