

# TA7 钛合金高温流变行为研究

东赞鹏, 于秋颖, 方爽, 王淑云, 王超渊, 宋晓俊

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 通过热压缩试验研究了 TA7 钛合金在变形温度 850 ~ 1000℃、应变速率 0.001 ~ 0.1 s<sup>-1</sup> 条件下的流变应力变化规律, 计算并建立了描述 TA7 钛合金高温变形特性的本构方程。结果表明: 变形温度和应变速率对 TA7 钛合金流变应力影响显著, 随变形温度升高和变形速率的降低, 相同变形程度下合金的流变应力显著降低, 并且在较低的应变下合金即可达到稳态流变状态。

**关键词:** TA7; 钛合金; 流变应力; 本构方程

**doi:** 10.11868/j.issn.1005-5053.2015.1.003

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-5053(2015)01-0013-07

TA7 钛合金属于中等强度的单相 α 型钛合金, 具有比强度高、中温性能好、耐腐蚀性能强、室温和高温下断裂韧性好等优点, 可长期在 500℃ 条件下工作, 短时工作温度可达 800℃, 广泛应用于飞机发动机环锻件, 同时也可用以制造机匣壳体、壁板、紧固件等零件<sup>[1-4]</sup>。该合金在 α 相区冷成形时变形抗力大, 工艺塑性差, 一般在较高温度下塑性成形加工, 因此对 TA7 钛合金高温变形特性的系统研究对成形工艺的制定具有重要的指导意义。本研究针对

TA7 钛合金的高温变形行为, 拟建立描述该合金流变特性的本构方程, 从而为其热加工工艺的制定提供理论依据。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

实验材料为 TA7 钛合金棒材, 具体的化学成分见表 1。

表 1 TA7 钛合金棒材化学成分 (质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of TA7 titanium alloy bar (mass fraction/%)

C	Al	Sn	Fe	Si	O	H	N	Ti
0.01	5.6	2.5	0.27	0.11	0.09	0.002	0.006	Bal.

### 1.2 实验方法

从 TA7 钛合金棒材切取 φ8mm × 12mm 的热压缩试样, 在 THERMECMASTOR-Z 热模拟机上进行高温压缩变形实验。为了保证试样在压缩过程中处于轴向应力状态, 在试样两端面涂抹高温润滑剂以减小试样与压头间的摩擦力。试样变形温度分别为 850℃, 900℃, 950℃ 和 1000℃, 应变速率分别为 0.1 s<sup>-1</sup>, 0.01 s<sup>-1</sup>, 0.005 s<sup>-1</sup> 和 0.001 s<sup>-1</sup>, 变形量为 50%。试样以 10℃/s 加热至变形温度保温 5min 后

进行热压缩, 热压缩过程中应变速率和变形温度均保持恒定, 变形结束后冷却方式为在氦气氛围中 10s 内激冷至 500℃ 后水冷。应力、应变和温度等数据由 Thermecmaster-Z 热模拟试验机自动采集。

## 2 实验结果及分析

图 1 为 TA7 钛合金在不同变形温度和不同应变速率下热压缩 50% 后的真应力-真应变曲线。从图 1 可以看出, 不同变形条件下该合金流变行为随应变量的变化规律较为相似, 即: 变形初期, 由于位错大量增殖和积累, 加工硬化占主导地位, 流变应力随应变量的增加急剧增大; 随应变量的不断增加, 位错密度不断增高, 晶体内部存储的能量不断增加, 当

收稿日期: 2014-05-20; 修订日期: 2014-07-08

通讯作者: 东赞鹏 (1979—), 男, 硕士, 工程师, 从事钛合金、铝合金、高温合金锻造成形工艺研究, (E-mail) dong\_yunpeng@163.com。

真应变超过一定值后,合金出现产生动态回复和动态再结晶,流变应力不再随应变量的继续增加而发生明显的变化,出现稳态流变特征。

此外,从图1a~d中流变曲线的对比中可知,TA7钛合金在 $\alpha$ 相区内热变形时流变应力随变形温度降低和应变速率提高而大幅度升高。这是因为

温度降低,合金变形所需激活能升高,流变应力增大;应变速率增加使合金内部位错增殖速度加快,位错运动阻力增大,加工硬化效果增强,因而导致流变应力增大。这说明TA7钛合金的流变应力对变形条件比较敏感,因此合金锻造过程中应准确合理控制变形温度和应变速率这两个工艺参数。

