

文章编号: 1007-4627(2013)01-0094-05

## 基于HIRFL的高温应力材料载能离子辐照实验装置

申铁龙<sup>1,2</sup>, 王志光<sup>1</sup>, 姚存峰<sup>1</sup>, 孙建荣<sup>1</sup>, 盛彦斌<sup>1</sup>, 魏孔芳<sup>1</sup>,  
李炳生<sup>1</sup>, 朱亚滨<sup>1,2</sup>, 庞立龙<sup>1,2</sup>, 崔明焕<sup>1,2</sup>, 李远飞<sup>1,2</sup>

(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:** 针对未来先进核能装置候选结构材料在高温和应力等条件下抗辐照性能的评价与快速筛选的需求, 基于兰州重离子研究装置(HIRFL)可提供的离子束流条件, 设计制作了国内第一套高温应力材料载能离子辐照装置。该装置由束流扫描及探测系统、高温系统、应力系统、真空冷却系统和远程控制系统等5部分组成, 可以同时提供高温和拉/压应力下材料的离子束均匀辐照条件, 温区覆盖了室温至1200 °C范围, 拉/压应力范围为0~1176 N, x-y方向均匀扫描面积可大于40 mm×40 mm。利用该装置, 已经成功进行了多次高温和应力条件下载能离子辐照先进核能装置候选材料的实验研究, 并取得了初步成果。

**关键词:** 辐照装置; 高温; 应力; 材料

**中图分类号:** O571.33      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/ NuclPhysRev.30.01.094

### 1 引言

核能(包括裂变能和聚变能)被公认是唯一现实的既干净又经济的可大规模替代化石燃料的现代能源, 大力发展核能不仅是我国能源可持续发展中长期战略规划的重要组成部分, 而且世界上科技发达国家也都在大力开发先进核能利用。但是, 对在恶劣环境下长期工作的结构材料的使役性能退化问题一直没有得到解决, 成为制约先进核能发展的关键问题之一。

先进核能装置中, 结构材料长期处在高温(可达500 °C以上)、强辐照[位移损伤水平约为200 dpa(平均每个原子的离位次数)]以及高浓度的氢、氦掺杂、介质腐蚀、高应力负载等苛刻环境条件下, 这样材料会出现辐照肿胀与蠕变、辐照硬化与脆化、辐照疲劳乃至裂纹生长等现象, 导致材料的性能恶化, 直接影响先进核能装置的运行安全。现有的核能装置材料不能满足新一代先进核能系统的要求。因此, 开展极端环境条件下的材料研究, 寻找具有优异的机械力学和抗辐照耐腐蚀等性能的材料受到了人们的广泛关

注, 成为世界上核材料研究的前沿和热点。在过去的数十年中, 科学家利用多种技术手段(包括电子、离子和中子辐照等)开展了大量的关于核能装置结构材料中辐照损伤的模拟研究, 探索了相关过程及机理, 积累了很多实验数据和经验<sup>[1-19]</sup>。但是, 由于实验条件的限制, 特别是缺乏能量合适且通量足够强的中子源, 绝大部分工作偏重于模拟研究辐照引起的材料微观结构的变化和从不同侧面揭示辐照损伤产生及其演化的机理, 能同时开展辐照引起的材料微观结构和宏观性能变化的实验条件极少。

实验和理论研究表明, 高能重离子在材料中具有大的穿透深度(超过100 μm)、高的位移损伤截面(可高于堆中子辐照损伤截面的4个数量级以上), 因此, 重离子辐照是快速模拟研究核能装置结构材料中粒子辐照损伤效应的有效手段<sup>[20]</sup>, 特别是能对候选材料进行快速筛选评估。近年来, 中国科学院近代物理研究所的科研人员, 利用兰州重离子研究装置(HIRFL)提供的高能离子, 开展了一系列候选材料辐照性能评价

收稿日期: 2012-06-11    修改日期: 2012-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10835010, 91026002); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2010CB832902)

作者简介: 申铁龙(1983-), 男, 河南濮阳人, 博士生, 从事金属材料辐照损伤研究; E-mail: shentielong@impcas.ac.cn

通信作者: 王志光, E-mail: zhgwang@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>

和辐照损伤基础研究工作<sup>[21-23]</sup>。为了进一步满足日益增长的核能材料快速筛选和抗辐照性能评价研究的需求, 基于 HIRFL 可提供的离子束流条件, 我们研发了国内第一套适用于高温、应力环境中材料的载能离子辐照实验装置。该装置以电磁扫描技术实现束流大面积均匀化, 采用半拦截式离子束流在线测量方法实现了长时间辐照实验中强束流的可靠测量和记录, 利用辐射加热实现了样品高温的快速施加与调控, 应力系统提供拉/压应力可满足不同研究需求。整个装置采用计算机远程自动控制的工作模式, 操作简便快捷安全。

