

材料与成形性能

LZ50 车轴钢高温拉伸变形本构模型研究

李汉林, 何 涛, 霍元明, 杜向阳, 李诗谦, 贾东昇

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 为更好地描述 LZ50 车轴钢的高温拉伸变形行为, 采用 Gleeble-3800 热模拟试验机在变形温度分别为 900、1000 和 1100 °C, 应变速率分别为 0.1、1.0 和 10.0 s⁻¹ 的条件下对 LZ50 车轴钢进行了高温拉伸试验, 获得了不同变形条件下的应力、应变数据, 并基于修正的 Johnson-Cook (JC) 本构模型和多元非线性回归的本构模型 (DMNR) 建立了两种 LZ50 车轴钢的高温拉伸本构模型。将建立的两种模型的预测值与试验数据进行对比, 并采用相关系数 R 以及平均相对误差 $AARE$ 对建立的两种模型的预测精度进行定量分析。结果表明: 两种模型在不同变形温度下的预测能力存在差异; JC 模型在 900 °C 下的预测能力较好, R 值和 $AARE$ 值分别为 0.995 和 1.20%; 在 1000 °C 变形温度下, DMNR 模型的预测能力较好, R 值和 $AARE$ 值分别为 0.997 和 6.38%; 而在 1100 °C 下两种模型的预测精度相差不大。

关键词: LZ50 车轴钢; 高温拉伸; Johnson-Cook 模型; DMNR 模型; 本构方程

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.032

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0224-09

Study on constitutive model for LZ50 axle steel under high temperature tensile deformation

Li Hanlin, He Tao, Huo Yuanming, Du Xiangyang, Li Shiqian, Jia Dongsheng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to better describe the high-temperature tensile deformation behavior of LZ50 axle steel, high-temperature tensile tests of LZ50 axle steel were conducted by using Gleeble-3800 thermal simulation tester at the deformation temperatures of 900, 1000 and 1100 °C and the strain rates of 0.1, 1.0 and 10.0 s⁻¹, respectively, and the stress-strain data were obtained under different deformation conditions. Then, based on the modified Johnson-Cook (JC) constitutive model and the multivariate nonlinear regression constitutive model (DMNR), two high-temperature tensile constitutive models for LZ50 axle steel were established. Furthermore, the predicted values of the two established models were compared with the experimental data, and the prediction accuracies of the two established models were quantitatively analyzed by using correlation coefficient R and average relative error $AARE$. The results show that the prediction abilities of the two models under different deformation temperatures are different, and JC model has better prediction ability at 900 °C, with the R and $AARE$ values of 0.995 and 1.20% respectively. However, DMNR model has better prediction ability at the deformation temperature of 1000 °C, the R and $AARE$ values are 0.997 and 6.38%, respectively, and the prediction accuracies of the two models at 1100 °C are similar.

Key words: LZ50 axle steel; high-temperature tensile; Johnson-Cook model; DMNR model; constitutive equation

铁路车轴是承担承载和走行功能的关键部件, 车轴成形质量的优劣对其服役性能具有重要影响^[1]。有限元法作为研究金属变形规律的一种有效

手段, 因效率高、成本低等优点受到学者的广泛关注^[2]。为了准确仿真分析车轴成形过程中的金属流动规律, 需获取描述材料应力、应变关系的本构模型^[3-4]。因此, 建立关于材料的本构模型是对该材料进行有限元仿真的重要基础。

Johnson-Cook (JC) 本构模型是由 Johnson C R 和 Cook W H 在 1983 年提出的适用于预测金属高温变形行为的模型, 由于模型形式简单, 在工程上得到广泛应用^[5-7]。张春菊等^[8]使用 JC 模型建立了 DP 钢室温拉伸的本构模型, 发现模型预测结果与试验结果具有较高的一致性。然而, 原始的 JC 模型认

收稿日期: 2023-03-05; 修订日期: 2023-06-10

基金项目: 国家重点研发项目 (2018YFB1307900); 国家自然科学基金资助项目 (52275350); 上海市自然科学基金资助项目 (20ZR1422100)

作者简介: 李汉林 (2002-), 男, 硕士研究生

E-mail: 915610463@qq.com

通信作者: 何 涛 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: hetao@sues.edu.cn

为应变硬化、热软化和应变速率硬化对流变应力是 3 种相互独立的影响因子,这限制了原始的 JC 模型的预测能力^[9-10],而且模型将材料参数定为恒定值同样也会影响模型的预测能力^[11],因此,对影响因子进行耦合并改进材料参数有助于提高模型的预测能力。Lin Y C 等^[12]考虑了应变速率与温度耦合的影响,对原始 JC 本构模型进行了改进,并运用于对特殊高强钢单轴拉伸试验的建模,发现改进模型拥有更好的预测能力。DMNR 模型由 Yuan Z 等^[13]提出,该本构方程由流变应力和影响因子组成,其中影响因子分为独立影响因子和具有耦合作用影响因子。Shen M L 等^[14]使用 DMNR 模型对 TC16 钛合金热压缩变形条件下的材料流动行为进行预测,发现 DMNR 模型具有较好的预测能力。因此,改进的 JC 模型和 DMNR 模型可以应用于 LZ50 车轴钢高温变形行为预测。目前,对 LZ50 车轴钢本构模型的研究主要集中在压缩试验方面^[15-17],对 LZ50 车轴钢拉伸条件下建立本构模型的研究较少。

本文使用高温拉伸试验获得 LZ50 车轴钢的应

力、应变数据,并基于改进的 JC 本构模型和 DMNR 模型建立本构模型,对比预测数据与试验数据,使用相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 参数来定量比较两种模型的预测精度。

