

Ti26 钛合金热变形行为及本构模型

赵恒章^{1,2}, 奚正平², 郭荻子², 赵彬², 杨英丽², 毛小南², 肖林¹

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049;

2. 西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘要: 通过热压缩试验研究热加工条件下 Ti26 高强钛合金的热变形行为。结果表明: 随着温度的升高和应变速率的降低, Ti26 合金的流变应力显著降低, 表现为较强的速率敏感性和温度敏感性; 而变形温度对流变应力的影响程度与应变速率的大小有关。根据 BP 神经网络原理算法, 基于试验数据, 建立了 Ti26 钛合金的一个知识库的本构关系模型。预测结果表明: 该神经网络本构关系模型具有很高的精度, 可以很好地描述该合金在高温变形时各热力学参数之间的复杂关系, 为本构关系模型的建立提供了一种更加准确有效的方法。

关键词: Ti26 合金; 热压缩; 流变应力; 本构模型; 神经网络

中图分类号: TG146.4

文献标志码: A

Hot deformation behavior and constitutive model of Ti26 alloy

ZHAO Heng-zhang^{1,2}, XI Zheng-ping², GUO Di-zi², ZHAO Bin², YANG Ying-li², MAO Xiao-nan², XIAO Lin¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China;

2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Hot deformation behavior of Ti26 alloy was investigated by the compression tests. The results show that the flow stress of Ti26 alloy reduces with the increase of temperature and decrease of strain rate, which presents strong strain rate sensitivity and temperature sensitivity. The effect of deformation temperature on flow stress is correlated with the strain rate. Based on the BP network knowledge and experimental data, the knowledge based constitutive relationship model was established. The results show that the neural network model for constitutive relationship has a higher predicted precision, which can describe the complicated nonlinear relationship of thermodynamic parameters well. Therefore, it provides a more convenient and more effective way to establish the model of constitutive relationship for titanium alloys.

Key words: Ti26 titanium alloy; hot compression; flow stress; constitutive model; neural network

随着新一代航空、航天飞行器高速、远程、轻质和提高燃油效率等方向的跨越式发展, 对结构钛合金强韧性匹配提出了更高的要求。 β 钛合金具有最高的强度, 因而成为开发和应用研究的重点方向之一, 在国际上的研究和发展也较活跃。以 Ti-1023、Ti-15-3、Ti40、TB8、 β -C、 β 21s 等为代表的 β 钛合金已在航天、航空等领域获得广泛的应用^[1-5]。Ti26 钛合金是西北

有色金属研究院在 Ti-15-3 基础上发展的新型 β 钛合金, 虽然含有大量的 β 稳定元素, 但是没有偏析倾向, 不需要特殊的熔炼技术。作为新型的 β 钛合金, Ti26 合金具有良好的冷加工性能, 通过热处理, 屈服强度从固溶态的 800 MPa 经时效后超过 1 241 MPa, 经形变热处理后强度可达到 1 517 MPa。

研究表明^[6-8], 热加工工艺条件对钛合金变形行为

和成形性能有显著影响, 热加工工艺也是调控 β 钛合金中 α 相尺寸、形貌和体积分数的的重要手段。因此, 开展 Ti26 合金热加工变形行为的研究, 对深入了解其变形规律具有重要意义。

流变应力对变形温度、应变速率及变形程度等热变形参数十分敏感, 而且各参数对流变应力的影响规律也很复杂。因此, 采用函数型的本构关系建立其流变应力模型很难精确地反映各热变形参数对流变应力的影响规律。近年来迅速发展的人工神经网络具有自学习、自组织、自适应功能, 特别适合处理复杂的非线性现象, 是新一代信息处理工具, 并成功地用于非线性系统的建模、预测预报、故障诊断和自适应控制等方面。BP 网络即误差反向传播网络(Error back propagation network)是目前应用最为广泛和成功的神经网络之一, 能够快速有效地反映多因素之间高度非线性的复杂关系。运用 BP 神经网络找出实验数据之间潜在的规律, 能够避免传统回归方法的不足, 有效地建立高精度本构模型。为此, 本文作者以 Ti26 合金热模拟压缩试验结果为基础, 研究变形温度、应变速率和变形程度等参数对 Ti26 合金高温变形时流变应力的影响。基于 BP 神经网络, 建立了一个知识基的本构模型。神经网络本构模型预测结果表明, 该模型具有很高的精度, 可以很好地描述该合金在高温变形时各热力学参数之间的复杂关系, 为本构关系模型的建立提供了一种更加准确有效的方法。

