

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.010

质子治疗设施的辐射防护问题研究

弋峰

(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: 质子治疗是目前肿瘤放射治疗先进的手段之一, 但质子治疗设施在使用中会产生辐射, 为了确保其安全运营, 周围环境和人员所受到的电离辐射满足国家相关规范要求, 需要考虑质子治疗设施的辐射防护问题。通过对质子治疗机理和屏蔽原理的分析, 提出辐射防护设计方法, 即确定辐射防护设计目标, 进行源项评估, 综合考虑设备使用的便利性和安全、工程造价等因素, 确定屏蔽材料和参数, 经屏蔽计算, 设置安全联锁系统和辐射监测系统, 确保医护人员受到的职业照射、大众受到的公众照射满足安全剂量要求。

关键词: 肿瘤; 质子治疗; 电离辐射; 辐射防护

中图分类号: TU246.1+87

文献标志码 A

文章编号: 2095-8676(2017)02-0064-05

Research on Radiation Protection of Proton Therapy Facility

YI Feng

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Proton therapy is currently one of the advanced tumor radiation therapy, but using proton therapy facility will produce radiation. In order to ensure its safe operation, environment and personnel by ionizing radiation meet the relevant national standards requirements, the proton therapy facility of radiation protection need to be considered. In this article, analysis of mechanism of proton therapy and shielding principle, the article puts forward the design method of radiation protection, which determine the radiation protection design goals, assess the source term, considering the convenience and safety of equipment use, engineering cost and other factors, shielding materials and parameters, the shielding calculation, set the safety interlock system and radiation monitoring system, and ensure that medical staff occupational exposure, satisfies the requirement of safety dose by public exposure of the masses.

Key words: tumour; proton therapy; ionizing radiation; radiation protection

放射治疗, 与化疗、手术并称肿瘤治疗的三大手段, 放射治疗原理, 即运用放射线攻击肿瘤细胞, 使肿瘤细胞失去活性, 从而杀死肿瘤。相比常规光子射线, 如 X 射线, 质子所具有的布拉格峰的特点, 使得相同治疗剂量下质子更多的能量沉积在末端的肿瘤部位, 对正常细胞的损伤比 X 射线小。

质子治疗是当今世界上最先进、最精确的肿瘤

放射治疗手段之一, 但由于在治疗病人的同时也会对周围环境和医务人员及其它人群带来辐射危害, 因此必须进行辐射防护。

1 质子治疗设备

质子治疗是一种针对多种肿瘤进行有效治疗的放射治疗手段, 具有精度高、副作用小的特点。

质子医院的核心设备是一台大型同步或回旋加速器, 启动后产生质子束流, 通过束流传输系统进入治疗室, 对病患体内不同深度肿瘤进行治疗。

典型的质子治疗系统由 230 MeV 回旋加速器系统、降能与选能器系统、射束传送系统、射束旋转机架系统组成, 上述系统装置安装在辐射防护建筑体内, 如图 1 所示。

收稿日期: 2016-02-01

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: 弋峰(1968), 女, 山西大同人, 高级工程师, 硕士, 主要从事核电站、火力发电厂、光伏发电等领域的设计、工程管理工作(e-mail)yifeng@gedi.com.cn。

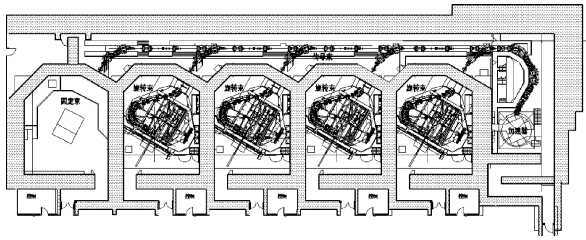


图1 质子治疗系统平面布置图

Fig. 1 Plan layout of proton therapy facilities

1.1 质子治疗的作用机理

质子，就是指氢原子剥去电子后带有正电荷的粒子。质子放射治疗是带有正电荷的质子通过加速器加速后，使其具有极高的能量，成为穿透力非常强的电离放射线，以极高的速度进入人体，通过特定的设备引导到需要治疗的肿瘤部位，用辐射的生物效应杀灭肿瘤。科学研究发现质子束进入身体后在穿越过程中不会马上大量释放能量，只有在质子束停下来位置才会释放其大部分能量，形成一个尖锐的能量峰-布拉格峰。而这个停下来位置是经过计算通过控制系统精确定位的肿瘤部位。

