

基于 BP 神经网络的 GH5188 高温合金本构模型

何 龙 张冉阳 赵刚要 成一博 金郴柏 郭正华
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 GH5188 高温合金试样进行热压缩试验,研究其在应变速率为 $0.001\sim0.1\text{ s}^{-1}$ 和变形温度在 $1\,000\sim1\,150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的热变形行为;建立了基于 BP 神经网络的本构模型,并验证了所建本构模型的可靠性,最后基于误差计算分析了 BP 神经网络本构模型的精度。结果表明,温度和应变速率对 GH5188 合金流变应力的影响明显,随着压缩温度升高和应变速率降低,GH5188 合金流变应力明显减小。经定量误差计算分析,BP 神经网络本构模型应力预测偏差值在 10% 以内的数据点占 97.92%,BP 神经网络模型能准确地预测 GH5188 高温合金的高温流变应力。

关键词 GH5188 高温合金;热变形行为;本构模型;BP 神经网络

中图分类号 TP311;TG135+1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.020 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Constitutive Model of GH5188 Superalloy Based on BP Neural Network

He Long, Zhang Ranyang, Zhao Gangyao, Cheng Yibo, Jin Chenbai, Guo Zhenghua
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The thermal deformation behavior of GH5188 superalloy was investigated by the hot compression on the Gleeble-3500 hot simulation compression testing machine with the strain rate range of $0.001\sim0.1\text{ s}^{-1}$ and the deformation temperature range of $1\,000\sim1\,150\text{ }^{\circ}\text{C}$. A constitutive model based on BP neural network was established, and the reliability of the constructed constitutive model was verified. Finally, the accuracy of BP neural network constitutive model based on error calculation was analyzed. The results indicate that the effect of temperature and strain rate on flow stress of GH5188 superalloy is very significant, and the flow stress of GH5188 superalloy is decreased greatly with the increasing in compression temperature or decreasing in the strain rate. After quantitative error calculation and analysis, data points where stress prediction deviation value of BP neural network constitutive model is within 10% account for 97.92%. Therefore, the BP neural network model can accurately predict the high temperature flow stress of GH5188 superalloy.

Key Words: GH5188 Superalloy, Hot Deformation Behavior, Constitutive Model, BP Neural Network

GH5188 合金作为一种钴基高温合金,固溶强化后具有良好的耐腐蚀、耐高温和抗氧化性能,在航空发动机涡轮板、燃烧室、冷却环等高温部件中应用广泛^[1]。GH5188 高温合金作为一种密度高、强度大和难变形的材料,常温下很难加工成形,其塑性成形加工一般在高温下进行。目前对于 GH5188 合金的本构关系研究还十分有限,因此研究 GH5188 高温合金热变形行为对其塑性加工成形具有积极意义。

目前,针对不同合金的本构关系已经展开了大量的研究,钛合金^[2~4]、铝合金^[5,6]和高温合金^[7,8]等金属材料大多采用 Arrhenius 型本构模型,但传统的本构模型

只能单一描述某一应变下的应力关系,并不能准确的体现出应变等参数对合金热变形行为的影响,而且由于合金材料热变形过程中工艺参数之间是相互影响的,若考虑热压缩过程中应变参数的影响而采用 Arrhenius 型应变补偿本构模型^[9],要精确计算不同应变下的应力关系,所需的计算量较大,且计算出的本构预测结果也并不理想。近年来,BP 神经网络在预测数值方面也有较为广泛的应用。BP 神经网络具有强大的非线性映射能力,适合解决合金材料应力随温度、应变速率和应变量之间的非线性问题;同时,BP 神经网络还具有高度自学习、自适应和容错能力,能够通过学习提取出输入、输出

收稿日期:2020-08-13;修改稿收到日期:2020-09-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51665041);江西省自然科学基金青年基金重点资助项目(20192ACBL21049);江西省重大科技研发专项资助项目(20194ABC28001);江西省教育厅青年科学基金资助项目(GJJ190530)
第一作者简介:何龙,男,1995 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1143058156@qq.com
通信作者:张冉阳,女,1980 年出生,讲师,南昌(330063),E-mail: zry108@126.com
引用格式:何龙,张冉阳,赵刚要,等. 基于 BP 神经网络的 GH5188 高温合金本构模型[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):223-226.
HE L, ZHANG R Y, ZHAO G Y, et al. Constitutive model of GH5188 super alloy based on BP neural network[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2021, 41(2):223-226.

