

文章编号: 1007-4627(2003)03-0197-04

## HIRFL 的辐照治癌终端

朱 昆, 张金泉, 唐靖宇, 尹全民, 詹文龙

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 为了进行重离子束流的肿瘤治疗和生物效应的研究, HIRFL 正在建造一个辐照治癌终端. 主要介绍了该终端的束流制备方法和束流线的布局、性能参数和束流光学设计计算结果.

**关键词:** 束流线; 癌症治疗; 重离子

**中图分类号:** TL501+.5      **文献标识码:** A

### 1 引言

重离子束流近年来被广泛地应用于重离子生物效应、重离子治癌、材料科学和航天器件的单粒子效应等研究领域. 包括兰州重离子加速器国家实验室在内的许多国际重离子实验中心都开展了很多这些方面的工作. 在重离子治癌方面, 由于重离子束人射到物质中时其能量损失主要集中在射程终端, 形成一个尖锐的布拉格峰, 具有比其他辐射优越得多的治癌效果, 因此, 在国际上引起普遍重视, 开展了许多研究工作. 在 GSI(德国重离子研究中心)已经建成了治癌终端并已经达到临床治疗阶段<sup>[1]</sup>.

HIRFL 不仅可以把 C, O 等轻离子的能量加速到 100 MeV/u, 而且在 10 MeV 质子注入回旋加速器建成后, 还可以提供能量高于 100 MeV 的质子. 这些束流十分适合于癌症治疗的实验研究, 甚至临床治疗研究. 另外, 随着正在进行的 HIRFL 改造工作的深入, HIRFL 的束流品种将由现在的 C—Xe 扩展到 C—U, 也将为开展其他各种领域的辐照研究提供十分有利的束流条件. 为此, 在 HIRFL 整个束流传输线进行分时供束改造的时候, 我们设计了一个置于 TR4 束线上的辐照治癌终端. 本文将介绍该终端的束流传输系统的光学设计.

### 2 癌症治疗对束流线的要求

目前世界上各实验室的治癌终端一般具有两种形式, 用于不同种类肿瘤的临床治疗或临床治疗研究. 一种是具有旋转机架的治疗终端<sup>[2]</sup>, 德国 GSI 的重离子治癌终端就属于这一种. 这种旋转机架能

够在不受旋转角度影响的情况下将束流消色差传输到治疗位置, 并且能在  $x$  和  $y$  发射度改变的情况下得到一个大小不变的束斑. 它是一个向心式机架, 束流最终指向轴线, 治疗床固定在轴线上. 另一种是固定束流方向的治癌终端. 这种终端的束流光学要求与前一种相同, 只是束流方向不能改变. 本文所介绍的 HIRFL 的治癌终端属于后一种. 它的建成不仅可以进行治癌的临床实验研究和某些癌症的临床治疗, 并且将为兰州重离子冷却存储环建成以后设计具有旋转机架的治癌终端提供了必要的经验.

重离子治癌终端位置的选定主要考虑以下几点要求: (1) 必须尽可能地减少本底辐射对病人的伤害; (2) 为了使病人的治疗床能水平放置, 束流必需竖直向下传输到病人的肿瘤上; (3) 重离子治癌终端一般主要由以下几个部分构成: 束流的输运系统、治疗方案设计软件系统、正电子发射  $\gamma$  射线层析系统、束流的位置与能量的探测和控制系统以及治疗床等<sup>[3]</sup>. 所有这些设备除了需要一定大小的面积外, 还需要束流线的最后一个束流光学元件离开治疗床 2.6 m, 以便安装有关装置. 为此, 在兰州重离子加速器束流输运线进行分时供束改造时, 位于 HIRFL 实验大厅下面的地下室被确定为辐照治癌终端的所在位置. 这间地下室远离加速器大厅, 又与实验大厅有 1.6 m 的水泥天花板相隔, 可以确保无用辐射完全被隔离. 图 1 给出了辐照治癌终端在 HIRFL 新束流线中的位置.

