

文章编号: 1007-4627(2005)02-0186-04

HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置调试*

卢旺¹, 杨晓东¹, 李杰¹, 冒立军^{1,3}, 王志学¹, 赵红卫¹, 燕宏斌¹, 张玮¹,
张军辉¹, V. V. Parkhomchuk², BINP Electron Cooler Group²

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 俄罗斯科学院核物理研究所, 俄罗斯 新西伯利亚 630090;

3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置采用了能够产生空心电子束的电子枪, 弯曲螺线管内采用了静电偏转电极, 冷却段采用了独立的高精度螺线管串联产生纵向磁场的设计。测量了沿离子束运动方向冷却段磁场分布及磁场平行度、电子枪和收集器性能、300 kV 高压电源相关参数。结果表明, 此装置达到了预期的设计目标。

关键词: 空心电子束; 磁场平行度; 高压发生器

中图分类号: TL56 **文献标识码:** A

1 引言

正在建造中的兰州重离子加速器电子冷却储存环(HIRFL-CSR)^[1]由主环(CSRm)和实验环(CSRe)组成, 每个环有一个用于改善束流品质的电子冷却装置。对于 HIRFL-CSRe, 电子冷却装置的作用是减小因内靶实验而导致的离子束在横向和纵向的膨胀, 为获取高精度、高分辨率的离子束重复打靶提供实验条件。

HIRFL-CSRe 电子冷却装置的主要参数见表 1。

表 1 HIRFL-CSRe 电子冷却装置主要参数

参数名称	参数指标
离子能量/(MeV·u ⁻¹)	10-450
电子能量/keV	5.5-300
最大电子流强/A	3.0
电子枪阴极半径/cm	1.25
β 函数/m	12.5, 16, 10
冷却段长度/m	4.0
冷却段磁感应强度/T	0.05-0.15
收集器磁感应强度/T	0.05-0.12
电子枪磁感应强度/T	0.05-0.5
真空度/Pa	4×10^{-9}

电子冷却装置作为 HIRFL-CSR 的关键设备之一, 其结构和性能也一直在不断改善, 但其中存在着三个比较突出的问题^[2]。针对这些问题, 在 HIRFL-CSR 电子冷却装置上首次设计并采用了能够产生空心电子束的特殊电子枪阴极, 弯曲螺线管内采用了静电偏转电极, 冷却段采用了独立的高精度螺线管设计。

2 装置结构及磁场测量

HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置包括电子枪、加速段、冷却段、减速段和收集器, 这些元件放置在由电子枪直螺线管、电子枪端弯曲螺线管、冷却段直螺线管、收集器端弯曲螺线管和收集器直螺线管产生的磁场中。图 1 给出了 HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置结构图。

HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置的冷却段磁场设计采用了一种新型的结构, 利用 68 个独立的线圈串联产生纵向磁场, 通过独立调节每个线圈相对于装置几何中心的角度, 获得很高的磁场平行度。冷却段磁场测量^[3]采用了霍尔片测磁和磁针测

收稿日期: 2004-10-12; 修改日期: 2004-10-26

* 基金项目: 国家重大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环资助项目

作者简介: 卢旺(1981-), 男(汉族), 重庆合川人, 本科, 从事加速器物理及电子冷却技术研究;

