

5456 铝合金的高温流变行为和本构模型

李 林, 冯柯茹, 何成奎

(达州职业技术学院 智能制造学院, 四川 达州 635001)

摘要: 为研究 5456 铝合金的高温流变行为及本构关系, 首先在温度为 573~773 K 和应变速率为 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 的条件下进行了等温热压缩试验, 获取了材料的流变曲线。然后, 基于试验数据, 建立了带应变补偿的 Arrhenius (AH)、Hensel-Spittel (HS) 和人工神经网络 (BP) 模型。最后, 针对现有模型的不足, 基于对数应力、温度、对数温度、对数应变速率和二次对数应变速率等参数的线性组合, 提出了一种新本构模型。结果表明: 随着应变的增加, 5456 铝合金的应力呈现出先迅速增加, 再缓慢下降, 最终趋于稳定的趋势; BP 神经网络模型的预测精度最佳, 其次是新模型, 然后是 AH 模型和 HS 模型; 新模型具有简洁的参数形式和良好的可解释性, 适用于较高精度要求的数值仿真。

关键词: 5456 铝合金; 高温流变行为; 神经网络; 预测精度; 本构模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.028

中图分类号: TG146; TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 12-0224-09

High-temperature rheological behavior and constitutive model for 5456 aluminum alloy

Li Lin, Feng Keru, He Chengkui

(Intelligent Manufacturing College, Dazhou Vocational and Technology College, Dazhou 635001, China)

Abstract: To investigate the high-temperature rheological behavior and constitutive relationship of 5456 aluminum alloy, isothermal compression experiments were conducted under the temperature 573–773 K and the strain rate $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, and the rheological curves of material were obtained. Then, based on the experimental datas, Arrhenius (AH) with strain compensation, Hensel-Spittel (HS) and Back-Propagation (BP) artificial neural network models were established. Finally, for the shortcomings of existing models, a new constitutive model was proposed based on the linear combinations of logarithmic stress, temperature, logarithmic temperature, logarithmic strain rate and quadratic logarithmic strain rate. The results indicate that with the increasing of strain, the stress of 5456 aluminum alloy shows a trend of first rapidly increasing, then slowly decreasing and finally stabilizing. In terms of prediction accuracy, BP neural network model performs the best, followed by the new model, then AH model, and finally HS model. However, the new model has a concise parameter form and good interpretability, making it suitable for the numerical simulation with high-precision requirement.

Key words: 5456 aluminum alloy; high-temperature rheological behavior; neural network; prediction accuracy; constitutive model

5XXX 系铝合金因其具有良好的耐腐蚀性和焊接性而在汽车制造、航空航天以及武器装备等领域得到广泛应用^[1]。这些领域使用的零部件通常采用塑性成形工艺进行制造^[2], 因此, 对其高温流变特性、本构关系以及热加工工艺窗口的研究尤为重要。目前, 金属本构模型主要包括 Arrhenius (AH)^[3-4]、Hensel Spittel (HS)^[5-6]、Zerilli Armstrong (ZA)^[7]和

Johnson-Cook (JC)^[8]等类型。国内外对 5XXX 系铝合金的本构关系也展开了一定程度的研究。例如, 林木森等^[9]使用热模拟试验机和分离式霍普金森压杆装置对 3 种不同加工形式及热处理状态的 5XXX 系铝合金在常温 $\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内的力学行为进行了研究。通过试验数据拟合, 确定了每种状态下的 Johnson-Cook (JC) 本构模型参数, 并对其中的应变率强化项进行了修正, 修正后的模型与试验数据吻合良好, 验证了 3 种状态下 5XXX 系铝合金的动态本构关系。张晓蕾等^[10]建立的 5052 铝合金材料模型, 能较好反应材料的变形行为和断裂现象。毕宝鹏等^[11]研究了 5XXX 系铝合金

收稿日期: 2024-03-04; 修订日期: 2024-06-18

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目 (2023YFG0371); 达州市科技局重点研发项目 (21ZDYF0015)

作者简介: 李 林 (1988-), 男, 本科, 讲师

E-mail: Lilin15908486195@163.com

的超塑性并建立了其 Backofen 本构方程, 结果表明, 该铝合金的最佳超塑性参数为温度为 400 °C、应变速率为 0.005 s⁻¹。李彦斌等^[12]研究了 5A06 铝合金唯象本构模型的建立方法, 开发了自动拟合热压缩试验数据的程序, 包含了 Arrhenius 本构模型和神经网络模型。试验结果显示: 手动计算耗时最长、精度最低; 修正的 Arrhenius 本构模型程序的耗时最短、精度适中; 神经网络模型耗时合理、精度最高。Wang J 等^[13]通过研究应力-应变数据的梯度信息, 提出了一种新的 5XXX 系铝合金本构模型, 并将其与经典模型 (AH 模型和 HS 模型) 进行了比较以评估预测精度。研究结果表明, 通过考虑应力与温度以及应力与应变速率之间的对数关系的二阶近似, 可以建立高精度的本构模型, 并且仅需较少的材料参数, 新模型的精度显著优于经典本构模型。朱振华^[14]利用 Gleeble-1500 热模拟试验机对 5A30 铝合金进行了高温等温压缩试验, 研究了其高温塑性变形行为及组织演变规律, 包括流变应力、应变、应变速率和温度之间的关系, 以及动态回复和动态再结晶行为, 确定了该合金的稳态流变应力与 Z 参数之间的关系, 计算了其高温塑性变形的材料常数, 并建立了稳态流变应力模型, 为合金的塑性加工提供了理论支持。总的来说, 目前对 5XXX 系铝合金本构关系的研究主要集中于经典模型及其改进模型, 新本构模型的研究较少。

