

DOI: 10.11973/jxgccl202308014

TC17 钛合金热变形行为及本构模型

温飞娟¹, 温奇飞², 龙 樟³, 宋 檬³, 曹立清¹

(1. 西南石油大学新能源与材料学院, 南充 637001; 2. 南充市特种设备监督检验所, 南充 637000;

3. 西南石油大学机电工程学院, 南充 637001)

摘要: 对 TC17 钛合金进行不同温度(600~950 °C)和不同应变速率(0.001~10 s⁻¹)的热压缩试验, 研究了 TC17 钛合金的热变形行为, 建立了 TC17 钛合金多元线性回归本构模型, 并进行了试验验证。结果表明: TC17 钛合金的流变应力随变形温度的升高而减小, 随应变速率的增大而增大; 在低温段(600~850 °C)变形时, 真应力-真应变曲线整体上呈应变软化特征, 在高温段(850~950 °C)变形时, 则呈稳态流动特征, 流变应力软化现象不明显; 由 TC17 钛合金多元线性回归本构模型得到的流变应力的计算值与试验值较为接近, 模型具有较高的预测精度。

关键词: TC17 钛合金; 热变形行为; Arrhenius 方程; 本构模型

中图分类号: TG146

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)08-0086-07

Hot Deformation Behavior and Constitutive Model of TC17 Titanium Alloy

WEN Feijuan¹, WEN Qifei², LONG Zhang³, SONG Meng³, CAO Liqing¹

(1. School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Nanchong 637001, China;

2. Nanchong Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Nanchong 637000, China;

3. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Nanchong 637001; China)

Abstract: The thermal compression test of TC17 titanium alloy at different temperatures (600~950 °C) and different strain rates (0.001~10 s⁻¹) was carried out, and the hot deformation behavior of TC17 titanium alloy was studied. The multiple linear regression constitutive model of TC17 titanium alloy was established and verified by experiments. The results show that the flow stress of TC17 titanium alloy decreased with the increase of deformation temperature, but increased with the increase of strain rate. At low temperatures (600~850 °C), the true stress-true strain curve showed strain softening characteristics on the whole, while at high temperatures (850~950 °C) showed steady flow characteristics, and the softening of flow stress at high temperatures was not obvious. The calculated value of the flow stress by the multiple linear regression constitutive model of TC17 titanium alloy was close to the experimental value, indicating the model had relatively high prediction accuracy.

Key words: TC17 titanium alloy; hot deformation behavior; Arrhenius equation; constitutive model

0 引言

钛合金由于密度低, 强韧性好, 常用于航天发动

机和飞机壳体的轻量化设计制造^[1-5]。TC17 钛合金是一种富 β 相的 α - β 型钛合金, 由于具有高强度、高韧性以及高淬透性, 因此又被称为“三高钛合金”^[6-8]。但 TC17 钛合金的热加工工艺复杂, 经过锻造后显微组织均匀性差, 严重影响着其力学性能^[9]。材料的热变形行为是制定其热加工工艺的基础, 热变形后材料的组织和性能取决于热变形过程中加工硬化和动态软化的相互作用, 而硬化和软化过程受多种因素的影响, 其中变形温度和应变量的影响最大^[10-11]。此外, 研究^[12-13]表明, TC17 钛合金在热变形时的流变应力与应变速率和变形温度之间

收稿日期: 2022-06-21; 修订日期: 2023-07-31

基金项目: 南充市西南石油大学市校科技战略合作专项项目(SX-QHJH034; SXQHJH027); 四川省 2021—2023 年高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2021-639); 教育部 2021 年第一批产学研合作协同育人项目(202101398047, 202102500012)

作者简介: 温飞娟(1993—), 女, 陕西西安人, 讲师, 硕士

通信作者: 龙樟讲师

具有复杂关系。因此,了解 TC17 钛合金在热变形时流变应力与应变速率、变形温度及应变量的关系对改善其热加工工艺有着重要指导意义。

使用有限元方法对 TC17 钛合金加工过程进行模拟,获得其热加工过程中的温度、应变和应力分布信息,可以更深层次地研究其加工工艺,优化工艺参数^[14],但这依赖于可靠的材料本构模型^[15-16]。目前常用的本构模型包括 Johnson-Cook(J-C)模型^[17]、Zerilli-Armstrong(Z-A)模型及双曲正弦模型^[18]。杨晓康等^[19]对 J-C 模型进行修正,修正的模型能较好地描述 TC17 钛合金的高温流变行为。目前国内对 TC17 钛合金本构关系的研究还很少,而关于双曲正弦模型对于 TC17 钛合金的适用性研究则更少。因此,作者对 TC17 钛合金的热压缩变形行为进行研究,构建了精度满足要求的本构模型,并对本构模型进行了验证,拟为 TC17 钛合金热加工过程的有限元模拟提供理论参考。

1 试样制备与试验方法

试验材料为经过单相区等温锻造+固溶+时效处理的 TC17 钛合金棒,其原始显微组织为 $\alpha+\beta$ 网篮组织,如图 1 所示。将钛合金棒机加工成尺寸为 $\phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的圆柱形试样。

