

核废物桶中 γ 射线吸收特征的蒙特卡洛模拟

苏容波¹, 阳林峰², 庾先国^{2,3}, 余小平², 李哲², 丁逸仙², 张金钊²

(1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900; 2. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610059; 3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 为了研究在分段 γ 测量技术中被测废物桶内放射源能量的大小和桶内覆盖物吸收之间的关系。采用蒙特卡罗方法模拟了桶内放射源分别为 ^{241}Am 和 ^{137}Cs , 在不同位置时, 对密度分别为 0.872 和 0.126 g/cm^3 两种介质吸收的关系。通过对 MCNP 模拟数据分析可得, 在利用分段 γ 测量技术测量核废物桶时, 桶内能量高的射线, 覆盖物的吸收影响小于能量低的射线。因此, 对于发射低能射线的桶装废物进行非破坏检测时, 由桶内覆盖物和放射源的分布不均引起的测量误差较大。

关键词: 蒙特卡洛模拟; 分段 γ 测量; 物质介质吸收

中图分类号: TL 822.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2012)11-1332-04

在核材料的生产、加工、运输、贮存和使用过程中不可避免地会产生一定量的中低放射性废物。按照国家相关规定和要求, 在对这些废物进行最终处置之前必须对其中所含核素种类及其核素的含量进行准确的鉴别和测量, 以检验其是否满足中低放废物的入库条件并制定相应措施对其进行处置^[1-2]。在这个实际操作过程中分段 γ 测量技术^[3] 发挥了重要作用, 本文通过建立蒙特卡洛模型, 探究在分段 γ 测量技术中废物桶内覆盖物介质与放射源能量之间的吸收关系。

1 计算模型描述

针对整个分段 γ 测量系统建立蒙特卡洛计算模型。建立计算模型时, 为了使模拟得到的结果更接近真实值, 必须对系统的几何结构、废物桶材料组成、废物桶内覆盖物材料组成以

及放射源等进行接近实物的必要描述。

1.1 几何描述

分段 γ 测量系统主要由探测器和废物桶两部分组成(如图1所示)。该模型中的高纯锗半导体探测器直径为 5.8 cm 、高为 6.0 cm , 封装在一圆柱形铝壳内, 铝壳顶部厚为 0.3 cm , 侧面厚为 0.6 cm , 与探测器表面相距 0.5 cm ^[4-5]。废物桶为 208 L 的标准钢桶, 桶内直径为 56 cm , 桶内高度为 89 cm 。

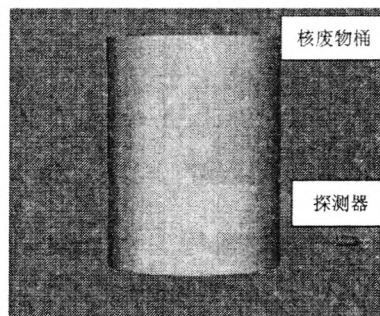


图1 MCNP 3D 模型

1.2 废物桶内覆盖物材料组成

在核电厂运行过程和核设施退役中产生的常见中低放核废物主要是用过的手套、口罩、衣物以及用于核设施建设的泥土等。因此, 在模

收稿日期: 2012-05-24

作者简介: 苏容波(1977-), 男, 助理研究员, 学士, 从事辐射防护研究。

拟废物桶内覆盖物选择上,主要考虑的是密度为0.126 g/cm³的棉质品和密度为0.872 g/cm³的泥土。

1.3 废物桶内 γ 射线的产生和能量选择

根据核电厂运行和核设施日常科研生产的经验,实际形成的放射性废物中用于 γ 谱测量的核素主要有:²⁴¹Am、²³⁸U、²³⁵U、¹⁵²Eu、¹³⁷Cs、⁵⁷Co、⁶⁰Co 和⁵⁴Mn。其用于活度计算的特征峰能量对应如下:59.54、92.80、143.76、344.27、661.65、122.10、1 332.50 和 834.83 keV。因此,在模拟废物桶内放射源选择上,主要选择的是特征峰能量为 59.54 keV 的²⁴¹Am 和特征峰

能量为661.7 keV 的¹³⁷Cs^[6-7]。

1.4 模拟模型的建立及模拟过程

进行蒙特卡洛模拟废物桶时,首先将放射源分别置于废物桶内距桶底 10 cm 的位置一、位置二、位置三以及位置四处(如表 1 所示),然后将桶内填充满上述选择的单一覆盖物。针对上述 4 处不同位置,MCNP 所建模型俯视图如图 2 至图 5 所示。为了尽可能使得废物桶内被测物质均匀接近实际测量过程,在放射源置于一处位置时,探测器体元以每次增加 10° 围绕废物桶旋转一圈,共进行 36 次模拟测量。

表 1 不同位置时距废物桶内壁距离

位置一	位置二	位置三	位置四
放射源中心距废物桶 内壁 3cm 处	放射源中心距废物桶 内壁 10cm 处	放射源中心距废物桶 内壁 20cm 处	放射源中心距废物桶 内壁 26cm 处

