

TC4 钛合金基于 Voce 方程的稳定流变本构模型研究

方 强, 王 莹, 尹晶晶

(海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009)

摘 要:提出了一种包含流变软化的本构的构建方法。通过采用圆柱体试样的热压缩模拟试验,在塑性应变速率为 0.1 s^{-1} 和 20 s^{-1} 之间时,观察到 TC4 钛合金在 $750\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内均存在流变应力随着塑性应变降低的流变软化现象。采用双 Voce 方程对试验数据拟合得到了大塑性变形条件下的稳定流变应力。采用 Levenberg-Marquardt 非线性拟合算法得到了 TC4 钛合金包含流变软化的本构方程。并且发现 Levenberg-Marquardt 非线性拟合算法求得的本构方程参数比线性拟合误差更小。结果表明文中提出的流变应力计算方法规避了变形不稳定区域对特征变形抗力判断的干扰,得到了符合指数函数的材料高温稳定流变本构模型,在新型金属材料热加工工艺开发中具有较强的应用价值。

关键词:TC4 钛合金; 流变软化; 本构模型; 热压缩模拟

中图分类号:TF823 文献标志码:A 文章编号:1004-7638(2021)04-0047-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Constitutive model for elevated temperature flow stress of Ti-6Al-4V alloy considering the effect of work softening

Fang Qiang, Wang Yin, Yin Jingjing

(State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: A method for establishing the constitutive model considering the flow softening was proposed. Isothermal uniaxial compression tests were performed on cylindrical specimens of Ti-6Al-4V at $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the strain rate of 0.1 s^{-1} to 20 s^{-1} . And the flow softening that the flow stress decreases with the plastic deformation was observed. The steady flow stresses under the severe plastic deformation were obtained by fitting the experimental data via double Voce function. The constitutive equation of the alloy considering the flow softening was acquired using Levenberg-Marquardt non-linear fitting. The parameters of the constitutive equation by Levenberg-Marquardt non-linear fitting have less error than those by the linear least square fitting. The proposed method for obtaining flow stress at high temperatures is able to avoid the influence of stress fluctuation in the early stage of hot deformation, and the high-temperature steady flow stress constitutive model according to the exponential function can be obtained, which will be useful in hot working process development for new metallic materials.

Key words: Ti-6Al-4V, flow softening, constitutive equation, thermocompression simulation

收稿日期:2021-06-21

基金项目:四川省重点研发项目(编号 2018GZ0037)。

作者简介:方强(1987-),男,湖南邵阳人,金属材料高级工程师,主要从事钛金属压延成型技术研究, E-mail: qiang.fang@queensu.ca。

0 引言

TC4 钛合金(Ti-6Al-4V)是使用最为广泛的钛合金,占据了世界钛材总产量的 50%^[1]。TC4 钛合金具有高的力学强度、优良的耐腐蚀性能和较低的密度,综合性能非常优异。大量研究发现,TC4 钛合金在塑性变形初期会出现流变软化,并且该现象与微观组织结构没有关系^[2-3]。流变软化还会带来超塑性,但是流变软化的机理尚不明确,随着超塑成型的日益广泛应用,该现象正受到学术界的重视^[4]。此外,TC4 钛合金价格相对高昂,实验室的材料工艺模拟试验成为降低成型工艺开发成本的有效手段^[5]。

圆柱体试样的热压缩模拟试验是热加工工艺开发最常用的试验方法。由于压头和试样之间的摩擦,导致大变形压缩过程会产生鼓肚效应,即试样的变形不均匀。因此,圆柱体试样的热压缩模拟试验不能完全真实地反映材料的热变形行为^[6]。此外,大变形还可能造成圆柱体同一横截面的塑性应变不对称分布^[7]。因此,如何从有限的塑性变形试验得到大塑性变形的材料本构是非常重要的问题^[8]。

笔者观察到了 TC4 流变软化在较大应变趋于稳定这一物理现象,通过 Voce 方程的拟合,规避了变形不稳定区域对特征变形抗力判断的干扰,得到了符合指数函数的材料高温稳定流变本构模型,在新型金属材料热加工工艺开发中具有较强的应用价值。

