

TC6 钛合金动态断裂机制

徐媛, 向文丽, 杨红斌, 孙坤

(楚雄师范学院, 云南 楚雄 675000)

摘要: 采用分离式 Hopkinson Bar 系统, 对双态组织的 TC6 钛合金帽形试样进行动态力学试验, 研究其动态断裂失效机制。结果表明: 双态组织 TC6 钛合金在动态下变形时, 其断裂常与绝热剪切带相联系, 且断裂由微孔洞形核、孔洞长大形成微裂纹、微裂纹长大扩展形成宏观断裂 3 个过程组成。

关键词: TC6 钛合金; 双态组织; 高应变率; 断裂机制

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)08-1924-04

由于耐腐蚀, 密度小, 比强度高, 钛及钛合金成为许多领域的优良结构材料。TC6 钛合金是 Ti-Al-Mo-Cr-Fe-Si 系的 $\alpha+\beta$ 型两相热强钛合金, 名义成分 Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si, 可在 400~450 °C 下长时间工作, 该合金不仅有良好的热加工性能, 且有较理想的综合机械性能, 在航空航天及军事装备领域具有较好应用前景^[1-7]。这些应用领域通常与高温、高压及高应变率等极端环境有关, 尤其在快速变化的冲击载荷作用下, 材料发生变形的过程和静态或准静态载荷条件下发生变形的过程显著不同^[8]。钛合金热导率低及应变硬化能力差, 在高应变率加载条件下会产生局域化变形现象, 易于产生绝热剪切带。因而, 有关钛合金在高应变率下的动态力学响应成为较为活跃的研究热点^[9-16]。

本工作利用高温、高应变率耦合分离式 Hopkinson Bar 装置, 采用帽形试样, 对 TC6 钛合金的动态失效及断裂机制进行研究, 以深入了解 TC6 钛合金在高应变率加载条件下的动态失效规律, 加快钛合金材料的工程应用, 具有重要的学术研究和工程应用价值。

1 实验

本实验用 TC6 钛合金是由宝鸡有色金属加工厂生产的直径为 $\Phi 30$ mm 的棒材, 其成分如表 1 所示。其热导率及比热容室温时分别为 $\lambda=6.8$ W/(m·°C) 和 $C=611$ J/(kg·°C)。材料经 950 °C 保温 2 h 后取出空冷, 然后再在 580 °C 保温 5 h 后空冷, 最终显微结构为双态组织, 如图 1 所示。

动态力学试验采用楚雄师范学院材料制备及力学行为研究所的 $\Phi 14$ mm 高温、高应变率耦合分离式

表 1 TC6 合金的化学成分

Table 1 Chemical constitution of TC6 alloy ($\omega/\%$)					
Al	Cr	Mo	Fe	Si	Ti
6.4	1.48	2.66	0.41	0.28	Bal.

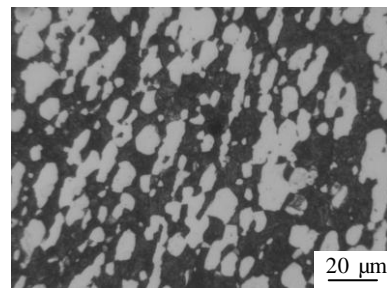


图 1 TC6 钛合金双重退火后的组织

Fig.1 Microstructure of TC6 titanium alloy after double annealing

Hopkinson Bar 系统进行, 试验系统如图 2 所示。使用帽形试样 (图 3 示) 进行动态剪切试验, 应变率从 880 s⁻¹ 到 2900 s⁻¹ (室温)。采用线切割方法将变形回收试样沿轴线切开, 经过不同粒度的砂纸研磨后, 机械抛光至镜面, 用克氏试剂 (5%HF, 20%HNO₃, 75%H₂O) 进行腐蚀。用光学显微镜 (OM) 及扫描电子显微镜 (SEM) 对试样进行微观分析, 并使用扫描电子显微镜 (SEM) 对断裂试样进行断口形貌分析。

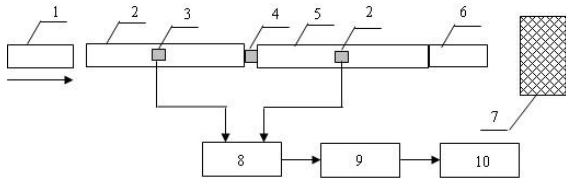
2 实验

图 4 是 TC6 钛合金双态组织试样经动态剪切后剖面的 SEM 形貌。图中沿试样对角方向出现了一条绝热剪切带, 剪切带中出现了 3 处裂纹, 两条长, 一条稍短, 试样的其它地方均未出现裂纹。裂纹总依附于剪

