

纤维体积分数对 W 纤维/Zr 基非晶合金 复合材料压缩性能的影响

张波^{*1,2}, 付华萌², 张海峰², 刘春忠¹, 王继杰¹

(1. 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110136; 2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘要: 采用渗流铸造法制备了含不同体积分数的 W 纤维的 W_f/Zr 基非晶合金复合材料, 其中 W_f 体积分分数分别为 47%、66%、77% 和 86%。研究了 W_f 体积分分数对 Zr 基非晶复合材料室温准静态压缩力学性能以及变形行为的影响。结果表明:随 W_f 体积分数的增加, W_f/Zr 基非晶复合材料的屈服强度单调增大, 塑性应变先增大后减小, W_f 体积分分数为 66% 时塑性应变最大。 W_f/Zr 基非晶复合材料塑性应变的变化主要取决于非晶基体和 W_f 相互作用的程度。随着应变量的增大, 基体中剪切带的数量和密度也随之增大, 主剪切带向大于 45° 方向偏转。由于压头的影响, W_f/Zr 基非晶复合材料压缩过程中样品端部和中部的受力状态不同, 导致两部分的剪切带方向也明显不同。随 W_f 体积分数的增大, W_f/Zr 基非晶复合材料的断裂方式由剪切断裂向纵向劈裂转变, 断裂行为符合摩尔库伦准则。

关键词: W_f/Zr 基非晶复合材料; 纤维体积分数; 塑性应变; 剪切带; 断裂方式

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)08-1833-06

Effect of fiber volume fraction on the compressive properties of the W fiber/Zr-based metallic glass composites

ZHANG Bo^{*1,2}, FU Huameng², ZHANG Haifeng², LIU Chunzhong¹, WANG Jijie¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The W fiber W_f/Zr -based metallic glass composites with different fiber volume fraction V_F were prepared by infiltration and rapid solidification. The V_F were 47%, 66%, 77% and 86%, respectively. The effect of V_F on the quasi-static compression mechanical properties and deformation behavior of the W_f/Zr -based metallic glass composites was researched in detail. The results show that the yield strength of the W_f/Zr -based metallic glass composites increases with increase of the V_F . The plastic strain firstly increases and then decreases with increase of the V_F . The plastic strain is the largest when the V_F is 66%. The change of the plastic strain in the W_f/Zr -based metallic glass composites mainly depends on the interaction between matrix and W_f . With increase of strain, the quantity and density of the shear bands in the matrix increase, and the main shear band deflects towards the direction more than 45° . The stress state in the end and middle of the W_f/Zr -based metallic glass composites sample is different during compression because of the influence of the pressure head, which results in the direction of the shear bands difference in different areas of the sample. The failure modes of the W_f/Zr -based metallic glass composites change from shear fracture to longitudinal splitting with the increase of the V_F . The fracture behavior the W_f/Zr -based metallic glass composites complies with the Mohr-Coulomb criterion.

Keywords: W_f/Zr -based metallic glass composites; fiber volume fraction; plastic strain; shear band; fracture mode

收稿日期: 2016-09-05; 录用日期: 2016-10-27; 网络出版时间: 2016-11-16 14:35

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20161116.1435.006.html

基金项目: 国家自然科学基金(51401131)

通讯作者: 张波, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为非晶合金及其复合材料的结构优化和性能 E-mail: zhangb@alum.imr.ac.cn

引用格式: 张波, 付华萌, 张海峰, 等. 纤维体积分数对 W 纤维/Zr 基非晶合金复合材料压缩性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(8): 1833-1838.

ZHANG Bo, FU Huameng, ZHANG Haifeng, et al. Effect of fiber volume fraction on the compressive properties of the W fiber/Zr-based metallic glass composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(8): 1833-1838 (in Chinese).

