

doi: 10.7690/bgzdh.2016.08.021

核废物密度对 SGS 测量影响的蒙特卡罗模拟

杜树标¹, 蒋韦韦², 甘霖¹

(1. 绵阳市维博电子有限责任公司技术中心, 四川 绵阳 621000;
2. 大亚湾核电运营管理有限责任公司安全防护部, 广东 深圳 518120)

摘要: 针对分层 γ 扫描 (segmented gamma scanning, SGS) 系统受核废物密度影响的问题, 为研究核废物密度对特征能量脉冲计数的影响, 提出一种蒙特卡罗仿真分析方法。采用蒙特卡罗软件 MCNP (monte carlo n-particle transport code) 建立基于原型的 SGS 仿真模型, 将废物桶内分别填充密度相差较大的 2 种常见核废物, 使用透射源、混合源分别进行透射测量和发射测量, 对比能谱测量结果。结果表明: 核素特征峰幅度随密度增大而减小, 杂散能量脉冲幅度随密度增大而增大, 且密度变化对透射测量影响较大, 需要在后期校正计算时进行针对性修正。

关键词: 分层 γ 扫描; 蒙特卡罗; 密度
中图分类号: TP206 **文献标志码:** A

The Monte Carlo Simulation of Nuclear Waste Density Influence on SGS Measurement

Du Shubiao¹, Jiang Weiwei², Gan Lin¹

(1. Technique Center, Mianyang Weibo Electronics Co., Ltd, Mianyang 621000, China;
2. Security Department, Daya Bay Nuclear Power Operation & Management Co., Ltd., Shenzhen 518120, China)

Abstract: Aiming at the influence of nuclear waste density on segmented gamma scanning (SGS) measurement, to study the influence on pulse count, put forward the Monte Carlo simulation method and establish the SGS system through Monte Carlo software MCNP based on the prototype, fill the waste barrel with two different density waste, and use the transmission source and mixed source to measure the energy spectrum respectively, contrast the simulation results. It shows that, the nuclide characteristic peak amplitude decreases with increasing the density, stray energy pulse amplitude increases with density increases, and the density change has a greater influence on the transmission measurement, it's necessary to take density factor into account when correction calculation for specific correction.

Keywords: segmented gamma scanning; Monte Carlo; density

0 引言

随着核能的不断开发利用, 在核燃料生产、核设施运行、乏燃料处理等过程中产生了大量核废物, 核废物的合理处置是核工业发展面临的重要问题。按放射性水平分类处理是减少废物总量、控制放射性交叉污染的有效方法, 分层 γ 扫描 (segmented gamma scanning, SGS) 技术在固体核废物分类过程中起到重要作用。目前, 国外 SGS 技术发展成熟, 已得到广泛应用, 如英国 BIL 公司研制的 HRGS MK II、美国 CANBERRA 公司研制的 WM2200 等, 但国内 SGS 技术研究还处于实验室或工程样机阶段, 尚没有成熟的市场产品。

根据 SGS 测量结果对核废物进行分类存储, 可实现废物处理最优化^[1]; 然而, SGS 测量结果受物质密度分布、放射性物质分布、层间串扰等多种因素影响, 难以得出准确的结果。基于此, 笔者采用蒙特卡罗仿真软件 MCNP 对 SGS 测量系统建模, 探析核废物密度对 SGS 系统的测量影响。

1 SGS 测量原理

SGS 是一种无损检测 (non-destructive assay, NDA) 方法, 系统由透射源组件、废物桶、HPGe 探测器组件及配套分析软件组成。通过透射源对废物桶分层透射测量以及桶内放射性物质自发射测量, 分析得出桶内放射性元素及活度^[2]。图 1 为西南自动化研究所研制中的 SGS 测量系统, 除升降测量、平台旋转等功能外, 还具备称重及废物桶传输等功能, 较大程度地减少了工作人员辐照损伤。

