



反应堆压力容器钢A508-3辐照硬化的剂量率效应研究

牛孟珂 韩旭孝 杨义涛 张崇宏

Effect of the Dose Rate on Irradiation Hardening of Reactor Pressure Vessel Steel A508-3

NIU Mengke, HAN Xuxiao, YANG Yitao, ZHNAG Chonghong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021016>

引用格式:

牛孟珂, 韩旭孝, 杨义涛, 张崇宏. 反应堆压力容器钢A508-3辐照硬化的剂量率效应研究[J]. *原子核物理评论*, 2021, 38(4):438-443. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2021016

NIU Mengke, HAN Xuxiao, YANG Yitao, ZHNAG Chonghong. Effect of the Dose Rate on Irradiation Hardening of Reactor Pressure Vessel Steel A508-3[J]. *Nuclear Physics Review*, 2021, 38(4):438-443. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2021016

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

16Cr-ODS铁素体钢的初始氧化物弥散相结构对抗辐照硬化和Ne离子脆化性能的作用研究

The Effect of Initial Microstructure of the Oxides on Irradiation Hardening/Embrittlement Behavior of 16Cr-ODS Steel
原子核物理评论. 2021, 38(2): 203-209 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020052>

冷轧和退火对V-5Cr-5Ti合金组织结构和抗辐照硬化性能的影响

The Effect of Cold Rolling and Annealing on the Microstructure and Irradiation Hardening Resistance of V-5Cr-5Ti Alloys
原子核物理评论. 2021, 38(3): 319-326 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021006>

Kr²⁺辐照导致的Ca₈LnNa(PO₄)₆F₂(Ln=La,Nd和Sm)磷灰石结构陶瓷材料的非晶转变

Amorphization of Ca₈LnNa(PO₄)₆F₂(Ln=La, Nd and Sm) Apatite Ceramics Induced by Kr Ion Irradiation
原子核物理评论. 2019, 36(2): 224-229 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.224>

两种国产低活化的铁素体/马氏体钢的He离子辐照硬化研究

Helium-implantation Induced Hardening of Two Low-activation Ferritic/Martensitic Steels of China
原子核物理评论. 2017, 34(2): 219-225 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.219>

双极器件ELDRS效应研究进展

Progress in ELDRS Effect of Bipolar Devices
原子核物理评论. 2019, 36(4): 477-483 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.477>

超临界水冷堆燃料包壳材料的辐照损伤研究进展

Research Development of Irradiation Damage on Fuel Cladding Materials for SCWR
原子核物理评论. 2017, 34(2): 211-218 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.211>

文章编号: 1007-4627(2021)04-0438-06

反应堆压力容器钢 A508-3 辐照硬化的剂量率效应研究

牛孟珂^{1,2}, 韩旭孝^{1,2}, 杨义涛^{1,2,†}, 张崇宏^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 针对不同剂量率对国产反应堆压力容器钢 (Reactor Pressure Vessel, RPV) A508-3 辐照硬化的影响, 利用 3.5 MeV 的 Fe 离子在 3 种不同剂量率 (0.1, 0.5 和 1.0 dpa/h) 下将样品辐照至 4 个不同剂量点 (0.1, 0.3, 1.0 和 3.0 dpa), 采用纳米压痕技术表征样品在不同辐照条件下的硬化效应。结果表明, 在高剂量率 (1.0 dpa/h) 下, 材料的硬度随剂量的增大快速增加, 在 0.3 dpa 以后逐渐达到饱和; 中剂量率 (0.5 dpa/h) 和低剂量率 (0.1 dpa/h) 下, 样品硬度随剂量的变化趋势与高剂量率相似, 但在 0.3 dpa 以后材料的硬度随剂量仍在缓慢增加。在辐照剂量低于 0.3 dpa 时, 不同剂量率引起的辐照硬化差异较小, 但在辐照剂量大于 0.3 dpa 时, 不同剂量率辐照下的硬化效应差异显著。数据拟合结果表明, 在实验剂量范围内辐照硬化的饱和值随剂量率的增加呈减函数关系。

