

# 壳源法放射性废物桶 作为 SGS 装置校准源的可行性

徐利军, 叶宏生, 张卫东, 林敏, 肖雪夫, 陈细林, 郭晓清, 夏文, 陈义珍, 陈克胜

(中国原子能科学研究院 计量与校准技术重点实验室, 北京 102413)

**摘要:** 由于均匀的大体积放射性废物桶制备困难, 放射性废物桶分段  $\gamma$  扫描 (SGS) 装置的活度探测效率多采用间接的方式进行刻度。壳源法制备的废物桶以线状源为核心, 制备简单, 结构灵活, 是最佳的间接方法之一。本文通过对均匀填充型放射性水溶液桶和壳源法制备的放射性废物桶测量比较, 证明壳源法制备的放射性废物桶在进行 SGS 装置探测效率刻度时与均匀桶是等效的, 可作为此类装置探测效率的校准源。

**关键词:** 壳源法; 分段  $\gamma$  扫描装置; 校准; 等效性

**中图分类号:** TL84      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2016)03-0558-07

**doi:** 10.7538/yzk.2016.50.03.0558

## Feasibility of Radioactive Waste Drum with Shell Source Method as Calibration Source for SGS Device

XU Li-jun, YE Hong-sheng, ZHANG Wei-dong, LIN Min, XIAO Xue-fu, CHEN Xi-lin,  
GUO Xiao-qing, XIA Wen, CHEN Yi-zhen, CHEN Ke-sheng

(National Key Laboratory for Metrology and Calibration Techniques,  
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Due to the difficulty in preparation of homogeneous radioactive waste drum with large volume, the detection efficiency of segmented  $\gamma$  scanning (SGS) device is scaled usually with indirect approaches. Shell source method is one of best ways, which uses linear source as the principal part. It is not so complicated for the preparation, and the structure is flexible. Based on the comparison of measurement results from uniform drums and drums prepared with shell source method, it is proved that they are equivalent in the calibration of efficiency. The latter can be taken as the reference source of SGS device.

**Key words:** shell source method; segmented  $\gamma$  scanning device; calibration; equivalent

放射性分段  $\gamma$  扫描 (SGS) 装置测量的物理基础是利用各种核素的特征  $\gamma$  射线来分析放射

性废物中所含核素的种类, 再利用这些特征  $\gamma$  射线的强度来计算感兴趣核素的含量或活

度<sup>[1-3]</sup>。SGS 装置是基于分层测量,因此首要解决的是某一分层内效率的校准。在各分层的  $\gamma$  能谱测量中, $\gamma$  射线全能峰计数率损失包括两方面<sup>[4]</sup>:1) 仪器本身由于谱堆积效应、核电子学死时间等原因引起的计数率损失;2) 由于样品本身对  $\gamma$  射线的自吸收效应引起的计数率损失。如果同时考虑上述两种计数率损失效应,则经校正后的第  $i$  段某能量  $\gamma$  射线的全能峰计数率为:

$$CR_i = RR_i \times CF_i(RL) \times CF_i(AT) \quad (1)$$

其中: $CR_i$  为第  $i$  段废物桶样品经校正后的  $\gamma$  射线全能峰计数率; $RR_i$  为第  $i$  段样品的原始  $\gamma$  射线全能峰计数率; $CF_i(RL)$  为第  $i$  段废物桶样品  $\gamma$  谱仪计数率损失校正因子; $CF_i(AT)$  为第  $i$  段废物桶样品对某一能量  $\gamma$  射线的自吸收衰减校正因子。

废物桶样品中单个测量层中放射性核素的活度  $A_i$  可由式(2)计算,再进行加和(式(3))得到整个废物桶的总放射性核素活度  $A$ :

$$A_i = CR_i / \eta K \quad (2)$$

$$A = \sum_{i=1}^N A_i \quad (3)$$

其中: $N$  为废物桶样品测量时所分的段数; $\eta$  为待测放射性核素发射的特征峰能量  $\gamma$  射线的发射率; $K$  为 SGS 装置的放射性活度探测效率。