收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 云南省应用基础研究计划项目 (2011FZ185)

作者简介: 徐媛, 女, 1973 年生, 硕士, 副教授, 楚雄师范学院材料制备及力学行为研究所, 云南 楚雄 675000, E-mail: xuyuan@cxtc.edu.cn



1-striker bar; 2-incident bar; 3-strain gauge; 4-specimen; 5-transmission bar; 6-absorption bar; 7-shock damper; 8-high dynamic strain indicator; 9-transient wave memorizer; 10-data processing system

图 2 分离式霍普金森杆示意图

Fig.2 Scheme of split Hopkinson bar

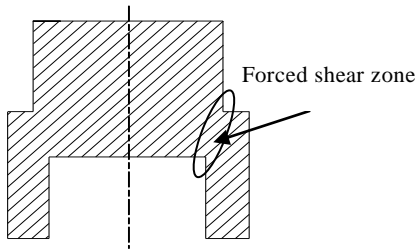


图 3 动态剪切帽形试样

Fig.3 Hat-shape sample of dynamic shearing

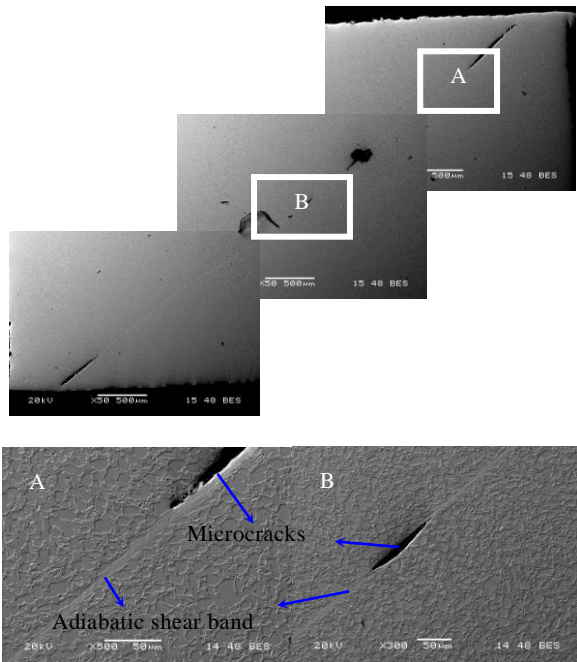


图 4 双态组织试样损伤微观形貌

Fig.4 Microstructure of damage of the sample with binary morphology

切带, 暗示着试验材料在动态载荷作用下, 绝热剪切带对材料的断裂起着非常重要的作用。一般情况下, 钛合金材料在高应变率的冲击载荷作用下, 总伴随着绝热剪切带的产生。这是因为高应变速率 (10^3 s^{-1} 量级) 下的动态变形, 材料变形瞬间完成 (μs 量级), 而钛合金热导率较低, 变形过程中由塑性变形功转化而来的热量无法在如此短的时间内传导出去, 使材料内部局部温度较其它区域高, 这些区域成为软化区, 材料的变形集中在这些区域进行, 形成了局域化变形, 出现绝热剪切带。

在动态载荷加载条件下, 材料内部产生的绝热剪切带通常是材料性能进一步恶化的根源。绝热剪切带在材料内形成后, 便会在剪切应力作用下扩展, 而扩展过程中, 带内会产生微孔洞、微裂纹等多种内损伤形式。通常情况下, 微孔洞形核主要由剪切带内拉应力引起。在高应变率加载条件下, 因局域化变形的绝热特点, 剪切带温升极高, 使剪切带成为微孔洞等缺陷产生的理想场所。带内由于变形的极度不均匀, 存在很多温度异常的热点, 某些热点在拉应力作用下形核成为微孔洞。图 5 所示为沿剪切带产生的微孔洞。

一旦微孔洞沿剪切带形成, 随着变形的进行, 在剪切应力及卸载时形成的拉应力作用下, 微孔洞将发生长大。通常, 剪切带内的微孔洞长大形貌呈圆形或椭圆形, 这是由于剪切带内微孔洞四周均为温度较高的易变形区域, 理论上微孔洞长大后应呈圆形, 但由于存在剪切应力及拉应力, 使孔洞朝剪切带宽度方向长大的同时, 沿剪切带扩展方向拉长为椭圆形, 图 6 所示 TC6 钛合金双态组织剪切带内微孔洞长大时的 SEM 形貌。

