

CSR 实验环电子冷却装置的纵向电子束温度*

冒立军^{1,2;1)} 杨晓东¹ 夏佳文¹ 魏宝文¹

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 100049)

摘要 电子冷却装置中,电子束纵向温度是计算冷却力的主要参量之一.当电子与被冷却离子的相对速度很小时,纵向冷却力与离子速度呈线性关系,并且线性区域的宽度与电子束纵向温度有关.通过分析影响电子束纵向温度的主要因素,得到了兰州重离子冷却储存环实验环(CSRe)电子冷却装置中电子束纵向温度的大小.

关键词 电子冷却 纵向温度 空间电荷效应 束内散射

1 引言

电子冷却是 G.Budker 于 1966 年提出的提高重离子束流品质的方法^[1], 通过以相同平均速度运动的离子束与高单色性、准直性的强流电子束之间的库仑碰撞, 将离子束的横向振荡与纵向振荡能量转移到电子束, 从而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. 冷却理论表明^[2], 当离子速度 $v_i < \Delta_P$ 时, 纵向冷却力与离子速度呈线性关系, 而在 $\Delta_P < v_i < \Delta_\perp$ 区域内近似为常数, 其中 Δ_P , Δ_\perp 分别为电子束的纵向和横向速度分量, v_i 为离子速度. 温度是衡量粒子速度分散的物理量^[3], 可见, 电子束纵向温度是计算冷却力的主要参量之一.

造成纵向温度变化的主要因素包括: 静电加速、阴极电压纹波、电子束的空间电荷效应、电子在磁场中的运动以及束内散射效应. 本文通过分析和计算以上因素造成的电子束纵向温度变化, 得到了 CSRe 300keV 电子冷却装置在典型参数值下(表 1)的电子束纵向温度.

表 1 CSRe 电子冷却装置参数

能量	电流强度	阴极温度	内径	外径
300keV	3A	0.1eV	10mm	25mm

2 纵向电子束温度

2.1 静电加速引起的拉平分布效应

为了达到冷却目的, 电子束在电子枪内需被静电加速至与离子具有相同的平均速度, 由此造成电子束纵向温度减小, 在相空间内呈扁平 Maxwell 分布, 即电子束的拉平分布效应^[4].

在电子枪阴极出口, 电子的温度等于阴极温度:

$$kT = \frac{1}{2}k(T_p + T_\perp) = kT_{\text{cathode}}. \quad (1)$$

初始动能为 W_{init} 的电子, 经过电压 U 加速之后, 纵向动能转变为

$$W_0 = W_{\text{init}} + e \cdot U, \quad (2)$$

忽略加速电压的纹波, 则电子束的纵向动能分布宽度为

$$\Delta W_0 = \Delta W_{\text{init}} = kT_{\text{cathode}}, \quad (3)$$

电子束的纵向温度为

$$kT_p = m_e \beta^2 c^2 \left(\frac{\Delta p}{p_0} \right), \quad (4)$$

而 $\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\Delta W}{W_0}$, 则加速之后电子的纵向温度可以表示为

$$kT_p = \frac{1}{(\gamma+1)} \frac{(kT_{\text{cathode}})^2}{W_0}. \quad (5)$$

由式(5)可见, 电子束能量越高, 纵向温度越低. 对应于表1中的参数, 静电加速使得电子束纵向温度减小为 $1.29 \times 10^{-8} \text{eV}$.

* 国家杰出青年基金(10325522)资助
1) E-mail: maolijun@impcas.ac.cn

2.2 阴极电压纹波引起的电子束纵向温度

电子枪的阴极直接连接在高压电源上, 电压纹波 δU 引起的电子束纵向能量的分布宽度为

$$\delta E_e = e\delta U, \quad (6)$$

对应的纵向温度为

$$kT_p = \frac{1}{(\gamma+1)} \frac{(\delta E_e)^2}{E_e} = \frac{E_e}{(\gamma+1)} \left(\frac{\delta U}{U} \right)^2. \quad (7)$$

CSR 实验环电子冷却装置阴极高压电源测试结果为 $\frac{\delta U}{U} = 10^{-5}$, 因此纹波引起的电子束纵向温度为 $1.16 \times 10^{-5} \text{eV}$.

