

# 一种新型高强高韧 TC27 钛合金的高温变形行为

张业勤<sup>1</sup>, 谷志飞<sup>2</sup>, 沙爱学<sup>1</sup>, 黄利军<sup>1</sup>, 鲁世强<sup>3</sup>

1. 北京航空材料研究院, 北京 100095
2. 内蒙古第一机械集团公司, 包头 014030
3. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 南昌 330063

**摘要** 采用 Gleeble 3500 热模拟机对一种新型高强高韧 TC27 钛合金进行等温恒应变速率压缩实验, 开展 TC27 钛合金的高温变形行为研究, 为制定 TC27 钛合金的热加工工艺提供依据。研究结果表明, TC27 钛合金应力应变曲线在变形温度较低时大致呈应变软化型; 而在变形温度较高且应变速率较低时, 应力应变关系曲线基本为稳态流动型。在应变速率为  $70 \text{ s}^{-1}$  时, 呈现较大幅的震荡现象。TC27 钛合金的流动应力对变形温度的敏感性在低温变形时要显著大于在高温变形时的; 对应变速率的敏感程度随变形温度的升高而降低。利用实验数据对 TC27 钛合金分别在  $700\sim 850^\circ\text{C}$  和  $850\sim 1150^\circ\text{C}$  温度段建立了本构方程, 并具有较高的精度。通过高温变形微观组织观察, 发现在变形温度高于  $\beta$  转变温度变形时, 随变形温度提高, 或应变速率降低, 动态再结晶数量增加。

**关键词** 高强高韧; TC27 钛合金; 流动应力; 本构方程; 微观组织

**中图分类号** TG3

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.24.002

## High Temperature Deformation Behavior of a High Strength and High Toughness TC27 Titanium Alloy

ZHANG Yeqin<sup>1</sup>, GU Zhifei<sup>2</sup>, SHA Aixue<sup>1</sup>, HUANG Lijun<sup>1</sup>, LU Shiqiang<sup>3</sup>

1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China
2. Inner Mongolia First Machinery Group Corporation, Baotou 014030, China
3. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

**Abstract** The high temperature deformation behavior of TC27 titanium alloy with high strength and high toughness was studied through isothermal constant strain-rate compression experiments using a Gleeble 3500 thermo-mechanical simulator, which might provide reference for thermal processing of TC27 titanium alloy. The results show that the stress-strain curves of TC27 titanium alloy at low temperature and high temperature roughly corresponded to the softening type and steady-state-flow type, respectively, and significant shock decline was observed when the strain rate was  $70 \text{ s}^{-1}$ . The dependence of temperature on flow stress at low temperature was much more significant than that at high temperature, and the dependence of strain rate decreased when the temperature was increased. Based on experimental data, two high precision constitutive equations of TC27 titanium alloy were established for temperature ranges of  $700\sim 850^\circ\text{C}$  and  $850\sim 1150^\circ\text{C}$ . Observation on the microstructure shows that the amount of dynamic recrystallized grains increased with the rise of temperature or the decrease of strain rate when the temperature was higher than  $\beta$  transition temperature.

**Keywords** high strength and high toughness; TC27 titanium alloy; flow stress; constitutive equation; microstructure

收稿日期: 2014-07-24; 修回日期: 2014-08-04

作者简介: 张业勤, 工程师, 研究方向为高强钛合金, 电子信箱: zyqdyx520@sohu.com

引用格式: 张业勤, 谷志飞, 沙爱学, 等. 一种新型高强高韧 TC27 钛合金的高温变形行为[J]. 科技导报, 2014, 32(24): 25-30.

TC27 钛合金是国内自主研发的一种新型高强高韧高淬透性近 $\beta$ 型钛合金,它具有比强度高、断裂韧性好、成形性好和抗应力腐蚀能力强等优点,能够满足损伤容限设计的需要和高结构效益、高可靠性的要求,可以应用于航空航天及兵器行业重要承力部件。该合金在一定的热加工工艺下组织可以得到很好的细化,从而获得很好的强化效果和强韧匹配,强度水平在抗拉强度 $\sigma_{\text{t}} \geq 1200$  MPa时延伸率 $\delta \geq 15\%$ <sup>[1]</sup>。

