

北京大学学报(自然科学版)
Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis
doi: 10.13209/j.0479-8023.2015.056

3 MeV 金离子辐照 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金及 Hastelloy-N 合金的辐照损伤研究

刘士毅¹ 徐光跃² 张艳文¹ 王绪¹ 唐美雄¹ 赵子强^{1,†} 魏炳忱^{2,†}

1. 北京大学物理学院重离子物理国家重点实验室, 北京 100871; 2. 中国科学院力学研究所微重力国家重点实验室, 北京 100190; † 通信作者, E-mail: zqzhao@pku.edu.cn(赵子强); weibc@imech.ac.cn(魏炳忱)

摘要 使用 3 MeV 金离子对 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金和 Hastelloy-N 合金进行剂量为 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 的辐照实验。X 射线衍射(XRD)数据表明, Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的非晶态在室温辐照下非常稳定, 而 Hastelloy-N 合金在辐照后有明显的微观应变增加。同时纳米压痕分析表明, Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的辐照软化和 Hastelloy-N 合金的辐照硬化主要由原子移位损伤造成。使用原子力显微镜(AFM)测量半遮挡的辐照方法制造的肿胀台阶, 发现两种材料的辐照肿胀效应相差不大。扫描电子显微镜(SEM)观察发现, 室温条件下 3 MeV 金离子导致 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金表面发生黏性流动的临界剂量大于 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 而且发生线性流动的临界剂量具有不均匀性, 推测是由机械抛光时产生的表面应力造成。由于黏性流动可以有效修补表面缺陷, 所以 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金有希望作为抗腐蚀抗辐照涂层材料。

关键词 Hastelloy-N 合金; 镍基非晶合金; 熔盐反应堆; 辐照损伤; 黏性流动; 自修复

中图分类号 TL341

Investigations on Irradiation Effects of Ni₆₀Nb₄₀ Amorphous Alloy and Hastelloy-N Alloy by 3 MeV Au Ion

LIU Shiyi¹, XU Guangyue², ZHANG Yanwen¹, WANG Xu¹, TANG Meixiong¹,
ZHAO Ziqiang^{1,†}, WEI Bingchen^{2,†}

1. State Key Lab of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871; 2. Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;
† Corresponding author, E-mail: zqzhao@pku.edu.cn(ZHAO Ziqiang); weibc@imech.ac.cn(WEI Bingchen)

Abstract 3 MeV Au ions were used to irradiate Hastelloy-N and Ni₆₀Nb₄₀ amorphous alloy, and total doses were $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ and $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. X-ray Diffraction results presented that Ni₆₀Nb₄₀ amorphous alloy showed good stability in crystal state, but Hastelloy-N had apparent strain increment after irradiation. Nano-Indenter test found that softening of Ni₆₀Nb₄₀ amorphous alloy and hardening of Hastelloy-N were mainly caused by atom displacement damage. Through measuring step height created by half-shielding irradiation with an Atomic Force Microscope, the authors found that the irradiation swelling of both materials were approximate. Scan Electron Microscope observation showed that the critical dose of Ni₆₀Nb₄₀ amorphous alloy surface viscous flow induced by 3 MeV Au ions was larger than $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. The surface viscous flow critical dose was not uniform, which may be caused by surface stress induced by mechanical polishing. Ni₆₀Nb₄₀ amorphous alloy should be potential to be protective coating against corrosion and irradiation damage, for its self-healing of surface defects through viscous flow mechanism.

Key words Hastelloy-N alloy; Ni-based amorphous alloy; molten salt reactor; irradiation damage; viscous flow; self-healing

国家自然科学基金(91226202)资助

收稿日期: 2014-05-13; 修回日期: 2014-06-09; 网络出版时间: 2015-08-05 11:52:47

熔盐反应堆(Molten Salt Reactor)是第四代先进核能系统中唯一可以实现燃料增殖的热中子反应堆,也是中国重点发展的第四代核反应堆系统。熔盐反应堆的最大特点就是使用液态氟化铀、钚、钍燃料,不使用固体燃料,可以在线处理核废料和添加燃料。与目前第三代和第二代反应堆相比,熔盐反应堆在中子经济性、放射性核废料处理、固有安全性和防止核扩散方面具有巨大的优势^[1-2]。熔盐反应堆中的熔融氟化盐既是冷却剂,又是核燃料载体,因此应用于熔盐反应堆的结构材料需要面临高温、高腐蚀和高中子辐照损伤的艰巨条件。以高温镍基合金 Hastelloy 为基础开发的,增强了抗熔盐腐蚀性的 Hastelloy-N,在第一座熔盐反应试验堆中被证明具有较强抗腐蚀和抗辐照性能,同时也是当前重要的熔盐堆结构备选材料。

