

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.003

# 恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计

吴青彪<sup>1,2</sup>, 彭毅<sup>3</sup>, 王庆斌<sup>1,2</sup>, 周斌<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所 东莞分部, 东莞 523803; 2. 东莞中子科学中心, 东莞 523808;  
3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 恒健质子治疗装置(HJPMF)是广东省在建的首台质子治疗装置。为确保该装置的辐射安全,采用经验公式计算和蒙特卡洛程序模拟两种方法,对该装置的瞬发辐射和感生放射性进行了计算分析,并按剂量限值对原屏蔽结构进行了优化设计。结果表明:装置的原屏蔽结构基本满足瞬发辐射防护要求,外混凝土屏蔽墙厚度可充分利用土壤屏蔽优化替换以节省成本,部分迷宫和屏蔽墙的厚度可进行优化;加速器室部件和治疗室病人的感生放射性剂量率较大,需严格管理。研究表明了经验公式和 FLUKA、MCNPX 程序都用来对质子治疗装置进行辐射防护设计,但在面对复杂结构和涉及感生放射性问题时,蒙特卡洛程序更为适用。

**关键词:** 质子; FLUKA; 剂量; 屏蔽; 感生放射性

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0016-07

## Radiation and Shielding Design of Hengjian Proton Medical Facility

WU Qingbiao<sup>1,2</sup>, PENG Yi<sup>3</sup>, WANG Qingbin<sup>1,2</sup>, ZHOU Bin<sup>1,2</sup>

(1. China Spallation Neutron Source (CSNS), Institute of High Energy Physics (IHEP), Chinese Academy of Sciences (CAS), Dongguan 523803, China; 2. Dongguan Institute of Neutron Science (DINS), Dongguan 523808, China;  
3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Hengjian Proton Medical Facility (HJPMF) is the first proton therapy device being built in Guangdong province. To ensure the radiation safety of HJPMF, two methods of empirical formulas calculation and Monte Carlo codes simulation were used to calculate and analyze its prompt radiation and induced radioactivity, and optimization design for its original shielding structure was conducted according to dose limit. The results shown that, the original shielding structure basically satisfies the requirement of shielding prompt radiation, but the thickness of outer concrete wall can be optimized and decreased greatly by soil shielding to save cost, and the thickness of several mazes and shielding walls can be optimized. The results also shown that, the induced dose rates from components in cyclotron room and from patients in treatment room are comparatively large and should be governed strictly. The research proved that both the empirical formulas and FLUKA or MCNPX code can be used to shielding design for proton medical facility, but the Monte Carlo codes are more suitable to the situations with sophisticated structure and induced radioactivity.

**Key words:** proton; FLUKA; dose; shielding; induced radioactivity

恒健质子治疗装置(Hengjian Proton Medical Facility, HJPMF)是在广州建设的广东省第一台质子治疗装置,包括回旋加速器、能选系统、束流传输线和治疗室几部份。其中,回旋加速器和能选系统均位于加速器室内,治疗室包括3个旋转治疗室和2个固定治疗室<sup>[1-2]</sup>。图1给出了采用

SimpleGeo<sup>[3]</sup>软件绘制的HJPMF束流平面的结构图。

HJPMF的主要加速器部件和系统由回旋加速器的制造商IBA公司提供,少量由建设单位自主研发。HJPMF的束流工艺流程为<sup>[1-5]</sup>:首先由回旋加速器C230引出能量230 MeV的质子束流,该质子束流经能选系统降能和准直后,获得能量在130~230 MeV之间、束流截面满足治疗要求的质子束流,经束流传输线输送到其中一个治疗室,对患者进行治疗。HJPMF只采用铅笔束扫描(pencil beam scanning, PBS)的治疗模式,因此,没有治疗头和

收稿日期: 2016-08-09

基金项目: 中国能建广东院防辐射建筑关键技术项目资助(EV03541)

作者简介: 吴青彪(1975),男,湖南古丈人,副研究员,博士,主要从事加速器辐射防护研究的工作(e-mail) qbwu@ihep.ac.cn.

