

医用直线加速器机房辐射屏蔽分析

石伟娜 艾尔肯·阿不列木

(新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

摘要 为评估机房辐射防护水平,依据机器的运行上限参数,运用相关文献报道的计算方法,对X射线初级和次级屏蔽层以及加速器防护门的屏蔽能力进行估算和分析。结果表明:加速器机房四周墙体(除迷路内墙外)和天棚的设计厚度均大于理论计算厚度,表明机房的相应屏蔽层厚度设计可以满足15 MeV X射线加速器的防护标准及选定的剂量管理目标值;此外,机房防护门需增加8.3 mm 铅和6.9 cm 含硼聚乙烯才能分别满足对X射线和中子的屏蔽要求。

关键词 医用直线加速器,屏蔽分析,辐射防护

中图分类号 R147

在临床放射治疗过程中,医用直线加速器是放射治疗的主要装置,它利用电磁场或微波能量,获得高能离子束或电子束,电子束轰击靶产生高能X射线,X射线或电子束轰击靶材料,有可能产生少量的中子。医用直线加速器在放射治疗的同时,X射线和中子不可避免地会同时产生,它们具有较强穿透力,能够危及人体健康。因此在医用加速器的使用中必须重视辐射防护,切实关注主要射线的透射、泄漏、散射和中子辐射的屏蔽。本文对某正常运行加速器机房的辐射屏蔽能力进行分析,为医用直线加速器的屏蔽防护最优化提供参考依据。

1 加速器和机房防护设施概况

1.1 医用电子直线加速器

医用电子直线加速器由德国西门子股份公司生产,型号为ONCOR Impression Plus。X射线标称能量有6 MeV和15 MeV二档,电子线能量有6、9、12、15、18和21 MeV六档。

当采用X射线治疗时,患者等中心100 cm条件下最大照射野面积为40 cm×40 cm,X射线的最大输出剂量率为6 Gy/min,常规使用输出剂量率为2 Gy/min。电子线治疗时,患者等中心100 cm条件下的最大照射野面积为25 cm×25 cm,最大输出剂量率为6 Gy/min。加速器等中心高度为1.295 m,主射线束总张角为28°,X射线漏射率为0.05%。

1.2 机房防护设施

加速器机房为独立单层建筑物,机座中心离四周墙最大距离为4 m,机房高度为3.5 m。加速器机房结构如图1所示。

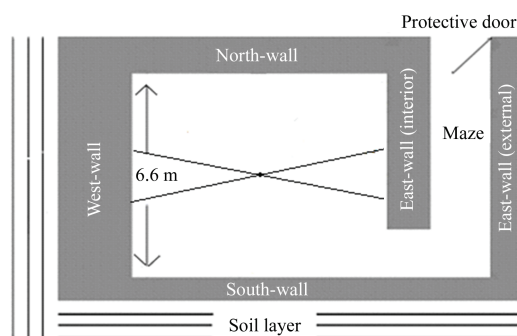


Fig.1 Schematic diagram of accelerator room

加速器机房几何尺寸:净空尺寸(长×宽×高)为8000 mm×6600 mm×3500 mm;面积为52.8 m²;迷路长度为5900 mm;迷路宽度为2100 mm。机房屏蔽体厚度:迷路外墙为1200 mm;迷路内墙为1500 mm(长为4500 mm);西墙为2500 mm;顶棚为2700 mm;北墙为1400 mm;南墙为1000 mm;排气管道截面积为400 mm×400 mm。其中,墙体均为普通混凝土,密度为2.35 g/cm³。

新疆维吾尔自治区科技支撑计划项目(201133136)资助

第一作者:石伟娜,女,1987年7月出生,2012年6月于新疆大学获核技术及应用专业硕士学位,主要从事辐射防护研究工作

通讯作者:艾尔肯·阿不列木

收稿日期:初稿 2011-07-01,修回 2011-10-15

2 照射水平控制值的选定

参考 GB18871-2002, 将职业照射年有效剂量限值控制在 20 mSv^[1]。参照王洪林等^[2]的方法, 照射时间以“周 (week)”或“小时 (h)”计, 则照射水平的相应控制值为 $H_{L,w}=0.4$ mSv/week 或 $H_{L,h}=0.01$ mSv/h。

