

多应变率下 Ti-811 钛合金针状组织压缩变形及断裂机制

石晓辉, 曹祖涵, 张团卫, 王志华, 乔珺威

(太原理工大学 材料科学与工程学院 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 采用 Instron 力学试验机及分离式 Hopkinson 压杆系统, 分别对 Ti-811 钛合金针状组织进行静、动态压缩实验, 以研究其不同应变率下的变形及断裂机制。结果表明: 随应变率升高, 针状组织屈服强度依次呈现正-负-正的应变率敏感性, 其内在原因是位错滑移机制和孪生变形机制的相互竞争。针状组织在静态和动态加载下的断裂机制明显不同, 分别呈现为双剪切及单剪切断裂模式。动态加载试样端面部位可形成连续锯齿形金属屑, 这是由高速变形过程中主剪切带两侧金属的剧烈错动被入射杆与透射杆遏制所导致。

关键词: Ti-811; 动态压缩; 变形; 断裂

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)05-1799-04

钛合金是一种综合性能极佳的轻质金属材料, 因广泛应用于航空航天领域, 故又被称为“太空金属”、“第三金属”^[1-3]。航空钛合金构件多属于飞机关键结构件, 如我国最新研制的 C919 客机的机身蒙皮、机头、中央翼、吊挂、接头等主要承力构件均是由钛合金制造。为了保证飞行的安全性, 所选用的钛合金材料需要经受不同受力模式下的性能检验, 如静态加载、疲劳、动态冲击等^[4-6]。钛合金的动态冲击性能描述了钛合金构件在受到外来物体高速冲击(如弹道冲击、飞鸟撞击)后的力学响应, 因此对于指导选材具有重要参考意义。

国内外针对钛合金片状组织、等轴组织、双态组织等的动态压缩行为进行了较为系统的研究^[7-10], 取得了诸多成果。孙坤等人^[8]研究发现, 在动态压缩条件下, TC6 钛合金双态组织具有较高的屈服应力、断裂应力及应变, 而网篮组织的断裂应力及应变均较差。张长清等人^[11]研究了 TC4-DT 钛合金网篮组织在 1000~8000 s⁻¹ 应变率范围内的动态压缩力学响应。结果表明 TC4-DT 钛合金存在应变率增强、增塑以及应变强化效应。作者基于改进的 Johnson-Cook 模型较好地描述了该材料的动态塑性本构方程。

针状组织是钛合金在 β 单相区固溶处理后水冷得到的组织类型。该组织具有很高的强度, 在高空航空构件中应用前景较大。当前, 针对钛合金针状组织动态压缩行为的研究较少, 一定程度上限制了其应用。本实验以一种近 α 型 Ti-811 (Ti-8Al-1Mo-1V) 钛合金为例,

研究其针状组织在多种应变率下的压缩变形及断裂机制, 以期对该型组织的力学行为产生更为全面的了解。

1 实验

本实验所用 Ti-811 合金相变点约为 1035 °C, 主要成分(质量分数)为 Al 8.1%、Mo 1.05%、V 0.99%, 其余为钛。原始 Ti-811 合金为轧态等轴组织。为了制备针状组织, 所设计的单相区热处理工艺为: 1080 °C, 2 h, WQ (water quenching)。图 1 所示为制备的针状组织。由图可见原始 β 晶粒尺寸十分粗大, 直径可达 0.5 mm 以上。细长如针状的马氏体 α' 相呈十字交叉析出, 表明其与原始 β 相满足一定的取向关系。

压缩试样尺寸约取为 $\Phi 3$ mm \times 3 mm。为排除试样表面粗糙度对实验结果的影响, 所有压缩试样均用砂

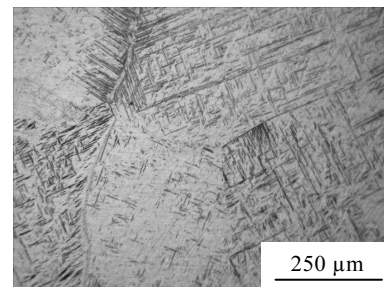


图 1 Ti-811 钛合金针状组织

Fig.1 Acicular microstructure of Ti-811 alloy

收稿日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(51801132)

