

H13 模具钢的热变形行为及本构模型建立

芮程祥^{1,2}, 王家昌³, 张明磊³, 张 松^{1,2}

(1. 山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061; 2. 山东大学 机械工程国家级实验教学示范中心, 山东 济南 250061; 3. 青岛海信模具有限公司, 山东 青岛 266114)

摘要: 为了改善 H13 模具钢的热加工性能和优化热成形工艺参数, 利用 Gleeble-3800 热模拟试验机研究了 H13 模具钢在不同应变速率、变形温度和真应变范围内的热变形行为, 并建立了应变补偿型 Arrhenius 和 BP-ANN 两种本构模型来描述 H13 模具钢的流动行为。结果表明, 流动应力随着应变速率的降低和变形温度的升高而减小。通过比较两种已建立的本构模型的预测能力发现, Arrhenius 模型和 BP-ANN 模型的相关系数分别为 0.99536 和 0.99952, 平均相对误差分别为 3.58% 和 1.23%, 而平均绝对误差分别为 4.45641 和 1.37732, BP-ANN 模型对 H13 模具钢高温流动应力的预测具有更好的准确性和稳定性。

关键词: H13 模具钢; 热变形; 流动应力; Arrhenius 模型; BP-ANN 模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.030

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 10-0221-09

Hot deformation behavior and establishment of constitutive model for H13 die steel

Guo Chengxiang^{1,2}, Wang Jiachang³, Zhang Minglei³, Zhang Song^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. National Experiment Education Demonstration Center for Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Qingdao Hisense Mould Co., Ltd., Qingdao 266114, China)

Abstract: In order to improve the hot working performance and optimize the hot forming process parameters for H13 die steel, the hot deformation behavior of H13 die steel under different strain rates, deformation temperatures and true strain ranges was studied by thermal simulation tester Gleeble-3800, and two kinds of constitutive model such as Arrhenius with strain compensation and BP-ANN were established to describe the flow behavior of H13 die steel. The results show that the flow stress decreases with the decreasing of strain rate and the increasing of deformation temperature. By comparing the prediction ability of two established constitutive models, it is found that the correlation coefficients of Arrhenius model and BP-ANN model are 0.99536 and 0.99952, the average relative errors are 3.58% and 1.23%, and the average absolute errors are 4.45641 and 1.37732, respectively. The BP-ANN model has better accuracy and stability in predicting the high-temperature flow stress of H13 die steel.

Key words: H13 die steel; hot deformation; flow stress; Arrhenius model; BP-ANN model

现代制造业的快速发展要求热作模具钢具备更高的服役性能, 尤其是在高温强度和耐磨性方面。H13 钢是一种应用广泛的热作模具钢, 具有优异的强度、韧性、耐磨性、热稳定性和抗冷热疲劳性能, 在压铸模、热锻模、热挤压模等领域得到广泛应用^[1]。热成形 (热轧、锻造和挤压) 过程中的材料

流动行为通常非常复杂, 一方面给定的热机械参数组合将导致特定的微观结构演变; 另一方面, 金属在热成形过程中的微观结构变化反过来会影响其流动应力和其他力学特性, 进而影响整个成形过程^[2-3]。通常, 可以通过分析高温流动曲线来系统地研究热变形行为。因此, 建立流动应力与变形参数 (变形温度、应变速率和应变) 相关联的、合适的本构模型对于描述热变形的动态行为至关重要^[4-5]。

目前, 基于不同材料的热变形实验, 提出了一些典型的材料本构模型, 包括唯象本构模型、基于物理的本构模型和人工神经网络本构模型^[6]。在前两类模型中, Arrhenius 模型已被证明是研究金属材料热压缩变形过程中变形温度、应变速率和流动应力之间关系

收稿日期: 2023-11-29; **修订日期:** 2024-03-03

基金项目: 青岛市科技计划 (24-1-2-qjh-10-gx); 山东省泰山学者工程专项 (ts201712002)

作者简介: 芮程祥 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 202234368@mail.sdu.edu.cn

通信作者: 张 松 (1969-), 男, 博士, 教授

E-mail: zhangsong@sdu.edu.cn

的一种有效方法。邱宇等^[7]研究了 4Cr5MoSiV1 钢在不同应变速率和变形温度条件下的应力-应变曲线,并构建了在真应变为 0.3 条件下的 Arrhenius 模型和热加工图。陈国鑫等^[8]采用 Arrhenius 模型构建了 H13 钢的本构方程,并结合微观组织研究了 H13 钢的动态再结晶行为。然而,因为未考虑应变对流动应力的影响,导致 Arrhenius 模型的精度有限。因此,一些研究人员提出了具有应变补偿的修正本构模型。毛欢等^[9]基于应变补偿型 Arrhenius 模型,较好地预测了 TC20 钛合金的高温变形行为。曹建国等^[10]基于 Arrhenius 模型进行改进,精准预测了无取向电工钢热轧高温变形行为。丁慧莹等^[11]基于热模拟实验分别建立了 Johnson-Cook 优化模型和应变补偿型 Arrhenius 模型,发现后者预测 GGG70L 球墨铸铁变形行为的能力更好。然而,由于变形参数之间的非线性关系致使修正本构模型的精度仍然有限,以及存在在考虑新的变形参数后,必须重新计算材料常数的问题。因此,本构方程的建立是一个非常麻烦的迭代计算问题。

