

W 丝/Zr 基非晶合金复合材料动态拉伸断裂模式研究

Research on Fracture Mode Under Dynamic Tension of W
Fiber/Zr-based Amorphous Alloy Matrix Composites

程焕武, 才鸿年, 王 鲁, 王扬卫, 薛云飞

(北京理工大学 材料科学与工程学院, 北京 100081)

CHENG Huan-wu, CAI Hong-nian, WANG Lu, WANG Yang-wei, XUE Yun-fei

(School of Material Science and Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 采用霍普金森杆拉伸技术研究了 W 丝体积分数为 80% 的 W 丝/Zr 基非晶合金复合材料的动态拉伸性能, 通过扫描电镜研究了该复合材料动态拉伸断裂模式。结果表明: 随着打击速度增加, 复合材料动态拉伸强度和断裂应变总体呈上升趋势; 复合材料的动态拉伸断裂模式以钨丝解理断裂为主导, 伴随非晶合金基体产生脉纹状花样和钨丝劈裂; 脉纹状花样的形态不同于在动态压缩条件下所形成的, 不存在“尖脊”形貌。

关键词: 非晶合金; 复合材料; 动态拉伸; 断裂模式

中图分类号: TB331; O347.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-4381(2007)07-0067-03

Abstract: The dynamic tensile properties of tungsten fibers (80%, volume fraction) reinforced Zr based amorphous alloy matrix composite was investigated by means of the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB), and Scanning Election Microscope (SEM) was used to evaluate the fracture mode of the composite under dynamic tension. It is found that the tensile strength and fracture strain of the composite appeared to enhance with the increase of impact speed; the fracture behavior is dominated by transgranular cleavage of the tungsten fibers, combined with the vein pattern of metallic glass matrix and splitting of tungsten fibers; the vein pattern under dynamic tension is different from that under dynamic compression, no ridge-like structure was observed.

Key words: amorphous alloy; composite; dynamic tension; fracture mode

W 丝/Zr 基非晶合金复合材料是一种新型穿甲弹芯材料^[1]。尾翼稳定脱壳穿甲弹在发射过程中除了受到膛内高温高压的火药气体推动作用外, 弹芯在弹托之后的部位受火药气体的径向压力及惯性拉力, 与弹托相啮合部分还受到由弹托传来的抱紧力及剪力作用^[2]; 同时弹芯在弹靶作用过程中也受到复杂动态拉应力作用, 因此动态拉伸性能是评价穿甲弹芯材料的关键性能参数之一。本工作选取 W 丝体积分数 80% 的 W 丝/Zr 基非晶合金复合材料进行动态拉伸实验, 研究其动态拉伸性能和断裂模式, 有助于解释侵彻机理, 为弹芯设计提供力学性能依据。

1 实验方法

实验用复合材料基体为 Zr-Ti-Cu-Ni 四元合金, 钨丝体积分数为 80%, W 丝直径约为 250 μ m, 复合材

料微观形貌如图 1 所示。采用霍普金森压杆(SHPB)实验技术中拉伸实验方法进行 W 丝/Zr 基非晶合金复合材料的动态拉伸性能测试, 实验采用两端带螺纹

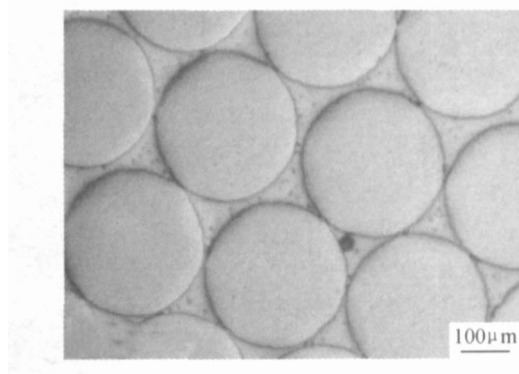


图 1 复合材料试样微观形貌

Fig. 1 Microstructure of composite

的棒型拉伸试样,中间原始标距为 $\phi 5\text{mm} \times 12\text{mm}$ 。通过控制 SHPB 系统中子弹打击速度从 21m/s 增加到 33m/s ,获得 4 种动态拉伸载荷,每种载荷下测试 3 个试样,所得数据作平均处理。动态拉伸断裂后试样宏观形貌如图 2 所示。