数据间的合理关系,在非线性系统建模、预测预报等方面具有广阔的应用前景^[10~12]。

因此,本课题对 GH5188 高温合金试样进行热压缩试验,揭示其高温下的流变行为,并建立基于 BP 神经网络的 GH5188 高温合金本构关系,定量分析了应力预测值与试验值之间的误差,为该合金塑性成形加工提供参考。

1 试验材料和方法

试验原材料为 $\phi 85\text{ mm}$ 的 GH5188 合金棒材,用线切割从棒材上切取 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的片状试样进行成分分析,其化学成分见表 1。从棒状试样上用线切割切取 $\phi 10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的热压缩试样,采用 Gleeble-3500 热模拟压缩机对 GH5188 合金圆柱试样进行压缩。压缩时先在试样中间位置焊上热电偶,以便后续采集温度、应力和应变等数据。为了控制压缩过程的摩擦,装夹时在圆柱试样两端涂抹高温润滑油并垫上石墨片。然后将每个试样以 $3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 分别加热至压缩温度($1\text{ }000$ 、 $1\text{ }050$ 、 $1\text{ }100$ 和 $1\text{ }150\text{ }^{\circ}\text{C}$),再将每个试样保温 300 s 使试样受热均匀,最后对试样分别以不同的应变速率(0.001 、 0.01 、 0.1 s^{-1})进行热压缩试验,试验共进行 12 组,总变形量为 50%,对应真应变为 0.69,每一次热压缩过程中维持一定的应变速率和温度。将试样经镶嵌、打磨和抛光,然后采用腐蚀剂(CuSO_4 、 HCl 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 配比为 $2\text{ g}:10\text{ mL}:10\text{ mL}$)腐蚀,采用 MJ41 金相显微镜和 SU510 扫描电镜进行微观组织观察,其组织见图 1。可以看出,合金基体相为 γ 相的细晶组织,有大量细小块状的白亮相和灰色相,白亮相主要为 M_{23}C_6 ,灰色相为 M_6C ^[13]。

