

# TC6 钛合金绝热剪切带不同发展阶段的精细结构

孙 坤<sup>1,2</sup>, 王富耻<sup>2</sup>, 程兴旺<sup>2</sup>, 苗 普<sup>2</sup>, 赵双赞<sup>2</sup>

(1. 楚雄师范学院, 云南 楚雄 675000)

(2. 北京理工大学, 北京 100081)

**摘 要:** 采用分离式 Hopkinson Bar 技术对 TC6 钛合金进行动态剪切试验, 通过光学显微镜、扫描电镜及透射电镜研究 TC6 钛合金绝热剪切带不同发展阶段的精细结构及其形成机制。结果表明: 在高应变率下, 材料绝热剪切带的形成是一个由萌生、扩展、完全发展组成的过程, TC6 钛合金绝热剪切带在不同发展阶段的精细结构有很大的不同, 从萌生到完全发展, 塑性变形剧烈程度逐渐增大, 位错在 TC6 钛合金绝热剪切带的形成中起到非常重要的作用。

**关键词:** TC6 钛合金; 绝热剪切带; 微观分析

中图分类号: TG 146.2<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)02-0233-04

绝热剪切是材料在冲击载荷作用下, 由于高应变率变形及材料较差的导热性能而使材料局部区域中产生的热来不及散失而产生的一种现象, 它是一种局部塑性失稳, 普遍存在于如冲击成形、机械切削加工、冲蚀、装甲侵彻、弹道冲击等高速变形过程中<sup>[1~6]</sup>。自从 Zener 和 Hollomon<sup>[7]</sup>开创性的工作后, 对绝热剪切带(ASB)的研究得到加速。

钛因其众多优良性能(密度小、比强度高、耐腐蚀、耐热、耐低温等), 因而在航空航天及其它国防工业等领域得到广泛的应用。又因其热导率低及应变硬化能力差, 在高应变率加载条件下极易发生变形局域化现象, 产生绝热剪切带, 在局域化变形及绝热剪切带研究中备受关注。关于钛合金的绝热剪切研究已有许多报道<sup>[8~13]</sup>, 针对钛合金绝热剪切带微观结构分析的研究也有很多<sup>[14~16]</sup>, 但对绝热剪切带不同发展阶段的研究还鲜有报道。弄清 ASB 的微观结构及组织演化规律, 具有重大的理论价值和实际意义。本实验利用分离式 Hopkinson Bar 技术, 采用帽形试样对 TC6 钛合金进行动态剪切试验, 并通过显微分析手段研究 TC6 钛合金绝热剪切带不同发展阶段的精细结构。

## 1 材料及方法

试验用 TC6 钛合金是由宝鸡有色金属加工厂生产的直径为  $\phi 35$  mm 的棒材, 其成分如表 1 所示。材料经 800 °C 保温 2 h 后取出空冷, 最终显微组织如图 1 所示为等轴组织。

表 1 TC6 钛合金的化学成分

Constitution	Al	Cr	Mo	Fe	Si	Ti
Content, $\omega/\%$	6.4	1.48	2.66	0.41	0.28	Bal.

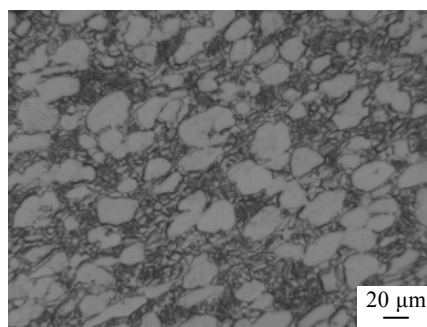


图 1 TC6 钛合金等温退火后的组织

Fig.1 Microstructure of TC6 titanium alloy after isothermal annealing

动态剪切试验在北京理工大学动态力学实验室的  $\phi 14.5$  分离式 Hopkinson Bar 上进行, 实验原理及试验装置参见文献<sup>[17]</sup>。动态剪切试样如图 2 所示。此试样是 Meyers 在 1986 年首次提出<sup>[18]</sup>, 由于试样独特的结构特征, 在外力作用下, 塑性变形被限制在一个很窄的区域内(强迫剪切区), 试样在剪切区内很容易发生绝热剪切变形, 许多研究人员都采用这种试样研究绝热剪切现象<sup>[19,20]</sup>。试验条件为: 采用 102 mm 及

收到初稿日期: 2008-01-27; 收到修改稿日期: 2008-04-04

作者简介: 孙 坤, 男, 1971 年生, 博士生, 北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081, 电话: 010-68913257

