

# 基于应变补偿 TC4-DT 钛合金高温变形本构模型

刘江林<sup>1</sup>, 曾卫东<sup>1</sup>, 谢英杰<sup>2</sup>, 舒滢<sup>2</sup>, 杨建朝<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 西部钛业有限责任公司, 陕西 西安 710201)

**摘要:** 通过 TC4-DT 钛合金在 1181~1341 K, 0.01~10 s<sup>-1</sup> 条件下热模拟压缩试验, 得到其在不同条件下高温变形真应力-真应变曲线。采用回归分析和多项式拟合建立了应变补偿高温变形本构方程。结果表明: 各变形条件下的流变应力曲线均呈现应变硬化和流动软化, 低温高应变速率特征更明显。当应变速率低于 1 s<sup>-1</sup> 时, 预测值与实验值吻合程度较高, 相关系数和平均相对误差绝对值分别为 0.9952 和 5.78%, 此修正模型可作为 TC4-DT 钛合金高温变形本构方程。

**关键词:** TC4-DT 钛合金; 热变形; 应变补偿; 本构方程

中图分类号: TG146.2<sup>3</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)11-2742-05

钛合金高温变形过程中伴随着不同的微观组织演变机制, 其与应变、应变速率和变形温度密切相关<sup>[1,2]</sup>。为了优化成形工艺参数, 同时弄清楚钛合金高温变形行为, 有限元作为一种有效降低成本的方法得到了广泛应用。有限元模型精度与相应变形条件下的本构模型密切相关, 因此高精度本构模型的建立尤其重要<sup>[3-5]</sup>。通常, 本构模型可以分为唯相模型、统计模型和理论模型, 每种模型都有自身的优势和缺点。唯相模型因其较少材料常数而被广泛应用, 尤其是基于 Arrhenius 方程的本构方程已成功应用于多种金属及合金。但是, 多数研究者<sup>[6-10]</sup>忽略了应变的影响。相关文献<sup>[11,12]</sup>研究显示, 应变对金属热变形行为的影响不能忽视, 应该对现有模型进行修正。Y. C. Lin 等<sup>[13]</sup>和 D. Samantaray 等<sup>[3]</sup>基于修正的本构方程建立了 42CrMo 钢和 9Cr-1Mo 钢的本构方程, 验证了本模型具有较高的预测精度。同时, Ti-6Al-4V<sup>[4]</sup>和奥氏体不锈钢<sup>[14]</sup>等合金也得到了验证。

TC4-DT 合金是由中国自主开发的中强、损伤容限型钛合金<sup>[15,16]</sup>。与普通的 TC4 合金相比, 低间隙元素使其除了拥有良好成形性、焊接性和耐蚀性外, 还具有高断裂韧性、低裂纹扩展的特性。本研究以不同应变速率和变形温度的热模拟压缩试验数据为基础, 在分析应变对材料常数影响的前提下, 建立考虑应变的 TC4-DT 钛合金高温变形本构模型, 最后通过预测值与实验值的对比分析证明模型的可靠性。

## 1 实验

试验用材料为 TC4-DT 钛合金板材, 成分如表 1 所示, 初始微观组织如图 1。金相法测得合金的相变点为 988 °C。将 TC4-DT 钛合金加工成  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的圆柱体热模拟压缩试样若干个。高温压缩试验在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行。实验温度为 1181, 1211, 1241, 1281, 1311, 1341 K, 应变速率为 0.01, 0.1, 1, 10 s<sup>-1</sup>, 变形量 60%。试样两端黏贴石墨片以减小压缩过程中摩擦, 压缩后试样即刻水淬

表 1 TC4-DT 钛合金成分

Table 1 Chemical composition of the tested alloy ( $\omega/\%$ )

Element	Ti	Al	V	Fe	C	Si	H	O
Content	Balance	6.22	4.25	0.032	0.005	0.068	0.0012	0.11

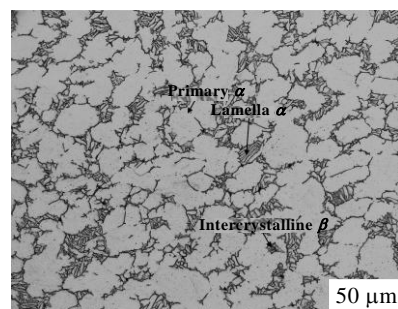


图 1 TC4-DT 板材初始组织

Fig.1 Starting microstructure of TC4-DT titanium alloy

收稿日期: 2014-11-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”)计划(2007CB613807); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-07-0696); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2012KTZB01-03)