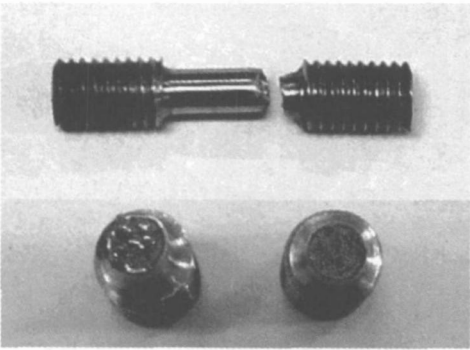


图 2 拉伸断裂后试样宏观照片

Fig. 2 Macro photograph of specimen after dynamic tension

2 动态拉伸实验结果及分析

图 3 是 W 丝/Zr 基非晶合金复合材料在不同打击速度下获得的动态拉伸应力-应变曲线,表 1 是对应的动态拉伸数据。图中曲线表明动态应力-应变曲线与常规静载荷下获得应力-应变曲线类似。从这些应力-应变曲线可以看出如下规律:(1)试样首先发生弹性变形,应力-应变之间呈线性关系;当应力达到试样的抗拉强度后马上衰减,即材料损伤断裂;加载过程没有明显的屈服阶段,整体表现为脆性断裂。(2)随打击速度增大,所测材料的动态拉伸强度和断裂应变总体呈升高趋势,但并未遵循严格的对应律;打击速度为 25.8m/s 时所得到的动态抗拉强度最大,为 1766MPa 。

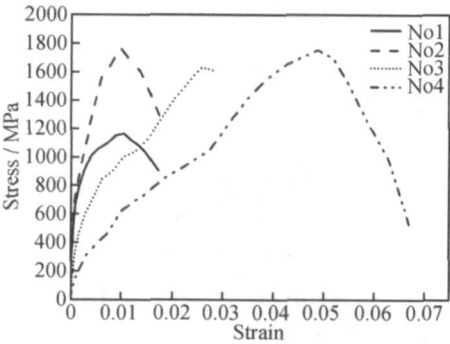


图 3 不同打击速度下复合材料应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of the composite under different shock rate

复合材料的动态拉伸行为主要由组成相 W 丝和非晶合金共同决定。已有的研究认为钨属于体心立方

表 1 动态拉伸实验数据

Table 1 Data of dynamic tension tests

No.	$V / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	σ_b / MPa
1	21.2	2267	1162
2	25.8	3133	1766
3	29.8	2991	1629
4	33.6	3865	1751

晶体结构,具有显著的应变率强化效应^[3],而基体非晶合金则没有应变率效应^[4]。本实验用复合材料中 W 丝含量达到 80%,因此在高应变率拉伸载荷下复合材料将表现出应变率强化效应,即随着打击速度提高,试样上实际发生的应变率增加,所测得的动态拉伸强度也呈现出上升趋势。

复合材料中非晶基体对钨丝起到径向约束和传递载荷作用。在宏观动态载荷下非晶合金基体局部受到剧烈的剪切应力而发生变形,高度局部化的变形导致温度升高;而基体合金的玻璃化转变温度仅为 355°C ,局部温升将导致非晶合金发生软化。因此随着应变速率的增加,非晶合金软化现象更趋突出,制约了钨金属应变率强化效应的表现,试样宏观断裂强度稍有下降,而断裂应变显著增加。

3 断口形貌特征和断裂模式

图 4a 为复合材料动态拉伸断口,从图中可以看出断口比较平齐,表现出脆性断裂特征。图 4b 是钨丝断裂面显微形貌,属于典型的解理面,解理面是解理断裂的重要微观形貌特征,因此复合材料主导断裂模式为钨丝解理断裂。

在拉伸断口上还可以观察到钨丝有劈裂现象,如图 5 所示。劈裂存在两种模式,其一,裂纹贯穿不同的钨丝,在相邻的钨丝间扩展,同时穿过钨丝间的非晶合金基体,如图 5a 所示;其二,在钨丝与非晶合金结合处出现开裂现象,同时钨丝内部劈裂,伴有非晶合金基体撕裂形成的脉纹状花样,如图 5b 所示。因此复合材料动态拉伸断裂模式包括钨丝解理断裂、钨丝劈裂和非晶合金的脉纹状撕裂,属于混合断裂模式。

动态拉伸断口上的脉纹状花样广泛分布,如图 6 所示。这些花样的形态不同于在动态压缩条件下形成的脉纹状花样^[5,6]，“脉络脊”相对而言有些凌乱,大多不完整且没有方向性,不存在动态压缩断裂中常见的“尖脊”形貌。脉状花样的形成是由于试样在打击能量作用下,能量无法通过其他失效形式得以充分释放而在试样局部区域集聚,从而使试样局部温度升高,局部区域温度接近或达到非晶软化点,在复合材料整体

