

医用加速器治疗室屏蔽防护简易计算方法应用价值的探讨

曾自力

中图分类号: T144.1 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2007)02-0174-02

【摘要】 目的 探讨医用加速器治疗室屏蔽防护简易计算方法的应用价值。方法 依据国家相关标准和有关文献提供的屏蔽防护简易计方法,经实践检验进行评价。结果 设计建造与运行及监测符合防护要求。结论 该设计与屏蔽防护简易计算方法可用于指导实践。
【关键词】 辐射防护;工作负荷;使用因子

根据国家标准 GBZ126-2002对医用加速器治疗室的防护要求,为保障周围环境的安全,有用线束直接投照的防护墙(包括屋顶)按初级辐射屏蔽要求设计,其余墙壁按次及辐射屏蔽要求设计。X射线能量超过 10MV 的加速器屏蔽设计应考虑中子的辐射防护。笔者主要验证医用加速器治疗室屏蔽防护简易计算方法的应用价值。

1 材料和方法

1.1 加速器 瓦里安 Clinac23EX 医用电子直线加速器, X 射线能量为 15MV、6 MV; 电子线能量为 6MeV、9MeV、12MeV、15MeV、18MeV、22MeV。

1.2 辐射防护设计依据^[1-3]

1.2.1 防护墙的计算

- (1)原射线 $S_u = TVL \log_{10} [(W \cdot U \cdot T \cdot n) / (P \cdot d_1^2)]$
- (2)散射线 $S_{us} = TVL_c \log_{10} [(a \cdot W \cdot U \cdot T) / (P \cdot d_1^2 \cdot d_2^2)]$
- (3)漏射线 $S_{ul} = TVL_c \log_{10} [(a \cdot W \cdot U \cdot T \cdot n) / (P \cdot d_1^2)]$
- (4)漏散射线 $S_{uls} = TVL_c \log_{10} [(a \cdot W \cdot U \cdot T) / (P \cdot d_1^2)] \times (n + 1 / d_2^2)$

式中: $S_u, S_{us}, S_{ul}, S_{uls}$ 是密度为 $2.35g/cm^3$ 的混凝土屏蔽墙的厚度,单位是 m。W 为每周工作负荷,放射治疗中,指距放射源 1m 处每周治疗机的输出总剂量,它由治疗机每周内治疗患者人次数和野次数,以及每次患者所接受的平均剂量的乘积确定,其单位为: $Gy \cdot m^2 \cdot 周^{-1}$ 。U 为使用因子,指的是原射线(或使用射线)或散、漏射线射向防护计算点方向的剂量负荷比或照射时间比,该值依赖于治疗机的类型(直立型或等中心旋转型)、治疗时使用的照射技术和相应照射技术的使用频率,例如对主防护墙和天花板,它受照的时间只为整个照射时间的分数,使用因子可能为 $1/2 \sim 1/4$ 但对大面积固定侧墙照射(如全身照射),使用因子 U 取 1;对散、漏射线,因所有时间都有照射,它的使用因子必需取 1。T 为居留因子,指的是各类人员停留相关区域的时间与治疗机总出束时间的比例,用于校正有关区域的居留程度和类型,如操作室、邻近医生诊室、邻近走廊等,居留因子取 1;而对于那些非经常性停留的区域,如走道、休息室等, T 取 $1/4$ 偶尔有人停留的区域,如洗手间等, T 取 $1/16$ 。n 为安全系数,一般取 2。P 为每周剂量限值,放射工作人员区,取 $100\mu Sv/w$ 公众区取 $5\mu Sv/w$ 。d 为距离因子,指的是以米为单位,防护计算点或防护区域代表点距放射源的直线距离,在屏蔽设计中,对原射线和散射线均要用距离平方反比定律, $d(d_1)$ 为靶点至计算点距离, d_2 为治疗点源皮距。a 为散射线与原射线强度之比,在防护设计中,对于高能 X(γ)射线辐

射, 90° 散射一般取值为 0.001。TVL($1/10$ 价层)为将入射光子辐射强度衰减至 $1/10$ 所需吸收体的厚度,对 15MV X 射线在混凝土(其密度为 $2.35g/cm^3$)中 TVL 值,对主射线 TVL 取 43.2cm,对次射线(90°)TVL 取 33cm。