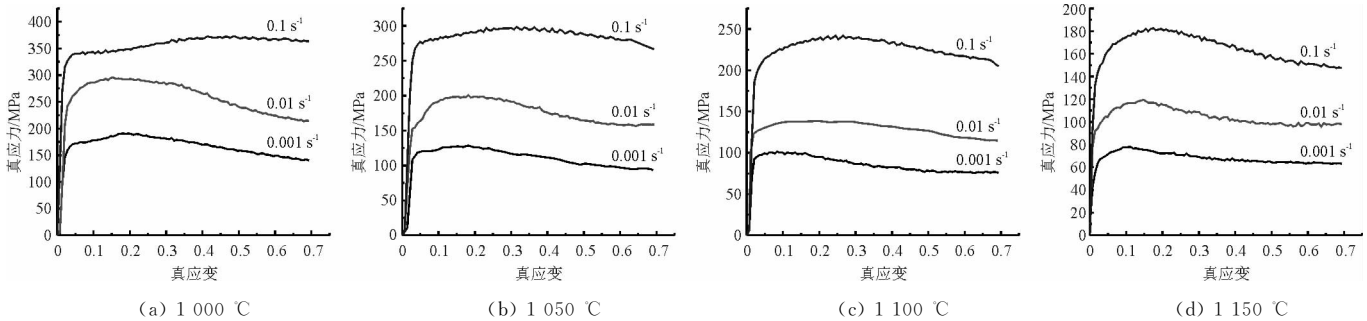


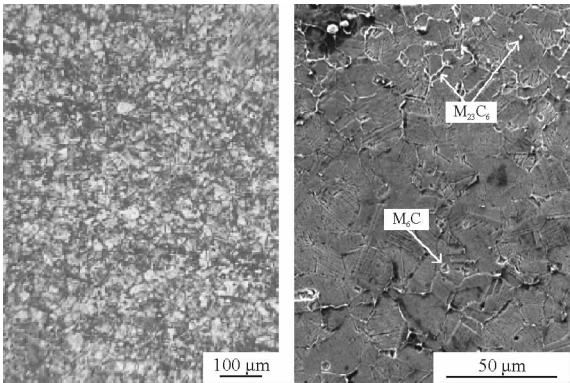
图 2 GH5188 高温合金真应力-真应变曲线

Fig.2 The true stress-strain curves of GH5188 superalloy

于动态再结晶与动态回复,使加工硬化效应减弱,最终导致了流变应力的降低^[15]。另外在图 2b 和图 2d 中应变速率为 0.01 s^{-1} 的曲线后期有上翘趋势,这是因为随着热压缩进行,试样端面变大,导致夹头与试样的接触面增大,同时后期润滑油作用也大大减弱,导致变形抗力增加,最终形成曲线上翘。

表 1 GH5188 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of GH5188 alloy %					
ω_B					
Cr	Mn	Fe	Co	Ni	W
22.35	1.00	1.68	37.08	21.64	16.25



(a) 低倍 (b) 高倍

图 1 GH5188 合金的原始组织

Fig.1 Original structure of GH5188 alloy

2 试验结果及分析

2.1 流变应力曲线

GH5188 合金在不同条件下的真应力-真应变曲线见图 2。可以看出,在同一温度下,其流变应力值随应变速率的增大而急剧增大,这是由于压缩时间与应变速率成反比,应变速率大,则压缩时间短,导致合金内部位错运动时间缩短,从而导致合金内部位错的增殖速度明显增大,位错阻力增大,最终表现为应力增大^[14]。在同一应变速率下, GH5188 合金的流变应力值大小随温度的降低而有所增大,这是因为变形温度升高,合金内储存的能量越大,对合金的软化效应有一定的增强,有利

总体而言, GH5188 高温合金不同条件下的流变应力-应变变化规律比较相似,呈动态再结晶特征,在开始塑性变形阶段,由于合金变形速度较快,变形量迅速增加,位错运动大量增殖,导致加工硬化程度远大于其软化程度。最终流变应力呈现稳态流动特征,稳态流动的实质是位错增殖引起的应变硬化和位错之间的相互抵

消及重排引起的软化之间达到动态平衡^[16]。

2.2 GH5188 高温合金 BP 神经网络本构模型

2.2.1 BP 神经网络

综合考虑应力-应变本构关系以及 BP 神经网络的非线性建模原理,常采用 3 层 BP 神经网络结构。输入层包含 3 个节点对应变形温度、应变速率和应变 3 个因素,而输出层只有 1 个节点,对应合金流动应力;隐含层节点数目可根据实际情况调整,通常情况下取输入层的 2 倍,因为过少的隐含层节点数会造成训练后的网络不够丰富,不能精准识别未参与训练的样本,而隐含层节点数量太多会很大程度延长网络学习的时间,同时也会加大网络训练的误差。采用下式来计算合适的隐含层节点数:

$$n_1 = \sqrt{n + m} + a \tag{1}$$

式中, m 、 n 分别为输入、输出层神经元。经过多次试验研究发现,在隐含层数量为 2 个、节点数为 8 时效果最好。图 3 为神经网络结构图。

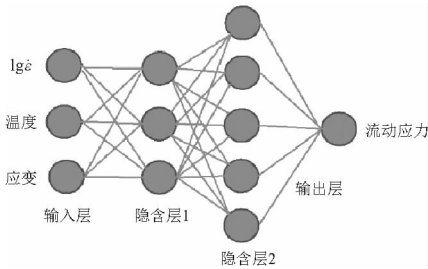


图 3 BP 神经网络结构

Fig.3 Structure of BP neural network

由于 BP 神经网络建模十分复杂,为了使预测的结果误差较小,必须每次将训练得到的和预想的结果比较,如果误差较大,适当地修改各个神经元之间的阈值和连接权值。网络训练的误差目标函数 E 为:

$$E = \sum_p E_p = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^m \sum_{j=1}^n (O'_{pj} - y_{pj})^2 = E(W_{ij}, W_{jk}, \theta_j, \theta_k) \tag{2}$$

