

HIRFL-CSR 主环电子冷却模拟计算*

杨晓东^{1;1)} Parkhomchuk V. V.² 赵红卫¹ 张文志¹
宋明涛¹ 原有进¹ 夏佳文¹

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000

2(俄罗斯科学院核物理研究所 新西伯利亚 630090 俄罗斯)

摘要 以¹⁶O⁸⁺为例,用电子冷却模拟程序计算了冷却时间随离子能量、初始发射度、初始动量分散、离子流强以及离子电荷态的变化规律,研究了储存环在冷却段的β函数和色散函数对冷却时间的影响.

关键词 电子冷却 冷却时间 参数

1 引言

电子冷却方法^[1]是由 G. Budker 在 20 世纪 60 年代中提出的,其基本原理是以相同平均速度运动的电子束与离子束通过库仑作用将相对较热的离子束的能量转移到冷的电子束,从而降低离子束的横向发射度和纵向动量分散,最后离子与电子的温度达到平衡.

冷却作用的强弱及快慢由冷却力和冷却时间来描述,冷却力不仅与冷却装置本身的有效长度、磁感应强度、磁场平行度、电子束的密度、半径及横向温度有关^[2],更重要的是与储存环光学参数,以及被冷却离子束的质量和电荷态、初始参数有关.

2 冷却力与冷却时间

在有限磁场情况下,冷却力^[3]的公式为

$$F = - \frac{4Z^2 e^4 n_e}{Am_p m_e} \frac{v}{\sqrt{(v^2 + v_{eff}^2)^3}} \ln \left(\frac{\rho_{max} + \rho_{min} + \rho_L}{\rho_{min} + \rho_L} \right), \quad (1)$$

其中 n_e 为电子密度, e 为电子电荷, m_e 为电子质量, m_p 为质子质量, Z 为离子电荷数, A 为离子质量数, v 为运动坐标系中离子速度. 在冷却之前,离子速

度远大于电子速度. $v_{eff} = \sqrt{v_{\parallel e}^2 + (\Delta v_{\perp e})^2}$ 是电子纵向速度 $v_{\parallel e}$ 和由于横向磁场、电场作用产生的电子横向漂移速度 $\Delta v_{\perp e}$ 的合成. $\rho_{max} = v / (\omega_e + 1/\tau)$ 为最大碰撞参数,这里 $\omega_e = \sqrt{4\pi e^2 n_e / m}$ 为电子束等

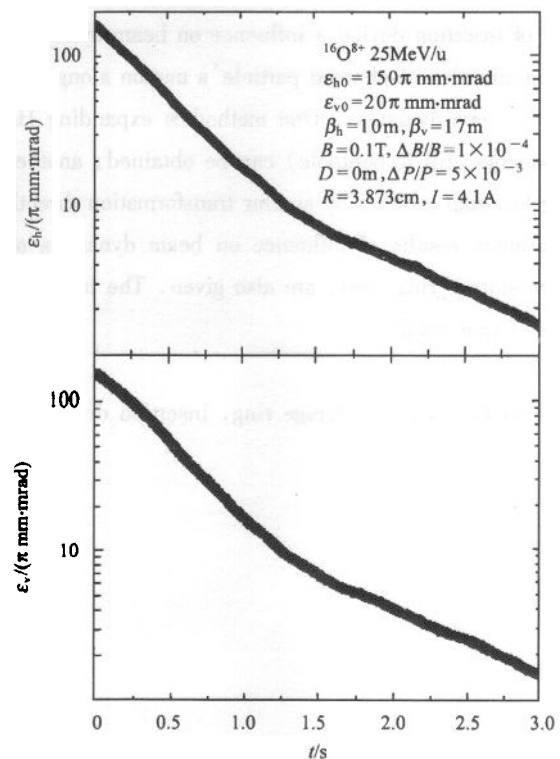


图 1 水平发射度和垂直发射度随时间的变化

2002-10-23 收稿

* 国家重大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环项目资助

1) E-mail: yangxd@impcas.ac.cn

离子频率, τ 是离子单次穿过冷却段的时间, $\rho_{\min} = e^2/mv^2$ 为最小碰撞参数, $\rho_L = mv_e/(eB)$ 为以 v_e 速度在磁感应强度为 B 的冷却段中运动的电子的拉摩半径. 可以看出, 在冷却力公式中显含离子电荷数 Z 和离子质量数 A .