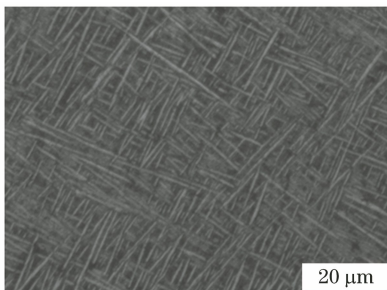


图 1 TC17 钛合金的原始显微组织

Fig. 1 Original microstructure of TC17 titanium alloy

在 Thermecmaster-Z 型热模拟试验机上对试样进行等温恒应变速率压缩试验,为防止热压缩过程中试样出现鼓肚,在试样两端垫云母片以降低试样与压头之间的摩擦力。设置应变速率分别为 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 s^{-1} , 变形温度分别为 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950 $^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, 达到变形温度后保温 5 min 进行压缩, 最大高度压下率为 40%, 对应的真应变约为 0.51。试验过程中用安装在试样侧面中部的热电偶实时测定试样温度, 将试样温度控制在变形温度的 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内波动。压缩后的试样立即在氩气中冷却至

室温。

2 试验结果与讨论

由图 2 可见,不同变形温度下压缩时 TC17 钛合金的真应力-真应变曲线变化趋势基本相同,整体可划分为 3 个阶段:在变形初期,位错密度随应变的增加而增大,产生加工硬化,流变应力随着应变的增大迅速增大;随后,随着应变增加,位错通过攀移或交滑移的方式进行运动,并在热能和外加应力的综合作用下发生合并与重组,使材料发生动态软化,并逐渐成为主要控制机制,流变应力增大趋势减小,应力在达到峰值后,开始缓慢下降^[20];在变形末期,加工硬化与动态软化达到动态平衡,曲线趋于平缓^[21],并且温度越高,这种现象越发明显。

在相同的应变速率下,流变应力随变形温度的升高而降低。这是因为一方面随着变形温度的升高,材料的活化能增大,原子获得的能量增多,平均动能增大,材料更容易发生滑移;另一方面,高温条件下更容易发生动态回复和动态再结晶,位错密度的降低弱化了塑性变形引起的加工硬化,进而降低了材料的流变应力。当变形温度较低(600~850 $^{\circ}\text{C}$)时,流变应力对变形温度的变化十分敏感,当应变速率为 0.1 s^{-1} 时,变形温度每升高 50 $^{\circ}\text{C}$, 峰值应力分别降低 136.8, 156.8, 160.9, 106.4, 105.1 MPa;当变形温度较高(850~950 $^{\circ}\text{C}$)时,流变应力对温度的敏感性下降,变形温度每升高 50 $^{\circ}\text{C}$, 峰值应力仅分别降低 32.5, 27.6 MPa。TC17 钛合金在低温段(600~850 $^{\circ}\text{C}$)变形时,真应力-真应变曲线整体上呈应变软化特征,而在高温段(850~950 $^{\circ}\text{C}$)变形时,真应力-真应变曲线整体呈稳态流动特征。

在相同的变形温度下,流变应力随应变速率的增大而增大。当应变速率增加时,位错数量增多导致临界剪切应力升高,同时由于塑性变形时间缩短,动态软化作用减弱,使得硬化过程更为明显,流变应力增大;此外,由于没有充足的时间通过位错运动及相邻晶粒协调变形使应力松弛,合金内部存在较大的应力集中,同样会导致流变应力增大。流变应力对应变速率的敏感程度随温度的变化明显不同,800 $^{\circ}\text{C}$ 是流变应力对应变速率敏感程度的临界温度;当变形温度低于 800 $^{\circ}\text{C}$ 时,流变应力对应变速率的敏感程度随变形温度的升高而增大;当变形温度高于 800 $^{\circ}\text{C}$ 时,流变应力对应变速率的敏感程度随变形温度的升高而降低。

