

高温、高应变率下 TB6 钛合金的动态压缩性能

易湘斌, 张俊喜, 李宝栋, 郭小汝, 李杏发, 常文春

(兰州工业学院 甘肃省高校绿色切削加工技术及其应用省级重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 利用高温 Hopkinson 压杆试验系统, 对 TB6 钛合金分别进行应变率为 3000 s^{-1} , 不同温度下 ($550\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的动态压缩力学性能测试, 得到材料在不同温度和应变率耦合作用下的真应力-应变曲线, 考察材料流动应力的温度和应变率敏感性。结果表明, 在高应变率条件下, 材料具有一定的应变率增强、增塑效应, 随着温度的升高, 塑性变形产生的绝热升温热软化作用增强, 剪切带长度增加; 材料在 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 表现出反常的应变率软化现象, 剪切带分叉可能是造成强度下降的原因。

关键词: TB6 钛合金; 动态压缩性能; 绝热剪切; 显微硬度

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)04-1220-05

TB6 (Ti-10V-2Fe-3Al) 为近 β 型钛合金, 具有比强度高、断裂韧性好、淬透性好、耐腐蚀能力强、抗疲劳裂纹扩展能力高的特点, 该合金的综合力学性能可以通过热处理调整, 实现不同强度、塑性和韧性水平的匹配, 广泛用于制作飞机机身、机翼和起落架结构件。该材料在切削加工、高速冲击等实际应用中经常受到动态载荷作用, 材料的服役环境往往处于力热效应耦合状态, 而明确高温高应变率下材料变形特性是合理进行工程设计的前提。因此, 研究 TB6 在动态冲击条件下的力学行为具有重要意义。

不同成分和组织的钛合金材料在动态载荷下的力学性能差别较大, 国内外一些学者对 α 钛合金、 $\alpha+\beta$ 钛合金材料的动态性能测试发现, 这些材料大多具有较强的应变率增塑、增强和温度软化等效应^[1-8]。同时, 相关研究也发现, 在高应变率载荷作用下, 钛合金材料发生绝热剪切失稳造成性能提前劣化, 并且随着组织的不同呈现不同的绝热剪切敏感性^[9-12]。Martinez 等^[13]研究 4340 钢子弹高速撞击 TC4 钛合金时发现, TC4 钛合金绝热剪切带宽度随着冲击速度的增加而增宽, 绝热剪切带和裂纹都随着子弹冲击速度的增加而增多。张长清等^[14]的研究表明, α 钛合金材料属于绝热剪切不敏感的材料, 而 β 型和 $(\alpha+\beta)$ 型钛合金是绝热剪切敏感的材料。由于目前对 β 钛合金研究较少, 本工作通过 TB6 钛合金动态压缩性能试验, 研究该材

料的动态力学响应及其应变率相关性。

1 实验

试验材料为 TB6 钛合金板材, 进行 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热+保温 30 min+水冷的固溶处理。采用电火花线切割方法加工成圆柱压缩试样, 试样尺寸为 $\Phi 3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$, 为减少压杆与试样间的摩擦, 将试样端面打磨光滑。

分离式 Hopkinson 压杆 (separate Hopkinson press bar, SHPB) 广泛应用于应变率为 $10^2\sim 10^4\text{ s}^{-1}$ 范围内的材料动态力学性能测试。通过同步组装实验装置和电阻式高温炉, 实现在预设温度下进行系统现场组装, 以消除温度梯度的影响。图 1 为试验系统原理图。

试验在甘肃省高校绿色切削加工技术及其应用省

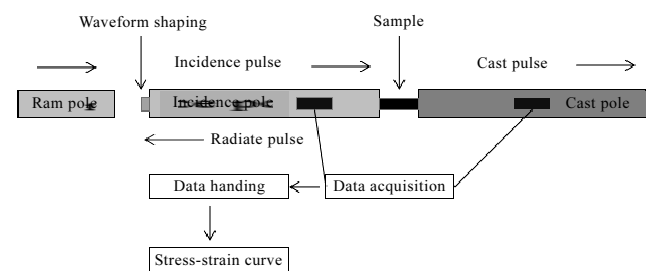


图 1 试验系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of test system

收稿日期: 2018-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51465029); 甘肃省科技计划 (1606RJYA253); 甘肃省高校科研项目 (2014A-123, 2015A-161); 兰州工业学院青年科技基金 (17K009)