关键词: 反应堆压力容器钢; A508-3; 辐照硬化; 离子辐照; 剂量率效应

中图分类号: O517.6

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.38.2021016

1 引言

反应堆压力容器 (Reactor pressure vessel, RPV) 是反应堆堆芯与外部环境之间的重要屏障, 也是反应堆服役全寿命周期不可更换的部件。反应堆压力容器在高温、高压、强中子辐照环境下长期服役 (现役压水堆服役工况: 压力 15.5 MPa, 温度 290 °C, 中子辐照剂量 $10 \times 10^{19} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$)。由于服役过程中的不可更换性, 反应堆压力容器的安全性备受关注, 是反应堆延寿评估中需要考虑的重要问题。服役过程中, 快中子 ($E \geq 1.0 \text{ MeV}$) 辐照会使 RPV 材料中产生离位损伤, 并伴随溶质原子析出。离位损伤和析出相的累积会导致辐照硬化与辐照脆化的发生, 从而引起材料性能退化, 影响反应堆的安全运行。

针对 RPV 钢中的辐照损伤问题, 借助试验堆中子辐照条件以及加速器离子辐照条件开展了大量的研究。研究表明, 辐照引起 RPV 钢损伤的主要缺陷是基体缺陷 (空位/间隙子的团簇、位错环、空洞等)、富 Cu 原子团簇以及 P 元素在晶界的偏析等^[1-5]。中子辐照实验可以提供拉伸、冲击、断裂韧性等标准试验结果, 但是实验周期长、样品具有放射性, 后期样品的测试分析

需要在热室进行, 试验成本高。而离子辐照实验参数精确可控、试验周期短、样品放射性低, 后期样品测试分析无需特殊环境要求。因此, 在机理研究方面常采用离子辐照方法开展实验研究。但是, 中子辐照产生的损伤是一个长期积累的过程, 而离子辐照能够在短时间内达到相同的辐照损伤水平, 两者的损伤速率 (剂量率) 有显著差异, 这也是中子辐照与离子辐照实验等效性研究的主要关注点之一^[6-8]。

针对剂量率对 RPV 辐照硬化和脆化的影响, 前人已经开展了部分研究。对于高铜 RPV 钢, 辐照产生的缺陷以富铜析出相和基底缺陷为主。不同辐照剂量率不影响硬化的饱和值, 但在达到硬化饱和前, 相较于高剂量率辐照, 低剂量率能够产生更显著的硬化效应, 有明确的剂量率效应存在^[9-11]。对于低铜 RPV 钢 (Cu 的质量分数小于 0.08%), 辐照产生的缺陷主要以基体缺陷为主。中子通量小于等于 $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时未观察到剂量率效应; 中子通量大于 $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 现有的实验结果不一致, 尚无统一的结论^[12-13]。离子辐照常用来研究 RPV 材料的辐照效应^[14-15], 但是对离子辐照过程中的剂量率效应研究较少。本项工作以国产低铜 RPV 钢 (A508-3) 作为研究对象, 利用 3.5 MeV 的

收稿日期: 2021-02-24; 修改日期: 2021-03-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0702200); 国家基金委大科学装置联合基金项目 (U1532262)

作者简介: 牛孟珂 (1995-), 女, 河北涉县人, 硕士研究生, 从事凝聚态物理研究; E-mail: niuMengke@impcas.ac.cn

† 通信作者: 杨义涛, E-mail: yangyt@impcas.ac.cn.

Fe 离子辐照开展了不同剂量率下的辐照实验, 研究了剂量率对辐照硬化的影响。

2 实验

实验材料选用国产压力容器钢 A508-3, 主要成分为 Fe-1.35Mn-0.74Ni-0.48Mo-0.20Si-0.17C-0.027Cu-0.09Cr-0.07V-0.05P-0.02S(质量分数), 其制备工艺详见文献 [16]。从热处理后的锻件切割用于辐照实验的样品, 样品尺寸为 10mm×10mm, 厚度为 0.5mm。辐照前, 先依次使用 800-2400 目碳化硅砂纸对样品表面进行抛磨, 随后用 SiO₂ 悬浮液 (0.5 μm) 进行精抛得到平整表面。