作者简介: 刘江林, 男, 1984 年生, 博士生, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88460516, E-mail: jlliu84@sina.com

至室温。仪器自动记录载荷-行程数据，并转化为真实应力-应变曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 变形行为

图 2 为 TC4-DT 钛合金两相区和单相区不同应变速率条件下的典型流变应力曲线。图中显示，合金经过较小应变硬化即达到应力峰值，随后由于再结晶和回复使流变应力逐渐下降趋于稳定，此时加工硬化和流动软化达到平衡，即表现为稳态流变特征。在低温高应变速率时，加工硬化占主导；高温低应变速率时，软化效应更明显。原因在于高温低应变速率条件下，为能量积累、再结晶晶粒晶界处形核和长大，位错密度扩散等机制提供了充裕的时间，进而产生较低的应力水平<sup>[4]</sup>。另外，从不同温度和应变速率下的流变应力差值显著的特点看，TC4-DT 钛合金对应变速率和温度具有较高的敏感性。

### 2.2 本构方程的建立

金属和合金的热变形是一个热激活的过程，应变速率和变形温度可以通过 Zener-Holloman 参数作用于 Arrhenius 方程中，Z 参数及 Arrhenius 方程的 3 种形式如式(1)、(2)、(3)和(4)所示<sup>[4]</sup>。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

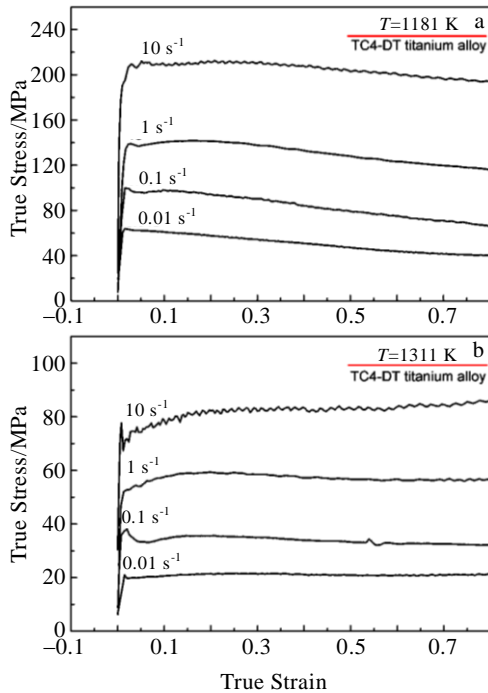


图 2 TC4-DT 钛合金 2 种变形温度下典型流变应力曲线

Fig.2 Typical flow stress curves of TC4-DT titanium alloy at the deformation temperatures of 1181 K (a) and 1131 K (b)

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \alpha\sigma < 0.8 \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = C \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \alpha\sigma > 1.2 \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \text{for all } \sigma \quad (4)$$

式中， $\dot{\epsilon}$  为应变速率 ( $s^{-1}$ )， $R$  为气体常数 [ $8.315 \text{ (J/mol) K}^{-1}$ ]， $T$  为绝对温度 (K)， $Q$  为变形激活能 ( $\text{kJ/mol}$ )， $A, B, C, n_1, \alpha, \beta, n$  为材料常数， $\alpha = \beta/n_1$ 。

### 2.3 材料常数的确定

通常，研究者直接将不同变形条件下的应力应变数据进行拟合得到 Arrhenius 方程中的材料常数，进而建立忽略应变的本构方程。但 Cai 等<sup>[4]</sup>和 Luo 等<sup>[11]</sup>研究发现应变对钛合金高温变形影响显著。本研究通过应变对材料常数的影响证明其不可忽略，以应变为 0.5 的计算过程如下：

将方程(2)，(3)和(4)两边取对数，得到：

$$\ln \sigma = (1/n_1) \ln \dot{\epsilon} + (1/n_1)(Q/RT - \ln B) \quad (5)$$

$$\sigma = (1/\beta) \ln \dot{\epsilon} + (1/\beta)(Q/RT - \ln C) \quad (6)$$

$$1/n = \left[ \frac{\partial \ln(\sinh(\alpha\sigma))}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right]_T \quad (7)$$

$$Q = nR \left[ \frac{\partial \ln(\sinh(\alpha\sigma))}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (8)$$

