微观组织对 Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo 合金绝热剪切敏感性的影响

李建崇，李树奎，范群波，霍咚梅，刘　杰
(北京理工大学，北京 100081)

摘　要：对锻造态 Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo 合金采用不同的热处理工艺得到等轴、双态和网篮 3 种组织。使用分离式 Hopkinson Bar 技术对 3 种组织的试样进行动态剪切试验，研究了不同微观组织对该合金绝热剪切敏感性的影响。结果表明：当加载条件高于其临界应变率时，不同组织试样的承载时间均随着应变率的提高而降低；微观组织对该合金的绝热剪切敏感性影响较大，网篮组织绝热剪切敏感性最低，双态组织绝热剪切敏感性最高；双态组织剪切带附近基体相界处出现微裂纹，是造成其易于发生剪切破坏的主要原因。

关键词：钛合金；组织；绝热剪切敏感性；应变率
中图法分类号：TG146.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002-185X(2012)01-0045-04

钛合金具有密度低、比强度高、耐高温、耐腐蚀等优良性能，在航空、航天等工业领域已得到了广泛的应用[1,2]。但钛合金热导率较低，应变硬化能力较差，是一种绝热剪切敏感性较高的合金。钛合金在高应变率加载条件下易于产生绝热剪切带，从而引发变形与破坏，目前关于钛合金绝热剪切性能的研究已非常广泛[3-5]。本实验研究的 Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo 合金是一种在传统合金 TC4 基础上设计的新型钛合金，加入了 Mo、Zr 等元素从而获得了良好的高温性能。但钛合金的组织敏感性非常强，不同组织的钛合金其力学性能差别很大，因此本实验针对 Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo 合金采用不同的热处理工艺得到 3 种典型组织，并利用分离式 Hopkinson Bar 技术研究了该合金不同组织对其绝热剪切性能的影响。

1　实　验

Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo 合金为北京理工大学研制的高温钛合金，其具体成分如表 1 所示。测得其相变点为 945 ℃。

表 1　Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo 成分

Table 1　Chemical constitution of Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo alloy (ω/%)

Ti	Al	Mo	V	Zr	Fe
Bal.	5.82	1.47	4.10	4.08	0.04

该合金经常规锻造（$\alpha+\beta$ 锻造）得到的原始组织如图 1 所示。其显微组织为晶粒尺寸较均匀的等轴组织。本实验采用的热处理方法如表 2 所示。

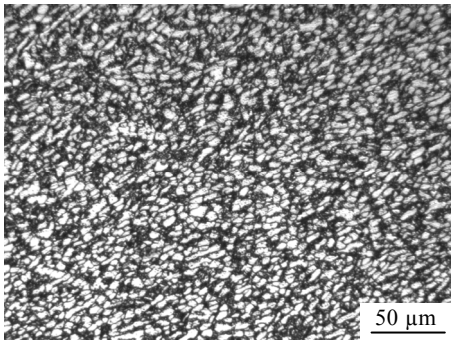

图 1　原始组织

Fig.1　Microstructure of Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo alloy in as-received state

表 2　热处理工艺参数

Table 2　Heat treatment technologies of Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo alloy

Code	Treating process	Microstructure
1#	750 ℃/1.5 h/AC	Equiaxed
2#	900 ℃/1.5 h/AC+600 ℃/4 h/AC	Bimodal
3#	960 ℃/1.5 h/AC	Lamellar

收稿日期：2011-01-11
作者简介：李建崇，男，1983 年生，博士生，北京理工大学材料学院，北京 100081，E-mail: jchlee1983@163.com

将热处理后的试样使用 Φ14.5 分离式 Hopkinson Bar 进行动态剪切试验，文献[6]中对该实验原理及实验装置进行了介绍。图 2 为动态剪切试验采用的帽形试样尺寸，由于其独特的结构特征，在外力作用下，塑性变形被限制在一个很窄的区域内，该区域为变形局域化区域。此区域内很容易发生绝热剪切变形，从而可以对材料的绝热剪切现象进行细致的研究[7]。

通过超动态应变仪及瞬态波形存储器，得到试样在一定应变率条件下动态剪切的时间-电压曲线，该曲线表征了材料从动态加载开始到产生绝热剪切带的承载时间，从而可以对材料在一定应变率条件下的绝热剪切敏感性进行表征。

2　结果及讨论

2.1　热处理后显微组织观察

钛合金经过 3 种热处理后的 1#、2#和 3#显微组织如图 3 所示。其中图 3a 为低温退火后形成的 1#等轴组织，其晶粒尺寸大约为 10 μm，晶粒较细，α 相分布较均匀；图 3b 为双重退火后形成的 2#双态组织，即在网篮基体上分布着等轴状初生 α 相；图 3c 为 β 退火后形成的 3#网篮组织，β 相薄片分布在浅色 α 相层片周围。