辐照实验在中国科学院近代物理研究所 320kV 综合实验平台上完成。实验采用 3.5 MeV 的 Fe 离子进行辐照, 辐照过程样品温度保持在 (290±5) °C(采用烘烤方式加热, 样品台后面固定热偶实时监测温度变化)。根据蒙特卡罗模拟程序 SRIM 2013 计算 (Fe、Mn 和 Ni 的离位阈能选择 40 eV), 3.5 MeV 的 Fe 离子在样品中产生的离位损伤 (displacement per atom, dpa) 随深度的分布如图 1 所示, 损伤峰值位于 1.0 μm 处。为了研究辐

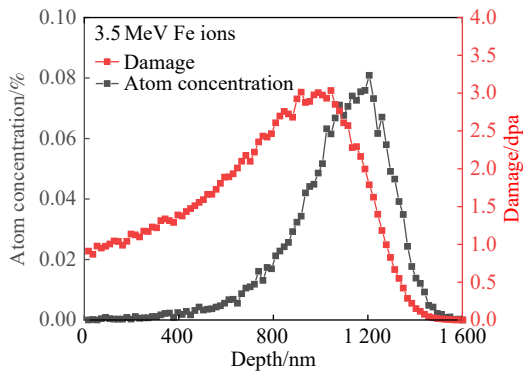


图 1 (在线彩图) 3.5 MeV 的 Fe 离子辐照在 RPV 钢中的产生的离位损伤和原子浓度随深度分布的 SRIM 模拟结果

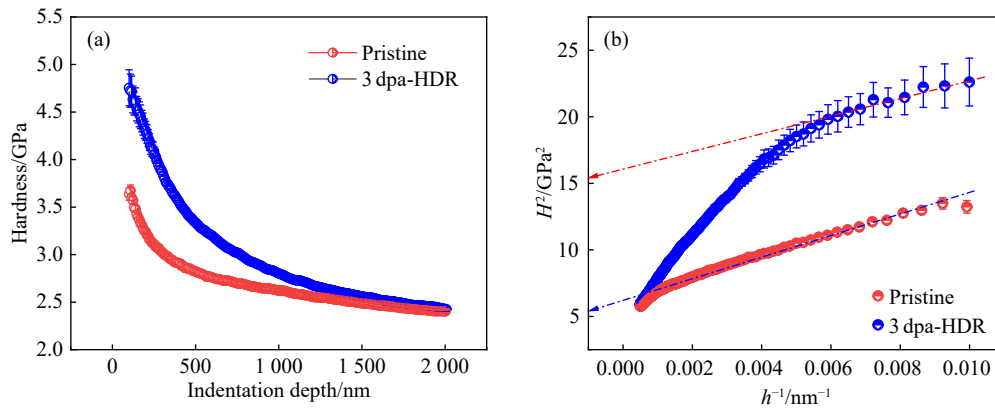


图 2 (在线彩图) 空白样和高损伤速率 (1.0 dpa/h) 辐照下的样品纳米压痕实验得到的硬度随压入深度曲线 (a) 及 H^2-1/h 曲线 (b)

照过程中的剂量率效应, 实验中根据 SRIM 的计算结果, 通过调整束流的强度使剂量率分别为 0.1(低剂量率, low dose rate, LDR)、0.5(中剂量率, Medium Dose Rate, MDR) 和 1.0 dpa/h(高剂量率, High Dose Rate, HDR)。在每一种剂量率下, 样品辐照至 4 个不同剂量, 其损伤峰所对应的剂量分别为 0.1, 0.3, 1.0 和 3.0 dpa。

利用纳米压痕技术对辐照前后的样品硬度进行表征。纳米压痕测试 (Nano Indenter G200) 采用连续刚度测量模式 (Continuous Stiffness Measurement, CSM) 来获取材料的纳米硬度 H 随压头压入深度 h 的变化关系 [17-18]。纳米压痕测试采用 Berkovich 压头, 应变率 0.05 s^{-1} , 频率 45 Hz, 谐波位移 2.0 nm, 最大压入深度为 2000 nm。在每个样品辐照面不同位置测量 10 个数据点 (两点之间距离大于 70 μm), 最终材料的硬度随深度的曲线为这 10 次测试结果的平均值。