图2形象地表示了质子治疗与常规光子治疗的区别，从图中可以看出，相比常规光子放疗，质子治疗通过适形器和准直仪的应用，对于肿瘤病灶的打击定位更为精准，避免误伤正常组织，同时布拉格峰的特点使得质子治疗杀灭肿瘤细胞的力度也更大。

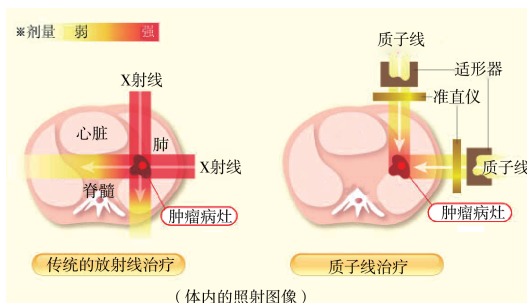


图2 质子治疗与常规光子治疗的对比

Fig. 2 Comparison of proton therapy and conventional photon therapy

1.2 质子治疗的适应症

目前，质子治疗肿瘤的适应症包括：脑和脊髓肿瘤、颅底肿瘤和有关疾病、眼部肿瘤、头颈部肿瘤、胸腹部肿瘤、盆腔肿瘤和儿童肿瘤等多种肿瘤。尤其对于早期肿瘤患者，质子治疗的生存率更高。

1) 儿童肿瘤：对于儿童实体瘤，质子治疗是首选方案，因为儿童的正常组织受到辐射可能会导致生长发育出现异常。与常规X射线放疗相比，采用质子治疗不仅可以精确控制放射剂量，减少对正常组织的辐射损伤，还可以尽可能地减少并发症，降低继发肿瘤的发生率，明显降低对儿童的不良影响。

2) 邻近重要脏器或组织结构的肿瘤：当肿瘤直接与重要器官或结构如脊髓、视神经、心脏等相邻时，质子治疗能在有效破坏肿瘤的同时保护这些重要器官的结构和功能。

3) 病灶局限的肿瘤：病变范围较局限，病变及周围组织活动度较小的肿瘤。

4) 肿瘤复发及不能耐受X射线治疗的患者。

1.3 质子射线的特点

质子是原子核的组成部分，带正电，经回旋加速器加速后，其能量可达230 MeV，进入人体后先以较低的能量损失率损失能量，到达射程末端时能量损失率突然增加，并在很短距离内能量降低为零，形成“布拉格峰”。

1.4 质子治疗的优越性

质子治疗具有五个方面的优点：(1)精确度极高；(2)副作用极小；(3)治愈率高；(4)无创、无痛治疗；(5)弥补其它治疗方法的不足。

1.5 质子治疗现状

质子治疗是当前疗效最好，副作用最少的放射治疗方法之一。专家证实，美国和日本作为长期排名在世界卫生组织评定的医疗水平最优的国家之一，他们的质子重离子治疗技术和设备更是全球领先，这也一直吸引了全世界众多的肿瘤和癌症患者前往美国或日本进行术后治疗。

截至2015年初世界各国质子治疗中心数量(含在建)：美国29家、日本17家、德国6家、英国6家、意大利、俄罗斯、法国、瑞典、荷兰、法国等国，包括我国香港地区和台湾地区也都有质子治疗中心在运营。其中美国瓦里安医疗系统、日本国立癌症研究中心、台湾林口长庚质子中心等癌症检测和治疗领域都有杰出的表现。

质子治疗癌症也是一项投资巨大，需要多学科集成的高难度技术，需要放射物理学和医学的紧密结合，需要具有综合能力的复合型人才。由于建设一个符合标准的质子治疗中心是一项庞大的工程，不仅在选址

和安全保障上有严格要求,还需要大量资金的投入,严格的评估,目前国内临床应用还比较少。

1.6 我国质子治疗前景

质子医疗是核技术在医疗领域中的应用,它涉及核物理、加速器、生物医学、影像学、核化学、计算机技术、放射生物、放射物理等诸多学科,是这些学科新技术的集成与创新。

随着我国国力的增强和全民生活水平的提高,对高端健康医疗的需求不断增加,质子治疗以其拥有其他癌症治疗手段无可比拟的优势,必将获得很大发展,在未来20—30年内将会成为肿瘤放射治疗的主流手段。

