

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20171019001

离子辐照对 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ 非晶合金力学性能的影响

金恩姬¹, 唐美雄², 赵云彪², 韩冬², 张坤³, 魏炳忱³, 赵子强²

(1. 北京石油化工学院 数理系, 北京 102617; 2. 北京大学 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 非晶合金有潜力成为新一代核材料, 离子辐照对其力学性能的影响决定了其使用价值。在不同剂量的 Au 离子辐照下, 探讨了 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ 非晶合金力学性能的变化过程。原子力显微镜以及正电子湮没寿命谱分析表明, 在离子辐照后, 非晶合金的自由体积尺寸增大、密度下降, 总自由体积增加。透射电子显微镜分析表明, 辐照剂量在达到 50 dpa 时非晶合金开始有纳米晶析出, 随着辐照剂量的增加, 纳米晶尺寸在增加、密度变大。纳米压痕试验表明, 离子辐照后非晶合金的硬度减小, 在高剂量时硬度又有增加的趋势。离子辐照下非晶合金的硬度变化是自由体积以及纳米晶竞争的结果。自由体积使非晶合金软化, 纳米晶析出使非晶合金硬化。

关键词: 离子辐照; 非晶合金; 力学性能; 自由体积; 纳米晶

中图分类号: TG139.8

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)03-0046-07

Effects of Ion Irradiation on Mechanical Property of $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ Amorphous Alloy

JIN En-ji¹, TANG Mei-xiong², ZHAO Yun-biao², HAN Dong², ZHANG Kun³, WEI Bing-chen³, ZHAO Zi-qiang²

(1. Department of Mathematics and Physics, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617; 2. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: Amorphous alloy is a type of promising nuclear material. The effects of ion irradiation on the mechanical property of amorphous alloy determine its application value. The mechanical properties of $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ amorphous alloy was investigated with different doses of Au ions irradiation. Atomic force microscopy and positron annihilation lifetime spectroscopy experiments show that ion irradiation can enlarge the free volume and decrease the density. Transmission electron microscope analysis show that the nanocrystallines begin to segregate in amorphous alloy at 50 dpa, and the size and density of nanocrystallines increase with increasing irradiation dose. Nanoindentation testing show the hardness of the amorphous alloy decreases at a low irradiation dose while increases at a high irradiation dose. The variation of hardness of amorphous alloy can be ascribed to a consequence of the competition mechanism between free volume and nanocrystallines. Free volume can soften the amorphous alloy, while segregated nanocrystallines can harden the amorphous alloy.

Keywords: ion irradiation; amorphous alloy; mechanical property; free volume; nanocrystallines

收稿日期: 2017-10-19; 修回日期: 2018-04-05

网络出版日期: 2018-05-09 09:11; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180509.0910.030.html>

通讯作者: 赵子强 (1965—), 男 (汉), 副教授, 博士; 研究方向: 离子束物理与应用; E-mail: zqzhao@pku.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (91426304, 91226202); 国家磁约束核聚变能发展研究专项 (2015GB113000)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (91426304, 91226202) and National Magnetic Confinement Fusion Energy Research Project (2015GB113000)

引文格式: 金恩姬, 唐美雄, 赵云彪, 等. 离子辐照对 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ 非晶合金力学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 46-52.

JIN E J, TANG M X, ZHAO Y B, et al. Effects of ion irradiation on mechanical property of $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ amorphous alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 46-52.

0 引言

块体非晶目前已经被广泛应用于变压器领域。受限於非晶形成能力,目前研制成功的非晶体系临界尺寸都不大,限制了其应用的前景。非晶形成能力与动力学、热力学等因素相关。从动力学上看,在低于玻璃转化温度范围内,结晶相的形核速率低、生长速度慢^[1],即结晶过程受到抑制。从热力学角度来看,当体系的临界冷却速率较小时,在冷却的过程中还未来得及结晶就已经凝固,从而保留了液态的无定形非晶结构。非晶形成能力越强的体系,其临界冷却速率越小。相比于一般的结构材料,核材料的运行环境更加恶劣,处于射线辐照之下。这对核材料的抗辐照性能有一定要求。非晶合金是近年来的研究热点之一,一直被认为拥有优异的抗辐照性能。