1.2.2 防护门的计算

1.2.2.1 X 射线防护 $\bar{E}_x = 0.287(E_c/10)^{0.265}$, \bar{E}_x 对应的铅半值层厚度为 HVP_{Pb} ,单位为 mm, E_c 为加速器 X 射线能量 15MV,门口剂量 $D_{\square} = 5 \times 10^{-7} D_{\phi}$, D_{ϕ} 为 $4Gy/min$ 控制剂量限值 $D_L = 2.5\mu Sv/h = 4.2 \times 10^{-8} Gy/min$ $K = D_{\square} / D_L$, $K_n = 2^n$,则 X 射线屏蔽层厚度为 $\Delta_{pb} = n \cdot HVP_{Pb}$,单位为 mm。

1.2.2.2 中子防护 迷路门口中子剂量率 \dot{H}_n ,单位为 Gy/min 门口中子剂量率限制值为 P,单位为 Gy/min 含硼聚乙烯材料对中子的半值层厚度为 HVT_{Pb} ,单位为 mm,则 $K_n = \dot{H}_n / P$, $K_n = 2^n$,中子屏蔽层厚度为 $\Delta_{PL} = n \cdot HVT_{Pb}$,单位为 mm。

2 结果

加速器机房主防护墙之间的宽度为 8m,次防护墙 C 与次防护墙 D 之间的宽度为 8m,机房迷路宽度为 2m,净空间高度为 3.5m。加速器机头(靶)朝次防护墙 D,机座(枪)靠近次防护墙 G。加速器等中心位于机房中心。

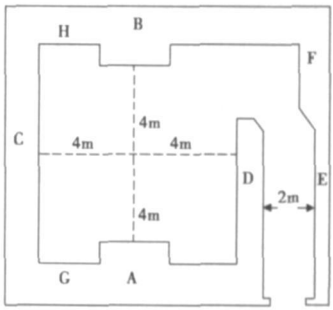


图 1 治疗机房辐射防护设计图

2.1 主防护墙 每天工作按 160 照射野计算,每野处方剂量 $2.5Gy$ 加速器 $SSD = 100cm = 1m$,则 $d_2 = 1m$,每周工作 $5d$ 在 $1m$ 处,加速器每周工作负荷 $W = 160 \times 2.5 \times 5 = 2000Gy \cdot m^2 \cdot w^{-1}$ 。

主防护墙 A $d_1 = 4 + 2.8 + 0.3 + 1 = 8.1$ (计算点一般选在 d_1 离墙 0.3m 处),A 墙外为公众区, $U = 1/4$ $T = 1$ $n = 2$ $P = 5\mu Sv/w = 5 \times 10^{-6}Gy/w$

$$S_u = TVL \log_{10} [(W \cdot U \cdot T \cdot n) / (P \cdot d_1^2)]$$
$$= 0.432 \log_{10} [(2000 \times 1/4 \times 1 \times 2) / (5 \times 10^{-6} \times 8.1 \times 8.1)]$$
$$= 0.432 \times \log_{10} 3.048316 = 0.432 \times 0.484 = 2.8(m)$$

同理可计算出主防护墙 B 为 2.8m。

顶层主防护层 $d_1 = 3 + 1.91 = 4.91m$,该机房为一层建筑,

屋顶为无人区,但在机房 3m 外有高层建筑且有公众人, $U=1/4$ $T=1/16$ $n=2$ $P=100\mu\text{Sv/h}$ $w=1\times 10^{-4}\text{Gy/h}$

$$S_u=TVL\log_{10}[(W\cdot U\cdot T\cdot n)(P\cdot d_1^2)]$$
$$=0.432\log_{10}[(2\,000\times 1/4\times 1/16\times 2)(1\times 10^{-4}\times 4.91\times 4.91)]=0.432\times\log_{10}^{26.385}=0.432\times 4.414=1.91(\text{m})$$

加速器的最大照射野为 35cm×35cm,计算出主防护层宽度为 3.5m,实际运用中取 3.5m。

2.2 次防护墙 次防护墙 $G_a=0.001$,每周工作负荷 $W=2\,000\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{w}^{-1}$,C 墙外为公众区, $T=1$ $U=1$ $n=2$ $P=5\mu\text{Sv/h}$ $w=5\times 10^{-6}\text{Gy/h}$ $d_1=4+1.45+0.3=5.75\text{m}$

$$S_{uL}=TVL\log_{10}[(a\cdot W\cdot U\cdot T\cdot n)(P\cdot d_1^2)]$$
$$=0.33\log_{10}[(0.001\times 2\,000\times 1\times 1\times 2)(5\times 10^{-6}\times 5.75\times 5.75)]=0.33\log_{10}24198=0.33\times 4.384=1.45\text{m}$$

