

Nd₆₀Al₁₀Fe₂₀Co₁₀ 金属玻璃的变形行为

喻更生¹, 李 伏¹, 魏炳忱², 马 蓂¹, 林建国¹

(1. 湘潭大学, 湖南 湘潭 411105)

(2. 中国科学院力学研究所微重力国家实验室, 北京 100080)

摘 要: 利用材料测试系统 (MTS)、X-Ray 衍射 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 等手段研究了 Nd 基大块金属玻璃的变形行为和断裂特征。Nd 基大块金属玻璃样品在室温下是脆性断裂, 大约在 500 K 时变形模式从非均匀变形转变为均匀变形, 在 523 K 以上表现出显著的塑性变形。在 5×10^{-4} m/s 的应变速率下, 这种 Nd 基大块金属玻璃材料在 523 K~600 K 之间出现明显的屈服应力下降现象, 随后进入 1 种稳定的粘性流动状态, 而且这种屈服下降现象与温度和应变速率有关。这种在过冷液相区的变形行为与其他大块金属玻璃变形特征相似。合金的这种塑性变形行为表明了其存在稳定的过冷液相区, 同时对其变形行为的研究有助于进一步了解 Nd 基大块金属玻璃的反常热稳定性。

关键词: 大块金属玻璃; 力学性能; 玻璃转变

中图分类号: TB 383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2005)03-0371-04

1 引 言

最近几年 Nd 基多组元大块金属玻璃引起了人们广泛的关注, 主要是由于它是大块金属玻璃中 1 个特殊的体系^[1~10], 它有 2 个不同于其他大块金属玻璃的特点: 一是传统意义上非晶是无序结构, 各向同性, 为软磁性, 而 Nd 基大块金属玻璃在室温具有很高的矫顽力, 表现出硬磁性。二是 Nd 基大块金属玻璃具有反常的热稳定性, Inoue 等人^[2]认为由于在晶化反应之前观测不到明显的玻璃转变, 其玻璃转变温度应高于初始晶化温度, T_g 分别高于 778 K 和 784 K, 由此得到的约化玻璃转变温度 T_{rg} 的最小值分别高达 0.90 和 0.85。采用最常用的手段差示扫描热分析 (DSC) 测试曲线上没有明显的玻璃转变, 也没有过冷液相区, 而其它体系的大块金属玻璃都表现出很宽的过冷液相区。

人们对大块金属玻璃的力学性能进行了广泛的研究, 其结果表明大块金属玻璃在低温高应变速率下为脆性断裂, 在过冷液相区, 合金处于过冷液态, 粘度很低, 材料发生显著的塑性变形, 甚至在过冷液相区表现出超塑性^[15~18]。Nd 基大块金属玻璃力学性能尚无报道, 本实验主要研究 Nd 基大块金属玻璃在各种温度下的变形行为, 此结果将有利于进一步了解 Nd 基大块金属玻璃的反常热稳定性。

2 实验方法

首先在通入氩气的电弧炉里熔炼母合金 (Nd₆₀Al₁₀Fe₂₀Co₁₀), 原料均为高纯金属 (纯度 $\geq 99.9\%$), 用吸铸法将熔化的母合金铸入水冷铜模得到 $\phi 3$ mm 柱状合金。合金结构测试在 Philips 公司生产的 PW1050X—衍射仪上测试, Cu K_α 靶。在 MTS 上测试压缩力学性能, 试样尺寸为 $\phi 3$ mm \times 5 mm, 温度从室温到 723 K。断口分析在扫描电镜上进行。

3 实验结果与分析

铸态合金棒的 XRD 结果如图 1 所示, 其衍射谱为典型的非晶衍射谱, 没有明显的晶态衍射峰, 表明用水冷铜模得到 $\phi 3$ mm 棒状合金在 XRD 测试极限内为非晶态。

图 2 所示应变速率为 5×10^{-4} m/s 不同温度下的应力-应变曲线。Nd₆₀Al₁₀Fe₂₀Co₁₀ 金属玻璃的变形行为对温度有明显的依赖性, 在室温为脆性断裂, 没有塑性变形, 断裂强度大约为 398 MPa。大约在 500 K 变形模式从非均匀变形转变为均匀变形, 试样在 503 K 以上没有出现断裂。随着温度的升高, 强度减小, 压缩变形增加。在 523 K 到 600 K 温度范围内出现屈服应力下降, 503 K 应力最大值大约为 620 MPa, 随着压缩时间的增加, 发生屈服, 应力值缓慢降低到 590 MPa,