2.2　微观组织对绝热剪切敏感性的影响

图 4a~4d 分别为两种试样在应变率为 1700，2300，3400 和 4200 s^{-1} 时动态剪切的时间-电压曲线，从中可以看出：(1)如图 4a 所示，在应变率为 1700 s^{-1} 条件下 3 种试样均承受了 80 μs 而未出现应力塌陷，即此应变率条件下 3 种组织的试样均未发生绝热剪切破坏；当应变率提高到 2300 s^{-1} 时，如图 4b 所示，3 种组织都出现了应力塌陷，发生了剪切破坏，因此可以判断这 3 种组织的临界破坏应变率范围为 1700 到 2300 s^{-1} 之间。(2)当加载条件高于其临界应变率时，具有“网蓝组织”和“等轴组织”的两种试样的承载时间均随着应变率的提高而降低，即其敏感性随着应变率的增加而增加。这是因为随着随应变率的提高，材料变形局域化区域内的绝热温升不断提高，因此而产生的热软化效应超过了应变硬化和应变率硬化的总和，使材料的热粘塑性本构失稳过程加快并表现为材料的高度局域化，最终形成绝热剪切破坏[8]。(3)从图4b~4d中可以看出同一个规律，即当加载条件高于其临界应变率时，在相同应变率条件下，网篮组织在3种组织中的承载时间最长，等轴组织次之，双态组织的承载时间最短。因此这3种组织的绝热剪切敏感性由低到高依次是：网篮组织，等轴组织和双态组织。

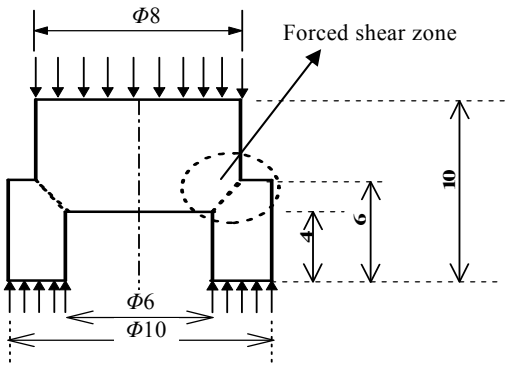

图 2　帽形试样尺寸

Fig.2　Geometrical shape and size of the hat specimen

微观组织对Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo合金绝热剪切敏感性的影响非常明显。图5为3种组织在同一应变率(2300 s^{-1})条件下产生的剪切带的微观形貌，从图中可以看出：通过β退火得到的是纵横交错的网篮状组织，因此剪切带在扩展的过程中需要不断改变方向冲破更

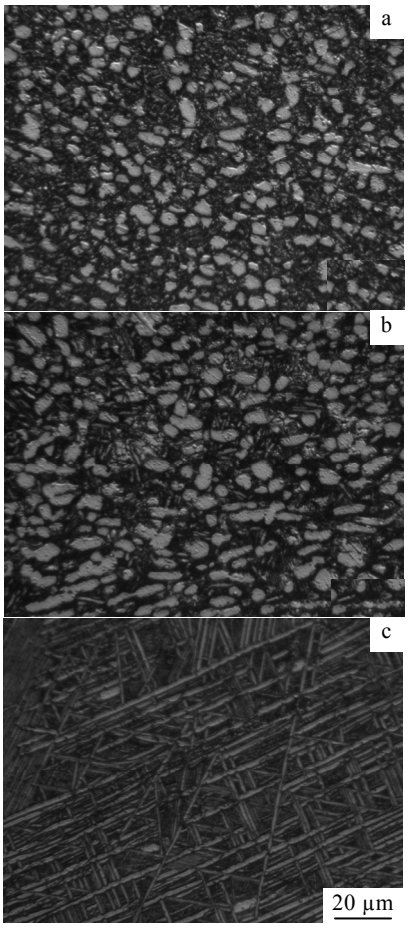

图 3　3 种热处理组织形貌

Fig.3　Microstructures of Ti-6Al-4V-4Zr-1.5Mo alloy with 3 kinds of heat treatments: (a) equiaxed morphology, (b) bimodal morphology , and (c) lamellar morphology

