

18 MV 加速器调试机房防护门的屏蔽效果及其影响因素分析

张国海¹, 章斌¹, 张贵英², 马永忠³

1. 瓦里安医疗器械贸易(北京)有限公司, 北京 100176; 2. 北京市化工职业病防治院, 北京 100093;

3. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013

摘要: **目的** 研究无迷路医用直线加速器生产调试机房防护门屏蔽效果及其影响因素, 为生产调试人员放射性职业病危害防护提供指导。**方法** 以某 18 MV 医用直线加速器及其新建无迷路调试机房防护门为研究对象, 防护门屏蔽材料由内往外的排列结构为 2.5 cm 钢板 + 20 cm 铅 + 41 cm 含 5% 硼聚乙烯 + 6 cm 铅 + 2.5 cm 钢板, 防护门右侧设置有凹槽(俗称“门口袋”)搭接, 分别在不同搭接宽度、不同照射方向和加速器机座不同安装位置的条件下, 使用 FLUKE451P 和 WENDI II 中子巡检仪测试防护门外关注点的周围剂量当量率, 分析其屏蔽效果及影响因素。**结果** 当防护门两侧搭接宽度为 300 mm 时, 有“门口袋”一侧的防护门前周围剂量当量率为 $(1.37 \pm 0.05) \mu\text{Sv/h}$, 无“门口袋”一侧为 $(4.71 \pm 0.11) \mu\text{Sv/h}$ 和 $(4.19 \pm 0.11) \mu\text{Sv/h}$; 在加速器主束朝东照射时, 防护门外关注点的周围剂量当量率均高于其他主束照射方向时门外相应关注点的剂量率; 当加速器机座位于机房南侧时, 相同照射条件下防护门外关注点的周围剂量当量率低于加速器机座位于机房北侧时相应关注点的周围剂量当量率。**结论** 18 MV 加速器的无迷路调试机房, 入口防护门需要同时考虑光子和中子的屏蔽, 防护门与两侧墙体有双层搭接时, 则防护门外可达到更好的屏蔽防护效果。

关键词: 加速器机房; 无迷路; 防护门; 屏蔽效果

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2024)03-0254-06

Analysis of the shielding effect of protective door of an 18 MV linear accelerator debugging room and its influencing factors

ZHANG Guohai¹, ZHANG Bin¹, ZHANG Guiying², MA Yongzhong³

1. Varian Medical Systems Trading (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100176 China; 2. Beijing Prevention and Treatment Hospital of Occupational Disease for Chemical Industry, Beijing 100093 China; 3. Beijing Center for

Disease Control and Prevention, Beijing 100013 China

Abstract: **Objective** To study the shielding effect of the protective door of a maze-free debugging room for an 18 MV medical linear accelerator and its influencing factors, and to provide guidance for protection of debugging personal against radioactive occupational disease hazards. **Methods** The investigation focused on the protective door of a newly constructed maze-free debugging room for an 18 MV medical linear accelerator. The protective door was made of the following shielding materials from inside to outside: 2.5 cm steel plate + 20 cm lead + 41 cm polyethylene containing 5% boron + 6 cm lead + 2.5 cm steel plate. The right side of the protective door was provided with a groove (commonly known as “door pocket”) lap. With different lap widths, irradiation directions, and installation positions of the accelerator base, FLUKE451P and WENDI II neutron detectors were used to measure the ambient dose equivalent rate of the points of interest outside the protective door. The shielding effect and influencing factors were analyzed. **Results** When the lap width at both sides of the protective door was 300 mm, the ambient dose equivalent rates outside the protective door were $(1.37 \pm 0.05) \mu\text{Sv/h}$ on the side with “door pocket” and (4.71 ± 0.11) and $(4.19 \pm 0.11) \mu\text{Sv/h}$ on the side without “door pocket”. When the primary beam of the accelerator was directed towards the east, the ambient dose equivalent rates at the points of interest outside the protective door were higher than those of the corresponding points of interest when the primary beam was directed towards other directions. When the accelerator base was located on the south side of the machine room, the ambient dose equivalent rates of the points of interest outside the protective door under the same irradiation conditions were lower than those when

the accelerator base was located on the north side of the machine room. **Conclusion** The study of an 18 MV accelerator and its maze-free debugging room showed that the radiation of photons and neutrons should be taken into consideration when designing the protective door at the entrance. The protective door with shiplaps on both sides of the wall has improved shielding effect outside the door.

