

HIRFL-CSR 电子冷却系统

饶亦农 夏佳文 原有进 魏宝文
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 建议中的兰州重离子加速器冷却贮存环(HIRFL-CSR)拟采用电子冷却方法将重离子束冷却到300MeV/u. 最高电子能量为165keV, 最大电子电流密度为0.244A/cm². 叙述了CSR电子冷却装置的初步方案.

关键词 电子冷却 皮尔斯电极 共振聚焦 收集器

1 引言

电子冷却是一个能够快速压缩带电粒子束的相空间,从而增大束流相空间密度的方法^[1]. 近十年内,电子冷却方法已经成功地应用在九个轻、重离子贮存环上,冷却之后的束流发射度与动量散度都减小一至二个数量级. 电子冷却技术的应用使得高分辨率的内靶实验能够实现,而且,它为原子物理的实验研究提供了理想的条件. 冷却贮存环已经成为国际上加速器技术发展的一个方向. 正是在这种形势下,提出了HIRFL-CSR的初步方案^[2]. HIRFL-CSR采用电子冷却方法可将重离子束冷却到300MeV/u,为此,要求最高电子能量达到165keV.

2 CSR 电子冷却物理参数

电子冷却系统的设计,关键是要确定束流冷却时间. 冷却时间^[3]近似表示为

$$\tau = \frac{2}{\pi \sqrt{2\pi}} \frac{e\gamma_0^2\beta_0}{\eta r_e r_p L_c J_e} \left(\frac{kT_e}{m_e c^2}\right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, β_0, γ_0 为相对论因子, r_e, r_p 分别为电子、质子的经典半径, L_c 为库仑对数, η 为冷却段长度与环周长之比, J_e 为电子电流密度.

根据(1)式和CSR总体指标^[2],对CSR提出如下考虑:(1)将离子束冷却到300MeV/u的能量上限,速度匹配要求电子最高能量达到165keV. (2)在冷却段,离子束必须被包围在电子束之内,于是 $\epsilon_h \beta_h(\text{cooler}) \leq$

r_0^2 ,其中 $\beta_h(\text{cooler})$ 为冷却段的包络函数. 考虑到多圈注入到环中的束流发射度比较大,如果 $\epsilon_h = 100\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$, $\beta_h(\text{cooler}) = 6.0$,那么 $r_0 \geq 2.4 \text{cm}$,因此,电子枪阴极直径定为5cm. 基于以上考虑,表1列出了电子冷却系统的物理参数.

表1 HIRFL-CSR 电子冷却系统物理参数

参数名称	参数指标
最高电子能量	165keV
最大电子电流	4.8A
电子枪设计	Pierce 电极+共振聚焦电极
阴极/电子束直径	5 cm
最大电子电流密度	0.244 A/cm ²
电子枪导流系数	$1.1 \times 10^{-6} \text{AV}^{-3/2}$
最高螺线管磁场	$2 \times 10^{-1} \text{T}$
横向磁场误差	$\pm 2 \times 10^{-4}$
横向电子束温度	$\leq 0.3 \text{eV}$
冷却段长度	3.0 m
弯曲螺线管偏转角	45°
收集器收集效率	99.99%
高压电源稳定性	$\pm 1 \times 10^{-5}$

采用上述电子冷却方案,将一组典型参数: $\gamma = 1.32, \beta = 0.65, L_c = 10, \eta = 0.027, J_e = 0.20 \text{A/cm}^2$ 及 $T_e = 0.2 \text{eV}$ 代入(1)式计算,可得到束流冷却时间约为1s. 并且,当CSR累积的离子数达到 10^8ppp 的量级,经过冷却之后,离子的束内散射与冷却达到平衡,这时束流包络 $\leq 2 \text{mm}$,动量分散约 10^{-5} .

3 CSR 电子冷却装置

冷却装置采用 U 形结构(见图1),垂直安装在环的一个长直线段上. 主要部件有电子枪, 加速管, 两个 45° 弯曲螺线管(toroid), 减速管和电子收集装置, 所有这些设备都处在螺线管(solenoid)轴线上. 环形阳极将电子从枪阴极表面吸出, 经加速管进一步加速到额定能量, 电子束进入接地的漂移管, 然后由第一个弯曲螺线管偏转 45° 进入冷却段, 再经第二个弯曲螺线管向上偏转 45° 进入减速管, 减速到几个 keV, 最后经收集器收集.

