

文章编号:1671-6833(2009)04-0089-04

# Zr基块状金属玻璃在准静态弯曲下的力学行为

李福山<sup>1</sup>, 孔超<sup>1</sup>, 杨会智<sup>2</sup>, 任晨星<sup>1</sup>, 王松杰<sup>1</sup>, 周家旭<sup>1</sup>, 和林林<sup>1</sup>

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南郑州450001; 2. 河南工程学院数理科学系, 河南郑州451191)

**摘要:** 利用三点弯曲的方法, 研究了 Zr-Cu-Al-Ni 系块状金属玻璃的准静态弯曲变形和断裂行为. 在室温下, 准静态三点弯曲变形过程主要表现为弹性和塑性变形, 塑性变形阶段没有出现加工硬化现象并且锯齿形流变不显著, 挠度值最高为 4.11 mm, 显示出较好的塑性. SEM 分析发现: 弯曲试样受力状态复杂, 表面剪切带并不是沿理论最大切应力方向扩展, 弯曲试样内部压应力区的断口形貌与压缩实验断口相似, 主要为脉状断口; 不同的是在单向拉伸时呈现菊花状形貌, 而在拉应力区, 呈现出复杂的网状形貌, 并发现大量的微孔和微裂纹, 表明剪切带的形成与自由体积合并有关.

**关键词:** 块状金属玻璃; 三点弯曲; 机械性能; 自由体积

**中图分类号:** TG 14 **文献标识码:** A

## 0 引言

块状金属玻璃不存在晶界、位错等晶态材料所特有的结构缺陷, 其变形机理与晶态材料不同, 导致其具有高强度、高硬度以及较低的弹性模量等独特的力学性能<sup>[1]</sup>以及优良的耐磨性能<sup>[2]</sup>, 因此受到广泛关注. 研究表明: 室温下块状金属玻璃的塑性变形只局限于非常细的剪切带内<sup>[3]</sup>, 为非均匀变形. 可以说, 块状金属玻璃在宏观上呈现脆性断裂, 但在微观上表现出一定延性<sup>[4]</sup>. 近年来, 人们虽然对块状金属玻璃的变形行为进行了广泛研究<sup>[5-6]</sup>, 但对其变形机理的研究还不透彻, 特别是对块状金属玻璃的弯曲行为研究较少. 棒状试样的弯曲行为不同于压缩和拉伸, 弯曲试样内部应力状态复杂, 其性能所体现的是拉应力以及压应力等多种应力综合的结果. 笔者在不同应变率下进行室温三点弯曲实验, 对剪切带的形成和扩展的微观机制以及断口形貌进行分析, 进一步研究块状金属玻璃的弯曲断裂行为.

## 1 三点弯曲实验方法

由于弯曲实验对材料的表面要求较高, 因此所选非晶合金的玻璃形成能力要好, 本实验所用的合金成分是  $Zr_{65}Cu_{15}Ni_{10}Al_{10}$ , 经广泛研究证明

此成分块状金属玻璃的玻璃形成能力  $\Delta T$  值可达 83 K, 可以在较大的范围内避免由于表面缺陷导致材料瞬断. 此合金在室温下还具有良好的塑性, 抗拉强度能达到 2 200 MPa, 塑性应变率接近 5%, 能够满足实验要求. 实验采用高纯原材料 (纯度 > 99.8%), 在氩气的保护下用电弧熔炼制成母合金, 再利用铜模喷射的方法制备出杆状试样; 采用 PHILIPS PW1700 型 X 衍射仪对制得的杆状试样进行分析, 衍射图曲线呈现漫散射的宽化峰, 为非晶态; 再将杆加工成直径为 2 mm, 长度为 30 mm 的圆棒; 室温下, 在 Zwick Roell Z030 型三点弯曲试验机上进行准静态三点弯曲实验, 应变速率分别为  $2.5 \times 10^{-4} s^{-1}$ 、 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$  和  $8.3 \times 10^{-4} s^{-1}$ . 由于此合金强度较高, 为保证压头不损坏和试验数据的准确, 三点弯曲试验采用特制的压头, 压头的基体材料为普通轴承钢, 在与试样接触位置镶嵌抗压强度较好的、直径为 5 mm 的  $Al_2O_3$  陶瓷棒; 最后在 Philips Quanta-2000 型扫描电镜下观察剪切带和断口的微观形貌.

## 2 结果与讨论

图 1 为 Zr 基块状金属玻璃试样在不同应变率下的三点弯曲变形曲线, 其中试样 A 由于实验条件所限没有断裂. 图 1 插图 1 为试样 A 的弯曲

收稿日期: 2009-04-02; 修订日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50871105), 河南省自然基金资助项目(072102230030)

作者简介: 李福山(1963-), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事大体积金属玻璃的研究, E-mail: Lifushan@zzu.edu.cn.