Keywords: Accelerator room; Maze-free; Protective door; Shielding effect

Corresponding author: MA Yongzhong, E-mail: myz0905@126.com

医用直线加速器是目前肿瘤治疗的重要手段之一^[1-3],近年来应用医用电子直线加速器治疗肿瘤的工作飞速发展,加速器生产企业也进入了快速发展时期。由于加速器运行时产生的电离辐射能量较高、强度较大,对周围工作人员、公众及环境具有较大的辐射安全风险^[4-6],可靠的辐射屏蔽设计和施工工艺是保障辐射安全、控制潜在风险的必要措施^[7-8]。大量的加速器机房的辐射屏蔽实践表明,加速器机房入口采用“迷路”方式进行设计及施工都相对成熟,而对加速器生产企业而言,由于设备出入需要,难以采用“迷路”设计,导致这类机房防护门的辐射屏蔽压力远高于有迷路的机房,这对机房门屏蔽体外辐射水平的控制和辐射防护最优化的实现提出了较大的挑战。笔者以某新建无迷路医用电子直线加速器调试机房为例,聚焦影响屏蔽效果的防护门搭接宽度、射束方向、机座安装方向等因素,通过对不同条件下的屏蔽效果进行验证检测,分析防护门屏蔽效果与各关键因素的关系,旨在为优化防护门设计、安装与调试提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 辐射源及场所 辐射源为 1 台 18 MV 医用电子直线加速器,在 X 射线 18 MV 下距离靶 1 m 等中心处的最大辐射剂量率 6 Gy/min;等中心处最大辐射野 40 cm × 40 cm;在距离靶 1 m 处辐射泄漏率不高于 0.1%。该加速器所在的机房为专用调试机房,为地上单层建筑,无迷路,防护门外左侧邻近工作台,图 1 为机房平面布局及射线束路径示意图。该加速器调试机房东西主束墙体为 181 cm 砼 + 35 cm 钢板、南北防护墙为 155 cm 砼、室顶主束和次束区屏蔽分别为 244 cm 砼和 137 cm 砼,防护门屏蔽材料由内往外的排列结构为 2.5 cm 钢板 + 20 cm 铅 + 41 cm 含 5% 硼聚乙烯 + 6 cm 铅 + 2.5 cm 钢板,设置于机房北侧,防护门的底部与地面搭接,右侧(西侧)有凹槽(俗称“门口袋”),左侧(东侧)、上侧与屏蔽墙直接搭接,防护门与屏蔽体左、上、右搭接设计均为 300 mm。

工作台右后方有电缆沟,左后方有检修门,检修门设有联锁,内部为控制区,加速器运行时无人在检修区内驻留。

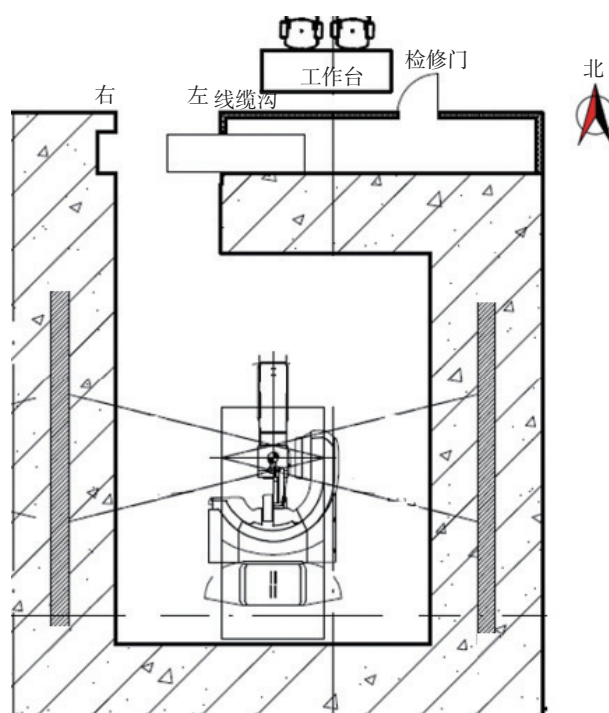


图 1 加速器机房平面布局及射线束路径示意图

Figure 1 Schematic diagram of linear accelerator room layout and beam direction

1.2 方法

1.2.1 检测仪器与测试指标 考虑到 X 射线高于 10 MV 的电子加速器运行时机房内同时会产生中子^[9-10],使用美国 FLUKE 公司生产的 451P 型高压电离室巡测仪和美国热电公司生产的 WENDI II 型中子剂量当量率仪。检测仪器均经国家法定计量部门检定/校准合格,并在检定/校准的有效期内使用。

