

双探测位置分段 γ 扫描系统研究

钱楠¹, 顾卫国¹, 王川², 王德忠^{1,*}

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘要: 本文以双探测位置的分段 γ 扫描技术为基础, 建立了环放射源探测效率的理论计算方法, 其能根据放射源所处的实际位置实时计算出探测效率。在此基础上研发了一套探测系统, 实现了对废物桶的自动化探测。使用该系统对单个及多个 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 及聚氨酯和木头组成的模拟桶进行测量。测量单个及多个放射源活度相对误差平均值分别为 10% 和 7.9%, 优于使用传统分段 γ 扫描技术的探测结果, 最后根据测量环境估算了探测系统的最小探测限。

关键词: 分段 γ 扫描; 放射性废物; 探测效率; 等效环形放射源

中图分类号: TL816

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)01-0147-07

doi: 10.7538/yzk.2015.49.01.0147

Research of Two-measurement Position Segmented Gamma Scanning System

QIAN Nan¹, GU Wei-guo¹, WANG Chuan², WANG De-zhong^{1,*}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Haiyan 314300, China)

Abstract: Based on the two-measurement position segmented gamma scanning, the efficiency calculation method of the circular radioactivity source was deduced. According to the source position, its detection efficiency could be calculated in time by this method. A new detection system was built on this basis, which could automatically detect the waste drums. This system was used to measure the simulated waste drums, which was composed of single and multiple ^{60}Co and ^{137}Cs in polyurethane and wood. The average relative errors of single source and multiple sources are 10% and 7.9%, respectively. The result was better than that measured by the traditional segmented gamma scanning. At last the minimum detection limit of the system was estimated according to the measurement environment.

Key words: segmented gamma scanning; radioactive waste; detection efficiency; equivalent circle radioactive source

随着核电事业的发展, 核电厂运行过程中产生大量放射性废物。这些放射性废物按其物理性

状分为气载废物、液体废物和固体废物3类。放射性废物经固化和减容后, 存于水泥桶或金属桶

收稿日期: 2013-11-13; 修回日期: 2014-02-28

基金项目: 博士学科点专项科研基金资助项目(20120073130009); 国家自然科学基金资助项目(11175118); 上海交通大学青年教师科研起步基金资助项目(13X100040089)

作者简介: 钱楠(1985—), 男, 江苏武进人, 博士研究生, 核能科学与工程专业

*通信作者: 王德忠, E-mail: dzwang@sjtu.edu.cn

中^[1-4]。这些放射性废物桶在进行运输和最终处置前,必须对其所含有的放射性物质进行甄别和测量,确定放射性物质种类及活度。分段 γ 扫描技术为应用最广泛的废物桶无损探测技术之一^[5-6],使用该技术对放射性废物桶测量时,废物桶被划分为若干层,每层内的填充物质和放射性物质都均匀分布。在测量时,废物桶匀速旋转以使废物桶内填充物质及放射性物质分布接近其基本假设,探测器位于每个测量层中心位置并对废物桶进行逐层测量。该技术测量时间短,但对于填充材料及放射性物质分布不均匀的废物桶的测量精度较差,这限制了其在核电厂中的应用。在进行分段 γ 扫描技术的自吸收修正时,主要有3种方法得到探测器的探测效率:实验方法,蒙特卡罗方法及数值方法^[7]。通过实验方法获得探测效率有非常大的局限性;使用蒙特卡罗方法可计算任意尺寸、任意形状和任意能量的放射源的探测效率,但使用蒙特卡罗方法计算一个废物桶的探测效率所需的时间是数值方法的几十倍甚至上百倍,若将其应用于分段 γ 扫描技术中时,无法实现探测效率的实时计算;数值方法可解决蒙特卡罗方法所不能解决的问题,它能实现计算任意尺寸、任意形状和任意能量的放射源的探测效率。本文使用双探测位置分段 γ 扫描技术,通过对环放射源建立分析数值计算模型,实现环放射源的准确实时计算。在此基础上,设计并制造使用单探测器的双探测位置分段 γ 扫描技术实验系统,通过实验对该系统进行验证。