## 2 装置结构与性能指标

设计研制的高温应力材料离子辐照实验装置安装在 HIRFL 的 TR3 实验终端。该装置的整体构成如图 1

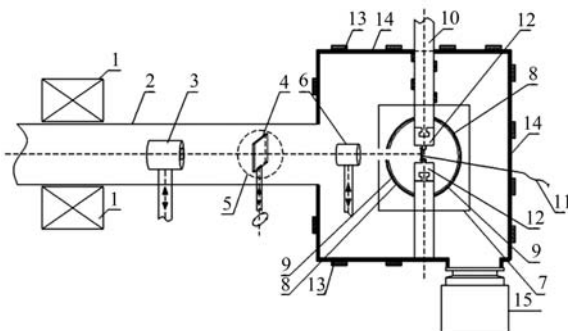


图 1 高温应力材料离子辐照装置结构示意图

1 电磁扫描设备, 2 束流传输真空管道, 3 半拦截式离子束流探测器, 4 荧光靶, 5 CCD束斑监测探测器, 6 拦截式离子束流绝对测量探测器, 7 内置腔室, 8 热辐射屏蔽层, 9 辐射加热源, 10 拉/压传感系统, 11 温度测量与自动控制系统, 12 拉/压样品夹具, 13 冷却水套, 14 真空腔室, 15 真空抽气系统。

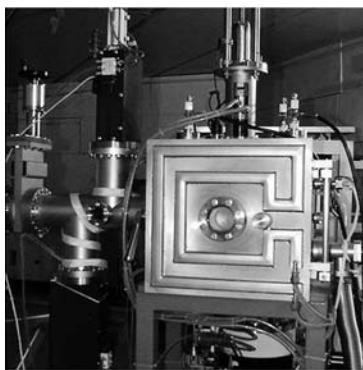


图 2 高温应力装置外部整体结构实物图

所示<sup>[24]</sup>, 主要包括束流扫描及探测系统、高温系统、

应力系统、冷却系统和远程控制系统等 5 部分。图 2 给出了辐照装置的实物图。

束流扫描及探测系统由离子束电磁扫描设备、束流传输真空管道、离子束流探测器和束斑监测设备等组成。其中, 离子束电磁扫描设备用于束斑大小和均匀度的控制, 图 3 给出了离子束的电磁扫描原理示意图。当带电粒子穿过磁场时, 在磁场的作用下带电粒子飞行方向发生偏转, 穿过磁场后沿出射方向作自由漂移飞行, 直至被阻止在偏移入射束流中心的某距离处。对于能量为  $E$ 、质量为  $M$  和电荷态为  $q$  的离子, 垂直入射到磁感应强度为  $B$ 、有效宽度为  $L_1$  的磁场中, 当不考虑带电粒子的相对论效应时, 如图 3 所示的束流扫描宽度  $d$  满足:

$$d = \frac{B[1 + L_1/(2L_2)]}{\sqrt{M \frac{E}{2}}} qL_1L_2 \quad (1)$$

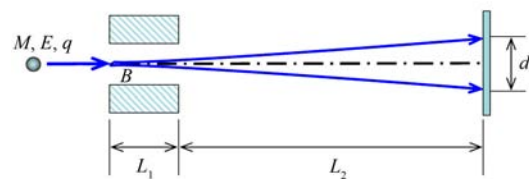


图 3 电磁扫描原理示意图

在实验中, 利用锯齿波形的交变电流在电磁铁中产生交变磁场, 通过  $x$ - $y$  二维方向安置的电磁铁实现  $x$ - $y$  二维方向的带电粒子束流偏转扫描。束流扫描的面积幅度由施加的交变电流值的大小决定。本装置施加至扫描电磁铁中的锯齿波电流的频率、强度可根据需要在  $0 \sim 100$  Hz 和  $0 \sim 100$  A 的范围内任意设置, 利用 CCD 监视器监测束斑位置, 保证样品处于均匀辐照面积内。辐照实验中可以实现均匀束流面积大于  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 束流扫描均匀度好于 95%。

