

铜基非晶合金板弯曲塑性及剪切带间距的研究 *

江 峰^{1,2)} 张志博¹⁾ 张 敬¹⁾ 贺 林¹⁾ 孙 军¹⁾

1) 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049

2) 西安交通大学建筑与力学工程学院, 西安 710049

摘 要 制备了一种压缩断裂塑性应变接近 2% 的铜基块状非晶板材, 并利用三点弯曲实验进行了其弯曲塑性、剪切带间距与试样厚度关系的研究. 结果表明: 非晶合金的弯曲断裂塑性应变明显依赖于试样厚度, 即弯曲断裂塑性应变随试样厚度增加呈指数衰减关系减少; 弯曲时剪切带间距随试样厚度增加而线性增加; 剪切带间距与试样厚度的比值对于同一非晶合金为恒定值, 但随非晶合金种类的不同而变化, 与非晶合金的塑性变形能力有关.

关键词 铜基块状非晶, 弯曲塑性, 剪切带间距

中图法分类号 TB383, TG111 文献标识码 A 文章编号 0412-1961(2005)10-1031-06

BENDING DUCTILITY AND SHEAR BAND SPACING OF COPPER-BASED METALLIC GLASS PLATE

JIANG Feng^{1,2)}, ZHANG Zhibo¹⁾, ZHANG Jing¹⁾, HE Lin¹⁾, SUN Jun¹⁾

1) State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University 710049

2) School of Civil Engineering and Mechanics, Xi'an Jiaotong University 710049

Correspondent: SUN Jun, professor, Tel: (029)82667143, E-mail: junsun@xjtu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.59871036 and 59925104) and the China Postdoctoral Funds

Manuscript received 2005-03-30, in revised form 2005-06-03

ABSTRACT A Copper-based bulk metallic glass with compression plastic stain near to 2% was prepared and bending tests were undertaken to investigate the dependences of ductility and shear banding spacing on metallic plate thickness. The results show that the relationship between bending ductility and the plate thickness is an exponential decay relation, which is agreement well with the relation between the bending fracture plastic stain and the plate thickness. The results also show that the shear band spacing in metallic glass plates under bending varies linearly with plate thickness and the ratio of shear band spacing to plate thickness is a constant. However, for different metallic glasses, the ratios are not a constant and dependent on their plastic deformation ability.

KEY WORDS Copper-based bulk metallic glass, bending ductility, shear band spacing

20 世纪 80 年代后期, 大尺寸块状非晶合金的制备和性能研究有了实质性进展^[1], 通过铸造方法制备的块状非晶合金已超过了 1000 种, 其中超过 50% 的合金是近 5 年获得的^[2], 成分涉及 Pt, Pd, Mg, Zr, Al, Cu, Ti, Ni, Fe 基等众多合金体系. 制备的非晶合金试样最大直径 (厚度) 也从几毫米增加到近 100 mm, 目前已经在民用及军事领域显示出广阔的应用前景. 然而非晶合金的本征脆性 (非晶条带表现出的柔软性并非塑性) 极大地阻碍了其作为高

性能结构材料的应用前景, 作为功能材料的应用也受到一定的限制. 在较低温度 (如室温附近) 和高的应力条件下, 非晶合金塑性变形模式通常为非均匀局部区域的剪切流变. 非晶合金单向拉伸时, 一般沿着最大剪切应力方向形成单一剪切带, 剪切带迅速扩展形成裂纹, 并穿透试样, 几乎没有出现任何宏观塑性就发生了断裂. 在单向压缩时试样以弹性 - 理想塑性模式通过多重剪切带的产生而显示一定的塑性应变, 但一般不超过 2%. 相关的研究^[3,4]也表明弯曲实验时, 当非晶合金试样厚度 (或直径) 小到某一临界值 (比如锆基非晶合金在 1 mm 以下) 时, 可以通过产生均匀的多重剪切带而发生可观的塑性变形, 甚至不发生断裂, 而同样材料的非晶合金厚板弯曲时虽然也形成多重剪切带, 但几乎没有出现塑性变形就发生断裂. 也就是说, 非晶合金的弯曲塑性存在明显的尺寸依赖性 (即

* 国家自然科学基金项目 59871036 和 59925104, 中国博士后基金 (2003 年秋季) 项目资助

收到初稿日期: 2005-03-30, 收到修改稿日期: 2005-06-03

作者简介: 江 峰, 男, 1973 年生, 副教授, 博士

尺寸效应)^[5,6]. 进行非晶合金弯曲塑性尺寸效应的研究对于理解非晶合金的变形机理以及开发新的具有良好延性的非晶合金及其复合材料具有重要的指导意义^[4].

