

# TC4 钛合金流动软化行为及本构模型研究

徐 勇<sup>1,2</sup>, 杨湘杰<sup>1</sup>, 何 毅<sup>1</sup>, 牡丹妮<sup>1</sup>

(1. 南昌大学, 江西 南昌 330031)

(2. 南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

**摘 要:** 利用 Gleeble-3500 热模拟试验机进行等温恒应变速率热压缩实验, 研究了 TC4 钛合金在温度 800~950 °C、应变速率 0.001~10 s<sup>-1</sup> 条件下的流动软化行为。研究发现随变形温度降低和应变速率增大 TC4 钛合金的流动软化程度增大, 且 800~850 °C、应变速率 1~10 s<sup>-1</sup> 变形时的流动软化主要是塑形流动失稳引起的, 温度 900~950 °C、应变速率 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 条件变形时, 流动软化主要是片状  $\alpha$  相的等轴化引起的。引入应变对材料常数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $A$  和  $Q$  的影响, 建立了考虑应变的 TC4 钛合金 Arrhenius 本构方程, 建立的本构模型精度较好, 在 800, 850 °C 和 10 s<sup>-1</sup> 条件以及在 900, 950 °C 和 0.1 s<sup>-1</sup> 条件下, 模型平均绝对误差分别为 4.2% 和 4.3%。TC4 钛合金的平均变形激活能为 403 kJ/mol, 平均应变速率敏感指数为 0.26。

**关键词:** TC4 钛合金; 流动软化; 本构方程; 热变形

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-1321-06

钛合金因其高的比强度、优异的抗腐蚀性和良好的高温力学性能广泛地应用于航空、航天、船舶等领域。钛合金热变形时伴随加工硬化、流动软化、动态回复和动态再结晶等复杂的物理过程<sup>[1-4]</sup>, 其对材料的微观组织和性能有着重要影响。

钛合金热变形行为, 尤其是两相区热变形过程中  $\alpha$  相的动态球化行为和热变形本构模型, 一直是国内外研究的热点。Semiatin 等<sup>[5]</sup>研究了针状、薄片层、厚片层组织 TC4 钛合金的高温流动行为。Kim 等<sup>[6]</sup>研究了不同厚度片层组织 TC4 钛合金的高温流动应力应变响应特性。X. Ma 等<sup>[7]</sup>利用神经网络技术建立了片状组织 Ti17 本构模型。J. Porntadawit 等<sup>[8]</sup>研究了 TC4 钛合金经单相区加热保温后在两相区和单相区的变形行为, 建立了 Hyperbolic Sine、Cingara 和 Shafiei-Ebrahimi 等多种本构模型。对钛合金热变形行为及本构模型的研究, 集中在针状、薄片层、厚片层、等轴、网篮等微观组织的热处理状态合金。对热加工态 TC4 钛合金的两相区热变形行为研究较少, 而这对 TC4 钛合金零部件的成形和零部件组织性能的精确控制有着重要的影响。

本研究通过对商业 TC4 热轧板材进行高温热压缩实验, 探讨变形温度 800~950 °C、应变速率 0.001~10 s<sup>-1</sup> 条件下合金的流动软化行为, 建立 TC4 钛合金的本构方程。

## 1 实 验

收稿日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (51164030); 航空科学基金 (2014ZE56015)

作者简介: 徐 勇, 男, 1978 年生, 博士生, 南昌大学机电学院, 江西 南昌 330031, E-mail: xuyong@nchu.edu.cn

TC4 钛合金实验材料取自热轧板材, 化学成分及原始组织分别如表 1 和图 1 所示。从图 1 可知, 实验用 TC4 钛合金微观组织由片状初生  $\alpha$  相、晶间  $\beta$  相以及少量等轴  $\alpha$  相组成。热模拟压缩实验在 Gleeble-3500 试验机上进行, 压缩试样为  $\Phi 6$  mm  $\times$  9 mm 圆柱体。压缩实验温度为 800, 850, 900, 950 °C, 应变速率为 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 s<sup>-1</sup>, 变形程度为 50%。试样加热到设定温度后保温 180 s, 变形完成后快速水冷。图 2 是试样压缩变形前后的宏观照片。压缩后的试样沿纵向中心剖开, 经

表 1 TC4 钛合金的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of as received TC4 alloy (wt%)							
Al	V	Fe	C	N	O	H	Ti
5.9	3.9	0.11	0.01	0.02	0.10	0.001	Bal.

