



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107462914 B

(45)授权公告日 2019.10.18

(21)申请号 201710816063.8

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2017.09.12

G01T 1/16(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

审查员 周桂芳

申请公布号 CN 107462914 A

(43)申请公布日 2017.12.12

(73)专利权人 四川轻化工大学

地址 643000 四川省自贡市汇兴路学苑街180号

(72)发明人 石睿 虞先国 李志刚 刘宇琦

郑洪龙 许阳阳 姚晓雨 李强
李怀良

(74)专利代理机构 成都点睛专利代理事务所

(普通合伙) 51232

代理人 刘文娟

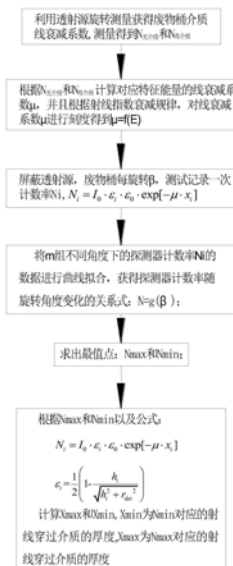
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

核废物桶分层γ扫描中确定点源径向位置的方法

(57)摘要

本发明公开了一种通用性强,工作量小,精度高的确定点源在桶中的位置,可以帮助在SGS还原点源活度计算中节省时间且提高精度的核废物桶分层γ扫描中确定点源径向位置的方法。该方法首先计算所需要的介质线衰减系数值,然后固定角度旋转测量不同角度下探测器计数率,然后拟合探测器计数率随旋转角度变化的曲线,求得探测器计数率最大值点和最小值点,最后通过探测器计数率最值比计算获得点源所在径向位置。采用本发明所述的核废物桶分层γ扫描中确定点源径向位置的方法确定点源径向位置后,可确定点源对应旋转半径的探测效率,可以提高分层γ扫描技术中估计点源活度精度;对进一步估计核废物桶内放射性核素活度分布具有重要意义。



1. 核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

(1) 利用透射源旋转测量获得废物桶介质线衰减系数;

透射源无核废物桶介质测量: 透射源正对探测器轴心, 在无核废物桶介质的情况下, 测量获得透射源多个能量的探测器计数率 $N_{\text{无介质}}$;

透射源有核废物桶介质测量: 透射源正对探测器轴心, 在有核废物桶介质的情况下, 匀速旋转废物桶, 测量获得经过介质衰减后透射源多个能量的探测器计数率 $N_{\text{有介质}}$;

(2) 根据步骤 (1) 获得的 $N_{\text{无介质}}$ 和 $N_{\text{有介质}}$ 计算线衰减系数; 对线衰减系数刻度: 根据步骤 (1) 中获得的衰减前后不同能量射线对应的探测器的计数率, 根据射线指数衰减规律, 对线衰减系数 μ 进行刻度, 获得线衰减系数 μ 随 γ 射线能量变化的关系式: $\mu = f(E)$; μ 为对应特征能量的线衰减系数; E 表示 γ 射线能量;

(3) 核废物桶以固定角度 β 旋转: 屏蔽透射源, 废物桶每旋转 β , 测试记录一次计数率 N_i , 旋转一圈测量的次数 $m = 360^\circ / \beta$;

$$N_i = I_0 \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp[-\mu \cdot x_i] \quad (1)$$

其中, $i = [1, m]$, μ 为对应特征能量的线衰减系数, I_0 为 γ 射线初始强度, x_i 为射线穿过第 i 个角度样品厚度, ε_i 为第 i 个角度点源几何因子, ε_0 为探测器本征探测效率; 几何因子的理论公式为:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h_i}{\sqrt{h_i^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (2)$$

式中, h_i 为第 i 个角度下点源到探测器表面的垂直距离, r_{det} 为探头表面半径;

(4) 拟合曲线: 将 m 组不同角度下的探测器计数率 N_i 的数据进行曲线拟合, 获得探测器计数率 N 随旋转角度变化的关系式: $N = g(\beta)$;

(5) 求出最值点: 根据指数衰减规律可知, 当放射性核素穿过介质厚度越厚, 探测器计数率就会越低, 因此, 根据步骤 (4) 中的拟合曲线得到探测器计数率的最大值点 N_{max} 和最小值点 N_{min} , 此时, 两个位置的角度差为 180° ; 将两个极值点带入式 (1), 得到式 (3)、(4):

$$N_{\text{max}} = I_0 \cdot \varepsilon_{\text{max}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_{\text{max}}) \quad (3)$$

$$N_{\text{min}} = I_0 \cdot \varepsilon_{\text{min}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_{\text{min}}) \quad (4)$$

