

# 基于GA-BP神经网络的网状钛基复合材料本构关系研究



李丽婷<sup>1</sup>, 黄帅军<sup>2</sup>, 王克环<sup>1,2</sup>, 温泽华<sup>2</sup>, 王东君<sup>1</sup>, 刘钢<sup>1</sup>

1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001

2. 空基信息感知与融合全国重点实验室, 河南 洛阳 471099

**摘要:**随着航空航天、能源等高端制造领域对材料性能要求的不断提高,网状钛基复合材料因其优异的比强度、耐热性和抗蠕变性能而受到广泛关注。为研究网状钛基复合材料的热变形行为,并建立能够描述其高温流变行为的本构模型,本文对(TiB+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15网状复合材料在温度为890~980°C、应变速率为0.001~1s<sup>-1</sup>下进行了等温压缩试验。结果表明,890°C、1s<sup>-1</sup>条件下该复合材料的流变行为在峰值应力之后明显软化,并且在变形初期表现出了不连续屈服特征。随着温度升高和应变速率降低,流动应力软化值逐渐降低,当温度为980°C、应变速率为0.001s<sup>-1</sup>时峰值应力基本达到一个稳态值。以应力应变数据为基础,分别建立了基于应变补偿修正的Arrhenius本构模型和遗传算法(GA)优化反向传播(BP)神经网络本构模型。其中,基于应变补偿修正的Arrhenius本构模型在应力较大时偏差较大。GA-BP神经网络本构模型能够更加准确地预测网状钛基复合材料的复杂流变行为,其相关系数 $R=0.9997$ 、均方根误差RMSE=1.1292MPa、平均相对误差AARE=1.0296%。该研究可为网状钛基复合材料的热变形工艺提供理论指导。

**关键词:**网状钛基复合材料;流变行为;Arrhenius本构方程;神经网络;遗传算法

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.06.002

在网状钛基复合材料中,增强相的网状结构分布不仅使得钛基复合材料保留了基体合金的室温塑性,同时起到了高温“晶界强化”作用,其优异的性能使其在航空航天领域具有非常大的应用潜力<sup>[1-2]</sup>。通常网状钛基复合材料在高温环境下成形,基体合金在高温成形过程中往往伴随着相变、回复及再结晶等复杂的组织演变,流动应力与变形参数呈复杂的非线性关系<sup>[3-4]</sup>。由于增强相的非均匀分布以及基体和增强相之间的相互作用,相比于基体合金,网状钛基复合材料高温流变行为更加复杂。本构模型通常用来表征材料的流变行为,并且可以用于有限元模拟中,为复杂零件的成形优化工艺参数<sup>[5]</sup>。因此,建立准确的本构模型才能获得更加可靠的有限元模拟结果。

材料本构模型分为不考虑微观机制的唯象本构和考虑微观机制的物理本构两大类。金属材料在热变形过程中的动态再结晶、位错密度演变等微观组织演变机制与流动应

力响应存在直接的关联性。基于微观机制建立的本构模型能够显著提高热变形过程的模拟精度,这一方法已成为材料加工领域的重要研究手段。然而对于具有网状结构的钛基复合材料而言,其建模过程不仅需要考虑各组元的独立演化行为,还要准确描述各组元间相互作用的动力学特征,这使得构建基于微观机制的本构模型面临巨大挑战,目前,该领域的研究仍处于探索阶段。

现阶段关于钛基复合材料本构模型的建立主要采用唯象模型。Arrhenius本构模型由于其参数较少且模型简单而被广泛应用,已有学者建立了网状钛基复合材料的Arrhenius本构模型<sup>[6-8]</sup>。然而,该模型仅考虑了温度和应变速率的影响,其应用范围具有一定限制条件。在现有研究中,通过材料参数和应变之间的多项式拟合,将应变引入Arrhenius本构方程中,可以得到基于应变补偿修正的Arrhenius本构方程<sup>[9-10]</sup>,可以进一步提高预测精度。尽管

收稿日期: 2025-01-08; 退修日期: 2025-03-26; 录用日期: 2025-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(52375324); 航空科学基金(20220001077002)

引用格式: Li Liting, Huang Shuaijun, Wang Kehuan, et al. Study on the constitutive relationship of network-structured titanium matrix composites based on the GA-BP neural network[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(6): 13-22. 李丽婷, 黄帅军, 王克环, 等. 基于GA-BP神经网络的网状钛基复合材料本构关系研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(6): 13-22.

如此,常规的数学模型仍难以对网状钛基复合材料复杂的非线性关系进行准确描述。

近年来,神经网络被广泛用于表征材料的本构关系。神经网络本构模型通过大量的非线性函数建立输入和输出数据之间的联系<sup>[11]</sup>,因此,具有很强的自学习、自适应和非线性关系识别能力,相比于唯象本构模型能够准确地描述材料的本构关系。如研究学者建立了钛合金<sup>[12-13]</sup>、高温合金<sup>[14]</sup>、铝合金<sup>[15]</sup>,以及复合材料<sup>[16]</sup>的神经网络本构,实现了其高温流变行为的精确预测。反向传播(BP)神经网络在迭代过程中调整的主要参数是权重矩阵和偏移矢量,它们是决定模型精度的关键因素。但是权重矩阵和偏移矢量的初值是随机生成的,在神经网络算法中存在容易陷入局部最小值问题。遗传算法(GA)具有良好的全局搜索能力,利用GA对神经网络的初始权重矩阵和偏移矢量进行优化,使其在给定的范围内搜索出最佳的初始权重矩阵和偏移矢量,从而避免由于初始权重矩阵和偏移矢量取值不当引起的神经网络不收敛问题<sup>[17-18]</sup>。研究表明,GA对BP神经网络模型有着良好的优化改进,可显著提高模型的预测精度<sup>[19]</sup>。但是目前尚未见到针对网状钛基复合材料的神经网络本构模型的报道。

