

CSRm 束流准直器模型腔设计

李朋¹, 原有进¹, 杨建成¹, 蒙峻¹, 毛瑞士¹, 柴振¹,
康新才¹, 李敏^{1,2}, 郑文亨^{1,2}, 姜培勇^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 目前国际上的强流重离子加速器通常在机器中安装镀有低解吸率材料的束流准直器用于阻挡由于电荷态变化而损失的离子, 降低解吸出的粒子数以维持真空系统的稳定。本文计划在现有的加速器冷却储存环主环(CSRm)上开展准直器模型腔测试、真空解吸率测量方面的研究。首先将介绍在 CSRm 上开展准直器系统研究的意义, 其次根据实验室开发的损失率模拟计算软件确定准直器模型腔的安装位置, 对安装位置中的真空设备进行了描述。随后重点阐述了 CSRm 准直器模型腔的硬件设计、控制系统及将来的测试方案。

关键词: 高能强流重离子加速器; 束流损失; 准直器; 真空材料解吸率

中图分类号: TL56 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2015)S1-0514-04

doi: 10.7538/yzk.2015.49.S1.0514

Design of Prototype Collimator for CSRm

LI Peng¹, YUAN You-jin¹, YANG Jian-cheng¹, MENG Jun¹, MAO Rui-shi¹,
CHAI Zhen¹, KANG Xin-cai¹, LI Min^{1,2}, ZHENG Wen-heng^{1,2}, JIANG Pei-yong^{1,2}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to suppress and control the gas desorption process, specifically designed beam catchers (collimators) with lower desorption rate material are installed at the impact positions to stabilize the vacuum system in the high intensity heavy ion accelerator. The test of prototype collimator and measurement of desorption rate will be carried out in the CSRm. The importance of collimation system research at CSRm was described in this paper. The prototype collimator installation position was calculated by the beam loss simulation program. The mechanical design of the vacuum chamber and the vacuum instruments were described. The control system of this collimation system and the beam test plan were also introduced in this paper.

Key words: high energy high intensity heavy ion accelerator; beam loss; collimator; vacuum material desorption rate

近年来,放射性束流物理、等离子体物理、高能天体物理等物理学的研究急需重离子加速器提供高能强流重离子束流^[1]。如在等离子体物理实验中,为了在 Au 材料上实现 1 MJ/g 的能量沉积率以探测物质内部结构,在束斑尺寸为 1 mm 的条件下,需提供 1.5×10^{12} (粒子数/脉冲)的铀离子束,且束流能量需达到 1 GeV/u 以上。如此之高的重离子累积数和能量将对加速器的设计提出严峻挑战,因为在重离子加速器中累积的离子数受限于束流本身的空间电荷限,与 A/q^2 (A 为质量数, q 为电荷态)呈正比,加速器只能采用中间电荷态的离子(如 U^{28+})进而得到较高电荷态(如 U^{73+})高 6.8 倍的累积率才能满足物理实验的需求。因此,中间电荷态的重离子束的累积、加速和引出将成为高能强流重离子加速器发展的必然趋势。

但在高能强流重离子加速器中,中间电荷态束流的稳定运行面临多方面困难,该电荷态的离子与真空中残余气体的反应截面较大,容易诱发各种损失机制,如束流俘获或剥离相应数量的电子,引起部分束流电荷态的变化^[2]。电荷态变更的离子经过加速器中二极磁铁偏转时运动方向改变,与真空管道壁碰撞进而从腔体表面解吸出一定数量的分子和离子,解吸出的粒子增加了真空中残余气体的密度,改变了系统真空度,进而再次提高离子的损失率,形成恶性循环,最终引起离子束流寿命下降^[3-4]、累积和加速不成功,甚至直接导致加速器停机、实验终止,离子损失过程参考文献^[5]。

在 高能强流重离子加速器中,为了既能运行中间电荷态的离子以提高束流累积数,又必须避免系统真空度的恶化造成的束流损失,通常采用的方法是:首先分析束流损失机制,准确计算离子损失位置,而后利用低解吸率材料制作的准直器阻挡损失的离子,并建立动态真空系统,快速高效地将解吸出的粒子抽除,保持系统的真空度,减小损失率,且在加速器设计初始时就需优化多种 Lattice 结构以提高准直器刮除损失离子的效率,避免离子损失位置处无法安装准直器的情况^[2]。