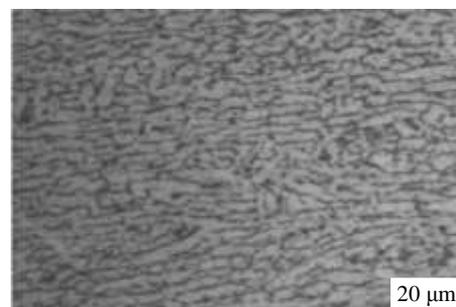


图 1 TC4 钛合金原始组织

Fig.1 Microstructure of the Ti-6Al-4V alloy used in this study

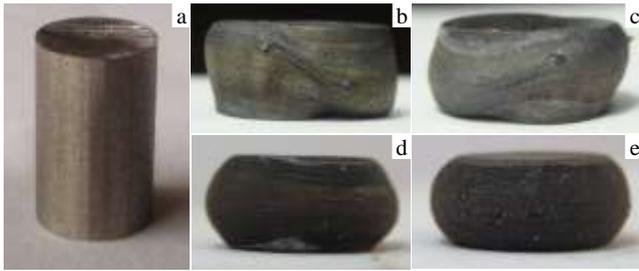


图 2 试样压缩变形前和不同条件变形后的宏观照片

Fig.2 Macro photos of the specimens: (a) before deformation; (b) 800 °C/10 s<sup>-1</sup>; (c) 850 °C/10 s<sup>-1</sup>; (d) 850°C/0.01 s<sup>-1</sup>; (e) 900 °C/0.01 s<sup>-1</sup>

机械打磨抛光并用 Kroll 试剂腐蚀后，采用 XJP-6A 型金相显微镜进行组织观察和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 应力应变曲线

金属及合金在 0.4T<sub>m</sub> 以上温度变形时，塑性变形受到热激活过程的强烈影响，流动应力受变形温度和应变速率影响<sup>[9]</sup>。图 3 为 TC4 钛合金不同温度、不同应变速率下的真应力-真应变曲线。变形初期，流动应力随着应变的增加快速增大并达到峰值。随后，流动应力随着应变的增加而持续下降或先下降并逐渐趋于稳定。

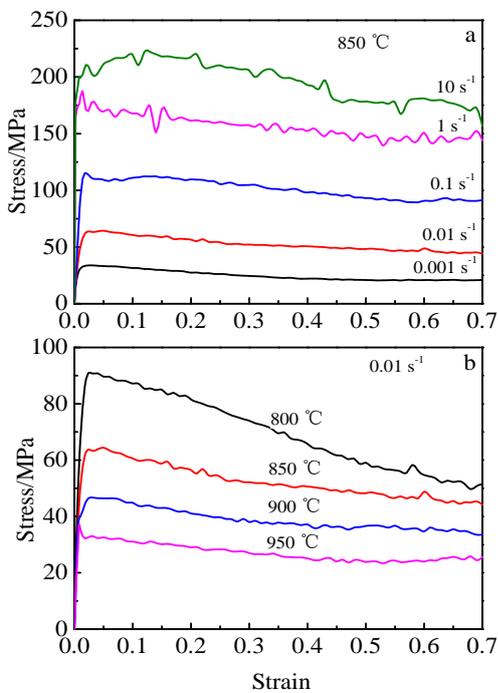


图 3 TC4 钛合金在不同应变速率和温度下的真应力-真应变曲线

Fig.3 Flow stress-strain curves at different strain rates and temperatures : (a) 850 °C and (b) 0.01 s<sup>-1</sup>