本文以(TiB+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15网状复合材料为研究对象,通过分析其高温压缩应力应变曲线,研究其高温流变行为;建立基于应变补偿修正的Arrhenius本构模型及GA优化BP(GA-BP)神经网络本构模型,对比不同本构模型的预测精度,为网状钛基复合材料的热变形模拟提供可靠的模型支撑。

## 1 材料和方法

本文试验材料为烧结态(TiB+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15网状复合材料,增强相为3.4%体积分数的TiB,基体为TA15,其微观组织如图1所示。由图1可知,TiB沿着原始钛球表面呈网状分布,基体为片层交替分布的 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相。

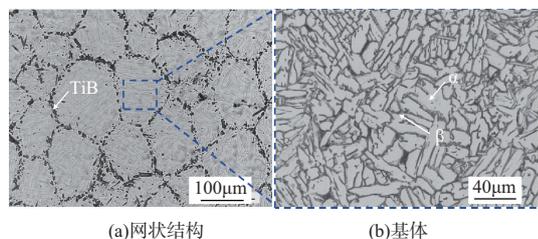


图1 烧结态网状钛基复合材料微观组织

Fig.1 Microstructure of the sintered composites with network structure

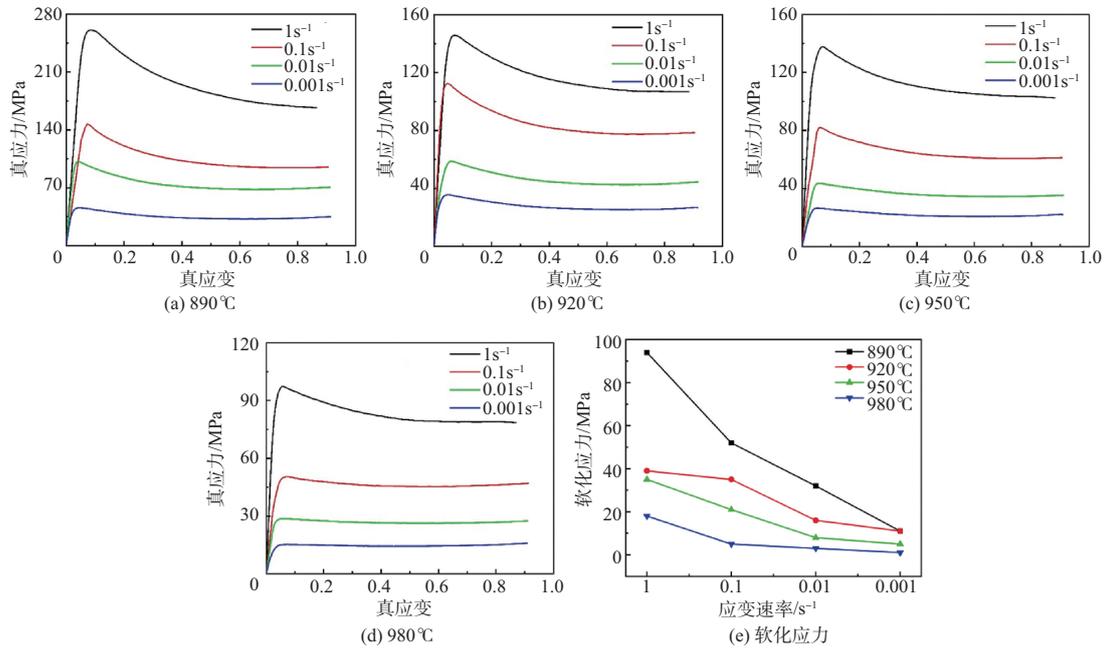
利用拉伸试验机对烧结态圆柱试样进行热压缩试验,试样尺寸为8mm(直径)×12mm(高度)。为了减小摩擦,在试样和压头之间使用石墨片,并在试样表面涂覆玻璃防氧化保护剂。首先将加热炉加热到变形温度(890℃、920℃、950℃、980℃),待炉温稳定后将试样放进加热炉并保温20min。随后在应变速率分别为0.001s<sup>-1</sup>、0.01s<sup>-1</sup>、0.1s<sup>-1</sup>、1s<sup>-1</sup>,压下量为60%的条件下进行压缩变形。获得载荷和位移,根据 $\epsilon = -\ln(L/L_0)$ 计算出真应变,根据 $\sigma = FL/A_0L_0$ 计算出真应力,其中, $\epsilon, L, L_0, \sigma, F, A_0$ 分别为压缩真应变、试样的当前高度、原始高度、真应力、当前载荷和原始截面积。

## 2 结果和讨论

### 2.1 流变行为

图2为(TiB+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15网状复合材料在不同条件下的压缩应力应变曲线。压缩后的试样表面质量良好,未见裂纹、折叠等缺陷,说明该复合材料具有良好的流动性。由图2可知,当温度和应变速率一定时,变形初期应力值随着应变增加快速增加至峰值应力,这主要是由加工硬化导致的。峰值应力后的流动应力表现为软化的趋势。为了评估软化行为,定义峰值应力和峰值应力之后的最小应力的差值为软化应力值,如图2(e)所示。当温度为890℃应变速率为1s<sup>-1</sup>时,软化应力值为94MPa,应力明显软化;当温度为980℃,应变速率为0.001s<sup>-1</sup>时,软化应力值几乎为0,即峰值应力后应力基本达到一个稳态值。随着温度升高和应变速率降低,软化应力值逐渐降低。

