

文章编号: 1001-1455(2013)03-0225-06

不同温度下 2 种钨结构增强 Zr 基非晶合金的动态压缩性能*

谭子翰, 徐松林, 章超, 胡时胜

(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 design 重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要: 利用 SHPB 装置对钨丝增强 Zr 基非晶复合材料和钨骨架增强 Zr 基非晶复合材料进行了 3 种环境温度下多种应变率的动态压缩性能测试。比较了 2 种材料的动态力学性能, 发现二者均具有应变率敏感性和较强的塑性变形能力。但二者承载机制存在较大差异。钨丝增强结构变形主要表现在钨丝的失稳, 由数值模拟初步分析了这种局部结构失稳控制的变形以及热失稳现象; 钨骨架增强结构变形前期钨骨架起主要承载作用, 而不是各成分的共同作用, 这导致材料的屈服强度比纯非晶和纯钨的低。

关键词: 固体力学; 热失稳; SHPB; Zr 基非晶; 钨丝增强; 钨骨架增强

中图分类号: O346.4

国标学科代码: 1301545

文献标志码: A

Zr 基块体非晶合金由于能形成不同的合金系统^[1-2], 具有一系列优越的物理力学性能: 高屈服强度和硬度, 较低的杨氏模量, 很大的弹性应变和较高的断裂韧性, 以及良好的耐磨损耐腐蚀性和自锐性^[3-4]等。近年来, 已经应用于空间工程、军事、体育用品等方面^[4]。但这类块体合金在屈服后, 由于形成了高度集中的剪切带而发生脆性断裂, 几乎没有塑性变形和加工硬化^[5], 这很大限制了它作为工程材料的应用。钨增强 Zr 基非晶合金是在 Zr 基块体非晶基体中加入钨增强相粘结而形成的一种新型的复合材料, 保持了非晶的高强度高硬度等力学性能, 并有效阻止了非晶基体中剪切带的扩展, 增加了塑性。

目前, 对这类非晶复合材料的大量研究, 主要集中于制备工艺、增强相与基体的界面控制、增强相含量与几何构架等方面^[6], 物理力学性能的研究则主要集中于断裂机制和静态力学性能方面。R. D. Conner 等^[7]通过熔体渗流浇铸法, 研制出钨丝增强非晶复合材料, 发现与原纯非晶相比, 其断裂应变的增加超过了 9 倍。程焕武等^[8]利用钨骨架预制体和 Zr 基非晶合金制备了新型的三维网络连通交叉结构复合材料。

关于该类材料动态力学性能方面的研究已有较多的报道^[9-10], 但在结构变形机理探讨方面, 都还不够深入。由于块体非晶和增强块体非晶在高温高压环境^[10]和空间工程及液化气储存低温环境^[11]下的应用, 研究此类材料的动态力学性能尤其高低温下的冲击性能^[12-15]就显得尤其重要。本文中, 将对钨丝增强和钨骨架增强的 2 类不同几何构架的 Zr 基非晶合金复合材料进行高低温下不同应变率动态力学实验, 探讨材料中 2 种不同钨结构的增强与变形机制。

1 结构分析

2 类钨增强 Zr 基非晶复合材料的结构如图 1 所示。图 1(a)为长钨丝增强 Zr 基非晶复合材料的横剖面(简称材料 A), 用 Zr 基非晶合金将一定的体积比或质量比的钨丝粘结而成。此材料具有明显的各向异性: 沿钨丝方向, 性能由基体和钨丝共同决定。图 1(b)为钨骨架 Zr 基非晶复合材料(简称材料 B), 非晶基体与钨骨架(泡沫钨)粘结形成较均匀的复合材料, 表观上体现出各向同性。以上 2 种材料钨的体积分数相近。

* 收稿日期: 2012-02-07; 修回日期: 2012-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272304, 11102206)