后表面形貌,表明此种成分的合金具有较好的弯曲塑性.由图1可知,试样的弯曲强度高达到3 000 MPa,弹性模量约为79 GPa,挠度最高可达4.11 mm.试样的变形分为弹性和塑性变形两个阶段,当弯曲应力达到2 200 MPa后材料发生塑性变形,经观察没有发现显著的锯齿形塑性流变出现,表明材料弯曲几乎不发生屈服或屈服表现不显著.一般认为锯齿形流变的出现和剪切带的形成和扩展有关,金属玻璃的塑性变形能力是由剪切带的数量和剪切变形量控制的,剪切变形量越大、剪切带数目越多,则金属玻璃的塑性变形能力就越好.弯曲变形的内部应力状态较为复杂,虽然发生剪切变形但是在整体性能上不能明显地表现出来.值得注意的是与压缩和拉伸实验所观察到的一样,材料几乎没有加工硬化现象<sup>[4]</sup>.随着应变速率的增加,挠度值由4.11 mm降到了3.80 mm,但弯曲强度变化较小,此结果正符合自由体积模型.自由体积理论认为:块体金属玻璃的变形行为是两个物理过程相互竞争的结果<sup>[7]</sup>.这两个过程分别是:①机械应力引起金属玻璃中自由体积的增加,进而导致非晶相无序度的增加.②松弛作用过程中原子重新排列,金属玻璃的有序度随之上升,而自由体积数量减少.室温下,随着加载应力的升高,为了满足变形的需要,大量的自由体积随之产生,由于在低温下原子的运动能力较低,松弛作用较弱,自由体积增加到一定的程度后将聚集,导致剪切带的形成,从而降低粘度,裂纹沿着剪切带断裂.松弛现象随着应变速率的降低而加强,在变形初期松弛作用虽能限制自由体积的局部聚集,但是不能完全湮灭,因此尽管加载速率很低,材料最终还要发生断裂.

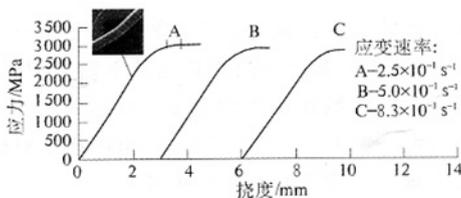


图1 试样在准静态三点弯曲下的应力-挠度曲线

Fig.1 Stress-deflection curves of specimens for different strain rates under three-point bending

图2是试样在不同应变速率下的三点弯曲表面形貌.图2(a)和2(b)的应变速率为 $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,图2(c)和2(d)的应变速率为 $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .由图可知,断裂面边缘的剪切带并不是如理论那样沿最大切应力平面(与轴向成 $45^\circ$ 的

平面)扩展,而是所成角度分别为 $47^\circ$ 、 $51^\circ$ 、 $46^\circ$ 和 $49^\circ$ ,这种偏离在许多金属玻璃的压缩实验中被发现<sup>[8]</sup>,从侧面说明金属玻璃变形和断裂不仅与剪应力有关还和断裂面上的正应力有关,实验结果正符合Mohr-Coulomb模型<sup>[9]</sup>:

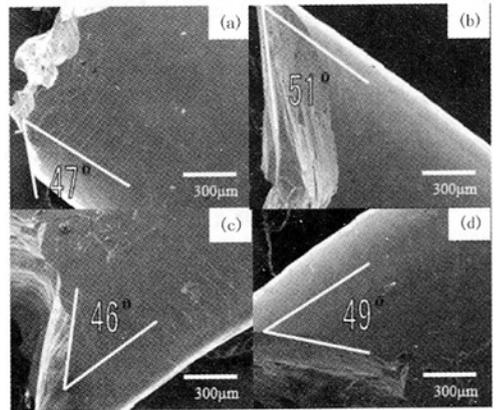


图2 试样在不同加载速率下的表面剪切带形貌

Fig.2 Shear bands pattern on the bending specimen surface at different loading rates

$$\tau_c = k_0 - a\sigma_n \quad (1)$$

式中: $\tau_c$ 为滑移面上的剪应力,MPa; $k_0$ 为材料常数,MPa; $a$ 为常量; $\sigma_n$ 为正应力.通过比较可知,应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的试样表面剪切带较密集,压应力区剪切带的交叉和分支现象明显,在其拉应力区出现了大量的垂直于轴向的二次剪切带,交叉的剪切带可以有效地阻碍金属玻璃沿某一剪切带发生迅速断裂,因此塑性相对较好.

