

钨合金材料的动态拉伸实验研究

Dynamic Tensile Experiments of Tungsten Alloys

黄石松¹, 宋卫东²

(1 西北工业大学, 西安 710072;

2 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

HUANG Shì song¹, SONG Wèi dong²

(1 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2 State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 采用旋转盘式间接杆-杆型冲击拉伸装置(SHTB)对颗粒度分别为 2, 5 μ m 和 20 μ m 的三种 91% (质量分数) 细化钨合金材料在动态冲击载荷作用下的力学性能进行了实验研究, 分析了三种钨合金在应变率为 0.001, 200, 500s⁻¹ 时动态力学性能, 给出了颗粒度大小与材料屈服强度的关系; 采用扫描电子显微镜(SEM)对动态拉伸实验中回收的试件断口进行断口分析, 研究钨合金在不同应变率状态下材料的破坏特征, 在动态拉伸载荷作用下钨合金材料呈现出一种混合破坏模式包括钨颗粒的劈裂以及颗粒与基体界面的开裂。

关键词: 钨合金; 动态拉伸; 颗粒度

中图分类号: O347.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)06-0009-04

Abstract: Dynamic tension tests were conducted by employing SHTB to study the fracture behavior of 91% (mass fraction) tungsten alloy with three kinds of grain sizes of 2, 5 μ m and 20 μ m. The dynamic mechanical properties of tungsten alloys under different strain rates were analyzed. The effects of grain size on the mechanical characteristics were discussed. By adopting SEM, the fracture section of the specimen after the dynamic tension tests were scanned and the fracture modes of the tungsten alloys under different strain rates were investigated.

Key words: tungsten alloy; dynamic tension; grain size

钨合金是一种颗粒增强复合材料, 影响因素多, 决定了其力学性能也是复杂、多变和离散的。同时, 在制备过程中不同的工艺对材料的力学性能也有不同程度的影响。钨合金在许多民用、工业和军事领域中发挥着十分重要的作用。钨合金由于其良好的力学性能, 广泛应用在国防、航天以及民用领域, 经过几十年的探索、研究, 已经从多方面对其进行了研究, 采用不同的处理方法来改善其力学性能^[1-5]。但是, 由于影响钨合金力学性能的因素很多, 交叉了化学工艺、材料科学以及力学等众多学科, 对钨合金研究还不完善, 所以不论是在实验方面还是在理论方面, 关于钨合金力学性能的研究都有着广阔的前景^[6,7]。所有这些工作对于了解、认识钨合金的动态力学性能, 完善钨合金的高压物理数据是十分有意义的。然而, 钨颗粒的大小、形状以及体积分数对钨合金材料的动、静态力学性能都有着重要的影响, 关于钨颗粒尺寸对钨合金动态力学性能影响的研究文献并不是很多^[8]。因此, 研究钨合金材料在动态载荷作用下的力学性能, 对于国防和航空、

航天领域都具有十分重要的应用价值。本研究采用旋转盘式间接杆-杆型冲击拉伸实验装置对三种不同颗粒度钨合金材料进行了动态拉伸实验, 分析了不同应变率条件下钨合金材料的动态力学行为, 进而采用扫描电镜研究了试件断口的破坏特征

1 SHTB 实验装置

1.1 实验装置

冲击拉伸实验均在旋转盘式间接杆-杆型冲击拉伸实验装置(SHTB)上进行的, 这类杆-杆型装置的实验原理可用统一的 Langrange($X-T$) 图来表示。图 1 为实验装置示意图, SHTB 实验装置由旋转盘式加载系统、撞块、输入杆和输出杆组成。加载装置是一个直径为 1.4m, 转动线速度可以达到 100m/s 的飞轮。