分别对  $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$  及  $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$  进行拟合，分别得到  $n_1$  和  $\beta$ ，见图 3。从文献[17]得知，两相区与单相区得到的材料常数具有显著差别，所以将材料常数计算分为 2 个区进行（见图 4）。应变为 0.5 时，两相区和单相区不同温度条件下应变速率与流变应力的拟合得出的材料常数见表 2。

### 2.4 应变补偿

图 5 为材料参数随应变变化关系。从图 5 可知，应变对材料常数影响较大。因此，在建立 TC4-DT 钛合金本构方程时不能忽略应变。这里假设材料常数为应变的多项式函数，通过数据拟合显示 6 次多项式具有较高的相关系数  $R$  和平均绝对相对误差，低次或高次都会出现欠拟合和过拟合的不足，多项式拟合系数见表 3。

材料常数确定以后，利用 Z 参数与材料常数表示的本构方程见式 (9)：

表 2 应变为 0.5 时  $n, \alpha, Q$  和  $\ln A$  的值  
Table 2 Values of  $n, \alpha, Q$  and  $\ln A$  under the strain of 0.5

Phase field	$n$	$\alpha$	$Q/\text{kJ mol}^{-1}$	$\ln A$
$(\alpha+\beta)$ phase	3.325	0.0130	551.52	52.92
$\beta$ phase	3.698	0.0219	202.43	16.89

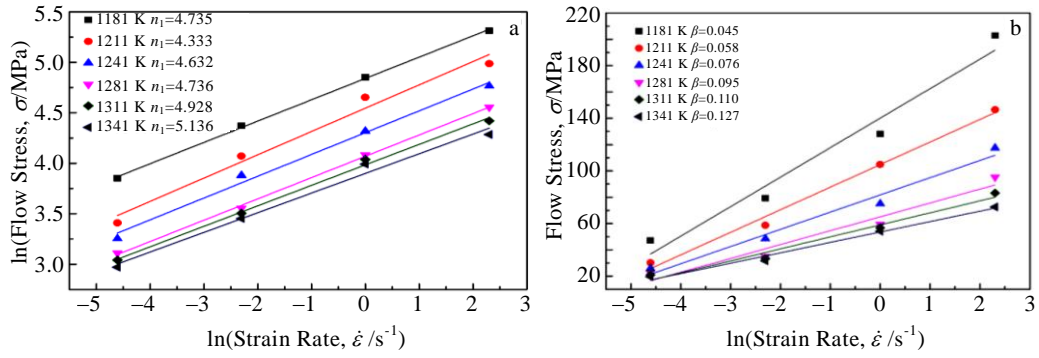


图 3 不同变形温度下  $\ln\sigma\text{-}\ln\dot{\epsilon}$  与  $\sigma\text{-}\ln\dot{\epsilon}$  的关系

Fig.3 Relationship of  $\ln\sigma\text{-}\ln\dot{\epsilon}$  (a) and  $\sigma\text{-}\ln\dot{\epsilon}$  (b) at different deformation temperatures

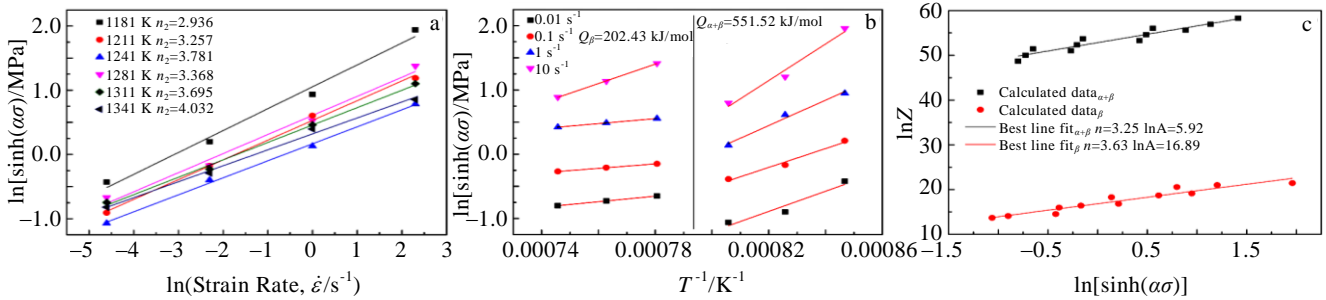


图 4  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\text{-}\ln\dot{\epsilon}$ 、 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\text{-}1/T$  及  $\ln Z\text{-}\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  的关系

