

某医院 15MV医用电子加速器机房的屏蔽防护计算

谢 萍; 陈掌凡; 张会敏; 黄玉龙

中图分类号: X591 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2009)03-0312-02

【摘要】 目的 介绍医用电子加速器机房设计、辐射屏蔽厚度计算和天空反散估算。方法 依据相关计算公式, 采用顺序替代法计算屏蔽墙体设计厚度, 以 NCRP151估算原则估算天空反散射剂量。结果 顺序替代法计算屏蔽层厚度既简便又省时, 所获得数值准确, 天空反散射剂量估算结果的影响可以忽略不计。结论 采取本方法计算的屏蔽厚度作为机房辐射屏蔽厚度值建造, 能达到既确保辐射安全又经济的目的。
【关键词】 加速器机房; 顺序替代法; 屏蔽计算; 天空反散射剂量估算

加速器类型很多, 其基本原理都是利用电磁场使带电粒子(如电子、质子和重粒子等)获得高能量。按被加速粒子种类, 可分为电子加速器、质子加速器和重粒子加速器。能量 1~50MeV范围内的加速器被广泛应用于医学领域, 我区在放射治疗和核医学中加速器的应用发展很快, 用户不断增加, 只有加速器机房屏蔽设计达到安全可靠, 才能保障职业人员、公众的安全和健康, 因此, 加速器机房的屏蔽防护计算倍受放射防护工作者的关注。现介绍某医院 15MV医用电子加速器机房的屏蔽防护计算。

1 材料和设计

- 1.1 材料 加速器机房的墙体和天棚均采用密度为 2.35 g/cm³ 的混凝土, 防护门采用铅板、硼酸粉和石蜡作为屏蔽材料。
- 1.2 机房设计 加速器用房为单独一层建筑, 由治疗室、单折 L 型迷路和控制室等组成。机房尺寸设计要根据用户放疗实践的需求, 并达到经济合理。机房土建意图见图 1、2。

2 屏蔽计算依据

加速器机房内的辐射由有用射线、漏射线、散射线和光中子组成。机房各点墙体厚度计算公式^[1,2]如下。

2.1 主屏蔽墙体厚度计算公式

$$S_{ij} = TVI \log_{10} \frac{W_u \cdot U_i \cdot T_i \cdot f}{P_i \cdot d_j^2} \quad (1)$$

式中, S_{ij} 为计算点第 j 次计算墙体厚度, W_u 为距源

1m 处有用射线每周工作负荷, mGy/wk; d_j 为放射源或靶到屏蔽计算点第 j 次计算的距, m; U_i 为计算点的利用因子; T_i 为计算点的居留因子; P_i 为计算点的周控制剂量限值, mGy/wk; TVI 为根据 X 射线能量与屏蔽材料所取的十分之一值层, α_j 为安全系数。

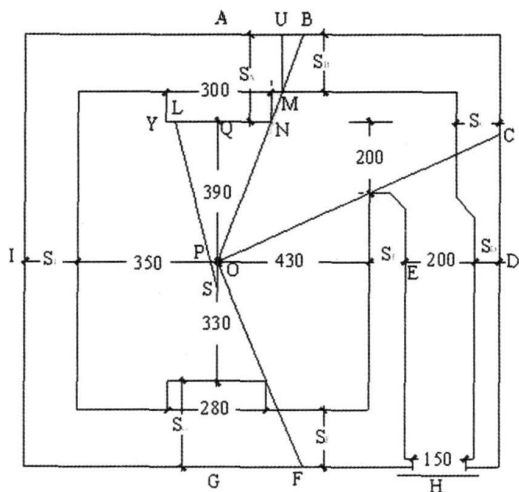


图 1 加速器机房土建平面示意图 (cm)

