

## 辐照装置屏蔽厚度计算的方法研究与评价

李雪琴 彭建亮 陈栋梁 邢劲松

中图分类号:R143 文献标识码:B 文章编号:1004-714X(2013)02-0157-02

**【摘要】** 目的 探讨辐照装置的屏蔽计算中公式的运用、参数的选择以及不同的计算方法的使用,为辐照装置的防护设计与评价提供参考。方法 根据国家标准相关标准、相关教材,对某一辐照装置的 $\gamma$ 外照射防护的主防护墙进行计算并评价。结果 从直接计算法、减弱倍数法以及半减弱厚度法三种方法检验了主墙的屏蔽设计满足辐射防护要求,通过计算得出,半减弱厚度的方法更保守。结论 通过对不同方法的比较与参考,从而给出辐照装置屏蔽计算最合理的方法。

**【关键词】** 辐照装置;累积因子;辐射防护

随着核技术的发展,大型辐照装置在工业、农业、科研、环境、医学等领域的应用不断扩大。根据国家核技术利用辐射安全监管系统统计数据,截止 2011 年底,我国共有辐照装置应用单位 110 多家,分布在全国 28 个省、直辖市和自治区,在用辐照装置 125 座,其中静态装置 65 座,动态装置 60 座,共使用辐照用 I 类放射源 9 000 余枚。随着辐照装置数量的增多,大型辐照装置的外照射屏蔽防护评价的重要性日益增加。

评价的主要目的之一,通过对建设项目屏蔽厚度涉及的审查与核实,论证项目主体工程屏蔽厚度是否达到最优化,放射工作人员受照剂量及公众受照剂量是否保持在可合理达到的尽量低的水平<sup>[1]</sup>。笔者以某一辐照装置的屏蔽计算为例,通过不同计算方法对其进行评价,并对计算方法进行探讨研究。

## 1 辐照装置的基本情况

该 $^{60}\text{Co}$ 静态辐照装置的设计装源活度为  $7.4 \times 10^{15}$  Bq(20 万 Ci),辐照室为一圆形结构,内径 7.0 m,见辐照室平面图 1。主防护墙厚度为 2.0 m,密度为  $3.4 \text{ g/cm}^3$  的重混凝土,辐照室屋顶厚度为 1.7 m,辐照室内净高度为 4.0 m。辐照中心的 $^{60}\text{Co}$ 放射源采用国产源,单根源棒尺寸为直径 29 mm,长 120 mm。源架为花篮式结构,设有 12 根圆形套管,每个套管可装 4 根源棒。

防护与安全规范<sup>[2]</sup>(GB10252-2009)的要求,通常对于  $1.85 \times 10^{16}$  Bq(50 万 Ci)级以下的放射源,考虑到源架的尺寸相对于辐照室的尺寸较小,屏蔽计算时可以采用点源的计算模式。鉴于该静态辐照装置的设计装源活度为  $7.4 \times 10^{15}$  Bq(20 万 Ci),因此采取点源计算的方法。其次,按照《 $\gamma$ 辐照装置设计建造和使用规范<sup>[3]</sup>(GB 17568-2008)的相关要求,规定辐射工作人员与该源相关的年剂量限值为 5 mSv;辐照室屏蔽体外 0.3 m 处的剂量率不超过  $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

