

新疆某医疗机构直线加速器机房辐射屏蔽分析

祝继东, 周海强

新疆辐射环境监督站, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年3月12日; 录用日期: 2022年4月14日; 发布日期: 2022年4月21日

摘要

医用电子直线加速器的辐射防护问题不容忽视, 为减少辐射对人体的伤害, 实施屏蔽是目前医用直线加速器的主要方法。文章通过对新疆某医院医用电子直线加速器设计的屏蔽体厚度合理性进行计算量化分析和实际监测验证分析, 期望对同类型医用电子直线加速器辐射防护屏蔽体的设计及电离辐射影响评价有参考意义。

关键词

医用直线加速器, 机房, 辐射屏蔽

Radiation Shielding Analysis of Linear Accelerator Room in a Medical Institution in Xinjiang

Jidong Zhu, Haiqiang Zhou

Xinjiang Radiation Environment Supervision Station, Urumqi Xinjiang

Received: Mar. 12th, 2022; accepted: Apr. 14th, 2022; published: Apr. 21st, 2022

Abstract

The radiation protection of medical electronic linear accelerator cannot be ignored. In order to reduce the harm of radiation to human body, shielding is the main method of medical linear accelerator at present. Through the calculation, quantitative analysis and actual monitoring verification analysis of the thickness rationality of the shield designed for the medical electron linac in a hospital in Xinjiang, this paper is expected to have reference significance for the design of the radiation protection shield of the same type of medical electron linac and the impact evaluation of ionizing radiation.

Keywords

Medical Linear Accelerator, Computer Room, Radiation Shielding

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

医用直线加速器运行期间会对周围环境产生一定的辐射影响,但是它在医学诊断、治疗方面有着其他技术无法替代的特点,对保障健康、拯救生命起到十分重要的作用,为病人提供优越的诊疗环境,具有明显的社会效益;同时也提高了医院医疗服务水平,满足了更多患者的需要[1]。本文的目的是介绍医用电子直线加速器机房设计防护效果估算过程和结果,对直线加速器安装具有重要指导意义,防止因设计失误给机房运行带来不良后果。在完全落实国家有关法律法规和标准及相应的辐射防护和安全措施,做到辐射防护最优化的前提下,直线加速器可实现辐射防护“实践正当性”原则[2],能够满足辐射环境保护的要求,这就对直线加速器辐射屏蔽分析工作显的尤为重要。

2. 原理

电子直线加速器是产生高能电子束的装置,如图 1。当高能电子束和靶物质相互作用时产生轭致辐射,即 X 射线,其最大能量为电子束的最大能量[3]。因此医用电子直线加速器既可利用电子束对患者病灶进行照射,也可利用 X 射线束对患者病灶进行照射。医用电子直线加速器可根据所治疗病症类型及其在体内的位置、患者的身体状况和各次给予剂量之间的时间间隔,可以最佳输出能量对人体病灶进行照射治疗。