非晶合金在室温压缩以及拉伸载荷下，其塑性应变通常集中在几条有限的剪切带内，无应变硬化现象并伴随着绝热升温引起的加工软化，这些特征意味着在没有几何限制的情况下，非晶合金趋向于沿单一剪切带发生突然破坏，无宏观塑性^[1-3]。而室温下，非晶薄板在弯曲载荷下或小高径比的样品在压缩载荷下往往表现出良好的塑性^[4-5]，变形后样品表面可观察到大量的剪切带并且剪切带密度较大，这就说明剪切带数量的增加以及间距的减小有助于材料塑性的增大。传统的晶态合金在拉伸载荷下通常表现出良好的弹塑性变形行为，即屈服以后伴随着一定的塑性变形行为，因此人们自然而然地想到通过向非晶合金中引入晶态金属来改善其室温塑性。大量的研究结果也表明非晶复合材料与对应的基体非晶合金相比具有更优异的力学性能，其塑性的提高主要源于增强体对非晶基体中剪切带扩展的阻碍作用以及多剪切带的形成^[6-8]。

W_f/Zr 基非晶复合材料与 Zr 基非晶合金相比，在准静态以及动态压缩下均表现出更优异的力学性能，压缩塑性应变与抗压强度均有一定程度的提高^[6, 9-12]。因此，在工程材料，如动能穿甲弹或者遭受动态变形的工程材料中具有非常重要的应用前景。而纤维的分布以及体积分数对复合材料的强度、塑性以及断裂模式均具有一定的影响。Qiu 等^[13]对 W_f/(Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀)_{98.5}Si_{1.5} 非晶复合材料的研究结果表明，纤维体积分数 V_F 对复合材料的屈服强度、塑性应变和断裂模式都有非常重要的影响。

本实验中，制备了含不同体积分数的 W_f/Zr 基非晶复合材料，并详细讨论了增强相体积分数对复合材料室温压缩性能以及破坏方式的影响。

1 实验材料及方法

本研究选用的基体合金成分为 Zr 基非晶合金，成分如表 1 所示，通过电弧熔炼制备。选用纯度高于 99.8wt% 的 Zr、Ti、Cu、Ni、Be 纯金属，按原子

表 1 Zr 基非晶合金中各元素的含量

Table 1 Content of each element in the Zr-based metallic glass

Element	Content/at%
Zr	41.2
Ti	13.8
Ni	10.0
Cu	12.5
Be	22.5

分数计算出各种纯金属所需的质量，去除金属表面的氧化皮后分别在石油醚和无水乙醇中进行超声波清洗以去除金属表面的油污。熔炼合金之前，先将预先放置于炉内的吸收钛合金锭熔化，以进一步降低炉腔内的氧含量。每个合金铸锭至少翻转熔炼四次以保证合金铸锭的成分均匀。

增强相选用直径为 300 μm 的 W_f，采用浸渗铸造法制备出纤维体积分数不同的 W_f/Zr 非晶复合材料，加热温度为 1 173 K，保温 4 min，再充入 0.3 MPa 的高纯氩气使合金熔体渗入到 W_f 的空隙内，之后用饱和食盐水冷却。其中 W_f 体积分数 V_F 分别为 47%、66%、77% 以及 86%，其横截面的 SEM 图像如图 1 所示。可见，当 W_f 体积分数为 47% 时，复合材料中纤维分布不均匀，而当 V_F 大于等于 66% 时，纤维分布比较均匀。压缩样品采用 Φ 5 mm×10 mm 的圆柱状样品，压缩实验在 Instron5582 万能力学实验机上进行，应变速率为 4×10⁻³ s⁻¹。为了更好的观察复合材料在加载过程中剪切带的萌生以及扩展过程，预先在压缩样品侧面磨出一个宽度大约为 2 mm 的小平面，研磨抛光之后进行压缩实验。实验过程中在不同的应变量下卸载，然后利用 SEM 观察样品侧表面上剪切带的形貌。样品在不同应变量下的侧面剪切带形貌、裂纹扩展情况以及样品断裂后的断口形貌通过 LEO Supra 35 和 FEI Quanta 60 两种扫描电子显微镜观察。

2 结果与讨论

图 2 为含不同 V_F 的 W_f/Zr 基非晶复合材料的压缩应力-应变曲线。图 3 为 W_f/Zr 基非晶复合材料的屈服强度和塑性应变随 V_F 的变化关系。可见，W_f/Zr 基非晶复合材料的屈服强度随 V_F 的增大而单调增大，V_F 为 86% 时，屈服强度最高为 2 190 MPa；而塑性应变先是随 V_F 的增大而增大，到 V_F 为 66% 时达到最大值，为 30%，之后随 V_F 的增大而减小，这与 Zhang^[14] 以及 Qiu^[13] 等的研究结果相似。

