## ・卫生工程・

# 典型医用加速器治疗室改造的屏蔽设计与分析

Shieiding designing and analyzing on the reconstruction of a typical medical accelerator treatment room

马永忠,娄云,万玲,冯泽臣,王新明,王时进

MA Yong-zhong , LOU Yun , WAN Ling , FENG Ze-chen , WANG Xin-ming , WANG Shi-jin

(北京市疾病预防控制中心/首都医科大学公共卫生与家庭医学学院,北京 100013)

摘要: 以某一6 MV 加速器治疗室为研究对象,采用 NCRP No. 151、IAEA No. 47 方法,估算该治疗室改造成 10 MV 加速器治疗室时的辐射剂量水平,结合有关标准进行分析 和评价。在保持原有6 MV 加速器治疗室主体屏蔽的基础上, 按照 10 MV 加速器的防护性能和设置要求初步拟订了治疗室 的局部屏蔽改造方案。此改造方案下,估算出 10 MV 加速器 1 m 处的输出量率为 400 cGy/min 时,该治疗室室顶和水平方 向主束墙外最高剂量率分别为 1.53  $\mu$ Sv/h 和 1.17  $\mu$ Sv/h,室 顶和水平方向次束墙外最高剂量率分别为 0.17  $\mu$ Sv/h 和 0.37  $\mu$ Sv/h; 治疗室入口屏蔽前由主射线束和泄漏辐射的散射辐射 所产生的剂量率为 53.8  $\mu$ Sv/h,6 mm Pb 当量的防护门屏蔽 后门外剂量率为 5.38  $\mu$ Sv/h,6 mm Pb 当量的防护门屏蔽 后门外剂量率为 5.38  $\mu$ Sv/h,6 mm Pb 当量的防护门屏蔽 运加速器治疗室屏蔽改造设计方案是可行的,在施工中必须 注意屏蔽设计的细节,保证治疗室改造的辐射防护质量。

关键词: 医用加速器; 加速器治疗室; 放射治疗; 辐射防护; 屏蔽设计

中图分类号: R134.1 文献标识码: B 文章编号: 1002 - 221X(2012)01 - 0063 - 04

在放射治疗工作中,当原有加速器设备不适应临床需要 时,就须对设备进行更新并建设新的加速器治疗室或是对原 有场所进行改造,以满足新设备的运行技术参数和防护需 求<sup>[1]</sup>。目前许多开展放射治疗的医疗机构都存在或可能正面 临着更新加速器设备的情形。由于加速器治疗室构造特殊, 具有很强的抗辐射结构,治疗室拆除工程复杂,而利用原室 改造既可解决治疗场所紧张的问题,也可在某种程度上节约 大量的土建资金、避免重新选址的麻烦,所以将原加速器治 疗室改造成新的治疗室则是多数医院的首要选择<sup>[2]</sup>。当然, 治疗室改造的屏蔽设计合理与否则是整个改造工作中极为关 键的。本文报道某一典型6 MV 医用加速器更新为 10 MV 加 速器之前,相应的治疗室屏蔽改造设计方案及其关注位置的 辐射剂量估算结果,分析屏蔽改造方案的可行性,并对相关 问题进行讨论。

