

74PBq ^{60}Co 辐照源辐射防护计算研究洪天祺¹, 周晓剑², 戴瑜¹

1. 江苏省辐射环境保护咨询中心, 江苏 南京 210019; 2. 环境保护部核与辐射安全中心

摘要: 目的 研究 74PBq ^{60}Co 辐照源辐射防护计算。方法 使用点核积分法和蒙特卡罗程序 MCNP5 计算 ^{60}Co 辐照源经不同厚度混凝土屏蔽防护后的通量密度。结果 点核积分法对 ^{60}Co 辐照源经不同厚度混凝土屏蔽后的通量密度计算结果比 MCNP5 高 1~3 个数量级。结论 使用点核积分法计算混凝土屏蔽后的通量密度比 MCNP5 程序偏安全。

关键词: 点核积分; mcnp; 通量密度

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2014.04.010

中图分类号: R144.1 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2014)04-0315-02

点核积分法是通过积分点核减弱函数来得到各种几何形状 γ 源在空间某一点的辐射通量密度的方法。点核积分函数等于空间点处每处每秒发射一个 γ 光子的点源在空间 γ 处所引起的辐射通量密度。蒙特卡罗方法在研究粒子输运问题的领域得到了广泛的应用。MCNP、FLUKA、GEANT4、EGS 是目前通用的蒙特卡罗程序, 它们由不同的研究小组开发, 针对的对象、采用的物理内核以及实现粒子输运的具体算法各有特色。本文选用 MCNP5 程序进行蒙特卡罗模拟计算。

本文讨论的辐照室内部空间为长 14 m、宽 8 m、高 5 m, 四面墙体和辐照室屋顶辐射防护均为厚 2 m 的混凝土。 ^{60}Co 放射源初始装源活度为 74PBq, 每个源模块可以容纳 34 根源棒, 5 个放射源模块构成一层放射源板, 共 4 层放射源板, 4 层放射源板中总共可以容纳 680 根源棒, 每根源棒尺寸为直径 11.1 mm, 长 451.5 mm^[1]。源板放置于辐照室内中央, 距离地面 1 m。辐照室的防护设计、源板的布置和辐射通量密度计算点 A、B 示意图见图 1。

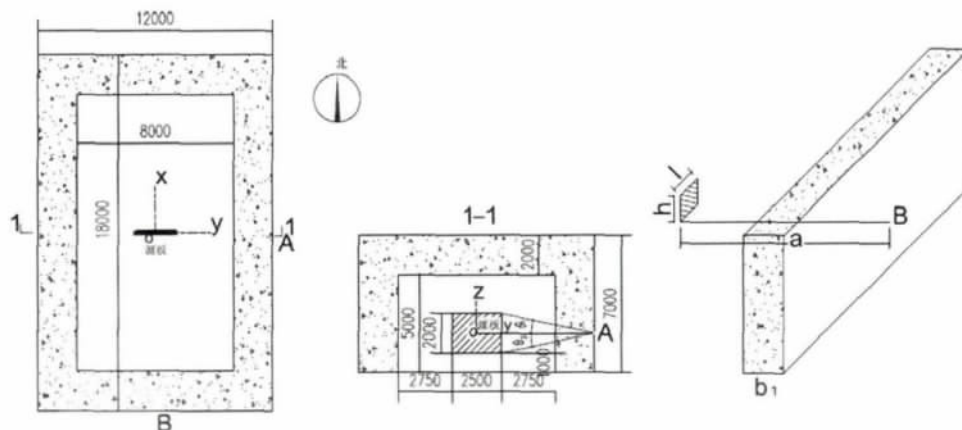


图 1 辐照室的防护设计、源板的布置和计算点示意图

1 点核积分估算公式

本文为方便起见使用线源和面源的 γ 射线辐射通量密度计算公式进行估算, 忽略源棒自吸收的影响。单根线源对东墙外参考点 A 的辐射通量密度计算采用《辐射防护手册》第一分册表 5.21 中有屏蔽均匀线源有效减弱系数法计算公式 (1)^[2]。

$$\Phi = \frac{S_1}{4\pi\alpha} [F(\theta_1 \mu_{\text{eff}} t) + F(\theta_2 \mu_{\text{eff}} t)] \quad (1)$$

式中 Φ 是 γ 光子通量密度 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, S_1 是线源强度 (Bqcm^{-1}), α 是线源到计算点的距离 (m), F 函数取值可查《辐射防护手册》第一分册附录 A-18, θ_1 和 θ_2 如图 1 所示, 混凝土的 $\mu_{\text{eff}} t$ 可查《辐射防护手册》第一分册图 5.29。

根据单根线源的叠加原理, 可得到多根线源对 A、B 点的通量密度计算公式 (2) $\Phi = \sum_{i=0}^{n-1} \Phi_i$ 。为方便计算将上下 4 层面板的 680 根源棒简化为单层源板