W_f 的 V_F 为 77% 时，W_f/Zr 基非晶复合材料不同压缩变形阶段样品侧表面的剪切带形貌如图 4 所示。图 4(b)~4(e) 的塑性应变分别对应于应力-应变曲线(图 2)上的点 1~4。可见，试样刚刚屈服时，非晶合金中没有发现剪切带，说明非晶基体还没有屈服。W_f 的弹性模量较大，因此 W_f 先于非晶

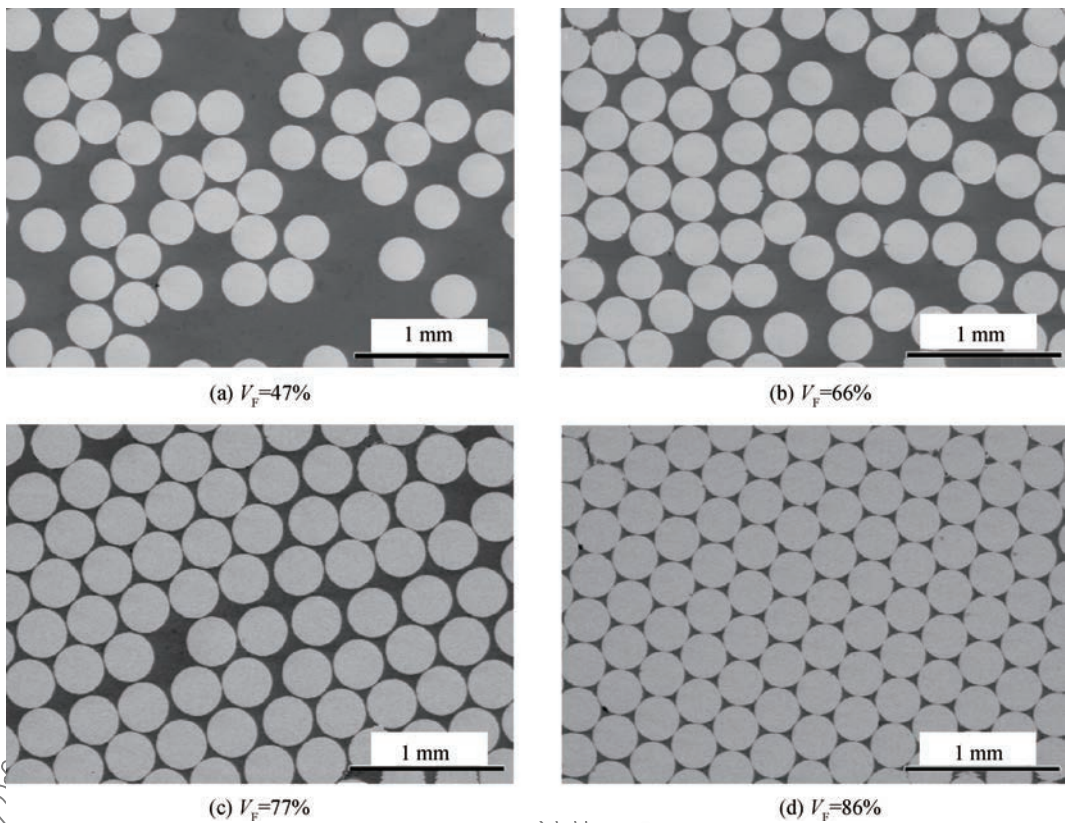


图 1 不同纤维体积分数的 W_f/Zr 基非晶复合材料的横截面 SEM 图像

Fig. 1 SEM images of the W_f/Zr-based bulk metallic glass composites with different volume fractions of W fiber