3 结果

图 2(a) 给出了空白样和高剂量率 (1.0 dpa/h) 辐照样品的纳米压痕数据。从图中可看出, 材料的硬度先随压入深度的增加快速降低, 后随压入深度的增加有逐渐趋于饱和的趋势。材料的硬度随深度的增加而降低的现象被称为“压痕尺寸效应 (Indentation Size Effect, ISE)” [17, 19]。为描述压痕尺寸效应, Nix 和 Gao 基于几何必需位错理论 (Geometrically Necessary Dislocation, GND) 提出了 Nix-Gao 模型 [19], 该模型可以从实验数据得到不依赖于压入深度的硬度值 H_0 (即等效体硬度),

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{1 + \frac{h_0}{h}}, \quad (1)$$

其中: h_0 为特征长度, 与材料以及压头几何参数相关; h 为压入深度; H 为对应深度处的硬度值。从公式可以

发现, H^2 和 $1/h$ 具有线性关系。对实验测得的数据进行处理得到 H^2-1/h 曲线, 通过线性拟合可得到不依赖于深度变化的硬度 H_0 的值, 如图 2(b) 所示。从图中可以看出, 未辐照样品的硬度数据的平方与压入深度的倒数呈现出良好的线性关系, 这表明 Nix-Gao 模型在处理纳米硬度数据时具有很好的适用性。在辐照样品结果中, 能够观察到硬度数据的平方与压入深度的倒数有明显的双线性关系。这主要是由于测试过程中, 随着压头压入深度的增加, 塑性变形区从辐照层逐渐扩展到了未辐照层, 相应的较深区域的硬度平方随深度倒数的线性关系偏离了近表面辐照层对应的线性关系。因此, 通过拟合

近表区域的数据可以获得辐照层的硬度值。

图 3(a) 是通过 Nix-Gao 模型得到的不同剂量率下辐照引起的样品硬度的增量 ΔH ($\Delta H = H_{0_irradiated} - H_{0_pristine}$) 随剂量的依赖关系。从图 3(a) 可以看出, 在 3 种剂量率下辐照硬化值 (ΔH) 均先随剂量的增大快速增加, 后随剂量增大的趋势逐渐减缓。相较于低剂量率和中剂量率辐照, 在剂量大于 0.3 dpa 时, 高剂量率辐照的辐照硬化值随剂量的增加基本趋于饱和。同时可看到, 辐照硬化有明显的剂量率效应存在。在实验剂量范围内, 辐照硬化效应随剂量率的增加呈递减关系, 不同剂量率下产生的硬化效应的差异随剂量的增大而增大。

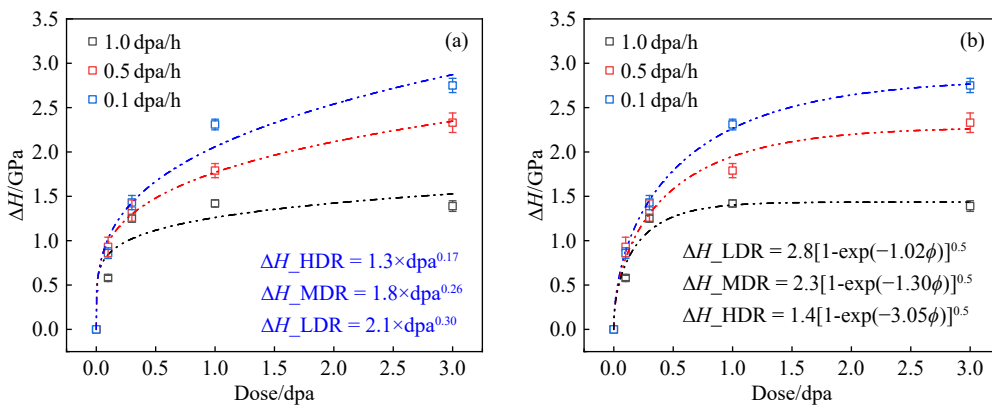


图 3 (在线彩图) 对不同剂量率下硬化增量 ΔH 随剂量依赖关系的拟合结果
(a) 幂函数; (b) 指数函数。

通常认为 RPV 材料的硬化随剂量的变化符合幂函数关系 [见式 (2)],

$$\Delta H = h\varphi^n, \quad (2)$$

其中: φ 是剂量; h 和 n 为拟合的常数。利用幂函数对 3 种剂量率下辐照硬化随剂量的数据进行拟合, 结果如图 3(a) 所示。由拟合结果可知, 相较于高剂量率, 中剂量率和低剂量率曲线拟合良好, 高剂量率的拟合曲线与实验数据点偏离较大, 这主要是在剂量大于 0.3 dpa 时, 辐照引起的硬化基本进入了饱和阶段。