作者简介: 谭子翰(1987—), 男, 硕士研究生。

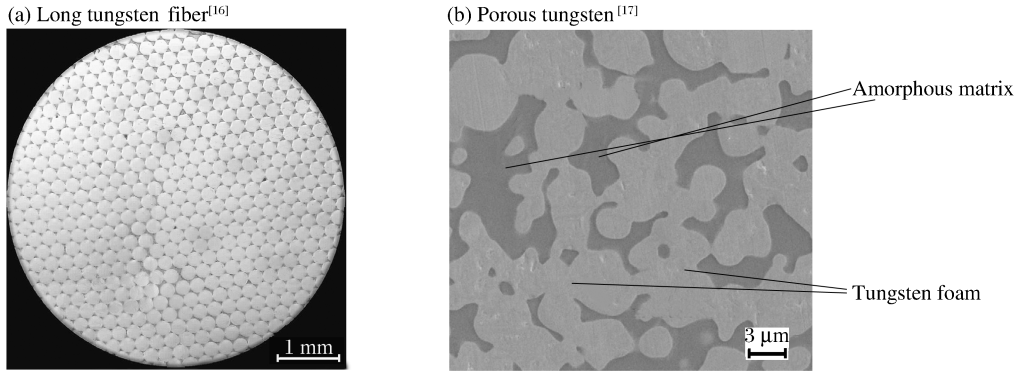


图 1 2 种 Zr 基钨合金

Fig. 1 Tungsten structure reinforced Zr-based metallic glass composites

2 静、动态力学性能

2.1 实验方法

对 2 种复合材料在常温下分别进行了准静态和 4 种应变率的动态实验。准静态实验在中国科学技术大学工程与材料实验中心的设备 MTS809 上进行;动态实验在中国科学技术大学冲击动力学实验室的设备 SHPB 上进行,应变率为 $600\sim 5\,000\text{ s}^{-1}$ 。还进行了温度范围 $223\sim 473\text{ K}$ 的动态性能测试,高低温装置采用中国科学技术大学冲击动力学实验室自行研制的加热、制冷设备,操作详情请参见文献 [18-19]。将试件加工成圆柱形,长 5 mm、直径 5 mm。对于材料 A,沿钨丝延伸方向进行取样和实验加载。为确保数据的可靠性,每种情况至少进行 3 次重复性实验。

2.2 静、动态力学性能

图 2 为常温下 2 种钨增强结构 Zr 基非晶合金准静态真实应力应变曲线。作为对比,也分别给出了纯 Zr 基非晶(材料 C)和纯钨(材料 D)的典型应力应变曲线^[20]。由图 2 可见,加入了定向长钨纤维,材料 A 的塑性变形特性比纯 Zr 基非晶有了很大的改善。钨骨架的加入,同样改善了材料 B 的塑性变形特性,但它的屈服强度比纯 Zr 基非晶和纯钨都弱。2 种结构的复合材料的准静态力学性能差异表现为:材料 A 具有较高的屈服强度,而材料 B 具有较好的塑性变形能力。文献[9, 20]中也有类似的结论。

图 3 为 2 种钨结构增强 Zr 基非晶材料的动态应力应变关系。由图 3 可见,与准静态(0.001 s^{-1})对比,材料 A 具有较明显的应变率效应,材料 B 也具有较明显的应变率效应。对比 2 种材料,材料 A 具有相对较高的峰值强度,但峰值强度后,承载能力逐步下降,已呈现出失稳现象;材料 B 峰值强度较低,但峰值强度后,承载能力基本维持不变,表现出理想塑性特性。

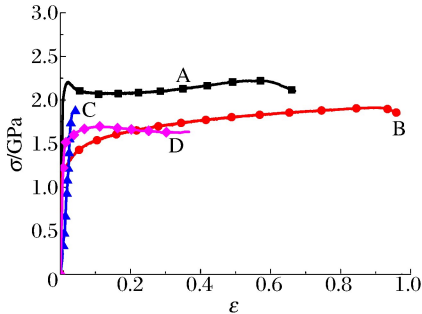


图 2 准静态应力应变曲线

Fig. 2 Quasi-static true stress-strain curves

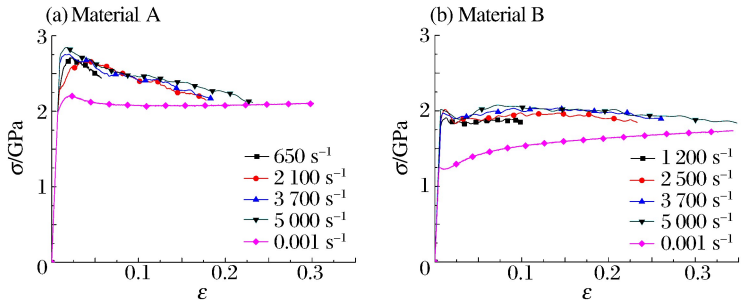


图 3 高应变率下的真实应力应变曲线

Fig. 3 True stress-strain curves at high strain rates

2.3 不同温度的影响

图 4 为不同环境温度下 2 种材料的应力应变曲线。由图 4 可见,材料 A 和材料 B 均出现了高温软

化和低温硬化现象。即断裂应变随着温度升高而增大；屈服应力和流动应力随温度升高而降低，这与普通材料的现象一致。引起这种热软化的机制有：一种是材料在绝热过程自身的产热引起的软化，另一种是环境温度引起的软化。