1.2 试件及其连接

实验用试件为哑铃形扁平状, 试件尺寸如图 2 所示。为减小试件拉伸段圆弧部分的应力集中现象, 在

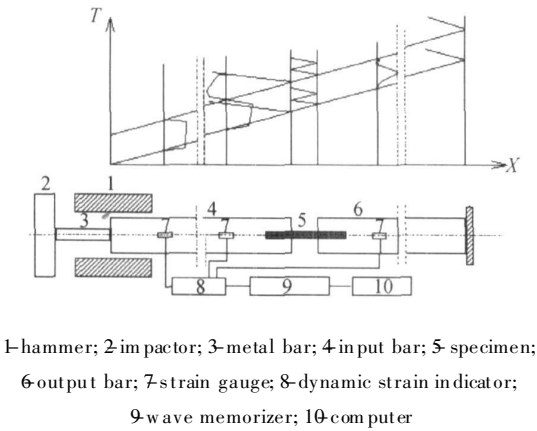


图 1 实验装置

Fig 1 Schematic of experimental set-up

粘接前要把实验段的圆弧部分沿纵向研磨光滑。图 3 为试件与输入杆和输出杆的连接图。试件与输入杆和

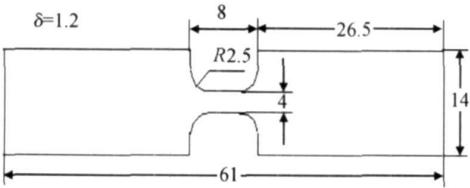


图 2 试件形状和尺寸

Fig. 2 Specimen shape and geometry size

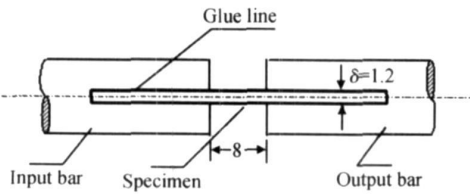


图 3 试件与输入杆和输出杆的连接

Fig. 3 Connection of specimen with input bar and output bar

输出杆之间采用粘接方式, 以克服原来螺钉连接方式产生的波形弥散, 在这里粘接剂选择高强度耐冲击胶。

2 实验结果与讨论

本实验是在室温(14℃)条件下进行的, 对颗粒度分别为 2, 5μm 和 20μm 三种 91% (质量分数) 细化钨合金材料, 通过动态拉伸实验研究上述材料的力学性能。获得了钨合金材料在不同应变率条件下的应力-应变曲线和动态力学参数。

表 1 给出了三种材料在准静态加载条件下实验数据。其中 σ_b 为钨合金材料的强度极限; σ_s 为材料的屈服极限; E 为材料的杨氏模量; δ 为延伸率; ρ 为材料密度。从表 1 可以得出随着钨合金颗粒度的减小, 其强度极限从 950MPa 提高到 1270MPa, 提高了 33. 7%。这表明颗粒度的大小对材料强度极限的影响较大。此外, 材料的延伸率随着颗粒度的减小而减小, 表明细化钨合金的致脆作用。颗粒度的大小对钨合金材料性能的影响还体现在对材料杨氏模量的影响, 使材料的刚度随着颗粒度的增大而减小。

表 1 细化钨合金的静态实验数据

Table 1 Static experimental parameters of tungsten alloy

σ_b / MPa	σ_s / MPa	E / GPa	δ / %	ρ (g · cm ⁻³)	Grain size / μm
1270		340		17. 3	2
1010	750	310	12	17. 3	5
950	670	280	33	17. 3	20

