

文章编号: 1001-4322(2003)05-0505-04

CSR 电子冷却系统电子束空间电荷效应对电子束温度的影响*

夏国兴^{1,2}, 夏佳文¹, 杨建成¹, 武军霞¹, 刘 伟¹, 殷学军¹, 赵红卫¹, 魏宝文¹

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 通过求解电子冷却系统中冷却段漂移管区的强流电子束产生的空间电荷场,研究了电子束空间电荷效应对电子温升的影响。结合 HIRFL-CSR 电子冷却系统的典型参数,得到了电子在自身空间电荷场和纵向螺线管磁场组成的交叉场作用下产生的漂移速度和由此引起的附加温度大小,并指出减小电子束空间电荷效应的方法。

关键词: 电子冷却; 空间电荷; 冷却效率; 漂移速度; 温升

中图分类号: TL56 **文献标识码:** A

电子冷却是采用以相同平均速度运动的强流冷电子束与热离子束在储存环的一小段上相互重叠,通过库仑相互作用,冷的电子束将离子束的一部分热量带走,从而达到降低束流的发射度和动量散度,改善束流品质的目的。兰州重离子加速器冷却储存环 HIRFL - CSR 就是利用电子冷却方法迅速压缩储存环中离子束的横向发射度、发散角和纵向动量散度^[1,2],从而获得高品质的重离子束流。

电子冷却理论表明,束流的冷却率与电子束的温升紧密相关^[3]。因此,为了缩短冷却时间,获得高的束流冷却率,就对电子束的温升提出限制要求。但是,由于强流电子束自身的空间电荷效应,它引起了电子束径向速度的梯度分布;并且由于冷却段纵向磁场和电子束空间电荷场的联合作用,电子产生了方位角漂移速度 v_d ,造成了电子束的温升,降低了冷却效率^[4]。本文分析了强流电子束空间电荷场的作用,研究了其对电子束温升的影响,并计算了 HIRFL-CSR 电子冷却系统中电子在自身空间电荷场和纵向螺线管磁场组成的交叉场作用下产生的漂移速度和由此引起的附加温度大小,并指出减小电子束空间电荷效应的方法。

1 电子在冷却段漂移管中的空间电荷场

为了简便,设电子束为一圆形束,半径为 r_0 ,在半径为 r_c 的真空漂移圆管内沿轴向运动,且圆管的电势为地电位,如图 1 所示,则电子束的密度为^[5]

$$n_e = pU_0^{3/2}/e r_0^2 c = I_e/e r_0^2 c \quad (1)$$

式中: p 为电子枪的导流系数; U_0 为电子枪的引出电压; v 为电子在漂移管中的相对论速度因子; c 为真空中的光速; I_e 为电子束的电流。由于强流电子束自身空间电荷效应,在冷却段漂移管中产生径向电场 E_r ,根据静电学高斯定理,该电势和电场可以分别表述为

$$U_{in} = e n_e (r^2 - r_0^2)/4 \epsilon_0 - (e n_e r_0^2/2 \epsilon_0) \ln(r/r_0) \quad (0 \leq r \leq r_0) \quad (2)$$

$$U_{out} = - (e n_e/2 \epsilon_0) r_0^2 \ln(r/r) \quad (r_0 \leq r \leq r_c) \quad (3)$$

$$E_{in} = - \partial U_{in}/\partial r = - (e n_e/2 \epsilon_0) r \quad (0 \leq r \leq r_0) \quad (4)$$

$$E_{out} = - \partial U_{out}/\partial r = - (e n_e/2 \epsilon_0) (r_0^2/r) \quad (r_0 \leq r \leq r_c) \quad (5)$$

式中: U_{in} 和 U_{out} 分别为电子束内部和外部的电势大小; E_{in} 和 E_{out} 分别表示所对应的电场大小; r 为距束轴中心的径向距离; ϵ_0 为真空介电常数。从(2)式可以看出,在束轴的中心 $r=0$ 处,存在一个负的电势,且束轴中