1 试验方法

本试验采用的 TC4 钛合金是一种($\alpha+\beta$)型钛合金,名义化学成分为 Ti-6Al-4V。热模拟试验前的显微组织如图 1 所示。热压缩试验在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行,如图 2 所示。整个试验过程在氩气保护下进行,以防止高温下试样被氧化。试样的两端采用 Ta 片润滑,不仅能减小摩擦对试样应力状态的影响,还能降低试样两端热量的损失,有利于试样的均匀变形。试样采用电阻加热法进行加热,并由焊于试样中部的热电偶来控制 and 测量试样的温度,升温速率为 5 °C/s,并在设定的温度(分别为 750、800、850、900、950 °C)保温 10 min,然后按照设定的应变速率(分别为 0.1 s⁻¹, 1 s⁻¹, 10 s⁻¹, 20 s⁻¹)开始变形,变形量为 50%。压缩完成后,试样随压头快速冷却到 300 °C 左右,再开箱空冷至室温,以此保留高温变形后的组织形貌。

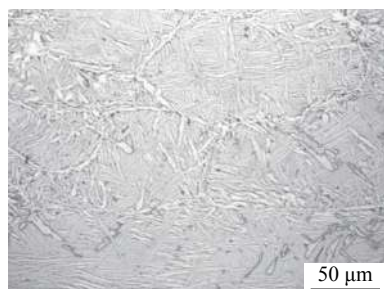


图 1 热模拟试样的显微组织

Fig. 1 Initial microstructure of the tested sample

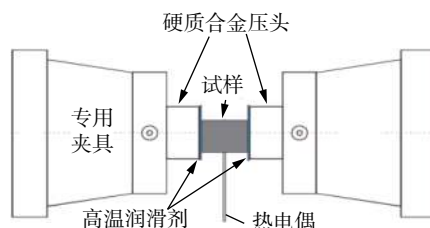


图 2 热模拟试验示意

Fig. 2 Schematic diagram of the hot compression test

2 结果及讨论

2.1 真应力和真应变曲线

图 3 为不同应变速率下的 TC4 钛合金真应力—真应变曲线。由图 3 可以看出,在本研究设定的应变速率和变形温度条件下,真应力—真应变曲线很快达到峰值应力后,均出现了流变软化现象,即真应力值随真应变速率的增加而减小。并且在测量变形范围内,流变应力没有达到稳定状态。Li^[9] 的研究表明,在两相材料中的流变软化是由于 α 相中的弹性应变能在 β 相发生变形时缓慢释放造成的,进一步的研究需要对试验曲线进行拟合。

2.2 应力应变曲线的指数函数拟合

对不存在明显屈服平台金属材料的加工硬化常常随着塑性应变增加而递减,最终达到稳定流变应力,这种现象可以由 Voce 本构方程描述:

$$\sigma_1 = \sigma_{s1} - (\sigma_{s1} - \sigma_{01})e^{-n\epsilon} \quad (1)$$

其中, n 为材料常数; ϵ 为等效应变速率 (s⁻¹); σ_1 为流变应力 (MPa); σ_{01} 为理论屈服强度 (MPa); σ_{s1} 为极限流变应力 (MPa)。

与之类似,一些金属材料的加工软化随着塑性应变增加而递减,最终达到稳定流变应力,这种现象也可以由 Voce 本构方程描述:

$$\sigma_2 = \sigma_{02} - (\sigma_{02} - \sigma_{s2})(1 - e^{-n\epsilon}) \quad (2)$$