本文针对新型高强高韧 TC27 钛合金开展高温变形行为研究,在热模拟压缩实验基础上,分析高温变形时变形温度、应变速率对流变应力及微观组织的影响,根据微观组织初步判定合金中的变形及软化机制,并建立 TC27 钛合金高温变形本构方程。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验采用锻造 TC27 钛合金,名义成分为 Ti-5Al-4Mo-6V-2Nb-1Fe,相变点为 867°C,原始组织为等轴组织,显微组织如图 1 所示。

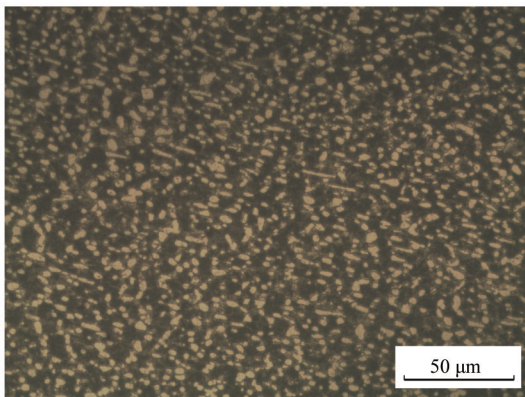


图 1 TC27 钛合金原始组织

Fig. 1 Original microstructure of TC27 titanium alloy

### 1.2 实验方法

等温恒应变速率压缩实验在 Gleeble 热模拟实验机上进行。压缩试样为 $\phi 8$  mm $\times$ 12 mm 圆柱体,在试样两端涂抹润滑剂以减小压头与样品之间的摩擦,防止热压缩过程中试样出现鼓肚。压缩应变速率分别为 0.001、0.01、0.1、1、10、70  $\text{s}^{-1}$ ;变形温度分别为 700、750、800、850、900、950、1000、1050、1100、1150°C;压下量为 50%,对应真应变约为 0.7。在每个变形条件下,试样以 10°C/s 的速度升温到加热温度保温 5 min 后压缩,压缩后的试样采用水冷以保留高温变形组织。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TC27 钛合金高温变形应力-应变曲线及特征

热变形过程中流变应力的变化主要取决于两个方面:一是变形时的位错增值及位错间相互作用导致的加工硬化;二

是位错通过攀移或交滑移并在热激活和外加应力作用下发生合并、重组使材料发生的动态软化<sup>[2,3]</sup>。加工硬化和动态软化在热变形过程中同时进行、互相竞争。在变形初期,随应变变量增大,位错密度不断增加,变形抗力增加,即产生加工硬化。TC27 钛合金高温变形时,由于位错密度增加速度非常快,致使加工硬化的增加速率较快,变形抗力迅速上升。当变形进行到一定阶段时,由于在加工硬化过程中金属内部能量升高,基体处于不稳定的状态,为位错移动提供了驱动力,部分位错消失、重排,产生动态回复,使基体软化,抵消部分加工硬化,反映在应力-应变曲线上是随着应变量的增大,应力值缓慢降低。在变形末期,硬化与软化达到动态平衡,曲线趋于平缓。

变形温度对 TC27 钛合金的流动应力有较大影响,在同一应变速率下,温度越高,流动应力越低,这主要是因为随着变形温度的升高,材料的热激活作用增强,原子平均动能增大,晶体产生滑移的临界分切应力减小,减少了对材料位错运动和晶面间滑移的阻碍,并且随着温度的升高,动态回复和动态再结晶也更容易进行,使得位错密度下降,抵消了塑性变形造成的加工硬化,从而促使材料流动应力减小。但在低温时流动应力对温度的敏感性较大,高温时敏感性较小。在应变速率 0.001  $\text{s}^{-1}$ (图 2(a)),变形温度 700、750、800、850、900°C 时,变形温度每升高 50°C,稳态流变应力值分别降低 25、22、17、13 MPa;而当变形温度为 950、1000°C 时,变形温度每升高 50°C,稳态流变应力值仅分别降低 6、3 MPa;当变形温度为 1050、1100、1150°C 时,稳态流变应力值均基本稳定在 12 MPa 左右,应力随温度变化很小。

