

文章编号: 1007-4627(2001)01-0039-04

兰州重离子加速器冷却储存环束流累积研究^{*}

原有进, 夏佳文, 张文志, 宋明涛, 杨晓东

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 对兰州重离子加速器冷却储存环加速器主体的主要功能环——主环的束流累积方法和设计进行了研究. 为了使主环对不同种类的重离子束流都具有较强的累积能力, 在设计时考虑采用电子冷却参与下的两种束流累积方法: 多次多圈注入和射顿堆积. 对这两种方法, 电子冷却的冷却时间都是将束流累积到高流强的关键因素.

关键词: 重离子加速器; 注入; 累积

中图分类号: TL56 **文献标识码:** A

1 引言

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的加速器主体包括主环(CSRm)、实验环及其束流传输线^[1]. 主环的功能是为物理实验提供高流强、高能量、高品质的重离子束流.

由注入器兰州重离子加速器研究装置(HIRFL)引出的重离子束(碳到铀)在环内的储存寿命为 15 s 至几个 h, 因此, CSRm 有足够的时间作束流累积(累积周期约 10 s). 电子冷却时间 τ 可以近似地由下式给出:

$$\tau = 2 \times 10^7 \frac{\beta^4 \gamma^3 \theta_1^3}{\eta j_e} \frac{A}{Z^2}, \quad (1)$$

在这里 β 和 γ 为相对论因子; $\theta_1 = \sqrt{\epsilon/\beta_{x,y}}$ 为离子束横向发散角, ϵ 是未冷却束流的发射度; A 为离子束质量数; Z 为电荷态; η 是冷却段长度与环周长的比值; j_e 是电子束束流面密度, 单位为 A/cm^2 ; $\beta_{x,y}$ 是冷却段处束流横向振荡参数.

2 多次多圈注入^[2,3,4-7]

CSRm 注入系统布局示于图 1. 用注入束流线上的四极磁铁和偏转磁铁使注入点的束流横向振荡参数 β 和 α 可以调节, 在纵向与环匹配, 并可调节注入束流的方向和位置; 用切割磁铁和静电偏转板

将束流导入储存环; 用三(四)块凸轨磁铁在注入区改变闭合轨道, 使束流在注入点靠近静电偏转板, 并且满足多圈注入对凸轨变化的要求.

多圈注入时, 首先用凸轨磁铁将闭合轨道在注入点的水平方向位置移动到注入束流的中心. 然后, 凸轨磁铁的磁场强度同步降低到零, 在此过程中注入束流逐步填充环的 x 方向接受空间.

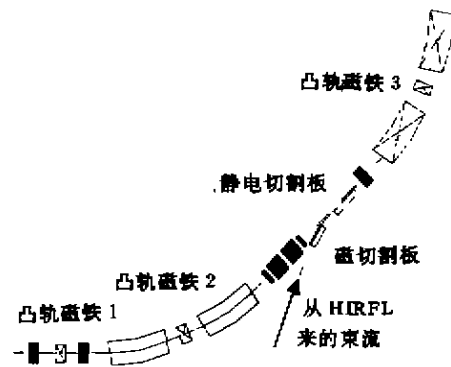


图 1 CSRm 注入系统布局图

为了使凸轨磁铁不改变注入区域以外的闭合轨道, 最少需要两块凸轨磁铁, 这时要求两块凸轨磁铁之间 x 方向振荡相移为 π 的整数倍. 使用三块凸轨磁铁时, 可以在不满足 x 方向 β 振荡相移为 π 的整数倍的情况下, 满足对凸轨位置的要求. 各块凸轨磁铁的偏转角度 ψ 要满足以下条件:

收稿日期: 2000-12-01

* 基金项目: 国家重大科学工程

作者简介: 原有进(1969-), 男(汉族), 山西阳城人, 博士, 研究员, 从事加速器物理研究.

$$\begin{cases} \Psi_1 = \frac{\delta\chi_x}{\sqrt{\beta_1\beta_2}} \frac{\sin\Phi_{23}}{\sin\Phi_{12}\sin(\Phi_{23}-\Phi_{21})} \\ \Psi_2 = \Psi_1 \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}} \frac{\sin\Phi_{12}}{\sin\Phi_{23}} \\ \Psi_3 = -\Psi_1 \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}} \frac{\sin(\Phi_{12}+\Phi_{23})}{\sin(\Phi_{21})} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\delta\chi_x$ 为注入点 x 方向的闭轨偏移; Φ_{12} 和 Φ_{23} 是凸轨磁铁之间 x 方向 β 振荡的相移, Φ_{21} 是凸轨磁铁 2 和注入点之间 x 方向 β 振荡的相移. CSRm 使用了三块凸轨磁铁, 可以在不满足 x 方向 β 振荡相移为 π 的奇数倍的情况下, 满足对凸轨位置的要求. 如果需要同时调节束流轨道在注入点的方向, 可以增加另外一块凸轨磁铁. 注入束流轨道及多圈注入后束流轨道的计算结果见图 2. 注入束流初始发射度 $\epsilon_{x,y}$ 为 $5-10 \text{ } \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 动量分散为 $\pm 0.15\%$. 多圈注入后发射度 $\epsilon_x = 150 \text{ } \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