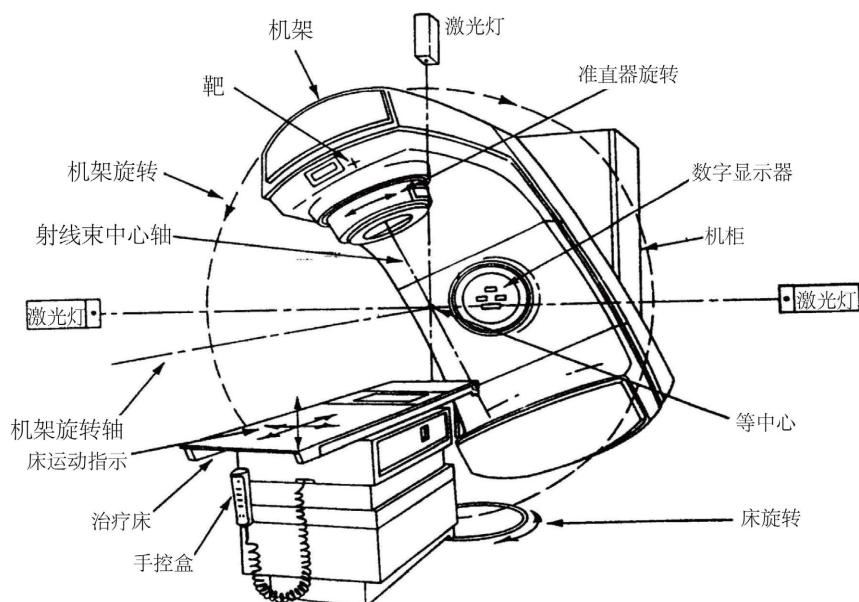


Figure 1. Schematic diagram of typical medical linear accelerator

图 1. 典型医用直线加速器示意图

机房屏蔽防护原理主要是依据加速器的参数及机房实际处理, 通常考虑两种辐射屏蔽[4]: 主屏蔽和次屏蔽。主屏蔽会受到由靶或源发出的光子的直接照射, 而次屏蔽则受到主射束经病人和治疗室墙面散射后的散射辐射照射, 以及由加速器机头泄漏辐射照射。次级辐射可以向所有方向发射并覆盖治疗室的所有表面。而主射束的方向则被加速器在治疗室中的位置和最大照射野所限定。一个经过充分设计的主屏蔽会比需要防护所有次级辐射的次屏蔽更大的厚度。

用于放射屏的材料通常是混凝土, 钢, 或是铅[5]。混凝土通常是最便宜的材料, 并且容易运送和易于建造。然而混凝土的密度并不像钢和铅那么均匀, 所以它的密度更难监测和控制。更需要注意的是, 在接缝处, 建造师更要控制好混凝土质量, 避免可能的漏浇和浇灌时的不连续。所以在浇灌混凝土阶段, 现场测试也是需要的。一般使用的混凝土标准密度是 2350 千克每立方。如果有严格的空间限制, 或许就需要使用钢铁或是铅这样更高密度的材料。

目前国内外发表的屏蔽计算论文主要是按照 NCRP151 号报告[6]、IAEA 47 号报告[7]和 GBZ/T201 国家标准[8]这 3 种医用电子直线加速器机房屏蔽标准计算, 本文拟用方杰等所编的《辐射防护导论》(1991 年原子能出版社出版)中的计算方法对新疆某医疗机构的直线加速器进行辐射防护屏蔽分析, 《辐射防护导论》中的屏蔽计算方法与 GBZ/T 201 国家标准基本一致。由于评价指标(特别是剂量率限值)的不同, 各屏蔽方案所需的屏蔽厚度有明显差异, NCRP151 号报告和 IAEA 47 主要使用时间平均的剂量率作为评价指标, 而 GBZ/T 201 现行国家标准使用瞬时剂量当量率作为评价指标。我国加速器机房环境影响评价所参照的是 GBZ126-2011 其第 6.1 节“治疗室的防护要求”中规定“辐射屏蔽设计应符合 GBZ/T 201.1 的要求”, 而 GBZ/T 201.1 对医用电子直线加速器的屏蔽计算和评价方法是由 GBZ/T 201.2-2011 具体规定, 所以本文中按照现行国家标准 GBZ/T 201.2-2011 计算了相应的屏蔽厚度。

3. 医院直线加速器情况

新疆某医院提供的加速器机器机房的资料如表 1, 直线加速器的平面布局图如图 2 所示。

Table 1. Accelerator data provided by the hospital

表 1. 医院提供加速器资料

加速器出束剂量率	600 cGy/min·m ²
加速器电子射线能量	15 MeV
照射野半角	14°
机房净高	3.20 m
中心点距左侧内墙	3.50 m
中心点距主射内墙	3.50 m
中心点距散射内墙	4.30 m
中心点距迷道内墙	3.50 m
中心点距离地面	1.00 m
机房右侧防护墙厚度	次防护墙 1.70 m 厚混凝土 主防护墙 1.20 m 厚混凝土
前后两侧散射防护墙厚度	1.50 m 厚混凝土
机房迷道	内墙厚度 2.00 m 迷道外墙厚度 1.20 m
主射线方向	左、右、顶三个方向