由图 2 可以看出,在应变速率 0.001~10  $\text{s}^{-1}$  时,对流动应力影响显著的低温段(700~850°C)的应力-应变曲线大致呈应变软化型,而对流动应力影响较小的高温段(900~1150°C)的应力-应变曲线基本为稳态流动型。而在应变速率 70  $\text{s}^{-1}$  下,应力-应变曲线呈现大幅震荡下降现象。相关研究认为,这种大幅震荡与局部流动相关<sup>[4,5]</sup>。

应变速率对 TC27 钛合金流动应力也有较大影响,当变形温度一定时,应变速率越高,流动应力越大。这是因为当应变速率增加时,位错产生的数目增多,位错运动增强,临界剪切应力升高,同时由于实现塑性变形的时间缩短而动态软化相对减弱,硬化过程相对加剧,导致流变应力增加显著;另一方面,由于没有足够时间通过位错运动或相邻晶粒协调变形使应力松弛,合金内部造成较大的应力集中,导致流变应力增大。但流变应力对应变速率的敏感程度随温度升高而降低。由图 2(a)、(f) 可看出,在变形温度为 700°C 时,应变速率为 70  $\text{s}^{-1}$  的稳态流变应力与应变速率为 0.001  $\text{s}^{-1}$  的稳态流变应力差值约为 340 MPa;当温度升高到 800°C 时对应的稳态流变应力差值约为 270 MPa;温度升高到 900°C 时,对应的稳态流变应力差值降低到 240 MPa 左右;温度升高到 1000°C 时,对应的稳态流变应力差值约为 195 MPa;温度升高到 1100°C 时,对应的稳态流变应力差值约为 160 MPa。

