

文章编号: 1007-4627(2015)S1-0020-05

## 北京大学 4.5 MV 静电加速器核材料辐照系统

高原, 王建勇, 杨向军, 龚建华, 路祥臣

(北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 随着我国核电事业的发展, 新一代核能系统对材料性能的更高要求已经成为材料科学领域新的挑战, 为适应这一需求, 为高性能抗辐照核材料的研究和测试提供平台, 北京大学 4.5 MV 静电加速器组在核物理与核技术国家重点实验室的支持下, 在原有束线基础上新增设质子/氦温控辐照系统并投入使用。该系统可进行能量范围在 0.7~3.5 MeV 内的质子或氦离子辐照, 离子流强最高 10  $\mu\text{A}$ , 并可进行最高 1000  $^{\circ}\text{C}$  的加热辐照, 特别适合开展核能材料的初级快速筛选。此外, 4.5 MV 加速器与 2 $\times$ 6 MV 串联加速器联合建设的双束共靶辐照系统也已经整体调试完成, 可为材料辐照效应的进一步研究提供良好的实验平台。

**关键词:** 静电加速器; 核材料; 辐照; 温控靶室; 双束

**中图分类号:** TL52      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.20

### 1 引言

随着人类对天然资源的逐渐消耗, 发展核能等新型能源已成为各国首要的战略部署。在新一代核能系统(第四代裂变反应堆和聚变堆)中, 其结构与功能材料需要长时间耐受强辐照、超高温、强腐蚀等极端环境。第四代裂变堆与当代裂变堆相比, 系统运行的温度要大大提升, 除了要求反应堆材料具有更好的机械稳定性和热稳定性以外, 材料需要具备更好的抗辐照损伤能力。聚变反应堆中材料的辐照损伤速率每年约 10 dpa(displacement per atom, 即每个原子的移位次数, 一般用来评价材料的辐照损伤程度), 是目前热堆的 10 倍以上。以运行寿命 30 年计, 聚变堆结构材料中的辐照损伤将高达 300 dpa, 这是目前核能材料及聚变堆备选材料都无法承受的。此外, 反应堆中嬗变产物氢和氦会引起材料性质变化, (n, p)和(n,  $\alpha$ ) 反应生成的氢和氦, 对于聚变堆第一壁和包层材料而言, 每年的沉积浓度为氦 200 appm (atom parts per million, 即每百万原子中所含该原子个数)、氢 1000 appm, 碳化硅中的氦将是金属中的 4~5 倍, 可达 1000 appm; 金属构件中 He 的质量分数可达约 0.04%, 而碳化硅构件中 He 的质量分数将达约 0.6%。材料由于高浓度辐照缺陷和氦/氢泡的积累会发生严重的肿胀和脆化, 从而导致核心部件以及连接结构材料性能的整体下降, 缩短了大量部件的服役寿命。因此, 研究新条件下各种材料中辐照

损伤机制, 氢和氦的积聚规律, 研发新型抗辐照核能材料, 已经成为核能材料研究领域的热点及关键问题<sup>[1]</sup>。

中子的辐照损伤会对反应堆的材料结构造成影响。辐照过程中单个原子会产生移位, 迁移聚集进而产生更大的缺陷, 从而造成材料的形变。研究该机制的一种方法是将材料放入反应堆进行辐照实验。热中子反应堆中子辐照实验的剂量率为每年 3~5 dpa, 在快堆中, 这一速率为每年 20 dpa。因此, 对于沸水堆结构材料而言, 其 10 dpa 的寿命测试实验可以通过反应堆中子辐照实现; 但压水堆的部件需要在堆中经过 4~5 a 时间才可以完成 80 dpa 的寿命测试。而快堆的核心部件的辐照剂量甚至要求达到 200 dpa, 往往需要数十年的时间来产生需要的缺陷数量, 因此花费巨大, 这对使用反应堆进行中子辐照测试来说是不现实的。