### 2.2 流动软化行为

图 4 为 TC4 钛合金的各变形参数下峰值应力和真应变为 0.65 时流动应力的差，即材料的流动软化程度。可以看出，随应变速率增大、变形温度降低，TC4 钛合金各变形温度下的流动软化程度增大。低温、高应变速率（800~850 °C、1~10 s<sup>-1</sup>）时发生了较大程度的流动软化，对照图 2 发现，在 800 °C/10 s<sup>-1</sup>、850 °C/10 s<sup>-1</sup> 条件下，试样表面形成了明显的宏观剪切裂纹，剪切裂纹与试样压缩轴线呈 45°。变形温度较低和应变速率较高时，变形速度快，因钛合金热导率小变形热来不及向周围传递，从而使试样局部温度升高而产生绝热失稳<sup>[10-12]</sup>。图 5 是 TC4 钛合金在不同变形温度和应变速率下压缩变形后的微观组织。图 5a 和 5b 在 800 °C/10 s<sup>-1</sup> 条件下变形时组织中出现变形不均匀而产生局部流动带的照片，片状初生 α 相沿局部流动带方向被拉长，等轴 α 相晶较少。与图 5b 不同，图 5c 和 5d 在 850 °C/0.01 s<sup>-1</sup>、900 °C/0.01 s<sup>-1</sup> 条件下变形时，微观组织中片状初生 α 相大量发生了等轴化，且 α 相的等轴化分数分别高达 67%和 85%，对照图 2d 和 2e 宏观试样也未发现其存在塑形流动失稳。可见，图 4 中 TC4 钛合金应力-应变曲线中的流动软化主要是塑形流动失稳和片状 α 相的等轴化引起的。在低温（800~850 °C）、高应变速率（1~10 s<sup>-1</sup>）变形时，流动软化主要是塑形流动失稳引起的；在高温（900~950 °C）、低应变速率（0.001~0.1 s<sup>-1</sup>）时，流动软化主要是片状相 α 的等轴化引起的。

### 2.3 本构模型

#### 2.3.1 材料常数的确定

Arrhenius 方程被广泛地用于描述金属及合金热变形时应变速率、温度和应力之间的关系<sup>[8,13-17]</sup>，尤其是在高温变形条件下。在低应力水平，应变速率与应力成幂律关系，如式（1）所示；在高应力水平，应变速率与应力成指数关系，如式（2）所示<sup>[18]</sup>。Sellars 等<sup>[19]</sup>则提出了适用所有应力状态的双曲正弦形式的本构模型，见式（3）。

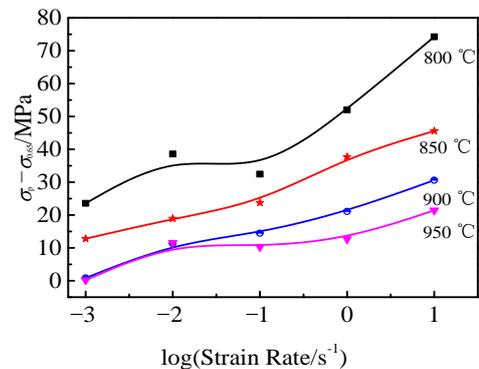


图 4 TC4 钛合金的流动软化程度 (σ<sub>p</sub>-σ<sub>0.65</sub>)

Fig.4 Flow softening degree of TC4 titanium alloy ( $\sigma_p - \sigma_{0.65}$ )