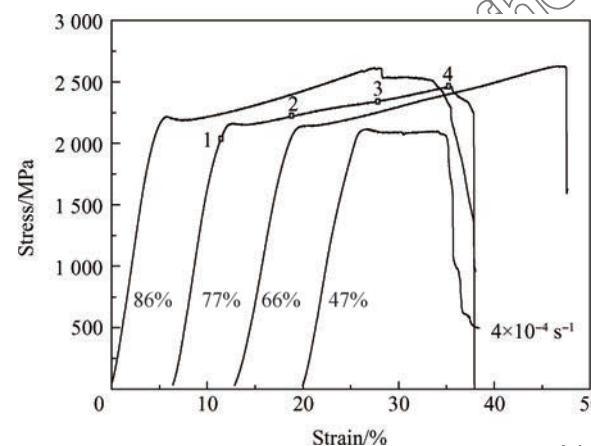


图 2 不同 W 纤维体积分数的 W_f/Zr 基非晶复合材料的压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Compressive stress-strain curves of the W_f/Zr-based bulk metallic glass composites with different volume fractions of W fiber

基体发生屈服,进而发生塑性变形,而非晶基体依然保持弹性变形,两种材料变形的不匹配会在界面附近区域产生一定的应力集中,从而促使非晶基体中的剪切带优先在界面处产生,而 W_f 中的裂纹优先在靠近界面的位置萌生。

随着加载的进行,当应变量达到 12% 时,非晶

基体中出现大量的剪切带,但是样品中部以及两端靠近压头的位置剪切带形貌明显不同,样品中部剪切带比较密集,方向比较杂乱,主剪切带与加载轴之间的夹角为 44° 且比较平直,而其它方向的二次剪切带则呈现波浪或者弯曲的形状并伴随着分叉的现象。主剪切带与二次剪切带相互交割的地方可以观察到剪切台阶,如图 4(c) 中的圆圈区域所示,这些现象都有助于 W_f/Zr 基非晶复合材料塑性的提高。首先波浪形或弯曲的剪切带的扩展路径比直剪切带更长,它们可以消耗更多的塑性功,容纳更多的塑性变形,而剪切带之间的相互作用能够减小剪切带尖端的应力集中,阻止剪切带的继续扩展或者改变剪切带的扩展方向。样品端部剪切带数量较少且方向多垂直于加载轴。这是由于压缩载荷下,样品并不是发生整体的均匀变形,而是由于样品与压头之间的摩擦力作用,样品端部靠近压头的位置难于变形,变形量最大的地方集中在样品中部,因此样品中部剪切带比较密集。而样品两端,由于与压头之间摩擦力的作用会在两端形成自端部向中心逐渐减小的径向压应力 σ_r ,而这种径向压应力的存在

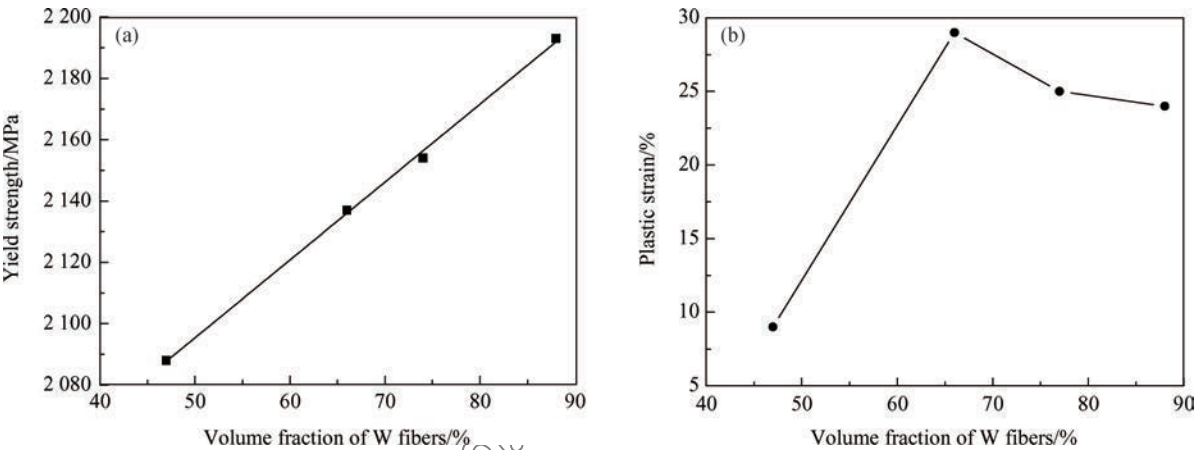


图3 W_f/Zr 基非晶复合材料的屈服强度(a)与塑性应变(b)随 W_f 体积分数的变化关系
Fig. 3 Variation of the yield strength and plastic strain of W_f/Zr -based bulk metallic glass composites with different volume fractions of W fiber

