

文章编号: 1001-4322(2003)08-0809-04

HIRFL-CSR 电子冷却系统空心电子束性能研究^{*}

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

(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: 电子冷却系统中冷却力的大小与电子束的温度密切相关。由于强流电子束自身产生的空间电荷场,使得电子束的速度离散,增加了电子束温度,降低了冷却效率。为了减小空间电荷效应,HIRFL-CSR 的电子冷却系统将首次采用空心电子束对储存环中的重离子束流进行冷却。通过分析实心电子束和空心电子束的空间电荷场,研究了其对电子束速度和温度的影响。

关键词: 电子冷却; 空间电荷场; 空心电子束

中图分类号: TL56 文献标识码: A

电子冷却系统是通过具有相同平均速度运动的离子束与强流电子束的库仑碰撞,降低储存环或对撞机中离子束的横向发射度和纵向动量散度^[1~3]。一般情况下,电子束的流强在安培量级,因此其自身产生的空间电荷场会对电子的速度产生影响,即出现新的速度分散。电子冷却理论表明,电子冷却时间是表征冷却快慢的物理量,冷却力和冷却时间的大小与电子束的速度密切相关,且冷却时间可以用经验公式表示为^[4]

$$t_c = - \left(\frac{1}{v_i} \frac{dv_i}{dt} \right)^{-1} = C \frac{A_i}{Q_i^2} \frac{1}{\epsilon_e j_e} \left(\frac{v_i}{c} + \frac{v_e}{c} \right)^{3/2} \quad (1)$$

式中: t_c 表示冷却时间; Q_i 和 A_i 分别表示离子的电荷态和质量数; v_i 和 v_e 表示离子的相对论速度和相对论因子; ϵ_e 和 j_e 分别表示冷却段内离子束和电子束的张角; ϵ_e 表示电子电流密度; ϵ_e 表示冷却段长度与储存环周长之比; C 为常系数。因为电子束的张角与电子的横向速度成正比,因此,电子速度的增加会增加冷却时间,降低冷却效率。

空心电子束的采用,不但降低了电子束与离子束的复合,而且也减小了强流电子束的空间电荷效应。本文详细分析了电子束空间电荷场的分布,并对 HIRFL-CSR 电子冷却系统中空心束的性能进行了研究。

1 电子束的空间电荷场

1.1 实心电子束的场及其对电子束速度的影响

传统的电子冷却采用电子枪产生实心的电子束。在漂移管中,电子束内任意一点处产生的空间电荷势可以表示为

$$U_{sp}(r) = - \frac{I_e}{4 \epsilon_0 c} \left[1 + 2 \ln \left(\frac{b}{a} \right) - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right], \quad r < a \quad (2)$$

式中: I_e 为电子束电流, $I_e = n_e e a^2 c^{[5]}$, n_e 为漂移管中电子束密度; a, b 分别为电子束和真空室的半径; ϵ_0 为真空介电常数; γ_e 为电子的相对论速度因子; c 为光速。因而空间电荷产生的径向电场为

$$E_{sp}(r) = - \frac{\partial U_{sp}(r)}{\partial r} u_r = - \frac{I_e}{2 \epsilon_0 c a^2} r u_r, \quad r < a \quad (3)$$

式中: u_r 表示径向单位矢量。由此可见,空间电荷场对电子产生一个横向作用力,从而增加了电子束的横向速度分散。

相对于束轴中心,束内任一点 r 处的电位差可以表示为

$$U_{sp}(r) = - \int_0^r E_{sp}(r) \cdot dr = \frac{I_e}{4 \epsilon_0 c a^2} r^2 \quad (4)$$

所以,半径 r 处电子与束轴电子的相对动能差为

$$\frac{W_e}{W_e} = \frac{e U_{sp}(r)}{m_e c^2 (\gamma_e - 1)} = \frac{I_e}{4 \epsilon_0 c m_e c^2 (\gamma_e - 1)} \frac{r^2}{a^2} \quad (5)$$

* 收稿日期:2003-01-21; 修订日期:2003-04-20

基金项目:国家“九五”重大科学工程 HIRFL-CSR 项目基金资助课题

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。

式中: γ_e 为电子的相对论因子; m_e 为电子静止质量。因此,相对速度差可以表示成

$$\frac{v_e}{v_0} = \frac{1}{(\gamma_e + 1)} \frac{W_e}{W_0} = \frac{I_e}{4} \frac{e}{m_e c^2} \frac{r^2}{a^2} \quad (6)$$

从(6)式可见,由于空间电荷效应,引起电子速度在横向呈抛物线分布,且距束轴越远,速度差也越大。

另外,在 $r < a$ 的区域内,强流电子束在漂移管中运动时也产生磁场,根据安培定律有

$$B_e = \frac{\mu_0}{2} \frac{I_e}{a^2} r u \quad (7)$$

因此,由于空间电荷场的作用,电子所受到的作用力可以表示成

$$f = -e [E_{sp}(r) + v_0 \times B_e] = \frac{e I_e}{2} \frac{r}{a^2} (1 - \frac{v_e^2}{c^2}) u_r \quad (8)$$

