文章编号: 1001-1455(2014)01-0001-05

动高压加载下锆基金属玻璃强度测量*

俞宇颖,习 锋,戴诚达,蔡灵仓,谭 华,李雪梅
(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,四川 绵阳 621999)

摘要: 为了研究 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ 金属玻璃的高压强度特性,进行了平靶冲击实验。采用反向碰撞方式,运用 DISAR 技术测量金属玻璃样品/LiF 窗口界面粒子速度剖面,分析粒子速度剖面获得了 37~66 GPa 压力范围锆基金属玻璃的屈服强度和剪切模量。实验结果表明,在上述压力范围金属玻璃的屈服强度和剪切模量均显示出一定程度的压力硬化效应,分析表明金属玻璃冲击加载波阵面剪应力衰减并非由损伤/破坏或温度软化等因素导致。

关键词: 固体力学;屈服强度;DISAR;金属玻璃;剪切模量;冲击波
中图分类号: O346.4 **国标学科代码**: 1301515 **文献标志码**: A

金属玻璃作为原子无序堆垛结构的代表性材料,有独特的原子短程有序、长程无序的微观结构,兼有金属和玻璃特性,是具有广泛应用前景的新型结构和功能材料[1]。金属玻璃力学性能的研究有助于理解其变形和损伤破坏机理、提高其结构性能。

对一般环境下金属玻璃的弹塑性变形、损伤及破坏等力学性能已有了大量研究,C. A. Schuh 等[2]和 M. M. Trexler 等[3]分别对相关研究进行了综合评述。在已有研究中,金属玻璃的屈服强度特性是重点关注的内容之一。很多准静态实验研究结果表明,金属玻璃的屈服强度与应力状态有关。J. Lu 等[4]采用围压法研究了受约束状态下 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 金属玻璃的屈服强度特性(最大压力约 2 GPa),结果显示屈服强度压力硬化效应非常明显。近年来,高压、高应变率等极端条件下金属玻璃的冲击波响应特性逐渐引起重视,目前已有 Zr 基金属玻璃的冲击绝热线[5-6]、层裂现象[7-8]和弹塑性变形行为[9-12]的一些实验及理论模拟研究。F. P. Yuan 等[9]运用压剪炮技术对 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 金属玻璃屈服强度的压力相关性进行了研究(最大压力 8.8 GPa),实验结果与准静态不同:压剪加载下压力或法向应力对屈服强度影响很小;而 S. J. Turneaure 等[10]和俞宇颖等[11]的 27 GPa 压力范围内平靶冲击实验结果表明,锆基金属玻璃的冲击加载波阵面存在剪应力衰减。总之,金属玻璃的屈服强度特性研究限于较低压力范围,而且相关结论并不一致,须进一步研究。此外,表征金属玻璃强度特性的另外一个物理量——剪切模量也仅有 2 GPa 压力范围内的超声测量结果[13],还未见冲击波加载下的高压剪切模量数据。

本文中,对一种锆基金属玻璃进行平靶冲击,通过测量样品/透明窗口界面冲击加载-卸载粒子速度剖面,获得 37~66 GPa 压力范围的屈服强度和剪切模量数据;结合实验测得的强度数据,对锆基金属玻璃冲击波阵面剪应力松弛现象[10-11]进行分析。

1 实 验

为简化冲击加载-卸载过程样品中的波系作用,利于粒子速度剖面的处理分析,实验采用如图 1 所示的反向碰撞方式,即由待测样品(锆基金属玻璃)作为飞片直接撞击透明的单晶 LiF 窗口。LiF 窗口碰撞面镀有 1 μm 铝膜作为光学测试的反射面,为保护长历时测量过程中铝膜不受破坏,铝膜前粘接了

* **收稿日期**: 2012-07-25; **修回日期**: 2013-01-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(10732010,10972206,11172281);
冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金项目(9140C6701021102)
作者简介: 俞宇颖(1976—),男,博士,副研究员。

8 μm 铜箔。飞片衬垫为低阻抗的聚碳酸酯,实现对冲击后样品的卸载。DISAR (displacement interferometer system for any reflector)技术[14]用于测量锆基金属玻璃样品/LiF 窗口界面粒子速度剖面,飞片速度采用磁测速技术测量。