图 4a 给出了颗粒度为 2μm 的钨合金在不同应变率下的应力-应变曲线。颗粒度为 2μm 的细化钨合金材料在动态加载条件下, 屈服极限降低幅度最大。应变率

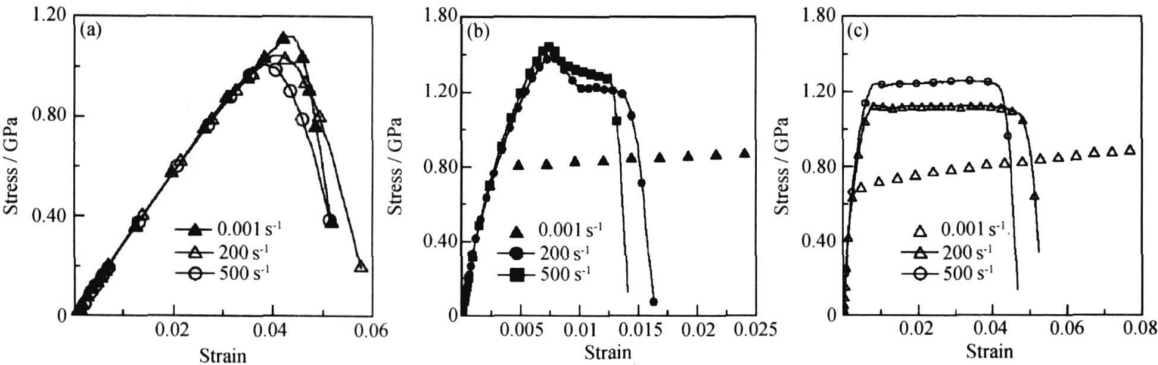


图 4 钨合金在不同应变率时应力-应变曲线

(a) 2μm; (b) 5μm; (c) 20μm

Fig 4 Stress-strain curves of tungsten alloys under different strain rates

(a) 2μm; (b) 5μm; (c) 20μm

为 200s^{-1} 时, 颗粒度为 $2\mu\text{m}$ 的材料抗拉强度极限仅为 1.04GPa ; 应变率为 500s^{-1} 时, 抗拉强度极限为 1.01GPa 。而静态加载条件下抗拉强度为 1.17GPa , 断裂时无任何塑性变形, 表现为完全脆断。实验数据离散性较大, 说明材料的性能不稳定, 可能材料中的初始缺陷较多。

图 4b 和图 4c 给出颗粒度分别为 $5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 两种不同颗粒度钨合金在不同应变率下的应力-应变曲线。从图中可以观察到, 两种材料的动态屈服强度都比静态屈服强度高; 在动态拉伸条件下, 颗粒度为 $5\mu\text{m}$ 的细化钨合金材料当应变率为 200s^{-1} 时屈服极限为 1.22GPa , 应变率为 500s^{-1} 时屈服极限为 1.31GPa , 提高了 7.4% ; 破坏应力则由 1.16GPa 提高到 1.23GPa , 上升了 6.1% 。对于颗粒度为 $20\mu\text{m}$ 的细化钨合金材料, 应变率为 200s^{-1} 时, 屈服极限为 1.13GPa , 当应变率提高到 500s^{-1} 时, 屈服应力为 1.20GPa , 提高了 6.3% ; 破坏应力则由 1.21GPa 上升为 1.235GPa , 提高了 2.2% 。由以上数据分析可知颗粒度减小, 应变率强化作用增强。

从图 4b 和图 4c 中还可以看出颗粒度为 $5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 的两种细化钨合金材料都表现出应变率敏感性, 而且随颗粒度减小, 应变率强化作用提高。在两种细化钨合金材料中都发现有应变率致脆现象, 但随着颗粒度的减小, 应变率的脆化现象减弱。对于颗粒度

为 $5\mu\text{m}$ 的材料, 在应变率为 200s^{-1} 时, 破坏应变 1.41% ; 在应变率为 500s^{-1} 时, 破坏应变 1.28% , 降低了 9.4% 。颗粒度为 $20\mu\text{m}$ 的材料, 当应变率由 200s^{-1} 增至 500s^{-1} 时, 破坏应变则由 4.97% 降为 4.2% , 下降了 15.5% 。

动态拉伸载荷作用下钨合金材料的杨氏模量比静态杨氏模量高, 颗粒度为 $5\mu\text{m}$ 的材料动态时杨氏模量为 366GPa , 比静态时的 310GPa 提高了 18% 。说明动态加载条件下的细化钨合金的刚性提高了。在实验中, 动态加载范围内应变率的取值对杨氏模量的影响不大。

3 细化钨合金断裂机理的细观分析

3.1 钨合金原始微观组织

图 5 给出了三种颗粒度分别为 $2\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 的细化钨合金材料原始试样的金相观察结果。从金相照片上看颗粒度为 $2\mu\text{m}$ 的材料中钨颗粒的形状为近似多面几何体, 粘接相分布形态与另外两种材料不同。在材料中粘接相被钨颗粒分开, 呈块状不连续分布。许多钨颗粒直接粘接在一起, 颗粒间无粘接相分布, 钨合金界面比大。在颗粒度为 $5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 的材料中钨颗粒基本上为球形或椭球形, 钨颗粒被粘接相所包围, 钨颗粒与钨颗粒交界面(W-W)比例较小。