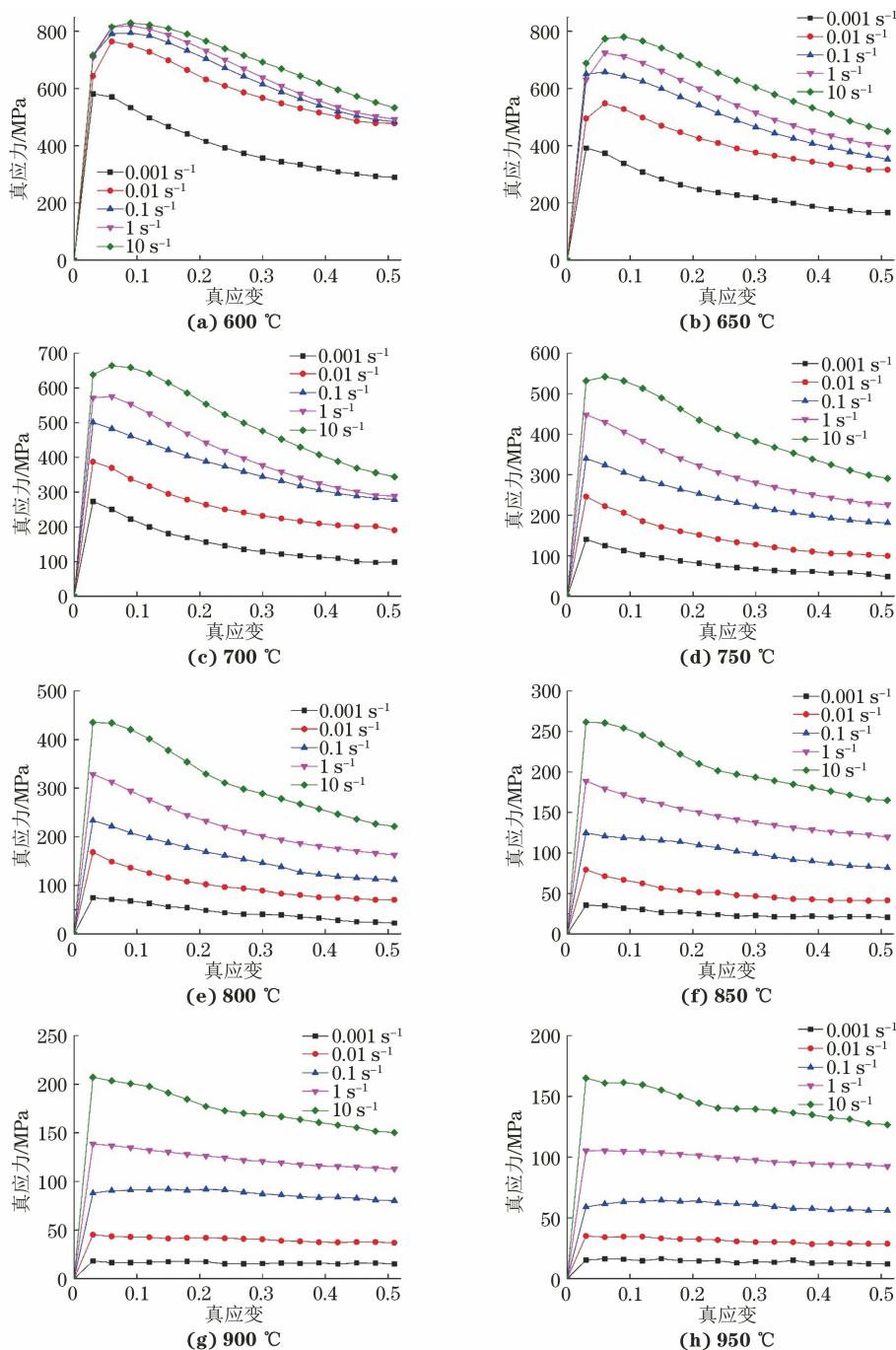


图2 不同变形温度和应变速率下压缩时 TC17 钛合金的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of TC17 titanium alloy during compression at different deformation temperatures and strain rates

3 本构模型

3.1 Arrhenius 方程

一般来说,建立本构关系的方法有两种:一种是预先假定材料流动行为的变形机理,然后根据材料的相关常数确定本构关系;另一种是在试验应变速率范围和温度内测定流变应力,对试验结果进行数理统计以确定本构关系。第一种方法具有一定的局限性,依赖于材料本身的参数变化,难以精确描述变形机理。第

二种方法不需要考虑复杂的材料内部参数,且在相当宽的温度范围内有效,因而得到了广泛的应用^[22-23]。

许多学者对金属变形的动态响应方程提出了不同的本构模型,其中比较著名的是由 Sellar 等提出的 Arrhenius 方程^[24],其表达式为

$$\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A \sinh(\alpha \sigma)^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; σ 为流变应力; Q 为热变形激活能; R 为气体常数; T 为变形温度; A, α, n 为材料参数。

在低应力区,即 $\alpha\sigma < 0.8$ 时,Arrhenius 方程可表示为

$$\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1 \sigma^{n_1} \quad (2)$$

在高应力区,即 $\alpha\sigma > 1.2$ 时,Arrhenius 方程可表示为

$$\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_2 \exp(n_2 \sigma) \quad (3)$$

式中: A_1, A_2, n_1, n_2 均为材料参数。

分别对式(1)、式(2)、式(3)两边取对数可得:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{nRT} - \frac{\ln A}{n} \quad (4)$$

$$\ln \sigma = \frac{1}{n_1} \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{n_1 RT} - \frac{\ln A_1}{n_1} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{n_2} \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{n_2 RT} - \frac{\ln A_2}{n_2} \quad (6)$$

式(4)、式(5)、式(6)的统一形式如下:

$$f(\sigma) = B + C \ln \dot{\epsilon} + \frac{D}{T} \quad (7)$$

式中: $f(\sigma)$ 分别对应于式(4)、式(5)和式(6)中的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 、 $\ln \sigma$ 和 σ ; B, C, D 分别对应各方程中