本文通过非晶合金弯曲实验研究试样厚度与其弯曲塑性关系, 并对剪切带间距与试样厚度的比值及其和材料塑性之间的相关性进行了初步探讨.

1 实验方法

采用高真空电弧熔炼炉, 在氩气保护、Ti 净化环境下, 水冷铜坩埚电磁搅拌、电弧熔炼母合金, 反复熔炼四次, 在电弧熔炼过程中翻转水冷坩埚 60°, 使合金熔体注入固定在坩埚一侧的水冷铜模, 制备得到厚度为 3 和 3.5 mm 的板状样品. 合金的名义成分 (原子分数) 为 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$, 原料纯度均在 99.9% 以上. 对于铸态板状合金的截面采用 X 射线衍射 (XRD) 确定其非晶结构, 采用 DSC800 差热分析仪进行等温和变温测试, 进一步确定其非晶结构以及测定玻璃转变温度 (T_g)、晶化温度 (T_x). 变温 DSC 测试的升温速率为 0.33 K/s, 等温 DSC 测试采用 743 K 保温 30 min. 对于确定为完全非晶结构的 3 mm 合金板利用电火花线切割方法加工得到尺寸为 32 mm×4.2 mm×3 mm 的非晶合金板条, 然后采用磨床加工四个表面, 得到尺寸为 32 mm×3.8 mm× h ($h=0.6-2.8$ mm) 的非晶板条, 再对 $h=0.6$ mm 的试样进行手工减薄, 最后得到一系列相同长度和宽度、不同厚度 h (0.18 mm ≤ h ≤ 2.5 mm) 的非晶合金板条, 每个厚度有 3 个尺寸相同的试样. 采用三点弯曲加载方式进行弯曲实验, 记录载荷-挠度 ($P-\delta$) 曲线. 为了便于弯曲实验完毕后采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样侧面产生的剪切带形状及进行剪切带间距测量, 试样的侧面预先进行金相抛光处理. 另外加工尺寸为 2.5 mm×2.5 mm×5 mm (径向比为 1 : 2) 的压缩实验试样 5 件.

三点弯曲实验在位移控制加载的 SANS 试验机上进行, 加载速率 0.2 mm/min, 载荷精度 0.1 N, 自动记录载荷-挠度 ($P-\delta$) 曲线, 实验过程中, 跨距根据试样的厚度有所不同, 试样厚度 2.8 mm 时跨距为 16 mm, 厚度 0.2 mm 时跨距为 8 mm, 加载的压头半径为 1 mm. 实验完毕后, 试样的侧面采用 SEM 进行观察, 并采用统计方法计算剪切带间距的大小. 单向压缩实验在位移控制加载的 Instron 试验机上进行, 应变速率为 5×10^{-3} s⁻¹.

2 实验结果与讨论

2.1 非晶结构的确定及热性能

图 1 是 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 非晶合金不同厚度试样的 X 射线衍射谱. 可以看出 3 mm 板的衍射谱主要由一个主峰和一个较弱的次峰组成, 没有表征晶体的峰存在; 而 3.5 mm 板的衍射则显示出部分晶体特征. 需要指出的是微晶结构材料的 X 射线衍射谱与非晶结构材料的 X 射线衍射峰相似, Chen 和 Spaepen^[7] 指出等温热分析曲线可以用来区分非晶和微晶结构, 真正的非晶结构材料

在等温扫描时会出现放热峰, 而微晶结构材料则显示单峰下降趋势. 因此采用等温热分析实验来进一步确定制备的 3 mm 合金板的非晶结构, Xu 等^[8] 也曾采用相同的方法来确定材料是非晶结构.

图 2 为 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 3 mm 合金板等温和变温 DSC 曲线. 其中, DSC 变温测试的升温速率为 0.33 K/s, 根据其 DSC 曲线 (图 2a) 确定玻璃转变温度 T_g 、晶化温度 T_x 和过冷液相区温度分别为 696, 769 和 76 K, 这些热力学性能与文献^[8] 报道的结果一致. 图 2b 为 743 K 时的等温 DSC 曲线, 具有明显的显示形核-长大过程特征的放热峰, 这个结果进一步证实了本文得到的 3 mm 的 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 合金具有完全的非晶结构.