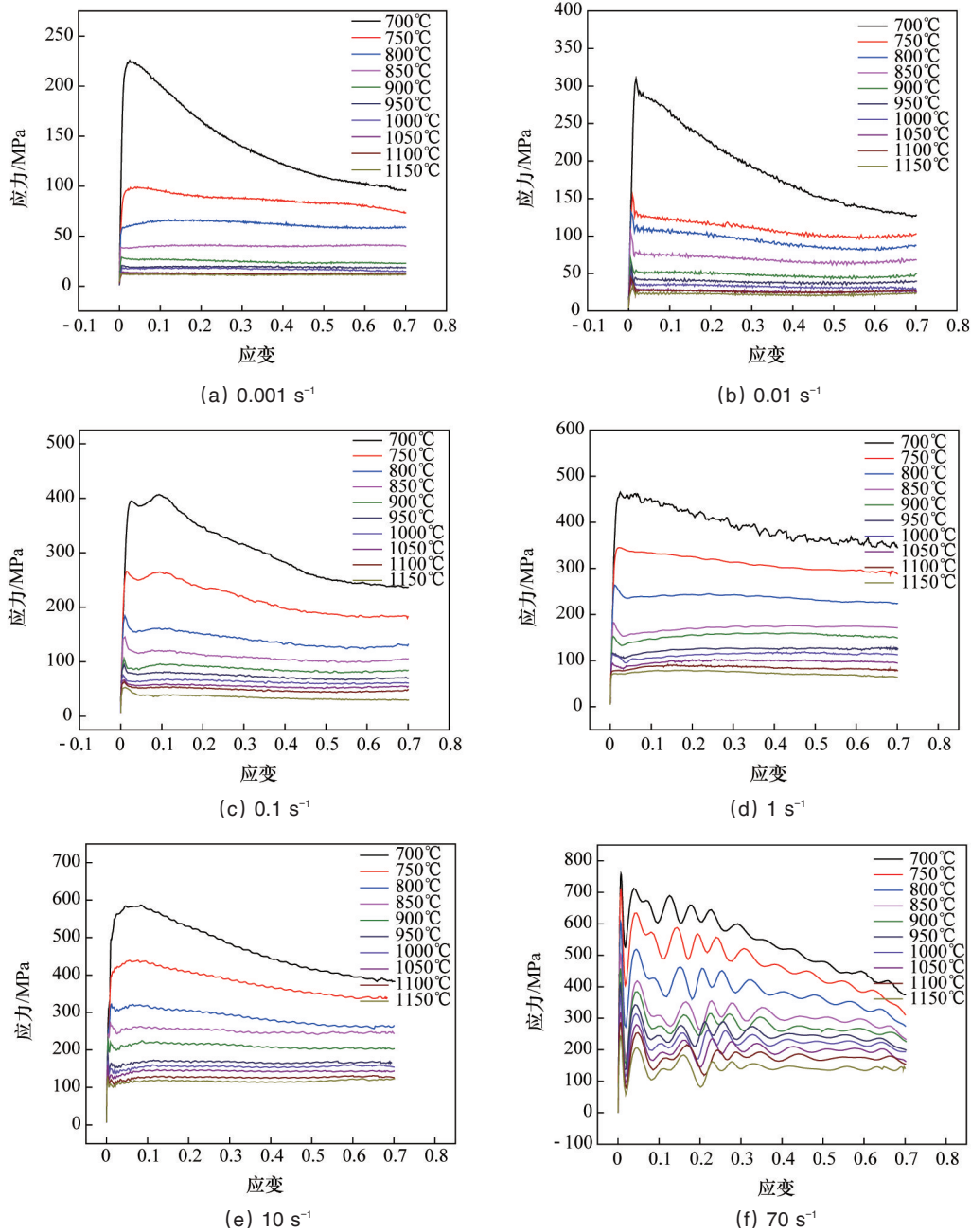


图2 应变速率0.001~70 s<sup>-1</sup>下不同温度的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves as functions of temperature for strain rate of 0.001~70 s<sup>-1</sup>

通过以上分析可知,TC27钛合金属于热敏感型和应变速率敏感型材料<sup>[6]</sup>,流动应力随变形温度升高及应变速率降低而减小<sup>[7]</sup>。当应变速率较高时,不但变形抗力较大,而且容易造成锻件的绝热升温而导致锻造缺陷的产生。因此从获得较低的变形抗力角度考虑,TC27钛合金适宜的锻造温度范围为800~1150℃,适宜的应变速率范围为0.001~10 s<sup>-1</sup>。

### 2.2 TC27钛合金新型高温变形的本构方程

由于3种形式的Arrhenius方程<sup>[8]</sup>对锻态TC27合金不适用,根据TC27钛合金应力-应变曲线的特征,综合考虑温度、应变、应变速率对流动应力的影响,同时为了提高本构方程

的精度,将实验温度范围分成2个温度段,并对每个温度段分别提出不同的本构模型。

700~850℃时的本构模型为

$$\ln \sigma = c_0 + b_1 \frac{1}{T} + c_2 \varepsilon + c_3 \dot{\varepsilon} + c_4 \frac{\dot{\varepsilon}^2}{T} + c_5 \frac{\dot{\varepsilon}}{T} + c_6 \ln \dot{\varepsilon} + c_7 \frac{\ln \dot{\varepsilon}}{T} + c_8 \frac{(\ln \dot{\varepsilon})^2}{T} + c_9 \frac{(\ln \dot{\varepsilon})^3}{T} + c_{10} \varepsilon \ln \dot{\varepsilon} + c_{11} \varepsilon^3 \ln \dot{\varepsilon} + c_{12} \dot{\varepsilon} \ln \varepsilon + c_{13} \ln \varepsilon \ln \dot{\varepsilon} + c_{14} \frac{\ln \varepsilon \ln \dot{\varepsilon}}{(\ln T)^2} + c_{15} \frac{\varepsilon^3 \ln \dot{\varepsilon}}{T} + c_{16} \frac{(\dot{\varepsilon} \ln \varepsilon)^2}{T} + c_{17} \frac{(\dot{\varepsilon} \ln \varepsilon)^2}{\ln \varepsilon} \quad (1)$$



式中,  $T$  为变形温度,  $\varepsilon$  为应变,  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率,  $c_0 \sim c_{17}$  为待定系数。

85~1150℃时的本构模型为

$$\ln \sigma = d_0 + d_1 \frac{1}{T} + d_2 \dot{\varepsilon} + d_3 \frac{\dot{\varepsilon}^2}{T} + d_4 \ln \dot{\varepsilon} + d_5 \frac{\dot{\varepsilon}}{T} + d_6 \dot{\varepsilon} \ln \varepsilon + d_7 (\varepsilon \ln \dot{\varepsilon})^2 + d_8 \ln \varepsilon \ln \dot{\varepsilon} + d_9 \frac{\ln \dot{\varepsilon}}{T} + d_{10} \frac{(\ln \dot{\varepsilon})^2}{T} + d_{11} \frac{(\ln \dot{\varepsilon})^3}{T} + d_{12} \frac{\varepsilon^3}{\ln T} + d_{13} \frac{(\dot{\varepsilon} \ln \varepsilon)^2}{T} \quad (2)$$