作者简介: 石晓辉, 男, 1989 年生, 博士, 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6010533, E-mail: sxhtough@126.com

纸抛磨光亮。动态压缩实验(820~2180 s⁻¹)在分离式 Hopkinson 杆上进行。静态压缩测试(2.5 × 10⁻³ s⁻¹)则在 Instron 力学试验机上进行。测试完毕后从系统中导出压缩数据,以作分析。为观察针状组织的压缩断裂行为,选取部分典型试样纵向剖开后制备金相样品。

2 结果与讨论

2.1 压缩行为

图 2 所示为不同应变率下针状组织的压缩曲线。可以发现,静态加载下应力呈现平稳硬化,而动态加载下应力呈现周期性震荡现象。这与变形过程中位错及孪生的增殖、运动及相互作用有关。

图 3 所示为针状组织压缩屈服强度随应变率的变化趋势。静载条件下,屈服强度可达 1017 MPa。当应变率 < 820 s⁻¹ 时,屈服强度随应变率上升缓慢增加。当应变率介于 820 s⁻¹ 与 1130 s⁻¹ 之间时,屈服强度随应变率增加快速线性上升,可用公式(1)表示。综上,当应变率小于 1130 s⁻¹ 时,针状组织呈现正的应变率敏感性。这是由于应变率的升高可降低位错热激活能 ΔG^[12],导致位错启动的抗力增大,使得屈服强度增加。公式(2)所示为 ΔG 的表达式,其中 κ 为玻尔兹曼常数, T 为变形温度, $\dot{\epsilon}$ 和 $\dot{\epsilon}_0$ 分别为应变率和参考应变率。

$$\sigma_y = 742.3 + 0.46\dot{\epsilon} \tag{1}$$

$$\Delta G = \kappa T \ln \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \tag{2}$$

需要注意的是,当应变率介于 1130 s⁻¹ 与 1930 s⁻¹ 之间时,针状组织呈现负的应变率敏感性,即屈服强度随应变率增加呈指数衰减式下降,可用公式(3)表示。

$$\sigma_y = 1127.5 + 3.06 \times 10^5 e^{\frac{-\dot{\epsilon}}{204.6}} \tag{3}$$

负的应变率敏感性可由多种原因导致,如动态应变时效效应(DSA)、孪生及相变^[13-15]。动态应变时效效

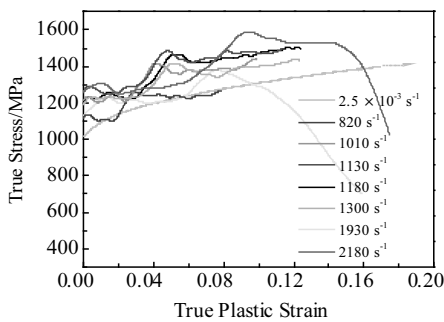


图 2 不同应变率下 Ti-811 钛合金针状组织压缩应力-应变曲线
Fig.2 Compressive stress-strain curves for Ti-811 titanium alloy with acicular microstructure under various strain rates

应的产生需要时间,因此几无可能在高应变率下发生。此外,针状组织在高速变形过程中并无相变发生。综上,孪生是本研究中唯一可能引发负应变率敏感性的因素。当应变率高于 1130 s⁻¹ 时,孪生机制在诱导针状组织的宏观初始塑性变形中逐渐发挥重要作用。众所周知,钛合金临界孪晶应力(CRSS_{tw})对应变率较不敏感,因此本研究假设:针状组织的临界孪晶应力在不同应变率条件下保持恒定。根据 Chen 等人的研究成果^[16]可以推测:随着应变率增加,原始 β 晶界或 α/α、β/β 界面处的应力集中系数 k 逐渐增加,由 CRSS_{tw} = σk 成立可知,仅需要较低的宏观外加应力 σ 即可诱发孪晶变形。最终,针状组织的宏观屈服应力随应变率升高呈现下降的趋势。

