

文章编号: 1007-4627(2003)04-0255-04

基于 HIRFL-CSR 中剥离器的支束线物理设计*

张雪荧, 尹全民, 唐靖宇, 徐珊珊, 李文飞, 毛瑞士

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 介绍了通过剥离器后不同电荷态的束流在弯曲磁铁中的传输情况, 由此引出一种切割束流的方法, 在此基础上设计了一条支束线, 以实现两个实验终端同时供束, 增加供束时间. 在束运线设计过程中, 根据 HIRFL-CSR 的实际条件, 对束流的中心轨迹和束流包络做了详细的计算, 给出了束流输运线的几何布局 and 各个元件的基本物理参数.

关键词: 剥离器; 电荷态; 束流输运

中图分类号: O572.21⁺¹ **文献标识码:** A

1 引言

兰州重离子研究系统(HIRFL)是由两台等时性回旋加速器组成: 注入器 SFC 是能量常数为 69 的扇聚焦回旋加速器, 主器 SSC 是能量常数为 450 的分离扇回旋加速器, 中间由一条 65 m 长的束流输运线 BL1 连接, 在 BL1 上设置有一台碳膜剥离器^[1](如图 1 所示). 为使束流能更有效地被 SSC 加速, 一般从 SFC 引出后要经过一次电荷剥离提高束流离子的电荷态. 束流穿过剥离膜后, 其电荷态有了一定的分布, 而 SSC 参数设置一般仅对应为强度最大的电荷态为 Q_0 的离子, 而对于电荷态为 $Q_0 \pm n$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 的离子就被二极磁铁 BL1-B2 分离废弃掉了. 通过计算, 对于 $Z > 10$ 的重离子, 电荷态为 $Q_0 \pm n$ 的束流的强度大约占总束流的 20% 以上^[2], 并且随原子序数 Z 的增高比例增大. 特别是在 SFC 改造完成后, 引出束流的强度将大幅度提高, 那么电荷态为 $Q_0 \pm n$ 束流的强度也将是比较强的. 因此, 设想在剥离器后, 建立一条 BL1 束流输运线的支束流输运线, 使得多电荷态的束流经过 BL1-B2 磁铁的分析分离后, 选择 $Q_0 \pm n$ 中某一电荷态的束流加以利用, 可以从事很多低能核物理及应用方面的研究, 从而可以大大增加束流的利用率. 新设计的支束流输运线和 BL1 束线是同时供束

的, 可以大大增加供束时间, 也相当于提高了 HIRFL 的运行效率. 尤其在超重核合成实验中, 需要的束流时间很多, 而且有很多的弹核核素是非常贵重的^[3], 有这样的支束运线可更加充分地利用资源.

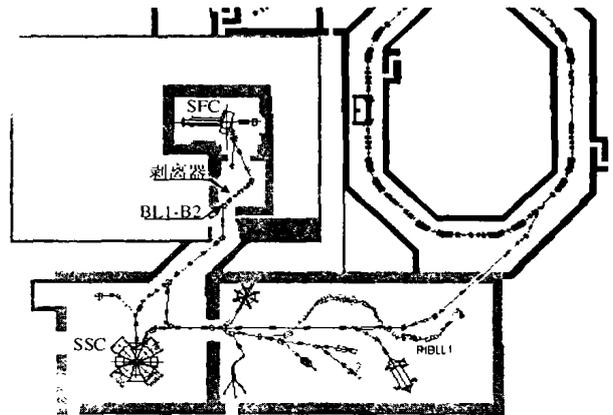


图 1 HIRFL-CSR 系统装置布局

2 切束方法

当一单一电荷态的束流离子通过剥离碳膜后, 其电荷态变成 $Q_0 \pm n$ ($n=1, 2, \dots$) 的多种电荷态, 且不同电荷态束流强度随电荷态的变化呈峰位在 Q_0 的高斯型分布^[2]. 对于比较轻的重离子 ($Z \leq 15$),

收稿日期: 2003 - 04 - 18; 修改日期: 2003 - 07 - 10

* 基金项目: 中国科学院百人计划基金资助项目; 科技部重大项目前期研究专项基金资助项目(2001CCB012010); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(CKJCX2-SW-NO4); 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G2000077400, G2000077401, G2000077404)

作者简介: 张雪荧(1967-), 男(汉族), 甘肃渭源人, 硕士研究生, 从事核物理研究.

从 SFC 引出的束流能量能使 Q_0 等于原子序数, 即束流中不存在 $Q_0 + n$ 的束流. 因此, 这里我们选用电荷为 $Q_0 - n$ 的束流作为输运对象.

