

HIRFL-CSR 主环电子冷却装置调试*

杨晓东^{1;1)} V. V. Parkhomchuk² 赵红卫¹ 王志学¹

BINP Electron Cooler Group²

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (俄罗斯科学院核物理研究所(BINP) 新西伯利亚 630090)

摘要 介绍了在 HIRFL-CSR 主环电子冷却装置上首次设计的能够产生空心电子束的电子枪阴极。在弯曲螺线管内采用了静电偏转电极,冷却段采用了高磁场平行度螺线管设计。在 IMP 与 BINP 的合作下完成了电子冷却装置,测量了电子束剖面及密度分布、冷却段磁场平行度、电子枪和收集器的性能。实验验证了静电偏转电极的优越性,调试结果表明实现了预期的设计目标。

关键词 空心电子束 磁场平行度 静电偏转

1 引言

正在建造中的兰州重离子加速器电子冷却储存环^[1](HIRFL-CSR)由主环、实验环组成,主环用于离子束的累积、加速,实验环用于内靶实验,每个环有一个电子冷却装置。对于 HIRFL-CSR 主环,电子冷却装置的作用是减小注入离子束的发射度和动量分散,在最短的时间内累积尽可能多的离子。

电子冷却能够降低储存环中离子束的横向发射度和纵向动量分散,从而改善离子束的品质,为实验提供高性能的离子束。在过去三十多年中,电子冷却装置一直在发展、完善和提高性能。但其中存在3个比较突出的问题:第一,冷却后的离子处于电子束的中心,在这个区域电子与离子的相对能量非常小,离子俘获电子的截面很大,从而造成离子损失,不利于离子的累积^[2];第二,由于电子在弯曲螺线管内运动时产生横向漂移,通常采用磁场补偿漂移,对于相反方向运动的电子补偿磁场反而加大了这种漂移,造成电子的损失,增加了高压电源的负载;第三,冷却段磁场平行度影响冷却时间^[3]。针对这些不足之处,在 HIRFL-CSR 电子冷却装置上首次设计了能够产生空心电子束的电子枪阴极,弯曲螺线管内采用

了静电偏转电极,冷却段采用了高磁场平行度螺线管设计。

2 电子冷却装置结构及磁场测量结果

HIRFL-CSR 电子冷却装置^[4]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。HIRFL-CSR 主环电子冷却装置电子枪直螺线管由9个八边形线圈组成,施加1200A 电流可产生0.24T 磁场,可以将电子束绝热展开^[7]。电子枪端弯曲螺线管分为40°和50°两部分,40°弯曲螺线管由9个方形线圈等角度扇形排列组成,50°弯曲螺线管有11个矩形线圈等角度扇形排列组成,这两部分串联供电,施加780A 电流可产生0.15T 磁场。电子冷却装置冷却段长4m,由68个圆形线圈组成,施加200A 电流可产生0.15T 磁场。收集器端弯曲螺线管与电子枪端弯曲螺线管相同,收集器直螺线管由6个八边形线圈组成,与电子枪直螺线管共用电源,采用分流技术获得所需要的磁场。在每个直螺线管内有两对调节电子束方向的校正线圈。在弯曲螺线管

2002-10-28 收稿

* 国家重大科学工程基金资助(HIRFL-CSR 冷却储存环项目)

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

内,为了补偿离心漂移,有由 9 个线圈组成的偏转二极磁场. 图 1 为电子冷却装置结构图.

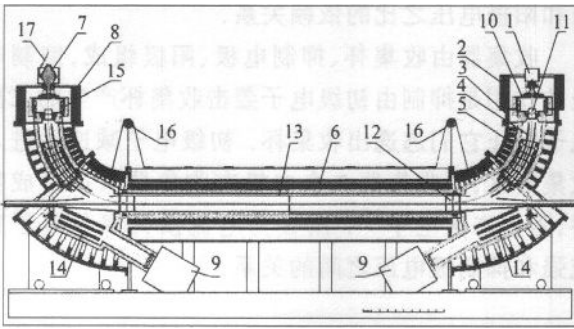


图 1 电子冷却装置结构图

1 电子枪,2 电子枪段螺线管,3 电子枪段过渡螺线管,4 静电偏转电极,5 弯曲螺线管,6 冷却段螺线管,7 收集器,8 收集器段螺线管,9 离子泵,10 补偿线圈,11 钛升华泵,12 束流位置探测器,13 真空室,14 钛升华泵,15 真空烘烤外套,16 连接轴,17 收集器冷却系统.