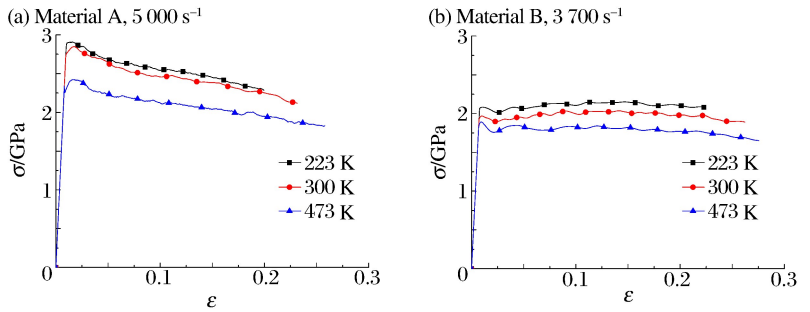


图 4 不同温度下应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under different temperatures

3 作用机制探讨

以上实验结果表明：2 种不同的钨结构增强都增加了非晶的塑性，但程度上有差异；材料 A 与材料 B 相比，屈服强度高，而塑性变形能力低；材料 B 的屈服强度比纯钨和纯 Zr 基非晶都低。这些主要是由它们不同的变形机制决定。

3.1 钨丝结构

如上所述，材料 A 变形机制主要取决于钨丝的承载和变形。图 5 为实验后回收试样的断口照片，加载过程中材料 A 的钨丝结构发生了明显的屈曲。这表明，此复合材料的承载能力与钨丝结构的失稳有关。实际上，在图 3(a)和图 4(a)中，峰值应力后，流动应力都有不同程度的下降。图 3(a)反映的是一种典型的结构失稳现象。钨丝具细长杆的形态，在一定载荷作用下会产生失稳。这与弹性细长杆的 Euler 失稳理论分析及 J. W. Hutchinson 等^[21]的弹塑性细长杆的塑性后屈曲行为讨论一致。不过在材料 A 中，这些细长杆受周围 Zr 基非晶的侧向约束，其屈服失稳过程得以延缓。

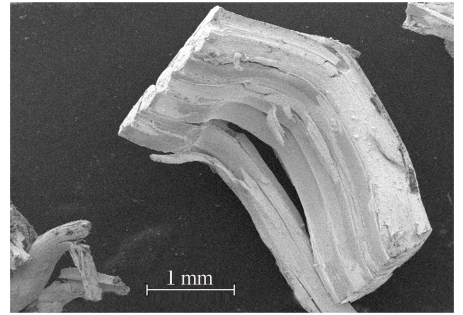


图 5 钨丝增强结构材料回收试样的断口照片图

Fig. 5 The fracture of tungsten fiber reinforced structure material recovery

图 4(a)反映的是温度对钨丝这种细长杆结构的压杆失稳的影响。钨丝失稳的机制同上，而且这种失稳所造成的峰值应力处的应力降随温度的升高略有降低。即温度升高降低了压杆失稳的剧烈程度。可以预期，当温度足够高时，这种应力降现象可以消失。B. Song 等^[22]就有类似的观测。因此对于材料 A，钨丝的局部压杆失稳以及与温度相关的热失稳是材料的主要变形机制。有必要对这些机制进行深入的研究。

本文中，初步探讨细长杆的热屈曲机制。利用 Abaqus 软件，采用与温度相关的本构关系：随着温度的升高，材料的屈服强度降低，呈现热软化效应。高温环境下，除了外载荷引起的屈曲，由于材料内部各组分对热响应不同而产生热应力，热应力引起的热屈曲也起着作用。设置杆一端固定，另一端自由，并在在自由端施加外载荷。设定细长杆初始缺陷系数（初始缺陷与杆半径的比值）为 0.01，采用 Abaqus 中的弧长法对外载荷引起的屈曲与温度引起的热屈曲进行计算并定性分析。

