

# TC11 钛合金热变形性能的试验研究

## Study on Hot Deformation Properties of TC11 Titanium Alloy

上海航天动力技术研究所 孙海全 朱小兵 肖晓青

**[摘要]** 研究了 TC11 钛合金在温度 600~800℃、应变速率 0.001s<sup>-1</sup>~1s<sup>-1</sup> 条件下的高温压缩变形行为,分析了变形温度、应变速率对热变形过程中变形抗力和显微组织的影响,探讨了 TC11 钛合金热旋压变形的可行性,为钛合金热旋工艺制定提供理论和试验依据。

**关键词:** TC11 钛合金 热压缩 旋压 变形抗力 显微组织

**[ABSTRACT]** In this paper, the hot deformation behaviors of TC11 titanium alloy are investigated at temperature range of 600-800 °C and strain rate range of 0.001s<sup>-1</sup>-1s<sup>-1</sup> by hot-compression test. It is analyzed that the effect of deformation temperature and strain rate on deformation resistance and microstructure in the hot-compression process, and the feasibility of TC11 titanium alloy for hot spinning deformation is discussed.

**Keywords:** TC11 titanium alloy Hot-compression Spinning Deformation resistance Microstructure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.08.080

TC11 钛合金具有密度低、比强度高、导热率低和耐腐蚀等特点,是 Ti-Al-Mo-Zr-Si 系的两相热强型钛合金,可在 500℃ 下长期工作,具有优异的热强性,并具有较高的室温强度和良好的热加工工艺性能,适于制造航空发动机的压气机盘、叶片、鼓筒和轴类等零件<sup>[1-2]</sup>,在航空、航天、兵器等薄壁壳体零件的结构轻量化需求中有着广泛的应用前景<sup>[3]</sup>,是未来导弹发动机壳体的备选材料之一。

TC11 钛合金热加工成形温度范围窄,变形抗力大,其变形抗力和显微组织对应变温度、应变速率很敏感,易造成产品的显微组织不均匀和成形过程中变形不均匀,严重影响产品质量的稳定性<sup>[4-5]</sup>。为探讨 TC11 钛合金合适的旋压温度,需要开展 TC11 钛合金热压缩模拟试验,研究变形温度、变形速率对 TC11 钛合金力学性能和显微组织的影响。本文针对 TC11 钛合金热旋压成形需求,进行了温度 600℃~800℃、应变速率(ε) 0.001~1s<sup>-1</sup> 下的热压缩试验,得到该合金在不同应变温

度和应变速率条件下的流动应力曲线,探讨了热加工条件下微观变形机制与组织变化规律,为 TC11 钛合金热旋压成形工艺的制定提供一定的理论与试验依据。

### 1 试验

#### 1.1 试验材料

试验用 TC11 钛合金是由宝鸡有色金属加工厂生产的 φ320mm 双重退火态的热轧管材,其主要化学成分见表 1。双重退火制度为 960℃/1hAC+530℃/6hAC,退火后组织为等轴 α 相 + β 转,是均匀分布的混合组织,其中有初生相 α (亮块)和 α + β 混合体的 β 转 (暗块),这种组织是合金在(α + β)区内低于相变点 30℃~50℃ 的温度变形时所获得的<sup>[6]</sup>,其显微组织形貌如图 1 所示。

表1 TC11钛合金化学成分(质量分数) %

合金元素					杂质			
Al	Mo	Zr	Si	Ti	Fe	H	O	N
6.50	3.38	1.72	0.29	余量	0.054	0.0029	0.12	0.008

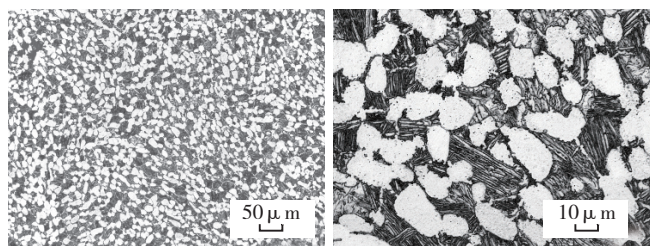


图1 TC11钛合金双重退火态等轴组织

Fig.1 Equiaxed microstructure of TC11 titanium alloy under double annealing state