SGS 装置的探测效率与被测  $\gamma$  射线的特征峰能量及被测样品对  $\gamma$  探头的立体角等因素有关(式(4)),它可用某种标准样品在一定条件下进行刻度获得,且在同一分层条件下各层的刻度因子相同。

$$K = \frac{CR_i}{\eta A_i} \quad (4)$$

SGS 装置的测量原理是基于各纵向分层内基质材料和放射性核素是均匀一致的。可见单层探测效率  $K$  的确定是对 SGS 装置进行校准的关键<sup>[5-6]</sup>。国际上用于放射性废物桶  $\gamma$  扫描装置的标准源主要采用填充法<sup>[7-9]</sup>和壳源法<sup>[10-12]</sup>制备。但无相关标准给出明确的标准源定义,如 ASTM 1133-03 标准<sup>[13]</sup>只针对装置给出测试方法,未对标准源作出严格的规定,只建议测量所用的样品和标准源应尽量接近以减少测量误差。

理想的放射性废物桶标准源填充材料与放

射性物质分布在各层内绝对均匀。实际中只有放射性水溶液(真溶液,无任何水解沉淀)接近理想源,固态物质实现放射性分布完全均匀更为困难。同时,考虑到量值溯源传递过程中,大体积( $>200$  L)均匀放射性废物桶存在运输和储存难题,因此本文拟采用壳源法制备放射性废物桶,并将其作为此类装置的校准源。壳源法是指以单个与废物桶高度相同的线状源插入废物桶中进行旋转测量,利用其不同位置的测量值计算得到与均匀放射性废物桶相同的测量结果,其中线状源可单独抽出进行储存,增加了安全性且便于运输传递。

本文通过选用水作为填充基质和放射性核素的载体,对两种桶分别进行测量,以验证壳源法制备的放射性废物桶标准源与均匀填充型废物桶的等效性。测量选择的目标核素为<sup>152</sup>Eu。为保证测量的准确性和溯源性,采用的放射性溶液制备前均进行准确定值。定值的方法是从<sup>152</sup>Eu 原始溶液中取样制备成标准薄膜点源,<sup>152</sup>Eu 点源放射性活度测量在国防科技工业电离辐射计量一级站的  $\gamma$  谱仪标准装置上进行,经计算得到原始溶液的比活度以及测量不确定度。

## 1 均匀填充型放射性废物桶源的实验测量

### 1.1 均匀填充型放射性废物桶标准源的制备

为保证与壳源法制备的废物桶测量条件一致,水均匀填充型放射性废物桶(简称水均匀放射性废物桶)采用相同尺寸的 208 L 标准桶。制备该类型的大体积源涉及到实验室内人员辐射防护、放射源安全以及废物储存问题,对此采取了以下措施。

1) 制备前对所选的放射性废物桶进行检漏实验,将 208 L 标准桶装满水放置至少 1 周,观察其是否存在渗水或破漏。

2) 所选水体为去离子水,以减少生物细菌的滋生,保持水体均匀;为防止加入的放射性核素离子水解,废物桶中水介质加酸性缓冲溶液保持弱酸性,同时加入同类核素的盐作为载体。

3) 为防止放射性核素的壁吸附和水体对不锈钢桶壁的腐蚀,以及溶液长期放置可能形成的泄漏,内壁用塑料布隔开。

4) 为防止研究过程中水溶液的挥发,将塑料布密封,同时加上桶盖用螺丝咬合密封。

放射性核素加入前先对其活度进行准确定值,与水进行混合时采用逐渐稀释的方法。制备完成后放置1周再进行测量。

### 1.2 水均匀放射性废物桶的均匀性检测

为保证所制备的208 L水均匀放射性废物桶的均匀性符合实验研究的要求,对制备的放射性废物桶进行初测。基于208 L标准桶的对称性,同时考虑SGS装置分层测量的基本原理,将放射性废物桶分成几段测量,并验证每段测量结果与壳源法测量结果的一致程度,如图1所示。