软化应力值的演变规律反映了不同条件下的组织演变不同。在变形过程中,增强相发生旋转、断裂,并且温度越低,应变速率越高,增强相发生断裂程度越严重<sup>[20]</sup>。基体组织在低温条件下,由于片层 $\alpha$ 相含量较高,主要发生片层 $\alpha$ 相的再结晶;在高温条件下,基体中高温 $\beta$ 相含量较高,主要发生高温 $\beta$ 相的动态回复<sup>[21]</sup>。值得注意的是,在890~920℃、应变速率为1s<sup>-1</sup>条件下,流动应力在峰值应力之后呈现下凹趋势,类似于不连续屈服行为。根据文献报道,钛合金在高温变形的不连续屈服行为目前并没有较好的物理解释,主要的基本理论有柯氏气团的钉扎理论、位错增殖理论和动态再结晶理论<sup>[22]</sup>。根据本文团队之前的研究,在该条件下真应变为0.9时,片层 $\alpha$ 相再结晶比例非常低,而再结晶的发生需要一定的孕育期,那么在变形初期片层 $\alpha$ 相几乎未发生再结晶。其次在890℃条件下,相比于更高温度,硅更多以硅化物的形式存在,那么不存在硅原子柯氏气团的钉扎作用。因此,网状钛基复合材料在890~920℃及

图2 (TiB+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15 网状复合材料在不同条件下的压缩应力-应变曲线Fig.2 Compression stress-strain curves of the (TiB+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15 network composites under different conditions

应变速率为 $1s^{-1}$ 条件下,变形初期的软化是可动位错大量增值和位错速度与宏观切应力之间关系共同作用的结果,除此之外,还有增强相的断裂。另外,应变一定时,应力随着温度升高和应变速率降低而降低。因此,流动应力与应变、温度和应变速率呈现复杂的非线性关系。

## 2.2 基于应变补偿修正的Arrhenius本构模型

热变形本构模型可以预测材料在不同热变形条件下的流变应力和变形行为,本构方程的精度决定了模拟结果的准确性。目前 Arrhenius 方程在金属及金属基复合材料本构方程中最为广泛,其表达式如式(1)~式(3)所示<sup>[23-24]</sup>

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \alpha\sigma < 0.8 \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \alpha\sigma > 1.2 \quad (2)$$

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

式中, $\sigma$ 为流动应力, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, $T$ 为变形温度, $R$ 为气体常数, $Q$ 为变形激活能,其中 $A$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、 $Q$ 、 $n_1$ 、 $\beta$ 均为与材料性质相关的常数,且 $\alpha = \beta/n_1$ 。

对 Arrhenius 本构方程的幂函数形式、指数形式及双曲正弦形式分别取对数可得式(4)~式(6)

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

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

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

由式(4)~式(6)可见,当温度和应变恒定时, $\beta$ 为 $\sigma$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的线性拟合斜率, $n_1$ 为 $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的线性拟合斜率,根据 $\alpha = \beta/n_1$ 可计算得出 $\alpha$ ,其中 $n$ 为 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的线性拟合斜率。

根据式(6),对 $1/T$ 求偏导可以得到 $Q$ 的表示形式,如式(7)所示

$$Q = Rn \cdot \left[ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right]_{\dot{\epsilon}} = R \cdot \left[ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T \cdot \left[ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (7)$$

由式(7)可知,当温度和应变速率恒定时,将 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的线性拟合斜率以及 $1/T$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的线性拟合斜率代入式(7)可计算得出 $Q$ 。根据 Zener-Hollomon 参数的定义见式(8),对其两边取对数可得式(9)

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (8)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (9)$$

由式(9)可见,参数 $A$ 为 $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 与 $\ln Z$ 线性拟合的截距。

图3为应变为0.9时, $\beta$ 、 $n_1$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $\ln A$ 参数的拟合结果。根据拟合结果得到的 $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $\ln A$ 分别为0.01786、3.30224、495.7245、45.3382,将其代入式(1)中可得到真应变为0.9,变形温度为890~980°C,应变速率在0.001~1s<sup>-1</sup>条件下的Arrhenius本构方程。

由图3可知,当温度和应变速率一定时,流动应力达到峰值应力之后,随着应变增加软化明显。然而,Arrhenius模型仅考虑了温度和应变速率的影响,仅适用于峰值应力后即达到稳态的流变行为。为了将应变引入Arrhenius本构方程中,对不同变形温度和应变速率下0~0.9范围内的真应变每间隔0.1计算其材料参数 $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $\ln A$ ,然后将不同应变下的参数与应变之间的关系进行多项式拟合。拟合时发现5次多项式的拟合效果最好,见式(10)~式(13)

$$\alpha = K_0 + K_1 \varepsilon + K_2 \varepsilon^2 + K_3 \varepsilon^3 + K_4 \varepsilon^4 + K_5 \varepsilon^5 \quad (10)$$

$$n = K_0 + K_1 \varepsilon + K_2 \varepsilon^2 + K_3 \varepsilon^3 + K_4 \varepsilon^4 + K_5 \varepsilon^5 \quad (11)$$

$$Q = K_0 + K_1 \varepsilon + K_2 \varepsilon^2 + K_3 \varepsilon^3 + K_4 \varepsilon^4 + K_5 \varepsilon^5 \quad (12)$$

$$\ln A = K_0 + K_1 \varepsilon + K_2 \varepsilon^2 + K_3 \varepsilon^3 + K_4 \varepsilon^4 + K_5 \varepsilon^5 \quad (13)$$

拟合效果如图4所示。由图4可知,拟合后的相关系数 $R^2$ 均达到了0.99以上,说明5次多项式拟合能较好地反映应变对材料参数的影响。表1为求得的式(10)~式(13)中的

系数值。将表1中的系数值代入式(10)~式(13),即可得到任意真应变下的材料参数,然后将得到的材料参数代入式(3),即可得到一定温度、应变速率条件下的真应力。因此,表1联合式(3)和式(10)~式(13)即为考虑了应变修正的Arrhenius本构。

图5为基于应变补偿修正的Arrhenius本构方程预测值和试验值的对比,其中数据点为基于应变补偿修正的Arrhenius本构方程预测值,曲线为高温压缩试验所得的试验值。由图5可知,基于应变补偿修正的Arrhenius本构方程计算的应力与试验较为贴合,基本能描述高温应力应变流变行为。但是在较高的应变速率和较低的变形温度下,如图5(a)和图5(b)中紫色虚线标出的位置,试验值和预测值仍具有较大的偏差。