#### 1.2 热模拟压缩试验参数的选取

为研究不同大小级别的应变速率对旋压成形过程的影响,热模拟的变形速率需根据旋压工艺的变形速率来确定,旋压有效应变速率计算公式<sup>[7]</sup>:

$$\epsilon_e \geq \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{v_0 \sin \alpha_p}{t_0(1 - \phi_t)} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left( \frac{t_{0f}}{t_f} \right)^2 \sin^2 \alpha_p}$$

其中,  $v_0$  为进给速度;  $\alpha_p$  为旋轮成形角; 初始壁厚为  $t_0$ ,  $t_f$ ,  $t_{\theta}$  分别为旋压前、旋压后、旋压过程中不同  $\theta$  层的壁厚;  $\phi_i$  为壁厚减薄率。

旋压参数设定为: 旋压毛坯壁厚 10mm, 第一道次旋轮与芯模的间隙  $X_3=8.80\text{mm}$ ,  $X_1=7.6\text{mm}$ ,  $X_2=6.50\text{mm}$ , 进给速度为 1.2mm/s, 旋轮前角  $\alpha_p$  为  $22^\circ$ 。

最终壁厚  $t_{\beta}=8.80\text{mm}$ ,  $t_{\gamma}=7.6\text{mm}$ ,  $t_{\rho}=6.50\text{mm}$ , 对应的减薄率  $\phi_i$  分别为 12%、24%、35%, 代入上式, 得到不同减薄率下的最大旋压应变速率为  $0.06\text{s}^{-1}$ 、 $0.07\text{s}^{-1}$ 、 $0.08\text{s}^{-1}$ , 最大在  $0.1\text{s}^{-1}$  左右。确定热压缩模拟的应变速率范围为  $0.001\text{s}^{-1}$ 、 $0.01\text{s}^{-1}$ 、 $0.1\text{s}^{-1}$ 、 $1\text{s}^{-1}$ 。

根据生产经验和文献查阅初步确定热旋温度为  $600^\circ\text{C}$  ~  $800^\circ\text{C}$ , 选取的热压缩的温度数值分别为  $600^\circ\text{C}$ 、 $650^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 。

### 1.3 试验方法

热变形试验在 Gleeble-1500 热模拟机上进行。压缩试样尺寸为  $\phi 8\text{mm} \times 12\text{mm}$ , 应变速率范围为  $0.001\text{s}^{-1}$ 、 $0.01\text{s}^{-1}$ 、 $0.1\text{s}^{-1}$ 、 $1\text{s}^{-1}$ , 应变温度为  $600^\circ\text{C}$ 、 $650^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ , 每个试样的变形量为 60%。试验结束后立刻水淬以保留变形组织, 采用光学显微镜对变形后组织进行观察, 试样所用腐蚀剂为: 5%HF+15%HNO<sub>3</sub>+80%H<sub>2</sub>O。

## 2 结果与讨论

### 2.1 应力-应变曲线

图 2 为应变速率为  $0.001\text{s}^{-1}$ 、 $0.1\text{s}^{-1}$  时的不同温度的应力-应变曲线, 图 3 为  $650^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$  时不同应变速率的应力-应变曲线。从图 2 和图 3 中可以看出: 材料的应力-应变行为表现出先硬化后软化的趋势, 最后达到一种相对稳定的应力水平; 相同变形速率下, 变形温度越低, 变形抗力就越大; 相同变形温度下, 应变速率越大, 变形抗力就越大。低温变形时最大变形抗力所对应的应变要大于高温变形时, 应变增加到约 0.15 左右时, 变形抗力达到最大值; 在应变为 0.6 左右, 达到稳定状态, 变形抗力值基本保持恒定。

