

基于双探测器校正的分段 γ 扫描技术研究

刘 诚¹ 王德忠¹ 李厚文² 白云飞¹ 钱 楠¹ 张 适¹ 张继革¹

1(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

2(秦山第三核电有限公司 海盐 314300)

摘要 将探测器对准废物桶两个不同偏心位置进行测量,由两个位置计数率比值,确定桶内放射源所在等效半径位置,从而计算其活度。对非均匀样品进行了测量,结果显示,测量结果误差在10%以内。

关键词 分段 γ 扫描,探测效率,等效半径

中图分类号 TL81

20世纪70年代,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室研究开发的分段 γ 扫描(Segmented gamma scanning, SGS)测量技术,已成为中低放核废物无损检测的重要工具之一^[1]。

在传统的分段 γ 扫描系统中,将废物桶沿其轴向作分层,并假设每层的填充物质与核素均匀分布。测量时,废物桶匀速旋转,以提高桶内核素的分布均匀度。测得每一段计数率后,计算出各层的探测效率和自吸收校正因子,计算各层的核素量,求得整个被测物的核素总量^[2,3]。但是,实际样品通常并不满足上述假设,径向活度的不均匀分布使核素总量测量值产生严重误差^[4,5]。

为减小误差,Anh等^[6]提出,在上述分层基础上,再将每层分为若干环(如四环),并设各环内核素均匀分布,将探测器在径向四个不同位置进行测量,求出各环内放射性核素的活度。本文研究发现,利用两个位置的测量结果,并根据这两个位置探测效率的差异进行校正,可获得较精确的测量结果。

1 测量原理

SGS技术基于层内物质均匀分布的假设,即线性衰减系数相同。测量时,废物桶匀速旋转,对于探测器而言,某一个半径位置上的所有点源可看作是均匀分布在该半径上的圆形线源。在一整层内,探测器测到的全能峰计数率可以式(1)表示:

$$C = \alpha \int_0^R I p_r E(r) dr \quad (1)$$

其中, α 为该能量射线对应的分支比, R 为废物桶半径, I 为层内对应放射性核素总活度, p_r 为该核素活度在半径 r 上的概率密度函数, $E(r)$ 为半径为 r

的圆形线源对探测器的全能峰探测效率,此探测效率与探测器参数、射线能量、半径 r 、桶内物质密度等有关。

传统的分段 γ 扫描技术假设一层内物质及核素都均匀分布,即:

$$P_r = 2r/R^2 \quad (2)$$

全能峰计数率为:

$$C = \frac{2\alpha I}{R^2} \int_0^R r E(r) dr \quad (3)$$

由式(3)可知,传统SGS技术的探测效率是各圆形线源探测效率的加权平均。然而,由于半径不同,当桶内核素不均匀分布时,用平均探测效率计算会产生较大误差。

对单一圆形线源,设同一探测器在两位置进行测量,计数率分别为 C_A 和 C_B ,则有:

$$C_A = \alpha I E_A(r), C_B = \alpha I E_B(r) \quad (4)$$

$$C_A/C_B = E_A(r)/E_B(r) \quad (5)$$

定义函数 $F(r) = E_A(r)/E_B(r)$,若 $F(r)$ 为单调函数,则此圆形线源的半径 r 可唯一确定。

若是非单一圆形线源,则有

$$C_A = \alpha I \int_0^R p_r E_A(r) dr \quad (6)$$

$$C_B = \alpha I \int_0^R p_r E_B(r) dr \quad (7)$$

将两式相除:

$$C_A/C_B = \frac{\alpha I \int_0^R p_r E_A(r) dr}{\alpha I \int_0^R p_r E_B(r) dr} = \frac{\int_0^R p_r E_A(r) dr}{\int_0^R p_r E_B(r) dr} \quad (8)$$

国家自然科学基金(10675084)资助

第一作者:刘 诚,女,1985年出生,2006年毕业于上海交通大学,现为该校博士研究生,专业:核能科学与工程

收稿日期:2009-08-11,修回日期:2009-09-17

由柯西中值定理, $F(r)$ 曲线存在一点使:

$$F(r') = E_A(r')/E_B(r') = C_A/C_B \quad (9)$$

满足式(9)的半径 r' 为等效半径, 如 $F(r)$ 为单调函数, 则 r' 可唯一确定。将一层内的所有放射性核素看作分布在等效半径 r' 上的圆形线源, 按此等效半径计算得到的总活度为:

$$I_0 = C_A/\alpha E_A(r') \text{ 或 } I_0 = C_B/\alpha E_B(r') \quad (10)$$

该活度相对于真实活度的误差定义为:

$$ER = [(I_0 - I_{\text{true}})/I_{\text{true}}] \times 100\% \quad (11)$$

2 实验系统

本文所涉探测器、透射源和废物桶的位置如图1所示。核电厂中的200 L废物桶标准尺寸为 $\Phi 560 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$, 壁厚1.2 mm。探测器准直器长150 mm, 前端距桶壁100 mm, 准直孔为半轴长36 mm的正菱形通孔。探测器采用美国CANBERRA公司的P型同轴高纯锗探测器, 尺寸 $\Phi 62 \text{ mm} \times 59.5 \text{ mm}$, 冷井 $\Phi 8 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$, 死层厚度 $\sim 0.45 \text{ mm}$ 。桶内置 ^{137}Cs 点源, 2001年2月标定活度为36.2 kBq, 则8年后实验时的活度 $\sim 30.1 \text{ kBq}$ 。

测量时探测器并未对准桶中心测量, 而选择偏心方式, 探测效率计算也按实际的探测器位置, 因此并不影响实验结果的分析。

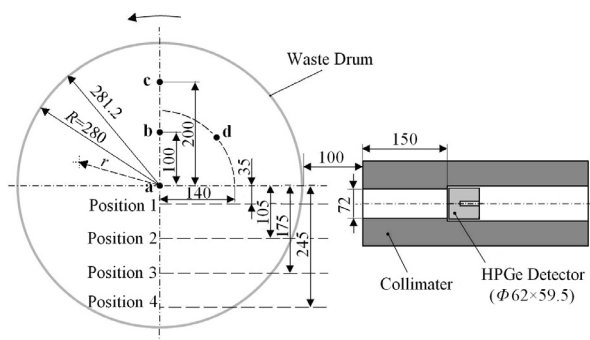


图1 实验系统布局

Fig.1 Layout of the experimental system.

对一非均匀废物桶一层进行扫描。根据填充物折算, 该层的平均密度 $\sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ 。扫描时分别将探测器置于半径1/8、3/8、5/8、7/8处(图1), 废物桶以10 r/min匀速旋转。为模拟各种源的分布, 桶内点源分别置于图1中a、b、c、d处, 其中a为桶中心, b、c、d所在半径分别为100、200和140 mm。除对单点源情况进行活度测量外, 还根据4个位置的组合对多点源情况进行了测量。

3 效率计算结果及分析

用MCNP-4C程序计算了不同半径的圆形线源、4个探测器位置探测效率。计算时假设桶内物质密度均匀(0.2 g/cm^3), 填充材料为 H_2O , 准直器重要性设为1。计算采用F8卡, ^{137}Cs 的特征能量0.6617 MeV。

图2为4个探测器位置的各圆形线源探测效率随半径的变化, 横坐标为 $r^* = r/R$ 。在此密度下, 探测器轴线靠近桶心时(如位置1), 探测效率随半径增加而减小, 而远离桶心时(如位置3、4)探测效率基本随半径增加, 其中位置4由于准直器的屏蔽作用, 圆心附近的源探测效率极小。探测效率的变化趋势主要受物质吸收及准直器的影响。在位置1时, 随着半径的增加, 源在探测器视野角内的几率变小, 被桶内物质吸收衰减的份额也变小。由于密度较低, 物质吸收对探测效率的影响比准直器的影响小, 故探测效率呈下降趋势。在位置3或4时, 随半径增加, 源在探测器视野内的几率变大, 探测效率呈上升趋势。可见, 随源半径 r 增加, 4个位置的探测效率均有较大变化, 因此, 如按传统SGS方法每层都用同一刻度因子, 会带来较大误差。

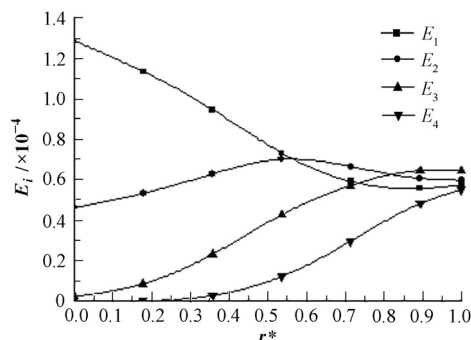


图2 不同半径圆形线源的探测效率($\rho=0.2 \text{ g/cm}^3$)
Fig.2 Detection efficiency of circular line sources of a different radius ($r^* = r/R$).