光栏的束流损失,进入治疗头的束流 100% 损失在患者身上。

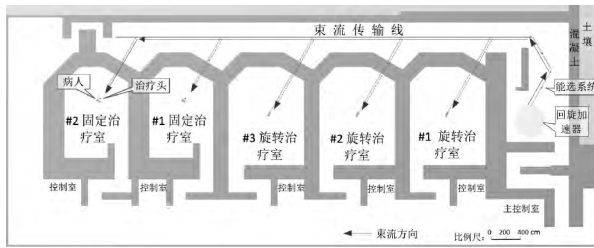


图1 HJPMF束流平面的结构

Fig. 1 Structure of HJPMF at its beam plane

对辐射防护设计来说,辐射源项是关键,通过多次深入探讨束流损失方式和治疗计划<sup>[4-5]</sup>,最后确定了HJPMF的辐射源项,如表1所示<sup>[1-2]</sup>。由图1和表1可以看出,HJPMF既有线损、又有点损;既有治疗时在回旋加速器、降能器、准直器、狭缝、束流线和患者的连续束流损失,又有调束时在各个束流阻止器 (beam stop) 上的短暂损失。因此,在进行辐射防护设计时,既要考虑点损模型,又要考虑线损模型;既要考虑剂量率的防护要求,又要考虑年累积剂量的防护要求。

## 1 设计依据

HJPMF的辐射防护设计依据《放射性污染防治法》、《环境保护法》、《职业病防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)等法律法规和国家标准,并按辐射防护最优化原则进行设计。

### 1.1 剂量管理限值

HJPMF对放射工作人员和公众的剂量管理限值分别取《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)规定的基本限值的1/4和1/10,即分别取5.0 mSv/a和0.1 mSv/a。

### 1.2 屏蔽设计的剂量率限值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)、《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-1985)和《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第1部分:一般原则》(GBZT 201.1-2007)的要求,对HJPMF的屏蔽设计各处剂量当量率限值如表1所示:

1) 辐射区(加速器室、束流传输线和治疗室)外

全居留工作场所表面剂量率小于2.5  $\mu\text{Sv/h}$ 。

2) 辐射区外部分居留的迷宫入口剂量率小于10  $\mu\text{Sv/h}$ 。

## 1.3 区域划分

HJPMF进行分区管理,其控制区属于放射性工作场所,包括加速器室、束流传输线、旋转治疗室、固定治疗室等,年剂量远大于5.0 mSv/a,平均剂量率远大于2.5  $\mu\text{Sv/h}$ ;其监督区属于非放射性区域,包括加速器室外的主控制室、各治疗室的控制室、所有迷宫联锁门外的过道等,年剂量小于5 mSv/a,平均剂量率小于2.5  $\mu\text{Sv/h}$ 。

场址边界: HJPMF产生的辐射对场址边界的剂量贡献不超过0.1 mSv/a。

## 2 计算和设计方法

### 2.1 瞬发辐射和屏蔽设计的计算方法

HJPMF的瞬发辐射和屏蔽设计,以蒙特卡洛程序FLUKA<sup>[6-7]</sup>的计算结果为主,同时使用了经验公式和MCNPX程序进行对比验证。

采用的经验公式中,屏蔽厚度采用Tesch公式计算<sup>[8]</sup>,涉及的各能量点的剂量当量和衰减长度由FLUKA程序模拟和通过中子产额与质子能量的平方成正比的关系换算得到;迷宫计算采用NCRP-144号报告推荐的计算公式估算<sup>[9-10]</sup>;天空反散射计算采用Stapleton公式计算<sup>[11]</sup>。

### 2.2 感生放射性的计算方法

HJPMF的感生放射性,采用蒙特卡洛程序FLUKA精确计算,结合Gollon经验法则<sup>[9]</sup>、活化公式进行估算和验证。

## 3 FLUKA计算模型和方法

用FLUKA程序计算HJPMF的感生放射性,采用了3种模型和方法:

1) 对长期运行情况,取连续运行100 d考虑,分析具体部件的放射性核素活度,以及停机4 h后各辐射区的剩余剂量率,评估对设备进行检修可能受到的剩余剂量。

2) 对治疗室,由于治疗需要,在病人2 min短时照射结束后,需要摆位技术人员及时进入解除摆位和对下一个病人进行摆位,期间间隔30 min。因此,计算分析了2 min短时治疗的病人感生放射性和长期治疗的治疗室部件的饱和感生放射性的影响。