收到初稿日期: 2003-08-27; 收到修改稿日期: 2003-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(50101012); 湖南省杰出青年基金(02JJyB010)

作者简介: 喻更生, 男, 1975 年生, 硕士, 湘潭大学材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411105, 电话: 0732-8292195

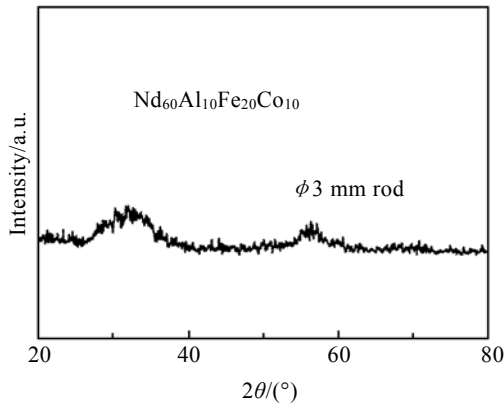


图1 $Nd_{60}Al_{10}Fe_{20}Co_{10}$ 合金的 XRD 结果
Fig.1 X-ray diffraction pattern of the $Nd_{60}Al_{10}Fe_{20}Co_{10}$ alloy

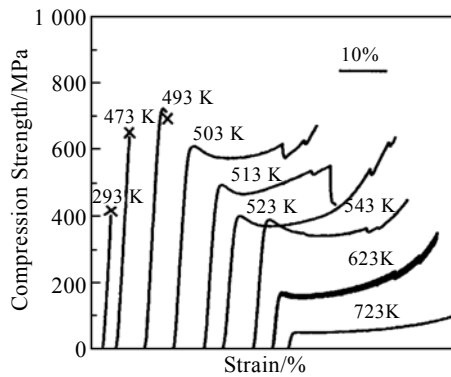


图2 $Nd_{60}Al_{10}Fe_{20}Co_{10}$ 金属玻璃在不同温度下的应力-应变曲线
Fig.2 The temperature dependence of the stress-strain curves for $Nd_{60}Fe_{20}Co_{10}Al_{10}$ BMG

在宏观上表现出稳定的粘性流动。513 K 应力最大值大约为 510 MPa, 然后也是发生屈服, 应力值缓慢降低, 直到在宏观上表现出稳定的粘性流动。屈服应力随着温度的增加而缓慢下降, 从 503 K 时的 620 MPa 到 623 K 的 190 MPa, 在 723 K 及更高温度下没有看到屈服下降现象, 应力-应变曲线变成平稳的 1 条直线。这种变形特征在其他大块金属玻璃的研究中已经报道过, 如 Zr 基等^[17]大块金属玻璃在过冷液相区出现应力屈服, 并且对温度的变化十分敏感, 这些特征与 Nd 基大块金属玻璃的变形特征都十分相似。

温度为 513 K, 不同应变速率下应力-应变曲线如图 3 所示。应变速率为 1.4×10^{-2} m/s, 应力峰值突然下降, 发生断裂, 压缩变形量约为 10%。应变速率为 2.8×10^{-3} m/s 时, 试样没有出现断裂。随着应变速率的降

低, 屈服应力下降, 这种屈服下降现象在高应变速率下压缩应力下降更明显, 随着应变速率的降低, 屈服下降的幅度降低, 应变速率降低到 1.4×10^{-3} m/s 时, 屈服下降现象已基本消失。

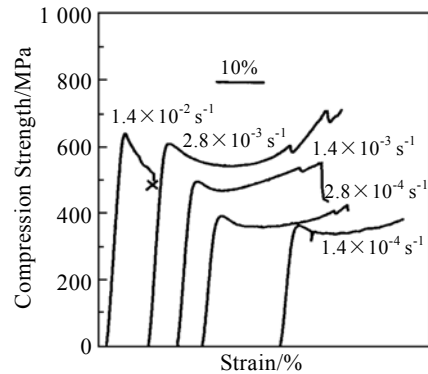


图3 $Nd_{60}Al_{10}Fe_{20}Co_{10}$ 金属玻璃在 513 K 时不同应变速率下应力-应变曲线图
Fig.3 The strain-rate dependence of the stress-strain curves at 513 K for $Nd_{60}Fe_{20}Co_{10}Al_{10}$ BMG

