Atomic Energy Science and Technology

Vol. 38 ,Suppl. J uly 2004

IMP 质子治癌 3D 剂量探测系统

郭忠言,肖国青,詹文龙,徐瑚珊,胡正国,毛瑞士,孙志宇, 李加兴,王金川,李 琛,陈立新,赵铁成,张金霞,李存藩 (中国科学院近代物理研究所,甘肃 兰州、730000)

摘要:文章描述了中国科学院近代物理研究所(IMP)正在研制的 IMP 质子治癌装置 3D 剂量测量系统。 该系统主要由 2D 剖面探测器、辐照深度和剂量探测器、射程调整器等组成。其中,多级双维位置灵敏平 行板雪崩探测器(MPPAC)使用 C₃F₈作为工作气体,工作气压为 700 Pa,阳极电压为 + 700 V。对 3 组分 粒子测得位置分辨为 0.54 mm(FWHM)。

关键词:Bragg 峰; 质子治癌; 3D 剂量测量 中图分类号:TL503.5;TL503.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-6931(2004)S0-0219-04

A Dosimetry System for Measurement of 3D Depth Dose Profiles in Proton Tumor Therapy

GUO Zhong-yan, XIAO Guo-qing, ZHAN Wen-long, XU Hu-shan, HU Zheng-guo, MAO Rui-shi, SUN Zhi-yu, LIJia-xing, WAN GJin-chuan, LI Chen, CHEN Li-xin, ZHAO Tie-cheng, ZHAN GJin-xia, LI Cun-fan (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract : A 3D dosimetry system of proton therapy facility was designed and constructed in Institute of Modern Physics. It is composed of 2D profile detector, depth-dose detector and rang tuning detector. Under the 2D detector operating gas C_3F_8 with the pressure of 700 Pa and the anode voltage of +700 V, the position resolution of about 0.54 mm (FWHM) is achieved for 3-components particles.

Key words: Bragg peak; proton therapy; 3D dose measurement

带电粒子治癌装置可以分为质子治癌装置 和重离子治癌装置两种。到目前为止,已用带 电粒子为约2万癌症病人成功地进行了治疗, 其中,绝大多数是在质子治癌装置上治疗的。

1954年,质子首次在 Berkeley 应用于肿瘤临床 治疗。1975年, Lawrence Berkeley Laboratory^[1]首先使用 Bevalac 的重离子 Ne 束为患者治 疗;1983年,日本人参考 Bevalac 的经验,在 Ch-

收稿日期:2004-04-15;修回日期:2004-06-03

基金项目:国家基金委创新研究群体科学基金资助课题(10221003)

作者简介:郭忠言(1940 ----),男,辽宁辽阳人,研究员,原子核物理专业

iba^[2]的 National Institute of Radiological Sciences 建造重离子治癌装置 HIMAC,1994 年投入运 行,HIMAC利用直线加速器、同步加速器提供 的几百 MeV/u¹²C离子已为 400 多位癌症患者 进行了治疗。1997 年,GSI^[3]的重离子治癌装置 利用 SIS 200 ~ 300 MeV/u¹²C离子投入治疗。 质子治癌装置规模较小,成本较低,便于普及。 重离子治癌装置规模较大,结构复杂,成本高,不 易普及。重离子的物理和生物效应远高于质子, 因此,治疗效果更好。

带电粒子穿过物质时,在射程的末端其能量 损失急剧增加,形成所谓 Bragg 峰。图1示出 120 keV X射线、⁶⁰Co 射线、18 MeV 光子、250 和 300 MeV/u¹²C离子在水中的射程曲线。显 然,X射线和 射线通过物质时的能量损失在路 径的起点附近达到最大,然后逐渐下降。¹²C的 行为完全相反,能量损失随路径增加,在路径的 末端急剧增加,形成很窄的峰。质子和重离子治 癌就是利用带电粒子的这一特点,精确调整重离 子方位和射程使其 Bragg 峰准确落在肿瘤体积 之内,有效杀死癌细胞,而对健康组织伤害最小。 无论精确定位还是物理生物效应,带电粒子治癌 是 X 射线和 射线治癌无法比拟的,因此,它倍 受人们关注。

