

TC6 钛合金不同组织绝热剪切带的形成机理

孙 坤^{1,2}, 王富耻¹, 程兴旺¹, 苗 普¹, 赵双赞¹

(1. 北京理工大学, 北京 100081)

(2. 楚雄师范学院, 云南 楚雄 675000)

摘 要:采用分离式 Hopkinson Bar 技术对 TC6 钛合金等轴组织及网篮组织试样进行了动态剪切试验,通过光学显微镜、扫描电镜及透射电镜研究了 TC6 钛合金 2 种组织绝热剪切带的形成机理。结果表明:由于组织状态不同,其绝热剪切带的形成机理也不同;等轴组织绝热剪切带的形成是位错增殖、运动及塞积的结果,而网篮组织绝热剪切带的形成则是动态再结晶的结果。

关键词:钛合金;绝热剪切带;微观分析;机理

中图法分类号: TG 146.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)01-0034-04

绝热剪切是材料在冲击载荷作用下产生的一种局部塑性失稳现象,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^[1~6]。自从 Zener 和 Hollomon^[7]开创性的工作后,对 ASB 的研究得到了快速发展。近 20 年来,人们一直十分关心剪切带内部微观结构,但仍有些问题一直存在争论^[8,9],即对剪切带内晶粒特征及是否发生相变等问题有不同的看法。弄清绝热剪切带内微结构演化与变形过程的关系有助于了解绝热剪切带的形成及发展,因此,绝热剪切带微结构本质一直以来都是有关绝热剪切带研究的热点之一。

各国学者对不同金属材料的绝热剪切带的精细结构及形成机理做了大量研究。Stelly 和 Dorneval^[10]、Pak^[11]等、Meyers 和 Pak^[12]、Grebe 等^[13]采用 TEM 对 Ti-6Al-4V 和商业纯钛中产生的剪切带进行了细致的观察,他们发现,剪切带内部和外部的电子衍射花样大为不同,在剪切带外部,单晶取向的特征花样极为明显,而在剪切带内部,由许多晶体取向产生的环状花样也很明显,剪切带由直径为 0.05~0.2 μm 的等轴晶粒组成,位错密度相对较低,由于这种显著的特征,Meyers 和 Pak^[12]提出这种结构是由动态再结晶形成的;Andrade 等^[14~16]也在铜中首先观察到了动态再结晶。但迄今为止鲜有关于组织与绝热剪切带形成机理关系的报道。本研究利用分离式 Hopkinson Bar 技术,采用帽形试样对 TC6 钛合金 2 种组织状态的试样进行了动态剪切试验,并通过显微分析手段研究了 TC6 钛合金不同组织绝热剪切带的形成机理。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及处理方法

实验用 TC6 钛合金是由宝鸡有色金属加工厂生产的直径为 $\Phi 35$ mm 的棒材,其成分如表 1 所示。材料经热处理获得等轴及网篮组织,热处理工艺如表 2 所示。等轴组织平均颗粒尺寸约为 5~8 μm,网篮组织的平均板条宽度约为 0.4 μm,2 种组织的微观形貌如图 1 所示。

表 1 TC6 合金的化学成分

Elements	Al	Cr	Mo	Fe	Si	Ti
Contents	6.4	1.48	2.66	0.41	0.28	Bal.

表 2 材料的热处理方法

No.	Treatment	Morphology
1	800 °C、2 h、AC	Spherical equiaxed
2	1040 °C、1 h、AC	Lamellar

1.2 动态剪切试验

动态剪切试验在北京理工大学动态力学实验室的 $\phi 14.5$ mm 分离式 Hopkinson Bar 上进行,实验原理及试验装置参见文献[17]。动态剪切采用 Meyers 等^[18]设计的帽形试样,如图 2 所示。试验条件为:采用 200 mm 撞击杆,打击气压为 3×10^5 Pa,应变率为 1900 s^{-1} 。

1.3 微观形貌观察

收稿日期: 2008-02-04

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, E-mail: Sunkun@bit.edu.cn

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 OLYPUS PME3 型光学显微镜及 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 的小片，机械研磨至 50 μm 后经离子减薄至 5~20 nm 制备 TEM 薄膜，采用 JEM200CX 型透射电镜系统观察剪切带的微观结构。