以职业照射年有效剂量限值的约束值 5 mSv 作为职业照射水平的控制标准, 照射时间以“周 (week)”或“小时 (h)”计, 则放射区照射水平的相应约束值为 $H_{L,w}=0.1$ mSv/week 或 $H_{L,h}=2.5\mu$ Sv/h。

3 屏蔽厚度的计算

假设医院每天投照的人次数在 80–100 之间, 按每周工作 5 d, 每次投照 3 Gy 计, 则医用电子加速器的工作负荷 (W) 通常在 1500 Gy·m²/week 之内。为偏重安全考虑, 下面计算屏蔽墙厚度时, 取工作负荷最大值, 加速电子能量为 15 MeV (屏蔽防护设计参考能量)。u 表示使用因子, 对旋转照射方向取 1/4, 次级 X 射线辐射取 1; q 表示居留因子, 全部居留区取 1, 部分停留区取 1/4, 对偶尔停留区取 1/16。

3.1 初级 X 射线的屏蔽墙厚度

初级 X 射线的屏蔽透射比计算公式如下:

$$\xi = \frac{H_{L,w} \cdot r^2}{Wuq} \quad (1)$$

十倍衰减厚度个数为

$$n = \lg(1/\xi) \quad (2)$$

屏蔽层的厚度 d 为

$$d = \Delta_{1/10,1} + (n-1)\Delta_{1/10,e} \quad (3)$$

式中, $\Delta_{1/10,1}$ 和 $\Delta_{1/10,e}$ 的计算方法参考文献[3]; 此外, 考虑 2 倍安全系数, 应加上一个半衰减层厚度 $\Delta_{1/2}=12.7$ cm。

3.2 次级屏蔽层厚度

3.2.1 泄漏 X 射线的屏蔽墙厚度 $d_{\text{泄漏 X 射线}}$ 考虑到本设备 X 射线漏射率为 0.05%, 计入辐射的泄漏份额后, 关于泄漏 X 射线的屏蔽计算过程与初级 X 射线相仿, 只是这部分射线已经适当程度的衰减, 所以利用衰减倍数确定厚度时只需采用平衡 10 倍

衰减厚度。则,

$$K = \frac{Wuq \cdot 0.05\% / r^2}{\dot{H}_{L,w}} \quad (4)$$

10 倍衰减厚度个数为: $n=\lg K$, 平衡 10 倍衰减厚度 $\Delta_{1/10,e}=42.15$ cm, 则

$$d_{\text{泄漏 X 射线}} = n \Delta_{1/10,e} \quad (5)$$

3.2.2 散射 X 射线的屏蔽墙厚度 当电子加速器加速电压大于 6 MV 后, 散射线数量实际已趋恒定, 散射 X 射线的衰减特性均与 6 MV 时相同^[4]。

当采用 X 射线治疗时, NTD 是 100 cm 条件下最大照射野面积, 其值 $F=40$ cm $\times$ 40 cm。屏蔽计算时, 通常关注 90° 方向的散射线屏蔽。当病人体表距离辐射源 1 m, 受照面积为 400 cm², 散射辐射的照射水平与受照表面中心照射水平的比值 $S=0.06\%$ ^[5]。则

$$K = \frac{[WqS / (r_{\text{散射体}}^2 \cdot r_{\text{散射屏蔽}}^2)] [F / 400]}{\dot{H}_{L,w}} \quad (6)$$

考虑到辐射源到病人体表的距离 $r_{\text{辐射体}}=1$ m; 散射线的屏蔽距离 $r_{\text{散射屏蔽}}=5$ m, 其它参数同上。

10 倍衰减厚度个数 $n=\lg K$

依据文献[3], 加速电子束能量为 6 MeV 的 $\Delta_{1/10,e}=33.8$ cm, 则 $d_{\text{散射 X 射线}}=n\Delta_{1/10,e}$ 。