目前,中国科学院近代物理研究所正在研制 质子加速器、质子治癌装置。本工作为该装置研 制 3D 剂量探测系统,它包括 2D 剖面探测器,辐 照深度和剂量探测器、模拟人体组织的射程调整 器以及 3D 图像系统。

7



1 束流控制和三维剂量测量系统

图 2 示出了质子治癌治疗室区域质子束控 制装置和三维剂量测量探测器系统分布示意图。 质子束控制单元主要由 x 方向偏转磁铁 D_x 、y方向偏转磁铁 D_y 和 2 个聚焦磁铁 $Q_{1,2}$ 组成。 3D 剂量测量探测器系统主要包括束流剖面探测 器 xy-1、xy-2,剂量、深度测量电离室和射程调整 器。



Fig. 2 Layout of the proton beam control and 3D dosimetry system

治疗程序大致如下:由 CT 准确确定病人 肿瘤的位置和范围,数据输入计算机,编制出详 细治疗程序,包括质子束能量、强度、方向、深 度、辐照持续时间等参数;220 MeV 质子束进 入治疗室后,控制计算机按程序设置 x、y 偏转 磁铁、聚焦磁铁、射程调整器等参数,使得质子 束的 Bragg 峰准确在肿瘤区域内按一定顺序和 合适剂量扫描,束流剖面探测器 xy-1,xy-2 和 剂量深度测量电离室实时测量质子束的方向、 能量损失和剂量,反馈回控制计算机,构成质子 剂量分布的三维图像,实现治疗过程闭环控制, 确保病人的安全和治疗效果最佳。

2 **東流剖面探测器**图 3 是東流剖面探测器 xy-1,xy-2 的照片。它们的主体结构是多级双 维位置灵敏平行板雪崩室(MPPAC^[4])。MP-PAC 的灵敏面积为 250 mm ×250 mm,阳极由 厚度 1.5 µm 双面镀铝 Mylar 膜制作, x 和 y 栅 极由 ϕ 20 µm 镀金钨丝布成,丝间距 1 mm,预 应张力 200 g, x 栅极与 y 栅极丝方向相互垂 直。两个阴极由单面镀铝 1.5 µm Mylar 膜构 成,镀铝面面向栅极。阳极与栅极以及阴极与 栅极之间距离均为 5 mm。雪崩室的窗由 7µm 单面镀金 Kapton 膜制作。

MPPAC 工作时,阳极加正高压,阴极加负 高压,x、y 栅极钨丝之间用高精密电阻连接。 x1、x2、y1、y2信号由电阻串两端读出,经电荷 灵敏前置放大器,主放大器放大成形,最后送到 CAMAC ADC。阳极信号经时间前放、时间主 放大器、恒分甄别器,为 ADC 提供触发信号。 数据获取之前,必须仔细调整 x1、x2、y1、y2四 路电子学参数,使得它们的变换斜率相等。



图 3 束流剖面探测器照片 Fig. 3 Photo of the 2D profile detector

221

数据获取计算机将 x₁、x₂、y₁、y₂数据以事 件方式记录在固定磁盘上。离线分析程序通过 电荷分除法计算出每个质子的 x、y 位置,构造 2D 散布图和一维位置谱。这些信息一方面反 馈给控制计算机复核和调整偏转磁铁 D_x和 D_y 参数设置,同时又为重构 3D 剂量分布图像提 供横向密度分布信息。

探测器选择 P10 作为工作气体,在自动稳 压系统控制下流气式工作。存储钢瓶内的高压 气体经减压阀、电磁阀并联进入剖面探测器和 剂量探测器,它们的气体出口并联到气体流量 调节阀的入口,阀的出口直接连到机械泵。探 测器气体入口并联一套气压传感器,实时测量 探测器的气压,通过绝对气压计送回气压控制 单元,与设置的气压比较,控制电磁阀充气速 率,使得整个探测系统工作气体保持动态平衡。 整个系统的气压稳定度可保持为(10⁵±10²) Pa。