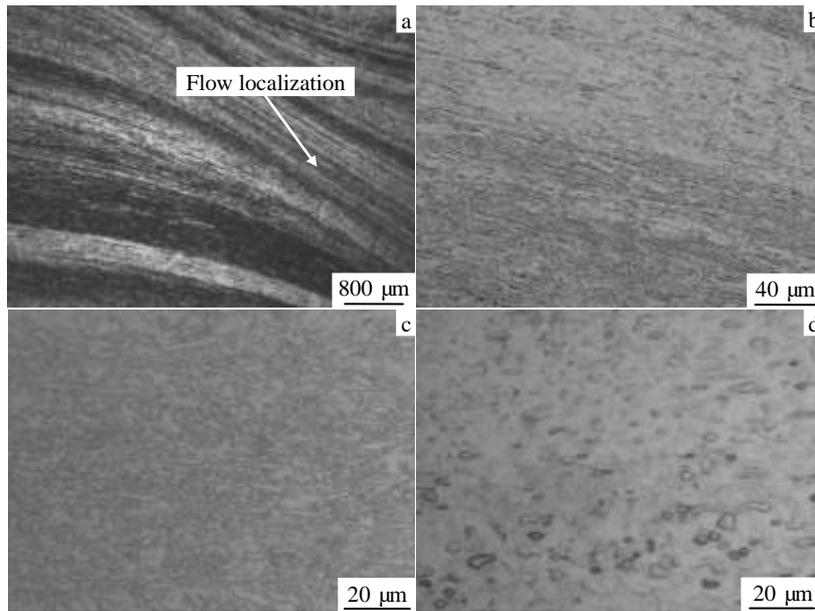


图 5 TC4 钛合金在不同温度和应变速率下的微观组织

Fig.5 Microstructures of the specimens at the strain of 0.7: (a, b) 800 °C/10 s<sup>-1</sup>, (c) 850 °C/0.01 s<sup>-1</sup>, and (d) 900 °C/0.01 s<sup>-1</sup>

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

式中,  $\dot{\epsilon}$  是应变速率 (s<sup>-1</sup>),  $\sigma$  是峰值应力、稳态应力或某一应变下的应力 (MPa),  $T$  是绝对温度 (K),  $Q$  是变形激活能 (J/mol),  $R$  是气体常数(8.314 J/mol K),  $A$ 、 $n_1$ 、 $\beta$  (MPa<sup>-1</sup>)、 $n$  和  $\alpha$  ( $\alpha = \beta/n_1$ , MPa<sup>-1</sup>) 是材料常数。

对式 (1) 和 (2) 两边取自然对数, 并整理可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - \frac{Q}{RT} \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta\sigma + \ln A_2 - \frac{Q}{RT} \quad (5)$$

图 6 是应变为 0.1 时的  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  关系曲线。 $n_1$  和  $\beta$  的值可由图中不同温度下的  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  和  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  直线的斜率计算而来。取低应力状态下的  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  直线的斜率平均, 可得  $n_1 = 4.6839$ ; 取高应力状态下的  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  直线的斜率平均, 可得:  $\beta_{0.1} = 0.0430 \text{ MPa}^{-1}$ ,  $\alpha_{0.1} = \beta_{0.1}/n_1 = 0.0092 \text{ MPa}^{-1}$ 。

对式 (3) 两边取自然对数, 整理可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A - \frac{Q}{RT} \quad (6)$$

当温度或应变速率一定, 分别对式 (6) 微分可

得:

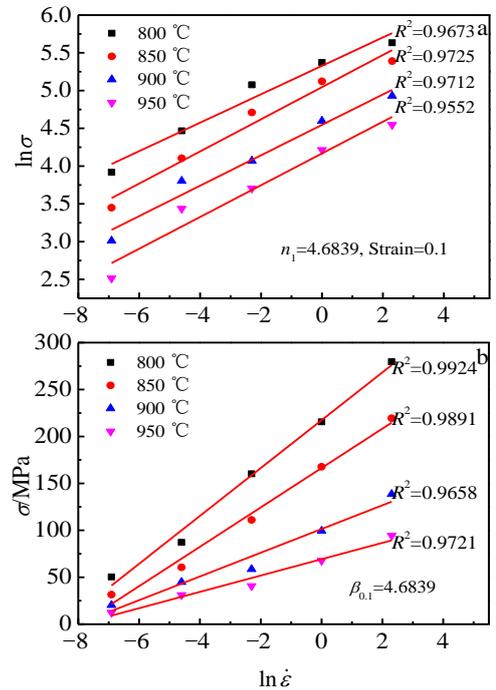


图 6 应变速率与应力的关系

Fig.6 Relationship between the strain rate and flow stress:

(a)  $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$  and (b)  $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$

$$\frac{1}{n} = \frac{d\{\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\}}{d(\ln \dot{\epsilon})} \quad (7)$$

$$Q = nR \frac{d\{\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\}}{d(1/T)} \quad (8)$$