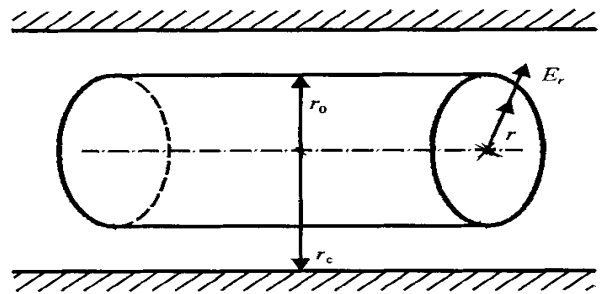


Fig. 1 Space charge field in drift space
图 1 漂移管内的空间电荷场

* 收稿日期:2002-12-13; 修订日期:2003-02-18

基金项目:国家“九五”重大科学工程 HIRFL-CSR 项目资金资助课题

作者简介:夏国兴(1973-),男,博士研究生,主要从事加速器束流物理和电子冷却相关研究;兰州市 31 信箱。

心的电势可以写为

$$U_c = - (e n_e r_0^2 / 4 \epsilon_0) [1 + 2 \ln(r_c / r_0)] \tag{6}$$

因为经典电子半径 $r_e = e^2 / 4 \pi \epsilon_0 m_e c^2$, 所以束轴中心的电势也可表示成

$$U_c = - n_e r_0^2 r_e (m_e c^2 / e) [1 + 2 \ln(r_c / r_0)] \tag{7}$$

束流中心处的电子动能为

$$E_e = e \{ U_0 - n_e r_0^2 r_e (m_e c^2 / e) [1 + 2 \ln(r_c / r_0)] \} \tag{8}$$

式中: m_e 为电子的质量; r_e 为经典电子半径。为了冷却 10MeV/u 的 C^{6+} 离子, 采用 HIRFL-CSR 主环电子冷却器的电子枪的典型参数^[6], 如表 1 所示。代入上式, 可以计算出空间电荷场所对应的电势大小, 如图 2 所示。从图中可以看出, 在电子束的中心轴 ($r=0$) 和电子束的边缘 ($r=r_0$) 处, 电势分别为 $U_c = -1.975\text{kV}$, $U = -1.357\text{kV}$ 。因此, 当电子枪的加速电压一定时, 必然存在有电子速度在径向的梯度分布。因此在选择加速电压时必须考虑到由于电子束空间电荷产生的这一个场分量, 以便获得设计所需要的电子束能量。

表 1 HIRFL-CSR 电子枪设计参数

Table 1 Parameters of HIRFL-CSR electron gun design

parameters		parameters	
electron energy	5.5keV	gun cathode radius	1.25cm
electron beam current	3.0A	gun perveance	$1.1 \times 10^{-6} \text{A} \cdot \text{V}^{-3/2}$
solenoid field strength	0.1T	vacuum chamber radius	7.5cm
electron beam radius	2.5cm	relativistic velocity factor	0.146

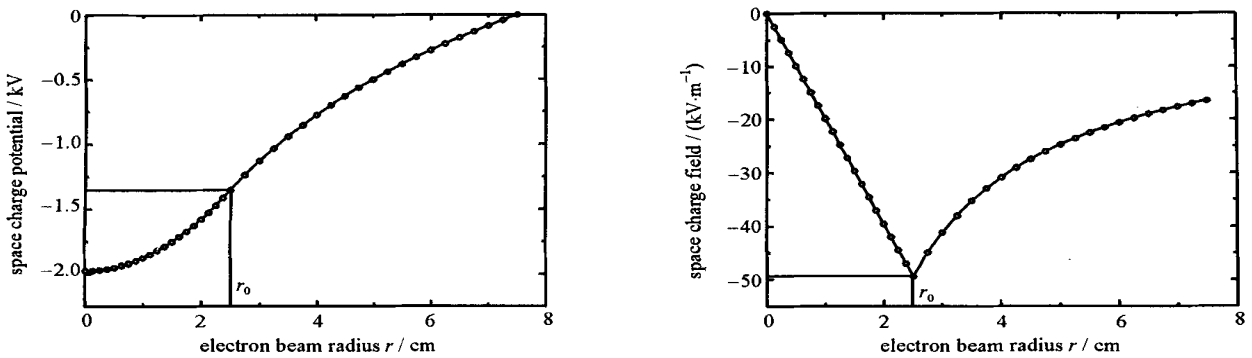


Fig. 2 Space charge potential and field vs electron beam radius

图 2 漂移管中空间电荷引起的电势和电场随电子束半径的分布图

从以上分析可见, 在半径为 $0 < r < r_0$ 的区域, 当电子枪引出电压一定时, 由于强流电子束空间电荷场的作用, 电子将受到不同的加速电压的作用, 因此, 不在束流中心轴上的电子与束轴电子的纵向速度并不相同, 即存在径向场梯度所引起的速度变化。对于 HIRFL-CSR, 其空间电荷的电势梯度近似为 247V/cm , 这种情形下的电子束并不是单能的, 势必对电子束造成加温, 因而将影响冷却过程的快慢。