2.3 空间电荷效应引起的电子束纵向温度

为了减小电子束空间电荷场造成的离子与电子的不稳定性, 降低离子俘获电子所产生的离子损失^[5], CSR 电子冷却装置采用了特殊设计的电子枪, 能够产生空心电子束冷却离子束流。

设电子束空心部分的半径为 r_0 , 电子束半径为 a , 真空室半径为 b , 空心电子束的密度为 n_e , 且在区域内均匀分布. 以真空室管壁为零电位, 由高斯定理得到电子束内任一点处与束流中心位置处的电势差为:

$$\Delta\varphi(r) = \frac{e \cdot n_e}{4\epsilon_0} \left[r^2 - r_0^2 \left(1 + 2\ln \frac{r}{r_0} \right) \right] \quad (r_0 \leq r \leq a). \quad (8)$$

不考虑电子枪加速电压造成的速度分散, 则由空间电荷电势造成的电子束纵向温度的增加值为

$$kT_1 = \frac{1}{(\gamma+1)W_0} \left(\frac{eI}{4\pi\epsilon_0\beta c} \right)^2 \frac{1}{(\alpha^2 - r_0^2)^2} \times [r^2 - r_0^2(1 + 2\ln \frac{r}{r_0})]^2 (\text{eV}) \quad r_0 \leq r \leq \alpha. \quad (9)$$

计算空心电子束在不同内径下的纵向温度, 如图1所示. 可以看出, 空心电子束内, 电子纵向温度随着半径的增大而增大, 空心电子束内径越大, 由空间电荷效应引起的最外层电子纵向温度的增加值越小, 因此, 采用空心电子束的设计, 可以减小电子束的纵向温度. 表1参数下最外层电子束纵向温度约为 $7.3 \times 10^{-3} \text{eV}$.

一般模式下^[6], CSR 电子冷却装置处的包络函数为 $12.5/16\text{m}$, 色散为0, 对应于发射度为 $15\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 的情况, 其束流半径约为 15.5mm , IUCF 冷却装置的测量表明^[7], 通过准值调节, 可以忽略离子与电子之间的束轴夹角, 根据(9)式的计算结果, 在 $r = 16\text{mm}$ 处电子束的纵向温度为 $2.4 \times 10^{-4} \text{eV}$.

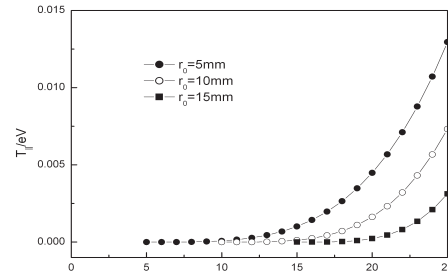


图1 不同内径下的电子束纵向温度

2.4 电子束内散射引起的纵向温度

2.4.1 横-纵松弛

拉平分布效应导致电子束的纵向温度远小于横向温度, 在这种情况下, 电子之间的多次库仑散射(即束内散射)将使得电子束的纵向与横向温度趋于平衡, 纵向温度增加, 称为横-纵松弛^[8].

不存在外部磁场的条件下, 横-纵松弛引起的纵向温度随电子束通过的距离递增:

$$\frac{d(kT_p)}{dz} = \frac{0.87\pi e^2 L_e}{(4\pi\epsilon)^2 c E_e} \sqrt{\frac{m_e c^2}{kT_\perp}} J_e, \quad (10)$$

J_e 为电子电流密度.

在有纵向螺线管磁场存在的条件下, 当磁场足够强, 使得电子之间的平均距离大于电子围绕纵向磁力线的回旋半径时

$$s_e[\text{m}] = \left[\frac{e\pi(\alpha^2 - r_0^2)\beta c}{1[\text{A}]} \right]^{\frac{1}{3}} \geq r_L[\text{m}] = 3.372 \times 10^2 \frac{\sqrt{kT_\perp[\text{eV}]}}{B[\text{T}]} \quad (11)$$

横-纵松弛被抑制. 根据计算, 在表1参数值下, 当电子束的横向温度为 0.2eV ^[9], 上述条件要求纵向螺线管磁场 $8.1 \times 10^{-2} \text{T}$, 而 CSR 实验环电子冷却装置的纵向螺线管磁场设定在 $0.12\text{—}0.5\text{T}$ 之间, 因此横-纵松弛被抑制.