作者简介: 易湘斌, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 兰州工业学院甘肃省高校绿色切削加工技术及其应用省级重点实验室, 甘肃 兰州 730050, E-mail: yibin2003@126.com

级重点实验室的高温 Hopkinson 压杆上进行。该装置利用压力气体来推动子弹，通过调节气室的气压控制子弹冲击速度，当子弹以一定速度撞击入射杆左端，夹在两杆之间的短试件产生一入射弹性应力脉冲。脉冲到达入射杆和试样交界面时，一部分被反射，另一部分透射入试样，分别形成反射波和透射波。随着透射波传播通过试件和透射杆，试件发生的微小变形被贴在距离入射杆和透射杆端部一定距离的应变片所测得。根据应力波理论计算试件的应力、应变率和应变之间的关系，最终获得材料动态压缩应力应变曲线。图 2 为本次实验获取的一个原始波形。

动态压缩冲击试验在室温、550、650、750 和 850 °C 进行，通过调节气压实现 1000、2000、3000 和 4000 s⁻¹ 左右的应变率对试样的动态加载。实验用子弹长度 101 mm，压杆直径为 8 mm。为保证试验的可重复性，降低实验误差，取 3 组实验有效数据的平均值进行分析。试验采取超动态应变仪和瞬态波形存储器件记录不同环境温度、不同应变率加载过程中的时间-电压曲线，经软件计算出反射应变、透射应变，最终得到应力-时间曲线和应力应变关系。

试验结束后，对压缩试样沿轴线方向进行线切割，研磨、抛光后制备成金相试样，使用氢氟酸、硝酸和水混合的 Kroll 溶液腐蚀 10 s，清洗、干燥后采用蔡司 Smartzoom5 超景深显微镜和 FEI Inspect F50 扫描电子

显微镜对腐蚀的显微组织进行观察拍照，最后采用 HXD-1000TMJC 显微硬度计进行硬度测试。

2 结果与分析

2.1 应力应变关系

图 3 为实验材料在不同温度、不同应变率下加载的真实应力-应变曲线。可以看出，室温下，随着应变率的提高，材料强度大幅提高，表现出显著的应变率强化效应。在 550、650 °C，随着应变率的增加，屈服点上升，应变率硬化作用明显，流变应力增加，表现出一定的应变率强化效应；但在 750 °C 表现出强烈的