目前的研究表明,熔融氟化盐对 Hastelloy-N 合金的腐蚀主要是晶间腐蚀,呈现的腐蚀机制主要是对材料中铬元素的选择性侵蚀导致的合金成分和结构的变化,此外石墨的存在对铬铁元素的腐蚀有强化作用^[3-5]。由于中子辐照实验的长周期和低损伤,目前较多利用重离子辐照来模拟中子辐照损伤。研究表明,Hastelloy-N 受到氩离子辐照后,能在较大移位损伤范围内保持稳定的晶格结构,但是由于密集的点缺陷可能使得 Hastelloy-N 的硬度在不到 10 dpa 就有明显变化^[6-7]。镍基非晶材料具有较强的抗腐蚀性和抗辐照能力^[8],还可通过使用不含铬、铁元素的成分来大大降低熔盐对材料的腐蚀性。实验表明,铌(Nb)与镍一样具有很强抗熔融氟化盐腐蚀能力,所以 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金也应当具有很强的抗熔盐腐蚀能力。在非晶合金系统中, Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金具有晶化温度高的特点,因此有一定的高温高腐蚀强辐照环境应用前景。

本文探索 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金作为 Hastelloy-N 的保护涂层材料可行性,选择 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金和 Hastelloy-N 合金作为研究材料。利用重离子模拟中子辐照损伤中的原子移位损伤,综合使用 X 射线衍射(XRD)、纳米压痕(Nano-Indenter)、原子力显微镜(AFM)和扫描电子显微镜(SEM)对样品的晶体结构、硬度和辐照后表面形貌进行了表征。

1 实验方法

实验使用的高温镍基合金 Hastelloy-N 由上海市应用物理研究所提供,详细的成分组成见表 1。

表 1 Hastelloy-N 合金化学成分
Table 1 Normal chemical composition of Hastelloy-N

元素	质量分数/wt%
C	0.05
Si	0.5
Mn	0.5
Fe	4
Cr	7
Mo	17
Ni	bal

Hastelloy-N 合金首先被切割成 5 mm×5 mm×2 mm 薄片状,然后使用 1000 目 SiC 砂纸将双面粗磨至平面,最后对单面进行镜面抛光处理。

Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金使用甩带方法制备,甩带前使用真空电弧炉将原子比例为 6:4 的高纯度(纯度大于 99.95%) Ni 和 Nb 原料反复熔炼 10 次,使得组分原子在合金锭中分布比较均匀。然后将合金锭放入真空单辊甩带机的石英管中,使用高频感应将合金锭熔化,之后用氩气将熔化的合金喷射在水冷的铜辊上。制备的甩带样品宽度约为 3 mm,厚度平均为 40 μm。用剪刀将非晶样品剪成长约 10 mm 的条状,然后对样品进行单面抛光。所有抛光保证在 AFM 观察下表面起伏不大于 10 nm。

辐照实验使用北京大学物理学院重离子物理研究所 2×1.7 MV 串列静电加速器(型号 5SDH-2),注入的金离子能量为 3 MeV,平均粒子束流强度为 150 nA,总剂量分别为 2.3×10¹⁵ cm⁻² 和 5×10¹⁶ cm⁻²,辐照时样品温度保持室温,实验中对部分样品进行了半遮挡。使用 SRIM 2008 对金离子造成的原子移位损伤和电子能损进行模拟计算,Hastelloy-N 合金和 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金移位能均设置为 40 eV^[7,9-11],每单位粒子剂量的损伤分布如图 1 所示。3 MeV 金离子辐照导致的原子移位损伤峰都位于深度 200 nm 处。

辐照实验后使用 Phillip X'Pert Pro MPD 多功能粉末衍射仪(XRD)、Agilent 5420AFM 原子力显微镜(AFM)、Agilent G200 纳米压痕仪(Nano-Indenter)和 Nova NanoSEM430 场发射扫描电子显微镜(SEM)对样品的晶体结构、表面形貌和硬度进行表征。

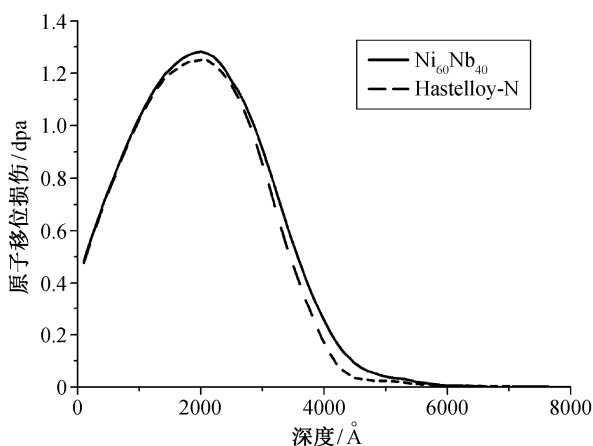


图 1 SRIM 2008 计算 3 MeV Au⁺ 辐照 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金及 Hastelloy-N 合金原子移位损伤的深度分布