对 CSRm 的单次多圈注入进行了模拟计算, 通过调节注入束流的 x 方向相空间参数、注入束流的注入方向、发射度以及凸轨磁铁的下降速度(或注

入圈数)、研究了多圈注入的增益因子与这些参数的依赖关系.

通过模拟计算可以看出, 在注入束流横向发射度 $\epsilon_{x,y} = 10 \text{ } \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 动量分散为 $\pm 0.15\%$ 时, 采用单次多圈注入方法可以得到束流增益 6-8 倍. 多次多圈注入时注入的束流发射度被电子冷却装置由 $150 \text{ } \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 冷却至 $20 \text{ } \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 即开始进行下一次多圈注入, 因而每次多圈注入只能在 $130 \text{ } \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 接收度内得到 4-5 倍的增益. 表 1 列出了多次多圈注入得到的累积流强, 其中考虑了剥离效率. 束流寿命对累积束流强度的影响需要另行考虑.

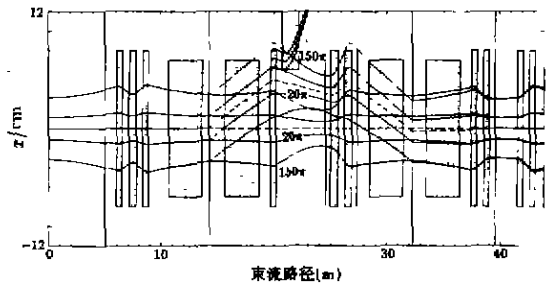


图 2 多圈注入时注入轨道及多圈注入后束流包络

表 1 典型重离子束多次多圈注入的累积参数

注入离子	注入能量 (MeV/u)	注入流强 (ions/s)	单圈离子数	剥离后电荷态	剥离效率 (%)	束流寿命 (s)	冷却周期 (s)	多圈注入增益因子	注入周期 (s)	累积离子数	累积流强 (μA)
$^{12}\text{C}^{6+}$	25	3.13×10^{12}	7.4×10^6			3 198	2.50	5	10	1.5×10^8	59.8
$^{16}\text{O}^{8+}$	25	2.34×10^{12}	5.5×10^6			1 769	1.90	5	10	1.4×10^8	76.3
$^{20}\text{Ne}^{10+}$	25	6.25×10^{11}	1.5×10^6			1 107	1.60	5	10	4.5×10^7	30.7
$^{40}\text{Ar}^{18+}$	25	6.94×10^{11}	1.6×10^6			340	0.78	5	10	1.2×10^8	146.0
$^{56}\text{Ni}^{24+}$	25	1.30×10^{11}	3.1×10^5	26	29.3	110	0.52	5	10	8.7×10^6	16.4
$^{84}\text{Kr}^{28+}$	25	2.23×10^{11}	5.2×10^5	33	24.0	76	0.41	5	10	1.5×10^7	34.6
$^{129}\text{Xe}^{36+}$	20	8.68×10^{10}	2.3×10^5	48	19.3	37	0.25	5	10	8.9×10^6	26.1
$^{161}\text{Ta}^{36+}$	15	8.68×10^9	2.6×10^4	59	16.9	24	0.12	5	10	1.9×10^6	5.8
$^{203}\text{Pb}^{37+}$	12	8.45×10^9	2.8×10^4	66	16.2	20	0.11	5	10	2.0×10^6	6.4
$^{238}\text{U}^{37+}$	10	8.45×10^9	3.1×10^4	72	15.4	15	0.11	5	10	2.2×10^6	7.0

3 多圈注入+射频堆积^[2, 5, 8]

多圈注入+射频堆积是首先进行多圈注入, 然后进行射频堆积(堆积周期为 50-100 ms), 紧接着进行下一次多圈注入及射频堆积. 这样多次重复(10 s 内重复 100-200 次)就可将注入束流累积到高流强.

在累积过程中, 要保持电子冷却装置的电子能

量与射频堆积后束流能量相匹配, 对纵向及横向发射度进行冷却. 特别是对纵向发射度的冷却可以增大储存环纵向接受度内可允许的射频堆积次数. 射频堆积时 x 方向的孔径示于图 3.