3.2.3 次级屏蔽层厚度的确定 $|d_{\text{泄漏 X 射线}} - d_{\text{散射 X 射线}}| < \Delta_{1/10,e}$ 时, 选用二者之间较大值基础上, 再加上一个半衰减层厚度 $\Delta_{1/10,e}$, 作为次级屏蔽层厚度。

3.3 加速器防护门屏蔽厚度计算

3.3.1 迷路外口 X 射线能量的估算 参照曾自力的方法^[6], $E_x=0.278(E_e/10)^{0.265}$, 其中 E_x 表示迷路外口处的 X 射线平均能量, 单位为 MeV; E_e 表示加速器 X 射线能量, 单位为 MeV; 迷路门口 X 射线吸收剂量 $D_{\text{门}}=5 \times 10^{-7} D_{\text{中}}$, 该机等中心 (100 cm 处) X 射线的最大输出量率为 2 Gy/min, 正常治疗的常用剂量率为 2 Gy/min, 故本文选定 $D_{\text{中}}$ 为 2 Gy/min, 控制剂量限值 $D_L=2.5 \mu$ Sv/h $=4.2 \times 10^{-8}$ Gy/min, $K=D_{\text{门}}/D_L$, $K_n=2^n$, 则 X 射线屏蔽层厚度 $\Delta_{\text{pb}}=n \cdot HVP_{\text{PL}}$, 单位为 mm。

3.3.2 迷路门口中子射线屏蔽厚度的计算公式 $K_n=H_n/P$, $K_n=2^n$, $\Delta_{\text{pl}}=n \cdot HVT_{\text{pl}}$, 式中: K_n 表示减弱倍数; H_n 表示门口中子当量剂量率, 单位为 μ Sv/h; P 表示门外环境中子当量剂量率约束值, 单位为 μ Sv/h; Δ_{pl} 表示含硼聚乙烯的厚度, 单位为 cm; n 表示半值层个数; HVT_{pl} 表示半值层厚度, 其值为 1.5 cm。

本机房迷路长度为 6.77 m, 属单折中 L 型迷路, 为安全起见, 迷路外口中子剂量率取值为 $60\mu\text{Sv/h}^{[7]}$ 。

3.4 中子辐射的屏蔽计算

当医用加速器的 X 射线能量高于 10 MeV 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。由于加速器机房主、副屏蔽墙均采用混凝土作为屏蔽层材料, 各防护墙的混凝土含有足够量的氢原子, 而

且又是低原子序数材料, 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^[8]。因此, 本文忽略对中子辐射的屏蔽计算。

3.5 屏蔽墙厚度的计算结果

由上述介绍的计算公式和方法进行屏蔽墙厚度的计算, 考虑到具有足够厚度的主屏蔽墙, 可以满足对散射辐射和泄露辐射的屏蔽要求, 同时南墙外围有填土层, 起到足够的屏蔽作用。因此本文只考察北墙的次级屏蔽能力。具体计算结果见表 1。

Table 1 Shielding analysis results of the accelerator

The point protected	Distance/m	Radiation barrier	Thickness of the shielding body/cm
The external surface of east-wall	9.1	Primary barrier	220
The external surface of west-wall	6.8	Primary barrier	231
The external surface of platfond	5.21	Primary barrier	241
The external surface of north-wall	5	secondary barrier	120
The external surface of south-wall	4.7	secondary barrier	—
The maze door	—	secondary barrier	8.3 mmPb+ 6.9 cmBPE