1.2.2 测试条件 在加速器 18 MV X 射线、最大剂量率 6 Gy/min 和最大照射野 40 cm × 40 cm 条件下,分别测量防护门与门框墙体不同搭接宽度、主束不同照射方向和加速器机座不同安装方向时防护门外关注点的 X/γ 射线周围剂量当量率和中子剂量当量率,分别以 γ 和 n 表示,测量时在有用线束区域内不放置模体。检测关注点包括防护门外前表面、防护门旁侧的工作台后方、防护门旁侧的检修门前表面及线缆沟

处。鉴于加速器 18 MV X 射线在最小照射野时具有最大的中子产额, 测量最小照射野和最大照射野时防护门前表面的中子剂量当量率, 并求出两者之比。

1.3 评价依据 设定加速器防护门外周围剂量当量率控制值为 $2.5 \mu\text{Sv/h}$, 其屏蔽方案及屏蔽效果评价依据 NCRP Report No.51^[11]、NCRP Report No.151^[12] 和 GBZ 121—2020《放射治疗放射防护要求》、GBZ/T 201.1—2007《放射治疗机房的屏蔽规范 第 1 部分: 一般原则》、GBZ/T 201.2—2011《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分: 电子直线加速器放射治疗机

房》等^[13-15] 相关技术标准。

2 结 果

2.1 防护门与门框墙体不同搭接宽度时防护门外关注点的周围剂量当量率 加速器机座位于北侧时, 将防护门按照 10 mm/次的频率平行移动以调整防护门右侧与“门口袋”的搭接宽度, 通过限位开关控制防护门的运动, 将其移动到需要设置的具体位置, 在主束向下照射时测量防护门前右侧和左侧关注点的周围剂量当量率, 其中防护门前右侧周围剂量当量率测试结果见表 1。

表 1 防护门与“门口袋”墙体不同搭接宽度时防护门前右侧关注点的周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

Table 1 Ambient dose equivalent rates of points of interest at the right side of the protective door with different lap widths between the protective door and door pocket

防护门前右侧搭接宽度/mm	γ	n	$\gamma + n$	γ/n
300	0.84 ± 0.03	0.53 ± 0.03	1.37 ± 0.05	1.60
267	0.66 ± 0.02	1.50 ± 0.02	2.16 ± 0.03	0.44
257	0.82 ± 0.04	1.14 ± 0.05	2.29 ± 0.08	0.55
247	0.84 ± 0.03	1.79 ± 0.04	2.64 ± 0.06	0.47

表 1 中的检测结果均含现场环境本底 $0.09 \sim 0.12 \mu\text{Sv/h}$ 。从表 1 可见, 防护门与右侧门框墙体搭接宽度为 300 mm 时, 门外右侧周围剂量当量率最低, 随着防护门右侧搭接宽度递减, 防护门前右侧周围剂量当量率递增, 当右侧搭接宽度为 247 mm 时, 防护门前右侧的周围剂量当量率超过设计值 $2.5 \mu\text{Sv/h}$; 当右侧搭接宽度为 257 mm 时, 该处的周围剂量当量率为 $2.29 \mu\text{Sv/h}$, 但接近 $2.5 \mu\text{Sv/h}$; 当右侧搭接宽度为 267 mm 时, 该处的周围剂量当量率为 $2.16 \mu\text{Sv/h}$, 降低较明显。测量中发现, 虽然右侧“门口袋”搭接 300 mm 时门右侧剂量率最低, 但此时门左侧旁的工作台位置的周围剂量当量率达到 $(4.71 \pm 0.11) \mu\text{Sv/h}$, 均超过 $2.5 \mu\text{Sv/h}$; 而在搭接宽度为 267 mm 时, 防护门前其他各关注点的周围剂量当量率均不大于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$, 符合相关控制指标的要求, 同时将防护门与右侧“门口袋”搭接宽度为 267 mm 作为加速器调试出束时防护门的合适搭接宽度。

2.2 加速器主束不同方向照射时防护门外关注点的周围剂量当量率 加速器机座分别位于机房北侧和南侧, 在主束分别朝下, 朝西和朝东照射条件下, 防护门外关注点的周围剂量当量率见表 2。从表 2 可见, 加速器机座位于机房北侧的条件下, 在主束朝东照射时, 防护门外关注点的周围剂量当量率均高于其