### 2.2 变形条件对变形抗力的影响

图 4 为最大变形抗力  $\sigma_m$  与应变温度的关系图, 图 5 为  $\sigma_m$  与应变速率的关系图。从图 4 可以看出, 随着变形温度的增加, 变形抗力逐渐减小。这是由于温度升高, 动态回复和再结晶进行得越充分, 变形抗力越来越小。图 4 中各个温度区间变形抗力的降幅较均匀, 温度和变形抗力基本呈线性关系;  $700^\circ\text{C}$  ~  $800^\circ\text{C}$  时不同应变速率下变形抗力的降幅随变形温度的增加越来越大,  $650^\circ\text{C}$  ~  $700^\circ\text{C}$  的降幅基本相等, 说明 TC11 钛合金在  $650^\circ\text{C}$  ~  $700^\circ\text{C}$  对应变速率不太敏感, 在  $700^\circ\text{C}$  ~  $800^\circ\text{C}$  对

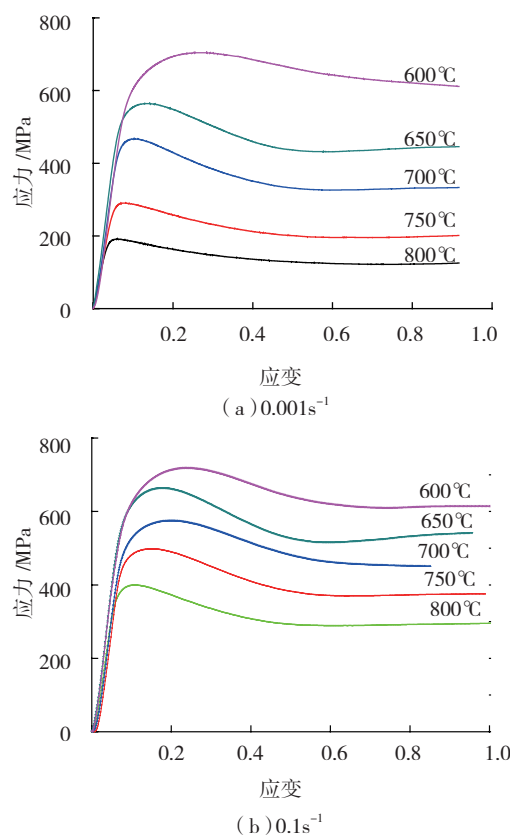


图 2 相同应变速率、不同温度下的压缩应力-应变曲线  
Fig.2 Stress-strain curves of TC11 titanium alloy at same strain rate and different temperatures

应变速率较敏感。

在图 5 中, 应变速率在  $0.001\text{s}^{-1}$  ~  $0.01\text{s}^{-1}$  区间变化时, 变形抗力的增幅较大, 最大增幅达 130MPa; 应变速率在  $0.1\text{s}^{-1}$  ~  $1\text{s}^{-1}$  区间变化时, 变形抗力的增幅较小, 最小增幅为 15MPa; 在较高温下 ( $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ ),  $\sigma_m$  随着应变速率的增大而增大, 但是, 随着应变速率的增大, 变形抗力增加的幅度却越来越小, 变形抗力与应变速率之间呈非线性的关系。  $700^\circ\text{C}$  ~  $800^\circ\text{C}$  时, 最大变形抗力的增幅随应变速率的增加越来越小, 说明在此温度范围内动态回复和再结晶随应变速率的增加进行得越来越充分。

变形速率增加会造成位错效应和温度效应, 位错效应促使变形抗力增大, 温度效应促使变形抗力降低<sup>[8]</sup>。图 5 中,  $650^\circ\text{C}$  时, 变形抗力  $\sigma_m$  也有随应变速率逐渐增大的趋势, 但是当应变速率处于  $0.1\text{s}^{-1}$  和  $1\text{s}^{-1}$  时, 变形抗力  $\sigma_m$  几乎相同, 说明在这个区间, 应变速率造成变形抗力的增加和温度效应造成的变形抗力的减小的程度是一样的, 最终使变形抗力保持稳定;  $600^\circ\text{C}$  时, 不同应变速率下的峰值应力  $\sigma_m$  均为 700MPa 左右, 没有随应变速率的变化表现出增加或减小的趋势, 说明 TC11 钛合金在  $600^\circ\text{C}$  下, 温度效应显著。还可以看出,  $650^\circ\text{C}$  ~  $700^\circ\text{C}$