2.2 单向压缩实验性能

单向压缩实验得到的应力-应变曲线如图 3 所示. 可以看出在超过弹性极限以后显示出一定的塑性变形, 在塑性变形过程中产生明显的锯齿流动, 这种锯齿流动与多重剪切带的产生有关. 最近有研究^[9] 表明 $\text{Cu}_{47.5}\text{Zr}_{47.5}\text{Al}_5$ 非晶合金在压缩过程中产生了 18% 的塑性应变, 并且有类似“加工硬化现象”出现. 本文所研究的 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$

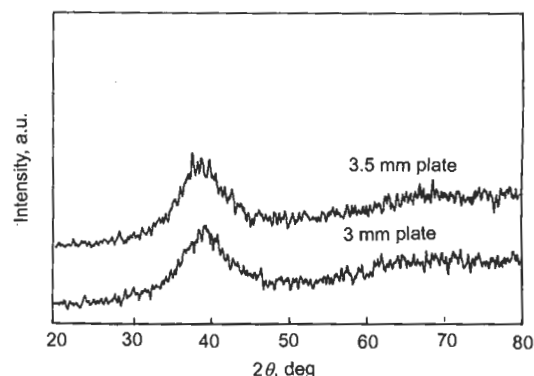


图 1 X 射线衍射图像

Fig.1 XRD patterns of the as cast bulk $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ samples with different thicknesses ($\text{CuK}\alpha$)

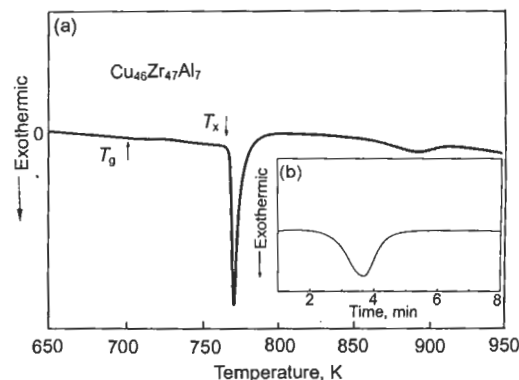


图 2 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 3 mm 合金板的 DSC 曲线

Fig.2 DSC scans of the $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ alloy with 3 mm in thickness

(a) constant heating rate of 0.33 K/s

(b) isothermal DSC profile at 743 K

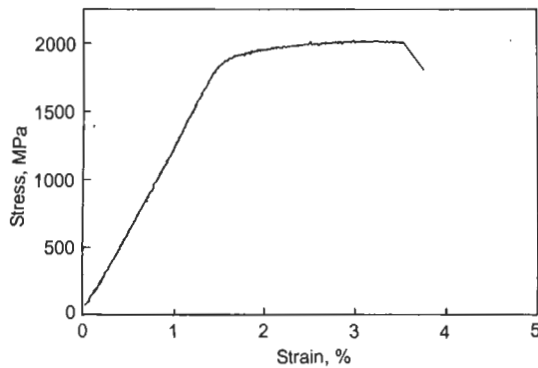


图 3 尺寸为 2.5 mm×2.5 mm×5 mm 的 Cu₄₆Zr₄₇Al₇ 非晶合金单向压缩应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of a bar shaped amorphous Cu₄₆Zr₄₇Al₇ with 2.5 mm×2.5 mm×5 mm dimension under quasi-static compression at a strain rate $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

合金在成分上与 Cu_{47.5}Zr_{47.5}Al₅ 接近,因此本文合金在压缩过程中出现的类似“加工硬化现象”的原因应该与 Cu_{47.5}Zr_{47.5}Al₅ 相同.根据实验曲线得到:弹性模量 120 MPa,压缩断裂强度 2000 MPa,压缩屈服强度约 1880 MPa,弹性极限 $\varepsilon_e=1.6\%$,断裂塑性应变 $\varepsilon_p=1.9\%$.相对于以前报道^[10]的铜基非晶合金 Cu₅₅Zr₄₅Al₅ 0.2%的断裂塑性应变,本研究所制备的非晶合金具有相当突出的塑性变形能力,并且和广泛研究的具有较好塑性的铜基非晶合金 Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀^[11]的塑性($\varepsilon_p=1.9\%$)相当.