为进一步促进 5456 铝合金热成形工艺的应用, 本研究首先通过热压缩试验研究了其高温流变特性; 随后, 基于高温流变数据建立了 5456 铝合金的经典本构模型, 并提出了一种新的本构模型。综合预测精度和材料参数的数量, 新模型具有更大的优势。

1 材料及热压缩试验

1.1 材料成分

5456 铝合金是一种铝镁合金, 具有优异的强度、耐腐蚀性和焊接性, 其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 5456 铝合金的化学成分 (% , 质量百分数)

Table 1 Chemical compositions of 5456 aluminum alloy (% , mass fraction)

Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Cu	Al
5.48	0.75	0.12	0.10	0.25	0.10	余量

1.2 热压缩试验

试验所用材料为经过均匀化热处理的 5456 铝合金铸锭。为进行热压缩试验, 将试样加工成尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱, 再使用 1000 目砂纸将其端面打磨光滑, 并涂抹润滑剂以减少摩擦对试验的干扰。热压缩试验在 Gleeble-3500 热物理模拟试验机上进行, 变形温度分别为 573、623、673、723 和 773 K, 应变速率为 0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹, 压缩变形量为 65%。在进行热压缩试验之前, 将试样以 10 K · s⁻¹ 的加热速度升温至压缩温度, 并保温 5 min 以消除试样内部的温度梯度, 减少试样的温度各向异性。试验结束后, 将试样迅速放于水中冷却, 以获取试样高温变形组织。

如图 1 所示, 在各种试验条件下, 随着应变的增加, 5456 铝合金中的应力表现出先快速增加, 然后缓慢下降, 最终趋于稳定的趋势。这是由于随着变形程度的增加, 动态回复和动态再结晶等动态软化效应逐渐显现并占据主导, 抑制了加工硬化的进一步发展, 导致铝合金的热压缩应力逐渐减小, 最终趋于稳定状态。在较低的变形温度下, 主要由动态回复引起动态软化, 而随着温度的升高, 动态再结晶更容易发生。此外, 较低的应变速率有利于延长变形时间, 促进动态回复和动态再结晶的发生。

1.3 应力插值

为了便于研究应力、应变、温度、应变速率之间的关系, 现将应变等分为 10 等份, 并基于图 2 中的曲线对每个应变对应的应力进行线性插值, 得到应力、应变速率、温度、应变数据, 如表 2 所示。其中, R^2 为量化模型对数据拟合程度的决定系数, 其值越接近 1, 则该模型的拟合效果越好。

2 本构模型

2.1 Arrhenius 模型

Arrhenius (AH) 方程^[3-4]主要应用于塑性成形仿真软件 DEFORM 中, 其描述了在同一应力水平下, 应变速率、应力和温度之间的关系, 其数学表达式如下:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: A 、 α 、 n 均为材料常数; Q 为热变形激活能,

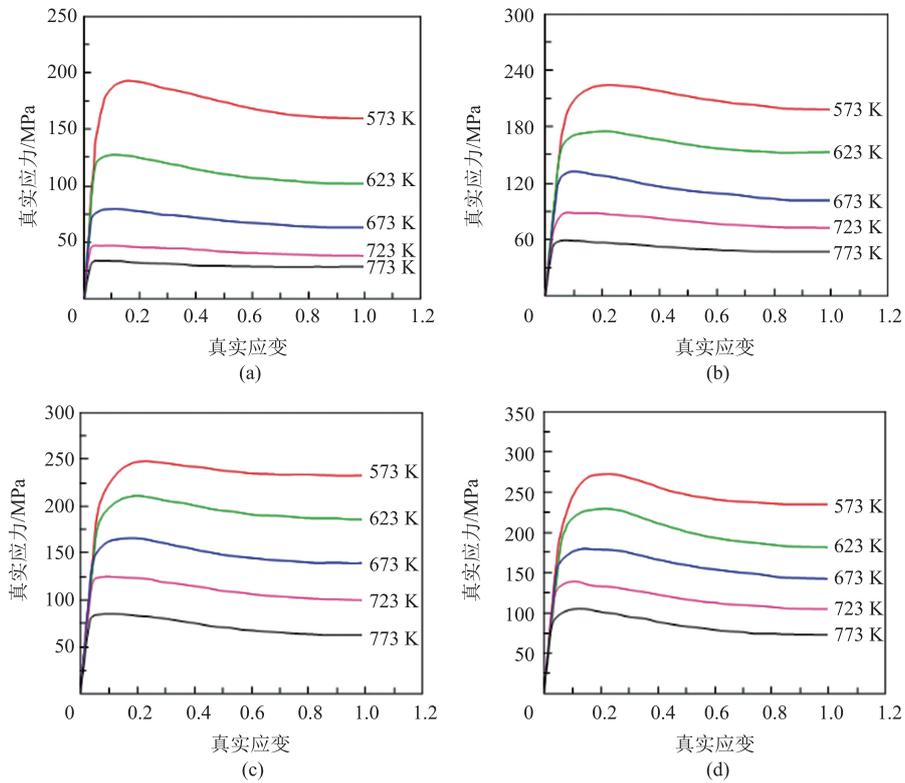


图 1 不同应变速率下 5456 铝合金的真实应力-真实应变曲线

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

Fig. 1 True stress-true strain curves of 5456 aluminum alloy under different strain rates

