

# 不同晶粒度钨合金动态力学性能研究

## Dynamic Behavior of Tungsten Alloys with Different Grain Sizes

刘海燕, 宋卫东, 宁建国  
(北京理工大学, 北京 100081)

LIU Hai-yan, SONG Wei-dong, NING Jian-guo  
(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**摘要:** 采用拉格朗日实验分析技术对 1~ 3 $\mu$ m, 10~ 15 $\mu$ m 和 30~ 40 $\mu$ m 三种不同晶粒度细化钨合金材料 91W-6.3Ni-2.7Fe 在高应变率下的动态力学性能进行研究。得到三种不同晶粒度的钨合金在不同冲击速度下各拉氏位置的应力时程曲线。利用拉氏分析方法对钨合金在高应变率下的力学性质进行探讨, 分析各拉氏位置的应变, 比容, 密度, 应变率, 比内能, 质点速度等物理量的变化历史, 讨论不同晶粒度尺寸对钨合金在高应变率下动态力学性能的影响, 给出钨合金在应变率为 10<sup>4</sup>~ 10<sup>5</sup>s<sup>-1</sup> 时的应力应变曲线。

**关键词:** 钨合金; 高应变率; 冲击; 晶粒度; 拉氏分析

中图分类号: O347.1      文献标识码: A      文章编号: 1001-4381(2007)06-0003-04

**Abstract:** Experimental Lagrangian analysis technique was adopted to investigate the dynamic behavior of 91W-6.3Ni-2.7Fe with three kinds grain sizes of 1-3 $\mu$ m, 10-15 $\mu$ m and 30-40 $\mu$ m. The stress-time history curves at different Lagrangian positions were obtained for tungsten alloys at different impact velocities. Lagrangian analysis technique was used to discuss the mechanical properties of the tungsten alloys under high strain rate. The mechanical quantities at different Lagrangian positions, such as strain, specific volume, density, strain rate, specific internal energy and particle velocity were obtained. The influence of grain size on the dynamic behavior of tungsten alloys under high strain rate was analyzed and the stress-strain curves (10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup>s<sup>-1</sup>) of the tungsten alloys were given.

**Key words:** tungsten alloy; high strain rate; impact; grain size; Lagrangian analysis

钨合金具有熔点高、高温条件下强度优良、导热性好、热膨胀系数小、吸收射线能力强以及抗辐射等良好的特性, 在国防军工、航空航天、电子工业、能源、冶金、机械加工工业和核工业都发挥着广泛的用途。特别是在军事工业中, 钨合金的这些优良特性使其在现代兵器工业的发展中不可避免地成为了目前对付装甲目标的主要动能武器弹芯材料<sup>[1-4]</sup>。

国外自二次世界大战以来, 各国对钨合金的动态力学行为的研究一直给予高度的重视。经过数十年的发展, 已经在加载手段和测试技术、动态响应、性能、材料的动态破坏以及动态变形和断裂的微观机制等材料动态力学行为研究领域的各个方面做了大量的工作。Woodward<sup>[5]</sup>等人利用 Kolsky 杆研究了钨合金材料在不同应变率条件下 (10<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) 的动态力学性能, 表明材料的流动应力随着应变率的增加而增加。Cimpoeru<sup>[6]</sup>等人在 Woodward 等人研究的基础上将应变率的范围扩展到 1.4 × 10<sup>4</sup>s<sup>-1</sup>。Rittel 和 Weisbrod<sup>[7]</sup>通过金相分析对钨合金材料动态断裂强度的各向异性性质

进行了研究。Couque<sup>[8]</sup>等人在测量钨合金静、动态动态断裂强度时发现随着加载速率的提高其断裂强度会发生突变。Churn and German<sup>[9]</sup>通过钨合金材料的弯曲试验发现裂纹产生原因在于裂纹尖端的钨颗粒的开裂, 而其他研究者得到不同的研究结论: 裂纹的形成是由于钨颗粒间界面的开裂并且该裂纹的形成与材料的微观特性以及拉伸应力有关。

