

一台用于 IMP 重离子治癌线上的电离室

胡正国^{1,2} 徐治国¹ 肖国青¹ 孙志宇¹ 徐珊珊¹ 章学恒^{1,2}
毛瑞士^{1,2} 张宏斌¹ 黄天衡^{1,2} 付 芬^{1,2} 唐 彬^{1,2} 涂小林^{1,2}
王 猛¹ 肖志刚¹ 王建松¹ 李 强¹ 郭忠言¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 介绍一种用于中国科学院近代物理研究所(IMP)重离子肿瘤治疗线上、于纵向场常压下工作的气体电离室,其灵敏面积为 250 mm×250 mm,极间距离为 10 mm,电离室工作气体为 P10,在 85kPa 下流气式工作。用 75 MeV/u ¹²C 离子入射,测量了电离室的坪曲线。发现电离室工作坪区 900—3000 V, ¹²C 的 Bragg 峰位于 13.73 mm,峰的极大值半高宽(FWHM)为 0.19 mm。

关键词 重离子治癌, 电离室, Bragg 曲线, 正电子影像装置

中图分类号 TL816.5

癌症已经成为危害人类生命最重要的杀手之一。多年来,医学工作者一直致力于研究治疗癌症的各种方法。1895 年伦琴发现 X 射线,不久, X 射线和 γ 射线就被用于肿瘤治疗。X、 γ 射线治疗肿瘤的效果是明显的,但是,缺点也是明显的:由于它们的能量损失-射程曲线是指数衰减的,射线在到达肿瘤体积之前,大量能量沉积在健康组织之中,对健康细胞造成致命的伤害^[1]。而带电粒子能量-射程关系是典型反转的 Bragg 曲线,入射粒子在物质中行进时能量损失较小,随路程缓慢增加,在接近粒子射程的末端,能量损失急剧增加达到一极大值-Bragg 峰,然后戛然而止,能损为 0。所以带电粒子治疗肿瘤具有独特的优势;入射粒子将大部分能量沉积在射程末端,形成 Bragg 峰;通过精确调节 Bragg 峰的位置,使其位于肿瘤组织体积内,从而达到杀死肿瘤细胞的目的,同时对射程中健康组织伤害最小。研究发现 ¹²C 粒子是治疗肿瘤的理想重离子,它的 Bragg 峰能量沉积能有效杀死癌细胞,而对路径上健康组织的损伤是可以恢复的。

1950 年代美国首先将质子用于治疗肿瘤,现在质子治疗肿瘤装置遍布世界各地,接受治疗人数超过 4 万。随着计算机、电子学和加速器技术的发展,使得重离子治疗肿瘤自 1980 年代快速发展。德国的 GSI^[2],日本的 HIMAC^[3]等研建了用 200—400 MeV/u ¹²C 粒子治疗肿瘤的装置并开展临床治疗,接受治疗的病人数以千计。2005 年底,中国科学院

近代物理研究所(IMP)建成了一个用 120 MeV/u ¹²C 离子治疗浅层肿瘤的装置,并计划在 CSR 上研建 200—400 MeV/u ¹²C 离子治疗肿瘤的装置。

本文描述一台为该装置研制的一种纵向场电离室(IC)及其在重离子肿瘤治疗装置上的一些性能测试。

1 IMP 浅层治癌装置简介

重离子肿瘤治疗装置主要包括重离子束流交付系统、剂量测量系统、PET (Positron Emission Tomography) 检测系统、安全保证系统和计算机自动控制和数据采集分析显示系统。图 1 给出了 IMP 浅层肿瘤治疗装置的束流控制系统,三维剂量测量探测器系统及 PET 检测系统分布示意图。该装置主要由降能器、束流控制系统和 3D 束流监测系统组成。束流控制系统包括 X 方向扫描磁铁 Dx, Y 方向扫描磁铁 Dy 和 2 个聚焦磁铁 Q₁、Q₂。3D 剂量监测系统包括束流剖面探测器 XY-1、XY-2,束流剂量和射程探测器电离室和正电子影像装置(Positron Emission Tomography, PET)。由 HIRFL 提供的最高能量为 120 MeV/u 的 ¹²C 束流进入 IMP 浅层肿瘤治疗线。治疗之前,根据肿瘤的位置、形状、深度设计专门与之匹配的降能器,将 ¹²C 初始能量降低,使得 Bragg 峰刚好位于肿瘤体积内部,再由束流控制系统将调整好的束流辐照肿瘤的相应部位,进行临床治疗。