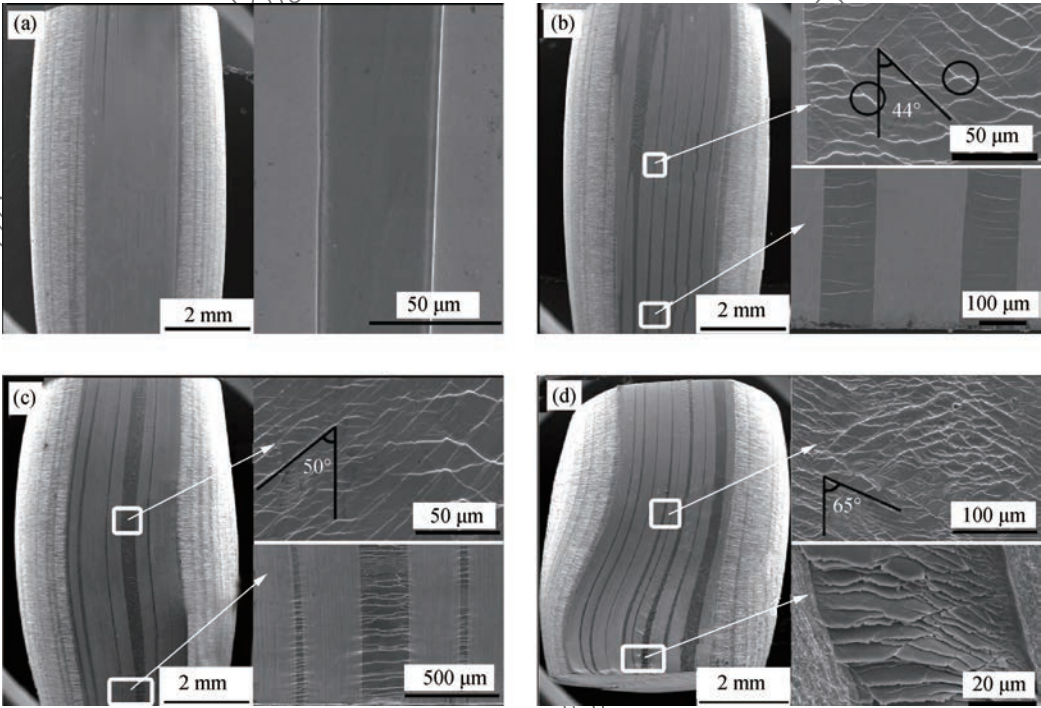


图4 纤维体积分数为 77% 时 W_f/Zr 基非晶复合材料不同压缩变形阶段样品侧表面的剪切带形貌
((a)~(d) 分别对应于图 2 中应力-应变曲线上的点 1~4)
Fig. 4 Shear bands morphologies on the profiles of the W_f/Zr -based metallic glass composite specimens
((a)~(d) are corresponding to the points 1-4 on the stress-strain curve in Fig. 2)

使样品在不同的部位其受力状态也不相同。如图 5 所示,端部处于类似双轴压缩的应力状态,在冰的双轴压缩实验中也观察到了垂直于轴向加载轴的剪切带^[15]。而不同的剪切应力面的形成取决于径向应力 σ_L 与轴向应力 σ_C 的比率 σ_L/σ_C , 即为限制比。 W_f/Zr 基非晶复合材料在压缩过程中,样品中部不受径向应力的作用,因此限制比较低,剪切带趋向于沿最大剪切应力面形成,即剪切带方向与轴向应力以及径向应力的夹角均为 45° 方向,如图 5 中的

剪切带 A。而样品端部,由于 σ_L 的存在,限制比较高,剪切带方向与轴向应力方向成近似 45° 但是平行于径向应力方向,如图 5 中的剪切带 B 和 C。此外,屈服阶段,在样品中部 W_f 间距较小的位置也可以观察到垂直于加载轴的剪切带,这是由于在样品刚发生屈服的时候,外加应力相对较小,而 W_f 对非晶基体变形的限制也可以提供类似径向应力的作用,这种情况下,非晶基体处于高限制比条件下,因此其剪切带垂直于加载轴。

