

文章编号: 1007-4627(2001)01-0043-04

SSC 注入系统能量接收范围的研究

丁原涛, 王义芳, 刘 巍, 朱 昆

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 分析了影响 SSC 注入能量的因素和 SSC 注入系统适应能量变化的能力, 计算了在理论等时场下 SSC 注入系统对3种典型离子 O^{9+} , Xe^{20+} 和 Ar^{15-} 的能量可接收范围, 找出了加速较轻的重离子时束流损失较大的部分原因.

关键词: 分离扇回旋加速器; 注入系统; 圈间距; 能量匹配

中图分类号: TL56 **文献标识码:** A

兰州重离子加速器装置(HIRFL)是一个组合式的回旋加速器系统, 它是由扇聚焦回旋加速器(SFC)作为注入器, 对束流预加速后注入到分离扇回旋加速器(SSC)进行第二级加速. 要使束流顺利注入 SSC 并得到加速, SFC 和 SSC 必须满足严格的匹配关系^[1]. 其匹配要求主要有3条(以下标1, 2分别代表 SFC, SSC): (1) $F_2/F_1 = R_2/R_1$, R_1 和 R_2 分别表示 SFC 的平均引出半径和 SSC 的平均注入半径, F 为离子回旋频率; (2) $N_1 H_1 F_1 = N_2 H_2 F_2$, H 为相对于离子频率的高频频率的谐波数, N 为整数, 表示高频频率的最小公倍数对原高频频率值的约数; (3) $Z_1 B_1 R_1 = Z_2 B_2 R_2$, Z 表示离子的电荷态, B_1 和 B_2 分别表示在 SFC 引出半径和 SSC 注入半径处的平均磁场. 在工程上实现上述匹配要求只是 SSC 正常工作的必要条件.

SSC 采取径向注入法, 注入系统是一个由电磁元件组成的束流通道. 从 SFC 来的束流在 SSC 注入系统的引导约束下进入加速轨道. 理论上讲从 SFC 引出的束流能量与 SSC 的注入半径能够很好的匹配. 但受各种实际因素的影响, SSC 的注入能量往往有所偏差. 这时为了满足上述匹配要求, 必须通过调整注入系统, 将束流引导到合适的注入半径才能进入正常的加速轨道. 本文讨论了影响 SSC 注入能量大小的因素, 并计算了在理想等时场下几种典型离子注入 SSC 时的能量可接受范围, 并考虑了高频电压幅度的影响, 希望本研究对 HIRFL 调

束有参考价值.

1 影响 SSC 注入能量的因素

束流在 SFC 中经过预加速后经前束流运输系统进入 SSC 注入系统. 束流在 SFC 中的加速过程中, 在大部分时间内束流圈间距小于束流宽度. 束流圈间距公式为^[2]

$$\Delta r = \frac{NmV_0 \cos\varphi}{ZB^2r}, \quad (1)$$

N 为加速间隙数, V_0 和 φ 分别为加速电压和相位, Z 为离子所带电荷, m 为离子的质量. 由上式可见, 在引出区, 圈间距更小^[3], 给束流引出带来更多的困难. 为此, 在 SFC 引出区使用一次谐波场使束流产生进动来改进引出, 但这将引起引出束能量的变化, 并且束流在通过束运系统的剥离器时, 也有一定的能损^[4]. 由于以上因素的影响, 即使 SFC 的引出半径严格限制在理论位置上, 注入 SSC 的能量也很难保证要求.

2 SSC 注入系统

SSC 注入系统能够适应一定限度的注入能量变化^[5]. 注入系统如图1所示, 它是由偏转磁铁 MI1, MI2和磁通道 MSI3, MSI4以及静电偏转板 ESI5组成. 其中, 前4个磁元件在调束过程中只可改变其电参数, 而 ESI5可以在束调节其位置和电压值. ESI5的位置调节方式有3种: ESI5入口固定, 出

收稿日期: 2000-08-30

作者简介: 丁原涛(1974-), 男(汉族), 山东日照人, 硕士生, 从事加速器物理研究.