模拟反应堆中子辐照损伤另一种有效的方法是进行离子辐照, 多年来, 电子、质子、氦离子以及重离子等载能离子均被用来研究反应堆部件材料的辐照损伤<sup>[2-5]</sup>。载能离子束辐照由于其低活化、低成本、辐照参数(剂量、剂量率、温度等)灵活等优势被认为是模拟反应堆中子辐照的一种有效方式。一方面, 离子辐照相比中子辐照最明显的优势是辐照剂量可以在短时间内快速积累, 达到 1~100 dpa 的损伤效果通常只需要几个至数十个小时。另一方面, 离子辐照几乎不会造成样品活化, 实验周期短, 成本低, 而中子辐照会造成材料样

收稿日期: 2014-10-18;      修改日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11305005)

作者简介: 高原(1983-), 男, 山东济南人, 博士, 从事核技术及应用研究; E-mail: pkugaoyuan@pku.edu.cn.

品的活化, 需冷却后才能进行观测, 使整个实验的周期大大增加, 甚至可能长达数年。

目前最关键的问题是如何进行中子辐照与离子辐照实验的比较, 即对于某种中子辐照环境, 如何选择离子辐照的参数与之进行匹配, 从而模拟和接近中子辐照的效果。这一关键问题的解决, 将会为核能材料的研究提供巨大帮助。我们希望通过加速器辐照实验方法的探索 and 改良, 为理解和解决这一问题提供更有利的支持。

## 2 北京大学 4.5 MV 静电加速器

北京大学 4.5 MV 静电加速器于 20 世纪 80 年代由北京大学和上海先锋电机厂联合研制, 1991 年投入运行, 1994 年正式通过鉴定验收。目前每年的运行机时 1000 h 以上, 近年主要在核材料辐照、托克马克中子飞行时间谱仪 (TOFED) 刻度、中子核数据测量等研究领域进行了实验工作。该设备端电压目前可达 3.8 MV, 高压稳定度  $\pm 1$  kV, 可加速质子、氘、氦 3 种离子, 安装有两条束线, 分别进行离子打靶的中子核反应实验和离子辐照实验 (如图 1 示)。其中, 中子核反应束线能提供连续束流和脉冲束流, 能在 0.03 ~ 7 MeV 和 14 ~ 19 MeV 两个能区提供单色中子。主要用于中子核反应分析、中子探测器刻度、中子照相和低通量中子辐照 (器件) 等实验应用。离子辐照线可进行质子和氦离子辐照实验。

近期, 北京大学 4.5 MV 静电加速器组在核物理与核技术国家重点实验室的支持下, 为了进一步发挥 4.5 MV 加速器 H 和 He 离子辐照的优势, 从而为高性能抗辐照核材料的研究和测试提供更好的技术支持, 在原有

离子辐照线基础上新增设了核材料辐照系统, 可利用加速器产生的质子或氦离子进行核材料相关的辐照实验工作。该束线在改造后分为前端质子/氦温控辐照系统及后端双束共靶辐照系统两部分, 其中 4.5 MV 静电加速器与 2 × 6 MV 串列加速器联合建设的双束共靶辐照系统, 可进行轻重离子协同辐照效应的研究。整套核材料辐照系统可用于核能相关材料辐照, 器件辐照损伤及 NRA (Nuclear Reaction Analysis) 系统和外束等领域的实验研究。

## 3 核材料辐照系统

### 3.1 质子/氦温控辐照系统

相比重离子辐照而言, 质子辐照具有较深的射程 (3.2 MeV 质子在不锈钢中射程可达 40  $\mu\text{m}$ ), 在除 Bragg 峰以外的损伤区域可以产生几十个微米范围较为平坦的损伤分布<sup>[6]</sup>, 这一尺度为评价材料辐照后的微结构及力学性能都提供了有利条件。我们可以利用质子辐照作为一种辐照损伤方式与中子损伤效果进行对比, 研究材料的辐照响应, 从而开展核能材料的初级快速筛选。美国密西根大学的 Was Garry 等人通过大量的质子辐照实验, 从材料微结构、应力、淬火、肿胀行为等性能改变的效果上与中子辐照进行了对比研究<sup>[7-12]</sup>。