美国国家航空局曾使用 $ZrNbCuNiAl$ 体系的非晶合金作为太阳风收集器^[2]。太阳风收集器在太空环境中遭受各种射线的强烈辐照,甚至在运行期间遭遇过一次太阳风暴,射线水平为平时的好几倍。3年之后,太阳风收集器仍然保持着金属光泽,并保持着良好的外形。这说明非晶合金拥有优异的抗辐照性能。人们认为,非晶合金的抗辐照性能源于其无序的微观结构。对于晶体而言,辐照引入的移位损伤使晶体非晶化,材料性能变化大。而对于非晶,其本身就是无序的,辐照引入的损伤有可能埋没在无序的本征结构中,相比而言损伤较小。

非晶合金作为核材料的研究始于19世纪80年代,某些非晶合金在H、He离子辐照下表现出比晶体更高的氦泡临界剂量^[3-6]。作为核材料,非晶合金的力学性能优异,但离子辐照导致的微观结构的变化对非晶合金宏观力学性能的影响至今仍然没有研究透彻。文中通过研究Au离子辐照损伤对非晶合金力学性能影响,探讨非晶玻璃力学性质改变的本质原因。

1 试验与方法

1.1 材料

块体非晶的制备方法有铜模吸铸^[7]、压力铸造、水淬法等。文中采用铜模吸铸的方法制备大块非晶合金。铜模吸铸是目前应用最广的制备非晶的方法之一。铜模吸铸法保证了比较高的冷却

速率,并且制备的非晶尺寸还能随铜模的内径改变。

在制备时,首先需要制备母合金。将99.999%以上纯度的Zr、Cu、Ni、Al原料分别按质量比63.6%,24.5%,7.3%和4.6%混合,并置于熔池中,使用氩弧枪反复熔炼10次,使不同元素的金属充分混合均匀。制备好母合金后,再使用氩弧枪将其熔化,熔体进入铜模真空腔快速冷却,凝结成非晶合金。制备出的圆柱型非晶合金直径为5 mm,组分为 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ 。

1.2 试验方案

将圆柱状非晶合金材料切割成小圆片,单面抛光。利用北京大学 2×1.7 MV 串列加速器对非晶合金样品进行辐照,由于Au离子在样品中快速产生辐照损伤,研究采用能量为3 MeV的Au离子,剂量为 8.3×10^{13} 、 4.15×10^{14} 、 8.3×10^{14} 、 4.15×10^{15} 和 8.3×10^{15} ions/cm²,对应的损伤峰值为1、5、10、50和100 dpa (Displacements per atom)。采用SRIM (Stopping and range of ion in matter) 程序计算相应的辐照损伤随深度的分布,如图1所示。其中,Zr、Cu、Ni、Al的原子离位阈能为25 eV。由图可知,损伤峰的位置约为300 nm。

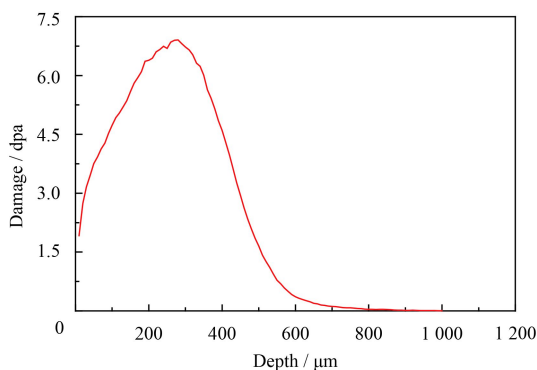


图1 Au离子辐照非晶合金的损伤分布

Fig.1 Damage depth profile of amorphous alloy under the Au ion irradiation

采用原子力显微镜AFM(Atomic force microscopy, AFM)研究3 MeV Au离子辐照非晶合金后沿着辐照方向发生的纵向肿胀。辐照试验前,使用刀片将辐照表面遮挡一半,辐照后在同一样品表面有辐照区域以及未辐照区域,测量它们边界附近辐照区域凸起的高度,即得出非晶合金的宏观肿胀,以及辐照肿胀的信息。