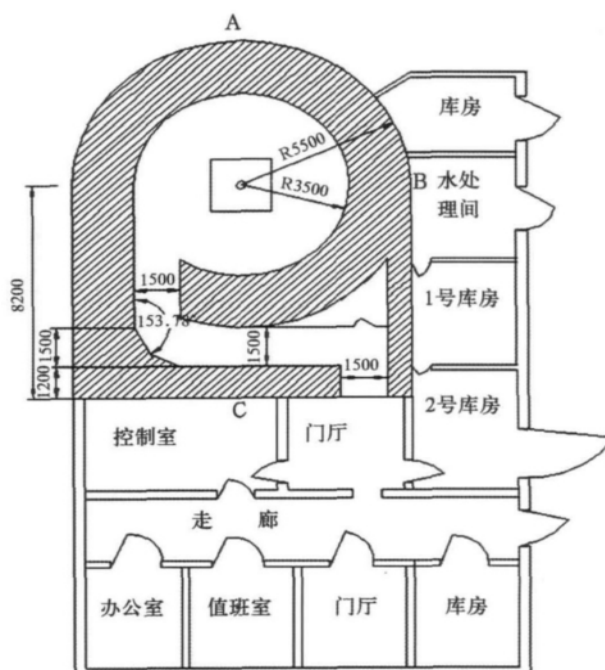


图1 辐照装置平面示意图

## 2 主防护墙的防护计算与评价

### 2.1 辐照装置的评价依据 按照《 $\gamma$ 辐照装置的辐射

### 2.2 辐照装置的几种计算方法

2.2.1 直接计算法与减弱倍数法 根据《辐射防护基础<sup>[4]</sup>》中推荐的“直接计算法”与通过计算点源 $\gamma$ 射线减弱倍数 $k$ 值的“减弱倍数法计算”,分别对运行时辐

作者单位:环境保护部核与辐射安全中心,北京 100082

作者简介:李雪琴(1981~),女,山西省人,博士研究生,工程师,从事核技术利用项目的审评。

照室防护墙外 0.3 m 处的剂量率进行估算。其中,累积因子计算的利用泰勒(Taylor)公式,累积因子 B 为:

$$B = A_1 e^{-\alpha_1 \mu R} + A_2 e^{-\alpha_2 \mu R} \quad (1)$$

其中  $A_1, A_2 = 1$ ; R 为屏蔽层厚度(cm); 对于  $\gamma$  辐照装置而言, Co-60 发出的  $\gamma$  射线的平均能量为 1.25 MeV, 通过内插法可以求得计算 1.25 MeV 的  $\gamma$  射线的累积因子 B。

### 2.2.1.1 直接计算方法 辐照室屏蔽墙的穿透辐射

$$H = \frac{A \Gamma B e^{-\mu X}}{d^2} \quad (2)$$

表 1 直接计算法计算的屏蔽体外敏感点的剂量率

计算参数	涵义	数值
A	放射源活度, Bq	$7.4 \times 10^{15}$
$\Gamma$	空气比释动能率常数 Sv·m <sup>2</sup> ·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> (Co-60)	$3.12 \times 10^{-13}$ [5]
$\mu$	线性衰减系数 cm <sup>-1</sup>	0.19278
R	点源与探测点之间的距离 (cm <sup>-1</sup> )	R <sub>A,B</sub> : 580; R <sub>C</sub> : 850
B	累积因子	B <sub>(A,B)</sub> : 252.684; B <sub>C</sub> : 1245.5
X	屏蔽层厚度, cm	200
H <sub>(A,B)</sub>	敏感点的剂量率, $\mu$ Sv/h	H <sub>(A,B)</sub> : $2.99 \times 10^{-7}$ ; H <sub>C</sub> : $6.0 \times 10^{-17}$

### 2.2.1.2 利用减弱倍数法 屏蔽体外探测点所在区域剂量约束值对应的剂量率为:

$$D_m = D/K \quad (3)$$

具体的计算过程、结果及参数详见表 2:

### 2.2.3 利用半减弱厚度计算 半减弱厚度,就是将 $\gamma$ 射线的照射率、剂量率或注量率等减弱一般所需要屏蔽层的厚度,常用符号 $\Delta_{\frac{1}{2}}$ 表示。令减弱倍数 $k = 2^n$ , 得 $n = \log K / \log 2$ , 则屏蔽层厚度:

$$R = n \Delta_{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

n 为半减弱厚度的数目。通过查表得: 1.25 MeV 的 E <sub>$\gamma$</sub>  在重混凝土中的半减弱厚度为 4.5 cm, 则通过 n 个半减弱厚度后, 屏蔽体外的敏感点的剂量率详见表 3:

## 3 计算结果分析

三种估算方法的剂量率估算结果如表 4, 估算结果表明, 计算方法验证了采取 2 m 和 3.2 m 的屏蔽墙(密度为 3.4 g/cm<sup>3</sup> 的重混凝土)均可以满足《 $\gamma$  辐照装置设计建造和使用规范》<sup>[3]</sup>(GB 17568-2008) 辐照室屏蔽体外 0.3 m 处的剂量率不超过 2.5  $\mu$ Sv/h 的要求。直接计算法与减弱倍数法的计算结果很接近, 半减弱厚度计算方法结果偏大, 比较保守, 具体原因有待进一步讨论。