如图 1 所示, 质子/氦温控辐照系统安装在 90° 磁铁之后, 主要部件依次为磁导向 (束流方向微调)、X 扫描 (200 Hz 电扫描)、缝控 (能量稳定)、Y 扫描 (50 Hz 磁扫描)、温控辐照靶室 (如图 1)。靶室内可进行能量范围在 0.7 ~ 3.5 MeV 内的质子或氦离子辐照, 离子流强最高 10  $\mu\text{A}$ , 可实现  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  以上剂量的辐照。

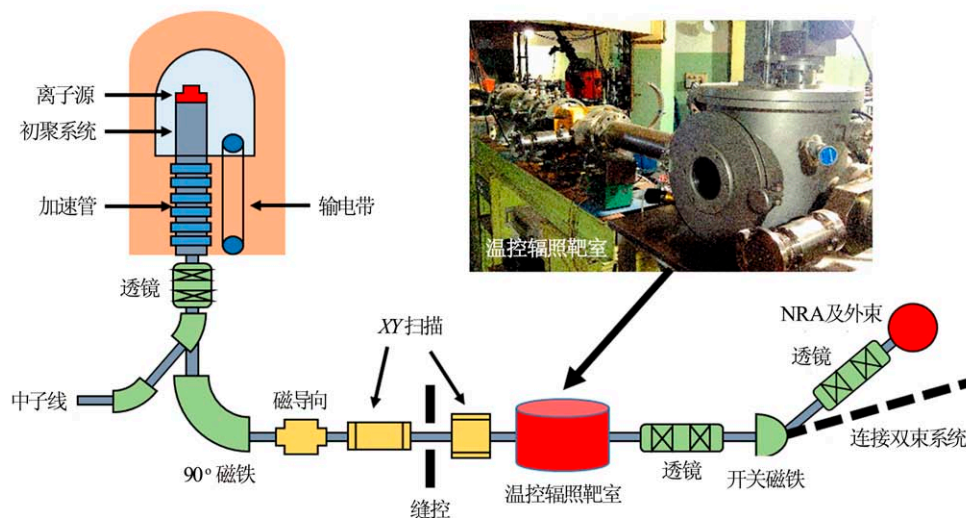


图 1 (在线彩图) 4.5 MV 静电加速器结构示意图

温控靶室内可安装常温和加热两种靶台，常温靶台可同时安装 7 组样品，配合扫描与光阑，辐照范围可达 4 cm×4 cm，可实现不开靶室更换样品；加热靶台通过样品台后 SiC 加热模块在辐照过程中对样品进行最高 1 000 °C 的恒温控制，温度误差 10 °C。如图 2(a) 所示，样品台尺寸为 2 cm×2 cm，通过前端束流扫描装置和光阑实现矩形范围均匀辐照，在温控靶室中，束流垂

直入射样品，入射方向两侧的靶室壁上有观察窗分别安装红外热像仪和 CCD 摄像头，其中红外热像仪窗口为红外线可穿透的锗玻璃窗口。如图 2(b) 所示，靶室内的在线监测包括束流监测和温度监测。束流积分仪连接对地绝缘的样品台进行束流监测，样品台前安装 300 V 的偏压极板用于抑制二次电子。样品台后安装热电偶进行温度监测，同时热电偶连接至加热电源用于恒温控制。