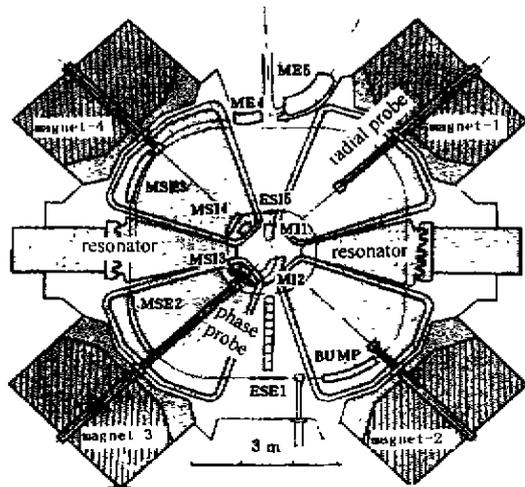


图1 SSC 注入和引出系统

口前后移动；出口固定，入口前后移动；平动。通过步进电机拉动 ESI5 两端的轴来移动其位置，前后移动范围为 ±20 mm。要使束流在加速区满足中心化要求，相应于能量有微小差异的注入束，静电偏转板的位置和角度是唯一确定的。SSC 能否通过调节注入系统元件的参数来接收能量有微小差异的注入束，主要考虑以下瓶颈因素的影响：(1) ESI5 位置可调节范围的限制；(2) 在注入元件的可调磁场和电压范围内，使束流在注入元件中满足中心化要求；(3) 是否有足够大的圈间距使第 1 圈加速轨道上的束流不致被注入元件的外缘挡掉。SSC 注入束流的发射度为 $20 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。计算时要考虑束流宽度的影响^[6]，通过束流动力学计算可知在 ESI5 附近束流半宽度为 4 mm，在 MSI4 附近束流半宽度为 6 mm。

3 模拟计算及结果

3.1 计算过程和方法

在理想等时场下，选取了 O^{5+} ， Xe^{22+} ， Ar^{15+} 3 种典型离子进行了模拟计算^[7]。以由 SSC 输出能量为 100 MeV/u 的 O^{8+} 为例，其注入能量为 8.47 MeV/u，磁刚度为 $B\rho = 0.82989 \text{ T} \cdot \text{m}$ ，它对应的平衡轨道在谷中心的半径为 $R = 0.92628 \text{ m}$ 。适当调节注入束流的人射角、半径及离子的初始相位，能得到合适的中心化加速轨道。加速 10 圈后，在谷中心停止，得到此点轨道的半径和离子的出射角、相位及磁刚度。以此作为初始条件，反向计算减速轨道，并依次置入注入元件计算注入轨道。由于在

注入区束流通过两个加速间隙时造成了大约 7° 的高频相移，使反向计算得到的注入系统入口处的离子磁刚度发生了变化，因而不能与前运输系统来的离子磁刚度匹配。这时适当改变在 10 圈处的初始条件（根据平衡轨道的计算结果改变 R 和 $B\rho$ 等），重新计算减速轨道及注入轨道，反复调整，直到满足注入束的磁刚度匹配要求，这时认为得到了好的注入轨道。

为了研究注入系统的能量接收度范围，对 10 圈处的离子磁刚度或能量做一微小改动，选择合适的初始条件，重复上述计算过程，仔细调整注入元件的参数，使束流能够顺利通过注入元件。由第 2 节中描述的瓶颈因素可得到 SSC 注入能量的可接收范围。

3.2 计算结果

(1) 100 MeV/u O^{8+} 的计算结果

由公式(1)可知，对于较轻的重离子， Δr 较小，计算结果也表明了这一点。MSI4 和 ESI5 元件内的束流和元件外的第 1 圈加速束流的计算结果分别如图 2 和图 3 所示。图中给出了中心离子轨迹和束流包络。当高频电压为设计要求的 230 kV 时，使用