图 7 示意地描绘了剪切带内孔洞的演化过程^[17]。当剪切带内出现拉应力时, 孔洞在剪切带中形核, 并随时间延长而长大; 孔洞边缘到达剪切带边缘之前呈现球形, 当其边缘到达剪切带边界后, 由于边界处温

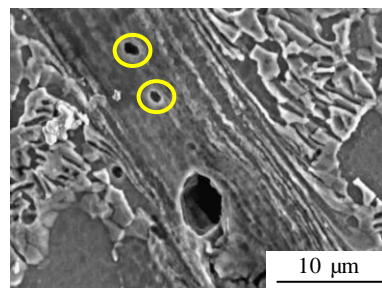


图 5 TC6 钛合金双态组织绝热剪切带中的微孔洞

Fig.5 Voids generated along shear band of TC6 titanium alloy with binary morphology

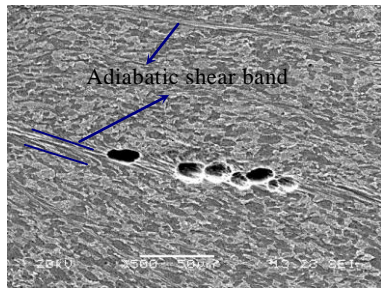


图 6 TC6 钛合金双态组织剪切带中的孔洞长大

Fig.6 Growth of voids in shear band of TC6 titanium alloy with binary morphology

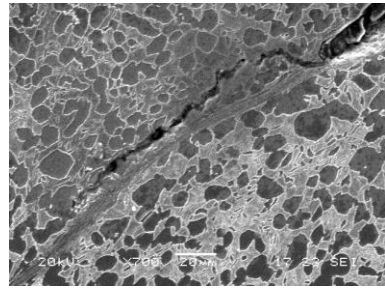


图 9 TC6 钛合金双态组织中裂纹的扩展

Fig.9 Expansion of crack in shear band of TC6 titanium alloy with binary morphology

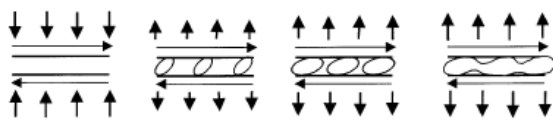


图 7 孔洞长大及连接示意图

Fig.7 Schematic representation of void growth and coalescence

度较剪切带内低，强度更高，因而孔洞的生长将受到剪切带边缘的限制，孔洞拉长呈现椭球状(图 6 所示)。

微孔洞形成微裂纹后，在剪切应力的作用下，微裂纹会继续扩展长大，导致材料性能的进一步恶化。当剪切带向前扩展时，由于剪切应力的作用，剪切区域的组织经历了很大的应变，通常为 1~100^[18]，区域中组织均匀性及致密性都有很大变化，这种变化通常不均匀，加之带内较高的温升，两方面因素均为微孔洞产生创造了条件，图 8 所示为裂纹前端绝热剪切带中产生的孔洞，进一步剪切变形将导致微裂纹与孔洞连接，使微裂纹扩展长大。

图 9 为 TC6 钛合金双态组织剪切带中微裂纹扩展长大时的 SEM 形貌。图中可看到裂纹仍留有明显孔洞形貌。微裂纹在剪切应力作用下继续扩展长大，当裂纹长大到一定尺寸时，试样发生宏观断裂。

对 TC6 钛合金双态组织动态断裂过程的分析表明，孔洞在材料动态断裂过程中起到了至关重要的作用，没有孔洞出现也不会有材料的最终断裂，这可从试样的断口 SEM 形貌得到证实(图 10 所示)。图中可看到，双态组织试样在动态加载后，断口表面出现了大量韧窝，韧窝正是材料断裂前出现大量孔洞的证据。

综上所述，TC6 钛合金双态组织在高应变率加载条件下的动态断裂由微孔洞形核、孔洞长大形成微裂纹、微裂纹长大扩展形成宏观断裂 3 个过程组成。

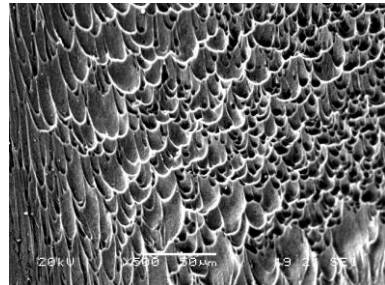


图 10 TC6 钛合金双态组织试样动态加载后断口的 SEM 形貌

Fig.10 SEM micrograph of fracture of TC6 titanium alloy with binary morphology after dynamic loading