1 实验

采用 Ti26 合金热轧棒材, 用金相法测得其相变点为 $(760 \pm 10)^\circ\text{C}$ 。压缩试样由 $d12\text{ mm}$ 棒材加工成 $d8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的圆柱。为减小压缩时压头与试样上下端面之间的摩擦, 试样的两端涂敷石墨作为润滑剂。热压缩试验在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行, 试验温度为 700 、 780 、 860 、 940°C , 应变速率为 0.001 、 0.01 、 0.1 、 1 、 10 s^{-1} , 最大变形程度为 70% 。变形过程由计算机控制, 自动采集应力、应变、温度、位移等数据, 绘制真应力—真应变曲线。

2 Ti26 合金的热变形行为

图 1 所示为 Ti26 钛合金在不同温度下热压缩变形

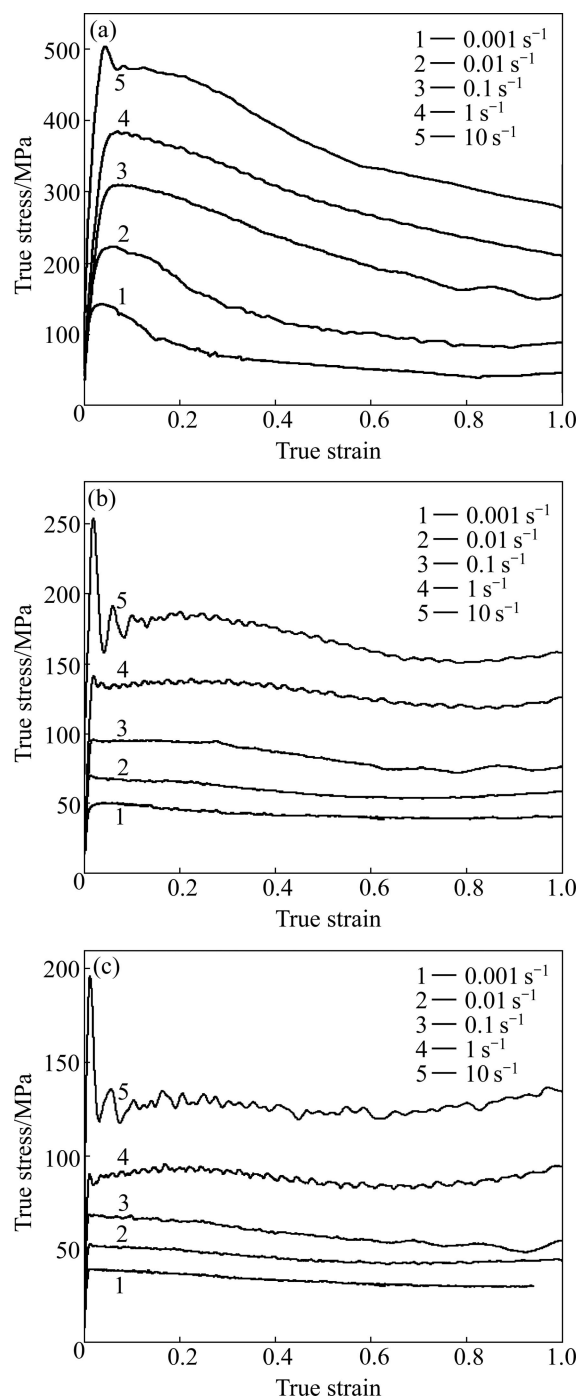


图 1 Ti26 合金不同温度下的真应力—真应变曲线

Fig. 1 True stress—true strain curves of Ti26 alloy at different compression temperatures: (a) 700°C ; (b) 860°C ; (c) 940°C

时的真应力—真应变曲线。从图 1 中可以看出, Ti26 合金表现出了明显的加工硬化、动态软化、稳态流变 3 种高塑性变形特征。在变形初始阶段, 压缩试样内位错滑移受阻, 位错密度不断增加, 流变应力随着变形量的增加而迅速增加并达到峰值, 发生明显的加工

