

Ar 离子辐照非晶态合金引起的尺寸变化*

刘昌龙 侯明东 王志光 程松 孙友梅
朱智勇 金运范 李长林 王引书 孟庆华

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1996-11-10 收稿

摘 要

利用兰州重离子加速器(HIRFL)提供的 2.79MeV/u Ar 离子,在 50K 以下的低温辐照了 Fe₄₇Ni₂₉V₂Si₆B₁₆ 等 4 种非晶态合金样品,室温下使用光学显微镜对辐照前、后的同一样品拍照,对比测量了样品的宏观尺寸.结果表明:在辐照剂量为 1.5×10^{14} 离子/cm² 时,非晶态合金形变不明显,测量到的样品宽度相对增长 $\Delta b/b_0$ 均小于 1.0%;当辐照剂量增加到 1.6×10^{15} 离子/cm² 时,所有非晶态合金样品都发生了显著的形变,其宽度相对增长分布在 4.3%—12.0% 之间.对此结果进行了定性的分析.

关键词 非晶态合金, Ar 离子辐照, 尺寸变化.

1 引 言

荷能离子穿过固体材料,主要通过核阻止和电子阻止损失其能量,即核能损 S_n 和电子能损 S_e . 电子能损在固体中引起的损伤效应是近十年来的研究热点,国际上现有的几台重离子加速器都在进行该领域的研究.在各种类型的固体材料中现已观测到了越来越多的电子能损引起的损伤效应,如电子能损在金属中引起的缺陷的产生与退火^[1]、晶态合金中的非晶化和潜径迹形成^[2]、非晶态材料各向异性的塑性形变等^[3],并且仍不断有新的现象被发现.

S. Klaumünzer 等人首先报道了快重离子低温辐照引起非晶态合金的各向异性塑性形变^[3]:样品的尺寸在垂直于入射束流方向生长,在平行于束流方向收缩,而样品的体积几乎不变.这种形变效应对电子能损的依赖性很强,电子能损值越高,形变效应越明显.这动摇了电子能损不贡献于金属靶中原子位移的传统观念,促使人们去探讨沉积在靶电子系统中的能量如何转化为原子位移这个微观过程.

目前,对 Kr 以上的重离子辐照非晶态合金引起的塑性形变的研究已积累了相当多的

* 国家自然科学基金和甘肃省自然科学基金资助.

数据, 而关于 Ar 及 Ar 以下的重离子辐照的数据却很少. 本工作利用 HIRFL 提供的 2.79MeV / u Ar 离子在 50K 以下的低温辐照了 $\text{Fe}_{47}\text{Ni}_{29}\text{V}_2\text{Si}_6\text{B}_{16}$ 等 4 种非晶态合金, 在样品的厚度稍小于离子射程的情形下, 研究了 Ar 离子辐照引起的宏观尺寸变化.

2 实验过程

实验采用了 $\text{Fe}_{47}\text{Ni}_{29}\text{V}_2\text{Si}_6\text{B}_{16}$ 、 $\text{Fe}_{77.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 、 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{Si}_{12}\text{B}_8$ 和 $\text{Fe}_{39}\text{Ni}_{39}\text{V}_2\text{Si}_{12}\text{B}_8$ 4 种非晶态合金, 用电解的方法将非晶态合金的厚度减至 8.0—10.5 μm , 然后截取面积为 3mm ×

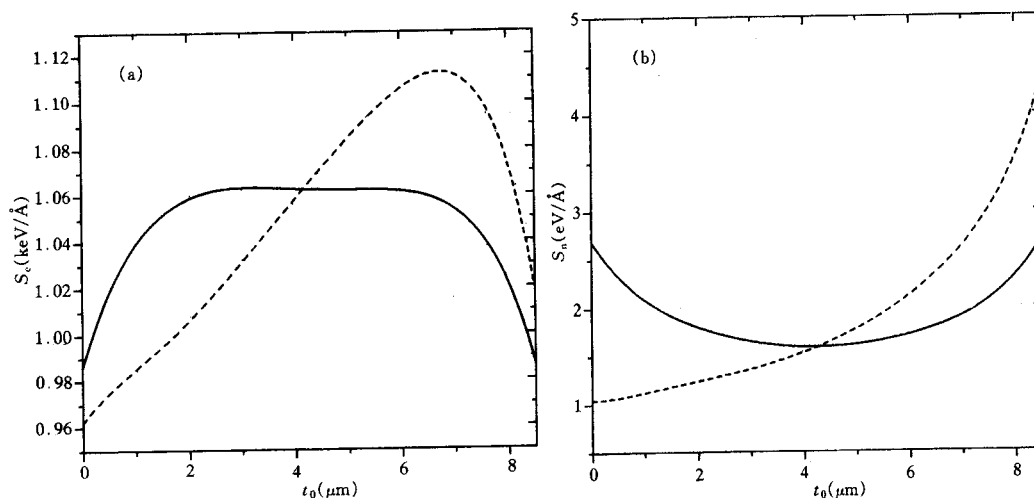


图 1 用 TRIM-89 程序计算得到的 2.79MeV/u Ar 离子辐照 8.5 μm 厚的非晶态合金 $\text{Fe}_{77.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Si}_9\text{B}_{13}$