绝热剪切带颜色灰暗，而网篮组织试样绝热剪切带颜色呈“白亮”特征；从图 4 可以看出，2 种组织绝热剪切带也有显著的差别，等轴组织绝热剪切带中晶粒被严重拉长变形，可看到清晰的剪切变形流线，呈现出明显的方向性，TC6 为双相 ($\alpha+\beta$) 钛合金，因此剪

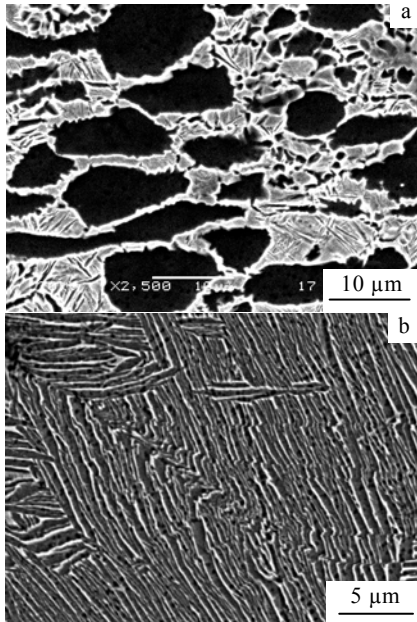


图 1 TC6 钛合金热处理后的组织

Fig.1 Microstructure of TC6 titanium alloy after heat treatment: (a) spherical equiaxed and (b) lamellar

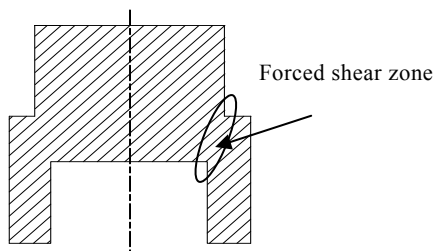


图 2 动态剪切试样

Fig.2 Sample for dynamic shearing

2 结果及分析

图 3 为 TC6 钛合金等轴及网篮 2 种组织状态试样绝热剪切带的光学显微形貌。图 4 为 2 种组织状态试样绝热剪切带的 SEM 形貌。由图 3 可以看出，2 种组织状态的绝热剪切带有显著的区别，等轴组织试样的

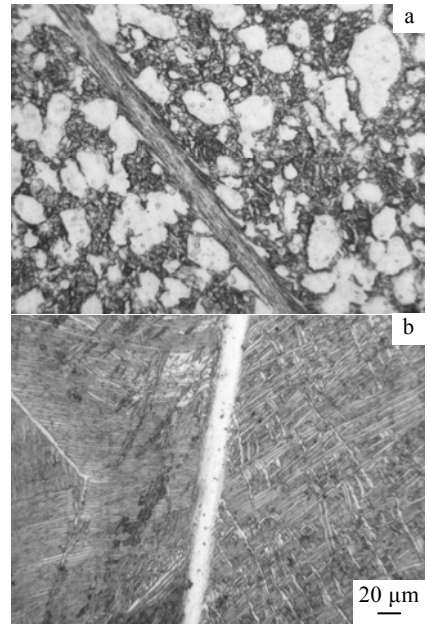


图 3 TC6 钛合金绝热剪切带的形貌

Fig.3 Morphology of adiabatic shearing band of TC6 titanium alloy: (a) spherical equiaxed and (b) lamellar

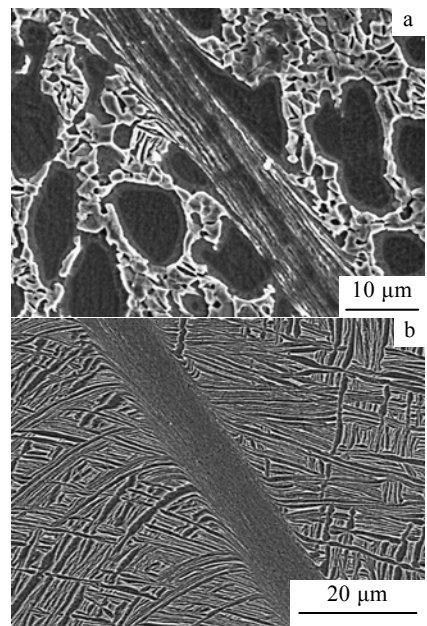


图 4 TC6 钛合金绝热剪切带的 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of adiabatic shearing band of TC6 titanium alloy: (a) spherical equiaxed and (b) lamellar