考虑到辐照硬化的饱和现象, Makin 等 [20] 提出了利用式 (3) 对辐照硬化的剂量依赖关系进行拟合:

$$\Delta\sigma_{YS} = A[1 - \exp(-B\varphi)]^{1/2}, \quad (3)$$

其中: $\Delta\sigma_{YS}$ 为屈服强度的增量; A 和 B 为系数; φ 为剂量。

前人的研究 [21] 结果表明, 材料的屈服强度的增量与材料硬度的增量之间是线性关系, 因此硬化的数据也可以利用式 (3) 的形式进行拟合, 拟合结果如图 3(b) 所示。可以看出, 考虑辐照硬化饱和的公式能对剂量依赖关系进行更好的拟合, 尤其是对于高剂量率辐照下的硬

化随剂量趋于饱和数据的拟合效果较好。通过拟合获得的高剂量率、中剂量率和低剂量率的硬化最大饱和值分别为 1.4, 2.3 和 2.8 GPa。式 (3) 中系数 B 的大小可以反映辐照硬度趋于饱和的快慢程度, B 值越大, 趋于饱和的剂量越小。图 3(b) 的拟合结果中, 高剂量率、中剂量率和低剂量率的指数系数分别为 3.05, 1.30 和 1.02, 这说明辐照剂量率越高, 辐照硬度值趋于饱和越快。

4 讨论

材料中辐照硬化效应主要是由于辐照产生的缺陷引起的, 根据弥散障碍硬化模型 (Dispersion Barrier Hardening, DBH) 模型, 辐照引起硬度的增量 ΔH 与缺陷的尺寸和数密度之间的关系可以用下列公式进行描述 [22],

$$\Delta H = \mu b \sum_i \alpha_i (N_i d_i)^{1/2}, \quad (4)$$

其中: α 为对应缺陷的强度因子; μ 为剪切模量; b 为伯氏矢量; N 和 d 分别为对应缺陷的数密度和平均直径。RPV 钢中引起辐照硬化效应的缺陷主要由两部分构成, 富铜析出相 (Copper-Rich Precipitates, CRP) 和基体缺

陷(Matrix Features, MF)。其中基体缺陷又可以分为不稳定基体缺陷(Unstable Matrix Features, UMF)和稳定基体缺陷(Stable Matrix Features, SMF)^[9]。CRP对RPV钢辐照硬化产生显著影响需要Cu含量大于0.2%^[1, 23],而本文所用的材料为国产低铜RPV钢,其Cu的质量分数为0.027%。同时,考虑到对CRP影响较大的主要因素为与时间相关的扩散过程,相较于中子辐照,重离子辐照在很短的时间达到相应的剂量,降低了扩散过程的影响。因此,在本实验中辐照引起的硬化主要考虑来自基体缺陷的影响。基体缺陷主要涉及间隙子/空位团簇、位错环和空洞等。自间隙原子(SIA)及其小团簇的迁移能在0.1~0.5eV之间^[24],显著小于空位及其小团簇的迁移能(~1.3eV^[25])。因此,在本辐照实验条件下(290℃),自间隙原子的扩散-聚集-生长过程显著快于空位团簇的形成生长过程。Dubinko等^[26]研究发现,当缺陷聚集形成空位型位错环时,硬化随剂量的幂函数关系中幂指数会大于0.5,且辐照硬化未出现快速饱和。本次实验硬化随剂量的幂律拟合指数为0.17~0.3[图3(a)],同时,我们近期对于离子辐照的RPV钢中缺陷的透射电镜和正电子湮没寿命谱的分析表明,引起RPV钢辐照硬化缺陷主要是SIA纳米团簇(位错环)^[27]。因此,本实验的RPV钢辐照硬化主要考虑来自SIA纳米团簇的影响。