国内对钨合金的动态性能也进行了研究, 获得了钨合金在不同加载条件下的动态性能数据。曾元金, 经福谦, 张万甲<sup>[10]</sup>等利用压缩空气炮对钨合金在冲击载荷作用下的层裂现象进行了研究。发现此种钨合金的层裂强度与拉伸应力率的平方根成单调递增关系而与加载应力峰值无关。姜春兰, 张宝平对 93 钨合金材料的模量、比热及热膨胀系数的温度效应进行了实验研究<sup>[11]</sup>。张宝平<sup>[12]</sup>等在大量实验的基础上建立了 93 钨合金动态拉伸行为的本构关系, 提出了该钨合金在动载作用下发生塑性失稳以致发生断裂的依据。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, 钨颗粒的尺寸、纯度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。本研究就是针对三种不同颗粒度的钨合金材料, 采用一级轻气炮, 获得了在不同冲击载荷作用下钨合金材料的应力历程曲线, 并对试验数据进行了拉氏分析获得了不同拉氏位置不同物理量的时间历程曲线。

1 拉格朗日实验技术

1.1 实验系统以及测量技术

本实验是在  $\phi 101\text{mm}$  的一级轻气炮上进行, 如图 1 所示。该炮炮管长 17m, 驱动弹丸最高出口速度为 1400m/s, 最低速度为 20m/s, 弹速误差小于 5%, 碰撞斜角小于  $10^{-3}\text{rad}$ , 真空度小于 1Pa。

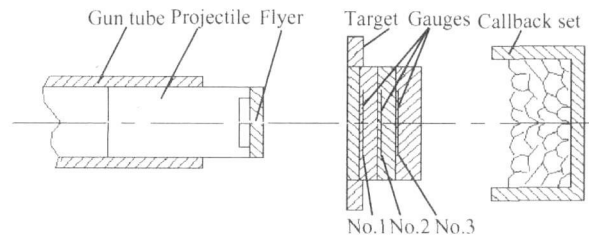


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Configuration of experimental set-up

每发实验中, 用四个锰铜应力计分别嵌入五块钨合金切片之间, 组成一组拉氏量计。钨合金切片间用环氧树脂粘结。所用锰铜计的初始电阻为  $50\Omega$ , 实验前用恒压电源激励。第一块为  $\phi 35\text{mm} \times 1\text{mm}$ , 第二块到第四块为  $\phi 35\text{mm} \times 3\text{mm}$ , 第五块为  $\phi 35\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。冲击加载实验在中科院力学研究所非线性连续介质力学开放实验室的一级轻气炮(发射管内径  $\phi 100\text{mm}$ )上完成。飞片撞击钨合金靶后, 产生一右行冲击波向样品中传播, 将样品压缩到 Hugoniot 状态。同时在飞片中有一左行冲击波, 该冲击波到达飞片后表面时, 将立即反射一右行卸载波, 并依次传入飞片和样品中, 使样品从其 Hugoniot 状态卸载。以上所说的样品在各拉格朗日点上的应力状态, 用嵌入试样间的锰铜计记录下来。

1.2 试件的制作

本实验钨合金组分(质量分数)为钨 91%, 镍 6.3%, 铁 2.7%。一共有  $1\sim 3\mu\text{m}$ ,  $10\sim 15\mu\text{m}$  和  $30\sim 40\mu\text{m}$  和三种晶粒度的钨合金棒材, 其直径分别为 35, 40, 45mm。试件采用线切割, 将钨合金棒材分别切成  $1\sim 1.5\text{mm}$  厚 5 片,  $3\text{mm}$  厚 20 片,  $4\text{mm}$  厚 5 片,

每根棒材共计 30 片, 三根棒材总计 90 片。线切割以后的试样片有线条纹, 因此试样必须经过平磨, 使表面光滑, 这样可以减少实验误差。由于钨合金的高熔点, 高硬度, 以及导磁性差, 所以加工难度大, 加工费用昂贵。加工好的试件如图 2 所示。

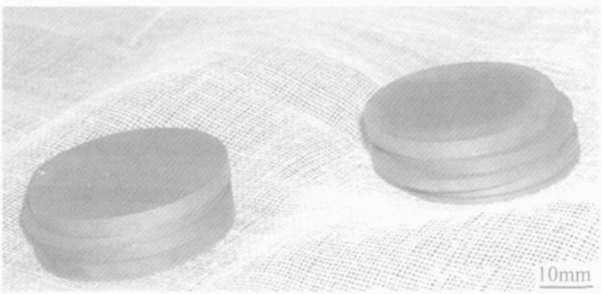


图 2 试件

Fig. 2 Specimen

首先将加工好的试件五个分为一组, 其中每两个试件中间夹入一个锰铜压阻计, 压阻计呈正交分布, 然后用胶粘牢, 并将试件组放入保温箱烘干 30min, 然后用环氧树脂固化在靶底板座上。整个过程如图 3 所示。