国家自然科学基金(10305015,10475098),国家基金委创新研究群体科学基金(10221003)资助项目

第一作者:胡正国,男,1979 年出生,2003 年于中国科学院近代物理研究所获硕士学位,从事实验核物理研究,助理研究员

收稿日期:2006-09-22,修回日期:2006-11-27

此浅层治癌装置对黑色素瘤、皮肤癌、鼻咽等 浅表层的肿瘤具有很好的治疗作用。

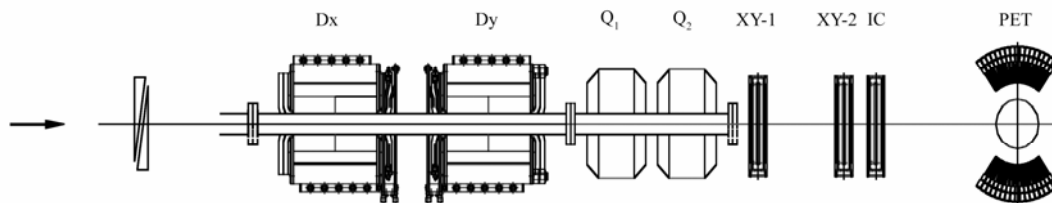


图 1 重离子浅层治癌装置示意图
Fig.1 Layout of the facility for treatment of localized skin-seated tumors

2 电离室的结构和性能测试

纵向场电离室(IC)和 2 维位置灵敏多丝正比室(MWPC)是构成 3D 剂量测量系统的核心探测器。电离室的作用主要是准确测量辐照剂量和粒子射程。在重离子肿瘤治疗过程中,通过调整 Bragg 峰位使得大部分能量正好沉积在肿瘤所在的体积之内,杀死肿瘤细胞。因此,准确测量 Bragg 峰的位置是非常重要的,为此,我们专门为 IMP 重离子肿瘤治疗装置研制了一种大面积纵向场电离室。

电离室结构比较简单,它是只包含一个阳极和一个阴极的纵向场电离室(图 2),灵敏面积 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$ 。阳极和阴极都是由厚度 $1.5\mu\text{m}$ 单面镀铝 Mylar 膜制作,极间距离 10mm 。电离室窗由厚度 $7\mu\text{m}$ 的单面镀金 Kapton 膜制作。电离室工作气体为 P10 (90% Ar+10% CH₄),在自动稳压系统控制下流气式工作,气压稳定在 $(85.0 \pm 0.2)\text{kPa}$ (兰州大气压)。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。

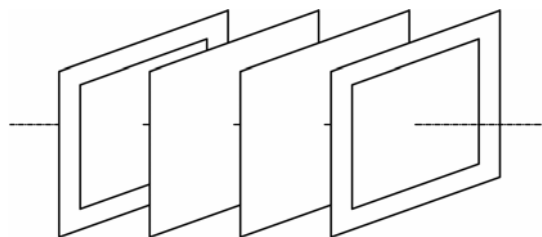


图 2 电离室的结构示意图
Fig.2 Layout of framework of the IC

图 3 是电离室的坪曲线。HIRFL 提供的 75MeV/u ^{12}C 束流经肿瘤治疗线上偏转磁铁和聚焦透镜注入测试电离室,测量阳极电压和阳极输出信号幅度的关系-坪曲线。从图中可以看出,此电离室在 900V 已到达坪区, 3000V 仍处于坪区,可见电离室的工作坪区足够长,且坪斜非常小。