采用正电子湮没寿命谱 (Positron annihilation lifetime spectroscopy, PALS) 来研究辐照后非晶合金的自由体积的变化, 并与 AFM 测得的辐照肿胀进行对照研究。由于正电子是一种不稳定的粒子, 与电子相互作用后会湮灭并发出 2~3 个光子, 探测这些光子的产生时间, 结合正电子的入射时间, 即可得到正电子湮灭时间。这就是正电子湮没寿命谱的原理。正电子湮没试验在室温下进行, 采用²²Na 正电子源, 正电子在非晶合金中的射程大约为 15 μm。当正电子发射时, 伴随一个光子产生, 正电子在非晶材料中淹没后, 探测到能量为 0.511 MeV 的光子, 两个光子探测时间差即为正电子的寿命。正电子寿命谱探头采用 BaF₂ 闪烁体探测器, 时间分辨率约 210 ps。信号符合系统电子学插件为美国 EG&G 公司电子学 NIM 插件, 每个谱计数累计 200 万以保证好的统计性, 拟合软件为通用的软件包 LifeTime9.0, 采用三寿命自由拟合。

采用透射电子显微镜 (Transmission electron microscope, TEM) 来研究辐照前后非晶合金的微观结构变化, 并研究是否在辐照后有纳米晶析出; 制备透射电镜截面样品时, 将两块样品辐照面相对粘, 在垂直对粘面方向将对粘样品双面机械抛光, 制成 20~30 μm 的薄片, 再使用离子减

薄的方法将对粘样品局部减薄至 100~200 nm, 以便 TEM 观察。TEM 分析在北京大学电镜中心的 F20 电镜上进行, 运行电压 200 kV。

采用纳米压痕仪 (Nanoindentation) 来研究辐照前后非晶合金表面硬度等力学性能的变化, 并将力学性能的变化与自由体积、纳米晶之间建立联系, 得出离子辐照损伤对非晶合金力学性能的影响。纳米压痕实验使用安捷伦 Nano Indenter G200 纳米压痕仪上进行, 使用 Berkovich 金刚石压头在连续刚度测量 (Continuous stiffness measurements, CSM) 模式下压入 1 μm, 每个样品压入 20 个点。

2 结果讨论

2.1 非晶合金的表面平整度

图 2 为原始样品、1、5、10、50 以及 100 dpa 剂量 Au 离子辐照下非晶合金的 SEM 表面形貌。由图 2(a) 可以看到: 原始非晶合金样品表面光滑, 说明抛光质量较好, 能满足辐照试验的要求。由图 2(a)~(f) 可知, 在 1~100 dpa 剂量的 Au 离子辐照下, 非晶合金的表面都能保持平整, 说明非晶合金在离子辐照后表现出比较强的抗辐照性能。