高剂量下辐照硬化的饱和和主要是由于离子入射过程中产生的碰撞级联的重合(cascade overlap),导致缺陷团簇量不再继续随辐照剂量的增大而增加。采用图3(b)中拟合获得的3种剂量率下硬化的饱和值 ΔH_m 做图,如图4所示,可以看到在本文涉及的剂量率范围内,辐照硬化的饱和值 ΔH_m 随剂量率的增加指数递减,随剂量率的逐渐降低,辐照硬化饱和值的差别逐渐缩小,有趋于稳定的趋势,这与低Cu的RPV钢的中子辐照结果一致(通量小于等于 $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时未观察到剂量率效应^[12-13])。

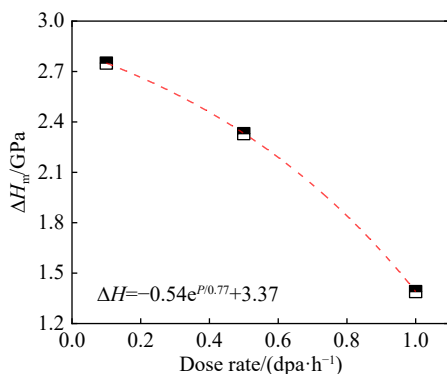


图4 (在线彩图) 辐照硬化饱和值 ΔH_m 随剂量率变化曲线

根据缺陷演化的速率理论^[28-30],对于辐照硬化随着剂量率呈递减的关系做定性的分析讨论。在辐照初始阶段,材料基体中的点缺陷(SIA,空位)浓度快速增加,由于SIA的高扩散能力,SIA与空位相遇发生复合的事件以及SIA相互之间形成SIA团簇的事件相应地增多,导致SIA团簇的数密度随着时间线性增大。在点缺陷产生速率一定的情形下,当SIA与空位之间的复合以及SIA团簇聚集消耗的SIA数量接近级联碰撞过程新产生的间隙子的时候,SIA团簇的数密度就会达到转折点,此后随时间趋于缓慢变化。该转折点处SIA团簇的数密度 N_1^* 与SIA的浓度 C_1 之间存在准平衡关系

$$S_1 \cdot N_1^* \cdot C_1 = R_1 \cdot C_1^2, \quad (5)$$

其中: S_1 是自由SIA在SIA团簇的俘获系数; R_1 是自由SIA相互间俘获系数。进一步引入点缺陷(间隙子与空位)之间的复合及其与剂量率之间的准平衡关系,

$$D_1 C_1 = D_v C_v, \quad (6)$$

$$P \approx R \cdot C_1 C_v, \quad (7)$$

其中: P 为剂量率(dpa/s); R 为SIA和空位之间的俘获系数; D_1 、 D_v 分别为SIA和空位的扩散系数; C_v 为空位浓度,可以推导出SIA团簇的数密度 N_1^* 、平均规模 n_1 (包含SIA的数量)的表达式:

$$N_1^* \approx \frac{R_1}{S_1} \left(\frac{D_v}{D_1 R} \right)^{1/2} P^{1/2}, \quad (8)$$

$$n_1 \approx S_1 \left(\frac{D_v}{D_1 R} \right)^{1/2} P^{1/2} t, \quad (9)$$

其中 t 为辐照时间。对于本实验中 P 与 t 的乘积为定值。将SIA团簇视为多余原子面,可以得到平均规模 n_1 与平均直径 d 的关系,

$$d = \left(\frac{4n_1}{\pi\rho} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

其中 ρ 为原子面密度。

因此,由式(9)可以看出,随着剂量率的减小,达到对应剂量的时间增大,间隙团簇的规模(位错环尺寸)逐渐增大。同时从式(7)也看到,剂量率越高团簇数密度越大,但是在剂量一定的情况下高密度的团簇意味着团簇尺寸的降低。Tan等^[31]研究结果表明,辐照在材料中产生的缺陷(位错环、析出相,空洞/气泡等)的硬化强度因子与缺陷尺寸密切相关,小尺寸的缺陷对辐照硬化的贡献较弱,大尺寸的缺陷会对硬化产生显著的硬化效应。因此,在考虑不同尺寸缺陷的强化因子影响下,低剂量率辐照时,虽然数密度低,但产生的缺陷尺寸较大,其强化因子值也显著增大,会对硬化产生显