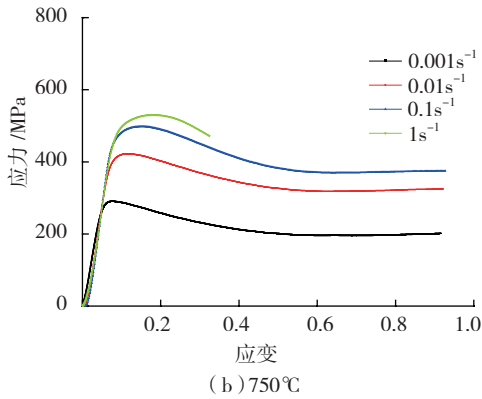
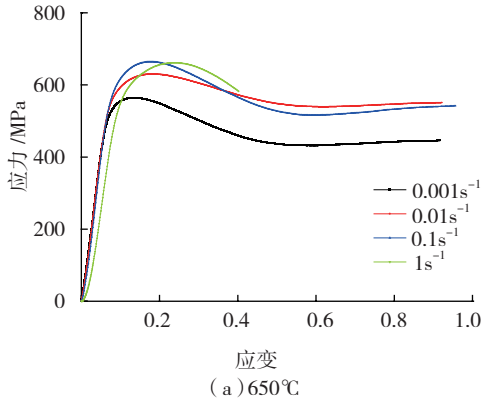


图3 相同温度、不同应变速率下的压缩应力-应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curves of TC11 titanium alloy at same temperature and different strain rates

时随着变形速率的增大,变形抗力虽然增加,但是增加的幅度很小,可以认为,该合金在该温度范围内不是应变速率敏感材料,在旋压的时候,变形速率有较宽的选择范围。

在钛合金热旋时,温度偏低,金属的变形抗力大,塑性差,在旋压过程中容易产生裂纹;温度过高又容易使变形后的金属晶粒长大,氧化加剧,降低旋压后的综合性能,并且温度过高使得变形抗力过小,材料变软,很容易发生起皱缺陷。综上所述,650℃~750℃是TC11钛合金比较合理的旋压温度,在650℃~750℃、0.1s<sup>-1</sup>~1s<sup>-1</sup>应变速率下,温度效应和速率效应几乎相抵消,变形抗力基本保持不变,有利于旋压过程中合金均匀化变形。此外,在此温度区间旋压变形时,变形速率有较宽的选择范围,通过调整进给比可改善钛合金旋压成形质量。

### 2.3 变形条件对显微组织的影响

图6为TC11钛合金在650℃、不同应变速率条件下变形后的显微组织图,图7为应变速率和α相的体积分数的关系图。由图6可见,在同一变形温度下,变形速率越大,α相和β相晶粒被拉长细化的程度越高;随着应变速率的增加,初生α相含量呈先增多再减少的趋势(图6和图7)。在低应变速率(0.001s<sup>-1</sup>、0.01s<sup>-1</sup>)条件下,α晶粒仍成等轴状,沿变形方向被拉长的现象不明