图 4 剖面探测器用 3 组分 粒子测量的 二维散布图

Fig. 4 2D scatter of MPPAC for 3 component particles

由于目前质子加速器还不能提供质子束, 平行板雪崩室性能测试暂时在低气压下进行。 初步测试结果如下:考虑使用3组分 源,气体 探测器窗改为4µm 镀金 Mylar 膜,并用丝网支 撑。利用3组分 源测试其位置分辨和位置线 性。为了测量位置分辨,首先在 PPAC 之前放 置一个特别设计的合金铝光栅,光栅面积 250 mm ×250 mm,分为四个象限,1、3 象限按 y方向分布,2、4 象限按 x 方向分布,光栅狭缝宽1 mm,中心距离5 mm,光栅厚度为8 mm。测试时使用 C₃F₈气体,气压 700 Pa,阳极电压为 + 700 V,两阴极接地。3 组分 源距探测器80 cm,光栅直接放在探测器前面, 粒子飞行80 cm,穿过光栅,进入探测器。

图 4 是探测器测得的 粒子二维散布图。 图 5 是在该双维位置谱上,在 y 坐标加窗,向 x 坐标投影得到的一维位置谱。用高斯拟合一维 位置谱上的诸峰,结果得到 = 0.35 mm,从而 得到位置分辨为0.82 mm(FWHM)。对狭缝、 电子学分辨等因素进行修正后,得到位置分辨 为 0.54 mm(FWHM)^[5]。



图 5 y轴上加窗的 x 位置谱 Fig. 5 x position spectrum with the y windows

考虑到高能质子能量损失远低于 粒子, 尽管工作气压提高 140 倍,但信噪比仍较差,估 计位置分辨可能降到约 1 mm (FWHM)左右。

以上仅为初步测试结果,一旦条件具备,将 在实际应用条件下对剖面探测器性能进行仔细 测试。

3 剂量测量电离室

电离室结构比较简单,是只包含阳极和阴极 的纵向场电离室。阳极和阴极均由厚度1.5μm 单面镀铝 Mylar 膜制作,极间距离10mm。电离室 窗用厚度 7μm 单面镀金 Kapton 膜制作。电离 室工作气体仍为 P10,在1×10⁵ Pa下工作。工作 时,阳极加正高压,阴极接地。阳极的能量损失 信号通过电荷灵敏前置放大器、能量放大器,送 到 CAMAC ADC 记录,提取射程深度和剂量信 息,反馈给控制计算机,核实和调整射程和辐照 时间,同时与剖面探测器提供的横向分布信息重 构 3D 剂量分布图像。 目前,该电离室芯体和壳体均已完成制作, 近期将在低气压下使用3组分 粒子进行粗略 测试。

4 射程调整器

射程调整器是选用与人体组织密度相近的 材料制成的不同厚度的薄板,通常选用 PMMA (polymethyl methacrylate)材料,有 0.5、1、2、4、 8、10 mm 等厚度。它们被安放在自动控制台 上,治疗控制计算机根据治疗进程的射程分布 自动插入或移出特定厚度的薄片,使得 Bragg 峰准确达到指定深度。

射程调整器在 2 种场合使用,一是模拟测量,在治疗病人之前,完全用 PMMA 模拟人体,精确测量出 Bragg 峰的位置。二是在临床治疗病人时,按肿瘤位置、范围,插入合适厚度的 PMMA,确保 Bragg 峰落在指定位置。这些均在治疗程序控制下自动进行。

目前,该机构正在研制中。

5 讨论

放射性治疗已有近 100 年历史,过去普遍 使用 X 射线和 射线辐照,其优点是结构和使 用简单,治疗成本低。但是,它的明显缺点是治 疗过程中对健康组织和器官损伤较大。使用带 电粒子辐照,由于能量损失的 Bragg 峰效应,癌 变部分接受了大部分剂量,健康组织接受少部 分剂量,这样,癌变受到有效治疗,健康组织受 到伤害较小。因此,带电粒子治疗癌变效率高。 当然,它结构复杂,成本也高。基于小型质子加 速器质子治癌装置是解决这个矛盾的一个途 径。