由上述测量原理可知, 等效半径由两个位置的相对效率确定, 选择第一个位置的效率 E_1 作为基准效率, 相对效率的分布曲线见图3, 图中纵坐标 $E_i^* = E_i/E_1 (i=2,3,4)$ 。由图3, E_2/E_1 相对效率曲线并非单调趋势, 不能用来唯一确定等效半径; E_3/E_1 和 E_4/E_1 基本呈单调上升趋势, 可用来唯一确定等效半径。另外, 实际测量时可由计数率比值确定相对效率, 并最终确定等效半径。相对效率曲线的选择需考虑相对效率取值区间要满足要求, 且曲线各点的斜率要适中, 以便于等效半径的确定, 本文选择 E_3/E_1 曲线作为理论曲线来进行校正。实验时两个探测器位置分别选择位置1与位置3。

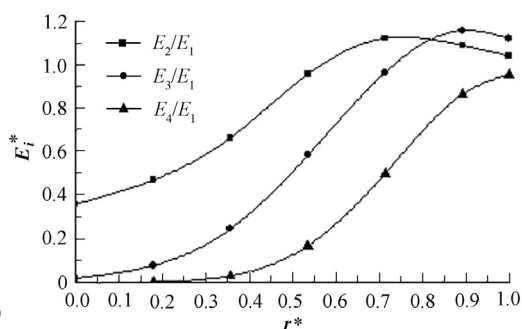


图3 探测器不同位置的效率比值($\rho=0.2 \text{ g/cm}^3$)
Fig.3 Ratio of detection efficiencies at different detector positions ($r^*=r/R$).

为研究桶内物质密度对相对探测效率的影响,计算了 5 个密度下的 E_3/E_1 曲线(图 4)。在各种密度下, E_3/E_1 曲线都单调上升, 密度变大时, 曲线尾端的单调性越好, 并且各条曲线都比较接近。因此, 探测器位置的选择不受桶内物质密度的影响。

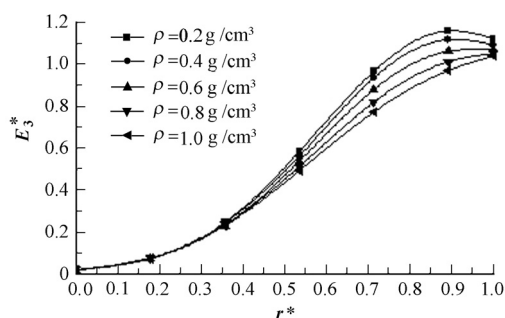


图4 不同密度下的 E_3/E_1 曲线
Fig.4 Data of E_3/E_1 with different densities ($r^*=r/R$).

4 实验结果分析

各不同点源相对于位置 1 与位置 3 的探测器测得的计数率 C_1 、 C_3 见表 1, 其中点源位置由 a、b、c、d 表示, 多个字母表示相应位置同时存在点源。表 1 也列出所得等效半径 r' (表中 $r'^*=r'/R$)、等效半径对应的圆形线源的探测效率 $E(r')$ 及桶内核素活度 I_0 。

表 2 列出处理后活度与真实活度的对比、传统 SGS 测量结果(I_{SGS})及相对误差(ER_{SGS}), 该结果是利用位置 1 探测器的计数率并假设活度均匀分布求得。由表 2 发现, 除了在位置 d 的点源情况, 对真实活度的相对误差均在 10% 以内。位置 d 的点源误差较大, 是因为实际测量时根据填充材料设置, 该处点源局部衰减, 远大于桶内平均衰减系数, 导致计算后的活度偏小。

对比传统的 SGS 测量, 本文得到的活度相对误差明显低于传统的 SGS 测量结果。图 5 为该方法与传统的 SGS 方法测量活度结果的相对误差随等效半径的变化曲线。对于本实验桶内物质的密度情况, 采用传统的 SGS 测量, 点源靠近桶心处活度较大, 靠近壁面处活度变小, 都表现出较大的相对误差。只有当点源位于假设活度均匀得到的等效半径时, 误差才接近于零。而本文提出的方法, 在整个半径范围内活度的相对误差都较小, 不存在传统 SGS 测量的误差特征。因此, 采用两个探测器确定等效半径, 从而计算桶内活度的方法, 在测量精度上较传统的 SGS 测量方法有明显提高。

表 1 探测器测量计数率及活度结果
Table 1 Measured counting rates (in counts·s⁻¹) of HPGe detector and activity results (in $\times 10^4 \text{ Bq}$)

