

## 新型 350kV 氦离子注入系统的设计和应用

李进<sup>1</sup> 胡振东<sup>1</sup> 李可<sup>2</sup> 范平<sup>2</sup> 张乔丽<sup>2</sup>

1 北京烁科中科信电子装备有限公司长沙分公司, 湖南 长沙 410000

2 中国原子能科学研究院, 北京 102413

**[摘要]**在先进核能系统的抗辐照结构材料研发过程中, 基于加速器的多束离子辐照是目前唯一可快速模拟实际堆内工况下材料高剂量辐照损伤的技术。文中介绍了一个应用于三束辐照装置的 350kV 氦离子注入系统的设计和应用。该系统搭载潘宁源、间接加热式阴极 (IHC) 离子源, 从源引出的 He<sup>+</sup> 离子经过最高 350kV 的加速后, 经过静电透镜、磁分析器及导向器后注入靶样品。对改进型 316Ti 不锈钢进行注 He 及重离子高温辐照, 采用透射电镜观察到在辐照样品注 He 区产生氦泡, 氦泡位置与计算得到的注 He 区一致。

**[关键词]**离子注入系统; 三束辐照; 氦离子; 高温离子; 设计与应用

DOI: 10.33142/aem.v3i6.4364

中图分类号: O4

文献标识码: A

### Design and Application of a New 350 KV Helium Ion Implantation System

LI Jin<sup>1</sup>, HU Zhendong<sup>1</sup>, LI Ke<sup>2</sup>, FAN Ping<sup>2</sup>, ZHANG Qiaoli<sup>2</sup>

1 Changsha Branch of Beijing Shuoke Zhongkexin Electronic Equipment Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

2 China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413, China

**Abstract:** In the research and development of radiation resistant structural materials for advanced nuclear power system, accelerator based multi beam ion irradiation is the only technology that can quickly simulate the high-dose irradiation damage of materials under actual in reactor conditions. This paper introduces the design and application of a 350kv helium ion implantation system applied to a three beam irradiation device. The system is equipped with panning source and indirect heating cathode (IHC) ion source. After acceleration of up to 350KV, HE<sup>+</sup> ions from the source are injected into the target sample after passing through electrostatic lens, magnetic analyzer and deflector. The modified 316Ti stainless steel was irradiated by he implantation and heavy ion high temperature irradiation. It was observed by transmission electron microscope that helium bubbles were generated in the he implantation area of the irradiated sample, and the position of helium bubbles was consistent with the calculated he implantation area.

**Keywords:** ion implantation system; three beam irradiation; Helium ion; high temperature ion; design and application

### 引言

核能作为一种高效、清洁、可靠的能源, 具有供应能力强、可大规模应用等发展优势。在新一代核能系统中, 结构材料将受到 100~200 dpa 或更高剂量的辐照损伤<sup>[1]</sup>。反应堆内中子与结构材料的原子核发生碰撞, 并且与 (n,  $\alpha$ ) 和 (n, p) 等核反应产生的嬗变产物氢、氦协同作用, 形成辐照损伤缺陷<sup>[2-3]</sup>。辐照损伤及由此引发的材料综合性能的下降成为了核反应堆结构材料的主要失效原因。在先进核能系统的抗辐照结构材料研发过程中, 了解辐照位移损伤与嬗变产生的氢、氦的协同作用的机理是关键科研问题之一<sup>[4]</sup>。

结构材料入堆考验作为一种直接的研究手段, 可以让材料处于现役反应堆工况环境。但是堆内中子辐照位移损伤剂量率低, 使得品置于堆内时间可达数月至数年之久。此外, 经堆内中子辐照后的样品由于核反应产物的放射性, 需要放置较长时间才可以进行进一步研究<sup>[5]</sup>。

基于加速器的多束离子辐照是目前唯一可快速模拟实际堆内工况下材料高剂量辐照损伤的技术, 与低剂量率和高放射性的中子辐照相比, 经带电粒子辐照的样品处于非放射性状态, 在辐照后可以立即进行后续测试工作。加速器多束离子辐照可以通过重离子辐照产生一系列位移损伤, 模拟中子辐照损伤对材料的影响<sup>[6-8]</sup>; 在重离子辐照前或辐照过程中注入的氢、氦离子来模拟堆内的嬗变产物。

本工作是在中国原子能科学研究院串行加速器辐照终端上, 建立一台用于三束辐照系统的氦注入机, 可用于多束同时辐照实验或氦单独注入实验。对一种改进型 316Ti 不锈钢样品进行 He 离子注入及高温离子辐照实验, 并通过透射电镜观察辐照形成的 He 泡。