IMP 质子治癌装置是主动束流控制型治 疗系统,质子束斑为几毫米,在磁铁 D_x和 D_y 控制下,对癌变区域实施网格扫描,充分利用质 子剂量沉积的 Bragg 峰特点,精确制导质子束, 实现有效治疗。这要求剂量分布的 3D 测量系 统在三维空间分辨达到约 1 mm。本工作研制 的 x,y 剖面探测器在低气压测量的位置分辨 达到了 0.54mm(FWHM),在常压下,对于质子 的位置 x,y 分辨达到约 1mm 是可能的。对 (下转第 235 页,Continued on p. 235)

235

395: 291~297.

- [2] Fang WC. A Low-power High-speed Smart Sensor Design for Space Exploration Missions [J]. Acta Astron, 2000, 46: 241 ~ 250.
- [3] Dyer CS, Sanderson C, Mugford R, et al. Radiation Environment of the Microelectronics and Photonics Test Bed as Measured by CREDO-3 [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2000, 47:481~485.
- Eid ES, Chan TY, Fossum ER, et al. Design and Characterization of Ionizing Radiation tolerant CMOS APS Image Sensors up to 30 Mrd (Si) Total Dose [J \]. IEEE Trans Nucl Sci, 2001, 48: 1 796~1 806.
- [5] Bogaerts J, Dierickx B, Mertens R. Enhanced Dark Current Generation in Protorrirradiated CMOS Active Pixel Sensors [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49:1 513~1 521.
- [6] 孟祥提,康爱国. CMOS 图像传感器 射线辐照 损伤的研究[A].中国核学会 2001 年学术年会 论文集[C].武汉:中国核学会,2001.671~673.
- [7] Meng XT, Kang AG. Dark Output Characteristic of Gamma ray Irradiated CMOS Digital Image Sensor [J]. Rare Metals, 2002, 21:79~84.

- [8] Meng XT, Kang AG, You Z. Degradation of Black and White Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) Digital Image Sensor by Gammairradiation [J]. Jpn J Appl Phys, 2002, 41:L919 ~L921.
- [9] Meng XT, Kang AG, Wang XY, et al. Gammar ray Radiation and Annealing Effects of Color CMOS Image Sensors [J]. Semicond Sci Technol, 2003, 18: L1~L3.
- [10] Chen DT, Fremont CA. Active Pixel With a Pinned Photodiode [P]. 美国专利:US5880495, 1999.
- [11] 陆 妩,任迪远,郭 旗,等.CMOS运算放大器 的质子和 辐照效应 [J].核电子学与探测技 术,1997,17(5):370~373.
- [12] Galloway KF, Schrimpt PD. MOS Device Degradation Due to Total Dose Ionizing Radiation in the Natural Space Environment: a Review [J]. Microelectronics J, 1990, 21:67~81.
- [13] Sake NS, Klein RB, Griscom DL. Formation of Interface Traps in MOSFETs During Annealing Following Low Temperature Irradiation[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1988, 35:1 234~1 240.

(上接第 222 页, From p. 222)

于气体电离室,近日将在低压下测量 粒子的 Bragg峰,待质子束可供利用时才能够实际测 定。对于射程调整器,技术上完全可以实现,重 点是安全稳定可靠。

参考文献:

- Kraft G. Tumotherapy With Ion Beams [J]. Nucl Instrum Methods, 2000, A454:1~10.
- [2] Hirao Y, Ogawa H, Yamada S, et al. Heavy Ion Synchrotron for Medical Use HIMAC Project at

NIR&JAPAN [J]. Nucl Phys, 1992, A538:541c ~ 550c.

- [3] Kraft G, Arndt U, Becher W, et al., Heavy Ion Therapy at GSI[J]. Nucl Instrum Methods, 1995, A367:66~70.
- [4] 郭忠言,詹文龙,肖国青,等.两种位置灵敏平行 板血崩探测器[J].原子能科学技术,2004,38
 (2):169~173.
- [5] 胡正国,郭忠言,肖国青,等.用于重离子治癌的 大面积 PPAC[J].原子核物理评论,2004(待发 表).