一次射频堆积包括 3 个过程:

(1) 捕获 高频启动, 束流被捕获到静态相稳区内, 经过 1/4 同步振荡周期后高频电压降低到一定值, 而 80% 的束流仍然在相稳区内, 用这种方法

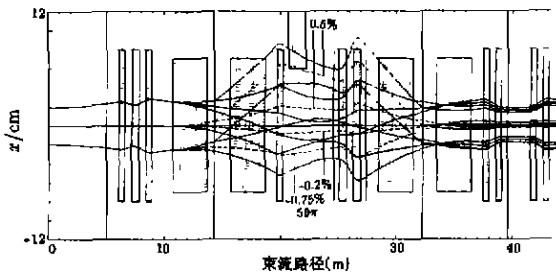


图3 多圈注入和射频堆积束流孔径

来降低纵向相空间的发射度“稀释”因子。

(2) 减速 高频电压、频率和同步相位绝热变

化，束流由堆积轨道的低部移动到顶部。由于注入轨道能量高于射频堆积轨道能量，因而需要减速。

(3) 沉积 高频电压降低到零，束流停留在堆积轨道上。

每次射频堆积对已经堆积的束流有所扰动，根据刘维定理，其主要效应是将已经堆积的束流由堆积轨道的顶部向低部移动(与高频对稳相区内束流的作用相反)。这样束流最终将填充堆积轨道的顶部到底部的纵向相空间。图4是在无冷却情况下一次射频堆积周期中纵向相空间的演化过程。

CSRm 射频堆积使用了专门的高频腔。在整个

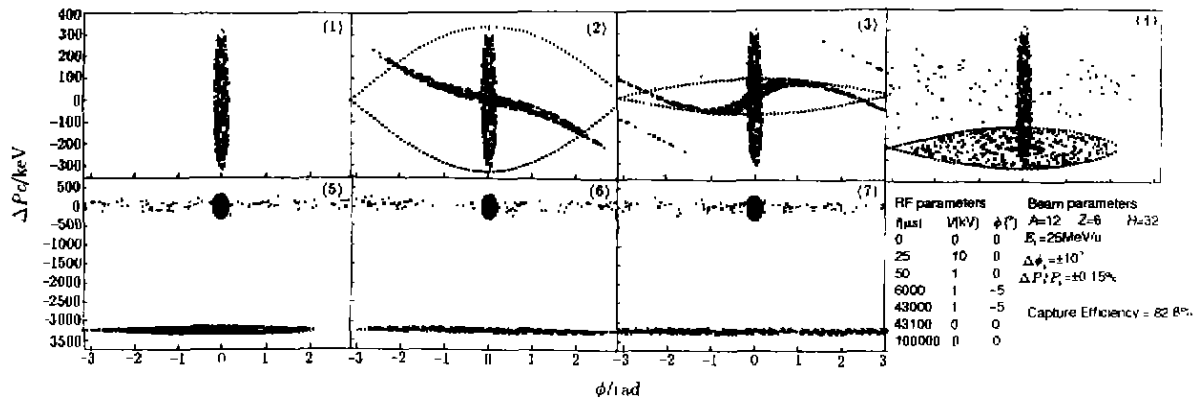


图4 射频堆积纵向相空间演变过程

表2 典型重离子束的射频堆积累积参数

注入离子	注入能量 (MeV/u)	注入流强 (ions/s)	单圈 离子数	剥离后 电荷态	剥离效率 (%)	增益因子	堆积周期 (ms)	注入周期 (s)	累积 离子数	累积流强 (μA)
$^{12}\text{C}^{6+}$	25	3.1×10^{12}	7.4×10^6			2.8	100	10	2.0×10^9	840.00
$^{16}\text{O}^{8+}$	25	2.3×10^{12}	5.5×10^6			2.8	100	10	1.5×10^9	840.00
$^{20}\text{Ne}^{10+}$	25	6.3×10^{11}	1.5×10^6			2.8	60	10	5.1×10^8	350.00
$^{40}\text{Ar}^{16+}$	25	6.9×10^{11}	1.6×10^6			2.2	60	10	7.6×10^8	933.30
$^{58}\text{Ni}^{24+}$	25	1.3×10^{11}	3.1×10^5	28	29.3	2.2	60	10	4.2×10^7	79.70
$^{56}\text{Kr}^{28+}$	25	2.2×10^{11}	5.2×10^5	33	24.0	1.68	60	10	3.5×10^7	79.20
$^{129}\text{Xe}^{36}$	20	8.7×10^{10}	2.3×10^5	48	19.3	1.68	60	10	1.2×10^6	36.50
$^{181}\text{Ta}^{36}$	15	3.5×10^{10}	2.6×10^4	59	16.9	1.4	60	10	1.0×10^5	3.23
$^{208}\text{Pb}^{37}$	12	8.5×10^9	2.8×10^4	66	16.2	1.4	60	10	1.0×10^5	3.37
$^{238}\text{U}^{37+}$	10	8.5×10^9	2.9×10^4	72	15.4	1.4	60	10	1.1×10^6	3.49