1 试验材料及方法

本试验以 LZ50 车轴钢作为试验材料,其化学成分如表 1 所示。使用太原钢铁集团有限公司生产的方坯,经线切割和车削获得光滑圆棒试件。拉伸试验在如图 1 所示的 Gleeble-3800 热模拟系统进行。参考 LZ50 车轴钢的较优的轧制温度为 1050 ℃^[18],考虑到轧制过程中的降温等问题,选择 900、1000 和 1100 ℃作为拉伸温度,拉伸试验按照表 2 中的变形条件进行。将试件焊上电阻丝后,夹持在热模拟系统中,以 20 ℃·s⁻¹ 的升温速率将试件升至试验温度后,保温 3 min 使材料完全奥氏体化,之后进行拉伸,计算机采集数据,试件拉断后进行水冷,拉断的试件如图 2 所示。

表 1 LZ50 车轴钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of LZ50 axle steel (% , mass fraction)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al _s	Fe
0.47~0.57	0.60~0.90	0.17~0.40	≤0.03	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.25	≥0.01	余量



图 1 Gleeble-3800 热模拟系统

Fig. 1 Gleeble-3800 thermal simulation system

表 2 高温拉伸试验方案

Table 2 Schemes of high temperature tensile test

温度/℃	900			1000			1100		
应变速率/s ⁻¹	0.1	1.0	10.0	0.1	1.0	10.0	0.1	1.0	10.0

2 本构模型的建立

2.1 改进的 JC 模型构建

Lin Y C 等^[12]认为初始模型假设热软化、应变



图 2 拉断后的试件

Fig. 2 Test pieces after tensile fracture

率硬化和应变硬化对流变应力是 3 种独立的影响,可以相互分离,但实际上应考虑温度、应变速率对流动行为的耦合影响。因此,本文使用改进的 JC 模型进行模型建立,如式 (1) 所示,改进的模型耦合了温度和应变速率对流变应力的影响:

$$\sigma = (A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1\ln\dot{\varepsilon}^*) \times$$
$$\exp[(\lambda_1 + \lambda_2\ln\dot{\varepsilon}^*)(T - T_r)] \quad (1)$$

式中: σ 为应力; A_1 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 λ_1 和 λ_2 为需要计算的材料常数; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 为无纲量应变

速率, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_r$; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; $\dot{\varepsilon}_r$ 为参考应变速率; T 为材料的实际变形温度; T_r 为参考变形温度。

本研究选择在应变区间为 0.050~0.135 范围内进行拟合, 参考变形温度 $T_r = 900$ °C, 参考应变速率 $\dot{\varepsilon}_r = 0.1$ s⁻¹。故在参考变形温度和参考应变速率条件下, 式 (1) 可以被写为:

$$\sigma = (A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2) \quad (2)$$

拟合参考条件下的应力、应变数据, 结果如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 利用二次方程可以很好地拟合试验数据。最终得到 A_1 为 107.01 MPa, B_1 为 569.15 MPa, B_2 为 -2025.96 MPa。

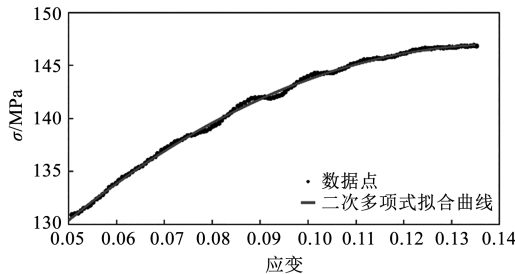


图 3 参考变形温度和应变速率条件下 σ 和 ε 的关系

Fig. 3 Relationship between σ and ε under conditions of reference deformation temperature and strain rate

在变形温度为 900 °C 的参考条件下, 式 (1) 可以被写作式 (3) 的形式, 将该温度下不同应变数据带入到式 (4) 中, 获得 $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)$ 与 $\ln\dot{\varepsilon}^*$ 的关系, 通过线性拟合可得出 C_1 为 0.10716, 拟合结果如图 4 所示。

$$\frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)} = 1 + C_1 \ln\dot{\varepsilon}^* \quad (3)$$

获得 C_1 后, 式 (1) 可以写为:

$$\frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln\dot{\varepsilon}^*)} = e^{(\lambda_1 + \lambda_2 \ln\dot{\varepsilon}^*)(T - T_r)} \quad (4)$$

将式 (4) 等号两边分别取对数, 并令 $\lambda^* = \lambda_1 + \lambda_2 \ln\dot{\varepsilon}^*$, 获得式 (5):

$$\ln \frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln\dot{\varepsilon}^*)} = \lambda^* (T - T_r) \quad (5)$$

由于 λ^* 值的不同, $\ln \frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln\dot{\varepsilon}^*)}$ 与 $T - T_r$ 之间存在 3 种拟合结果: (1) 当 $\dot{\varepsilon}^* = 1$ 时, $\lambda^* = -0.00481$, 拟合结果如图 5a 所示; (2) $\dot{\varepsilon}^* = 10$ 时, $\lambda^* = -0.00322$, 拟合结果如图 5b 所示;

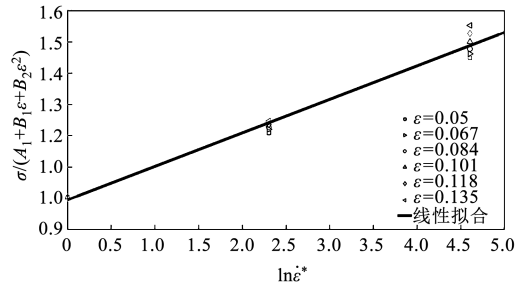


图 4 $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2) - \ln\dot{\varepsilon}^*$ 的关系

Fig. 4 Relationship of $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)$ and $\ln\dot{\varepsilon}^*$