人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 模型具有自学性、自组织、自适应和非线性动态处理等优点,使其能够有效地捕捉复杂关联并实现精确预测^[12]。刘雪峰等^[13]基于 BP (Back Propagation) 神经网络模型建立了 Cu-12%Al 合金的本构模型,该模型具有很好的预测能力。邓肖峰等^[14]利用不同的本构模型研究了 ZL205A 铝合金的塑变行为,发现 BP 人工神经网络模型比 Arrhenius 模型和 Extended Ludwik-Hollomon 模型的预测精度更高。Pasco J 等^[15]应用 Johnson-Cook (JC)、Hensel-Spittel (HS) 和人工神经网络模型预测了 H13 改性钢在 1173~1423 K 温度范围和 0.01~10 s⁻¹ 应变速

率范围内的流动行为,结果表明,ANN 模型在预测流动应力方面具有较高的精度。Zamani M R 等^[16]采用人工神经网络模型准确预测了高熵合金和多主元素合金的流动应力。Ji G L 等^[17]开发了 Arrhenius 模型和人工神经网络模型,发现神经网络模型能够更好地预测 Aermet100 钢的复杂高温变形行为。

尽管 H13 模具钢在工业上得到了广泛应用,但对于使用本构模型和 ANN 模型表征其热变形行为的研究却鲜有报道。为了改善 H13 模具钢的热加工性能和优化热成形工艺参数,本文进行了不同变形温度和应变速率下的热压缩实验,分析了应变速率、变形温度和应变对 H13 模具钢的热变形特性的影响规律。建立了两种本构模型,即 Arrhenius 模型和 BP-ANN 模型以描述 H13 模具钢的流动行为,并讨论了两种模型的拟合效果和预测精度。本文研究意义为建立了更加准确的材料本构模型,从而为加工工艺优化提供了理论指导和技术支持。

1 热模拟实验与结果分析

1.1 实验材料与方法

根据 ASTM E209-18^[18],制备直径为 $\Phi 10$ mm、高度为 15 mm 的圆柱形试样,其化学成分如表 1 所示。采用热模拟试验机 (Gleeble-3800, DSI, 美国) 在不同变形温度 (950、1000、1050、1100 和 1150 ℃) 下,以不同应变速率 (0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹) 对试样进行热压缩变形,最大真应变 $\varepsilon=0.75$ 。热压缩样品的加热速率约为 10 ℃·s⁻¹,保温时间为 180 s,压缩完成后迅速水淬。试样和砧座之间涂抹润滑剂以减少摩擦。热压缩实验装置图和工艺曲线如图 1 和图 2 所示。

表 1 H13 模具钢的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of H13 die steel (% , mass fraction)

C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Fe
0.440	0.006	0.361	0.015	0.910	4.670	0.127	0.054	1.250	1.010	0.015	余量

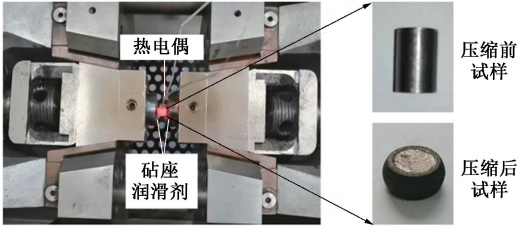


图 1 热压缩实验图

Fig. 1 Diagram of hot compression experiment

1.2 实验结果与分析

图 3 显示了在不同变形条件下的材料流动应力曲线。整个压缩过程中,流动应力在初始阶段迅速增加,达到峰值后保持稳定或略有减小。在变形的初始阶段,由于位错密度的快速增加,流动应力因加工硬化而快速增加。随着应变的增加,晶界和晶界的位错可以由于螺旋位错交滑移和刃型位错攀移而重新组织,从而降低了位错密度,流动应力缓慢增加。当应力接近峰值时,加工硬化和动态软化 (动