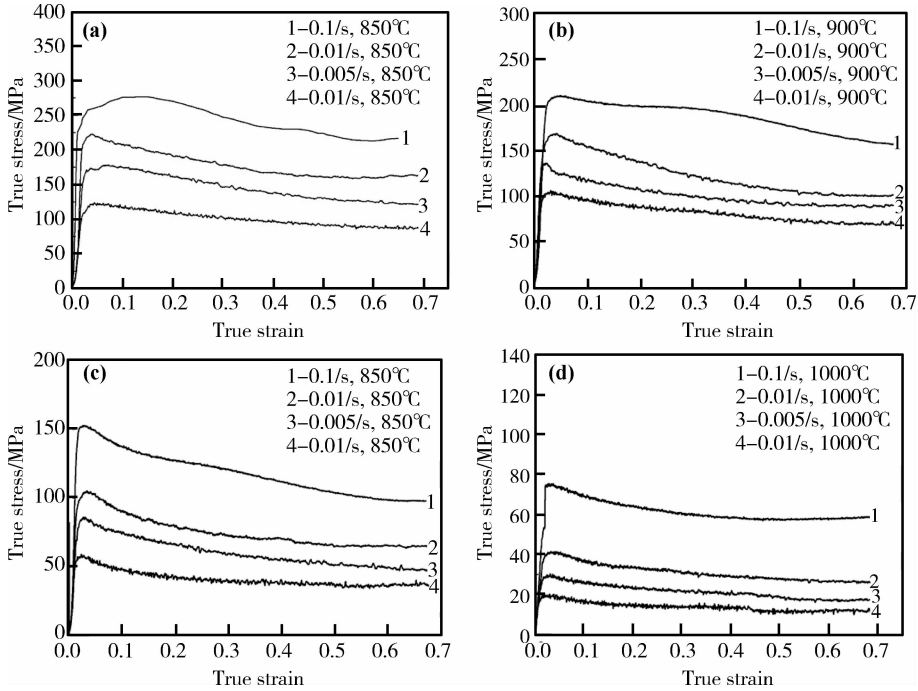


图1 TA7钛合金热压缩真应力-应变曲线

Fig. 1 True strain-true stress curves of TA7 titanium alloy during hot compression (a) 850°C; (b) 900°C; (c) 950°C; (d) 1000°C

### 3 TA7钛合金本构方程

#### 3.1 本构方程的建立

金属材料高温变形过程一般采用 Arrhenius 型本构方程来描述合金流动应力与应变速率、变形温度之间的关系<sup>[5-11]</sup>,如式(1)所示。

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式(1)中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, $s^{-1}$ ;  $\sigma$ 为流动应力,MPa;  $T$ 为变形温度,K;  $Q$ 为变形激活能,J/mol;  $R$ 为普氏气体常数, $8.314 \text{ mol} \cdot \text{K}$ ;  $\alpha, n, A$ 为常数。

在高温条件下,合金变形过程积累的塑性应变 $\varepsilon$ 也是一个不可忽略的重要变量<sup>[12-14]</sup>。由于式(1)中不包含应变对流动应力的影响,直接采用该公式将会引起较大误差,因此在本构方程中将引入等效应变,可以表示为

$$\sigma = (\dot{\varepsilon}, T) f(\varepsilon) \quad (2)$$

式(2)中:表示公式(1),其中 $\alpha, n, A$ 和 $Q$ 等材料常

数将视为应变变量 $\varepsilon$ 的函数,通过对不同应变量下的材料常数进行回归拟合,建立改进的TA7钛合金的本构方程。

#### 3.2 材料参数的确定

当 $\alpha\sigma < 0.8$ 时,合金处于低应力水平条件下,流变应力 $\sigma$ 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 可以表示为指数关系:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \quad (3)$$

当 $\alpha\sigma > 1.2$ 时,合金处于高应力水平条件下,流变应力 $\sigma$ 和应变速率之间接近幂指数关系:

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \quad (4)$$

$\alpha, n_1$ 和 $\beta$ 满足如下关系:

$$\alpha = \beta/n_1 \quad (5)$$

式(3)和式(4)两边取对数后可得:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \quad (6)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma \quad (7)$$

由公式(6)和式(7), $n_1$ 和 $\beta$ 分别为 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 曲线的斜率。取不同真应变 $\varepsilon$ 及对应流动应