实验用金属玻璃为 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$(原子百分比),平均密度为约 6.740 g/cm^3,超声测量的常态纵波和横波声速分别为 4.820 和 2.193 km/s[6]。根据测定的纵波和横波声速,可以得到体波声速为 4.101 km/s,剪切模量为 32.4 GPa,泊松比为 0.369。样品名义尺寸为∅28 mm×3 mm,表面抛光处理,平行度 2～5 μm。LiF 窗口尺寸为∅28 mm×12 mm,密度为 2.638 g/cm^3,冲击波速度 $D=5.148\ \mathrm{km/s}+1.353u$($u$ 为粒子速度)[15]。

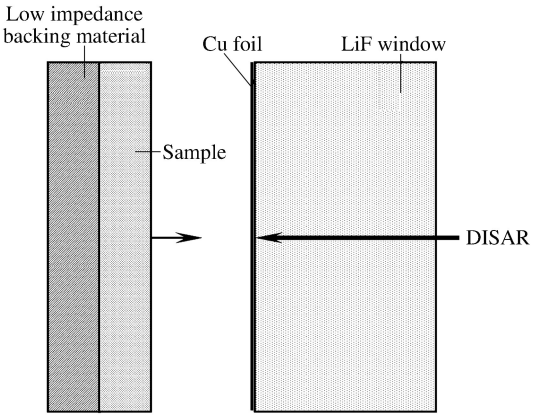


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

2 结果与分析

在∅30 mm 二级轻气炮上进行了 4 发冲击加载-卸载实验,冲击速度为 2.889～4.480 km/s,锆基金属玻璃样品产生的压力为 37～66 GPa。实验的参数列于表 1 中,其中 ρ_0 为锆基金属玻璃样品初始密度,H_s 为样品厚度,W 为冲击速度,σ_H 为冲击压力,$\tau_H+\tau_c$ 为屈服强度,G 为剪切模量。

表 1 平靶冲击实验参数及结果

Table 1 Experimental conditions and results for four plate-impact experiments

No.	ρ_0/(g·cm^{-3})	H_s/mm	W/(km·s^{-1})	σ_H/GPa	$(\tau_H+\tau_c)$/GPa	G/GPa
1	6.744	3.142	2.889	37.28	1.73	47.59
2	6.743	3.120	3.604	49.69	1.88	63.25
3	6.736	3.016	3.640	50.33	1.99	62.96
4	6.655	3.007	4.480	66.42	2.39	79.47

由 DISAR 测得的 4 发实验锆基金属玻璃样品/LiF 窗口界面粒子速度剖面如图 2 所示。卸载过程中呈现明显的弹塑性特征,表明在 66 GPa 冲击压力范围内锆基金属玻璃没有发生冲击熔化。根据波传播特性,可由粒子速度剖面(见图 2),得到沿着卸载过程的拉格朗日纵波声速:

$$c_L=\frac{H_s}{t-H_s/D_s} \tag{1}$$

式中:D_s 为样品的冲击波速度,t 为来自样品后界面的卸载波到达样品/窗口界面时间(以碰靶为起始时刻)。在 18～100 GPa 冲击压力范围,该锆基金属玻璃的冲击波速度 $D_s=4.241\ \mathrm{km/s}+1.015u$[6]。

图 3 给出了由上述加载-卸载粒子速度剖面得到的卸载过程拉格朗日纵波声速 c_L 随粒子速度 u 的变化。其中,粒子速度 u 由样品/窗口界面粒子速度 u_w 结合增量型阻抗匹配法计算得到,由此得到的粒子速度计及了卸载波在样品/窗口界面反射造成的影响[16]。与金属材料相类似,锆基金属玻璃卸载过程也呈现准弹性行为特征,即卸载过程弹、塑性波速为光滑过渡,而没有发生突降[17]。尽管冲击压力不同,但塑性声速与粒子速度关系基本一致。将塑性段声速线性外延可得相应的拉格朗日体波声速 c_B。

根据 J. R. Asay 等[18]提出的双屈服面强度测量方法,对沿卸载过程的声速进行计算,可得到:

$$\tau_H+\tau_c=-\frac{3}{4}\rho_0\int_{u_H}^{u_c}\frac{c_L^2-c_B^2}{c_L^2}\mathrm{d}u \tag{2}$$