离子束流强度通过拦截式绝对测量和半拦截式相对测量探测器进行在线束流测量。拦截式束流测量是将离子收集于法拉第筒中, 收集电量经束流积分器刻度计数, 然后根据得到的累积束流电量和离子的电荷态导出离子数目。图 4 给出了在线相对测量的半拦截式束流测量探测器示意图, 在每个法拉第筒前均有抑制束流激发次级电子发射的偏压环。该束流测量以均匀扫描的束流为基础, 以拦截式绝对束流测量为参照, 通过联合开孔的前法拉第筒和拦截式束流测量的

后法拉第筒来完成。在离子能量和扫描参数确定的前提下,在前后法拉第筒获得的均匀扫描束流的测量值的比值是确定的。因此,在正式辐照前测量前、后法拉第筒束流强度的比值 $k(k = I_2/I_1)$ ,在辐照过程中在线测量记录前法拉第筒的总束流相累积量并随时监测 $k$ 值,最终可得辐照到样品上的绝对束流通量。束流测量精度主要由束流扫描的均匀性和束流积分器的灵敏度决定,利用半拦截式相对测量探测器进行在线束流测量的误差约 10%。

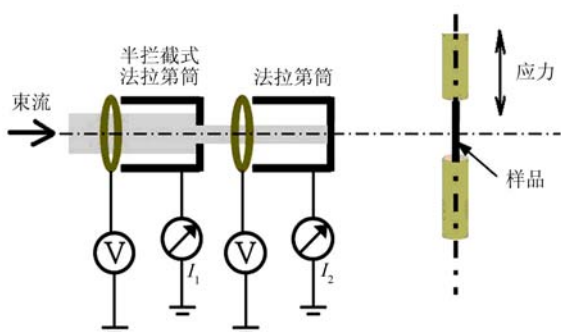


图 4 束流测量原理示意图

高温系统包括内置辐射加热源、外围热屏蔽层以及测温控温系统等,如图5所示,通过放置在样品背后的热电偶来实现温度实时测量,温度的控制系统通

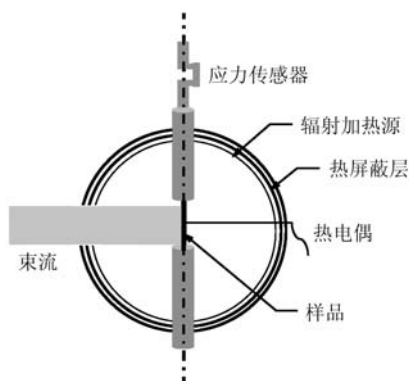


图 5 高温系统及应力系统原理示意图

过测量值的反馈与目标温度的设定自动实现,加热源外围设有多层热屏蔽层来防止热扩散,离子束流通过屏蔽层上面积为 $10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的小孔辐照样品。应力系统中固定样品的拉/压样品夹具直接相连拉/压力传感系统垂直位于内置腔室的中心。冷却系统通过真空腔室的外侧及拉/压传感系统上部外侧设置的循环冷却水套,用来对外部腔室进行降温,防止影响外部电线电缆,保证整个装置系统正常工作。

远程控制系统通过安置在数据获取室的计算机远程控制辐照实验室内的辐照装置,用以参数设置及实时监控。远程计算机控制界面如图6所示。经过多次实验检验,装置整腔室真空度可达 $2\times 10^{-5}\text{ Pa}$ ,温度最高可达 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,并且成功实现施加 $0\sim 120\text{ kg}$ 范围内拉/压力,施加拉/压力精度为 $0.98\text{ N}$ ,经过电磁扫描离子束流可以实现样品的均匀辐照,完全达到设计指标。



图 6 计算机远程控制界面

该辐照装置的设计具有以下几个特点:(1)通过调节前端放置的 $x$ 和 $y$ 方向扫描电磁铁的参数,使束斑的形状和束流的均匀性达到实验要求;(2)采用半拦截式离子束流在线测量方法,实现了大流强束流的长时间在线测量和记录,突破了传统的铝箔三明治束流测量方法的局限;(3)利用环绕周围的辐射加热源和外围热辐射屏蔽层进行加热与保温,既保证了高温的快速获得与调控,又使辐照样品时温度均匀,减少了温度梯度;(4)施加应力系统既可以施加拉应力,又可以施加压应力,满足了研究的不同需求;(5)利用数据获取室内的计算机远程自动控制,实时监控真空度、辐照温度、施加应力等情况,亦可进行对机械泵/分子泵抽气,前后法拉第筒及荧光靶的升降和辐照温度、施加应力参数的改变等操作,不仅简便快捷,而且安全。

### 3 辐照实验

利用研发的装置成功开展了多次在不同温度和施加拉力条件下的高能离子(Ar和Kr等)辐照候选结构材料[中国低活化马氏体钢(CLAM), T91钢等]的实验,研究材料辐照损伤的剂量效应、温度效应以及应力的影响等。

