

# TC18 钛合金热压参数对流动应力与显微组织的影响

Effects of Hot Process Parameters on Flow Stress and Microstructures of TC18 Titanium Alloy

李红恩<sup>1</sup>, 沙爱学<sup>2</sup>

(1 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

LI Hong-en<sup>1</sup>, SHA Ai-xue<sup>2</sup>

(1 Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China;

2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 通过在 700~950℃和应变速率 0.001~50s<sup>-1</sup>条件下的热模拟实验,系统研究了 TC18 钛合金应变速率、变形温度对变形抗力和显微组织的影响。结果表明:提高变形温度或降低应变速率,可显著降低 TC18 合金变形过程中的真应力,与单相区相比,两相区变形抗力对温度的变化更为敏感。在 $\alpha+\beta$ 区变形时, $\alpha$ 相和 $\beta$ 相都参与变形,球状初生 $\alpha$ 沿形变方向略有拉长, $\beta$ 相沿金属流动方向形成纤维组织; $\beta$ 相变点以上温度变形时, $\beta$ 相沿金属流动方向呈纤维状分布,在 950℃可以观察到再结晶的等轴 $\beta$ 晶粒。

**关键词:** TC18 钛合金; 热变形; 显微组织

**中图分类号:** TG146.2+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2010)01-0085-04

**Abstract:** The effect of strain rate and deformation temperature on the deformation resistance and the microstructure of TC18 titanium alloy was studied through heat simulating test at 700-950℃ and strain rate 0.001-50s<sup>-1</sup>. The results show that, when the deformation temperature increases or the strain rate decreases, the real stress can be reduced obviously. Comparing to deformation in  $\beta$  phase, deformation resistance in  $\alpha+\beta$  phase is more sensitive to the change of temperatures. When  $\alpha+\beta$  phase deformed,  $\alpha$  and  $\beta$  phases join in deformation at the same time, but deformation degree is different. Preliminary equiaxed alpha phase is elongated slightly and beta phase changes to fiber texture along deformation direction. When  $\beta$  phase deformed, beta phase is fibrous along metal flowing direction, and equiaxed beta grain can be seen when the deformed temperature is above 950℃.

**Key words:** TC18 titanium alloy; hot deformation; microstructure

TC18 钛合金是典型的过渡型合金,具有良好的热加工性、焊接性、淬透性和可热处理强化性<sup>[1-3]</sup>。该合金双重退火后的强度在 1080MPa 以上,淬透截面为 250mm;固溶时效后的强度在 1280MPa 以上,淬透截面为 100mm,特别适合制造飞机上的大型主承力构件,已经在俄罗斯多种型号的军民飞机上获得了广泛应用<sup>[4-6]</sup>。TC18 合金力学性能对热变形工艺和热处理工艺都很敏感,开发合适的热变形工艺是获得最佳性能匹配及良好高低倍组织的关键因素之一。热变形工艺参数主要包括加热温度、应变速率、保温时间、变形量等,以往的研究主要针对 TC18 合金模锻变形温度、变形量等工艺参数展开<sup>[7,8]</sup>。本工作通过在 700~950℃和应变速率 0.001~50s<sup>-1</sup>下进行热模拟实验,系统研究了应变速率、加热温度对 TC18 合金变形

抗力和显微组织的影响,为制定合理的 TC18 合金热变形工艺提供理论和技术上的支持。

## 1 实验材料和方法

实验所用材料是宝钛公司生产的  $\phi 170\text{mm}$  TC18 钛合金棒材,炉号为 548-20061318,化学成分(质量分数/%)如下:Al 5.1,Mo 5.0,V 5.0,Cr 0.93,Fe 0.93,C 0.02,N 0.01,H 0.001,O 0.1,其余为 Ti,相变点  $T_{\beta}=865^{\circ}\text{C}$ 。图 1 是原材料的显微组织,显微组织由等轴  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织组成。热模拟实验在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行,采用等温恒应变速率压缩变形方式,试样尺寸为  $\phi 8\text{mm}\times 15\text{mm}$ 。实验温度:700,750,800,850,880,900℃和 950℃;应变速