2.4.2 纵-纵松弛

电子束传输过程中, 电子间的静电排斥引起电子的相对运动, 静电势能转变成纵向动能, 导致电子束纵向温度增加, 增加量约等于电子之间的平均静电势能^[6]:

$$\Delta(kT_p) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon} \frac{1}{s} = \frac{e}{4\pi\epsilon} \left[\frac{e\pi(\alpha^2 - r_0^2)\beta c}{I} \right]^{-\frac{1}{3}} (\text{eV}), \quad (12)$$

纵-纵松弛弛豫时间等于电子等离子体的振荡周期:

$$\tau = \pi \sqrt{\frac{e}{r_e c} \frac{(a^2 - r_0^2) \beta}{I}} \approx 1.365 \times 10^{-6} \sqrt{\frac{(a^2 - r_0^2) \beta}{I}} (s). \quad (13)$$

当电子束传输时间大于弛豫时间时, 纵-纵松弛产生的纵向温度达到平衡.

在 CSR 实验环电子冷却装置电子枪内, 电子束在螺线管中运动的时间约为 6.0×10^{-8} s, 而其纵-纵松弛弛豫时间为 1.59×10^{-8} s, 所以电子束最终的纵向温度等于

$$kT_p = \frac{1}{(\gamma + 1)} \frac{(kT_{\text{cathode}})^2}{W_0} + \frac{e}{4\pi\epsilon} \left[\frac{e\pi(a^2 - r_0^2)\beta c}{I} \right]^{-\frac{1}{3}} \approx 7.69 \times 10^{-5} \text{eV}. \quad (14)$$

3 结论

介绍了纵向温度与冷却力的关系, 分析了导致纵向温度变化的主要因素. 归纳起来, 在 CSR 实验环电子冷却装置上, 对应于表1的典型电子束, 阴极高压电源纹波引起的纵向温度为 1.16×10^{-5} eV, 电子束空间电荷效应产生的纵向温度约为 2.4×10^{-4} eV, 横-纵松弛被抑制, 纵-纵松弛导致的纵向温度为 7.69×10^{-5} eV, 在冷却段入口处, 总的电子束纵向温度不超过 3.3×10^{-4} eV, 主要由电子束的空间电荷效应引起. 根据式(9)可以看出, 由空间电荷效应引起的电子束纵向温度与电子束半径的平方近似成正比. 当冷却作用开始进行后, 被冷却的离子束迅速收敛于电子束的中央^[7], 因此可以推断, 与离子束相互作用的电子束纵向温度要低得多.

参考文献(References)

- 1 Budker G. Atomic Energy [Sov. J. At. Energy], 1967, **22**: 346
- 2 Poth H. Physics Reports, 1990, **196**(3-4): 135—297
- 3 Bossler J. CERN Report, 1992, **92-01**: 147
- 4 Derbenev Y, Meshkov I. CERN Report, 1977, **77-03**: 10
- 5 XIA G X, XIA J W, YANG J C et al. Nuclear Instr. & Methods, 2003, **A508**: 239
- 6 XIA J W, ZHAN W L, WEI B W et al. Nuclear Instr. & Methods, 2002, **A488**: 11
- 7 Ellison T et al. IUCF Annual Report 1987
- 8 Dikansky N S, Kudelainen V I, Lebedev V A et al. Preprint INP 88-61, Novosibirsk, 1988
- 9 RAO Yi-Nong et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1996, **20**(4): 369(in Chinese)
(饶亦农等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(4): 369)

Electron Beam Longitudinal Temperature of Electron Cooler on the CSR^{*}

MAO Li-Jun^{1,2;1)} YANG Xiao-Dong¹ XIA Jia-Wen¹ WEI Bao-Wen¹

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

2(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Electron beam longitudinal temperature is an important parameter on electron cooling devise. In this paper, electron beam longitudinal temperature on the HIRFL-CSR electron cooling devise is deduced from four important factors—flattened distribution, electrostatic accelerate, space charge effect and beam scattering.

Key words electron cooling, longitudinal temperature, space charge effect, beam scattering

^{*}Supported by National Natural Science Funds for Distinguished Yong Scholar (10325522)

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