

# CSRm 纵向束流绝热俘获研究\*

刘伟<sup>1,2;1)</sup> 夏佳文<sup>1</sup> 张文志<sup>1</sup> 刘勇<sup>1,2</sup> 夏国兴<sup>1,2</sup>  
杨建成<sup>1,2</sup> 武军霞<sup>1,2</sup> 殷学军<sup>1,2</sup>

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 在研究重离子储存环纵向相振荡运动特性的基础上,对 CSR 主环 CSRm 内重离子的绝热俘获及加速过程进行了模拟,得出与 CSR 机器特性相适应的高频参数,并给出了高频参数在绝热俘获过程中随时间的变化曲线.

**关键词** 绝热俘获 相振荡 匹配

## 1 引言

在兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)<sup>[1]</sup>主环(CSRm)的设计中,采用电子冷却作用下的剥离注入、多次多圈注入和射频堆积 3 种方法将束流在横向相空间和纵向相空间进行累积,使环内粒子数达到  $10^6 \sim 10^9$ ,然后将束流加速到高能. 但无论采用哪种方法对束流进行累积,累积后的束流都是具有一定动量散度的连续束(coasting beam),在加速以前,都需要对束流进行俘获. 由于 CSRm 在整个加速过程中,粒子的能量均小于转变能,在这个过程中粒子的相振荡是绝热收缩的<sup>[2]</sup>,束流没有损失,因此影响加速效率的关键因素就是对束流的俘获是否为绝热俘获.

## 2 俘获电压的选取

假定注入后所累积的束流在相位方向上是均匀分布,束流的初始相宽  $\Delta\phi$  为  $2\pi$ ,在动量散度方向上是高斯分布,最大动量散度为  $\pm \left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{inj}$ ,那么,粒子的初始发射度

$$J = 2\pi \cdot \left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{inj} \cdot 2 = 4\pi \left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{inj}, \quad (1)$$

束流被高频相稳区俘获时刻,高频相稳区的面积<sup>[3]</sup>

$$A_b = 16 \sqrt{\frac{qV_{cap}}{2\pi\beta_{inj}^2 E_{inj} h |\eta|}} \alpha(\phi_s), \quad (2)$$

其中  $E_{inj}$  为注入粒子的能量,  $\beta_{inj}$  为注入粒子的相对论速度,  $h$  为高频谐波数,  $\eta = 1/\gamma_i^2 - 1/\gamma^2$ ,  $\gamma$  为粒子的能量,  $\gamma_i$  为机器的转变能,  $q$  为粒子的电荷,  $V_{cap}$  为俘获电压,  $\phi_s$  为同步相角,  $\alpha(\phi_s)$  为相面积因子,数值上等于移动相稳区( $\phi_s \neq 0$ )面积与静态相稳区( $\phi_s = 0$ )面积之比<sup>[3]</sup>

$$\alpha(\phi_s) = \frac{1}{4\sqrt{2}} \int_{\phi_u}^{\pi-\phi_s} \left\{ -\frac{|\eta|}{\eta} [\cos\phi + \cos\phi_s - (\pi - \phi - \phi_s)\sin\phi_s] \right\}^{\frac{1}{2}} d\phi, \quad (3)$$

其中  $\phi$  为任意粒子的相角,  $(\pi - \phi_s, 0)$  和  $(\phi_u, 0)$  为两个非稳定固定点,  $\phi_u$  由下式决定

$$\cos\phi_u + \phi_u \sin\phi_s = -\cos\phi_s + (\pi - \phi_s)\sin\phi_s. \quad (4)$$

通常在俘获时刻,使高频相稳区的面积等于粒子纵向发射度的  $k$  倍<sup>[4]</sup>,  $k$  称为动量稀释因子,则有

$$A_b = kJ, \quad (5)$$

又由于俘获时,  $\phi_s = 0$ , 则  $\alpha(\phi_s) = 1$ , 由此解得俘获电压

$$V_{cap} = \frac{\pi^3 h k^2 |\eta| \beta_{inj}^2 E_{inj} \left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{inj}^2}{8q}. \quad (6)$$

2003-04-28 收稿

\* 国家九五重大科学工程——兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)项目资助

1)E-mail:w.liu@impcas.ac.cn

### 3 绝热俘获原理

在 CSRm 中,束流累积之后是连续束,需要高频 (rf) 在纵向相空间进行重新俘获,其中被 rf 初始相稳区所俘获的时间,即高频电压  $V_{rf}$  从零加到俘获电压所需时间称之为俘获时间  $T_{cap}$ . 它决定了束流是被绝热俘获还是非绝热俘获. 一般而言,若俘获时间  $T_{cap}$  远远大于粒子作同步相振荡的周期  $T_s$ , 可认为是绝热俘获. 因为俘获时间足够长,使得束团能与相稳区达到很好地匹配,从而保证绝大多数粒子不损失,加速效率就高. 但另一方面,从粒子储存寿命及加速周期考虑,俘获时间又不可太长,否则将造成粒子的损失,因而必须选取合适的俘获时间.