电子能损 S_e (a)、核能损 S_n (b) 随深度的分布

—为两面照射下的能损分布; ---为单面照射下的能损分布.

1mm 的长方形样品. 将样品并排地夹在两铜块间, 露出约 1mm × 1mm 的部分接受 2.79MeV / u 的 Ar 离子辐照. 装有样品的铜块夹固定在低温恒温器的冷指上, 低温恒温器可以 $\pm 180^\circ$ 旋转. 为了得到良好的热接触, 铜块间、铜块与冷指间安放了薄的铜片. 实验中, 对样品进行了两面辐照, 每步剂量为 6×10^{13} 离子 / cm^2 . 整个辐照过程中, 温度由固定在铜块上的热电偶测量得到, 并控制在 50K 以下. 样品尺寸的变化通过室温下对辐照前后的样品光学显微镜拍照, 对比测量得到. 辐照中采用两面照射的方法有助于改善样品中 Ar 离子能量沉积的均匀性 (如图 1 所示). 由图 1 可以看出, 在 2.79MeV / u 的 Ar 离子辐照下, 电子能损比核能损要高 2—3 个量级.

3 结 果

在表 1 和图 2 中给出了 2.79MeV / u Ar 离子辐照下非晶态合金的塑性形变随剂量 Φt 的变化. 表 1 中 t_0 为样品的厚度, R_p 、 ΔR_p 分别为 Ar 离子在样品中的平均投影射程和射程歧离, $\langle S_e \rangle$ 、 $\langle S_n \rangle$ 和 $\langle P \rangle$ 分别为样品中的平均电子能损、平均核能损以及仅考虑核弹性碰撞

时的平均原子位移截面, $\Delta b / b_0$ 为样品最底端宽度相对增长量. 从实验结果可以看出: 低剂量 (1.5×10^{14} 离子 / cm^2) 辐照引起的样品的形变不明显, 测量到的样品的宽度相对变化 $\Delta b / b_0$ 均小于 1.0%. 而当辐照剂量增加到 1.6×10^{15} 离子 / cm^2 , 几种非晶态合金都发生了较大的塑性生长, 并且不同组元、组份的非晶态合金样品生长程度不同. 图 2 中的直线是对数据的线性拟合. 直线的斜率给出了每种材料的塑性生长率, 其物理含义为一个入

表 1 2.79MeV/u Ar 离子辐照 4 种非晶态合金到 1.6×10^{15} 离子 / cm^2 时测量到的宽度相对增长 $\Delta b / b_0$ 及主要参数

样 品	t_0 (μm)	$R_p \pm \Delta R_p$ (μm)	$\langle S_e \rangle$ ($\text{keV} / \text{\AA}$)	$\langle S_n \rangle$ ($\text{eV} / \text{\AA}$)	$\langle P \rangle$ (10^{-17}cm^2)	Φ_t ($\times 10^{15}$ 离子 / cm^2)	$\Delta b / b_0$ (%)
$\text{Fe}_{47}\text{Ni}_{29}\text{V}_2\text{Si}_6\text{B}_{16}$	8.0	11.7 ± 0.5	1.09	2.18	1.75	0.15	0.4
						1.6	7.6
$\text{Fe}_{77.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Si}_9\text{B}_{13}$	8.5	11.9 ± 0.5	1.06	2.31	1.85	0.15	0.7
						1.6	12.0
$\text{Fe}_{39}\text{Ni}_{39}\text{V}_2\text{Si}_{12}\text{B}_8$	10.0	11.4 ± 0.5	0.96	5.62	4.43	0.15	0.5
						1.6	6.0
$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{Si}_{12}\text{B}_8$	10.5	11.3 ± 0.5	0.83	10.00	7.84	0.15	0.3
						1.6	4.3
$\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}^{(a)}$	8.5	16.7 ± 0.7	1.00	1.40	0.83	2.68	1.1

(a) 引自文献[4].