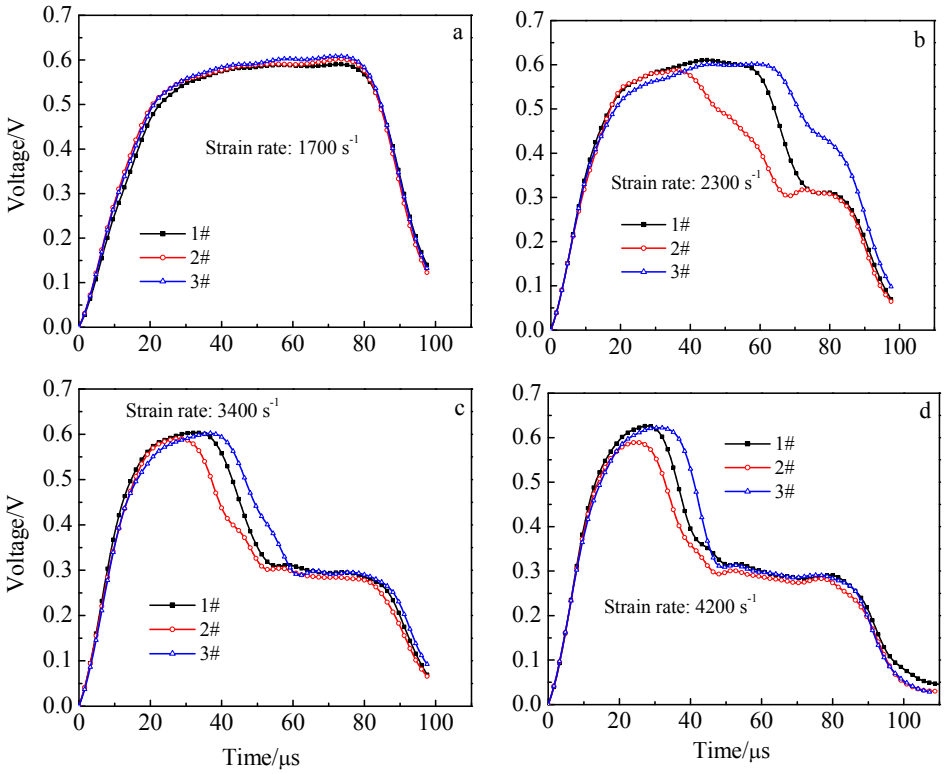

图 4　3 种试样在同一应变率下动态剪切的时间-电压曲线

Fig.4　Time-voltage curves for the 3 dynamic shearing specimens at the same strain rate: (a) 1700 s^{-1}, (b) 2300 s^{-1}, (c) 3400 s^{-1}, and (d) 4200 s^{-1}

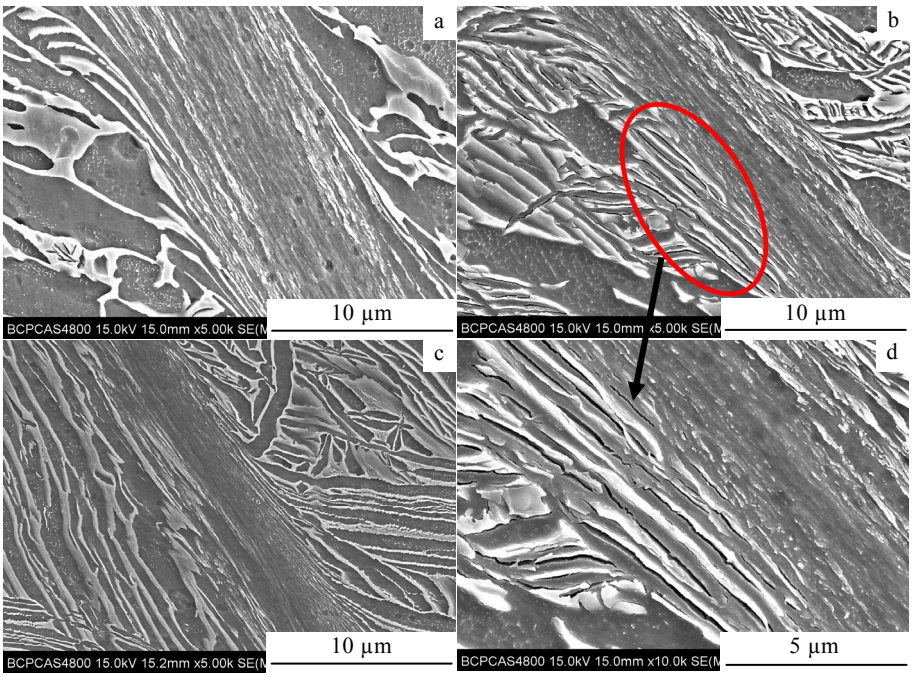

图 5　同一应变率下 3 种组织剪切带形貌

Fig.5　Morphologies of shearing bands of 3 kinds of microstructures at the same strain rate of 2300 s^{-1}: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) magnification of 2#