根据图 3 还可发现,当应变率大于 1930 s⁻¹ 时,针状组织屈服强度出现回跃现象,即重新呈现正的应变率敏感性。2180 s⁻¹ 条件下的屈服强度回升至 1265 MPa。造成此现象的原因可能如下:高应变率下激活位错滑移的临界应力可持续升高,而诱导孪晶变形的宏观外加应力并不会一直降低。其综合效果是屈服强度的重新回跃。

综上,在本研究范围内,随应变率升高,屈服强度依次呈现正-负-正的应变率敏感性,其内在原因是位错滑移机制和孪生变形机制的相互竞争。

2.2 断裂机制

变形的最终结果是断裂。分析 Ti-811 合金针状组织在不同应变率下的断裂机制有助于我们更为全面地了解其力学行为。图 4 所示为静态压缩试样(2.5 × 10⁻³ s⁻¹)断裂后的纵向剖面金相。从图 4a 可以看到,静载条件下针状组织呈现双剪切断裂行为。断裂面沿着接近试样对角线的最大剪应力方向,呈漏斗形分布。裂纹尖端可明显看到形核的孔洞(见图 4b),若变形继续进行,这些孔洞将与主裂纹汇合,从而加速断裂

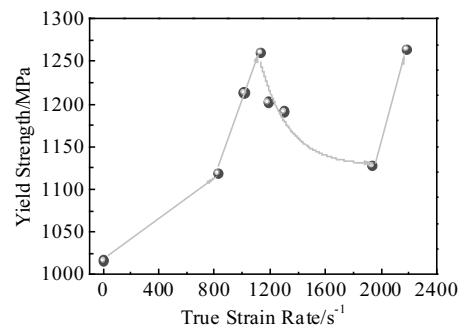


图 3 不同应变率下 Ti-811 钛合金针状组织压缩屈服强度
Fig.3 Compressive yield strengths for Ti-811 titanium alloy with acicular microstructure under various strain rates

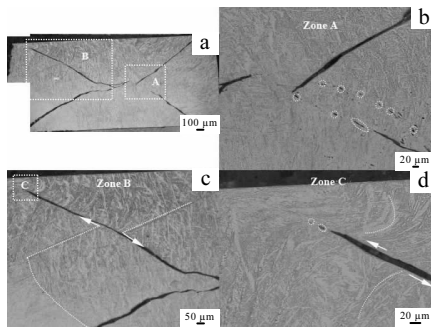


图 4 静态压缩试样 ($2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 纵向剖面金相照片

Fig.4 Metallographs of the longitudinally sectioned specimen under static compression ($2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$): (a) macro feature and (b~d) local enlarged views

过程。分布于断裂面上的组织特征发生相对错动，如图 4c 中的原始 β 晶界。依图 4d 可知，临近断裂面的组织特征发生相对弯折，以适应金属的剪切流动方向。由于变形过程缓慢，剪切变形区域无大量热量累积，因此未形成绝热剪切带。

动态加载时，根据变形曲线末端是否出现应力陡降可判断仅 2180 s^{-1} 应变率下的试样发生最终断裂。图 5 所示为 1180 s^{-1} 条件下压缩试样纵向剖面金相，无裂纹或剪切带产生。 2180 s^{-1} 条件下则断裂明显，见图 6。与静态加载下断裂模式明显不同的是：针状组织动载下呈现单剪切断裂。众所周知，裂纹都是沿着组织最弱点萌生及扩展，如图 6a 所示断裂区域为原始 β 晶界。由于动态变形过程十分迅速，当某一裂纹率先萌生后即发生快速扩展，留给其它裂纹萌生的时间极其有限，最终便呈现为单剪切断裂。