其中, σ_2 为流变应力 (MPa); σ_{02} 为理论屈服强度 (MPa); σ_{s2} 为极限流变应力 (MPa)。

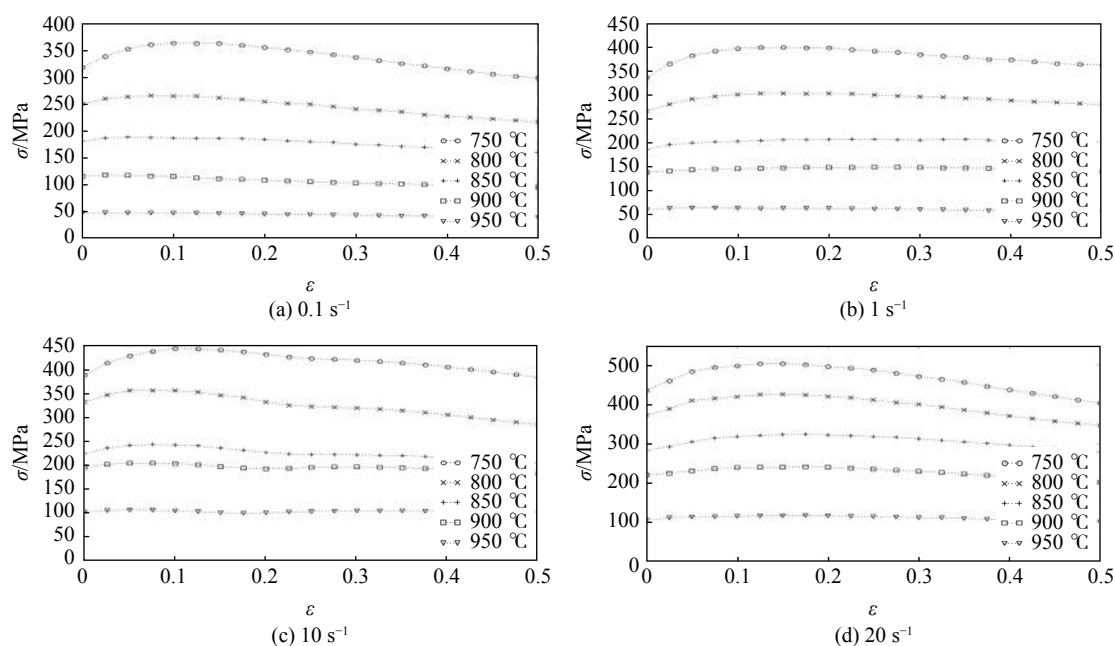


图3 TC4 钛合金真应力-真应变曲线

Fig. 3 True stress-strain curves of TC4 alloy

将公式 (1) 和公式 (2) 结合起来就可以得到本文所用的拓展 Voce 方程, 该方程可以描述变形初期的加工硬化和变形后期的加工软化:

$$\sigma = \sigma_1 e^{-n\dot{\epsilon}} + \sigma_2 (1 - e^{-n\dot{\epsilon}}) \quad (3)$$

实测数据和拟合曲线如图 4 所示, 可见基于 Voce 函数的拟合, 通过较小应变试验得到了大变形条件下的材料流变应力。把稳定流变应力进行样条曲面拟合 (图 5) 可以看到, 在塑性应变速率小于

10 s^{-1} 和温度大于 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域, 稳定流变应力有一个平台, 表明该区域是 TC4 钛合金进行热加工的稳定区域。

2.3 稳定流变应力双曲正弦本构方程的建立

为了进一步研究 TC4 合金的热加工变形行为, 有必要建立流变应力本构方程。通常, 钛合金的变形温度、应变速率和流变应力的关系可以双曲正弦函数模型表示^[10]。