Fig.4 Relationship of  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\text{-}\ln\dot{\epsilon}$  (a),  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\text{-}1/T$  (b), and  $\ln Z\text{-}\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  (c)

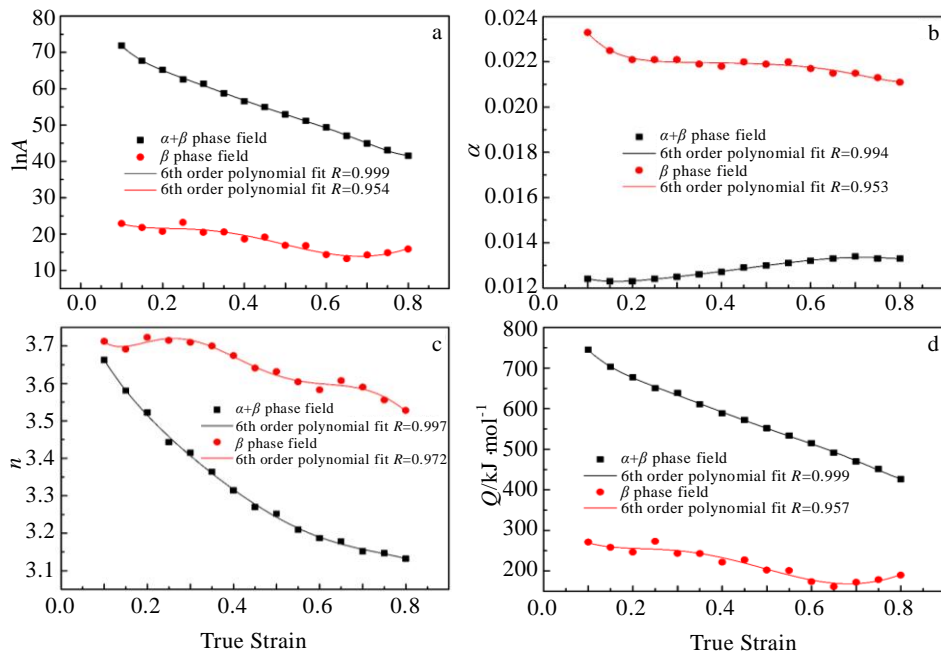


图 5 材料参数随应变变化关系

Fig.5 Relationship between  $\ln A$  (a),  $\alpha$  (b),  $n$  (c) as well as  $Q$  (d) and strain

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (9)$$

利用得到的本构方程对不同变形温度和应变速率条件下的流变应力进行预测，对比结果如图所示。从图中可以看出，实验值与预测值在应变速率低于  $1 \text{ s}^{-1}$

表 3  $\alpha, Q, \ln A$  and  $n$  关于应变多项式拟合系数

Table 3 Coefficients of the polynomial for $\alpha, Q, \ln A$ and $n$			
$\alpha$	$Q/\text{kJ mol}^{-1}$	$\ln A$	$n$
$B_0=0.01344$	$C_0=933.421$	$D_0=35.755$	$E_0=3.907$
$B_1=-0.0194$	$C_1=-3084.541$	$D_1=949.252$	$E_1=-3.232$
$B_2=0.12012$	$C_2=16321.231$	$D_2=-9010.442$	$E_2=9.979$
$B_3=-0.35534$	$C_3=-51270.230$	$D_3=38200.784$	$E_3=-23.462$
$B_4=0.58675$	$C_4=86952.059$	$D_4=-82183.841$	$E_4=30.369$
$B_5=-0.50241$	$C_5=-75240.994$	$D_5=86895.297$	$E_5=-17.911$
$B_6=0.17062$	$C_6=25960.204$	$D_6=-35805.601$	$E_6=3.306$

时具有较高的精度。但是，高应变速率（1 和  $10 \text{ s}^{-1}$ ）时呈现较高的预测偏差（图 6c 和 6d），这种偏差是由多种原因引起的，归结起来为图 3 和图 4 求的平均值，

