

金刚石探测器测量质子束流场分布

丁雨阳, 高 飞, 董璐琪, 王菲菲, 刘蕴韬, 陈义珍, 王子业, 王靖谦

(中国原子能科学研究院, 计量与校准技术重点实验室,

中核核工业计量与测试技术重点实验室, 北京 102413)

摘要: 质子治疗(proton beam therapy, PBT)因其独特的布拉格峰能够达到精准放疗的效果。在质子治疗过程中, 将峰准确定位到肿瘤区域, 可以给予肿瘤较大剂量照射的同时, 降低对正常组织和器官的伤害, 减少副作用的发生。因此在质子治疗中对质子束的布拉格峰进行准确定位至关重要。本研究利用回旋加速器产生质子束流, 通过金刚石探测器对质子束辐射特性进行测试, 测量质子束束斑分布及布拉格峰位, 得到质子束流的布拉格峰位置为(0, 35 mm), 为质子治疗的准确性提供了保障。

关键词: 质子治疗; 布拉格峰; 金刚石探测器

中图分类号: TL84

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2023)04-0446-05

doi: 10.7538/tws.2023.36.04.0446

Measurement of Proton Beam Distribution by Diamond Detector

DING Yuyang, GAO Fei, DONG Luqi, WANG Feifei, LIU Yuntao,

CHEN Yizhen, WANG Ziye, WANG Jingqian

(China Institute of Atomic Energy, National Key Laboratory for Metrology and

Calibration Techniques, China National Nuclear Corporation Key Laboratory

of Metrology and Measurement Technology, Beijing 102413, China)

Abstract: Proton beam therapy (PBT) can achieve the effect of precision radiotherapy due to its unique Bragg peak. In the process of proton therapy, the peak can be accurately located to the tumor area, which can give the tumor a larger dose of irradiation, reduce the damage to normal tissues and organs, and reduce the occurrence of side effects. Therefore, it is very important to locate the Bragg peak of proton beam in real time in proton therapy. In this paper, a cyclotron is used to generate proton beam, and a diamond detector is used to test the radiation characteristics of proton beam, and the Bragg peak and the beam spot center are measured (0, 35 mm). Thus, accurate Bragg peak value of proton beam was obtained, which guaranteed the accuracy of proton therapy.

Key words: proton beam therapy; bragg peak; diamond detector

恶性肿瘤由于其高发病率和死亡率, 仍是威胁人民健康寿命的主要因素。根据国际癌症

研究中心的估算, 全球 2020 年新增癌症患者约 1 900 万, 死亡患者约 1 000 万。我国由于人口

基数大,新发癌症人数和癌症死亡人数均位居全球第一^[1]。目前,放射治疗是恶性肿瘤最主要和有效的治疗手段。放射治疗主要利用 X 射线、 γ 射线、电子线、质子束和重离子束对患者病变组织进行治疗^[2]。

相比于其他常规的光子放疗手段,质子治疗由于其独特的布拉格峰具有较大的优势。布拉格峰是 1904 年威廉·亨利·布拉格(William Henry Bragg)与克里曼(Kleeman)在实验中观测到,当质子、碳离子等带电粒子束射入物质中时,会在射入介质中的某个深度处形成一个剂量峰值,这一个峰值称为“布拉格峰”。质子束传递的剂量大量沉积在质子束射程的末端,即布拉格峰的位置,在传递路径上的剂量沉积很小。因此质子治疗能够有效回避到达肿瘤之前的正常组织,通过调节质子束的射程使在组织中剂量的布拉格峰精确位于肿瘤部分,使其大量能量在肿瘤靶区内沉积,而穿过肿瘤后剂量迅速下降,使得肿瘤后侧的正常组织几乎不受剂量影响,能够产生高效低毒并对肿瘤组织进行精准治疗的效果,在对肿瘤照射相同剂量的情况下,对正常组织伤害更小。如果能够将峰准确定位到肿瘤区域,就可以较大剂量照射肿瘤的同时,降低对正常组织和器官的伤害,减少副作用的发生。因此在质子治疗中对质子束的