冷却时间可以用经验公式^[4]描述:

$$\tau \approx 4 \times 10^{12} \frac{R}{L_c} \frac{A}{Z^2} \frac{\beta^4 \gamma^5}{n_e} \theta^3, \quad (2)$$

其中 R 为储存环平均半径, L_c 为冷却段长度, β 和 γ 为相对论因子, n_e 为电子束密度, θ 为离子与电子在冷却段的角分散. 图 1 给出了冷却过程中水平发射度 ϵ_h 和垂直发射度 ϵ_v 随时间的变化情况.

3 HIRFL-CSR 参数, 储存环光学参数及离子束参数

HIRFL-CSR^[5] 由两个储存环组成, 主环 CSRm 用于离子束的累积、加速, 实验环 CSRc 用于内靶实验, 作为高精度、高分辨率的探测器. 表 1 列出了 HIRFL-CSR 电子冷却系统的主要参数.

表 1 HIRFL-CSR 电子冷却系统的主要参数

	CSRm	CSRc
离子能量 $E_{ion}/(\text{MeV/u})$	8—50	25—450
电子能量 E_e/keV	4.39—27.43	13.7—246.87
储存环周长/m	161.0	128.8
电子冷却段长度/m	4.0	4.0
β 函数 β_T/m	β_h	10.0
	β_v	17.0
色散函数 D/m	0	0
冷却段磁感应强度/T	< 0.15	< 0.15
最大电子流强/A	3	3
冷却前离子束发射度	ϵ_h	150
$/(\pi \text{mm} \cdot \text{mrad})$	ϵ_v	20
冷却前离子束动量分散 $\Delta P/P$	$\pm 5 \times 10^{-3}$	$\pm 5 \times 10^{-3}$
冷却后离子束发射度	ϵ_h	20
$/(\pi \text{mm} \cdot \text{mrad})$	ϵ_v	1
冷却后离子束动量分散 $\Delta P/P$	$\pm 5 \times 10^{-4}$	$< \pm 1 \times 10^{-6}$

储存环光学参数(即 β 函数; 以后记为 β_T 和色散函数)与离子束参数(即发射度和动量分散)决定离子束的尺寸、角度分散及离子束的偏移. 离子半径 $a_i^2 = \epsilon \cdot \beta_T$, 离子的角度 $\theta_i = \sqrt{\epsilon/\beta_T}$.

从式(2)可以看出, 冷却时间与离子和电子之间的角度分散 θ 成二次方关系, 当离子与电子平均速度匹配很好时, θ 只由离子和电子的角度分散给出:

$\theta = \sqrt{\theta_i^2 + \theta_e^2}$. 当电子温度为 0.1eV 时, 其角度分散为 $\theta_e = \sqrt{T_e/(mc^2 \beta^2 \gamma^2)} \approx 4\text{mrad}$. 当离子角度分散大于电子角度分散时, 较大的 β_T 函数可以提供较快的电子冷却; 但当离子束尺寸接近电子束尺寸时, 由于空间电荷作用很难达到离子和电子速度之间的匹配, 而造成冷却力的减弱. 离子电荷数 Z 和质量数 A 不影响离子束在储存环中的尺寸和角度分散, 对于不同的离子, 冷却规律是相同的, 冷却时间之间的差别为 A/Z^2 . 图 2 为冷却时间随冷却段水平和垂直 β 函数的变化情况.