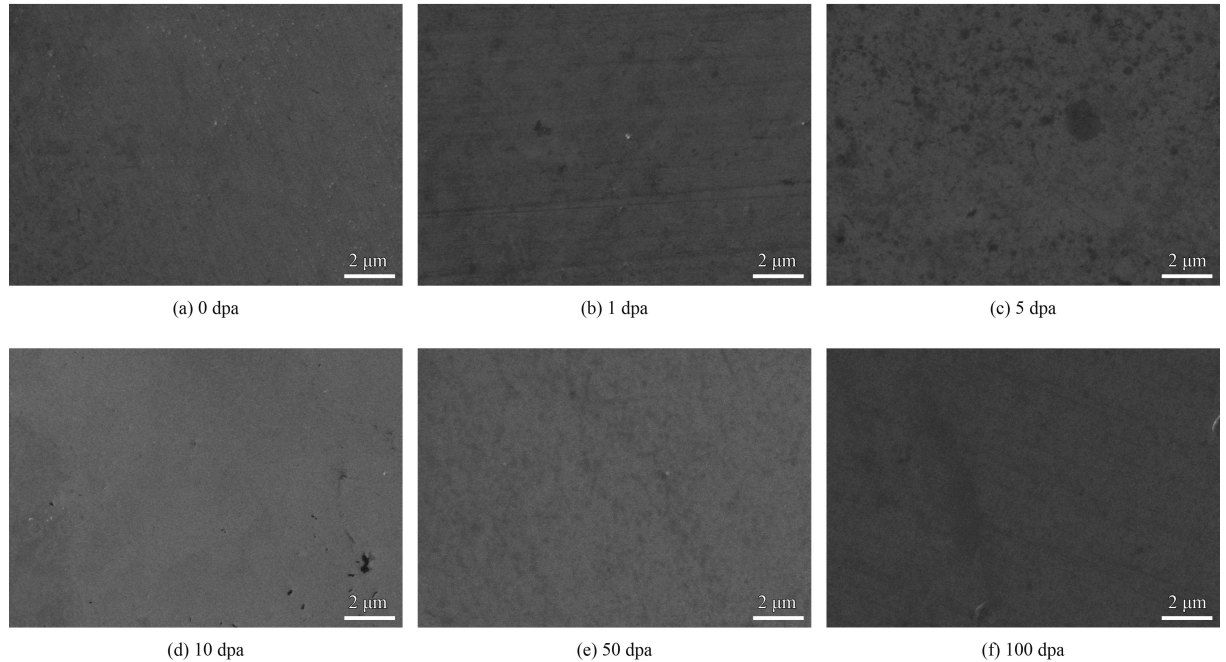


图 2 不同辐照剂量下 Zr_{50.7}Cu₂₈Ni₉Al_{12.3} 非晶合金的 SEM 形貌

Fig.2 SEM images of Zr_{50.7}Cu₂₈Ni₉Al_{12.3} amorphous alloy under different ion irradiation dose

2.2 非晶合金的抗辐照肿胀性

在 1 dpa 剂量时, 使用 AFM 未能找到未辐照区域和辐照区域的交界区域, 非晶合金在此剂量辐照下, 保持了原始样品的形貌, 说明辐照没有引起明显的肿胀, 非晶合金具有一定的抗辐照肿胀性能。

图 3 为 50 dpa 和 100 dpa 剂量下非晶合金辐照与未辐照交界区域的 AFM 形貌, 以及辐照肿胀引起的台阶分布。由图 3(a) 可知在 50 dpa 剂量下, 辐照区域与未辐照区域的形貌和衬度有明显的差异, 这是由于不同区域的高度不一致。使用 Gwyddion 程序, 计算图 3(a) 中绿色的直线所对应的台阶分布如图 3(c) 所示。由图 3(c) 可知, 50 dpa

剂量辐照引起的台阶高度为 12.5 nm。图 3(b) 中绿色的直线所对应的台阶分布如图 3(d) 所示。由图 3(d) 可知, 100 dpa 剂量辐照引起的台阶高度为 22.5 nm。由分析可知, 台阶高度随着辐照剂量的增加而增加, 这与 Leclerc S 等人的研究结果一致^[8]。以上结果表明, 非晶合金具有一定的抗辐照肿胀性能。但在高剂量辐照下, 非晶合金与晶体一样出现辐照肿胀的现象。辐照肿胀源于辐照产生的各种缺陷的综合效果, 这是因为在高剂量下, 非晶合金中的总自由体积增加, 局部区域密度下降, 在辐照方向上发生肿胀, 下面将使用正电子湮没寿命谱的方法对自由体积进行进一步分析研究。