- 1 材料与方法
- 1.1 研究对象与分析指标

收稿日期: 2011-02-15; 修回日期: 2011-03-22 作者简介: 马永忠(1968-),男,医学博士,副主任医师,主要 从事辐射剂量研究与职业病危害评价工作。 以某一医院拟改造的典型医用加速器治疗室为研究对象, 该治疗室设置在建筑物的地下二层,-8.4 m 深,治疗室的 东、北墙外和地下为土层,南墙外为控制室和水冷机房,迷 路设在治疗室的西侧,西墙外为相邻加速器治疗室的迷路, 室顶为排风机房和空调机房。该治疗室原已安装一台6 MV 医 用加速器进行放射治疗多年,本次拟更新为一台10 MV 加速 器并对治疗室重新作屏蔽改造。新加速器等中心处常用最高 剂量率4 Gy/min,泄漏辐射因子1×10<sup>-3</sup>,预期每天最多治疗 50 人次,250 人次/周,在 400 cGy/min 照射条件下,常规治 疗时周工作负荷(W)为 500 Gy/周;适形调强放射治疗 (IMRT)的泄漏辐射周工作负荷 W=1 500 Gy/周。在屏蔽改 造设计和剂量分析中,以加速器10 MV X 射线、常用最高400 cGy/min 的 IMRT 治疗条件评价改建机房的屏蔽。

#### 1.2 屏蔽核算与估算方法

1.2.1 加速器治疗室屏蔽防护的主要对象 对加速器治疗室 的防护墙和室顶以 10 MV X 射线为屏蔽对象,该加速器所产 生的电子对屏蔽的要求低于 10 MV X 射线的要求。其中,对 主束区仅考虑有用束的直接照射,忽略进入该区的泄漏辐射 和散射辐射。与主束区直接相连的次屏蔽区:考虑泄漏辐射 和主射线束水平方向射入模体或患者的散射辐射;其他区: 仅考虑泄漏辐射;入口门:考虑来自主射线束和泄漏辐射的 散射辐射,不需考虑对中子和中子俘获γ射线的屏蔽。

 2.2 屏蔽与剂量核算方法 拟改造的治疗室主屏蔽区为 "内凸"结构,其主屏蔽区半宽度Y按图1所示的情形估算。



图 1 加速器治疗室主屏蔽区示意图

主屏蔽墙的透射系数 
$$B_{\text{pri}}$$
,由公式(1)求出:  
 $B_{\text{pri}} = (10^{-1}) 10^{-[\frac{(H-TVL_1)}{TVL_e}]} = 10^{-\{1+[\frac{(H-TVL_1)}{TVL_e}]\}}$ (1)  
主束对相应关注点的剂量率贡献  $H_{\text{pri}}$ ,依据公式(2)进

行估算:

$$H_{\rm pri} = B_{\rm pri} \cdot D_0 \cdot (1 + d)^{-2}$$
 (2)

(1) 和(2) 式中, H为主屏蔽墙的厚度, cm; TVL<sub>1</sub>为 主束对混凝土(砼)的第一个十分之一值层, TVL<sub>e</sub>为主束对 混凝土的平衡十分之一值层, cm; d为等中心点到关注点的

#### 距离,m; $D_0$ 为等中心处 X 射线的吸收剂量率。

泄漏辐射的透射系数 B<sub>L</sub>, 由公式(3) 求出:

$$B_{1} = 10^{-\{1 + [\frac{(h/\cos\theta - TVL_{1})}{TVL_{1}'}]}$$
(3)

泄漏辐射对相应关注点位的剂量率贡献 H<sub>L</sub>,依据公式 (4) 进行估算:

$$H_{\rm L} = B_{\rm L} \cdot L_f \cdot D_{\rm o} \quad (d)^{-2} \tag{4}$$

(3) 和(4) 式中,h为屏蔽墙的厚度,cm;  $\theta$ 为射线对 屏蔽墙的入射角;  $TVL_1^L$ 为泄漏辐射对混凝土的第一个十分之 一值层, $TVL_e^L$ 为泄漏射辐对混凝土的平衡十分之一值层,

cm;  $L_{f}$ 为主束的辐射泄漏率,保守取 0.1%。符号 h、  $D_{0}$ 和 d 代表的意义同式 (2)。

加速器治疗室入口的辐射剂量来源于: 主束经屏蔽墙二 次散射所致的剂量贡献, H<sub>s</sub>; 加速器机头泄漏辐射经屏蔽墙 一次散射所致的剂量贡献, H<sub>is</sub>; 主束经患者和屏蔽墙的散射 所致的剂量贡献, H<sub>Ps</sub>; 泄漏辐射贯穿迷路内墙所致的剂量贡 献, H<sub>ir</sub>。入口屏蔽前的辐射剂量依据(5)式计算。