率:  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ , 1,  $10s^{-1}$  和  $50s^{-1}$ 。系统升温时间 1min, 保温 2min 后进行真应变约为 70% 的压缩变形, 试样变形后空冷到室温。变形过程中系统自动控制和采集变形温度、变形速率和变形量。变形后的试样沿轴向中心线纵切, 进行显微组织观察。

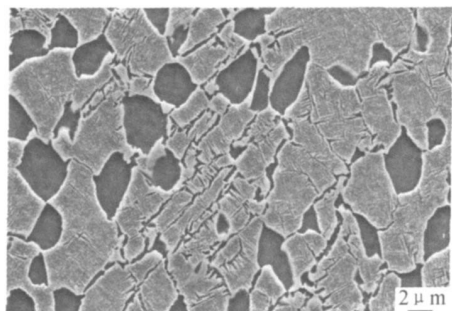


图 1 TC18 钛合金棒材原始组织 SEM 照片  
Fig. 1 SEM image of original microstructures of TC18 titanium alloy bar

## 2 实验结果与分析

### 2.1 应力-应变曲线

TC18 钛合金在不同温度和应变速率下的真应力-真应变曲线见图 2。由图 2 可见, 提高变形温度或降低应变速率, 可显著降低 TC18 合金变形过程中的真应力。 $T_{\beta}$  以下变形时, 真应力随温度变化很大;  $T_{\beta}$  以上变形时变化较小, 说明  $\alpha + \beta$  两相区变形抗力对温度的变化更为敏感。当应变速率低于  $1s^{-1}$  且变形温度较高 ( $> 850^{\circ}C$ ) 时, 应力-应变曲线为动态回复型, 即变形初期以加工硬化为主, 而后出现动态回复, 抵消部分加工硬化, 最后变形过程的加工硬化几乎完全被动态回复所引起的软化所抵消, 表现为流变应力不随应变增加而增加, 进入稳态。当应变速率提高到  $10s^{-1}$  时, 变形温度低于  $850^{\circ}C$  时, 应力-应变曲线呈现单峰的动态再结晶型; 变形温度高于  $850^{\circ}C$  时, 应力-应变曲