Fig. 1 Damage profile produced by 3 MeV Au⁺ ions irradiation in Ni₆₀Nb₄₀ amorphous alloy and Hastelloy-N alloy by SRIM 2008

2 实验结果及讨论

2.1 损伤分布

由于入射离子主要能损方式是电子能损, 因此 3 MeV 金离子在 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金及 Hastelloy-N 合金中的入射深度基本相同, Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金损伤略大于 Hastelloy-N 合金。粒子剂量为 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 的辐照分别对应原子移位损伤峰值: Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金为 29.4 dpa 和 640 dpa, Hastelloy-N 合金为 28.8 dpa 和 625 dpa。

2.2 XRD 分析

使用 X 射线衍射对样品辐照后晶体结构变化进行表征, Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金及 Hastelloy-N 合金的原始样品、 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 金离子辐照后样品的 XRD 谱图见图 2。金离子辐照后, Hastelloy-N 合金的衍射峰位置没有明显偏移, 28.8 dpa 和 625 dpa 辐照样品的衍射峰半高宽(FWHM)增大, 见图 2(a)。使用 Williamson 方程可以推导出公式^[12]:

$$\varepsilon = \frac{\beta(2\theta) - \Delta(2\theta)}{4 \tan \theta},$$

其中 β 为衍射峰半高宽, Δ 为晶粒尺寸引入的宽化, 2θ 为衍射峰衍射角度, ε 为应变率。对三强峰 (111)(200)(220) 进行计算并拟合, 得到原始样品应变为 $0.113(\pm 0.010)\%$, 28.8 dpa 辐照样品为 $0.140(\pm 0.028)\%$, 625 dpa 的残余应变为 $0.147(\pm 0.028)\%$ 。辐照后的微观应变导致衍射峰展宽。而且考虑到 500 nm 厚度损伤层以下未受到辐照损

伤的基底对常规 XRD 的影响, 辐照导致的应变实际值可能会更高。此外, 28.8 dpa 和 625 dpa 辐照后样品的应变差值远小于误差, 应变可能在 28.8 dpa 左右达到最大值, 之后的辐照将不会导致额外应力产生。

由 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的 XRD 图谱(图 2(b)), 我们发现, Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金在经过即使高达 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (640 dpa) 的辐照后, 依然没有明显的玻璃态-晶态转变现象发生, 而 Carter 等^[13]使用剂量为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, 能量为 1 MeV 的 Cu 辐照 Cu₅₀Zr₄₅Ti₅ 非晶合金后, 发生常规 XRD 可以发现的高密度纳米晶析出现象。在室温辐照条件下, 重离子辐照对 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的非晶态影响很小, 非晶合金的短程有序长程无序结构具有我们期望的抗重离子辐照性能。此外, Nagase 等^[14]发现更低的辐照温度有利于纳米晶的形成, 所以 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金在更高的温度下, 可能会有更强的非晶态稳定性。

2.3 AFM 及台阶测量

使用 AFM 对 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 金离子辐照的 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金及 Hastelloy-N 合金的半遮挡区域进行观察, AFM 形貌见图 3(a)和(b)。在晶体中, 足够能量的重离子辐照会引入间隙原子和空位, 虽然绝大部分的间隙原子和空位会自行湮灭, 但是剩下的会通过热迁移聚集形成各种缺陷, 缺陷使得附近的原子有序排列被破坏, 进而导致材料发生宏观的肿胀。非晶合金虽然没有所谓的晶格格点, 但重离子辐照会在材料中引入类似晶体中的空位最小损伤单位——自由体积, 自由体积的积累会降低非晶合金密度, 从而导致肿胀。由于实验中的 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金及 Hastelloy-N 合金受到的辐照损伤基本相同, 我们通过测量并对比辐照-未辐照区域的台阶高度来比较二者肿胀效应的强弱。为了提高可信度, 我们测量台阶高度的办法是在台阶区域取一个矩形框, 统计矩形框内高度的概率分布, 在两个最概然分布处分别取值, 作为未辐照区高度(较小值)和辐照区高度(较大值), 二者之差即是台阶高度, 如图 3(c)和(d)所示。每一个样品上取 5 个矩形区对台阶进行计算, 平均后得到各个样品的台阶高度。测得的台阶高度: Hastelloy-N 合金为 $39.54 \pm 1.75 \text{ nm}$, Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金为 $45.38 \pm 2.66 \text{ nm}$, 辐照肿胀程度为 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金略大于 Hastelloy-N。在测量台阶时, 发现非晶合金的辐照区表面粗糙程度相比未辐照区有明显增大, 在高度统计图中,