E-mail: Luwang@impcas.ac.cn

磁两种方法。测量过程中, 由于冷却段螺线管工作在励磁曲线的线性区域内, 故将所有线圈的电流值

均设定为其额定电流值的一半进行测量。图 2(a)为霍尔片测量结果, 图 2(b)为磁针测量计算结果。

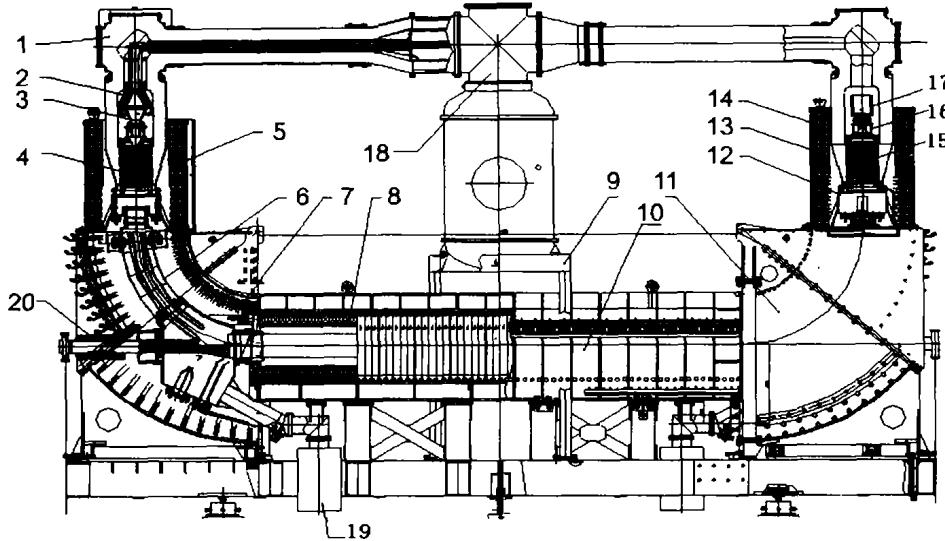


图 1 HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置结构图

1 SF6 气体室, 2 收集器磁屏蔽, 3 收集器, 4 减速管, 5 收集器端直螺线管, 6 静电偏转板, 7 弯曲螺线管, 8 冷却段直螺线管, 9 支架, 10 冷却段磁屏蔽, 11 弯曲段磁屏蔽, 12 钛升华泵, 13 电子枪端直螺线管磁屏蔽, 14 电子枪端直螺线管, 15 加速管, 16 电子枪, 17 电子枪磁屏蔽, 18 300 kV 高压电源, 19 溅射离子泵, 20 校正二极铁。

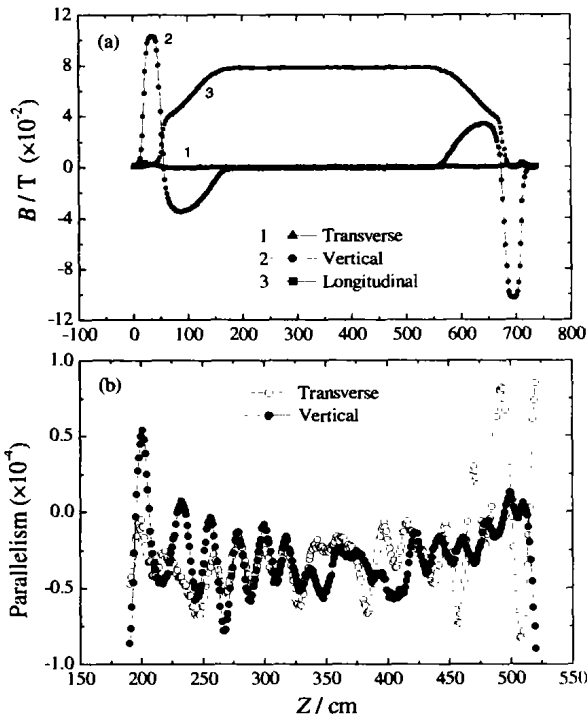


图 2 冷却段磁场分布及磁场平行度

(a) 冷却段磁场分布, (b) 冷却段磁场平行度。

从图 2(a)可以看出, 在长约 3.6 m 的冷却段好场区, 纵向磁场约为 0.078 T, 而横向磁场接近于 0。从图 2(b)可以看出, 水平方向与垂直方向的磁场平行度均好于 1×10^{-4} 的设计要求。

计算了冷却段从 $z=183$ cm 到 $z=542$ cm 处约 3.6 m 长的有效冷却区域内磁力线相对于几何中心的横向角度均方根值, 水平方向的均方根偏差为 3.298×10^{-5} , 垂直方向的均方根偏差为 2.458×10^{-5} 。

3 静电偏转电极

静电偏转电极位于弯曲螺线管内, 弯曲螺线管的半径为 1 m, 两个弧形电极之间的距离为 0.07 m, 等距离位于弯曲螺线管中心, 当施加极性相反的电压时产生径向电场。