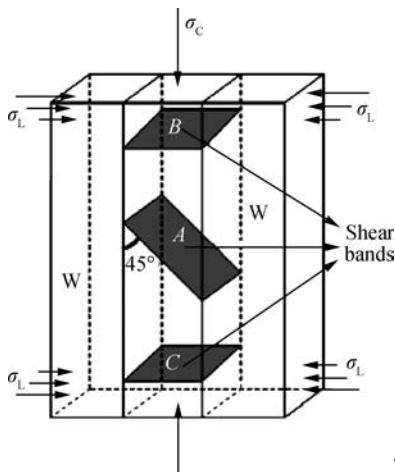


图 5 W_f/Zr 基非晶复合材料压缩载荷下剪切带的形成示意图
Fig. 5 Schematic illustration of the formation of the shear bands in W fiber/Zr-based metallic glass composites under compressive load

随着加载的进行, W_f/Zr 基非晶复合材料的塑性变形量增大, 无论样品端部还是中心位置, 非晶基体中剪切带的数量和密度都在不断增大, 纤维屈曲现象越来越明显, 如图 4(d) 和图 4(e) 所示。随

着样品变形量的增大, 可以发现主剪切带的方向逐渐偏离了最初的 44° 方向, 剪切带与加载轴之间的夹角不断增大, 到应变量为 28% 时, 主剪切带与加载轴之间的夹角增大到 65° 。这是因为主剪切带与二次剪切带的相互作用会在其中的一个剪切面上形成剪切台阶, 而大量的剪切台阶在主剪切面上的堆积会导致主剪切带向试样的水平方向偏转^[16]。也就是说, 样品在经过较大的塑性变形以后, 剪切带的方向已经偏离了其最初形成的方向, 而剪切带的旋转必然会导致较高的压缩塑性。

图 6 为 W_f 体积分数不同时, W_f/Zr 基非晶复合材料的宏观破坏形貌。可见, V_F 为 47% 时, 复合材料发生剪切断裂, 剪切断裂角为 42° 。 V_F 大于等于 66% 时, 复合材料发生纵向劈裂并伴随着纤维的屈曲现象。可见 V_F 对 W_f/Zr 基非晶复合材料的破坏模式有非常重要的影响。在 SiC 骨架/Zr 基非晶双连续相复合材料中, 科研人员也发现了类似的随增强相体积分数的增大复合材料破坏方式发生变化的现象^[17]。