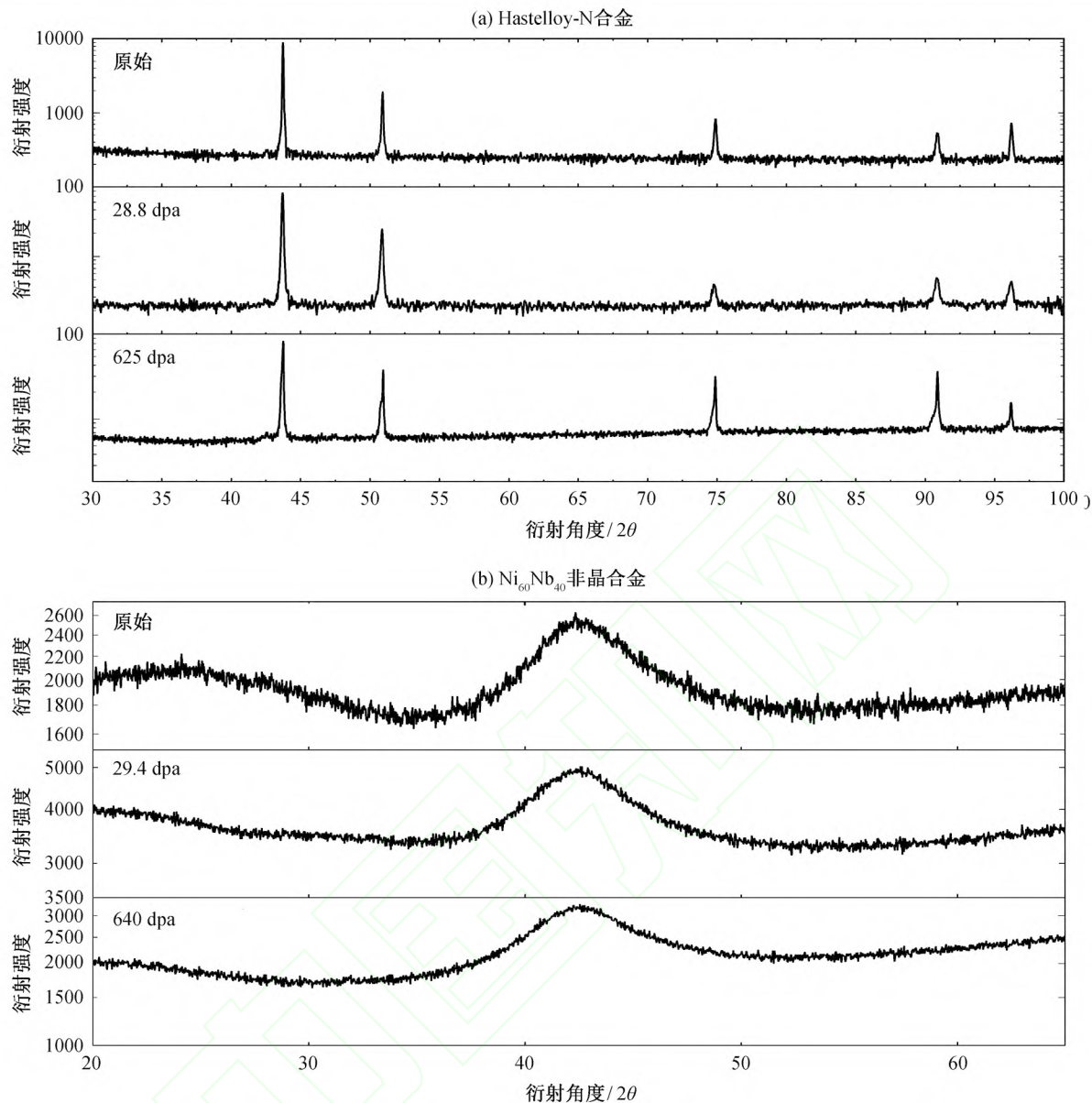
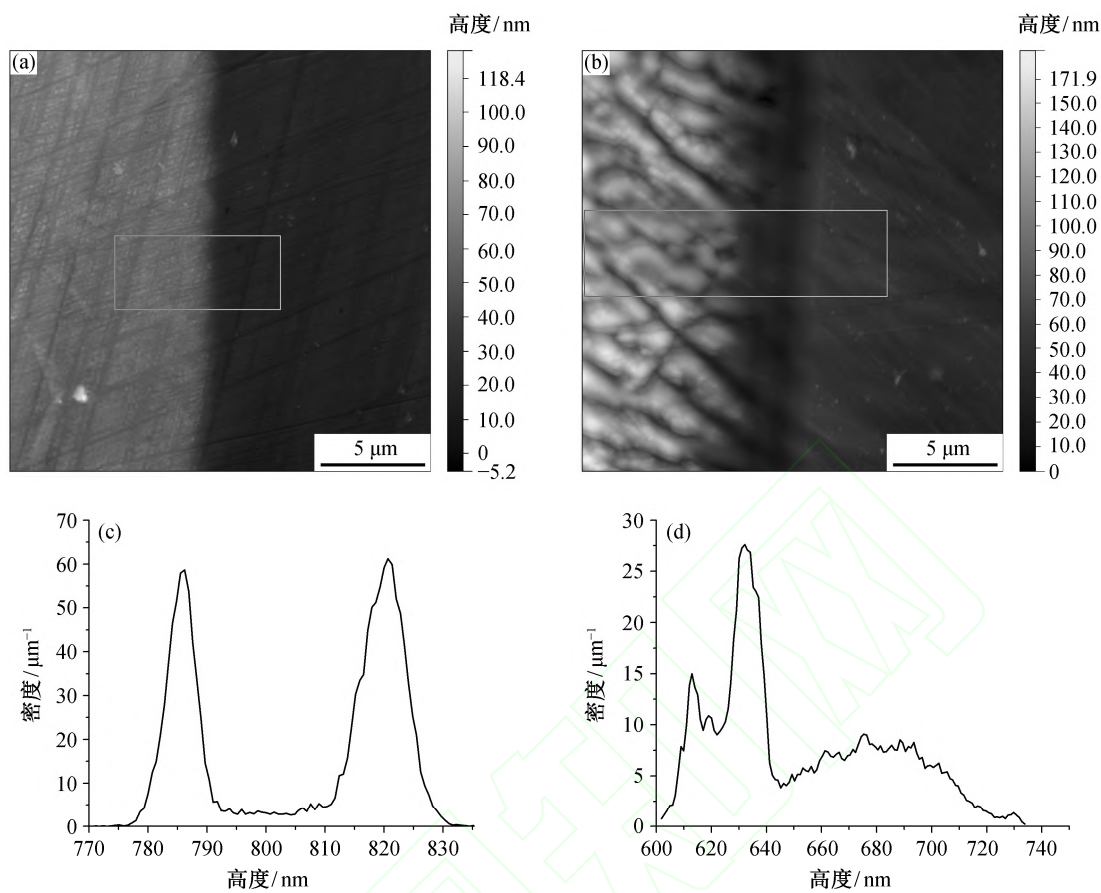