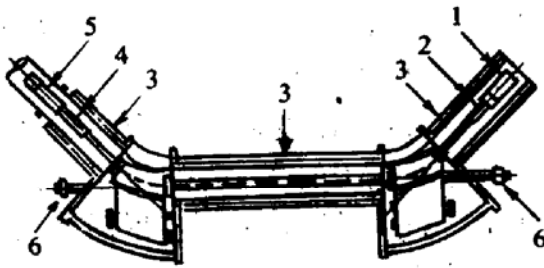


图1 HIRFL-CSR 电子冷却装置示意图

1. 电子枪 2. 加速管 3. 螺线管
4. 减速管 5. 收集器 6. 校正二极磁铁

3.1 电子枪

电子枪的光学结构由皮尔斯电极和共振

聚焦电极组成, 这样加速电场横向分量造成横向电子温度最低^[5]. 选扁平式阴极, 直径为 5cm, 枪导流系数为 $1.1\mu\text{p}$. 阴极安在圆柱对称的皮尔斯电极内, 处在枪螺线管轴线上. 加速管长 34.1cm. 整个电极结构密封在一真空容器内, 容器用一法兰连接和由一根陶瓷柱支撑, 从容器尾部馈入高压引线. 枪系统周围维持 2 个大气压的 SF_6 气体, 防止电晕放电.

3.2 收集装置

收集装置的作用是高效率地收集电子. 电子束经过减速后进入收集器. 收集器处在下降的螺线管磁场中, 电子束受该散焦透镜作用沿磁力线方向散开, 从而避免收集器表面局部热负载过高. 在收集器区域安装两个垫补螺线管, 以形成磁镜场, 阻止次级电子向后散射进入漂移节.

CSR 收集装置的光学结构设计成与电子枪镜象对称. 减速后电子能量取决于收集器阳极电位, 为几百 eV. 收集器采用法拉第筒式, 内径和深度分别为 15cm 和 31cm. 整个收集器通过 15 个横截面积为 0.6cm^2 的冷却水通道进行冷却, 总的水流率为 40 l/min. 收集装置用真空容器密封, 从末端通入冷却水管, 整个容器用一根陶瓷柱支撑. 容器周围维持 2 个大气压的 SF_6 气体.

表2 CSR 冷却装置磁场线圈

名称	数量	长度/直径	最高场(T)	功能
电子枪螺线管	1	1.4m/0.35m	$B_1=2\times 10^{-1}$	形成枪区导向场
冷却段螺线管	1	3.0m/0.35m	$B_1=2\times 10^{-1}$	形成冷却段导向场
收集器螺线管	1	1.0m/0.35m	$B_1=2\times 10^{-1}$	形成收集器导向场
45°弯曲螺线管	2		$B_1=2\times 10^{-1}$	引导电子进出冷却段
弯曲螺线管导向线圈	2		$B_h=5\times 10^{-3}$	补偿离心力
准直线圈	6		$B_h, B_o=5\times 10^{-3}$	微调束轴
枪区校正线圈	3		$B_1=2\times 10^{-3}$	微调枪区纵向场
收集器校正线圈	2		$B_1=5\times 10^{-2}$	调节磁镜场
过渡线圈	8		$B_1=5\times 10^{-3}$	匹配过渡区

3.3 磁场系统

螺线管磁场的作用是将电子从电子枪引导到收集器, 并将电子的横向运动转变成围绕磁力线的回旋运动, 以抑制电子之间的相

互排斥造成的束流膨胀. CSR 冷却装置的电子导向线圈列于表2中.

所有线圈用 15mm 厚的软钢覆盖, 以形成磁通回路并屏蔽外部杂散场影响. 冷却装置

两端对称放置两个导向二极磁铁,用以补偿弯曲螺线管引起的水平和垂直两方向离子轨道畸变.对磁场精度的要求是:沿着电子轨道, $\Delta B_{\perp}/B_0$ 应达到 $\pm 2 \times 10^{-4}$.