(3) 当 $\dot{\varepsilon}^* = 100$ 时, $\lambda^* = -0.00405$, 拟合结果如图 5c 所示。最终通过线性拟合 $\ln\dot{\varepsilon}^*$ 与 λ^* 的曲线, 如图 6 所示, 可以获得 λ_1 和 λ_2 的值, 分别为 -0.00441 和 0.000165。最终, 建立的改进 JC 模型参数如表 3 所示。

2.2 DMNR 模型构建

式 (6) 为 DMNR 本构模型, DMNR 模型中包含独立影响因子方程和相互作用影响因子方程。独立影响因子是进行热模拟试验过程中对流变应力产生直接影响的因素, 包括变形温度 T 、应变 ε 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$, 具有相互作用的影响因子则是独立影响因子的耦合形式, 分别为 $\varepsilon/\dot{\varepsilon}$ 、 $T \ln\dot{\varepsilon}$ 和 $1/T\varepsilon$ 。

$$\sigma = \sigma_0 \cdot f_\varepsilon \cdot f_{\dot{\varepsilon}} \cdot f_T \cdot f_{\varepsilon-T} \cdot f_{\dot{\varepsilon}-T} \cdot f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}} \quad (6)$$

式中: σ_0 为材料常数; f_ε 为应变项; $f_{\dot{\varepsilon}}$ 为应变速率项; f_T 为温度项; $f_{\varepsilon-T}$ 为应变与温度耦合项; $f_{\dot{\varepsilon}-T}$ 为应变速率与温度耦合项; $f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}}$ 为应变与应变速率耦合项。

由于独立影响因子的平均应力与具有相互作用的影响因子的平均应力的求解方法不同, 以独立影响因子 $\dot{\varepsilon}$ 与相互影响因子 $\varepsilon - \dot{\varepsilon}$ 为例, 不同的影响因子的平均应力分别以式 (7) 和式 (8) 进行求和计算:

$$\bar{\sigma}(f_{\dot{\varepsilon}}) = \bar{\sigma}(\dot{\varepsilon}) = \sum_{\varepsilon-T} \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) / K_\varepsilon K_T \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}(f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}}) = \bar{\sigma}(\varepsilon - \dot{\varepsilon}) = \sum_T \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) / K_T \quad (8)$$

独立影响因子 $\dot{\varepsilon}$ 的平均应力的计算公式 (式 (7)) 中, $\bar{\sigma}(\dot{\varepsilon})$ 为某一应变速率下的应力平均值, 其计算方法是将某一应变速率下的应力值总和除以另两个独立影响因子 (变形温度和应变) 的水平 (K_ε 、 K_T) 的乘积。相互影响因子 $f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}}$ 的平均应力的计算公式 (式 (8)) 中, $\bar{\sigma}(\varepsilon - \dot{\varepsilon})$ 为某一应变速率和某一应变下的应力平均值, 其计算方法是: 首先, 将某一应变速率和某一应变下的应力值进行求和; 然后, 将求和得到的值仅除以另一个独立影响因子 (变形温度) 的水平 (K_T)。

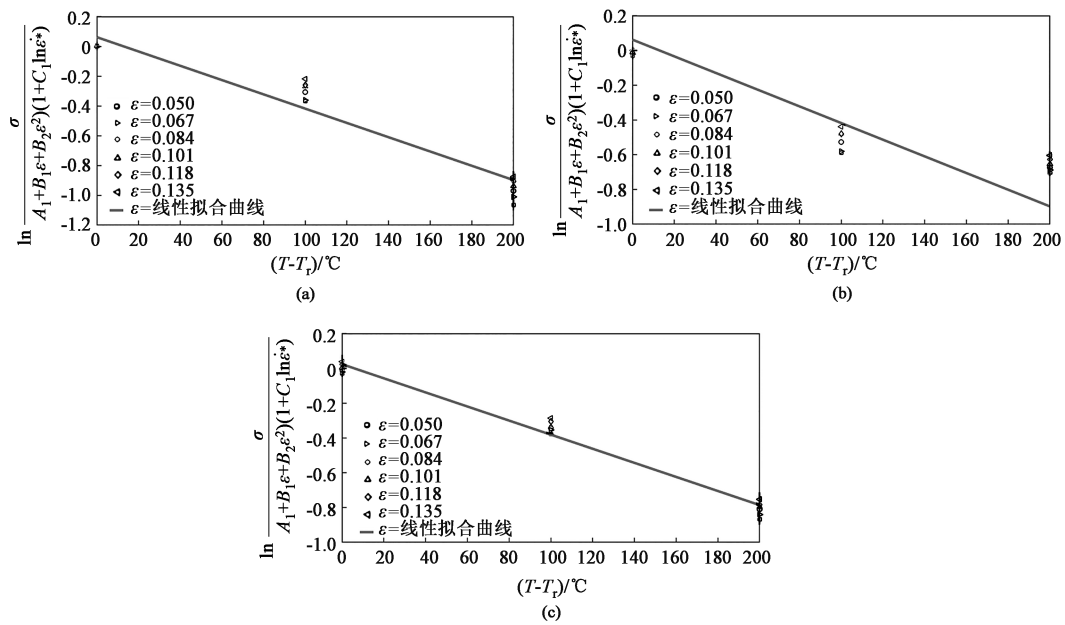


图 5 不同应变速率下 $\ln \frac{\sigma}{(A_1+B_1\varepsilon+B_2\varepsilon^2)(1+C_1\ln\dot{\varepsilon}^*)}$ 和 $(T-T_r)$ 的关系

(a) $\dot{\varepsilon}^* = 1$ (b) $\dot{\varepsilon}^* = 10$ (c) $\dot{\varepsilon}^* = 100$

Fig. 5 Relationship between $\ln \frac{\sigma}{(A_1+B_1\varepsilon+B_2\varepsilon^2)(1+C_1\ln\dot{\varepsilon}^*)}$ and $(T-T_r)$ under different strain rates