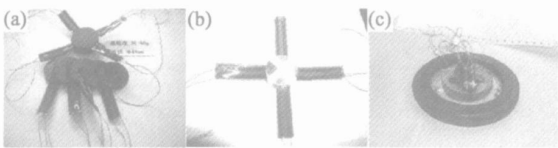


图 3 试件的组成 (a) 分组; (b) 粘贴; (c) 浇筑固定

Fig. 3 Configuration of specimen  
(a) grouping; (b) sticking; (c) fixing

2 实验结果

本实验在中科院力学所冲击动力学实验室完成, 采用一级轻气炮打击试样, 一共进行 15 发实验, 其中 12 发成功, 3 发失败。实验所测  $1\sim 3\mu\text{m}$ ,  $10\sim 15\mu\text{m}$  和  $30\sim 40\mu\text{m}$  三种晶粒度分别在 200, 300, 400m/s 和 500m/s 下的各个拉氏位置处应力变化情况, 由于实验本身的局限性, 实测速度分别在 200, 300, 400m/s 和 500m/s 附近。图 4 所示各图分别为不同晶粒度的钨合金试样在 500m/s 速度下测定的各个拉氏位置的应力变化曲线。No. 1, 2, 3 代表不同测试点。

从图 4 中可以初步得到钨合金材料的一些基本响应特征:

(1) 相同冲击速度下峰值应力随着钨合金颗粒尺寸则增加而相应地有所增强, 这表明晶粒度的大小对钨合金材料的力学性能有一定的影响。

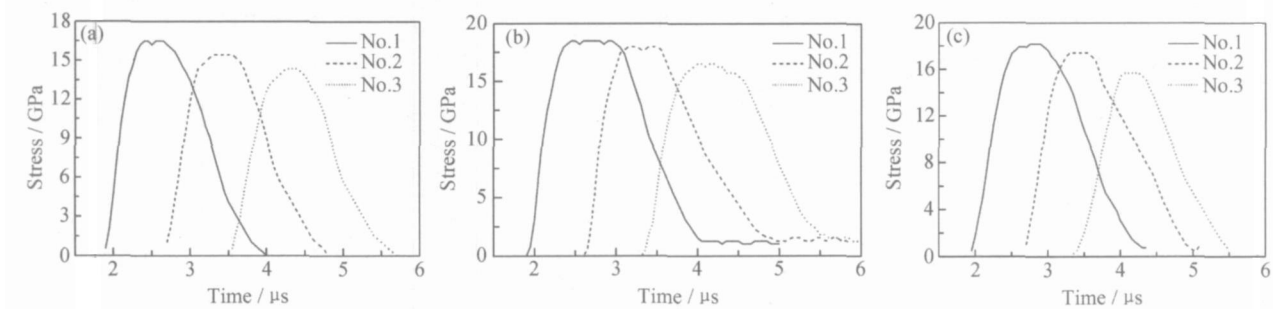


图 4 实验所测不同拉氏位置应力时间历程曲线 (a) 1~ 3 $\mu$ m( 冲击速度 506. 0m/ s); (b) 10~ 15 $\mu$ m(冲击速度 510. 1m/ s); (c) 30~ 40 $\mu$ m( 冲击速度 505. 8m/ s)

Fig. 4 Stress-time curves for different Lagrangian positions (a) 1~ 3 $\mu$ m( impact velocity 506. 0m/ s); (b) 10~ 15 $\mu$ m( impact velocity 510. 1m/ s); (c) 30~ 40 $\mu$ m( impact velocity 505. 8m/ s)

- (2)峰值应力随着拉氏位置的增加而有规律的衰减。
- (3)应力波在钨合金中传播时,弹性波在衰减并逐渐拉开,而塑性波在衰减的同时,由于追赶卸载的影响,波宽越来越窄。

3 路径法的数值模拟

拉氏分析方法( 全称为拉格朗日分析方法 Lagrangian analysis method) 是由 Fowles, Williams<sup>[13]</sup> 等人于 20 世纪 70 年代提出的,伴随着拉氏量计及其实验技术的发展而产生的一种用来计算冲击波作用下的流场分布的主要方法。它是基于拉氏量计的测量结果,对一维不定常流体力学方程进行数值计算。本论