$$H_{\rm G} = fH_{\rm S} + H_{\rm Is} + H_{\rm Ps} + H_{\rm LT} \tag{5}$$

其中, f 为患者对有用束的吸收因子, 对 10 MV X 射线为 0. 25。考虑 0°、90°、180°和 270° 4 种照射, U 各占 1/4, 每 种照射几何条件不同,总剂量  $H_{Tot}$ 小于上述 90°照射的 4 倍, 通常以  $H_{Tot}$  = 2. 64  $H_{C}$  估算,本方案评价中保守地以  $H_{Tot}$  = 4 $H_{C}$  估算。有关文献给出了详细的估算步骤<sup>[3]</sup>。 1.3 分析与评价依据

对主要依据 GBZ/T 201.1—2007、NCRP No. 151、IAEA No. 47 和 NCRP No. 144 等国内外相关的技术规范和标准<sup>[4-9]</sup> 对拟改造治疗室的屏蔽方案与辐射剂量进行分析评价。

- 2 结果
- 2.1 加速器治疗室的防护屏蔽改造方案

经分析, 拟改造为 10 MV 加速器治疗室的原有建筑屏蔽 虽然最初是按照6 MV 加速器机房进行设计施工建造的,但实 际上采取了较大的保守因子。在本次加速器治疗室的屏蔽结 构改造中,保持原有6 MV 治疗室的主体屏蔽,按照 10 MV 加速器的防护性能要求进行局部改造,并确定了治疗室防护 墙基本的屏蔽改造方案,见图2。其中,由于拟安装的10 MV 加速器等中心点相对于原加速器等中心点位置向西侧偏移 70 cm,故将南侧主束防护墙和室顶主束屏蔽向西侧作相应的延 伸,相应主束屏蔽总宽度由原330 cm 砼增至400 cm 砼,使相 对于中心点两侧的宽度均满足主束防护屏蔽的要求;同时, 将迷路内墙向北延伸110 cm,并在其末端(北端) 增设一向 治疗室内伸60 cm 长的砼防护墙垛。对于改造中考虑的其他 细节,主要包括:①控制室位于治疗室南墙外,改造时将治 疗室内西南墙脚原有的通往控制室的电缆管沟填实,而将治 疗室与控制室之间必需的地下电缆管道的设置位置挪到治疗 室东南墙脚的次束屏蔽区,电缆管沟设为"U"形埋设。电 缆敷设后,穿墙处管口和穿墙电缆洞内多余空间均以(铅+ 砼) 或钢板屏蔽,以减少治疗室内射线的散射和泄漏; ②对 于治疗室内墙壁安装激光定位等装置的凹陷处,在相应位置 设置必要的厚钢板,以保证该侧防护墙的屏蔽效果不受影响; ③加速器治疗室为地下二层建筑,室顶屏蔽采用了与水平主 束方向等效的屏蔽设计,不需考虑天空散射问题;④治疗室 内的送风管和排风管从迷路上方以45°角穿出治疗室以有效减 少通过通风管道传出的散射辐射,将室内送风口设置于室顶 天花板上,排风口设置于南墙西端的次束墙角,排风口截面 40 cm × 60 cm,其位置接近治疗室的地面,以便于室内密度 高于空气的 O<sub>3</sub> 等有害气体的排出。



#### 图 2 10 MV 加速器治疗室屏蔽改造方案图

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 2.2 改造治疗室外关注点的辐射剂量核算与分析

2.2.1 直接辐射屏蔽核算与剂量估计 加速器治疗室外关注 位置的剂量评估点见图 2。已知 10 MV X 射线在砼中的 *TVL* 值: ①初级束: *TVL*<sub>1</sub>/*TVL*<sub>e</sub> 为 41 cm/37 cm; ②90°泄漏辐射: *TVL*<sub>1</sub>/*TVL*<sub>e</sub>为35 cm/31 cm; ③30°人体散射辐射: *TVL*为28 cm。治疗室屏蔽的几何位置、计算中所用参数与估算结果见表1。