图 6 为计算的不同温度下后屈曲载荷位移曲线。可以看出，随着温度升高，临界载荷下降，曲线后半段持续下降；而且当温度升高到 873 K，下降段曲线趋于平坦；可以预测，如果温度更高，应力应变曲线会趋于水平。由于钨丝增强材料的模型界面接触较复杂，同时主要承载的成分是钨丝，所以本文中对钨丝增强材料的模拟，仅利用细长杆的失稳推测。另外，由于大量钨丝阻断了其周围 Zr 基非晶内剪切带的发展，所以

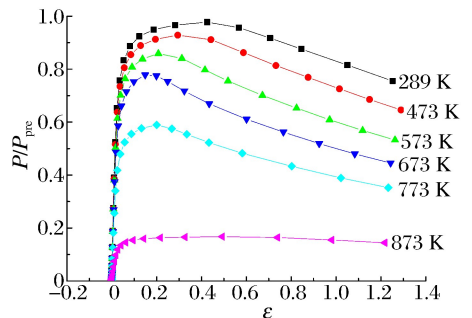


图 6 不同温度下后屈曲载荷位移曲线

Fig. 6 The bulking load-displacement curves under different temperatures

材料 A 不仅峰值应力比纯 Zr 基非晶高,而且塑性变形也好。

3.2 钨骨架结构

由前面实验,材料 B 的屈服强度比纯 Zr 基非晶和纯 W 还低。这主要由钨骨架的“泡沫”型结构决定。图 7~8 为类似钨骨架复合材料的分阶段变形示意和对应变形阶段的 SEM 照片^[23]。由图 7~8 可见:随着载荷的增加,材料进入屈服,钨中开始出现塑性变形,揭示泡沫钨(钨骨架)结构开始坍塌,而且非晶基体中也出现了少量剪切带(见图 8(a)),整体进入塑性变形;材料 B 中泡沫钨(钨骨架)所占成分大,承载过程前期起主要作用,导致其屈服强度低于纯 Zr 非晶和材料钨;图 8(b)~图 8(c)中,钨骨架和非晶两者相互支撑,钨结构逐步坍塌,但由于 Zr 基非晶的支撑,过程缓慢,而非晶内部的剪切带也因钨结构的存在而缓慢形成,且不易扩展断裂,因而其塑性变形特性很好。

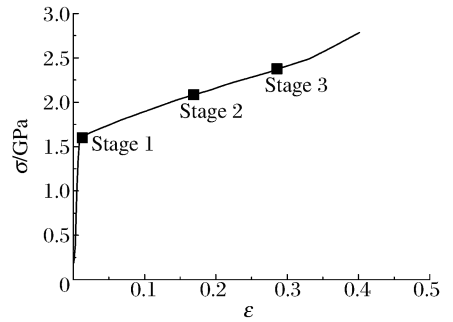


图 7 钨骨架复合材料的分阶段变形示意图^[23]

Fig. 7 The grading deformation diagram of porous tungsten reinforced Zr-based metallic glass composite

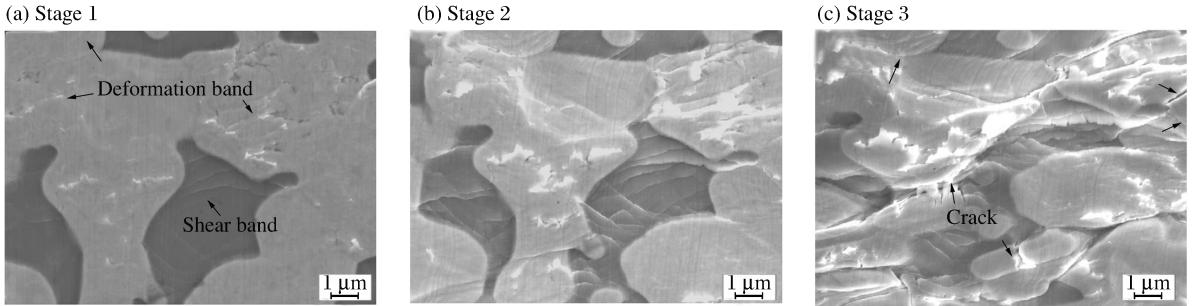


图 8 3 个变形阶段的 SEM 照片^[23]