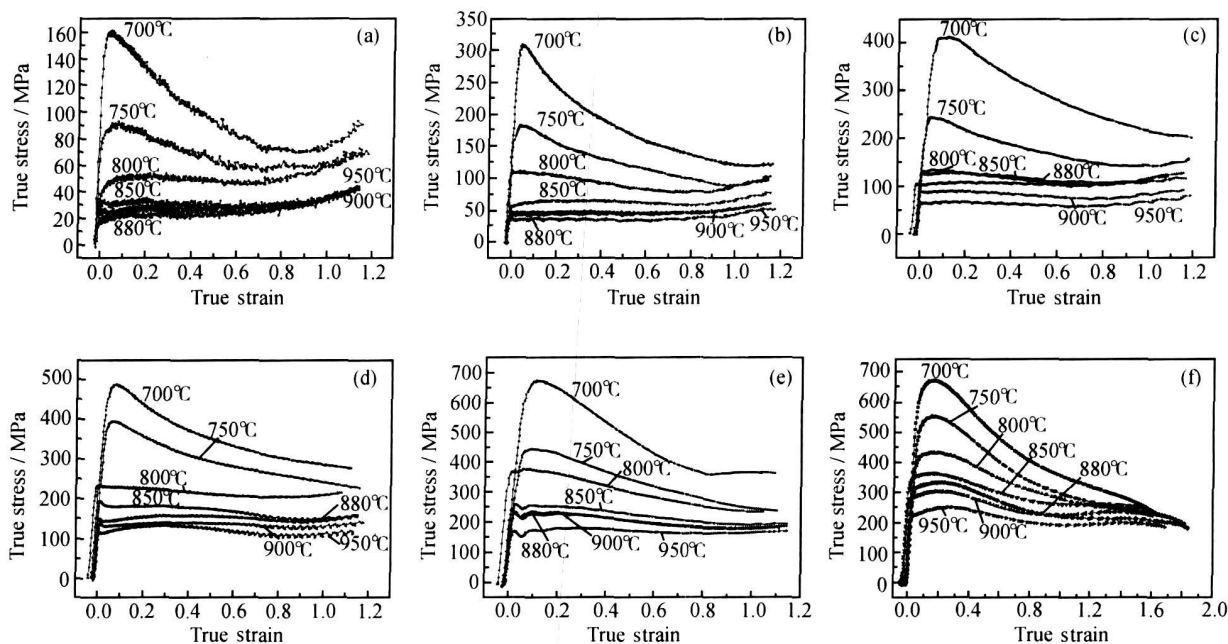


图 2 TC18 钛合金在不同温度和应变速率下的真应力-真应变曲线

(a)  $0.001s^{-1}$ ; (b)  $0.01s^{-1}$ ; (c)  $0.1s^{-1}$ ; (d)  $1s^{-1}$ ; (e)  $10s^{-1}$ ; (f)  $50s^{-1}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of TC18 titanium alloy at different temperatures and strain rates

(a)  $0.001s^{-1}$ ; (b)  $0.01s^{-1}$ ; (c)  $0.1s^{-1}$ ; (d)  $1s^{-1}$ ; (e)  $10s^{-1}$ ; (f)  $50s^{-1}$

线呈现多峰的动态再结晶型。当应变速率提高到  $50s^{-1}$  时, 在所有实验温度下的应力-应变曲线均为单峰的动态再结晶型。这时变形初期是加工硬化阶段, 此阶段仅出现较缓慢的动态回复, 硬化作用大于软化, 表现为应力不断提高; 当应变达到约 0.7 的峰值应变时, 开始形成再结晶晶粒; 随着动态再结晶的逐渐加

剧, 软化作用大于硬化作用, 于是曲线下降。

### 2.2 显微组织

图 3 为应变速率  $1s^{-1}$  时不同温度变形后的显微组织。由图 3 可见, 在  $\alpha + \beta$  区变形时,  $\alpha$  相和  $\beta$  相都参与变形, 球状初生  $\alpha$  沿变形方向略有拉长,  $\beta$  相沿金属流动方向形成纤维组织。 $\beta$  相变点以上温度变形时,

金属沿流动方向呈纤维状分布。TC18 合金中  $\beta$  相稳定性很高, 在变形后的空冷过程中未发生分解。另外

由图 3(c) 可见, 由于升温 and 保温时间很短, 在 880℃ 仍有极少量  $\alpha$  相存在, 由于数量很少, 不会对金属流动

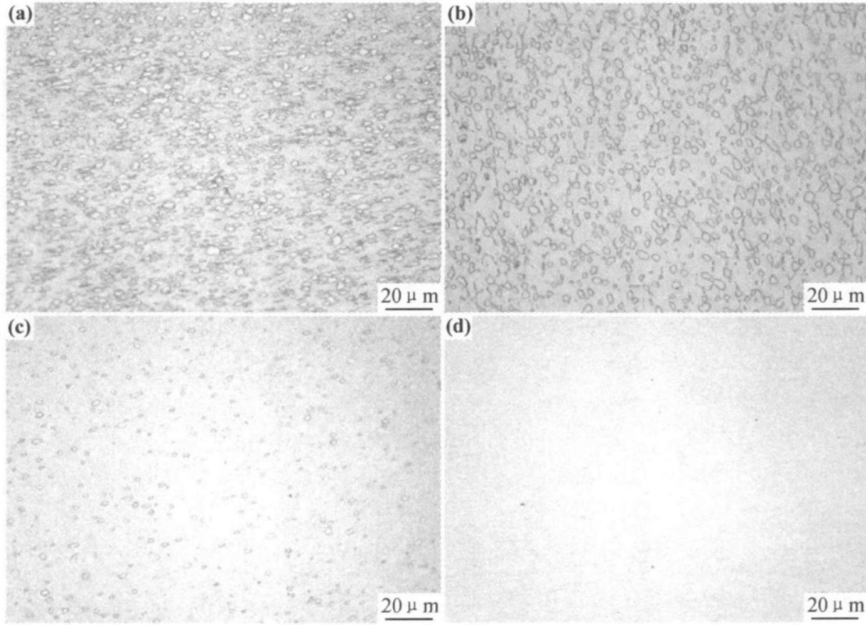


图 3 TC18 钛合金在 1 s<sup>-1</sup> 应变速率下不同温度变形后的空冷组织

(a) 750℃; (b) 850℃; (c) 880℃; (d) 950℃

Fig. 3 Microstructures of TC18 titanium alloy while deformed at different temperatures and cooled in air at strain rate of 1 s<sup>-1</sup>