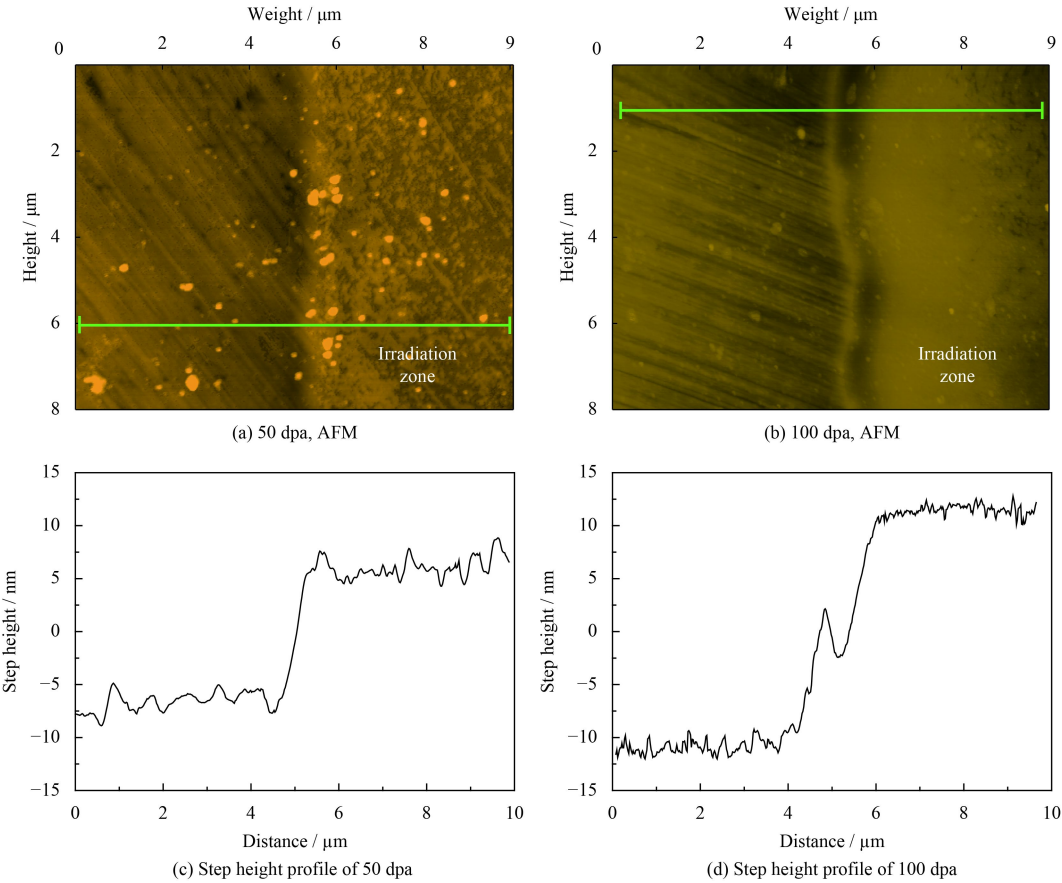


图 3 50 dpa 和 100 dpa 剂量下非晶合金辐照与未辐照交界区域 AFM 形貌以及辐照肿胀引起的台阶分布

Fig. 3 AFM images of amorphous alloy over the interfaces of irradiated and unirradiated regions and the step height profile under the damage of 50 dpa and 100 dpa

2.3 非晶合金的自由体积变化

使用正电子湮没寿命谱研究非晶合金在重离子辐照后自由体积的变化。自由体积越大, 自由体积内的电子密度越少, 因此正电子寿命越长。

使用 Lifetime 9 程序, 对正电子湮没寿命谱进

行解谱, 可以得到 3 组寿命 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 , 为正电子处于不同湮没态时的寿命。其中 τ_1 为单态电子偶素的湮没时间, τ_2 为正电子自由湮没时间, τ_3 为三重态电子偶素拾取湮没时间。3 组寿命相对应的 3 组强度 I_1 、 I_2 、 I_3 , 为正电子处于不同湮没态

的强度。 τ_3 与非晶合金自由体积的大小息息相关, I_3 则与自由体积的浓度相关。 τ_3 与自由体积半径 R 的关系如下:

$$\tau_3 = 0.5 \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

其中, τ_3 以 ns 为单位, ΔR 为自由体积的电子层厚度, 一般取 1.656 Å。

表 1 为不同辐照条件下非晶合金的 τ_3 与 I_3 以及计算得到的自由体积半径和体积。其中, τ_3 为三重态电子偶素拾取湮没时间; I_3 对应 τ_3 的强度; R 为非晶合金中自由体积半径; V 为非晶合金中自由体积大小。由表 1 可知, 经过 Au 离子辐照后, 自由体积的尺寸有所增加, 但是自由体积的密度有所下降。重离子辐照后, 非晶合金中内部的自由体积发生了填充过程。在重离子碰撞下, 一些自由体积边缘的原子往外扩散, 并通过级联碰撞将另一些自由体积填充, 从而使得自由体积尺寸变大, 但是自由体积密度减小。100 dpa 剂量下, 平均自由体积的半径比 1 dpa、50 dpa 剂量下

表 1 不同非晶合金样品的 τ_3 , I_3 , 自由体积半径及体积
Table 1 τ_3 , I_3 , free volumes radii and volumes of different amorphous alloy samples

Dose / dpa	τ_3 / ns	I_3 / %	R / Å	V / Å ³
0	2.18	3.13	3.01	113.9
1	2.26	2.89	3.08	118.9
50	2.29	2.67	3.10	120.8
100	2.24	3.02	3.06	117.7

的自由体积半径小, 但是自由体积密度有所增加, 结合 AFM 的结果, 可推测总自由体积是增大的。对照 AFM 测得的辐照肿胀的结果可知: 辐照后非晶合金中的总自由体积增加, 密度减小, 表现为辐照肿胀。