弯曲试样的断口呈现多种花纹形貌.图3(a)中箭头的方向为弯曲时压头压入的方向,I区和II区的形貌分别如图3(b)和3(c).I区是压应力为主要正应力的区域,主要呈现出脉状花纹形貌,其中也出现了少量的菊花状形貌(如图3(b)圈中所示),并且脉状花纹不是沿着单一的方向扩展,而通常Zr基金属玻璃的压缩断口形貌的扩展方向是一致的,不同的扩展方向也从侧面说明了试样内部的剪应力方向不同.通常认为剪切过程中由于自由体积和一些非均匀质点的聚集而形成空穴,使得剪切区域变成了非连续状,随之而发生的是这些空穴的塑性膨胀而产生断裂,导致黏度降低,当剪切带内黏度降低的同时发生一定的滑移因而形成这种脉状花纹.菊花状形貌通常在金属玻璃的拉伸断口上出现.这是由于在拉伸变形过程中,拉应力作用使断裂表面先形成变形核心,然后通过剪应力的作用从核心处向四周扩展,

从而形成菊花状,在断面上存在以下关系<sup>[9]</sup>:

$$\tau = \sigma \cos\theta, \sigma_n = \sigma \sin\theta \quad (2)$$

即当断裂角度是由理论压缩应力下断裂所确定的.当 $45^\circ$ 变为 $47^\circ$ 时,断裂面上的剪应力下降3.8%,而正应力上升了2.8%,弯曲试样内部越靠近I区,所受的压应力越大.和拉伸实验类似,压应力的增加使得断裂层部分区域出现变形核心,并在剪应力的作用下扩展. II区是拉应力为主要正应力的区域,图3(c)所示的断口呈现出复杂的网状以及塑坑状的混合形貌.通过观察,在断裂面的拉应力区,材料的断裂方向与轴向所成角度小于常规拉伸实验断口角度.由于II区的拉应力增加较快,剪应力相对较小,由拉应力形成的变形核心很难扩展,因此形成网状形貌,并且网状金属丝较粗大且伴有大量的熔融液滴状形貌,显示出断裂时发生剧烈的变形.同时,在网状形貌的中心光滑区也发现了少量的剪切带(如图白色箭头所示)以及在边缘大量出现指向网格中心的金属丝,这些都从侧面证明了试样能在正应力的作用下形成变形核心进而向外扩展.断口内部剪切带的发现能更好地解释在试样内部发生的局部塑性变形现象.在断裂面上,还可以观察到大量的微孔,Hufnagel等<sup>[10]</sup>认为这类纳米级孔洞的形成和自由体积的产生和聚集有关,由此可知断裂面处发生了剧烈的塑性变形.

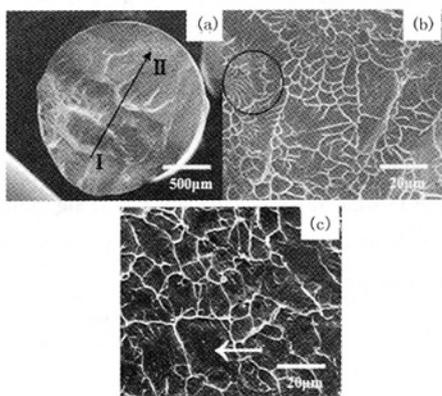


图3 试样三点弯曲断口形貌(应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ );  
Fig.3 Fracture surface of specimens under three-point bending (loading rate: $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )

三点弯曲实验的加载速率虽然变化较小,但材料体现宏观塑性变化明显.图4为试样在不同应变速率下的断口形貌,图4(a)和图4(b)为所承载的主要正应力为拉应力的断口形貌;图4(c)和图4(d)为所承载的主要正应力为压应力的断口形貌;由图4可知,在压应力区断口形貌变化较

小,而拉应力区变化较大.图4(a)的表面金属丝相对于图4(b)较粗大,网格较深,熔融状态明显,变形剧烈,塑性较好.在图4(b)中能够观察到清晰的菊花状形貌.相比之下,图4(a)中的网格内部由于剪切作用所拉出的金属丝虽然不是很明显,但是可以观察到;网格边缘的金属丝的密度较大,说明正应力形核较多,使得形成剪切带密度较大,体现出的宏观塑性较大,与实验结果相符.