在绝热俘获过程中,  $A_b$  的变化率相对于同步振荡频率  $\omega_s$  应为慢变化,即

$$\omega_s \gg \frac{1}{A_b} \frac{dA_b}{dt}, \quad (7)$$

纵向运动  $\omega_s$  与  $V_{rf}$  的关系是<sup>[3]</sup>

$$\omega_s = \omega_0 \sqrt{\frac{hqV_{rf} |\eta \cos \phi_s|}{2\pi\beta^2 E}}, \quad (8)$$

其中  $\omega_0$  为同步粒子的回旋角频率. 又由(2)式可知  $A_b$  和  $\omega_s$  均与  $\sqrt{V_{rf}}$  成正比,令

$$a = \frac{\omega_s}{\sqrt{V_{rf}}} \quad (9)$$

可得

$$a \gg \frac{1}{2V_{rf}^{3/2}} \frac{dV_{rf}}{dt} \quad (10)$$

或

$$at \gg -\frac{1}{\sqrt{V_{rf}(t)}} + K, \quad (11)$$

其中  $K$  为常量. 从上式可以看出, rf 电压不能从  $V_{rf} = 0$  开始俘获, 因为  $V_{rf} = 0$  时  $K$  为无穷量. 假设从  $V_{rf} = V_1, t = t_1 = 0$  到  $V_{rf} = V_2, t = t_2 = T_{cap}$  为绝热俘获时间, 得到

$$K = 1/\sqrt{V_1}, \quad (12)$$

设  $\omega_{s1}$  为初始 ( $V_{rf} = V_1$  时) 同步振荡频率, 则由(9), (11), (12)式可推知

$$\omega_{s1} t \gg 1 - \sqrt{\frac{V_1}{V_{rf}(t)}}, \quad (13)$$

如果  $A_b$  的变化速度为同步振荡频率的  $\frac{1}{n}$  倍, 则有

$$\sqrt{\frac{V_{rf}(t)}{V_1}} = \frac{1}{1 - \omega_{s1} t/n}. \quad (14)$$

由此可以看出,绝热俘获过程的研究归结为 3 个参量  $V_1, V_2, n$  的选取. 由于  $V_{cap}$  可以由(6)式求出(实际采用的电压要高于俘获电压), 也就是说  $V_2$  可以确定, 因而给定  $n$  和  $V_1$ , 俘获时间  $T_{cap}$  便可以得出了.

### 4 CSRm 绝热俘获模拟研究

根据上述理论,在 CSRm 中利用扇聚焦回旋加速器进行剥离注入时,对能量为 8MeV/u 的  $^{16}\text{O}^{8+}$  束流绝热俘获及加速过程进行了模拟研究. 表 1 列出的是模拟计算中利用到的参数. 利用表中给定的参数从(6)式可以求出 CSRm 的俘获电压为 4.2kV, 因而可选取  $V_2 = 4.5\text{kV}$ . 为了使俘获的束团与相稳区很好地匹配,降低初始时刻电压从 0 跳变到  $V_1$  的非绝热过程的影响,并顾及电子学器件的响应速度,需要对  $V_1$  进行选择. 为此模拟了  $V_1$  取不同值时的俘获及加速过程,图 1 给出了最终加速效率及俘获时间随初始电压  $V_1$  的变化曲线 ( $n$  取 15). 兼顾效率及俘获时间,得到适合于 CSRm 的俘获参数  $V_1 = 90\text{V}$ .

表 1 CSRm 中纵向运动模拟计算参数

参量	量值	参量	量值
$C/m$	161.0014	$\gamma_i$	5.168
$\Delta P/P(\%)$	$\pm 0.6$	$k$	1
$\Delta\phi/(\text{rad})$	$2\pi$	$h$	1

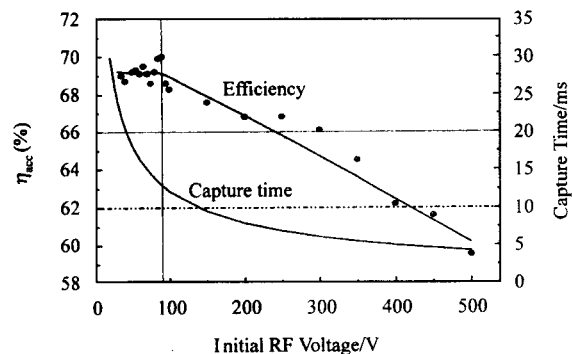


图 1 最终加速效率及俘获时间随初始高频电压的变化

为了满足绝热俘获的要求,需选取合适的  $n$  值,使得高频相稳区的面积  $A_b$  的变化率相对于同步振荡频率为慢变化. 为此模拟了 CSRm 中  $V_1 = 90\text{V}$ ,  $n$  取不同值时的俘获过程,图 2 是取不同  $n$  值时俘获完毕的相图,并注明了俘获时间及俘获之后的最终加速效率  $\eta_{acc}$ . 当  $V_{rf} = V_1 = 90\text{V}$  时,同步振