2.2 主屏蔽条带宽度计算公式

主屏蔽条带宽度 L_i 的计算公式:

$$L_i = 2 \times \left[\frac{(D_i + SSD) \times h}{SSD} + a \right] \quad (2)$$

作者单位: 广西壮族自治区疾病预防控制中心 广西 南宁 530028
作者简介: 谢萍, 女, 副主任医师, 从事放射卫生工作。

养, 确保职业人员的安全与健康。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国卫生部. 放射诊疗管理规定 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2006
- [2] GBZ 128-2002 职业性外照射个人监测规范 [S].
- [3] NCRP Report No. 122 Use of personal monitors to estimate effective dose equivalent and effective dose to workers for external exposure to low-LET radiation [R]. National Council on Radiation Protection Measurements Washington DC, 1995
- [4] 田崇彬, 杨均芳, 楚彩芳. 参加全国个人剂量盲样比对结果分析 [J]. 中国辐射卫生, 2007 16(3): 293-294
- [5] 田崇彬, 程晓军, 武丽, 等. 河南省 X 射线诊断职业人员剂量水平调查 [J]. 中国辐射卫生, 2006 15(4): 444-445
- [6] 田崇彬, 丁丽, 楚彩芳, 等. 河南省放射治疗职业人员剂量

- 水平调查 [J]. 中国辐射卫生, 2007 16(4): 427-428
- [7] 田崇彬, 杨均芳, 程晓军. 河南省放射工作人员外照射个人剂量水平分析 [J]. 中国辐射卫生, 2002 12(4): 220-222
- [8] 慈捷元, 饶秀珍, 杨小柯. 深圳市 2003~2005 年放射工作人员个人剂量监测与分析 [J]. 中国辐射卫生, 2007 16(1): 45-46
- [9] 赵国良, 侯菲菲, 丁金华. 2003~2005 年南京军区放射工作人员个人剂量监测结果分析 [J]. 中国辐射卫生, 2006 15(4): 427-428
- [10] 陈新伟, 黄丽华, 林美榕, 等. 福建省部分临床核医学放射工作人员外照射个人剂量分析 [J]. 中国辐射卫生, 2008 17(3): 292-293
- [11] 杨小勇, 余宁乐, 许翠珍, 等. 江苏省介入放射工作人员个人剂量水平调查 [J]. 中国辐射卫生, 2007 16(4): 418-419

式中: D_i 为主屏蔽条带表面考查点 i 到等中心距离, m ; SSD 为治疗机源皮距, m ; h 为等到中心点最大照射野的半边长, m ; a 为主屏蔽条带宽度余量, m 。

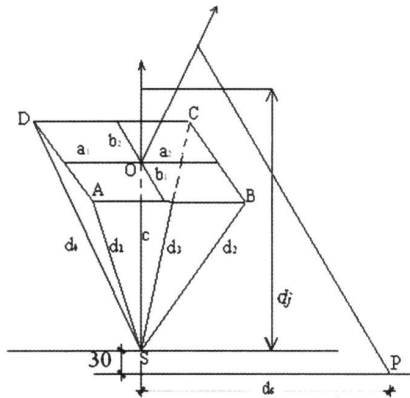


图 2 加速器机房土建剖面示意图 (m)

2.3 副屏蔽墙体厚度计算公式

$$S_{ij} = TVT \log_{10} \frac{0.001 \cdot W_u \cdot T_i \cdot f}{P_i \cdot d_j^2} \quad (3)$$

式中, 0.001 为距靶 1m 处泄漏辐射强度与主射线束中心轴参考点辐射强度比; 其余各参数意义与 (1) 式相同。

2.4 半值层法计算公式

$$K_i = D_{0i} / P_i \quad K_i = 2^{N_i} \quad (4)$$

$$N_i = HK_i / E_2 \quad (5)$$

$$S_i = N_i \cdot HVT \quad (6)$$

(4)~(6) 式中, D_0 为屏蔽材料表面的剂量率, $\mu Gy/h$; P_i 为穿过屏蔽层减弱后的剂量值, $\mu Gy/h$; K_i 为一点剂量减弱倍数; N_i 为考查点的半值层个数; HVT 为根据射线能量与屏蔽材料所取的二分之一值层, m ; S_i 为一点所选材料屏蔽厚度, m 。