力  $\sigma$ , 分别作  $\ln \dot{\varepsilon}$ - $\ln \sigma$  关系曲线 (图 2) 和  $\ln \dot{\varepsilon}$ - $\sigma$  关系曲线 (图 3), 并用最小二乘法线性回归求得所取应

变量下的  $n_1$  和  $\beta$ , 进而根据式 (5) 确定不同真应变  $\varepsilon$  下的  $\alpha$  值。

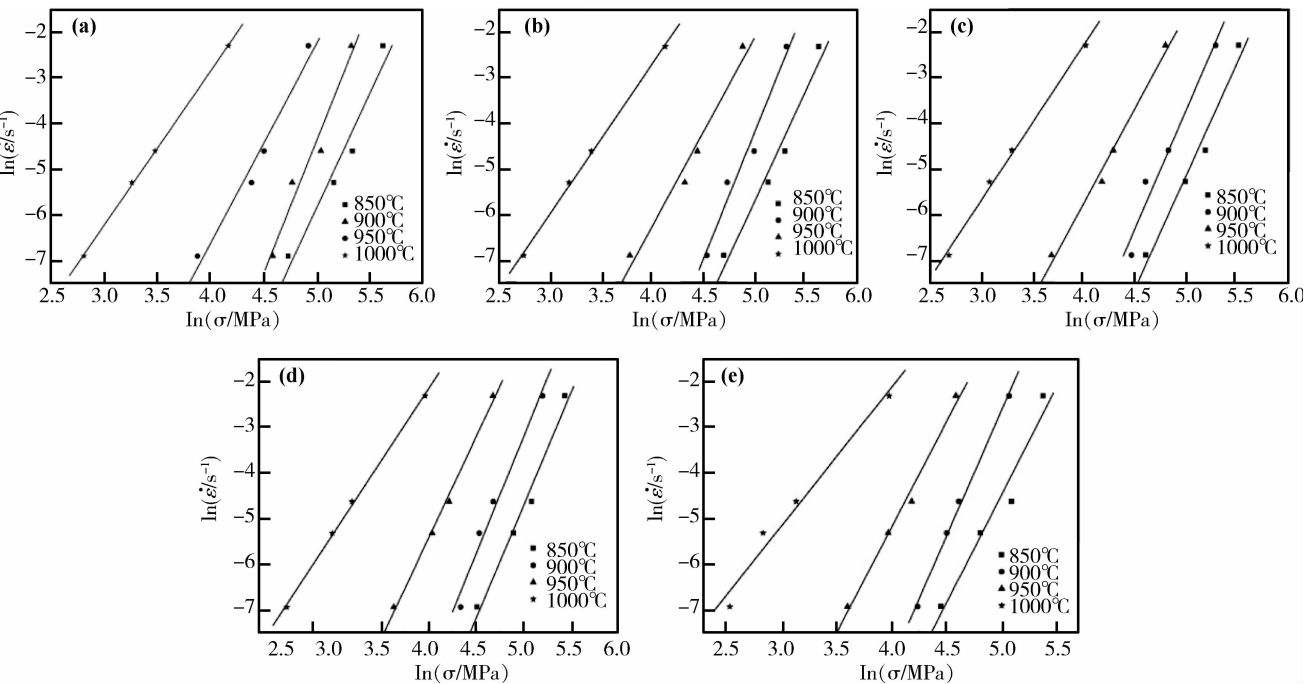


图 2 不同应变条件下 TA7 钛合金  $\ln \dot{\varepsilon}$  和  $\ln \sigma$  关系曲线

Fig. 2 Relationships between  $\ln \dot{\varepsilon}$  and  $\ln \sigma$  of TA7 titanium alloy at different true strain (a) 0.1; (b) 0.15; (c) 0.3; (d) 0.45; (e) 0.65