硬化现象; 流变应力达到峰值后, 动态再结晶的软化效应大于加工硬化的强化效果, 流变应力随变形量的增加而逐渐下降, 呈现动态软化现象; 随着变形的继续进行, 动态再结晶的软化效应与热加工硬化效应处于相对平衡状态, 流变应力进入稳态流变阶段。

由图 1 可知: 稳态流变应力曲线并非一条光滑曲线, 而是有波动, 这说明在变形过程中, 动态再结晶与加工硬化相互竞争、强化与软化交互领先的结果。在高温高应变速率条件下, Ti26 合金在 0.01~0.03 的范围内出现了一个明显的应力峰值, 随后突然下降, 出现应力不连续屈服现象。

研究表明, 这种不连续屈服现象存在于许多 β 合金中^[9-12], 可用静态和动态理论来解释这种现象^[13, 14]。另外, 从图 1 可以看出, 在应变速率一定的情况下, Ti26 合金的流变应力随着变形温度的升高而降低。流变应力对温度具有敏感性, 当应变速率相同时, 变形温度越低, 流变应力对温度越敏感。如图 1(a)所示, 700 °C 时, 流变应力均表现出明显的流动软化特性, 而在高温情况下(见图 1(b)、(c)), 流变应力未呈现明显的软化特性, 而是达到峰值后快速趋于稳定, 进入稳态流变状态。应变速率越大, 变形温度越低, 合金越难达到稳态变形。

图 2 所示为峰值流变应力随热变形工艺参数的变化情况。从图 2 中可以看出, 恒应变速率时, 峰值应力随变形温度的升高而降低; 变形温度一定时, 峰值应力随应变速率的增大而增大; 当变形温度升高时, 动态再结晶驱动力增大, 位错活动能力增强, 从而使软化过程更为突出。当变形温度低于 780 °C 时, 峰值

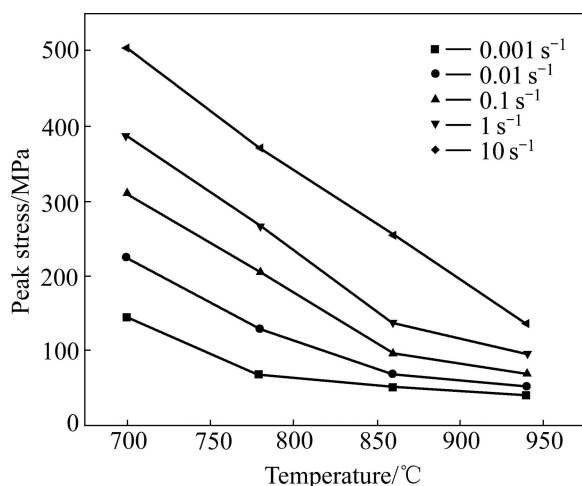


图 2 不同变形条件下 Ti26 合金的流变应力峰值

Fig. 2 Peak stress of Ti26 alloy under different deformation conditions

应力随应变速率的变化规律接近一致, 呈相同斜率的直线变化; 随着变形温度的升高, 峰值应力随应变速率的减小而直线减小的趋势变缓, 表现出变形温度对流变应力的影响程度与应变速率相关的规律。

3 本构模型的建立

通过 Ti26 合金的热变形行为分析, 可以看出流变应力(σ)主要取决于变形温度、应变速率和变形量。高温塑性变形时本构关系可以表示为

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t) \quad (1)$$

流变应力 σ 是应变变量 ε 、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 和温度 t 这 3 个变量的函数, 因此, 构建的神经网络结构模型中输入层有 3 个输入分量, 即($\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t$), 而输出层只有一个输出量, 即流变应力 σ 。网络结构如图 3 所示。