## 1 氢氦离子注入机设计

在三束辐照系统中，重离子由 HI-13 列加速器产生，可以提供各种重离子。氢、氦离子分别由单独离子注入机产生。本工作建立的氦注入机注入机包含一套离子源系统、引出系统、加速及分析系统。最高可产生 350keV 的离子，He 离子束流与氢、重离子束流处于同一水平面上，夹角分别位  $20^\circ$ 、 $40^\circ$ ，如图 1 所示。

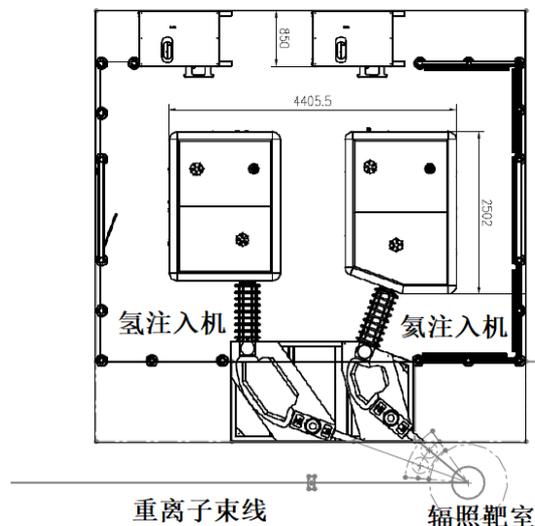


图 1 三束辐照系统示意图

离子源采用潘宁离子源或 IHC 离子源，可以根据实验需要替换使用。离子源气箱设计两种气路，其中一路为高纯 He 气，另一路为氩气，用于辅助电离。两路气体通过不锈钢管道注入到离子源弧室内。

为消除设计、安装误差对引出缝对中特性的影响，同时满足不同引出能量下获得最佳的引出束流，引出电极设计为可调节结构，通过对 Z 的调节实现束流在不同电极距离情况下最佳的聚焦效果，使束流得到最大的引出效率。电极调节采用差分密封结构，保证运动状态下系统的真空度，如图 2 所示。引出系统最高电压 80keV。

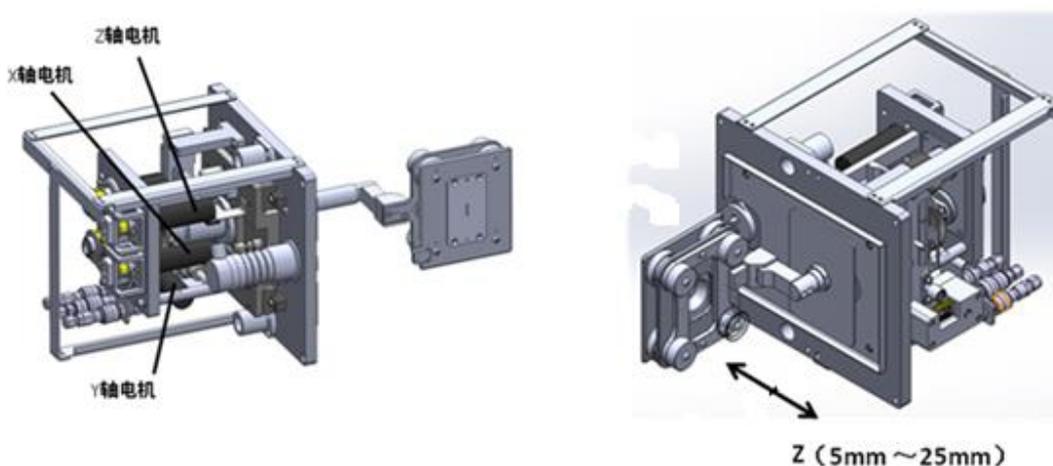


图 2 可调引出电极示意图

加速及分析系统中加速管采用采用 7 级静电等梯度加速管，最高加速电压 300kV。He 离子经过高压加速后进入质量分析器。质量分析器入口设计固定挡束光栏及磁场检测霍尔探头安装结构，在正对离子束入射方向设计接束杯检测光路的对中性。线包和分析扁盒设计有水冷结构保证磁场稳定工作环境。分析器扁盒内衬石墨板以减少离子束溅射产生的金属颗粒污染。分析器出口设计法拉第筒，用于测量分析后得到的 He 束流强度。

