

# 锻造工艺对 Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 合金绝热剪切敏感性的影响

李建崇, 李树奎, 范群波, 裴传虎

(北京理工大学, 北京 100081)

**摘要:** 对铸造态 Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 合金采用两种不同的锻造工艺 ( $\alpha+\beta$  锻造,  $\beta$  锻造) 进行热加工, 使用 Hopkinson Bar 技术对这两种不同状态的合金进行动态剪切试验, 研究了不同锻造工艺对该合金绝热剪切敏感性的影响。结果表明,  $\alpha+\beta$  锻后试样的微观组织为细小的等轴状组织,  $\beta$  锻后的组织为晶粒粗大的网篮状组织。当加载条件高于其临界应变率时, 两种试样的承载时间均随着应变率的提高而降低,  $\beta$  锻造后的试样较  $\alpha+\beta$  锻后的试样具有更高的绝热剪切敏感性。

**关键词:** 钛合金; 锻造; 绝热剪切敏感性; 组织

中图分类号: TG146.4<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)S1-060-04

钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性好等优点, 已被广泛应用于航空、航天等工业领域<sup>[1,2]</sup>。同时, 钛合金又是一种绝热剪切敏感性较高的合金, 在高应变率加载条件下, 极易以绝热剪切带的形式发生变形与破坏<sup>[3]</sup>。本实验研究的 Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 合金是一种在现有钛合金 Ti-6Al-4V 基础上设计的新型钛合金, 因 Mo、Zr 等元素的加入而具有良好的综合力学性能。但钛合金的力学性能对材料的微观组织非常敏感, 而其微观组织很大程度上取决于铸造后的锻造工艺。目前关于钛合金的绝热剪切性能的研究已经非常广泛<sup>[4-6]</sup>, 但是关于锻造工艺对钛合金绝热剪切性能影响的研究还鲜有报道。为此, 本实验对铸造态 Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 合金采用两种不同的锻造工艺 ( $\alpha+\beta$  锻造,  $\beta$  锻造) 进行热加工处理, 利用分离式 Hopkinson Bar 技术对 Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 合金在不同锻造工艺下的绝热剪切性能进行研究。

## 1 实验

Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 合金为北京理工大学研制的新型高温钛合金, 相变点为 945 °C, 其具体成分如表 1 所示。

表 1 Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 成分 (wt%)

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

合金的原始组织如图 1 所示。可以看出, 钛合金铸件显微组织为晶粒粗大的网篮状组织, 此种显微组织无法直接通过热处理等工艺进行改变, 需要对钛合金铸件进行锻造加工来细化其晶粒, 消除缺陷。钛合金的锻造工艺就其锻造温度与  $\beta/(\alpha+\beta)$  转变温度的关系, 可分为常规锻造 ( $\alpha+\beta$  锻造) 与高温锻造 ( $\beta$  锻造)<sup>[7]</sup>。采用的锻造工艺主要为先采用开坯锻造进行粗锻, 然后采用上述 2 种不同的锻造工艺进行精锻, 具体工艺参数列于表 2、表 3。

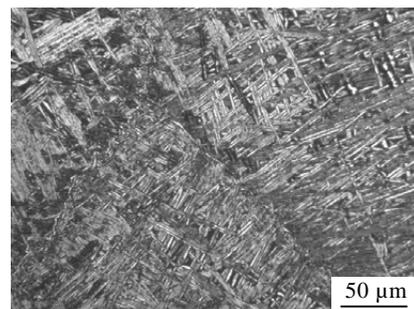


图 1 Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 合金原始组织

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

使用  $\Phi 14.5$  分离式 Hopkinson Bar 对 2 种锻造工艺处理后的试样进行动态剪切试验, 实验原理及实验装置参见文献[8]。动态剪切试验采用的帽形试样尺寸见图 2。由于试样独特的结构特征, 在外力作用下,

收稿日期: 2009-06-10

作者简介: 李建崇, 男, 1983 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: jchlee1983@163.com

塑性变形被限制在一个很窄的区域内，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<sup>[9]</sup>。