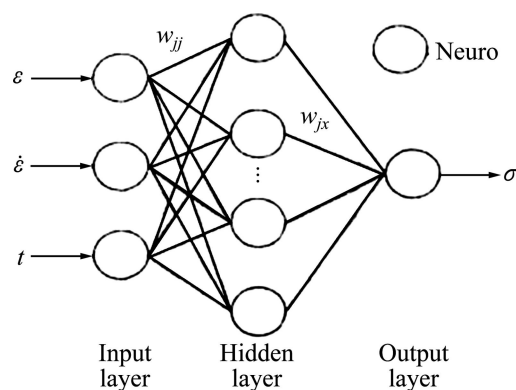


图 3 BP 神经网络结构

Fig. 3 Structure of BP ANN model

为了避免建立的神经网络模型迭代计算时, 数值过于集中在某些神经元和权值上而降低模型的计算精度, 需要将输入和输出数据进行初始化处理。由于应变速率和温度的数据点较少, 且应变速率数据点的空间分布不均匀, 不利于网络的训练, 因此, 对这些数据进行了归一化处理。

BP 神经网络是将误差从输出层向输入层的方向进行反向传播以修正相应的连接权值, 为防止振荡, 加了一个惯性项。新的权值修正量可以表示为

$$\Delta W_{ji}(m+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ji}} + \alpha \Delta W_{ji}(m) \quad (2)$$

式中: W_{ji} 为任意两个神经元之间的连接权; E 为连

接权相关的非线性误差函数; $\Delta W_{ji}(m)$ 为连接权 m 次迭代的修正量; η 为学习率; α 为动量因子, 主要用来抑制振荡; m 为迭代次数。

通过反复试验发现, 当 $\alpha=0.8$, $\eta=0.65$, 均方差为 0.001, 使用 $3 \times 20 \times 1$ 型神经网络模型时, 模型精度高, 收敛速度快, 网络经过 956 次迭代计算后趋于收敛、稳定。

图 4 所示为 Ti26 合金流变应力 BP 网络模型训练结果的相关性分析。由图 4 可以看出, 该模型的训练精度非常高, 网络模型训练的预测值与实验值非常接近, 平均相对误差为 1.3%。这说明建立的流变应力预测模型具有较高的精度。选取样本数据范围内非样本数据的变形条件输入到已经训练好的人工神经网络模型中, 可以得到相应的流变应力输出值。流变应力输出值与实验值的对比情况如图 5 所示。由图 5 可以看

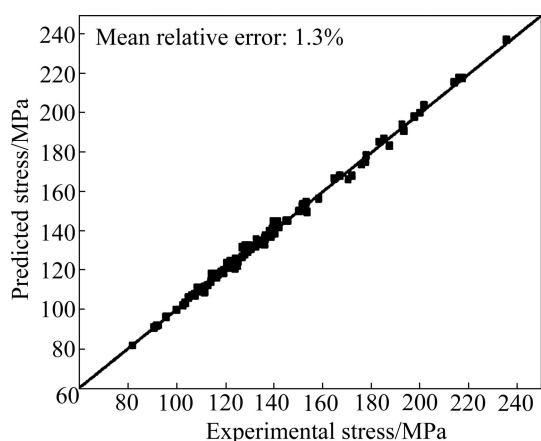


图 4 流变应力的预测与实验值的比较

Fig. 4 Comparison between predicted and measured flow stresses

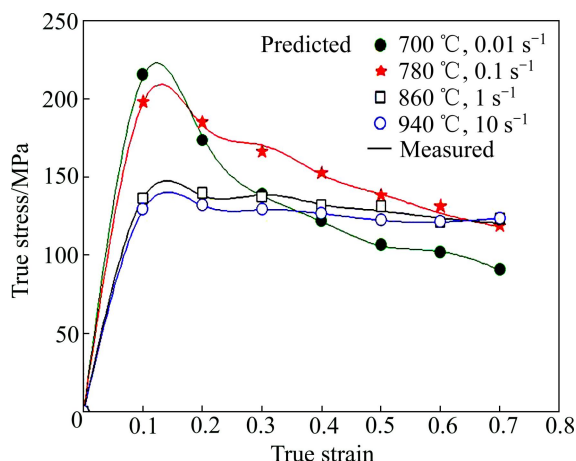


图 5 非样本数据条件下流变应力预测值与实验值的比较

Fig. 5 Comparisons between predicted and measured flow stresses under condition of non-sample data

出, 其预测结果也充分反映了合金流变应力的变形特征, 非样本数据预测结果与实验值的相对误差不超过 4%。由此可见, 采用人工神经网络方法建立的本构模型能够比较准确地预测热变形过程中 Ti26 合金的流变应力。