式中,  $d_0 \sim d_{13}$  为待定系数。

利用 SPSS 软件对实验数据进行多元线性回归, 所得到的式(1)和式(2)回归系数分别如表 1 和表 2 所示。

为检验本构方程的精度, 对建立的新型本构方程进行误差分析, 计算值误差散点在 +10% 以内的提高到 79.44%, 计算值误差散点在 +15% 以内的达到了 92.47%, 说明该本构方程具有较高的计算精度。

表 1 式(1)线性回归系数

Table 1 Coefficient values in Equation(1) evaluated using linear regression

系数	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
回归值	$7.23 \times 10^{-6}$	5931.941	-0.366	0.011	-0.264	20.143
系数	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$	$c_{11}$
回归值	0.607	-549.315	-39.169	-3.859	0.059	2.209
系数	$c_{12}$	$c_{13}$	$c_{14}$	$c_{15}$	$c_{16}$	$c_{17}$
回归值	0.011	-0.062	2.946	-0.002	-12.488	0.001

表 2 式(2)线性回归系数

Table 2 Coefficient values in Equation(2) evaluated using linear regression

系数	$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$
回归值	1.024	4143.176	-0.007	0.561	0.48	-47.875	0.003
系数	$d_7$	$d_8$	$d_9$	$d_{10}$	$d_{11}$	$d_{12}$	$d_{13}$
回归值	0.004	0.008	-238.952	12.008	1.632	-0.025	5.585

### 2.3 TC27 钛合金高温变形组织演变规律

在低于  $\beta$  转变温度 (867℃) 的 700~800℃ 范围变形时, 应变速率对变形组织的影响很小, 不同应变速率下的变形组织演变规律大致相同, 即随着变形温度提高, 初生  $\alpha$  相有减少的趋势, 并且初生  $\alpha$  相具有轻微流线型分布的迹象。

在变形温度高于  $\beta$  转变温度的 900~1150℃ 范围变形时, 应变速率对变形组织有一定的影响, 不同应变速率下的变形组织演变规律存在差异<sup>[9]</sup>, 具体表现在:

当应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  时(图 3), 变形温度为 900℃ 时仅发生部分动态再结晶, 原  $\beta$  晶粒的压扁痕迹较明显; 变形温度