表 1 恒健质子治疗装置的辐射源项

Tab. 1 Source terms of HJPMF

装置	源项位置	质子能量/MeV	束流损失率/%	损失工作量/(nA·h)	靶材	损失频率	年损失总时间/h	平均损失流强/nA	说明		
回旋加速器	加速过程	150 ~ 230	20	52 669. 17	Fe/Cu/Al	连续	4 800	10. 97	年总工作量		
	引出点	230	40	105 338. 35	Fe/Cu/Al	连续		21. 95	263 376. 45 nA. h		
	引出到降能器	230	5	5 266. 92	Fe	连续		1. 10	—		
能选系统	降能器	230	0. 00	0. 00	Be/C/Al	连续		265. 39	0. 00	降能到 230 MeV	
			1. 43	88. 51				296. 87	0. 30	降能到 210 MeV	
			6. 40	636. 61				476. 93	1. 33	降能到 180 MeV	
			10. 39	3 285. 35				1 517. 06	2. 17	降能到 160 MeV	
			17. 24	8 063. 41				2 243. 76	3. 59	降能到 130 MeV	
	降能器上的 beam stop(峰值)	230	100	1 250. 00	Ni	5 min/周	4. 17	300	每周束流调试		
	降能器上的 beam stop(常规)	230		450. 00		小于 30 min/d				150. 00	3
	准直器	230	100	24. 30	1 344. 50	Ta	连续		265. 39	5. 07	—
				53. 85	3 285. 36				296. 87	11. 07	
				77. 81	7 241. 14				476. 93	15. 18	
				85. 41	24 206. 68				1 517. 06	15. 96	
				91. 15	35 288. 65				2 243. 76	15. 73	
	发散狭缝 + 动量狭缝	230	100	88. 11	3 690. 46	Ni	连续		265. 39	13. 91	—
				85. 93	2 419. 20				296. 87	8. 15	
				83. 15	1 717. 33				476. 93	3. 60	
				78. 59	3 250. 31				1 517. 06	2. 14	
				79. 52	2 724. 60				2 243. 76	1. 21	
	发散狭缝后的 beam stop	230	100	789. 10	789. 10	Ni	小于 10 min /d	50. 00	15. 78	—	
				474. 17	474. 17				9. 48		
				216. 53	216. 53				4. 33		
136. 31				136. 31	2. 73						
76. 35				76. 35	1. 53						
束流传输线	束线点(平均) + 沿束线分布	230	6	29. 88	Fe	连续		265. 22	0. 113	损失在磁铁 + 均匀损失	
				23. 77				296. 27	0. 080		
				20. 88				477. 49	0. 044		
				53. 13				1 518. 23	0. 035		
				42. 10				2 242. 79	0. 019		
	束线点(峰值)	230	100	0. 13	Fe	5 s /d 1 d/周	0. 07	1. 88	束流突然丢失		
				0. 09				1. 34			
				0. 05				0. 73			
				0. 04				0. 58			
				0. 02				0. 31			
	各治疗室入口的 beam stop	230	100	0. 12	Ni	5 s /d 1 d/周	0. 07	1. 76	—		
				0. 09				1. 26			
				0. 05				0. 69			
				0. 04				0. 55			
				0. 02				0. 29			
各治疗室	束线点(平均) + 沿束线分布	230	6	5. 62	Fe	连续		53. 08	0. 106	—	
				4. 47				59. 37	0. 075		
				3. 93				95. 39	0. 041		
				9. 99				303. 41	0. 033		
				7. 91				448. 75	0. 018		
	束流运输线到治疗头, 束线点(峰值)	230	100	0. 12	Fe	5 s /d 1 d/周	0. 07	1. 76	—		
				0. 09				1. 25			
				0. 05				0. 69			
				0. 04				0. 55			
				0. 02				0. 29			
	患者(铅笔束扫描模式)	230	100	88. 00	人体组织	连续		53. 08	1. 66	88. 00	
				70. 00				59. 37	1. 18	70. 00	
				61. 50				95. 39	0. 64	61. 50	
				156. 50				303. 41	0. 52	156. 50	
				124. 00				448. 75	0. 28	124. 00	

注: (1) 患者治疗时, 瞬时流强在平均流强上下波动: 瞬时流强峰值 ~ 8 nA, 但每次 2 min 治疗时间里的平均流强控制在 1. 66 nA 内;  
 (2) 采用图中标为阴影的平均流强和 230 MeV 能量保守计算。

3) 对混凝土、空气、冷却水、土壤和地下水的感生放射性和有害气体的产生, 采用束流传输线的隧道结构, 参照文献 [12], 构建了图 2 所示的简化模型进行计算。各辐射区结构和源项对计算结果的差异通过瞬发辐射或束损流强与计算结果间的比例关系进行换算。