2.4 非晶合金的微观结构变化

为了解辐照对非晶合金微观结构的影响, 使用透射电子显微镜 (TEM) 观察 3 MeV Au 离子辐照 Zr_{50.7}Cu₂₈Ni₉Al_{12.3} 非晶合金时微观结构的变化。图 4 为不同非晶合金样品的 TEM 形貌。由图 4(a) 可知, 制备的原始非晶合金质量较高, 呈

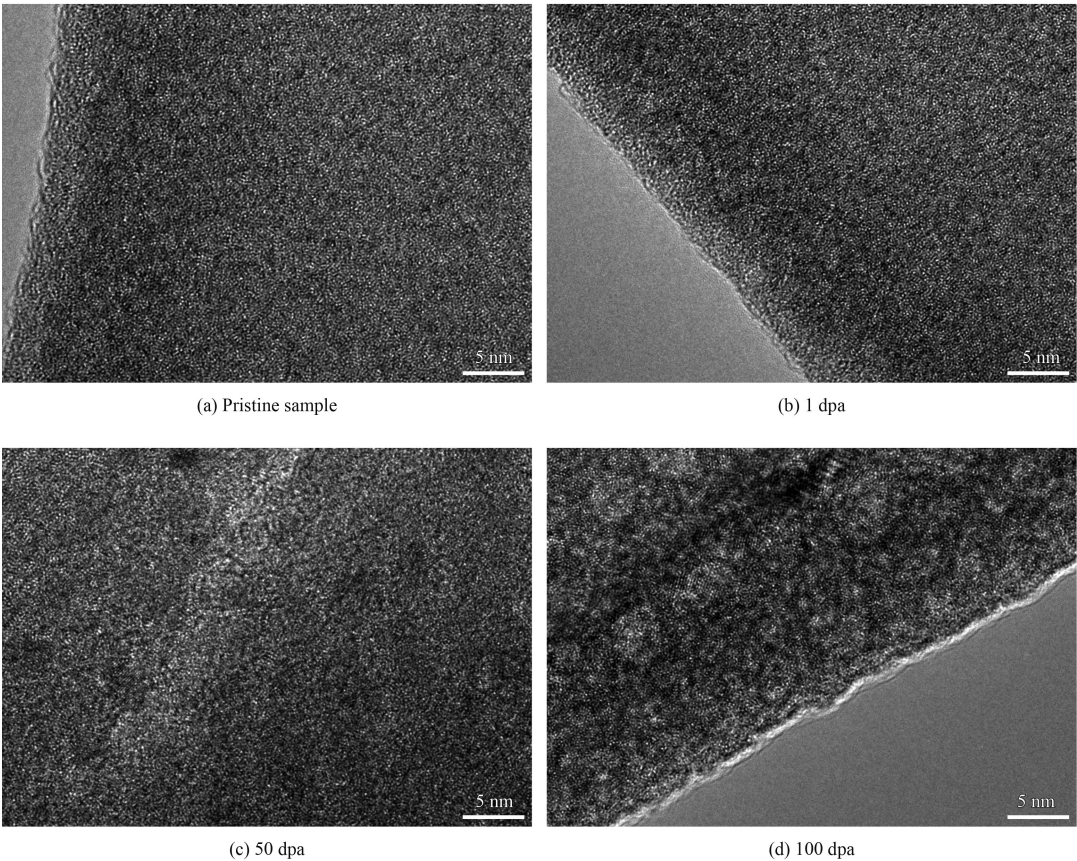


图 4 不同非晶合金样品的 TEM 形貌
Fig.4 TEM images of different amorphous alloy samples

现完整的非晶态。此外也可得知离子减薄方法不会在非晶合金中引入纳米晶。图 4(b) 为 1 dpa 剂量下, 300 nm 深度附近非晶合金的 TEM 形貌, 由图可知在此剂量下离子辐照几乎没有改变非晶合金的微观结构, 非晶合金表现出一定的抗辐照性能。图 4(c) 为 50 dpa 剂量时, 300 nm 深度附近非晶合金的 TEM 形貌。由图可知, 50 dpa 时, 总体来说非晶态比较完整, 但是非晶合金中有少量 2~3 nm 的纳米晶析出。纳米晶的析出, 一般认为是由于离子辐照下非晶合金原子发生了迁移, 并在局域内形成了最低能量状态的结晶态。图 4(d) 为 100 dpa 剂量时, 300 nm 深度附近非晶合金的 TEM 形貌。由图可知, 100 dpa 时, 析出纳米晶的密度增加了, 尺寸也变大了, 部分纳米晶尺寸可达 5 nm。而且纳米晶之间相互发生了交联, 有形成更大尺寸纳米晶的趋势。在高剂量下, 入射离子在局部产生了更加广泛的级联碰撞, 使得非晶合金原子的迁移更加频繁, 从而产生了尺寸更大、密度更高的纳米晶。