他主束照射方向时的剂量率, 主要原因是此时加速器机头与防护门的距离最近。同时从表 2 可知, 当加速器机座位于机房南侧、主束朝东和主束朝下照射时防护门关注点的周围剂量当量率, 与加速器机座位于机房北侧、同条件下照射时相应关注点的周围剂量当量率相比, 均有所降低, 其中主束朝东照射时, 防护门外左侧的工作台左后位置的剂量率和线缆沟位置的剂量率分别由 3.26 和 $2.80 \mu\text{Sv/h}$ 降低到 2.23 和 $2.31 \mu\text{Sv/h}$ 。为比较不同照射野条件下门外中子产额, 测量出主束朝下照射时最小照射野和最大照射野条件下防护门前表面的中子剂量当量率平均值之比为 $12:7$, 虽然加速器均是在打开照射野时进行调试, 但该比值也充分说明了应重视 18 MV 加速器小野调试时的中子防护。

3 讨 论

通常来说, 当加速器调试机房内的辐射源项不变时, 防护门外及其旁侧区域的周围剂量当量率主要取决于 3 个因素, 即防护门屏蔽结构与厚度、门缝大小, 以及防护门与门框屏蔽墙体的搭接宽度。该加速器调试机房为无迷路的机房, 防护门的屏蔽结构及其厚度依据最高 18 MV 的加速器辐射源项进行了设计, 并给予了足够的保守因素, 确保了防护门体及防

表 2 加速器主束不同方向照射时防护门外关注点的周围剂量当量率 (μSv/h)

Table 2 Ambient equivalent dose rates of points of interest outside the protective door with different primary beam directions

加速器机座位置	关注点	主束朝下			主束朝西			主束朝东		
		γ	n	γ+n	γ	n	γ+n	γ	n	γ+n
北侧	防护门前右侧	0.67±0.02	0.94±0.01	1.61±0.02	0.74±0.03	1.28±0.01	2.01±0.04	0.84±0.04	1.47±0.02	2.30±0.03
	防护门前中间	0.78±0.06	1.04±0.02	1.82±0.04	-	-	-	0.97±0.03	1.46±0.06	2.43±0.06
	防护门前左侧	0.72±0.03	0.87±0.01	1.59±0.02	-	-	-	0.85±0.01	1.49±0.03	2.34±0.02
	工作台左后	1.15±0.07	1.01±0.01	2.16±0.06	1.07±0.05	0.82±0.02	1.90±0.05	1.57±0.02	1.69±0.28	3.26±0.30
	检修门前	0.57±0.07	0.40±0.01	0.96±0.07	-	-	-	0.75±0.03	0.75±0.01	1.49±0.04
	线缆沟	0.80±0.03	1.39±0.06	2.19±0.08	0.84±0.02	1.32±0.07	2.16±0.08	1.23±0.04	1.57±0.03	2.80±0.05
南侧	防护门前右侧	0.69±0.04	0.97±0.01	1.66±0.03	-	-	-	0.66±0.02	1.50±0.02	2.16±0.03
	防护门前中间	0.70±0.02	0.95±0.01	1.66±0.02	-	-	-	0.73±0.01	1.14±0.02	1.86±0.01
	防护门前左侧	0.55±0.02	0.92±0.02	1.47±0.04	-	-	-	0.75±0.03	0.87±0.01	1.62±0.03
	工作台左后	0.91±0.04	0.62±0.01	1.54±0.05	-	-	-	1.08±0.03	1.15±0.03	2.23±0.04
	检修门左前	0.50±0.02	0.29±0.01	0.79±0.01	-	-	-	0.59±0.03	0.31±0.01	0.90±0.03
	线缆沟	0.74±0.10	0.65±0.01	1.39±0.10	-	-	-	0.91±0.04	1.41±0.09	2.31±0.06

护门旁侧屏蔽墙体的屏蔽厚度满足加速器最高出束调试条件下产生的光子杂散辐射、中子及中子俘获 γ 射线等的防护要求^[4, 16-17], 所以防护门外关注点辐射水平大小及其来源的影响因素应集中在门缝和门的搭接宽度。