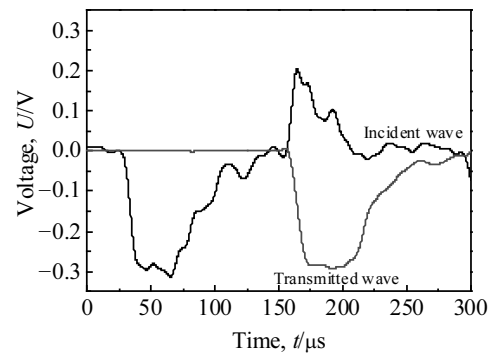


图 2 入射杆和透射杆上的原始波形

Fig.2 Waveform of the incident and transmission rod

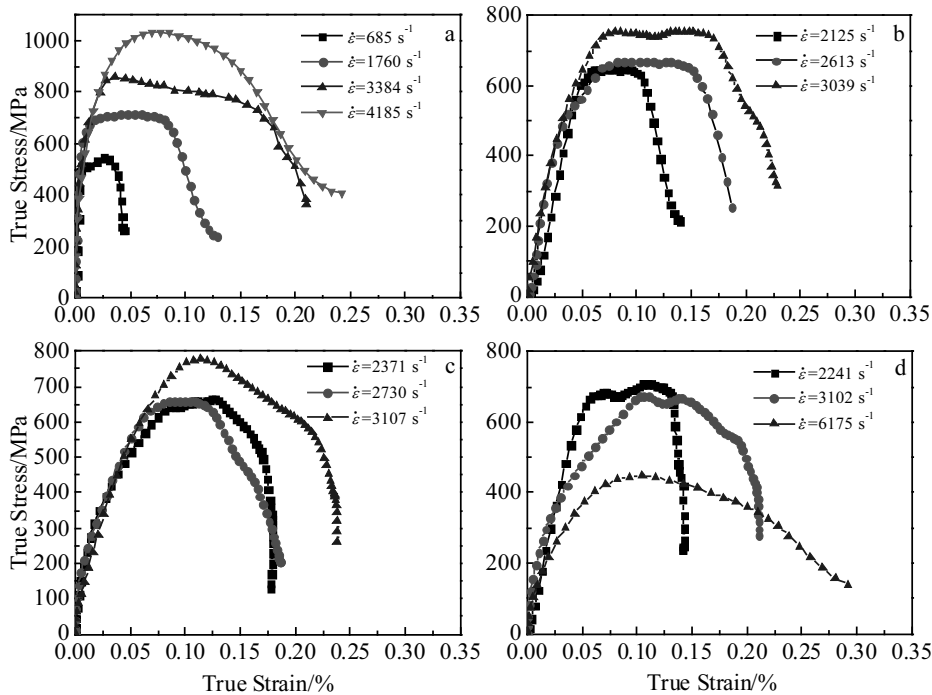


图 3 不同温度、不同应变率下 TB6 钛合金的动态应力-应变曲线

Fig.3 Dynamic stress-strain curves of TB6 at different temperatures and strain rates: (a) 20 °C, (b) 550 °C, (c) 650 °C, and (d) 750 °C

应变率软化效应，随着应变率的增加，屈服强度和流变应力反而降低。

应变率较高时，部分应力应变曲线呈现出明显的双屈服平台，文献[15,16]认为是发生应力诱发亚稳的β相产生马氏体相变所致，应力诱发马氏体相变在提高材料强度的同时，使塑性也能保持在一个较高的水平。随着应变率的增加，材料塑性应变增大，塑性流动性增强，在所有温度下均表现出应变率增塑效应。在高应变率下的绝热剪切现象的发生，使滑移更易于进行，是应变率增塑现象产生的原因。

图 4 为不同温度下，应变率 3000 s⁻¹时的材料应力应变曲线。可以看出，材料强度对温度敏感性并不显著，随着温度的增加，屈服强度和流动应力变化不大，但在 750 °C 时出现反常，材料的强度较其他温度有显著的下降，材料在 750 °C 承载能力的降低可能与此温度下组织的变形特性有关。

还可以看到，高温高应变率下的塑性变形过程中，早期表现出应变强化，流动应力随着应变的增加而增大，经过一段应变稳定阶段后，应变软化占据主导作用。随着温度的增加，屈服平台逐渐消失，说明随着环境温度的升高，绝热温升引起的应变软化在与应变强化的竞争中占据了主导地位。

2.2 绝热剪切敏感性

由应力波理论可知，Hopkinson 压杆中入射波、透射波脉冲宽度由子弹长度决定，由于子弹长度为 L=101 mm，压杆（材料 18Ni）中纵波波速为 5000 m/s，则加载时间 $t=2L/c=2 \times 101 / (5000 \times 1000) = 40.4 \mu s$ 。若试样在加载过程中无剪切破坏，则透射脉冲宽度约为 40 μs，若加载过程中出现剪切破坏，试样承载能力下降，透射脉冲高度在不到 40 μs 就提前下降，出现应力塌陷。