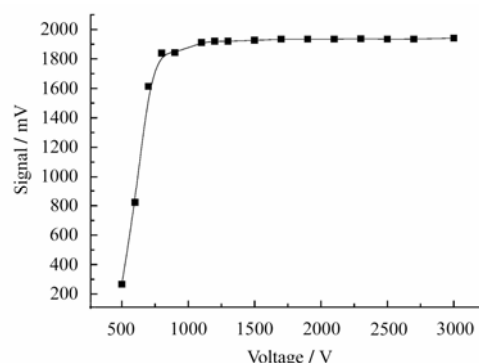


图 3 电离室的工作坪区

Fig.3 The plateau of the IC

使用与人体组织密度相近的 PMMA 材料模拟人体,精确测量 ^{12}C 离子的 Bragg 峰的位置。测试过程中,电离室的阳极电压固定在 2300V ,工作气体仍为 P10,气压仍为 $85.0 \pm 0.2\text{kPa}$,插入不同厚度的 PMMA 吸收片到入射束流与电离室之间,记录每一厚度下电离室阳极信号的幅度,直到信号幅度变得很小,说明此时的 PMMA 吸收片已经将 ^{12}C 离子全阻止。如图 4 所示,横坐标为插入的吸收片的厚度,纵坐标为 ^{12}C 离子在电离室内能损产生的阳极信号幅度,这样就得到了 ^{12}C 离子在 PMMA 吸收片中能量损失的 Bragg 峰, Bragg 峰位位于 13.73mm 。能量为 75MeV/u 的 ^{12}C 束流入射生物体组织的实际深度,即 Bragg 峰位约为 16mm 。考虑 HIRFL 提供的 75MeV/u 的 ^{12}C 离子在入射过程中经过隔离窗等物质,进入吸收片前的能量大约为 75MeV/u ,测得的 Bragg 峰位与理论计算的值基本上一致。Bragg 峰的极大值半高宽为 0.19mm (FWHM),由此可见,用该电离室测量重离子射程的精度是很高的。

将能量换算为剂量,就可以得到剂量分布的 Bragg 峰。同时,此电离室的阳极给出的电荷信号经过电子学转换进入计数器就可以直接给出计数,经过效率修正后就能够直接得到入射的离子数目。此电离室可以在 10^6 离子/ps 的束流照射下正常工作,所以此电离室的指标都满足了重离子治癌在线监测的需要。

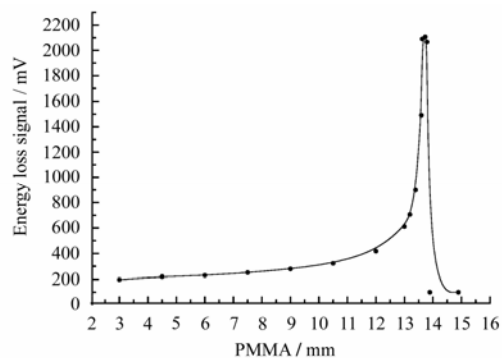


图4 电离室测试得到的 ^{12}C 离子的 Bragg 峰
Fig.4 The Bragg peak for ^{12}C ions measured by IC

3 电离室 Bragg 峰与 PET 测试结果比较

^{12}C 粒子入射到 PMMA 中, 有很少量粒子发生碎裂反应, 产生 ^{12}C 、 ^{10}C 、 ^{15}O 等 β^+ 衰变碎片, PET(Positron Emission Tomography)可以通过符合

技术测量这些碎片正电子湮灭的 2 个 γ 光子、确定湮灭位置、监测 ^{12}C 粒子入射深度。

在实验中先利用气体电离室测出 Bragg 峰位置, 方法如前所述, Bragg 峰位在 13.73mm, 半极大值全宽度(FWHM)0.19mm。然后, 在 ^{12}C 粒子辐照停止 1min 之后, PET 开始测量正电子湮灭的 2 个 γ 光子, 图 5 是 PET 测量的 ^{12}C 、 ^{10}C 、 ^{15}O 的 Bragg 峰位置图。A 是 3 种碎片混合的 Bragg 峰; B 是 ^{11}C 的 Bragg 峰; C 是 ^{10}C 的 Bragg 峰; D 是 ^{15}O 的 Bragg 峰。各图中都显示了电离室测量的 ^{12}C 的 Bragg 峰位置。

PET 测量 ^{12}C 、 ^{10}C 、 ^{15}O Bragg 峰与电离室测量 ^{12}C 的 Bragg 峰位置有些差异, 主要是它们的核子数差异所致。通过计算校正, 从 PET 测量数据可以推出 ^{12}C Bragg 峰的准确位置。