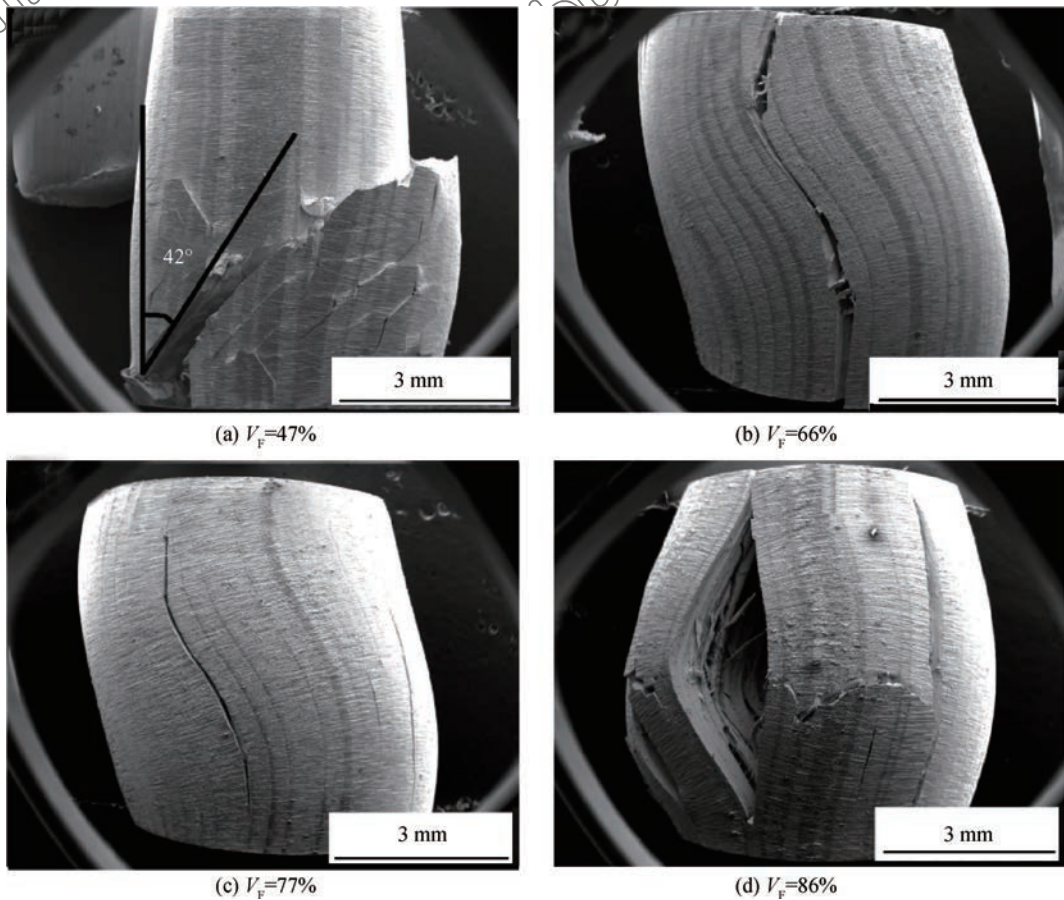


图 6 W_f 体积分数不同时 W_f/Zr 基非晶复合材料的宏观破坏形貌

Fig. 6 Compressive fracture macroscopic morphologies of the W fiber/Zr-based metallic glass composites with different volume fractions of W fiber

大部分非晶合金在压缩载荷下发生剪切断裂,但是由于断裂面上正应力的影响,其剪切断裂面会略微偏离最大剪切应力面,通常情况下剪切角小于 45° 。同时大量的研究也表明,非晶合金复合材料在压缩载荷下,其破坏模式包括剪切断裂、劈裂以及碎裂成多块等。最常见的破坏方式为剪切断裂和轴向劈裂两种,并且这两种破坏方式的变化多与增强相的体积分数有关。也就是说两者之间的竞争将决定最终的断裂方式。这种竞争机制可以通过 Mohr-Coulomb 准则进行解释,复合材料的压缩断裂强度 σ_{shear} 将随着 V_F 的增大而增大,也就是说随着 V_F 的增大,复合材料将越来越不容易发生剪切断裂。而复合材料在压缩过程中具有一定的轴向应变 ϵ_c ,根据泊松比效应,同时会产生一个径向拉伸应变 ϵ_L ,这种径向应变的产生会促使材料发生轴向劈裂。当复合材料的径向应变达到临界径向破坏应变时,复合材料将发生轴向劈裂。而当 V_F 较高时,要达到临界径向破坏应变则需要更大的轴向应变,即需要更大的压缩应力,因此复合材料发生轴向劈裂的临界劈裂应力 σ_{split} 也将随着 V_F 的增大而增大。 W_f 与 Zr 基非晶合金的泊松比分别为 0.28 和 0.36,两者差别并不是很大, W_f /Zr 基非晶复合材料的临界劈裂应力将随 V_F 的增大缓慢升高。因此随着 V_F 的增大,临界剪切破坏应力与临界劈裂应力必会出现一个交点,此交点对应的纤维体积分数 V_0 即为材料破坏方式发生改变时所对应的临界纤维体积分数。当纤维体积分数 V_1 小于 V_0 时, $\sigma_{\text{shear}}^{V_1}$ 小于 $\sigma_{\text{split}}^{V_1}$,因此 W_f /Zr 基非晶复合材料发生剪切断裂。而当纤维体积分数 V_2 大于 V_0 时, $\sigma_{\text{shear}}^{V_2}$ 大于 $\sigma_{\text{split}}^{V_2}$,因此 W_f /Zr 基非晶复合材料发生轴向劈裂。

3 结 论

(1) 纤维体积分数 V_F 对 W_f /Zr 基非晶合金复合材料的压缩性能具有较大影响,复合材料的屈服强度随 V_F 的增大而增大,而塑性应变先随 V_F 的增大而增大,到 V_F 为 66% 时达到最大值,之后随 V_F 的增大而减小。