相应的系数项。

Arrhenius 方程中,双曲正弦函数形式具有较广的适用性。在验证 Arrhenius 方程的适用性时,需要先确定双曲正弦函数形式中的 α 值。由文献[25-27]可知:

$$\alpha = \frac{n_2}{n_1} \quad (8)$$

$$n_1 = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \quad (9)$$

$$n_2 = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \quad (10)$$

采用 TC17 钛合金热压缩试验数据,绘制 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 曲线并进行最小二乘法线性回归,结果如图 3 所示。 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 曲线的斜率分别为 n_1 和 n_2 值,计算得到 $n_1 = 3.815, n_2 = 0.054$,因此 $\alpha = 0.011$ 。

3.2 适用性检验

由式(7)可知,函数 $f(\sigma)$ 与变量 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 T^{-1} 成双线性关系是使用 Arrhenius 方程的前提条件。绘制 TC17 钛合金的 σ - $\ln \dot{\epsilon}$ 、 σ - $10\,000/T$ 、 $\ln \sigma$ - $\ln \dot{\epsilon}$ 、 $\ln \sigma$ - $10\,000/T$ 、 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln \dot{\epsilon}$ 、 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ -

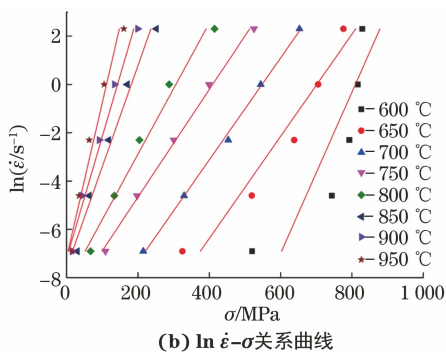
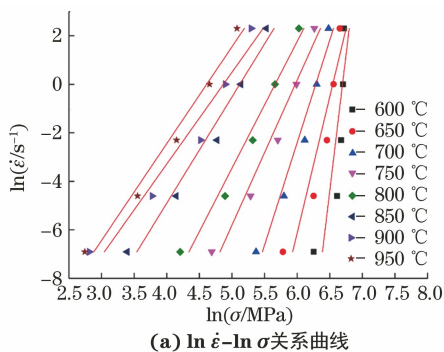


图 3 TC17 钛合金的 $\ln \epsilon$ - $\ln \sigma$ 和 $\ln \epsilon$ - σ 关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of $\ln \epsilon$ - $\ln \sigma$ (a) and $\ln \epsilon$ - σ (b) of TC17 titanium alloy

$10\,000/T$ 关系曲线,由图 4 可见, $f(\sigma)$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $10\,000/T$ 之间无双线性关系,这说明 3 种形式的 Arrhenius 方程均不适用于 TC17 钛合金。

3.3 本构关系的建立

由于 3 种形式的 Arrhenius 方程均不适用于

TC17 钛合金,因此在考虑应变速率、应变和变形温度的前提下,提出基于逐步回归法构建的多元线性回归本构模型^[28]。将整个变形温度范围分成 (600~850 °C) 和 (850~950 °C) 两个温度段,分别构建本构模型,如下:

$$\ln \sigma = a_0 + a_1 \epsilon + a_2 \frac{\dot{\epsilon}^5}{T} + a_4 \frac{1}{T} + a_5 \frac{1}{T^8} + a_6 (T \cdot \epsilon)^6 + a_7 (T \cdot \epsilon)^3 + a_8 T^3 \cdot (\ln \epsilon)^2 + a_9 T \cdot \ln \dot{\epsilon} + a_{10} (T \cdot \ln \dot{\epsilon})^3 + a_{11} (\ln \dot{\epsilon} \cdot \ln \epsilon)^5 + a_{12} \frac{\ln \epsilon}{T} + a_{13} \left(\frac{\ln \epsilon}{T}\right)^4 + a_{14} \frac{\ln \dot{\epsilon}}{T} + a_{15} \left(\frac{\ln \dot{\epsilon}}{T}\right)^3 \quad (600 \sim 850 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (11)$$

$$\ln \sigma = b_0 + b_1 \epsilon + b_2 \frac{\dot{\epsilon}^5}{T} + b_3 (\ln \epsilon)^2 + b_4 (\ln \epsilon)^7 + b_5 \frac{\epsilon \cdot T}{\dot{\epsilon}} + b_6 \frac{\ln \epsilon \cdot \ln \dot{\epsilon}}{T} + b_7 \dot{\epsilon} \cdot T \cdot \ln \epsilon + b_8 \frac{1}{T^2} + b_9 T \cdot \epsilon + b_{10} T^3 \cdot (\ln \epsilon)^4 + b_{11} T \cdot \ln \epsilon + b_{12} \left(\frac{\ln \epsilon}{T}\right)^4 + b_{13} \frac{\ln \dot{\epsilon}}{T} \quad (850 \sim 950 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (12)$$