2.5 中子剂量减弱^[3,4]因子

$$e^{-0.083t} = H_n / H_0 \quad (7)$$

式中, H_0 、 H_n 分别为中子到物质表面时的剂量和穿过厚度时的剂量; t 为减弱物质的厚度, m 。

2.6 天空反散射估算

估算天空散射到观察位置的辐射剂量率 D_{sk} 的计算公式如下:

$$D_{sk} = 2.5 \times 10^{-2} \frac{D_0 \Omega^{1.3}}{d_j^2 K} (\mu Gy/h) \quad (8)$$

式中, d_j 为靶至房顶外表面上方 2m 处距离, m ; d_s 为靶至观察位置的距离, m ; K 为房顶屏蔽层减弱倍数; D_0 为等中心剂量率, $\mu Gy/h$; Ω 为靶点至房顶所张的立体角; $2.5 \times 10^{-2} \Omega^{1.3}$ 为散射因子。

3 辐射屏蔽层厚度计算方法

辐射屏蔽计算是指对不同射线选定不同屏蔽材料, 寻求到一个合适的厚度, 使每种射线穿过该厚度的屏蔽层后, 剂量不大于拟定的某一剂量控制值。因此, 辐射屏蔽墙体厚度计算分为屏蔽厚度设计计算和屏蔽厚度计算。前者是指垂直屏蔽体有效使用距离 (或源到屏蔽体) d_0 不变, 而源到屏蔽计算点与屏蔽体垂直距离 d_i 可变, 寻求合适的屏蔽厚度 S_i 后者是指源 S 到屏蔽计算点距离 d_0 固定, 即机房土建面积固定, 计算出合适的屏蔽层厚度值 S_0 。前者的屏蔽计算采用顺序替代法, 此方法是指先任意预置一屏蔽厚度 $S_j = S_1$ 代入 d_i 把相关参数和

d_i 代入相关公式中, 计算出某一屏蔽层厚度值 S_i 。若 $S_1 - S_i = \sigma_1$, 当 $\sigma_1 < 0$ 说明预置屏蔽层厚度不足, 不安全; 当 $\sigma_1 > 1$ 说明预置屏蔽层过厚, 不经济。因此, 只要把第一次计算值替代第二次预置值, 即 $S_2 = S_1$ 重复上述计算得到 S_2 , 则 $S_2 - S_i = \sigma_2$ 。若 $\sigma_2 < 0$ 或 $\sigma_2 > 1$ 则继续依此顺序替代计算, 直至 $S_j - S_i = 0 \sim 1m$ 此时选取 S_j 作为屏蔽层厚度值, 能够满足既安全又经济的目的。后者计算方法是先由已知条件计算出计算点至源距离 d_0 , 然后把 d_0 直接代入相关公式计算出所需要屏蔽厚度值 S_0 , 再由 S_0 推算出墙体垂直厚度 S_i 即可。综上所述, 凡要预置值计算的为前者, 其余为后者。

4 机房辐射屏蔽墙体厚度计算

4.1 需确定的计算量 有的计算量随用户要求和机型确定而设定。①每周工作负荷 $W_u = 2 \times 10^6 Gy/week$ ②周控制剂量限值 P 根据职业人员和公众的剂量控制管理值分别为 $5mSv/a$ 和 $0.3mSv/a$ 所以放射工作人员区 $P = 0.1mSv/week$ 公众中的个人区 $P = 6 \times 10^{-3} mSv/week$ 用户要求机房门口控制剂量为 $0.02mSv$ ③查文献[2]表 5-21 假定漏射 X 射线与主射 X 射线的能量相同, 均为 15MeV 其对应混凝土 ($\rho = 2.35g/cm^3$) 的十分之一值层 $TVT = 42.2m$ 半值层 $HVT = 12.7m$ 该机源皮距

$SSD = 100m$ 等中心剂量率 $\dot{D}_0 = 4Gy/min$ 最大射野为 $40 \times 40cm^2$ 等中心距地面为 1.3m ④所有屏蔽层计算均取 2 倍安全系数, $f = 2$ 各屏蔽计算点离墙体 30m 但天棚除外。