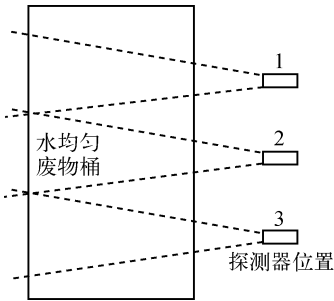


图1 水均匀桶纵向分层测量示意图  
Fig. 1 Segmented gamma scanning of uniform water drum in lengthwise

为便于比较,以分层1的计数率作为归一,其他层的计数率与其相比,结果列于表1。由表1可看出,水均匀放射性废物桶3层测量结果非常一致,相对偏差小于0.8%,表明制备的水

均匀废物桶中放射性核素的分布均匀,与预期的技术指标符合;同时也表明,在与壳源法测量进行验证时采用任一分层,只要其测量时几何张角完全被放射性废物桶纵向范围覆盖即可<sup>[13]</sup>。

表1 水均匀废物桶各层测量结果

Table 1 Results of segmented gamma scanning of uniform water drum

能量/keV	各层的归一化计数率		
	分层1	分层2	分层3
121.8	1	1.003	1.000
344.3	1	0.992	1.007
778.9	1	1.008	1.000
964.1	1	0.996	1.006
1 112	1	1.006	1.002
1 408	1	0.999	1.008

### 1.3 SGS装置对均匀放射性废物桶的活度探测效率

本实验中两种废物桶的测量条件相同,且放射性活度的纵向分布是均匀的,因此SGS装置的绝对分层数值在校准过程中仅作为参考,层间串扰不会影响探测效率的比较。为方便问题的论述,暂选中间任一分层进行讨论。由测得的净计数率根据式(4)对中间某层进行分析,SGS装置的探测效率计算结果列于表2。其中分层修正因子根据几何张角计算;透射修正因子则考虑到桶壁及中间支架等因素,利用透射源修正到水溶液活度。

表2 SGS装置对水均匀废物桶的探测效率

Table 2 Detection efficiency of SGS device for uniform water drum

能量/keV	$\gamma$ 发射率	净计数率/ $s^{-1}$	透射修正因子	探测效率
121.8	0.285 8	4.77	0.737	$3.42 \times 10^{-5}$
344.3	0.265 0	3.77	0.898	$2.36 \times 10^{-5}$
778.9	0.129 3	1.49	0.922	$1.86 \times 10^{-5}$
964.1	0.146 1	1.61	0.932	$1.77 \times 10^{-5}$
1 112	0.136 4	1.48	0.931	$1.74 \times 10^{-5}$
1 408	0.210 1	2.14	0.940	$1.61 \times 10^{-5}$

注:废物桶活度为2 MBq,分层修正因子为0.336

## 2 壳源法放射性废物桶标准源的测量

壳源法制备的放射性废物桶标准源(简称

壳源法放射性废物桶)由线状源和套管组成,如图2所示。本文采用两种类型的线状源作为壳

源法放射性废物桶进行测量,两种线状源为:分

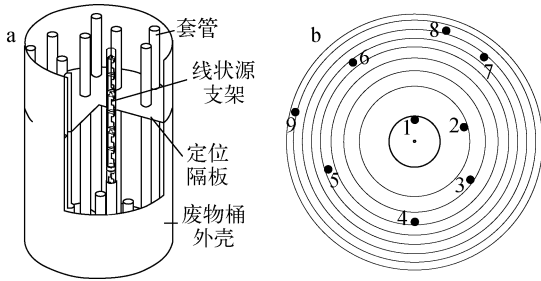


图 2 壳源法废物桶标准源结构(a)及标准源径向线状源位置(b)示意图

Fig. 2 Structure of reference source with shell source method (a) and sketch of linear source in different locations along with radial direction (b)