200 mm 撞击杆，打击气压为 0.3 MPa，平均应变率分别为 2100 及 1900 s<sup>-1</sup>。

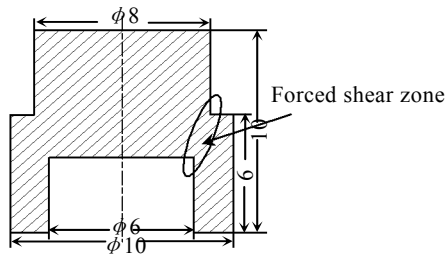


图 2 动态剪切试样

Fig.2 Sample of dynamic shearing

将动态剪切试验后的帽形试样沿轴线切开，经研磨、机械抛光、腐蚀后在 S-4800 冷场发射扫描电子显微镜下观察试样在动态剪切中产生的绝热剪切带形貌及特征。利用线切割切下包含剪切带的 2 mm×2 mm×0.3 mm 小片，机械研磨至 50 μm 后经离子减薄至 5~20 nm 制备薄膜，采用 JEM200CX 透射电镜系统观察剪切带的微观结构。

## 2 结果及分析

图 3 为 TC6 钛合金绝热剪切带在萌生阶段(图 3a)及完全发展阶段(图 3b)时的 SEM 照片。可看出，绝热剪切带在不同的发展阶段，其宽度是不一样的，绝热剪切带在萌生阶段宽度大约为几个微米，形如一条线，如图 3a 所示，而在完全扩展后，其宽度增加到 10 几个微米，如图 3b 所示。这说明 TC6 钛合金在经历高应变速率变形后，形成的绝热剪切带经历了萌生、扩展、完全发展 3 个阶段，反映在形貌上便是绝热剪切带的宽度从窄到宽到最终完全形成，从萌生时的几微米到最终完全发展时的 10 几微米，是一个逐渐增加的单向变化过程。

图 4 为 TC6 钛合金绝热剪切带在不同发展阶段精细结构的 TEM 照片。其中，图 4a 为剪切带萌生阶段的 TEM 照片。图 4b 为剪切带完全发展阶段的 TEM 照片。可见，剪切带萌生阶段和完全发展阶段除了其变形局域化宽度不同外，带内组织变形及破碎程度也不一样。从图 4a 可以看到，材料在动态剪切应力的作用下刚开始萌生应变局域化时，剪切带宽度只有 4 μm 左右，在局域化区域内，原来等轴的组织被拉长变形，但仍未破碎断开，从剪切带中心往外，组织被拉长变形的程度有所减弱，带外，则是未受剪切应力影响的等轴状基体组织。整个观察面根据晶粒形貌可分为 3 个区域：晶粒被严重拉长，但未碎化 (A 区)；晶粒被稍微拉长变形 (B 区)；晶粒未变形 (C 区)。图 5 分别为图 4a 中 A、B、C 3 个区的 TEM 照片。

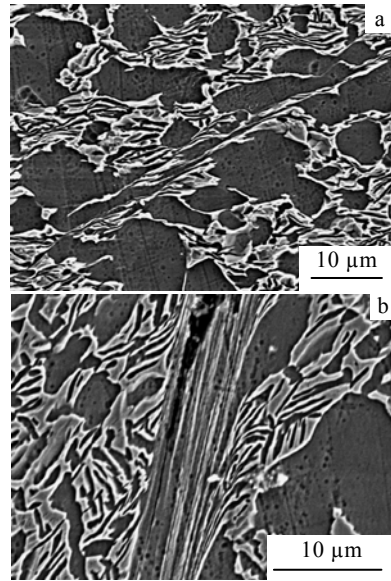


图 3 TC6 钛合金绝热剪切带的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of adiabatic shearing band of TC6: (a) initial stage and (b) full development stage

从图 4b 可看到，剪切带完全扩展时形成的局域化区域形貌与剪切带刚萌生时的形貌差别很大，剪切带中心因剪应力作用，被拉长变形的组织已经严重破碎，形成许多形如等轴颗粒的碎化组织，但这些碎化组织并不是再结晶的结果，而是在动态剪应力作用下，由