图 7 是应变为 0.1 时的  $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  关系曲线。计算不同温度下的  $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  直线斜率即为  $1/n$ ，平均可得  $n_{av}=3.9235$ 。因为应变率敏感指数  $m = d\{\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\}/d(\ln \dot{\epsilon})$ ，图 7 中各直线的斜率即为  $m$ ，平均可得  $m_{0.1}=0.2575$ 。

图 8 是应变为 0.1 时的  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$  关系曲线。计算不同应变速率下的  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$  直线斜率的平均值为 1.3935，按式 (8) 可得  $Q_{0.1}=454.5453$  kJ/mol。

由式 (3) 可得：

$$\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (9)$$

式 (9) 左端即 Zener-Holloman 参数，它是表征温度和应变速率对材料变形行为影响的重要参数。对式 (9) 两边取对数，可得：

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (10)$$

式 (10) 中，Z 是 Zener-Holloman 参数。图 9 是应变为 0.1 时  $\ln Z$  与  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  的关系曲线。线性拟合后计算直线斜率可得， $n_{0.1}=3.8626$ ， $\ln A_{0.1}=46.1729$ 。

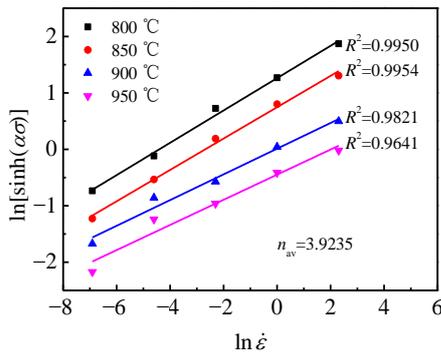


图 7  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  与  $\ln \dot{\epsilon}$  的关系

Fig.7 Relationship between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  and  $\ln \dot{\epsilon}$  at different temperatures and the strain of 0.1

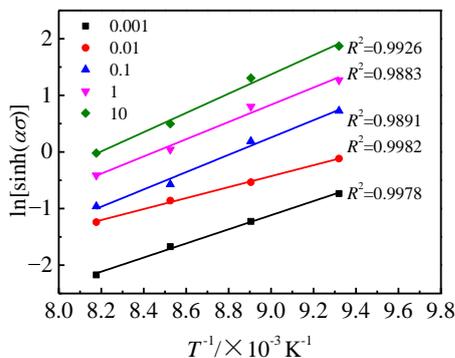


图 8  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  与  $(1/T)$  的关系

Fig.8 Relationship between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  and  $1/T$  at different strain rates and the strain of 0.1

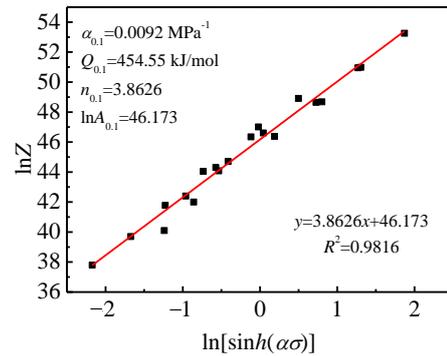


图 9  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  与  $\ln Z$  的关系

Fig.9 Relationship between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  and  $\ln Z$  at different temperatures and the strain of 0.1

### 2.3.2 本构模型及误差检验

Arrhenius 方程没有考虑应变对流动应力的影响。实验结果表明在低应变区，应变对应力的影响非常明显；在高应变速率区，应变对应力也有较明显的影响。按照前述方法分别计算得到不同应变下的材料常数 ( $n$ 、 $\alpha$ 、 $Q$  和  $A$ ) 并分别绘制材料常数与应变的关系曲线，如图 10 所示，应变对材料常数 ( $n$ 、 $\alpha$ 、 $Q$  和  $A$ ) 的影响明显。根据不同应变下的  $Q$ 、 $m$  值平均可得 800~950 °C 和 0.001~10 s<sup>-1</sup> 范围内，TC4 钛合金的平均变形激活能为 403 kJ/mol，平均应变率敏感指数为 0.26。