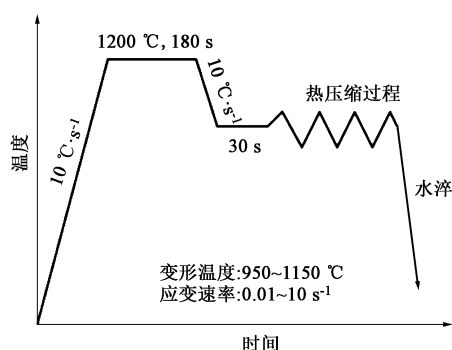


图 2 热压缩实验曲线

Fig. 2 Experimental curve of hot compression

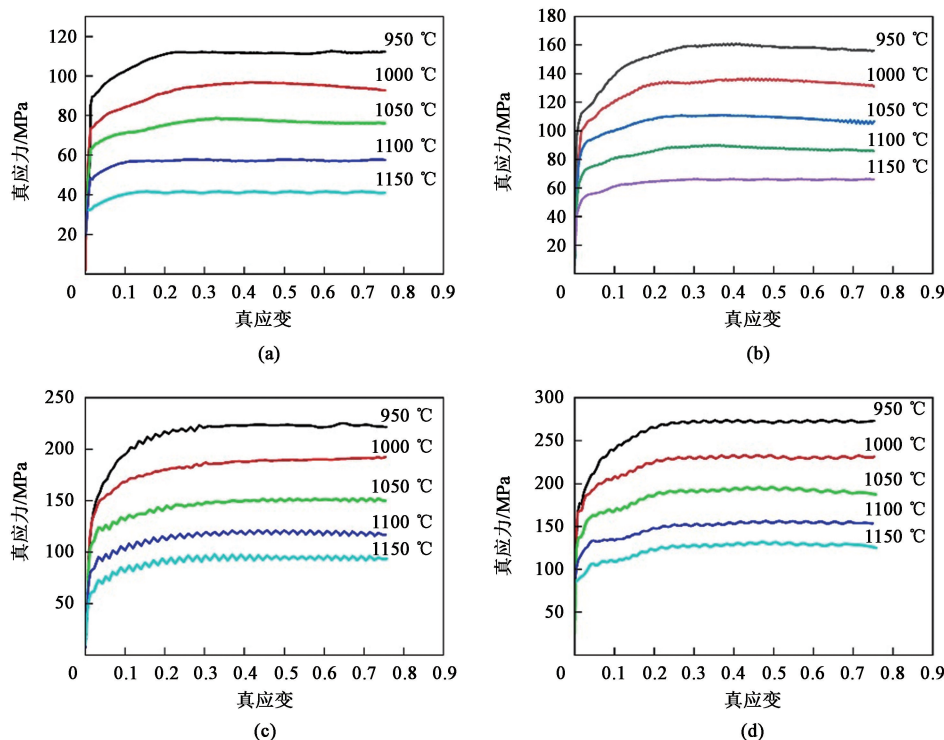


图 3 不同应变速率下 H13 模具钢的真应力-真应变曲线

(a) 0.01 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 1 s^{-1} (d) 10 s^{-1}

Fig. 3 True stress-true strain curves of H13 die steel under different strain rates

处有足够的能量以提供动态再结晶形核, 因此, 动态回复和再结晶引起的软化效应更显著, 从而导致较低的流动应力。此外, 当变形温度不变时, 流动应力随着应变速率的增加而增加。其原因为: 在较高的应变速率下, 动态回复和再结晶时间短, 加工硬化占主导地位, 导致软化效应减弱, 无法及时抵消硬化作用, 从而使流动应力随着应变速率的增加而增加。

2 H13 模具钢本构模型的建立

2.1 应变补偿型 Arrhenius 模型的建立

在热压缩过程中, 流动应力可能受到应变速率、

态回复和动态再结晶) 达到平衡, 流动应力曲线进入稳定阶段。此外, 在 1 和 10 s^{-1} 的应变速率下, 流动应力曲线呈现出明显的波动, 如图 3c 和图 3d 所示。曲线的波动主要归因于两个因素: 硬化效应和软化效应的共同作用和热变形过程中孪晶的形成^[19]。

流动应力受到变形条件的显著影响, 随着应变速率的降低和变形温度的升高而降低。当应变速率一定时, 随着变形温度的升高, 材料的流动应力值减小。这是因为: 当温度升高时, 原子的内能不断增加, 原子运动迁移能力增强, 从而促进位错的滑移和攀移, 使晶粒协调。此外, 在晶界和位错纠缠

变形温度和应变的影响。Arrhenius 方程可用于反映流动应力与应变速率和变形温度之间的关系, 其数学表达式如下:

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \alpha\sigma < 0.8 \\ A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \alpha\sigma > 1.2 \\ A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \text{所有的应力} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为真应力, MPa; Q 为变形激活能, $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$; T 为热力学温度, K; A 、

A_1 、 A_2 、 n 、 n_1 、 α 和 β 为与变形温度无关的常数。

在 Zener-Hollomon 参数 (Z) 中, 应变速率、变形温度和应变关系如下^[20]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{2}$$

对式 (2) 进行整理, 可以得到材料的本构方程为:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \tag{3}$$

材料常数和变形激活能与应变值之间存在显著的相关性, 采用文献 [7] 和文献 [8] 中描述的最小二乘法进行线性回归分析, 并加入应变补偿使预测结果更加精确。为了建立应变补偿型的本构方程,

在应变为 0.1~0.7 的范围中每隔 0.1 取作一组数据进行材料常数计算。式 (4)~式 (7) 所示的五阶多项式拟合可以用于描述应变对材料常数和变形激活能的影响, 并且拟合曲线具有良好的相关性和通用性。多项式拟合系数取值如表 2 所示, 拟合结果如图 4 所示。

$$\alpha(\epsilon) = B_0 + B_1\epsilon + B_2\epsilon^2 + B_3\epsilon^3 + B_4\epsilon^4 + B_5\epsilon^5 \tag{4}$$

$$n(\epsilon) = C_0 + C_1\epsilon + C_2\epsilon^2 + C_3\epsilon^3 + C_4\epsilon^4 + C_5\epsilon^5 \tag{5}$$

$$Q(\epsilon) = D_0 + D_1\epsilon + D_2\epsilon^2 + D_3\epsilon^3 + D_4\epsilon^4 + D_5\epsilon^5 \tag{6}$$

$$A(\epsilon) = E_0 + E_1\epsilon + E_2\epsilon^2 + E_3\epsilon^3 + E_4\epsilon^4 + E_5\epsilon^5 \tag{7}$$

式中: $B_0 \sim B_5$ 、 $C_0 \sim C_5$ 、 $D_0 \sim D_5$ 、 $E_0 \sim E_5$ 为五次多项式拟合系数。

表 2 各参数的多项式拟合系数取值

Table 2 Values of polynomial fitting coefficients for each parameter

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
B_0	0.01137	C_0	6.35887	D_0	455173.15	E_0	-7.54×10^{17}
B_1	-0.02925	C_1	-13.09225	D_1	234994.46	E_1	1.93×10^{19}
B_2	0.12095	C_2	66.19666	D_2	-874807.35	E_2	-1.11×10^{20}
B_3	-0.26257	C_3	-165.70963	D_3	276721.37	E_3	2.73×10^{20}
B_4	0.28937	C_4	198.34818	D_4	1896388.47	E_4	-3.09×10^{20}
B_5	-0.12572	C_5	-90.52769	D_5	-1674316.17	E_5	1.33×10^{20}