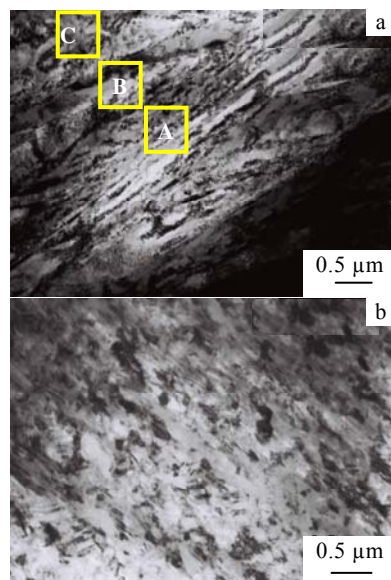


图 4 TC6 钛合金绝热剪切带的 TEM 照片

Fig.4 TEM images of adiabatic shearing band of TC6 titanium alloy: (a) initial stage and (b) full development stage

于位错快速增殖造成在拉长变形组织中的晶界、第二相等处塞积,在塞积处产生较大应力集中而使拉长组织产生断裂,形成细小颗粒。从图中可以看到,虽然颗粒细化,但仍有方向性,在图 3b 中看到明显的流线,正是由于这些细小颗粒成一定方向排列的结果,而再结晶颗粒是没有方向性的。和萌生阶段相似,靠近剪切带边缘的区域,是等轴组织被稍微拉长变形的过渡区,剪切带外则是不受变形影响的基体等轴组织。

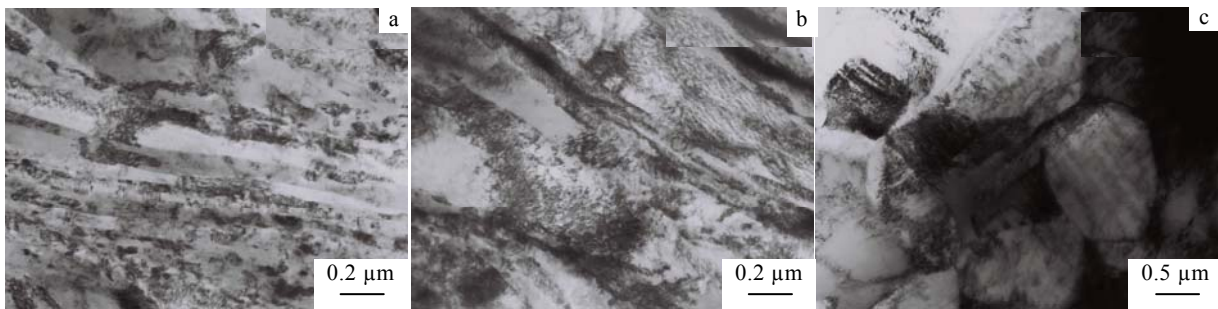


图 5 TC6 钛合金剪切带 3 个区域的 TEM 照片

Fig.5 TEM pattern of three areas of adiabatic shearing band of TC6 titanium alloy: (a) A area; (b) B area; and (c) C area of Fig.4a

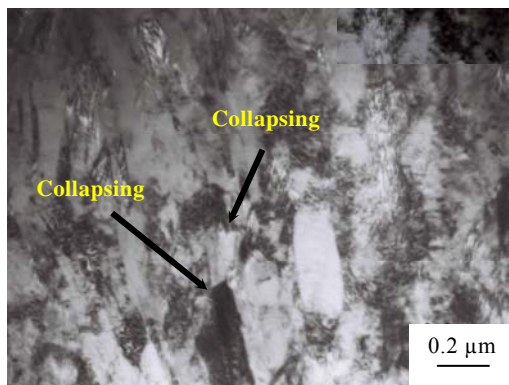


图 6 在位错的作用下晶粒的碎化照片

Fig.6 Broken grains formed by dislocation slipping and clogging

### 3 结 论

1) 在高应变率下,材料绝热剪切带的形成是一个由萌生、扩展、完全发展组成的过程,在发展过程中,剪切带宽度由最初的几个微米变到最终的 10 几个微米。

2) 无论是萌生阶段还是完全发展阶段,剪切带由内到外,晶粒的变形程度逐渐减弱,可由如图 5 的 3 个区进行描述。

3) 萌生阶段与完全发展阶段在剪切带中组织的变形程度不同。在萌生阶段,带中心晶粒变形拉长但

剪切带无论是在萌生还是完全发展阶段,位错的运动均在其中起到相当重要的作用。在外加动态剪应力作用下,组织由于位错的滑移导致塑性变形而被拉长,滑移的位错在碰到障碍时将产生塞积,同时,由于外加应力的作用,晶粒中会源源不断地产生位错增殖,使得塞积头处产生更大的应力集中,应力大于材料的断裂强度时,将使拉长晶粒产生坍塌而碎化,拉长晶粒的坍塌碎化过程如图 6 所示。