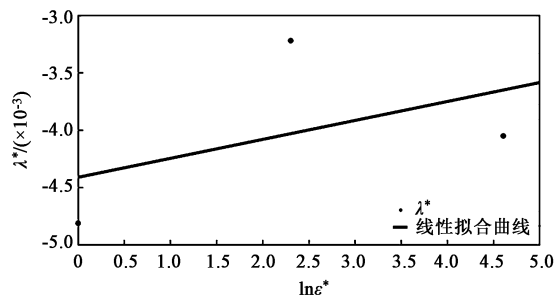


图 6 λ^* 与 $\ln\dot{\varepsilon}^*$ 的关系

Fig. 6 Relationship between λ^* and $\ln\dot{\varepsilon}^*$

表 3 改进的 JC 模型参数

Table 3 Parameters of improved JC model

参数	A_1	B_1	B_2	C_1	λ_1	λ_2
数值	107.01	569.15	-2025.96	0.10716	-0.00441	0.00016

其他影响因子的平均应力计算方法与上述方法相同。根据求解得到应力平均值，从而可以通过非线性回归方法获得贡献方程 f_i ，基于不同的影响因子，需要求解的贡献方程如表 4 所示。

热模拟试验在不同的变形温度和应变速率下进行，使用 K_T 和 K_ε 表示变形温度和应变速率的水平。本文的热拉伸试验温度选择 900、1000 和 1100 °C，因此 K_T 为 3；应变速率为 0.1、1.0 和 10.0 s⁻¹，因

表 4 需要求解的贡献方程

Table 4 Contribution equations that need to be solved

影响因子	贡献方程
ε	$f_1 = f_\varepsilon(\varepsilon)$
$\dot{\varepsilon}$	$f_2 = f_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon})$
$1/T$	$f_3 = f_T(1/T)$
$1/T\varepsilon$	$f_4 = f_{\varepsilon-T}(1/T\varepsilon)$
$T\ln\dot{\varepsilon}$	$f_5 = f_{\varepsilon-T}(T\ln\dot{\varepsilon})$
$\varepsilon/\dot{\varepsilon}$	$f_6 = f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}}(\varepsilon/\dot{\varepsilon})$

此 K_ε 为 3； K_ε 为从热拉伸的真应力、应变数据中选择数据的水平，本研究以 0.0447 的应变为间隔，在应变区间为 0.05~0.135 中选取数据，故 K_ε 为 30。

由于不同的影响因子对流变应力的影响程度不同，故引入权重系数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f ，因此，将式 (6) 改写为：

$$\ln\sigma = \ln R_{eL} + a\ln f_\varepsilon + b\ln f_{\dot{\varepsilon}} + c\ln f_T + d\ln f_{\varepsilon-T} + e\ln f_{\varepsilon-T} + f\ln f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}} \quad (9)$$

式中： R_{eL} 为某一变形条件下的屈服应力值。

通过 Matlab 软件的最小多元回归计算方法，可以解出式 (9) 中的材料常数。

图 7a 为使用五次多项式拟合不同应变的应力值 σ 与应变 ε 的结果，最终得到的贡献函数 f_ε 为：

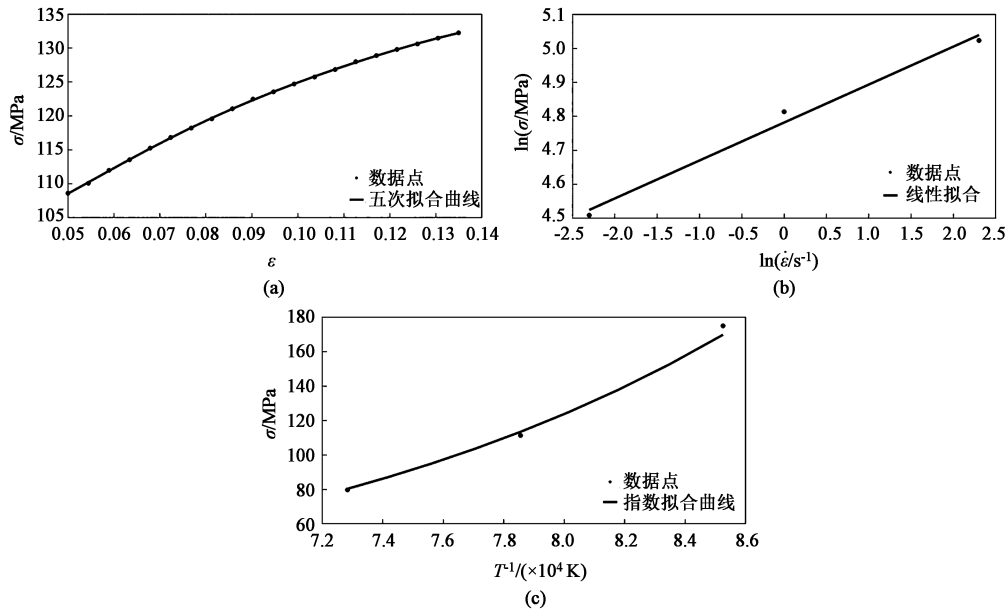


图 7 应力与不同参数的拟合结果

(a) σ - ε (b) $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$ (c) σ - $1/T$

Fig. 7 Fitting results of stress and different parameters

$$f_{\varepsilon} = -3847491.595\varepsilon^5 + 1868546.554\varepsilon^4 - 352037.134\varepsilon^3 + 30627.063\varepsilon^2 - 863.7\varepsilon + 108.6 \quad (10)$$