### 2.3 GA-BP神经网络本构模型

BP神经网络结构由输入层、隐藏层和输出层组成<sup>[25]</sup>,如图6所示。输入层和输出层的数据特征由变形条件决定。输入层包含温度、应变速率和应变,输出层为流动应力。

GA-BP神经网络计算流程如图7所示。用于模型建立的数据集共包含144个数据点,其中70%被指定用于训练,15%用于验证,15%用于测试。由于神经网络模型对数值敏感,输入与输出数据不同的数量级和范围,导致神经网络模型的训练更加困难。因此,样本数据首先需要进行归一化处理,归一化区间为[-1, 1]。

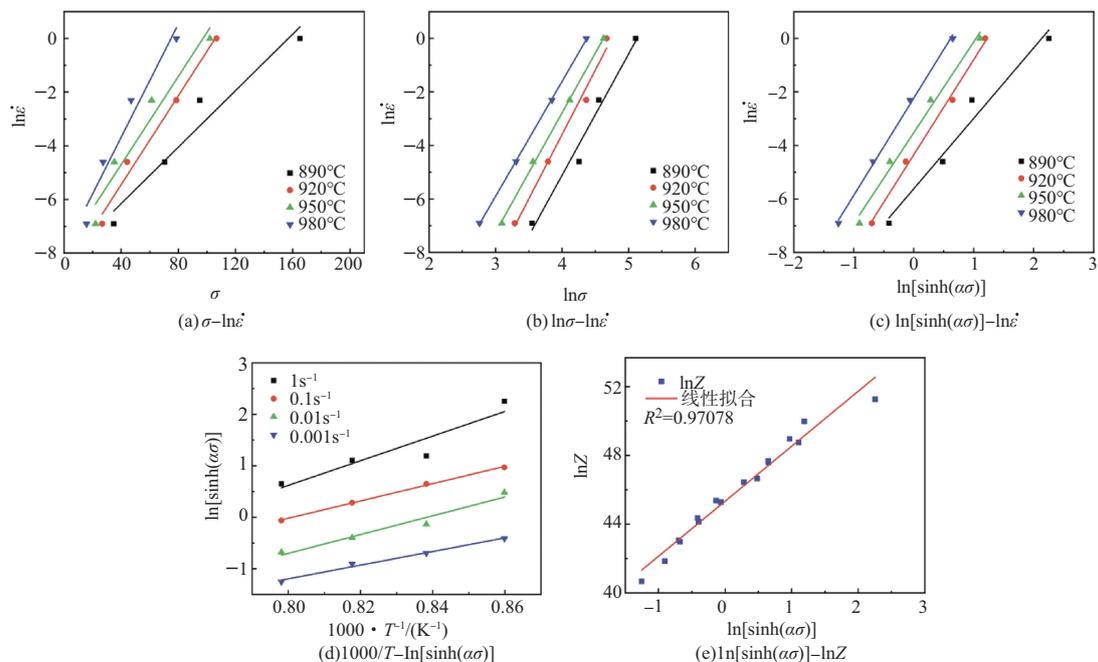


图3 应变0.9材料参数的拟合结果

Fig.3 The fitting results of the material constants at strain of 0.9

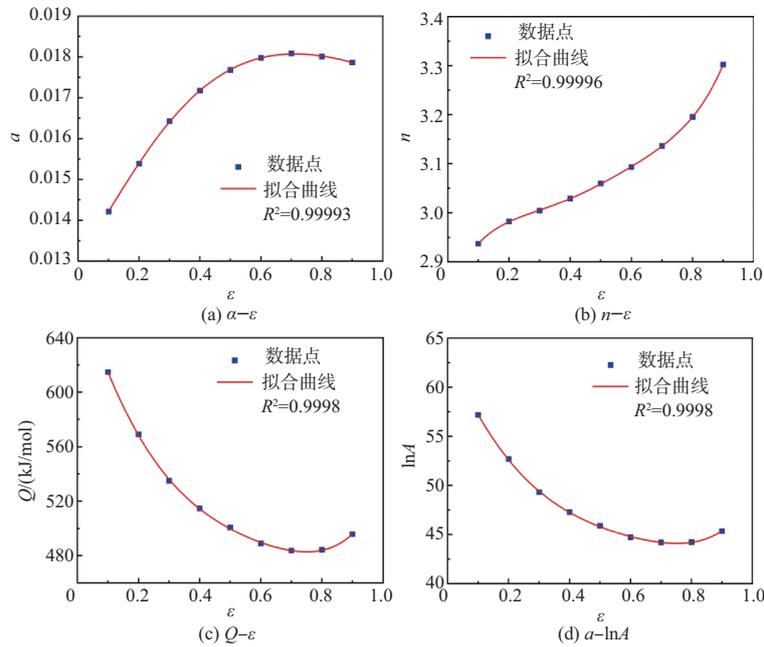


图4 材料参数与应变的五次多项式拟合效果

Fig.4 The fitting results of fifth degree polynomial between material constants and strain

表1 5次多项式的拟合系数

Table 1 The fitting coefficients of the fifth degree polynomial

系数	$\alpha$	$n$	$Q$	$\ln A$
$K_0$	0.0130	2.8275	678.9447	63.4942
$K_1$	0.0120	1.6457	-736.4400	-72.2671
$K_2$	0.0081	-6.8998	980.3501	94.7911
$K_3$	-0.0437	15.6819	-170.4620	-13.9459
$K_4$	0.0419	-16.7177	-890.1920	-89.4373
$K_5$	-0.0136	6.9755	667.0659	65.9760