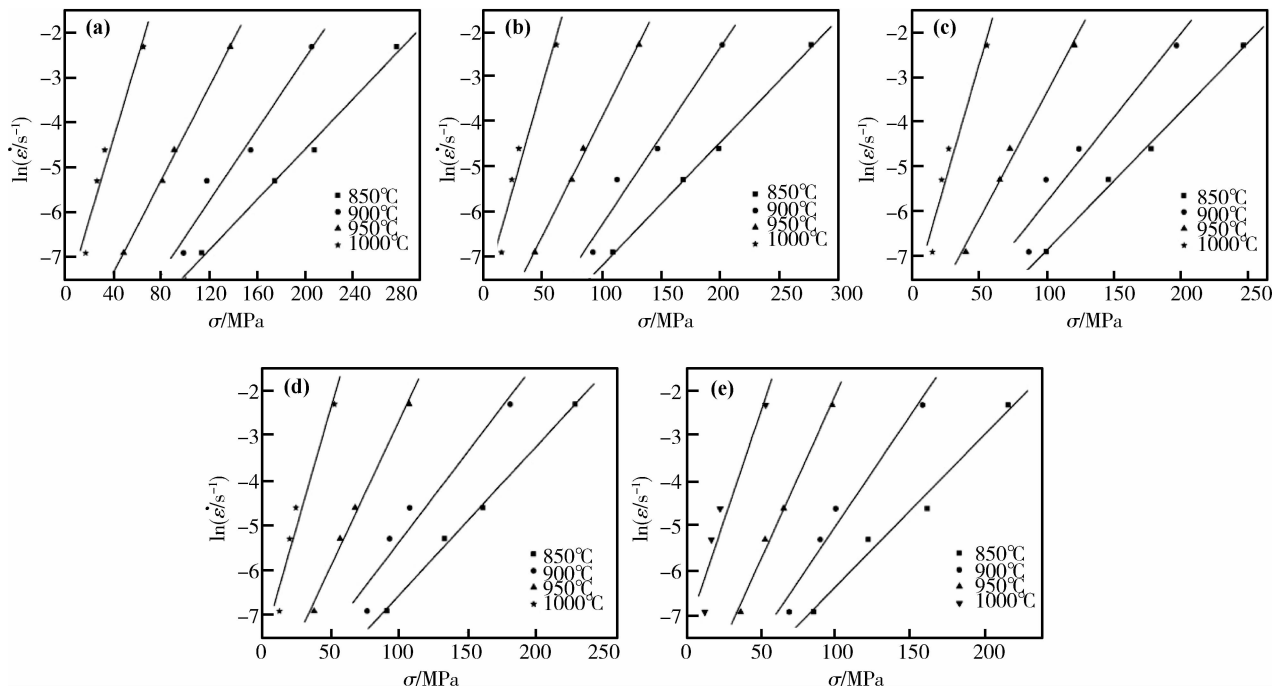


图 3 不同应变条件下 TA7 钛合金  $\ln \dot{\varepsilon}$  和  $\sigma$  关系曲线

Fig. 3 Relationships between  $\ln \dot{\varepsilon}$  and  $\sigma$  of TA7 titanium alloy at different true strain (a) 0.1; (b) 0.15; (c) 0.3; (d) 0.45; (e) 0.65

对式(1)两边取对数,可得:

$$\frac{Q}{RT} = n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\varepsilon} + \ln A \quad (8)$$

对(8)求偏微分可得热变形激活能  $Q$  为:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_\varepsilon \quad (9)$$

上式中  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  曲线的斜率为常数  $n$ 。利用求得的  $\alpha$  值,在不同应变变量  $\varepsilon$  时绘制  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  曲线(见图4),采用最小二乘法线性回归求

出斜率  $n$ 。同时,绘制  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - (1/T)$  关系曲线(见图5),求得斜率  $k$ 。将  $n$  和  $k$  带入式(9),从而可以得到 TA7 钛合金不同应变变量下的变形激活能  $Q$ 。最后将此时的变形激活能  $Q$  和  $n$  代入式(8),可以计算出对应的常数  $A$  的数值。分别以不同真应变下的  $Q, \alpha, n$  和  $\ln A$  为函数,真应变  $\varepsilon$  为自变量进行三次多项式回归,得到图6所示的拟合曲线,可见材料参数与真应变  $\varepsilon$  的三次多项式拟合较好。