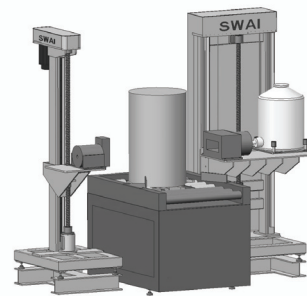


图 1 西南自动化研究所研制的 SGS 系统

收稿日期: 2016-04-18; 修回日期: 2016-05-15

作者简介: 杜树标(1978—), 男, 四川人, 硕士, 助理工程师, 从事核辐射监测技术研究。

1.1 透射测量

透射测量目的是为了测得废物桶中物质的线衰减系数，用于发射测量计算时自吸收校正。使用经准直后的透射源 ^{152}Eu 对废物桶进行透射测量，根据窄束 γ 射线在物质中的衰减规律公式 (1)，拟合得出线衰减系数 μ 随 γ 射线能量变化的特征方程，通过式 (2) 求出对应 γ 射线能量下的线衰减系数：

$$N(E) = N_0(E)e^{-\mu(E)x}; \quad (1)$$

$$\mu(E) = -\frac{1}{x} \ln\left[\frac{N(E)}{N_0(E)}\right]. \quad (2)$$

式中： $N_0(E)$ 和 $N(E)$ 分别为放入废物桶前后所得 γ 能谱全能峰净计数； x 为 γ 射线在物质中穿透厚度。

1.2 发射测量

关闭透射孔闸门，测量废物桶内放射性物质自发射 γ 射线，通过校正和分析，得出放射源元素及活度。发射测量全能峰计数 $C(E)$ 满足下式：

$$C(E) = \varphi(E) \cdot A(E). \quad (3)$$

式中： $\varphi(E)$ 为衰减校正效率； $A(E)$ 为放射物质活度，衰减校正效率满足下式

$$\varphi(E) = \varepsilon(E) \cdot a(E) = \varepsilon(E) \cdot e^{-\mu(E)R}. \quad (4)$$

式中： $\varepsilon(E)$ 为探测效率； $a(E)$ 为自吸收校正因子，而自吸收校正因子由线性衰减系数求得； R 为自发射 γ 射线在物质中的衰减厚度。综合式 (3)、式 (4)，得出放射性物质活度计算公式：

$$A(E) = \frac{C(E)}{\varphi(E)} = \frac{C(E)}{\varepsilon(E) \cdot e^{-\mu(E)R}}. \quad (5)$$

2 仿真模拟

蒙特卡罗方法是一种以概率统计理论为基础的方法，广泛运用于实验核物理、反应堆物理、高能物理等领域，解决中子、光子、电子等粒子输运问题^[3-4]。笔者采用美国 Los Alamos 国家实验室开发的蒙特卡罗仿真软件 (monte carlo n-particle transport code, MCNP) 进行仿真，为使仿真结果更接近真实值，以图 1 的系统作为原型进行建模，按照原型几何结构参数建立仿真模型如图 2 所示。

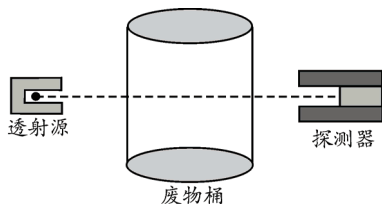


图 2 SGS 系统蒙特卡罗模型

2.1 核废物组成

为研究核废物密度对系统测量的影响，笔者选用核设施运行过程中常见的几种核废物。根据我国 CPR1000 核电机组固体废物处理工艺，SGS 系统主要用于检测放射性技术型核废物，以便分拣和分类存储。技术型核废物是指核电站在设备检修、去污等过程中产生的放射性固体废物，主要包括保温材料、纸片、塑料布、电子器件、金属碎片等^[5]，选用密度相差较大的 2 种核废物：玻璃棉保温材料和聚乙烯塑料布，密度分别为： 0.02 g/cm^3 和 0.9 g/cm^3 。由于 SGS 计算模型是建立在核废物密度分布均匀的基础上，在 SGS 系统实际测量过程中，废物桶会在转台的带动下进行周向低速旋转，使核废物密度“均匀化”，以减小物质密度分布不均产生的偏差^[6-7]。在仿真模拟试验中，不考虑核废物密度分布不均的影响，仅在桶内充满单一物质核废物。

2.2 放射性核素组成

核电站在实际运行过程中产生的核废物放射性核素主要为： ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am 等^[8]，选择常用的 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 放射源作为桶内放射性核素进行模拟，其特征峰能量分别为 1.17、1.33 和 0.662 Mev。透射源选用 ^{152}Eu ，主要特征峰能量为 0.121 8、0.344 3、0.778 9、0.964、1.11 和 1.408 Mev。

2.3 仿真试验

分别将废物桶设置为空桶和均匀充满玻璃棉和聚乙烯的废物桶，使用 ^{152}Eu 源对废物桶进行透射测量，观察探测器能谱信息。取消透射源，将 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的混合源置于桶中进行发射测量，对比在不同核废物中的测量结果，分析核废物密度对透射测量和发射测量的影响。由于放射源分布会对测量结果产生影响，考虑实际测量中桶的旋转，模拟试验将放射源置于桶中心。仿真时蒙特卡罗随机采样数设为 10^7 ，通过 E8 对 0~1.5 Mev 能量进行 409 6 道划分，并采用 F8 计数方式测量各能量区间脉冲计数^[9-10]。

