

CSR 放射性次级束流线*

宋明涛 杨晓东 夏佳文 詹文龙

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 兴建中的放射性次级束流线,是兰州重离子冷却储存环中连接主环和实验环的束运线的主要部分. 描述它的结构、离子光学,以及二、三阶像差校正.

关键词 次级束流 离子光学 高阶像差

1 引言

在中能区,碎裂过程是一个很重要的反应机制. 反应中产生的远离稳定线的奇异核,集中于一个小角锥内出射,具有较小的动量分布. 为了研究这些奇异核的性质及其次级反应,必须将它们从初级束流和其他碎片中分离出来. 近20年来,随着核物理研究的深入发展,实验核物理学家对放射性束流的兴趣与日俱增. 在天体物理、原子物理、材料及表面科学和生物医药研究等领域,使用放射性束流的要求也越来越多.

中国科学院兰州近代物理研究所的放射性重离子次级束流线^[1](RIBLL1),可以提供中低能区20—100MeV/u的次级束流. 目前,国家重大科学工程兰州重离子冷却储存环(CSR)已开始兴建^[2]. CSR主环将加速和储存更高能量的重离子束流,预期¹²C⁶⁺束的能量达到900MeV/u;从主环引出的束流可以直接传输到实验环,也可以打靶后成为次级束流而进入实验环. 放射性次级束流线(RIBLL2)是连接主环和实验环的束运线的主要组成部分,将在竣工之后提供中高能区100—900MeV/u的次级束流. 本文详细描述RIBLL2的光学设计及其性能参数.

2 奇异核的产生和分离

在中高能区用重离子束轰击薄靶时,弹核与靶核发生周边碰撞,通过弹核碎裂、转移反应甚至弹核裂变,产生奇异核. 它们通常是全剥离的,具有和弹核几乎相同的速度,集中在0°附近的小角锥内出射. 产额随入射能量增加而急剧增长.

次级束流线,又称分离器,用来分离感兴趣的奇异核,产生次级束流. 它主要由聚焦

2000-04-25 收稿

* 国家重大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环项目资助

磁铁和偏转磁铁构成。从靶上出射的离子包括初级束离子和不同的反应产物,具有不同的磁刚度,被分离器的二极磁铁偏转后选择性地通过中间焦平面狭缝,分离出一定 Z/A 值的碎片(在中高能区域离子被全剥离),其能量 $E \propto Z^2/A$ 。然后,碎片穿过置于中间焦平面的厚度为 t 的降能片,由于质量数 A 和原子序数 Z 不同而损失不等的能量 $\Delta E \propto AZ^2 t/E$,以相对能损表示 $\Delta E/E = kA^3 t/Z^2$ 。一般分离器第二部分为消色散聚焦装置,将不同的核素聚焦在最终焦平面不同的位置。调节第二部分的磁刚度 $\Delta(B\rho)/B\rho = 1/2 (\Delta E/E)$ 和最终焦平面狭缝的宽度,就能唯一地选取感兴趣的前冲碎片,获得次级束流。

3 RIBLL2 的物理设计

3.1 分离器的光学参数

(1) 最大磁刚度:磁刚度定义为离子动量和电荷态之比。对于给定的磁铁间隙,分离器的最大磁刚度基本上决定了磁铁的重量及最大耗电量,它们分别正比于 $(B\rho)^3$ 和 $(B\rho)^2 - (B\rho)^{2.5}$ 。

(2) 分辨本领:分离器的动量分辨本领定义为色散焦平面处的位置色散与束流宽度之比, $R_p = R_{16}(i)/2x_i$, 本文采用 TRANSPORT^[3] 程序的记号, R_{16} 为线性传输矩阵的矩阵元。色散焦平面处 $R_{12}(i) = 0$, 即点到点成像,因而束流半宽度 $x_i = R_{11}(i)x_o$, x_o 为束流在靶上的半宽度。所以在一阶近似下, $R_p = R_{16}(i)/2R_{11}x_o$ 。又因为 $R_{12}(i) = 0$ 时,从辛条件知 $R_{16}(i)R_{11}(i)R_{52}(i)$, 得到 $R_p = R_{52}(i)/2x_o$ 。其中,矩阵元 R_{52} 由类正弦轨道 $R_{12}(s)$ 与二极铁半径 ρ 之比沿着中心轨道从物点(o)到像点(i)的积分给出,

$$R_{52}(i) = \int_o^i R_{12}(s)/\rho ds. \quad (1)$$

由此可见,为了提高分辨本领,必须增大偏转磁铁内的类正弦轨道 $R_{12}(s)$ 。

(3) 焦平面倾角:一阶近似下,相对于中心离子动量偏差为 δ 的离子,在焦点处与中心轨道径向偏离 $R_{16}\delta$;二阶近似下,主要的附加位移是 $R_{126}\delta$ (假定在物点以单位角发射)。该位移对焦点的张角为 R_{22} ,沿束流方向对应的偏离为 $R_{126}\delta/R_{22}$ 。因此,当 $R_{126} \neq 0$ 时,焦平面与中心轨道之间的夹角 χ 并非 90° ,其正切函数为

$$\text{tg}\chi = \frac{R_{16}\delta}{R_{126}\delta/R_{22}} = \frac{R_{16}}{R_{11}R_{126}}. \quad (2)$$