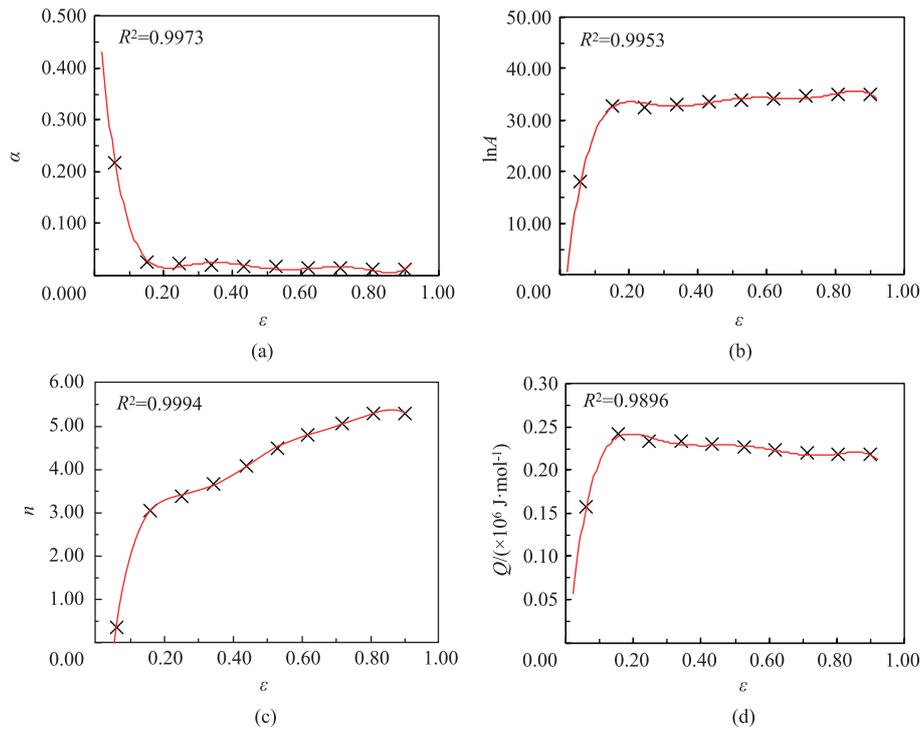


图 2 AH 模型中材料参数与应变的关系曲线

(a) α - ε (b) $\ln A$ - ε (c) n - ε (d) Q - ε

Fig. 2 Relationship curves between material parameters of AH model and strain

表 2 线性等距插值后得到的各点的应力 (MPa)
Table 2 Stress at each point obtained after linear equidistant interpolation (MPa)

应变	应变速率/ s ⁻¹	温度/K					应变	应变速率/ s ⁻¹	温度/K				
		573	623	673	723	773			573	623	673	723	773
0.06	0.01	164	124	78	47	34	0.53	0.01	172	110	69	41	29
	0.1	173	157	127	86	59		0.1	211	160	112	79	50
	1	191	175	150	121	83		1	238	194	147	109	70
	10	197	186	163	132	100		10	245	199	157	115	83
0.15	0.01	192	127	79	46	33	0.62	0.01	167	107	67	41	29
	0.1	220	174	131	88	58		0.1	207	157	109	76	49
	1	241	208	165	124	84		1	235	191	144	106	67
	10	268	227	179	135	105		10	241	192	153	112	79
0.25	0.01	189	123	76	45	32	0.71	0.01	163	105	65	40	29
	0.1	224	174	126	86	56		0.1	204	154	106	75	48
	1	248	209	163	122	82		1	234	189	142	103	65
	10	272	228	178	131	100		10	238	188	149	109	76
0.34	0.01	183	118	74	45	31	0.81	0.01	161	103	64	39	29
	0.1	221	170	120	84	54		0.1	201	153	103	73	47
	1	245	204	157	117	78		1	234	187	140	102	64
	10	264	219	171	126	94		10	236	185	145	107	75
0.43	0.01	178	113	71	43	30	0.90	0.01	160	102	64	38	29
	0.1	216	165	115	81	52		0.1	199	153	102	73	47
	1	241	199	152	113	73		1	233	187	140	101	63
	10	253	208	163	121	87		10	235	182	143	105	74

(J · mol⁻¹); R 为气体常数, 取为 8.314 J · (K · mol)⁻¹; σ 为应力, MPa; ε̇ 为应变速率, s⁻¹; T 为热力学温度, K。

将式 (1) 变换为:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \frac{1}{A} \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right)^{\frac{1}{n}} + \sqrt{\left[\frac{1}{A} \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^2 + 1} \right\} \quad (2)$$

可见, AH 模型中不包含应变参数, 因此, 其本构模型不完整。为了获取完整的本构模型, 通常会假设材料常数为应变的函数, 并使用多项式进行拟合。将表 2 中不同应变水平对应的数据带入式