1 双探测位置的分段 γ 扫描技术原理

图1为双探测位置的分段 γ 扫描技术原理图。分段 γ 扫描技术适用于每层内的物质及放

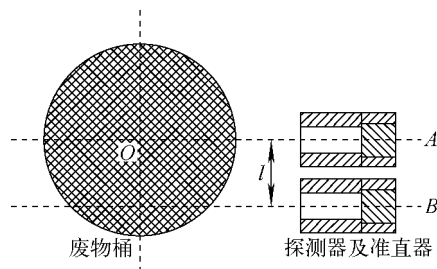


图1 双探测位置的分段 γ 扫描技术原理

Fig. 1 Sketch of two-measurement position segmented gamma scanning

射性核素分布均匀的废物桶。但实际上,废物桶内的放射性核素多呈热点分布^[8]。当使用分段 γ 扫描技术对废物桶进行测量时,桶内热点也随桶匀速旋转,该热点可等效为一个环形放射源。若能确定等效环形放射源的半径,即可准确地得到其探测效率,进而计算出放射源的活度。刘诚等^[9]的研究结果表明,当放射源在1层时,若两个探测位置选择适当,两处计数率之比与放射源半径 r 的函数 $(F(r))$ 为单调函数。

通过两处计数率比值及 $F(r)$ 函数可求得该环放射源的等效半径 r' ,进而计算出该放射源的探测效率;再根据式(1),计算出该层的放射性核素总活度。

$$I_0 = \frac{C}{\alpha E(r')} \quad (1)$$

其中: C 为探测器测到的计数率; I_0 为层内对应的放射性核素总活度; α 为该能量射线对应的分支比; $E(r')$ 为等效半径为 r' 的环放射源对探测器的全能峰探测效率。

2 探测效率数值计算方法

图2为探测效率数值计算方法的计算模型。该模型主要由准直器、探测器、钢桶及桶内填充物质组成。放射源位于桶内的 C 处。 O 、 A 及 B 分别表示废物桶的中心、废物桶中心在探测器轴线上的投影及放射源在探测器轴线上的投影; a_{col} 为准直器窗口宽度; r_d 为探测器半径; l_{col} 为准直器长度; d_0 为废物桶中心至探测器表面的距离; d_x 为放射源至探测器表面的距离; d_y 为放射源至探测器轴线的距离; d_n 为放射源至探测器表面中心点的距离; r_s 为放射源至桶中心的距离; l 为射线束在物质内的平均径迹长度;下角 p 和 w 分别表示桶内的填充材料和桶壁。

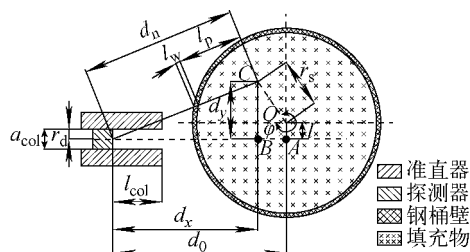


图2 探测效率数值计算方法的计算模型

Fig. 2 Calculation model of numerical method for detection efficiency

计算放射源位于 C 处的探测效率时,首先计算放射源位于 A 处的探测效率,再将放射源位于 A 处的探测效率转化为放射源位于 B 处的探测效率,最后将放射源位于 B 处的探测效率转化为目标位置的探测效率。 A 处的探测效率可通过数值计算或蒙特卡罗方法获得。当 d_x 远大于 r_d 时,可推出其探测效率 ϵ 与 d_x^2 呈反比。因此, A 、 B 两点的探测效率有如下关系:

$$\frac{\epsilon_A}{\epsilon_B} = \left(\frac{d_0}{d_x}\right)^{-2} \quad (2)$$

当放射源位于 B 、 C 两处时,放射源距探测器表面距离相同,则这两个位置探测效率的差别主要由射线束照射到的探测器有效面积和探测器的本征效率不同引起的,两者之间的关系可表示为:

$$\frac{\epsilon_C}{\epsilon_B} = \frac{S_{dn}}{S_{det}} C_{or} \quad (3)$$

其中: C_{or} 为探测器吸收率修正因子; S_{dn} 为射线束照射至探测器端面的有效面积; S_{det} 为探测器端面面积。

点放射源的探测效率 $\epsilon(d_n)$ 可由式(4)^[10]计算得到:

$$\epsilon(d_n) = \epsilon_A \left(\frac{d_0}{d_x}\right)^{-2} \frac{S_{dn}}{S_{det}} C_{or} e^{-\frac{\mu_p}{\rho_p} \rho_p l_p} e^{-\frac{\mu_w}{\rho_w} \rho_w l_w} \quad (4)$$