2.3 弯曲塑性与试样厚度的关系

在三点弯曲实验过程中记录载荷-挠度($P-\delta$)曲线,通过这些曲线可计算试样的弯曲强度、塑性挠度、塑性应变.需要指出的是,对于厚度在 0.28 mm 以下的试样,由于加载过程中挠度过大使得压头和支座发生干涉,因此未能得到完整的 $P-\delta$ 曲线.本文所用的 $P-\delta$ 曲线数据来自于厚度在 0.28—2.5 mm 试样的结果.弯曲应力 $\sigma_{b,f}$ 和弯曲弹性模量 $E_{b,f}$ 可以根据以下公式得到

$$\sigma_{b,f} = 3FL/2Wh^2 \quad (1)$$

$$E_{b,f} = L^3F/4Wh^3\delta \quad (2)$$

其中, F 为载荷, L 为跨距, W 为试样宽度, h 为试样厚度, δ 为挠度.

一般认为材料的弯曲强度对于残余应力状态很敏感,弯曲外表面存在的残余压应力能在很大程度上提高其弯曲强度^[12].本实验中铜模铸造时试样快速凝固会造成很大的残余应力存在,并且不同厚度试样减薄程度不同,导致外表面残余应力状态不同,因此本实验中由不同厚度试样测量得到的弯曲断裂强度有所不同,所测得的弯曲断裂强度在 3300—3700 MPa 之间.

典型的弯曲应力-挠度($\sigma_{b,f}-\delta$)曲线如图 4 所示,其中图 4a 为厚度 0.83 mm 试样的曲线,图 4b 为厚度 2.5 mm 试样的曲线.总的挠度 δ_{total} 分为弹性挠度 δ_e

和塑性挠度 δ_p 两部分.对于相同试样尺寸的板状弯曲试样(跨距也相同),可以通过比较塑性挠度 δ_p 的大小来反映塑性变形能力的大小, δ_p 越大,塑性越好.而对于厚度、跨距不同的试样,采用比较 δ_p 来判断塑性的大小是不合适的.采用塑性挠度占总挠度的比例(δ_p/δ_{total})用来表示塑性变形的能力,很容易分析得到 δ_p/δ_{total} 与跨距大小无关,因此不同厚度的板状弯曲试样的塑性变形能力可以通过 δ_p/δ_{total} 来表征.

图 5 为 δ_p/δ_{total} 随试样厚度变化的关系曲线,从中可以看出当试样厚度为 2.5 mm 时塑性挠度比例非常小,几乎为零,随着厚度尺寸的减小,塑性挠度在总挠度中的比例急剧增加,也就是塑性变形能力急剧提高.由于该非晶合金最大临界尺寸为 3 mm,因此难以制备得到更大厚度的非晶试样以进行弯曲实验.

弯曲实验时非晶合金产生的最大断裂塑性应变可以由式(1)和式(2)得到

$$\varepsilon \propto \frac{\sigma_{b,f}}{E_{b,f}} = \frac{6h\delta}{L^2} \quad (3)$$

考虑 $\sigma_{b,f}$ 曲线的弹性挠度部分对应着材料的弹性应变,塑性挠度部分对应着材料的塑性应变,有

$$\varepsilon_e \propto \delta_e, \varepsilon_p \propto \delta_p \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p + \varepsilon_e} = \frac{\delta_p}{\delta_e + \delta_p} = \frac{\delta_p}{\delta_{total}} \quad (5)$$