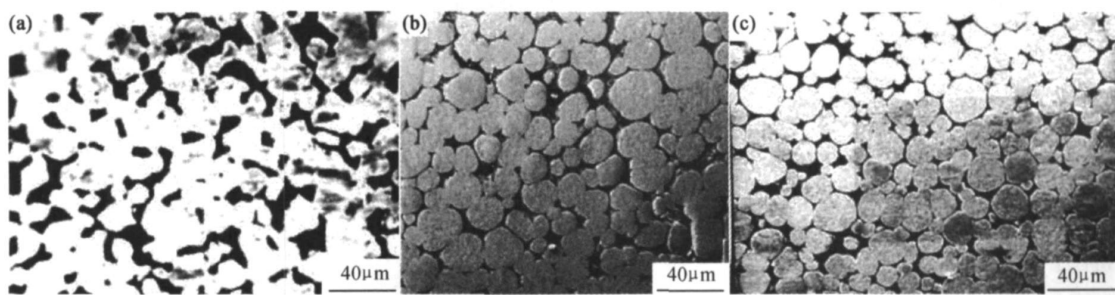


图 5 钨合金原始微观组织 (a) $2\mu\text{m}$; (b) $5\mu\text{m}$; (c) $20\mu\text{m}$

Fig 5 Original micro-structure of tungsten alloy (a) $2\mu\text{m}$; (b) $5\mu\text{m}$; (c) $20\mu\text{m}$

3.2 不同颗粒度材料断口形貌特征

从断口的整体形貌上看, 颗粒度为 $2\mu\text{m}$ 的细化钨合金材料断口较为平整, 为典型脆性断裂; 颗粒度为 $20\mu\text{m}$ 的材料, 断口较为粗糙, 几种材料都没有发现颈缩现象。图 6 分别给出了三种不同颗粒度钨合金断口电镜扫描图像。

从颗粒度为 $2\mu\text{m}$ 材料的断口形貌图(见图 6a)可以发现: 这种材料的断裂方式几乎全部是钨颗粒之间断裂和颗粒与基体分离(W-M), 没有发现钨颗粒劈

裂; 颗粒间裂纹较多, 裂纹都是沿着 W-W、W-M 界面传播; 粘接相与钨颗粒剥离比例高, 无粘接相韧断痕迹。

颗粒度为 $5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 的材料在断裂方式上既有沿 W-M 界面开裂又有钨颗粒劈裂, 粘接相有韧断迹象, 典型的断口形貌见图 6b 和图 6c。裂纹呈 Z 字形传播, 如图 6b 所示, 裂纹扩展大多沿 W-W 界面、W-M 界面进行, 当裂纹传播途中经过钨颗粒时, 引起钨颗粒的劈裂。

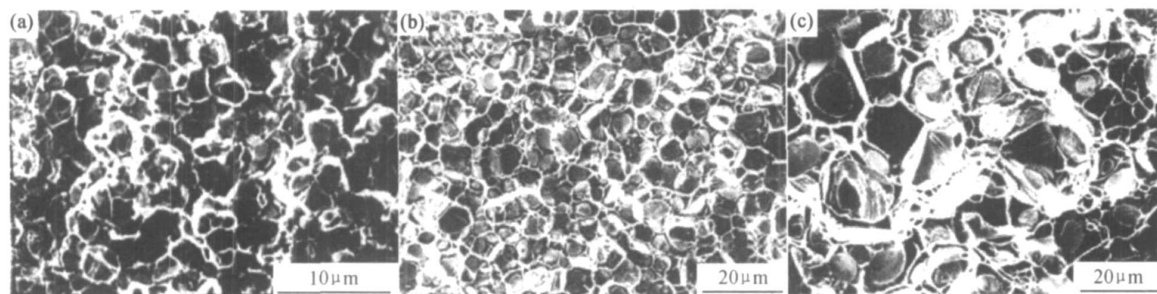


图6 颗粒度为 20 μm 钨合金断口形貌 (a) 2 μm ; (b) 5 μm ; (c) 20 μm

Fig 6 Fracture section appearance of tungsten alloy (a) 2 μm ; (b) 5 μm ; (c) 20 μm