初始权重矩阵和偏移矢量随机生成,并基于此建立BP神经网络结构。其中,输入层到隐含层、隐含层到输出层的激活函数分别选择tansig函数和purelin函数,训练函数选择trainlm函数。最大迭代次数为1000,确保模型充分收敛,学习速率为0.01,以平衡收敛速度和稳定性,训练目标最小误差为0.00001。这些设置已在试验中验证,能有效提升模型性能。另外,BP神经网络中隐含层的节点数也是十分重要的参数<sup>[26]</sup>。当隐含层的节点数较少时,模型的误差将剧烈波动,而过多的隐含层节点数增加计算成本且容易造成过拟合,降低BP神经网络的泛化能力。为了优化隐含层的节点数 $N$ ,通常采用式(14)获得隐含层节点数大致范围<sup>[27]</sup>。采用均方根误差(RMSE)来评估模型隐含层节点数对BP神经网络本构模型的影响,如式(15)所示。通过反复验证,隐含层具有11个节点的BP神经网络,具有较低的均方根误差

$$N = \sqrt{a+b} + k \tag{14}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (e_i - c_i)^2} \tag{15}$$

式中, $a$ 和 $b$ 分别为输入层和输出层节点数, $k$ 为范围为[1, 10]的常数; $m$ 、 $e_i$ 和 $c_i$ 分别表示样本数量、试验值和预测值。

基于上述获得的BP神经网络结构参数,利用GA优化其权重矩阵和偏移矢量。GA中适应度函数采用的是神经网络中的RMSE。遗传算法的参数设置主要在经验参考范围内通过试凑法来确定,本文中初始化GA参数,设定初始种群规模为150,最大进化代数为200,交叉概率为0.8,变异概率为1,初始权重矩阵和偏移矢量的变量个数为56,并设定变量的范围为[-1,1]。调用GA,提取种群中每个个体的权重矩阵和偏移矢量,并进行BP神经网络训练,计算每个个体的适应度值。若GA迭代次数未达到最大值,则根据个体适应度值进行筛选、交叉和变异,生成新的种群,并继续计算新种群中个体的适应度值,直至GA迭代次数达到最大值。根据整个迭代过程中个体的适应度值,输出最优的初始权重矩阵和偏移矢量,代入BP神经网络进行训练和仿真,最终建立起GA-BP神经网络本构模型。

图8为GA-BP神经网络本构模型预测值和试验值的对比结果。如图8所示,GA-BP神经网络本构的预测值与试验曲线高度一致。相比于基于应变补偿修正的Arrhenius本构模型,GA-BP神经网络提供了输入与输出之间的非线性

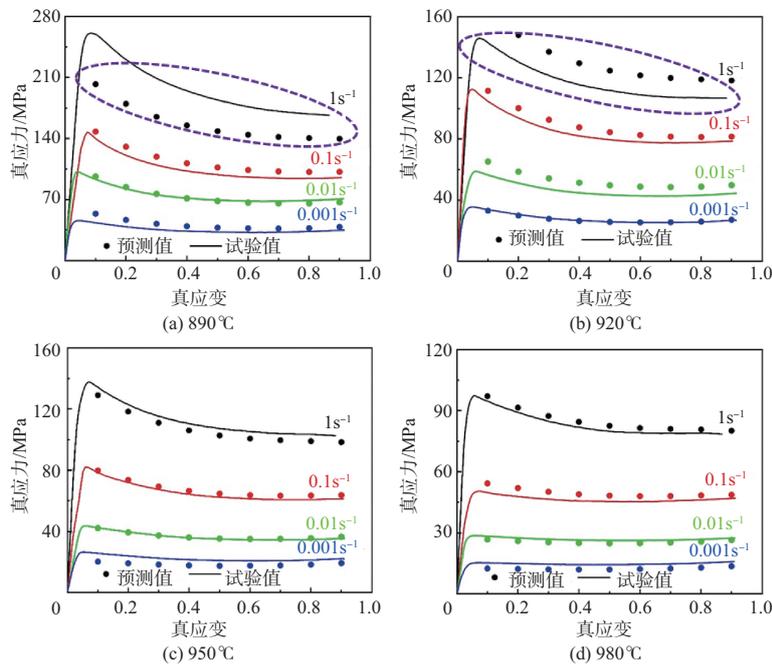


图5 基于应变补偿修正的Arrhenius本构方程预测值和试验值的对比结果

Fig.5 Comparison between the predicted stress by the modified Arrhenius constitutive model and experimental stress

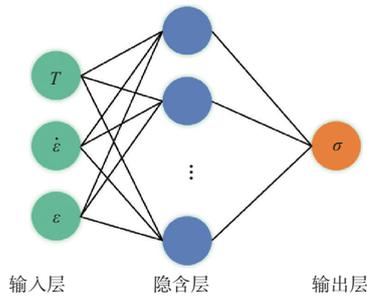


图6 BP神经网络结构

Fig.6 BP neural network structure

性映射关系,并有效降低了初始权重矩阵和偏移矢量对神经网络结构影响,使其能够更加准确地预测不同应变速率和温度下的复杂流变行为。

### 2.4 本构模型拟合效果对比

为了进一步对比不同本构模型的拟合效果,采用式(15)~式(17)分别计算了不同本构模型在训练数据上的RMSE、相关系数 $R^{[28]}$ 和平均相对误差AARE $^{[29]}$

$$R = \frac{\sum_1^m (e_i - \bar{e}_i)(c_i - \bar{c}_i)}{\sqrt{\sum_1^m (e_i - \bar{e}_i)^2 \sum_1^m (c_i - \bar{c}_i)^2}} \quad (16)$$

$$AARE = \frac{1}{m} \sum_1^m \left| \frac{e_i - c_i}{e_i} \right| \times 100\% \quad (17)$$

式中, $m$ 、 $e_i$ 和 $c_i$ 分别为样本数量、试验值和预测值; $\bar{e}_i$ 和 $\bar{c}_i$ 分别为试验值和预测值的平均值。