4.2 墙体屏蔽厚度计算

4.2.1 采用顺序替代法 凡是屏蔽设计的防护计算点均采用顺序替代法计算屏蔽层厚度。(1)寻求 A 点 (主) 屏蔽带厚度 S_A 由图 1 可知, O 点为等中心, $d_0 = OQ = 3.9m$ 可任意预置 $S_j = S_1 = AQ = 2m$ $d_j = d_A = d_0 + S_1 + SSD + 0.3 = 7.2m$ $T_A = 1$ $U_A = 1/4$ A 点是公众成员区 $P_A = 0.006mGy/week$ 将 W_u , P_A , f , TVT , T_A , U_A 代入 (1) 式, 得 $S_A = 42.2 \lg \frac{2 \times 10^6 \times 1/4 \times 1 \times 2}{0.006 \times (7.2)^2} = 275$

(m), 则 $S_1 - S_A = 200 - 275 = -75m$ 说明屏蔽层严重不足。将第一次计算值替代第二次预置值, 即 $S_2 = S_A = 275m$, 则 $d_2 = d_0 + S_A + SSD + 0.3 = 7.95m$, 重复上述计算, 可算得 $S_2 = 271m$ $S_2 - S_A = 4m$ 即屏蔽层稍偏厚。再将第二次计算值替代第三次预置值, 即 $S_3 = S_2 = 271m$, 则 $d_3 = d_0 + S_2 + SSD + 0.3 = 7.91m$, 重复上述计算, 可算得 $S_3 = 271m$ $S_3 - S_A = 0$ 可见 A 点墙体 $S_A = S_3 = 271m$ 最合适。以此类推可计算出墙体 S_C , L_C , S_B , L_B 的厚度和宽度。同理 S_1 , S_2 副屏蔽墙体厚度照此计算, 只要把 I E 点的相关参数代入 (3) 式, 可推算出 S_i , S_e 墙体设计厚度。对迷路外墙 S_0 的厚度计算, 不能简单地采和单一射线或几种射线复合屏蔽层设计计算值, 而要分别计算出 D 点对迷路内漏、散射 X 射线和散射光中子的屏蔽厚度, 选取最大厚度值为 S_0 。如 D 点对 X 漏射线屏蔽, 只要把 D 点的相关参数代入 (3) 式, 可推出总厚度 $S_{DL} = 168m$ 则 $S_0 = S_{DL} - S_e = 62m$ 。凡是能屏蔽加速器 X 漏射线的混凝土墙体厚度, 足能充分屏蔽加速器的散射 X 射线。因此, 散射 X 射线屏蔽可不考虑。对散射光中子的屏蔽, 由文献[2]可知, 机房门口散射光中子的剂量 $H_{\gamma} = 70 \mu Gy/h$ 设迷路外墙内表面散射光中子剂量 $H_{0n} = H_{\gamma}$, $H_n = P_D = 0.15 \mu Gy/h$ 把 H_{0n} , H_n 代入 (7) 式中得 $e^{-0.083t} = 2.14 \times 10^{-3}$, 则 $t = 74m$ 。比较上述计算结果, $S_0 = 74m$ 为最大厚度值, 因此, 取 $S_0 = 74m$ 为最适合。

(2)寻求 K 点 (副) 屏蔽层厚度 S_K 值, 如图 2 所示, 因为 $\triangle KWR$ 的两条直角边, 其中 $WR = VT + YR$, $S_K = VT$ 是未知数, 斜距 KR 无法求出, 只能采用顺序替代法计算。已知 $SO = OR = SSD = 1m$ 靶至天棚的距离为 1.7m 预置 $S_1 = VT = 1.4m$ 则 $WR = 1.7 + 1.4 = 3.1m$ $WK = L_1/2 = 1.58m$ $RK = \sqrt{(WR)^2 + (WK)^2} = 3.48m$ $d_K = RK = 3.48m$ K 点为放射性工

作人员区, $T_K=1/4$ 把 W_K , f , d_K , P_K , T_K 值代入 (3) 式, 得 $KT=42.2 \lg \frac{2 \times 10^6 \times 0.001 \times 1/4 \times 2}{0.1 \times (3.48)^2} = 123 \text{ m}$ 。又因 $\triangle KVT \approx \triangle KWR$ 故 $VT/WR=KT/KR$ 则 $S_K=VT=KT/KR \times WR=123/3.48 \times 3.1=110 \text{ m}$ 。 $\sigma_1=S_1-S_K=140-110.6=29.4 \text{ m}$ 防护偏保守, 则预置 $S_2=S_K=110 \text{ m}$ 重复上述计算, 得 $S_{K_2}=110 \text{ m}$ 则 $\sigma_2=S_2-S_{K_2}=0$ 取 $S_K=110 \text{ m}$ 合适。

