

体源近似屏蔽计算的两种方法

殷文娟¹, 吕 军²

中图分类号: R144.1 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2013)05-0618-02

【摘要】 目的 解决体源的屏蔽计算。方法 采用模拟源计算方法和自吸收因子修正方法。结果 通过与 MCNP 程序计算结果进行比较,证明由两种模拟源计算方法得到的计算结果偏大,为保守估计。结论 这两种方法所得计算结果相同,在本质上是一种方法,同时也证明了所得到的自吸收因子公式的正确性。

【关键词】 屏蔽计算; 模拟源; 自吸收因子; MCNP

在体源(即大体积放射源)的屏蔽计算中,如果对着接受体的源面积的长、宽都不超过源与接受体间的距离时,则可把体源近似为点源进行计算;而当上述条件不具备时,源介质的自吸收因素就是必须考虑的一个问题,可以有以下两种处理方法。

1 模拟源计算方法

体源计算中,当源厚度大于平均自由程并采用点源近似计算时,应采用一个模拟源,其体积等于平均自由程乘以源在接受体所在平面的投影面积,该平面垂直于接受体到源心的连线。以中放废液贮罐屏蔽计算为例,给定条件如下:

贮罐外形尺寸为直径 3 800 mm 高 5 000 mm,贮

罐中心与屏蔽层外表面的距离为 3 m。参考源项为:
 ^{137}Cs —— $1 \times 10^9 \text{ Bq/L}$; ^{60}Co —— $1 \times 10^8 \text{ Bq/L}$ 。照射量率常数: $\Gamma_{\text{Cs}} = 6.312 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; $\Gamma_{\text{Co}} = 2.503 \times 10^{-18} \text{ C} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [3]。源介质近似为水,则在水中的线性减弱系数为: $\mu_{\text{Cs}} = 8.957 \text{ m}^{-1}$; $\mu_{\text{Co}} = 6.413 \text{ m}^{-1}$ 。管理限值取 $H_{\text{lh}} = 100 \mu\text{Sv/h}$,设屏蔽介质为混凝土。

1.1 ^{137}Cs (0.662 MeV) 由 $\mu_{\text{Cs}} = 8.957 \text{ m}^{-1}$ 知,平均自由程 $\lambda = 0.1116 \text{ m}$,考虑源的自吸收之后,令 R 为圆柱体半径, H 为圆柱体高度,则模拟源的体积为 $V = \lambda \cdot 2R \cdot H = 2.1204 \text{ m}^3$,故近似源的活度为 $A_{\text{Cs}} = 2.1204 \times 10^{12} \text{ Bq}$ 。衰减倍数为:

$$K > \frac{1.4 \times 10^5 \times A_{\text{Cs}} \times \Gamma_{\text{Cs}}}{H_{\text{lh}} \times L^2} \approx 2.08 \times 10^2$$

查表:当 $K = 2 \times 10^2$ 时,屏蔽层厚度 $d = 49.3 \text{ cm}$;

作者单位:1 河北省辐射环境管理站,河北 石家庄 050091;2 中国核工程有限公司河北分公司,河北 石家庄 050011
 作者简介:殷文娟(1981-),女,硕士,从事辐射环境监测管理工作。

从图 2 和图 3 中可以看出,对于我们使用的由 CANBERRA 公司生产的低本底实验室 HPG γ 谱仪,在测量 1 500 g 的土壤样品,采用圆柱形聚乙烯盒封装时,最佳几何尺寸为直径在 173 mm 和 174 mm 之间,当样品密度为 1.5 g/cm^3 时,此时样品厚度为 42 mm 左右。同理,应用无源效率刻度方法可以推广到其他基质材料、不同密度和质量样品的几何尺寸优化设计。

本文仅从保证探测效率最大这一单方面因素探讨了无源效率刻度方法在样品几何尺寸上的优化设计,实际实验室 HPG γ 谱仪测量工作中,还要多方面综合考虑本底谱中康普顿坪计数的影响、屏蔽室尺寸的限制、样品代表性、样品量及其密度等因素,来进行样品的最优化设计。

参考文献:

- [1] Genie2000 Customization Tools Manual [Z]. USA: CANBERRA, 2004.
- [2] 巨凌军,申茂泉,张洋,等. 无源效率刻度技术在 γ 谱仪分析中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 1: 39-43.
- [3] 曾奕,徐彬,陈立. 实验室无源效率刻度技术的准确性检验[J]. 四川环境, 2011, 6: 5-9.
- [4] 周程,王凤英,朱晓翔. 无源效率刻度方法的实验验证和分析[J]. 核技术, 2011, 8: 604-608.
- [5] 沈明,朱月龙,赵燕子. 环境辐射监测中 γ 谱仪无源效率刻度方法探讨[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 1: 116-121.
- [6] 陈立,马豪,曾志,等. 基于蒙特卡罗的 HPG γ 伽马谱仪无源效率刻度方法[J]. 强激光与粒子束, 2013, 1: 201-206.
- [7] 任天山,吴生财,等. 食物和环境样品中放射性核素的测量与评价[M]. 北京:原子能出版社, 1992: 45-61.

(收稿日期: 2013-05-20)

当 $K=5 \times 10^2$ 时 $d=55.8 \text{ cm}^{[1]}$ 。因此 $49.3 \text{ cm} < d < 55.8 \text{ cm}$ 。

1.2 ^{60}Co (1.25 MeV) 由 $\mu_{\text{Cs}}=6.413 \text{ m}^{-1}$ 知, 平均自由程 $\lambda=0.1559 \text{ m}$, 考虑源的自吸收之后, 模拟源的体积为 $V=2.963 \text{ m}^3$, 近似源的活度为 $A_{\text{Cs}}=2.963 \times 10^{11} \text{ Bq}$ 。衰减倍数为: $K \approx 1.154 \times 10^2$; 查表: 当 $K=1 \times 10^2$ 时, $d=55.6 \text{ cm}$; 当 $K=2 \times 10^2$ 时, $d=62.2 \text{ cm}^{[1]}$ 。因此 $55.6 \text{ cm} < d < 62.2 \text{ cm}$ 。

综上所述, 屏蔽层厚度可选取保守值为 $d=60 \text{ cm}$ 。

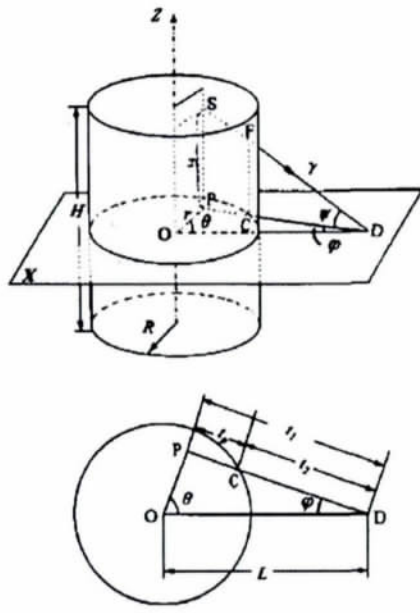


图1 体源模型

2 自吸收因子修正方法^[2,4]

假定一均匀分布的圆柱型体源, 源半径为 R , 源厚度即高度为 H , 源介质中射线的线性减弱系数为 μ , 以圆柱体中心为坐标原点, 采用圆柱坐标(如图1所示), 考虑空间一点 $S(r, \theta, z)$, 到测量点距离为 SD , 与圆柱表面交点为 F , 则 $t=SF$ 为射线在源介质中的自吸收距离。 SD 与平面夹角为 ψ , 吸收距离在平面上的投影为 PC , 记为 t_p , P 点的极坐标为 $P(r, \theta)$, 令 PD 与极轴交角为 φ , 源中心点与测量点距离 $OD=L$, 有:

$$PD = \sqrt{r^2 + L^2 - 2rL\cos\theta}$$

$$CD = L\cos\varphi - \sqrt{R^2 - L^2\sin^2\varphi}$$

因此吸收距离在平面的投影为: $PC = PD - CD$

吸收距离 $t = PC \cdot \sec\psi$

因此自吸收因子为:

$$F_a = \frac{4 \int_0^{H/2} dz \int_0^R r dr \int_0^\pi e^{-\mu(r, \theta, z)} d\theta}{\pi R^2 H} \quad (1)$$