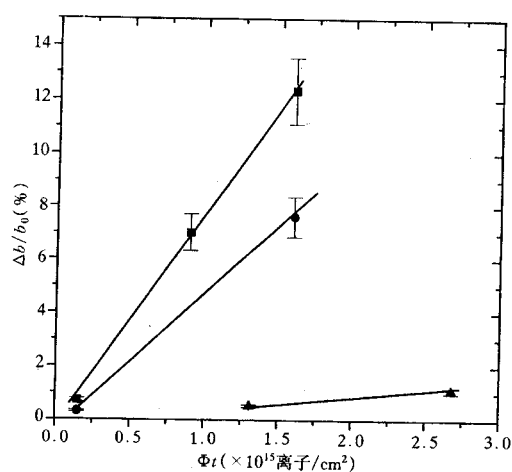


图 2 2.79MeV/u Ar 离子辐照下, 各种非晶态合金宽度相对生长 $\Delta b / b_0$ 随剂量 Φ_t 的变化曲线

■ 为 $\text{Fe}_{77.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Si}_9\text{B}_{13}$; ● 为 $\text{Fe}_{47}\text{Ni}_{29}\text{V}_2\text{Si}_6\text{B}_{16}$; ▲ 为 $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$ (引自文献[4]).

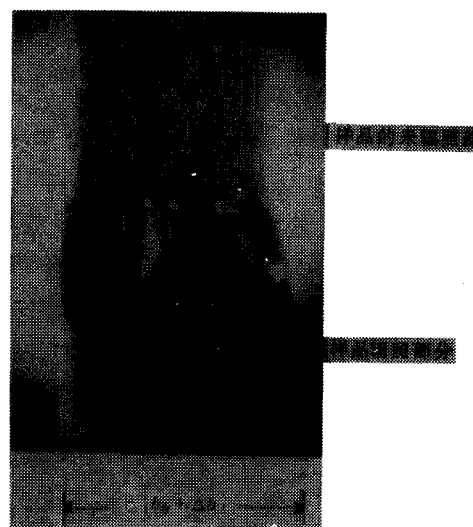


图 3 2.79MeV/u Ar 离子辐照非晶态合金 $\text{Fe}_{77.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 到 1.6×10^{15} 离子 / cm^2 剂量时的光学显微镜照片

射离子引起的样品表面积的变化,它是描述塑性形变的一个重要的物理参数。

图 3 为由光学显微镜拍摄的非晶态合金 $\text{Fe}_{77.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 样品辐照后的照片。在照片中,样品的上部由于夹在厚度远远大于离子射程的铜片之间,没有受到 Ar 离子的辐照,因此保持了原有的形状和大小;而下部在 Ar 离子的轰击下,样品的形状和大小都发生了显著的变化。同时,由于固定对样品的机械约束,导致了靠近固定端样品的皱褶。

4 讨 论

目前,关于快重离子辐照引起低温下非晶态固体发生各向异性的塑性形变的微观物理过程尚不十分清楚。为了解释这种效应,人们提出了许多尝试性的模型,如 S. Klaumünzer 等人^[5]认为形变来源于靶原子的电离和激发引起的“库仑爆炸”,提出由材料的某种机械极化“剪切单位”触发不可逆“剪切应变”的所谓缺陷反应运动学模型,从唯象的角度描述了塑性形变。而 H. Trinkaus 等人^[6]则提出粘弹性模型,认为离子在样品中能量的沉积引起了沿离子路径的一个柱状区域内材料熔化和快速冷却,热应力弛豫和快速冷却使相应的形变增量“冻结”而引起塑性形变。前一模型虽然较好地解释了较高电子能损引起的非晶态固体各向异性的塑性形变的某些规律,并给出了支配塑性形变的主要参数,但没有对较低电子能损引起的形变进行考虑。本实验给出了较低电子能损引起的形变的数据。实验中所使用的 Fe-Si-B 和 Fe-Ni-Si-B 两个系列的非晶态合金样品在辐照下表现出了比 $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$ 非晶态合金^[4]大得多的生长(见表 1 和图 2),主要有以下两个原因:

(1) 材料性质(包括材料的组元、组份及制备工艺等)的影响:不同的材料具有不同的辐照生长率,其生长率的差异可达几倍。实验结果表明, Pd-Si 系列的非晶态合金不如 Fe-Ni-Si-B 和 Fe-Si-B 系列的非晶态合金敏感,在相同的辐照条件下,前者的生长率要比后者小好几倍,这与文献 [5] 给出的结果一致。