(2) 中进行多元非线性回归可以得到不同应变水平下的材料常数。

图 2 为不同应变对应的材料参数, 参数 α 随着应变 ε 的增加而逐渐减小, 参数 A 和 n 随着应变的增加逐渐增加, 参数 Q 随着应变的增加先增加后减小。此外, 采用 6 次多项式对 4 个材料参数进行拟合, 得到式 (3) 所示的表达式, 其决定系数 R² 均较大 (均大于 0.9896); 这说明 6 次多项式能够精确地拟合材料参数与应变的关系。将式 (3) 中的多项式带入 (2) 中可以得到 AH 模型的显示表达式。由于采用 6 次多项式拟合材料参数与应变的关系, 因此, 带应变补偿的 AH 模型共有 28 个材料系数。

$$\begin{cases} \alpha = 58.72\epsilon^6 - 198.39\epsilon^5 + 242.46\epsilon^4 - 156.37\epsilon^3 + 53.03\epsilon^2 - 8.88\epsilon + 0.59 \\ \ln A = 5199.83\epsilon^6 + 16593.56\epsilon^5 - 20977.51\epsilon^4 + 13321.48\epsilon^3 - 4428.53\epsilon^2 + 723.65\epsilon - 12.06 \\ n = -810.08\epsilon^6 + 2600.36\epsilon^5 - 3311.44\epsilon^4 + 2116.49\epsilon^3 - 706.848\epsilon^2 + 119.15\epsilon - 4.67 \\ Q = -30361753\epsilon^6 + 97093130\epsilon^5 - 122839747\epsilon^4 + 78029765\epsilon^3 - 25966352\epsilon^2 + 4201510\epsilon - 16593 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 Hensel-Spittel 模型

另一个常用于塑性成形仿真软件 FORGE 中的

本构模型是 Hensel Spittel (HS) 模型^[5-6], 其描述了应力、应变速率、温度和应变之间的关系, 其数

学表达式为:

$$\sigma = m_0 \exp(m_1 T) \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp\left(\frac{m_4}{\varepsilon}\right) (1 + \varepsilon)^{m_5 T} \cdot \exp(m_6 \varepsilon) \dot{\varepsilon}^{m_7 T} T^{m_8} \quad (4)$$

式中: $m_0 \sim m_8$ 为材料常数。

HS 模型的对数形式表达式如下:

$$\ln \sigma = \ln m_0 + m_1 T + m_2 \ln \varepsilon + m_3 \ln \dot{\varepsilon} + m_4 / \varepsilon + m_5 T \ln(1 + \varepsilon) + m_6 \varepsilon + m_7 T \ln \dot{\varepsilon} + m_8 \ln T \quad (5)$$

根据式 (5) 的定义可知, HS 模型中假设对数应力与温度、对数应变、对数应变速率、应变的倒数、对数温度等量之间为线性关系。同样地, 将表 2 的数据带入式 (4) 中进行多元线性回归得到材料参数, 如表 3 所示。

表 3 HS 模型多元线性回归得到的材料参数值

Table 3 Material parameter values obtained by multiple linear regression of HS model

参数	$\ln m_0$	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8
数值	-28.7040	-0.0154	-0.0759	-0.2432	-0.0216	-0.0021	0.6826	0.0005	6.7874

将表 3 中的参数代入式 (4), 即可得到 HS 本构模型的显式表达式。与 AH 模型相比, HS 本构模型中的材料参数显著减少, 仅有 9 个参数值。

2.3 BP 神经网络模型

构建材料本构关系的本质是构建一个映射, 其具备应变、应变速率、温度作为输入, 应力作为输出

的功能, 并且能够准确预测应力。BP 神经网络模型能够对复杂数据进行逼近, 从而实现这一过程。图 3a 展示了构建的一个 3 输入 1 输出的 BP 神经网络模型, 其隐藏层包含 20 个神经元, 而输出层仅有一个神经元。每个神经元均具备权值、偏置和激活函数。

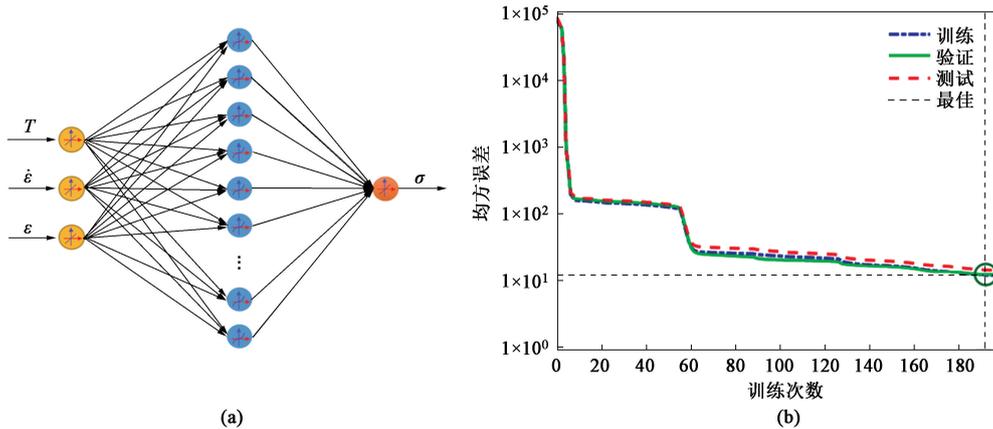


图 3 本构关系预测 BP 神经网络结构 (a) 及训练收敛图 (b)

Fig. 3 BP neural network structure for constitutive relation prediction (a) and training convergence plot (b)

在图 3 构建的 BP 神经网络模型中, 隐藏层采用双曲正切函数作为激活函数, 而输出层采用线性函数作为激活函数。利用表 2 中的 200 组数据 (4 个应变速率、5 个温度、10 个应变) 对 BP 神经网络模型进行训练, 可得到经过训练的 BP 神经网络模型。如图 4 所示, 拟合曲线和数据分布越靠近 $Y = T$ 曲线, 表明精度越高, 在不同数据集上的相关系数 R' 略有差异, 但均大于 0.97000, 表明 BP 神经网络模型对本构关系的逼近精度较高。考虑到神经网络的全连接结构, 可知 BP 该神经网络模型共计 100 余个参数。