安装之前,测量每一个线圈的磁轴偏角^[5],初步调整线圈角度,使得每个线圈磁轴偏角小于 1×10^{-3} rad,线圈安装后,用磁针方法^[6]测量沿冷却段几何轴线坐标 Z 的磁场分布,根据这个结果,将线圈重新排列,利用磁场叠加原理,将磁轴偏角相反的线圈相邻放置,相互压缩部分横向分量,以获得最佳的磁场分布. 最后微调线圈的角度,测量冷却段几何轴线的磁场分布,反复多次,可获得磁场平行度好于 1×10^{-4} 的磁场.

图 2(a),(b)为线圈初次安装的磁力线相对于螺线管几何中心的角度,(a)为水平角度,(b)为垂直角度. 测量结果表明,在螺线管有效区域磁场平行度好于 1×10^{-3} 的磁场.(c),(d)为调整后的磁力线相对于螺线管几何中心的角度,调整后磁场平行度好于 5×10^{-5} ,在这种情况下,水平角度的均方根偏差为 7.838×10^{-6} ,垂直角度的均方根偏差为 8.044×10^{-6} . 这一结果是所有电子冷却装置中最好的结果.

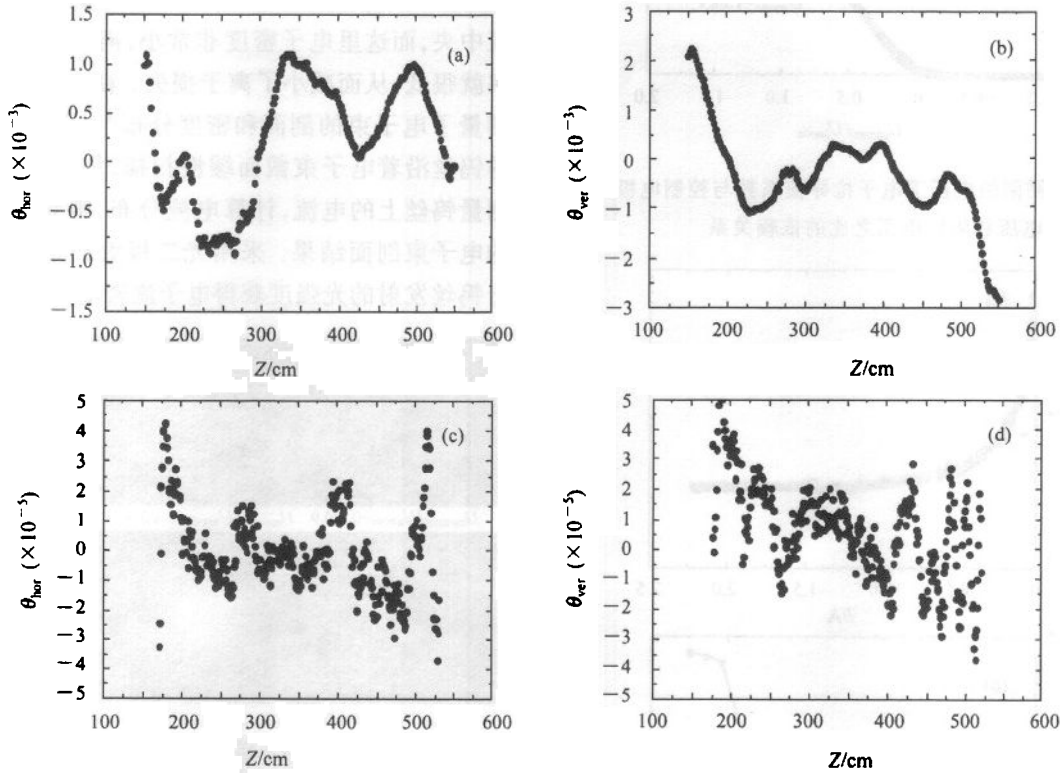


图 2 线圈初次安装(a),(b)和调整后的(c),(d)的磁力线相对于螺线管几何中心的角度

3 电子枪和收集器性能

电子枪由阴极、成形极、控制电极、阳极以及引出极组成. 成形极的作用是抑制阴极侧面的电子发射,控制电极离阴极边缘很近,施加到它的电位强烈

影响阴极发射的电子,用于调节电子束的大小及密度分布,阳极电压决定引出的电子束大小,引出极决定电子束的最终能量. 图 3 给出了电子束电流与控制电极电压的依赖关系. 电子枪导流系数 p 表征电子枪给出电流的能力,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,它把电子枪的几