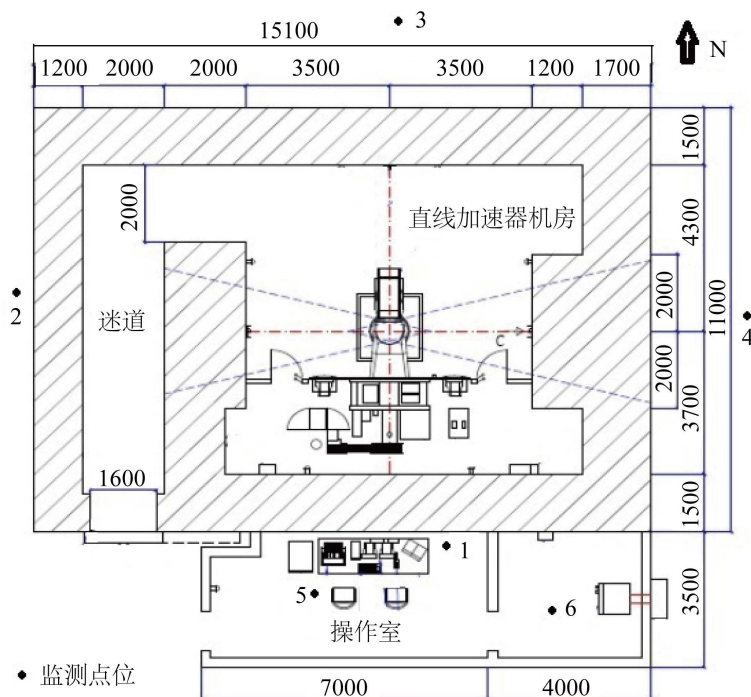


Figure 2. Hospital linear accelerator plan
图 2. 医院直线加速器平面图

4. 屏蔽计算分析

① 屏蔽厚度计算

厚度计算采用以下公式:

$$K = W \cdot U \cdot T \cdot n / (HLW \cdot r^2) \quad (\text{公式 1})$$

W : 周工作负荷 $\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{w}$ (对 X 射线机用一周内管电流(mA)与开机时间(min)的乘积表示, 单位 $\text{mA} \cdot \text{min}/\text{w}$ 。对加速器或 γ 射线治疗仪, 则用 1 m 处的剂量当量指数率表示其工作负荷 WR , 单位是 $\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{min}$ 、 $\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ 或 $\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{w}$), 每周工作 5 天, 每天照射 20~50 人, 按 50 人计算, 则每周 250 人。

U : 束定向因子, 可取 1, 1/4, 1/8, ……

T : 居留因子, 可取 1, 1/4, 1/8, ……

n : 安全系数, 取 1

r : 靶(出束口)距防护点距离, m

HLW : 周剂量限值, 取 $0.02 \text{ mSv}/\text{w}$ ($1 \text{ mSv}/\text{a}$)

$$W = 6 \text{ Gy}/\text{min} \cdot \text{m}^2 \times 50/\text{周} = 1500 \text{ Sv} \cdot \text{m}^2/\text{w}$$

主束方向(右、顶):

右边: 如果 U 取 1/4, $K = 1500 \times 1/4 \times 1 \times 1 / (0.02 \times 10^{-3} \times 3.5^2) = 1.53 \times 10^6$

顶部: 如果 U 取 1/4, $K = 1500 \times 1/4 \times 1 \times 1 / (0.02 \times 10^{-3} \times 3.2^2) = 1.83 \times 10^6$

对漏射方向, 取 3/1000:

北面墙体: $K = 3000 \times 3/1000 \times 1 \times 1 / (0.02 \times 10^{-3} \times 4.3^2) = 2.43 \times 10^4$

查《辐射防护导论》附图 13, 得到所需混凝土厚度, 所得结果见表 2。

Table 2. Protective thickness parameters of hospital linear accelerator room
表 2. 医院直线加速器机房防护厚度参数

射线方向	距离 m	定向因子 U	减弱倍数	投射比 B	混凝土厚 m	照射野直径 m
主束右面墙体	3.5	1/4	1.53×10^6	6.54×10^{-7}	2.9	1.745
主束(顶)	3.2	1/4	1.83×10^6	5.46×10^{-7}	2.8	1.596
漏射	4.3	1	2.43×10^4	4.12×10^{-5}	2.4	-

注: 在机房内部四面和顶部需要增加 50 mm 的聚乙烯板或聚氯乙烯板。在机房顶部防护层需要向机房四面侧墙方向各延长 300 mm。

② 主射线方向照射野大小计算

右面照射野大小(m)为:

$$3.5 \times \operatorname{tg}14^\circ \times 2 = 1.745$$

顶部照射野大小为:

$$3.2 \times \operatorname{tg}14^\circ \times 2 = 1.596$$

③ 加速器防护门屏蔽厚度计算

本项目使用加速器 X 射线最大能量为 15 MeV, 因此本项目应考虑感生放射性问题[9]。

1) 迷路外口 X 线能量的估算[3]