表 2  $\alpha+\beta$  锻造工艺参数

Table 2 ( $\alpha+\beta$ ) forging processing

Forging times	Heating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Holding time/h	Distortion/%
1	1100	1.5	70
2	1000	1	60
3	925	1	60
4	925	1	60

表 3  $\beta$  锻造工艺参数

Table 3  $\beta$  forging processing

Forging times	Heating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Holding time/h	Distortion/%
1	1100	1.5	70
2	1000	1	60
3	980	1	60
4	980	1	60

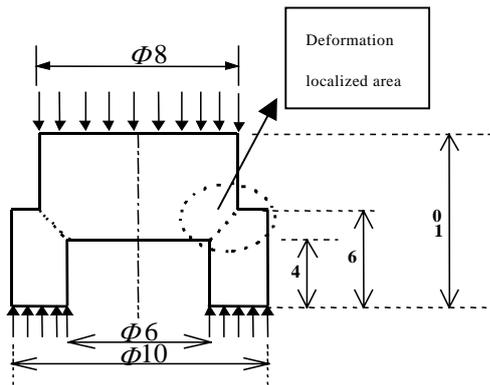


图 2 帽形试样尺寸(mm)

Fig.2 Geometrical shape and size of the hat specimen

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 锻造工艺后显微组织观察

钛合金经过  $\alpha+\beta$  锻造与  $\beta$  锻造（具体参数见表 2、表 3）后的显微组织如图 3 所示。从图 3a 中可以看出， $\alpha+\beta$  锻造得到了等轴状组织，为均匀分布的混合组织，其中有初生  $\alpha$  相和  $(\alpha+\beta)$  混合体，晶粒尺寸为 5  $\mu\text{m}$  左

右。形成这种组织的主要原因是：在  $\alpha+\beta$  锻造过程中同时发生  $\alpha$  与  $\beta$  晶粒形状的变化， $\beta$  晶粒被压扁，并沿着金属流动的方向被拉长、破碎，在一定温度与变形程度下开始发生再结晶现象，再结晶后的  $\alpha$  晶粒呈现扁球状，而一些未能完全进行再结晶的  $\alpha$  晶粒呈纤维状或杆状。从图 3b 中可以看出， $\beta$  锻造得到的显微组织为网篮状组织，其晶粒尺寸较大，并有部分原始  $\beta$  晶界残留，晶界不完整、不清晰。这是由于  $\beta$  锻造的温度高于该合金的相变点，因此最后形成的显微组织为网篮组织。由于变形温度较高，导致了晶粒不断长大。另外，已被打碎的晶粒有重结晶现象发生，因此最终形成晶粒尺寸较大、组织不均匀的网篮状微观组织。

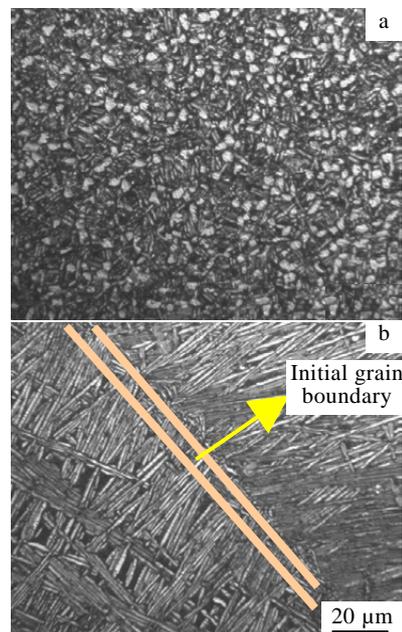


图 3 不同锻造工艺处理后的微观组织

Fig.3 Microstructure of Ti-6Al-4V-4Zr-Mo alloy by different forging processing: (a)  $\alpha+\beta$  forging and (b)  $\beta$  forging