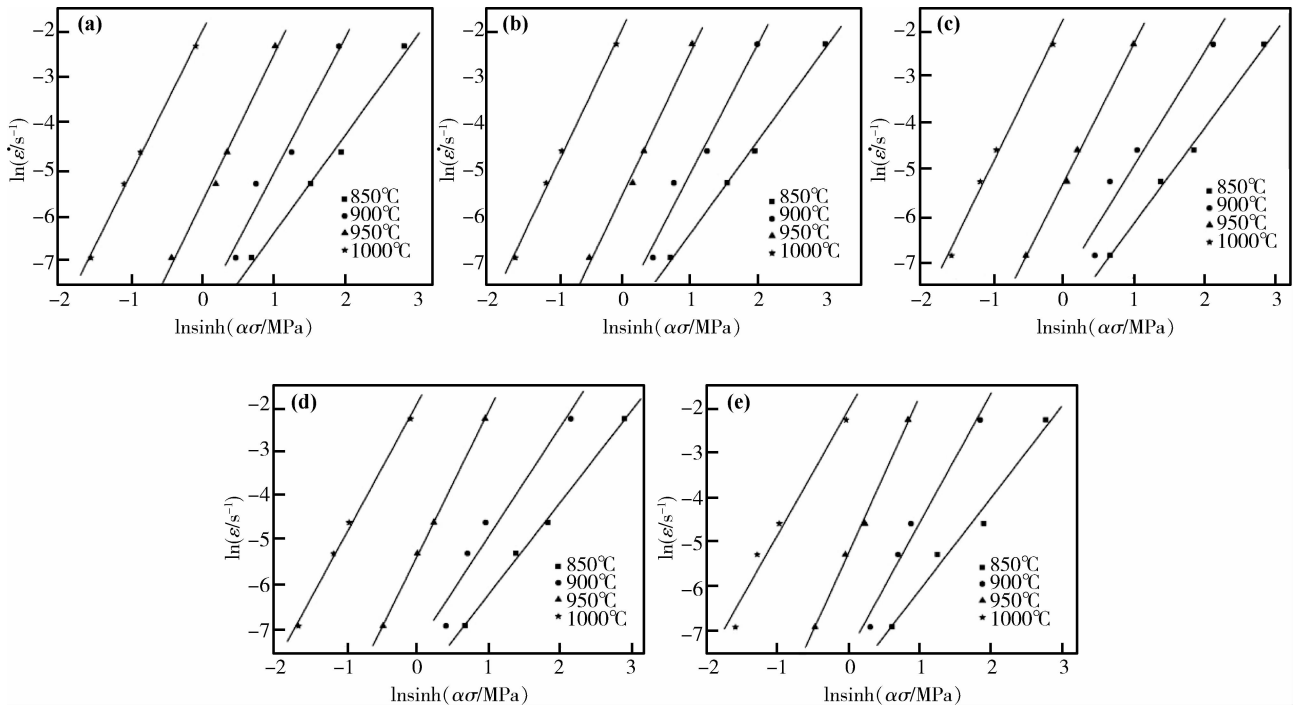


图4 不同应变条件下 TA7 钛合金  $\ln \dot{\varepsilon}$  和  $\ln \sinh(\alpha\sigma)$  关系曲线

Fig.4 Relationships between and of TA7 titanium alloy at different true strain

(a)0.1;(b)0.15;(c)0.3;(d)0.45;(e)0.65

将求得的材料参数值代入式(1),整理后得到 TA7 钛合金的本构方程:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{\alpha} \times \sinh^{-1} \left\{ \exp \left[ \frac{1}{n} \times \left( \ln \dot{\varepsilon} - \ln A + \frac{Q}{RT} \right) \right] \right\} \\ \ln A &= 54.815 - 18.35 \times \varepsilon + 6.207 \times \varepsilon^2 + 21.533 \times \varepsilon^3 \\ \alpha &= 0.0123 + 0.003 \times \varepsilon + 0.0209 \times \varepsilon^2 - 0.025 \times \varepsilon^3 \\ n &= 3.007 - 1.988 \times \varepsilon + 3.303 \times \varepsilon^2 - 1.162 \times \varepsilon^3 \\ Q &= 610639.21 - 211190.02 \times \varepsilon + \\ & 118246.51 \times \varepsilon^2 + 172897.64 \times \varepsilon^3 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

图7为不同应变速率和温度下计算值和实验值的对比,其中实线为实验值,虚线为计算值。可以看到两者相对误差较小,这说明所建立的本构方程具

有良好的预测能力。

## 4 结论

(1)本实验条件下,变形温度和应变速率对 TA7 钛合金的流变应力影响强烈,随变形温度升高和应变速率的降低,相同变形程度下合金的流变应力显著降低,并且在较低的应变下合金即可达到稳态流变状态。