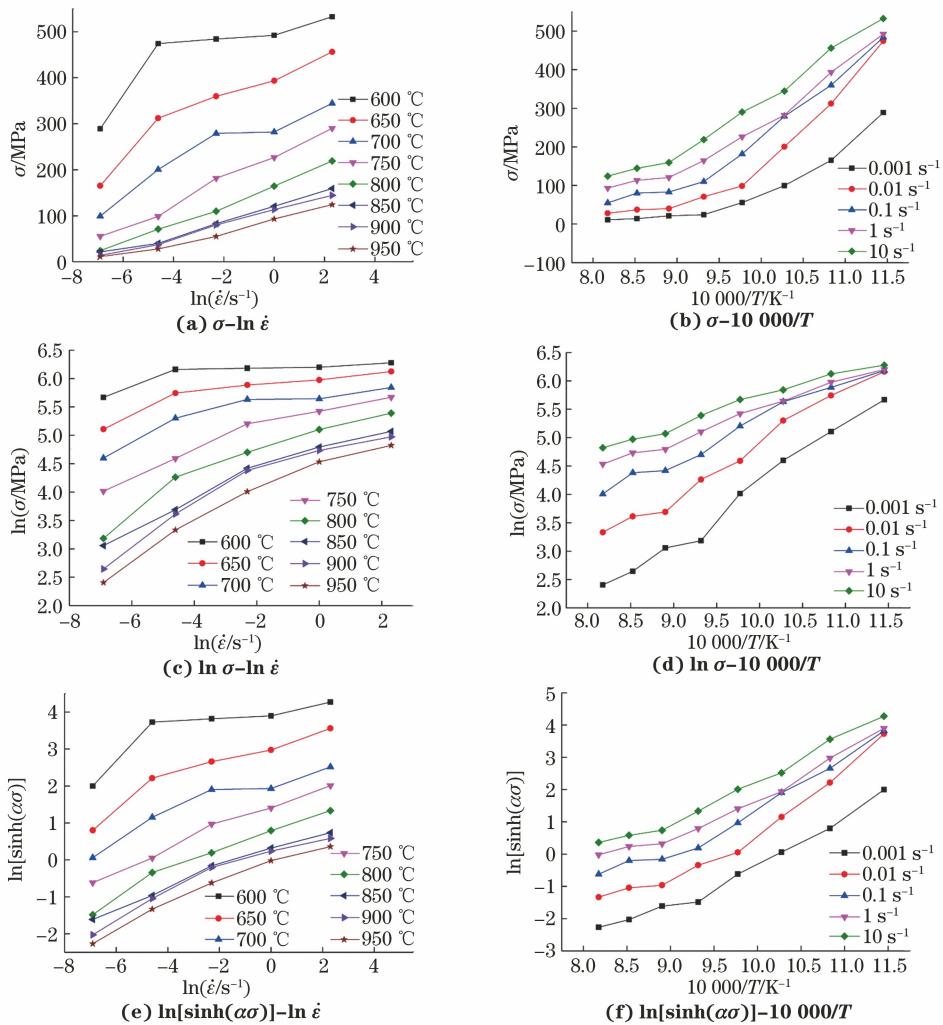


图 4 TC17 钛合金各参数拟合关系曲线

Fig. 4 Fitting relationship curves of each parameter of TC17 titanium alloy

式中: $a_0 \sim a_{15}, b_0 \sim b_{13}$ 为多项式系数。
使用 SPSS 软件对式(11)和式(12)进行多元
线性回归,得到多项式系数 $a_0 \sim a_{15}$ 和 $b_0 \sim b_{13}$,如
表 1 所示。

表 1 线性回归拟合多项式系数

Table 1 Multinomial coefficients by linear regression fitting

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
-2.810 248	0.001 706	0.103 544	-850.327 732	8 515.676 675	-3.315 99×10 ²³	-6.03×10 ⁻¹⁸	-1.25×10 ⁻¹³
a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
1.27×10 ⁻¹¹	0.000 433	1.26×10 ⁻¹²	-8.07×10 ⁻⁸	-343.208 204	-3 564 712 017	-349.225 252	852 286.845 9
b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1.888 139	-5.938 061	0.001 396	-0.028 975	-2.32×10 ⁻⁷	1.94×10 ⁻⁷	13.589 279	-7.78×10 ⁻⁶
b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}		
4 162 376.747	0.004 647	-1.16×10 ⁻¹²	0.000 18	3 076 726 504	-95.548 519		

3.4 本构关系的误差检验

由图 5 可见,在 600~850 °C 和 850~950 °C 两个温度段内,相对误差在 ±10% 以内的数据点分别占全部数据点的 95.53% 和 91.76%,同时求得式(11)

和式(12)的复相关系数 R 均较高,分别为 0.994 和 0.998,说明预测数据与实际数据误差较小。
由图 6 可见,由本构模型得到的流变应力计算
值与试验值比较接近,说明所建立的 TC17 钛合金