图 2 原始及 3 MeV $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 金离子辐照后样品的 XRD 谱
 Fig. 2 XRD of virgin and 3 MeV $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ and $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ Au ions irradiated samples

辐照区高度分布没有未辐照区集中。从图 3(d) 中可以发现分布有 3 个峰, 分析可知: 最大的对应辐照区, 中间的对未辐照区, 较小的对应辐照区-未辐照区中间部分的凹陷。凹陷中还有比较明显的两个小的凹陷, 根据推测, 遮挡边缘产生的凹陷是刀锋对 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ 非晶合金表面的遮挡, 使得边缘附近黏性流动不均匀, 非晶物质净流出, 最终形成沟-堤结构, 而二次凹陷则是因为辐照实验过程中由于某种原因(比如振动), 改变了刀锋的位置而造成。压痕的形成与辐照导致的表面黏性流动有关。

2.4 纳米硬度

我们对辐照样品和未辐照样品进行纳米硬度测试。使用 Berkovich 金刚石压头, 对样品表面至 $1 \mu\text{m}$ 深处进行连续刚度测试, 如图4(a)所示。从硬度曲线可以发现非常明显的硬度变化, 其中 Hastelloy-N 受辐照后硬度呈现上升, 而 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ 非晶合金则表现为软化。晶体受辐照产生的内部缺陷最终会演化形成位错环、层错等缺陷团, 这些缺陷会阻止层间滑移, 从而提高硬度, 而同时材料的其他力学性能会下降, 比如延展性、疲劳极限、断裂



(a) Hastelloy-N 合金; (b) Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金; (c)为(a)中矩形区高度统计分布; (d)为(b)中矩形区高度统计分布