例如,在本装置上成功开展的 $792\text{ MeV}$ 能量的 $^{36}\text{Ar}$ 离子辐照处于高温应力条件下的CLAM钢

实验。辐照实验前,先通过远程控制实现加载样品温度 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,施加样品拉力 $167\text{ MPa}$ ,样品真空度保持在约 $10^{-5}\text{ Pa}$ 。采用从室温开始由较低温度分几步预置加温,避免样品初始加载温度超过设定的 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (从室温到 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可预置温度相差 $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的几个点, $10\text{ min}$ 内达样品温度 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。样品拉力在预置数值确定后,在 $1\text{ min}$ 内自动完成对样品应力的施加。正式辐照实验过程中,样品真空度保持不变。首先对束流施加 $x$ - $y$ 方向扫描,利用荧光靶确认扫描后束斑大小和位置,确保均匀束斑覆盖待辐照样品区域,同时尽可能充分利用束流(该实验中,样品有效辐照面积约 $10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ )。其次,利用半拦截式离子束流探测器进行 $k$ 值测量和累积辐照量的在线测量记录。另外,关于束流变化对样品温度影响的监测结果表明, $792\text{ MeV}$ 能量的 $^{36}\text{Ar}$ 离子束流强约为 $500\text{ nA}$ 时,突然加载或关闭束流,样品的温度变化小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。也就是说,开启或关闭束流样品的温度总波动幅度小于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而且通过自动调节加热功率约在一分钟内稳定。在长达 $300\text{ h}$ 的辐照实验过程中,装置各部分运行情况稳定,整体性能良好。图7给出了不同辐照条件下CLAM钢样品的应力-应变曲线。可以看出,未

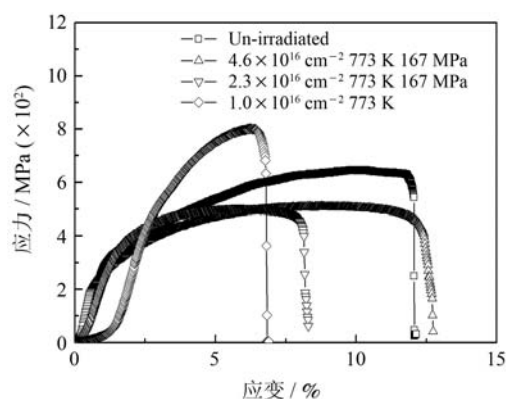


图7 Ar离子辐照CLAM钢应力-应变曲线

施加拉力辐照样品较未辐照样品抗拉强度增大,而延伸率降低;对于施加拉力样品,与未辐照样品相比,抗拉强度降低。在本实验辐照剂量范围内,样品的延伸率随辐照剂量的增加而增大。以上结果表明,利用新研制的装置,可以完成候选结构材料辐照性能的剂量效应、温度效应、应力效应以及其综合效应的研究,从而实现了对候选材料的抗辐照性能进行综合评价及筛选。

## 4 结论

基于HIRFL,我们设计制作了国内第一套高温应力材料载能离子辐照装置。该装置可以同时提供高温和拉/压应力下的材料离子辐照条件,温区覆盖了室温至 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围,拉/压应力范围为 $0\sim 1176\text{ N}$ ;  $x$ - $y$ 方向的电磁扫描频率 $0\sim 100\text{ Hz}$ ,可实现在大于 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 的面积内样品的均匀辐照。利用该装置已经进行了多次高温应力条件下载能离子辐照材料的实验研究,并获得了初步的成果。通过已经开展的多次实验验证,该装置整体性能稳定,完全满足材料的高温应力条件下辐照实验研究的要求。该装置的建成,不仅显著地改善了实验条件,而且将有力地促进我国先进核能装置候选结构材料辐照损伤效应模拟研究水平的提高。