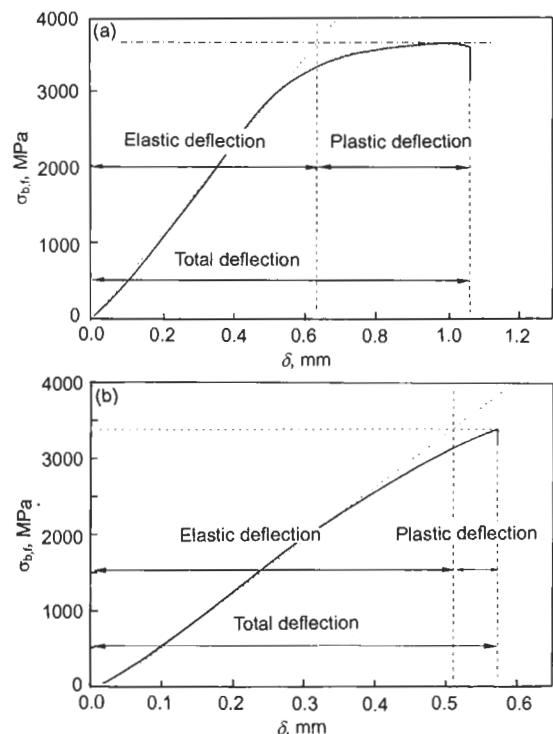


图 4 Cu₄₆Zr₄₇Al₇ 板的弯曲应力-挠度($\sigma_{b,f}-\delta$)曲线

Fig.4 Curves of flexural stress vs deflection ($\sigma_{b,f}-\delta$) for Cu₄₆Zr₄₇Al₇ BMG of 0.83 mm thick plate (a) and 2.5 mm thick plate (b)

根据压缩实验有 $\varepsilon_c=1.6\%$, δ_p/δ_{total} 和试样厚度的关系已经由图 5 给出, 于是根据式 (5) 和图 5 可以求得不同试样厚度时的弯曲断裂塑性应变值 ε_p . 该结果整理后如图 6 所示, 可以看出塑性断裂应变随着试样厚度增加急剧减小, 当试样厚度超过 2.5 mm, ε_p 几乎为零; 当试样厚度为 0.28 mm 时, ε_p 等于 4.6%. 根据实验数据点的变化趋势, 可以推断当试样厚度更小的时候, 应该能产生更大的弯曲断裂塑性应变. 采用式 (6) 和式 (7) 对实验数据进行拟合

$$\varepsilon_p = A_1 h^{-2} \quad (6)$$

$$A_1 = 0.0078$$

$$\varepsilon_p = A_1 e^{-h/t_1} \quad (7)$$

$$A_1 = 0.07806 \pm 0.01024, t_1 = 0.50416 \pm 0.07148$$

拟合曲线如图 6 中所示, 可以看出两个函数和实验数据均符合得很好.

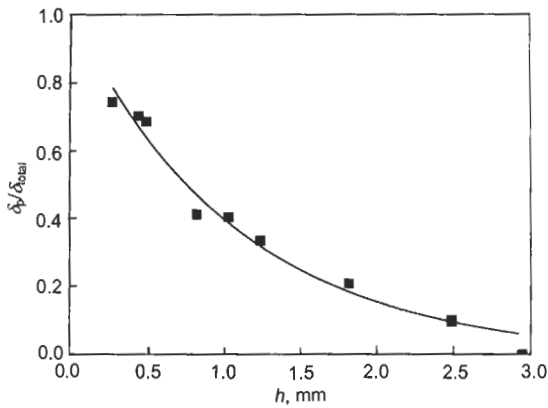


图 5 塑性挠度占总挠度比例随试样厚度变化关系

Fig.5 Ratio of plastic deflection to total deflection vs sample thickness measured from the flexural stress vs deflection curve

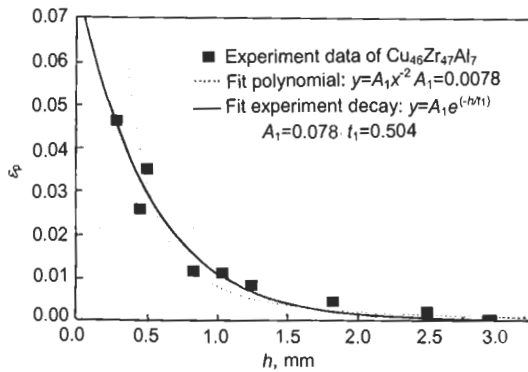


图 6 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 非晶合金弯曲断裂塑性应变随试样厚度的变化曲线

Fig.6 Bending plastic strain to failure vs sample thickness for $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$