布拉格峰进行准确定位至关重要^[3]。本研究通过金刚石探测器对质子束辐射特性进行测试,以为质子治疗的准确性提供保障。

1 实验设备

1.1 回旋加速器

目前世界各地的质子治疗中心基本采用回旋加速器、同步加速器及直线加速器^[4]。回旋加速器能产生连续且束流强度较高的质子流,且使用回旋加速器引出的质子束能量单色性较高,可通过降能器灵活调节质子束流的能量^[5]。本研究利用中国原子能科学研究院某国产质子回旋加速器产生质子束流,并测量质子束束斑及布拉格峰位。该质子回旋加速器结构示于图 1,整体由中心区、相位靶、真空室、高频腔、磁极和引出开关组成^[7],主要参数列于表 1。该国产加速器采用外部离子源轴向注入,使用剥离引出的方式引出能量范围为 75~100 MeV 的质子束,实现了 10 pA 到数百 μ A 共计 7 个量级跨度的流强供束范围^[6]。

1.2 金刚石探测器

金刚石是半导体中十分接近绝缘体的物质,其禁带宽度可达 5.5 eV,是硅的 5 倍,大的禁带宽度使得金刚石探测器可以在 500 $^{\circ}$ C 甚至更高的环境温度下正常运行。纯净的金刚石材

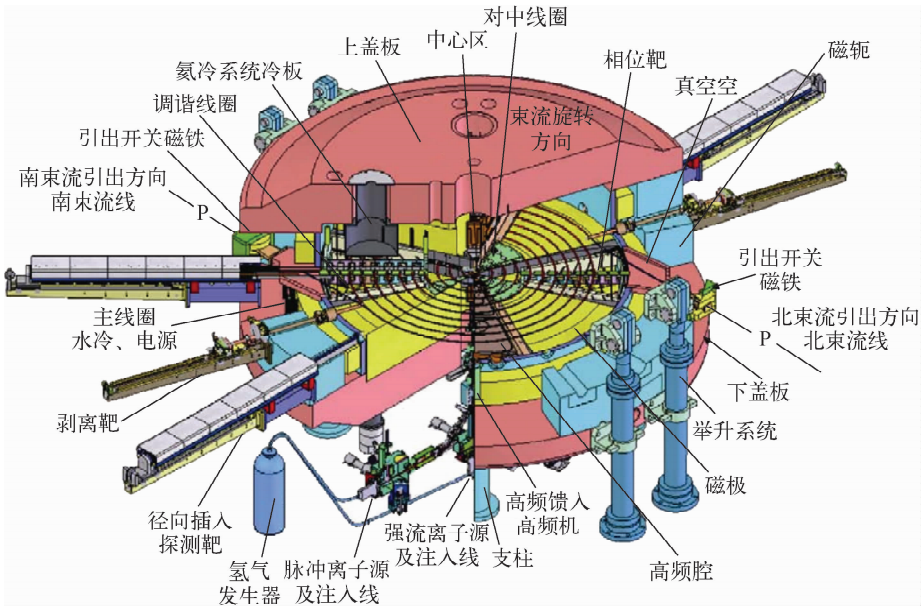


图 1 质子回旋加速器总体结构图
Fig. 1 Overall structure diagram of Cyclotron accelerator

料具有极高的电阻率,因而其本征载流子浓度非常低($<10^3\text{ cm}^{-3}$),导致其探测器的暗电流可以忽略不计,具有极好的信噪比^[8-9]。基于以上特性,金刚石是一种耐辐射、耐高温、响应快的半导体探测器材料,金刚石探测器也被广泛应用于质子、 α 粒子、电子、X 射线和 γ 射线测试。

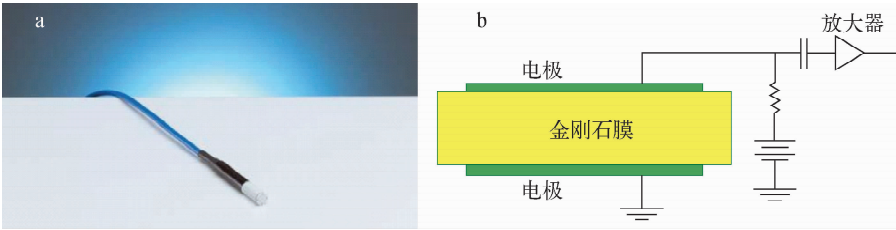
本研究所用的金刚石探测器为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 厚的金刚石膜探测器(图 2),在 $1\text{ }000\text{ V}$ 的外加电压下,其暗电流约 $30\sim40\text{ pA/cm}^2$ 。为 PTW 生产的 60019 宝石探测器,晶体为合成单晶金刚石,灵敏体积为 0.004 mm^3 ,漏电流 $\leq 20\text{ fA}$ 。内部有两个金属电极,并加上偏压,高电阻率的金刚石膜夹在两个电极中,呈三明治状^[10]。当高能电子通过金刚石膜时,可与金刚石发生作用使其产生电离激发,在入射路径上电离产生大量的电子空穴对,在外加电场作用下向两极漂移,收集极上产生感应电荷,从而在外电路产