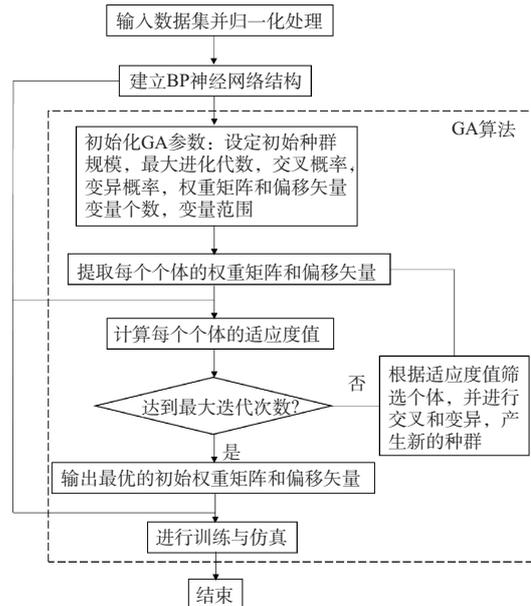


图7 GA-BP神经网络计算流程

Fig.7 The calculation process of GA-BP neural network model

图9为不同本构模型在训练数据上拟合结果的相关性。由图9(a)可知,基于应变补偿修正的Arrhenius本构模型在应力较大时偏差较大。应力较大时对应温度为890~920°C,应变速率为 $1s^{-1}$ 条件下的流变行为,如图5(a)和图5(b)中紫色虚线标出的位置。根据2.1节流变行为的分析,在该条件下变形初期的软化机制为可动位错大量增殖、位

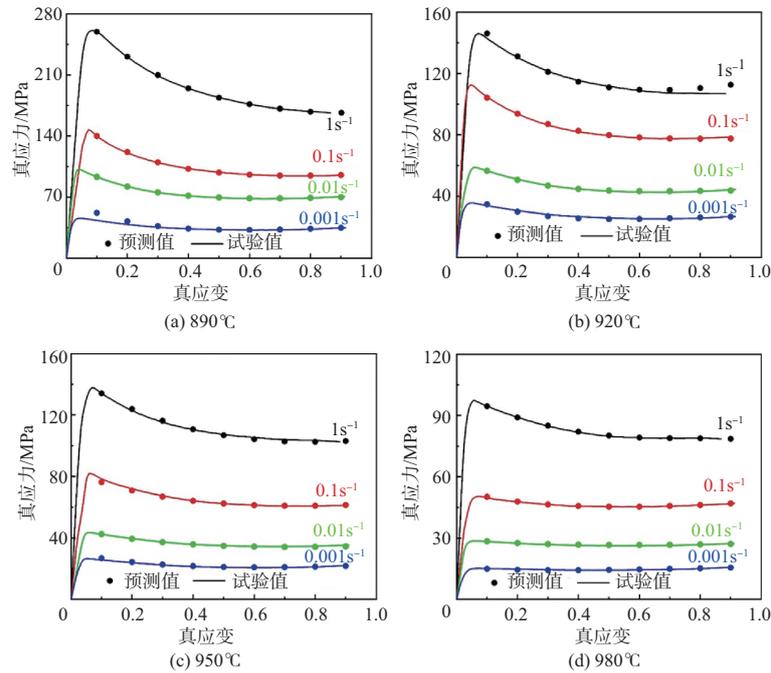


图8 GA-BP神经网络本构模型预测值和试验值的对比结果

Fig.8 Comparison between the predicted stress by the GA-BP neural network model and experimental stress

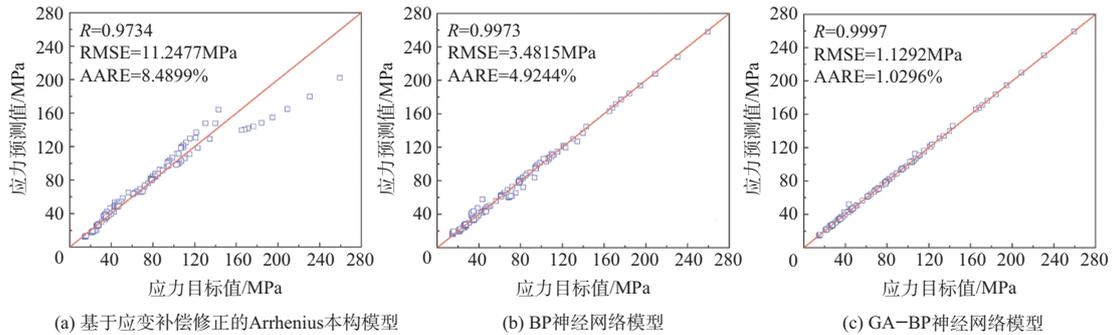


图9 不同本构模型在训练数据上的拟合结果相关性

Fig.9 Correlation of the fitness results of the different constitutive model on the training data

错速度与宏观切应力共同作用以及增强相的断裂,在变形后期为片层 $\alpha$ 相的再结晶。其他条件下的软化机制为片层 $\alpha$ 相的结晶和高温 $\beta$ 相的动态回复。因此,当应力较大时影响流动应力软化的因素更多,多因素耦合作用增加了模型预测的复杂性。图9(b)为初始权重矩阵和偏移矢量优化前建立的BP神经网络拟合结果相关性,相比于基于应变补偿修正的Arrhenius本构模型,BP神经网络模型的 $R$ 由0.9734提高至0.9973, RMSE由11.2477MPa降至3.4815MPa, AARE由8.4899%降至4.9244%,BP神经网络模型预测精度显著提高。这主要是因为BP网络模型具有高度的非线性关系识别能力。图9(c)为GA-BP神经网络模型的拟合结果相关性。由图可知,GA-BP神经网络模型预测应力与

目标应力整体具有高度的一致性。与BP神经网络模型相比,GA-BP神经网络模型的 $R$ 由0.9973提高至0.9997, RMSE由3.4815MPa降至1.1292MPa, AARE由4.9244%降至1.0296%。因此,GA-BP神经网络本构模型能更好地预测网状钛基复合材料复杂的流变行为。这主要是由于GA对BP网络初始权重矩阵和偏移矢量的优化。

### 3 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1) (TiB+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15网状复合材料在890°C、1s<sup>-1</sup>条件下的流变行为在峰值应力之后明显软化,并且在变形初期表现出不连续屈服特征。随着温度升高和应变速率降低,