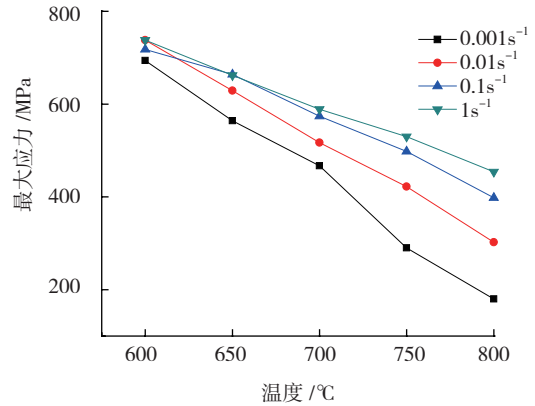


图4  $\sigma_m$ 与应变温度的关系  
Fig.4 Relation of  $\sigma_m$  and temperature

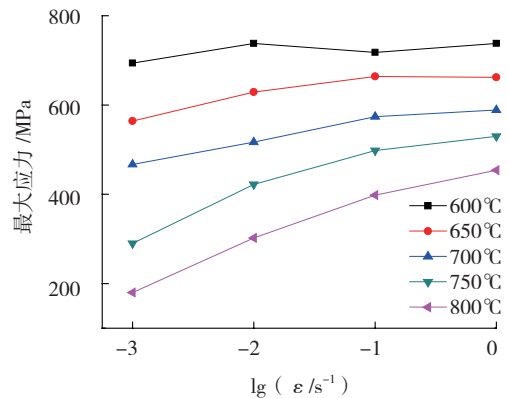


图5  $\sigma_m$ 与应变速率的关系  
Fig.5 Relation of  $\sigma_m$  and strain rate

显。在高应变速率(0.1s<sup>-1</sup>、1s<sup>-1</sup>)条件下,β相随金属流动方向变扁、拉长效果显著,主要发生了动态回复。β相为bcc结构,具有较高的层错能,变形时容易发生攀移和交滑移,可以较容易地发生动态回复<sup>[8-9]</sup>,等轴晶被拉长效果明显并使晶粒得到细化。图7中,相同温度下,应变速率为1s<sup>-1</sup>时β相含量最多,这也验证了图6(d)中β相晶粒被拉长效果最明显的现象,因为β相越多,动态回复变形机制占的比重就越大,拉长细化现象越明显。

图8为TC11钛合金在0.1s<sup>-1</sup>、不同温度条件下变形后的显微组织图。图中可见,在同一应变速率下,随着温度的升高,β相的等轴晶粒被拉长效果减弱,晶粒变粗大;α相晶粒变大,等轴化效果增强。在相对低变形温度下(600℃、650℃、700℃),变形后α相和β相晶粒沿压缩的垂直方向被明显拉长了,晶界平直,为典型的动态回复特征;在相对高变形温度下(750℃、800℃),变形后晶粒比较粗大,为等轴态组织,动态再结晶为主要变形机制。

由图1知,变形前,TC11钛合金组织为等轴α相+β转,β转为α相+β相混合相间的组织,这是一种非

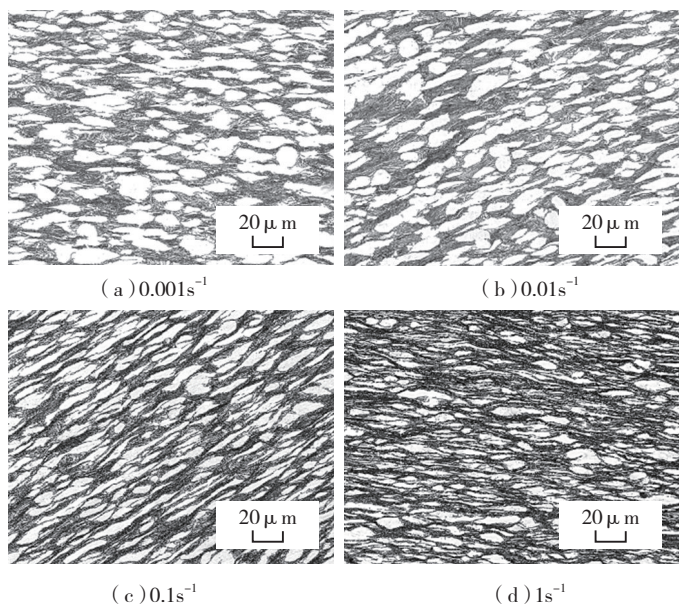


图6 650°C、不同应变速率条件下TC11钛合金光学显微组织  
Fig.6 OM of TC11 alloy at 650°C and different strain rates