图 3 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV 金离子半遮挡辐照区域 AFM 形貌

Fig. 3 AFM image of $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV Au ions half-shielding irradiation samples

强度等。对于非晶合金，一方面辐照会引入“自由体积”，另一方面会导致纳米晶析出。前者会导致非晶合金塑性增大、硬度下降，而后者由于纳米晶弥散强化作用使得硬度上升^[15]。对 640 dpa 辐照 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的纳米硬度测试表明，在室温下，Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的主要损伤类型为自由体积增大，纳米晶相析出不是辐照的主要效应，与之前 XRD 测试未发现可观测的纳米晶析出相符合。

从图 4(b) 可以发现最大硬度变化的深度：Hastelloy-N 合金在约 250 nm 处，而 SRIM 计算损伤峰深度为 210 nm；Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金则在约 220 nm 处，对应 SRIM 计算损伤峰为 220 nm。两个硬度变化最大深度与使用 SRIM 计算的损伤峰位置相差不大(<20%)，说明硬度变化主要由原子移位损伤导致，入射粒子的主要能量损失方式(电子能损)，在 Hastelloy-N 合金的辐照硬化过程和 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的辐照软化过程中影响不大。

2.5 SEM 形貌

使用扫描电子显微镜对 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 的 3 MeV 金离子辐照的 Hastelloy-N 合金和 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的原始表面、辐照和半辐照表面进行观测。重离子辐照对 Hastelloy-N 表面改变很小，本文不做展示。Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金 SEM 照片见图 5。在 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 金离子辐照 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金样品表面没有发现明显的黏性流动现象，而在 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 金离子辐照样品表面发现明显的黏性流动。Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金在室温下被 3 MeV 金离子辐照而发生各向异性黏性流动的临界剂量，应当介于 $2.3 \times 10^{15} \sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 之间。黏弹性理论可以解释非晶合金在重离子辐照条件下发生剪切黏性流动的微观机制^[16]。电子能损和核能损的作用分别是：核能损提高了自由体积浓度，降低了非晶合金的塑性流动的黏性，而电子能损主要导致辐照区热应力积累，当应力积累到超出黏性流动极限时，表

面就发生黏性流动。由于热峰效应产生的热应力在垂直于重离子入射方向上是均匀发散的, 所以这种流动在重离子垂直于表面入射时, 在表面应当是均匀的^[17]。但是在 AFM 形貌中我们发现 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 金离子辐照后 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ 非晶合金表面粗糙度增大, 而在 SEM 中可以明显发现辐照后表面的不均匀肿胀(沟回样)。通过对图 5(c)和(e)分析发现, 优先肿胀的位置具有一定连续性, 往往在表面划痕处。由图 5(d)可以明显发现辐照后凸起的位置一般在划痕两侧: 由于划痕内部黏性流动受两侧陡崖的限制, 两侧的非晶物质流向划痕边缘, 非晶物质在划痕两侧逐渐堆积, 形成两条凸起带, 划痕内由于没有外来物质的补偿, 高度变化不大。在样品边缘(图

5(f)), 剪切流动的非晶合金物质在样品边缘产生比较明显的堆积, 使得边缘处的沟被基本填满, 而远离边缘约 $6 \mu\text{m}$ 的地方, 沟回结构就开始比较平均。在辐照渐进区域(图 5(e)), 随着辐照剂量增大, 表面剪切流动从不均匀到均匀, 而表面起伏也是先增大后降低, 辐照导致的黏性剪切流动对表面的结构不均匀有修复作用。

3 结论

本文对能量为 3 MeV、剂量为 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 的金离子辐照的 Hastelloy-N 合金和 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ 非晶合金进行了分析。实验表明, Hastelloy-N 合金受到重离子辐照后微观应力增大,