注入过程中，电子冷却将作用于堆积轨道顶部，以阻尼空相稳区扫描对已堆积束流的影响。图5是射频堆积过程模拟结果的一个例子。模拟中使用的参数为：

(1) 冷却器参数

$L=3.6\text{ m}$, $R_{\text{cathode}}=1.25\text{ cm}$, $L_{\text{ring}}=161.2\text{ m}$, $I_e=3\text{ A}$, $B_{\text{gun}}=2.0\text{ kG}$, $B_{\text{cool}}=1.0\text{ kG}$, $\alpha_B=0.0\text{ mrad}$.

(2) 电子冷却器中的转移参数

$\beta_x=6.702, \alpha_x=0, \beta_y=14.167, \alpha_y=0, \nu_x=3.63,$
 $\nu_y=2.6115, \epsilon_x=50 \pi, \epsilon_y=10 \pi, \gamma_{tr}=4.18063.$

根据理论研究和模拟计算得出, CSRm 在采用单(多)圈注入、射频堆积以及电子冷却相结合方法

几种典型重离子束的累积计算结果. 在考虑了多圈注入增益、射频堆积效率、束流寿命及剥离效率的影响后, CSRm 累积的离子数在 10 s 内可达到 10^6-10^9 个.

4 结论

CSRm 将首选在电子冷却作用下的多次多圈注入的方法累积束流, 这种方法在横向接收度内累积束流, 利用的动量接收度小, 容易实现. 但由于冷却时间的关系, 适用于较重离子的累积. 其次是采用多圈注入、射频堆积和冷却相结合的方法累积束流, 这种方法是在动量接收度内进行束流累积, 利用的动量接收度较大, 累积后的束流具有好的横向品质. 由于需要对高频系统进行周期性精确控制, 在实现上较前一种方法复杂. 此方法对轻离子的累积效果较前一种方法要好.

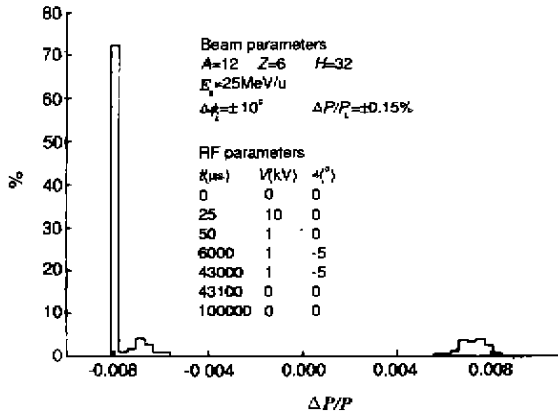


图5 射频堆积过程模拟结果

的情况下, 可以将重离子束累积到高的流强. 表2是

参 考 文 献:

[1] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子冷却储存环工程[J]. 原子核物理评论, 2001, 18(1): 35-38.

[2] Rees G H. Injection, Proceedings of General Accelerator Physics[R]. CERN-94-01, 1994, 2: 731-743.

[3] Fenster S, Takeda H, Bart G. Multiturn Injection[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1981, 3(28): 2 574-2 576.

[4] Van der Stok P D V. A Simple Model for Multiturn Injection into A. G. Proton Synchrotrons[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1977, 3(24): 1 417-1 419.

[5] Watanabe S, Noda A, Takanaka M, et al. Beam Stacking Experiments at the Ion Accumulation Ring TARN[J]. Nucl Instrum and Meth, 1988, A271: 359-374.

[6] Cosgrove D F, Curtis C, Gray E, et al. Injection Methods in the Fermilab Booster[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1977, 24(23): 1 423-1 425.

[7] Yamada S, Katayama T. Injection and Accumulation Method in the TARN[J]. INS-NUMA-12-mc (microfiche), IEEE Trans Nucl Sci, 1981, 28: 2 608-2 611.

[8] Soga F, Noda K, Chida K, et al. Beam Transport and Injection System from the SF Cyclotron to the TARN II Synchrotron Cooler Ring[R]. INS-T-494, Accelerator-10, 1990.

Beam Stacking Study of HIRFL-CSR Project

YUAN You-jin, XIA Jia-wen, ZHANG Wen-zhi, SONG Ming-tao, YANG Xiao-dong
(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The beam accumulation methods of HIRFL-CSR(Heavy Ion Research Facility of Lanzhou and Cooler Storage Rings) project were studied. Two accumulation methods will be adopted to increase the beam intensity of CSRm. For both multiple multi-turn injection method and RF stacking method, electron cooling of beam plays an important role.

Key words: heavy ion accelerator; injection; accumulation

* Foundation item: National Scientific Project HIRFL-CSR