图 4a 是应变速率为 5×10^{-4} m/s 室温压缩断口的 SEM 照片, 可以看到比较平直的断口, 基本上为条纹状, 在断裂前没有发生相互滑移与相互传播, 是典型的脆性断裂。因为变形来不及扩散与传播, 几乎完成约凑成密集的剪切带, 不能形成塑性变形。图 4b 为 473 K 压缩断口照片, 在高温时该金属玻璃变形已经发生微量塑性变形。断口分为 2 部分组成: 一是光滑的区域, 二是有些已经发生了变形的区域, 可以看到明显的塑性变形, 形成脉状条纹, 剪切带已经发生相互滑移或相互传播, 每 1 个剪切带都分裂成几个滑移带。

非晶的变形行为一般分为 2 类, 一类是低温和高应变速率时, 表现出非均匀变形, 基本上为脆性断裂。二类是高温和低的应变速率时表现出均匀的塑性变形, 表现出粘性流动。一般根据自由体积模型来解释大块金属玻璃的力学变形特征。在低温或室温的非均匀变形是由于形成局域剪切带, 然后迅速传播导致脆性断裂。宏观的塑性变形行为, 在过冷液相区尽管也形成局域剪切带, 但是合金处于过冷液态, 粘度很低, 因此宏观的流动变形是由微观原子激发到剪切带的空间^[11~14]。

实验结果可以看出在低温和室温变形时, 塑性变形阻力对温度的依赖性相对较小。作者以前的动态力学试验结果表明在 600 K 时弹性模量迅速衰减和内耗峰增加, 这表明大约在 500 K 发生了玻璃转变^[7]。在 T_g 温度以前非晶态合金中的原子被冻结了, 扩散系数

很小, 粘度很大, 所以微观的塑性变形产生了大量的剪切带, 自由体积由于原子来不及扩散, 变形来不及扩散和传播, 几乎完成约凑成密集的剪切带, 不能形成塑性变形。因此 Nd 金属玻璃从非均匀变形到均匀变形有 1 个临界转变温度和临界应变速率, 在过冷液相区其强度对温度应变速率都十分敏感。但是塑性变形阻力在低温范围内对温度的依赖相对较小特别是在 T_g 以前。

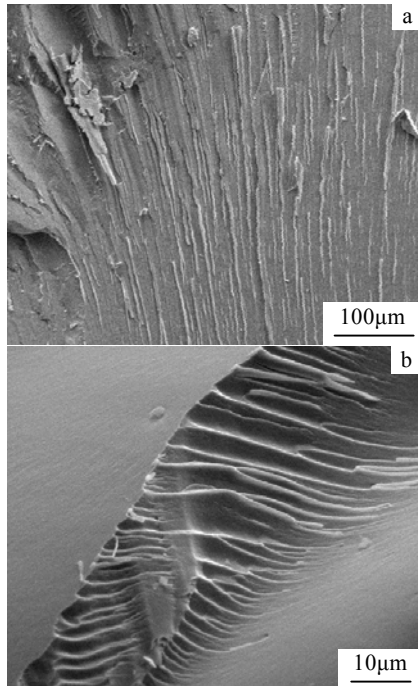


图 4 合金在室温(a)和 473 K(b)下的压缩断口形貌

Fig.4 SEM micrographs of the fracture surface: (a) room temperature and (b) 473 K

在高温 523 K 到 600 K 之间合金变形出现屈服应力下降, 这是因为在高温低应变速率下变形引起自由体积迅速增加, 在高温时非晶态合金处于过冷液态, 原子扩散的激活能减小, 粘度迅速下降, 可以近似认为合金中的原子堆垛结构和液态下相近, 自由扩散系数很大。尽管在高温低应变速率下变形引起自由体积迅速增加, 由于自由体积迅速增加激发原子扩散引起局域原子的重新排列自由体积迅速消失, 其增长速度与消失速度相当, 在宏观上表现为稳定的流动变形, 原子扩散的激活能依赖于测试温度, 所以屈服应力数值随温度升高而下降。

以前的动态力学试验结果表明在 500 K 时弹性模量迅速衰减和内耗峰增加^[7,9], 这表明在 $\text{Nd}_{60}\text{Al}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{10}$ 大块金属玻璃中有玻璃转变发生。本