著的贡献；而高剂量率辐照虽然缺陷数密度高，但其对应的强化因子数值较低，导致产生的缺陷对材料的硬化贡献有限。

Dubinko 等^[26]在 WWER 440 反应堆(高剂量率, 中子通量为 $2.848 \times 10^{16} \text{ n} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 WWER 1000 反应堆(低剂量率, 中子通量为 $5.7 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 辐照的 RPV 的位错环的研究中发现, 在达到相同剂量时, WWER 1000 中位错环的平均尺寸高于 WWER 440, 位错环的尺寸和剂量率成负相关, 剂量率越高, 尺寸越小。这一结果和我们离子辐照的结果及式(8)相符合。因此, 可以认为在本次实验中不同剂量率下辐照硬化的差异主要来自缺陷形核生长导致最终缺陷团簇(位错环)尺寸上的不同, 剂量率减小, 缺陷团簇尺寸增大, 导致辐照硬化程度增大。

5 总结

采用 3.5 MeV 的铁离子在 3 种不同剂量率(0.1, 0.5, 1.0 dpa/h) 下辐照国产反应堆压力容器钢 A508-3 至 4 个不同剂量点(0.1, 0.3, 1.0 和 3.0 dpa)。纳米压痕的结果表明, 在高剂量率辐照时材料的硬度随剂量的增大快速增加, 在 0.3 dpa 以后逐渐到达饱和。在中剂量率、低剂量率辐照时, 在剂量大于 0.3 dpa 时硬化随剂量仍保持缓慢增长。通过拟合获得硬化饱和值, 发现硬化效应与剂量率之间呈现减函数关系, 即高剂量率(1.0 dpa/h) 辐照在材料中引起的硬化效应较小, 低剂量率(0.1 dpa/h) 辐照在材料中引起的硬化效应最为显著。初步分析, 认为剂量率效应主要来自于缺陷形核生长过导致最终缺陷团簇(位错环)尺寸上的不同。

致谢 该工作得到了国家重点研发计划材料基因工程关键技术与支撑平台重点专项(批准号: 2017YFB0702200) 和国家基金委大科学装置联合基金(批准号: U1532262) 的资助; 同时也感谢中科院近代物理研究所 320 kV 综合实验平台在辐照实验过程中提供的支持。

参考文献:

- [1] ODETTE G R, LUCAS G E. *Radiat Eff Defect S*, 1989, 144(1-4): 189.
- [2] MILLER M K, RUSSELL K F. *J Nucl Mater*, 2007, 71(1-3): 145.
- [3] CHAOUADI R, GÉRARD R. *J Nucl Mater*, 2005, 345(1): 65.
- [4] WAS G S, HASH M, ODETTE G R. *Philos Mag*, 2005, 85(4-7): 703.
- [5] NISHIYAMA Y, ONIZAWA K, SUZUKI M, et al. *Acta Mater*, 2008, 56(16): 4510.
- [6] ABROMEIT C. *J Nucl Mater*, 1994, 216: 78.
- [7] KOHYAMA A, KATOH Y, ANDO M, et al. *Fusion Eng Des*, 2000, 51-52: 789.
- [8] SERRUYS Y, RUAULT M O, TROCELLIER P, et al. *Comptes Rendus Physique*, 2008, 9(3-4): 437.
- [9] ODETTE G R, YAMAMOTO T, KLINGENSMITH D. *Philos Mag*, 2006, 85(4-7): 779.
- [10] DOHI K, ONCHI T, KANO F, et al. *J Nucl Mater*, 1999, 265(1-2): 78.
- [11] DEBARBERIS L, SEVINI F, ACOSTA B, et al. *Int J Pres Ves Pip*, 2005, 82(5): 373.
- [12] KASADA R, KUDO T, KIMURA A, et al. Effects of Neutron Dose, Dose Rate, and Irradiation Temperature on the Irradiation Embrittlement of a Low-copper Reactor Pressure Vessel Steel[C]// ALLEN T R, LOTT R G, BUSBY J T, et al. Effects of Radiation on Material: International Symposium on Effects of Radiation on Materials, USA, 2005: 225.
- [13] SUZUKI M, ONIZAWA K, M. KIZAKI. Effects of Neutron Flux and Irradiation Temperature on Irradiation Embrittlement of A533B Steels[C]//HAMILTON M L. Effects of Radiation on Material: International Symposium on Effects of Radiation on Materials, 1996: 351.
- [14] HARDIE C D, WILLIAMS C A, XU S, et al. *J Nucl Mater*, 2013, 439(1-3): 33.
- [15] KEDHARNATH A, SARKAR A, KAPOOR R, et al. *Mater Res Express*, 2019, 6(10): 1065c5.
- [16] LIN Yun, NING Guangsheng, ZHANG Changyi, et al. *Atomic Energy Science and Technology*. 2016, 50(02): 204. (in Chinese). (林赞, 宁广胜, 张长义, 等. *原子能科学技术*, 2020, 44(11): 1129.)
- [17] OLIVER W C, PHARR G M. *J Mater Res*, 1992, 7(6): 1564.
- [18] OLIVER W C, PHARR G M. *J Mater Res*, 2004, 19(1): 3.
- [19] NIX W D, GAO H. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46(3): 411.
- [20] MAKIN M J, MINTER F J. *Acta Metall*, 1960, 8(10): 691.
- [21] BUSBY J T, HASH M C, WAS G S, et al. *J Nucl Mater*, 2005, 336(2-3): 267.
- [22] MANSUR L K, GROSSBECK M L. *J Nucl Mater*, 1988, 155(PART 1): 130.
- [23] WAS G S. *Fundamentals of Radiation Materials Science[M]*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 545.
- [24] WIRTH B D, ODETTE G R, MAROUDAS D, et al. *J Nucl Mater*, 2000, 276(1): 33.
- [25] ARAKAWA K, ONO K, ISSHIKI M, et al. *Science*, 2007, 318(5852): 956.
- [26] DUBINKO V I, KOTRECHKO S A, KLEPIKOV V F. *Radiat Eff Defect S*, 2009, 164(10): 647.
- [27] DING Z, ZHANG C, ZHANG X, et al. *Nucl Mater Energy*, 2020: 22.
- [28] GHONIEM N M, SHARAFAT S, WILLIAMS J M, et al. *J Nucl Mater*, 1983, 117: 96.
- [29] MANSUR L K, W A COGHLAN. *J Nucl Mater*, 1983, 119(1): 1.
- [30] SINGH B N, LEFFERS T, GREEN W V, et al. *J Nucl Mater*, 1984, 125(3): 287.
- [31] TAN L, BUSBY J T. *J Nucl Mater*, 2015, 465: 724.

Effect of the Dose Rate on Irradiation Hardening of Reactor Pressure Vessel Steel A508-3

NIU Mengke^{1,2}, HAN Xuxiao^{1,2}, YANG Yitao^{1,2,†}, ZHNAG Chonghong^{1,2}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To study the effect of dose rate on irradiation hardening of the reactor pressure vessel steel (A508-3), the specimens of RPV steel were irradiated by 3.5 MeV Fe ions to four doses (0.1, 0.3, 1, 3 dpa) at three different dose rates (0.1, 0.5 and 1 dpa/h), respectively. Nano-indentation technique was used to characterize the change in hardness after irradiation. At high dose rate (1.0 dpa/h), the results indicated that irradiation hardening increases rapidly with dose and tends to saturation at the dose higher than 0.3 dpa. Compared to that with high dose rate, the hardness increment showed similar behavior at low dose rate (0.1 dpa/h) and medium dose rate (0.5 dpa/h), but it still increased gradually at dose higher than 0.3 dpa. When dose is lower than 0.3 dpa, a small difference showed in irradiation hardening under different dose rates irradiation, but the difference became significant when the dose was higher than 0.3 dpa. At present dose regime, the irradiation hardening was found to be inversely proportional to the dose rate.

Key words: reactor pressure vessel; Chinese A508-3; irradiation hardening; ion irradiation; dose rate

Received date: 24 Feb. 2021; **Revised date:** 23 Mar. 2021

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2017YFB0702202); National Science Foundation of China (U1532262)

† **Corresponding author:** YANG Yitao, E-mail: yangyt@impcas.ac.cn.