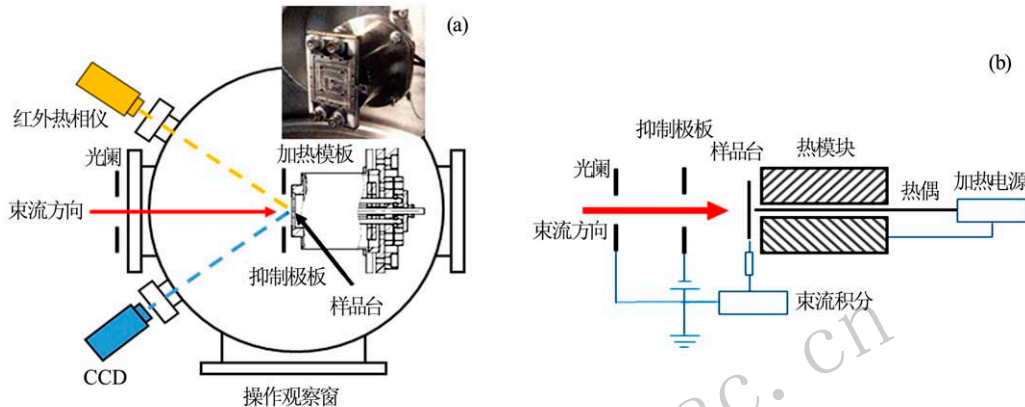


图 2 (在线彩图) (a) 温控靶室示意图; (b) 在线监测示意图

我们对加热靶台进行了温升曲线的测量，并使用 Comsol 软件对安装在样品台上的 1 cm<sup>2</sup> 样品表面温度进行计算，结果如图 3(a) 所示，横坐标为加热电源的输出功率，纵坐标为样品台中心温度。加热模块的额定电流为 10 A，我们选取加热电源的输出功率范围为 5 ~ 160 W，可以看到输出功率 40 W 以内时实验值与计算值基本吻合，40 W 处对应的温升为 470 °C；输出功率超过 40 W 后，温升的实验测量值明显低于计算值，160 W 处对应的温升为 700 °C，与计算值相差 180 °C，推测原因可能是随电流加大，加热模块接线端发热明显，耗散较多能量。我们使用红外热像仪对加热靶台

进行了热成像(如图 3 (b)), 红外窗口锗玻璃的透射率为 0.46，加入此修正参数校准后，测量温度已经可以接近实际温度。我们用简化模型计算了 SiC 加热模块与样品台的温度分布(如图 3(c))，可以看出，计算中当样品台温升达 700 °C 时，SiC 的温度已经超过 1 100 °C，由于在真空环境中热传递的主要方式是热辐射传热，加热模块的实际结构比计算使用的模型复杂，外壳的散热也可能导致温升效率变低。此外，由于温度的测量和控制是使用样品台后方的热电偶，在高温及电流干扰的情况下热电偶的测量值可能偏低。