需要注意的是，试样两端面出现了连续的锯齿形金属屑，这是动态压缩条件下的特有现象。造成此现

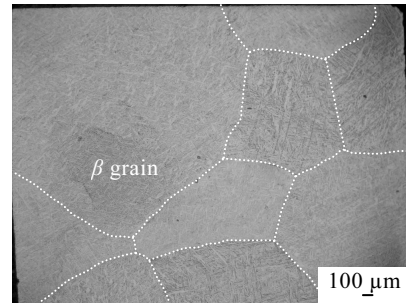


图 5 应变率为 1180 s^{-1} 的压缩试样纵向剖面宏观金相照片

Fig.5 Macro metallograph of longitudinally sectioned compression specimen under 1180 s^{-1}

象的原因是：主剪切带萌生后，其两侧的材料发生相对错动。上半部分向下的速度分量被刚体透射杆阻碍，下半部分向上的速度分量被刚体入射杆阻碍，刚体杆所产生的反作用力引发材料多次剪切破坏，产生连续锯齿现象。应变率越大，材料产生的锯齿越多。本研究的针状组织在 2180 s^{-1} 应变率下可产生 3~4 个锯齿。

图 7 所示为应变率为 2180 s^{-1} 时的真应力-加载时间曲线。可以看到，整个塑性变形过程仅耗时约 $80 \mu\text{s}$ 。最为关键的是，钛合金具有低的热导率，因此高应变率下变形功所转化的热量可在剪切带处快速累积，形成绝热剪切带。绝热剪切带内所产生的应变可达到试样宏观应变的几十倍，其内部组织特征被强烈破碎，因此难以通过金相分辨，宏观上呈现出“白亮带”的特征。分析图 6c 发现，主绝热剪切带的厚度可达到 $10 \mu\text{m}$ 左右。随着变形的进行，冲击能量逐渐削弱，锯齿处所形成的次级绝热剪切带的厚度也逐渐变窄。

总之，Ti-811 钛合金针状组织在静态和动态加载下的断裂机制明显不同，分别呈现双剪切及单剪切断裂模式。动态加载下试样可形成绝热剪切带，主剪切

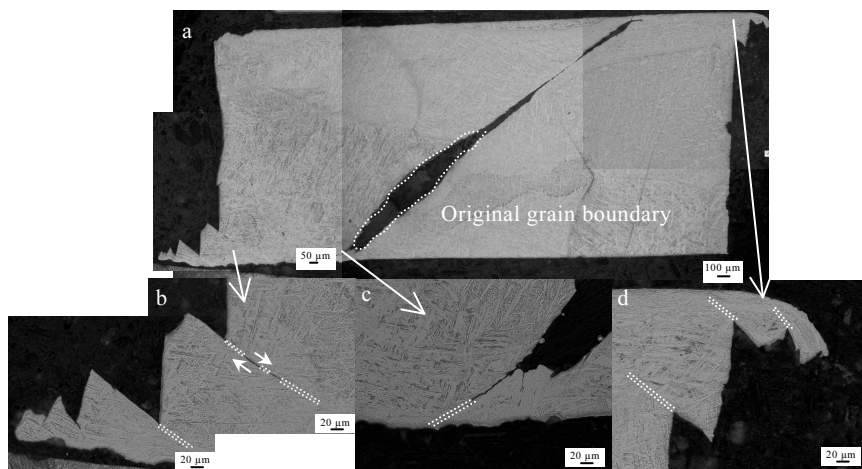


图 6 应变率为 2180 s^{-1} 的压缩试样纵向剖面金相照片

Fig.6 Metallographs of longitudinally sectioned compression specimen under 2180 s^{-1} : (a) macro feature and (b~d) locally enlarged views