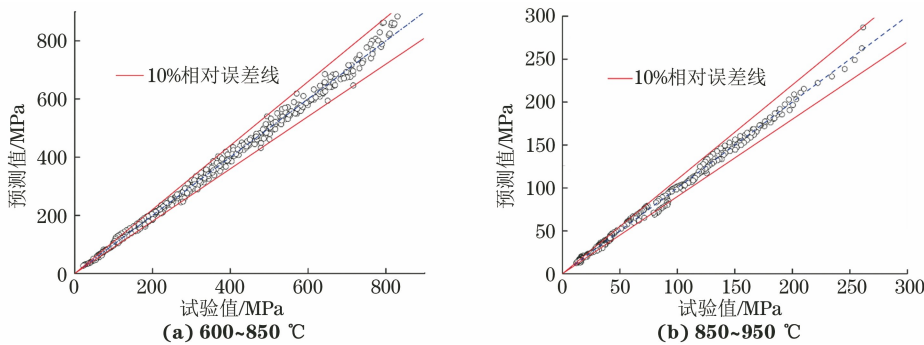


图 5 不同温度范围内 TC17 钛合金本构模型预测得到的流变应力与试验值的关系

Fig.5 Relationship between predicated flow stress by constitutive model and tested flow stress of TC17 titanium alloy in different temperature ranges

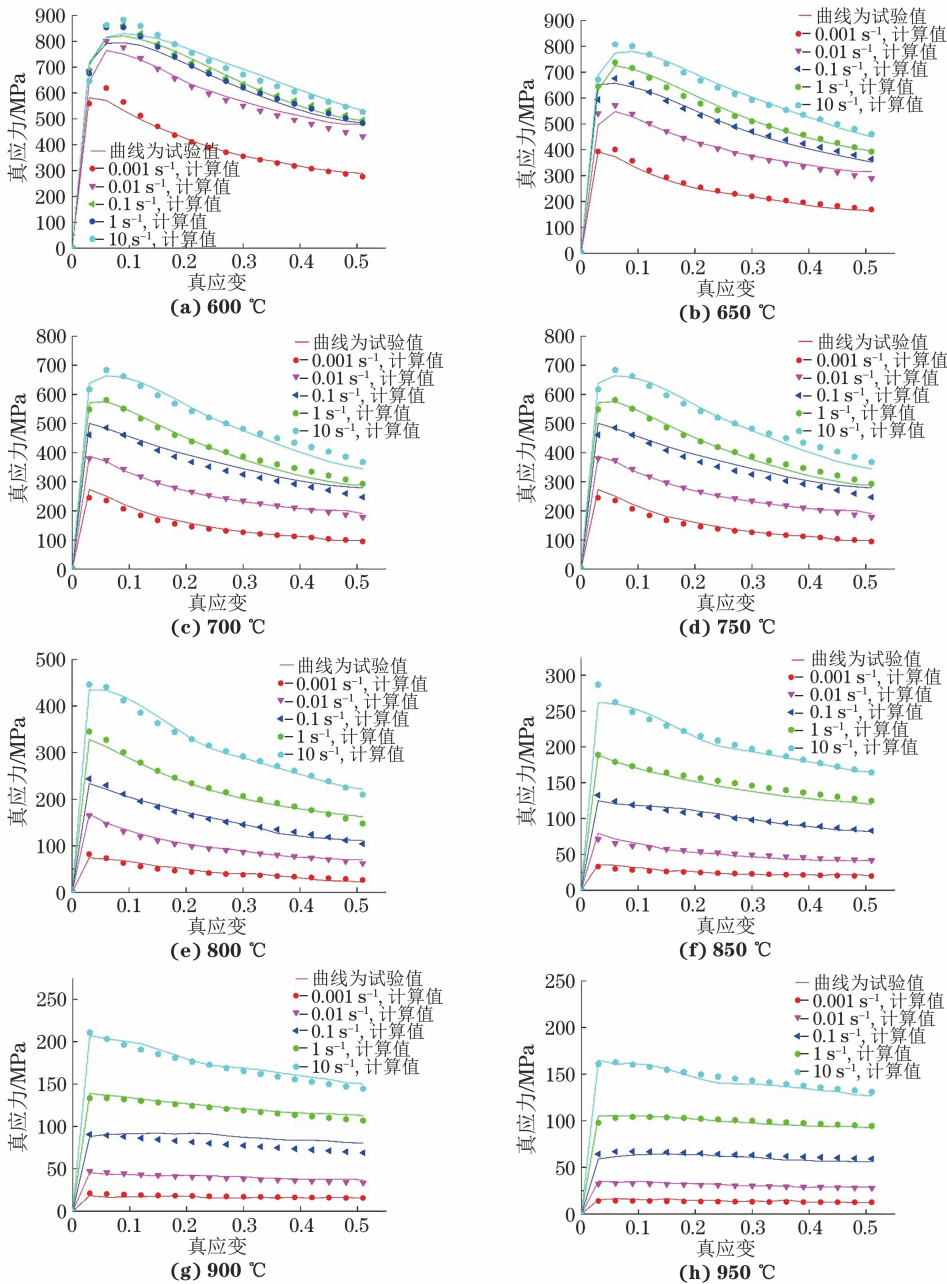


图 6 不同真应变下流变应力计算值与试验值的对比

Fig.6 Comparison of calculated and tested values of flow stress at different true strains