收稿日期: 2002-12-12; 修改日期: 2003-01-02

作者简介: 朱 昆(1977-), 男(汉族), 陕西汉中, 在读博士, 从事加速器物理研究.

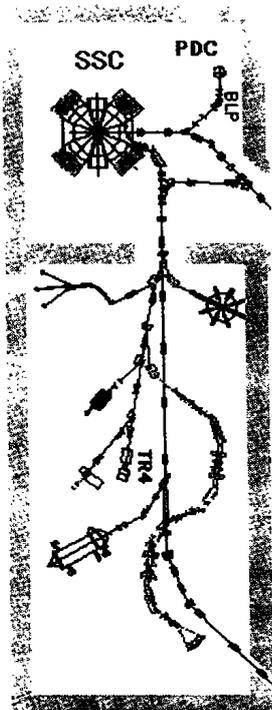


图 1 治癌终端位置

除了上述考虑之外，这条束流线还必需满足以下的光学要求。癌症治疗需要频繁地改变离子能量以便布拉格峰可以处于肿瘤的不同纵向深度处。这要求在束流线上必需设置一个由降能片和光阑组成的降能装置。为了使束流在通过降能片时由于多次库仑散射所造成的相空间的增大为最小，束流在降能片处要形成小斑点的双腰；肿瘤治疗需要在不同纵向深度的不同形状的横截面上有均匀的束流照射。这要求束流线上必需具备一个束流的横向二维扫描装置，使束流可以均匀的照射到需要照射的面积上。为了保证束流均匀，并且在肿块边沿上有一

个清晰的束流边界，被扫描的束流斑点应尽可能的小；整个束流线，特别是在降能片以后的束流线上，还必需尽可能的实现消色差传输，以避免能散引起的像点变大。

针对上述设计要求，我们计划用一组降能片对束流能量进行调节。在治疗床上边加上两块扫描磁铁，分别进行  $x$  方向和  $y$  方向的扫描。传输系统使到达治疗床时的束流成为能散很小，并且束斑很小的束流。将降能片放置在远离治疗床的 HIRFL 的实验大厅里，并采取严格的辐射防护措施，以减少其次级辐射的影响。

### 3 束流线的布局

根据上述要求所设计的束运线的布局图如图 2 所示。从 HIRFL 主加速器 SSC 引出的束流在三狭缝组的 S2 狭缝处形成一个  $x$  和  $y$  方向都是 4 mm 的双腰。S2 是通往 HIRFL 所有实验终端和 CSR 的全部束流线的起点。束流经过三组合四极透镜 2Q07, 2Q08 和 2Q09 后，在分时开关磁铁 BL2-BSW 处被偏转  $12^\circ$ ，使得这个治癌终端和用 BL2-BSW 分时切换到  $0^\circ$  或  $-12^\circ$  的其它终端可以同时得到束流。三组合四极透镜 2Q07, 2Q08, 2Q09 和 TCA-Q1, TCA-Q2, TCA-Q3 组成一个单元节使束流在 TCA-Q3 后 2.5 m 处成一个在  $x$  与  $y$  方向半径均为 8 mm 的双腰。TCA-Q4, TCA-Q5 和 TCA-Q6 使束流平行传输，TCA-Q7 和 TCA-Q8 使平行束流聚焦成  $x$  和  $y$  方向半径都是 2 mm 小斑点落在降能片上。小的束斑可以使束流经过降能片后发射度的增加最小。降能片的作用是用来调节束流能量以得到不同的穿透深度，不同治疗或研究需要不