2 空间电荷场对电子束横向温度的影响

在 $0 < r < r_0$ 的区域, 根据安培定律, 电子束自身产生的磁感应强度可以表示为

$$B_e = \frac{\mu_0}{2} (n_e e c) r u \tag{9}$$

由于空间电荷场的作用, 电子所受到的合力为

$$f = - e [E(r) \cdot u_r + v_e \times B_e] = [e^2 n_e r / 2 \epsilon_0 - (\mu_0 / 2) e^2 n_e r^2 c^2] u_r = (e^2 n_e r / 2 \epsilon_0) (1 - \beta^2) u_r \tag{10}$$

式中: u 和 u_r 分别为辐向和径向的单位矢量; μ_0 为真空磁导率; v_e 为电子的速度。由上式可见, 电场力与磁场力的比为 $1/\beta^2$, 在非相对论情况下, 电子束自身产生的磁场力通常可以忽略。在此径向力的作用下, 电子将获得一个附加的径向速度, 即增加了电子束的温升。在实际的电子冷却系统中, 通常需要考虑电子束空间电荷场和螺线管的纵向磁场组成的交叉场对电子束温升的影响。为此, 采用表 1 中 HIRFL-CSR 电子枪的典型参数, 可以计算出电子在交叉场中的漂移速度相对大小和引起附加温度的大小。漂移速度 v_d 可以表示为^[7]

$$v_d = c(E_{in} - B_e)/B \tag{11}$$

因此,漂移速度的相对大小为

$$\frac{v_d}{v_e} = (1 - \dots) \frac{2I_e}{2} \frac{r}{c} \frac{1}{r_0^2 B} \tag{12}$$

漂移速度引起的温升增加值为

$$kT = m_e v_d^2 / 2 \tag{13}$$

式中: $\alpha = n_i / n_e$ 为中和因子,表示存储离子的密度 n_i 与电子束密度 n_e 之比; β 为电子能量因子; B 为冷却段漂移管处的磁感应强度; k 为玻尔兹曼常数。对于 $\alpha = 0, B = 0.1 \text{ T}$, 采用表 1 中 HIRFL-CSR 电子冷却器的参数, 计算得到漂移速度的大小变化如图 3 所示, 漂移速度所引起的附加温度增加的变化如图 4 所示。由图可见, 随着 r 的增加, 漂移速度和附加温度也逐渐上升, 且在 $r = r_0$ 处得到漂移速度的相对大小为 $v_d / v_e = 3.69 \times 10^{-4}$, 由漂移速度所引起的温度增加值约为 $7.42 \times 10^{-4} \text{ eV}$ 。