Fig. 8 The SEM photos of three deformation stages

3.3 作用机制比较

比较 2 种材料,在同一应变率下,材料 A 的屈服应力较高而塑性应变较小(见图 2~3)。显然,2 种材料中,其力学性能与其增强相的排列结构也有很大的关联。如图 1,钨的体积分数相近时,材料 A 中单根钨丝尺寸大,而材料 B 中钨骨架很细。显然,与材料 A 相比,材料 B 中细的钨骨架单位体积里钨的表面积大,与非晶相的接触面积相应也大,复合材料承受外载荷时,能够更加均匀地将载荷通过接触面传递给增强相钨分担^[6],因此材料 B 更能有效阻止非晶基体中剪切带的演化和发展。而钨丝增强结构接触面积小,钨丝不能及时分担载荷而发生了较小塑性变形。

4 结 论

主要对 2 种不同结构增强的非晶合金材料进行动态实验研究,可得出如下结论:

(1)增强相钨丝或钨骨架的加入,有效地阻止了 Zr 基非晶内剪切带的发展,大大增加了材料的塑性变形能力。材料 A 的变形主要表现为轴向钨丝的结构失稳,且具有很强的轴向承载能力,屈服应力比纯 Zr 基非晶高。材料 B 中钨骨架较细,轴向承载能力比材料 A 弱;变形前阶段钨骨架起主要作用,使屈服应力比纯钨和纯 Zr 基非晶都低;后阶段非晶基体与钨骨架共同起作用,其流动应力略高于纯钨。

(2)比较材料 A 和材料 B 的增强相结构,Zr 基非晶合金中加入等体积分数的钨骨架和钨丝时,钨骨架因其结构纤细能与非晶更好地接触,且轴向承压时因其径向的牵拉作用而能使其能产生更大的塑性变形。

(3)2 种材料在不同温度下呈现出低温硬化和高温软化现象。特别地,通过对细长杆热屈曲的模拟,并结合材料 A 的实验曲线,推测随着温度升高会发生热软化现象,但应力应变曲线中流动应力区后

半段曲线趋于平坦。

参考文献:

- [1] Peker A, Johnson W L. A highly processable metallic glass: $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 1993,63(17):2342-2344.
- [2] Zhang T, Inoue A, Masumoto T. Amorphous Zr-Al-TM (TM= Co, Ni, Cu) alloys with significant supercooled liquid region of over 100 K [J]. *Materials Transactions, JIM*, 1991,32(11):1005-1010.
- [3] Bian Z, Kato H, Qin C L, et al. Cu-Hf-Ti-Ag-Ta bulk metallic glass composites and their properties [J]. *Acta Materialia*, 2005,53(7):2037-2048.
- [4] 王玉良. Zr 基块体非晶合金力学行为研究 [D]. 北京:北京工业大学,2009.
- [5] Zhang Z F, Eckert J, Schultz L. Difference in compressive and tensile fracture mechanisms of $Zr_{59}Cu_{20}Al_{10}Ni_8Ti_3$ bulk metallic glass [J]. *Acta Materialia*, 2003,51(4):1167-1179.
- [6] 马卫锋,寇宏超,李金山,等. 钨丝增强 Zr 基非晶复合材料动态力学行为及断裂特性 [J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(6):1045-1050.
Ma Wei-feng, Kou Hong-chao, Li Jin-shan, et al. Dynamic mechanical behaviors and fracture characteristic of tungsten fiber reinforced Zr-based metallic glass matrix composites [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008,18(6):1045-1050.
- [7] Conner R D, Dandliker R B, Johnson W L. Mechanical properties of tungsten and steel fiber reinforced $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ metallic glass matrix composites [J]. *Acta Materialia*, 1998,46(17):6089-6102.
- [8] 程焕武,王鲁,薛云飞,等. 高速冲击载荷下钨骨架/Zr 基非晶合金复合材料的变形特征 [J]. *兵工学报*, 2008,29(3): 361-363.
Cheng Huan-wu, Wang Lu, Xue Yun-fei, et al. Deformation characteristic of Tungsten Skeleton/Zr-based amorphous alloy composites under high-speed impact [J]. *Acta Armamentarii*, 2008,29(3):361-363.
- [9] Xue Y F, Cai H N, Wang L, et al. Dynamic compressive deformation and failure behavior of Zr-based metallic glass reinforced porous tungsten composite [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007,445/446:275-280.
- [10] Wu Z, Wu H G, Kang P C, et al. High temperature fracture behavior of tungsten fiber reinforced copper matrix composites under dynamic compression [J]. *Materials and Design*, 2011,32(10):5022-5026.
- [11] 姚健,李金山,马卫锋,等. 块体 $Ti_{40}Zr_{25}Ni_8Cu_9Be_{18}$ 非晶合金的低温压缩行为 [J]. *中国有色金属学报*, 2009,19 (8):1443-1448.
Yao Jian, Li Jin-shan, Ma Wei-feng, et al. Compressive behavior of $Ti_{40}Zr_{25}Ni_8Cu_9Be_{18}$ bulk metallic glass at cryogenic temperature [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009,19(8):1443-1448.
- [12] Rong G, Huang D W, Yang M C. Penetrating behaviors of Zr-based metallic glass composite rods reinforced by tungsten fibers [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012,58(1):21-27.
- [13] Conner R D, Dandliker R B, Scruggs V, et al. Dynamic deformation behavior of tungsten fiber/metallic glass matrix composites [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000,24(5):435-444.
- [14] Zheng W, Huang Y J, Shen J. Influence of strain-rate on compressive-deformation behavior of a Zr-Cu-Ni-Al bulk metallic glass at cryogenic temperature [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011,528(22/23):6855-6859.
- [15] Ma W, Kou H, Chen C, et al. Compressive deformation behavior of tungsten fiber reinforced Zr-based metallic glass composites [J]. *Material Science and Engineering: A*, 2008,486(1/2): 308-312.
- [16] Zhang H F, Li H, Wang A M, et al. Synthesis and characteristics of 80 vol. % tungsten (W) fibre/Zr based metallic glass composite [J]. *Intermetallics*, 2009,17(12):1070-1077.
- [17] Son C Y, Lee S B, Lee S K, et al. Compressive properties of Zr-based amorphous matrix composite reinforced with tungsten porous foam [J]. *Intermetallics*, 2010,18(10):1880-1883.
- [18] 周国才,胡时胜. 不同温度的环氧大豆油聚合物的动态压缩力学性能研究 [C]// 第五届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 安徽:安徽省力学学会,2008:310-315.
- [19] 陈柏生,胡时胜,马芹永,等. 冻土动态力学性能的实验研究 [J]. *力学学报*, 2005,37(6):724-728.
Chen Bai-sheng, Hu Shi-sheng, Ma Qin-yong, et al. Experimental research of dynamic mechanical behaviors of