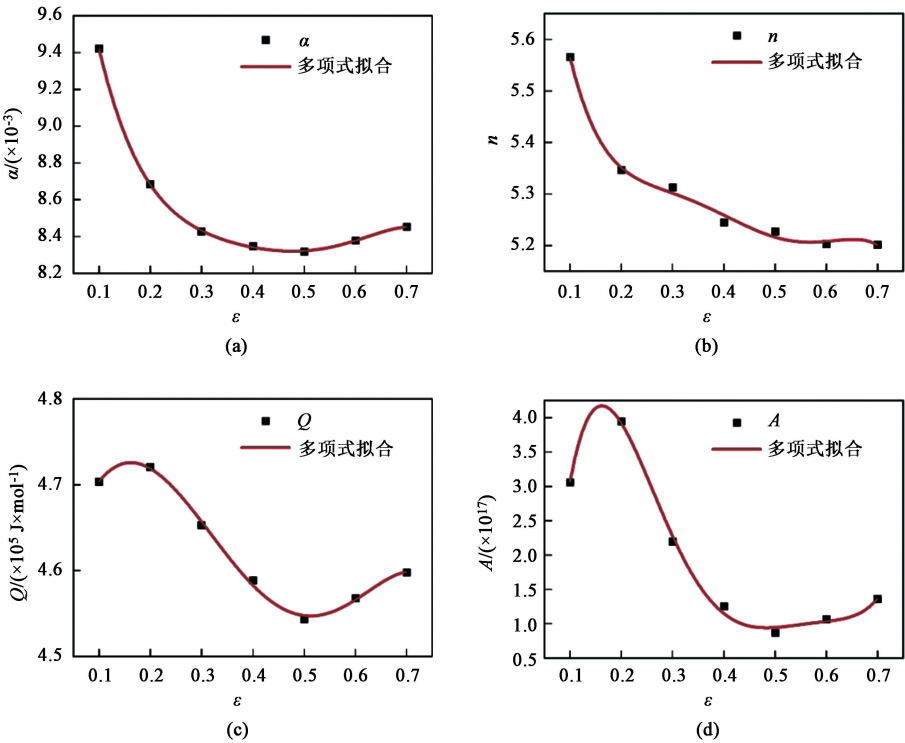


图 4 各参数与应变之间的关系曲线
(a) α (b) n (c) Q (d) A

Fig.4 Relationship curves between each parameter and strain

图 5 为不同应变速率和变形温度下的流动应力实验值和应变补偿型 Arrhenius 模型预测值, 可以观察到, 在较低的应变速率和变形温度下, 应变补偿型 Arrhe-

nus 模型能够很好地描述 H13 模具钢的流动行为。然而, 随着变形温度的升高或者应变速率的增加, 动态软化对流动应力的影响更为明显, 导致预测结果不准确。

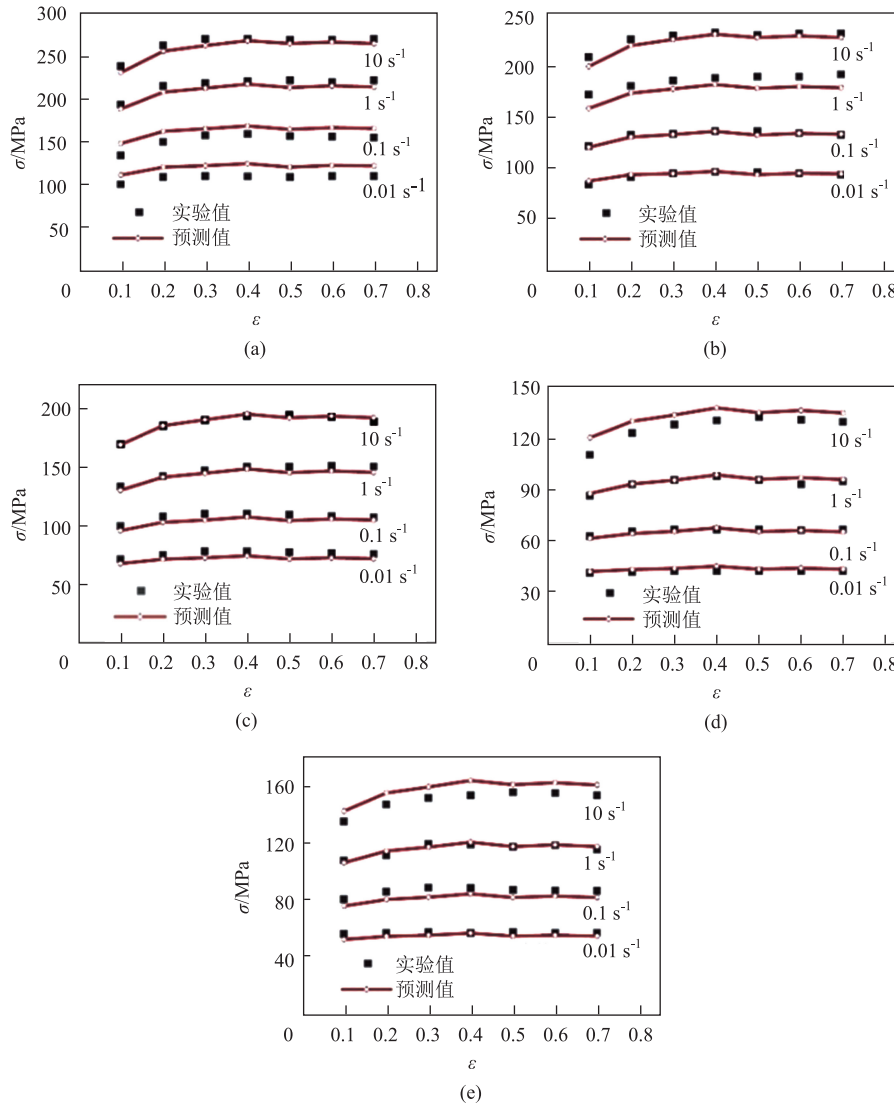


图 5 不同变形条件下流动应力的实验值和应变补偿型 Arrhenius 模型预测值对比

(a) 950 °C (b) 1000 °C (c) 1050 °C (d) 1100 °C (e) 1150 °C

Fig. 5 Comparison of flow stress between experimental values and predicted values by Arrhenius model with strain compensation under different deformation conditions