(2) W_f /Zr 基非晶合金复合材料的侧面观察显示,随着应变量的增大,基体中剪切带的数量和密度也随之增大,主剪切带向大于 45° 方向偏转。由于压头的影响,复合材料压缩过程中端部和中部的受力状态不同,导致两部分的剪切带方向也明显不同。

(3) 纤维体积分数 V_F 对 W_f /Zr 基非晶合金复合材料的破坏模式有非常重要的影响,当 V_F 为 47% 时,复合材料发生剪切断裂,剪切破坏角为 42° ;而当 V_F 大于等于 66% 时,复合材料发生纵向劈裂并伴随着纤维的剪切型屈曲失稳。根据 Mohr-Coulomb 准则详细分析了复合材料断裂方式随 V_F 的变化关系。

参考文献:

- [1] PAMPILLO C A. Flow and fracture in amorphous alloys[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(7): 1194-1227.
- [2] LÖFFLER J F. Bulk metallic glasses[J]. Intermetallics, 2003, 11(6): 529-540.
- [3] SCHNEIDER S. Bulk metallic glasses[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2001: 137723-137736.
- [4] ZHANG Z, ZHANG H, PAN X, et al. Effect of aspect ratio on the compressive deformation and fracture behaviour of Zr-based bulk metallic glass[J]. Philosophical Magazine Letters, 2005, 85(10): 513-521.
- [5] CONNER R D, LI Y, NIX W D, et al. Shear band spacing under bending of Zr-based metallic glass plates[J]. Acta Materialia, 2004, 52(18): 2429-2434.
- [6] 陈洁, 李敏, 张佐光, 等. 铁基非晶条带玻璃纤维混杂复合材料力学特性[J]. 复合材料学报, 2009, 26(6): 18-24. CHEN Jie, LI Min, ZHANG Zuoguang, et al. Mechanical behavior of Fe-based amorphous ribbons-glass fibers reinforced hybrid composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(6): 18-24 (in Chinese).
- 王鹏, 寇宏超, 白洁, 等. 塑性铁基非晶复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 120-124. WANG Peng, KOU Hongchao, BAI Jie, et al. Preparation and properties of Ti-based metallic glass composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(6): 120-124 (in Chinese).
- [8] ZHU Z, ZHANG H, HU Z, et al. Ta-particulate reinforced Zr-based bulk metallic glass matrix composite with tensile plasticity[J]. Scripta Materialia, 2010, 62(5): 278-281.
- [9] 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}Ni₁₀Be_{23.5} metallic glass matrix composites[J]. Acta Materialia, 1998, 46(17): 6089-6102.
- [10] 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.
- [11] CHOI Y M, CONNER R D, SZECS F, et al. Quasistatic and dynamic deformation of tungsten reinforced Zr_{41.25}Nb_{5.4}Al₁₀Cu_{15.4}Ni_{12.6} bulk metallic glass matrix composites[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(9): 1039-1046.
- [12] ZHANG B, FU H, SHA P, et al. Anisotropic compressive deformation behaviors of tungsten fiber reinforced Zr-based metallic glass composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2013: 56616-56621.
- [13] QIU K Q, WANG A M, ZHANG H F, et al. Mechanical properties of tungsten fiber reinforced ZrAlNiCuSi metallic glass matrix composite[J]. Intermetallics, 2002, 10(11): 1283-1288.
- [14] ZHANG H, ZHANG Z F, WANG Z G, et al. Effects of tungsten fiber on failure mode of Zr-based bulk metallic glassy composite[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(8): 2459-2469.
- [15] ILIESCU D, SCHULSON E M. The brittle compressive failure of fresh-water columnar ice loaded biaxially[J]. Acta Materialia, 2004, 52(20): 5723-5735.
- [16] ZHANG Z, HE G, ZHANG H, et al. Rotation mechanism of shear fracture induced by high plasticity in Ti-based nanostructured composites containing ductile dendrites[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(9): 945-949.
- [17] CHEN Y, WANG A, FU H, et al. Preparation, microstructure and deformation behavior of Zr-based metallic glass/porous SiC interpenetrating phase composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 530(12): 15-20.