流动应力软化值逐渐降低。当温度为 $980^{\circ}\text{C}$ 、 $0.001\text{s}^{-1}$ 时,峰值应力之后流变行为基本达到一个稳态值。

(2) 当应力较小时,软化机制为片层 $\alpha$ 相的再结晶和高温 $\beta$ 相的动态回复;当应力较大时,软化机制还包含了可动位错大量增殖和位错速度与宏观切应力共同作用,以及增强相的断裂,多种软化因素作用导致该模型在应力较大时预测偏差较大。

(3) GA-BP神经网络本构模型由于GA对BP网络初始权重矩阵和偏移矢量的优化,进一步提高了BP神经网络模型的预测精度,该模型的预测值与试验应力值的 $R$ 为0.9997、RMSE为1.1292MPa、AARE为1.0296%。 **AST**

### 参考文献

- [1] Huang Lujun, An Qi, Geng Lin, et al. Multiscale architecture and superior high-temperature performance of discontinuously reinforced titanium matrix composites[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(6): 2000688.
- [2] Huang Lujun, Geng Lin, Peng Huaxin. Microstructurally inhomogeneous composites: is a homogeneous reinforcement distribution optimal? [J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 71: 93-168.
- [3] Gao Pengfei, Zhan Mei, Fan Xiaoguang, et al. Hot deformation behavior and microstructure evolution of TA15 titanium alloy with nonuniform microstructure[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 689: 243-251.
- [4] Li Zhiqiang, Qu Haitao, Chen Fulong, et al. Deformation behavior and microstructural evolution during hot stamping of TA15 sheets: experimentation and modelling[J]. *Materials*, 2019, 12(2): 223.
- [5] 李辉, 杨健, 秦锋英. TC18 钛合金变形行为试验研究及其流动应力模型的建立[J]. *航空科学技术*, 2016, 27(9): 56-61.  
Li Hui, Yang Jian, Qin Fengying. Experimental study on deformation behavior and flow stress model of TC18 titanium alloy[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016, 27(9): 56-61. (in Chinese)
- [6] Zhang Rui, Huang Lujun, An Qi, et al. The hyperbolic constitutive equations and modified dynamic material model of TiBw/Ti-6.5 Al-2.5 Zr-1Mo-1V-0.5 Si composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 766: 138329.
- [7] Zhang Rui, Wang Shuai, Lu Weihang, et al. Enhancing micro-structure refinement and strengthening efficiency of TiBw/near  $\alpha$ -Ti composites by combining solid-solution treatment with hot processing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 257: 110696.
- [8] Xiong Shaixiong, An Qi, Wang Shuai, et al. Hot compression deformation characteristics of TiBw/Ti65 composites for high-temperature application[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(22): 10003-10021.
- [9] 白洁, 马瑞, 王亚军, 等. 选区激光熔化GH3536高温合金高温本构模型[J]. *锻压技术*, 2023, 48(7): 234-241.  
Bai Jie, Ma Rui, Wang Yajun, et al. High temperature constitutive model for super alloy GH3536 by selective laser melting[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48(7): 234-241. (in Chinese)
- [10] 张开铭, 温余远, 王克鲁, 等. Ti-22Al-24Nb合金热变形行为及本构关系[J]. *塑性工程学报*, 2022, 29(10): 208-215.  
Zhang Kaiming, Wen Yuyuan, Wang Kelu, et al. Hot deformation behavior and constitutive relation of Ti-22Al-24Nb alloy[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29(10): 208-215. (in Chinese)
- [11] Li Quan, Jin Zhaoyang. Comparative study of physical-based constitutive model and BP artificial neural network model in predicting high temperature flow stress of AZ80 magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(11): 3924-3933.
- [12] 胡鹏飞, 李开勇, 尹国杰. 基于神经网络预测的TC23合金高温流动行为精确仿真[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(12): 132-139.  
Hu Pengfei, Li Kaiyong, Yin Guojie. Accurate simulation of hot flow behavior of TC23 titanium alloy based on neural network prediction[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(12): 132-139. (in Chinese)
- [13] 刘杨, 李志强, 赵冰, 等. TA32钛合金超塑性变形行为及本构模型[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(10): 3752-3761.  
Liu Yang, Li Zhiqiang, Zhao Bing, et al. Superplastic deformation behavior and constitutive model of TA32 Titanium Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(10): 3752-3761. (in Chinese)
- [14] 叶青, 陈博, 倪恒, 等. 基于神经网络的Haynes 282合金高温流动行为表征及其有限元应用[J]. *宇航材料工艺*, 2022, 52