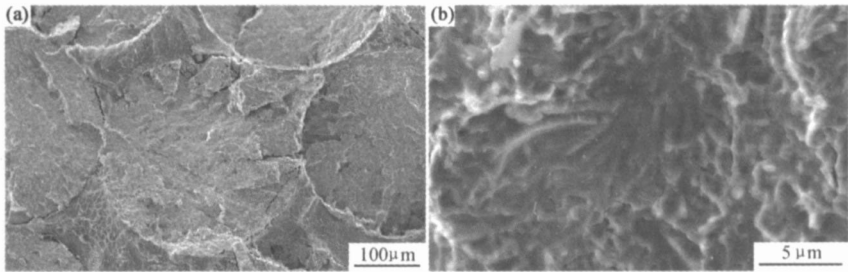


图 4 动态拉伸断口形貌 (a) 低倍断口形貌; (b) 钨丝解理断裂形貌

Fig. 4 Fracture surface of dynamic tension (a) fractograph of low times; (b) transgranular cleavage of W fiber

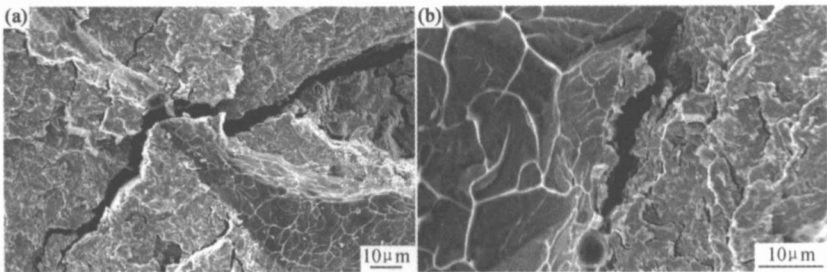


图 5 钨丝劈裂模式 (a) 劈裂裂纹在相邻的钨丝间扩展; (b) 钨丝/ 非晶合金界面开裂, 同时钨丝内部劈裂

Fig. 5 Fracture mode of tungsten fiber (a) splitting cracks spread to border Tungsten fiber; (b) tungsten fiber and amorphous alloy interface split and split inside tungsten fiber

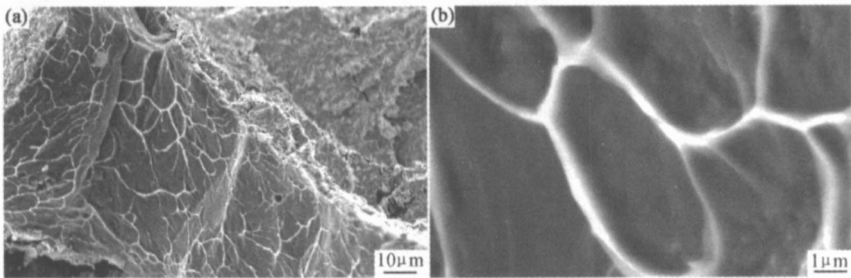


图 6 无“尖脊”脉纹状花样 (a) 低倍形貌; (b) 高倍形貌

Fig. 6 No ridge-like vein pattern (a) of low times; (b) of high times

损伤断裂过程中被撕裂而形成。脉状花样是释放打击能量的一种渠道。

4 结论

- (1) 随着打击速度增加, 复合材料动态拉伸强度和断裂应变总体呈上升趋势, 打击速度为 25. 8m/s 时所得到的动态抗拉强度最大, 为 1766MPa。
- (2) W 丝/ Zr 基非晶合金复合材料动态拉伸断裂以 W 丝解理断裂为主, 伴随非晶合金基体产生脉纹状花样和钨丝劈裂。
- (3) 动态拉伸断口上的脉纹状花样形态与动态压缩条件下形成的脉纹状花样不同, 不存在“尖脊”形貌。

参考文献

[1] 王宝生. 钨丝集束复合材料弹芯[EB/OL]. [http://www. defenseonline. com. cn](http://www.defenseonline.com.cn), 2003.

[2] 赵国志, 王晓鸣, 潘正伟, 等. 杆式穿甲弹设计理论[M]. 北京: 国防工业出版社出版, 1997.

[3] SUBHASH G, LEE Y J, RAVICHANDRAN D G. Plastic deformation of CVD textured tungsten-I Constitutive responses[J]. Acta metall Mater, 1994, 42(1): 319- 330.

[4] SUBHASH G, DOWDING R J, KECSKES L J. Characterization of uniaxial compressive response of bulk amorphous Zr-Cu-Ni-Be alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 334: 33- 40.

[5] 王鲁, 王富耻, 程焕武, 等. 钨丝/ 锆基非晶合金复合材料的动态力学特性[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(2): 165- 167.

[6] WRIGHT W J, SAHA R, NIX W D. Deformation mechanisms of the Zr₄₀Ti₁₄Ni₁₀Cu₁₂Be₂₄ bulk metallic glass[J]. Mater Trans JIM, 2001, 42(4): 642- 649.

收稿日期: 2006-09-14; 修订日期: 2007-01-15
作者简介: 程焕武(1967-), 男, 讲师, 从事非晶合金及其复合材料性能研究, 联系地址: 北京理工大学材料科学与工程学院(100081)