点源位置 Source positions	Counts		C_3/C_1	r'^*	$E_1(r') \times 10^{-5}$	I_0
	C_1	C_3				
a	3.0621	0	0	0	12.9	2.80
b	2.5201	0.4155	0.16	0.29	10.2	2.90
c	1.6753	1.3088	0.78	0.62	6.51	3.03
d	1.6391	0.8429	0.51	0.50	7.76	2.49
ab	5.5822	0.4155	0.07	0.17	11.4	5.76
bc	4.1954	1.7243	0.41	0.45	8.28	5.96
cd	3.3144	2.1517	0.65	0.57	7.02	5.55
abc	7.2575	1.7243	0.24	0.35	9.54	8.95
bcd	5.8345	2.5672	0.44	0.46	8.17	8.40
abcd	8.8966	2.5672	0.29	0.39	9.10	11.5

表 2 数据处理结果与 SGS 结果比较
Table 2 Comparison of the activities (in $\times 10^4 \text{Bq}$) with SGS results

点源位置 Source positions	I_{ture}	I_0	$ER / \%$	I_{SGS}	$ER_{\text{SGS}} / \%$
a	3.01	2.80	-6.89	5.14	70.93
b	3.01	2.90	-3.62	4.23	40.68
c	3.01	3.03	0.68	2.81	-6.48
d	3.01	2.49	-17.37	2.75	-8.50
ab	6.02	5.76	-4.24	9.37	55.81
bc	6.02	5.96	-0.94	7.04	17.10
cd	6.02	5.55	-7.71	5.57	-7.49
abc	9.02	8.95	-0.84	12.2	35.04
bcd	9.02	8.40	-6.87	9.80	8.57
abcd	12.0	11.5	-4.36	14.9	24.16

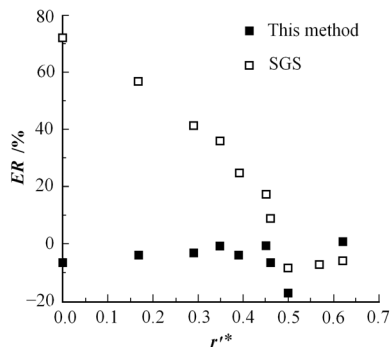


图 5 两种方法测量结果的相对误差随等效半径的分布
Fig.5 Relative errors of the proposed method and conventional SGS method plotted vs equivalent radius ($r'^* = r'/R$).

5 结论

本文测量放射性核素活度的方法是通过两个探测器计数率与两个探测效率曲线确定核素分布的等效半径,再根据该半径的探测效率计算核素活度。

该方法在测量精度上较传统 SGS 法有较大提高,尤其是改善了点源分布在桶心或靠近壁面时产生较大误差的状况。实验表明,该法对单点源和多点源分布都有较好的准确度。本文选择偏心方式的

探测器位置,能满足中低放废物活度测量精度要求。

参考文献

- 1 杨明太, 张连平. 核电子学与探测技术, 2003, **23**(6): 600-604
YANG Mingtai, ZHANG Lianping. Nucl Electron Detect Technol, 2003, **23**(6): 600-604
- 2 Parker J L. The use of calibration standards and the correction for sample self-attenuation in gamma-ray nondestructive assay. Los Alamos National Laboratory Document, LA-10045, Rev. 1986
- 3 吕 锋, 曹 斌, 辛 标, 等. 原子能科学技术, 1998, **32**(1): 239-244
LV Feng, CAO Bin, XIN Biao, *et al.* At Energy Sci Technol, 1998, **32**(1): 239-244
- 4 Dung T Q. Ann Nucl Energy, 1997, **24**(1): 33-47
- 5 Dung T Q. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 1998, **416**(2): 505-515
- 6 Anh T H, Thanh N D, Dung T Q. Ann Nucl Energy, 2005, **32**(13): 1516-1523

An improved gamma scanning technique using two detectors at off-center positions

LIU Cheng¹ WANG Dezhong¹ LI Houwen² BAI Yunfei¹ QIAN Nan¹ ZHANG Kuo¹ ZHANG Jige¹

¹ (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

² (No.3 Qinshan Nuclear Power Co. Ltd, Haiyan, 314300, China)

Abstract The equivalent radius of source in a waste drum was determined based on counting rate ratio of two detectors located at off-center positions. The experimental data of a non-uniform sample was presented and compared to that of conventional SGS. The results confirm that the analysis errors are reduced greatly by the technique proposed.

Key words Segmented gamma scanning, Detection efficiency, Equivalent radius

CLC TL81