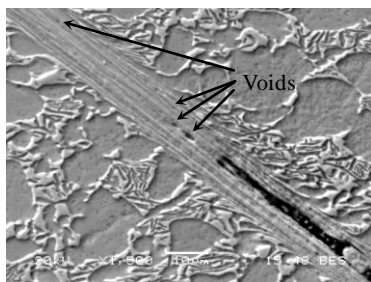


图 8 裂纹前端的孔洞

Fig.8 Voids in front of tip of crack

3 结 论

- 1) 钛合金材料动态断裂与绝热剪切带密切相关，孔洞及微裂纹通常在绝热剪切带中产生并扩展。
- 2) 钛合金的动态断裂过程可分为 3 个阶段：微孔洞形核、微孔洞长大连接形成微裂纹、微裂纹扩展形成宏观断裂。

参考文献 References

[1] Xiong Aiming(熊爱明), Chen Shenghui(陈胜晖), Huang

- Weichao(黄维超) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(6): 447
- [2] Wang Zejun(王泽均), Li Mingqiang(李明强), Li Changliang(李长亮) *et al.* *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2003, 1: 43
- [3] 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
- [4] Sun Kun(孙坤), Wang Fuchi(王富耻), Cheng Xingwang(程兴旺) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(1): 34
- [5] Sun Kun(孙坤), Wang Fuchi(王富耻), Cheng Xingwang(程兴旺) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(2): 233
- [6] Sun Kun(孙坤), Xu Yuan(徐媛), Liu Jinhao(刘晋豪). *Journal of Yunnan University: Natural Sciences*(云南大学学报, 自然科学版)[J], 2012, 34(2): 185
- [7] 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
- [8] Li Qiang(李强), Xu Yongbo(徐永波). *Acta Metallurgica A*(金属学报)[J], 1999, 35(5): 491
- [9] Chichili D R, Ramesh K T, Hemker K J. *Acta Materialia*[J], 1998, 46(3): 1025
- [10] Zhang Zhong(张忠), Zhao Lizhong(赵立中), Tu Zhihua(涂志华) *et al.* *Journal of Experimental Mechanics*(实验力学)[J], 1994, 9(3): 209
- [11] Zhuang Shiming(庄仕明), Feng Shuping(丰树平), Wang Chunyan(王春彦) *et al.* *Chinese Journal of High Pressure Physics*(高压物理学报)[J], 1995, 19(2): 96
- [12] Wang Lili(王礼立), Hu Shisheng(胡时胜). *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 1985, 5(1): 9
- [13] Qiang Li, Xu Y B, Bassim M N. *Mater Proc Tech*[J], 2004, 155-156: 1889
- [14] Mostafa Shazly, Vikas Prakash, Susan Draper. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2004, 41: 6485
- [15] Nemat-nasser S, Guo W G, Cheng J Y. *Acta Mater*[J], 1999, 47(13): 3705
- [16] Xu Yuan(徐媛), Sun Kun(孙坤), Zi Xingfa(自兴发) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(11): 2002
- [17] Timothy S P, Hutchings I M. *Acta Metall*[J], 1985, 33: 667
- [18] Xue Q, Meyers M A, Nesterenko V F. *Acta Metall*[J], 2002, 50: 575

Dynamic Fracture Mechanism of TC6 Titanium Alloy with Binary Morphologies

Xu Yuan, Xiang Wenli, Yang Hongbin, Sun Kun
(Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000, China)

Abstract: Using the technology of split Hopkinson bar, dynamic mechanical experiments under high strain-rate loading on hat-shape samples of TC6 titanium alloy with binary structure have been conducted and the fracture failure mechanism has been investigated. It is shown that the fracture of TC6 titanium alloy with binary structure is often related to adiabatic shear band when deformed at the high strain rate. Its fracture includes three stages, i.e. nucleation of voids, growth of voids to form micro-crack and expansion of the micro-crack to form fracture.

Key words: TC6 titanium alloy; binary morphology; high strain rate; fracture failure mechanism

Corresponding author: Sun Kun, Ph. D., Professor, Research Institute on Preparation and Mechanical Behavior of Materials, Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000, P. R. China, E-mail: sunkun@cxtc.edu.cn