### 3.1 空气活化计算

空气活化计算, 首先采用 FLUKA 程序按图 2 的简化模型计算出静态(不通风)的核素饱和浓度, 再计算出动态(每小时通风 1 次)的各核素的饱和浓度及其与豁免浓度的比值、年排放量; 考虑到空气活化泄漏和排放会分别对工作场所的工作人员和周围环境的公众产生照射, 采用 ICRP68 报告<sup>[13]</sup>、FGR12 报告<sup>[14]</sup>给出的空气吸入剂量转换因子和空气浸没剂量转换因子、地面沉积剂量转换因子, 将活度浓度转化成各种照射途径产生的剂量。其中, 空气扩散到周围环境采用了高斯扩散模型<sup>[12, 15]</sup>结合气象参数进行编程计算。

### 3.2 冷却水活化计算

冷却水活化计算, 首先采用 FLUKA 程序按图 2 的简化模型计算出静态(不流动)的核素饱和浓度, 再参照文献 [16], 按有支路的再循环流动模式计算。

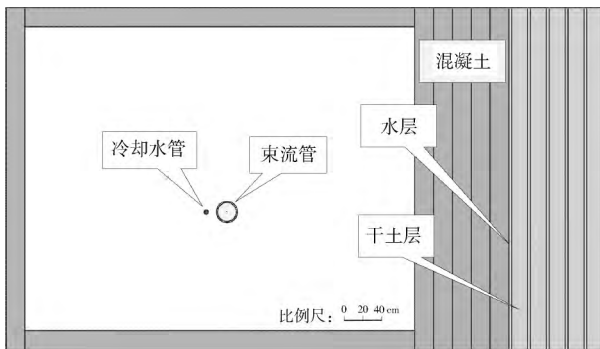


图 2 计算 HJPMF 感生放射性的蒙特卡洛几何模型  
Fig. 2 Monte Carlo geometrical model of calculating the induced radioactivity of HJPMF

## 4 计算和设计结果

### 4.1 瞬发辐射和屏蔽设计

#### 4.1.1 年累积剂量分布

经计算, 采用图 1 的屏蔽结构, 无论剂量率还是年剂量, 都满足管理目标值。图 3 给出了 HJPMF 的年累积剂量分布。

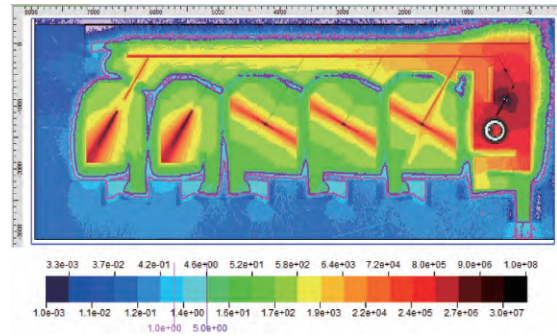


图 3 恒健质子治疗装置的年累积剂量分布(单位: mSv/a)  
Fig. 3 Annual dose distribution of HJPMF (unit: mSv/a)

#### 4.1.2 对原屏蔽结构的优化

计算结果表明, 装置的原屏蔽结构基本满足防护要求, 但原屏蔽结构的加速器室和束流传输线的外墙混凝土厚度分别达 4 m 和 3 m, 是按外墙外面有人群来设计的, 而 HJPMF 是建在地下, 因此, 设计中, 利用土壤屏蔽替换了大部分混凝土屏蔽以节省成本, 将加速器室和束流传输线的外墙混凝土厚度分别优化到 1.5 m 和 1 m, 该混凝土墙厚度可将混凝土与土壤边界的瞬发辐射的剂量率屏蔽到 < 1 mSv/h, 小于文献 [17 - 19] 中 5.5 mSv/h 的土壤活化的剂量率限值。此外, 对原建筑结构中少量屏蔽薄弱和可以优化的地方进行了加强和优化。

#### 4.1.3 蒙卡程序 FLUKA 与 MCNPX 之间、FLUKA 与经验公式之间的计算结果对比

计算结果表明, 在#2 固定治疗室的迷宫入口处, FLUKA 与 MCNPX 程序全按 230 MeV 保守计算得到的结果分别为 0.513 mSv/a 和 0.622 mSv/a, 相差不到 20%, 符合得非常好; MCNPX 按实际能量点计算结果为 0.308 mSv/a, 保守计算结果为按实际能量点计算结果的 2 倍。