(2) 样品厚度的影响:图 1 给出了 2.79MeV/u Ar 离子在样品中的电子能量沉积(S_e)和核能量的沉积(S_n 或 $\langle P \rangle$)。样品厚度的增加使得由核弹性碰撞而产生的平均原子位移增大,导致在单位体积样品中产生更多的缺陷。在缺陷反应运动学模型^[5]下,非晶态合金中缺陷的产生可以看成自由体积的增加,样品的粘性随其中自由体积的增加而大大地减小。因此,一个小的剪切应力就会造成大的形变,即样品中缺陷浓度的增加有助于塑性形变的发生。通过在线电阻测量的方法, A. Audouard 等人^[7]已观测到了样品生长率与样品中缺陷浓度的这种相关性。对于我们的辐照条件,单面辐照中离子穿过样品时在射程后端沉积的能量较射程前端多,即样品前表面的辐照生长比后表面的小,故样品应迎着束流的来向弯曲。在实验过程中已观测到了样品的这种择向弯曲性。样品的弯曲影响到束流与样品间的辐照几何条件,可导致垂直于束流方向的样品尺寸生长效应变小^[8]。尤其是当样品弯曲严重至离子阻止在样品中时,离子在样品中的平均能量沉积会较大地下降。对于不同厚度的 $\text{Fe}_{47}\text{Ni}_{29}\text{V}_2\text{Si}_6\text{B}_{16}$ 、 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{Si}_{12}\text{B}_8$ 和 $\text{Fe}_{39}\text{Ni}_{39}\text{V}_2\text{Si}_{12}\text{B}_8$ 3 种 Fe-Ni-Si-B 系列的非晶态合金,其生长随厚度的增加而减小可能与这种样品弯曲引起的生长负效应有关。

此外,样品在辐照中沿悬挂方向存在的温度梯度也会对样品的生长产生一定的影响。在辐照过程中样品温度的控制仅仅靠与铜块接触部分的热传导来实现。因此,受辐照样

品沿悬挂方向必然存在着依赖于样品的热传导性质的温度梯度。由于生长率是温度函数,对于特定的样品,辐照的温度一旦高于某一个值,生长率随温度的增加会迅速地减小^[4]。在测量样品的尺寸时,我们观察到了个别样品的形状在辐照后变得中间突出而下部较小,这说明了底端具有较上端高的温度。

迄今为止,关于 Ar 离子辐照非晶态合金引起尺寸变化的研究十分有限,见有报道的也仅是 170MeV Ar 离子在 50K 以下的低温辐照 Pd₈₀Si₂₀ 非晶态合金所得的结果^[4]。因此,为了更好地从理论上去解释离子束引起的塑性形变,更多的数据积累和分析工作必须进行。

参 考 文 献

- [1] A. Dunlop, P. Legrand, D. Lesueur *et al.*, *Europhys. Lett.*, **15**(1991)765.
- [2] A. Barbu, A. Dunlop, D. Lesueur *et al.*, *Europhys. Lett.*, **15**(1991)37.
- [3] S. Klaumünzer, G. Schumacher, *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983)1987.
- [4] G. Schumacher, S. Klaumünzer, S. Rentzsch *et al.*, *J. Non-Crys. Sol.*, **61&62**(1984)365.
- [5] Ming - dong Hou, S. Klaumünzer, G. Schumacher, *Phys. Rev.* **B41**(1990)1141.
- [6] H. Trinkaus, A. I. Ryazanov, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995)5072.
- [7] A. Audouard, J. Dural, M. Toulemonde *et al.*, *N.I.M.*, **B107**(1996)185.
- [8] A. Audouard, J. Dural, M. Toulemonde *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter*, **5**(1993)995.

Dimensional Changes of Amorphous Alloys Under Swift Ar Ion Irradiation

Liu Changlong Hou Mingdong Wang Zhiguang Cheng Song Sun Youmei
Zhu Zhiyong Jin Yunfan Li Changlin Wang Yinshu Meng Qinghua

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

Received 10 November 1996

Abstract

Small strips of amorphous alloys Fe_{77.2}Mn_{0.8}Si₉B₁₃, Fe₃₉Ni₃₉V₂Si₁₂B₈, Fe₄₇Ni₂₉V₂Si₆B₁₆ and Fe₄₀Ni₄₀Si₁₂B₈ have been irradiated with 2.79MeV / u Ar ions below 50K. Using optical microscopy, the macroscopic dimensions of the samples were measured at room temperature before and after irradiation. The observed dimensional changes of all the samples are very small for the low fluence of 1.5×10^{14} ions / cm², but it becomes drastically large and irreversible when the fluence increased to 1.6×10^{15} ions / cm². The measured relative change in width $\Delta b / b_0$ is in the range of 4.3%—12.0%. The results are qualitatively discussed.

Key words amorphous alloy Ar ion irradiation, dimensional change.