3 模拟结果

3.1 透射测量模拟

当废物桶分别为空和装满玻璃棉保温材料时，透射测量模拟结果如图 3 所示。2 种条件下各能量脉冲计数非常接近，填充玻璃棉时计数略少于空桶计数，但杂散能量脉冲计数有所增加，能谱波动有

所增大。

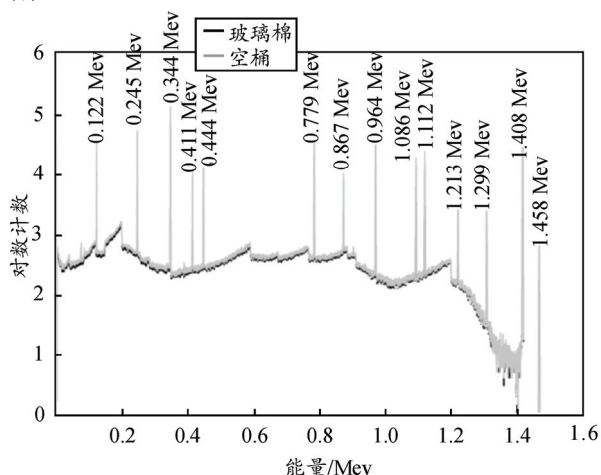


图 3 空桶及玻璃棉废物桶透射测量对比

当废物桶填充聚乙烯塑料时，透射测量模拟结果如图 4 所示，填充聚乙烯时各能量脉冲计数大幅低于玻璃棉，且杂散能量脉冲显著增加，能谱波动明显增大。

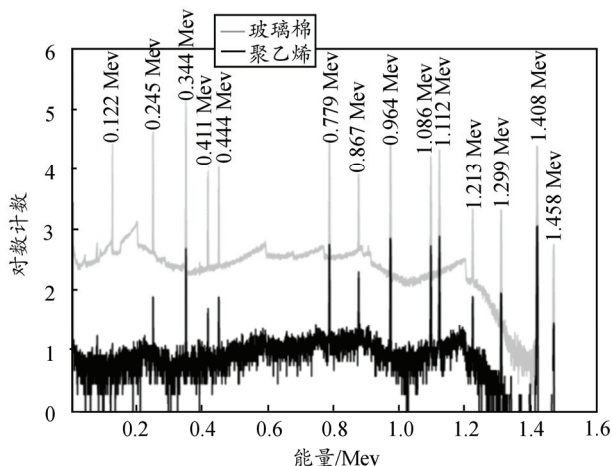


图 4 玻璃棉和聚乙烯核废物透射测量对比

3.2 发射测量模拟

采用 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的混合源置于桶中心进行发射测量，空桶和玻璃棉废物桶模拟结果如图 5 所示， ^{60}Co 和 ^{137}Cs 各特征能量峰清晰可辨，2 种条件下各能量脉冲计数非常接近，填充玻璃棉时计数略少于空桶计数，略有杂散计数脉冲。