$$\bar{E}_x = 0.278(E_e/10)^{0.265} \quad (\text{公式 2})$$

\bar{E}_x : 迷路外口处的X射线平均能量, MeV; E_e : 加速器X射线能量, MeV; 迷路门口X射线吸收剂量估算公式: $D_{\Gamma} = 5 \times 10^{-7} D_{\text{中}}$, 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, 故本评价选定D中为2 Gy/min, 控制剂量限值 $D_L = 2.5 \mu\text{Sv/h} = 4.2 \times 10^{-8} \text{ Gy/min}$, $K = D_{\Gamma}/D_L$, $K_n = 2^n$, 则X射线屏蔽层厚度为 $\Delta_{pb} = n \cdot HVP_{PL}$, 单位为mm。

因加速器X射线能量为15 MeV, 则 $\bar{E}_x = 0.31 \text{ MeV}$, 其对应的铅半值层厚度 $HVP_{PL} = 1.8 \text{ mm}$ 铅当量。 $D_{\Gamma} = 5 \times 10^{-7} D_{\text{中}} = 5 \times 10^{-7} \times 2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ Gy/min}$, $K = D_{\Gamma}/D_L = 23.8$, 则 $n = 4.57$, 所以 $\Delta_{pb} = n \cdot HVP_{PL} = 4.57 \times 1.8 \text{ mm} \approx 8.3 \text{ mm}$ 。

2) 迷路门口中子射线屏蔽厚度的计算公式:

$$\begin{aligned} K_n &= H_n/P \\ K_n &= 2^n \\ \Delta_{PL} &= n \cdot HVT_{PL} \end{aligned} \quad (\text{公式 3})$$

式中:

K_n : 减弱倍数; H_n : 门口中子当量剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

P : 门外环境中子当量剂量率约束值, $\mu\text{Sv/h}$; Δ_{PL} : 含硼聚乙烯的厚度(cm);

n : 半值层个数; HVT_{PL} : 半值层厚度, 1.5 cm;

为安全起见, 迷路外口中子剂量率取值为60 $\mu\text{Sv/h}$, 则:

$$K_n = H_n/P = 60/2.5 = 24$$

$$K_n = 2^n, \quad n = \ln K / \ln 2 = \ln 24 / \ln 2 \approx 4.58$$

屏蔽中子所需的含硼聚乙烯厚度为:

$$\Delta_{PL} = n \cdot HVT_{PL} = 4.58 \times 1.5 \approx 6.9 \text{ cm}$$

5. 辐射防护要求

- 1) 主射线方向右面墙按 2.9 m 混凝土设计, 上顶按 2.8 m 混凝土设计, 漏射线方向北面墙体按 2.4 m 混凝土设计, 迷道内墙按 1.8 m 混凝土设计, 迷道外墙按 1.1 m 混凝土设计。
- 2) 机房防护门对 X 射线屏蔽厚度需 8.3 mm 铅, 对中子的防护需 6.9 cm 含硼聚乙烯。
- 3) 铅门铅当量应考虑达到 20 mmpb, 铅门左右方向与门洞各重叠 200 mm。门与门洞墙体之间的缝隙小于 5 mm。
- 4) 除加速器机房覆土层以外, 机房内其余方向应在房间内部(包括顶部)增加 50 mm 的聚乙烯板或聚氯乙烯板。
- 5) 照射野宽度: 主束右面墙体方向应考虑直径达到 2 m 以上, 顶部应考虑直径达到 2 m 以上。
- 6) 医院设计: 主射线方向右面墙主防护墙为 1.7 m 厚混凝土, 次防护墙 1.20 m 厚混凝土, 散射方向墙体厚度为 1.5 m 厚混凝土, 迷道内墙为 2 m 厚混凝土, 迷道外墙为 1.2 m 混凝土。综上所述, 医院的设计满足防护要求。

6. 监测结果分析

为了进一步验证机房屏蔽的合理性, 监测人员采取实际监测的方法进行屏蔽合理性的检验[10], 此次监测选用的仪器为 FH40G 型便携式 X- γ 剂量率仪, 检出限: 1×10^{-8} Gy/h, 监测点位主要选择机房四周人员能到达的范围, 在直线加速器正常开机状态下监测结果见表 3。

Table 3. Monitoring results of dose rate around hospital linear accelerator room
表 3. 医院直线加速器机房周围剂量率监测结果