式中:u_H 和 u_c 分别为 Hugoniot 状态对应粒子速度和卸载进入塑性屈服时对应的粒子速度(见图 3),τ_H 和 τ_c 分别为 Hugoniot 状态剪应力和临界剪应力,$\tau_H+\tau_c$ 为屈服强度。

冲击压缩下(Hugoniot 态)的剪切模量：

$$G=\frac{3}{4}\frac{\rho_0^2}{\rho}(c_L^2-c_B^2) \tag{3}$$

式中：ρ_0为材料的初始密度，ρ 为冲击压缩下(Hugoniot 态)的密度，c_L和 c_B分别为 Hugoniot 态对应的拉格朗日纵波和体波声速(见图 3)。

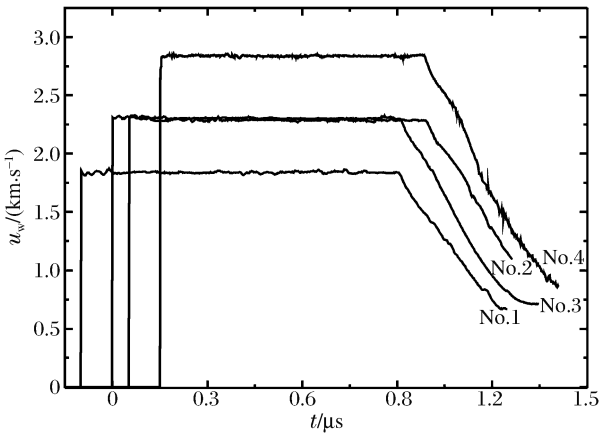


图 2 样品/窗口界面粒子速度剖面

Fig. 2 Particle velocity profiles measured at sample/window interface

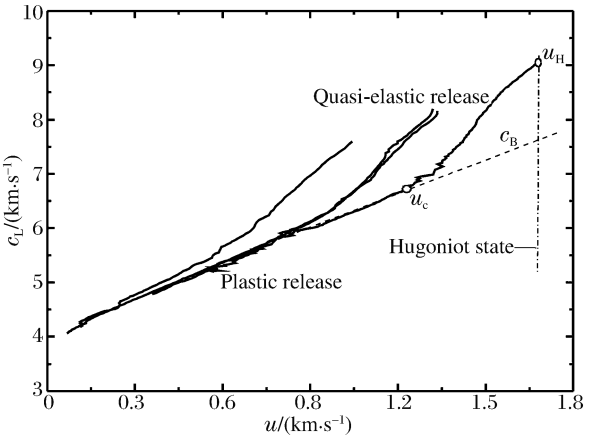


图 3 卸载过程的拉格朗日纵波和体波声速

Fig. 3 Longitudinal and bulk Lagrangian wave speed during unloading

计算得到的屈服强度和剪切模量列于表 1 中。屈服强度和剪切模量随冲击压力的变化如图 4 所示。在涉及的冲击压力范围，$Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$金属玻璃的屈服强度和剪切模量均随冲击压力的增加而增加，出现了压力硬化效应。其中，屈服强度在 0～37 GPa 压力范围变化很小，这与 F. P. Yuan 等[9]应用压剪炮技术测量的 6.3～8.8 GPa 压力范围 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$金属玻璃屈服强度变化情况一致；在 37～66 GPa 范围，屈服强度则明显增加。