由于上述积分难以计算, 故考虑在远场($L \gg R$,

$L \gg H$) 和样品足够大($\mu R \gg 1$) 条件下近似计算, 并将上式在直角坐标系内表示, 则上式变为:

$$F_a = \frac{4}{\pi} \int_0^l e^{-2\mu R x_1} \sqrt{1-x^2} dx_1 \quad (2)$$

在式(2)中, 如果 $\mu R \gg 1$, 则 $e^{-\mu R} \ll 1$, 当 $x_1 \rightarrow 1$ 时, 积分内的函数迅速趋于零, 则有:

$$F_a \approx \frac{4}{\pi} \int_0^l e^{-2\mu R x_1} dx_1 \approx \frac{2}{\pi \mu R} \quad (3)$$

该吸收因子是在满足远场条件($L \gg R$) 和样品足够大($\mu R \gg 1$) 的条件下近似得出的, 前文给定条件不满足远场条件, 但是满足样品足够大($\mu R \gg 1$) 的条件, 将相关数据代入, 有如下计算结果。

2.1 ^{137}Cs (0.662 MeV) 由式(3)知, 总吸收因子为: $F_a \approx 0.0374$; 近似源活度为 $A_{\text{Cs}} = 1.87 \times 10^{12} \text{ Bq}$ 。衰减倍数为: $K \approx 1.83 \times 10^2$ 。查表: 当 $K=1 \times 10^2$ 时, $d=44.3 \text{ cm}$; 当 $K=2 \times 10^2$ 时, $d=49.3 \text{ cm}^{[1]}$ 。因此 $44.3 \text{ cm} < d < 49.3 \text{ cm}$ 。

2.2 ^{60}Co (1.25 MeV) 由式(3)知, 总吸收因子为: $F_a \approx 0.05225$; 近似源活度为 $A_{\text{Cs}} = 2.61 \times 10^{11} \text{ Bq}$ 。衰减倍数为: $K \approx 1.02 \times 10^2$ 。查表: 当 $K=1 \times 10^2$ 时, $d=55.6 \text{ cm}$; 当 $K=2 \times 10^2$ 时, $d=62.2 \text{ cm}^{[1]}$ 。因此 $55.6 \text{ cm} < d < 62.2 \text{ cm}$ 。

综上所述, 屏蔽层厚度可选取保守值为 $d=60 \text{ cm}$ 。

通过与 MCNP 程序计算结果进行比较, 证明由两种模拟源计算方法得到的计算结果偏大, 为保守估计。注意到两种方法的计算结果基本相同, 令单位源活度为 ξ , 两种方法得到的模拟源活度为 A_{Cs}^1 和 A_{Cs}^2 , 则由前文知: $A_{\text{Cs}}^1 = \xi \cdot \lambda \cdot 2R \cdot H$; $A_{\text{Cs}}^2 = 2\xi \cdot \pi R^2 \cdot H \cdot (\pi \mu R)^{-1} = \xi \cdot H \cdot 2R \cdot \lambda$; 可见 $A_{\text{Cs}}^1 = A_{\text{Cs}}^2$, 故两种方法所得计算结果相同, 在本质上是一种方法, 同时也证明了所得到的自吸收因子公式的正确性。

参考文献:

- [1] 朗 J. T. 著, 杨云鸿 译. 核燃料后处理工程 [M]. 北京: 原子能出版社, 1980: 44-45.
- [2] 吴晨彦, 田东风, 黄永义, 等. γ 射线空间分布与双屏蔽圆柱形核裂变材料的几何信息 [J]. 复旦学报(自然科学版) 2006, 45(4): 464-468.
- [3] 方杰. 辐射防护导论 [M]. 北京: 原子能出版社, 1991: 75-85.
- [4] 陆向东. 放射性核材料的特征谱分析与自吸收修正的研究 [Z]. 中国工程物理研究院硕士学位论文, 2002: 62-63.

(收稿日期: 2013-05-20)