段型线状源和连续型线状源。前者放射性溶液封装在单个 5 cm 高的玻璃瓶中,再均匀分布在线状源套管内;后者放射性溶液则整体封装在线状源套管(与壳源法放射性废物桶等高)内,两种线状源的直径相同,均为 1 cm。

2.1 分段型线状源废物桶的测量

线状源废物桶内填充的介质为水,为更好地比较测量结果,选择 9 个套管位置的隔板装配废物桶标准源,线状源位置分别选择在距离圆心 6.6、11.4、14.8、17.5、19.8、21.9、23.8、25.8、26.4 cm 处(图 2b 中 1~9 位置)。测量时将废物桶放置在旋转平台上,线状源插入其中 1 个套管中,其他位置的套管填充水。测量结果列于表 3。

表 3 分段型线状源废物桶不同位置的测量结果

Table 3 Results of measurement in different positions for dispersed linear source waste drum

线状源位置	不同能量处峰面积净计数率/s <sup>-1</sup>					
	121.8 keV	344.3 keV	778.9 keV	964.1 keV	1 112 keV	1 408 keV
1	2.13	3.38	2.20	2.67	2.62	4.19
2	3.63	4.64	2.66	3.12	3.03	4.71
3	5.77	6.20	3.17	3.62	3.45	5.27
4	8.40	7.93	3.66	4.13	3.85	5.76
5	11.99	9.92	4.18	4.61	4.25	6.23
6	16.77	12.25	4.72	5.10	4.66	6.71
7	21.80	14.47	5.23	5.57	5.01	7.10
8	29.57	17.56	5.88	6.10	5.46	7.60
9	32.20	18.38	6.05	6.26	5.61	7.73

由于各位置点的测量时间间隔较大,将计数率归一到同一时刻。各位置上各能量点的净计数  $N_E(R_i)$  与线状源所在位置  $R_i$  存在如下函数关系<sup>[11]</sup>:

$$\ln N_E(R_i) = a_0 E R_i^2 + a_1 E R_i + a_2 E \quad (5)$$

其中,  $a_{iE}$  为拟合系数,  $i=0, 1, 2$ 。

按式(5)中  $\ln N_E(R_i)$  对  $R_i$  作图,并进行拟合,拟合函数和线性相关系数  $R^2$  列于表 4。

表 4 分段型线状源  $\ln N_E(R_i)-R_i$  的拟合函数及线性相关系数

Table 4 Fitting function of  $\ln N_E(R_i)-R_i$  and its linearly dependent coefficient for dispersed linear source

能量/keV	拟合函数	$R^2$
121.8	$y=1.5518 \times 10^{-3} x^2 + 8.9661 \times 10^{-2} x + 1.0878 \times 10^{-1}$	0.999 6
344.3	$y=1.0656 \times 10^{-3} x^2 + 5.3325 \times 10^{-2} x + 8.3044 \times 10^{-1}$	0.999 5
778.9	$y=6.5196 \times 10^{-4} x^2 + 3.1117 \times 10^{-2} x + 5.7292 \times 10^{-1}$	0.999 5
964.1	$y=5.0551 \times 10^{-4} x^2 + 2.7952 \times 10^{-2} x + 7.8976 \times 10^{-1}$	0.999 2
1 112	$y=4.5112 \times 10^{-4} x^2 + 2.4494 \times 10^{-2} x + 8.0185 \times 10^{-1}$	0.999 4
1 408	$y=2.9408 \times 10^{-4} x^2 + 2.2216 \times 10^{-2} x + 1.2916$	0.999 3

拟合结果的线性相关系数  $R^2=0.9992\sim 0.9996$ ,可见线状源废物桶的设计基本满足要求。由于线状源支架、套管、隔板及放射性溶液容器的存在而与理想状态的线状源废物桶有差异,需通过实验对其影响进行扣除。