对关键位置的 FLUKA 程序与经验公式的计算结果对比分析表明, 二者大部分在 2 倍以内相符, 相对而言, 经验公式的计算结果更为保守。同时, 有部分源项因结构复杂, 难以按经验公式简化, 经验公式与 FLUKA 程序的计算结果间存在最多 7 倍的差异。此时, 应认为不适合采用经验公式计算, 计算结果以蒙卡程序 FLUKA 的计算结果为依据。

### 4.2 感生放射性

#### 4.2.1 长期运行的剩余剂量率分布

图 4 给出了本装置连续运行 100 d、停机 4 h 后

的剩余剂量率分布。可见,治疗室内和束流传输线的剩余剂量率很小,离源30 cm处,小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ;加速器室内剩余剂量率较大,在 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 以上,其中靠近束流线的大部分区域在 $25 \mu\text{Sv/h}$ 以上,但除靠近准直器、发散狭缝、动量狭缝的50~60 cm范围内大于 $1.0 \text{mSv/h}$ ,其它区域都小于 $1.0 \text{mSv/h}$ 。在检修时应尽可能避开这些高剂量区域,并缩短检修时间。

#### 4.2.2 治疗室和病人的感生放射性

在HJPMF的防护设计中,作者对长期被忽视的病人感生放射性进行了深入计算分析<sup>[1-2]</sup>。结果发现,对病人短时治疗2 min、停机1 min后,治疗室内的剩余剂量率在离治疗中心30 cm处可达 $200 \mu\text{Sv/h}$ ,1 m远处可达 $20 \mu\text{Sv/h}$ ;这一剂量97%以上都是由病人的感生放射性产生,且病人的感生放射性在停机10 min里由半衰期仅2 min的 $^{15}\text{O}$ 主导(通过 $^{16}\text{O}(p,pn)^{15}\text{O}$ 反应产生);因此,在停机5 min后,剩余剂量率可衰减为停机1 min的1/4。此外,作者还推导出了新的具有嵌套周期的加速器活度累积公式,细致分析了治疗室的周期性照射条件下核素的累积过程和能达到的饱和度与核素半衰期之间的关系<sup>[2]</sup>。结果发现,除开病人和空气,治疗室内的其他固定部件在30年周期性照射后,停机1 min的剂量率最多仅为单次治疗2 min、停机1 min的剂量率的2.2倍,远小于于此前的设想。这是因为短时照射-长时冷却的周期性治疗模式使得中、长寿命的核素的实际饱和度远低于其连续照射所能达到的理想饱和度。

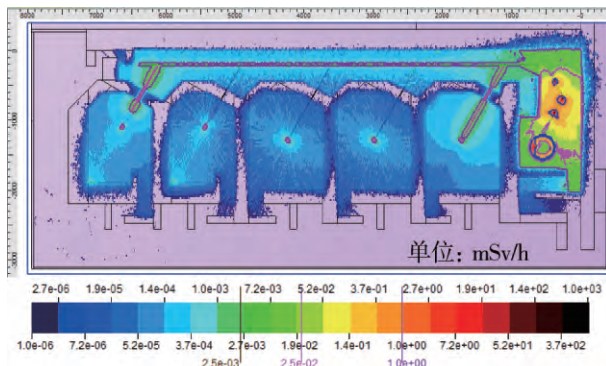


图4 连续运行100 d、停机4 h后的剩余剂量率分布

Fig. 4 Residual dose rate distribution after 100 days irradiation and 4 hours cooling

由于病人感生放射性的重要性,进一步计算分析了病人感生放射性对患者陪同人员和摆位技术人

员的辐射影响。结果发现,对患者陪同人员而言,因为患者每年的治疗次数有限,且患者陪同人员在患者治疗结束后开始接触时间通常在治疗结束5 min以后,接触距离通常在60 cm以上,保守估计出受到的年累积剂量仅 $0.058 \text{mSv/a}$ ,小于 $0.1 \text{mSv/a}$ 的管理目标值;对摆位技术人员而言,假设1个治疗室配备1个摆位技术人员、解除摆位和摆位分别需时1 min和10 min、平均接触距离1 m,则由此受到的年剂量可达约 $4 \sim 5 \text{mSv/a}$ ;如将开始解除摆位的时间推迟到治疗结束5 min后,由此受到的年剂量可减小到 $1 \sim 2 \text{mSv/a}$ ,减小为治疗结束1 min就开始接触的1/4~1/3。因此,建议治疗结束5 min以后摆位技术人员再进入治疗室解除摆位,以便病人产生的短寿命核素 $^{15}\text{O}$ 足够衰减。