2.2 BP-ANN 模型的建立

ANN 是一种可以模拟生物神经网络结构的数学模型, 它通过使用大量非线性单元 (神经元) 来模拟复杂和非线性关系。本文采用了 3 层 BP-ANN 模型, 包含输入层、输出层和隐藏层, 如图 6 所示。每层中有一个或多个独立的神经元, 通过权重 (U 为输入层至隐藏层的权重, V 为隐藏层至输出层的权重) 连接进行计算。输入层和输出层的神经元数量表示模型中的变量数量。在此工作中, 将变形温度、应变速率和应变设置为输入变量, 将流动应力

定义为输出变量。在每个计算过程中, 数据从输入层输入至该模型, 并开始向前传播, 输出层实现流动应力的预测。随后, 可以用均方根误差 R_{MSE} 反向传播预测值和实验值之间的差异, 以校正每个权重。均方根误差 R_{MSE} 的表达式如式 (8) 所示。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2} \quad (8)$$

式中: X_i 和 Y_i 分别为第 i 个数据的实验值和预测值, $i=1, \dots, N$; N 为数据的个数。

本文中的所有代码均是由 MATLAB 2020a 实现。

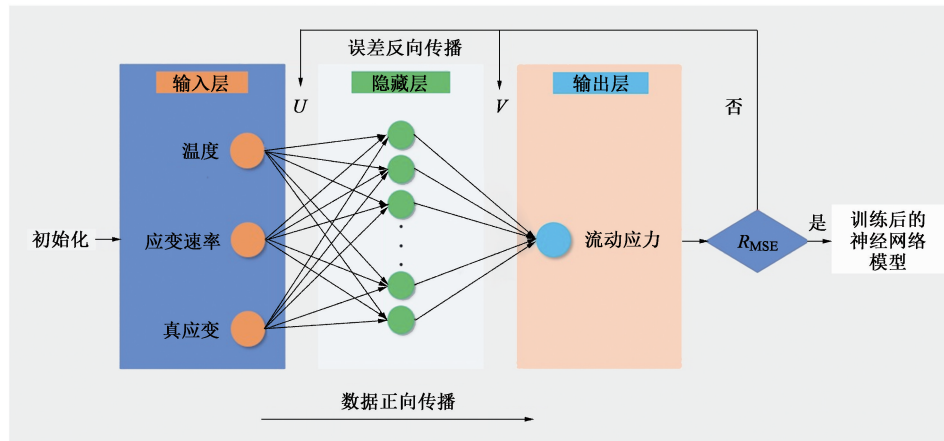
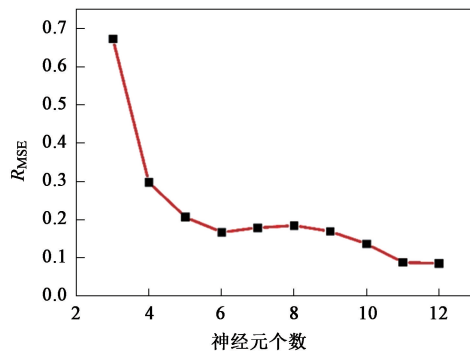


图6 BP-ANN 模型架构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of BP-ANN model architecture

在当前的 ANN 模型中，从实验数据中随机选择了共 3000 个输入-输出对。在这些数据集中，70%（2100 个）的数据被随机选择用来训练 ANN 模型，剩余的 30%（900 个）输入-输出对用于测试 ANN 模型的性能。为了在神经网络训练过程中避免受到输入和输出数据大幅波动的影响，同时提高网络的收敛速度和准确性，对所有变量进行归一化^[21]从而将输入和输出数据的范围均调整至 0~1 之间。隐藏层层数和各隐藏层神经元个数的选择对于神经网络的性能有很大的影响。通过经验公式和穷举计算^[22]，当隐藏层设置为单层，神经元个数设定为 12 时，均方根误差 R_{MSE} 值达到最小，可以使得神经网络的性能达到最佳，计算结果如图 7 所示。

图7 R_{MSE} 随神经元个数的变化曲线Fig. 7 Change curves of R_{MSE} with number of neurons

实验流动应力和 BP-ANN 模型预测流动应力之间的比较如图 8 所示。由图 8a 和图 8b 可以看出，大多数预测结果均很好地叠加在实验流动应力上，说明该训练的 BP-ANN 模型具有良好的性能。为了更加直观地观察 BP-ANN 模型的性能，图 8c 和图 8d 给出了另一种形式的比较图，其中所有数据点均