切带中的不同相仍可通过颜色而分辨出来，不同相以流线分隔开，剪切带与基体组织的边界不平整，呈现一种过渡的形貌；网篮组织绝热剪切带中没有晶粒变形的流线，剪切带颜色均匀，不同相混合均匀而不能在扫描电镜下分辨出来，带中组织也没有明显的方向性，剪切带与基体未变形区边界平整。这些差异预示着 2 种组织绝热剪切带的形成机理截然不同。

图 5 为 TC6 钛合金等轴及网篮 2 种组织剪切带中心晶粒的 TEM 照片。可以看出，2 种组织绝热剪切带中心晶粒均呈细小的等轴状，但形貌不同。等轴组织剪切带中心颗粒大小不均，尺寸在 0.1~0.5 μm 之间，边缘带有毛刺，不同颗粒形状也不相同，颗粒内部及颗粒与颗粒之间存在大量的位错，有些位错形成了胞状结构从而构成了亚晶结构；网篮组织剪切带中心颗粒大小均匀，尺寸约为 0.2 μm，颗粒形状相似，晶粒边缘光滑，颗粒内部及颗粒与颗粒之间位错较少。

图 3、图 4 显示了 2 种组织剪切带外观形貌的差异，图 5 显示了 2 种组织剪切带内部晶粒形貌的差异，产生这些差异的原因在于 TC6 钛合金 2 种组织在动态剪切应力作用下，其剪切带形成机理不同。

对于 TC6 等轴组织，其剪切带形成是位错作用的结果。由于图 2 所示试样的特殊形状，在外加动态载荷作用下，试样的变形极不均匀，图中强迫剪切区将产生应变局域化，由于位错的滑移产生塑性变形，等轴晶粒在剪切应力作用下沿剪切方向拉长变形，同时变形晶粒中的位错将快速增殖，当最初的位错滑移到晶界等障碍处时由于克服不了其阻力而停止滑移，后到的位错滑移到此处也将停止运动，由于快速增殖的位错，在障碍处将形成庞大的位错塞积群，同时在塞积头处产生应力集中，巨大的应力在晶界处将产生微裂纹，晶粒沿微裂纹产生断裂，如图 5a 所示。断裂形成的小颗粒不规则，呈现一定方向性，选区衍射花样证实了此结论，如图 5a 右上角小图所示，该花样为不连续的多晶衍射环，证明了剪切带中多晶有很强的方向性。这也解释了为什么在光学显微镜下剪切带具有变形流线。由图 5b 可看到，网篮组织剪切带内的晶粒具有等轴、无畸变、晶粒内部无位错或低密度位错的结构特征，而这正是再结晶晶粒所具有的结构特征。因此，对于 TC6 网篮组织，其剪切带形成是动态再结晶的结果。由于变形塑性功转化为热，使剪切带中心温度达到或超过了材料的再结晶温度，这为动态再结晶提供了能量保证；网篮组织较小的片层间距，在外加剪切应力作用下，局域化区域的片层将断裂为细小的颗粒，这将为动态再结晶提供再结晶晶核，如图 6 中箭头所示，晶核尺寸大约为 0.1~0.2 μm，随着局域

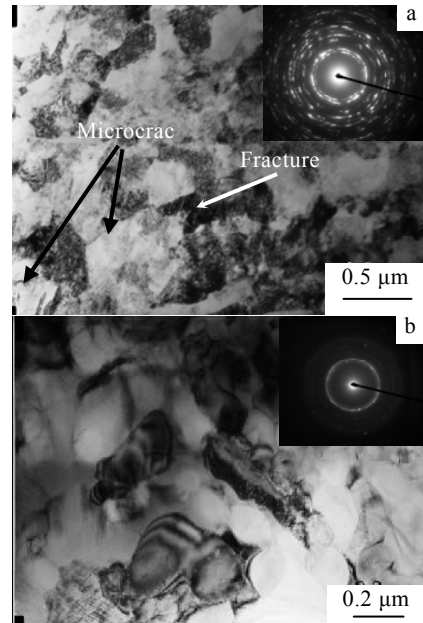


图 5 TC6 钛合金绝热剪切带的 TEM 照片
Fig.5 TEM images of adiabatic shearing band of TC6 titanium alloy: (a) spherical equiaxed and (b) lamellar