传统的电子冷却装置采用磁场偏转电子, 而线圈产生的磁场不可能完全满足不同半径上电子的偏转要求, 而且相反方向轨迹的偏转方向相反, 因而磁场偏转导致了电子束收集效率降低。采用静电场避免了这个问题, 初级电子可以全部被收集, 降低了电子束的损失。从收集器反射回来的二次电子一方面会在电子束中产生噪音和不稳定性, 另一方面这些电子轰击到真空室壁上会降低真空度。采用静电偏转将使这些电子沿原来的路径运动最终进入收集器, 不会轰击到真空室壁, 从而消除了反射电子对真空的影响。

4 电子枪与收集器性能

电子枪由氧化物阴极、成形极、控制电极、阳极以及引出极组成。成形极与阴极等电位，用于抑制阴极侧面的电子发射。控制电极离阴极边缘很近，用于调节电子束的大小及密度分布，施加给它的电位强烈影响着电子的发射。阳极决定电子束的引出流强。引出极决定电子束的最终能量。通过调节控制电极电压和极性可以获得从圆形平面实心束到中心区域电子密度远低于边缘区域的空心束。衡量电子枪性能的主要参数为导流系数 ρ ，它表征电子枪给出电子流的能力、电子流中空间电荷作用的程度以及电子枪的结构特点与尺寸。图 3 给出了 HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置电子枪电流与控制电极电压的依赖关系，图 4 给出了电子枪导流系数与控制电极电压和阳极电压之比的依赖关系。

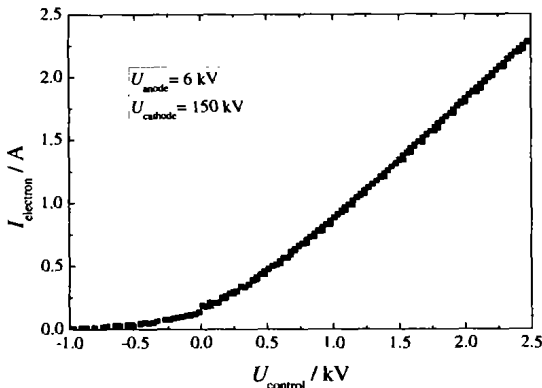


图 3 电子枪电流与控制电极电压的依赖关系

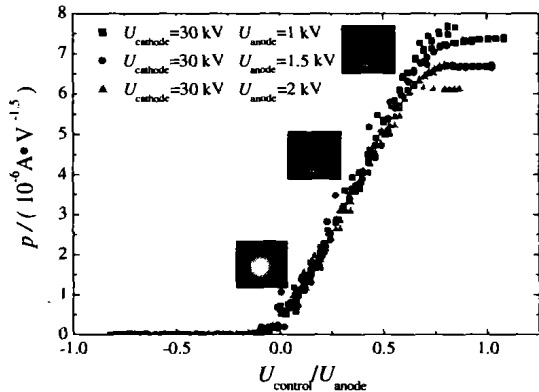


图 4 电子枪导流系数与控制电极电压和阳极电压之比的依赖关系

空心电子束一方面避免了由于离子电子重组造成的离子束流损失^[4]，另一方面减小了电子束空间电荷场对电子和离子造成的不稳定性。除此之外，由于空心电子束的空间电荷场大大降低，使其对电

子的横向加热减小，从而降低了冷却时间，提高了冷却效率。

收集器由收集杯、抑制电极和阳极组成。抑制电极的作用是抑制由初级电子轰击收集杯产生的二次电子逃逸出收集杯。通过测量电流损失率来衡量收集器的性能。图 5 给出了电子能量分别为 150 和 50 keV 时，电流损失率与电子束流强之间的依赖关系。

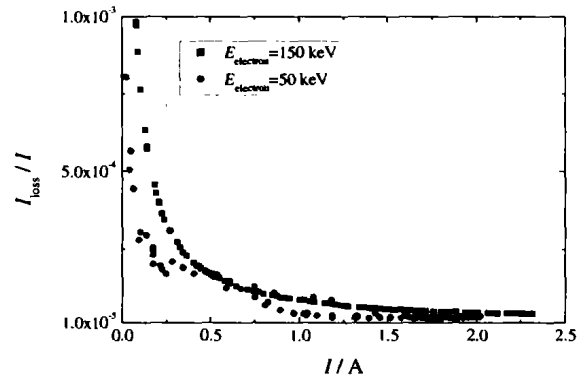


图 5 电流损失率随电子束流强的依赖关系

5 高压电源系统

高压电源系统即充有高压绝缘介质的高压发生器。高压发生器通过电容耦合和特殊的滤波电路来获得负高压，它由钢筒、高频电极、分压环、滤波电容和整流器等组成。在密封钢筒内，振荡器与高频电极相连，高频功率通过分压环与高频电极间的耦合电容输送到各个整流器。整流后，电子被输送到滤波电容上，并对它充电。HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置高压发生器共分为 16 节，每一节上的滤波电容均被充电，而各个滤波电容之间相互串