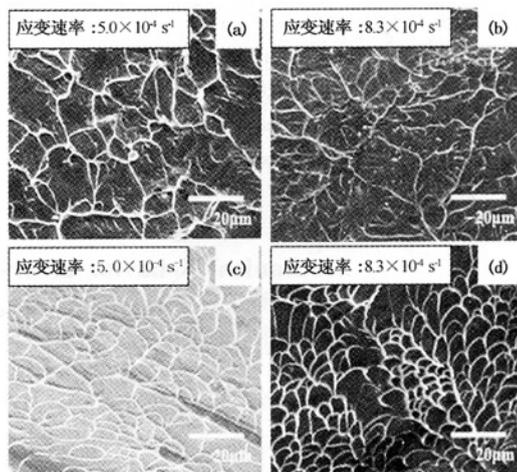


图4 试样在不同应变速率下的断口形貌  
Fig.4 Fracture surface of specimens at different loading rates

### 3 结论

(1)室温下杆状 $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{15}\text{Ni}_{10}\text{Al}_{10}$ 块状金属玻璃的三点弯曲变形过程表现为弹性和塑性变形,变形过程中没有明显的加工硬化现象和锯齿形流变出现,弯曲强度可达3 000 MPa,挠度可达4.11 mm.

(2)试样的断裂面和表面剪切带并不是沿着理论最大切应力方向扩展而是呈一定的角度.

(3)材料的塑性随着加载速率的降低而增大,弯曲变形是正应力和剪切力共同作用的结果,断口形貌也与拉伸和压缩断口不同.

(4)实验中不仅在试样表面出现大量剪切带,在断裂花纹内部也发现的少量的剪切带.

### 参考文献:

- [1] LIN Y H, WANG G, WANG W H, et al. Super plastic bulk metallic glasses at room temperature[J]. Science, 2007(315): 1385 - 1387.
- [2] 李福山,黄凤勇,袁静慧,等.  $(\text{MgCuGd})_{100-x}\text{Ti}_x$ 块状金属玻璃复合材料耐磨性能研究[J]. 郑州大学

- 学报:工学版,2008,29(3):15-18.
- [3] JIANG W H, LIAW P K. Inhomogeneous deformation in compression-comparison of two bulk-metallic glasses [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9(11): 959-962.
- [4] LIU L F, DAI L H, BAI Y L. Initiation and propagation of shear bands in Zr-based metallic glass under quasi-static and dynamic shear loadings [J]. *Journal of Non-crystalline solids*, 2005, 351: 3259-3270.
- [5] QI Q K, LI M. Effects of surface imperfections on deformation and failure of amorphous metals [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(3): 1-4.
- [6] KIM K B, YI S. Propagation of shear bands in a  $\text{Cu}_{47.5}\text{Zr}_{47.5}\text{Al}_5$  bulk metallic glass [J]. *J Mater Res*, 2008, 23(1): 6-11.
- [7] HE G, LU J, BIAN Z, et al. Fracture morphology and quenched in precipitates induced embrittlement in a Zr-base bulk glass [J]. *Mater Trans JIM*, 2001, 42(2): 356-364.
- [8] ZHANG Z F, HE G, ECKERT J, et al. Fracture mechanisms in bulk metallic glassy Materials [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(4): 1-4.
- [9] LIU T, HEATHERLY L, EASTON D S, et al. Test environments and mechanical properties of Zr-Based bulk amorphous Alloys [J]. *Metall and Mater Trans A*, 1998, 29A: 1811-1820.
- [10] LI J, SPAEPEN F, HUFNAGELT C. Nanometer-scale defects in shear bands in a metallic glass [J]. *Philos Mag*, 2002, A82: 2623-2630.

## Mechanical Behavior of Zr-based Bulk Metallic Glass under Quasi-static Bending Stress

LI Fu-shan<sup>1</sup>, KONG Chao<sup>1</sup>, YANG Hui-zhi<sup>2</sup>, REN Chen-xing<sup>1</sup>, WANG Song-jie<sup>1</sup>,  
ZHOU Jia-xu<sup>1</sup>; HE Lin-lin<sup>1</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Mathematical and Physical Sciences, Henan Engineering Institute, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** The deformation and fracture behavior under bending of bulk metallic glass  $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{15}\text{Ni}_{10}\text{Al}_{10}$  was studied using three-point bending machine and scanning electron microscopy (SEM) at room temperature. The results indicate that the samples experience elastic and plastic deformation process before fracture, and no obvious serrated rheological change and work hardening is found during plastic deformation. The biggest deflection value of specimens reaches 4.11 mm, which exhibits better plasticity. Shear bands do not propagate along the direction of theoretical maximum stress because of complex stress state. The fracture surface is typical vein-pattern in compressive stress regions, which is the same as fracture surface in compressive test. Complex reticular patterns are observed under different stress states in tension regions, and micro-scale voids and cracks exit along the shear bands, showing that the formation of shear bands is associated with free volume.

**Key words:** bulk metallic glass; three-point bending; mechanical properties; free volume