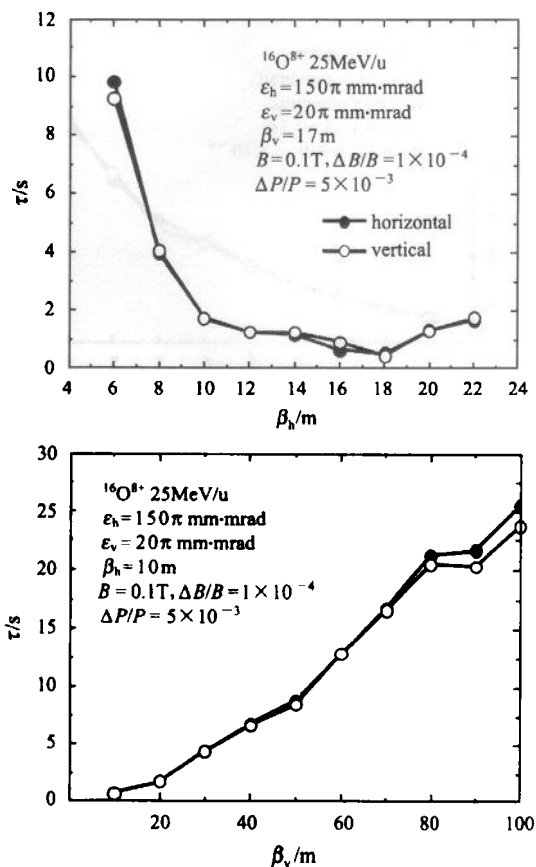


图 2 冷却时间随水平和垂直 β 函数的变化

色散函数 D 决定了离子轨道的偏移量

$$\chi = D \frac{\Delta P}{P}. \quad (3)$$

为了获得最强的冷却, 电子冷却装置一般位于储存环色散函数很小的直线节上, β_T 值选择在 10—20m 之间. 当有很小的色散时, 引入了离子与电子束之间的角度, 有利于冷却, 这就是所谓的“色散冷却”^[6]. 色散冷却的原理是当色散不为零时, 不同动量分散的离子在不同的闭轨上运动, 处于外面的离子横向振荡就被阻尼; 另一方面, 由于空间电荷作