用多项式对材料常数进行拟合。发现用 5 次多项式对  $\alpha$  拟合具有较好的相关性，用 4 次多项式对  $n$ 、 $Q$  和  $\ln A$  拟合具有较好的相关性。将材料常数  $n_\epsilon$ 、 $\alpha_\epsilon$ 、 $Q_\epsilon$  和  $A_\epsilon$  代入式 (3) 可得到考虑应变的 Arrhenius 本构方程。

$$\dot{\epsilon} = A_\epsilon [\sinh(\alpha_\epsilon \sigma)]^{n_\epsilon} \exp\left(-\frac{Q_\epsilon}{RT}\right) \quad (11)$$

式 (11) 中，

$$n_\epsilon = 0.891\epsilon^5 - 1.552\epsilon^4 + 0.929\epsilon^3 - 0.226\epsilon^2 + 0.023\epsilon + 0.008$$

$$\alpha_\epsilon = -1.884\epsilon^4 + 4.773\epsilon^3 - 0.866\epsilon^2 - 1.028\epsilon + 3.971$$

$$Q_\epsilon = -401.96\epsilon^4 + 721.71\epsilon^3 - 419.53\epsilon^2 + 71.22\epsilon + 42.53$$

$$A_\epsilon = -3049.6\epsilon^4 + 5539.6\epsilon^3 - 3248.3\epsilon^2 - 514.2\epsilon + 430.1$$

图 11 是不同温度和应变速率下实验测得的应力应变曲线与模型预测值分布。对比实验值与模型预测值，结果表明模型能较好地预测 800~950 °C 和 0.001~10 s<sup>-1</sup> 范围内的流动应力，在 800, 850 °C 和 10 s<sup>-1</sup> 条件下，模型平均绝对误差为 4.2%，在 900, 950 °C 和 0.1 s<sup>-1</sup> 条件下，模型平均绝对误差为 4.3%，在高温 (900 和 950 °C) 高应变速率 (10 s<sup>-1</sup>) 条件下，模型误差较大。