(2)建立了包含应变变量因素的 TA7 钛合金高温变形本构方程,较好地反映了合金在热变形过程中流变应力的变化规律。

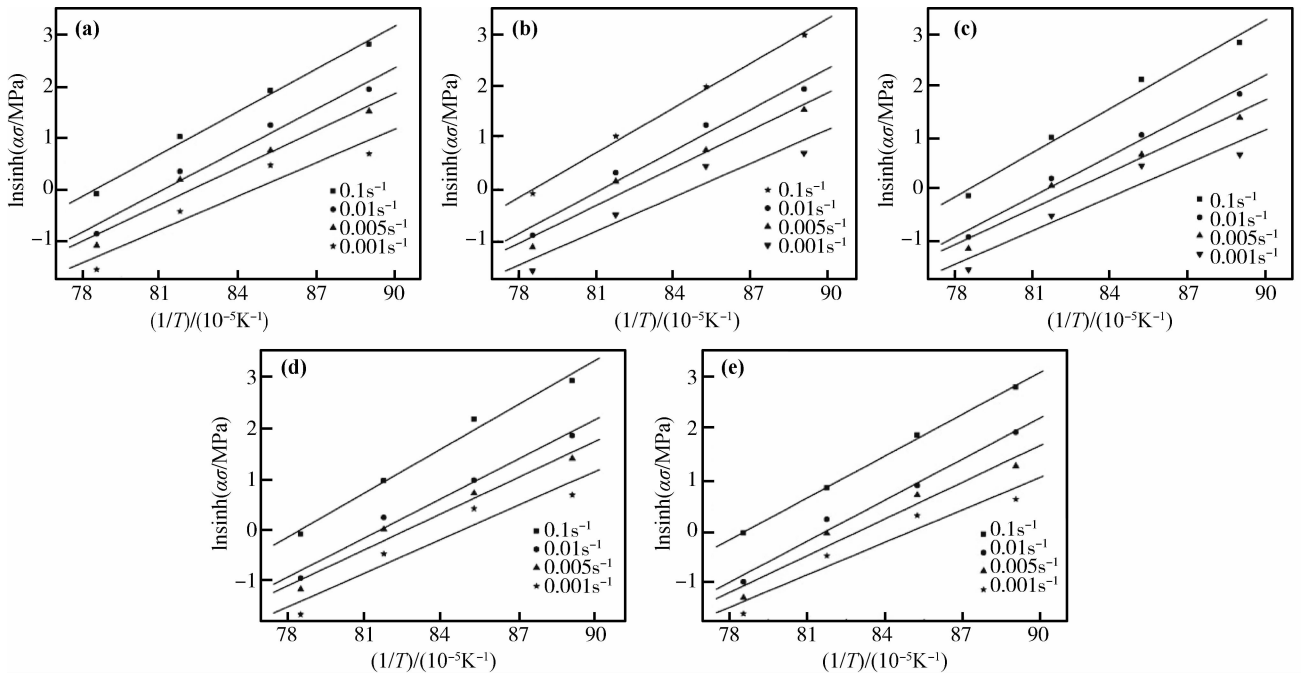


图 5 不同应变条件下 TA7 钛合金  $\ln \sinh (\alpha \sigma)$  和  $1/T$  关系曲线

Fig. 5 Relationships between  $\ln \sinh (\alpha \sigma)$  and  $1/T$  of TA7 titanium alloy at different true strain  
(a) 0.1; (b) 0.15; (c) 0.3; (d) 0.45; (e) 0.65