(6) 确定点源位置: 式 (3)、(4) 中 x_{max} 为 N_{max} 对应的射线穿过介质的厚度, x_{min} 为 N_{min} 对应的射线穿过介质的厚度, μ 为线衰减系数, ε_0 为探测器本征探测效率, I_0 为点源初始强度, ε_{max} 和 ε_{min} 分别为最大值和最小值位置几何因子, 由 (2) 式得到:

$$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{\text{max}} + l}{\sqrt{(x_{\text{max}} + l)^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{min}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{\text{min}} + l}{\sqrt{(x_{\text{min}} + l)^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (6)$$

其中, l 为介质表面到探测器表面的垂直距离;

将式 (3)、(4) 等式做比值, 约掉 ε_0 和 I_0 , 并将 (5)、(6) 式代入, 得到:

$$\frac{N_{\max}}{N_{\min}} = \frac{\sqrt{(l+x_{\max})^2 + r_{\text{det}}^2} - (l+x_{\max})}{\sqrt{(l+x_{\min})^2 + r_{\text{det}}^2} - (l+x_{\min})} \cdot \frac{\sqrt{(l+x_{\min})^2 + r_{\text{det}}^2}}{\sqrt{(l+x_{\max})^2 + r_{\text{det}}^2}} \cdot \exp[-\mu(x_{\max} - x_{\min})] \quad (7)$$

其中, μ 由步骤3) 得到; 且 x_{\min} 、 x_{\max} 满足:

$$x_{\max} + x_{\min} = 2R \quad (8)$$

其中, R 表示核废物桶 (3) 的半径; 联立式 (7)、(8) 可求解出 x_{\min} 、 x_{\max} , 即可得到点源所在的旋转半径 r , 从而可以确定在旋转半径为 r 的对应的探测器探测效率 $E(r)$ 以及该核素在旋转半径 r 上的概率。

核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及在分层 γ 扫描技术的测量及分析,尤其是一种核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法。

背景技术

[0002] 公知的:分层 γ 扫描(Segmented Gamma Scanning,SGS)是一种无损检测技术,是桶装核废物定性、定量分析的重要手段。分层 γ 扫描技术在对废物桶进行测量时,采用桶内每层介质与放射性核素都均匀分布在桶轴径向上,但是实际情况中放射性核素则极易出现不均匀分布的情况,高活度区域往往以点源或多点源的形式存在,这样放射性核素的均匀分布假设就存在不合理性,这也是造成目前SGS技术测量精度不高的最主要原因。

[0003] 传统的分层 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。测得每一层计数率后,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,求和得整个被测物的核素活度总量。

[0004] 传统分层 γ 扫描系统点源活度还原方法研究,分为发射与透射测量两部分。透射测量是测量外置透射源射线穿过废物桶的放射性,其目的在于获取废物桶介质的线衰减系数,实现对废物桶本身放射性自吸收的校正。其强度衰减服从指数规律:

$$[0005] \quad I(E) = I_0(E) \cdot \exp[-\mu(E) \cdot x] \quad (1)$$

[0006] 式中 $I_0(E)$ 为能量为 E 的入射 γ 射线强度, $I(E)$ 为穿透样品后的 γ 射线强度; $\mu(E)$ 为废物桶介质的线衰减系数, x 为均匀密度介质厚度。

[0007] 发射测量是屏蔽透射源后测量废物桶本身的放射性的过程,由于废物桶介质会对其本身的放射性产生自吸收,其活度需由自吸收校正后得到:

$$[0008] \quad F(E) = \varepsilon(E) \cdot A(E) \quad (2)$$

$$[0009] \quad D(E) = F(E) \cdot S(E) \quad (3)$$

[0010] $\varepsilon(E)$ 为探测效率, $A(E)$ 为自吸收校正因子, $F(E)$ 为衰减校正探测效率, $D(E)$ 为体源样品发射 γ 射线的探测器计数, $S(E)$ 为估计放射性核素活度。

[0011] 结合透射测量和发射测量,计算得到每一层的放射性活度,再对每一层的活度求和,实现整个废物桶放射性活度的计算,如式(4):

$$[0012] \quad \overline{S(E)} = \sum_{i=1,2,3\dots} S_i(E) \quad (4)$$

[0013] 式中 $\overline{S(E)}$ 为整个废物桶样品放射性活度; $S_i(E)$ 为第 i 层的放射性活度。

[0014] SGS技术是基于层内物质均匀分布的假设,即线衰减系数相同。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用式(5)表示:

$$[0015] \quad C = \alpha \int_0^R I_p \cdot E(r) dr \quad (5)$$

[0016] 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 r 的圆形线源对探测器的全能峰探测效率。分段 γ 扫描技术假设一层内物质及核素都均匀分布, 即:

$$[0017] \quad p_r = 2r/R^2 \quad (6)$$

[0018] 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。为减小误差, 有研究者提出, 将每层分为若干环, 并假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。