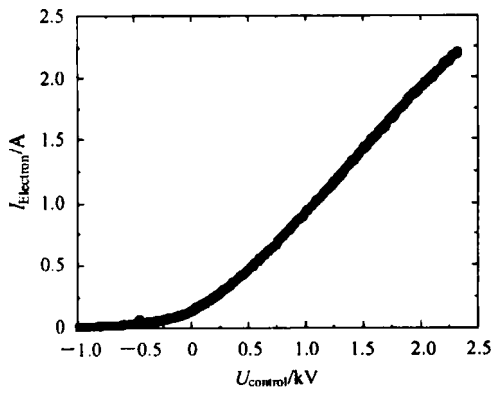


图 3 电子束电流与控制电极电压的依赖关系

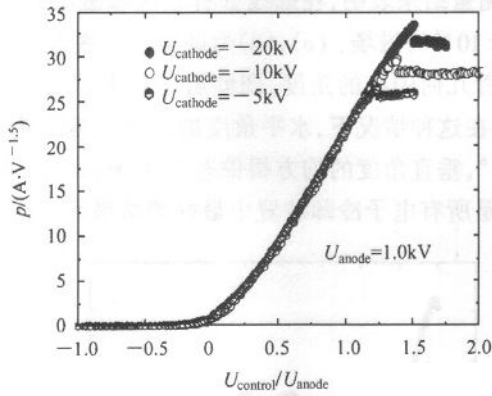


图 4 不同阴极电压下电子枪导流系数与控制电极电压和阳极电压之比的依赖关系

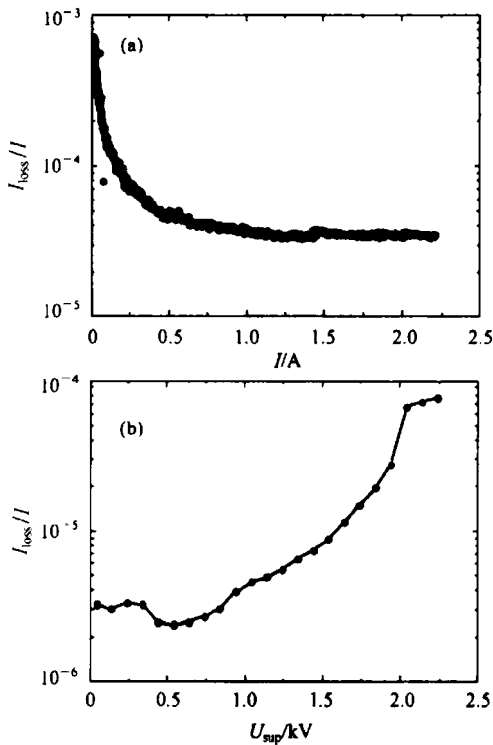


图 5 电流损失率与电子束流强(a)和抑制极电压(b)之间的关系

何参数和电参数有机地联系在一起. 图 4 为不同阴极电压下测量得到的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.

收集器由收集杯、抑制电极、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阻止它们逃逸出收集杯. 初级电子减速后进入收集器区,由收集器 3 个电极在收集器入口形成势阱,阻止二次电子^[7]. 图 5 为电流损失率与电子束流强和抑制极电压之间的关系.

4 空心电子束

为了解决冷却后离子与电子束中心的电子之间由于离子俘获电子造成的离子损失以及产生的离子束不稳定性,在 HIRFL-CSR 电子冷却装置上采用了电子束尺寸和密度可变的设计,改变电子枪控制电极的电压极性可以将电子束截面由圆盘形变为环形,如图 6 所示. 在这种情况下,已经被冷却的离子位于电子束中央,而这里电子密度非常小,离子俘获电子的几率就很低,从而减小了离子损失. 在 BINP 实验台上,测量了电子束的剖面 and 密度分布^[8]. 采用一根 20μm 的钨丝沿着电子束截面缓慢扫描,每移动一定距离,测量钨丝上的电流,计算电流分布,得到如图 7 所示的电子束剖面结果. 采用光电极管扫描测量电子轰击钨丝发射的光强度获得电子流密度分布.