同理可计算出次防护墙 E、G、H、J 的厚度分别为: 1.12m, 1.20m, 1.20m, 1.00m。

次防护墙 $D_a=0.001$,每周工作负荷 $W=2\,000\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{w}^{-1}$,D 墙外为治疗室内迷路无人区, $T=1/4$ $U=1$ $n=2$ $P=100\mu\text{Sv/h}$ $w=1\times 10^{-4}\text{Gy/h}$ $d_1=4+0.85+0.3=5.15(\text{m})$

$$S_{uL}=TVL\log_{10}[(a\cdot W\cdot U\cdot T\cdot n)(P\cdot d_1^2)]$$
$$=0.33\log_{10}[(0.001\times 2\,000\times 1\times 1/4\times 2)(1\times 10^{-4}\times 5.15\times 5.15)]=0.33\log_{10}377=0.33\times 2.576=0.85\text{m}$$

次防护墙 $E_a=0.001$,每周工作负荷 $W=2\,000\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{w}^{-1}$,E 墙外为公众区, $T=1$ $U=1$ $P=5\mu\text{Sv/h}$ $w=5\times 10^{-6}\text{Gy/h}$ $n=2$ $d_1=4+0.85+2+1.42-0.85+0.3=7.72(\text{m})$

$$S_{uLs}=TVL\log_{10}\{[(a\cdot W\cdot U\cdot T)(P\cdot d_1^2)]\times(n+1/d_2^2)\}$$
$$=0.33\log_{10}\{[(0.001\times 2\,000\times 1\times 1)(5\times 10^{-5}\times 7.72\times 7.72)]\times(2+1)\}=0.33\log_{10}20134=0.33\times 4.304=1.42\text{m}$$

此时次防护墙 E 的厚度为 1.42m-0.85m=0.57m

2.3 加速器治疗机房的门

2.3.1 X 射线防护 因为 $E_e=15\text{MV}$,而 $\bar{E}_x=0.287(E_e/10)^{0.265}$,所 $\bar{E}_x=0.32\text{MeV}$,其对应的铅半值层厚度为 $HVP_{pl}=1.86\text{mm}$ 铅当量。门口剂量 $D_{\Gamma}=5\times 10^{-7}D_{\Phi}$, D_{Φ} 为 4Gy/h 控制剂量限值 $D_L=2.5\mu\text{Sv/h}$ $=4.2\times 10^{-8}\text{Gy/h}$ $K=D_{\Gamma}/D_L=47.6$ 取 $48=2^5$,则 $n=5.6$ 所以 $\Delta_{pb}=n\cdot HVP_{pl}=5.6\times 1.86=10.4\text{mm}$ 铅当量。

2.3.2 中子防护 因为 $\dot{H}_n=1.17\times 10^{-6}\text{Gy/h}$ 其对应的含硼聚乙烯材料对中子的半值层厚度为 $HVT_{PL}=15\text{mm}$ 而 $P=2.5\mu\text{Sv/h}$ $=4.17\times 10^{-8}\text{Gy/h}$ 所以 $K_n=\dot{H}_n/p=28.1$ 取 $28=2^5$,则 $n=4.81$ 所以 $\Delta_{PL}=n\cdot HVP_{pl}=4.81\times 15=72.15\text{mm}$ 。

加速器治疗机房各防护点的计算值及建筑取值见表 1

表 1 加速器治疗机房各防护计算点的计算值及建筑取值表

防护计算点	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
射线类型	原	原	漏	漏	漏散	漏	漏	漏	原	漏
计算值(m)	2.8	2.8	1.45	0.85	0.5	1.12	1.2	1.20	1.91	1.00
建筑取值(m)	2.8	2.8	1.45	0.85	0.57	1.12	1.20	1.20	1.91	1.00

注: 1) 机房门主要为散射线,计算值为 10.4mmPb 和 72mm 含硼聚乙烯材料。实际建筑取值为 11mmPb 和 80mm 含硼聚乙烯材料。

2.4 检测结果 装机后,经省级环保局会同同级疾病控制中心、卫生监督所对机房进行全面检测,其结果符合国家标准 GBZ126-2002 对医用加速器治疗室的防护要求。