2.5 非晶合金的力学性质变化

使用纳米压痕方法研究 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ 非晶合金辐照前后力学性能的变化, 并将力学性能的变化与自由体积、纳米晶建立起联系。

图 5 为不同非晶合金样品纳米硬度随深度的关系。表面至 100 nm 之间硬度波动比较大, 是由于压头的形状与理想形状不同以及表面效应的影响。为保证试验准确性, 文中研究 200~1 000 nm 的硬度对比。由图可知, 在重离子辐照之后, 非晶样品的硬度都出现不同程度的下降, 表现为辐照软化。1 dpa 剂量下, 非晶合金软化最严重, 之后随着剂量的增加, 纳米硬度相比 1 dpa 剂量时又有所增加, 但是比原始样品小。这是辐照软化是自由体积增加的结果。由 AFM 以及正电子湮没寿命谱分析可知, 在不同剂量的重离子辐照后, 非晶合金中都出现了辐照肿胀以及自由体积的增加。自由体积的增加意味着局部范围内原子之间的势能减小, 原子的迁移概率增加, 使得硬度减小。在 50 dpa、100 dpa 时, 硬度又有所提升, 这是纳米晶析出造成的。

由 TEM 分析结果可知, 在 50 dpa 时有少部分 2~3 nm 纳米晶产生, 100 dpa 时纳米晶的尺寸

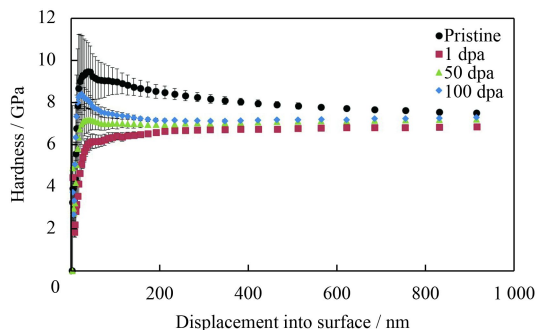


图 5 非晶合金在不同剂量辐照后硬度随深度的变化

Fig.5 Changes of hardness with depth of amorphous alloy under different dose irradiation

和密度都有所增加。Kondo M 等人认为, 纳米晶的析出会增加非晶合金的硬度^[9]。因此文中认为重离子辐照下, 非晶合金硬度的变化是自由体积和纳米晶析出竞争的结果。

3 结 论

非晶合金 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ 在 3 MeV 不同剂量 Au 离子的辐照下, 通过 SEM、AFM、正电子湮没寿命谱、纳米压痕以及 TEM 等一系列表征探讨了非晶合金辐照后力学性能的变化。

(1) SEM 表面分析表明, 在经过 1~100 dpa 剂量的 Au 离子辐照下, 非晶合金的表面依旧可以保持平整, 说明非晶合金在离子辐照后表现出比较强的抗辐照性能。

(2) AFM 以及正电子湮没寿命谱分析表明, 在离子辐照过程中, 随着 Au 离子辐照剂量的增加, 非晶合金中的自由体积尺寸在逐渐增大, 密度反而在逐渐减小, 但是非晶合金中总体的自由体积在逐渐增大。

(3) TEM 微观结构分析表明, 非晶合金在 50 dpa 时开始有 2~3 nm 的纳米晶析出, 随着辐照剂量的增加纳米晶尺寸增大, 并且密度也呈现增加的趋势。

(4) 通过非晶合金的纳米压痕试验发现, 非晶合金表面的硬度在随着辐照剂量的变化过程中, 在低剂量如 1 dpa 的情况下相比原始样品都有所下降, 但在高剂量如达到 50 dpa、100 dpa 时, 硬度相比低剂量又有所增加。离子辐照下非晶合金的硬度变化是自由体积以及纳米晶竞争的结果。自由体积使非晶合金软化, 纳米晶的析出长大使非晶合金进一步硬化。

参考文献

[1] MUKHERJEE S, SCHROERS J, JOHNSON W L, et al. Influence of kinetic and thermodynamic factors on the glass-forming ability of zirconium-based bulk amorphous alloys[J]. Physics Review Letter, 2005, 94(24): 167-172.