作者简介: 洪天祺 (1980-) 男, 四川遂宁人, 工学硕士, 从事核工业类环境影响评价工作。

通讯作者: 周晓剑, E-mail: zhouxiaojian@chinansc.cn

共 170 根线源,线源板高 2 m,长 2.5 m,距离地面 1 m,线源强度为 0.21765P Bq/cm。根据《辐射防护手册》第一分册中有屏蔽均匀矩形面源计算公式 5.27^[2],面源对南墙外参考点 B 的辐射通量密度采用公式(3)进行计算。

$$\Phi = B \frac{S_A}{4\pi} \left[\frac{\pi}{2} E_1(b_1) - J_1(m, n, b_1) - J_2(m, n, b_1) \right] \quad (3)$$

式中 Φ 同上, S_A 是面源强度 (Bq · cm⁻²), b_1 是屏蔽体厚度 (μt, μ 是屏蔽材料 γ 线性减弱系数 (cm⁻¹), t 是屏蔽体厚度 (cm)) E_1 函数取值可查《辐射防护手册》第一分册附录 A-2, J_1 函数取值可查《辐射防护手册》第一分册表 5.1, $\mu = 1/a$, $n = h/a$, J_2 函数取值可查《辐射防护手册》第一分册表 5.2, 面源强度为 3.7 T Bq/cm²。B 是照射量积累因子,由于碰撞辐射的积累和减弱自由程、屏蔽材料的原子序数和射线的能量以及方向有着非常复杂的关系,因此对于 γ 射线能量在 0.5 ~ 10 MeV,屏蔽体厚度在 1 ~ 20 (μt),可使用《辐射防护手册》第一分册中公式 5.104^[2]计算 B。

$$B(E, \mu t) = A_1 e^{-\alpha_1(E) \mu t} + (1 - A_1) e^{-\alpha_2(E) \mu t} \quad (4)$$

式中 E 是光子能量 (MeV), A_1 , α_1 , α_2 可查《辐射防护手册》第一分册表 5.19, μt 同上。

2 MCNP5 模拟计算

根据源板在辐照室内的布置位置、源板的结构设计,使用 MCNP5 模拟计算辐照室墙体外点 A、B 的辐射通量密度时将源项简化为长度为 2.5 m,高度为 2 m 的矩形均匀各向同性面源,γ 光子能量为 1.1732 MeV、1.3325 MeV,发射概率为 1:1。坐标系坐标原点为源板中心,其中面源距离东侧、西侧墙体为 2.75 m,距离南侧、北侧墙体距离为 7 m,墙外计算点 A 为面源中心沿 Y 轴方向至墙外参考点,计算点 B 为面源中心沿 X 轴方向至墙外参考点。辐照室墙体混凝土密度为 2.36g/cm⁻³。使用 MCNP5 中的 F5 卡^[3](半径为 2 cm 的点探测器,光子截断能量为 0.05 MeV,样本数为 1 × 10⁹) 计算辐照室墙体外点 A、B 的辐射通量密度。

3 计算结果及比较分析

点核积分公式法和 MCNP5 程序对辐照室墙外计算点 A、B 的计算结果见表 1。

表 1 点核积分法与 MCNP5 计算的通量密度结果比较

计算点	A		B		A		B	
b_1 (μt)	7.64(60cm)		15.3(120cm)		25.5(200cm)			
a (m)	4.6		5.2		6.0		9.0	
公式法 (cm ² s ⁻¹)	6.83E+09		1.19E+07		1.35E+02		1.36E+02	
MCNP5 (cm ² s ⁻¹)	6.97E+07		1.91E+04		1.71E-01		1.60E-02	
公式法 MCNP5	9.80E+01		6.23E+02		7.89E+02		8.50E+03	

比较点 A 和点 B 的通量密度计算结果表明,点核积分公式法对 74PBq ⁶⁰Co 辐照源经 60 cm、120 cm 和 200 cm 混凝土屏蔽后的通量密度计算结果比 MCNP5 程序的计算结果高 1 ~ 3 个数量级,点核积分公式法比 MCNP5 程序计算的结果偏安全。计算过程中,对源项采取了简化的线源和面源模型,忽略了自吸收,源强大于实际情况,因此公式法和 MCNP5 程序计算的通量密度结果是偏大的。根据通量密度和通量剂量转换因子可以得到计算点的 γ 辐射空气吸收剂量率。

参考文献

- [1] 戴瑜,赵福祥.南京喜悦辐照科技有限公司新建 74PBq 钴-60 辐照装置项目环境影响报告书[P].2012.
- [2] 李德平,潘自强.辐射防护手册第一分册[M].北京:原子能出版社,1987.
- [3] X-5 Monte Carlo Team. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Volume I ~ III[Z]. Version 5, 2003.

收稿日期:2014-01-29 修回日期:2014-04-17