得到上述拟合函数后,可对  $N_E(R_i)$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 27$ ) 按照  $R_i$  从 0.5 到  $R$  等距离进行插值计算,即  $R_1=0.5\text{ cm}, R_2=1.5\text{ cm}, \dots, R_{28}=27.5\text{ cm}$  (废物桶内半径  $R$  为 28.3 cm)。将各点的计算结果再进行加权平均,得到等效净计数  $N_E(\text{tot})$ :

$$N_E(\text{tot}) = \sum_{j=1}^{28} \frac{N_E(R_j)S_j}{S} \quad (6)$$

其中:  $S_i = \pi(R_i^2 - R_{i-1}^2)$ ;  $S = \pi R^2$ 。

将峰面积按式(6)计算得到其等效于均匀废物桶特征峰 121.8、344.3、778.9、964.1、1112、1408 keV 处的净峰面积计数率为 15.5、11.8、4.51、4.88、4.47、6.46  $\text{s}^{-1}$ 。

## 2.2 连续型线状源废物桶的测量

同样采用水作为主要介质制备成的连续型线状源废物桶与 2.1 节中的测量条件完全一致,所测的结果同样进行  $\ln N_E(R_i)-R_i$  拟合,结果列于表 5。

拟合结果的线性相关系数  $R^2=0.9995\sim 0.9998$ ,略优于分段型线状源的拟合结果,由此可见,连续型线状源废物桶的测量结果好于分段型线状源,但其长度与废物桶高度相同不可拆卸,日常使用不如分段型线状源方便安全。

表 5 连续型线状源  $\ln N_E(R_i)-R_i$  的拟合函数及相关系数

Table 5 Fitting function of  $\ln N_E(R_i)-R_i$  and its linearly dependent coefficient for consecutive linear source

能量/keV	拟合函数	$R^2$
121.8	$y=1.5863 \times 10^{-3}x^2+9.1964 \times 10^{-2}x-4.2527 \times 10^{-2}$	0.9998
344.3	$y=1.2591 \times 10^{-3}x^2+4.7942 \times 10^{-2}x+7.5037 \times 10^{-1}$	0.9998
778.9	$y=6.7469 \times 10^{-4}x^2+3.1656 \times 10^{-2}x+4.4503 \times 10^{-1}$	0.9998
964.1	$y=5.8597 \times 10^{-4}x^2+2.6843 \times 10^{-2}x+6.6819 \times 10^{-1}$	0.9997
1112	$y=4.7492 \times 10^{-4}x^2+2.5569 \times 10^{-2}x+6.6429 \times 10^{-1}$	0.9997
1408	$y=3.4647 \times 10^{-4}x^2+2.2397 \times 10^{-2}x+1.1534$	0.9995

## 3 两种桶状标准源测量结果的比较

由于水介质线状源废物桶与水均匀放射性废物桶的主体基质均为水,盛放容器为 208 L 标准规格废物桶,因此进行对比时探头测得的计数中水体的吸收与衰减系数相互抵消,可忽略不计,需考虑的部分为壳源法放射性废物桶测量过程中废物桶中的隔板、支架、套管、空气缝隙以及盛放放射性溶液的容器等非水体部分对  $\gamma$  射线的吸收与衰减影响,因此需进行修正。

1) 盛放放射性溶液的容器与支架套管间存在的空气间隙、固定线状源的隔板及套管、支架对  $\gamma$  光子都存在衰减作用,通过透射源可对其衰减修正。具体方法为:在隔板、支架、套管及容器等介质有和无两种条件下通过对透射源的测量得到的归一化计数率作为修正因子。