### 2.2 锻造工艺对绝热剪切敏感性的影响

图 4 分别为 2 种试样在应变率为 1800, 2250, 2750  $\text{s}^{-1}$  时动态剪切的时间-电压曲线。两种试样在不同应变率下的承载时间列于表 4。从图 4a 可看出，在应变率 1800  $\text{s}^{-1}$  条件下 2 种试样均承受了 80  $\mu\text{s}$  而未出现应力塌陷，即二者均未发生绝热剪切破坏；当应变率升高到 2250  $\text{s}^{-1}$  时，如图 4b 所示， $\beta$  锻造后的试样的承载时间为 57.6  $\mu\text{s}$ ，即在 57.6  $\mu\text{s}$  时出现了应力塌陷，发生了剪切破坏，而  $\alpha+\beta$  锻造后的试样仍能完整承载 80  $\mu\text{s}$ ，即没有剪切现象出现；如图 4c 所示，当应变率达到 2750  $\text{s}^{-1}$  时，2 种试样均出现了应力塌陷，但  $\alpha+\beta$  锻造后的试样承载时间较  $\beta$  锻长。

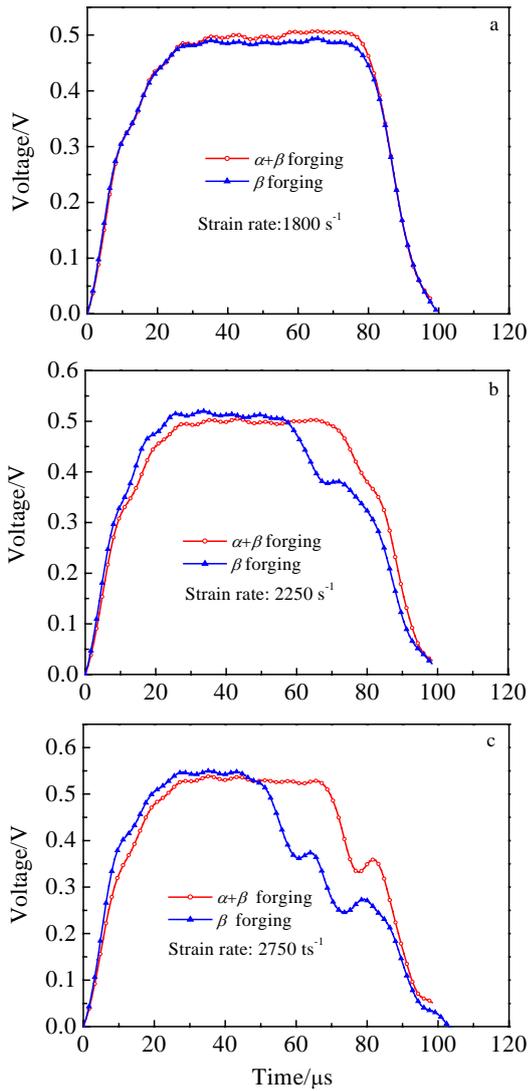


图 4 2 种试样在同一应变率下动态剪切的电压-时间曲线

Fig.4 Time-voltage curves for the two dynamic shearing specimens under the same strain rate: (a)  $1800\text{ s}^{-1}$ , (b)  $2250\text{ s}^{-1}$ , and (c)  $2750\text{ s}^{-1}$

表 4 2 种试样不同应变率条件下的承载时间

Table 4 Load-bearing time of the two specimens under different strain rates

Strain rate/ $\text{s}^{-1}$	Bearing time/ $\mu\text{s}$	
	$\alpha+\beta$ forging	$\beta$ forging
1800	80	80
2250	80	57.6
2750	67.2	49.2

因此，当加载条件高于其临界应变率时，两种试样的承载时间均随着应变率的提高而降低。在相同加载条件下， $\alpha+\beta$  锻造后试样的承载时间比  $\beta$  锻造后的试样长，所以  $\beta$  锻造后的钛合金较  $\alpha+\beta$  锻造后的钛合

金对绝热剪切更加敏感。

产生这种力学性能差异的主要原因是微观组织的影响。2 种不同的锻造工艺条件下产生了不同的微观组织，而钛合金的力学性能对其微观组织是非常敏感的。 $\alpha+\beta$  锻造后试样的微观组织为细小的等轴状组织，而  $\beta$  锻造后试样的微观组织为粗大的网篮状组织。首先，在钛合金中，等轴  $\alpha$  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<sup>[10]</sup>。其次，晶粒尺寸对钛合金力学性能的影响也比较大，晶粒尺寸越小则晶界的数量就会增加，从而使剪切带的扩展路径更加曲折，因此细小的晶粒组织能够有效地阻碍剪切带的扩展。第三，由于  $\beta$  锻造后试样的微观组织中存在部分残留的原始  $\beta$  晶界，在原始  $\beta$  晶界会随着温度的降低析出初生  $\alpha$  相，而在晶界处存在的  $\alpha$  相会使其断裂韧性急剧降低<sup>[11]</sup>。