表 2 减弱倍数法计算的屏蔽体外敏感点的剂量率

序号	计算公式	计算参数	涵义	数值
1	$\Phi = \frac{S_0}{4\pi R^2}$	A	放射源活度, Bq	$7.4 \times 10^{15}$
		S <sub>0</sub>	点源能量强度 (MeV/s)	$1.85 \times 10^{16}$ MeV/s
		R	点源与探测点之间的距离 (cm)	R <sub>A,B</sub> : 580cm; R <sub>C</sub> : 850cm
		$\Phi$	探测点的 $\gamma$ 射线能通量密度, [MeV/(cm <sup>2</sup> ·s)]	$\Phi_{A,B}$ : $4.38 \times 10^9$ (MeV/[cm <sup>2</sup> ·s]) $\Phi_C$ : $4.38 \times 10^9$ (MeV/[cm <sup>2</sup> ·s])
2	$D = \Phi \times H_p$	1.25MeV $\gamma$ 射线的能通量		
		H <sub>p</sub>	密度与剂量率的转换因子 (mSv/h) / [MeV/(cm <sup>2</sup> ·s)]	$1.765 \times 10^{-5}$ [2]
		D	无屏蔽体情况下探测点的剂量率 ( $\mu$ Sv/h)	D <sub>A,B</sub> : $7.73 \times 10^7$ ; D <sub>C</sub> : $3.60 \times 10^7$
		$\mu$	线性衰减系数 cm <sup>-1</sup>	0.19278
3	$k = \frac{e^{\mu R}}{B}$	R	点源与探测点之间的距离 (cm)	R <sub>A,B</sub> : 580; R <sub>C</sub> : 850
		B	累积因子 cm <sup>-1</sup>	B <sub>(A,B)</sub> : 252.684; B <sub>C</sub> : 1245.5
		k	屏蔽体的有效减弱倍数	k <sub>A,B</sub> : $2.2 \times 10^{14}$ ; k <sub>C</sub> : $4.97 \times 10^{23}$
		屏蔽体外探测点所对应的剂量率 ( $\mu$ Sv/h)		D <sub>m(A,B)</sub> : $3.52 \times 10^{-7}$ ; D <sub>m(C)</sub> : $7.25 \times 10^{-17}$

表 3 半减弱厚度法计算的屏蔽体外敏感点的剂量率

计算参数	涵义	数值
HVT	半减弱厚度	4.5 cm <sup>[6]</sup>
n	半减弱厚度的数目	44.44(2 m); 71.11(3.2 m)
k	屏蔽体的有效减弱倍数	$2.39 \times 10^{13}$ (2 m); $2.55 \times 10^{21}$ (3.2 m)
D <sub>m</sub>	屏蔽体外探测点所对应的剂量率 ( $\mu$ Sv/h)	D <sub>m(A,B)</sub> : $3.23 \times 10^{-6}$ $\mu$ Sv/h; D <sub>m(C)</sub> : $1.411 \times 10^{-14}$ $\mu$ Sv/h

表 4 几种计算结果的估算结果与实测结果比较

敏感点	辐射源点到关注点的距离(m)	距屏蔽墙外 0.3m 处剂量率估算结果			GB 17568-2008 剂量限值 ( $\mu$ Sv/h)
		直接计算 ( $\mu$ Sv/h)	减弱倍数法 ( $\mu$ Sv/h)	半减弱厚度法 ( $\mu$ Sv/h)	
主墙(A,B)	5.8	$2.99 \times 10^{-7}$	$3.52 \times 10^{-7}$	$3.23 \times 10^{-6}$	2.5
控制室(C)	8.5	$6.0 \times 10^{-17}$	$7.25 \times 10^{-17}$	$1.411 \times 10^{-14}$	2.5

## 2011 年参加全国放射卫生检测能力考核结果分析

马军营,田崇彬,武丽,韩林

中图分类号:TL75 文献标识码:B 文章编号:1004-714X(2013)02-0159-02

【摘要】目的 检验本实验室放射卫生检测能力和水平。方法 按照组织者比对方案要求,实验室对不同的比对样进行测试,得出各比对样品的测量值,分析测量值与参考值的相对偏差,符合组织者要求为比对合格。结果 4 项比对结果均合格。结论 本实验室检测能力和水平满足放射卫生技术服务的要求。