式中: u 表示角向单位矢量; μ_0 为真空磁导率; v_0 为电子的速度。由(8)式可见,电场力与磁场力的比为 $1/\gamma_e^2$,在非相对论情况下,即 $\gamma_e \ll 1$ 时,电子束自身产生的磁场力可以忽略。在此径向力的作用下,电子将获得一个附加的径向速度,即增加了电子束的横向温度。

电子在径向空间电荷场和冷却段纵向螺线管场组成的交叉场的作用下,还会产生一个径向的漂移速度^[6],可以表示成

$$v_d = \frac{I_e}{2} \frac{1}{\gamma_e^2} \frac{r}{c a^2 B} \quad (9)$$

式中 B 为纵向螺线管磁场的大小。漂移速度引起的温度增加为

$$kT = \frac{1}{2} m_e v_d^2 \quad (10)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数, T 为电子的增加温度。温度的增加引起了电子束张角的增大,结合(1)式可以看出,空间电荷场的存在增加了冷却时间,减小了冷却效率。

1.2 空心电子束的场及其对电子束速度的影响

为了降低电子束空间电荷对电子束速度的影响,HIRFL-CSR 电子冷却系统将首次采用空心电子束^[7,8]冷却重离子束流。为了产生空心束,在电子枪阴极周围放置一个环形控制电极,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。采用空心电子束,不但极大地减小了冷却段电子束与离子束的复合几率,而且在一定程度上降低了强流电子束的空间电荷效应^[9]。

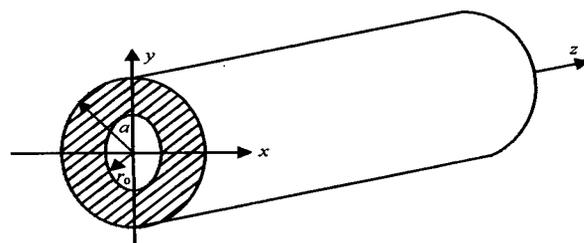


Fig. 1 Hollow electron beam

图 1 空心电子束示意图

设电子束空心部分的半径为 r_0 ,电子束(包括空心部分)半径为 a ,真空室半径为 b ,空心电子束电流为 $I_{h,e}$,且 $I_{h,e} = n_e e (a^2 - r_0^2) c$,如图 1 所示。在 $r_0 < r < a$ 区域内,电子束密度均匀分布。根据高斯定理得到空心电子束空间电荷场可以表示为

$$E_{h,sp}(r) = -\frac{I_{h,e}}{2} \frac{1}{c} \begin{cases} 0, & r < r_0 \\ \frac{r^2 - r_0^2}{r(a^2 - r_0^2)}, & r_0 < r < a \\ \frac{1}{r}, & a < r < b \end{cases} \quad (11)$$

对(11)式积分,得到空心电子束的空间电荷势为

$$U_{h,sp}(r) = -\int_{r_0}^r E_{h,sp}(r) \cdot dr = \frac{I_{h,e}}{4} \frac{1}{c} \left[2 \ln \frac{b}{a} - \frac{r^2 - a^2}{a^2 - r_0^2} + 2 \frac{r_0^2}{a^2 - r_0^2} \ln \frac{r}{a} \right], \quad r_0 < r < a \quad (12)$$

束内任意一点 r 处与束轴中心的相对电势差可以表示为

$$U_{h,sp}(r) = \frac{I_{h,e}}{4} \frac{1}{c} \frac{1}{a^2 - r_0^2} \left[r^2 - r_0^2 \left(1 + 2 \ln \frac{r}{r_0} \right) \right] \quad (13)$$

在非相对论情况下,空间电荷势引起的速度分散为

$$\frac{v_{h,e}}{v_e} = \frac{I_{h,e}}{4} \frac{e}{c} \frac{1}{m_e c^2} \frac{1}{a^2 - r_0^2} \left[r^2 - r_0^2 \left(1 + 2 \ln \frac{r}{r_0} \right) \right], \quad r_0 < r < a \quad (14)$$

可见在空心束的内边缘处,即 $r = r_0$ 处,速度分散为零。

类似于实心束的情形,在空心电子束产生的场和纵向螺线管磁场的作用下引起的漂移速度大小和漂移速度引起的温度增加,分别表示为

$$v_{h,d} = \frac{I_{h,e}}{2} \frac{1}{c} \frac{1}{B} \frac{r^2 - r_0^2}{r(a^2 - r_0^2)} \quad (15)$$

$$kT_h = \frac{1}{2} m_e v_{h,d}^2 \quad (16)$$

2 空心束与实心束对电子速度和温度影响的比较

利用 HIRFL-CSR 电子冷却系统电子枪设计的典型参数,如表 1 所示。根据 (6), (14) 式,分别在实心电子束和不同的空心束内径条件下,对空间电荷场引起的电子束的相对速度偏离、电子在交叉场中的漂移速度大小和漂移速度引起的电子温度沿电子束径向的变化分别进行了计算,这些结果比较分别表示在图 2 ~ 图 4 中。