对于门缝尺寸、防护门与屏蔽体搭接宽度的控制, 应保证无迷路机房防护门的安装精度, 使防护门与屏蔽体之间的缝隙严格限制在一定尺寸之内, 其难度比有迷路的机房防护门安装和验证难度要大得多。对于无迷路的加速器调试机房, 防护门的门缝与墙体搭接宽度之比没有明确的规定, 而对于设置有迷路的加速器机房防护门的设计时, 为有效减少门来自于透过门缝的杂散辐射, 要求防护门体与门框墙体搭接宽度不低于 10 倍门缝宽度^[11, 16]。实践中往往受施工及防护门安装位置条件的限制, 很可能在初始安装位置无法一次性通过防护门屏蔽效果的验证。该加速器调试机房防护门与右侧“门口袋”墙体和左侧墙体搭接时的门缝均为 10 mm, 初始设计为防护门与左右两侧墙体搭接宽度均为 300 mm, 左侧和右侧的搭接宽度与门缝之比均为 30:1, 远高于 10:1。从表 1 可知, 虽然防护门右侧搭接宽度为 300 mm 达到了 10:1 的搭接宽度与门缝之比, 保证了防护门外右侧关注点的辐射水平在控制值以内, 但是防护门左侧旁关注位置辐射水平超过了控制指标, 关键是左侧防护门与墙体只有一个搭接缝, 从而使得门的左侧尾部泄

漏辐射较大, 而防护门右侧设置有“门口袋”, 防护门与墙体实质上是双层搭接。“门口袋”设计, 可以适当缩小屏蔽搭接宽度, 而门左侧只有单缝搭接处则为防护门的屏蔽薄弱环节, 为此调整防护门左右两侧的搭接宽度, 使得左侧搭接宽度略多于右侧, 正好在设置为防护门右侧搭接宽度 267 mm、左侧搭接宽度 333 mm 时, 虽然防护门外右侧关注点辐射水平略有升高, 但此时明显降低了左侧关注点的辐射水平, 防护门外区域各关注点的周围剂量当量率均满足了控制指标的要求。该验证结果也表明, 对于无迷路机房的防护门, 参考 10 倍门缝的搭接宽度显然是不足的, 建议在门缝 5 mm 时搭接宽度不低于 300 mm, 从放射防护的角度是可行的。当然, 防护门搭接处的墙面垂直度和平整度也会影响防护门的门缝宽度, 进而造成门外过多的辐射泄漏, 因此施工过程中同时需要关注所有与防护门搭接处的屏蔽墙面平整度和垂直度, 以确保门缝可相对容易的调整到设计宽度, 也可以使搭接区域的各个位置都有均匀一致的宽度, 以免影响防护门搭接部位的屏蔽效果。同时应注意, 当门缝降低到一定程度后, 工程上的难度大大增加, 而搭接宽度对防护门两侧是此消彼长的关系, 不能向一边无限制的移动。从工程实践角度, 当门缝宽度和搭接长度已经很难调整时依然无法满足验收要求时, 可通过增加适当的补偿屏蔽以有效降低调试机房入口处的辐射水平。从表 1、表 2 可方便计算出 γ 与 n 的比值, 而且通

过比值分析表明,防护门外多数关注点周围剂量当量率以中子成分占比较大,而且同时产生中子俘获 γ 射线,所以对于这种 X 射线高于 10 MV 的电子加速器无迷路的调试机房,优先降低入口防护门外中子剂量率是可取的,可以在防护门内侧采取适当的中子屏蔽补偿措施,确保在有效实现中子和光子复合周围剂量当量率降低时,也不会对运维带来较大的困难。

另外不可忽视的是,在相同照射参数时,主束照射方向和加速器机座安装位置等是影响防护门入口辐射水平的直接因素。结合图 1 可知,加速器主束朝东照射时,实际上是缩短了加速器机头与防护门的距离,18 MV 加速器产生的直射中子更容易到达防护门入口,必然增加防护门外的周围剂量当量率,从而增加了防护门的负担,这时也是防护门所处屏蔽的最不利条件;机座安装方向不同,防护门入口处的辐射水平也会有明显的差别,与加速器的结构及其本身的自屏蔽设计有一定关系。表 2 给出了在加速器等中心点位置不变的情况下,加速器机座设置于机房南侧时,防护门外关注点的辐射水平低于机座设置于北侧时的辐射水平,从加速器本身的结构来看,虽然加速器的靶点和等中心点在机座位于机房南侧和北侧两种不同位置时相同,但是从这种高能加速器的结构可知,加速器机座设置于北侧时,加速器机架内部的电子轨道则更接近于入口防护门的位置,可能与此有关。