[0019] 假设将每一层分为 n 个环形源在由内到外的半径区域分别为 (R_0, R_1) , (R_1, R_2) , (R_2, R_3) , \dots , (R_{n-1}, R_n) , 则

$$[0020] \quad C_k = I_1 G_{k1} + I_2 G_{k2} + \dots + I_n G_{kn} \quad (7)$$

[0021] C_k 为在距离桶中轴 k 处的探测器计数率, I_1, I_2, \dots, I_n 为每一个环形源的活度, $G_{k1}, G_{k2}, \dots, G_{kn}$ 为考虑到几何因子和样品吸收的衰减校正探测效率, α 为准直器张角, $f(r_{k-1}, \theta, \mu_i, k_j)$ 为关于旋转半径 r_k , 点源旋转偏离桶轴角 θ , 线衰减系数 μ_i , 探测器与桶轴距离 k_j 的响应函数, 经简化可得到式 (8), H_j 为探源距, 可用式 (10) 表示。

$$[0022] \quad G_{kn} = \frac{\alpha}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(r_{k-1}, \theta, \mu_i, k_j) d\theta \quad (8)$$

$$[0023] \quad f(r, \theta, \mu_i, k_j) = e^{-\mu_i k_j / H_j^2} \quad (9)$$

$$[0024] \quad H_j^2 = H_x^2 + H_y^2 \quad (10)$$

$$[0025] \quad H_x = r_{k-1} \cos(\theta) \quad (11)$$

$$[0026] \quad H_y = r_{k-1} \sin(\theta) \quad (12)$$

[0027] 根据式 (7) 改变 n 次 k_j 得到 n 个方程, 解出 n 个 I_1, I_2, \dots, I_n 环形源的活度, 将 n 个环形源活度累加得到整个层的活度 I :

$$[0028] \quad I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (13)$$

[0029] 使用此种方法还原点源活度比传统方法优越很大, 但是为了精确还原点源的活度就需要将环形源之间的距离划分更小。但是传统方法无法准确的确定点源的位置, 因此无法简化测量的次数, 还原点源活度准确性较低。

发明内容

[0030] 本发明所要解决的技术问题是提供一种通用性强, 工作量小, 精度高的确定点源在桶中的位置, 可以帮助在 SGS 还原点源活度计算中节省时间且提高精度的核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法。

[0031] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是: 核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法, 包括以下步骤:

[0032] (1) 利用透射源旋转测量获得废物桶介质线衰减系数;

[0033] 透射源无核废物桶介质测量: 透射源正对探测器轴心, 在无核废物桶介质的情况下, 测量获得透射源多个能量的探测器计数率 $N_{\text{无介质}}$;

[0034] 透射源有核废物桶介质测量: 透射源正对探测器轴心, 在有核废物桶介质的情况下, 匀速旋转废物桶, 测量获得经过介质衰减后透射源多个能量的探测器计数率 $N_{\text{有介质}}$;

[0035] (2) 根据步骤 1) 获得的 $N_{\text{无介质}}$ 和 $N_{\text{有介质}}$ 计算线衰减系数; 对线衰减系数刻度: 根据步骤 1) 中获得的衰减前后不同能量射线对应的探测器的计数率, 根据射线指数衰减规律, 对线

衰减系数 μ 进行刻度,获得线衰减系数 μ 随 γ 射线能量变化的关系式: $\mu=f(E)$; μ 为对应特征能量的线衰减系数; E 表示 γ 射线能量;

[0036] (3) 核废物桶以固定角度 β 旋转:屏蔽透射源,废物桶每旋转 β ,测试记录一次计数率 N_i ,旋转一圈测量的次数 $m=360^\circ/\beta$;

$$[0037] \quad N_i = I_0 \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp[-\mu \cdot x_i] \quad (1)$$

[0038] 其中, $i=[1, m]$, μ 为对应特征能量的线衰减系数, I_0 为 γ 射线初始强度, x_i 为射线穿过第 i 个角度样品厚度, ε_i 为第 i 个角度点源几何因子, ε_0 为探测器本征探测效率;几何因子的理论公式为:

$$[0039] \quad \varepsilon_i = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h_i}{\sqrt{h_i^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (2)$$

[0040] 式中, h_i 为第 i 个角度下点源到探测器表面的垂直距离, r_{det} 为探头表面半径;

[0041] (4) 拟合曲线:将 m 组不同角度下的探测器计数率 N_i 数据进行曲线拟合,获得探测器计数率 N 随旋转角度变化的关系式: $N=g(\beta)$;