- frozen soil[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005,37(6):724-728.
- [20] Li H, Subhash G, Kecskes L J, et al. Mechanical behavior of tungsten preform reinforced bulk metallic glass composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005,403(1/2):134-143.
- [21] Hutchinson J W. On the postbuckling behavior of imperfection-sensitive structures in the plastic range[J]. Journal of Applied Mechanics, 1972,39(1):155-162.
- [22] Song B, Lu W Y, Syn C J, et al. The effects of strain rate, density, and temperature on the mechanical properties of polyethylene diisocyanate (PMDI)-based rigid polyurethane foams during compression[J]. Journal of Material Science, 2009,44(2):351-357.
- [23] Son C Y, Lee S B, Lee S K. Correlation of microstructure and compressive properties of amorphous matrix composites reinforced with tungsten continuous fibers or porous foams[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010,527(16/17):4028-4034.

Dynamic compressive properties of two tungsten structure reinforced Zr-based metallic glass composites at different temperatures*

Tan Zi-han, Xu Song-lin, Zhang Chao, Hu Shi-sheng

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Tungsten structure reinforced composites are materials that the tungsten structure is embedded into the metallic glass to prevent the shear bands from developing in the metallic glass. In order to expand their application and understand their mechanical properties, dynamic compression tests were performed for two Zr-based metallic glass composites reinforced by tungsten fiber and porous tungsten, respectively, by using a SHPB device at three different temperatures and various strain rates. Comparison of the dynamic mechanical properties between the two composites reveals that they both have considerable strain rate sensitivity and excellent plastic deformation ability, but they have different deformation mechanisms. The deformation of the tungsten fiber reinforced Zr-based metallic glass composite is due to the local structure instability or thermal instability of tungsten fibers. And this phenomenon was numerically simulated. On the other hand, the loading of the porous tungsten reinforced Zr-based metallic glass composite at the beginning is mainly carried by tungsten skeleton rather than the combined action of the components, which makes the yield stress of the porous tungsten reinforced composite smaller than those of both pure Zr-based metallic glass and pure tungsten.

Key words: solid mechanics; thermal instability; SHPB; Zr-based metallic glass; tungsten fiber reinforced; porous tungsten reinforced

* Received 7 February 2012; Revised 18 June 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11272304,11102206)

Corresponding author: Xu Song-lin, slxu99@ustc.edu.cn