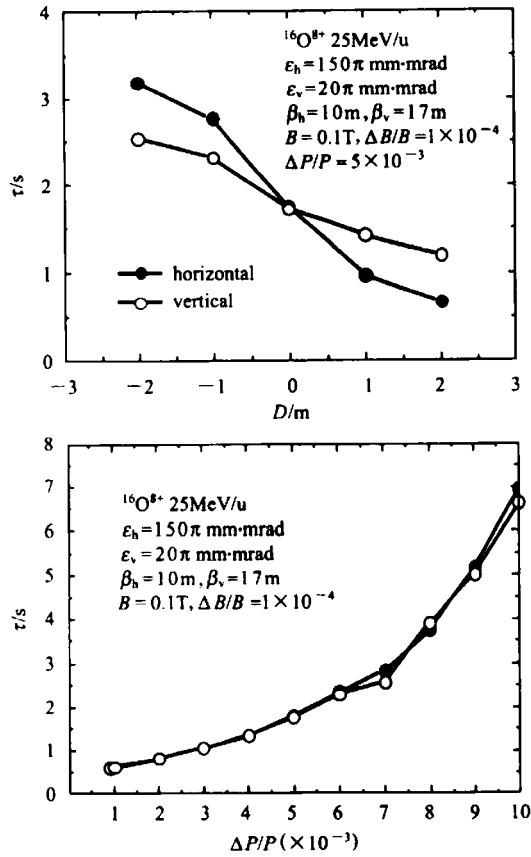


图 3 冷却时间随色散函数和初始动量分散的变化

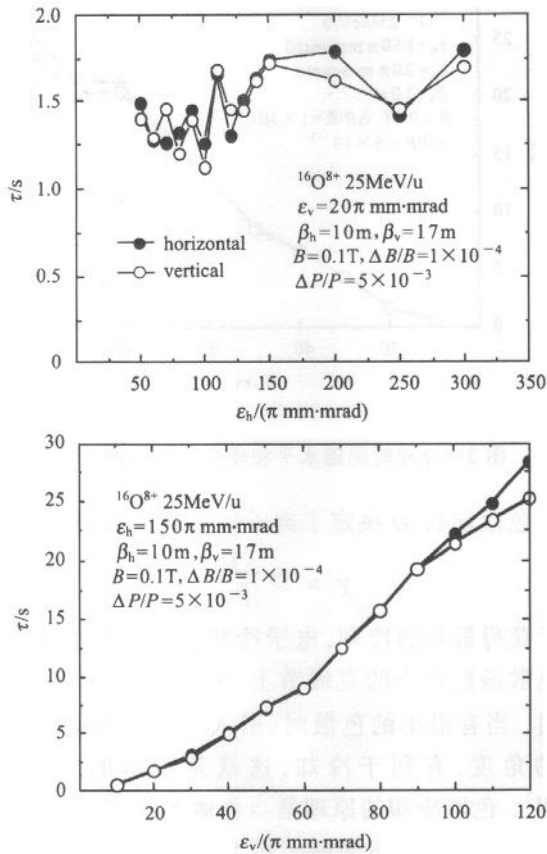


图 4 冷却时间随初始水平发射度和垂直发射度的变化

用,电子束的速度呈抛物线分布,当色散不为零时,离子束中心与电子束中心产生偏移,加大了离子与电子之间的角度,从而增强了冷却力.图3为冷却时间随色散函数和初始动量分散的变化情况.动量分散越大,冷却时间越长.图4为固定 β 函数情况下,冷却时间随初始发射度 ϵ 的变化情况.

4 离子束参数—能量、电荷态和流强

从公式(2)中得知,冷却时间与离子和电子平均运动速度 $\langle v \rangle = \beta c$ 有关.对于同一种离子,在其他参数相同的情况下,能量越高,冷却时间越长,可以从电子束密度 $n_e = I/(\pi R_b^2 \beta c)$ 来分析.固定长度的电子冷却装置相当于储存环中具有一定厚度的薄膜,在电子流强和半径固定情况下,离子运动速度越大,离子在电子束中停留时间越短;电子束密度越小,与离子相互作用的电子数越少,冷却作用越弱.

如果电子冷却装置中没有其他引起电子横向运动的因素,只有电子束的空间电荷效应,那么,方程(1)中的有效速度 v_{eff} 仅为电子在磁场 B 中的漂移运动速度 $v_{drift} = 2\pi n_e R_b c/B$, R_b 为电子束半径.从方程(1)中可以看出,增大电子束密度 n_e 有利于电