图 5 为应变率在 3000 s⁻¹左右，不同温度下 TB6 钛合金动态压缩试验的应力-时间曲线。可以看到，在

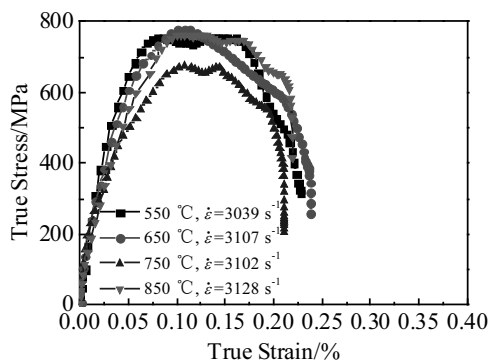


图 4 应变率 3000 s⁻¹时 TB6 钛合金的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of TB6 titanium alloy at 3000 s⁻¹

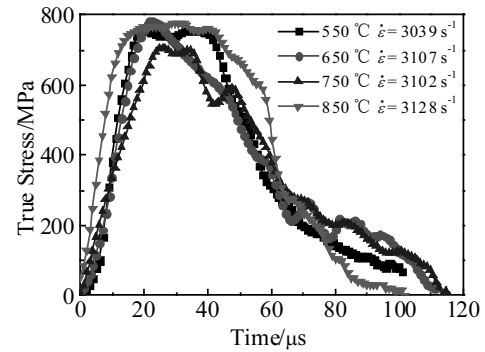


图 5 应变率 3000 s⁻¹时 TB6 钛合金的应力-时间曲线

Fig.5 Stress-time curves of TB6 titanium alloy at 3000 s⁻¹

550 °C 试样承载时间在 40 μs 左右，表明试样能够完全稳定承载而未发生应力卸载。在 850 °C 环境及 750 °C 环境下，试样在承载了 32 μs 后发生应力塌陷。在 650 °C 高温环境，试样仅承载了约 20 μs 就发生了应力塌陷卸载，表明此温度下材料的绝热剪切敏感性最大。

2.3 剪切带显微组织

图 6 为不同温度下 TB6 钛合金动态压缩试样的纵截面显微组织。可以看出，相同应变率不同温度下剪切带形貌无明显差异，在β基体上分布着球状或条带状初生α相，晶内有细针状次生α相均匀析出。在应变率 3000 s⁻¹左右的试样中均发现了沿 45° 度方向发展的绝热剪切带 (adiabatic shear band, ASB)。剪切带由两侧的形变带、中心转变带和周围基体 3 个区域构成。形变带内可看到被剪切力拉长的致密的细条状组织，在 SEM 下无法清晰分辨，整个区域呈现经历大塑性变形的迹象。转变带则由流线形态的组织构成，α相沿剪切带扩展方向弯曲，形貌区别于基体组织。

剪切带发展长度、宽度与加载时间之间存在着显著相关性，随着承载时间的降低，剪切带长度增加，宽度减小。在 550 °C，承载时间接近 40 μs，形成的剪切带长度很短，宽度约为 11 μm；850 °C 下承载时间 30 μs，剪切带宽度约 10 μm，在 650 °C 试样仅承载 20 μs 就形成宽度仅约 8 μm 的贯穿整个试样的剪切带。

在 750 °C 下剪切带宽度大幅增加，主剪切带最终分支为 2 条宽度各约 11 μm 的剪切带。由于α相和β相两者在导热和变形的能力在此温度下存在较大差异，造成剪切带的分叉，弱化了材料的力学性能，是 750 °C 温度下材料强度异常下降的原因。