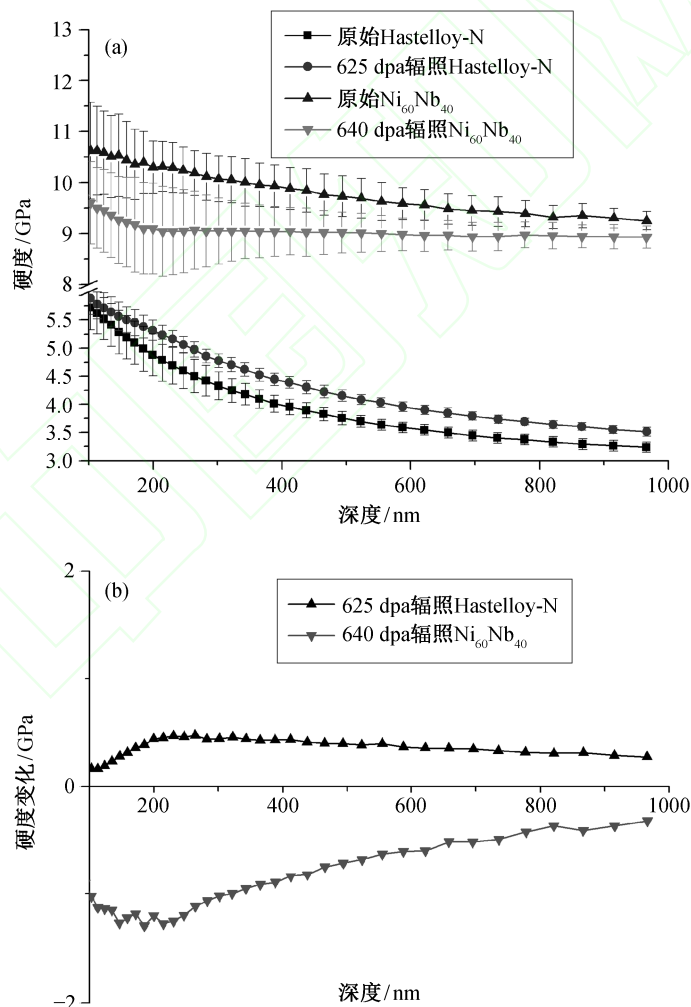
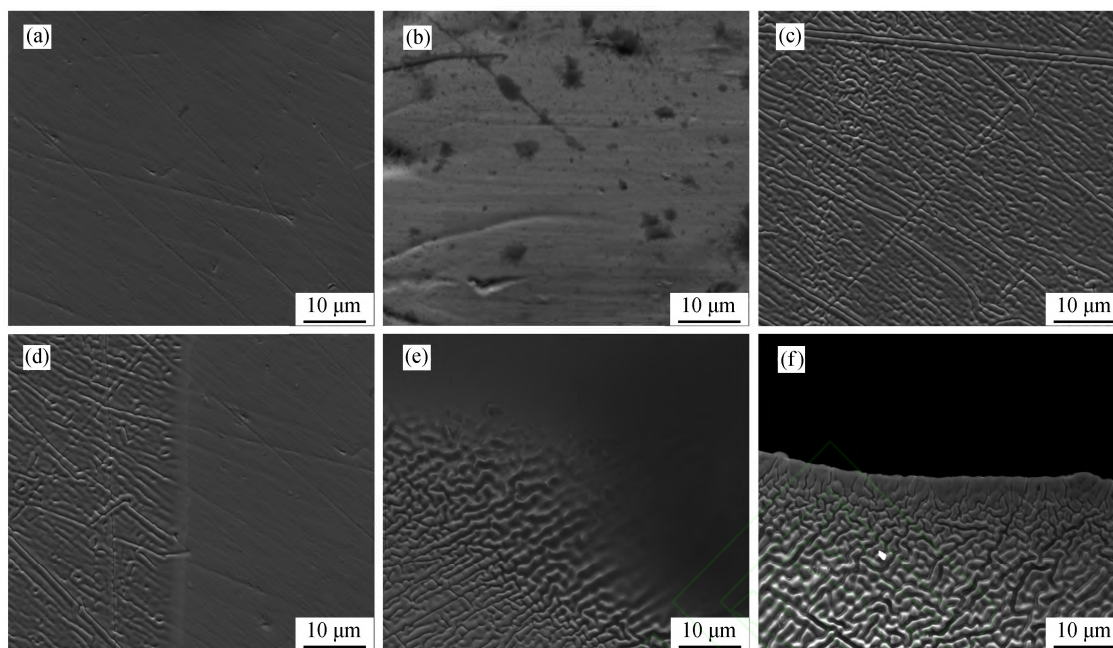


图 4 原始及 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV 金离子辐照 Hastelloy-N 合金和 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ 非晶合金距表面 100 nm 到 1000 nm 硬度(a)以及辐照后纳米硬度增量(b)

Fig. 4 Hardness(a) and hardness increment(b) of virgin and $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV Au ions irradiated Hastelloy-N alloy and $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ amorphous alloy with depth from 100 nm to 1000 nm



(a)原始; (b) $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV 金离子, 辐照区; (c) $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV 金离子, 辐照区; (d) $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV 金离子, 半辐照区; (e) $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV 金离子, 辐照区边缘; (f) $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 3 MeV 金离子, 辐照区样品边缘