实际上常常希望通过校正,使得到焦平面垂直于束流轴线,不仅提高了实际分辨本领,而且利于安装降能片和粒子探测器。

(4) 动量接收度:实验核物理希望有高的动量接收度 δ ,客观上要求额外的磁铁孔径 $R_{16}\delta$,从而导致磁铁重量的增加。另外,动量离散越大,色差越严重。确定适当大的动量接收度后,采用小色散方案比较有利。这意味着必须减小放大率 $R_{11}(i)$ 以保证分辨本领。

(5) 立体角接收度:立体角接收度可以近似地表示为水平方向(或径向)与垂直方向

(或轴向)接收度 θ, ϕ 的乘积, $\Omega = \pi\theta\phi$. 束流尺寸和所需磁铁孔径主要取决于类正弦轨道 $R_{12}\theta$ 及 $R_{34}\phi$. 二极磁铁的重量和 θ^2 成正比, 其耗电量正比于 ϕ^2 . 另外, 发散角越大, 几何像差越严重. 因此, 立体角接收度也要折衷确定.

3.2 分离器的磁聚焦结构

RIBLL2 采取双消色差的对称结构(见图 1). 三组合四极透镜收集前冲的反应产物, 使之形成平行束并传输到分析磁铁的有效磁场区; 两组透镜将它们汇聚到中间焦平面上, 在水平和垂直平面内同时形成点到点、平行到平行的像, 相移均为 π . 不同磁刚度的离子汇聚在不同的焦点上, 此时位置色散为极大值. 由于角色散为零, 这样就使镜像对称的第二部分自然实现双消色差. 图 2 给出了动量偏离分别为 $\pm 1\%$ 的束流的包络, 虚线代表各自中心粒子的轨迹. 动量不同的粒子在中间焦平面上分离, 在最终焦平面上又重新汇聚为一点(水平方向). 表 1 中列出了 RIBLL2 的主要参数.

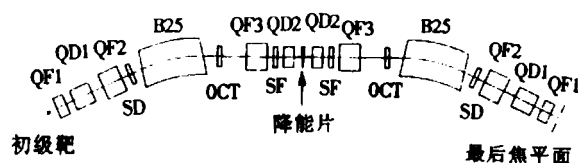


图 1 次级束流线 RIBLL2 的磁铁布局

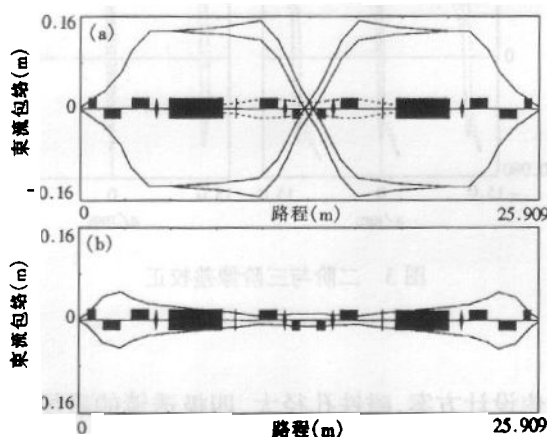


图 2 水平方向(a)和垂直方向(b)的束流包络

表 1 RIBLL2 的主要参数

r_p/mm	θ/mrad	ϕ/mrad	R_p	$\delta/\%$	$B\rho_{\text{max}}/\text{Tm}$	总长度(m)
+1	25	25	1200	± 1	10.64	25.91
	R_{11}	R_{33}	R_{52}/m	R_{16}/m	R_{26}	χ
中间焦平面	-0.487	-11.77	2.40	1.169	0	90°
最终焦平面	1	1	0	0	0	90°

3.3 像差校正

粒子跟踪显示,束流平行通过二极铁,几何像差可以忽略;像差主要表现为强聚焦结构引起的二阶色差(图 3(a)). 图中各点表示水平方向的初始位置在发射度椭圆边界上的粒子,跟踪至中间焦平面时的相空间位置. 三组粒子的动量偏差分别为 -1% , 0 , $+1\%$, 实线为中心粒子取对应动量值的椭圆变换. 色差导致像的宽度随动量偏差线性增加,实际分辨本领降低. 为校正色差,在色散较大处 QF3 和 QD2 之间插入六极磁铁 SF(见图 1),使得相移恢复至 π ,却不可避免地引入了二阶几何像差(图 3(b)). 在 QF2 和 B25 之间插入六极磁铁 SD,可以部分校正几何像差(图 3(c)),剩余的三阶像差由 B25 和 QF3 之间的八极铁校正(图 3(d)). 磁铁位置的选择,以少引入更高阶像差为原则.