加速器中安装准直器的前提是确定该设备的镀膜材料,选择一种低解吸率材料才能有效降低由于束流损失引起的真空度的变化。通过

束流实验测量不同处理工艺、镀膜厚度的多种材料的解吸率。因此在加速器上开展准直器不同镀膜材料的解吸率测量实验能够为防止束流损失、维持真空系统的稳定提供强有力的实验数据支持。本文以测量的材料解吸率为基础,详细计算束流损失条件下真空系统的变化,确定准直器的安装位置和数量,为高能强流重离子加速器的高效运行提供重要的理论依据和工程设计经验。

1 CSRm 准直系统设计

为能模拟同步加速器中由于电荷交换引起的束流损失及动态真空效应,开发了新的模拟计算软件 ColBeam,以冷却储存环主环(CSRm)在 2011 年累积的离子束 $^{238}U^{32+}$ 为目标粒子计算了该电荷态的离子在 CSRm 中的损失分布^[5-6]。通常用于阻止损失离子与真空管壁碰撞的束流准直器安装在束流损失概率大的位置,以此为标准确定了准直器模型腔的安装位置为 CSRm 第 3 象限的两块二极磁铁之间的区域,安装位置如图 1 所示,总长度为 1 120 mm。

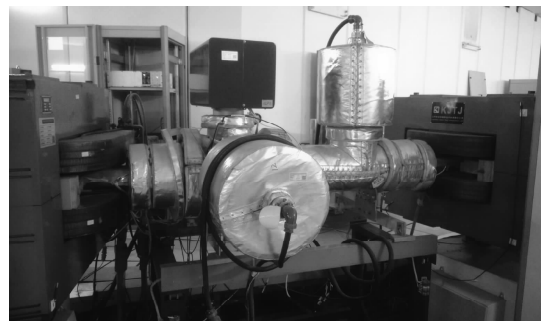


图 1 准直器模型腔安装位置

Fig. 1 Installation position for prototype collimator

目前在这段区域中安装了 1 台束流位置探测器,两台钛升华泵和 1 台溅射离子泵。溅射离子泵的抽速通常为 200~400 L/s,能有效抽除非蒸汽型气体(如甲烷和氩气)。钛升华泵拥有高达 5 000 cm^2 吸气表面,形成对于氢气的抽速接近 5 000 L/s^[7]。准直系统概念性测试腔和法兰由不锈钢 304L 和 316LN 制造。将来安装准直器时,将保留钛升华泵和溅射离子泵,

且安装真空计用于测量系统真空度的变化趋势。同时在该腔体上安装四极质谱仪用于分析损失束流碰撞真空管壁解吸出的分子和离子的组成成分。伺服电机控制的横向准直器将安装在模型腔横向平面的两端,束流位置探测器与腔体临近安装,准直器模型腔的真空腔如图2所示。

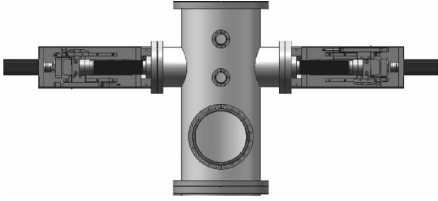


图2 准直器模型腔的真空腔

Fig.2 Vacuum chamber for prototype collimator

安装在真空测试腔中的准直器将由两个横向可移动的铜制挡块构成,其中一块将镀20 nm的金和一定厚度的防止扩散层镍材料,另一块将不镀任何材料用于对比。根据 CSRm 近几年来离子束的累积流强和能量,利用软件 LISE 计算了挡块的纵向阻挡深度,同时铜制挡块的横向尺寸由安装位置的束流包络决定,因此两个铜制挡块的尺寸为 50 mm × 50 mm × 100 mm,重量为 2.23 kg。在挡块的背部和尾部安装有温度传感器和电流传感器,用于测量损失束流的强度和引起的温度变化,准直器挡块的机械设计如图3所示。