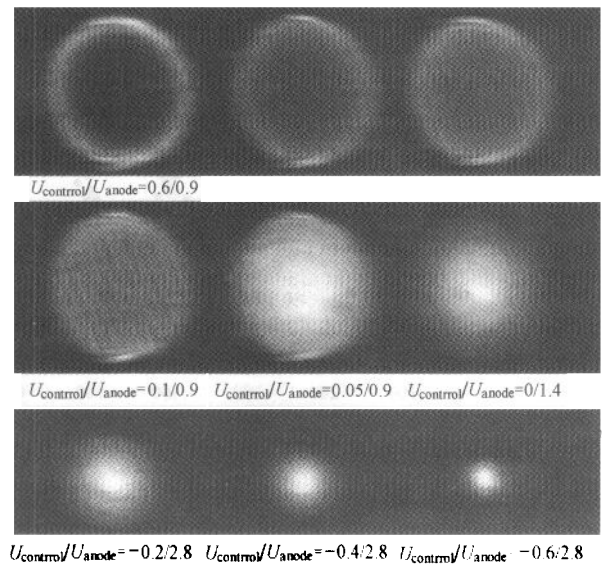


图 6 不同的阳极和控制电极电压(kV)情况下电子束的密度分布

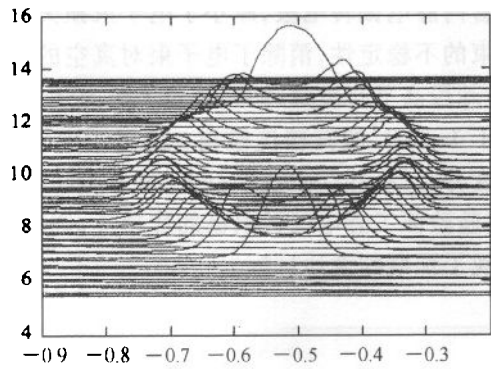


图 7 空心电子束二维剖面

5 静电偏转电极

静电偏转电极位于弯曲螺线管内,弯曲螺线管半径为 1m,两个弧形电极之间的距离为 0.07m,等距离位于弯曲螺线管中心,当施加极性相反的电压产生径向电场.如引言所述,在以前的电子冷却装置中采用磁场偏转电子,而线圈产生的磁场不可能完全匹配不同半径上电子的偏转要求,另一方面,相反方向电子轨迹的偏转方向是相反的,而静电场避免了这个问题.从收集器发射回来的电子,一方面会在电子束中产生不稳定性,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,这

些电子将沿原来的路径运动最终进入收集器,不会轰击到真空室壁,从而提高了收集效率,消除了反射电子对真空的影响.图 8 为不同阴极电压下电流损失和真空度与静电偏转电极电压之间的关系.

图 9 为单独采用磁场偏转和静电偏转时电流损失的比较.可以看出采用静电偏转时电流损失明显减小.在阴极和控制极之间施加 4MHz,幅值为 10V 左右的高频电压调制电子束,用位于电子冷却装置冷却段两端的束流位置探测器测量束流感应到探测器上的信号,可以得到束流的噪音,采用示波器扫描得到噪音谱,可以用它来测量电子束的噪音,图 10 为无静电偏转和采用静电偏转情况下电子束噪音的比较