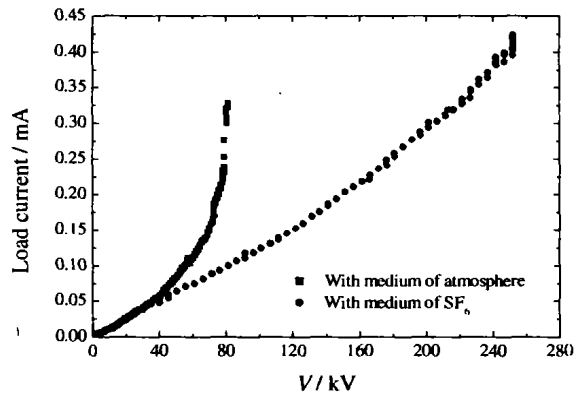


图 6 在不同介质下的高压电源测试

联，最终获得所需的负高压。所需耦合电容由间距

和介质的绝缘程度等因素决定。

在高压电源系统的测试过程中, 分别以空气和一定压强的 SF_6 气体为绝缘介质, 测试结果如图 6 所示。首先以空气为介质, $V_{\text{HV}} \approx 80 \text{ kV}$ 时负载电流显著上升。充入约 1.5 Pa 的 SF_6 气体后, $V_{\text{HV}} \approx 250 \text{ kV}$ 时负载电流显著上升。在进一步除去 SF_6 中的水蒸汽后高压可达到 300 kV 。

6 总结

HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置采用独立高

精度螺线管获得了平行度好于 10^{-4} 的冷却段纵向磁场; 弯曲螺线管内静电偏转电极的采用, 减小了电子束的损失, 抑制了电子束的不稳定性, 消除了二次电子对真空的影响; 采用密度可调的空心电子束, 减小了因离子电子重组导致的离子束流损失。高压电源测试中, 最高 $V_{\text{HV}} \approx 250 \text{ kV}$ 。测量了电子枪和收集器性能。通过以上调试, 表明该装置达到了预期设计的目标。

参 考 文 献:

- [1] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文等. 原子核物理评论, 2001, 18(1): 35.
- [2] 杨晓东, Parkhomchuk V V, 赵红卫等. 高能物理与核物理, 2003, 27(8): 726.
- [3] 冒立军, 杨晓东, 李 杰等. 强激光与粒子束, 2005, 17(6):
- [4] Bubley A, Goncharov A, Ivanov A, *et al.* Proceedings of EP-AC2002, Paris, France, 2002, 1 356.

Commission of HIRFL-CSR Electron Cooling Device*

LU Wang¹, YANG Xiao-dong¹, LI Jie¹, MAO Li-jun^{1,3}, WANG Zhi-xue¹,
ZHAO Hong-wei¹, YAN Hong-bin¹, ZHANG Wei¹, ZHANG Jun-hui¹,
V. V. Parkhomchuk², BINP Electron Cooler Group²

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

2 Budker Institute of Nuclear Physics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russian;

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In CSR electron cooling device, a special electron gun which can produce variable profile electron beam with different size and density distribution was adopted for decreasing ion losses. Electrostatic bending device was used for reducing electron beam losses and improving vacuum condition. The instability of the electron beam is suppressed because the secondary electrons from collector would come back to the collector in the same orbit finally. Longitudinal magnetic field with parallelism better than 10^{-4} was achieved by adopting of independent high precise solenoid coils at cooling section. In this case, the r. m. s deviations of the transverse magnetic field at cooling section in horizontal and vertical direction are 3.298×10^{-5} and 2.458×10^{-5} respectively. The characters of the gun and collector were investigated. The results were presented and indicate that it achieves the design purpose very well.

Key words: hollow electron beam; magnetic parallelism; high voltage generator

* Foundation item: National Important Project on Science(HIRFL-CSR)