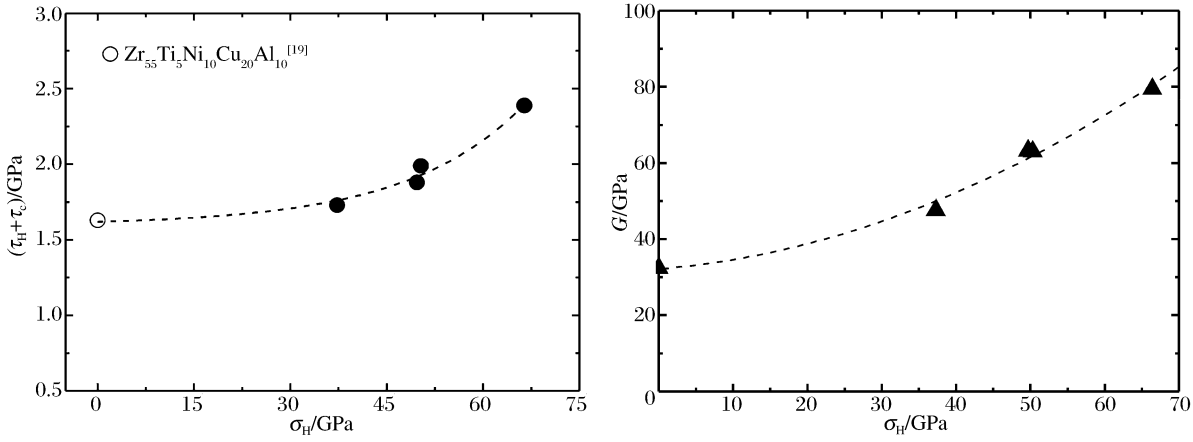


图 4 屈服强度和剪切模量随冲击压力的变化

Fig. 4 Variation of yield strength and shear modulus with shock pressure

与上述的压力硬化效应不同，已有的实验结果表明金属玻璃的冲击加载波阵面存在剪应力衰减现象。S. J. Turneaure 等[10]对 17 GPa 冲击压力范围内的实测 $Zr_{56.7}Cu_{15.3}Ni_{12.5}Nb_{5.0}Al_{10.0}Y_{0.54}$金属玻璃粒子速度剖面进行了数值模拟，发现采用应变软化强度模型计算的剖面才能与实验结果符合。俞宇颖等[11]则通过轴向应力与静水压线的比较获得了 10～27 GPa 冲击压力范围 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$金属玻璃的冲击加载波阵面剪应力，表明该金属玻璃的冲击加载波阵面剪应力存在明显衰减，而且衰减幅度随着冲击压力的增加而增加。

通常,材料强冲击导致的损伤/破坏和高温是造成材料强度降低的两种主要因素。如果金属玻璃冲击加载波阵面剪应力衰减是由冲击加载导致的损伤/破坏所引起的,那么由损伤/破坏材料的 Hugoniot 态卸载获得的屈服强度和剪切模量也应出现衰减,但本文中强度测量结果显示一定程度的压力硬化效应,基于此可以排除损伤/破坏因素;如果金属玻璃冲击加载波阵面剪应力衰减是由温度软化所引起的,同样由 Hugoniot 态卸载获得的屈服强度和剪切模量也应出现衰减,而且应随冲击压力增加而更明显衰减,这显然与本文中强度测量结果不相符,温度因素也可以排除。因此,导致金属玻璃冲击加载波阵面剪应力衰减的,并非损伤/破坏或温度软化,而应有其他控制因素。最近,B. Arman 等[12]对平面冲击波加载下二元体系 $Cu_{46}Zr_{54}$ 金属玻璃的塑性、层裂及原子结构演化进行了分子动力学模拟,发现金属玻璃冲击波阵面上的剪应力衰减与加载过程材料内部具有较强剪切的原子团簇数量减少有关。但由于分子动力学模拟的粒子速度剖面与实测结果还存在一定差异,因此上述剪应力衰减的微观机理还需进一步研究确认。

3 结 论

对 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ 金属玻璃进行了反向碰撞实验,测得了金属玻璃样品/LiF 窗口界面粒子速度剖面,由此获得了 37～66 GPa 压力范围的屈服强度和剪切模量数据。结果表明,在上述实验压力范围金属玻璃的屈服强度和剪切模量均随冲击压力的增加而增加,具有一定程度的压力硬化效应;进一步分析表明,金属玻璃冲击加载波阵面剪应力的衰减,并非由冲击损伤/破坏或温度软化等因素导致。

哈尔滨工业大学材料科学与工程系沈军教授提供样品了材料,张毅、王为、叶素华、傅秋卫、汪小松、景海华、蓝强、方茂林、向曜明和靳开诚等在实验测试中给予了帮助,在此表示感谢。

参考文献:

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

[2] Schuh C A, Hufnagel T C, Ramamurty U. Mechanical behavior of amorphous alloys[J]. Acta Materialia, 2007,55(12):4067-4109.

[3] Trexler M M, Thadhani N N. Mechanical properties of bulk metallic glasses[J]. Progress in Materials Science, 2010,55(8):759-839.