2) 线状源方法制备的废物桶中套管的位

置为 7 个或 9 个,每次测量时线状源处于不同的位置。线状源处于不同位置时对  $\gamma$  光子的衰减可通过透射源的透射实验进行衰减校正。利用 1 个与线状源组成相同但不含放射性核素的“假线状源”放置在不同的套管位置上,再利用透射源进行透射测量,透射源的计数率测量结果(计数率按平均值归一)如表 6 所列。

由表 6 可看出,在不同位置上放置同一个支架、放射性溶液盛放容器,透射源的测量结果大致相同,即其衰减修正是相同的。因此在比较两种测量结果时,可不用单独考虑线状源在不同位置上的修正,只需进行 1 次修正即可。

插入桶内的线状源活度已知,根据拟合得到的等效净计数率,根据式(4)同样可计算得到等效探测效率,再利用透射源测量修正后得到修正值。分段型和连续型壳源法放射性废物桶的计算结果如表 7、8 所列。

表 6 线状源废物桶内不同位置上放置支架、盛放容器时透射源的测量结果

Table 6 Results of transmission source with different stands and holders in different positions of linear source waste drum

能量/keV	各位置点的归一化计数率								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
121.8	0.976	0.987	0.998	1.006	1.008	1.004	1.003	1.007	1.010
344.3	0.979	0.994	1.001	1.000	1.005	1.005	1.003	1.003	1.008
778.9	0.991	0.987	1.011	0.999	0.995	1.009	1.002	1.008	1.000
964.1	0.985	0.995	1.009	0.991	1.008	0.997	1.002	1.002	1.011
1 112	0.988	0.995	0.998	1.002	1.006	1.004	1.002	1.007	0.997
1 408	0.988	0.994	1.002	0.998	0.999	1.007	1.005	1.005	1.002

表 7 考虑各种修正后的对分段型线状源废物桶的探测效率

Table 7 Corrected detection efficiency for dispersed linear source

能量/keV	等效探测效率	隔板、支架、套管、空气缝隙修正因子	修正后效率
121.8	$2.78 \times 10^{-5}$	0.873 7	$3.14 \times 10^{-5}$
344.3	$2.28 \times 10^{-5}$	0.954 6	$2.39 \times 10^{-5}$
778.9	$1.79 \times 10^{-5}$	0.949 3	$1.88 \times 10^{-5}$
964.1	$1.71 \times 10^{-5}$	0.959 3	$1.79 \times 10^{-5}$
1 112	$1.68 \times 10^{-5}$	0.963 0	$1.75 \times 10^{-5}$
1 408	$1.58 \times 10^{-5}$	0.966 7	$1.63 \times 10^{-5}$

表 8 考虑各种修正后的连续型线状源废物桶的探测效率

Table 8 Corrected detection efficiency for consecutive linear source waste drum

能量/keV	等效探测效率	隔板、支架、套管、空气缝隙修正因子	修正后效率
121.8	$2.90 \times 10^{-5}$	0.915 1	$3.17 \times 10^{-5}$
344.3	$2.33 \times 10^{-5}$	0.948 4	$2.45 \times 10^{-5}$
778.9	$1.81 \times 10^{-5}$	0.957 1	$1.89 \times 10^{-5}$
964.1	$1.73 \times 10^{-5}$	0.957 6	$1.80 \times 10^{-5}$
1 112	$1.70 \times 10^{-5}$	0.962 8	$1.76 \times 10^{-5}$
1 408	$1.58 \times 10^{-5}$	0.965 7	$1.64 \times 10^{-5}$

将 3 种放射性废物桶测量与计算得到的 SGS 装置的单层放射性活度探测效率进行比较,如图 3 所示。

从图 3 可看出,无论是由分段型还是连续型线状源制备的废物桶,所得探测效率与水均匀放射性废物桶所得的探测效率均一致;能量较低的点探测效率最大相对偏差为 4%,中高能量点线状源法与水均匀桶法探测效率相对偏差不超过 2%,能量较低的点由于其  $\gamma$  光子的透射率较低,因此通过透射源修正偏差较大。