位置	<b>距离</b> (m)	射线束	辐射屏蔽因子		空气吸收剂量率(μ Gy/h)		治疗室外围
			等效砼 (cm)	衰减,B	屏蔽前	屏蔽后	场所条件
А	6.80	主束	250	2.25E – 07	5.19E +06	1.17	南墙外加速器控制室
В	7.0	漏射辐射(30°斜射)	150 <sup>b</sup>	1.93E – 05	4.90E + 03	0.10	
		人体散射 ( 30°斜射) ª	150°	4.35E – 06	6.23E + 04	0.27	
С	7.63	漏射辐射(90°方向)	236	3.28E - 08	4. $12E + 03$	1.35E – 04	西墙外加速器治疗室迷路
D	7.30	漏射辐射(39°斜射)	$167^{d}$	5.39E – 06	4.50E + 03	0.02	南墙外水冷机房
		人体散射(39°斜射)	167 <sup>e</sup>	1.06E - 06	5.73 $E + 04$	0.06	
G	6.23	主束	250	2. $25 \text{ E} - 07$	6.82E + 06	1.53	室顶排风机房
Н	6. 20	漏射辐射(36°斜射)	163 <sup>f</sup>	7.60E – 06	6.24E + 03	0.05	室顶空调机房
		人体散射(36°斜射)	163 <sup>g</sup>	1.55E – 06	7.94E + 04	0.12	

表1 🛾	10 MV	加速器治疗	室直接辐射	屏蔽与剂	量估算结果
------	-------	-------	-------	------	-------

注: a, 10 MV 加速器 X 射线 30°方向人体散射系数为 3.18×10<sup>-3</sup>; b、c, 130 cm 次束墙 30°斜射等效屏蔽厚度为 150 cm; d、e, 130 cm 次束墙 39°斜射等效屏蔽厚度为 167 cm; f、g, 130 cm 次束墙 37°斜射等效屏蔽厚度为 163 cm。

从表1可见,加速器治疗室主束区的辐射剂量率分别为A 点(南主束墙外控制室) 1.17 µ Gy/h 和 G 点(室顶排风机 房) 1.53 μ Gy/h; 水平方向主束屏蔽与次束屏蔽交接处 B 点 (南墙外控制室西北角)和 D 点(南墙外水冷机房)分别为 0.37 μ Gy/h 和 0.08 μ Gy/h, 室顶次束区 H 点为 0.17 μ Gy/h (室顶空调机房)。治疗室外各关注点的人员居留因子(T)分 别为: 控制室内(A和B点)为1, 南墙外水冷机房(D 点)、室顶排风机房(G点)和空调机房(H点)均为1/16, 主束使用因子(U)为1/4,取10 MV X射线常规放射治疗照 射时间为 100 h/年、IMRT 照射时间为 310 h/年,则估算出控 制室内人员所受年剂量最高为 0.09 mSv/年(包括主束区常规 治疗最高年剂量为 30 µSv/年、次束区因 IMRT 所致泄漏辐射 和散射辐射而使人员所受的剂量分别为 32 μSv/年和 28 μSv/ 年;同样,估算出治疗室屏蔽墙外人员可接触的其他区域可 能受照的剂量均低于 0.05 m Sv/年。其中治疗室外主次束屏蔽 交接处(B、D和H点)剂量值为相应主束方向最大照射野照 射并未考虑受治疗照射患者体吸收时的保守估计值;治疗室 外东墙和北墙外均为地下土层,不需对其辐射剂量水平进行 估算。总体估算结果表明,治疗室防护墙的屏蔽是安全的。