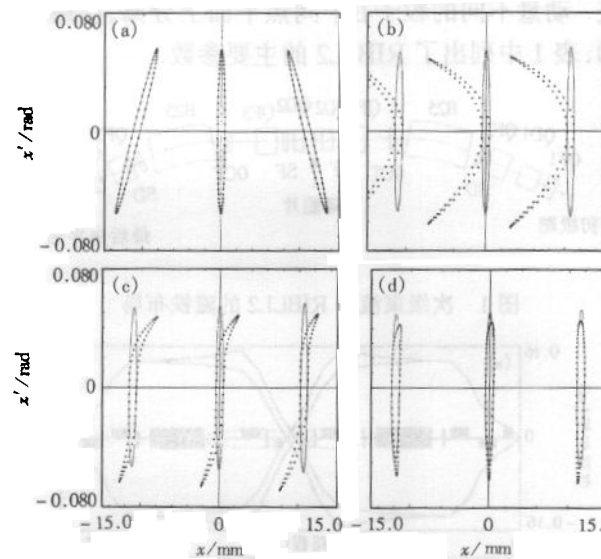


图 3 二阶与三阶像差校正

3.4 磁铁参数

RIBLL2 采取强聚焦设计方案,磁铁孔径大,四极透镜的磁场梯度高. 由于垂直方向的束流包络不及水平方向的一半,因此采用跑道形的真空管道以减小磁铁的内切圆半径,将四极透镜的极面场强控制在 1T 以下. 二极铁的偏转半径为 7m ,偏转角 25° ,设计重量约 30t . 表 2 中列出了 RIBLL2 主要的磁体参数.

表 2 RIBLL2 的主要磁体参数

	数量	有效长度 (mm)	最高场强 (T)	有效孔径 (mm^2)
二极磁铁	2	3055	1.52	320×70
四极透镜	2	1000	0.90	150×110
	4	500	0.89	150×110
	4	1000	0.71	320×110
六极磁铁	4	200	0.37	320×110

4 结论

RIBLL2 采用小色散、强聚焦方案和细致的像差校正, 仅以 25° 的偏转磁铁获得较高的实际分辨本领, 可以提供中高能区的放射性重离子次级束流. 其设计方法也可用于一般的磁刚度分析系统. 目前, 磁铁设计已经完成, 诊断设备和探测仪器正在研制中.

参考文献(References)

- 1 ZHAN W L, YIN Q M et al. Radioactive Ion Beams at HIRFL. In: LIN Yu-Zheng ed. Proceedings of 6th Particle Accelerator Physics Symposium. 1997, 297—299(in Chinese)
(詹文龙, 尹全民等. HIRFL 的放射性束流装置. 见: 林郁正, 王光伟主编. 第六届全国加速器物理学术交流会论文集. 1997, 297—299)
- 2 ZHAN W L, XIA J W, WEI B W. Status Report: HIRFL-CSR. In: Meyer H and Schwandt P ed. AIP Conference Proceedings 512. Bloomington: IUCF, 1999
- 3 Carey D C, Brown K L, Rothacker F. Third Order Transport: A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems. SLAC-R-0462, May 1995. 295

Radioactive Ion Beam Line of CSR*

SONG Ming-Tao YANG Xiao-Dong XIA Jia-Wen ZHAN Wen-Long

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

Abstract A new radioactive ion beam line designed to work at higher energy equivalent up to a magnetic rigidity of 10.64Tm is going to be constructed at Lanzhou. It is to connect the main ring and the experiment ring of the HIRFL-CSR complex. The separator is mirror-symmetrically configured both in geometry and magnet strength, achieving a point-point and parallel-parallel image at its intermediate focal plane with maximum spatial dispersion. Achromatism is automatically realized at the final focal plane. The total length is about 26 meters. Its resolution power of magnetic rigidity is 1200 at $\pm 1\%$ momentum deviation and $\pm 25\text{mrad}$ divergence simultaneously. With sextupole- and octupole- magnets carefully positioned and powered, second and third-order aberrations are corrected to a large extent. The magnet design has already fulfilled.

Key words radioactive ion beam, ion optics, aberration

Received 25 April 2000

* Supported by HIRFL-CSR Project, Lanzhou, China