图 12 是流动应力实验值与模型预测值的对比,可知二者有好的相关性, 相关系数为 97.1%, 说明建立的本

构模型能准确预测 TC4 钛合金热变形过程的流动应力。

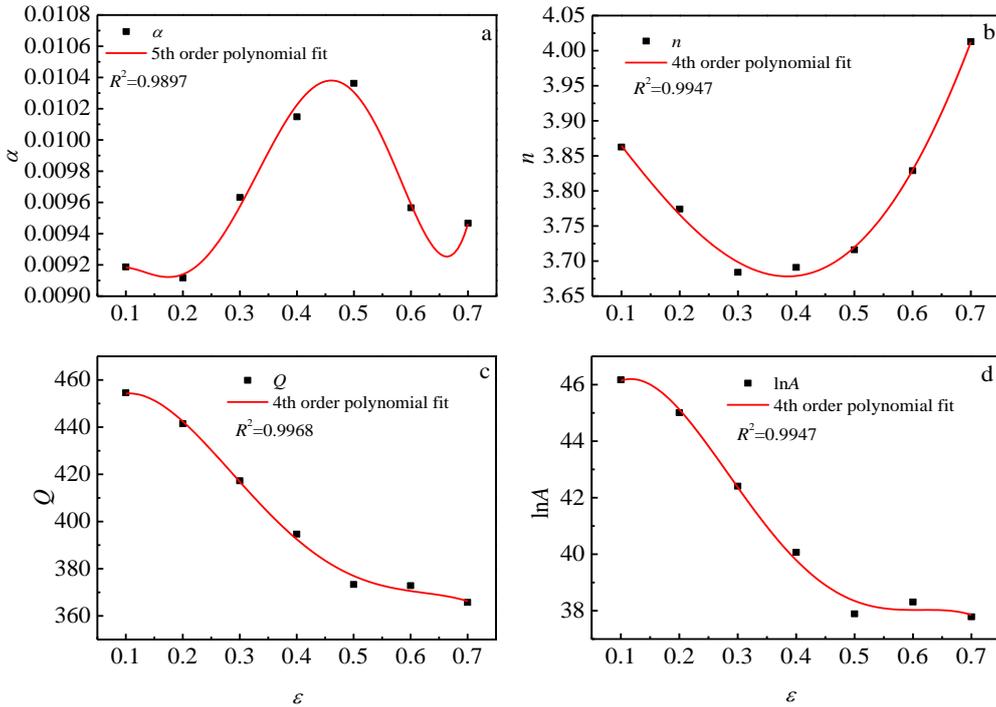


图 10 材料常数与应变的关系

Fig.10 Variations in constitutive parameters as a function of strain: (a)  $\alpha$ , (b)  $n$ , (c)  $Q$ , and (d)  $\ln A$

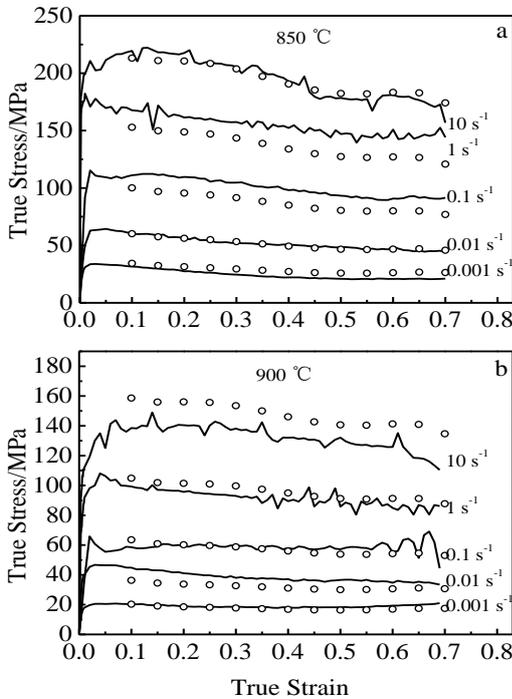


图 11 不同温度和应变速率下流动应力的预测值与实验结果  
Fig.11 Experimental and calculated flow stresses of the TC4 alloy

at various temperatures and various strain rates: (a) 850 °C and (b) 900 °C

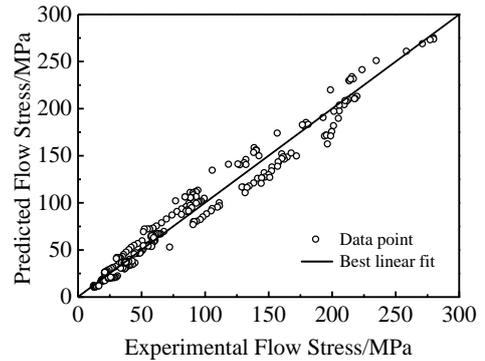


图 12 流动应力的预测值与实验值对比  
Fig.12 Comparisons between the experimental and the calculated flow stresses of TC4 alloy

### 3 结 论

1) 随变形温度降低、应变速率增大, TC4 钛合金的流动软化程度增大。流动软化主要是由塑形流动失稳和片状  $\alpha$  相的等轴化引起的。在低温、高应变速率

(800~850 °C、1~10 s<sup>-1</sup>) 变形时, 流动软化主要是塑形流动失稳引起的; 在高温、低应变速率(900~950 °C、0.001~0.1 s<sup>-1</sup>) 时, 流动软化主要是片状  $\alpha$  相的等轴化引起的。

2) 建立了引入应变的 TC4 钛合金 Arrhenius 本构方程, 模型能较好地预测 800~950 °C 和 0.001~10 s<sup>-1</sup> 范围内的流动应力; 在 800, 850 °C 和 10 s<sup>-1</sup> 条件下, 模型平均绝对误差为 4.2%, 在 900, 950 °C 和 0.1 s<sup>-1</sup> 条件下, 模型平均绝对误差为 4.3%, 在高温(900 和 950 °C) 高应变速率(10 s<sup>-1</sup>) 条件下, 模型误差较大。

