

等离子体/热负荷/重离子辐照协同作用下钨基壁材料损伤机制研究

袁悦, 郭望果, 朱秀丽, 王诗维, 程龙, 吕广宏

北京航空航天大学物理学院先进核能材料研究团队, 北京, 102206

Email: yueyuan@buaa.edu.cn

钨被认为是聚变装置中面对等离子体材料的重要候选材料。服役过程中将受到氢氦等离子体、高热负荷、高能中子三重辐照的考验。本研究团队近年来围绕钨基壁材料辐照损伤行为开展了系统实验研究, 揭示了钨基材料在单一和多重辐照因素下损伤行为物理机制及其对燃料滞留的影响。

针对高热负荷下钨熔体中的空穴现象及其导致的熔体溅射问题, 揭示其本质为基于异质形核的自沸腾行为, 发现氧化镧掺杂可使钨凝固组织致密、熔体溅射减少, 提出通过氧化镧气化逸出减少钨蒸气气泡形核核心从而抑制钨熔体自沸腾的物理机制, 从材料的组织成分设计的角度解决熔体溅射问题[1]。然而, 第二相氧化镧在高热负荷中发生的相变将导致氦滞留及热脱附行为的变化, 相变产生的镧单质作为吸氢相将作为新的捕获点, 使氦的热脱附温度升高, 总氦滞留量增加[2]。

针对氦等离子体辐照下钨材料表面起泡行为, 基于微观结构观察及位错理论, 揭示 $\{001\}\langle 001\rangle$ 刃位错氦泡微观形核机制, 提出位错行为对于氦致起泡行为的重要性[3]。此外, 氦泡形成将进一步诱导位错增殖及缠结, 导致氦滞留量进一步增加, 基于大量实验获得表面氦致起泡数密度对于氦滞留的线性影响规律。

利用重离子辐照模拟中子辐照, 研究重离子及氦等离子体辐照对空位型缺陷及氦行为的影响, 发现重离子辐照将导致大量空位型缺陷产生, 且从实验角度此证实了氦对空位型缺陷的占据行为, 使得损伤钨中氦滞留量显著增加[4]。同时, 大量空位型缺陷的形成将稀释每个氦泡形核点中的氦浓度, 对表面氦泡的形成起到抑制作用。

这些研究结果将深化对聚变辐照环境下钨基材料损伤行为的认识, 为评估聚变堆中钨基材料服役性能及设计高性能聚变堆材料提供重要参考。

关键词: 等离子体; 高热负荷; 重离子; 协同效应; 损伤机制; 氦滞留

参考文献

- [1] Yue Yuan, Wangguo Guo, Peng Wang, Shilian Qu, Wei Liu, Guangnan Luo, Long Cheng, Guang-Hong Lu, Influence of surface melting on the deuterium retention in pure and lanthanum oxide doped tungsten, *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 016022.
- [2] Yue Yuan, Ben Xu, Baoqin Fu, Henri Greuner, Bernd Boeswirth, Haiyan Xu, Chun Li, Yuzhen Jia, Shilian Qu, Guang-Hong Lu, Wei Liu, Suppression of cavitation in melted tungsten by doping with lanthanum oxide, *Nuclear Fusion*, 2014, 54 (8): 083026.
- [3] Wangguo Guo, Lin Ge, Yue Yuan, Long Cheng, Shiwei Wang, Xiaona Zhang, Guang-Hong Lu*, $\langle 001\rangle$ edge dislocation nucleation mechanism of surface blistering in tungsten exposed to deuterium plasma, *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 026005.
- [4] Xiuli Zhu, Ying Zhang, Long Cheng, Yue Yuan, Gregory De Temmerman, Baoyi Wang, Xingzhong Cao, Guang-Hong Lu, Deuterium occupation of vacancy-type defects in argon-damaged tungsten exposed to high flux and low energy deuterium plasma, *Nuclear Fusion*, 2016, 56 (3): 036010.