综上所述，具有细小等轴状微观组织的  $\alpha+\beta$  锻造后试样具有较好的抵抗裂纹萌生以及阻碍剪切带扩展的能力； $\beta$  锻造后的组织由于晶粒尺寸较大以及原始  $\beta$  晶界的残留导致其断裂韧性的降低。因此  $\alpha+\beta$  锻造后，试样的绝热剪切敏感性较  $\beta$  锻造后试样要小，即相对于  $\beta$  锻造来说， $\alpha+\beta$  锻造可以有效地降低该合金的绝热剪切敏感性。

### 3 结 论

- 1)  $\alpha+\beta$  锻造后得到等轴状显微组织，晶粒尺寸为  $5\text{ }\mu\text{m}$  左右，组织均匀； $\beta$  锻造后得到网篮状组织，晶粒尺寸较大，组织不均匀，有部分原始  $\beta$  晶界存在。
- 2) 当加载条件高于其临界应变率时，2 种试样的承载时间均随着应变率的提高而降低。
- 3) 相同应变率条件下， $\alpha+\beta$  锻造后的试样较  $\beta$  锻造后的试样承载时间长，因此  $\alpha+\beta$  锻造后组织绝热剪切敏感性较  $\beta$  锻造差。
- 4)  $\alpha+\beta$  锻造后的试样具有细小的等轴状组织，相对于  $\beta$  锻造后具有粗大的网篮组织来说具有更好的抵抗裂纹萌生以及阻碍剪切带扩展的能力。

### 参考文献 References

[1] Anon. *Advanced Materials & Processes* [J], 1999, 155 (3): 39  
 [2] 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  
 [3] Lu Weixian(卢维娴), Wang Lili(王礼立). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报) [J], 1986, A22(4): 317  
 [4] Liao Shih-Chieh, Duffy J. *J Mech Phys Solids* [J], 1998, 46(11): 1190

- [5] Wright T W. *The Physics and Mathematics of Adiabatic Shear Bands* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 2
- [6] Lee Woei-Shyan, Lin Chi-Fneg. *Materials Science and Engineering* [J], 1998, 241: 48
- [7] Zhang Xiyan(张喜燕), Zhao Yongqing(赵永庆), Bai Chenguang(白晨光). *Titanium alloy and its application*(钛合金及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 176
- [8] 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
- [9] Meyers M A, Andrade U, Chokshi A H. *Metal Mater Trans*[J], 1995, 26A: 2881
- [10] Cao Jingxia(曹京霞), Fang Bo(方波), Huang Xu(黄旭) et al. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2004, 28(2): 362
- [11] Ward C H, Williams J C, Thompson A W. *Scripta Metallurgica et Materialia* [J], 1993, 28: 1017

## Effects of Forging Processing on Adiabatic Shearing Sensitivity of Ti-6Al-4V-4Zr-Mo Alloy

Li Jianchong, Li Shukui, Fan Qunbo, Pei Chuanhu  
(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The casting Ti-6Al-4V-4Zr-Mo alloy was forged using two different forging methods, including forging at  $\beta$  phase range, as well as forging at  $\alpha+\beta$  phase range. Dynamic shearing experiments on the two kinds of materials were carried out by the technology of split Hopkinson Bar. The adiabatic shearing sensitivity under different morphologies and different strain rates were studied. The results show that the specimen by  $(\alpha+\beta)$  forging processing has relatively lower adiabatic shearing sensitivity than that by  $\beta$  forging processing, because the former is composed of the fine equiaxed grains and the latter is characterized as big lamellar morphology.

**Key words:** titanium alloy; forging processing; adiabatic shearing sensitivity; microstructure

---

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