4 结论与评价

通过本文的具体计算结果可以看出, 加速器机房四周墙体和天棚的设计厚度均大于理论计算厚度, 表明机房的相应屏蔽层厚度设计可以满足 15MeV X 射线加速器的防护标准及选定的剂量管理目标值; 加速器机房主、副屏蔽墙均采用混凝土作为屏蔽层材料, 各防护墙的混凝土含有足够量的氢原子, 且又是低原子序数材料, 按本文方法计算的墙体防护厚度, 足以起到屏蔽中子的效果, 因此本文不讨论中子的主、副墙屏蔽。其中, 初级 X 射线的屏蔽墙厚度计算考虑 2 倍安全系数, 屏蔽厚度是偏安全的; 关于泄漏 X 射线的屏蔽计算过程与初级 X 射线相仿, 只是这部分射线已经适当程度的衰减, 计入辐射的泄漏份额就可确定泄漏射线的屏蔽厚度, 当电子加速器加速电压大于 6 MeV 后, 散射射线数量实际已趋恒定, 散射 X 射线的衰减特性均与 6 MeV 时相同, 依据 6 MeV 的 $\Delta_{1/10,e}$ 值确定散射 X 射线的屏蔽墙厚度, 通过泄漏射线的屏蔽厚度和散射 X 射线的屏蔽墙厚度进行比较来确定次级屏蔽层厚度, 此计算结果是偏安全的。此外, 机房防护门需加 8.3 mm 铅和 6.9 cm 含硼聚乙烯才能分别满足对 X 射线和中子的屏蔽要求, 此计算结果是将迷路外口中子剂量率取值为 $60\mu\text{Sv/h}$, 是比较安全的。

参考文献

1 中华人民共和国国家标准. 电离辐射防护与辐射源基

本安全标准. GB 18871-2002. 北京: 中国标准出版社, 2003

National standard of the People's Republic of China. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. GB 18871-2002, Beijing: Standard House of the People's Republic of China, 2003

2 王洪林. 在原钴-60 放疗机房内安装医用电子加速器时辐射屏蔽防护最优化方案的研究[D]. 苏州: 苏州医学院, 1998: 11-28

WANG Honglin. The Study of Optimizing of Protection against the Radiation Produced by Clinic Electron Accelerator to be Installed in old Room of Cobalt-60 Unit[D]. Suzhou: Soochow Medical College, 1998: 11-28

3 方杰. 辐射防护导论[M]. 北京: 原子能出版社, 1991: 85-119

FANG Jie. Radiation protection introduction[M]. Beijing: Atomic energy press, 1991: 85-119

4 NCRP. Radiation Protection Design Guide Lines for 0.1-100MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP Report 1977, No.51

5 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 144-148

LI Xinghong. Radiation protection foundation[M]. Beijing: Atomic energy press, 1982: 144-148

6 曾自力. 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[J]. 中国辐射卫生, 2007, 16(2): 174-175

ZENG Zili. Discussion on Application Value of Simple

- Calculation Method of Medical accelerator therapeutic room shielding protection[J]. Chin J Radiol Health, 2007, **16**(2): 174-175
- 7 陈敬忠, 龚怀宇. 医用电子加速器的防护[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001: 71-85
- CHEN Jingzhong, Gong Huaiyu. Medical Electronic Accelerator's Protection. Chengdu: Sichuan science and technology press, 2001: 71-85
- 8 曾自力. 医用电子直线加速器环境监测的分析[J]. 中国辐射卫生, 2008, **17**(3): 342-343
- ZENG Zili. The Environmental Monitoring Analysis of Medical Electron Linear Accelerator [J]. Chin J Radiol Health, 2008, **17**(3): 342-343

Analysis of the shielding design for medical linear accelerator room

SHI Weina Abulimu·Aierken

(College of Physics Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

ABSTRACT This paper is to evaluate and inspect the protective ability of the shielding walls and door with various thickness against the primary and secondary radiation coming from X-rays transferred by use of a medical accelerator according to the optimized parameters. The result indicates that the calculated thickness of the wall (except labyrinth interior wall) and accelerator facility roof could fit both the protection criterion and desired value of dose management for 15 MeV X-rays. Furthermore, the protective door should be added with a Pb layer of 8.3 mm and a polyethylene containing boron layer of 6.9 cm to meet the shielding requirement of X-rays and neutron, respectively.

KEYWORDS Medical linear accelerator, Shielding analysis, Radiation protection

CLC R147