4.2.2 利用相关公式 屏蔽厚度计算是靶点至防护计算点距离确定, 则只要把计算点参数代入相关公式计算即可。

4.2.2.1 B点(副)屏蔽层 S_B 连接 ON并延长 ON交 S_B 墙于 M B两点, 源到屏蔽计算点的距离 $OB=\sqrt{(OA)^2+(AB)^2}=\sqrt{6.61^2+3.42^2}=7.44 \text{ m}$ 则 $d_{B0}=OB+0.3=7.74$ B点为公众中的个人区 $P_B=P_A$, $T_B=T_A$ 将 W_B , f , P_B , T_B 值代入 (3) 式, 得 $BM=42.2 \lg \frac{2 \times 10^6 \times 0.001 \times 1 \times 2}{0.006 \times (7.74)^2} = 171 (\text{cm})$ 。又因 $\triangle BUM \approx \triangle BAQ$ 故 $UM/AO=BM/BQ$ 则 $S_B=UM=BM/BO \times AO=171/7.44 \times 6.61=152 (\text{cm})$ 。同理可推算出 S_C , S_F 墙体的厚度。

4.2.2.2 H点防护门的屏蔽计算 由文献 [2] 可知, 15MV医用电子加速器机房门口散射 X射线剂量 $\dot{D}_{H(X)}=5 \times 10^{-7} \dot{D}_K=120 \mu \text{ Gy/h}$ 散射 X射线平均能量为 0.32 MeV 对应铅的 HVT=1.86mmPb 散射光中子剂量 $\dot{D}_{H(n)}=70 \mu \text{ Gy/h}$ 散射中子平均能量 0.1 MeV 左右, 对应含硼 (5%) 聚乙烯的 HVT=1.5 m, $P_{H(X)}=P_{H(n)}=0.5 \mu \text{ Gy/h}$ 把上述相关参数代入 (4) ~ (6) 式, 可分别算得对散射 X射线屏蔽层 $S_{H(X)}=14.7 \text{ mmPb}$ 对散射中子屏蔽层 $S_{H(n)}=10.7 \text{ cm}$ 含硼 (5%) 聚乙烯板。

机房的辐射屏蔽墙体厚度计算结果见表 1

表 1 机房辐射屏蔽墙体厚度计算结果

防护计算点	屏蔽射线类型	周控制剂量限值 $P(\text{mSv/wk})$	居留因子	利用因子 U	计算点到靶点距离 $d_i(\text{m})$	屏蔽计算结果 $S_i(\text{cm})$
A	主 X射线	6×10^{-3}	1	1/4	7.91	271 ($L_A=404$)
B	泄漏 X射线	6×10^{-3}	1	1	7.74 (斜距)	152
C	泄漏 X射线	6×10^{-3}	1	1	10.07 (斜距)	183
D	散射中子	6×10^{-3}	/	/	/	74
E	泄漏 X射线	0.1	1/4	1	5.66	106
F	泄漏 X射线	6×10^{-3}	1	1	7.28 (斜距)	150
G	主 X射线	6×10^{-3}	1	1/4	7.34	271 ($L_G=382$)
I	泄漏 X射线	6×10^{-3}	1	1	5.63	183
J	主 X射线	0.1	1/4	1/32	5.40	170 ($L_J=316$)
K	泄漏 X射线	0.1	1/4	1	3.20 (斜距)	110