电荷态不同的束流在 BL1-B2 磁铁中, 由于磁刚度不同而偏转半径不同, 从而在出射时被分开, 并且分开的距离和偏转角度均不同(如图 2 所示).

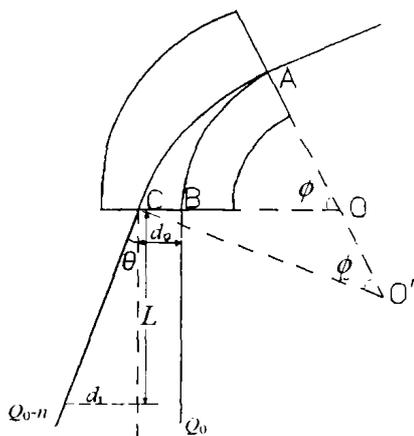


图 2 束流通过 BL1-B2 的情况

入射能量为 E , 电荷态为 Q_0 和 $Q_0 - n$ 的束流的磁刚度分别为 G_0 和 G , 中心轨迹的曲率半径分别为 OB 和 $O'C$, 偏转角度分别为 $\phi (=50^\circ)$ 和 ϕ' , 通过几何物理关系知:

$$G = \frac{1}{300(Q_0 - n)} [E(E + 2\epsilon_0)]^{1/2} = \frac{G_0 Q_0}{Q_0 - n}, \quad (1)$$

$$\overline{OC} = \frac{G}{B_0} = \frac{G_0 Q_0 / (Q_0 - n)}{G_0 / R_0} = \frac{Q_0 \overline{OB}}{Q_0 - n}, \quad (2)$$

$$\overline{OC} = (\overline{OC} - \overline{OB}) \cos \phi + [\overline{OC}^2 - (\overline{OC} - \overline{OB})^2 \sin^2 \phi]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\phi' = \cos^{-1} \left\{ \frac{(\overline{OC} - \overline{OB})^2 + \overline{OC}^2 - \overline{OC}^2}{2(\overline{OC} - \overline{OB}) \overline{OC}} \right\}, \quad (4)$$

$$d = d_1 + d_0 = L \tan r + (\overline{OC} - \overline{OB}), \quad (5)$$

$$\beta = -\theta = -(\phi - \phi'), \quad (6)$$

其中, d 为 Q_0 和 $Q_0 - n$ 束流磁铁出口处分开的距离, $\theta = \phi - \phi'$ 为偏离的角度, β 为 $Q_0 - n$ 束流磁铁出口处的边缘角.

由以上关系看出, 在磁铁中两组束流偏离的角度和距离只与 Q_0 和 n 有关, 与能量 E 和质量数无关. 为了既便于切割磁铁的安装, 又不使束流范围太大而造成偏转磁铁的极面过宽, 通过具体数值计算分析, 选择在 BL1-B2 后 1.15 m 处安装切割磁铁对束流进行切割, 并采用如下模式传输束流:

- (1) 当 $+6 \leq Q_0 \leq +15$ 时, 支束运线传输 $Q_0 - 1$ 束流;
- (2) 当 $+16 \leq Q_0 \leq +30$ 时, 支束运线传输 $Q_0 - 2$ 束流;
- (3) 当 $Q_0 \geq +31$ 时, 支束运线传输 $Q_0 - 3$ 束流.

表 1 中列出了在 BL1-B2 出口后 1.15 m 处, 电荷态分别为 Q_0 和 $Q_0 - n$ 束流的中心距离及偏角的部分计算结果. 从表中看出, 其中心距离在 82 mm 以上时可以加一块切割磁铁将两组束流分开, 被切束流 $Q_0 - n$ 传输到实验区, 而主束 Q_0 被输送到 SSC 或 CSR 继续加速.

表 1 BL1-B2 出口后 1.15 m 处电荷态为 Q_0 和 $Q_0 - n$ 束流的中心距离及偏角

Q_0	$Q_0 - 1$	$-\beta / (^\circ)$	d / mm	$Q_0 - 2$	$-\beta / (^\circ)$	d / mm	$Q_0 - 3$	$-\beta / (^\circ)$	d / mm
6	5	7.34	209.7	4	14.78	432.6	3	22.51	681.5
10	9	4.39	124.8	8	8.79	252.8	7	13.08	380.6
15	14	2.93	82.9	13	5.86	167.0	12	8.81	252.8
16	15	2.74	77.7	14	5.38	153.6	13	8.21	235.9
23	22	1.66	47.7	21	3.60	102.9	20	5.71	163.3
30	29	1.46	41.4	28	2.93	82.9	27	4.39	124.8
31	30	1.42	40.0	29	2.83	80.2	28	4.25	120.7
33	32	1.33	37.6	31	2.66	75.3	30	3.99	113.3