多的晶界的阻碍，同时在片状组织中运动方向的改变比在球状组织中更频繁，裂纹容易分叉形成次生裂纹，这些过程的结果使裂纹的总长度增加，需要对更多的金属体积塑性变形做功，从而具有更高的断裂韧性[9]；等轴 α 相具有较强的抗裂纹萌生的能力，有利于钛合金塑性和冲击性能的提高[10]，但由于其晶界较网篮组织少很多，裂纹比较容易扩展，因此其绝热剪切敏感性较网篮组织要高；从图 5b 中可以看出，双态组织靠近剪切带的基体组织中出现了比较多的微裂纹，而其他两种组织中均未出现。这些微裂纹的存在为剪切带的扩展提供了更多的路径，使其更加容易扩展，同时这些微裂纹在应变不断增加的过程中不断长大，并相互连接，最终形成造成材料失效的宏观裂纹。通过图 5d 可以观察到这些微裂纹绝大多数产生于 α/β 相界处，这是由于晶界处 α 相尤其是连续薄片状晶界 α 相的存在容易使应变被局限在软态的 α 相内，从而导致了晶界处的裂纹形核和断裂[11]。

3 结　论

1）低温退火后形成等轴组织，其晶粒尺寸大约为 10 μm；双重退火后形成双态组织，在网篮基体上分布着等轴状初生 α 相；β 退火后形成网篮组织，β 相薄片分布在浅色 α 相层片周围。

2）当加载条件高于其临界应变率时，3 种试样的绝热剪切敏感性随着应变率的增加而增加。

3）在相同应变率条件下，3 种组织的绝热剪切敏感性由低到高依次是：网篮组织，等轴组织和双态组织。

4）网篮组织较等轴组织晶界多从而更能有效阻止剪切带的扩展；双态组织由于晶界 α 相的存在容易在基体 α/β 相界出产生微裂纹，从而使剪切带更容易扩展。

参考文献　References

[1] Peng Yanping(彭艳萍), Zeng Fangchang(曾凡昌), Wang Junjie(王俊杰). *Material Engineering* (材料工程) [J], 1997, 10: 3

[2] Anon. *Advanced Materials &Processes* [J], 1999, 155 (3): 39

[3] Wright T W. *The Physics and Mathematics of Adiabatic Shear Bands* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 2

[4] Liao Shih-Chieh, Duffy J. *J Mech Phys Solids* [J], 1998, 46(11): 1190

[5] Lee Woei-Shyan, Lin Chi-Fneg. *Materials Science and Engineering* [J], 1998, 241: 48

[6] 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

[7] Meyers M A, Andrade U, Chokshi A H. *Metal Mater Trans* [J], 1995, 26A: 2881

[8] Dong Xinlong(董新龙), Wang Lili(王礼立), Wang Wu(王 悟) *et al*. *Explosion and Shock Waves* (爆炸与冲击)[J], 1999, 19(3): 222

[9] E.A.Ворисова. *Titanium Alloy Metallography* (钛合金金相学)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986: 246

[10] Cao Jingxia(曹京霞), Fang Bo(方 波), Huang Xu (黄旭等) *et al*. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属) [J], 2004, 28(2): 362

[11] Meyer L W, Manwarig S. In: Murr L E eds. *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena* [M]. New York: Marcel Dekker, 1986: 657

Effects of Microstructure on the Adiabatic Shear Banding Sensitivity of Ti-6Al-4V-4Zr-Mo Alloy

Li Jianchong, Li Shukui, Fan Qunbo, Huo Dongmei, Liu Jie

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An examination of the effects of microstructures on the adiabatic shear banding sensitivity of Ti-6Al-4V-4Zr-Mo alloy was reported. Using the technology of split Hopkinson bar, the dynamic shearing experiments on Ti-6Al-4V-4Zr-Mo alloy with different heat treatments were conducted. The obtained microstructures are divided into the lamellar, the equiaxed and the bimodal according to heat-treatment conditions. The results indicate that the lamellar microstructure has the lowest adiabatic shear banding sensitivity, while the bimodal microstructure has the highest. In the bimodal microstructure, small cracks are found in the α/β interface located in the matrix region near the adiabatic shear band, which is considered as the main reason why the bimodal ones have the highest adiabatic shear banding sensitivity.

Key words: titanium alloy; microstructure; adiabatic shearing sensitivity; strain rate

Corresponding author: Li Jianchong, Candidate for Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, E-mail: jchlee1983@163.com