表 1 HIRFL-CSR 电子枪设计参数

Table 1 Parameters of HIRFL-CSR electron gun design

E_0 / keV	n_0 / cm^{-3}	a / cm	b / cm	r / cm	r_0 / mm	B / T
25	1.05×10^8	2.5	7.5	0.302	5, 10	0.1

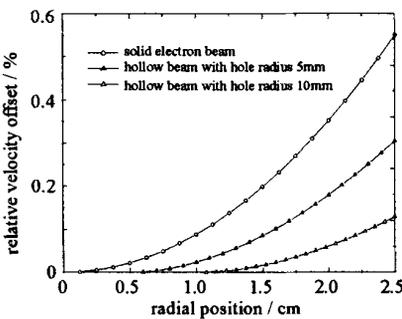


Fig. 2 Relative velocity offset as a function of radial position in electron beam

图 2 空间电荷势引起的速度偏离随电子束径向的变化

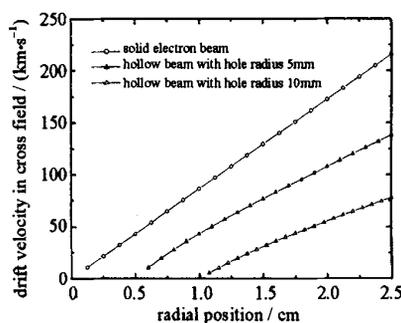


Fig. 3 Drift velocity in cross field as a function of radial position in electron beam

图 3 交叉场中的漂移速度随电子束径向的变化

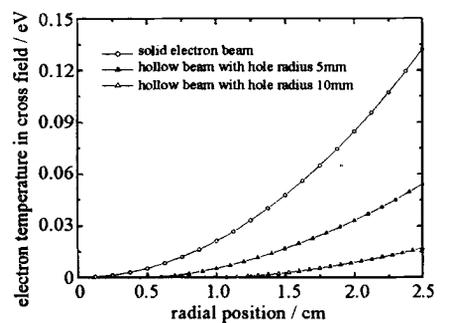


Fig. 4 Electron temperature variation in cross field as a function of electron beam radial position

图 4 交叉场中的电子温度随电子束径向的变化

图 2 表明,空心束的内径越大,空间电荷场对电子束的速度影响越小,即在相同径向位置处电子的相对速度偏离越小。由图 3 可以看出,电子在交叉场中产生的漂移速度随空心束内径的增加也呈减小的趋势。相应地,如图 4 所示,空心束内径愈大,由漂移速度引起的电子在交叉场中的温度增加愈小。当空心束的内径为 5mm 时,在电子束边缘处 ($r = 2.5\text{cm}$),温度增加值为同样情况下实心束温度增加值的 40%;而当空心束的内径增加至 10mm 时,电子束边缘处温度的增加值为此时实心束的 13%。总之,空心电子束在降低强流电子束空间电荷效应方面的作用是明显的。电子束空间电荷作用的降低,有利于提高电子冷却的效率。值得说明的是,不能无限制地增大空心电子束的内径,因为这样会降低电子束的流强,反而影响冷却效率的提高,所以在实际的冷却器运行中,通常必须综合考虑这两方面的效应。

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] 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)

- [3] 杨晓东, Parkhomchuk V V. HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置参数优化[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6):771—775. (Yang X D, Parkhomchuk V V. Parameters optimization of HIRFL-CSR experiment ring electron cooling device. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(6):771—775)
- [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] Bosser J. Electron cooling[A]. CAS CERN accelerator school, fifth advanced accelerator physics course[C]. CERN95-06, 1995. 673—730.
- [6] Meshkov I N. Physics and technique of electron cooling[R]. RIKEN-AP-AC-2, 1997.
- [7] Buble A, Goncharov A, et al. The electron gun with variable beam profile for optimization of electron cooling[A]. Proc of EPAC[C]. Paris: 2002. 1356.
- [8] Yang X D, Parkhomchuk V, Zhao H W, et al. Progress of HIRFL-CSR electron cooling device of main ring[R]. IMP & NL HIAL Annual Report, 2002.
- [9] 夏国兴, 夏佳文, 杨建成, 等. 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[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5):505—508. (Xia G X, Xia J W, Yang J C, et al. Studies of electron beam temperature rise due to space charge effect of intense electron beam in CSR e-cooler system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5):505—508)

Characteristic studies on hollow electron beam in HIRFL-CSR e-cooler system

XIA Guo-xing^{1,2}, XIA Jia-wen^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, YANG Jia-cheng^{1,2}, WU Jun-xia^{1,2},
YIN Xue-jun^{1,2}, ZHAO Hong-wei^{1,2}, WEI Bao-wen^{1,2}

(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: Cooling force in electron cooling system is closely related to the temperature of electron beam. The velocity of electron has the offset due to space charge of intense electron beam. In order to minimize this effect, a new type of electron gun to produce the hollow electron beam is firstly adopted in HIRFL-CSR e-cooler project. The hot ion beam is cooled by Coulomb interaction with intense and cold hollow electron beams. By analysis of space charge effect of solid and hollow electron beam respectively, the impact on the electron velocity and additional temperature due to the space charge field are preliminarily investigated.

Key words: Electron cooling; Space charge field; Hollow electron beam