3 几何布局及束流中心轨迹计算

根据 HIRFL-CSR 系统 BL1 束线的具体参数^[4]以及实际状况,安排几何布局如图 3 所示。

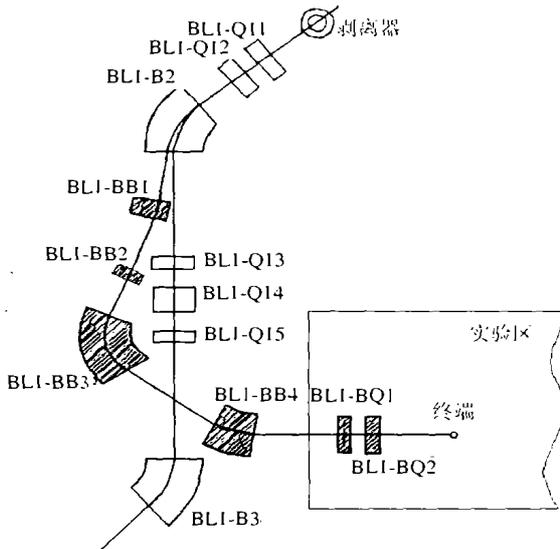


图 3 支束线几何布局

从 BL1-B2 磁铁出射的束流经过 1.15 m 传输后,用切割磁铁 BB1 使 Q_0-n 束流在空间上继续偏离 Q_0 ,使其绕过原 BL1 束流线上的三组合透镜,且对后面的磁铁元件安装提供足够的空间.由于不同电荷态束流从 BL1-B2 出射时的角度不同,为了使被选择束流在经过偏转磁铁 BB3 时,能受到统一的边缘角聚焦约束,它们在进入二极磁铁 BB3 时必须沿同一轨道,因此用 BB1 和 BB2 两台磁铁对束流轨道进行归一.根据具体环境以及 BL1 束线的现状,确定 BB1 和 BB2 的总偏转角为 16° ,此时其后续有足够的空间安装 BB3 偏转磁铁.通过 BB3 磁铁 63° 偏转后,最后用 BB4 磁铁弯曲束流至实验区。

4 束流光学计算

按照终端对束流的要求,对束流传输线用 TRANSPORT 做一阶光学计算^[5].根据束线 BL1 的传输模式,束流在剥离器处成双腰,所以将此处作为起始点进行光学计算,其束流发射度为 $24 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$.计算时,首先选取 Q_0 和 Q_0-n 束流分开距离最大、最小以及中间三种情况计算,再对每种情况又分磁刚度大、小两种条件计算,最后根据计算结果对束线参数进行折中考虑,使设计的束线有通用性.光学计算中 BL1-Q11, BL1-Q12 和 BL1-

B2 元件的磁场参数由电荷态为 Q_0 的束流确定,即它们的各种参数是不能改变的,而 BB4 考虑采用改造以后的剩余磁铁^[6],因此条件比较苛刻.通过对 $^{40}\text{Ar}^{14+}$ 和 $^{132}\text{Xe}^{21+}$ 等^[6]种代表性的束流进行设计计算,使束流在支束线的终端形成 $\phi 5-\phi 6 \text{ mm}$ 的靶点,束流的包络如图 4 所示.设计的运输线长度为 10.15 m,共有偏转磁铁 4 台,四极透镜两台。