$\beta$  值和  $n_1$  求解时用的是高应力水平公式（3）和低应力水平公式（2），最终影响本构方程的预测精度；再者，钛合金导热系数小，高应变速率下产生的变形热难以及时扩散引起合金局部流动软化，Liu 等<sup>[18]</sup>研究表明，变形热是 Ti17 合金低温高应变速率变形条件下重要的软化机制。

$$\begin{aligned} \alpha &= B_0 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2 + B_3 \varepsilon^3 + B_4 \varepsilon^4 + B_5 \varepsilon^5 + B_6 \varepsilon^6 \\ Q &= C_0 + C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 + C_3 \varepsilon^3 + C_4 \varepsilon^4 + C_5 \varepsilon^5 + C_6 \varepsilon^6 \\ \ln A &= D_0 + D_1 \varepsilon + D_2 \varepsilon^2 + D_3 \varepsilon^3 + D_4 \varepsilon^4 + D_5 \varepsilon^5 + D_6 \varepsilon^6 \\ n &= E_0 + E_1 \varepsilon + E_2 \varepsilon^2 + E_3 \varepsilon^3 + E_4 \varepsilon^4 + E_5 \varepsilon^5 + E_6 \varepsilon^6 \end{aligned} \quad (10)$$

2.5 本构模型检验

这里采用相关系数  $R$  和平均绝对相对误差 AARE

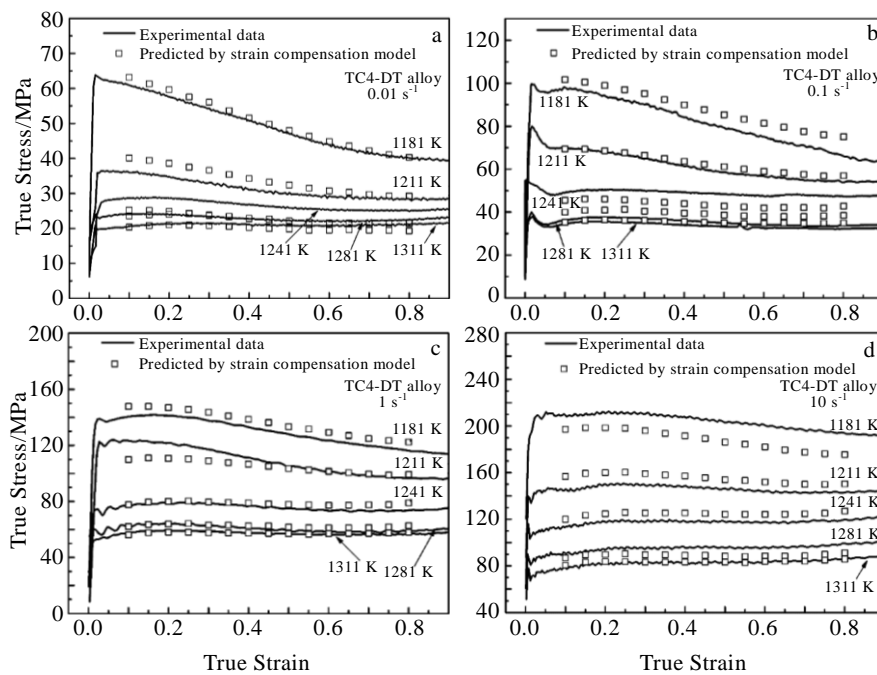


图 6 实验值与本构模型预测值对比

Fig.6 Comparison between experimental value and prediction by constitutive model

衡量基于应变补偿本构方程的预测精度， $R$  和 AARE 的表达式为：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (11)$$

$$\text{AARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中， $E$  为流变应力的实验值， $P$  为模型预测值， $N$  为数据组数量。图 7 显示实验值与模型预测值的相关系数  $R$  和 AARE 分别为 0.9952 和 5.78%，表明了此模型具有较高的预测精度。

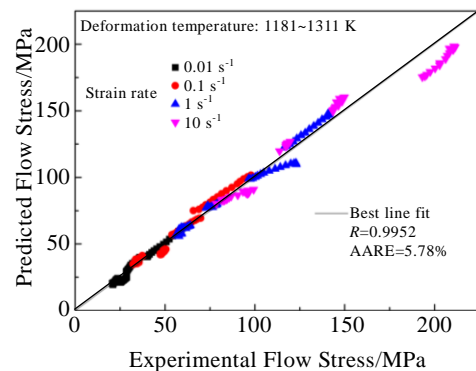


图 7 实验值与预测值之间的相关程度

Fig.7 Correlation between experimental values and the predicted by strain compensation model