近似分布在与水平线倾斜 45° 的直线上。可以得出结论：已经训练好的 BP-ANN 模型能够准确地描述 H13 模具钢在不同变形条件下的流动行为。

通过训练好的 BP-ANN 模型计算出 H13 模具钢在不同变形条件下的流动应力，如图 9 所示。可以清楚地看出，在整个变形条件下，预测得到的流动应力随着变形温度的升高而减小，随着应变速率的降低而减小，与实验中的流动应力高度一致。表明该模型具有很好的预测 H13 模具钢热压缩变形过程中流动应力的能力。

2.3 两种本构模型的对比

为了更好地评估 Arrhenius 模型和 BP-ANN 模型的性能，计算两种模型在不同变形条件下的相关系数 R 、平均相对误差 $AARE$ 和平均绝对误差 MAE ，表达式如式 (9)~式 (11) 所示。计算结果如图 10 和表 3 所示。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_i - Y_i}{X_i} \right| \times 100\% \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i) \quad (11)$$

式中： \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为 X_i 和 Y_i 的平均值。

与 Arrhenius 模型相比，BP-ANN 模型预测值的相关系数 R 为 0.99952，优于应变补偿型 Arrhenius 模型的 0.99536，说明 BP-ANN 模型拟合的更加完美；其次，BP-ANN 模型预测值的平均相对误差 $AARE$ 为 1.23%，小于应变补偿型 Arrhenius 模型的 3.58%，表

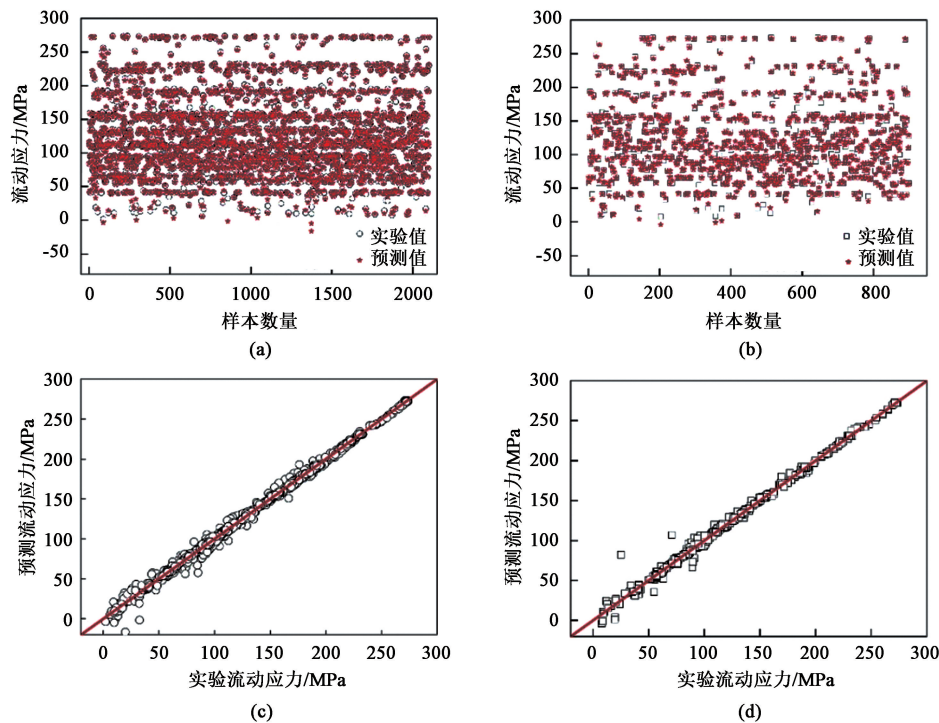


图 8 流动应力实验值和 BP-ANN 模型预测值比较

(a) 训练数据点 (b) 测试数据点 (c) 训练数据点相关性 (d) 测试数据点相关性

Fig. 8 Comparison of flow stress between experimental values and predicted values by BP-ANN model

(a) Training data points (b) Testing data points (c) Correlation of training data points (d) Correlation of testing data points

表 3 两种模型的相关系数、平均相对误差和平均绝对误差
Table 3 Correlation coefficient, average relative error and average absolute error of two models

模型	指标		
	<i>R</i>	<i>AARE</i> /%	<i>MAE</i>
应变补偿型 Arrhenius	0.99536	3.58	4.45641
BP-ANN	0.99952	1.23	1.37732

明 BP-ANN 模型的预测值与实验值之间的差异更小；最后，BP-ANN 模型预测值的平均绝对误差 *MAE* 为 1.37732，优于应变补偿型 Arrhenius 模型的 4.45641，下降 69%。总体而言，从性能指标来看，BP-ANN 模型比应变补偿型 Arrhenius 模型表现出更好的预测能力。

3 结论

(1) 研究了 H13 模具钢在较宽的应变速率 (0.01~10 s⁻¹)、变形温度 (950~1150 ℃) 和真应变 (0~0.75) 范围内的热变形过程。整个压缩过程，流动应力在初始阶段迅速增加，达到峰值后保持稳定或略有减小。流动应力随着应变速率的降低

和变形温度的升高而减小。

(2) 建立了两种本构模型，即应变补偿型 Arrhenius 模型和 BP-ANN 模型，来描述 H13 模具钢的流动行为。应变补偿型 Arrhenius 模型更适合于较低应变速率和变形温度下流动应力的预测。然而，随着变形温度的升高或者应变速率的增加，动态软化对流动应力的影响更为明显，导致预测结果不准确。相比之下，BP-ANN 模型预测的流动应力随着变形温度的升高而降低，随着应变速率的降低而降低，因此其拟合效果更加完美。