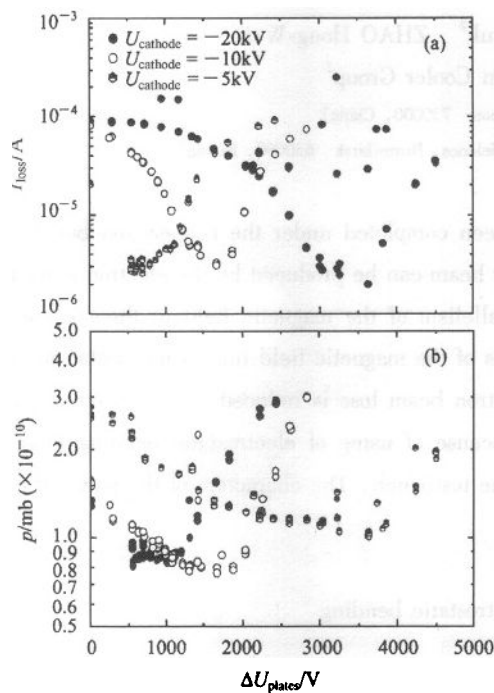


图 8 不同阴极电压下损失电流(a)和真空度(b)与静电偏转电极电压之间的关系

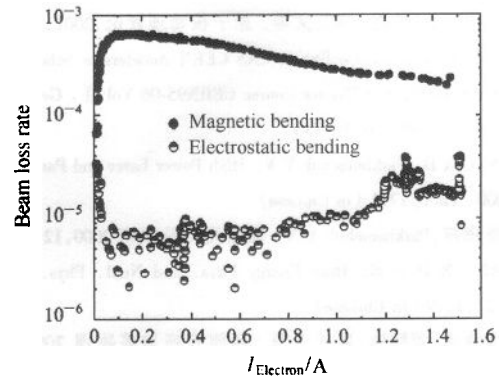


图 9 单独采用磁场偏转和静电偏转时电流损失的比较

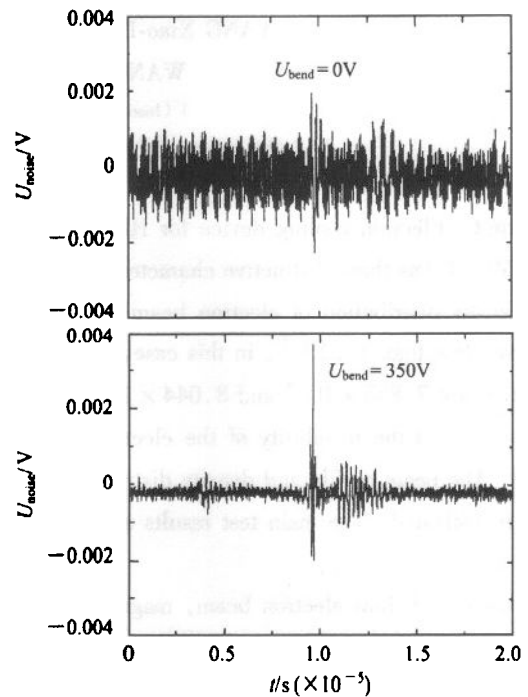


图 10 无静电偏转和采用静电偏转情况下电子束噪音的比较

比较,可以看出采用静电偏转时电流损失明显减小

6 结论

HIRFL-CSR 主环电子冷却装置采用独特设计具有 3 个显著特点,第一,能够产生空心电子束,电子束的大小和密度分布可以根据需要调节;第二,弯曲

螺线管内静电偏转电极,减小了电子束损失,抑制了电子束的不稳定性,消除了电子束对真空的影响;第三,冷却段高平行度螺线管,获得了磁力线偏角均方根小于 1×10^{-5} 的高精度磁场. 测量了电子束剖面及密度分布,冷却段磁场平行度,电子枪和收集器性能,实验验证了静电偏转电极的优越性,调试结果表明实现了预期的设计目标.

参考文献 (References)

- 1 XIA J W, ZHAN WL, WEI B W et al. Nucl. Phys. Rev., 2001, 18 (1):35—38(in Chinese)
(夏佳文,詹文龙,魏宝文等. 原子核物理评论,2001,18(1):35)
- 2 Bosser J. Electron Cooling in CAS CERN Accelerator School Fifth Advanced Accelerator Physics Course CERN95-06 Vol II, Geneva: Editor Turner. S 1995, 673—730
- 3 YANG X D, Parkhomchuk V V. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(6):771 (in Chinese)
(杨晓东, Parkhomchuk V V. 强激光与粒子束 2000,12(6):771)
- 4 YANG X D et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, 24 (12):1179 (in Chinese)
(杨晓东,宋明涛,夏佳文等. 高能物理与核物理 2000,24(12):

1179)

- 5 YANG X D, HE Y, ZHAO H W et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(5):649 (in Chinese)
(杨晓东,何源,赵红卫等. 强激光与粒子束 2001,13(5):649)
- 6 Arapov L N et al. Precision Solenoid for Electron Cooling. Proceedings of the 11th International Conference on High Energy Accelerators, Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1987, 1:341—344
- 7 YANG X D et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(5): 245—248(in Chinese)
(杨晓东等. 强激光与粒子束 2001,13(5):245—248)
- 8 Buble A, Gonchanov A, Ivanov A et al. The Electron Gun with Variable Beam Profile for Optimization of Electron Cooling, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France: 2002, 1356—1358

Test Results of HIRFL-CSR Main Ring Electron Cooling Device *

YANG Xiao-Dong^{1,1)} V. V. Parkhomchuk² ZHAO Hong-Wei¹

WANG Zhi-Xue¹ BINP Electron Cooler Group²

1 (Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

2 (Budker Institute of Nuclear Physics, Russian Academy of Science, Novosibirsk 630090, Russia)

Abstract Electron cooling device for HIRFL-CSR main ring has been completed under the cooperation between BINP and IMP. It has three distinctive characters. Variable profile electron beam can be produced by the electron gun, the size and density distribution of electron beam can be changed. The parallelism of the magnetic field in the cooling section achieves less than 1×10^{-5} , in this case, the r. m. s angle deviations of the magnetic field line in horizontal and vertical direction are 7.838×10^{-6} and 8.044×10^{-6} respectively. The electron beam loss is reduced, the vacuum condition is improved, and the instability of the electron beam is suppressed because of using of electrostatic bending plate in the toroid. The beam profile and density distribution were measured in the testbench. The characters of the gun and collector were investigated. The main test results are presented in this paper.

Key words hollow electron beam, magnetic field parallelism, electrostatic bending

Received 28 October 2002

* Supported by National Important Project on Science (HIRFL-CSR)

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