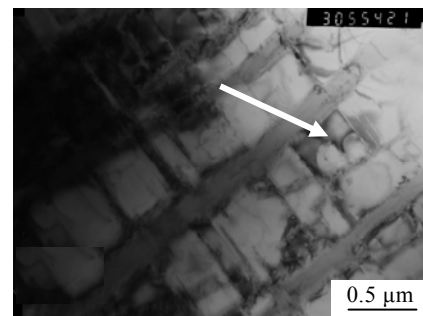


图 6 片层组织断裂过程中形成的再结晶晶核
Fig.6 Recrystal nucleus formed in the course of fracture of lamellar structure

化区域的进一步剪切变形，将产生更多的再结晶晶核，这些晶核在高应变速率下主要以亚晶合并的方式进行长大，如图 5b 所示。动态再结晶形成的细小等轴晶粒没有方向性，表现为各向同性，图 5b 右上角的选区衍射花样为连续的多晶衍射环，说明了该区域是由无方向性的细小晶粒组成，这也解释了为什么在光学显微镜下网篮组织剪切带具有“白亮”的特征，正是由于这些细小晶粒的各个方向对光具有相同反射率的缘故。

3 结 论

1) 在高应变速率下，TC6 钛合金组织不同，其绝热剪切带的形成机理也不相同。

2) 等轴组织绝热剪切带的形成是位错增殖、运动及塞积的结果; 网篮组织绝热剪切带的形成则是动态再结晶的结果。

3) 等轴组织绝热剪切带在光学显微镜下具有的流线特征是由于带内变形晶粒断裂形成的细小颗粒呈现一定方向所致。

4) 网篮组织绝热剪切带在光学显微镜下没有流线特征而具有“白亮”特征, 这是由于动态再结晶形成的细小晶粒不呈现方向性, 在各个方向对光具有相同反射率的缘故。

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*[M]. 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*[M]. New York: Plenum Press, 1981: 249
- [3] Bai Y L. *Res Mechanics*[J], 1990, 31: 133
- [4] Pak H R, Wittman C L. *Metallurgical Applications of Shock-Waves and High-Strain-Rate Phenomena* [M]. New York: Plenum Press, 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] Xue Q, Meyer Nesterenko M A. *Materials Science and Engineering*[J], 2004, 384A, 35
- [9] Nabil Bassim M. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2001, 119: 234
- [10] Stelly M, Dorneval R. In: Murr L.E, Staudhammer K P, Meyers M A eds. *Metallurgical Applications of Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena*[M]. New York: Marcel Dekker, 1986: 607
- [11] Pak H R, Wittman C L, Meyers M A. In: Murr L E, Staudhammer K P, Meyers M A eds. *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*[M]. New York: Marce Dekker, 1986: 607
- [12] Meyers M A, Pak H R. *Acta Mater*[J], 1986, 34: 2493
- [13] Grebe H A, Pak H R. Meyers M A. *Met Trans A*[J], 1985, 16: 761
- [14] Meyers M A, Meyer L W, Beatty J et al. *Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials*[M]. New York: Marcel Dekker, 1992
- [15] Andrade U R, Meyers M A, Vecchio K S et al. *Acta Metall Mater*[J], 1994, 42: 3183
- [16] Meyers M A, Andrade U, Chokshi A H. *Metall Mat Trans A*[J], 1995, 26A: 2881
- [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*[M]. New York: Marce Dekker, 1986: 657

Formation Mechanics of Adiabatic Shear Band for the Different Microstructures of TC6 Alloy

Sun Kun^{1,2}, Wang Fuchi¹, Cheng Xingwang¹, Miao Pu¹, Zhao Shuangzan¹

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

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

Abstract: Dynamic shearing experiment has been done for TC6 titanium alloy by using the technology of split Hopkinson bar. The formation mechanics of adiabatic shear band of TC6 titanium alloy have been studied by optical microscope (OP), scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). It is shown that the formation mechanics of adiabatic shear band are different due to the different microstructures for the TC6 titanium alloy. To the spherical equiaxed microstructures, its formation of shear band is due to the multiplication, moving and clogging of dislocation; and to the lamellar microstructures, the formation of shear band is due to the dynamic recrystallization.

Key words: titanium alloy; adiabatic shear band; micro-analysis; dynamic recrystallization

Biography: Sun Kun, Candidate for Ph. D., School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, E-mail: sunkun@bit.edu.cn