将不同应变速率下的平均应力和应变速率分别取对数, 将 $\ln\sigma$ 与 $\ln\dot{\varepsilon}$ 进行一次线性拟合, 拟合结果如图 7b 所示, 拟合方程为:

$$\ln\sigma = 0.1117\ln\dot{\varepsilon} + 4.781 \quad (11)$$

忽略式 (11) 中的常数项, 将等式两侧取指数, 求解得到的贡献函数 $f_{\dot{\varepsilon}}$ 为:

$$f_{\dot{\varepsilon}} = \dot{\varepsilon}^{0.1117} \quad (12)$$

计算不同变形温度下的应力值 σ , 并与温度的倒数 $1/T$ 进行指数型拟合, 拟合结果如图 7c 所示, 贡献方程则表达为:

$$f_T = \exp(6022.511/T) = \exp\left(\frac{0.1117 \times 448.337 \times 10^3}{RT}\right) \quad (13)$$

式中: R 为气体常数, 取为 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

计算一定应变速率下的平均应力 $\bar{\sigma}_{f_{\varepsilon-T}}$, 将其与耦合温度和应变的相关因子 $T\varepsilon$ 进行拟合, 如图 8a 为所示, 提取图 8a 中不同拟合曲线的斜率, 线性拟合斜率与应变之间的关系如图 8b 所示, 获得拟合曲线的斜率为 5643.856, 截距为 60.542。则 $f_{\varepsilon-T}$ 的贡献方程可以写为:

$$f_{\varepsilon-T} = \exp\left(\frac{60.542}{T} + \frac{0.1117 \times 420.155 \times 10^3}{RT}\right) \quad (14)$$

式 (14) 中的 420.155×10^3 也为活化能, 与式 (13) 中的活化能相近。观察式 (13) 与式 (14), 可以发现式 (14) 包括 f_T 贡献方程的内容, 因此, 需要将其去除, 去除后 $f_{\varepsilon-T}$ 贡献的方程被写为:

$$f_{\varepsilon-T} = \exp\left(\frac{60.542}{T} - \frac{3147.36576}{T}\right) \quad (15)$$

将一定应变下的平均应力 $\bar{\sigma}_{f_{\varepsilon-T}}$ 与耦合温度和应变速率的相关因子 $T\ln\dot{\varepsilon}$ 进行拟合, 图 8c 为 $\ln\bar{\sigma}_{f_{\varepsilon-T}}$ 与 $T\ln\dot{\varepsilon}$ 的拟合结果, 将图 8c 中曲线的斜率取平均值, 获得 $f_{\dot{\varepsilon}-T}$ 的贡献方程, 写为如下形式:

$$f_{\dot{\varepsilon}-T} = \dot{\varepsilon}^{0.00009189} \quad (16)$$

将一定温度下的平均应力 $\bar{\sigma}_{f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}}}$ 与耦合应变和应变速率的相关因子 $\varepsilon/\dot{\varepsilon}$ 进行拟合, $\ln\bar{\sigma}_{f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}}}$ 与 $\varepsilon/\dot{\varepsilon}$ 的拟合结果如图 8d 所示, 取图 8d 中的拟合曲线斜率的平均值, 最终 $f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}}$ 的贡献方程写为如下形式:

$$f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}} = \left(\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}}\right)^{-0.11165} \quad (17)$$

确定不同因子对流变应力的贡献方程之后, 材料参数 $\ln\sigma_0$ 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 f 可以通过多元回归

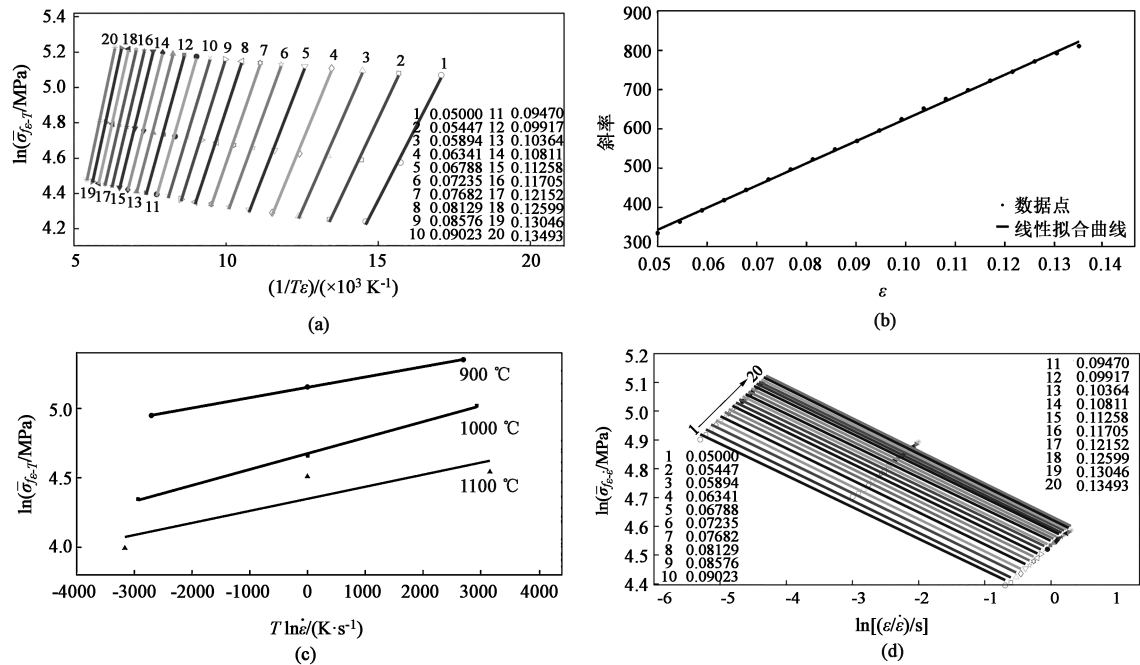


图 8 不同参数间的关系

(a) $\ln \bar{\sigma}_{f,\epsilon-T} - 1/T\epsilon$ (b) 图 8a 中拟合曲线斜率与应变 (c) $\ln \bar{\sigma}_{f,\epsilon-T} - T \ln \dot{\epsilon}$ (d) $\ln \bar{\sigma}_{f,\epsilon-T} - \ln(\dot{\epsilon}/\epsilon)$