生信号,电流信号经放大后被检测,即可对入射粒子的计数和能谱进行测量。

表 1 回旋加速器主要参数

Table 1 The main parameters of cyclotron accelerator

机器部位		参数
磁铁	磁铁叶片数	4 对
	叶片平均角	47°
	磁场场强	$1.32\text{ T}/0.15\text{ T}$ 可选
	磁铁半径	$2\text{ m}/3.08\text{ m}$ 可选
	磁极间隙	6 cm
	Dee 盒系数	2
高频	Dee 盒张角	36°
	D 电压	$60\sim120\text{ kV}$ 连续可调
	高频频率	44.4 MHz
	谐波数	4
离子源	类型	多峰负氢
	注入能量	40 keV



a——实物图;b——结构图
图 2 金刚石探测器
Fig. 2 The diamond detector

2 实验方法

利用 PTW60019 宝石探测器和德国 IBA (Ion Beam Applications S. A.) 公司三维扫描水箱,测量质子束斑及布拉格峰位。实验布局示意图示于图 3,IBA 水箱和金刚石探测器实物图示于图 4。利用 IBA 水箱和金刚石探测器进行质子束辐射特性实验,将三维水箱及金刚石探测器进行安装及通讯,为减少质子散射,使出束端到三维水箱前表的控制源皮距 (source skin distance, SSD) 距离为 50 cm ,调节台架使水箱中心与出束口中心重合。通过质子加速器出束,控制支架及金刚石探测器垂直于束流方向平面上,以水箱主体中心为原点进行水平和

垂直扫描,确定束斑大小及均匀性。

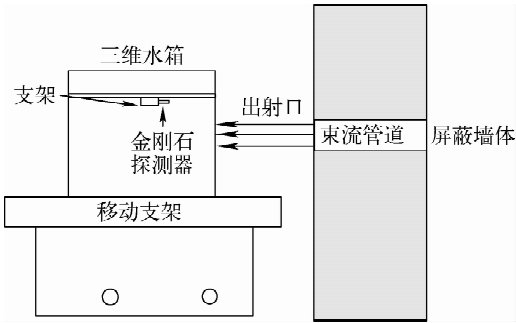


图 3 质子束辐射特性实验布局示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the experimental layout of proton beam radiation characteristics



图 4 IBA 水箱和金刚石探测器实物图

Fig. 4 IBA phantom and diamond detector

3 结果与讨论

探测器水平、垂直扫描实验结果分别列于表 2、表 3,垂直扫描的剂量分布示于图 5。利用金刚石探测器和 IBA 水箱,通过水平和垂直扫描结果可得其束斑中心位置,水平扫描至 50 mm 时,剂量率最大为 818.3 mGy · min⁻¹;垂直扫描至 -60 mm 时,剂量率最大

为 935.4 mGy · min⁻¹。

远程控制三维水箱内支架及金刚石探测器移动至束斑中心,进行布拉格峰测量,深度剂量分布示于图 6,其在 35 mm 处的剂量率达到最大,为 2 703.6 mGy/min。通过以上实验及分析,最终得到布拉格峰的位置为 (0,35 mm)。

表 2 水平扫描实验结果

Table 2 Results of horizontal scan experiment

束斑左右扫描(平行于地面方向)														
测试条件	束流能量:100 MeV;束流强度:1.8 nA;探测器型号:TW60019													
坐标 x/mm	-100	-95	-90	-85	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35
剂量率/(mGy · min ⁻¹)	1.3	1.4	1.6	9.1	113.7	112.7	215.6	241.6	250.6	261.5	306.2	321.5	319.6	343.5
坐标 x/mm	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
剂量率/(mGy · min ⁻¹)	359.6	393.5	438.9	448.9	531.7	568.3	562.5	586.6	605.9	667.6	666.2	684.2	731.2	754
坐标 x/mm	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
剂量率/(mGy · min ⁻¹)	765.2	774.3	818.3	738.2	736.5	630.8	538.2	220.3	36.3	16.5	14.1	10.8	8.3	