当 h 分别为 0.28, 0.13 和 0.05 mm 时, 由式 (6), ε_p 分别为 9.9%, 46% 和 312% (ε_p 与厚度平方成反比关系); 由式 (7), ε_p 分别为 4.6%, 6% 和 7% (ε_p 与厚度成指数衰减关系). 试样厚度越薄, 差别越大. 采用单辊甩带法制备出来的非晶薄带的厚度一般在 0.05 mm (50 μm) 左右, 这些薄带的柔软性是因为刚度低所致, 并不是材料本身发生塑性变形引起的, 只要两个支点距离足够小, 非晶薄带也可以在三点弯曲加载下发生断裂, 而塑性变形并不是很大. 另外即使在多向应力状态如多向压缩加载^[13]、纳米压入^[14]等极端方式下能达到的塑性应变也不超过 10%, 因此非晶合金在弯曲加载时能够产生的最大塑性应变值也应有类似大小. 采用式 (7) 可以得到 0.05 mm 时, 塑性应变达到 7%, 比较符合实际. 因此作者认为非晶合金的弯曲塑性断裂应变与试样厚度的平方成反比这一结论虽然在一定试样厚度范围内成立, 但是对于更薄的试样, 如 100 μm 以下可能是不适合的. 相对来说第二种函数关系即弯曲塑性断裂应变与试样厚度成指数衰减关系应该更为合理, 比如根据这个函数关系, 试样厚度大于 2.5 mm 以后, 塑性断裂应变接近为零, 与实验事实相符. 同时, 试样厚度相当薄时, 达到的极限断裂塑性应变值为 7.8%. 但是由于这个函数关系是从有限的实验数据点得到, 所研究的试样厚度范围限于 $180 \mu\text{m} \leq h \leq 2.5 \text{ mm}$ 之间, 因此对于厚度更小的试样是否适用还需要进一步研究.

2.4 剪切带间距与试样厚度及材料塑性的关系

SEM 观察弯曲实验的试样侧面可以看出在试样上表面 (压缩表面) 和下表面 (拉伸表面) 都产生了均匀的剪切带, 剪切带与自由表面成 50° , 向内部扩展. 图 7 为厚度分别为 0.24 和 1.25 mm 的 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 非晶合金弯曲试样侧面的剪切带形貌. 可以看出二者剪切带间距明显不同, 剪切带内部形貌也有很大差别, 薄试样有二次、三次剪切带出现, 塑性明显增加, 而厚试样则很少有二次剪切带产生, 塑性变形也不明显. 多个数据平均得到剪切带间距与试样厚度呈线性关系, 如图 8 所示. 在受压缩一侧剪切带间距与试样厚度的比值约为 1 : 24, 在拉伸一侧该比值约为 1 : 20, 这种差异与非晶合金的压应力敏感性有关.

Conner 等^[4]通过对 Zr-Ti-Ni-Cu-Be, Ni-Si-B 和 Zr-Nb-Ni-Cu-Al 等非晶合金的研究表明弯曲时剪切带间距与试样厚度具有线性变化关系, 认为对于锆基非晶合金该比值在 1 : 10 左右. 图 8 中也给出了文献 [4] 对于 $\text{Zr}_{57}\text{Nb}_5\text{Al}_{10}\text{Cu}_{15.4}\text{Ni}_{12.6}$ 非晶合金剪切带间距与试样厚度的曲线, 可以看出与本文研究的 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 非晶合金得到的直线的斜率明显不同. 分析文献 [4] 的结果可以得到: 对于 $\text{Zr}_{57}\text{Nb}_5\text{Al}_{10}\text{Cu}_{15.4}\text{Ni}_{12.6}$, 其剪切带间距与试样厚度的比值约为 1 : 8; 对于 Ni-Si-B 合金, 该比值是 1 : 12. 近来, Schroers 和 Johnson^[15]得到了压缩

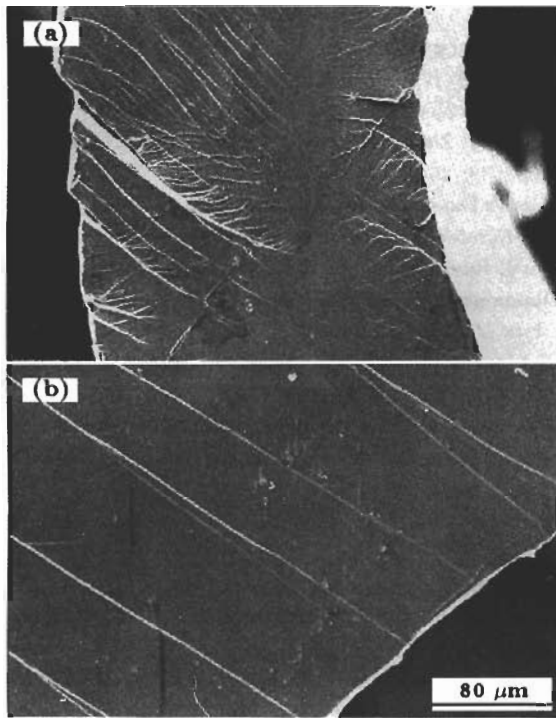


图 7 厚度分别为 0.24 和 1.25 mm $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 非晶合金试样弯曲实验产生的剪切带形貌