4.3 观察点天空反散射剂量的估算 由高能 X射线透过机房顶屏蔽层后与空气相互作用, 会反散射到地面造成地面某个地带带有较强辐射场, 因此, 机房天棚屏蔽厚度确定后, 需对反散射剂量强度进行估算。由图 2 图 3 可知, $d_1=7.4 \text{ m}$ 设 $d_s=20 \text{ m}$, $S_j=n^\circ$ HVT=170 m, $n=170/12.7=13.39$, $K=2$, 则 $K=1.073 \times 10^4$, $a_1=a_2=b_1=b_2=1.58 \text{ m}$, $c=5.4 \text{ m}$, $d=\sqrt{a^2+b^2+c^2}=5.84$

天空反散射是主射线所致, 故靶点向屋顶 $3.16 \text{ m} \times 3.16 \text{ m}$ 的视野所张立体角为 $\Omega=4 \lg^{-1} \left[\frac{ab}{cd} \right] = 0.32 \Omega^{\circ 3} = 0.23$ 把 d_1 , d_s , K , $\Omega^{\circ 3}$ 值代入 (8) 式, 可算得 $\dot{D}_{sk}=5.87 \times 10^{-3} \mu \text{ Gy/h}$

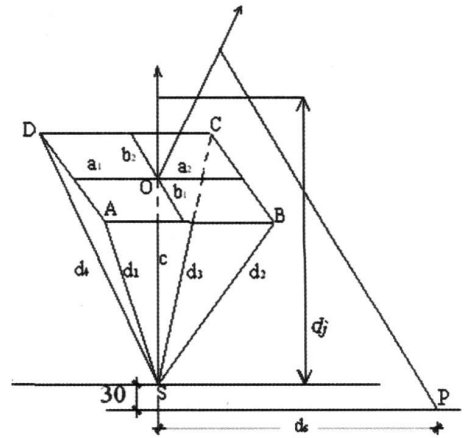


图 3 天空反散射示意图 (cm)

5 讨论

(1) 机房辐射屏蔽墙体厚度计算, 要遵循先屏蔽厚度设计计算, 后屏蔽厚度计算的原则, 如计算墙体 S_K 厚度, 要先计算出墙体 S_B , S_D 厚度, 再计算墙体 S_K 厚度。这样计算过程简易方便。

(2) 在辐射屏蔽设计计算中, 笔者提出顺序替代算法, 此法是一个目的性强、省时、所获数值精确的方法, 尤其在放射防护预评价中, 审查核算防护屏蔽时, 可迅速判断防护屏蔽的合适程度。此法供同行参考。

(3) 假设漏射 X射线与主射 X射线的能量相同, 副屏蔽层的计算结果既对漏射 X射线屏蔽留有余量, 又能满足 NCRP151 号报告 [5] 计算散射 X射线的屏蔽要求, 且计算简单, 由此可略去对散射 X射线的屏蔽计算, 计算量几乎可减少一半。从防护角度这样的假设是允许的。

(4) 对辐射屏蔽, 不仅要准确计算出屏蔽层厚度, 而且更重要的是确保屏蔽材料和施工质量。如普通混凝土, 密度不小于 2.35 g/cm^3 , 墙体要连续灌制, 边灌制边充分振动使墙体不留空隙, 均匀结实。

(5) 在机房竣工装机投入运行后, 在机房周围 $10 \sim 20 \text{ m}$ 范围内巡查测量, 未发现有超过本底辐射水平的记录。说明机房天棚采用 170 cm 主屏蔽层, 天空反散射剂量 $\dot{D}_K=5.87 \times 10^{-3} \mu \text{ Gy/h}$ 符合放射防护的要求, 天空反散射不会对机房周围公众造成任何影响。

(6) 由于含硼 (5%) 聚乙烯板在市场上很难买到, 用硼酸粉和石蜡代替是可行的。

参考文献:

- [1] 谷铎之, 刘泰福, 潘国英主编. 肿瘤放射治疗学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1983. 103—112
- [2] 张丹枫, 赵兰才. 辐射防护技术与管理 [M]. 南宁: 广西民族出版社, 2003. 370—414
- [3] 朱寿彭, 李章主编. 放射毒理学 [M]. 北京: 原子能出版社, 1992. 363—364
- [4] 夏复成主编. 放射性同位素应用卫生防护 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1990. 129—133
- [5] Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-ray and Gamma-ray Radiotherapy Facilities Report No. 151

(收稿日期: 2009-01-19)