[0042] (5) 求出最值点:根据指数衰减规律可知,当放射性核素穿过介质厚度越厚,探测器计数率就会越低,因此,可根据步骤(4)中的拟合曲线得到探测器计数率的最大值点 N_{max} 和最小值点 N_{min} ,此时,两个位置的角度差为180度;将两个极值点带入式(1),得到式(3)、(4):

$$[0043] \quad N_{\text{max}} = I_0 \cdot \varepsilon_{\text{max}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_{\text{max}}) \quad (3)$$

$$[0044] \quad N_{\text{min}} = I_0 \cdot \varepsilon_{\text{min}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_{\text{min}}) \quad (4)$$

[0045] (6) 确定点源位置:式(3)、(4)中 x_{max} 为 N_{max} 对应的射线穿过介质的厚度, x_{min} 为 N_{min} 对应的射线穿过介质的厚度, μ 为线衰减系数, ε_0 为探测器本征探测效率, I_0 为点源初始强度, ε_{max} 和 ε_{min} 分别为最大值和最小值位置几何因子,由(2)式得到:

$$[0046] \quad \varepsilon_{\text{max}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{\text{max}} + l}{\sqrt{(x_{\text{max}} + l)^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (5)$$

$$[0047] \quad \varepsilon_{\text{min}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{\text{min}} + l}{\sqrt{(x_{\text{min}} + l)^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (6)$$

[0048] 其中 l 为一个固定常数, h_i 为第 i 个角度下点源到探测器表面的垂直距离,

[0049] $x_{\text{max}}+l$ 为在最大值时的检测角度下点源到探测器表面的垂直距离;

[0050] $x_{\text{min}}+l$ 为在最小值时的检测角度下点源到探测器表面的垂直距离;因此, l 为介质表面到探测器表面的垂直距离;

[0051] 将式(3)、(4)等式做比值,约掉 ε_0 和 I_0 ,并将(5)、(6)式代入,得到:

$$[0052] \quad \frac{N_{\text{max}}}{N_{\text{min}}} = \frac{\sqrt{(l+x_{\text{max}})^2 + r_{\text{det}}^2} - (l+x_{\text{max}})}{\sqrt{(l+x_{\text{min}})^2 + r_{\text{det}}^2} - (l+x_{\text{min}})} \cdot \frac{\sqrt{(l+x_{\text{min}})^2 + r_{\text{det}}^2}}{\sqrt{(l+x_{\text{max}})^2 + r_{\text{det}}^2}} \cdot \exp[-\mu(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})] \quad (7)$$

[0053] 其中, μ 由步骤3)得到;且 x_{min} 、 x_{max} 满足:

$$[0054] \quad x_{\text{max}} + x_{\text{min}} = 2R \quad (8)$$

[0055] 其中, R 表示核废物桶的半径;联立式(7)、(8)可求解出 x_{min} 、 x_{max} ,即可得到点源所

在的旋转半径 r ,从而可以确定在旋转半径为 r 的对应的探测器探测效率 $E(r)$ 以及该核素在旋转半径 r 上的概率。

[0056] 本发明的有益效果是:本发明所述的核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法,可以提高SGS技术估计点源活度的精度。利用射线在经过不同厚度的介质的探测器计数率的变化曲线和几何模型结合确定点源在核废物桶径向上的位置,通过建立SGS装置的几何模型,对桶不同径向上的位置的点源进行估计,使SGS技术中效率刻度中可以精确对应相应位置的效率,更加精确的估计点源活度,避免了传统的SGS估计点源活度效率不对应导致还原点源活度精度低的不足,具有很高的使用价值和广泛的应用前景。

附图说明

[0057] 图1是本发明实施例中核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法的流程图;

[0058] 图2是透射源无废物桶介质测量示意图;

[0059] 图3是透射源有废物桶介质测量示意图;

[0060] 图4是核废物桶介质固定角度旋转测量示意图;

[0061] 图5为探测器计数率最值点位置示意图;

[0062] 图中标示:1-透射源,2-探测器,3-核废物桶。

具体实施方式

[0063] 下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

[0064] 如图1至图5所示,本发明所述的核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法,包括以下步骤:

[0065] (1) 利用透射源旋转测量获得废物桶介质线衰减系数;

[0066] 如图2所示为透射源无核废物桶介质测量:透射源正对探测器轴心,在无核废物桶介质的情况下,测量获得透射源多个能量的探测器计数率 $N_{\text{无介质}}$;

[0067] 如图3所示为透射源有核废物桶介质测量:透射源正对探测器轴心,在有核废物桶介质的情况下,匀速旋转废物桶,测量获得经过介质衰减后透射源多个能量的探测器计数率 $N_{\text{有介质}}$;

[0068] (2) 根据步骤(1)获得的 $N_{\text{无介质}}$ 和 $N_{\text{有介质}}$ 计算线衰减系数;对线衰减系数刻度:根据步骤(1)中获得的衰减前后不同能量射线对应的探测器的计数率,根据射线指数衰减规律,对线衰减系数 μ 进行刻度,获得线衰减系数 μ 随 γ 射线能量变化的关系式: $\mu=f(E)$; μ 为对应特征能量的线衰减系数; E 表示 γ 射线能量;