2.4 二次新模型

根据 AH 模型和 HS 模型, 可知对数应力、温

度、对数温度以及对数应变速率之间存在一定程度的线性关系。此外, 为了更高精度地预测应力, 考虑将对数应变速率进行二阶逼近。假设新模型为 $\ln T$ 、 T 、 $\ln \dot{\varepsilon}$ 、 $\ln^2 \dot{\varepsilon}$ 和 $1/T$ 的线性组合, 得到如下所示的改进本构模型:

$$\ln \sigma = a_0 + a_1 T + a_2 \ln T + \frac{a_3}{T} + a_4 \ln \dot{\varepsilon} + a_5 \ln \dot{\varepsilon} T + a_6 \ln \dot{\varepsilon} \ln T + \frac{a_7}{T} \ln \dot{\varepsilon} + a_8 \ln^2 \dot{\varepsilon} + a_9 T \ln^2 \dot{\varepsilon} + a_{10} \ln T \ln^2 \dot{\varepsilon} + \frac{a_{11} \ln^2 \dot{\varepsilon}}{T} \quad (6)$$

式中: $a_0 \sim a_{11}$ 为材料参数, 是应变的函数。

使用表 2 中的数据, 并用多元线性回归能够得到不同应变下的材料参数, 并用 6 次多项式进行拟合, 可以得到材料参数与应变的关系如下:

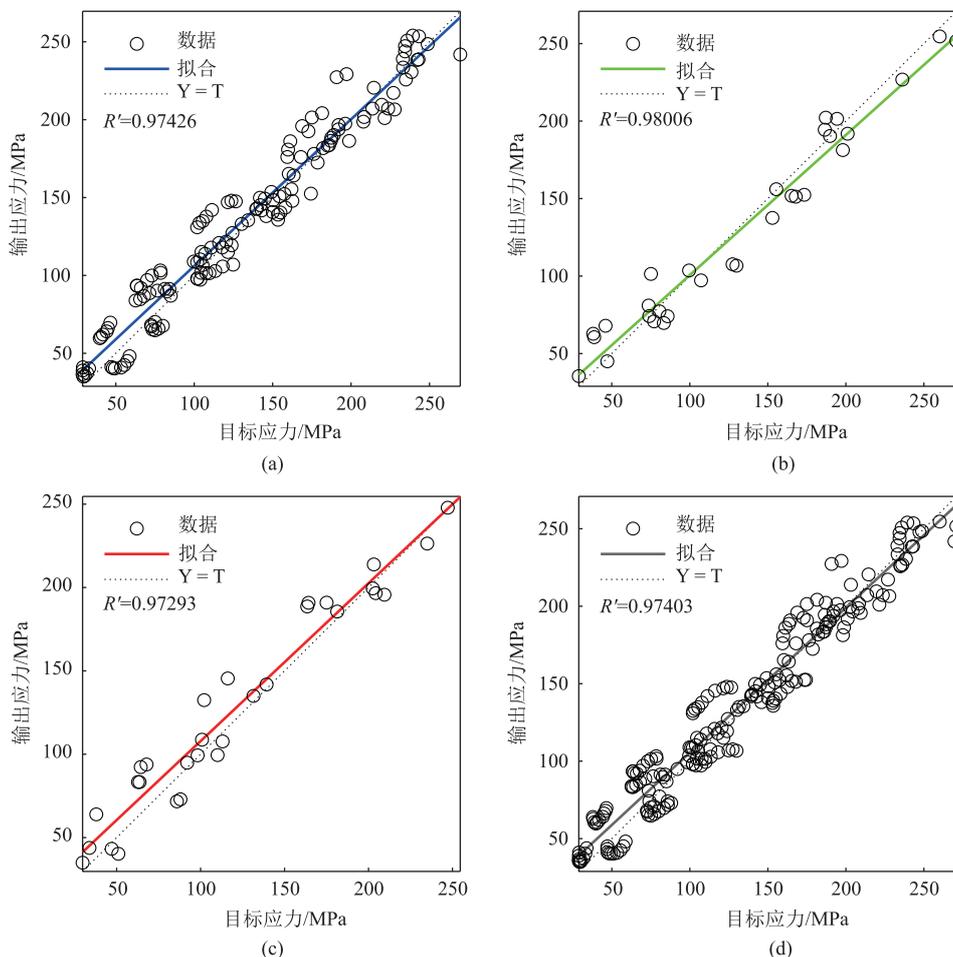


图 4 神经网络在不同集合上的拟合优度

(a) 训练集 (b) 验证集 (c) 测试集 (d) 全部样本

Fig. 4 Goodness of fitting for neural network in different datasets

(a) Training set (b) Validation set (c) Test set (d) Entire dataset

$$\begin{cases}
 a_0 = 22730\varepsilon^6 - 38190\varepsilon^5 - 7430\varepsilon^4 + 53240\varepsilon^3 - 39670\varepsilon^2 + 10240\varepsilon - 1244 \\
 a_1 = 1.400\varepsilon^6 - 0.8035\varepsilon^5 - 5.027\varepsilon^4 + 8.574\varepsilon^3 - 5.344\varepsilon^2 + 1.310\varepsilon - 0.1702 \\
 a_2 = -3262\varepsilon^6 + 5175\varepsilon^5 + 1964\varepsilon^4 - 8677\varepsilon^3 + 6259\varepsilon^2 - 1602\varepsilon + 196.600 \\
 a_3 = -1644000\varepsilon^6 + 3410000\varepsilon^5 - 1365000\varepsilon^4 - 1660000\varepsilon^3 + 1677000\varepsilon^2 - 462300\varepsilon + 55890 \\
 a_4 = -82510\varepsilon^6 + 257500\varepsilon^5 - 319700\varepsilon^4 + 202900\varepsilon^3 - 70240\varepsilon^2 + 12160\varepsilon - 637.500 \\
 a_5 = -9.784\varepsilon^6 + 30.580\varepsilon^5 - 38.010\varepsilon^4 + 24.140\varepsilon^3 - 8.344\varepsilon^2 + 1.436\varepsilon - 0.07354 \\
 a_6 = 12740\varepsilon^6 - 39770\varepsilon^5 + 49380\varepsilon^4 - 31350\varepsilon^3 + 10850\varepsilon^2 - 1877\varepsilon + 98 \\
 a_7 = 4125000\varepsilon^6 - 12860000\varepsilon^5 + 15940000\varepsilon^4 - 10110000\varepsilon^3 + 3503000\varepsilon^2 - 608600\varepsilon + 32310 \\
 a_8 = -13820\varepsilon^6 + 42260\varepsilon^5 - 51180\varepsilon^4 + 31000\varepsilon^3 - 9511\varepsilon^2 + 1175\varepsilon + 107 \\
 a_9 = -1.701\varepsilon^6 + 5.229\varepsilon^5 - 6.369\varepsilon^4 + 3.881\varepsilon^3 - 1.198\varepsilon^2 + 0.1503\varepsilon + 0.012 \\
 a_{10} = 2145\varepsilon^6 - 6565\varepsilon^5 + 7956\varepsilon^4 - 4824\varepsilon^3 + 1481\varepsilon^2 - 183\varepsilon - 16 \\
 a_{11} = 671500\varepsilon^6 - 2044000\varepsilon^5 + 2464000\varepsilon^4 - 1485000\varepsilon^3 + 45300\varepsilon^2 - 55230\varepsilon - 5383
 \end{cases} \tag{7}$$

将上述多项式 (7) 带入新模型 (式 (6)) 中即可得到不同应变、温度、应变速率下的应力值。考

虑到二次模型用 6 次多项式拟合材料参数与应变的关系，因此，此二次模型中共计有 84 个材料系数。

3 预测能力分析

3.1 总体精度

将所有模型的预测应力和试验应力（10 个应变、4 个应变速率、5 个温度）绘制在一个图上，

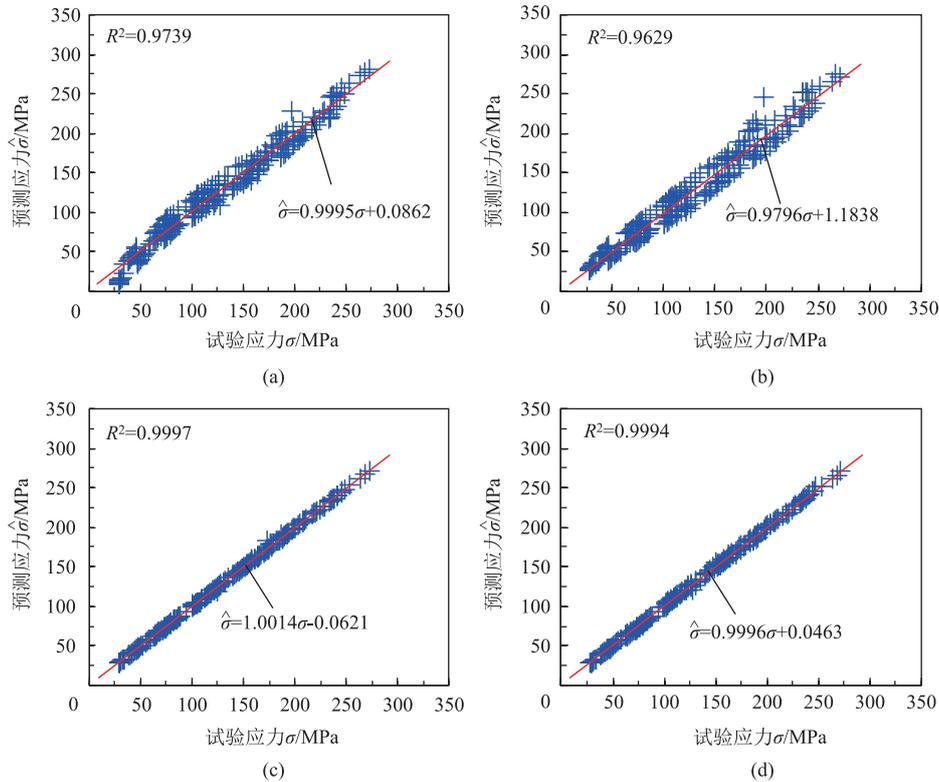


图 5 不同模型的预测精度对比

(a) AH 模型 (b) HS 模型 (c) BP 神经网络模型 (d) 新模型

Fig. 5 Comparison of prediction accuracy for different models

(a) AH model (b) HS model (c) BP neural network model (d) New model

此外，从试验应力和预测应力的分布规律也可以看出，神经网络模型的分散程度最小、HS 模型的分散程度最大。综合图 5 中点的分布规律和决定系数可知改进模型能够显著提升其预测能力。