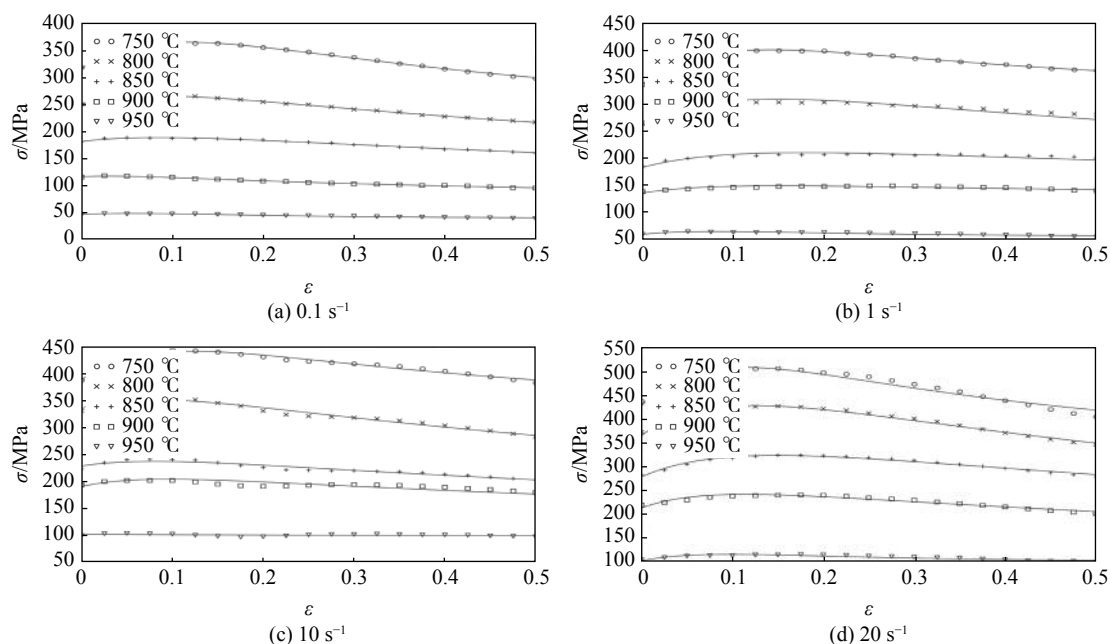


图4 测量值和 Voce 函数拟合值的比较

Fig. 4 Comparison between the measured and fitted stress-strain curves

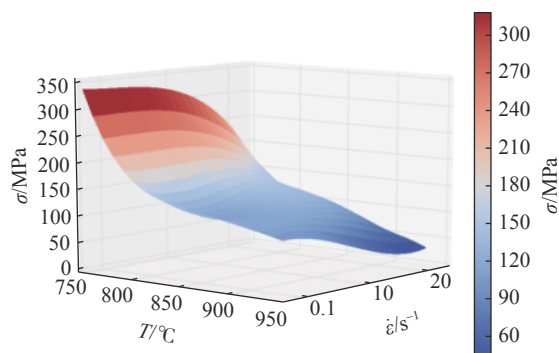


图5 稳定流变应力的样条曲面拟合

Fig. 5 Bivariate spline approximation for the saturated flow stress

$$\dot{\varepsilon} = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n e^{-Q/RT} \quad (4)$$

其中, A , α , n 为材料常数; $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变速率 (s^{-1}); Q 为塑性变形激活能 (J/mol); T 为绝对温度 (K); σ 为极限流变应力 (MPa); R 为 $8.314 J/(mol \cdot K)$ 。

常用的拟合方法是线性多部算法^[11]。在流变应力较小时, 近似为:

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \sigma^n e^{-Q/RT} \quad (5)$$

公式 (5) 中包含的线性关系如公式 (6) 所示。在不同温度, 对 $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 作线性拟合, 拟合曲线 (图 6a) 的斜率的倒数即为该温度下的 n 值, 取平均

即得 n 的初始值。

$$\ln \sigma = \frac{1}{n} \ln \dot{\varepsilon} + \frac{1}{n} \ln (A_2 e^{-Q/RT}) \quad (6)$$

在流变应力较大时, 近似为:

$$\dot{\varepsilon} = A_3 e^{\beta \sigma} e^{-Q/RT} \quad (7)$$

公式 (7) 中包含的线性关系如公式 (8) 所示, $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 σ 的线性关系如图 6(b) 所示, 图中 β 就是直线斜率的倒数, 不同温度 β 值, 取平均即得 β 的初始值, α 就是 β 和 n 的比值。

$$\sigma = \frac{1}{\beta} \ln \dot{\varepsilon} + \frac{1}{\beta} \ln (A_3 e^{-Q/RT}) \quad (8)$$