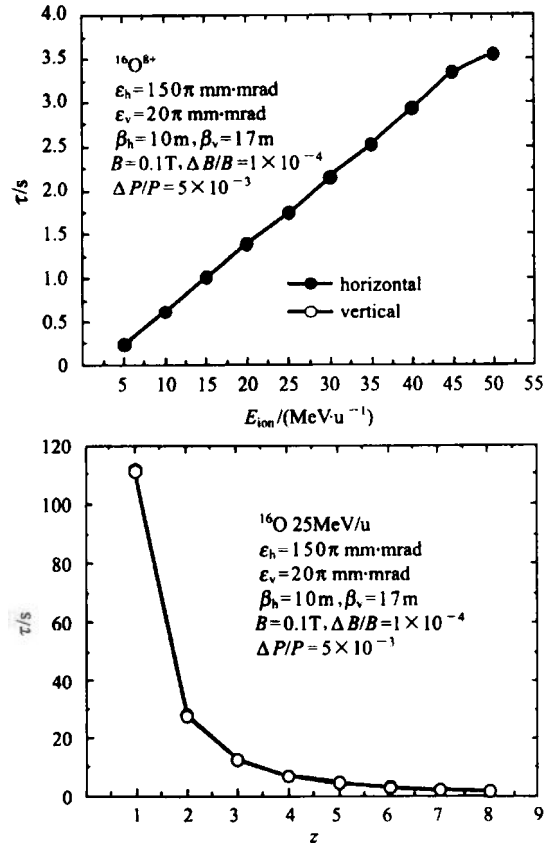


图 5 冷却时间随离子能量和电荷态的变化规律

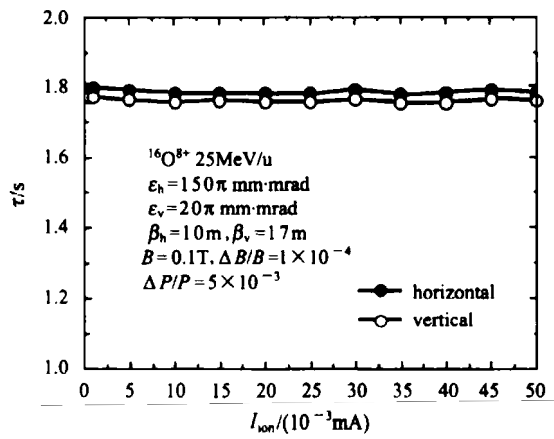


图 6 冷却时间随离子束流强的变化规律

子冷却, 当 $v_{eff} = v$ 时, 冷却力达到最大值, 最佳的电子束密度为

$$n_e = \beta\gamma^2 B / (2\pi e\beta_\tau), \quad (4)$$

以实用单位表示, 其形式为

$$j_e \approx \frac{1.6(\beta\gamma)^2 B}{\beta_\tau}, \quad (5)$$

上式中 B 的单位为 T, β_τ 的单位为 m, j_e 的单位为

A/cm^2 . 对于不同能量的离子束, 最佳冷却要求的电子束密度不同. 从公式(1)中得知, 冷却力与离子电荷数 Z 成平方关系, 与质量数 A 成反比. 图 5 为冷却时间随离子能量 E_{ion} 和电荷态的变化规律.

图 6 为冷却时间随离子束流强的变化情况, 可以看出在设定范围内, 冷却时间对离子束流强不敏感.

5 结论

对于 HIRFL-CSR 主环, 为了在最短的时间内累积尽可能多的离子, 首先要选择电荷态较高的低能离子. 计算结果表明 CSR 主环在冷却段的 β 函数数值在 10—20m 之间, 处于电子冷却所要求的最佳值范围内. 如果选择在电子冷却段色散函数为正, 而且数值为 1—2m 的 Lattice 运行模式, 将缩短冷却时间. 在给定的 β 函数和色散函数的情况下, 注入离子束的动量分散尽可能小, 这样才能满足主环的设计要求.

参考文献 (References)

- 1 Dikansky N S, Kudellainen V I, Lebedev V A et al. Ultimate Possibilities of Electron Cooling Preprint INP 88—61. Novosibirsk: INP, 1998. 1—58
- 2 YANG X D, Parkhomchuk V V. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(6): 771—775 (in Chinese)
(杨晓东, Parkhomchuk V V. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 771—775)
- 3 Parkholmchuk V V. Nucl. Instr. & Meth., 2000, A441: 9—17
- 4 Bossler J, Carli C, Chanel M et al. Nucl. Instr. & Meth., 2000, A441: 60—63
- 5 ZHAN W L, XIA J W, WEI B W et al. In: Marti F. Cyclotrons and Their Applications 2001, Sixteenth International Conference, East Lansing: Michigan, 2001. 175—185
- 6 Beutelspacher M, Grieser M, Schwalm D et al. Proceedings of EPAC, Vienna Austria, 2000. 530—532

Electron Cooling Simulation in HIRFL-CSR Main Ring*

YANG Xiao-Dong^{1,1)} Parkhomchuk V. V.² ZHAO Hong-Wei¹
ZHANG Wen-Zhi¹ SONG Ming-Tao¹ YUAN You-Jin¹ XIA Jia-Wen¹

1(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)
2(Budker Institute of Nuclear Physics, Russian Academy of Science, Novosibirsk 630090, Russia)

Abstract With the help of electron cooling code, the cooling time of $^{16}O^{8+}$ ion beam are simulated in various parameters of the ion beam in the HIRFL-CSR electron cooling storage main ring, such as ion beam energy, initial transverse emittance, and momentum spread. The influence of the machine optical parameters-betatron function, and dispersion function on the cooling time are investigated in this paper.

Key words electron cooling, cooling time, parameter

Received 23 October 2002

* Supported by National Scientific Project HIRFL-CSR

1) E-mail: yangxd@impcas.ac.cn