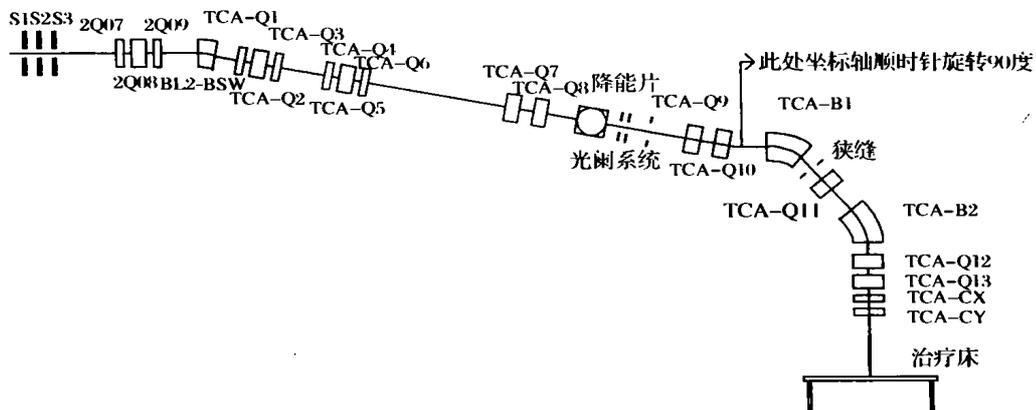


图 2 治癌终端元件布局图

同的降能片, 可以通过一个计算机程序 TRIM 较为精确地给出降能片的厚度. 通过降能片后束流发射度将增加且使束流产生能散, 为了使束流的发射度与降能片后的束运线接收度相匹配, 需要在降能片后加上光栏来限制束流的发射度. TCA-Q9, TCA-Q10 和 TCA-B1 与它后边 0.7 m 处的狭缝构成动量分析装置, 选择所要求的能量. TCA-B1, TCA-Q11 和 TCA-B2 构成对称消色差系统, 使束流经过两个偏转磁铁后成为消色差束流. TCA-Q12 和 TCA-Q13 对束流起聚焦作用. 它们使束流在治疗床处在  $x$  和  $y$  方向成半径为 2 mm 的小斑点, 治疗床离 TCA-Q13 有 2.6 m. TCA-CY 和 TCA-CX 两个扫描磁铁进行纵向和横向扫描. TCA-CY 是快扫描磁铁, TCA-CX 是慢扫描磁铁, 两个磁铁的长度均为 0.2 m. 在扫描磁铁后放置测量束流位置的探测器, 确定束流的实际位置以对束流进行调节.

#### 4 束流光学计算结果

根据上述的束流光学要求使用 TRANSPORT 程序进行了束流光学一级计算. 计算中所使用的束流的初始条件如下: (1) 离子的最大磁刚度为 3.1 Tm; (2) 束流的发射度在水平方向和垂直方向均为  $10 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ; (3) 初始束流的能量散度为 0.5%. 束流在经过降能片后, 由于受到降能片中原子核的多次库仑散射, 无论是发射度还是能量散度都有相应的增大. 降能片的厚度越大, 发射度和

能量散度的增加就越大. 为了在降能片后的束流中降低束流发射度, 在降能片后面设置了一个光栏系统: GL1, GL2 和 GL3, 其半径分别为 3, 3.15 和 4 mm. 用此系统可以限制发射度的大小以及调节发射度的形状. GL1 和 GL2 用来把束流的发射度降低到  $9 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , GL3 用来拦截 GL1 和 GL2 光栏的边沿所产生的散射离子. 束流能量分散的限制是用由 TCA-Q09, TCA-Q10, TCA-B2 和狭缝 S 组成的能量分析系统来实现的. 光学计算表明, 这个能量分析系统具有  $\Delta E/E=0.82\%$  的能量分辨率, 可以将束流的能量分散限到 1% 以下. 发射度限制和能量分析都会带来束流强度的损失. 由于治癌和辐照研究都只需要很小的束流强度, HIRFL 的束流强度是足够的.

图 3 是这条束流线的包络图. 计算中, 降能片后经过限制的束流发射度大小为  $9 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 经过能量分析后的束流能量分散为 1%. 根据包络计算结果, 确定了四极透镜和偏转磁铁的参数. 根据  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  扫描面积的要求, 设计计算了扫描磁铁 TCA-CY 和 TCA-CX 的参数. 四极透镜部分使用原有的元件, 新加工的透镜有效长度为 30 cm, 孔径 4 cm, 最大极头磁场为 0.6 T. 偏转磁铁的参数在下表 1 中给出. 扫描磁铁 TCA-CY 和 TCA-CX 的最大扫描磁场分别为 0.154 和 0.176 T, 间隙宽度为 4 cm.