其中: μ 为质量吸收系数; ρ 为物质密度。

在测量过程中放射源随废物桶旋转,因此点放射源等效于环放射源。环放射源的探测效率计算公式可通过对点放射源的探测效率函数进行环积分推导出:

$$\epsilon = \oint_{C_{ir}} \epsilon_A \left(\frac{d_0}{d_x(s)}\right)^{-2} \frac{S_{dn}(s)}{S_{det}} \cdot C_{or}(s) e^{-\frac{\mu_p}{\rho_p} \rho_p l_p(s)} e^{-\frac{\mu_w}{\rho_w} \rho_w l_w} ds \quad (5)$$

其中, C_{ir} 为环放射源的曲线函数。由于积分函数较复杂,通常将整个环放射源离散为许多点放射源,这些点放射源的探测效率的平均值即为该环放射源的探测效率。式(5)可写为:

$$\epsilon = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \epsilon(d_0) \left(\frac{d_0}{d_x^i}\right)^{-2} \frac{S_{dn}^i}{S_{det}} C_{or} e^{-\frac{\mu_p}{\rho_p} \rho_p l_p^i} e^{-\frac{\mu_w}{\rho_w} \rho_w l_w} \quad (6)$$

2.1 有效探测区域

根据放射源与探测器的位置关系,有效探测区域分为图3所示的几种形式(阴影部分表示有效探测区域,线框代表射线束在探测器表面形成的投影,圆代表探测器晶体),其中: δ 为相交区域弓形部分所对应的圆周角; g 为相交区域弓形部分所对应的弦; a 、 b 分别为探测器与放射源投影面的交点。根据各有效探测区域的不同形状,可分解为圆、弓形(对应面积为 S_1 与 S_2)、三角形的组合。各有效探测区域面积的计算公式为:

$$S_{dn} = \begin{cases} 0 & \text{case 1} \\ \pi r_d^2 & \text{case 2} \\ S_1 + \frac{1}{2} |y_a - y_b| |z_a - z_b| & \text{case 3} \\ \pi r_d^2 - (S_1 + S_2) & \text{case 4} \\ S_1 & \text{case 5} \\ \pi r_d^2 - S_1 & \text{case 6} \end{cases} \quad (7)$$