(a) 750℃; (b) 850℃; (c) 880℃; (d) 950℃

产生明显的阻碍作用。

2.3 与中等强度钛合金变形抗力的比较

TC18 钛合金变形抗力与最常用的中等强度钛合金 TC4, TA15 变形抗力的比较是锻造技术人员十分关心的, 图 4 给出了两种典型应变速率下三个合金最大变形抗力-温度曲线。可以看出, 在相同加热温度下, 应变速率低时变形抗力由高到低的顺序是 TA15  $\rightarrow$  TC4  $\rightarrow$  TC18(图 4(a)); 应变速率高时变形抗力由高到低的顺序是 TA15  $\rightarrow$  TC18  $\rightarrow$  TC4(图 4(b))。由于

TC18 钛合金的相变点比 TC4, TA15 低 120℃ 左右, 实际模锻温度相应也低, 因此更有意义的比较应该在三个合金各自典型的模锻温度下进行, 结果见图 5。由图 5 可见, 在水压机上热模锻通常采用的低应变速率(0.01 s<sup>-1</sup>) 下, TC18 钛合金变形抗力与 TA15 相当, 高于 TC4; 在接近锤上模锻的高应变速率(50 s<sup>-1</sup>) 下, TC18 钛合金变形抗力明显高于 TA15 和 TC4。这意味着 TC18 钛合金锤上变形时过热倾向更加明显, 因此锻造工艺参数和工艺过程的控制也应更加严格。

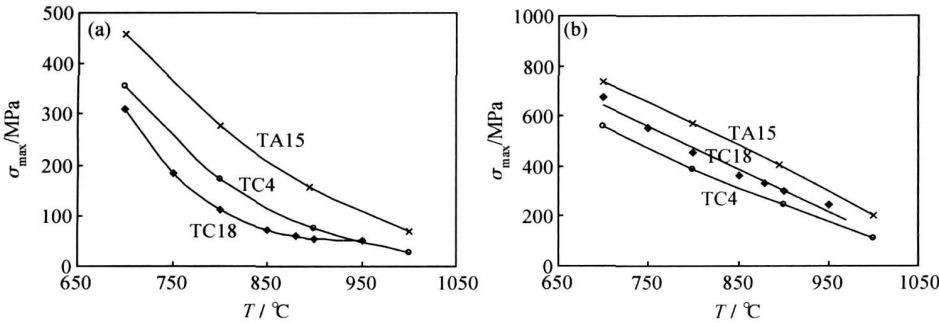


图 4 TC4, TA15, TC18 钛合金不同应变速率下最大变形抗力的比较

(a)  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $\dot{\epsilon} = 50 \text{ s}^{-1}$

Fig. 4 Comparison of the maxium deformation resistance of TC4, TA15 and TC18 alloys at different strain rates

(a)  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $\dot{\epsilon} = 50 \text{ s}^{-1}$

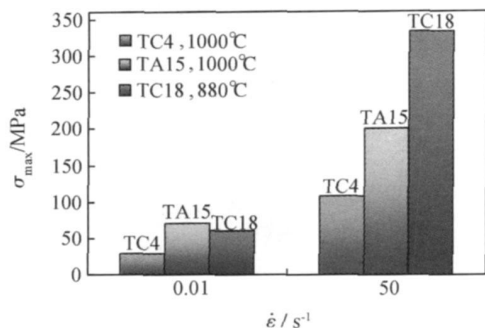


图5 TC4, TA15, TC18 钛合金在典型模锻温度下最大变形抗力的比较

Fig. 5 Comparison of the maximum deformation resistance of TC4, TA15 and TC18 alloys at different typical die-model temperatures

### 3 结论

(1) 提高变形温度或降低应变速率, 可显著降低 TC18 钛合金变形过程中的真应力; 与  $\beta$  区相比,  $\alpha + \beta$  两相区变形抗力对温度的变化更为敏感。