Fig.7 Cross sectional SEM micrographs of the amorphous alloy $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ specimens with 0.24 mm (a) and 1.25 mm (b) in thickness, showing shear bands initiated at the two surfaces of the specimens

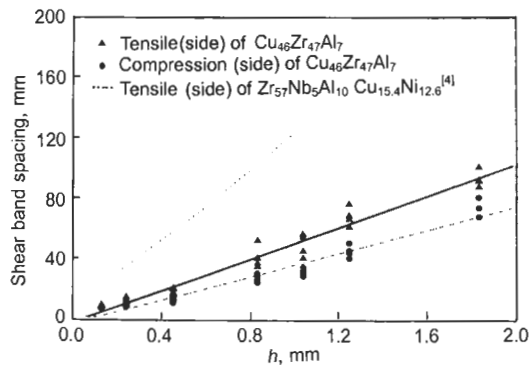


图 8 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ 非晶合金剪切带间距随着试样厚度的变化关系, 为比较同时给出了一个锆基非晶合金的线性关系

Fig.8 Linear relationships of shear band spacing vs sample thickness for tension and compression sides of $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$, and that of Zr base BMG^[4] was also given as comparison

断裂塑性应变达 20% 的 $\text{Pt}_{57.5}\text{Cu}_{14.7}\text{Ni}_{5.3}\text{P}_{22.5}$ 非晶合金, 弯曲实验时厚度为 1.8 mm 的试样可以产生 17% 的塑性应变, 而其实验数据显示该非晶合金的剪切带间距与试样厚度大致成 1 : 36 的线性关系. 对于 $\text{Zr}_{57}\text{Nb}_5\text{Al}_{10}\text{Cu}_{15.4}\text{Ni}_{12.6}$ 剪切带间距与厚度的比值及其压缩断裂塑性应变值分别为 1 : 8 和 0.5%, $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$

分别为 1 : 24 和 1.9%, $\text{Pt}_{57.5}\text{Cu}_{14.7}\text{Ni}_{5.3}\text{P}_{22.5}$ 分别为 1 : 36 和 20%. 可以看出剪切带间距与试样厚度的比值随着塑性变形能力的提高而降低, 也就是说, 相同厚度时塑性好的非晶合金能产生更多更致密的剪切带, 相应地能够产生更大的弯曲塑性变形.

综合考虑以上结果, 非晶合金弯曲实验时剪切带间距与试样厚度的比值对于同一种非晶合金是一恒定值, 该比值与非晶合金的塑性变形能力有关. 如果该规律成立则可通过测量剪切带间距来表征非晶合金的塑性, 尤其是对于难以采用传统的压缩实验来测定其断裂塑性应变的非晶合金 (如直径或厚度小于 1 的非晶合金) 将更具有实际意义.

2.5 非晶合金弯曲塑性尺寸依赖性的原因探讨

最新的研究^[16]表明, 对于金属玻璃, 断裂韧性和塑性作用区域尺寸存在明显的关系, 微观失效不依赖该点的应力和应变, 而是与其微结构相关的特征长度有关. 对于断裂韧性高的铜基和锆基非晶该特征长度分别在 60 和 100 μm 左右, 对于断裂韧性极低的镁基非晶则在 100 nm 左右. 只要裂纹在塑性作用区域内或者试样尺寸小于特征尺寸就不会产生额外的材料变形, 形成的断裂表面将几乎不会显示材料宏观塑性的影响. 因此对于弯曲实验, 当试样厚度接近材料的特征尺寸时, 厚度小于 100 μm 的锆基非晶条带能够弯曲 180°, 显示良好的塑性^[4]. 可以预计, 当铜基非晶条带厚度在 60 μm 左右时也会产生明显的塑性变形, 而对于厚度较大的试样则塑性变形很小就发生断裂, 显示出明显的尺寸效应.

比较非晶合金的拉伸实验和弯曲实验, 最大的不同点在于其所处的应力状态不同. 对于弯曲加载, 很容易分析得到弯曲试样下表面受到拉伸应力的作用, 上表面受到压缩应力作用, 两个表面之间存在一个应力 (应变) 梯度, 不同厚度的试样有不同的应力梯度. 有研究表明自由体积的产生与应变、应变速率和应力有关^[17,18]. Huang 等^[17]提出了用于解释非晶合金不均匀变形的理论框架, 非晶合金局部自由体积浓度的改变与自由体积的扩散、自由体积的湮灭和应力驱动下自由体积的产生三个过程有关.