图 5 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金表面 SEM 图

Fig. 5 SEM images of Ni₆₀Nb₄₀ amorphous alloy

Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金的非晶态具有很强的稳定性, 高达 640 dpa 的辐照损伤也没有导致明显的纳米晶析出。Hastelloy-N 合金辐照后发生硬化, 而 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金辐照后硬度下降, 二者都与原子移位损伤引入的缺陷有关, 但是机制不同。在 Hastelloy-N 合金中缺陷最终形成位错环等复杂缺陷结构, 这些缺陷结构会抑制层间滑移, 使得材料表现出硬度上升。在非晶合金中, 缺陷以自由体积的形式存在于原子间隙中, 自由体积含量增加使得非晶合金中原子扩散能力提高, 材料性能更趋近液体, 所以硬度下降。由于纳米晶弥散对非晶硬度具有增强效果, 而软化效应也从侧面说明辐照后没有高密度的纳米晶析出。二者的硬度变化最大处与移位损伤最大位置基本重合, 所以纳米硬度变化主要是由入射粒子的核能损导致。3 MeV 金离子辐照 Ni₆₀Nb₄₀ 非晶合金发生剪切塑性流动临界剂量大于 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 辐照导致的剪切流动与样品表面应力分布有关, 而且随着辐照剂量增大, 表面起伏程度经历从小到大再减小的过程, 剪切黏性流动使得样品渐趋均匀。由于剪切黏性流动效应, 非晶对于表面的不均匀展现出自修复能力。

参考文献

- [1] LeBlanc D. Molten salt reactors: a new beginning for an old idea. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(6): 1644–1656
- [2] Mathieu L, Heuer D, Brissot R, et al. The thorium molten salt reactor: moving on from the MSBR. *Progress in Nuclear Energy*, 2006, 48(7): 664–679
- [3] 林建波, 李爱国, 何上明. He⁺ 离子辐照后 Hastelloy N 合金的耐腐蚀性研究. *核技术*, 2014, 37(5): 050601
- [4] Olson L C, Ambrosek J W, Sridharan K, et al. Materials corrosion in molten LiF-NaF-KF salt. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2009, 130(1): 67–73
- [5] Olson L C, Sridharan K, Anderson M, et al. Nickel-plating for active metal dissolution resistance in molten fluoride salts. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 411: 51–59
- [6] Liu Min, Lu Yanling, Liu Renduo, et al. TEM investigation on the microstructural evolution of hastelloy N induced by Ar⁺ ion irradiation. *Micro-*

- scopy Research and Technique, 2014, 77(2): 161–169
- [7] Hunn J D, Lee E H, Byun T S, et al. Ion-irradiation-induced hardening in Inconel 718. *J Nucl Mater*, 2001, 296: 203–209
- [8] Nagase T, Sanda T, Nino A, et al. MeV electron irradiation induced crystallization in metallic glasses: atomic structure, crystallization mechanism and stability of an amorphous phase under the irradiation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, 358(3): 502–518
- [9] Hashimoto N, Hunn J D, Byun T S, et al. Microstructural analysis of ion-irradiation-induced hardening in inconel 718. *J Nucl Mater*, 2003, 318: 300–306
- [10] Norgett M J, Robinson M T, Torrens I M. A proposed method of calculating displacement dose rates. *Nucl Eng Des*, 1975, 33(1): 50–54
- [11] Audouard A, Balogh J, Dural J, et al. Displacement threshold energy of iron atoms in amorphous and crystalline Fe₇₅B₂₅ alloys. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 1982, 62: 161–165
- [12] Jin Shuoxue, Guo Liping, Yang Zheng, et al. Structural characterization of nickel-base alloy C-276 irradiated with Ar ions. *Plasma Science and Technology*, 2012, 14(6): 548–552
- [13] Carter J, Fu E G, Martin M, et al. Effects of Cu ion irradiation in Cu₅₀Zr₄₅Ti₅ metallic glass. *Scripta Materialia*, 2009, 61(3): 265–268
- [14] Nagase T, Umakoshi Y. Temperature dependence in density-fluctuation-induced crystallization in metallic glass by MeV electron irradiation. *Intermetallics*, 2010, 18(10): 1803–1808
- [15] Luo W D, Yang B, Chen G L. Effect of Ar⁺ ion irradiation on the microstructure and properties of Zr-Cu-Fe-Al bulk metallic glass. *Scripta Materialia*, 2011, 64(7): 625–628
- [16] Trinkaus H, Ryazanov A I. Viscoelastic model for the plastic flow of amorphous solids under energetic ion bombardment. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(25): 5072–5075
- [17] Gutzmann A, Klaumunzer S, Meier P. Ion-beam-induced surface instability of glassy Fe₄₀Ni₄₀B₂₀. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(12): 2256–2259