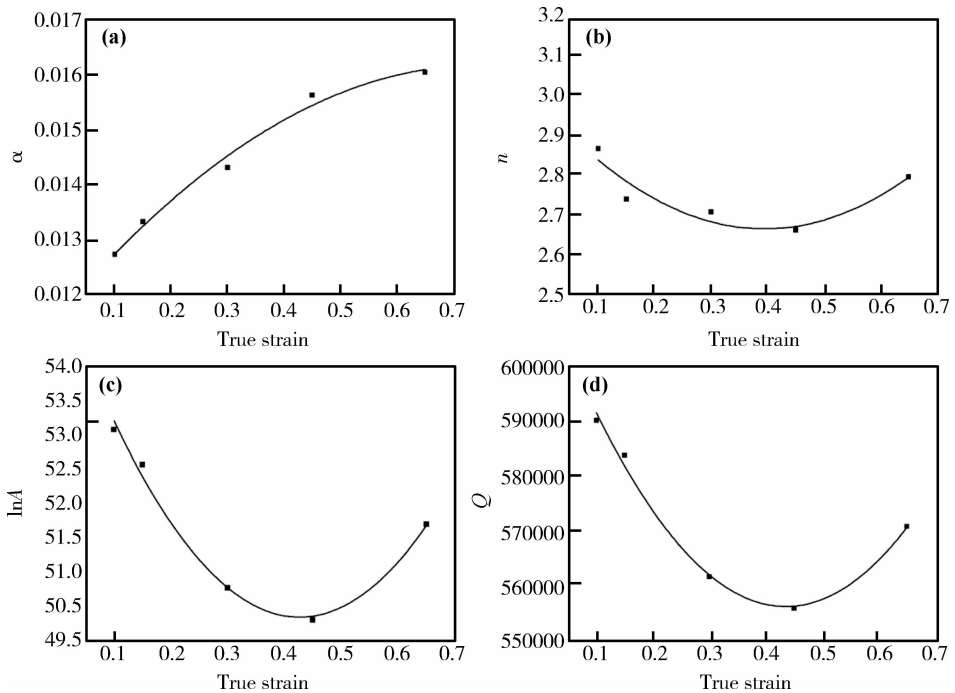


图 6 材料参数和应变量的关系

Fig. 6 Relationships between material parameters and strain  
(a)  $\alpha$ ; (b)  $n$ ; (c)  $\ln A$ ; (d)  $Q$

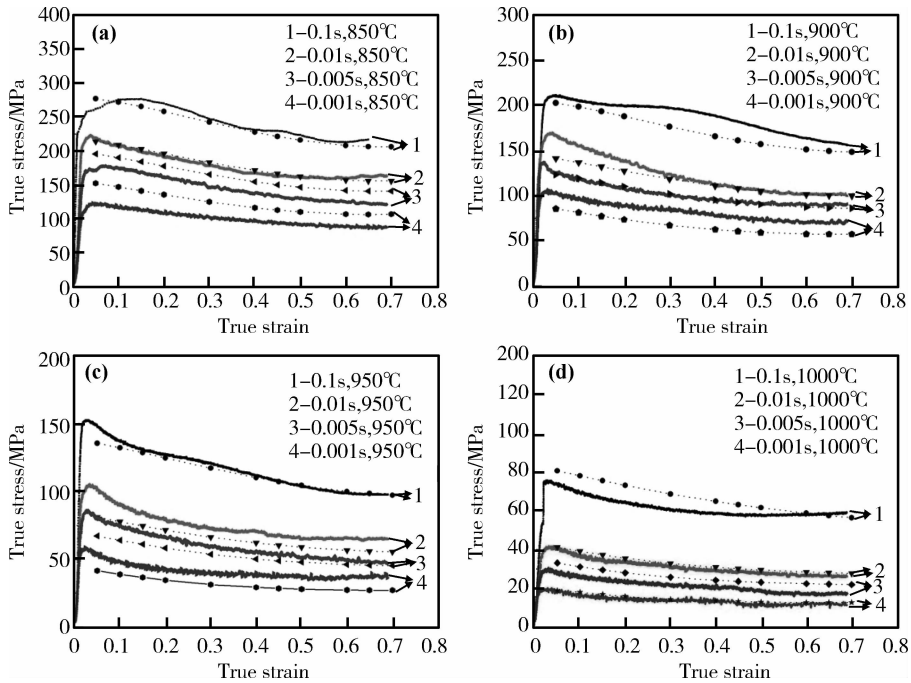


图7 不同应变速率和温度下本构关系模型预测的流变应力与实验值对比

Fig.7 Comparison between experimental and predicted flow stress from constitutive equation at different strain rates and temperatures (a) 800°C ;(b) 850°C ;(c) 900°C ;(d) 1000°C

## 参考文献:

[1] 卢剑,丁宝峰,殷京瓿,等. TA7 钛合金在甲醇溶液中的应力腐蚀敏感性研究[J]. 钛工业进展,2005,22(1):20-23.

(JIAN L, DING B F, YIN J O, *et al.* Electrochemical behavior and SCC susceptibility of TA7 in methanol solution [J]. Hot Working Technology, 2005, 22(1): 20-23.)

[2] 冀胜利,王林歧,徐斌. TA7 合金环件低倍试样“麻坑”现象分析[J]. 热加工工艺,2006,35(2):59-60.

(JI S L, WANG L Q, XU B. Analysis of pock marks in ring forgings macrostructure of TA7 alloy [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(2): 59-60.)

[3] 庞洪,张海龙,王希哲,等. 包覆叠轧 TA7 钛合金薄板的组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报,2010,20(s1):66-69.