编号	测量点描述	剂量率 nsv/h
1	加速器南侧墙 30 厘米处	112
2	加速器西侧墙 30 厘米处	115
3	加速器北侧墙 30 厘米处	114
4	加速器东侧墙 30 厘米处	114
5	操作位	112
6	过道	110
7	楼顶	113

通过现场实际监测说明直线加速器机房防护效果较好, 不存在射线泄漏[11], 且满足《电子加速器放射治疗放射防护要求》(GBZ126-2011) [12]中“在加速器迷宫门处、控制室和加速器机房墙外 30 cm 人员活动处的周围剂量当量率应不大于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ”的规定要求。

7. 小结

目前用于机房屏蔽防护的材料主要是混凝土、重晶石以及铅板[13]。平时大多数医院使用的都是比较单一的材料用于辐射防护。对于不受空间限制的机房迷路建设, 混凝土无疑是易获取, 成本低, 并且无论是对 X 射线还是中子, 屏蔽效果都是非常好的; 对于空间比较紧张的机房迷路, 一般的混凝土占据空间大, 而一方面要实现合乎国家标准的屏蔽目标, 另一方面要在受局限的空间完成施工, 用于防护的材

料密度需要更大。如果单纯用铅板, 对于 10 MV 及以上能量的加速器来说, 高能 X 射线会在迷路产生更多的次级辐射, 使防护更困难。实际防护材料的选择中, 空间不受限的, 混凝土是性价比最高的, 空间受限的, 可以考虑重混凝土, 或是在混凝土中加入一定比例的钢纤维、钛纤维、铅纤维等混合, 既能提高混凝土的力学性能, 也可以提升对 X 射线和高能中子的屏蔽效果。

通过计算结果可以看出, 该医疗结构使用的医用电子直线加速器机房其屏蔽防护厚度符合 X 射线辐射能量为 10 MV 医用电子直线加速器的屏蔽防护及预先所选取剂量限值的要求, 医院的加速器工作人员和周围公众所受照射剂量远低于《电离辐射防护与辐射源基本安全标准》(GB18871-2002) [14]中所规定的剂量限值和剂量约束值。从辐射防护与安全方面考虑, 该新疆医疗机构使用的电子直线加速器机房屏蔽设计可以保障从事放射性操作的工作人员和放射治疗患者及公众的健康与安全, 其屏蔽设计方案切实可行[15], 在实际应用中具有一定的现实指导意义。

参考文献

- [1] 赵艳芳, 楚彩芳, 时峰, 等. 某 10mv 医用电子加速器屏蔽计算与防护效果验证对比分析[J]. 中国辐射卫生, 2013, 22(2): 169-171.
- [2] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T201.1-2007 放射治疗机房辐射屏蔽规范第 1 部分: 一般原则[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2007.
- [3] 方杰. 辐射防护导论[M]. 北京: 原子能出版社出版, 1991.
- [4] 温莉琴. 医用电子直线加速器及机房的屏蔽防护[J]. 海峡科学, 2010, 10(6): 64-65+70.
- [5] 赵兰才, 张丹枫. 放射防护实用手册[M]. 济南: 济南出版社, 2009: 346-357.
- [6] National Council on Radiation Protection and Measurements (2005) Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities. NCRP Report No. 151. NCRP, Bethesda, 65-104.
- [7] IAEA (2006) Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. Safety Reports Series No. 47. IAEA, Vienna, 18-121.
- [8] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T201.2-2011 放射治疗机房辐射屏蔽规范第 2 部分: 电子直线加速器放射治疗机房[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [9] 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.
- [10] 李朋起, 楚彩芳, 赵艳芳, 等. 某医用电子直线加速器机房防护改造方案及效果分析[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(1): 51-54.
- [11] 曹兴江, 周献锋, 杨春勇, 等. 江苏省医用电子加速器质量控制和防护水平监测结果分析[J]. 中国职业医学, 2014, 41(1): 84-86.
- [12] 中华人民共和国卫生部. GBZ126-2011 电子加速器放射治疗放射防护要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [13] 许家昂, 宋钢, 朱建国, 等. 45 MV 医用电子加速器机房主要屏蔽体的防护核算[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(1): 55-61.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB18871-2002 电离辐射防护与辐射源基本安全标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [15] 谢萍, 陈掌凡, 张会敏, 等. 某医院 15 mv 医用电子加速器机房的屏蔽防护计算[J]. 中国辐射卫生, 2009, 18(3): 312-314.