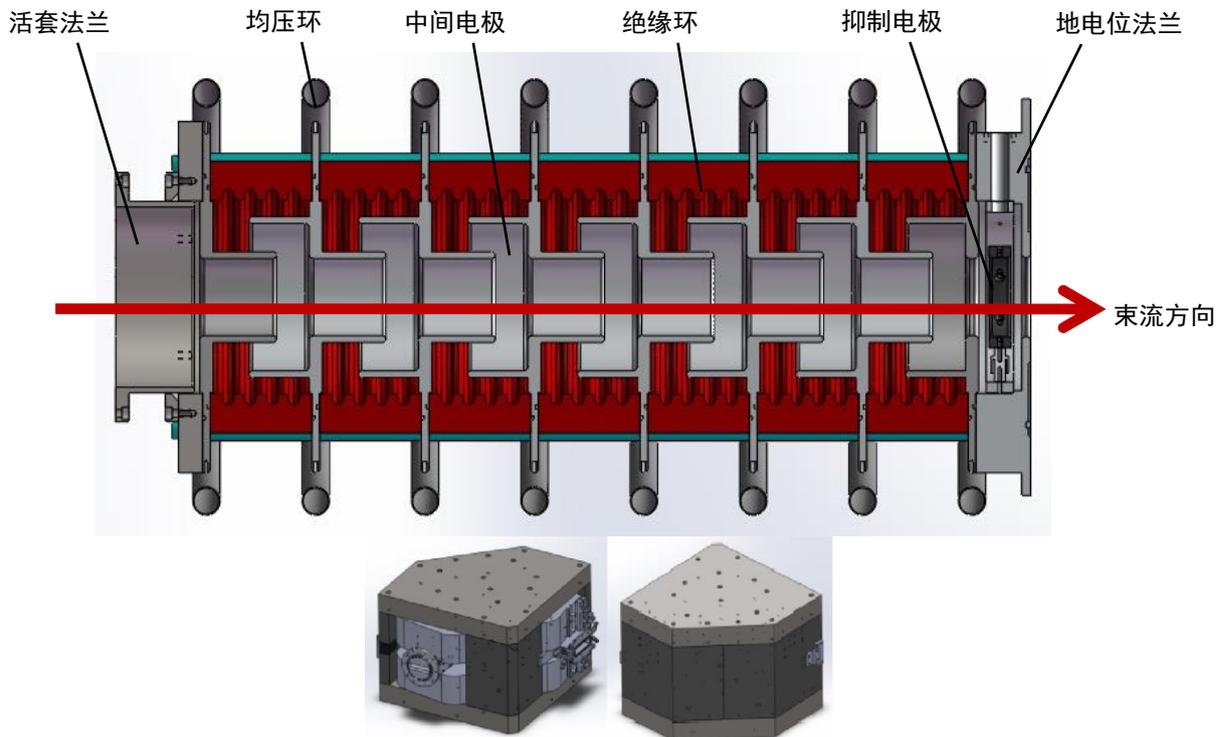


图3 加速管及质量分析器示意图

为了得到理想的均匀束斑，在加速管出口和分析器后各设计了一组电四极透镜，可以对束流进行水平和垂直方向的聚焦，用于调整束斑形状。另外在分析器后还具有一组静电导向器，可以将束流在 x 和 y 方向偏转，用于束流对中。最后在靶室入口出设置一组四分板光阑，实验时通过测量光阑的上、下、左、右四个位置上的束流，用于实验时监测束流的稳定性。

## 2 He 离子注入及高温离子辐照实验

通过调节输入的 He 气、He/Ar 气比例等，可以得到不同的 He 束流强度。图 4 为采用潘宁源、He 气流量 4.5SCCM、Ar 气流量 0.1SCCM、离子源功率 50W、加速电压 150kV 时的质量分析谱。分析后法拉第筒处 He<sup>+</sup>束流强度为 7.5uA。另外还可以看到存在较弱的 He<sup>2+</sup>离子。

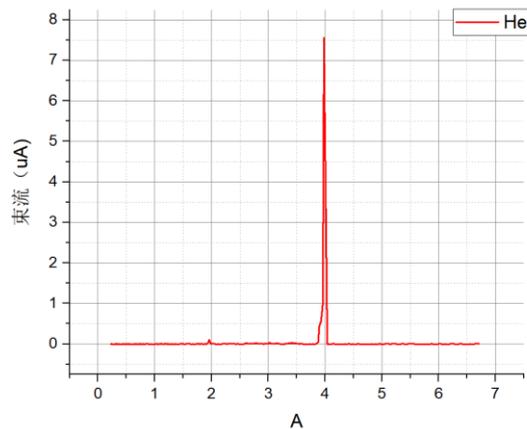


图4 150kV 质谱分析

He 离子注入实验采用在常温下用不同能量的 He 离子束流对改进型 316Ti 不锈钢样品进行注入。通过 SRIM 程序模拟计算 100、150、200、250、300keV 五种能量的 He 离子注入分布，对不同能量的 He 离子选择合理的注量，使得在

350–700nm 深度区间内形成均匀注 He 平台区, 平台区的 He 注量约为  $1.2 \times 10^{21}/\text{cm}^2$ , 如图 5 所示。