[0069] 具体的,透射测量是测量外置透射源射线穿过废物桶的放射性,其目的在于获取废物桶介质的线衰减系数,实现对废物桶本身放射性自吸收的校正;其强度衰减服从指数规律:

$$I(E) = I_0(E) \cdot \exp[-\mu(E) \cdot x]$$

[0071] 式中 $I_0(E)$ 为能量为 E 的入射 γ 射线强度, $I(E)$ 为穿透样品后的 γ 射线强度; $\mu(E)$ 为废物桶介质的线衰减系数, x 为均匀密度介质厚度。

$$[0072] \quad \mu = \frac{1}{x} \times \ln \frac{N_{\text{有介质}}}{N_{\text{无介质}}}$$

[0073] 通过步骤(1)和步骤(2)从而得到对应特征能量的线衰减系数 μ 。

[0074] (3)核废物桶以固定角度 β 旋转:如图4所示,屏蔽透射源,废物桶每旋转 β ,测试记录一次计数率 N_i ,旋转一圈测量的次数 $m=360^\circ/\beta^\circ$;

$$[0075] \quad N_i = I_0 \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp[-\mu \cdot x_i] \quad (1)$$

[0076] 其中, $i=[1,m]$, μ 为对应特征能量的线衰减系数, I_0 为 γ 射线初始强度, x_i 为射线穿过第 i 个角度样品厚度, ε_i 为第 i 个角度点源几何因子, ε_0 为探测器本征探测效率;几何因子的理论公式为:

$$[0077] \quad \varepsilon_i = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h_i}{\sqrt{h_i^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (2)$$

[0078] 式中, h_i 为第 i 个角度下点源到探测器表面的垂直距离, r_{det} 为探头表面半径;

[0079] (4)拟合曲线:将 m 组不同角度下的探测器计数率 N_i 的数据进行曲线拟合,获得探测器计数率 N 随旋转角度变化的关系式: $N=g(\beta)$;

[0080] 通过步骤(3)和步骤(4)从而得到获得探测器计数率 N 随旋转角度 β 变化的关系式: $N=g(\beta)$;从而可以根据探测器计数率 N 随旋转角度 β 变化的关系式得到任意角度时对应的探测器计数率 N 。同时也可以家算出探测器计数率 N 的最大值和最小值,以及此时核废物桶介质3旋转的角度。

[0081] (5),求出最值点:根据指数衰减规律可知,当放射性核素穿过介质厚度越厚,探测器计数率就会越低,因此,可根据步骤(4)中的拟合曲线得到探测器计数率的最大值点 N_{max} 和最小值点 N_{min} ,此时,两个位置的角度差为180度;将两个极值点带入式(1),得到式(3)、(4):

$$[0082] \quad N_{\text{max}} = I_0 \cdot \varepsilon_{\text{max}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_{\text{max}}) \quad (3)$$

$$[0083] \quad N_{\text{min}} = I_0 \cdot \varepsilon_{\text{min}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_{\text{min}}) \quad (4)$$

[0084] (6),确定点源位置:式(3)、(4)中 x_{max} 为 N_{max} 对应的射线穿过介质的厚度, x_{min} 为 N_{min} 对应的射线穿过介质的厚度, μ 为线衰减系数, ε_0 为探测器本征探测效率, I_0 为点源初始强度, ε_{max} 和 ε_{min} 分别为最大值和最小值位置几何因子,由(2)式得到:

$$[0085] \quad \varepsilon_{\text{max}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{\text{max}} + l}{\sqrt{(x_{\text{max}} + l)^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (5)$$

$$[0086] \quad \varepsilon_{\text{min}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{\text{min}} + l}{\sqrt{(x_{\text{min}} + l)^2 + r_{\text{det}}^2}} \right) \quad (6)$$

[0087] 其中 l 为一个固定常数, h_i 为第 i 个角度下点源到探测器表面的垂直距离,

[0088] $x_{\text{max}}+l$ 为在最大值时的检测角度下点源到探测器表面的垂直距离;

[0089] $x_{\text{min}}+l$ 为在最小值时的检测角度下点源到探测器表面的垂直距离;

[0090] 因此, l 为介质表面到探测器表面的垂直距离;

[0091] 将式(3)、(4)等式做比值,约掉 ε_0 和 I_0 ,并将(5)、(6)式代入,得到:

$$[0092] \quad \frac{N_{\max}}{N_{\min}} = \frac{\sqrt{(l+x_{\max})^2 + r_{\text{det}}^2} - (l+x_{\max})}{\sqrt{(l+x_{\min})^2 + r_{\text{det}}^2} - (l+x_{\min})} \cdot \frac{\sqrt{(l+x_{\min})^2 + r_{\text{det}}^2}}{\sqrt{(l+x_{\max})^2 + r_{\text{det}}^2}} \cdot \exp[-\mu(x_{\max} - x_{\min})] \quad (7)$$