4 结论

1) Ti26 合金热压缩变形时, 表现出明显的加工硬化、动态软化、稳态流变 3 种高塑性变形特征, 温度越低, 特征阶段越明显。

2) Ti26 合金属于正应变速率敏感材料, 应变速率和变形温度对合金流变应力有显著影响。变形温度越低, 应变速率越高, 则流变应力越高。变形温度对流变应力的影响程度与应变速率的大小有关。

3) 采用神经网络建立了 Ti26 合金高温压缩变形时流变应力与变形温度、应变速率和应变之间的本构模型。神经网络模型预测值与实验值符合较好, 其平均误差范围在 1.3% 以内, 说明该模型能够比较准确地反映 Ti26 合金的高温变形行为。

REFERENCES

- [1] 商国强, 朱知寿, 常 辉, 王新南, 寇宏超, 李金山. 超高强度钛合金研究进展[J]. 稀有金属, 2011, 35(2): 286-290.
SHANG Guo-qiang, ZHU Zhi-shou, CHANG Hui, WANG Xin-nan, KOU Hong-chao, LI Jin-shan. Development of ultra-high strength titanium alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(2): 286-290.
- [2] 葛 鹏, 赵永庆, 周 廉. β 钛合金的强化机理[J]. 材料导报, 2005, 19(12): 52-54.
GE Peng, ZHAO Yong-qing, ZHOU Lian. Strengthening mechanism of beta titanium alloys [J]. Materials Review, 2005, 19(12): 52-54.
- [3] 汶建宏, 杨冠军, 葛 鹏, 毛小南, 赵映辉. β 钛合金的研究进展[J]. 钛工业进展, 2008, 25(1): 33-38.
WEN Jian-hong, YANG Guan-jun, GE Peng, MAO Xiao-nan, ZHAO Ying-hui. The research progress of β titanium alloys [J]. Titanium Industry Progress, 2008, 25(1): 33-38.
- [4] 王鼎春. 高强钛合金的发展与应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s958-s963.
WANG Ding-chun. The development and application of high-strength titanium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s958-s963.

- [5] 李劲波, 李 鑫, 鲁世强, 黄 旭, 曹京霞. 变态 Ti40 合金高温变形行为[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(1): 82–87.
LI Jin-bo, LI Xin, LU Shi-qiang, HUANG Xu, CAO Jing-xia. Study on high temperature deformation behavior of wrought Ti40 alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(1): 82–87.
- [6] PRASAD Y V, SESHACHARYULU T. Processing maps for hot working of titanium alloys [J]. Mater Sci Eng A, 1998, 243: 82–88.
- [7] PARK N K, YEOM J T, NA Y S. Characterization of deformation stability in hot forging of conventional Ti-6Al-4V using processing maps [J]. J Mater Process Technol, 2002, 130/131: 540–545.
- [8] 贺金字, 李德富, 陈海珊, 沈 建, 赵云豪. TB2 合金锻造工艺与组织性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(suppl. 2): 152–154.
HE Jin-yu, LI De-fu, CHEN Hai-shan, SHEN Jian, ZHAO Yun-hao. Microstructures and mechanical properties of TB2 forgings [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(suppl. 2): 152–154.
- [9] PHILIPPART L, RACK H J. High temperature dynamic yielding in metastable Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5 Al [J]. Mater Sci Eng A, 1998, 243: 196–200.
- [10] PHILIPPART L, RACK H J. Recrystallization in hot working and creep [J]. Mater Sci Eng A, 1998, 8(6): 161–170.
- [11] BALASUBRAHMANYAM V V, PRASAD Y V. Deformation behaviour of beta titanium alloy Ti-10V-4.5Fe-1.5Al in hot upset forging [J]. Mater Sci Eng A, 2002, 336: 150–158.
- [12] LI L X, LOU Y, YANG L B, PENG D S, RAO K P. Flow stress behavior and deformation characteristics of Ti-3Al-5V-5Mo compressed at elevated temperatures [J]. Materials and Design, 2002, 23: 451–457.
- [13] PHILIPPART L, RACK H J. High temperature dynamic yielding in metastable Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al [J]. Mater Sci Eng A, 1998, 243: 196–200.
- [14] SHERBY O D, CAIIGIURI R D, KAYAI E S. Advances in metal processing [M]. New York: Plenum Press, 1981: 133–171.

(编辑 李向群)