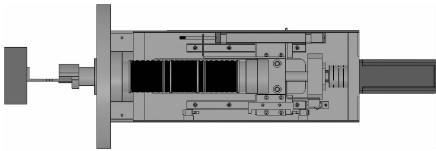


图3 准直器挡块的机械设计示意图

Fig.3 Mechanical design diagram of collimator block

为能有效避免准直器的挡块与 CSRm 中存储束流的碰撞,准直器将由伺服电机控制使得挡块能够在横向平面移动,横向的移动范围为 -100 ~ 100 mm,该机械结构的前后均安装限位开关用于准直器横向移动的限制和防护。步进电机的控制系统采用基于超高速以太网 EtherCAT 技术的网络控制系统^[8],整套系统

需 1 台实时工业控制计算机、1 个符合 EtherCAT 技术的耦合端口 EK1100、1 个伺服电机控制器、两台伺服电机驱动装置和一些配套设备。此外,新的 CSRm 真空采集程序已编写完成,能同时采集束流的流强和系统的真空度,用于分析束流损失条件下流强的变化。

2 测试计划

准直器模型腔的测试将分为 3 个步骤。

1) 准直器模型腔加工完成后,利用超声波、离子水技术对其进行清洗,然后进行烘烤,完成离线真空系统的相关检测和参数标定。安装准直器,利用伺服电机控制挡块移动,完成该模型腔控制系统的离线测试。

2) 将准直器模型腔安装在 CSRm 的 PISA 束流终端,从 CSRm 引出束流到终端并进入该腔体,与铜制挡块碰撞,利用真空计测量并记录该腔体内真空度的变化,利用式(1)计算两种材料(铜和金)的解吸率。

$$\eta_a = \frac{\Delta p V}{N k_b T} \quad (1)$$

其中: Δp 为腔体内压强的变化; V 为腔体的体积; N 为入射离子束的数目; T 为腔体的温度; k_b 为波尔兹曼常数。利用解吸率确定不同束流能量和流强下损失束流引起的真空系统的变化率。

3) 将准直器模型腔安装在 CSRm 第 3 象限后,通过电机控制铜制挡块在横向空间移动,同时测量损失束流强度和真空系统的变化,与同步加速器中其他位置真空系统的稳定度进行对比。

3 总结

为了能够将束流累积到更高流强以满足物理实验的需求和为新的 高能强流重离子加速器累积设计经验,本文设计了束流准直器模型腔用于测试束流损失率的变化和真空解吸率随束流能量、强度的变化趋势。目前,CSRm 束流损失的模拟计算、准直器控制系统设计、准直器和腔体的机械设计已完成,该腔体随后将交付相关企业进行加工。新的准直器模型腔计划将于 2015 进行离线测试以完成带束测试的准备,预计于 2015 年底完成 CSRm 的安装和束流测试。

感谢德国重离子研究中心(GSI)的 Lars Bozyk 博士提供的有关束流损失计算、准直效率模拟方面的帮助, Peter Spiller 博士提供的参与准直器模型腔测试的机会。

参考文献:

- [1] FAIR 2006 Baseline Technical Report[R/OL]. (2006)[2015]. <http://www.fair-center.eu/users/publications/fair.html>.
- [2] OMET C, STADLMANN P S J, HOFFMANN D H H. Charge change-induced beam losses under dynamic vacuum conditions in ring accelerators[J]. *New Journal of Physics*, 2006, 8: 284-302.
- [3] SPILLER P. Towards the high intensity limit in the FAIR project present status and future challenges [C] // *Proceedings of HB2010*. Morschach, Switzerland; [s. n.], 2010.
- [4] SPILLER P, BLASCHE K, STADLMANN B F J, et al. Optimization of the SIS100 lattice and a dedicated collimation system for ionization losses [C]//3rd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity and High Brightness Hadron Beams. [S. l.]: [s. n.], 2005.
- [5] LI Peng, YUAN Youjin, YANG Jiancheng, et al. Beam loss distribution calculation and collimation efficiency simulation of a cooler storage ring in a heavy ion research facility[J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2014, 17: 084201.
- [6] LI Peng, YUAN Youjin, YANG Jiancheng, et al. The conceptual design of collimation system for CSRm[C]//The 12th Symposium on Accelerator Physics. Lanzhou; [s. n.], 2014.
- [7] YANG X T, ZHANG J H, ZHANG X J, et al. The ultra-high vacuum system of HIRFL-CSR [J]. *Vacuum*, 2001, 61: 55-60.
- [8] Beckhoff EtherCAT. (2009)[2015]. <http://www.beckhoff.com.cn/>.