[4] Lu J, Ravichandran G. Pressure-dependent flow behavior of $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ bulk metallic glass[J]. Journal of Materials Research, 2003,18(9):2039-2049.

[5] Mashimo T, Togo H, Zhang Y, et al. Hugoniot-compression curve of a Zr-based bulk metallic glass[J]. Applied Physics Letters, 2006,89(24):241904.

[6] Xi F, Yu Y Y, Dai C D, et al. Shock compression response of a Zr-based bulk metallic glass up to 110 GPa[J]. Journal of Applied Physics, 2010,108(8):083537.

[7] Turneaure S J, Dwivedi S K, Gupta Y M. Shock-wave induced tension and spall in a zirconium-based bulk amorphous alloy[J]. Journal of Applied Physics, 2007,101(4):043514.

[8] Yuan F P, Prakash V, Lewandowski J J. Spall strength and Hugoniot elastic limit of a zirconium-based bulk metallic glass under planar shock compression[J]. Journal of Materials Research, 2007,22(2):402-411.

[9] Yuan F P, Prakash V, Lewandowski J J. Shear yield and flow behavior of a zirconium-based bulk metallic glass [J]. Mechanics of Materials, 2010,42(3):248-255.

[10] Turneaure S J, Winey J M, Gupta Y M. Response of a Zr-based bulk amorphous alloy to shock wave compression [J]. Journal of Applied Physics, 2006,100(6):063522.

[11] 俞宇颖,习锋,戴诚达,等. 冲击加载下 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ 金属玻璃的塑性行为[J]. 物理学报,2012,61(19):196202.

Yu Yu-ying, Xi Feng, Dai Cheng-da, et al. Plastic behavior of $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ metallic glass under planar

shock loading[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(19):196202.

[12] Arman B, Luo S N, Germann T C, et al. Dynamic response of $Cu_{46}Zr_{54}$ metallic glass to high-strain-rate shock loading: Plasticity, sapll and atomic-level structures[J]. Physical Review B, 2010,81(14):144201.

[13] Wang W H, Li F Y, Pan M X, et al. Elastic property and its response to pressure in a typical bulk metallic glass [J]. Acta Materialia, 2004,52(3):715-719.

[14] Weng J D, Tan H, Wang X, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution[J]. Applied Physics Letters, 2006,89(1):111101.

[15] Narsh S P. LASL Shock Hugoniot Data[M]. Berkeley: University of California Press, 1980:296-297.

[16] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京:国防工业出版社,2007:163-167.

[17] Yu Y Y, Tan H, Hu J B, et al. Determination of effective shear modulus of shock-compressed LY12 Al from particle velocity profile measurements[J]. Journal of Applied Physics, 2008,103(10):103529.

[18] Asay J R, Chhabildas L C. Determination of the shear strength of shock compressed 6061-T6 aluminum[C]// Meyers M M, Murr L E. Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. New York: Plenum, 1981:417-431.

[19] Wang J G, Zhao D Q, Pan M X, et al. Correlation between onset of yielding and free volume in metallic glasses [J]. Scripta Materialia, 2010,62(7):477-480.

Measurement of strength in a Zr-based bulk metallic glass under dynamic high-pressure loading*

Yu Yu-ying, Xi Feng, Dai Cheng-da, Cai Ling-cang, Tan Hua, Li Xue-mei

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: To investigate the dynamic strength behaviors of a Zr-based bulk metallic glass (BMG), $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ (in atomic percent), a series of reverse-impact experiments were performed in the peak shock stress range from 37 to 66 GPa. A displacement interferometer system for any reflector (DISAR) was used to measure the particle velocity profiles at the sample/LiF window interface. By analyzing the measured particle velocity profiles, the yield strength and shear modulus of the Zr-based BMG were obtained. The experimental results show that both the yield strength and the shear modulus of the Zr-based BMG increase with the increasing of the shock stresses in the stress range considered here. And the shear stress relaxation across the shock wave front of the Zr-based BMG is not due to the shock-induced damage/failure or temperature softening.

Key words: solid mechanics; yield strength; DISAR; bulk metallic glass; shear modulus; shock wave

* Received 25 July 2012; Revised 1 January 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (10732010,10972206,11172281)
Corresponding author: Yu Yu-ying, yuyinyu@21cn.com

(责任编辑　丁　峰)