式中, m 为训练样本; n 为网络输出节点数; O'_{pj} 为网络实际输出; y_{pj} 为期望输出; W_{jk} 为隐含层和输出层之间

的连接权值; θ_j 为输入层到隐含层的阈值; θ_k 为隐含层到输出层的阈值。

2.2.2 数据归一化处理

由于 BP 神经网络输入节点数据之间差值较大,在调整隐含层到输入层的权值时变得十分复杂,因而降低 BP 神经网络的预测精度。因此,要对输入数据进行预处理来提高预测精度,采用下式对数据进行归一化处理:

$$N_i = 0.8 \times \left| \frac{N'_i - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \right| + 0.1 \tag{3}$$

式中, N_i 为第 i 个归一化处理后的值; N'_i 为第 i 个未归一处理的值; $N_{\max}$ 和 $N_{\min}$ 分别为对应值中的最大、最小值。

BP 神经网络训练过程中,3 个层间依次选择 tan-sig、purelin 函数进行数据之间的传递,为提高 BP 神经网络的精度、计算速度以及减小 BP 算法的迭代次数,采用 L-M 算法的 trainlm 函数对训练时 BP 算法进行优化。设定目标迭代次数为 3 000,目标误差为 10^{-5} ,学习速率为 0.3。

2.2.3 模拟结果及分析

采用 GH5188 合金在压缩温度为 1 000~1 150 °C,应变速率为 0.001~0.1 s⁻¹ 时的试验数据作为网络训练样本,并将试验数据划分为网络测试和训练数据,表 2 为 GH5188 高温合金样本划分结果, T 、 C 分别表示网络测试和训练数据。

表 2 GH5188 合金样本划分
Tab.2 Classification of GH5188 alloy

$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	温度/°C			
	1 000	1 050	1 100	1 150
0.001	C	T	C	T
0.01	T	C	T	C
0.1	C	T	C	T

不同条件下的 BP 模型预测值与试验数据的真应力-真应变对比见图 4。可以看出,通过 BP 神经网络建立的合金的本构模型,其预测应力值与试验所测值偏差不大,变化趋势也一致,因此所建 GH5188 高温合金 BP

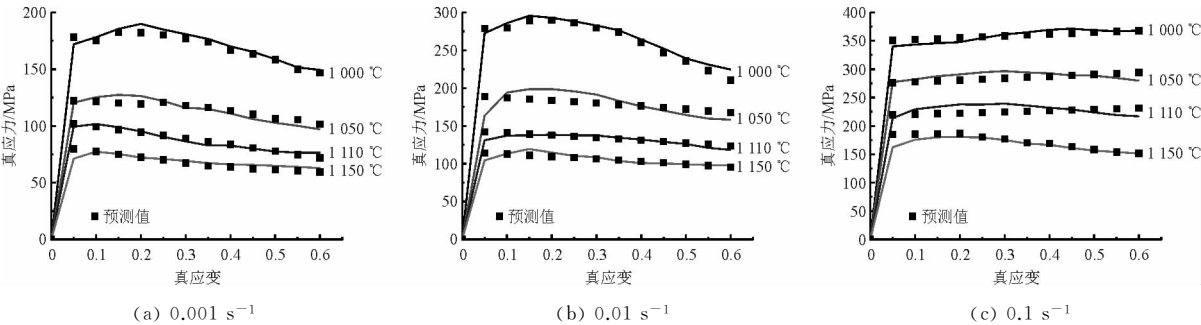


图 4 BP 神经网络本构模型试验值与预测值对比

Fig.4 Comparison of experimental and predicted values of BP neural network constitutive model

神经网络本构模型是可靠的。

采用模型相关系数 R 和平均相对误差 E 对 GH5188 合金 BP 预测模型的精确度进行定量分析。 R 和 E 采用下式计算：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}} \quad (4)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{C_i - T_i}{C_i} \right| \times 100\%}{N} \quad (5)$$

式中, C 为试验值; T 为预测值; N 为数据点个数。

将试验值与由 BP 本构方程计算出的预测值按式(4)、式(5)计算,对 BP 得到的预测值和试验值进行整理后作出对比结果,见图 5。BP 模型相关系数 R 为 0.996 95,平均相对误差 E 为 4.19%,其中预测偏差值在 10% 以内的数据点占 97.92%。说明建立的 GH5188 高温合金 BP 神经网络本构模型具有较高的精度,能准确预测 GH5188 高温合金的高温流变应力。