3.4 真空系统

贮存环的工作性质要求超高真空条件($6.65 \times 10^{-8} \sim 6.65 \times 10^{-9}$ Pa),冷却装置的真空系统同样要达到这样的要求.

CSR 冷却装置的主泵由四组 NEG 泵组成,分别置于弯曲螺线管腔内和两个漂移节内(见图1).另外,冷却装置两侧各装一台泵,用于真空系统烘烤过程中的粗抽.

真空腔内所有部件包括漂移管、电子位置监测器和电子微波辐射收集天线等,都被缠上灯丝套在 250°C 的温度下烘烤.系统经烘烤后,静态真空度应达到 1.33×10^{-9} Pa.

3.5 高压系统

冷却装置要求高压系统具有稳定度,因为电子束的纵向温度与加速电压的纹波有关.初始能量为 KT_{cath} 的电子加速到 E_0 之后,纵向温度为

$$KT_{\text{ell}} \simeq \left(\frac{\Delta U}{U_{\text{cath}}} \frac{KT_{\text{cath}}}{E_0} \right)^2 \frac{m_e \beta_0^2 c^2}{4}$$

若 $T_{\text{cath}} = 1000^{\circ}\text{K}$, $E_0 = 150\text{keV}$,对应 $KT_{\text{cath}}/E_0 \simeq 1.0 \times 10^{-5}$,则高压电源稳定度 $\Delta U/U_{\text{cath}}$ 应达到同样量级,即 $\Delta U/U_{\text{cath}} \sim 10^{-5}$.

CSR 冷却装置的高压系统包括:一台高压电源(HVPS)(-165kV , 10mA)、一台电子枪阳极电源、一台收集器阳极电源、一台收集器电源和一台阴极加热电源.高压电源(-165kV , 10mA)的稳定度达到 $\pm 1 \times 10^{-5}$.电子枪和收集器电源放在 165kV 的高压平台上,用隔离变压器供电.

3.6 诊断系统

为优化电子冷却,须对电子束进行有效的诊断,包括对:束轴的位置 $h(s)$ 与 $V(s)$ 、电子密度分布 $n_e(r)$ 、电子速度分布 $v_{e0}(r)$ 和电子温度 $T_{e\perp}$ 与 $T_{e\parallel}$ 等进行测量.

电子束的位置用一个精度为 1mm 的静电监测器进行测量,测量时要求调变电流大小.在试验阶段,还可采用拦截方法:用一个沿螺线管轴线移动的闪烁屏跟踪小股电子束($\sim 0.5\text{mm}$),电子打在屏上发出的光可用一个准直望远镜观察;电子密度分布采用十字叉丝扫描进行测量;电子绕磁力线作回旋运动会发出微波辐射,通过安装在漂移管内的一根天线接收微波辐射谱,测出电子的辐射功率,辐射功率跟电子横向运动平均动能成正比;电子束的纵向温度以及电子的速度分布可通过激光与电子的Thompson散射效应来进行测量.通过测量并分析出射激光光谱的宽度和中心波长,就可以确定电子束的绝对能量和纵向速度分布,从而求出纵向温度.由于激光束的直径很小,只要在电子束的不同径向位置进行测谱和分析,那么电子的径向速度分布也能获得.

参 考 文 献

- 1 Cole F T, Mills F E. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1981, 131:295
- 2 夏佳文等.核物理动态, 1993, 10(3):69
- 3 Bell J S, et al. Part. Acce., 1981, 11:233
- 4 Tanabe T, et al. INS-T-454
- 5 Kudelainen V I, et al. Sov. Phys.-Tech. Phys., 1972, 16:1821

HIRFL-CSR Electron Cooling System

Rao Yinong Xia Jiawen Yuan Youjin Wei Baowen

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

Abstract Electron cooling technique will be applied to the proposed (下转第51页)

(上接第18页)

Lanzhou heavy ion cooler-storage ring (HIRFL-CSR). A electron cooling device with a maximum electron energy of 165keV and maximum current density of 0.244A/cm² is planned to cool heavy ions up to energies of 300MeV/u. The preliminary design for the cooling system is presented.

Key Words electron cooling Pierce electrode resonant focusing collector