2.4 绝热剪切带显微硬度特征

为进一步研究 TB6 钛合金剪切带显微组织的特征，测定应变率在 3000 s⁻¹左右，不同环境温度下试

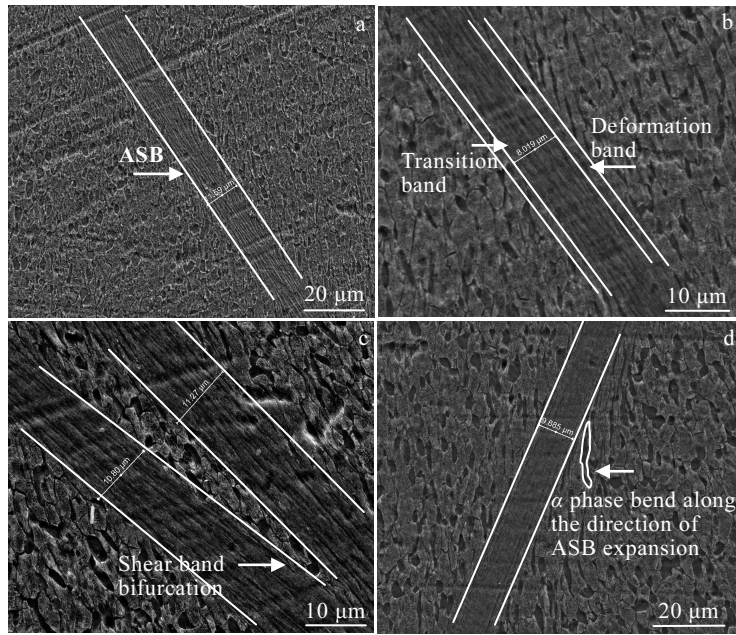


图 6 TB6 钛合金在不同温度下的绝热剪切带形貌 ($\dot{\epsilon}=3000 \text{ s}^{-1}$)

Fig.6 Morphologies of adiabatic shear band for TB6 titanium alloy at different temperatures ($\dot{\epsilon}=3000 \text{ s}^{-1}$): (a) 550 °C, (b) 650 °C, (c) 750 °C, and (d) 850 °C

样的显微硬度。设定压头载荷 0.5 N，保压时间 5 s，如图 7 所示，从剪切带中心开始，分别向两侧打出相互间隔距离 15 μm 的 3 个点，得到剪切带及附近组织的维氏硬度。图 8 反映了应变率 3000 s^{-1} 下，不同温度下 TB6 钛合金沿垂直于绝热剪切带方向上的显微硬度。结果表明，中心转变带的硬度明显比形变带和基体硬度更大，随着两侧距离剪切带中心距离的增大，硬度逐渐减小，到达基体后基本不再变化，中心转变带硬度较高的原因是材料晶粒的细晶强化所致。此外，环境温度对剪切带硬度也产生一定影响。在 750 °C 温度下，剪切带分叉使得剪切带内形变强化占据优势地位，因此转变带和形变带硬度基本相当；在 550 °C 温

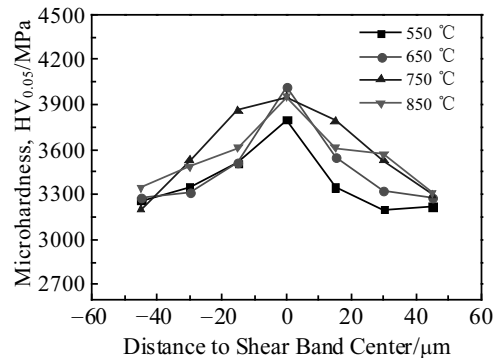


图 8 垂直绝热剪切带方向的显微硬度

Fig.8 Microhardness perpendicular to direction of ASB

度下，由于形成的剪切带长度较短，应变强化效应不足，剪切区硬度较其他温度下更小。

3 结 论

1) 在高应变率条件下，TB6 钛合金具有一定的应变率增强、增塑效应，随着温度的升高，绝热温升引起的应变软化占据了主导地位，剪切带长度增加。

2) 温度对 TB6 钛合金绝热剪切敏感性有着显著的影响，试验材料在 650 °C 绝热剪切敏感性最大，在 550 °C 绝热剪切敏感性最小。材料在 750 °C 表现出反