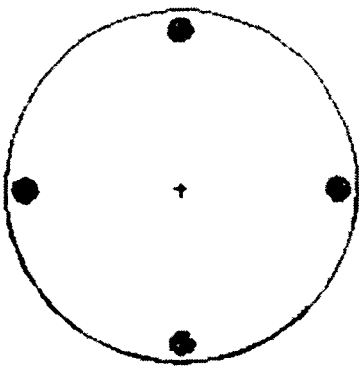


图 2 位置一

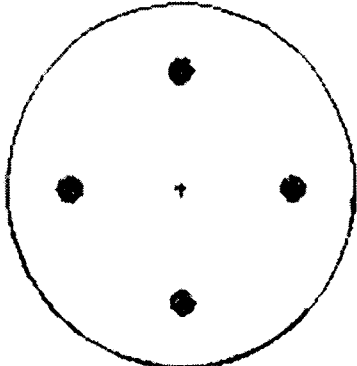


图 3 位置二

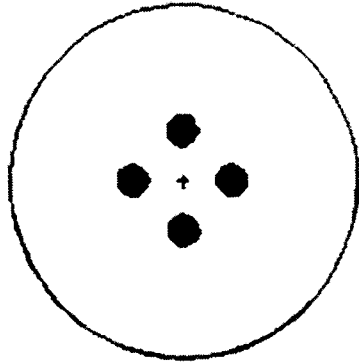


图 4 位置三

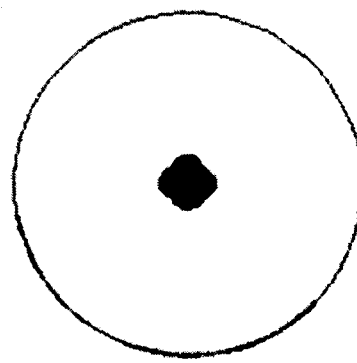


图 5 位置四

表 2 蒙特卡洛模拟所得计数

废物桶内放射源位置	MCNP 模拟计数			
	棉织品(0.126 g/cm ³)		泥土(0.872 g/cm ³)	
	²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs
位置一	8507	479	5299	236
位置二	8480	471	1651	117
位置三	8421	463	712	84
位置四	8097	461	349	79

2 模拟所得数据分析

通过对上述所建 MCNP 模型进行模拟计算得数据如表 2 所示。每一位置的计数均是放射源位于该处时,探测器体元以每次增加 10° 围绕废物桶旋转一圈,进行 36 次模拟测量所得数据的平均值。

如图6所示,当废物桶内覆盖介质为棉质产品时,随着放射源位置距废物桶内壁距离的增加,探测器计数变化不大。可见,低密度的覆盖物对废物桶内低能量和高能量射线吸收都较弱,此时对核废物桶内核素的测量几乎无影响。

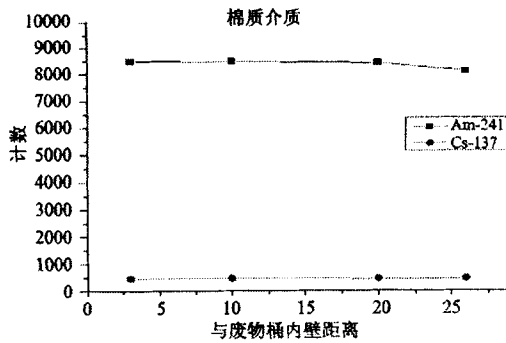


图6 覆盖物为棉质介质时的计数

如图7所示,当废物桶内覆盖介质为泥土,桶内放射源为 ^{241}Am 时,随着放射源位置距废物桶内壁距离的增加,探测器计数迅速减少,而当放射源为 ^{137}Cs 时,随着放射源位置距废物桶内壁增加,探测器计数变化不大。可见此时覆盖物对低能量射线的吸收作用比对高能射线强。这将在实际测量过程中,对废物桶内核素的测量带入误差。