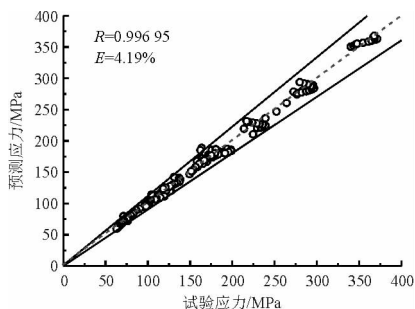


图 5 GH5188 高温合金 BP 预测值与试验值相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between BP prediction values and test values of GH5188 superalloy

3 结 论

(1)温度和应变速率对 GH5188 合金流变应力的影响效果十分明显,压缩温度越高和应变速率越低, GH5188 合金流变应力就越小,同时软化效应也较为明显。在低应变下 GH5188 高温合金流变曲线就能达到稳态流动特征。在应变速率为 0.01 s^{-1} ,变形温度为 1 050 和 1 150 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, GH5188 合金流变应力随着应变的增大有略微增大的趋势。

(2)建立了基于 BP 神经网络 GH5188 高温合金本构模型,其应力试验值和预测值的变化趋势基本一致,验证了所建模型的可靠性。BP 神经网络本构应力预测偏差值在 10% 以内的数据点占 97.92%,BP 神经网络本构模型能准确预测 GH5188 高温合金的高温流变应力。

参 考 文 献

- [1] 李伟,牛建科.热处理对 GH188 合金 650 $^{\circ}\text{C}$ 拉伸塑性的影响[J].特钢技术,2004(4):10-11.
- [2] BOBBILI R, RAMUDU B V, AMADHU V. A physically-based constitutive model for hot deformation of Ti-10-2-3 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 696:295-303.
- [3] WANG H R, WANG C G, LI M Y, et al. Constitutive equations for describing the hot compressed behavior of TC4-DT titanium alloy[J]. Materials, 2020, 13(15): 3 424.
- [4] ABBASI S M, MORAKKABATI M, SHEIKHALI A H, et al. Hot deformation behavior of beta titanium Ti-13V-11Cr-3Al alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2014, A45 (11): 5 201-5 211.
- [5] SENTHIL K, IQBAL M A, CHANDEL P S. Study of the constitutive behavior of 7075-T651 aluminum alloy [J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 108:171-190.
- [6] 吴道祥,梁强,王敬.2024A 铝合金高温流变行为及本构关系研究 [J].特种铸造及有色合金,2020,40(3):233-238.
- [7] TAN Y B, MA Y H, ZHAO F. Hot deformation behavior and constitutive modeling of fine grained inconel 718 superalloy[J].Journal of Alloys and Compounds, 2018, 745: 85-96.
- [8] 姚志浩,董建新,张麦仓,等.GH738 高温合金热加工行为[J].稀有金属材料与工程,2013,42(6):1 199-1 204.
- [9] YAN J, PAN Q L, LI A D, et al. Flow behavior of Al-6.2Zn-0.70 Mg-0.30Mn-0.17Zr alloy during hot compressive deformation based on Arrhenius and ANN models [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(3): 638-647.
- [10] 焦李成.神经网络系统理论[M].西安:西安电子科技大学出版社, 1990.
- [11] DING F J, JIA X D, HONG T J, et al. Prediction model on flow stress of 6061 aluminum alloy sheet based on GA-BP and PSO-BP neural networks[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6):1 840-1 853.
- [12] 周峰,王克鲁,鲁世强,等.Ti-22Al-24Nb-0.5Y 合金流变行为及 BP 神经网络高温本构模型[J].材料工程,2019,47(8):141-146.
- [13] 高亚伟,董建新,姚志浩,等.GH5188 高温合金组织特征及冷热加工过程组织演变[J].稀有金属材料与工程,2017,46(10):2 922-2 928.
- [14] 东赞鹏,于秋颖,方爽,等.TA7 钛合金高温流变行为研究[J].航空材料学报,2015,35(1):13-19.
- [15] 段为樑. Cu-25Cr 合金热变形行为及轧制工艺研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [16] 万鹏,王克鲁,鲁世强,等.Ti-10.2Mo-4.9Zr-5.5Sn 合金热变形行为及本构关系研究[J].特种铸造及有色合金,2018,38(9):1 034-1 038.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com