2.2.2 防护门处辐射剂量与屏蔽核算 加速器 IMRT 周工作 负荷 W 为1 500 Gy/周,依据(5)式估算拟改造治疗室入口 屏蔽前的剂量时,其他有关的计算参数如下。

2. 2. 2. 1 计算  $H_s$  的参数 北主束墙的照射使用因子  $U_F$  为 0. 25; 北墙主束散射面面积  $A_0$  为 5. 29 m<sup>2</sup> (230 cm × 230 cm); 主束散射面的散射系数  $a_0$  为 2. 1 × 10<sup>-3</sup>; 从主束散射面  $A_0$  通 过迷路内口投射到迷路外墙内散射面的截面积  $A_z$  为 12. 24 m<sup>2</sup> (272 cm × 450 cm),迷路外墙内散射面的散射系数  $a_Z$  为 8. 0 × 10<sup>-3</sup>; 从靶点至散射面  $A_0$  的距离  $d_h$  为 5. 75 m,从散射面  $A_0$  的中心沿散射线束方向经过迷路内墙边缘到迷路中线上 N 点的距离  $d_r$  为 5. 83 m,沿迷路从 N 点至治疗室入口 M 点的距 离 d<sub>z</sub> 为 7.68 m。

2. 2. 2. 2 计算  $H_{1s}$ 的参数 距靶 1 m 处机头辐射泄漏率  $L_{f}$  取 为 0. 1%; 泄漏辐射散射到墙  $A_{L}$  的反散射系数  $a_{1s}$  为 5. 1 × 10<sup>-3</sup>; 从治疗室入口可见的墙  $A_{L}$  的反射面面积为 10. 22m<sup>2</sup> (227 cm × 450 cm); 加速器机头泄漏辐射从中心点至墙  $A_{L}$  散射面中心的距离  $d_{1s}$  为 7. 31 m,从墙  $A_{L}$  散射面中心至治疗室入口的距离  $d_{zz}$ 为 10. 4 m。

2. 2. 2. 3 计算  $H_{PS}$ 的参数 加速器靶点至患者表面的距离  $d_{sca}$ 为1 m; 从患者表面散射至墙  $A_L$  的反射面面积  $A_L$  为 10. 22 m<sup>2</sup> (227 cm × 450 cm); 等中心点到墙  $A_L$  散射面中心的距离  $d_{sc}$ 为 7. 31 m; 从墙  $A_L$  散射面中心至治疗室入口的距离  $d_{zz}$ 为 10. 4 m; 患者等中心 1 m 处照射野的面积 F 为 0. 16 m<sup>2</sup> (40 cm × 40 cm); 患者有用束的散射辐射以  $\theta$  = 45°的散射角入射 到墙  $A_L$  的散射因子  $\alpha$  (45°) 为 1. 35 × 10<sup>-3</sup>; 墙  $A_L$  对患者有用束散射辐射的反散射系数  $a_1$  为 2. 2 × 10<sup>-2</sup> (散射能量为 0. 5 MeV,患者有用束散射辐射的入射角为 45°,反射角为 0°)。

2.2.2.4 计算  $H_{LT}$ 的参数 迷路内墙对机头泄漏辐射的衰减 因子  $B = 3.05 \times 10^{-5}$ (泄漏辐射以 46°斜射穿过 100 cm 砼迷路 内墙的等效屏蔽厚度为 144 cm 砼);机头泄漏辐射由靶经迷 路内墙至治疗室入口中心的距离  $d_{L} = 7.89$  m。