(3) 分别通过计算统计参数 *R*、*RRAE* 和 *MAE*，来定量分析已建立的两种本构模型的可预测性。该两种模型的 *R* 值分别为 0.99536 和 0.99952、*AARE* 分别为 3.58% 和 1.23%、*MAE* 分别为 4.45641 和 1.37732。由此可见，BP-ANN 模型对 H13 模具钢高温流动应力的预测具有更好的准确性和稳定性。

参考文献：

[1] 贺彤, 王海建, 李花兵, 等. 含氮热作模具钢的研究现状与发展 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34 (12): 1334–1344.
He T, Wang H J, Li H B, et al. Current research status and development of nitrogen-containing hot-work die steel [J]. Journal

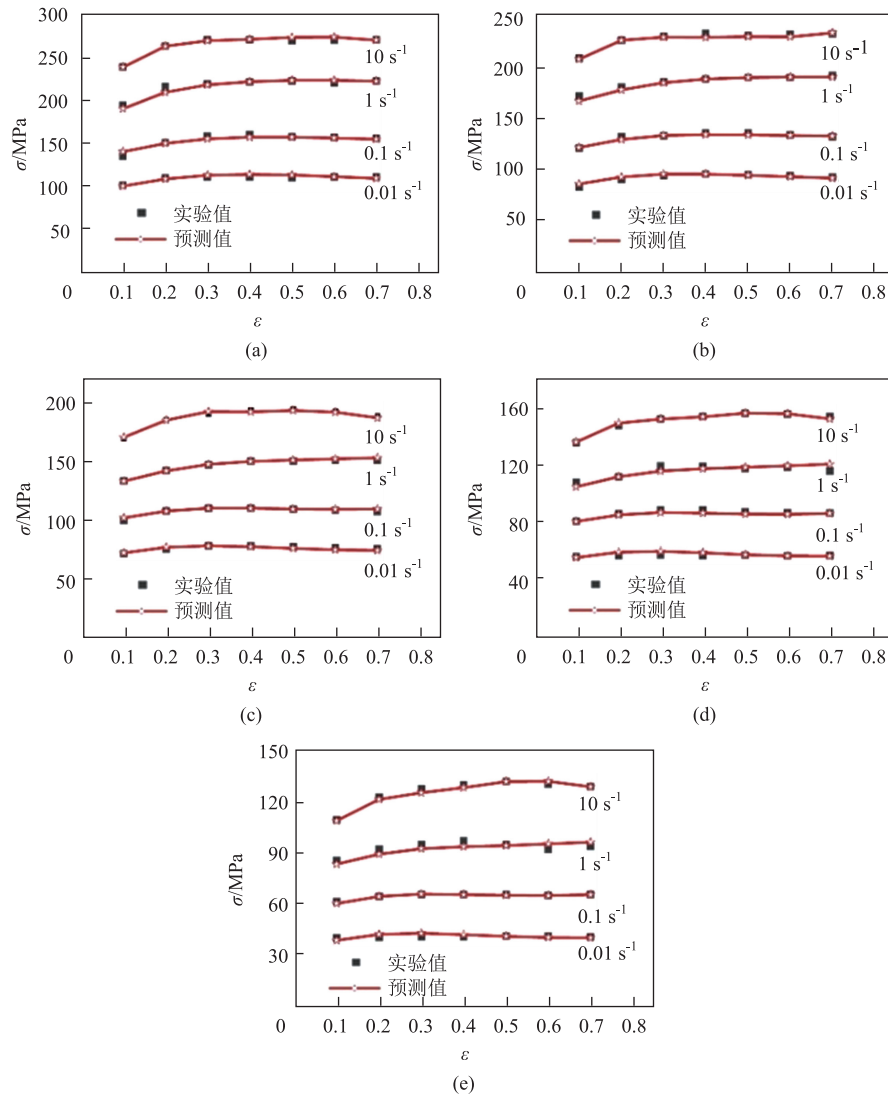


图 9 不同变形条件下流动应力实验值和 BP-ANN 模型预测值对比

(a) 950 °C (b) 1000 °C (c) 1050 °C (d) 1100 °C (e) 1150 °C

Fig. 9 Comparison of flow stress between experimental and predicted values by BP-ANN model under different deformation conditions