Fig. 8 Relationships between different parameters

(a) $\ln \bar{\sigma}_{f,\epsilon-T}$ and $1/T\epsilon$ (b) Slope of fitting curve and strain in fig. 8a (c) $\ln \bar{\sigma}_{f,\epsilon-T}$ and $T \ln \dot{\epsilon}$ (d) $\ln \bar{\sigma}_{f,\epsilon-T}$ and $\ln(\dot{\epsilon}/\epsilon)$

分析进行求解，最终的求解结果如表 5 所示。

表 5 经多元回归分析获得的权重系数值

Table 5 Weighting coefficient values obtained by multiple regression analysis

参数	数值
$\ln \sigma_0$	6.78934
a	-1.19484
b	4.56303
c	-1.00432
d	-33.61778
e	1.76665
f	-5.36254

3 精度分析

基于 LZ50 车轴钢热拉伸试验数据，建立了改进的 JC 模型及 DMNR 本构模型。将表 3 及表 5 中的模型参数分别带入建立的模型中，即可用于预测 LZ50 车轴钢在不同应变、应变速率及温度条件下的流动应力。为评价两种模型的预测精度，分别将预测值与试验数据进行对比，如图 9 和图 10

所示。从图 9 和图 10 中可以发现，改进的 JC 模型及 DMNR 本构模型的预测应力值可以较好地吻合试验数据，两种模型在不同温度下具有不同的预测能力。

使用定量表征方法，可以更好地描述两种不同模型的预测精度，因此，使用相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 进行计算。相关系数 R 可以计算出试验应力值与预测应力值之间的线性关系， R 的范围在 0~1 之间，越接近 1，表示预测值越准确。 $AARE$ 为平均相对误差，该值越小，则预测应力与试验应力之间的误差也越小。表达式为：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_E - \bar{\sigma}_E)(\sigma_P - \bar{\sigma}_P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_E - \bar{\sigma}_E)^2 \sum_{i=1}^N (\sigma_P - \bar{\sigma}_P)^2}} \quad (18)$$

$$AARE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_E - \sigma_P}{\sigma_E} \right| \times 100\% \quad (19)$$

式中： σ_E 为 LZ50 轴钢热拉伸获得的试验应力值； $\bar{\sigma}_E$ 为试验应力平均值； σ_P 为不同模型的预测应力值； $\bar{\sigma}_P$ 为预测应力平均值； N 为数据点个数； i 为第 i 点的试验数据值， $i=1, 2, 3, \dots, N$ 。

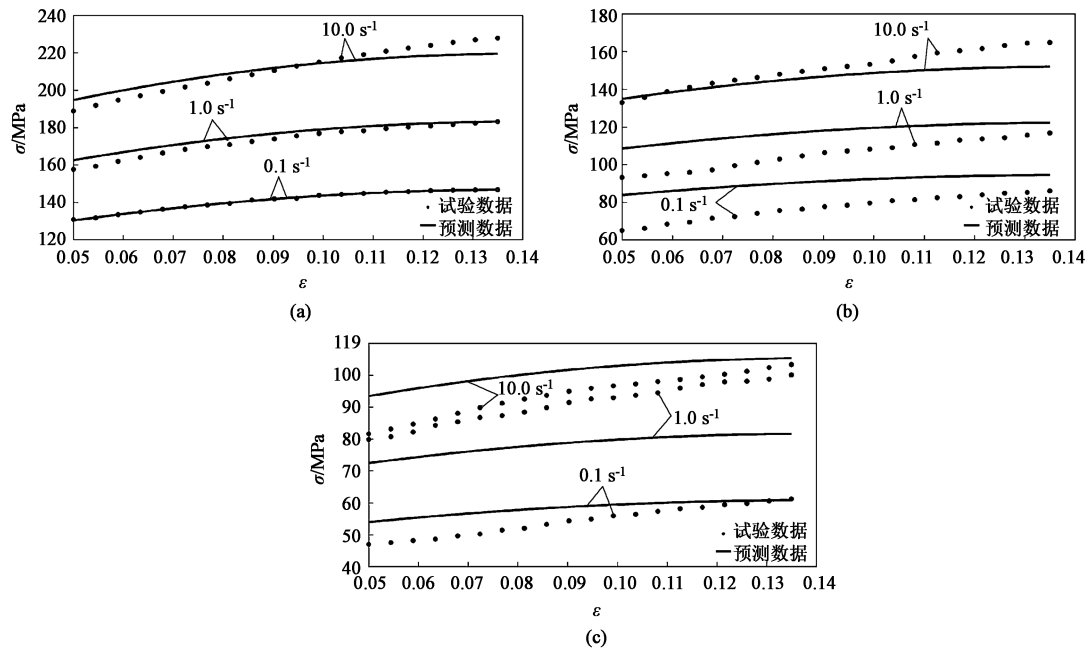


图 9 改进的 JC 模型预测值与试验值的对比

(a) 900 °C (b) 1000 °C (c) 1100 °C

Fig. 9 Comparison between predicted values by improved JC model and experimental values