3) 在 800~950 °C 和 0.001~10 s<sup>-1</sup> 范围内, TC4 钛合金的平均变形激活能为 403 kJ/mol, 平均应变速率敏感指数为 0.26。

#### 参考文献 References

- [1] Bruschi S, Poggio S, Quadrini F *et al. Materials Letters*[J], 2004, 58: 3622
- [2] Seshacharyulu T, Medeiros S C, Morgan J T *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 279: 289
- [3] Xiong Aiming(熊爱明), Chen Shenghui(陈胜晖), Huang Weichao(黄维超) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(6): 447
- [4] Chen Huiqin(陈慧琴), Lin Haozhuan(林好转), Guo Lin(郭 灵) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2007, 1: 60
- [5] Semiatin S L, Bieler T R. *Acta Materialia*[J], 2001, 49: 3565
- [6] Kim J H, Semiatin S L, Lee C S. *Acta Materialia*[J], 2003, 51(18): 5613
- [7] Ma X, Zeng W D, Sun Y *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 538: 182
- [8] Porntadawit J, Uthaisangsuk V, Choungthong P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 599: 212
- [9] Verlinden B, Driver J, Samajdar I *et al. Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials, 1st Ed*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007
- [10] Liao S-C, Duffy J. *J Mech Phys Solids*[J], 1998,46: 2201
- [11] Yang Y, Wang B F. *Materials Letters*[J], 2006, 60: 2198
- [12] Zhang Jing, Tan Chengwen, Ren Yu *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21: 2396
- [13] Cai J, Li F G, Liu T Y *et al. Materials and Design*[J], 2011, 32: 1144
- [14] Rezaei Ashtiani H R, Parsa M H, Bisadi H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 545: 61
- [15] Zou D N, Wu K, Han Y *et al. Materials and Design*[J], 2013, 31: 3599
- [16] Wu H Y, Yang J C, Zhu F J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 574: 17
- [17] Liu Jinhao(刘金豪), Liu Jiansheng(刘建生), Xiong Yunsen(熊运森) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(8): 1674
- [18] McQueen H J, Ryan N D. *Materials Science and Engineering A*[J], 2002, 322: 43
- [19] Sellars C M, Mc Tegart W J. *Acta Metal*[J], 1966, 14(9): 1136

## Flow Softening Behavior and Constitutive Equation of TC4 Titanium Alloy during Hot Deformation

Xu Yong<sup>1,2</sup>, Yang Xiangjie<sup>1</sup>, He Yi<sup>1</sup>, Du Danni<sup>1</sup>

(1. Nanchang University, Nanchang 330031, China)

(2. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** Hot compression tests were conducted on TC4 titanium alloy at different temperatures in a range of 800~950 °C and at different strain rates in the range of 0.001~10 s<sup>-1</sup>. Flow softening behavior of this alloy was investigated. Results show that the flow softening degree increases with the increasing strain rate and the decreasing temperature. Meanwhile, softening is mainly attributed to flow instability at temperatures of 800 and 850 °C, strain rates of 1 and 10 s<sup>-1</sup>. Conversely, softening is dominated by globularization of lamellar  $\alpha$  at temperatures of 900 and 950 °C, strain rates of 0.001, 0.01 and 0.1 s<sup>-1</sup>. In addition, the effect of strain is incorporated in the Arrhenius equation by considering the effects of strain on material constants including  $\alpha$ ,  $n$ ,  $A$  and  $Q$ . The calculated flow stresses are compared with the experimental results. It is indicated that this model gives precise estimation for the flow stress, especially at 800~850 °C and 10 s<sup>-1</sup>, 900~950 °C and 0.1 s<sup>-1</sup>. The average deformation activation energy is about 403 kJ/mol and the average strain rate sensitivity exponent of TC4 alloy is 0.26.

**Key words:** TC4 titanium alloy; flow softening; constitutive equation; hot working

Corresponding author: Yang Xiangjie, Ph. D., Professor, School of Mechatronics Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China, E-mail: yangxj@ncu.edu.cn