[0093] 其中, μ 由步骤3)得到;且 x_{\min} 、 x_{\max} 满足:

$$[0094] \quad x_{\max} + x_{\min} = 2R \quad (8)$$

[0095] 其中, R 表示核废物桶3的半径;联立式(7)、(8)可求解出 x_{\min} 、 x_{\max} ,如图5所示,即可得到点源所在的旋转半径 r ,从而可以确定在旋转半径为 r 的对应的探测器探测效率 $E(r)$ 以及该核素在旋转半径 r 上的概率。

[0096] 通过步骤(5)和步骤(6)最终确定点源所在核废物桶内的旋转半径 r 从而可以精确的确定点源的位置以及旋转半径为 r 的对应的探测器探测效率 $E(r)$ 以及该核素在旋转半径 r 上的概率。从而能够简少传统测量方法的测量次数,提高还原点源活度的准确性。

[0097] 综上所述,本发明所述的核废物桶分层 γ 扫描中确定点源径向位置的方法,可以提高SGS技术估计点源活度的精度。利用射线在经过不同厚度的介质的探测器计数率的变化曲线和几何模型结合确定点源在核废物桶径向上的位置,通过建立SGS装置的几何模型,对桶不同径向上的位置的点源进行估计,使SGS技术中效率刻度中可以精确对应相应位置的效率,更加精确的估计点源活度,避免了传统的SGS估计点源活度效率不对应导致还原点源活度精度低的不足,具有很高的使用价值和广泛的应用前景。

[0098] 实施例

[0099] 在以下领域均需要SGS技术准确估计核废物桶中点源的活度。在对放射性废物进行最终处置前,必须先对其进行准确的分类,我国规定了对不同种类的放射性废物的不同处理和处置方式,低、中放固体废物应采用近地表处置(包括岩洞处置)方式,也可采用其他具有等效功能的处置方式。在对这些废物进行处置之前,必须对其进行准确鉴别与测量,获得废物中所含核素及其核素的量,为其暂存、运输和最终处置的方案制定提供科学依据。

[0100] 采用SGS设备进行检验。实验所涉及探测器2、透射源1和核废物桶3的位置如图2和图3所示。采用200L标准桶(标准尺寸为 $\phi 560\text{mm} \times 900\text{mm}$,壁厚1.2mm)。探测器准直器长150mm,探头距桶壁790mm,准直孔为长100mm \times 50mm矩形通孔。填充样品为聚乙烯塑料块,样品密度为1.00g/cm³。本实施例采用美国ORTEC公司生产的电制冷P型同轴HPGe探测器2,型号:GEM-MX7080P4-HE-SMP,晶体直径70mm,长度82.6mm,探测器偏压2600V,能量响应范围4keV-10MeV,相对探测效率66%@1.33MeV,能量分辨率0.15%@1.33MeV。探测器2在如图2所示的12个位置,每个位置间隔30°。标准 γ 放射源(衰变校正后):¹³⁷Cs活度为 $3.15 \times 10^5\text{Bq}$ 。首先将标准 γ 放射源放到7个位置分别距离每层中心的距离为:0cm、4cm、12cm、16cm、19cm、22cm、24cm处。

[0101] 实验测量过程中,首先测量得到对应特征能量的线衰减系数 μ 为0.069cm⁻¹,然后核废物桶以固定角度 β 旋转:屏蔽透射源,废物桶每旋转 β ,测试记录一次计数率 N_i ,旋转一圈测量的次数 $m = 360^\circ / \beta^\circ$;

$$[0102] \quad N_i = I_0 \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp[-\mu \cdot x_i]$$

[0103] 其中, $i = [1, m]$, μ 为对应特征能量的线衰减系数, I_0 为 γ 射线初始强度, x_i 为射线穿过第 i 个角度样品厚度, ε_i 为第 i 个角度点源几何因子, ε_0 为探测器本征探测效率;几何因子的理论公式为:

$$[0104] \quad \varepsilon_i = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h_i}{\sqrt{h_i^2 + r_{\text{det}}^2}} \right)$$

[0105] 式中, h_i 为第 i 个角度下点源到探测器表面的垂直距离, r_{det} 为探头表面半径;

[0106] 然后, 拟合曲线: 将 m 组不同角度下的探测器计数率 N_i 的数据进行曲线拟合, 获得探测器计数率 N 随旋转角度变化的关系式: $N = g(\beta)$;