当桶内分别充满玻璃棉和聚乙烯时，模拟结果如图 6 所示，填充聚乙烯时各能量脉冲计数大幅低于玻璃棉，且杂散能量脉冲显著增加，能谱波动明显增大。

在核废物处理过程中，会对易压缩核废物进行压缩减容，压缩引起的密度变化同样影响 SGS 系统测量结果。图 7 为 ^{60}Co 放射源特征峰脉冲计数随玻

璃棉压缩密度变化情况，随压缩密度的增大，脉冲计数逐渐减小。

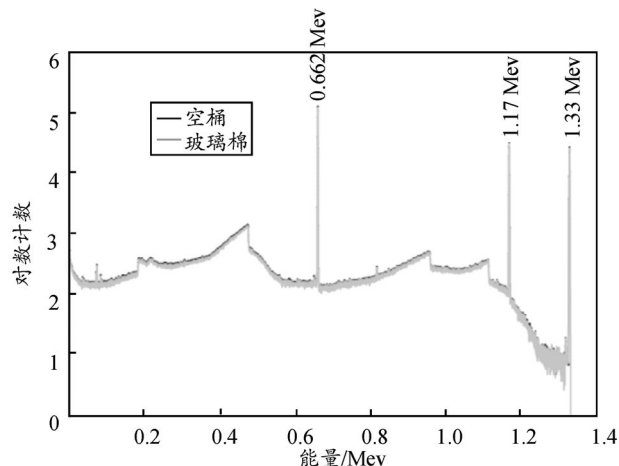


图 5 空桶及玻璃棉废物桶发射测量对比

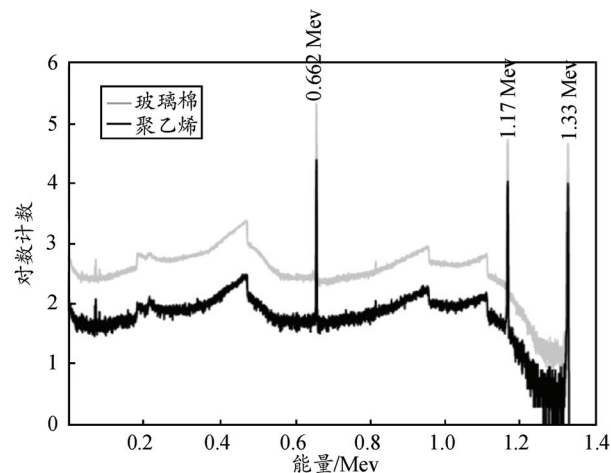


图 6 玻璃棉和聚乙烯核废物发射测量对比

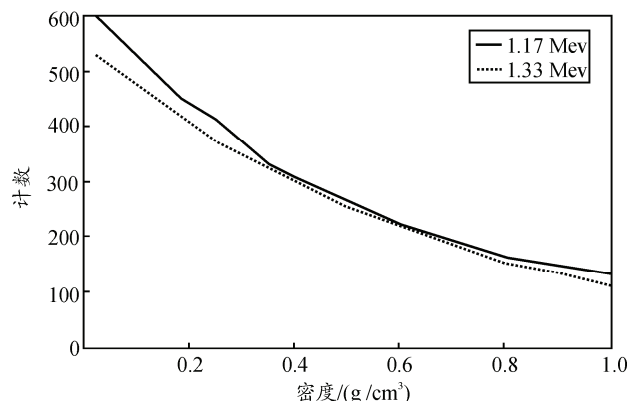


图 7 特征峰脉冲计数随玻璃棉压缩密度变化

4 结束语

由仿真试验结果可以看出：对于未经压缩的玻璃棉核废物，由于其密度较低，无论是透射测量还是发射测量，各特征能量脉冲计数均接近空桶计数值，对能谱影响较小；但经过压缩工序后，由于其密度变化，对特征峰脉冲计数有较大影响。对于密

度较大的聚乙烯塑料核废物,透射测量和发射测量时都出现明显杂散脉冲,且透射测量时杂散脉冲幅度较大,会对核废物衰减系数计算产生较大影响,将进一步影响桶内核素放射源活度计算。

在实际 SGS 测量时,应充分考虑密度因素的影响,并结合废物桶称重数据,对不同密度核废物进行针对修正计算,以准确得出桶内核素放射性活度。

参考文献:

- [1] 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): 950-952.
- [2] 苏荣坡,阳林峰,庾先国,等. 核废物桶中 γ 射线吸收特征的蒙特卡洛模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(11): 1132-1134.
- [3] Stanga D, Gurau D. A new approach in gamma ray scanning of rotating drums containing radioactive waste[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2012, 70(9): 2149-2153.
- [4] Hsue S T, Stewart J E. Guide to nondestructive assay standard preparation, criteria, availability, and practical considerations, LA-13340-Ms[R]. US: Los Alamos National Laboratory, 2005: 15-17.
- [5] 陆科峰,钟香斌,李超,等. CPR1000 机组固体废物处理系统及其调试[J]. 辐射防护, 2015, 35(4): 243-245.
- [6] 余少杰,郝锐,张静. MCNP 模拟 HP-Ge 探测器效率刻度曲线[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(1): 14-16.
- [7] 王仲奇,宗波,郜强,等. 分层 γ 扫描定量分析中层内放射性非均匀分布影响分析[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(1): 104-105.
- [8] 刘自霞,陆春海,陈敏,等. 不同材料对 γ 射线衰减系数的 MCNP 模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(11): 1376-1378.
- [9] 张建芳. 高纯锗探测器探测效率的 MCNP 模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [10] Bai Y F, Mauerhofer E, Wang D Z, et al. An improved method for the non-destructive characterization of radioactive waste by gamma scanning[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2009, 67(10): 1897-1903.