总体分析表明,18 MV 加速器的无迷路调试机房,入口防护门需要同时考虑光子和中子的屏蔽,防护门外关注点的周围剂量当量率水平受加速器照射条件、防护门结构屏蔽、门缝与搭接宽度、主束照射方向和加速器机座安装位置等因素的影响。防护门入口一侧墙体设置有“门口袋”时实质上为双层搭接,对防护门外可达到更好的屏蔽防护效果。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 张国海负责研究方案设计,数据测试方案设计及指导,测试指导,论文撰写及数据分析工作;章斌负责数据测试及采集工作;张贵英参与文献调研与整理,参与文章方案梳理;马永忠负责文章结构设计、撰写及修改指导

参考文献

- [1] 李春霞,任福琴,罗文,等.医用直线加速器临床应用评价及数据平台搭建[J].中国医学装备,2019,16(3):112-116. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2019.03.030.
- [2] 王武,李旭浩,金献测.医用直线加速器机房迷路改进设计研究[J].中国医学物理学杂志,2019,36(5):501-505. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2019.05.002.
- [3] 董硕,张文龙,白玫,等.具有非均整模式的医用直线加速器机房放射防护设计与效果分析[J].中国医学装备,2021,18(10):36-40. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2021.10.009.
- [4] 许志强,耿继武,贾育新,等.医用电子直线加速器治疗机房入口辐射剂量分析[J].中国辐射卫生,2022,31(6):663-668. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.06.004.
- [5] 原雅艺,左雅慧.放射治疗诱导的二次原发肿瘤的研究进展[J].中国辐射卫生,2019,28(2):209-213. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.02.026.
- [6] 郎锦义.中国放疗三十年回顾、思考与展望[J].肿瘤预防与治疗,2017,30(1):1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0904.2017.01.001.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. HJ 1198—2021 放射治疗辐射安全与防护要求[S].北京:中国环境科学出版社,2021.
- [8] 杨勇,曾利萍,马国学,等.10 MV 医用直线加速器防护门外辐射剂量简易估算模式[J].中国医疗设备,2021,36(4):173-176,185. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2021.04.040.
- [9] 王志斌,吕杨阳,张洋,等.15MV 高能电子直线加速器机房屏蔽理论计算和防护效果验证对比研究[J].医疗卫生装备,

- 2018, 39(8): 43-46,50. DOI: [10.7687/j.issn1003-8868.2018.08.043](https://doi.org/10.7687/j.issn1003-8868.2018.08.043).
- Wang ZB, Lü YY, Zhang Y, et al. Comparative study on theoretical calculation and protection effect verification of door shielding for 15MV high energy electron linear accelerator room[J]. *Chin Med Equip J*, 2018, 39(8): 43-46,50. DOI: [10.7687/j.issn1003-8868.2018.08.043](https://doi.org/10.7687/j.issn1003-8868.2018.08.043).
- [10] 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.
- Ma YZ, Lou Y, Wang SJ, et al. Calculation and analysis on the shielding of protective door of the room of medical accelerator[J]. *Chin J Nat Med*, 2007, 9(4): 297-301.
- [11] NCRP Report No. 51. Radiation protection design guidelines for 0.1-100 MeV particle accelerator facilities[R]. 1977: 68-72.
- [12] Deye JA, Rodgers JE, Wu RK, et al. NCRP Report No. 151. Structural shielding design and evaluation for megavoltage X-and gamma-ray radiotherapy facilities[R]. 2005: 84-89, 47-51.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 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]. 北京: 人民卫生出版社, 2007.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GBZ/T 201.1—2007 Radiation shielding requirements in room of radiotherapy installations. Part 1: General principle[S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2007.
- [14] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GBZ 121—2020 放射治疗放射防护要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- National Health Commission of the People's Republic of China. GBZ 121—2020 Requirements for radiological protection in radiotherapy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [15] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 201.2—2011 放射治疗机房的辐射屏蔽规范 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.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GBZ/T 201.2—2011 Radiation shielding requirements for radiotherapy room. Part 2: Radiotherapy room of electron linear accelerators[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [16] Patton H. McGinley, Direct Shield Doors, Radiation Protection Management. November/December. 2001: Volume 18, No6, 21-29.
- [17] 贾斌, 朱建国, 杨淑慧, 等. 医用电子直线加速器感生放射性的测量和分析[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30(5): 592-596. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.014](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.014).
- Jia B, Zhu JG, Yang SH, et al. Measurement and analysis of induced radioactivity in medical electronic linear accelerator[J]. *Chin J Radiol Health*, 2021, 30(5): 592-596. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.014](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.014).

(收稿日期: 2023-11-05)