[0107] 然后求出最值点: 根据指数衰减规律可知, 当放射性核素穿过介质厚度越厚, 探测器计数率就会越低, 因此, 根据拟合曲线得到探测器计数率的最大值点 N_{max} 和最小值点 N_{min} ,

$$[0108] \quad N_{\text{max}} = I_0 \cdot \varepsilon_{\text{max}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_{\text{max}})$$

$$[0109] \quad N_{\text{min}} = I_0 \cdot \varepsilon_{\text{min}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_{\text{min}})$$

[0110] 确定点源位置: x_{max} 为 N_{max} 对应的射线穿过介质的厚度, x_{min} 为 N_{min} 对应的射线穿过介质的厚度, μ 为线衰减系数, ε_0 为探测器本征探测效率, I_0 为点源初始强度, ε_{max} 和 ε_{min} 分别为最大值和最小值位置几何因子, 得到:

$$[0111] \quad \varepsilon_{\text{max}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{\text{max}} + l}{\sqrt{(x_{\text{max}} + l)^2 + r_{\text{det}}^2}} \right)$$

$$[0112] \quad \varepsilon_{\text{min}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{\text{min}} + l}{\sqrt{(x_{\text{min}} + l)^2 + r_{\text{det}}^2}} \right)$$

[0113] 得到:

$$[0114] \quad \frac{N_{\text{max}}}{N_{\text{min}}} = \frac{\sqrt{(l + x_{\text{max}})^2 + r_{\text{det}}^2} - (l + x_{\text{max}})}{\sqrt{(l + x_{\text{min}})^2 + r_{\text{det}}^2} - (l + x_{\text{min}})} \cdot \frac{\sqrt{(l + x_{\text{min}})^2 + r_{\text{det}}^2}}{\sqrt{(l + x_{\text{max}})^2 + r_{\text{det}}^2}} \cdot \exp[-\mu(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})]$$

[0115] 其中 l 为一个固定常数, h_i 为第 i 个角度下点源到探测器表面的垂直距离,

[0116] $x_{\text{max}} + l$ 为在最大值时的检测角度下点源到探测器表面的垂直距离;

[0117] $x_{\text{min}} + l$ 为在最小值时的检测角度下点源到探测器表面的垂直距离;

[0118] 因此, l 为介质表面到探测器表面的垂直距离;

[0119] 且 x_{min} 、 x_{max} 满足:

$$[0120] \quad x_{\text{max}} + x_{\text{min}} = 2R$$

[0121] 其中, R 表示核废物桶3的半径; 求解出 x_{min} 、 x_{max} , 即可得到点源所在的旋转半径 r , 从而可以确定在旋转半径为 r 的对应的探测器探测效率 $E(r)$ 以及该核素在旋转半径 r 上的概率。

[0122] 采用上述方法对 ^{137}Cs 源进行测量, 测量时间为 800s, 每个条件下测量 3 次, 取平均值作为能谱数据。根据上述方法确定点源位置为: 0cm、4.1cm、12.3cm、17.6cm、20.5cm、23.9cm、25.6cm 处; 根据 12 个位置的探测器计数率中的最值, 可得到点源的旋转半径, 旋转半径的相对误差在 2cm 以内。



图1

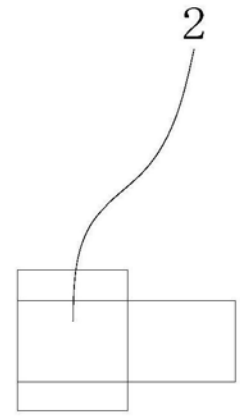
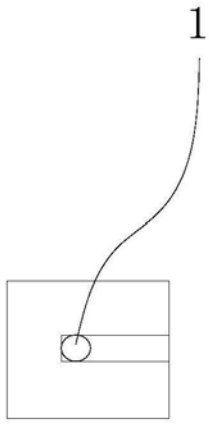