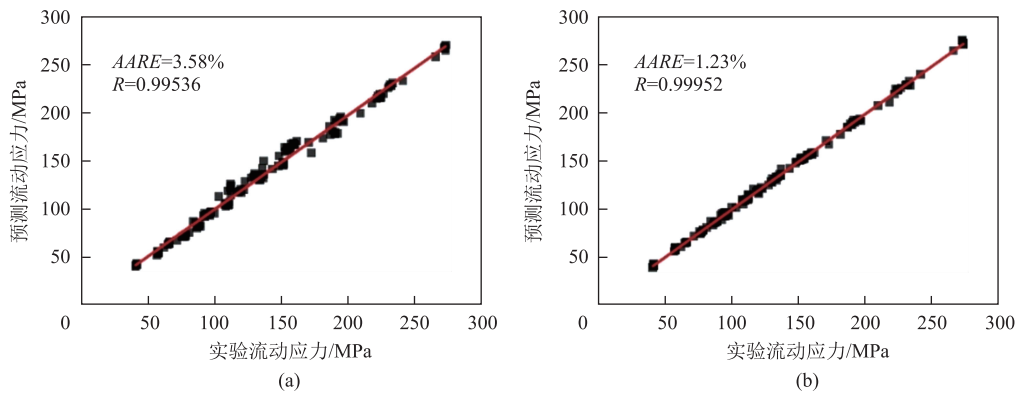


图 10 实验流动应力和预测流动应力之间的相关性

(a) 应变补偿型 Arrhenius 模型 (b) BP-ANN 模型

Fig. 10 Correlation between experimental and predicted flow stresses

(a) Arrhenius model with strain compensation (b) BP-ANN model

- of Iron and Steel Research, 2022, 34 (12): 1334–1344.
- [2] Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Constitutive modeling for elevated temperature flow behavior of 42CrMo steel [J]. Computational Materials Science, 2008, 42 (3): 470–477.
- [3] Lin Y C, Chen X M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working [J]. Materials & Design, 2011, 32 (4): 1733–1759.
- [4] 周靖, 王宝雨, 徐伟力, 等. 耦合损伤的 22MnB5 热变形本构模型 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35 (11): 1450–1457.
Zhou J, Wang B Y, Xu W L, et al. Damage-coupled constitutive model of 22MnB5 steel in hot deformation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35 (11): 1450–1457.
- [5] 傅垒, 王宝雨, 林建国, 等. 耦合位错密度的 6111 铝合金热变形本构模型 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35 (10): 1333–1339.
Fu L, Wang B Y, Lin J G, et al. Constitutive model coupled with dislocation density for hot deformation of 6111 aluminum alloy [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35 (10): 1333–1339.
- [6] 袁康博, 姚小虎, 王瑞丰, 等. 金属材料的率-温耦合响应与动态本构关系综述 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42 (9): 4–37.
Yuan K B, Yao X H, Wang R F, et al. A review on rate-temperature coupling response and dynamic constitutive relation of metallic materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42 (9): 4–37.
- [7] 邱宇, 袁飞, 曾元松, 等. 4Cr5MoSiV1 热作模具钢的热变形行为与热加工图 [J]. 机械工程材料, 2021, 45 (2): 71–77.
Qiu Y, Yuan F, Zeng Y S, et al. Hot deformation behavior and hot processing map of 4Cr5MoSiV1 hot working die steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45 (2): 71–77.
- [8] 陈国鑫, 桑宝光, 刘宏伟, 等. H13 钢高温热变形特征与动态再结晶行为 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (6): 193–202.
Chen G X, Sang B G, Liu H W, et al. Hot deformation characteristics and dynamic recrystallization behavior of H13 steel at high temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (6): 193–202.
- [9] 毛欢, 韩莹莹. 基于应变补偿 Arrhenius 模型的 TC20 钛合金本构方程研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (9): 1939–1942, 1947.
Mao H, Han Y Y. Study on constitutive equations of TC20 alloy based on strain-compensated arrhenius model [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (9): 1939–1942, 1947.
- [10] 曹建国, 王天聪, 李洪波, 等. 基于 Arrhenius 改进模型的无取向电工钢高温变形本构关系 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (4): 90–96, 102.
Cao J G, Wang T C, Li H B, et al. High-temperature constitutive relationship of non-oriented electrical steel based on modified Arrhenius model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (4): 90–96, 102.
- [11] 丁慧莹, 管延锦, 李玉琦, 等. GGG70L 球墨铸铁的高温变形行为及其本构模型建立 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 249–255.
- Ding H Y, Guan Y J, Li Y Q, et al. Deformation behavior at high temperature and establishment of constitutive model of GGG70L ductile iron [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 249–255.
- [12] 杨合, 詹梅. 材料加工过程实验建模方法 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
Yang H, Zhan M. Material Processing Experimental Modeling [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008.
- [13] 刘雪峰, 马胜军, 刘锦平, 等. Cu-12%Al 合金高温压缩变形过程本构关系的 BP 神经网络模型 [J]. 材料工程, 2009 (1): 10–14.
Liu X F, Ma S J, Liu J P, et al. BP neural networks models for constitutive relationship during high temperature deformation process of Cu-12%Al alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2009 (1): 10–14.
- [14] 邓肖峰, 王凯, 石伟. ZL205A 铝合金淬火过程本构模型及数值模拟 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42 (8): 125–136.
Deng X F, Wang K, Shi W. Constitutive model and numerical simulation of ZL205A aluminum alloy during quenching [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42 (8): 125–136.
- [15] Pasco J, McCarthy T, Parlee J, et al. Constitutive modeling of modified-H13 steel [J]. MRS Communications, 2022, 12 (3): 343–351.
- [16] Zamani M R, Mirzadeh H, Malekan M. Artificial neural network applicability in studying hot deformation behaviour of high-entropy alloys [J]. Materials Science and Technology, 2023, 39 (18): 1–9.
- [17] Ji G L, Li F G, Li Q H, et al. A comparative study on Arrhenius-type constitutive model and artificial neural network model to predict high-temperature deformation behaviour in Aermet100 steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (13–14): 4774–4782.
- [18] ASTM E209–18, Standard practice for compression tests of metallic materials at elevated temperatures with conventional or rapid heating rates and strain rates [S].
- [19] Sarkar A, Kapoor R, Verma A, et al. Hot deformation behavior of Nb-1Zr-0.1C alloy in the temperature range 700–1700 °C [J]. Journal of Nuclear Materials, 2012, 422 (1–3): 1–7.
- [20] Song C N, Cao J G, Xiao J, et al. High-temperature constitutive relationship involving phase transformation for non-oriented electrical steel based on PSO-DNN approach [J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105210.
- [21] Lin Y C, Zhang J, Zhong J. Application of neural networks to predict the elevated temperature flow behavior of a low alloy steel [J]. Computational Materials Science, 2008, 43 (4): 752–758.
- [22] 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 Y T, Li J L, Yuan K F, et al. Establishment of hot deformation flow stress prediction model based on GA improved BP neural network [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50 (6): 170–177.