由以上参数估算出治疗室入口屏蔽前的  $H_{\rm s}$ 、 $H_{\rm LS}$ 、 $H_{\rm PS}$ 和  $H_{\rm LT}$ 分别为 6.15 µSv/周、3.38 µSv/周、78.8 µSv/周和 0.18 µSv/周。根据(5) 式,求得  $H_{\rm C}$ 为 83.9 µSv/周,故  $H_{\rm Tot}$ 为 221 µSv/周。90°照射、U=1时治疗室入口的剂量为 336 µSv/ 周,周出束时间为 6.25 h,可估算出入口处屏蔽前的剂量率 为 53.8 µSv/h,入口处散射辐射能量取 0.2 MeV, $TVL_{0.2 \,\rm MeV,Pb}$ 为 6 mm。治疗室入口防护门为 6 mm Pb 当量时,屏蔽后门外剂 量率为 5.38 µSv/h,工作人员在防护门外的居留因子取 1/8, 加速器出束时间为 6.25 h/周,工作 50 周/年,则工作人员在 门外位置所受的剂量为 0.21 mSv/年。若防护门外剂量率按 5 μSv/h 控制,则防护门的屏蔽厚度须满足 8 mm Pb 当量。
 3 讨论

医用加速器治疗室的辐射屏蔽防护改造是一项严谨的、 系统的和专业化的工作,既要充分利用原治疗室的屏蔽结构 与材料,又要使治疗室的改造方案满足新设备的运行需要和 防护要求,同时还应尽可能为未来的发展留有余地。在该10 MV 加速器治疗室的屏蔽改造方案中,虽然是在原6 MV 加速 器治疗室屏蔽的基础上进行局部改造和优化,但实际上原6 MV 治疗室的屏蔽厚度已经充分满足 10 MV 加速器的主束和次 束屏蔽。从图2可知,治疗室屏蔽改造前后,室外围人员可 接触处关注点的屏蔽厚度并没有增加,而且从表1的剂量估 算结果也表明了采用原屏蔽厚度时,10 MV加速器在常用最 高 400 cGy/min 治疗照射时所致室外围剂量率均满足 GBZ201.1/T-2007 中的要求,人员在关注位置所受的年剂量 满足相应的管理目标值要求。同理,根据表1的结果进一步 分析出,治疗室室顶主束区外为排风机房,工作人员居留因 子小, 仅为1/16, 可取10 µSv/h 的剂量率控制目标值, 而室 顶采用了 250 cm 的砼屏蔽, 使室顶外主束区剂量率降至 1.53 μSv/h, 室顶主束屏蔽偏厚, 若将其厚度减薄 30 cm, 则估算 出该主束区部位剂量率为 9.91 µ Sv/h,也同样满足剂量率控 制目标值的要求;通过对表1中估算出的治疗室南墙和室顶 的次束区屏蔽外剂量率结果的分析,也同样可以看出其相应 部位的屏蔽过厚。但是,鉴于该治疗室的改造仅是在原有治 疗室屏蔽结构基础上的局部改造,尽量不对现有的主体屏蔽 进行拆解,否则可能造成更大的人力、物力和财力的浪费, 甚至超过新建加速器治疗室的费用。

在主屏蔽区的宽度设计与核算中,图2所示的主束屏蔽 区加宽改造方案表明,若更新的10 MV加速器等中心设置位 置保持与原加速器的位置相同,则南墙和室顶的主束屏蔽区 是不需向西侧延伸的,因为两加速器在等中心处的最大野和 主束的最大张角相同。这次改造中主要是考虑到新的 10 MV 加速器运行条件的需要,将相应治疗床的纵轴正向进行了改 变,即床纵轴由原来的"西→东"方向改为了"东→西"方 向。"西→东"方向时,加速器大机架的背面是朝西的, "东 →西"方向时则朝东,从而产生了加速器等中心点的西移。 内凸的南墙和室顶主束屏蔽在其两侧相对于等中心对称的条 件下,全宽分别不低于 320 cm 和 276 cm 即可满足要求。虽然 主束屏蔽经延伸后均达到了 400 cm,但其屏蔽的两端相对于 等中心不存在对称的关系,从图2(a)可见,等中心东侧的 主屏蔽宽度明显大于西侧,其中南侧主束墙,不向西侧延伸 时,等中心东侧宽 240 cm,西侧宽 90 cm,这样则造成西侧主 束墙相对于等中心的半宽度达不到 160 cm 的要求,所以必须 将其宽度向西侧延伸70 cm。对室顶主束屏蔽改造前也同样存 在该问题,向西侧延伸其主束宽度也是理所当然的,只是其 向西侧延伸的宽度可以减至 50 cm。