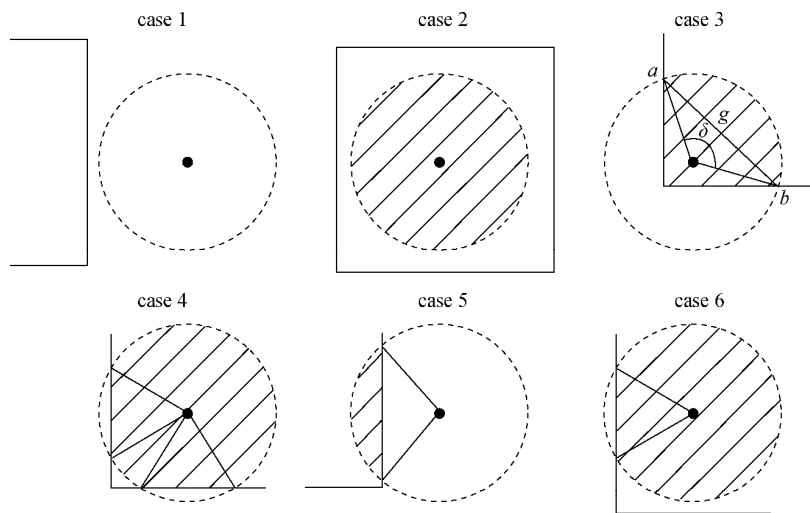


图3 方准直孔准直的探测器有效照射面

Fig. 3 Active detector surface illuminated by collimation with square window

2.2 探测器吸收率修正因子

放射源在不同位置发射出的射线束在探测器晶体内的平均径迹长度不同,导致不同位置的放射源到达探测器的射线束被探测器晶体吸收的概率不同。式(6)中的 $\epsilon(d_0)$ 包含了A处的探测器吸收率。因此,在计算圆周上离散点的探测效率时需对各位的探测器吸收率进行修正,此修正系数即为 C_{or} 。探测器吸收率根据比尔定律及点放射源的射线束在晶体内平均径迹长度计算得到。首先在探测器表面布置 n_0 个基准点,判断哪些点在探测器的有效照射区域内,然后计算出各基准点对应的探测器径迹长度,计算其平均径迹长度 $l_i(r_s)$,则 C_{or} 可表示为:

$$C_{or} = \left(1 - \frac{1}{n_C} \sum_{i=1}^{n_C} e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho l_i(r_s)}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{n_B} \sum_{i=1}^{n_B} e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho l_i(r_s)}\right)^{-1} \quad (8)$$

2.3 模拟计算结果

根据式(6)~(8)对半径为0、5、10、15、20、25 cm的环放射源进行数值计算,并将其计算结果与MCNP计算结果进行比较(图4)。相对误差最大为3%,最小为0.1%。因此,使用该数值方法计算所得的探测效率精度可达到分段 γ 扫描技术的要求。

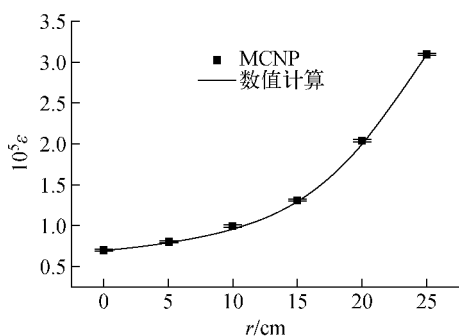


图4 环放射源探测效率数值计算及MCNP计算结果
Fig. 4 Detection efficiencies of circle source calculated by numerical method and MCNP

3 双探测位置的分段 γ 扫描技术实验系统

使用双探测位置的分段 γ 扫描技术对废物桶进行探测时,废物桶需匀速旋转,使桶内放射性物质近似于环放射源。选定匀速旋转速度时

需考虑废物桶旋转不满整数圈时带来的测量误差。本工作中废物桶旋转速度为14 r/min。在此速度下,当测量时间最小为150 s时,因废物桶旋转不满整数圈所产生的测量相对误差将小于3%。此误差对实验结果影响很小。此外,实验系统还需实现外放射源与探测器同时升降。

整个实验系统(图5)分为机械系统和控制系统,废物桶的重量上限为500 kg,既可通过电脑远程控制,也可通过操作台实现现场手动控制。通过控制系统与机械系统的联合运行实现废物桶的匀速旋转及探测器和放射源的精确定位,移动部件的定位精度达到1 mm/m,旋转部件的定位精度达到 $1^\circ/r$ 。

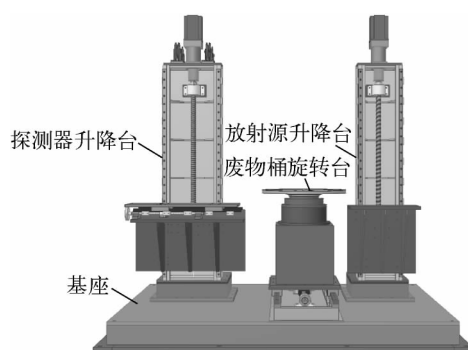


图5 双探测位置的分段 γ 扫描技术实验系统
Fig. 5 Detector system of two-measurement position segmented gamma scanning