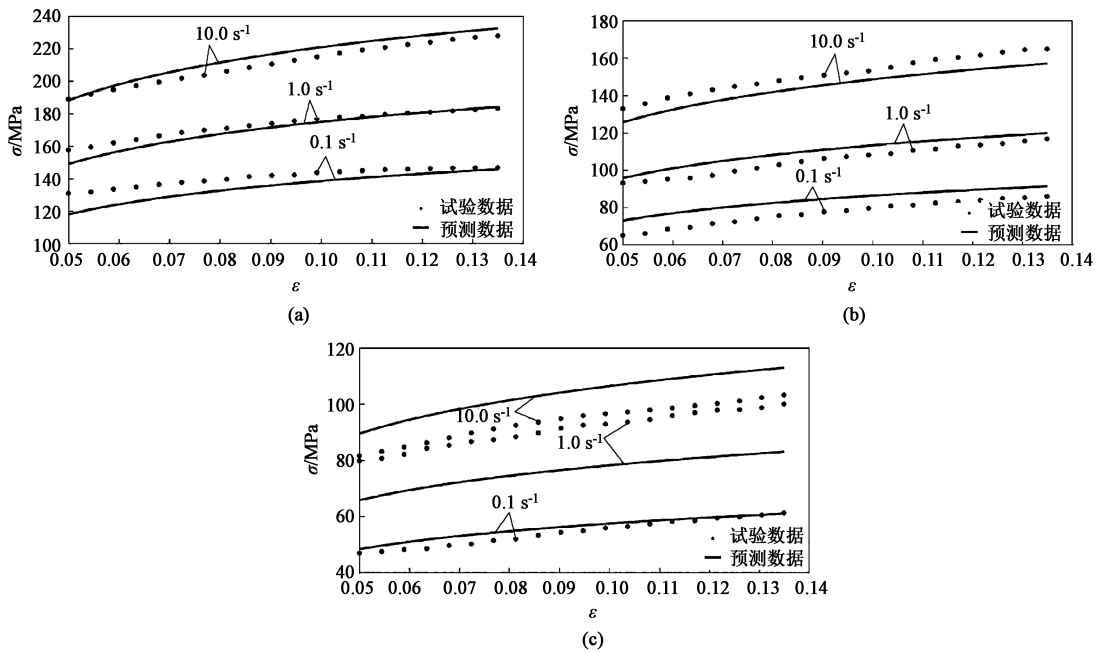


图 10 DMNR 模型预测值与试验值的对比

(a) 900 °C (b) 1000 °C (c) 1100 °C

Fig. 10 Comparison between predicted values by DMNR model and experimental values

图 11 为两种不同模型的预测精度。使用改进的 JC 模型和 DMNR 模型预测 LZ50 车轴钢的高温拉伸变形行为, 相关系数 R 分别为 0.985 和 0.986, 平均相对误差 $AARE$ 分别为 7.328% 和 6.234%。基于计算结果, 发现 DMNR 模型和改进的 JC 模型均具

有较好的预测精度。

由于两种模型在不同温度下的预测能力存在差异, 因此, 计算不同温度下两种模型的相关系数 R 值和平均相对误差 $AARE$ 值, 计算结果如表 6 所示。从表 6 中可以看出, 改进的 JC 模型对于 LZ50 车轴

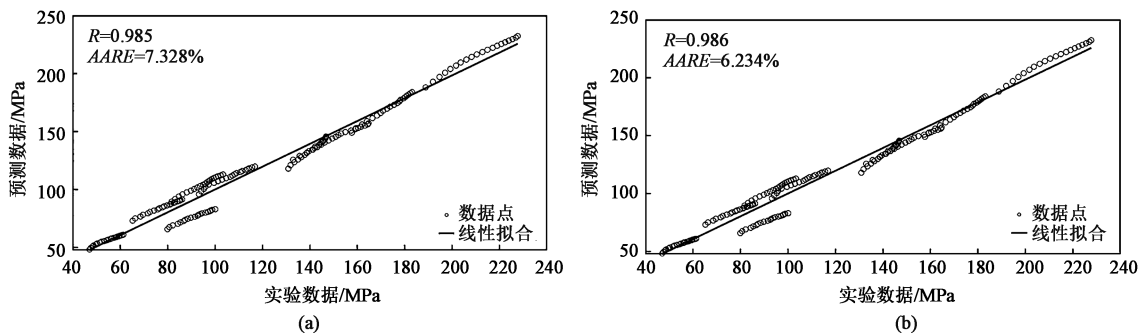


图 11 两种模型的预测精度
(a) 改进的 JC 模型 (b) DMNR 模型
Fig. 11 Prediction accuracies of two models
(a) Improved JC model (b) DMNR model

钢在 900 ℃ 变形条件下有很好的预测效果；DMNR 模型在 1000 ℃ 变形条件下具有良好的预测效果；当温度为 1100 ℃ 时，两种模型的预测精度相差不大。

表 6 两种模型在不同温度下的预测能力
Table 6 Prediction abilities of two models at different temperatures

模型	预测精度	温度/℃		
		900	1000	1100
改进的 JC 模型	R 值	0.995	0.991	0.878
DMNR 模型	R 值	0.998	0.997	0.866
改进的 JC 模型	$AARE$ 值/%	1.20	10.97	9.82
DMNR 模型	$AARE$ 值/%	4.86	6.38	10.42

4 结论

(1) 改进的 JC 模型和 DMNR 模型的相关系数 R 值分别为 0.985 和 0.986，平均相对误差 $AARE$ 值分别为 7.328% 和 6.234%。表明 DMNR 模型和改进的 JC 模型均具有较好的预测精度。

(2) 两种模型在不同温度下的预测能力存在差异，其中改进的 JC 模型在 900 ℃ 的预测能力较好， R 值和 $AARE$ 值分别为 0.995 和 1.20%。1000 ℃ 时预测能力最好的为 DMNR 模型， R 值和 $AARE$ 值分别为 0.997 和 6.38%。

参考文献：

[1] 魏文波,刁克军,范新光,等. 我国铁路车辆轮轴发展综述 [J]. 铁道车辆, 2022, 60 (3): 24-28.
Wei W B, Diao K J, Fan X G, et al. Overview of wheel-axle development of railway vehicle in China [J]. Rolling Stock, 2022,

60 (3): 24-28.

[2] 朱德彪,束学道. 工艺参数对楔横轧 GH4169 合金轴类件力能参数的影响 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (1): 52-59.
Zhu D B, Shu X D. Influence of process parameters on force and energy parameters of cross wedge rolling GH4169 alloy shaft parts [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (1): 52-59.