目前，质子/氦温控辐照系统的安装和测试已经基

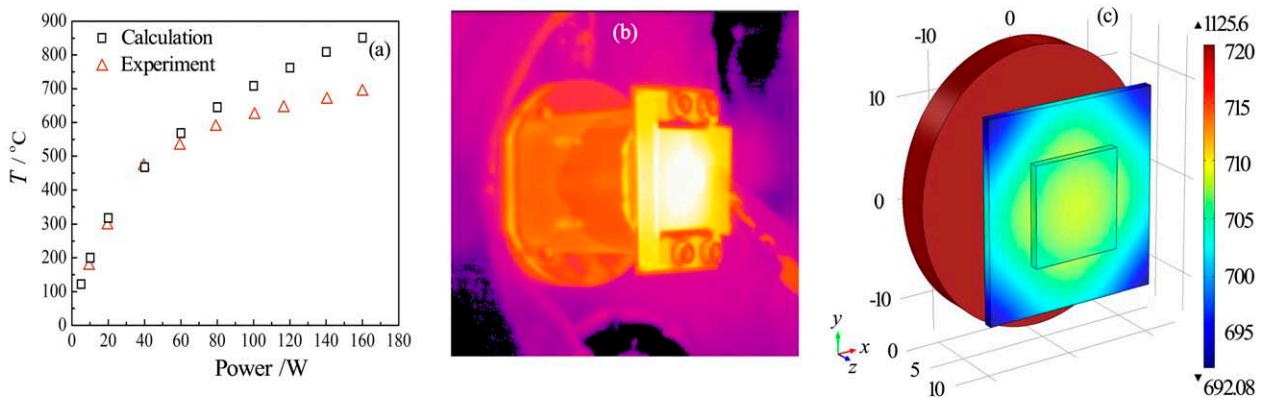


图 3 (在线彩图) (a) 加热模块温度曲线; (b) 红外热像仪采集加热图像; (c) 模拟计算加热模块温度分布

本完成, 与核材料相关的辐照损伤实验正在开展。2014年以来, 在核物理与核技术国家重点实验室开放课题支持下, 已陆续完成来自清华大学、中国工程物理研究院、中国科学院上海应用物理研究所等国内十余家科研院所的核材料辐照实验。

### 3.2 双束共靶辐照系统

反应堆中子辐照除了造成材料移位损伤之外, 会产生He等嬗变产物, 比如聚变堆 14 MeV 中子辐照会产生大量的氢和氦。因此, 我们可以通过两种或三种离子束同时辐照, 利用多离子的协同效应来研究反应堆中的这一过程<sup>[13-14]</sup>。

2010年至2014年, 在核物理与核技术国家重点实验室支持下, 北京大学物理学院王宇钢教授组织领导下, 2×6 MV串列加速器与4.5 MV静电加速器两个工作组联合进行了北京大学面向核能研究的多用途多离子束公共平台的建设(如图4)。在现有的2×6 MV串

列加速器与4.5 MV静电加速器基础上, 更新了两条束线, 并在终端安装双束共辐照靶室, 从而实现重离子和He(或H)两种离子的同时辐照, 目前已可以实现常温及1300 K加温辐照, RBS沟道在线分析和光学信号检测等功能正在陆续完善中。其中双束靶室, 可以满足来自两台加速器两种束流同时辐照同一样品, 靶室内配备四维移位靶台(三维平动一维转动), 可同时安装多组样品。靶室前端两条入射束线均安装XY方向电扫描装置, 可实现3 cm×3 cm大范围均匀辐照。目前, 该平台已经整体调试完成, 近期已经开始接受科研院所的实验申请。该平台投入运行后将应用于核能材料辐照性能研究、器件及材料辐照、半导体/金属/绝缘体离子注入及在线RBS分析、离子束材料改性及新材料离子束辅助合成、空间质子/重离子模拟辐照、活细胞辐照等研究领域, 将对国内外核能材料、凝聚态物理、半导体微电子、空间辐射、材料物理及纳米材料、辐射生物学及放疗物理等方面研究工作起到重要的促进作用。