的本构模型对流变应力具有较高的计算精度。

4 结 论

(1) TC17 钛合金流变应力对变形温度和应变速率均具有较高的敏感性,流变应力随变形温度的升高而减小,随应变速率的增大而增大。

(2) 在低温段(600~850 °C)变形时,TC17 钛合金的真应力-真应变曲线整体上呈应变软化特征;在高温段(850~950 °C)变形时,真应力-真应变曲线整体呈稳态流动特征,流变应力软化现象不明显。

(3) 建立了 TC17 钛合金在 600~850 °C 和 850~950 °C 两个温度段的多元线性回归本构模型由本构模型得到的流变应力的计算值与试验值的误差较小,具有较高的预测精度。

参考文献:

- [1] 金和喜,魏克湘,李建明,等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报,2015,25(2):280-292.
JIN H X, WEI K X, LI J M, et al. Research development of titanium alloy in aerospace industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280-292.
- [2] 徐杰,肖铁忠,黄娟. TC18 钛合金等高温压缩过程的组织性能[J]. 锻压技术,2017,42(1):111-115.
XU J, XIAO T Z, HUANG J. Microstructure and properties of isothermal high-temperature compression process for titanium alloy TC18[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(1): 111-115.
- [3] LIANG S, LI J H, ZHANG Q, et al. Microstructural evolution in the TC17 titanium alloy processed during laser stereo forming [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(4): 2967-2976.
- [4] 刘奇先,刘杨,高凯. 钛合金的研究进展与应用[J]. 航天制造技术,2011(4):45-48.
LIU Q X, LIU Y, GAO K. Research progress and application of titanium alloys[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(4): 45-48.
- [5] WANG C. High temperature deformation behavior of TC17 alloy[J]. Materials Sciences and Applications, 2018, 9(9): 732-739.
- [6] YANG R, HAO Y L, E G O, et al. Orthorhombic phase transformations in titanium alloys and their applications[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 46(11): 1443-1449.
- [7] LIU X Y, CHU P K, DING C X. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2004, 47(3/4): 49-121.
- [8] BANIA P J. Beta titanium alloys and their role in the titanium industry[J]. JOM, 1994, 46(7): 16-19.
- [9] 田伟,伏宇,钟燕,等. 锻造工艺对 TC17 钛合金的显微组织和

力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2016,37(9):57-61.

- TIAN W, FU Y, ZHONG Y, et al. Effects of forging process on microstructure and properties of TC17 titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(9): 57-61.
- [10] 蔡馨,雷旻,万明攀,等. TC17 钛合金连续冷却转变曲线研究[J]. 稀有金属,2019,43(12):1291-1296.
CAI X, LEI M, WAN M P, et al. Continuous cooling transformation diagram of TC17 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(12): 1291-1296.
- [11] LIU Q, WANG Y D, ZHENG H, et al. TC17 titanium alloy laser melting deposition repair process and properties [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 82: 1-9.
- [12] 周建华,王晓英,徐斌,等. TC17 钛合金热变形过程中片状组织演变规律[J]. 钛工业进展,2012,29(5):15-18.
ZHOU J H, WANG X Y, XU B, et al. Research on the microstructure evolution of TC17 titanium alloy during hot deformation[J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(5): 15-18.
- [13] MU Z, LI H, LI M Q. The microstructure evolution in the isothermal compression of Ti-17 alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 582: 108-116.
- [14] LIU G X, ZHANG D H, YAO C F. A modified constitutive model coupled with microstructure evolution incremental model for machining of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117262.
- [15] 孙志超,杨合,沈昌武. 基于逐步回归法的 TA15 钛合金本构模型的建立[J]. 锻压技术,2008,33(2):110-115.
SUN Z C, YANG H, SHEN C W. Establishment of TA15 titanium alloy constitutive model based on stepwise regression method[J]. Forging & Stamping Technology, 2008, 33(2): 110-115.
- [16] 刘继雄,岳旭,杨军,等. TC17 钛合金两相区变形时的失稳行为及组织特征[J]. 机械工程材料,2015,39(12):71-74.
LIU J X, YUE X, YANG J, et al. Instability behavior and microstructure characteristic of TC17 titanium alloy deformation on two-phase region [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(12): 71-74.
- [17] SHEN X H, ZHANG D H, YAO C F, et al. Research on parameter identification of Johnson-Cook constitutive model for TC17 titanium alloy cutting simulation [J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103772.
- [18] LI H Y, LI Y H, WANG X F, et al. A comparative study on modified Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict the hot deformation behavior in 28CrMnMoV steel[J]. Materials & Design, 2013, 49: 493-501.
- [19] 杨晓康,王快社,王萌,等. TC17 钛合金热变形行为及其修正 J-C 本构模型[J]. 金属热处理,2018,43(10):20-24.
YANG X K, WANG K S, WANG M, et al. Hot deformation behavior and modified J-C constitutive model for TC17 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(10): 20-24.