对治疗室屏蔽改造的细节问题,除基本应考虑的治疗室 通风管道、电缆地沟、设备安装所致防护墙凹陷部位的屏蔽,

以及室顶散射的屏蔽外,治疗室入口散射辐射的防护是尤为 重要的。入口既是工作人员出入治疗室而接触较多的部位, 同时也是接受治疗的患者必经之地,也可能有陪同患者的家 属(公众)接触此处,入口门的开启频率相对较高,因此入 口的防护既是难点,又是重点,在此处设置的防护门应作到 安全有效且方便实用。为了尽可能减轻防护门的负担,在不 影响设备和人员进出治疗室的前提下缩短迷路内口的宽度、 在迷路内口上端增设过梁从而缩小迷路内口面积以减少通过 迷路内口进入迷路和治疗室入口的散射辐射<sup>[10]</sup>,这些都是比 较妥当的设计方法。图 2(a) 所示的将迷路内口宽度由 330 cm 减至 220 cm,从而将迷路内口面积减至原来的 44%,自然 可以达到降低治疗室入口散射辐射水平的作用。当然,减少 防护门承重的另一个前提还必须是该处的泄漏辐射剂量份额 足够低,估算结果表明,迷路内墙的屏蔽已将治疗室入口泄 漏辐射的剂量份额降至该处总剂量的 0.2%,故该改造治疗室 的防护门设置方案不必考虑泄漏辐射的屏蔽。其他细节还包 括应考虑治疗室的面积应足以适应机器、床位的安装、维修 及利用患者与医生的活动;对增设墙体及顶板应在设计和施 工上作相应的特殊处理,不可有裂缝、气泡和蜂窝等等[11]。 总体分析表明,该加速器的治疗室屏蔽改造设计方案是可行 的,在施工中必须注意屏蔽设计的细节,保证治疗室改造的 辐射防护质量。

#### 参考文献:

- [1] Sasa Mutic , Dantel A Low , Eric E Klein , et al. Room shielding for intensity-modulated radiation therapy treatment facilities [J]. Int J Radiation Oncology Biol Phys , 2001 , 50 (1): 239-246.
- [2] 原锦,程惠华,林玉峰. 钴-60 机房改造成 6 MV 直线加速器机房 的放射防护评价 [J]. 中国辐射卫生,2005,14 (3): 197.
- [3] 马永忠,娄云,王时进,等. 医用加速器治疗室防护门的屏蔽估 算与分析 [J]. 中国自然医学杂志,2007,9 (4): 297-301.
- [4] NCRP Report No. 151. Structural Shileding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities [S]. NCRP, 2005.
- [5] IAEA Safety Reports Series No. 47. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilites [S]. IAEA, 2006.
- [6] NCRP Report No. 144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities [S]. NCRP, 2003.
- [7] GBZ/T 201.1—2007. 放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第1部分: 一般原则 [S].
- [8] GBZ/T 220.2—2009. 建设项目职业病危害放射防护评价规范 第
   2 部分: 放射治疗装置 [S].
- [9] GB18871-2002. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 [S].
- [10] Hong-Suk Kim, Ki-Won Jang, Youn-Hwan Park, et al. New empirical formula for neutron dose level at the maze entrance of 15 MV medical accelerator facilities [J]. Medical Physics, 2009, 36 (5): 1512–1519.
- [11] 张军,黄小莹,吕梅. 医用直线加速器房的设计和施工 [J]. 中山大学学报论丛,2003,23 (1): 114-118.