实验中大约也是在 500 K 时变形模式由非均匀变形转变为均匀变形, 表现出其它大块金属玻璃在过冷液相区相似的特性, 屈服应力现象和变形对温度依赖的相似性, 已经在其它大块金属玻璃中如 Zr, Pd, Cu 基观察到了^[15~18]。这进一步证实本实验所研究的 $\text{Nd}_{60}\text{Al}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{10}$ 金属玻璃有玻璃转变, 且具有稳定的过冷液相区。这与 Nd 大块金属玻璃的强非晶形成能力相吻合。

4 结 论

在不同温度下 $\text{Nd}_{60}\text{Al}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{10}$ 金属玻璃的变形模式依赖于应变速率和测试温度, 大约在 500 K 变形模式从非均匀变形转变为均匀变形, 在高温时应力过载与应变速率密切相关。低温为非均匀变形的脆性断裂, 高温为均匀变形的稳定塑性变形。在 523 K 到 600 K 温度范围内出现应力过载, 屈服强度与应变速率和测试温度密切相关。

参考文献 References

- [1] Inoue A. *Acta Mater*[J], 2000, 48: 279
- [2] Inoue A, Zhang T, Takeuchi A. *Mater Trans*[J], 1996, 37: 636
- [3] Fan G J, Loser W, Roth S. *Appl Phys Lett*[J], 1999, 75: 2 984
- [4] Wang X Z, Li Y, Ding J. *J Alloy and Comp*[J], 1999, 290: 209
- [5] Chiriac H, Lupu N. *J Non-Cryst Solids*[J], 2001, 287: 135
- [6] Ortega-Hertogs R J, Rao K V. *Scripta Mater*[J], 2001, 44: 1 333
- [7] Wei B C, Zhang Y, Zhuang Y X. *J Appl Phys*[J], 2001, 89: 3 529
- [8] Wei B C, Wang W H, Pan M X. *Phys Rev B*[J], 2001, 64: 012 406
- [9] Wei B C, Löser W, Xia L. *Acta Mater*[J], 2002, 504 357
- [10] Ding J, Li Y, Wang X Z. *J Phys Appl Phys*[J], 1999, 32: 713~716
- [11] Chen H S, Kato H, Inoue A. *Mater Trans*[J], 2001, 42: 597
- [12] Nieh T G, Wadsworth J, Liu C T. *Acta Mater*[J], 2001, 49: 2 887
- [13] Inoue A. *Mater Sci and Eng*[J], 1999, 267: 171~183
- [14] Inoue A. *Acta Mater*[J], 2000, 48: 279~306
- [15] Kawamura Y, Shibata T, Inoue A. *Appl Phys Lett*[J], 1996, 69: 1 208
- [16] Chen H S, Kate H, Inoue A. *Mater Trans*[J], 2001, 42: 597
- [17] Lu J, Ravichandran G, Johnson W L. *Acta Mater*[J], 2003, 51: 3 492
- [18] Inoue A, Zhang T, Ishihara S. *Scripta Mater*[J], 2001, 44: 1 615

Deformation Behavior of $\text{Nd}_{60}\text{Al}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{10}$ Bulk Metallic Glass

Yu Gengsheng¹, Li Fu¹, Wei Bingchen², Ma Mo¹, Lin Jianguo¹

(1. Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

(2. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The deformation behaviors and the fracture properties of the Nd-based bulk metallic glasses (BMG) were studied by X-ray diffraction (XRD), material testing system(MTS) and scanning electronic microscope(SEM). The alloy is extremely brittle at room temperature and no plastic deformation. The deformation mode changes from inhomogeneous deformation to homogeneous deformation around 500 K. At a high strain rate of $5 \times 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a stress overshoot followed by a viscous flow approaching a steady state can be seen in the stress-strain curves within the temperature range from 523 K to 623 K. Moreover, the flow behavior of the BMG is strongly dependent on the strain rate and temperature. This mechanical behavior is similar to that of other BMGs deformed near supercooled liquid region. The results indicate that the glass transition and supercooled liquid region exist in the Nd-based bulk metallic glasses, which is beneficial to the further understand of the anomalous thermal stability in this system.

Key words: bulk metallic glass; mechanical properties; glass transition

Biography: Yu Gengsheng, Master, Faculty of Material Photoelectric Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, P.R. China,
Tel: 0086-732-8292195