目前我国已有40多家医院申请建设质子治疗中心。

2 质子治疗设备的辐射

质子治疗系统是一套庞大、复杂而又极其精密的高科技设备,质子治疗设备的核心部件是回旋加速器(或同步加速器),它在运行时使用的粒子束会产生电离辐射,在治疗病人的同时会影响甚至伤害设施周围的其他人(包括医生)与环境,从而影响设备的使用及治疗。

3 辐射防护设计

质子治疗设施辐射防护设计的主要目的是保证设计范围内的设备能够正常使用,限制辐射剂量,降低潜在的照射危险,优化防护措施。主要包含以下内容:确定设计目标、源项评估、屏蔽设计、安全连锁系统设计、辐射监测系统设计、设备相关的辐射防护设计等。辐射防护设计是项目建设过程中重要的一环,贯穿设计、安装、调试、运营始终,不仅需要最优的设备布置方案还与控制、水、暖、电、消防、卫生防疫等密切相关。

3.1 确定设计目标

确定设计目标是辐射防护设计的第一步,是实施辐射防护的依据。

设计目标首先是确定工程项目应该遵守的法律法规及设计规范。辐射防护的设计目标值一般根据现行国家标准确定,内容包括:辐射源项、剂量限值、放射性及非放射性工作区域的划分、辐射的屏蔽、辐射的监测、流出物的监测、废物的处理等多个方面。

电离辐射对职业人员及公众的年有效剂量限值应按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)^[1]要求执行。即:

1) 职业照射:连续5年以内年平均有效剂量不超过20 mSv,任何单一年份内有效剂量不超过50 mSv;眼晶体的当量剂量150 mSv;四肢或皮肤的当量剂量500 mSv。

2) 公众照射:公众成员的有关关键人群组所受的平均年有效剂量的估计值不得超过1 mSv,在特殊情况下,在单一年份内最大有效剂量不得超过5 mSv;眼晶体的当量剂量15 mSv;四肢或皮肤的当量剂量50 mSv。

目前各国都是根据ICRP(国际辐射防护委员会)的建议,结合本国情况制订相应标准。国家标准中未明确规定的项目需要参考国际标准和已建项目的实测值,并经专家评审确定。

3.2 源项评估

源项评估是辐射防护设计的基础。对于质子治疗设施的源项评估主要包含中子能谱与产额、伽马能谱与产额、单位束流的吸收剂量率、材料的残余辐射场以及不同工况的源项分布及强度等。源项评估前需要设定各种可能出现的工艺状况,根据不同工况进行详细的计算分析,才能保证项目通过安全评估。对于医用射线装置的工程项目,工况复杂而且可调整余地较小。源项的评估,尤其是国内还没有实际经验的工程项目的源项评估需要投入较多的资源。

源项评估可以通过查阅文献、数模计算、对已有设施的实际测量得到。三种方法各有优劣,但单独使用难以确保结果的可靠性。所以在工程实践中通常需要通过三种方法的结合比对来得到可靠的结果。

源项评估的重要性在于评价报告的所有结论均是基于源项,一旦出现漏项或较大的误差往往在环评验收时很难通过增加额外的手段进行补充防护,必然会影响设备的使用,增加工程造价。这对设备的使用及资金的投入均是不利的。

由于采用最大能量及单一方向照射进行源项评估会引起侧墙及顶板屏蔽墙厚度的大幅度增加。源项估计需要通过分析临床假设来取得所需要的源项数据。用于估计源项数据的输入应根据治疗计划、对应源项位置不同方向照射的比例、对应源项位置不同能量的比例等给出总束流时间、束流的方向和

束流的能量等。

3.3 建筑平面布置

质子治疗装置及治疗室平面布局的优劣直接影响安全性、工程造价、治疗装置使用的便利性。例如工艺房间和辅助房间的安排、人流、物流通道的划分、卫生通道的设置均直接关系到设备的运行及维护。建筑的平面布置是多专业综合的产物,需要综合考虑设备及各专业间的接口,满足辐射防护合理分区。