(下转第 99 页)

- [6] 罗锐祺,刘勇琼,廖英强,等.碳纤维增强环氧树脂复合材料力学性能影响因素的研究进展[J].材料导报,2021,35(增刊2):558-563.
LUO R Q, LIU Y Q, LIAO Y Q, et al. Research progress on the influencing factors of mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composites [J]. Materials Reports, 2021, 35(S2):558-563.
- [7] 柏慧,惠虎,杨宇清.玻璃纤维/环氧乙烯基酯树脂复合材料的湿热老化力学性能[J].高压物理学报,2023,37(1):64-73.
BAI H, HUI H, YANG Y Q. Effect of hygrothermal aging on mechanical properties of glass fiber/epoxy VER composites [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(1):64-73.
- [8] 吴瑞,李岩,于涛.不同种类纤维增强复合材料湿热老化性能对比[J].复合材料学报,2022,39(9):4406-4419.
WU R, LI Y, YU T. Comparative study on the hygrothermal durability of different fiber reinforced composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9):4406-4419.
- [9] 谭翔飞,谭鹏达,何宇廷,等.航空碳纤维增强树脂基复合材料加筋壁板吸湿行为[J].材料工程,2018,46(12):61-69.
TAN X F, TAN P D, HE Y T, et al. Moisture behavior of aeronautic carbon fiber reinforced resin composite stiffened panel[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(12):61-69.
- [10] 张先航,李曙林,常飞,等. BA9916-II /CCF300 复合材料加筋板吸湿特性[J].航空材料学报,2017,37(5):63-69.
ZHANG X H, LI S L, CHANG F, et al. BA9916-II/CCF300 composite stiffened plate hygroscopic characteristics [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(5):63-69.
- [11] 喻健,何宇廷,冯宇,等.环氧树脂基复合材料加筋板结构吸湿行为研究[J].北京航空航天大学学报,2021,47(9):1908-1917.
YU J, HE Y T, FENG Y, et al. Moisture absorption behavior of epoxy resin matrix composite stiffened panel[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9):1908-1917.
- [12] 林国伟,李新祥.复合材料加筋板后屈曲分析及实验验证[J].航空材料学报,2021,41(4):149-156.
LIN G W, LI X X. Post-buckling analysis method of stiffened composite panels and test verification [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4):149-156.
- [13] ZHANG T J, LI S L, CHANG F, et al. An experimental and numerical analysis for stiffened composite panel subjected to shear loading in hygrothermal environment [J]. Composite Structures, 2016, 138:107-115.
- [14] TSAI S W. Composites design [M]. Array Dayton, Ohio: Think Composites, 1988.
- [15] BENKHEDDA A, TOUNSI A, ADDA BEDIA E A. Effect of temperature and humidity on transient hygrothermal stresses during moisture desorption in laminated composite plates[J]. Composite Structures, 2008, 82(4):629-635.

(上接第 92 页)

- [20] 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.
ZHANG Y Q, GU Z F, SHA A X, et al. High temperature deformation behavior of a high strength and high toughness TC27 titanium alloy [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(24):25-30.
- [21] 冯瑞,王克鲁,鲁世强,等. Zr-4 合金热变形行为及物理本构模型[J].稀有金属材料与工程,2021,50(2):525-530.
FENG R, WANG K L, LU S Q, et al. Hot deformation behavior and strain compensation physical constitutive model of Zr-4 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(2):525-530.
- [22] WANG X D, PAN Q L, XIONG S W, et al. Prediction on hot deformation behavior of spray-formed 7055 aluminum alloy via phenomenological models[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(8):1484-1494.
- [23] LIN P, FENG A H, YUAN S J, et al. Microstructure and texture evolution of a near- α titanium alloy during hot deformation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 563:16-20.
- [24] HE Y, XIAO G J, LI W, et al. Residual stress of a TC17 titanium alloy after belt grinding and its impact on the fatigue life[J]. Materials, 2018, 11(11):2218.
- [25] NIE X F, HE W F, LI Q P, et al. Experiment investigation on microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy treated by laser shock peening with different laser fluence[J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(4):1892-1898.
- [26] SUN J Z, LI M Q, LI H. Deformation behavior of TC17 titanium alloy with basketweave microstructure during isothermal compression [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 730:533-543.
- [27] 王琛. TA19 和 TC17 合金高温变形行为及组织研究[D].沈阳:东北大学,2013.
WANG C. Study on the hot deformation behavior and microstructures of TA19 and TC17 alloys [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [28] 朱乐宗,鲁世强,舒小勇,等. Ni-40Ti 形状记忆合金热变形行为及本构关系的建立[J].特种铸造及有色合金,2016,36(4):425-429.
ZHU L Z, LU S Q, SHU X Y, et al. Hot deformation behavior and constitutive relationships of Ni-40Ti shape memory alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(4):425-429.