

文章编号: 1007-4627(2006)02-0167-03

# 聚变堆候选金属材料的情性气体离子辐照损伤的研究\*

张崇宏

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 综述了有关核聚变反应堆材料的辐照损伤问题的研究, 主要包括国产 316L 奥氏体不锈钢中氦的扩散与氦泡形核生长的研究、316L 及低活化 FeCrMn 合金的高能 Ar 离子辐照缺陷与空洞肿胀的研究、近期开展的低活化马氏体钢和氧化物颗粒弥散强化合金的高能 Ne 离子辐照损伤和效应的研究成果。

**关键词:** 聚变堆候选材料; 辐照损伤; 氦泡; 低活化材料

**中图分类号:** O571 **文献标识码:** A

## 1 引言

材料问题关系到聚变堆等先进核能装置的建设 and 安全运行, 因此一直受到人们的关注。随着近年来国际上对先进核能如第四代反应堆、聚变堆重视的增加, 对反应堆严酷辐射环境中的材料问题研究变得更加迫切。自 20 世纪 90 年代以来, 我们围绕核聚变反应堆材料的辐照损伤问题, 在以下三方面展开了较系统的研究工作。

## 2 奥氏体不锈钢中氦的扩散与氦泡的形成机理研究

未来核聚变反应堆中金属结构材料由于高浓度辐照缺陷和核反应产物氦(He)的积累会发生严重肿胀和脆化。氦在材料中的扩散、与其它缺陷的相互作用以及氦泡的形成机理是材料辐照损伤的一个重要问题, 因为氦的积累会加速空洞肿胀的发生, 导致高温晶界型脆化以及 BCC 结构材料低温延脆转变点的显著上升<sup>[1]</sup>。在我们的研究中, 用透射电镜、质子弹性背散射等实验方法结合理论分析研究了氦离子辐照的多种奥氏体不锈钢(316L 不锈钢的不同预处理样品、低活化 Fe-Cr-Mn 合金等)以及金属 Mo 在室温至  $0.5T_m$  温区( $T_m$  为此材料熔点)中氦泡形核机理、氦泡核的迁移行为以及相应的能量关

系。主要研究进展简述如下。

对室温至 600 °C 范围 MeV 能量的氦离子辐照的奥氏体不锈钢样品中微观结构变化做了系统的研究, 发现在 300—400 °C 之间氦泡的形核生长机制存在转变; 在低温区域氦泡的微结构不随注入温度显著变化, 表明氦泡的形核生长受低激活能的或非热的过程制约; 而高温区域氦泡的微结构随注入温度显著变化, 由表观激活能的数据和氦泡数密度的数据推断出氦泡的形核生长受自间隙子/氦原子置换机制的扩散方式制约。316L 不锈钢不同预处理样品的分析表明, 样品的冷轧预处理只在高温区域显著增强了氦泡的形核而抑制了其生长, 而在低温区域对氦泡的微结构无显著影响。

进一步围绕 300—400 °C 之间氦泡的形核生长机制转变点, 开展了中能氦离子阶梯变温辐照实验, 旨在探讨这个转变点处氦泡形成初期的稳定性问题。与恒温注入氦离子的样品中氦泡的微结构对比发现, 尽管 300 °C/550 °C 阶梯变温注入氦的样品中第一阶段(300 °C)的注入剂量仅为第二阶段(550 °C)的 1/500, 但阶梯变温注入氦的样品中氦泡的微结构与在 550 °C 恒温注入氦的样品相比, 存在很大差别: 氦泡数密度增大 1 个数量级以上, 而平均有效直径减小为后者的 1/4。这一事实说明, 阶梯变温注入氦的样品中第一阶段(300 °C)氦的小剂量

收稿日期: 2005-11-20; 修改日期: 2006-01-12

\* 基金项目: 国家“八六三”计划裂变-聚变混和堆子课题; 中国科学院重点课题; 国家自然科学基金委员会联合基金资助项目(10376039); 教育部北京大学重离子物理开放实验室基金资助项目

作者简介: 张崇宏(1967-), 男(回族), 甘肃临夏人, 博士, 研究员, 从事先进反应堆材料研究; E-mail: c. h. zhang@impcas. ac. cn

注入所形成的高密度泡核在样品升温至 550 °C 时仍具有相当的稳定性并在第二阶段(550 °C)氦的注入过程中吸收空位和氦原子而长大,从而导致形成氦泡高的终态数密度。依氦泡的迁移合并模型,由实验数据得到了泡核(含 ~10 氦原子)在 550 °C 的迁移率小于  $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}$ ,这个值比相同温度下空位的迁移率小近 6 个数量级。

用增强质子背散射方法分析了氦离子辐照的奥氏体不锈钢和纯钼中氦的深度分布对辐照温度的依赖关系。结果发现,氦的深度分布的浓度峰值在室温—300 °C 温区随注入温度无明显变化,而  $\geq 425$  °C 温区随注入温度的上升显著下降。表明在 300—425 °C 之间氦原子的扩散方式发生了变化,高温区域发生了氦原子的长程迁移。研究发现这个转变点与氦泡微结构的转变温度点一致,由此可以判断这个转变点对应氦原子从空位或空位集团的大量释放,得到相应转变的激活能约 2.4 eV。

基于辐照条件下缺陷演化的速率方程研究了 300—900 K 温区氦离子注入的不锈钢中点缺陷、间隙型位错环和氦泡的变化行为。模型中假设氦泡的形核受自间隙子/氦原子置换机制的扩散方式制约,并采用一个普适的扩散模型表式,并假设氦泡的生长由内部压力驱动。计算结果表明,氦原子的有效扩散系数在高于 600 K 的温区趋近于空位的扩散系数,而在较低温区显著偏离空位的扩散系数并显示弱的温度依赖性;相应地,氦泡的微结构(数密度、平均半径、泡内压力)以及氦泡在位错上形核的比例在 600—700 K 之间发生明显变化,这个转变点对应于单个空位开始发生显著迁移的温度。理论结果与增强质子背散射分析结果以及氦泡微结构的透射电镜分析结果符合。