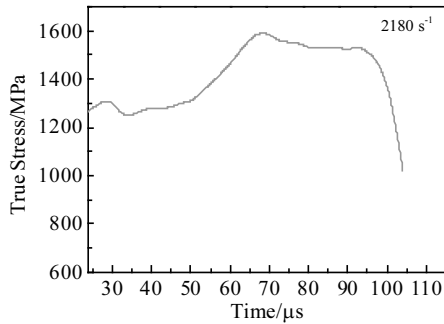


图 7 应变率为 2180 s^{-1} 时的应力-加载时间曲线

Fig.7 True stress-loading time curve under 2180 s^{-1}

带厚度在 $10 \mu\text{m}$ 左右。由于高速变形过程中主剪切带两侧金属的剧烈错动被入射杆与透射杆遏制，试样端面部位可形成连续锯齿形金属屑。

3 结 论

1) 静态加载下针状组织压缩曲线呈现平稳硬化的趋势，而动态加载下则表现出周期性震荡现象。

2) 随应变率升高，针状组织屈服强度依次呈现正-负-正的应变速率敏感性，其内在原因是位错滑移机制和孪生变形机制的相互竞争。

3) 针状组织在静态和动态加载下的断裂机制明显不同，分别呈现双剪切及单剪切断裂模式。由于高速变形过程中主剪切带两侧金属的剧烈错动被入射杆与透射杆遏制，试样端面部位可形成连续锯齿形金属屑。

参考文献 References

- [1] Cao Chunxiao (曹春晓). *Rare Metals Letters* (稀有金属快报)[J], 2006, 25(1): 17
- [2] Peng Yanping(彭艳萍), Zeng Fanchang(曾凡昌), Wang Junjie (王俊杰) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工

程)[J], 1997(10): 3

- [3] Leyens Christoph, Peters Manfred. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2003: 333
- [4] Srinivasu G, Natraj Y, Bhattacharjee A et al. *Materials & Design* [J], 2013, 47(47): 323
- [5] Luo Wenzhong(罗文忠), Sun Feng(孙峰), Zhao Xiaohua(赵小花) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 3967
- [6] Gao Yukui(高玉魁). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(9): 1000
- [7] Liu Qinghua(刘清华), Hui Songxiao(惠松晓), Ye Wenjun (叶文君) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(10): 2749
- [8] Sun Kun(孙坤), Zhao Shuangzan(赵双赞), Cheng Xingwang (程兴旺) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2007, 17(S1): 14
- [9] Zheng Chao, Wang Fuchi, Cheng Xingwang et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 658: 60
- [10] Cheng Xingwang(程兴旺), Sun Kun(孙坤), Wang Fuchi(王富耻) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(10): 1756
- [11] 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
- [12] Meyers M A. *Dynamic Behavior of Materials*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1994: 344
- [13] Picu R C. *Acta Materialia*[J], 2004, 52(12): 3447
- [14] Farghadany E, Zarei-Hanzaki A, Abedi H R et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 610: 258
- [15] Chun Y B, Davies C H J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(18): 5713
- [16] Chen Y, Guo Y B, Gupta M et al. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2016, 89: 114

Compressive Deformation and Fracture Mechanism for the Acicular Microstructure of Ti-811 Titanium Alloy Under Different Strain Rates

Shi Xiaohui, Cao Zuhan, Zhang Tuanwei, Wang Zhihua, Qiao Junwei

(College of Materials Science and Engineering, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The static and dynamic compression tests of Ti-811 alloy with acicular microstructure have been conducted by using the Instron testing machine and the split Hopkinson bar system, respectively. Its deformation and fracture mechanism under various strain rates have been studied. The results show that the yield strength of acicular microstructure exhibits positive-negative-positive strain rate sensitivity successively with increasing the strain rate. The intrinsic reason is the competition between dislocation slip and twinning mechanism. The fracture mechanisms of acicular microstructure under static and dynamic compression are obviously different, which show double-shearing and single-shearing fracture mode, respectively. Saw-tooth chips form at the end faces of dynamic compression specimen, which is due to restraint of the severe relative slide of the material at the two sides of primary shearing band by incident bar and transmission bar.

Key words: Ti-811; dynamic compression; deformation; fracture

Corresponding author: Shi Xiaohui, Ph. D., College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6010533, E-mail: sxhtough@126.com