从图 7a 可以看出, 剪切带首先在弯曲试样的上、下表面萌生, 然后向其厚度方向的中间部分扩展, 最后消失在中间位置. 试样由于在剪切带位置形成裂纹并开裂而发生失效. 非晶合金的弯曲塑性尺寸效应可能与应力梯度驱动所诱发的剩余自由体积有关: 弯曲实验时试样厚度与应力梯度成反比关系 (不考虑塑性变形), 试样越薄应力梯度越大, 产生的剩余自由体积越多, 能在更大程度上降低材料粘度和变形阻力, 产生更大的塑性变形 (见图 7a); 反之试样越厚, 产生的塑性变形越小 (见图 7b), 因此显示出弯曲塑性的尺寸依赖性. 此外, 高应力梯度的裂端区域也往往对应着高密度多重剪切带的产生^[19,20]. 以几何位错为基础的应变梯度理论^[21,22]已经很好地表征了晶体材料

塑性的尺度效应;但对于不存在任何位错的非晶合金而言,导致其变形的剪切带是否与应力(应变)梯度有某种类似的关系还需要进一步探讨.

3 结论

(1) 非晶合金的弯曲断裂塑性应变存在明显的尺寸依赖性,弯曲断裂塑性应变随试样厚度成指数衰减关系.

(2) 弯曲时剪切带间距随试样厚度成线性变化,剪切带间距与试样厚度的比值对于同种非晶合金是一恒定值,该比值与非晶合金的塑性变形能力有关.

参考文献

- [1] Inoue A, Zhang T, Kita K, Masumoto T. *Trans Jpn Inst Met*, 1989; 30: 870
- [2] Inoue A, Takeuchi A. *Mater Sci Eng*, 2004; A375-77: 16
- [3] Conner R D, Johnson W L, Paton N E, Nix W D. *J Appl Phys*, 2003; 94: 904
- [4] Conner R D, Li Y, Nix W D, Johnson W L. *Acta Mater*, 2004; 52: 2429
- [5] Inoue A, Katsuya A, Amiya K, Masumoto T. *Mater Trans JIM*, 1995; 36: 802
- [6] Katsuya A, Inoue A, Amiya K. *Int J Rapid Solidif*, 1996; 9(2): 137
- [7] Chen L C, Spaepen F. *Nature*, 1988; 336: 6197
- [8] Xu D H, Duan G, Johnson W L. *Phys Rev Lett*, 2004; 92: 245504
- [9] Das J, Tang M B, Kim K B, Theissmann R, Baier F, Wang W H, Eckert J. *Phys Rev Lett*, 2005; 94: 205501
- [10] Inoue A, Zhang W. *Mater Trans JIM*, 2002; 43: 2921
- [11] Inoue A, Zhang W, Zhang T, Kurosaka K. *Acta Mater*, 2001; 49: 2645
- [12] Metals Databook. In: Japan Institute of Metals, ed., *Metals Databook*, Tokyo: Maruzen, 1983: 366
- [13] Lu J, Ravichandran G. *J Mater Res*, 2003; 18: 2039
- [14] Ramamurty U, Jana S, Kawamura Y, Chattopadhyay K. *Acta Mater*, 2005; 53: 705
- [15] Schroers J, Johnson W L. *Phys Rev Lett*, 2004; 93: 255506
- [16] Xi X K, Zhao D Q, Pan M X, Wang W H, Wu Y, Lewandowski J J. *Phys Rev Lett*, 2005; 94: 125510
- [17] Huang R, Suo Z, Prevost J H, Nix W D. *J Mech Phys Solids*, 2002; 50: 1011
- [18] Demetriou M D, Johnson W L. *J Appl Phys*, 2004; 95: 2857
- [19] Flores K M, Dauskardt R H. *Acta Mater*, 2001; 49: 2527
- [20] Lee J G, Park S S, Lee D G, Lee S, Kim N J. *Intermetallics*, 2004; 12: 1125
- [21] Gao H, Huang Y, Nix W D, Hutchinson J W. *J Mech Phys Solids*, 1999; 47: 1239
- [22] Huang Y, Gao H, Nix W D, Hutchinson J W. *J Mech Phys Solids*, 2000; 48: 99