## 参考文献 (References):

- [1] KLUEH R L, ALEXANDER D J. *J Nucl Mater*, 1995, **218**: 151.
- [2] KAI J J, KLUEH R L. *J Nucl Mater*, 1996, **230**: 116.
- [3] WAKAI E, MIWA Y, HASHIMOTO N, *et al.* *J Nucl Mater*, 2002, **307-311**: 203.
- [4] MAZIASZ P J. *J Nucl Mater*, 1984, **122**: 472.
- [5] KLUEH R L, KAI J J, ALEXANDER D J. *J Nucl Mater*, 1995, **225**: 175.
- [6] SENCER B H, KENNEDY J R, COLE J I, *et al.* *J Nucl Mater*, 2009, **393**: 235.
- [7] JIA X, DAI Y. *J Nucl Mater*, 2006, **356**: 105.
- [8] LEE E H, HUNN J D, RAO G R, *et al.* *J Nucl Mater*, 1999, **271-272**: 385.
- [9] JIA X, DAI Y. *J Nucl Mater*, 2003, **318**: 207.
- [10] TAKAOKA A, HASEGAWA T, YOSHIDA K, *et al.* *Ultramicroscopy*, 2008, **108**: 230.
- [11] TSUCHIDA H, TAKAHASHI H. *J Nucl Mater*, 1996, **239**: 112.
- [12] LEWIS M B, ALLEN W R, BUHL R A, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 1989, **43**: 243.
- [13] SERRUYS Y, RUAULT M O, TROCELLIER P, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 2005, **240**: 124.
- [14] HAMADA S, MIWA Y, YAMAKI D, *et al.* *J Nucl Mater*, 1998, **258-263**: 383.
- [15] KOHNO Y, ASANO K, KOHYAMA A, *et al.* *J Nucl Mater*, 1986, **141-143**: 794.
- [16] KOHYAMA A, KATOH Y, ANDO M, *et al.* *Fusion Eng Des*, 2000, **51-52**: 789.
- [17] LISOWSKI P W, SCHOENBERG K F. *Nucl Instr and Meth A*, 2006, **562**: 910.

- [18] DAI Y, FOUCHER Y, JAMES M R, *et al.* J Nucl Mater, 2003, **318**: 167.
- [19] MAROCHOV N, GOODHEW P J. J Nucl Mater, 1988, **158**: 81.
- [20] WANG Zhiguang. Nuclear Physics Review, 2002, **23**(2): 155(in Chinese).  
(王志光. 原子核物理评论, 2006, **23**(2): 155.)
- [21] WANG Z G, CHEN K Q, LI L W, *et al.* J Nucl Mater, 1999, **272**: 306.
- [22] ZHANG C H, JANG J, KIM M C, *et al.* J Nucl Mater, 2008, **375**: 185.
- [23] ZHANG C H, CHEN K Q, WANG Y S, *et al.* J Nucl Mater, 1998, **263**: 1623.
- [24] WANG Zhiguang, YAO Cunfeng. Energetic Ion Irradiation Equipment under High Temperature and Stress: China, 201010046313.2[P].[2011-11-02](in Chinese).  
(王志光, 姚存峰. 高温-应力载能离子辐照装置: 中国, 201010046313.2[P].[2011-11-02].)
- [25] JUNG P, CHEN J, KLEIN H. J Nucl Mater, 2006, **356**: 88.
- [26] CHEN J, JUNG P, RODIG M. J Nucl Mater, 2005, **343**: 227.

## An Energetic Ion Irradiation Equipment Based on HIRFL for Materials under High Temperature and Stress

SHEN Tie-long<sup>1, 2</sup>, WANG Zhi-guang<sup>1</sup>, YAO Cun-feng<sup>1</sup>, SUN Jian-rong<sup>1</sup>, SHENG Yan-bin<sup>1</sup>, WEI Kong-fang<sup>1</sup>,  
LI Bing-sheng<sup>1</sup>, ZHU Ya-bin<sup>1, 2</sup>, PANG Li-Long<sup>1, 2</sup>, CUI Ming-huan<sup>1, 2</sup>, LI Yuan-fei<sup>1, 2</sup>  
(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 expedite the evaluation of properties of irradiated materials and the selection of candidate materials for future nuclear energy systems, we developed a specific ion irradiation equipment installed on the Heavy Ion Research Facility of Lanzhou (HIRFL) for materials under high temperature and stress. This equipment consists of ion beam scanning and detector system, high temperature load system, stress load system, water cooling system as well as telecommunication and control system. It can supply a wide range of temperature (from room temperature to 1 200 °C) and stress (pull/push from 0 to 1 176 N) simultaneously for materials under ion irradiation. The *x-y* scanning area with high uniformity is larger than 40 mm×40 mm. This is the first suit of ion irradiation equipment made in China that can be used to study co-operating effects of high temperature and stress in an irradiated material. It has been successfully used several times for materials irradiations under high temperatures and stress, which proved that the new equipment has very good performances in experiments.

**Key words:** irradiation equipment; high temperature; stress; material

**Received date:** 11 Jun. 2012; **Revised date:** 21 Oct. 2012

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10835010, 91026002); National Basic Research Program of China (973 Program)(2010CB832902)

**Corresponding author:** WANG Zhi-guang, E-mail: zhgwang@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>