3.2 预测效果

图 6 为不同温度和应变速率下的预测结果，经过计算，AH 模型、HS 模型、BP 神经网络模型和新模型的平均误差分别为：9.03、10.87、1.04 和 1.21 MPa。此外，BP 神经网络和新模型的预测点在所有应变速率和温度下与试验曲线的接近程度较高，而 AH 模型和 HS 模型的预测值在所有应变速率和温度下与试验曲线的偏离程度较大。此外，AH 模型和 HS 模型在不同温度和应变速率下的预测精度也不同，说明其预测精度与应变速率

并分析线性拟合决定系数 (R^2)，得到如图 5 所示的结果。拟合优度从大到小依次为：BP 神经网络模型 (0.9997) > 改进模型 (0.9994) > AH 模型 (0.9739) > HS 模型 (0.9629)。因此，神经网络模型的预测精度最高，其次为改进模型，再次为 AH 模型，最后为 HS 模型。

和温度存在一定关系，即 AH 模型和 HS 模型对该铝合金的逼近精度受到温度和应变速率的影响，这是由于不同温度和应变速率下，该铝合金的软化模式差异所导致的。

综上所述，BP 神经网络模型的预测精度最高，其次是新模型，再次是 AH 模型，最后是 HS 模型。这是因为 BP 神经网络模型中有 100 多个参数，其自由度较大，能够更灵活地预测应力。然而，BP 神经网络模型的显示表达式较难构建，梯度计算非常复杂，并且存在过拟合的风险，因此，在数值仿真软件中通常不会使用。HS 模型虽然仅有 9 个参数，但其预测能力较弱。综合考虑材料参数和预测精度，新模型的材料参数没有显著增加，但预测能力较 AH 模型和 HS 模型有显著提升。

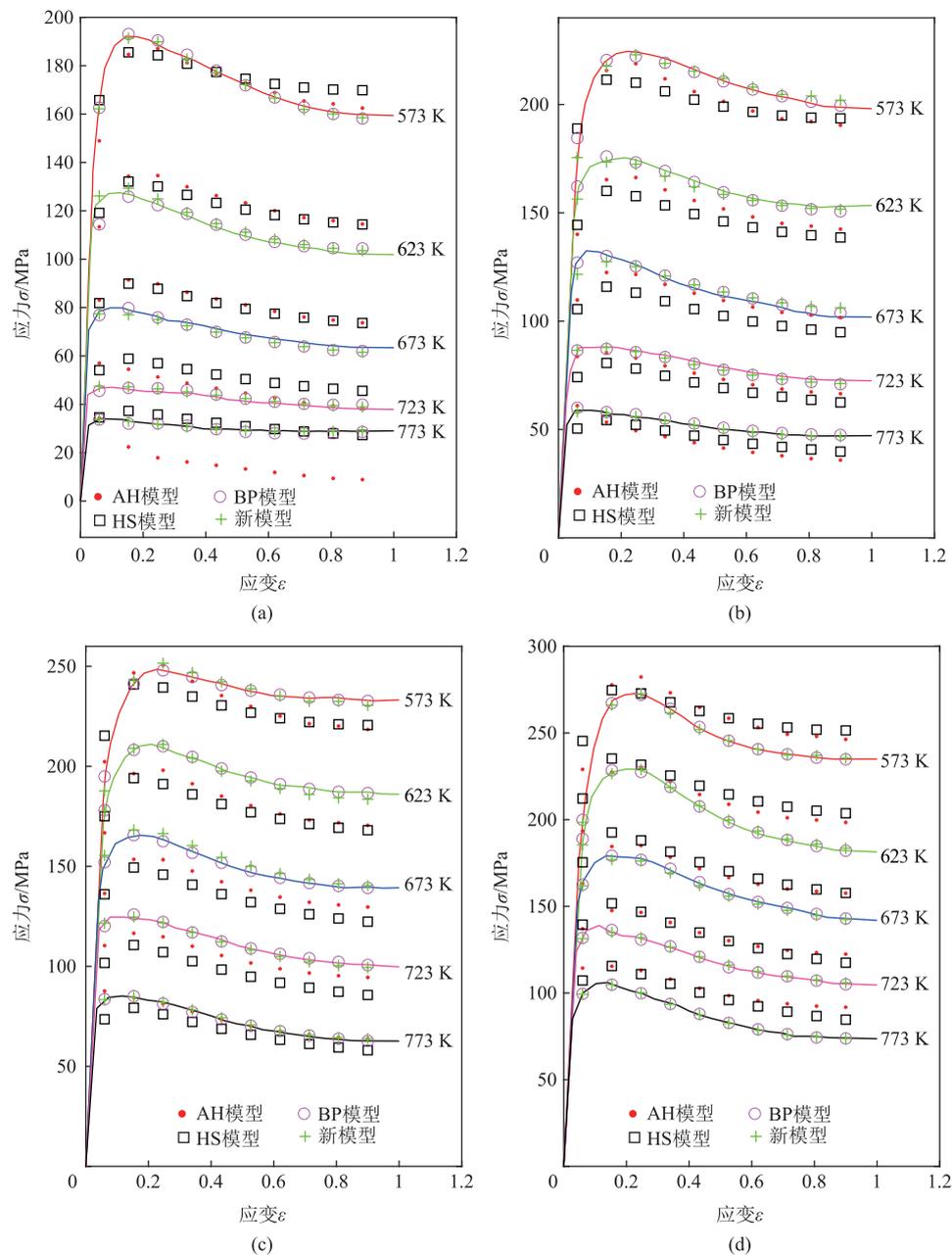


图 6 不同应变速率下不同模型的预测结果对比

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

Fig. 6 Comparison of predicted results for different models under different strain rates