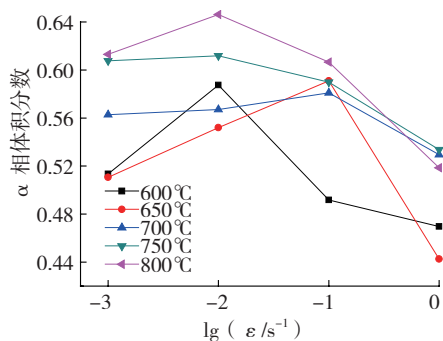


图7 应变速率和α相的体积分数的关系  
Fig.7 Relation of α volume fraction and strain rate

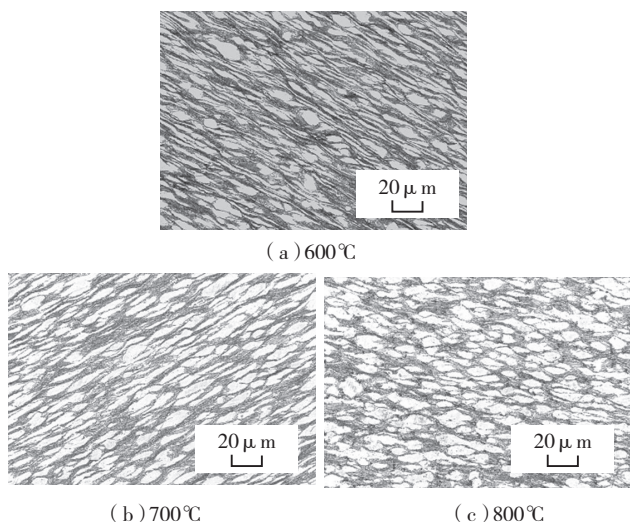


图8 应变速率为0.1s⁻¹、不同温度条件下TC11钛合金光学显微组织  
Fig.8 OM of TC11 alloy at 0.1s⁻¹ strain rate and different temperatures

平衡组织,高温下将进行分解,发生  $\beta \rightarrow \alpha + \beta$  平衡组织的转变。在相对低温情况下,由于原子扩散能力差,长距离扩散变得很困难,此时  $\beta$  相以细长的片层形态弥散分布在  $\alpha$  相之间,形成  $\alpha$ 、 $\beta$  相片层交替排列的组织形态,如图 8 (a) 所示;在相对高温情况下,由于原子扩散能力较强,晶粒形核长大容易<sup>[10]</sup>。在继续变形过程中,组织变化涉及到  $\alpha$  相晶核形成和长大的动态再结晶过程,也包括  $\beta$  相的动态再结晶。

### 3 结论

(1) 在各个变形温度和应变速率条件下,TC11 钛合金的应力-应变曲线均表现出先硬化后软化的趋势,最后都获得一种相对稳定的变形状态。

(2) 在同一变形温度下,随着应变速率的增加,变形抗力增大的幅度很小, $\alpha$  相含量呈先增多再减少的趋势,晶粒被拉长效果显著,变形以动态回复机制为主;在同一变形速率下,随温度越高,变形抗力逐渐减小, $\alpha$  相晶粒粗大,动态再结晶特征越明显。

(3) TC11 钛合金合理的旋压温度为 650°C ~700°C,变形速率在此温度范围有较宽的选择范围,可根据各道工序的需要对转速和进给速度进行调整。

### 参考文献

- [1] 李晓芹. 锻造加热温度对 TC11 合金组织性能的影响. 热加工工艺, 1999 (3): 30-32.
- [2] Li M Q, Liu X M, Xiong A M. Prediction of the mechanical properties of forged TC11 titanium alloy by ANN. Journal of Materials Processing Technology, 2002(121): 1-4.
- [3] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aero-space industry. Mater Sci Eng A, 1996 (213): 103-114.
- [4] 曾卫东, 周义刚. 冷速对 TC11 合金  $\beta$  加工显微组织和力学性能的影响. 金属学报, 2002, 38(12): 1273-1276.
- [5] 朱磊, 张麦仓, 董建新, 等. TC11 合金本构关系的建立及其在盘件等温锻造工艺设计中的应用. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(2): 253-256.
- [6] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 有色金属材料手册. 北京: 化学工业出版社, 2009:606-607.
- [7] 陈适先, 贾文铎, 曹庚顺, 等. 强力旋压工艺与设备. 北京: 国防工业出版社, 1986:68-70.
- [8] 愈汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理. 北京: 机械工业出版社, 1998:19-26.
- [9] Pololer J P. 晶体的高温塑性变形. 关德林, 译. 大连: 大连理工大学出版社, 1989.
- [10] Medeiros S C, Prasad Y V R K, Frazier W G, et al. Microstructural modeling of metadynamic recrystallization in hot working of IN 718 super alloy. Materials Science and Engineering A, 2000, 293(1-2): 198-207.

(责编 一帆)