图2

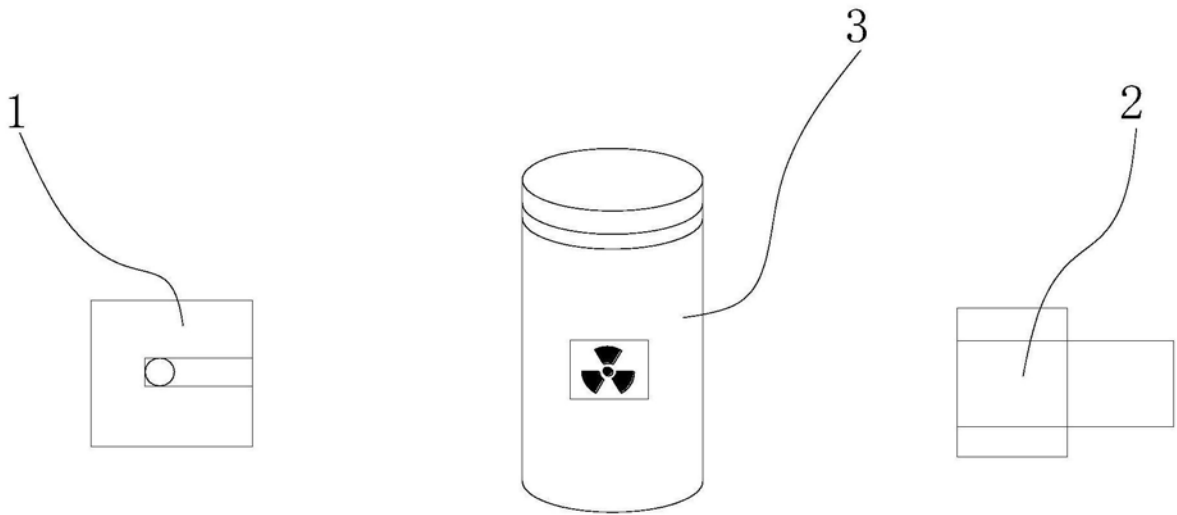


图3

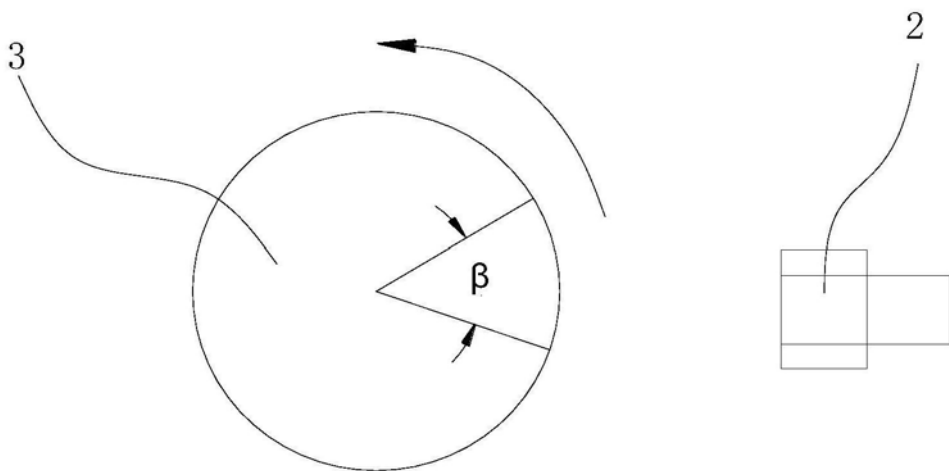


图4

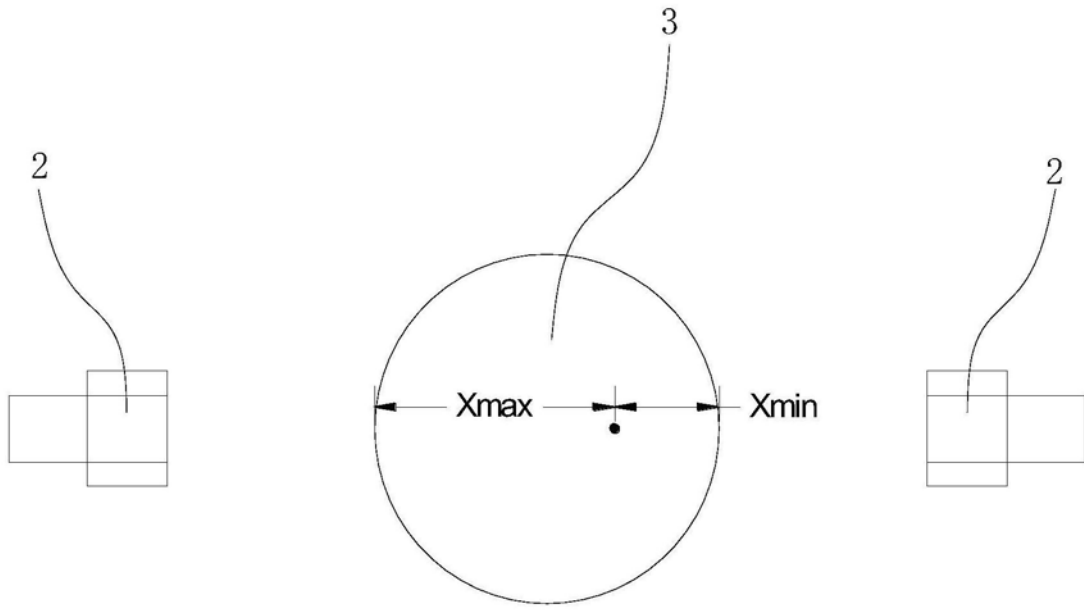


图5