3.1 机械系统

双探测位置的分段 γ 扫描机械系统由基座、放射源升降台、探测器升降台和废物桶旋转台构成。基座为整个设备提供统一的基准面,方便设备搬运及水平定位。放射源升降台和探测器升降台基本结构一致,均使用伺服电机驱动丝杠带动升降台升降。探测器升降台有一可移动平台,可根据不同探测器及准直器尺寸调整探测器与废物桶的距离,使探测器的测量效果最佳。废物桶旋转台由废物桶旋转部件和移动部件组成。旋转部件同样使用伺服电机驱动,并通过减速器增加伺服电机扭矩。在旋转部件顶部有一卡盘,能将废物桶定位于旋转部件中心,减小废物桶偏心对实验带来的误差。旋转部件整体坐落于旋转台移动部件上,由该移动部件的伺服电机对其进行定位。

3.2 控制系统

控制系统如图6所示。该系统能实现自动控制 and 手动控制两种运行模式,其运行指令分别由服务器和控制柜发出。探测系统主要运行于自动控制模式,手动模式主要用于探测系统的调试。服务器和控制柜发出的指令均通过PLC实现,再由PLC向伺服器发出运行参数。当伺服器完成运行任务后,伺服器返回完成信号至PLC,最后由PLC返回完成信号至服务器和控制柜,探测器的运行则完全由服务器控制。当探测器及废物桶移动至指定位置后,服务器调用探测器控制软件向多道分析器发出探测指令,并实时采集探测数据。当探测器完成测量任务后,服务器自动对所测得的谱数据进行分析并保存处理结果,之后向PLC发出运行指令,将探测器及废物桶移动到指定位置后再次发出探测指令,如此循环直至完成全部测量任务。通过该控制系统最终实现放射性废物桶的自动探测,探测数据的自动分析,使得操作人员远离放射性物质,减少人与放射性物质接触时间,降低工作人员的照射剂量,提高了安全性。

4 实验及其结果分析

4.1 实验工况

实验中使用的填充材料为直径56 cm、高10 cm的聚氨酯和高密度板圆柱体,填充材料

的密度分别为 0.3 g/cm^3 和 0.7 g/cm^3 。在圆柱体中央有宽2 cm、深7 cm的槽道。实验时,放射源置于槽道内不同位置,即可模拟放射源在废物桶内任意位置的情况。采用 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 模拟桶内的放射源,所使用的探测器为HPGe探测器,探测器表面距废物桶中心53 cm。探测器前置有一铅准直器,准直器长15 cm,准直孔截面为 $6\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 的正方形,准直孔距桶壁面10 cm。测量时,探测器测量位置为正对桶中心及偏离桶中心17.5 cm。采用该位置时 $F(r)$ 函数具有足够理想的单调性。

4.2 实验结果分析

将放射源放置于距桶中心0、12、24 cm处,使用该系统对样品进行测量。各位置重建出的放射源活度列于表1。使用分段 γ 扫描技术分析的样品活度最大相对误差为126%,平均相对误差为39%。使用双探测位置的分段 γ 扫描技术分析的样品活度最大相对误差为17.6%,平均相对误差为10%,均明显优于分段 γ 扫描技术的结果。

当有多个放射源时,各位置重建出的放射源活度列于表2。使用分段 γ 扫描技术分析的样品活度最大相对误差为81.2%,平均相对误差为33.5%。而使用双探测位置的分段 γ 扫描技术分析的样品活度最大相对误差为23.6%,平均相对误差为7.9%,均明显优于分段 γ 扫描技术的结果。同时可看出,当放射源分布情况越接近理论