#### 4.2.3 混凝土的感生放射性

计算发现,采用FLUKA手册的混凝土元素成分进行计算<sup>[6]</sup>,长期周期性治疗后,停机1 min,治疗室混凝土的剩余剂量率约为 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{Sv/h}$ 。其主要放射性核素是 $^{28}\text{Al}$ 和 $^{24}\text{Na}$ ,其中 $^{28}\text{Al}$ (半衰期2.3 min)在停机5 min内占主导, $^{24}\text{Na}$ (半衰期15 h)在停机5~30 min内占主导。如果混凝土不含Na元素, $^{24}\text{Na}$ 的活度将减小为原来的1/17。

#### 4.2.4 土壤及地下水的感生放射性

对土壤和地下水的活化的评估,重点考虑可迁移核素 $^3\text{H}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 的产生,其他核素如 $^7\text{Be}$ 、 $^{45}\text{Ca}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 等或由于半衰期短,或难以发生迁移可不予考虑<sup>[20]</sup>。计算表明,土壤和地下水感生放射性最严重的地方(加速器室的混凝土与土壤交界面处),土壤中 $^3\text{H}$ 和 $^{22}\text{Na}$ 的总饱和浓度分别比豁免浓度小8个多量级和3个量级;土壤所有核素的饱和浓度与豁免浓度之比的总和比豁免要求小2个多量级。与土壤本底对比,该交界面活化产生的总 $\alpha$ 和总 $\beta$ 的活度浓度比本底小1个量级以上,活化产生的 $\gamma$ 放射性的活度浓度也与土壤 $^{40}\text{K}$ 的本底放射性相当或更小。而离开该交界面每80 cm,活化程度就会减小1个量级。因此,无论相对于豁免浓度还是相对于环境本底,HJPMF对土壤的活化影响都可以忽略。

土壤和地下水感生放射性最严重的地方(加速器室的混凝土与土壤交界面处),地下水活化产生的长寿命核素 $^3\text{H}$ 和 $^7\text{Be}$ 的饱和浓度分别比豁免浓度分别小7个多量级和5个多量级;地下水所有核素



的饱和浓度与豁免浓度之比的总和比豁免要求小3个多量级。且离开该交界面每80 cm,活化程度就会就会减小1个量级。整个装置的地下水总饱和活度为 $6.73 \times 10^6$  Bq,比豁免要求小1个多量级。因此,从豁免角度考虑,HJPMF对地下水的活化影响可以忽略。

#### 4.2.5 空气的感生放射性

##### 1) 主要核素和排放量

加速器空气中的主要感生放射性来源于空气分子的直接核反应(包括热中子俘获反应、高能粒子散裂反应、 $(\gamma, n)$ 反应)。计算发现,通风状态下,主要核素有四种: $^{41}\text{Ar}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{11}\text{C}$ 和 $^{15}\text{O}$ 。在1次/h的通风频率下,整个装置的年排放总量为 $1.41 \times 10^{12}$  Bq。由于通风,中、长寿命核素的动态饱和浓度远远低于其静态饱和浓度,使得中、长寿命核素 $^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}$ 的排放量比前面四种小约4~6个量级。

##### 2) 空气活化泄漏对工作人员的影响

假设空气活化完全泄漏到工作场所(即不考虑泄漏过程的衰变和新鲜空气汇入引起的浓度降低),对工作人员造成的最大年剂量出现在加速器室外,为145 mSv/a,因此,保持辐射区特别是加速器室的密封和空气负压,防止活化空气泄漏到工作场所是必要的。空气活化在治疗室内产生的剂量率最大为 $0.17 \mu\text{Sv/h}$ ,可以忽略。