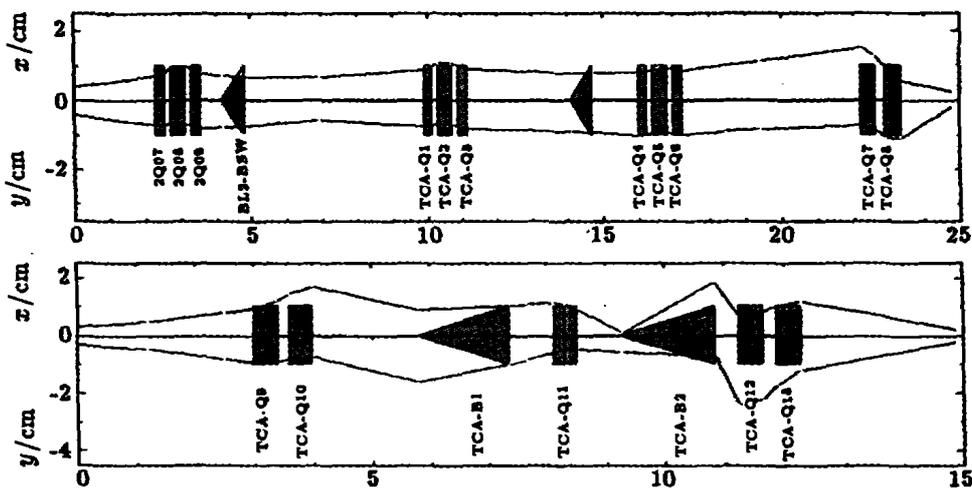


图 3 束流包络图

上: 降能片前束流包络图, 下: 降能片后束流包络图.

表 1 偏转磁铁参数

偏转磁铁	偏转角度/(°)	最大磁场/T	曲率半径/m	磁隙/cm	入口极面转动角/(°)	出口极面转动角/(°)
BL2-BSW	12.0	1.046	2.886	8.0	0	12.0
TCA-B1	45.0	1.509	2.0	8.0	22.5	22.5
TCA-B2	45.0	1.509	2.0	8.0	22.5	22.5

## 5 结束语

按照重离子治癌终端对束流的要求所设计的上述束流光学系统可以提供一个离子能量可以连续改变、扫描面积为  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  的均匀束流。HIRFL 不仅可以为该终端提供 125 MeV 的质子和 100 MeV/u 的 C, O 等轻重离子, 而且可提供 HIRFL 所

加速的全部重离子。这个终端建成以后, 既可用于来进行重离子治癌研究和某些种类肿瘤的临床治疗, 也为重离子生物效应、材料科学和航天器件的单粒子效应等应用研究提供了一个方便的实验平台。目前, 按照束流光学计算结果所给出的元件参数已做了工程技术设计, 整个系统的元件的加工制造正在进行中。

## 参 考 文 献:

- [1] Badura E, Becher W. Status Report of the Heavy Ion Therapy at GSI[M]. GSI Scientific Report, 1995, 142—146.
- [2] Badura E, Becher W. Patients Treated with Carbon Beams: Status report of the heavy-ion therapy at GSI[M]. GSI Scientific Report, 1997, 140—145.
- [3] Arndt U, Becher W. Heavy Ion Therapy at GSI[M]. GSI Scientific Report, 1994, 215—219.

## New Experimental Terminal for Cancer Therapy of HIRFL

ZHU Kun, ZHANG Jin-quan, TANG Jing-yu, YIN Quan-min, ZHAN Wen-long  
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** A new experimental terminal is being constructed at HIRFL for research program of proton and heavy ion therapies and irradiation effects of living things. The beam preparation method and the layout, performance and beam optics calculation of the beam line are presented.

**Key words:** beam line; tumor therapy; heavy ion