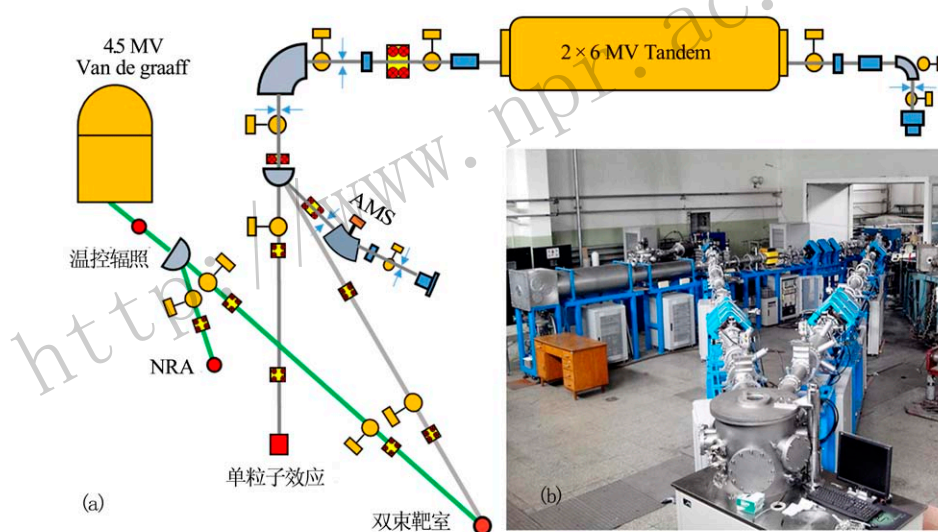


图4 (在线彩图)(a) 双束共辐照系统结构示意图; (b) 工程完工实景

## 4 总结

近年来, 北京大学4.5 MV加速器在核物理与核技术国家重点实验室的支持下, 结合自身在该领域的特点, 与国际国内多个课题组展开合作。在以往离子辐照、中子核物理、中子探测器等研究应用基础上, 为应对核能发展的需求, 在原有束线基础上扩展了核材料辐照系统, 包括质子/氦温控辐照系统和双束共靶辐照系统。改造后, 4.5 MV加速器目前可提供能量范围在0.7~3.5 MeV内的质子或氦离子, 离子流强最高10 μA, 并可进行最高1000 °C的加热辐照, 特别适合开展核能材料的初级快速筛选, 为核能材料的研究提供了更

为完善的实验平台。

**致谢** 感谢核物理与核技术国家重点实验室和教育部对文中工作的支持。

### 参考文献:

- [1] DAVID J Hill. Nature Materials, 2008, **7**: 680.
- [2] GARNER F A. J. Nucl. Mater. 1983, **117**: 177.
- [3] MAZEY D J. J. Nucl. Mater. 1990, **174**: 196.
- [4] WAS G S, ANDRESEN P L. JOM. 1992, **44**: 8.
- [5] WAS G S, Z JIAO, E GETTO, *et al.* Scripta Materialia. 2014, **88**: 33.

- [6] WAS G S, ALLEN T R. Mathematics, Physics and Chemistry, 2007, **235**: 65.
- [7] WAS G S, BUSBYJ T, ALIEN T, *et al.* J. Nucl Mater, 2002, **300**: 198.
- [8] ALIEN T R, COLE J I, GAN J, *et al.* J. Nucl Mater, 2005, **341**: 90.
- [9] SENCER B H, WAS G S, YUYA H, *et al.* J. Nucl Mater, 2005, **336**: 314.
- [10] WAS G S, HASH M, ODETTE G R. Philos. Mag, 2005, **85**: 703.
- [11] ZU X T, SUN K, ATZMON M, *et al.* Philos Mag, 2005, **85**: 649.
- [12] SINGH B H, ELDRUP M, HORSEWELL A, *et al.* Philos Mag A, 2000, **80**: 2629.
- [13] SERRUYS Y, TROCELLIER P, MIRO S, *et al.* J Nucl Mater, 2009, **386-388**: 967.
- [14] SEKIMURA N, IWAI T, ARAI Y, *et al.* J Nucl Mater, 2000, **283-287**: 224-228.

## Nuclear Material Irradiation System of 4.5 MV Electrostatic Accelerator at Peking University

GAO Yuan<sup>1)</sup>, WANG Jianyong, YANG Xiangjun, GONG Jianhua, LU Xiangchen

(*School of Physics & State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,  
Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** Understanding nuclear materials response in extreme environments, such as intense irradiation and high temperature in fusion reactors and advanced fission reactors, is significant in designing advanced nuclear energy systems. Recently, a nuclear material irradiation system has been installed and in service on the beam line of 4.5 MV electrostatic accelerator. The energy range of proton or helium ion accelerated will be from 0.7~3.5 MeV, and the ion current will be up to 10  $\mu$ A. The system will consist of a vacuum chamber combined with heating controlling, which can achieve the irradiation under 1000 °C. In addition, by coupling 2  $\times$  6 MV tandem accelerator and 4.5 MV single end electrostatic accelerator, a double beam irradiation system has been assembled and tested to study the synergistic effects of displacement damage, helium or hydrogen irradiation effects on microstructural changes of materials, as the experimental simulation of irradiation damage in reactors.

**Key words:** electrostatic accelerator; nuclear material; irradiation; temperature-control chamber; double-beam

**Received date:** 18 Oct. 2014; **Revised date:** 18 Dec. 2014

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11305005)

1) E-mail: pkugaoyuan@pku.edu.cn.