(2) 在  $\alpha + \beta$  区变形时,  $\alpha$  相和  $\beta$  相都参与变形, 球状初生  $\alpha$  沿变形方向略有拉长,  $\beta$  相沿金属流动方向形成纤维组织;  $\beta$  相变点以上温度变形时,  $\beta$  相沿金属流动方向呈纤维状分布, 在 950℃ 可以观察到再结晶的等轴  $\beta$  晶粒。

(3) 当锤上模锻(应变速率接近  $50\text{s}^{-1}$ ) 时, 在各自的锻造温度下, TC18 钛合金变形抗力明显高于 TA15 和 TC4。

(上接第 84 页)

### 4 结论

(1) Hastelloy G-4 合金焊接接头试样的平均腐蚀速率为 5.0319mm/a, 母材试样的平均腐蚀速率为 5.7970mm/a, 接头的耐腐蚀性能稍优于母材。

(2) 采用 Cr 含量高配比焊丝, 提升焊缝偏析组织的晶界 Cr 含量, 改善焊缝耐晶间腐蚀性能。

(3) 尽量减少焊接热输入, 严格控制层间温度, 有效利用焊接热循环固溶处理已有焊缝, 使其析出相溶解, 促进成分均匀, 可以改善焊缝耐晶间腐蚀性能。

#### 参考文献

- [1] 邢卓. Hastelloy C 系列合金综述[J]. 化工设备与管道, 2007, 44(2): 51-58.

#### 参考文献

- [1] FANNING J C, BOYER R R. Properties of TIMETAL 555-a new near  $\beta$  titanium alloy for airframe components [A]. LÜTJERING G, ALBRECHT J. Ti+2003 Science and Technology [C]. Hamburg: DGM, 2004. 2643-2649.
- [2] FROES F H, BOMBERGER H B. The  $\beta$  titanium alloy [J]. Metals, 1985, (7): 28-37.
- [3] KUBIAK K, HADASIK E, SIENIAWSKI J, et al. Influence of microstructure on hot plasticity of Ti-6Al-4V and Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloys [A]. LÜTJERING G, ALBRECHT J. Ti+2003 Science and Technology [C]. Hamburg: DGM, 2004. 371-376.
- [4] POLKIN S, RODIONOV V L, STROSHKOV A N, et al. Structure and mechanical properties of VT22( $\alpha + \beta$ ) high strength titanium alloy semiproducts [A]. FROES F H, CAPLAN I, ed. Titanium'92 [M]. San Diego: TMS, 1992. 1569-1572.
- [5] 鲍利素娃 E A. 钛合金金相学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [6] 王金友, 葛志明, 周彦邦. 航空用钛合金 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [7] 盛险峰, 刘志文, 朱益藩. 变形及热处理工艺对 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe 合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 金属学报, 1999, 35(S1): 465-468.
- [8] 沙爱学, 李兴无, 王庆如. 热变形温度对 TC18 钛合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(8): 1167-1171.

收稿日期: 2008-12-03; 修订日期: 2009-08-08

作者简介: 李红恩(1969—), 女, 硕士, 主要从事飞机用钛合金研究, 联系地址: 沈阳市 725 信箱 306 室(110035), E-mail: lhongen@126.com

- [2] CROOK P, CARUSO M, KINGSEED D. Corrosion resistance of a new wrought Ni-Cr-Mo alloy [J]. Materials Science and Design, 1997, 36(3): 49-52.
- [3] SIDHU R, OJO O, CHATURVEDI M. Microstructural analysis of laser beam welded directionally solidified Inconel 738 [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2007, 38A (4): 858-870.
- [4] OGBORN J, OLSON D, CIESLAK M. Influence of solidification on the microstructural evolution of nickel base weld metal [J]. Materials Science and Engineering A, 1995, 203: 134-139.
- [5] HUERTA D, SIEFERT B. Intercrystalline corrosion of surface welds of nickel alloys on carbon steel [J]. Journal of Material Science, 2005, 40: 5153-5159.

基金项目: 国家科技部国际科技合作项目 (2006DF52680)

收稿日期: 2008-12-25; 修订日期: 2009-07-28

作者简介: 倪加明(1983—), 男, 博士研究生, 从事激光焊接与材料焊接性能方面研究工作, 联系地址: 上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室(200240), E-mail: njm@sjtu.edu.cn