荡周期为  $T_{s1} = 6.32\text{ms}$ , 当  $V_{r1} = V_2 = 4.5\text{kV}$  时,  $T_{s2} = 0.89\text{ms}$ . 与绝热俘获相反, 如果俘获时间极短 ( $n$  取 1 或 0.1 时), 与粒子同步振荡周期相近甚至还要短, 虽然俘获结束时刻大多数粒子在相稳区内, 但束团与相稳区没有很好地匹配, 经过加速, 很大一部分粒子就会碰到真空壁上损失掉 (CSRm 的动量接收度为 1.25%). 图 3 分别为  $n = 15$  和  $n = 0.1$  的情

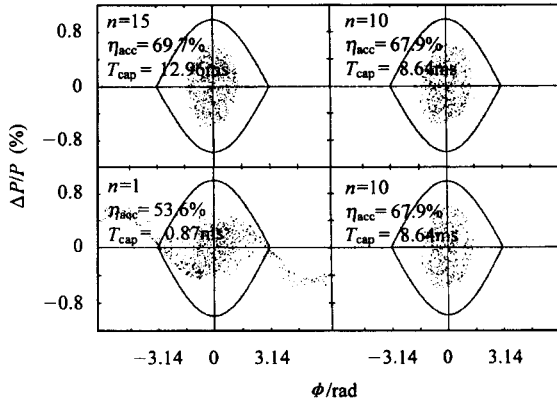


图 2 当  $V_1 = 90\text{V}$ ,  $V_2 = 4.5\text{kV}$ ,  $n$  取不同值时绝热俘获模拟结果

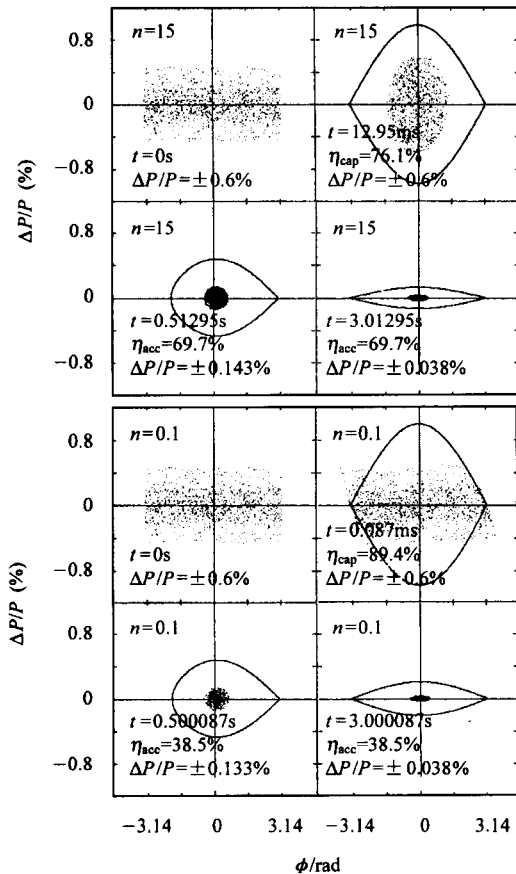


图 3  $n = 0.1$  和  $n = 15$  时俘获及加速各时刻粒子在纵向相空间的分布

况下, 在俘获及加速各个时刻粒子在纵向相空间的分布. 由图 2,3 可见, 当  $n$  取 1 或 0.1 时, 最终的加速效率很低, 而当  $n$  取 15 时, 最终的加速效率可达到 69.7%. 另外, 图 4 所给出的是当  $n$  取不同值,  $V_2$  取 4.5kV 时俘获电压随时间的变化曲线. 根据以上分析, 可以看出给定  $V_1, V_2$  的值,  $n$  值越大俘获时间越长, 例如当  $V_1 = 90\text{V}$ ,  $V_2 = 4.5\text{kV}$ ,  $n = 15$  时所需要的俘获时间为 12.96ms (3145 圈),  $n$  值从 15 变为 10 所需要的俘获时间缩短到 8.64ms (2097 圈). 而俘获时间过长, 如前所述, 又会造成粒子的损失. 图 5 给出了最终加速效率随  $n$  值的变化曲线, 可以看出, 对于 CSRm 只要  $n > 10$ , 俘获效率均可接近 70%.