文采用路径线法进行计算,路径线实际上就是一条人为构筑的连结各波形的曲线<sup>[14]</sup>。多条相互间隔的路径线与量计线(记录的  $\sigma$ - $t$  波形) 联系在一起,构成一个逼近实际流场曲面的网状框架,然后依赖普适的守恒方程数值模拟出流场的其它力学信息。

3.1 拉氏分析下不同物理量的时间历程曲线

图 5 给出了晶粒度为 30~ 40 $\mu$ m 的钨合金在 300 7m/s 冲击速度下的应变和比容随时间的变化曲线,从中可以看出其波形衰减规律。在拉氏分析中比内能、密度、粒子速度与应变的衰减规律相同。从应变等各个力学量波形的峰值时间来看,其峰值比应力峰值要滞后,即在衰减波阵面上,各量与应力  $\sigma$  的变化不同步。

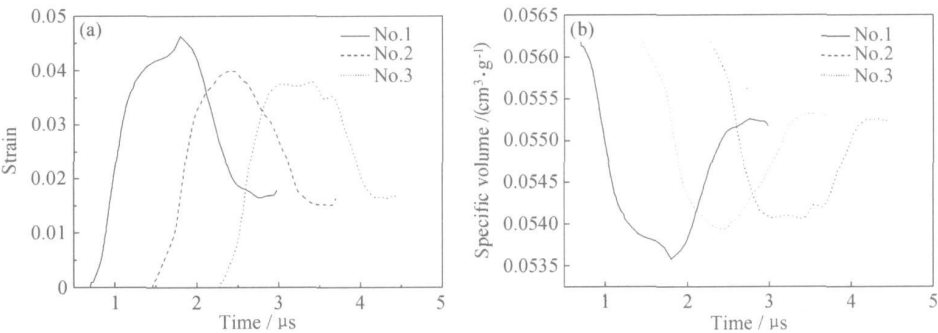


图 5 应变和比容时间历程曲线 (a) 应变随时间的变化曲线; (b) 比容随时间的变化曲线

Fig. 5 Strain-time and specific volume-time curves (a) strain-time curves; (b) specific-time curves

3.2 不同晶粒度在不同应变率的应力-应变曲线

图 6 给出了 1~ 3 $\mu$ m, 10~ 15 $\mu$ m 和 30~ 40 $\mu$ m 三种晶粒度钨合金在冲击速度为 500m/s 时的应力应变曲线。从图 6 可以发现如下规律:

- (1)在加载阶段应力应变曲线接近直线,曲线斜率随着应力的增加而减小。
- (2)从图 6d 可以看出在不同的加载速率下,随着应变率的增加,峰值应力递增,材料的动态屈服强度与

应变率大小有着密切关系,应变速度升高,动态屈服强度增大,应变率最大值出现在塑性主波到达之前,当应力上升到接近峰值时,应变率没有回到零,这就使在接近峰值应力处应力变化虽然不是很大,当应变仍有一定程度的增加,这表明钨合金材料具有明显的率相关性。