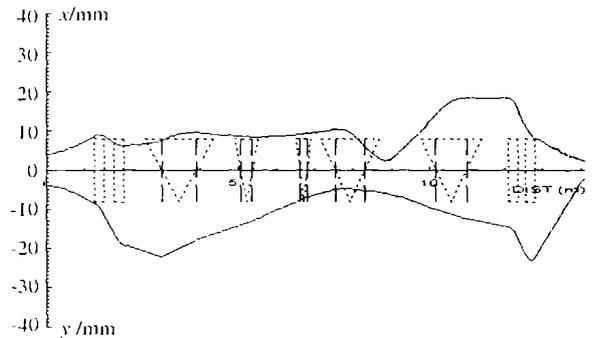


图 4 支束线的束流包络图

在整个设计中,巧妙地利用二极磁铁边缘角的横向聚焦功能对束流进行聚焦^[7],从而减少元件数.两台四极透镜的有效长度为 0.25 m,孔径为 $\phi 100 \text{ mm}$,场梯度为 8 T/m.各个元件在技术上都容易实现.根据多种磁刚度束流中心轨迹及包络的计算参数,计算确定各偏转元件的具体参数如表 2 所示.对于磁铁 BB1 和 BB2 磁极面计算过程中,考虑了它所要偏转的束流与主束偏离的最大、最小距离,以及束流此时的包络,为了建造容易,设计中采用矩形极面的 C 型磁铁.其中切割磁铁 BB1 磁极面的长和宽分别为 0.30 和 0.20 m,而 BB2 磁极面的长和宽分别为 0.2 和 0.16 m.两台磁铁的最高磁场分别为 0.8 和 0.4 T,磁间隙都有为 50 mm。

表 2 偏转元件参数

参数	BB4	BB3
偏转角度/ $^\circ$	46	63
曲率半径/m	1.0	0.7
有效长度/m	0.802	0.769 7
入口边缘角/ $^\circ$	6	0
出口边缘角/ $^\circ$	6	15
最高磁场/T	1.15	1.45
磁铁间隙/mm	75	60
磁铁类型	H 型	C 型

在所设计的束流传输线中,由于 Q_0 和 Q_0-n

束流在被切割处的距离最小只有 82 mm, 用普通 C 型磁铁偏转 $Q_0 - n$ 束流是行不通的, 主要是因为其杂散场会影响 Q_0 束流, 所以 BB1 磁铁采用切割磁铁, 其切割板厚度为 20 mm. 参考 CSR 切割磁铁设计^[8], 本束运线中所采用的切割磁铁, 在技术上是能实现的.

从实际建造考虑, 对 BL1 束线进行改造, BL1-B2 磁铁的极面宽度可以满足要求, 不需要改动, 只改变真空盒形状即可.

5 结束语

随着 CSR 的建造及超重核合成项目的启动,

HIRFL 的运行效率将备受关注. 设计建立这样一条束线对于增加供束时间很有好处. 在 SSC 的引出束流强度提高后, 用同样的设计思路, 可在 BL2 束线或 CSR 环的剥离器后设计建立同样类型的束线, 以提高束流的利用效率, 降低运行成本. 这条束线在满足物理要求的基础上尽量地减少元件, 并且在设计时运用了一块改造后的废旧磁铁, 成本低廉. 在对每个元件的考虑上, 都参考了现有的工艺技术和现场状况, 因此该束线的设计是很实际的.

参 考 文 献:

- [1] 束运工程室. 束运系统[M]. 兰州重离子研究装置进展报告, 北京: 科学出版社, 1989, 8: 62.
- [2] 夏佳文. HIRFL 剥离器后束线物理设计[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1990.
- [3] 徐珊珊, 周小红, 肖国青等. 超重核研究实验方法的历史和现状简介[J]. 原子核物理评论, 2003, 20(2): 76.
- [4] 尹全民, 何 易. SFC-SSC 之间束流匹配系统[M]. 兰州重离子研究装置进展报告, 北京: 科学出版社, 1983, 2: 34.
- [5] Brown K L. A First and Second Order Matrix Theory for the Design of Beam Transport Systems and Charged Particle Spectrometers[M]. SLAC-75, 1971, 11.
- [6] 何锐荣, 尹全民, 杨晓天等. HIRFL 直通线[M]. 兰州重离子研究装置进展报告, 北京: 原子能出版社, 1993, 10: 60.
- [7] 魏开煜. 带电束流传输理论[M]. 北京: 科学出版社, 1986, 1.
- [8] 马力祯, 何 源, 王 玥等. CSR 切割磁铁设计[J]. 原子核物理评论, 2002, 19(4): 399.

Conceptual Design of a Branch Beam Line after Stripper in HIRFL-CSR*

ZHANG Xue-ying, YIN Quan-min, TANG Jing-yu, XU hu-shan, LI Wen-fei, MAO Rui-shi
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A new branch beam line downstream of the stripper located between SFC and SSC is designed to collect the beams with the charge states other than the most intensive one. The layout of the branch beam line and the physical parameters for each dipole and quadrupole are given based on careful calculations.

Key words: stripper; charge state; transport

* **Foundation item:** One Hundred Person Project of Chinese Academy of sciences; National Key Program for Basic Research, Ministry of Science and Technology (2001 CCB01200); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJXC2-SW-N02); National Major State Basic Research Development Program (G2000077401, G2000077404, G2000077407)