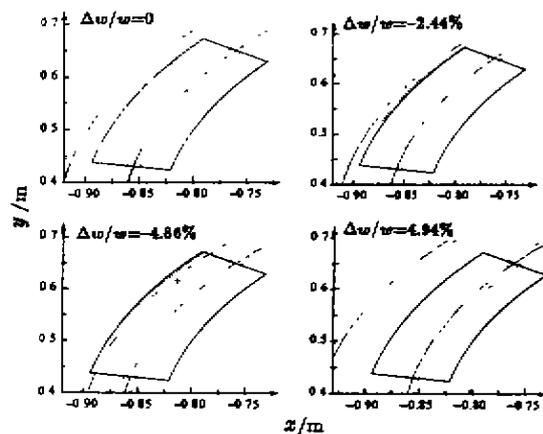


图2 O^{8+} 束流在 MSI4 附近的计算结果 (Dee 电压为 230 kV)
(x, y) = (0, 0) 处为机器中心。

谐波数 $h = 2$ 加速，束流在 ESI5 的位置可移动范围内，并保证束流在所有注入元件内中心化时，注入能量接收范围的下限可达 $\Delta w/w = -4.86\%$ 。但由图 2 可看到，此时第 1 圈加速束流碰在了注入元件 MSI4 的外缘，考虑这一因素，能量接收范围的下限为 $\Delta w/w = -2.44\%$ 。对于能量接收范围上限注

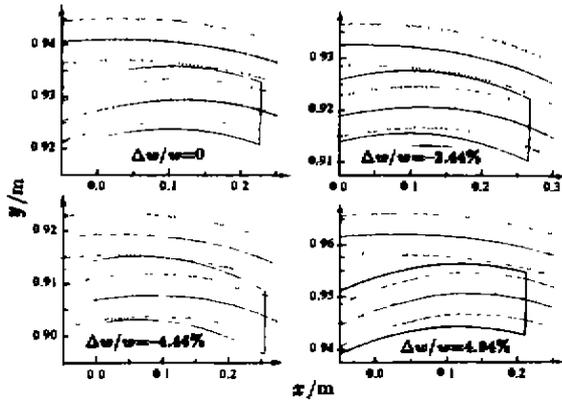


图3 O⁸⁺束流在 ESI5附近的计算结果(Dee 电压为230 kV)

入元件附近的圈间距有所增大,此时构成瓶颈因素的是 ESI5的可移动范围,得到能量接收度的上限为 $\Delta w/w = 4.94\%$ 。计算表明,束流在 MI1, MI2 和 MSI3 附近有足够大的圈间距,而在 MSI4 和 ESI5 附近,第1圈加速束流较易碰到元件外缘,由图1注入元件的分布也可看出这一点。

束流圈间距还与高频电压有关,对 O⁸⁺ 而言,230 kV 的高频电压是原来设计时的理论期望值,目前实际运行时,加速 O⁸⁺ 所用高频频率为 12.78 MHz,对应该频率的高频电压只能达到 120 kV 左右。按该电压计算表明,圈间距明显变小,即使能量完全满足匹配要求,也约有一半的束流挡在了 ESI5 的外缘,从而导致目前状况下加速较轻的重离子时束流有较大的损失,计算得到此时能量接收范围 $\Delta w/w$ 从 $-1.12\% - 4.5\%$ 。

(2) Xe²²⁺ 4.8 MeV/u 的计算结果

相对于 O⁸⁺, Xe²²⁺ 的能量低,圈间距较大,用谐波数 $h = 6$ 加速,此时是 ESI5 的可移动范围限制了 Xe²²⁺ 的能量接收范围,得到 $\Delta w/w$ 从 -5.38% 到 3.53% 。高频电压为 51 kV,运行时完全可以达到。束流在 MSI4 和 ESI5 附近的情况如图4所示。