##### 3) 空气活化对公众产生的剂量

活化空气对地面公众产生的年剂量与大气条件、排气口高度、通风频率、扩散距离和方位等因素有关。在场址确定后,主要取决于排气口高度和通风频率。计算发现,在一定高度下,地面的最大年剂量随排气口高度每增高10 m而减小约1个量级,随通风频率而增加的倍数则最大接近通风频率所增加的倍数。质子治疗装置所在建筑物最高点离地17.6 m,为使空气活化对地面公众的剂量小于管理目标值 $0.1 \text{ mSv/a}$ ,设置活化气体的排风口在主体建筑物顶部,并比主体建筑物的最高点高出2 m。计算结果显示,在1次/h的通风频率下,地面公众和儿童年剂量最大处分别为SW方向206 m、207 m远处,年剂量分别为 $0.774 \mu\text{Sv/a}$ 和 $0.794 \mu\text{Sv/a}$ ,比公众的管理目标值 $0.1 \text{ mSv/a}$ 小2个多量级。值得注意的是,HJPMF周围的建筑物高过排气口高度,因此,相对地面而言,高斯分布中心线处的公

众年剂量较大。院内年剂量最大出现在综合楼(二期)与排风口最近的29 m处(NNW方位),最大年剂量 $0.097 \text{ mSv/a}$ (估计有2~4倍保守因子),小于院内公众人员的管理目标值 $0.1 \text{ mSv/a}$ ;院外最大出现在0.2 km以外的某建筑楼盘,其排风口等高处的公众成人和儿童年剂量分别为 $2.40 \mu\text{Sv/a}$ 和 $2.48 \mu\text{Sv/a}$ ,比公众的管理目标值 $0.1 \text{ mSv/a}$ 小40倍。

##### 4) 有害气体的影响

按照文献[9]给出的计算方法结合FLUKA模拟得到的空气中光子的能量沉积进行计算,结果表明,在1次/h的通风频率下,各辐射区的有害气体 $\text{O}_3$ 和 $\text{NO}_2$ 的饱和浓度比《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中的二级浓度限值 $0.16 \text{ mg/m}^3$ 和 $0.04 \text{ mg/m}^3$ 低5~7个量级。因此,在1次/h的通风频率下,臭氧不会对患者和摆位技术人员造成危害。1次/h的通风频率完全满足防止有害气体的要求,质子治疗室不必像《电子加速器放射治疗放射防护要求》(GBZ 126-2011)中规定的必须要有大于4次/h的通风频率。这是因为,质子、电子加速器产生的次级粒子分别主要是中子、光子,因此,对产生的空气感生放射性而言,质子加速器远大于电子加速器;但对产生的有害气体而言,质子加速器则远小于电子加速器。

#### 4.2.6 冷却水的感生放射性

计算结果表明,冷却水中短寿命核素主要是 $^{15}\text{O}$ ,其流经工作场所时可对周围工作人员产生照射。保守计算(忽略自屏蔽和核素输运中的衰减),得到活化最严重的1#水冷系统,在最大管道内径5 cm、长20 m条件下,中间1 m远处的外照射剂量为 $1.57 \mu\text{Sv/h}$ ,小于管理目标值 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

## 5 结论

通过采用经验公式计算和蒙特卡洛程序模拟两种方法,对恒健质子治疗装置(HJPMF)的各种瞬发辐射和感生放射性情况进行了计算分析,并按剂量限值对原屏蔽结构进行了优化设计。结果表明:对瞬发辐射防护而言,装置的原屏蔽结构基本满足防护要求,外混凝土屏蔽墙厚度可充分利用土壤屏蔽优化替换以节省成本,部分迷宫和屏蔽墙厚度也可进行优化;对感生放射性防护而言,加速器室的部件感生放射性和治疗室的病人感生放射性剂量较

大,需严格管理。研究结果表明了经验公式和 FLUKA、MCNPX 程序都可用来对质子治疗装置进行辐射防护设计,但在面对复杂结构和涉及感生放射性问题时,蒙特卡洛程序更为适用。

质子加速器治疗装置的辐射防护设计在我国还是一个新鲜事物,在对 HJPMF 进行辐射防护设计时,我国还没有出台针对质子加速器的辐射防护规范。因此,我们在设计中,对一些重要而敏感的问题特别是感生放射性问题,不回避,进行了深入研究。其中,有关病人感生放射性和周期性照射的活度累积过程方面的原创成果已在国际权威刊物发表<sup>[2]</sup>。在2015年11月,我国刚刚出台了《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第5部分:质子加速器治疗机房》(GBZ/T 201.5-2015),在2016年5月1日正式实施。通过对比,对 HJPMF 的瞬发辐射的计算和屏蔽设计符合该规范的要求。由于该规范未对感生放射性作出规定,因此, HJPMF 感生放射性的研究结果,对类似装置的感生放射性研究具有示范作用,并可推动相关规范的早日出台。