上述关于金属中氦的主要结果已经发表在本领域相关的核心期刊上<sup>[2-8]</sup>,并有 2 篇详细的综述性文章介绍这个方面的工作<sup>[9, 10]</sup>。

### 3 低活化 Fe-Cr-Mn 合金中高能惰性气体离子辐照引起空洞肿胀的研究

开展了国产低活化 Fe-Cr-Mn 合金在 92 MeV 高能 Ar 离子辐照下的微结构变化和肿胀行为的研究。利用兰

州重离子加速器国家实验室提供的 92 MeV 能量的 Ar 离子,在固溶处理的 Fe-Cr-Mn 中引入 50—100 dpa(每个原子的位移次数)的峰值损伤,借助透射电子显微镜研究了空洞的浓度和尺寸与辐照剂量的关系,获得了空洞肿胀的数据,并且研究了偏析相对空洞形成的作用。为国内研制的这类低活合金第一次提供了高能重离子辐照证据。主要的研究结果已经发表在本领域核心期刊上<sup>[11, 12]</sup>。

### 4 低活化马氏体钢与铁素体 ODS 合金的辐照脆性机理研究

近年来,新型的铁素体/马氏体钢、氧化物弥散强化(ODS)合金以其高的抗辐照性能和高温强度得到人们重视,成为用于高温、强辐射等环境(如聚变堆)的重要候选结构材料。其高温高剂量辐照条件下的结构与性能变化数据是这类材料进一步改进的重要实验依据。

我们利用兰州重离子加速器国家实验室的高能离子束辐照条件,研究了两种铁素体/马氏体钢、两种铁基 ODS 合金和一种高镍奥氏体钢在高温、高离位损伤和高浓度惰性气体产生情形的效应。实验利用 HIRFL-SFC 装置提供的  $^{20}\text{Ne}$  离子(122 MeV)和  $^{12}\text{C}$  离子(84 MeV),每种样品在不同温度(300—600 °C 范围)辐照至不同剂量(1—10 dpa 范围)。用透射电镜分析了材料的结构变化。研究发现了 ODS 合金高的辐照稳定性,表现在弥散氧化物纳米颗粒界面对点缺陷的强复合作用和对惰性气体原子的捕获作用以及大量低角晶界在抗氦脆方面的优势和潜力。相比之下,铁素体/马氏体钢样品在高温高剂量情形表现出可观测的空洞肿胀。实验也发现高镍合金表现出较好的稳定性,反映其在高温强辐射环境的应用潜力。

这方面的部分工作还在进行中,我们计划进一步研究新型金属材料微结构和力学性能变化的相关性,建立对新型金属材料辐照性能的合适的评价方法。

致谢 感谢兰州重离子加速器国家实验室为我们的实验研究提供了基本的辐照条件。

## 参 考 文 献:

- [1] Ullmaier H. *Radiation Effects*, 1983, **78**: 1.
- [2] Zhang C H, Chen K Q, Wang Y S, *et al.* *J Nucl Mater*, 1997, **245**: 210.
- [3] Zhang C H, Chen K Q, Wang Y S, *et al.* *J Nucl Mater*, 1998, **263**: 1 623.
- [4] Zhang C H, Chen K Q, Wang Y S, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 1998, **B135**: 256.
- [5] Chen K Q, Zhang C H, Quan J M, *et al.* *J Nucl Mater*, 1996, **240**: 70.
- [6] Chen K Q, Wang Y S, Quan J M, *et al.* *J Nucl Mater*, 1994, **212**: 345.
- [7] Zhang C H, Chen K Q, Zhu Z Y. *Nucl Instr and Meth*, 2000, **B169**: 64.
- [8] 张崇宏, 陈克勤, 王引书等. *物理学报*, 1997, **46**(9): 1 774.
- [9] 张崇宏, 陈克勤, 王引书等. *原子核物理评论*, 2001, **18**(1): 50.
- [10] Zhang C H, Chen K Q, Wang Y S, *et al.* In: *Proc. 7th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems & Fission and Fusion Engineering*. Eds. Wang Z G, Zhu Z Y, Jin G M. World Scientific Publishing Co., 2003, 53—63.
- [11] Zhang C H, Wang Y S, Chen K Q, *et al.* *Mater Sci Forum*, 2004, **475—479**: 1 459.
- [12] Zhang C H, Chen K Q, Wang Y S, *et al.* *J Nucl Mater*, 2000, **283—287**: 259.

## Damage Production by Inert-gas-ion Irradiation in Some Candidate Materials to Fusion Reactors\*

ZHANG Chong-hong

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** This paper gives a review of our recent studies on the irradiation damage induced by energetic inert-gas-ions in metallic materials candidate to fusion reactors. The work includes the study of helium diffusion and helium bubble formation in 316L stainless steels, the study of void formation and swelling in the low-activation Fe-Cr-Mn alloy irradiated with high-energy Ar ions, the study of irradiation damage in some low-activation Fe-based steels and ODS alloys by high-energy Ne ions.

**Key words:** fusion reactor; irradiation damage; helium bubble; low-activation material

\* **Foundation item:** Fission-Fusion Hybrid Reactor of China 863 Project; Key Project from Chinese Academy of Sciences; NSFC-IAP CM Allied Foundation(10376039); Key Laboratory of Heavy Ion Physics(Peking University), Ministry of Education