采用 20MeV 的 Ni 离子在 580℃ 下对注 He 样品进行重离子辐照, 辐照剂量 30dpa。由于注入的 He 可以加速空洞成核过程, 对空洞的具有稳定作用, 能够形成透射电镜可明显观察的氦泡/空洞, 因此在辐照后采用聚焦离子束 (FIB) 技术制备透射电镜样品。图 6 为辐照后样品透射电镜观察照片, 可以看到氦泡大约分布在 330–800nm 深度范围内, 并在大约 350–750nm 区间形成 He 泡均匀分布区间, 该区域与计算的注入区间一致, 所观测到的空洞/氦泡是注入的氦和重离子产生的离位损伤共同作用的结果。

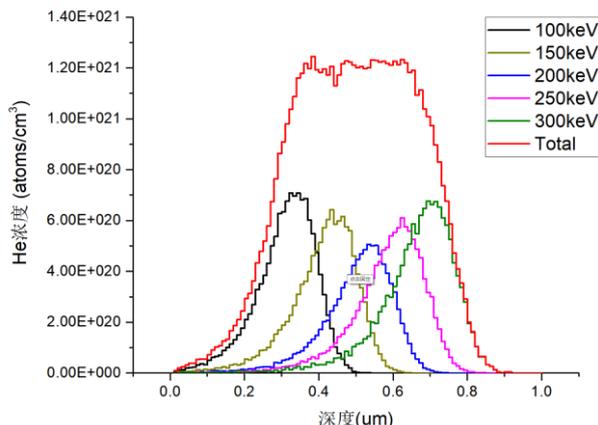


图 5 不同能量注 He 叠加及 He 离子分布

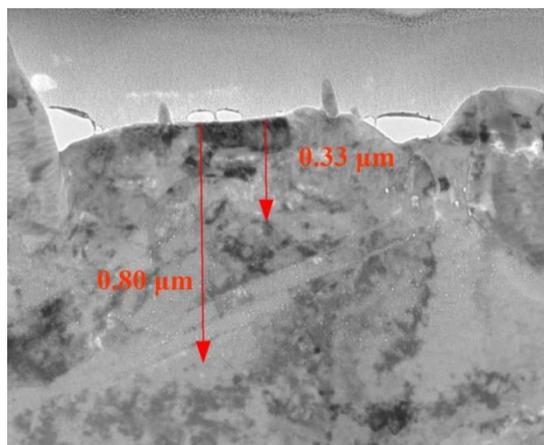


图 6 透射电镜观察下的氦泡分布

### 3 结论

本工作设计并建立一台氦离子注入机, 可用于三束辐照实验或氦离子注入实验。该注入机搭载潘宁源、IHC 离子源, 束流能量 100–350kV 连续可调。通过不同能量及注量的 He 离子束的组合注入, 实现了在改进型 316Ti 不锈钢距表面 350–750nm 深度区间制造均匀的注 He 平台区。并通过 TEM 观察经三束辐照的样品中氦泡分布区域验证了该结论。

#### [参考文献]

- [1] ZHU Shengyun, YUAN Daqing. Study of Radiation Properties of Structural Materials for Advanced Nuclear Energy Systems[J]. Nuclear Physics Review, 2017, 11(3): 34–35.
- [2] YUAN Da-Qing, ZHENG Yong-Nan, ZUO Yi, FAN Ping, et al. Synergistic Effect of Triple Ion Beams on Radiation Damage in CLAM Steel[J]. CHIN. PHYS. LETT., 2014, 31(4): 046101.
- [3] ANDO M, WAKAI E, SAWAI T, et al. Application of Multi-irradiation Facilities[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2008, 266(12): 3178–3181.
- [4] WAKAI E, ANDO M, SAWAI T et al. Effect of Gas Atoms and Displacement Damage on Mechanical Properties and Microstructures of F82H[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 356(1): 95–104.
- [5] AGARWAL S, CHEN Q, KOYANAGI T, et al. Revealing Irradiation Damage Along With the Entire Damage Range in ion-irradiated SiC/SiC Composites Using Raman Spectroscopy[J]. Journal of Nuclear Materials, 2019, 12(6): 151778.
- [6] ZHU S Y, ZHENG Y N, POLAT A, et al. Temperature and Dose Dependences of Radiation Damage in Modified Stainless Steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005(343): 325–329.
- [7] ZHENG Y N, ZUO Y, YUAN D Q, et al. Investigation of Radiation Damage in Stainless steel, Tungsten and Tantalum by Heavy Ion Irradiations[J]. Nuclear Physics A, 2010, 834(4): 761–763.
- [8] ZHU S Y, IWATA T, XU Y et al. Experimental Verification of Heavy Ion Irradiation Simulation[J]. Modern Physics Letters B, 2004, 18(17): 881–885.

作者简介: 李进 (1978.10–), 男, 汉族, 湖南常德人, 工程师, 现就职于北京烁科中科信电子装备有限公司长沙分公司, 研究方向: 高温高能离子注入技术及推广。