

74PBq ⁶⁰Co 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 7.4PBq ⁶⁰Co 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 ⁶⁰Co 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 ⁶⁰Co 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 $\vec{\gamma}$ 光子的点源在空间 $\vec{\gamma}$ 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。⁶⁰Co 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。

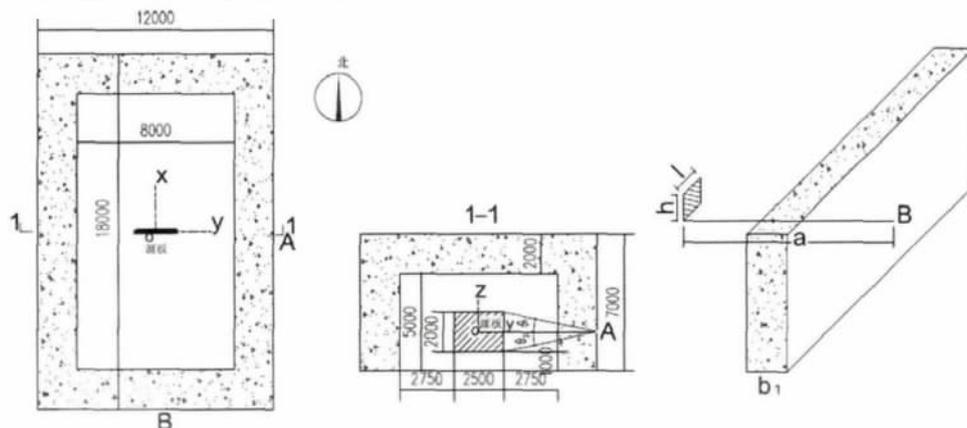


图 1 辐照室的防护设计、源板的布置和计算点示意图

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, $m = l/a$, $n = h/a$, 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。

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

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	7.6	5.2	8.2	6.0	9.0		
公式法(cm ² s ⁻¹)	6.83E+09	1.71E+07	1.19E+07	8.41E+05	1.35E+02	1.36E+02		
MCNP5(cm ² s ⁻¹)	6.97E+07	3.06E+04	1.91E+04	3.34E+03	1.71E-01	1.60E-02		
公式法	9.80E+01	5.59E+02	6.23E+02	2.52E+02	7.89E+02	8.50E+03		
MCNP5								

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