致谢:感谢本项目的加速器制造商 IBA 公司、建设单位恒聚医疗科技有限公司、承建单位中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司,以及监管部门广东省环保厅、国家环保部,和相关评审专家对我们工作的支持和帮助。

#### 参考文献:

- [1] 吴青彪,王庆斌,陈宇,等. 广东恒健质子治疗装置(HJPMF)辐射防护设计报告[R]. 广东:东莞市锐新粒子科技有限公司,2015.  
WU Q B, WANG Q B, CHEN Y, et al. Radiation protection design report on Guangdong Hengjian Proton Medical Facility (HJPMF) [R]. Guangdong: Dongguan Ruixin Particle Technology Co., Ltd., 2015.
- [2] WU Q B, WANG Q B, LIANG T J, et al. Study on patient-induced radioactivity during proton treatment in hengjian proton medical facility [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2016 (115): 235-250.
- [3] THEIS C, BUCHEGGER K H, BRUGGER M, et al. Interactive three dimensional visualization and creation of geometries for Monte Carlo calculations [J]. Nuclear Instruments and Methods, Physics Research Section A, 2006(562): 827-829.
- [4] STICHELBAUT F, Radiation sources in the proteus 235 system [R]. B0, 27/03/2014a.
- [5] STICHELBAUT F, Shielding design for hengjian facility [R]. 12/12/2014b.
- [6] FERRARI A, SALA P R, FASSO A, et al. Fluka manual: a multi-particle transport code (Program version 2011) [M]. Geneva, 2011.
- [7] BOHLEN T T, CERUTTI F, CHINH M P W, et al. The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications [J]. Nucl. Data Sheets, 2014(120): 211-214.
- [8] TESCH K. A simple estimation of the lateral shielding for proton accelerators in the energy range 50 to 1000 MeV [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1985, 11(3): 165-172.
- [9] THOMAS R H, CASEY W R, SLABACK L A, et al. Radiation protection for particle accelerator facilities [R]. NCRP Report No. 144, 2003.
- [10] TESCH K. The attenuation of the neutron dose equivalent in a labyrinth through an accelerator shield [J]. Particle Accelerators 1982(12): 169-175.
- [11] STAPLETON G B. Accelerator skyshine: tiger, tiger, burning bright [J]. Particle Accelerators, 1994, 44(1): 1-15.
- [12] 吴青彪. 中国散裂中子源的感生放射性研究[D]. 北京:中国科学院高能物理研究所,2014.  
WU Q B. Study on induced radioactivity of China Spallation Neutron Source [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (CAS), 2014.
- [13] CLEMENT C H. Compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60 [R]. ICRP Publication 119, 2012.
- [14] ECKERMAN K F, RYMAN J C. External exposure to radionuclides in air, water, and soil [R]. Federal Guidance No. 12, 1993.
- [15] 姬文超. 核电站气载放射性核素浓度和辐射剂量计算[D]. 广州:暨南大学,2008.  
JI W C. The calculation of the concentration and the radiation dose of airborne radionuclide from nuclear power plant [D]. Guangzhou: Jinan University, 2008.
- [16] JAEGER R G, BLIZARD E P, CHILTON A B, et al. Engineering compendium on radiation shielding [M]. New York: International Atomic Energy Agency Vienna, 1970: 266-267.
- [17] 王庆斌,吴青彪,吴靖民,等. 中国散裂中子源(CSNS)辐射防护设计报告[R]. 北京:中国科学院高能物理研究所,2008.  
WANG Q B, WU Q B, WU J M, et al. Radiation protection design report on China Spallation Neutron Source [R]. Beijing: Institute of High Energy Physics (IHEP), Chinese Academy of Sciences (CAS), 2008.
- [18] WU Q B, WANG Q B, WU J M, et al. Study on induced radioactivity of China spallation neutron source [J]. Chinese Physics C, 2011(6): 596-602.
- [19] TOKAI M, NAKA G, IBARKARKI K, et al. High intensity proton accelerator project (J-PARC) technical design report material & life Science Experimental Facility [R]. JEARI-Tech-2004-001-part2: 878-882.
- [20] BORAK T B, AWSCHALOM M, FAIRMAN W, et al. The underground migration of radionuclides produced in soil near high energy proton accelerators [J]. Health Physics, 1972 (23): 679-687.

(责任编辑 郑文棠)