4 结论

(1) 随着应变增加, 5456 铝合金的应力呈现出先迅速增加, 然后缓慢下降, 最终趋于稳定的趋势。这是由于动态回复和动态再结晶等动态软化效应逐渐显现, 抑制了加工硬化的进一步发展, 导致铝合金的热压缩应力逐渐减小, 最终趋于稳定状态。在较低的变形温度下, 主要由动态回复引起动态软化;

随着温度的升高, 动态再结晶更容易发生。较低的应变速率有利于延长变形时间, 促进动态回复和动态再结晶的发生。

(2) AH 模型参数的求解需要多元非线性回归, 而 HS 模型参数的求解仅需多元线性回归。两者具有相近的预测精度, 但 HS 模型参数数量更少, 更易获取。因此, 对于一般精度要求的塑性成形仿真问题, HS 模型是 5456 铝合金本构关系构建的较好选择。

(3) BP 神经网络模型在预测精度方面表现最佳,其次是新模型,然后是 AH 模型,最后是 HS 模型。尽管 BP 神经网络具有较大的自由度和灵活性,能够更准确地预测应力,但构建和训练过程相对复杂,参数过多,显示表达式构建困难,存在过拟合风险。相比之下,新模型在预测精度上与 BP 神经网络相当,但具有更简洁的参数形式和更好的可解释性,适用于较高精度要求的数值仿真。

参考文献:

- [1] 黄淑萍,黄亮,陈绍文,等. 退火温度对 5456 铝合金冷轧板材组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (8): 196-199.
Huang S P, Huang L, Chen S W, et al. Effects of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of 5456 aluminum alloy cold rolled sheet [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44 (8): 196-199.
- [2] 房洪杰,刘慧,孙杰,等. 5xxx 系铝合金研究现状及发展趋势 [J]. 材料导报, 2023, 37 (21): 211-220.
Fang H J, Liu H, Sun J, et al. Research status and development trend of 5xxx series aluminum alloy [J]. Materials Reports, 2023, 37 (21): 211-220.
- [3] 刘昭昭,王森,刘延辉. 镍基高温合金 GH4133B 本构模型及热加工图的热模拟研究 [J]. 航空材料学报, 2021, 41 (6): 44-50.
Liu Z Z, Wang M, Liu Y H. Analysis of deformation behavior and microstructure evolution for GH4133B superalloy based on isothermal compression test [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41 (6): 44-50.
- [4] 李娜. 镍基高温合金热变形行为及热加工性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Li N. Study on Hot Deformation Behavior and Hot Workability of Nickel-based Superalloy [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [5] 郭乐乐,陈学文,周旭东,等. 基于原位观测的 Cr5 合金钢 Hansel-Spittel 高温本构模型修正方法及试验验证 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (6): 88-95.
Guo L L, Chen X W, Zhou X D, et al. Correction method and experimental verification of Hansel-Spittel constitutive model of Cr5 alloy steel at high temperature based on in-situ observation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (6): 88-95.
- [6] 尹小燕,骆静,朱杰. 基于 Hansel-Spittel 模型的齿环用 HA161-4-3-1 合金本构模型构建 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2021, 35 (1): 111-117, 167.
Yin X Y, Luo J, Zhu J. Construction of high-temperature constitutive model of HA161-4-3-1 alloy for synchronizer ring based on Hansel-Spittel mode [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35 (1): 111-117, 167.
- [7] Senthilkumar V, Balaji A, Arulkirubakaran D. Application of constitutive and neural network models for prediction of high temperature flow behavior of Al/Mg based nanocomposite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23 (6): 1737-1750.
- [8] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541-547.
- [9] 林木森,庞宝君,张伟,等. 5A06 铝合金的动态本构关系实验 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29 (3): 306-311.
Lin M S, Pang B J, Zhang W, et al. Experimental investigation on a dynamic constitutive relationship of 5A06 alloy [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29 (3): 306-311.
- [10] 张晓蕾,陈思达,王子健. 5052 铝合金本构模型和断裂模型研究 [J]. 模具工业, 2024, 50 (8): 27-35.
Zhang X L, Chen S D, Wang Z J. Study on constitutive model and fracture model of 5052 aluminum alloy [J]. Die & Mould Industry, 2024, 50 (8): 27-35.
- [11] 毕宝鹏,王勇,孙梦莹. 5A06 铝合金超塑性变形力学特性 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (2): 62-67.
Bi B P, Wang Y, Sun M Y. Mechanical behavior of aluminum alloy 5A06 under superplastic deform [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (2): 62-67.
- [12] 李彦斌,何珞玉,李国钧,等. 5A06 铝合金高精度唯象本构模型的快速构建 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (7): 127-137.
Li Y B, He L Y, Li G J, et al. Rapid construction of high precision phenomenological constitutive model for 5A06 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (7): 127-137.
- [13] Wang J, Xiao G Q, Zhang J S. A new constitutive model and hot processing map of 5A06 aluminum alloy based on high-temperature rheological behavior and higher-order gradients [J]. Materials Today Communications, 2023, 36: 106502.
- [14] 朱振华. 5A30 铝合金高温压缩变形行为的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
Zhu Z H. Study on the Compression Deformation Behaviors of 5A30 Aluminum Alloy at Elevated Temperature [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.