将得到的拟合参数代入公式 (4) 得到又一个线性方程, 该线性拟合关系如图 6(c) 所示。图中的斜率即为塑性变形激活能, 根据拟合曲线的截距则可以求出该应变速率下的 A 值, 取平均即得 Q 和 A 的初始值。用这种方法得到的激活能为 $1240 kJ/mol$ 。

$$n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\varepsilon} = \frac{Q}{RT} - \ln A \quad (9)$$

最后将所有求得的参数代入公式 (4) 得到试验 TC4 材料的双曲正弦本构方程为:

$$\dot{\varepsilon} = 2.42 \times 10^{66} [\sinh(7.90 \times 10^{-9} \sigma)]^{12.4} e^{-1.24 \times 10^6 / RT} \quad (10)$$

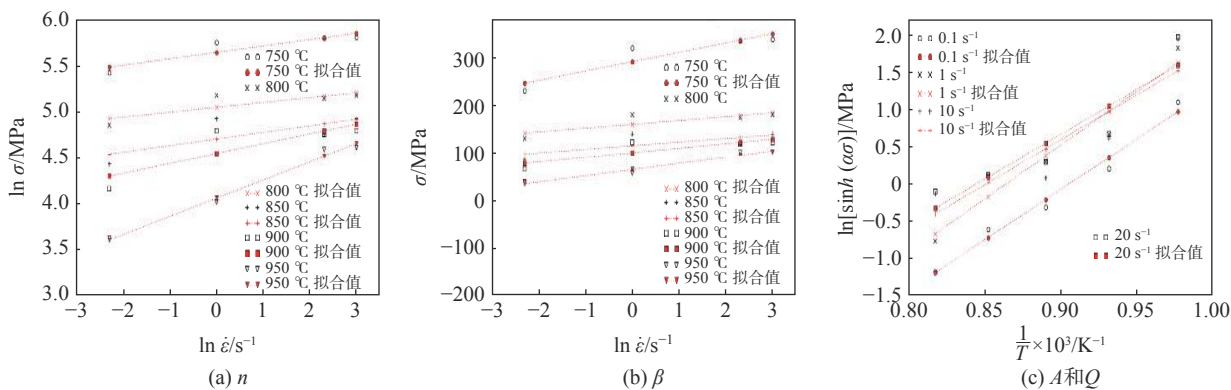


图6 本构参数的直线拟合

Fig. 6 Linear fitting of variables in the constitutive equation

作为对比, 笔者还采用 Levenberg-Marquardt 算法^[12]对通过应力应变曲线的指数函数拟合得到的稳定流变应力进行参数拟合。为了提高拟合精度, 参数拟合分两步进行。第一步, 对不同温度 and 不同应变速率的测量曲线进行拟合, 得到两个塑性应变系数 m 和 n 在不同温度 and 不同应变速率的最佳值。第二步, 将两个塑性应变系数 m 和 n 在相同温度下平均值作为该应变速率下的两个塑性应变系数 m

和 n 的值, 重新拟合其它参数。非线性函数拟合得到的激活能为 $1210 kJ/mol$, 得到的稳定流变应力双曲正弦本构方程为:

$$\dot{\varepsilon} = 235 [\sinh(8.75 \times 10^{-12} \sigma)]^{15.4} e^{-1.21 \times 10^6 / RT} \quad (11)$$