从颗粒度为 5 μm 和 20 μm 的断口观察中发现发生劈裂的钨颗粒大都是材料中相对粗大的颗粒, 而粒径相对较小的颗粒则为 W-M 界面断裂, 沿 W-M 界面断裂的 W 颗粒表面有许多微孔洞, 而在劈裂的 W 颗粒上则很少见到孔洞。

4 结论

(1) 在冲击拉伸实验应力-应变曲线的弹性应变阶段, 应力随应变的增加而迅速的上升, 有一定的非线性, 这说明材料在弹性变形阶段, 材料内部已有损伤出现。

(2) 随着钨合金颗粒度的减小材料屈服强度提高。

(3) 细化钨合金材料在应变率为 0.001, 200, 500 s^{-1} 加载条件下, 该细化钨合金材料具有应变率致脆现象。

(4) 采用扫描电镜对拉伸断裂后的试件断口进行金相分析, 发现钨合金的断裂模式是一种混合破坏模式, 既有钨颗粒的劈裂也有 W-M 界面开裂。

参考文献

[1] CIMPOERU S J, WOOWARD R L. High strain rate properties of three liquid phase sintered tungsten alloys [J]. Journal of Material Science Letters, 1990, 9: 187-191.

[2] RITTEL D, WEISBROD G. Dynamic fracture of tungsten base heavy alloys [J]. International journal of fracture, 2001, 212: 87-98.

[3] RAMESH K T, COATES R S. Microstructure influence on the dynamic response of tungsten heavy alloys [J]. Metallurgical Transactions A, 1992, 23A: 2625-2630.

[4] SONG W D, LIU H Y, NING J G. Mechanical properties of 91% tungsten alloys [J]. Key Engineering Materials, 2007, 345-346: 1625-1628.

[5] BAO G, RAMESH K T. Plastic flow of a tungsten-based composite under quasi-static compression [J]. Acta Metall Mater, 1993, 41(9): 2711-2719.

[6] 宋卫东, 刘海燕, 宁建国. 细化钨合金力学性能研究与数值模拟 [J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(9): 756-760.

[7] SONG W D, LIU H Y, NING J G. Microstructure properties and fracture behaviors of tungsten alloys [J]. Materials Science Forum, 2007, 567-568: 417-420.

[8] 刘海燕, 宋卫东, 宁建国. 不同晶粒度钨合金动力学性能研究 [J]. 材料工程, 2007, (6): 3-7.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10602008)

收稿日期: 2007-05-15; 修订日期: 2007-10-12

作者简介: 黄石松(1972-), 男, 博士研究生, 主要从事系统工程和材料科学研究, 通讯作者: 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室宋卫东(100081)。E-mail: swdgh@bti.edu.cn

(上接第 8 页)

ite manufacturing, 1992, 3(4): 235-277.

[4] HALLEY P J, MACKAY M E. Chemorheology of thermoset-an overview [J]. Polymer engineering and Science, 1996, 36(5): 593-608.

[5] 李小刚, 李宏运, 胡宏军, 等. RTM 用双马来酞亚胺树脂流变特性研究 [J]. 材料工程, 2003, (6): 11-14.

[6] ISHIDA H. Cationic ring-opening polymerization of benzoxazines [J]. Polymer, 1999, 40: 4563-4570.

[7] 顾宜, 钟赤峰, 谢美丽. 用于 RTM 成型工艺的苯并噁嗪树脂及其复合材料 [J]. 复合材料学报, 2000, 17(4): 32-37.

[8] 纪风龙, 顾宜. 苯并噁嗪树脂烧蚀性能的初步研究 [J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(1): 25-29.

[9] 梁志勇, 段跃新, 林云, 等. EPON862 环氧树脂体系化学流变特性研究 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(1): 16-19.

收稿日期: 2007-09-28; 修订日期: 2008-03-27

作者简介: 尹昌平(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事聚合物基复合材料研究, 联系地址: 国防科技大学一院五系 502 教研室(410073)。E-mail: ychangping@nudt.edu.cn