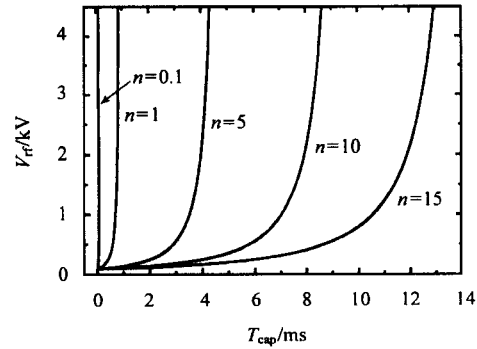


图 4 当  $n$  取 0.1, 1, 5, 10 和 15,  $V_2$  取 4.5kV 时俘获电压随时间的变化

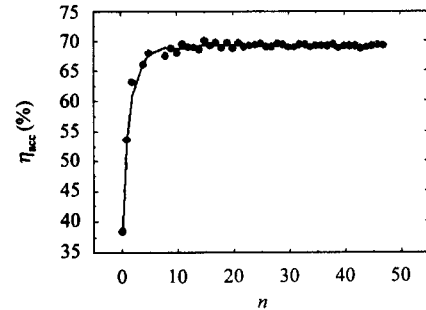


图 5 最终加速效率随  $n$  值的变化曲线

### 5 结论

经过模拟研究, 给出了 CSRm 对从扇聚焦回旋加速器采用剥离注入的方式注入的, 能量为 8MeV/u, 动量散度为  $\pm 0.6\%$  的  $^{16}\text{O}^{8+}$  束流的绝热俘获参数. 绝热俘获电压的最大值为 4.5kV, CSRm 加速腔的设计峰值电压为 7.0kV, 可以满足俘获过程的要求; 绝热俘获初始, 电压瞬间跳变到 90V 从控

制及电子学器件的响应速度考虑是可以实现的;绝热俘获时间约为  $10\text{ms}$  ( $n > 10$ ) 量级也在可以接受的范围内,并且保证最终的加速效率可以接近  $70\%$ 。

在俘获及加速过程中高频电压  $V_H$  和射频频率  $f_H$  的变化规律如图 6 所示。

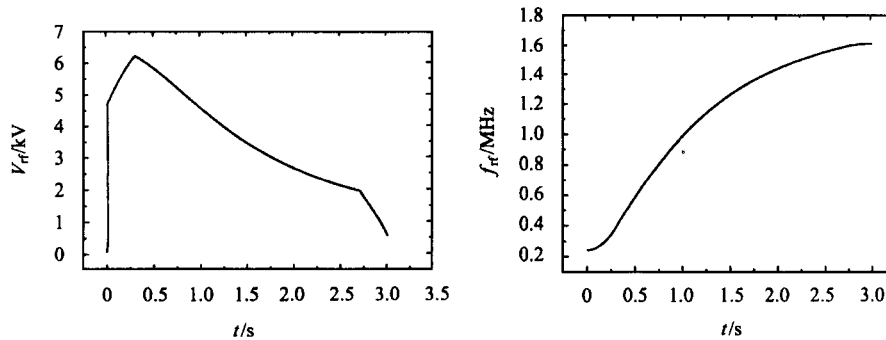


图 6 俘获及加速过程中高频电压和射频频率随时间的变化曲线

### 参考文献 (References)

- 1 XIA J W et al. Nucl. Instr. and Meth, 2002, **A488**:11—25
- 2 Dome G. Theory of RF Acceleration; S. Turner. CERN 87 - 03 [R]. Vienna: CAS, 1987, 110
- 3 Lee S Y. Acceleration Physics. Singapore: World Scientific Pub. 1999, 214
- 4 Katayama T, Yoshizawa M, Watanabe S et al. NI&M., 1993, **A - 336**: 391—409

### Investigation of the Adiabatic Capture in CSRm \*

LIU Wei<sup>1,2;1)</sup> XIA Jia-Wen<sup>1</sup> ZHANG Wen-Zhi<sup>1</sup> LIU Yong<sup>1,2</sup> XIA Guo-Xing<sup>1,2</sup>  
 YANG Jian-Cheng<sup>1,2</sup> WU Jun-Xia<sup>1,2</sup> YIN Xue-Jun<sup>1,2</sup>

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

2 (The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The adiabatic capture and acceleration for the heavy ion beam in CSRm are simulated based on the study of beam longitudinal phase oscillation. The distribution of particles at different time in longitudinal phase space is shown. The RF parameters according to the character of the machine are also obtained, and the variation of the parameter during the adiabatic capture process is presented.

**Key words** adiabatic capture, phase oscillation, matching

Received 28 April 2003

\* Supported by HIRFL-CSR Project, Lanzhou, China

1) E-mail: w.liu@impcas.ac.cn