晶粒未碎化,在完全发展阶段,变形拉长晶粒碎化,形成更加细小的晶粒。

4) 在剪切带的形成过程中,位错起着非常重要的作用。在外加剪切应力作用下,位错滑移导致材料的塑性变形,同时使变形晶粒中的位错快速增殖,在障碍处塞积的位错引起巨大的应力集中导致变形拉长晶粒的断裂,形成细小的等轴颗粒。

### 参考文献 References

- [1] Olson G B, Mescal J F, Azrin M. In: Meyers M A, Murr L E eds. *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals: Concepts and Applications*[C]. New York: Plenum Press, 1981: 211
- [2] Shockey D A, Erlich D C. In: Meyers M A, Murr L E eds. *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals: Concepts and Applications*[C]. New York: Plenum Press, 1981: 249
- [3] Bai Y L. *Res Mechanics*[J], 1990, 31: 133
- [4] Pak H R, Wittman C L. In: Murr L E, S taudhammer K P Meyers M A eds. *Metallurgical Applications of Shock-Waves and High-Strain-Rate Phenomena* [C]. New York: Marcel Dekker Inc, 1986: 749
- [5] Meunier Y, Beatty J H. *Shock-Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals* [M]. New York: Marce Dekker Inc, 1992: 637

- [6] Meyers M A. *Dynamic Behavior of Materials* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994
- [7] Zener C, Hollomon J H. *J Appl Phys*[J], 1944, 15: 22
- [8] Shih-Chieh Liao, Duffy J. *J Mech Phys Solids*[J], 1998, 46(11): 1190
- [9] Me-Bar Y, Shechtman D. *Mater Sci Eng*[J], 1983, 58: 181
- [10] Yu Ji-lin, Li Jian-rong, Wei Zhi-gang. *Journal of Ningbo University (NSEE)*[J], 2003, 12: 417
- [11] Wright T W. *The Physics and Mathematics of Adiabatic Shear Bands*[M]. London: Cambridge University Press, 2002: 2
- [12] Woei-Shyan Lee, Chi-Fneg Lin. *Materials Science and Engineering*[J], 1998, 241(1): 48
- [13] Li Qiang(李强), Xu Yongbo(徐永波). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 1999, 35(5): 491
- [14] Meyers M A, Subhash G, Kad B K *et al. Mech Mater*[J], 1994, 17: 175
- [15] Bai Y L, Xue Q, Xu Y B *et al. Mech Mater*[J], 1994, 17: 155
- [16] Xu Y B, Zhong W L, Chen Y J *et al. Mat Sci Eng A*[J], 2001, 299: 287
- [17] Hu Shisheng(胡时胜), Deng Detao(邓德涛), Ren Xiaobin(任小彬). *Journal of Experimental Mechanics(实验力学)*[J], 1998, 3: 9
- [18] Meyers L W, Manwaring S. In: Murr L E, Staudhammer K P, Meyers M A eds. *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*[C]. New York: Marcel Dekker Inc., 1986: 657
- [19] Meyers M A, Chen Y J, Marquis F D S *et al. Metallurgical and Materials Transation A*[J], 1995, 26A: 2493
- [20] Meyers M A, Andrade U, Chokshi A H. *Metal Mater Trans*[J], 1995, 26A: 2881

## Fine Structure of Adiabatic Shear Band of TC6 Alloy under Different Evolvement Stages

Sun Kun<sup>1,2</sup>, Wang Fuchi<sup>2</sup>, Cheng Xingwang<sup>2</sup>, Miao Pu<sup>2</sup>, Zhao Shuangzan<sup>2</sup>

(1. Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000, China)

(2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Dynamic shearing experiment has been done for TC6 titanium alloy by using a split Hopkinson bar process. The fine structure of adiabatic shear band of TC6 alloy under different evolvement stages has been studied by optical microscope (OP), scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). It is shown that the formation of adiabatic shear band of material goes through the three processes of initiation, expansion and full evolvement, for which the fine structure is quite different. The extent of plastic deformation increases gradually from the initiation stage to the full evolvement stage, during which the dislocations play a very important role.

**Key words:** TC6 titanium alloy; adiabatic shear band; microstructure analysis

---

Biography: Sun Kun, Candidate for Ph. D., School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68913257