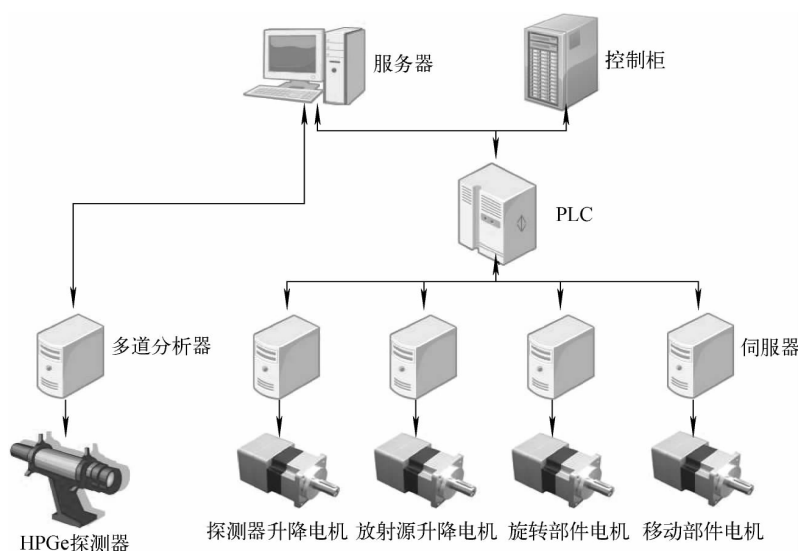


图6 控制系统原理图

Fig. 6 Sketch of control system

表 1 样品测量活度
Table 1 Measurement activity of sample

填充物	核素	位置/cm	实际活度/Bq	计算活度/kBq	
				分段 γ 扫描技术	双探测位置分段 γ 扫描技术
聚氨酯	^{137}Cs	0	1 326 988	3 000(126%)	1 490(12.3%)
		12	1 326 988	2 010(51%)	1 560(17.6%)
		24	1 326 988	1 110(16%)	1 520(14.5%)
	^{60}Co	0	206 132	355(72%)	187(9.3%)
		12	206 132	244(18%)	184(10.7%)
		24	206 132	124(40%)	191(7.3%)
密度板	^{137}Cs	0	1 326 988	1 690(27%)	1 300(2.0%)
		12	1 326 988	1 450(9%)	1 380(4.0%)
		24	1 310 000	1 310(1%)	1 400(5.5%)
	^{60}Co	0	206 132	335(63%)	230(11.6%)
		12	206 132	252(22%)	226(9.6%)
		24	206 132	170(18%)	182(11.7%)

注:括号内为相对误差,下同

表 2 多个放射源时样品测量活度
Table 2 Measurement activities of multiple samples

填充物	核素	位置/cm	实际活度/Bq	计算活度/kBq	
				分段 γ 扫描技术	双探测位置分段 γ 扫描技术
聚氨酯	^{137}Cs	0,12	2 653 976	4 810(81.2%)	2 730(2.9%)
		0,24	2 653 976	3 950(48.8%)	2 800(5.5%)
		12,24	2 653 976	3 000(13.0%)	3 000(13.0%)
		0,12,24	3 980 964	5 880(47.7%)	4 280(7.5%)
	^{60}Co	0,12	412 264	656(59.1%)	365(11.5%)
		0,24	412 264	530(28.6%)	376(8.8%)
		12,24	412 264	407(1.3%)	402(2.5%)
		0,12,24	618 396	749(21.1%)	526(14.9%)
密度板	^{137}Cs	0,12	2 653 976	3 220(21.3%)	2 600(2.0%)
		0,24	2 653 976	3 150(18.7%)	2 930(10.4%)
		12,24	2 653 976	2 750(3.6%)	2 950(11.2%)
		0,12,24	3 980 964	4 600(15.5%)	4 190(5.3%)
	^{60}Co	0,12	412 264	718(74.2%)	424(2.8%)
		0,24	412 264	623(51.1%)	394(4.4%)
		12,24	412 264	469(13.8%)	315(23.6%)
		0,12,24	618 396	849(37.3%)	618(0.1%)

假设情况时,所得放射源活度误差越小。

4.3 探测下限

由于统计涨落的原因,当全能峰净计数很小时,被测样品有无放射性很难判定。选取净计数 L_c 作为判断限,其表示没有放射性被误判为具有放射性的临界点,计算公式为:

$$L_c = K \sqrt{2N_b}$$
 (9)

其中: K 与发生错误的概率有关; N_b 为测量时本底计数。

由于全能峰计数的统计涨落有可能使测到的净计数小于判断限 L_c ,以至于发生放射性漏记。放射性漏计限值 L_D 可通过式(10)计算:

$$L_D = K^2 + 2L_c$$
 (10)