[3] 张钊玮,曾健,王锋华,等. 基于平面应变压缩的 AZ80 镁合金本构模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (10): 139-146.
Zhang Z W, Zeng J, Wang F H, et al. Study on constitutive model of AZ80 magnesium alloy based on plane strain compression [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (10): 139-146.

[4] Lin J B, Wang Q D, Liu M P, et al. Finite element analysis of strain distribution in ZK60 Mg alloy during cyclic extrusion and compression [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (8): 1902-1906.

[5] 顾晨,郑磊,葛琛,等. TNT 埋爆载荷下 700 MPa 高强韧钢变形行为及仿真分析 [J]. 钢铁, 2022, 57 (9): 130-137.
Gu C, Zheng L, Ge C, et al. Deformation behavior and simulation of 700 MPa steel subjected to TNT buried explosion load [J]. Iron and Steel, 2022, 57 (9): 130-137.

[6] Prawoto Y, Fanone M, Shahedi S, et al. Computational approach using Johnson-Cook model on dual phase steel [J]. Computational Materials Science, 2012, 54: 48-55.

[7] Ranc N, Chryschoos A. Calorimetric consequences of thermal softening in Johnson-Cook's model [J]. Mechanics of Materials, 2013, 65: 44-55.

[8] 张春菊,丁轩,杨明球,等. DP980 钢的动态力学性能及本构模型构建 [J]. 钢铁, 2022, 57 (2): 157-161.
Zhang C J, Ding X, Yang M Q, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive model of DP980 steel [J]. Iron and Steel, 2022, 57 (2): 157-161.

[9] Liang R Q, Khan A S. A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range

- of strain rates and temperatures [J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15 (9): 963-980.
- [10] Li Z X, Zhan M, Fan X G, et al. A modified Johnson-Cook model of as-quenched AA2219 considering negative to positive strain rate sensitivities over a wide temperature range [J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 155-160.
- [11] 黄东英, 徐亮, 刘晓红. 冲击载荷下中碳低合金钢的动态力学性能与 J-C 本构模型的改进 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 225-230.
- Huang D Y, Xu L, Liu X H. Dynamic mechanical properties of medium carbon low alloy steel under and improvement of J-C constitutive model under impact load [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 225-230.
- [12] Lin Y C, Chen X M, Liu G. A modified Johnson-Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527 (26): 6980-6986.
- [13] Yuan Z, Li F, Qiao H, et al. A modified constitutive equation for elevated temperature flow behavior of Ti-6Al-4V alloy based on double multiple nonlinear regression [J]. Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2013, 578: 260-270.
- [14] Shen M L, Huo Y M, He T, et al. Comparison of two constitutive modelling methods in application of TC16 alloy at the elevated deformation temperature [J]. Materials Today Communications, 2020, 24: 101053.
- [15] 郑晓华, 柏永青, 贾晓斌. 车轴用 LZ50 钢的热变形行为及高温塑性本构方程 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (10): 31-34.
- Zheng X H, Bai Y Q, Jia X B. Hot deformation behavior and high temperature plastic constitutive equation of LZ50 steel for axle [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (10): 31-34.
- [16] 李诗谦, 何涛, 杜向阳, 等. 修正的 J-C 和 Z-A 模型对 LZ50 钢高温流变应力预测 [J]. 钢铁, 2023, 58 (4): 148-156.
- Li S Q, He T, Du X Y, et al. Prediction of flow stress of LZ50 steel at high temperature by modified J-C and Z-A models [J]. Iron & Steel, 2023, 58 (4): 148-156.
- [17] Du S W, Chen S M, Song J J, et al. Hot deformation behavior and dynamic recrystallization of medium carbon LZ50 steel [J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2017, 48 (3): 1310-1320.
- [18] 林龙飞. 大型轴类零件柔性斜轧工艺及关键技术研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- Lin L F. Research on the Key Technology of Flexible Skew Rolling Process for Large Shafts [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.

“第 21 届国际制造研究会议 (21st International Conference on Manufacturing Research, ICMR 2024)” 征文通知

第 21 届国际制造研究会议 (21st International Conference on Manufacturing Research, ICMR 2024) 将于 2024 年 8 月 28-30 日于英国苏格兰格拉斯哥举办, 同期召开第 38 届英国制造研究全国会议。

ICMR 由英国大学制造和工程负责人联合会 (COMEh) 发起, 是英国主要的制造研究会议, 自 2003 年起发展为国际会议, 旨在将研究人员、学者和企业界人士聚集在一起, 分享他们的愿景、知识和经验, 共同探讨新兴趋势和新挑战。随着 21 世纪制造业全球化进程的加快, 与时俱进的迫切需求推动了技术、研究和创新的快速发展。ICMR 征集有关前沿和新兴理论研究及其最新工业应用的论文, 旨在汇集全球学术、政府和工业组织的实践和理论知识。

组织单位

主办单位: The University of Strathclyde, UK

协办单位: COMEH, UK

中国机械工程学会塑性工程分会

重要日期、内容

- 2024 年 3 月 30 日, 全文投稿截止
- 2024 年 5 月 1 日, 通知全文审理结果
- 2024 年 5 月 16 日, 最终投稿截止
- 2024 年 7 月 15 日, 提前缴费截止
- 2024 年 8 月 20 日, 最终注册截止

会议网址: <https://www.icmr.org.uk/>

联系方式

联系人: Dr. Jie Zhao, ICMR2024 Administrator, The University of Strathclyde

地 址: Department of Design, Manufacturing & Engineering Management Glasgow, G1 1XJ UK

电 话: +44 (0) 141 574 5155, 邮箱: j.zhao@strath.ac.uk

中国机械工程学会塑性工程分会