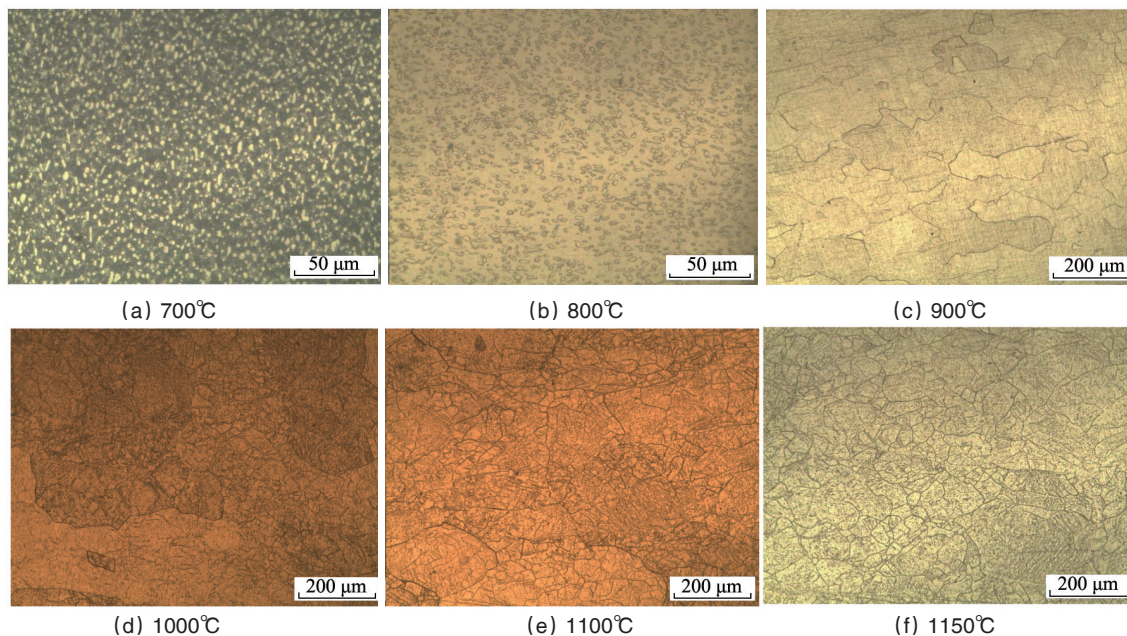


图 3 不同温度下应变速率  $0.001 \text{ s}^{-1}$ , 压下量 50% 时的金相

Fig. 3 Metallographs at gauge reduction of 50% and strain rate of  $0.001 \text{ s}^{-1}$  at different temperature



为 1000~1100℃ 时发生较充分的动态再结晶,原 $\beta$ 晶粒的压扁痕迹不明显,但原 $\beta$ 晶界仍清晰可见;变形温度为 1150℃ 时发生充分的动态再结晶,原 $\beta$ 晶界基本不可见。当应变速率为 0.1 s<sup>-1</sup> 时(图 4),变形温度为 900~1100℃ 时仅发生部分动态再结晶,原 $\beta$ 晶粒的压扁痕迹明显;变形温度为 1150℃ 时发生较充分的动态再结晶,原 $\beta$ 晶界基本不可见。当应变速率为 10 s<sup>-1</sup> 时(图 5),变形温度为 900~1150℃ 时几乎均未发生动态再结晶,原 $\beta$ 晶粒的压扁现象均很明显。可见,应变速率在 0.001~

10 s<sup>-1</sup> 时,应变速率越大,发生动态再结晶的温度就越偏向更高的温度。

因此,在 $\alpha+\beta$ 两相区锻造时,仅从变形组织角度考虑,应变速率为 0.001~70 s<sup>-1</sup> 是可行的锻造工艺参数。在 $\beta$ 单相区锻造时,从获得较多动态再结晶组织<sup>[10,11]</sup> 角度考虑,应变速率为 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 是较优的锻造工艺参数,并且在该工艺参数范围,随变形温度<sup>[12]</sup> 提高,或应变速率降低,动态再结晶数量增加。