[2] TELFORD M. The case for bulk metallic glass[J]. Materials Today, 2004, 7(3): 36-43.

[3] TYAGI A K, NANDEDKAR R V. Helium irradiation of Ni-(Zr or Nb) metallic glasses: Blistering, flaking and bubble formation[J]. Journal of Nuclear Materials, 1985, 132(1): 62-69.

[4] TYAGI A K, NANDEDKAR R V, KRISHAN K. Blistering, flaking and bubble formation in metal-metalloid metallic glasses bombarded with helium ions[J]. Journal of Nuclear Materials, 1983, 116(1): 29-39.

[5] TYAGI A K, NANDEDKAR R V. Surface damage of metallic glasses by argon ion bombardment[J]. Journal of Nuclear Materials, 1987, 148(1): 76-85.

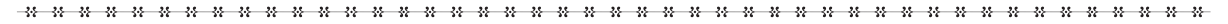
[6] TYAGI A K, NANDEDKAR R V, AND KRISHAN K. Helium and argon ion damage in metallic glasses[J]. Journal of Nuclear Materials, 1984, 122(1): 732-736.

[7] INOUE A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys[J]. Acta Materials, 2000, 48(1): 279-306.

[8] LECLERC S, DECLEMY A, BEAUFORT M F, et al. Swelling of SiC under helium implantation[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(11): 113506-113506-6.

[9] KONDO M, NAGASAKA T, TSISAR V, et al. Corrosion of reduced activation ferritic martensitic steel JLF-1 in purified Flnak at static and flowing conditions[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(7): 1430-1435.

(责任编辑: 黄艳斐)



• 本刊讯 •

2018 年全国青年摩擦学大会在福州成功举行

4 月 27—29 日, 2018 年全国青年摩擦学学术会议在福建福州召开。会议由中国机械工程学会摩擦学分会主办, 福州大学承办, 中国机械工程学会摩擦学分会、国家自然科学基金委员会工程与材料学部支持。中国机械工程学会摩擦学分会主任委员、中国矿业大学校长葛世荣教授担任此次会议的大会主席。来自全国 100 余家高等院校、科研院所、公司企业的近 600 名摩擦学工作者参加了会议, 其中包括摩擦学领域的院士、国家千人计划特聘教授、国家杰出青年基金获得者、长江学者和企业界专家学者, 以及高校和中科院的研究生。

28 日上午, 开幕式由福州大学机械工程及自动化学院院长姚立纲教授主持, 福州大学副校长黄志刚教授代表承办单位致欢迎辞。中国机械工程学会摩擦学分会主任委员葛世荣教授, 中国科学院院士、摩擦学分会常务委员、中科院兰州化学物理研究所刘维民研究员和中国机械工程学会摩擦学分会青年工作委员会主任委员、中国科学院兰州化学物理研究所郭志光研究员作了重要讲话。

开幕式后, 中国科学院刘维民院士和清华大学摩擦学国家重点实验室主任孟永钢教授分别应邀在会上做了大会的主旨报告。随后 12 名摩擦学领域的专家学者从摩擦学的思维创新、科技资助、前沿基础理论、工程实践等多方面做了大会特邀报告, 给予大会代表以启迪和思考, 并展示了摩擦学在国家发展及经济建设等方面的广阔前景, 引起了代表的强烈共鸣, 现场互动热烈, 学术气氛浓厚。

29 日全天进行了分会场报告及展览交流, 设 7 个分会场共 204 个分会报告。分会场有 28 位青年学者分别就摩擦学理论、技术和应用等问题做了特邀报告。会议期间, 围绕材料的摩擦磨损、润滑与摩擦化学、涂层/表面/界面摩擦学、微纳摩擦学、生物摩擦学及其它摩擦学相关问题、工业摩擦学等会议主题, 与会代表在分会场开展了深入的研讨与交流。各界摩擦学学者、工作者交流了在摩擦学基础理论和应用方面取得的成果和经验。组委会选出 21 篇“优秀论文奖”及 3 家“单位优秀组织奖”。此次大会促进了各界摩擦学学者与工作者的交流与合作, 更进一步推动了摩擦学科学技术的进步与发展。

(本刊编辑部 供稿)