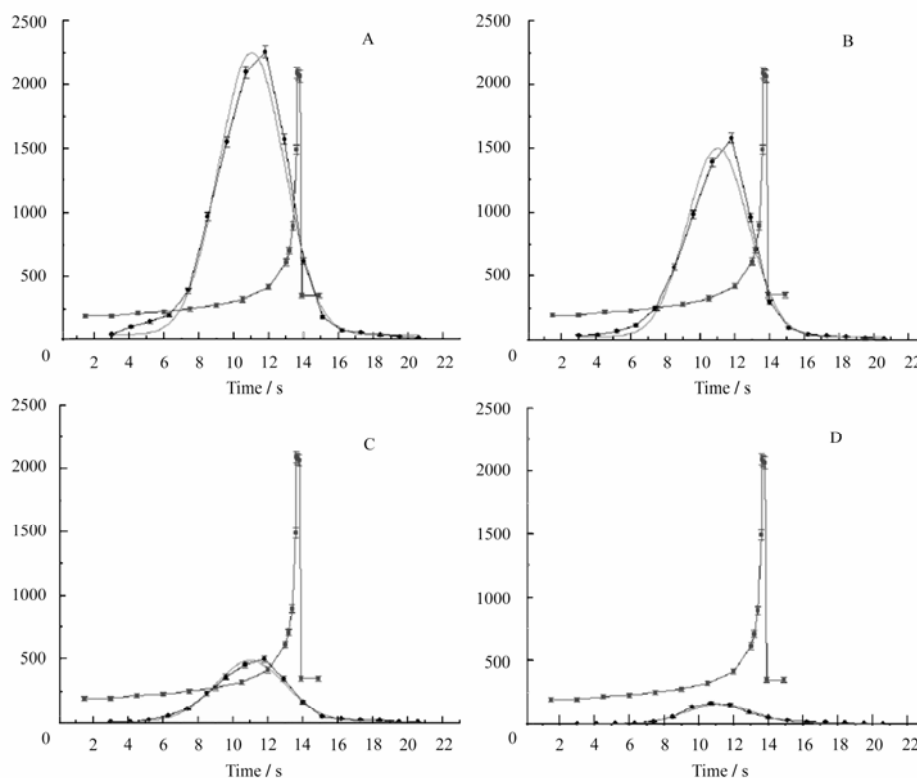


图5 正电子产物深度分布与 Bragg 峰比较
Fig.5 Comparison of the depth distributions of various positron products and Bragg peaks

4 结果与讨论

通过为 IMP 研制的纵向场常压气体电离室的在束测试, 显示出该电离室具有较长的坪区(900—3000V), 坪斜很小。测量 75MeV/u ^{12}C 离子射程-剂量曲线, Bragg 峰在 13.73 mm, 并有 0.19 mm 的 FWHM。由此可见, 该电离室工作稳定, 射程测量

精度高, 适合重离子肿瘤治疗装置的要求。

通过电离室和 PET 测量的 Bragg 峰位置分布数据比较, 我们认为研制中的 PET 可以执行重离子肿瘤治疗的在束监测。但是, PET 测量的 Bragg 峰较宽($\sim 3.5\text{mm}$ FWHM), 需要仔细调整, 提高分辨能力。

对于电离室计数率能力测试, 在 10^6 pps 75 MeV/u ^{12}C 粒子下, 电离室工作正常; 而在更高计数率下, 需要进一步测试。

现在, 近代物理研究所 ^{12}C 浅层肿瘤治疗装置已建成并已通过鉴定验收, 用该装置已经进行了多次动物和细胞实验, 现在正在为浅层肿瘤患者进行临床治疗。

中国科学院近代物理研究所正在兰州重离子加速器冷却储存环上建造一条深层肿瘤治疗装置, 届

时 ^{12}C 离子的能量将达到 430 MeV/u, 可以进行深层肿瘤的治疗。

参考文献

- 1 Kraft G. Nucl Instrum Methods, 2000, **A454**: 1—10
- 2 Stelzer H. Nucl Phys B (Proc Suppl.), 1998, **61B**: 650
- 3 Fuminori Soga. Progress of Heavy Ion Therapy, World Scientific, 2001

An ionization chamber developed for the facility of heavy ions therapy at IMP

HU Zhengguo^{1,2} XU Zhiguo¹ XIAO Guoqing¹ SUN Zhiyu¹ XU Hushan¹ ZHANG Xueheng^{1,2}
MAO Ruishi^{1,2} ZHANG Hongbin¹ HUANG Tianheng^{1,2} FU Fen^{1,2} TANG Bin^{1,2}
TU Xiaolin^{1,2} WANG Meng¹ XIAO Zhigang¹ WANG Jiansong¹ LI Qiang¹
GUO Zhongyan¹

1 (Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract An ionization chamber (IC) with a sensitive area of 250mm×250 mm was developed for the Institute of Modern Physics (IMP) heavy ion therapy facility. The gap was 10 mm between the anode and the cathode. A good plateau was seen in a large voltage range from 900V to 3000V when the IC was operated at (85.0 ± 0.2) kPa with P10 (10% CH_4 +90% Ar) as flowing gas. By putting the different thicknesses of polymethyl methacrylate (PMMA) in front of the IC, the Bragg curve for the beam in PMMA was measured by the IC. During the test, the voltage of 2300 V was applied to the anode of the IC. The measured Bragg peak for 75 MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$ ions in the PMMA was located at 13.73 mm and the FWHM was 0.19mm.

Key words Heavy ions therapy, Ionization chamber, Bragg peak, Positron emission tomography

CLC TL816.5