3 讨论

(1) 加速器治疗机房的防护墙的设计应考虑三种不同的射线: 原射线、散射线和机头漏射线。原射线指由治疗机头准直后直接辐射出来的射线,它所面对的屏蔽墙为主防护墙。散射线指由原射线与周围物质如患者或治疗床相互作用产生的射

线,它和从治疗机头泄漏出来的漏射线向四周辐射,直接面向所有防护墙。单纯只由散射线和漏射线面对的屏蔽墙为次防护墙。因原射线的强度远大于散射线和机头漏射线的强度,主防护墙主要根据原射线强度计算,次防护墙则按散射线、漏射线的强度计算,它们的厚度应将其强度减弱到所要求的剂量水平。为减少治疗机房墙的防护厚度和便于屏蔽墙的设计,治疗机房一般都设有迷路,利用射线的反射、折射和散射,增加它的实际行程,利用距离平方反比因子降低治疗治疗机房迷路口部位的辐射剂量^[1]。

(2) 经省级相关部门检测,其结果完全符合国家标准 GBZ126-2002 对医用加速器治疗室的防护要求。如有特殊需要,需在局部增加屏蔽厚度,改用非混凝土作屏蔽材料,则设计时可根据其对混凝土的相对密度来计算^[1]。混凝土具有成本低廉,结构性能良好,含有大量结晶水,对 X 射线具有良好的屏蔽性能。上述混凝土指的是由水泥、粗骨料(石子)、砂子和水混合做成,密度约 2.35g/cm^3 ^[4]。如有需要可在混凝土中掺入其他高密度物质。在施工中必需连续灌注,充分振动,墙体内部不留缝隙和气泡,保持墙体均匀结实,同时保证混凝土密度不小于 2.35g/cm^3 。

(3) 由于调强适形放射治疗的发展与应用,放射治疗从原来的垂直、水平照射,变为任意角度治疗,所以主防护层应是 3.5m 宽,竖墙壁 2.8m 厚、顶层 1.91m 厚的倒 U 型防护体。

(4) 治疗机房的设计,要兼顾辐射防护的要求和临床工作的便利,根据所安装的特定类型的治疗机,治疗机房内周边,需配置一定数量的辅件柜,挡铅架等,来确定机房面积,理想的面积为 $7.5\text{m}\times 7.5\text{m}\sim 8\text{m}\times 8\text{m}$,净空间高度为 3.5m。

(5) 上述医用电子直线加速器治疗机房的辐射防护设计方法是以 15MV X 射线为例,对于其他能量的医用电子直线加速器,计算方法相似,但要选择计算出相应的 TVL_{Wu} 等。

(6) 高能加速器在治疗过程中,会生成活化气体,如氮-14 氧-15 以及臭氧等有害气体,所以设计时,一定要考虑机房通风问题,一般要求机房内的空气每小时应更换 3~4 次。

(7) 当医用电子直线加速器的 X 射线能量高于 10MV 以上时,高能 X 光子会与治疗头中多种高原子序数的材料如铅、钨等发生光核反应,产生中子辐射。若按上述方法设计的以混凝土为材料的墙体防护厚度,用于中子的防护已不成问题,但机房门一般用铁、铅类高原子序数的材料,此时必需用含硼(大约 5% 含量)的聚乙烯材料,首先将中子慢化,然后将其热中子和中能热中子俘获,再用铅、铁将俘获过程中产生的 γ 射线吸收。为了尽可能减少防护门的门框与迷路墙间的间隙的漏射线,门、门框与墙间必须有一定程度的重叠。美国 NCRP 第 51 号报告推荐其重叠度应至少等于门间隙的 10 倍,实际上,每个门边重叠 5 至 7.5cm 即可。

(8) 对于双光子医用加速器,对混凝土防护墙,只需在较高一档 X 射线能量下作防护效能的检测,但对用铅作的防护门等,两档 X 射线能量下都要进行检测,因为低能如 6MV X 射线在铅中有较强的穿透能力^[1]。

参考文献:

[1] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999 649-657.
[2] 杨兴纲. 新概念放疗物理[M]. 杭州: 西冷印社出版社, 2004 424.
[3] 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 370-415.
[4] 李连波, 王金鹏. 放射卫生防护[M]. 济南: 黄河出版社, 1998 89.

(收稿日期: 2006-07-07)