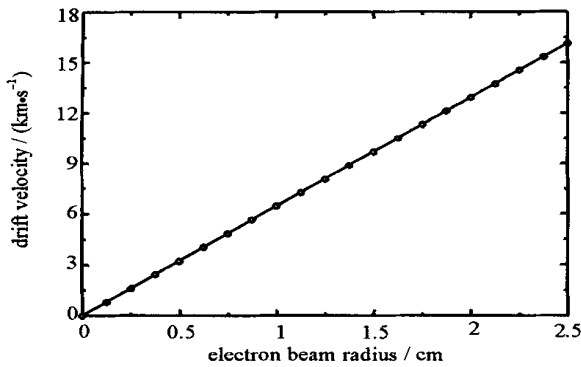


Fig. 3 Drift velocity vs electron beam radius
图 3 电子束在交叉场中的漂移速度的变化

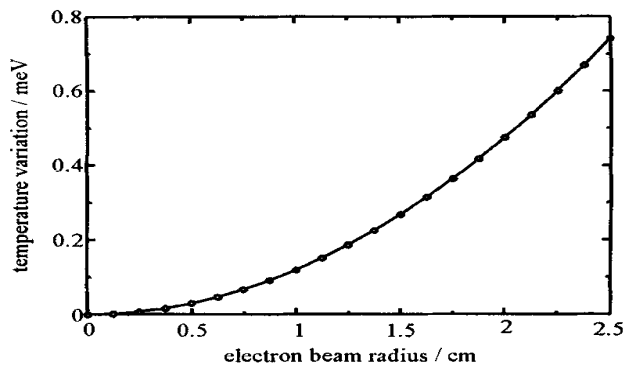


Fig. 4 Temperature variation vs electron beam radius
图 4 漂移速度引起的温度随电子束半径的变化

3 结 论

通过分析冷却段电子束空间电荷效应和电子所受到的作用力, 得到了 HIRFL-CSR 电子冷却系统中强流电子束产生的空间电荷场大小, 并计算了电子在自身空间电荷场和纵向螺线管磁场的作用下所产生的漂移速度和由此引起的附加温度。为了克服空间电荷效应对电子束的影响, 减小冷却时间, 提高冷却效率, 通常的低能电子冷却器都利用附加的引导场来抵消或减小这一效应。为了降低空间电荷效应, 也可以利用电子束与漂移管中剩余气体分子的碰撞而俘获离子, 中和部分或全部电子束的空间电荷场, 从而减少这一电场的影响。LEAR 的实验结果已经证明了经过空间电荷中和作用后, 冷却时间减小^[8], 冷却效率明显提高。

这次应用在 HIRFL-CSR 的电子冷却系统, 将首次采用最新型的电子枪产生的空心电子束冷却重离子束流。它是在电子枪阴极周围放置一个控制电极, 通过调节控制电极电压, 改变阴极边缘的电势, 增强阴极边缘的电子发射, 从而得到比较稳定的空心电子束。空心电子束的采用, 不但极大地减小了冷却段电子束与离子束的复合, 而且在一定程度上降低了强流电子束的空间电荷效应。

参考文献:

[1] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. The heavy ion cooler-storage ring project (HIRFL-CSR) at Lanzhou[J]. *Nucl Instrum and Methods in Phys Res*, 2002, **A488**:11—25.
 [2] 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. (Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. Heavy ion ring project in Lanzhou. *Nuclear Physics Review*, 2001, **18**(1):35—38)
 [3] 饶亦农, 夏佳文, 原有进, 等. HIRFL-CSR 电子冷却装置上的横向电子束温度[J]. *高能物理与核物理*, 1996, **20**(4):369—375. (Rao Y N, Xia J W, Yuan Y J, et al. Electron beam transverse temperature on HIRFL-CSR e-cooler. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1996, **20**(4):369—375)
 [4] Bosser J, Meshkov I, Parkhomchuk V, et al. Neutralization of the LEAR ECOOL electron beam space charge[R]. CERN PS/AR Note 93-08, 1993.
 [5] Dimopoulou C. Design of a high-perveance electron gun for electron cooling in the low energy ion ring(LEIR) at CERN[D]. CERN/PS 2002-004

(BD).

- [6] 饶亦农, 夏佳文, 原有进, 等. HIRFL-CSR 电子冷却装置的电子枪设计[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(1):131—137. (Rao Y N, Xia J W, Yuan Y J, et al. Electron gun design for HIRFL-CSR electron cooler. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(1):131—137)
- [7] Meshkov I N. Physics and Technique of Electron Cooling[R]. RIKEN-AP-AC-2, 1997.
- [8] Bossert J, Ley R, Korotaev Yu, et al. Active methods of instability suppression in a neutralized electron beam[J]. *Nucl Instr and Meth in Phys Res*, 1997, A391:103—106.

Studies of electron beam temperature rise due to space charge effect of intense electron beam in CSR e-cooler system

XIA Guo-xing^{1,2}, XIA Jia-wen¹, YANG Jian-cheng¹, WU Jun-xia¹, LIU Wei¹,
YIN Xue-jun¹, ZHAO Hong-wei¹, WEI Bao-wen¹

(1. Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 31, Lanzhou 730000, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: There exists the gradient distribution of radial electron velocity due to space charge effect of intense electron beam, and this influences significantly the cooling efficiency. By analysis of the space charge field of intense electron beam in the cooling section of electron cooler system, the variations of electron beam velocity are given. In addition, electron gets the transversal drift velocity and meanwhile causes an additional temperature rise in this crossing field produced by space charge field and longitudinal solenoid field. Using the typical parameters of HIRFL-CSR e-cooler system, some important conclusions have been drawn.

Key words: Electron cooler; Space charge; Cooling efficiency; Transversal drift velocity; Temperature rise