表 3 垂直扫描实验结果

Table 3 Results of vertical scan experiment

束斑上下扫描(垂直于地面方向)												
测试条件	束流能量:100 MeV;束流强度:1.8 nA;探测器型号:TW60019											
坐标 z/mm	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25
剂量率/(mGy · min ⁻¹)	4.4	6.6	22.5	51.5	51.2	237.3	553.5	667.6	750.7	774.2	787.5	820.5
坐标 z/mm	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
剂量率/(mGy · min ⁻¹)	825.5	884.5	924.1	909.5	935.4	887.5	930.4	775.5	742.5	729.5	684.5	522.8
坐标 z/mm	40	45	50	55	60	65	70	75	80			
剂量率/(mGy · min ⁻¹)	456.9	353.8	205.9	76.6	30.2	16.8	18.3	14.7	11.9			

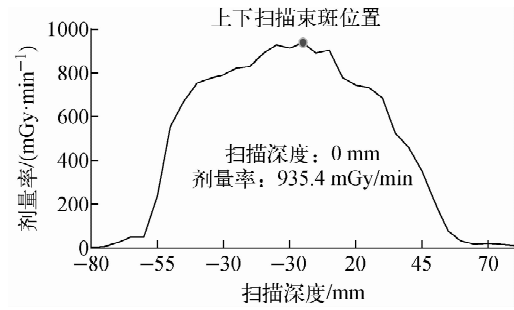


图 5 垂直扫描剂量分布实验结果
Fig. 5 Results of vertical scan experiment

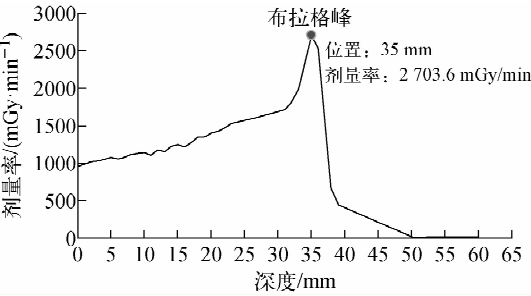


图 6 布拉格峰测量结果
Fig. 6 Results of the Bragg peak experiment

4 结论

本研究利用 PTW60019 金刚石探测器对紧凑型质子回旋加速器产生的质子束束斑中心及布拉格峰位进行了测量,最终得到布拉格峰的位置为(0,35 mm)。通过“十字”扫描实验可得质子束束斑中心位置。在该束斑中心进行前后布拉格峰扫描,得到布拉格峰位,为质子治疗时水中的剂量分布测试提出了可靠方法。

参考文献:

[1] Ferlay J, Ervik M, Lam F, et al. Global cancer observatory: cancer today. international agency for research on cancer[Z/OL]. [2021-02-20].

[2] Riva M, Vallicelli E A, Baschiroto A, et al. Acoustic analog front end for proton range detection in hadron therapy[J]. IEEE, 2018,12(4): 954-962.

[3] Astro. American society for therapeutic radiology and oncology-model policies, proton beam therapy (PBT)[J]. Radiotherapy & Oncology, 2007, 83 (2): 105-109. 2014.

[4] Flanz J B. What's new in particle therapy accelerator technology[J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research B, 2007, 261(1-2): 768-772.

[5] Mohan R, Grosshans D. Proton therapy-present and future[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2016, 109: 26-44.

[6] 姚红娟. CYCIAE-100 回旋加速器轴向注入与中心区理论和实验研究[D]. 北京:清华大学, 2008.

[7] 张天爵,樊明武,安世忠,等. CIAE 回旋加速器及应用综述[J]. 原子能科学技术,2020,54:275-292.

Zhang Tianjue, Fan Mingwu, An Shizhong, et al. Cyclotron and its application in China Institute of Atomic Energy[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54: 275-292(in Chinese).

[8] 沈沪江,王林军,黄健,等. 基于(100)定向金刚石薄膜的辐射探测器研究[J]. 无机材料学报, 2009,24(6):1254-1258.

Shen Hujiang, Wang Linjun, Huangjian, et al. Research on radiation detector based on (100) oriented diamond film[J]. Journal of Inorganic Materials, 2009, 24(6): 1254-1258(in Chinese).

[9] 张明龙. CVD 金刚石膜的光电性能及其在辐射探测器中的应用研究[D]. 上海:上海大学, 2005.

[10] 许平. CVD 金刚石膜辐射探测器的研制与性能研究[D]. 衡阳:南华大学,2020.