3.4 屏蔽设计

屏蔽防护的原理是:射线在穿透物质时强度会减弱,在辐射源与人体或工作场所之间设置足够厚的屏蔽物,便可降低辐射水平,使人们所受到的辐射剂量降低至允许剂量以下,确保人身安全,达到防护目的。

治疗装置的屏蔽是质子治疗中心除设备外,资金投入集中且数额较大的内容之一。屏蔽设计的好坏直接影响工程项目的成本及建设周期。屏蔽设计的主要目的是将评估的辐射水平合理地降低到设计目标规定的剂量限值以下,并对建筑内的工作区域按辐射水平进行合理的分区。剂量限值的设计目标通过现行有效的国家标准给出,由当地环保部门在环境评价报告中予以确认。而工作区域的划分是对设计目标中的放射性工作区域划分的响应。

屏蔽防护的要点是在辐射源与人体之间放置一种能有效吸收射线的屏蔽材料。与常规光子治疗不同,质子治疗装置产生的主要辐射场是中子场,其最有效的屏蔽材料是混凝土或(含硼)聚乙烯这类含氢丰富的材料,为了解决上述材料密度较低的问题,可通过增加厚度和密实度的方法来加强防护性能。

屏蔽设计给工程土建设计提供的重要参数是屏蔽材料的选用、屏蔽厚度及结构要求等。屏蔽材料的选用主要涉及到使用混凝土的特殊要求(包括元素组成比例、成分、密度、材料质量、施工质量等),可能包含特殊混凝土及其他特殊屏蔽材料的使用。屏蔽厚度直接影响工程土建成本及环评验收,其重要性毋庸置疑,设计过薄会引起局部区域的剂量率超过设计目标值,而过厚会增加成本。屏蔽结构还要求考虑结构自身的安全性、施工的难度和可行性,需要结构设计与屏蔽设计人员协同完成。屏蔽设计通常还应包含局部屏蔽的设计,作为主屏蔽(通常是混凝土墙)的补充。

为了减小结构厚度常使用防辐射混凝土,又称屏蔽混凝土、重混凝土,其对各种射线比普通混凝土具有更好的屏蔽能力,不易被放射线穿透。重混凝土通常用特别密实和特别重的骨料如重晶石、铁矿石、钢屑等作骨料和镭水泥、钡水泥共同配置,表观密度 $3\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ 以上。常用于医院、高科技研究场所、军事基地,主要用作核能工程的屏蔽结构材料。

除了上述选用材料的多重考量外,在设计时通过对周围环境中各种因素的分析也会对优化屏蔽结构起到重要作用。文献[2]中质子治疗装置建在地面以下,设计中利用土壤屏蔽替换混凝土屏蔽,将加速器室和束流传输线的外墙混凝土厚度分别由4 m和3 m优化到1.5 m和1 m,这样可以大幅度降低建造难度和节省项目投资。

屏蔽设计时必须考虑通风管道、进出水管、电缆管道、辐照材料的传输管道等可能穿越屏蔽墙的贯穿件对屏蔽效果的影响。这些管道设计的取向应尽可能避开束流方向或辐射发射率峰值的方向。为了防止辐射经管道的泄露,管道通常设置为“S”形或“U”形。

加速器的辐射场包括瞬发辐射和残余辐射,残余辐射是辐射与靶物质相互作用产生的感生放射性材料放出的辐射,具有以下特点:加速器停机后仍然存在;随加速器运行时间的增加而累积,并趋于饱和;随加速器关机时间的增长而衰减。

对材料、冷却水及空气的活化程度还需进行残余辐射计算,给出随运行时间的变化残余辐射的累积曲线用于设备维护计划的参考数据以及提供环评需要的三废管理的基础数据。

3.5 安全联锁系统的设计

安全联锁系统的主要目的是防止人员及环境受到设计目标外的照射,制止治疗系统非正常工况的出现等。包括人身安全联锁系统、门禁系统和紧急逃逸措施等。

工程建设中该系统主要是确保安装调试过程中进行正确的安装及功能的正确实现。该系统是防止人员受到辐射伤害的最后屏障,给出治疗装置所有可能工况的控制措施以确保该设施的安全。