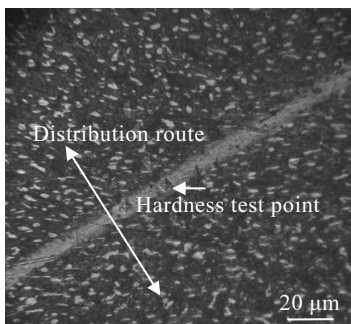


图 7 TB6 绝热剪切带显微硬度压痕

Fig.7 Microhardness indentation of TB6 shear band

常的强度下降, 与此温度下由于不同相的韧脆转变差异性引起的剪切带出现分叉有关。

3) 不同温度下, 绝热温升致使剪切带发生不同程度的形变强化, 引起剪切带硬度增大。

参考文献 References

- [1] Chichili D R, Ramesh K T. *Journal of Applied Mechanics*[J], 1999, 66: 10
- [2] Chichili D R, Ramesh K T, Hemker K J. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2004, 52(8): 1889
- [3] Sun Kun(孙 坤), Wang Fuchi(王富耻), Cheng Xingwang(程兴旺) *et al. Rare Metal Materials & Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(2): 233
- [4] Wang Xuebin(王学滨). *Rare Metal Materials & Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(12): 1854
- [5] Xu Yuan(徐 媛), Sun Kun(孙 坤), Zhong Wei(钟 卫) *et al. Journal of Yunnan University: Natural Sciences*(云南大学学报, 自然科学版)[J], 2012, 34(3): 320
- [6] Yang J, Li H, Hu D *et al. Intermetallics*[J], 2014, 45: 89
- [7] Xiong Aiming(熊爱明), Huang Weichao(黄维超), Chen Shenghui(陈胜晖) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2002, 12(S1): 206
- [8] Wang Lili(王礼立), Hu Shisheng(胡时胜). *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 1985, 5(1): 9
- [9] Yang Yang(杨 扬), Cheng Xinlin(程信林), Li Zhenghua(李正华) *et al. Rare Metal Materials & Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(4): 261
- [10] Li G A, Zhen L, Lin C *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2005, 395(1-2): 98
- [11] Yang Y, Wang B F. *Materials Letters*[J], 2006, 60(17-18): 2198
- [12] Guan Jie(官 杰), Liu Jianrong(刘建荣), Lei Jiafeng(雷家峰) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2009, 23(1): 77
- [13] Martinez F, Murr L E, Ramirez A *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2007, 454-455: 581
- [14] Zhang Changqing(张长清), Xie Lansheng(谢兰生), Chen Minghe(陈明和) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(2): 323
- [15] Shen Guiqin(沈桂琴), Zhang Hong(张 虹), Wang Shihong(王世洪) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 1997, 17(2): 26
- [16] Duerig T W, Albrecht J, Richter D *et al. Acta Metallurgica*[J], 1982, 30(12): 2161

Dynamic Compressive Mechanical Properties of TB6 Titanium Alloy Under High Temperature and High Strain Rate

Yi Xiangbin, Zhang Junxi, Li Baodong, Guo Xiaoru, Li Xingfa, Chang Wenchun

(Key Laboratory of Green Cutting Technology and Application in Gansu Province,
Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The dynamic compression mechanical properties test was conducted on TB6 titanium alloy under the strain rate of 3000 s^{-1} and different temperatures ($550\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) using high temperature Hopkinson pressure bar test system, and the true stress-strain curves of the material under the coupled action of different temperatures and strain rates were obtained. The temperature and strain rate sensitivity of flow stress for the material were investigated. The results show that under the condition of high strain rate, the material has a certain strain rate strengthening and plasticizing effect. With the increase of temperature, the effects of the thermal softening by adiabatic heating increase, and the length of shear zone increases. The material in $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ shows abnormal strain rate softening, and the shear band bifurcation may be the cause of strength decreasing.

Key words: TB6 titanium alloy; dynamic compression performance; adiabatic shear; microhardness

Corresponding author: Yi Xiangbin, Ph. D, Associate Professor, Key Laboratory of Green Cutting Technology and Application in Gansu Province, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: yibin2003@126.com