(PANG H, ZHANG H L, WANG X Z, *et al.* Microstructures and mechanical properties of TA7 alloy sheet produced by pack ply-rolling process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(s1): 66-69.)

[4] 孙红兰,姚泽坤,郭鸿镇,等. TA7 钛合金在不同墩粗条件下缺陷形成的研究[J]. 热加工工艺,2012,41(3):84-86.

(SUN H L, YAO Z K, GUO H Z, *et al.* Research on defect formation of TA7 titanium alloy under different upsetting condition [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(3): 84-86.)

[5] JONAS J J, SELLARS C M, TEGART W J MCG. Strength and structure under hot working conditions [J]. International Materials Reviews, 1969, 14: 1-24.

[6] LENARD G J G. Modelling hot deformation of steels [M]. Berlin:Springer-Verlag,1989:101-115.

[7] 冯亮,曲恒磊,赵永庆,等. TC21 合金的高温变形行为[J]. 航空材料学报,2004,24(4):11-13.

(FENG L, QU H L, ZHAO Y Q, *et al.* High temperature deformation behavior of TC21 alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 24(4): 11-13.)

[8] 易幼平,杨积慧,蔺永诚. 7050 铝合金热压缩变形的流变应力本构方程[J]. 材料工程,2007,(4):20-26.

(YI Y P, YANG J H, LIN Y C. Flow stress constitutive equation of 7050 aluminum alloy during hot compression [J]. Journal of Materials Engineering, 2007, (4): 20-26.)

[9] 付明杰,静永娟,张继. 挤压开坯  $\gamma$ -TiAl 合金的热变形行为研究[J]. 材料工程,2011,(5):62-65.

(FU M J, JING Y J, ZHANG J. Hot deformation behavior of extruded  $\gamma$ -TiAl alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (5): 62-65.)

[10] 张鹏,李付国,李惠曲. SiC 颗粒增强铝基复合材料的热变形本构方程及其优化[J]. 航空材料学报,2009,38(Z1):9-14.

(ZHANG P, LI F G, LI H Q. Optimization of general constitutive equation for hot deformation of SiC particle reinforced Al matrix composites [J]. Journal of Aeronautical

- Materials, 2009, 38(Suppl 1): 9-14.)
- [11] 孙欢迎, 曹京霞, 王宝, 等. 阻燃钛合金高温变形行为研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(S1): 31-35.  
(SUN H Y, CAO J X, WANG B, *et al.* Hot deformation behavior of as-cast burn resistant titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(S1): 31-35.)
- [12] 梁业, 郭鸿镇, 刘鸣, 等. TA15 合金高温本构方程的研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(4): 150-154.  
(LIANG Y, GUO H Z, LIU M, *et al.* Study on constitutive equations for hot deformation of TA15 alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(4): 150-154.)
- [13] 刘洋, 陶宇, 贾建. 镍基粉末高温合金 FGH98 流变曲线特性及本构方程[J]. 航空材料学报, 2011, 31(6): 12-18.  
(LIU Y, TAO Y, JIA J. Characteristics of flow curves and constitutive equation of nickel-based P/M superalloy FGH98 [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(6): 12-18.)
- [14] 东赞鹏, 王超渊, 宋晓俊, 等. GH5188 合金流变行为研究[J]. 锻压技术, 2013, 38(6): 116-121.  
(DONG Y P, WANG C Y, SONG X J, *et al.* Study on plastic deformation behavior of GH5188 superalloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2013, 38(6): 116-121.)

## Plastic Deformation Behavior of TA7 Titanium Alloy

DONG Yun-peng, YU Qiu-ying, FANG Shuang, WANG Shu-yun, WANG Chao-yuan, SONG Xiao-jun

(Laboratory of Welding and Forging, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The flow stress of TA7 titanium alloy was investigated by isothermal hot compression in the temperature range of 850-1000°C and strain rate of 0.001-0.1 s<sup>-1</sup>. The constitutive equation for describing the plastic deformation behavior of the TA7 titanium alloy during hot compression process was deduced. The results show that the flow stress of the TA7 titanium alloy is greatly affected by temperature and strain rate. With the increase of the temperature and decrease of the strain rate, the flow stress of the TA7 titanium alloy decreases greatly, and the plastic deformation get into the steady-going condition state immediately under the condition of low flow stress.

**Key words:** TA7; titanium alloy; flow stress; constitutive equation