(3) Ar¹⁵⁺ 25 MeV/u 的计算结果

O⁸⁺ 和 Xe²²⁺ 是 HIRFL 已加速过的较轻和较重的重离子。我们还计算了介于这二者之间的 Ar¹⁵⁺

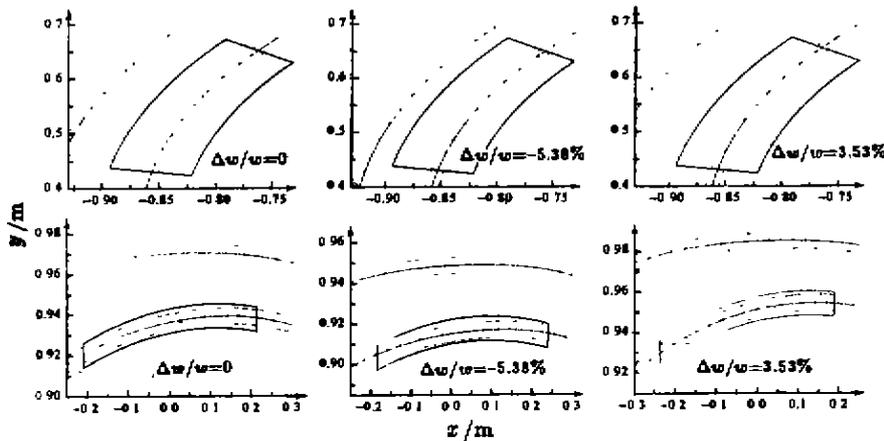


图4 Xe²²⁺ 离子束流在 MSI4(上图)和 MSI5(下图)附近的计算结果

离子,使用谐波数 $h = 4$,高频电压为 120 kV。计算表明,Ar¹⁵⁺ 的能量接收范围 $\Delta w/w$ 从 -4.76% 到 3.88% ,此时瓶颈因素为 ESI5 的可移动范围,束流在 MSI4 和 ESI5 附近的情况与 Xe²²⁺ 离子的情况很相近。

4 讨论

在理想等时场考虑了中心化的加速轨道的前提下,通过对3种典型离子的计算对注入束流进行了研究,从以上计算可以看出,注入系统本身有较大

范围的适应非匹配能量的能力,即在 ESI5 的可调节范围内能使束流中心化地通过该元件和其它所有注入元件。但还要考虑束流离开注入系统后的第1圈加速时,束流不会碰到注入元件外缘,在注入能量理想匹配的情况下,对于有较高能量的较轻重离子,束流圈间距较小,而且是二次谐波加速,有效加速电压低,要求有较高幅度的高频电压来增大圈间距,否则第1圈加速束的部分束流会挡在 ESI5 的外缘而损失掉。注入能量不匹配时,就意味着注入半径需要做相应的改变,而注入系统的元件除 ESI5

外都是固定的, 当注入能量低于匹配能量时, 注入半径的内移容易造成部分束流碰到 MSI4 和 ESI5 的外缘而损失掉. 因此希望注入束流能量能匹配或略高于匹配能量. 但对于较重的重离子, 束流圈间距

足够大, 得到了较大的能量接收范围. 当然, 考虑到谐波场的影响及其它实际因素, SSC 注入系统的能量可接收范围比上面的计算结果要小一些. 下一步将考虑谐波场的影响做更深入的计算.

参 考 文 献:

- [1] 王义芳. 在使用 ECR 源时 SFC 和 SSC 之间的匹配参数[M]. 兰州重离子研究装置进展报告, 北京: 科学出版社, 1986, 5: 70—75.
- [2] 桂伟燮. 荷电粒子加速器原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994, 87.
- [3] 唐靖宇. 对 HIRFL 几个主要参数的稳定性要求[J]. 原子核物理评论, 1998, 15(1): 31—34.
- [4] 唐靖宇. HIRFL 改造中的加速器物理问题[J]. 原子核物理评论, 2000, 17(2): 95—99.
- [5] 王义芳. SSC 注入系统调束相关物理问题研究的考虑[C]. 第七届全国加速器物理学术交流会议论文集, 1999, 205—208.
- [6] Fermé J., Gendreau G., Yvon P. Injection and Ejection Systems for the GANIL SSC[C]. Proc 7th Int Conf on Cyclotrons and their Applications, Birkhäuser, Basel, 1975, 260—263.
- [7] Owens H. C. Three Computer Programs for Calculating Cyclotron Orbits[J]. Nucl Instr and Meth, 1962, 18/19: 295—302.

Research on Energy Acceptance Range of SSC Injection System

DING Yuan-tao, WANG Yi-fang, LIU Wei, ZHU Kun

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

Abstract: The SSC injection system and the factors which influence the injecting beam energy were described and the capability of the SSC injection system for accepting the mismatching injecting beam energy was calculated. For most cases, small difference exists between the values of actual injecting beam energy and the theoretical requirements. The capability of accepting three typical particles: O^{8+} , Xe^{22+} and Ar^{15+} were calculated for the SSC injection system with small variation of the injection beam energy. The results show that for light particles with high energy, because of its small turn separation, the beam easily hits the injection components, which leads to beam intensity loss. The high Dee voltage is required to increase the turn separation. For heavier particles, the SSC injection system can accept them in a large energy scale.

Key words: Sector-Separated Cyclotron; injection system; turn separation; energy match