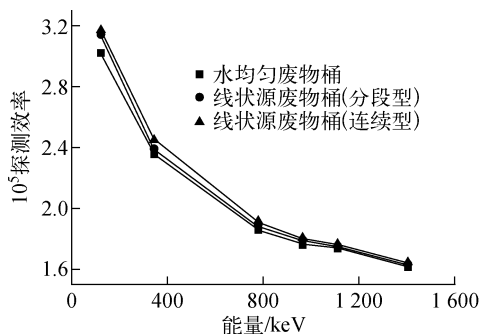


图 3 3 种废物桶标准源探测效率对比  
Fig. 3 Comparison of detection efficiency for three kinds of sources

## 4 结束语

根据实验结果,壳源法制备废物桶所得探测效率与水均匀放射性废物桶所得的探测效率基本一致,考虑其中存在的测量误差以及 SGS 装置本身的测量不确定度,利用壳源法制备的放射性废物桶标准源代替均匀填充分布的放射性废物桶刻度 SGS 装置的活度探测效率是可行的。

## 参考文献:

- [1] 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).
- [2] 杨明太,张连平. 桶装核废物的非破坏性分析:续[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: Continued [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(1): 104-105(in Chinese).
- [3] 吕峰,曹斌,辛标,等. 分层 $\gamma$ 扫描自吸收校正法分析残渣和废物中的铀、钚含量[J]. 原子能科学技术,1998,32(5):445-449.  
LV Feng, CAO Bin, XIN Biao, et al. Assay of the uranium and plutonium content in process residues and waste using the correction for sample self attenuation in segmented gamma scanning system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1998, 32(5): 445-449(in Chinese).
- [4] PARKER J L. The use of calibration standards and the correction for sample self attenuation in gamma-ray nondestructive assay, LA-10045[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1986.
- [5] 王仲奇,宗波,郜强,等. 分层 $\gamma$ 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):103-108.  
WANG Zhongqi, ZONG Bo, GAO Qiang, et al. Study on effect of radial-heterogeneity in segmented gamma scanning analysis[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(1): 103-108 (in Chinese).
- [6] 郜强,王仲奇,王奕博,等. 分层 $\gamma$ 扫描层间串扰影响的研究[J]. 原子能科学技术,2011,45(2):211-216.  
GAO Qiang, WANG Zhongqi, WANG Yibo, et al. Wedge-disturbing effect of segmented gamma scanner[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(2): 211-216(in Chinese).
- [7] SAMPSON T E, GOLDMAN A. Analysis of NDA instrument calibration data, LA-11316-MS [R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1988.
- [8] 何丽霞,吕峰,赵学军,等. 分段 $\gamma$ 扫描标样的非破坏性分析法检验[J]. 原子能科学技术,2007,41(2):248-251.  
HE Lixia, LV Feng, ZHAO Xuejun, et al. Non-destructive assay for segmented gamma scanning calibration standards[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(2): 248-251(in Chinese).
- [9] HSUE S T, STEWART J E, SAMPSON T E, et al. Guide to nondestructive assay standards: Preparation criteria, availability, and practical considerations, LA-13340-MS [R]. USA: Los Alamos Scientific Laboratory, 1997.
- [10] LIANG J H, JIANG S H, CHOU J T, et al. Parametric study of shell-source method for rad-waste radioactivity detection system[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1998, 49(4): 361-368.
- [11] BRUGGEMAN M, GERITS J, CARCHON R. A minimum biased shell-source method for the calibration of rad waste assay systems[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1999, 51(2): 255-259.
- [12] CROFT S, MCELROY R D. The calibration of segmented gamma scanners using rod sources [R]. USA: Canberra Industries Incorporated, 2002.
- [13] American Society for Test and Material. ASTM 1133-03 Standard test method for nondestructive assay of special nuclear material in low-density scrap and waste by segmented passive gamma-ray scanning[S]. USA: ASTM, 2003.