- (3)在峰值应力附近材料的加载曲线略有上凸,卸载时体应变不能完全恢复,当卸载应力趋于零时,将仍存有较大的残余变形,应力应变关系呈现滞回的特性。

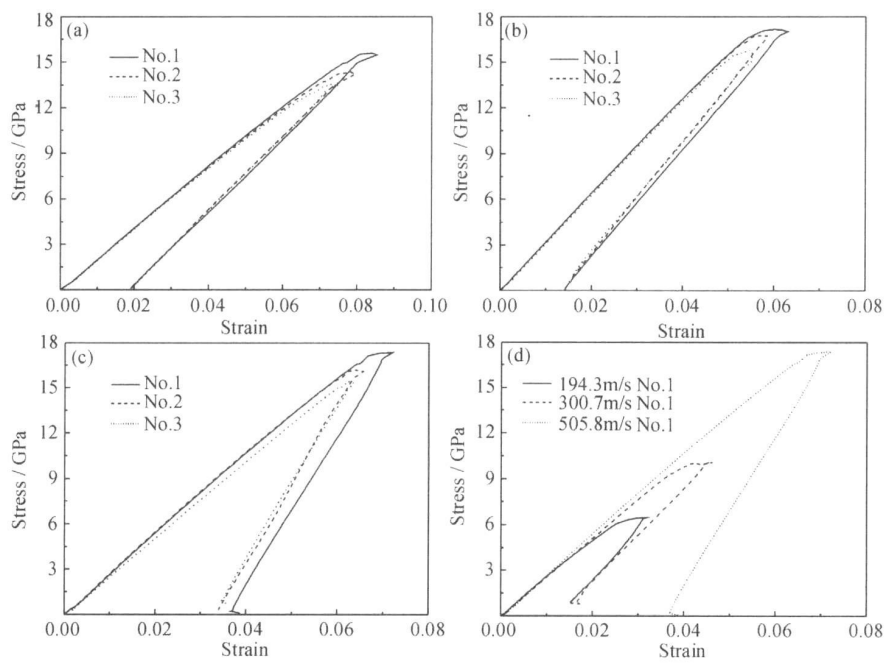


图 6 不同晶粒度在不同应变率的应力-应变曲线 (a) 1~ 3 $\mu$ m (冲击速度 506.0m/s;  
(b) 10~ 15 $\mu$ m (冲击速度 510.1m/s); (c) 30~ 40 $\mu$ m (冲击速度 505.8m/s)  
Fig. 6 Stress-strain curves for different grain sizes (a) 1- 3 $\mu$ m (impact velocity 506.0m/s;  
(b) 10-15 $\mu$ m ( impact velocity 510.1m/s); (c) 30-40 $\mu$ m ( impact velocity 505.8m/s)

4 结论

- (1) 采用一级轻气炮对三种不同晶粒度的细化钨合金进行了一维多压阻计拉格朗日实验,研究了 91W 钨合金在高应变率下的动态力学性能。
- (2) 利用拉氏分析方法对各拉氏位置下的物理量进行了分析,获得了各物理量的时间历程曲线。
- (3) 钨合金材料具有明显率相关效应,钨合金的加载曲线为上凸状,曲线斜率随应力的增加而逐渐减小,应力应变表现为非线性关系;晶粒度的尺寸对于钨合金材料力学性能具有一定的影响。

参考文献

[1] 杨卓越,刘国柱. 钨合金动态力学性能研究进展[J]. 华北工学院学报,1997,18(1): 44- 49.

[2] 赵国志. 穿甲技术文集[M]. 北京: 兵器工业出版社,1992.

[3] 黄晨光,董永香,段祝平,等. 钨合金的冲击动力学性质及细微观结构的影响[J]. 力学进展,2003, 33(4): 433- 445.

[4] 丁淳彤. 高应变率下 93% 钨合金动态本构关系的研究[ D]. 北京: 北京理工大学硕士学位论文,1992.

[5] WOOWARD R L, BALDWIN N J, BRUCH I, et al. Effect of strain rate on the flow stress of three liquid phase sintered tungsten alloys[J]. Met Trans, 1985, 16A: 2031- 2037.

[6] CIMPOERU S J, WOOWARD R L. High strain rate properties

of three liquid phase sintered tungsten alloy s[ J]. Journal of Material Science Letters, 1990, 9: 187- 191.

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

[ 8] COUQUE H, LANKFORD J, BOSE A. Tensile fracture and shear localization under high loading rate in tungsten alloys[ J]. J Phys France, 1992, 2: 2225- 2238.

[ 9] CHURN K S, GERMAN R M. Fracture behavior of W-Ni-Fe alloys[ J]. Metall Trans, 1984, 15A: 331- 338.

[ 10] 曾元金,经福谦,张万甲. 钨合金的层断裂强度研究[ J]. 高压物理学报, 1992, 6(1): 58- 69.

[ 11] 姜春兰,张宝平. 93 钨合金材料的模量、比热及热膨胀系数的温度效应[ J]. 兵器材料科学与工程, 1998, 23(3): 3- 6.

[ 12] 张宝平,丁淳彤. 钨合金的冲击拉伸行为及其本构和断裂判据的表述[ J]. 中国工程科学, 2003, 5(3): 44- 50.

[ 13] FOWLES R, WILLIAM S R F. Plane stress wave propagation in solids[ J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(1): 360- 388.

[ 14] GRADY D E, KIPP M E. The micromechanics of impact fracture of rock[ J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1976, 16: 293- 302.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10602008, 10625208)  
收稿日期: 2006-08-10; 修订日期: 2007-02-03  
作者简介: 刘海燕(1963- ),女,副教授,主要从事材料动态力学性能的研究,联系地址: 北京理工大学理学院(100081)。