被探测对象比活度下限 I_D 可通过式(11)

计算得到:

$$I_D = \frac{L_D}{ptE_i} \quad (11)$$

其中: p 为射线能量对应的分支比; t 为探测时间; E_i 为射线对应的探测效率。

探测器距桶中心 53 cm,放射源位于桶中心位置,所处的实验环境内放射性本底基本为零。置信概率为 95%,测量时间为 300 s 时,通过式(11)可得到 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的探测下限分别为 2.41 Bq/kg 和 3.71 Bq/kg。

5 结论

本文建立了环放射源的探测效率理论计算模型,并将其用于分段 γ 扫描技术探测效率的实时计算,设计并制造了适用于双探测位置的分段 γ 扫描技术的探测系统,通过机械系统和控制系统的组合实现了桶装放射性废物的自动测量及数据处理。探测系统既能实现远程操作又可近距离手动调试。移动部件的定位精度达 1 mm/m,旋转部件的精度达 $1^\circ/\text{r}$ 。为验证系统的性能,使用聚氨酯板和高密度板制作了模拟废物桶,并将单个 ^{60}Co 及 ^{137}Cs 放射源放置在模拟废物桶中不同位置进行测量,测量平均相对误差达 10%。并对有多个放射源的情况进行了测量,其平均相对误差为 7.9%。该测量系统的测量结果优于分段 γ 扫描系统的结果。通过计算得到在无本底的情况下,该系统测量 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的探测下限分别为 2.41 Bq/kg 和 3.71 Bq/kg。

参考文献:

- [1] 张勇,沈吉,郑国文,等. 秦山核电厂低中放固体废物管理及现状分析[C]//低中放废物管理和放射性物质运输学术研讨会. 北京:中国核学会, 2005:66-72.
- [2] 祈昌明. 秦山第二核电厂放射性废物管理进展[J]. 辐射防护通讯, 2007, 27(1): 13-17.
QI Changming. Progress in management of radioactive waste at QNPP-II [J]. Radiation Protection Bulletin, 2007, 27(1): 13-17(in Chinese).
- [3] 刘进军,陈坚. 田湾核电站放射性废物管理[J]. 辐射防护通讯, 2007, 27(6): 37-40.
LIU Jinjun, CHEN Jian. Brief introduction to management of radioactive waste in TNPP[J]. Radiation Protection Bulletin, 2007, 27(6): 37-40(in Chinese).
- [4] 黄来喜,何文新,陈德淦. 大亚湾核电站放射性固体废物管理[J]. 辐射防护, 2004, 24(3-4): 211-226.
HUANG Laixi, HE Wenxin, CHEN Degan. Solid radioactive waste management in Daya Bay Nuclear Power Station[J]. Radiation Protection, 2004, 24(3-4): 211-226(in Chinese).
- [5] 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): 600-603.
YANG Mingtai, ZHANG Lianping. Non-destructive assay of nuclear waste in drum[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(6): 600-603(in Chinese).
- [6] 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, 2004, 24(1): 104-105.
YANG Mingtai, ZHANG Lianping. Non-destructive assay of nuclear waste in drum[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(1): 104-105(in Chinese).
- [7] STANGA D, RADU D, SIMA O. A new model calculation of the peak efficiency for HPGe detectors used in assays of radioactive waste drums [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2010, 68(7): 1 418-1 422.
- [8] LIU Cheng, GU Weiguo, QIAN Nan, et al. Study of image reconstruction using dynamic grids in tomographic gamma scanning[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, 23(5): 277-283.
- [9] 刘诚,王德忠,李厚文,等. 基于双探测器校正的分段 γ 扫描技术研究[J]. 核技术, 2010, 33(5): 343-346.
LIU Cheng, WANG Dezhong, LI Houwen, et al. An improved gamma scanning technique using two detectors at off-center positions[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(5): 343-346(in Chinese).
- [10] NAN Q, THOMAS K, MAUERHOFER E, et al. Analytical calculation of the collimated detector response for the characterization of nuclear waste drums by segmented gamma scanning[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2012, 292(3): 1 325-1 328.