### 3 结 论

1) 通过应变与材料常数之间建立的多项式拟合关系,表明应变应该是本构关系的一个重要组成部分,6次多项式拟合具有较高的相关系数。

2) 材料常数因不同相区而不同,差别显著。 $Q$ 值和 $\ln A$ 在两相区较单相区明显提高,在两相区 $\alpha$ , $n$ , $Q$ 和 $\ln A$ 的取值区间分别为:0.0123~0.0134,3.132~3.663,426.24~745.06 kJ/mol,41.55~71.84;单相区时分别为:0.0211~0.0233,3.526~3.711,191.32~269.75 kJ/mol,16.03~22.82。

3) 考虑应变影响的本构方程可精确预测应变速率小于 $1\text{ s}^{-1}$ 的流变应力,然而在高应变速率时呈现较大的误差,此误差的产生初步分析为材料常数只是针对一定的范围进行拟合和变形热引起的温升效应。

4) 考虑应变的修正本构模型具有较高的预测精度,预测值与实验值相关系数和平均相对误差绝对值分别为0.9952和5.78%,显示了较高的预测能力。

#### 参考文献 References

- [1] Sommitsch C, Sievert R, Wlanis T *et al.* *Comput Mater Sci*[J], 2007, 39(1): 55
- [2] Berbenni S, Favier V, Berveiller M. *Comput Mater Sci*[J], 2007, 39(1): 96
- [3] Samantaray D, Mandal S, Bhaduri A K. *Mater Des*[J], 2010, 31(2): 981
- [4] Cai J, Li F G, Liu T Y *et al.* *Mater Des*[J], 2011, 32(3): 1144
- [5] Zhou M, Clode M P. *Mech Mater*[J], 1998, 27(2): 63
- [6] Lin Y C, Chen X M. *Mater Des*[J], 2011, 32(4): 1733
- [7] Zener C, Hollomon H. *J Appl Phys*[J], 1944, 15(1): 22
- [8] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metall*[J], 1966, 14(9): 1136
- [9] Jonas J, Sellars C M *et al.* *Int Metal Rev*[J], 1969(14): 1
- [10] Shi H, McLaren A J *et al.* *Mater Sci Technol*[J], 1997, 13(1): 210
- [11] Luo J, Li M Q, Li H *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2009, 505(1-2): 88
- [12] Lin Y C, Xia Y C, Chen X M *et al.* *Comput Mater Sci*[J], 2010, 50(1): 227
- [13] Lin Y C, Chen M S, Zhong J *et al.* *Comput Mater Sci*[J], 2008, 42(3): 470
- [14] Mandal S, Rakesh V, Sivaprasad P V *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2009, 500(1-2): 114
- [15] Guo P, Zhao Y Q, Zeng W D *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2013, 563(1): 106
- [16] Peng X, Guo H Z, Wang T *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2012, 533(1): 55.
- [17] Han Y F, Zeng W D, Zhao Y Q *et al.* *Comput Mater Sci*[J], 2011, 50(7): 2273
- [18] Liu J L, Zeng W D, Lai Y J *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2014, 597(1): 387

## Constitutive Model of TC4-DT Titanium Alloy at Elevated Temperature Considering Compensation of Strain

Liu Jianglin<sup>1</sup>, Zeng Weidong<sup>1</sup>, Xie Yingjie<sup>2</sup>, Shu Ying<sup>2</sup>, Yang Jianchao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Western Titanium Technologies Co. Ltd, Xi'an 710201, China)

**Abstract:** Elevated-temperature flow behavior of TC4-DT titanium alloy was investigated by conducting isothermal hot compression tests at strain rate from 0.01 to  $10\text{ s}^{-1}$  and in the temperature range of 1181~1341 K on Gleeble-3500 simulator. The Arrhenius constitutive equation considering the strain was established based on the experiment data with the material constants expressed by a polynomial fitting of strain. The results show that all the true stress-strain curves exhibit the characteristics of strain hardening followed by flow softening and it is particularly significant at higher strain rates and lower temperatures. The flow stress values predicted by the developed constitutive model demonstrate a well agreement with the experimental results at the strain rates under  $1\text{ s}^{-1}$ . The correlation coefficient ( $R$ ) and average absolute relative error (AARE) are 0.9952 and 5.78%, respectively, which confirm that the modified constitutive equation could give an accurate and precise estimate of the flow stress of TC4-DT titanium alloy.

**Key words:** TC4-DT titanium alloy; elevated-temperature deformation; strain compensation; constitutive model

Corresponding author: Zeng Weidong, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494298, E-mail: zengwd@nwpu.edu.cn