- (2):116-122.
- Ye Qing, Chen Bo, Ni Heng, et al. Characterization of hot flow behavior of Haynes 282 alloy based on artificial neural network and its finite element application[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2022, 52(2): 116-122. (in Chinese)
- [15] 程彬洋, 刘祥, 芦俊杰, 等. Al-Zn 合金热成形本构模型[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(4): 11-19.
- Cheng Binyang, Liu Xiang, Lu Junjie, et al. Constitutive model of Al-Zn alloy hot forming[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(4): 11-19. (in Chinese)
- [16] 李晓童, 庄乾铎, 牛志亮, 等. 基于神经网络的混杂 SiC 颗粒增强铝基复合材料力学性能预测[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(4): 95-100.
- Li Xiaotong, Zhuang Qianduo, Niu Zhiliang, et al. Prediction of mechanical properties of hybrid SiC particle-reinforced aluminum-based composites based on neural network[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2024, 16(4): 95-100. (in Chinese)
- [17] 丁军, 古榆川, 黄霞, 等. 基于改进遗传算法优化人工神经网络的 304 不锈钢流变应力预测准确性研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(10): 78-86.
- Ding Jun, Gu Yuchuan, Huang Xia, et al. Research on prediction accuracy of flow stress of 304 stainless steel based on artificial neural network optimized by improved genetic algorithm[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 58(10): 78-86. (in Chinese)
- [18] 苟建军, 李泽. 基于改进型 GA-BP 算法的 X100 管线钢本构模型[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(8): 182-188.
- Gou Jianjun, Li Ze. Constitutive model of X100 pipeline steel based on improved GA-BP algorithm[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(8): 182-188. (in Chinese)
- [19] 汪雅婷, 黎俊良, 袁楷峰, 等. 基于 GA 改进 BP 神经网络预测热变形流变应力模型的建立[J]. *材料工程*, 2022, 50(6): 170-177.
- Wang Yating, Li Junliang, Yuan Kaifeng, et al. Establishment of hot deformation flow stress prediction model based on GA improved BP neural network[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 50(6): 170-177. (in Chinese)
- [20] Zhang Rui, Wang Dongjun, Huang Lujun, et al. Deformation behaviors and microstructure evolution of TiBw/TA15 composite with novel network architecture[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 722: 970-980.
- [21] Li Liting, Wang Kehuan, Wang Dongjun, et al. Effects of hybrid reinforcements on flow softening of two-scale network-structured (TiBw+ Ti<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15 composites during deformation in  $\alpha+\beta$  region[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 909: 14.
- [22] 王哲君, 强洪夫, 王学仁. 发生不连续屈服的钛合金高温变形研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(7): 1904-1913.
- Wang Zhejun, Qiang Hongfu, Wang Xueren. Research and development progress of high temperature deformation of titanium alloy with discontinuous yielding[J]. *The Chinese Journal of Non-ferrous Metals*, 2012, 22(7): 1904-1913. (in Chinese)
- [23] Wei Zhenxiong, Gao Qiang, Su Xixi, et al. Flow characteristics, ANN-based prediction, 3D processing map, and interface microstructure of titanium/stainless steel bimetallic composite[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 2918-2935.
- [24] 李振江, 胡旭涛, 赵永琦, 等. 45 钢的温变形行为及本构模型[J]. *材料热处理学报*, 2024, 45(5): 161-168.
- Li Zhenjiang, Hu Xutao, Zhao Yongqi, et al. Thermal deformation behavior and constitutive model of 45 sheet[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2024, 45(5): 161-168. (in Chinese)
- [25] 邵敏强, 宋杰, 姚鹏, 等. 颗粒阻尼器耗能特性及振动抑制研究[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(6): 86-94.
- Shao Minqiang, Song Jie, Yao Peng, et al. Study on energy dissipation characteristics and vibration suppression of particle damper[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(6): 86-94. (in Chinese)
- [26] 邱仟, 王克鲁, 李鑫, 等. 基于 BP 神经网络的 SP700 钛合金本构关系[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(11): 167-172.
- Qiu Qian, Wang Kelu, Li Xin, et al. Constitutive relationship of SP700 titanium alloy based on BP neural network[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(11): 167-172. (in Chinese)
- [27] 张习康, 江洋, 王迪, 等. 基于 WOA-BP 神经网络的 25CrMo4 钢本构关系研究[J]. *塑性工程学报*, 2023, 30(8): 182-187.
- Zhang Xikang, Jiang Yang, Wang Di, et al. Study on constitutive relationship of 25CrMo4 steel based on WOA-BP

- neural network[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (8): 182-187. (in Chinese)
- [28] 汤孝, 高朝晖, 郗展, 等. 航空发动机健康特征参数与老化模式分析[J]. 航空科学技术, 2021, 32 (6): 27-35.  
Tang Xiao, Gao Zhaohui, Xi Zhan, et al. Analysis on health characteristic parameters and aging mode of aerospace generator[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(6): 27-35. (in Chinese)
- [29] Wang Guan, Zhang Pei, Kou Linyuan, et al. Research on constitutive model of aluminum alloy 7075 thermal deformation based on deep neural network[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(2): 707-717.

## Study on the Constitutive Relationship of Network-structured Titanium Matrix Composites Based on the GA-BP Neural Network

Li Liting<sup>1</sup>, Huang Shuaijun<sup>2</sup>, Wang Kehuan<sup>1,2</sup>, Wen Zehua<sup>2</sup>, Wang Dongjun<sup>1</sup>, Liu Gang<sup>1</sup>

1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. National Key Laboratory of Air-based Information Perception and Fusion, Luoyang 471099, China

**Abstract:** With the improved requirements of material performance in aerospace and energy fields, network-structured titanium matrix composites have garnered widespread attention due to their excellent specific strength, heat resistance, and creep resistance. To investigate the hot deformation behavior of the network-structured titanium matrix composites and establish a model capable of describing the flow behavior under high-temperature conditions, thermal compression tests were conducted on the network-structured (TiB+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/TA15 composites at temperatures ranging from 890°C to 980°C and strain rates ranging from 0.001s<sup>-1</sup> to 1s<sup>-1</sup>. The results show that the flow stress of the composites was softened typically after the peak stress at 890°C and 1s<sup>-1</sup> and showed discontinuous yield characteristics at the initial stage of the deformation. When the temperature increased to 980°C and strain rates decreased to 0.001s<sup>-1</sup>, the flow stress reached a steady state after the peak stress. Based on the obtained stress-strain data, the modified Arrhenius constitutive model based on strain compensation and the genetic algorithm (GA) optimized Backpropagation (BP) neural network constitutive model were developed, respectively. The results show that the modified Arrhenius constitutive model based on strain compensation shows a large deviation at high-stress levels. GA-optimized BP neural network model can predict the complex flow behavior of the composites more accurately with a correlation coefficient  $R$  of 0.9997, a root mean square error (RMSE) of 1.1292MPa, and an average absolute relative error (AARE) of 1.0296%. This research can provide theoretical guidance for the hot deformation process of the network-structured titanium matrix composites.

**Key Words:** network-structured titanium matrix composites; flow behavior; Arrhenius constitutive model; neural network; GA

**Received:** 2025-01-08; **Revised:** 2025-03-26; **Accepted:** 2025-04-28

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (52375324); Aeronautical Science Foundation of China (20220001077002)