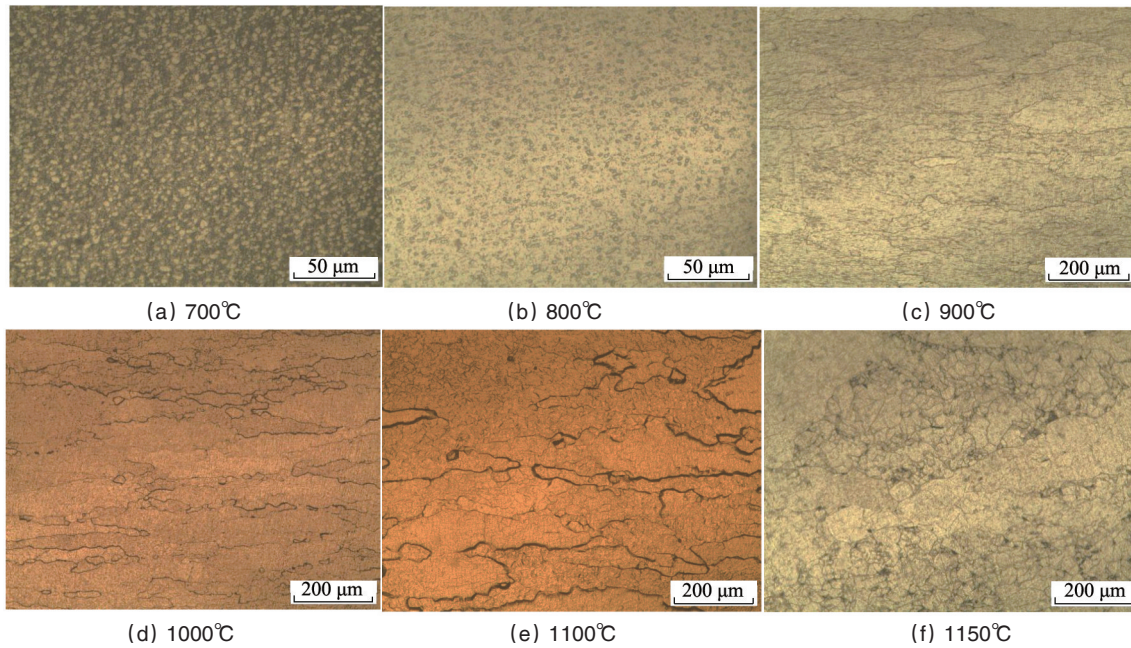


图 4 不同温度下应变速率 0.1 s<sup>-1</sup>, 压下量 50% 时的金相

Fig. 4 Metallographs at gauge reduction of 50% and strain rate of 0.1 s<sup>-1</sup> at different temperature

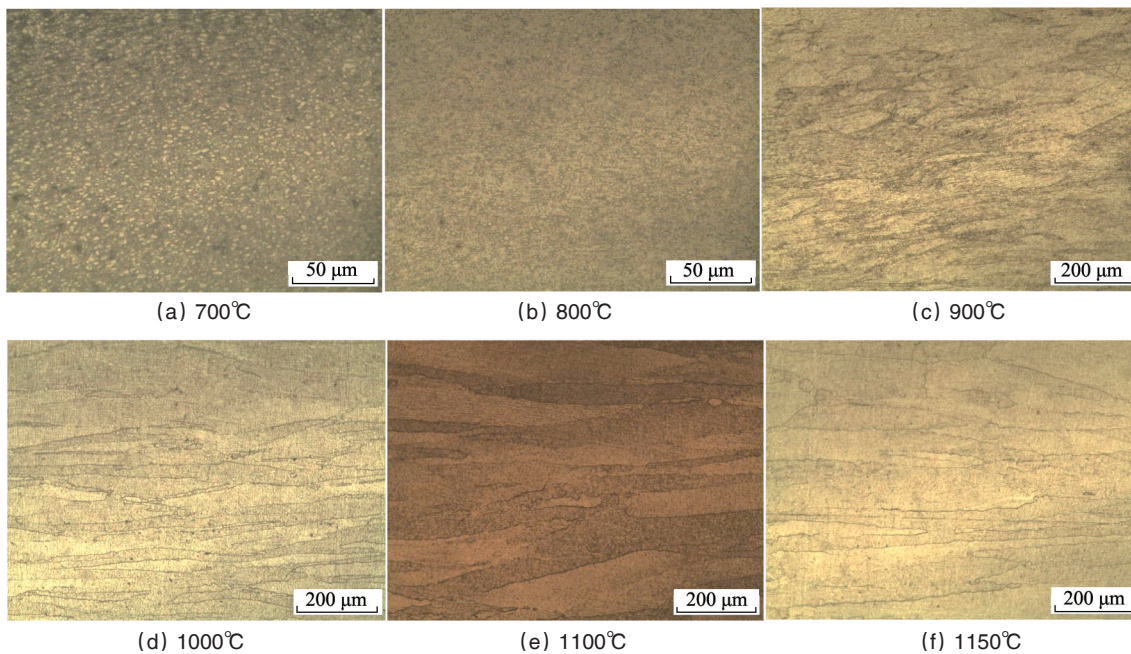


图 5 不同温度下应变速率 10 s<sup>-1</sup>, 压下量 50% 时的金相

Fig. 5 Metallographs at gauge reduction of 50% and strain rate of 10 s<sup>-1</sup> at different temperature

### 3 结论

1) TC27 钛合金流动应力随变形温度升高而减小,并且在低温变形时的流动应力对温度的敏感性显著大于高温变形时。TC27 钛合金流动应力随应变速率降低而减小,对应变速率的敏感程度随变形温度的升高而降低。

2) TC27 钛合金应力应变曲线在变形温度较低时大致呈应变软化型;而在变形温度较高且应变速率较低时,应力应变关系曲线基本为稳态流动型。在应变速率为  $70 \text{ s}^{-1}$  时,呈现较大幅的震荡现象。