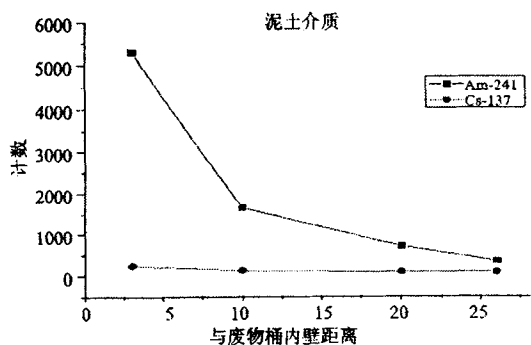


图7 覆盖物为泥土介质时的计数

如图8和图9所示,随着覆盖物密度的增加,覆盖物的吸收作用增强。

综上所述,在废物桶内发射低能射线的放射源受覆盖物介质吸收的影响较发射高能射线的放射源强。且随着覆盖物密度的增加,介质吸收的能力增强。

3 总结

利用蒙特卡洛模拟软件模拟测量废物桶中放射性废物时,由模拟测量数据分析可得,对于废物桶内发射低能量射线的放射源,覆盖物的

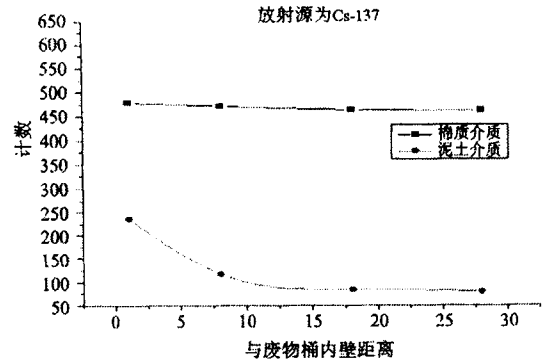


图8 放射源为 ^{137}Cs 时的计数

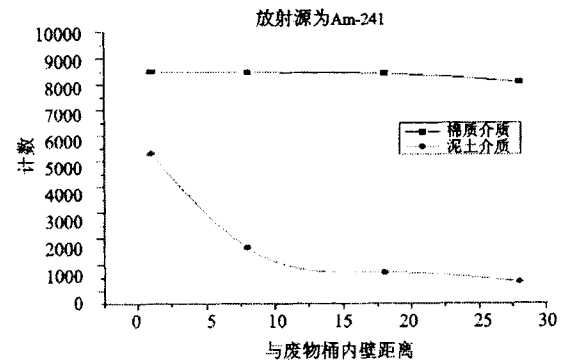


图9 放射源为 ^{241}Am 时的计数

吸收影响大于发射高能射线的放射源。因此,发射低能射线的桶装废物进行非破坏检测时,由桶内物质密度和放射源的分布不均引起的测量误差较发射高能射线的桶装废物大。在实际对核废物桶进行分段 γ 测量时,应当充分考虑此种情况对测量数据产生的影响,并对实际的测量数据采取一定的修正。

参考文献:

- [1]刘诚,王德忠,戚屯锋,等.核废物桶放射性探测的层析 γ 扫描技术[J].上海交通大学学报,2010,(9):1287-1291,1296.
- [2]张全虎,李锋,惠卫华,等.层析 γ 扫描技术研究[J].中国科学:物理学力学天文学,2010,40(8):983-991.
- [3]杨明太,张连平.桶装核废物的非破坏性分析[J].核电子学与探测技术,2003,23(6):105-108.
- [4]孙雪瑜.高纯锗核辐射探测器[J].核电子学与探测技术,1995,19(5):338-343.
- [5]FENG Shu-qiang. Monte-Carlo Calculations of Detection Efficiency and Coincidence Summing Correction for HPGe γ Spectrum Instrument[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2007, (0): 224-225.
- [6]张庆,古度意彦. HPGe 探测器测量低能 γ 射线

²⁴¹Am的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24
(5):498-501,476.

的两种修正函数[J]. 核电子学与探测技术, 2007,
27(6):1083-1086.

[7]高正,马玉圣,罗江华,等. HPCe 谱仪效率源自吸收

The Monte Carlo Simulation of Gamma Absorption Characteristics in The Barrel of Nuclear Waste

SU Rong-bo¹, YANG Lin-feng², TUO Xian-guo^{2,3}, YU Xiao-ping², LI Zhe²,
DING Yi-xian², ZHANG Jin-zhao²

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
2. The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology,
Chengdu 610059, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment
Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to study the relationship between the material absorption in the segmented γ measurement techniques, this article uses the Monte Carlo method to simulate when the sources is ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs which in the barrel, the effect to the material which density is 0.872g/cm⁻³ and 0.126g/cm⁻³ relationship, to through the MCNP simulation data, we can concluded: to the high-energy rays, the medium absorption effect is less than the low energy of the ray, so launch of barrels of waste of low-energy-ray non-destructive testing, the measurement error caused by the density and distribution of source.

Key words: Monte Carlo method; segmented γ measurement; material dielectric absorption

(上接第 1313 页, Continued from page 1313)

Design of Ionization Chamber Current Measuring Instrument Based on DDC112

HAO Shu-li, TUO Xian-guo, WANG Hong-hui, XI Da-shun

(1. College of Information Science and Technology, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu
University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: For the ionization radiation detectors, the output current of current ionization chamber is very weak and the current range is wide, proposed the use of direct current digital chip DDC112, to realize the dual channel continuous measurement of fA (10^{-15} A) current. By one single-chip, charge signal is directly converted into 20-bit digital output data, which simplify electronic circuit design, suppress the interference noise, improve the resolution, combining circuit anti-leakage current design process, achieve the system of high-performance ionization chamber measurement micro-current. After the actual circuit design and test, integration time can be adjusted in the range of $50 \sim 1 \times 10^6 \mu\text{s}$, current range can be set up in the range of $5 \times 10^4 \sim 7 \times 10^9$ fA by setting the integral time.

Key words: current ionization chamber; DDC112; dual switched integrator; fA level current