图 7 是线性拟合结果和 Levenberg-Marquardt 算法拟合结果的比较, 从图 7 可以看出非线性拟合更接近试验测量值。

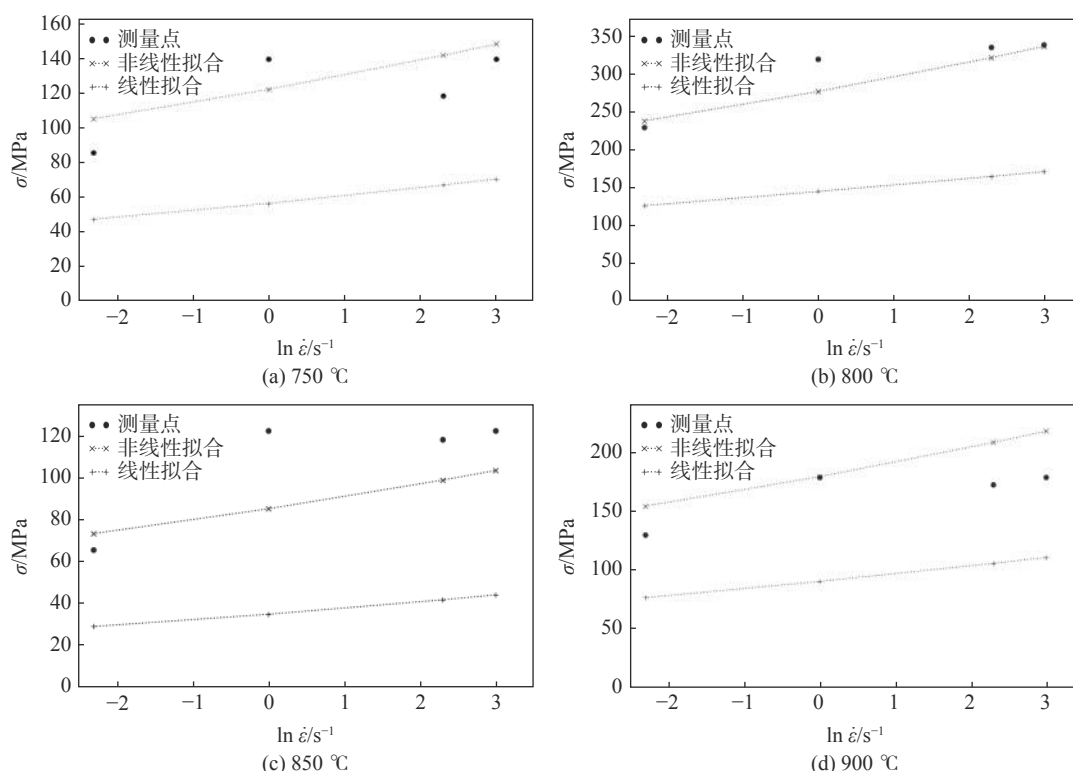


图7 测试数据和拟合数据的比较
Fig. 7 Comparison between the measured and fitted data

3 结论

1)通过在变形温度 750 ~ 950 °C、应变速率为 0.1 ~ 20 s⁻¹ 条件下 TC4 钛合金的热压缩实验,得到了 TC4 钛合金的热压缩真应力—应变曲线,并对流变软化行为进行了基于 Voce 函数的拟合,通过较小应变试验得到了大变形条件下的材料流变应力。

2)得到 TC4 稳定变形范围在温度大于 800 °C 和塑性应变速率小于 10 s⁻¹ 区间。

3)通过非线性拟合和本构参数的线性回归分析的比较发现, Levenberg-Marquardt 非线性拟合算法得到的 TC4 钛合金包含流变软化本构方程更接近测量值。

参考文献

- [1] Rugg David, Dixon Mark, Burrows Justin. High-temperature application of titanium alloys in gas turbines[J]//Material Life Cycle Opportunities and Threats – an Industrial Perspective. Materials at High Temperatures, 2016, 33 (4–5): 536–541.
- [2] Park Chan Hee, Kim Jeoung Han, Hyun Yong-Taek, *et al.* The origins of flow softening during high-temperature deformation of a Ti–6Al–4V alloy with a lamellar microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 582: 126–129.
- [3] Bai Q, Lin J, Dean T A, *et al.* Modelling of dominant softening mechanisms for Ti–6Al–4V in steady state hot forming conditions[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 559: 352–358.
- [4] Alabort E, Putman D, Reed R C. Superplasticity in Ti–6Al–4V: Characterisation, modelling and applications[J]. Acta Materialia, 2015, 95: 428–442.
- [5] Lu Jiapeng, Chen Jianbin, Fang Qihong, *et al.* Finite element simulation for Ti–6Al–4V alloy deformation near the exit of orthogonal cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9–12): 2377–2388.
- [6] Bennett, Christopher J, Sun Wei. Optimisation of material properties for the modelling of large deformation manufacturing processes using a finite element model of the gleeble compression test[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2014, 49(6): 429–436.

(下转第 72 页)