3.6 辐射监测系统

质子治疗设施建设时应同步建设辐射与剂量监测系统,对个人剂量、工作场所剂量和环境剂量进

行监测。该系统不仅包括治疗时照射的监测,还包括从治疗室流出的空气、水及固体垃圾的监测及制定相应的管理措施。

应根据治疗装置的实际情况选用合适的监测设备,合理布置探测器。主要监测项目包括辐射种类、测量的范围,能量响应范围,设备的稳定度,抗电磁场干扰能力以及系统接口等。同时该系统对于质子治疗设施另外一个重要作用在于让建筑内外的工作人员与公众确信整个治疗装置设施及所处环境是安全的。

3.7 设备相关的辐射防护设计

在主屏蔽的设计以外需要对特殊的设备进行针对性的辐射防护设计以确保安全、降低造价、方便维护与使用。其包含的内容十分复杂而且根据不同的工艺要求差别巨大,例如:选能器的屏蔽设计;束流穿墙管道上的束流阻挡器及中子屏蔽塞子用于不同束流线切换时对各个治疗室的防护;电缆、净水、污水、空调管道穿墙时的剂量泄露评估及相应的防护措施;高频照射区的防护;设备材料及电缆在辐射场中的使用寿命评估;放射性废物的处置等等。

辐射防护设计是需要质子医疗项目工程设计、建设和调试全程参与的重要环节。质子治疗装置的辐射防护设计人员需要对治疗装置的工艺流程有着深入的了解及一定的工程实践经验才能够进行有效的设计,实现项目的安全运营。

4 结论

质子治疗是目前世界上最先进的肿瘤放射治疗手段之一,1988年,美国食品药品监督管理局(FDA)批准质子治疗作为一种放射性治疗手段用于患者的临床治疗。目前质子治疗在美国、日本等发达国家已经是一种常见的放射疗法。在我国由于其技术难度大、造价高还未被广泛应用,随着国家综合实力的上升,人们生活水平不断提高,对高端医疗的需求不断增加,目前已有多家医疗机构甚至其它领域的投资机构提出投资建设质子治疗装置的申请。项目立项首先面临的问题就是如何解决设备在运行时产生的电离辐射对环境和人员的伤害,就如同核电站建设初期一样,要解决广大群众的恐慌心里,使大众愿意去接受它。

质子治疗设施辐射防护设计需以下几个步骤:

(1)确定设计目标;(2)源项评估;(3)建筑平面布置;(4)确定屏蔽材料;(5)屏蔽计算;(6)安全联锁和辐射监测。

我国虽然已经颁布了国家卫生标准《放射治疗机房的辐射屏蔽规范》等一系列标准,但在实际工程中由于环境和设备的复杂性,存在许多规范中无法涵盖的内容,需不断地总结补充完善。另外,随着材料科学和互联网的发展,屏蔽材料必将有大的突破,屏蔽效果好造价低的材料会越来越多,安全联锁和辐射监测必将更加准确和便利。

参考文献:

- [1] 核工业标准化研究所. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002. Institute for Standardization of Nuclear Industry. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources [S]. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [2] 吴青彪, 彭毅, 王庆斌, 等. 恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(3): 16-22. WU Q B, PENG Y, WANG Q B, et al. Radiation and shielding design of Hengjian proton medical facility [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(3): 16-22.
- [3] 国家标准局. 粒子加速器辐射防护规定: GB 51721—1985 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1985. State Standard Bureau. The rule for radiation protection of particle accelerators: GB 51721—1985 [S]. Beijing: China Standards Press, 1985.
- [4] 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 [M]. 东莞: 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) [M]. Dongguan: Dongguan Ruixin Particle Technology Co., Ltd., 2015.
- [5] 国家质量技术监督局. 放射治疗机房设计导则: GB/T 17827—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999. State Bureau of Quality Technical Supervision. Guidelines for radiotherapy treatment rooms design Beijing: GB/T 17827—1999 [S]. Beijing: China Standards Press, 1999.
- [6] 中华人民共和国卫生部. 放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第5部分: 质子加速器放射治疗机房: GBZ/T 201.5—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. Ministry of Health. Radiation shielding requirements for radiotherapy rooms. Part 5: Radiotherapy room of proton accelerators: GBZ/T 201.5—2007 [S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [7] 中华人民共和国卫生部. 医用电子加速器卫生防护标准: GBZ 126—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002. Ministry of Health. Radiological protection standard for using of medical electron accelerator: GBZ 126—2002 [S]. Beijing: China Standards Press, 2002.

(责任编辑 郑文棠)