3) 分别在  $700\sim 850^\circ\text{C}$  和  $850\sim 1150^\circ\text{C}$  温度段建立了锻态 TC27 钛合金的本构方程。经误差检验,该本构方程均有较高的精度。

4) TC27 钛合金在变形温度低于  $\beta$  转变温度变形时,应变速率对变形组织的影响很小,不同应变速率下的变形组织演变规律大致相同。在变形温度高于  $\beta$  转变温度变形时,随变形温度提高,或应变速率降低,动态再结晶数量增加。

#### 参考文献 (References)

- [1] 王震, 洪权, 赵永庆. 钛合金热变形行为研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(3): 13-16.  
Wang Zhen, Hong Quan, Zhao Yongqing. Hot deformation behavior of titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2010, 27(3): 13-16.
- [2] Niu Y, Hou H L, Li M Q, et al. High temperature deformation behavior of a near alpha Ti600 titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 492: 24-28.
- [3] 汪发春, 沈健, 赵云豪. TB2 钛合金热压缩变形流变应力[J]. 稀有金属, 2007, 12(6): 732-735.  
Wang Fachun, Shen Jian, Zhao Yunhao. Flow stress behavior of TB2 titanium alloy during hot compression[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 12(6): 732-735.
- [4] 王克鲁, 鲁世强, 李鑫, 等. 变形温度对 TC11 合金流动应力及组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(3): 165-167.  
Wang Kelu, Lu Shiqiang, Li Xin, et al. Effects of temperature on flow stress and microstructure of TC11 alloy at high strain rate[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2008, 28(3): 165-167.
- [5] 王克鲁, 鲁世强, 康永林, 等.  $\text{Ti}_3\text{Al}$  基合金的热变形行为及加工图[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(9): 1534-1538.  
Wang Kelu, Lu Shiqiang, Kang Yonglin, et al. Deformation behavior and processing map of  $\text{Ti}_3\text{Al}$  based alloy during the isothermal compression[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(9): 1534-1538.
- [6] 许国栋. TA15 钛合金的热压缩变形性能[J]. 金属学报, 2002, 38(S1): 230-232.  
Xu Guodong. Hot compressive characters of TA15 titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(S1): 230-232.
- [7] 徐文臣, 单德彬, 李春峰, 等. TA15 钛合金的动态热压缩行为及其机理研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(4): 10-16.  
Xu Wenchen, Shan Debin, Li Chunfeng, et al. Study on the dynamic hot compression behavior and deformation mechanism of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(4): 10-16.
- [8] 李森泉, 李晓丽, 龙丽, 等. TA15 合金的热变形行为及加工图[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(9): 1354-1358.  
Li Miaquan, Li Xiaoli, Long Li, et al. Deformation behavior and processing map of high temperature deformation of TA15 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(9): 1354-1358.
- [9] 王永, 尹建明, 卢斌, 等.  $(\alpha_2+O+B2)$  三相  $\text{Ti}_3\text{Al}$  基合金的热变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): s293-297.  
Wang Yong, Yin Jianming, Lu Bin, et al. Hot deformation behaviour of  $(\alpha_2+O+B2)$  three phases  $\text{Ti}_3\text{Al}$ -based alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): s293-297.
- [10] Homfan U, Blum W. Micro Structural evolution during high temperature deformation of Lamellar  $\text{Ti}_{48}\text{Al}-2\text{Nb}-2\text{Cr}$ [J]. Intermetallics, 1999(7): 351-361.
- [11] 朱知寿, 王新南, 顾伟, 等. TC21 钛合金高温热变形行为研究[J]. 中国材料进展, 2009, 28(2): 51-55.  
Zhu Zhishou, Wang Xinnan, Gu Wei, et al. Study on high temperature deformation behaviors of new type TC21 titanium alloy[J]. Materials China, 2009, 28(2): 51-55.
- [12] 沙爱学, 李兴无, 王庆如, 等. 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.  
Sha Aixue, Li Xingwu, Wang Qingru, et al. Influence of hot deformation temperature on microstructure and mechanical properties of TC18 alloy[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(8): 1167-1171.

(责任编辑 王媛媛)

#### 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbjb@cast.org.cn。