【关键词】放射卫生;检测;结果分析

为了进一步提高放射卫生技术服务的检测能力和水平,保证实验室出具的结果准确、可靠,我们实验室参加了 2011 年中国疾控中心辐射防护与核安全医学所组织的放射卫生技术服务机构检测能力考核,考核项目共 4 项“全国放射工作人员个人剂量监测系统比对”、“全国放射性核素  $\gamma$  能谱分析方法比对”、“全国水中总  $\alpha$  总  $\beta$  放射性测量比对”和“全国生物剂量估算方法比对”考核形式为实验室间比对<sup>[1]</sup>,考核结果均为合格。现将考核结果分析报道如下。

## 1 材料与方法

1.1 仪器设备 ①热释光剂量仪 RGD-3B 型,探测器 LiF(Mg,Cu,P) 圆片。②高纯锗  $\gamma$  能谱仪 BE3830 探测器。③BH1277 四路低本底  $\alpha\beta$  测量仪。④Olympus BX61-AI 全自动染色体分析系统。

## 1.2 比对方法

1.2.1 个人剂量监测系统比对方法 将参比样品交组织单位按设定的约定剂量值照射后,快递返回,最短时间内测量后提交结果报告,由组织者依据 GBZ 207

-2008<sup>[2]</sup>判定考核结果,测量值与约定剂量值单组偏差和综合标准偏差均小于 40% 为合格。

1.2.2 放射性核素  $\gamma$  能谱分析比对方法 对依次传递的、定量加入人工放射性核素制成的圆柱盒样品,进行测量,测定结果由组织者与计量院测量的参考值比对,判定考核结果。结果必须同时通过准确度与精密度标准要求方为合格。

准确度判定标准:

$$|\text{参考值} - \text{测量值}| \leq 2.58 \times \sqrt{U_{\text{nc参考值}}^2 + U_{\text{nc测量值}}^2}$$

精密度判定标准:

$$\sqrt{\left[\frac{U_{\text{nc参考值}}}{\text{参考值}}\right]^2 + \left[\frac{U_{\text{nc测量值}}}{\text{测量值}}\right]^2} \times 100\%$$

小于或等于 Z-检验中与  $\sigma$  相关的判据。

1.2.3 总  $\alpha$  总  $\beta$  放射性测量比对方法 对组织单位制备的比对样品进行测量,按照比对报告表要求提交比对水样分析结果,考核结果根据 IAEA 比对分析和 GB/T 15483-1999 要求进行判定。结果以 Z 比分数表示 Z 比分数计算公式:

$$Z \text{ 检验} = \frac{\text{测量值} - \text{参考值}}{\sigma}$$

Z 检验绝对值小于等于 2 为合格 Z 检验绝对值

作者单位:河南省职业病防治研究院,河南 郑州 450052  
作者简介:马军营(1963~),男,回族,河南郑县人,副主任技师,从事检测检验质量控制工作。

## 4 结果与讨论

有关三种方法:直接计算法、减弱倍数法以及半减弱厚度法都检验了主墙的屏蔽设计时满足辐射防护要求的。从计算的结果来看,半减弱厚度的方法更保守,对选择的防护墙厚度可以作为一个参考。那么,对于辐照室选择防护墙厚度,从利益-代价分析来看,并不能认为越安全越好,应遵循辐射防护最优化设计的原则,避免造成“防护过度”的现象。

## 参考文献:

- [1] 谭枫. 关于大型辐照装置屏蔽厚度计算的研究[J]. 中国饮食卫生与健康 2004. 2(4):9.
- [2] GB 10252-2009  $\gamma$  辐照装置的辐射防护与安全规范[S].
- [3] GB 17568-2008  $\gamma$  辐照装置设计建造和使用规范[S].
- [4] 李星洪,吴学超,李树德,等编. 辐射防护基础[M]. 北京:原子能出版社,1982.
- [5] 方杰,李士骏. 辐射防护导论[M]. 北京:原子能出版社,1988:12.
- [6] 姜德智. 放射卫生学[M]. 苏州:苏州大学出版社,2004.

(收稿日期:2012-10-07)