

18CrNiMo7-6 合金钢 Zerilli-Armstrong 本构模型的建立及修正

郭自洋¹, 王 伟^{1,2}, 马世博^{1,2}, 闫华军^{1,2}, 穆振凯^{1,2}

(1. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018;

2. 河北科技大学 河北省材料近净成形技术重点实验室, 河北 石家庄 050018)

摘要: 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机在应变速率为 $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为 $700 \sim 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 对 18CrNiMo7-6 合金钢实施等温压缩试验, 获得 18CrNiMo7-6 合金钢在不同条件下的真实应力-真实应变曲线, 分析其热变形行为。构建了 18CrNiMo7-6 合金钢的 Zerilli-Armstrong (Z-A) 本构模型, 描述其热变形行为。通过对比分析 Z-A 本构模型的预测值与等温压缩试验的试验值发现, 预测值与试验值的线性相关系数为 0.9750, 平均相对误差为 8.1792%。为了进一步提高模型的预测精度, 采用应变的 5 阶多项式描述 Z-A 本构模型中与应变有关的材料参数, 实现对模型的修正, 修正后的 Z-A 本构模型的预测值与试验值的线性相关系数为 0.9853, 平均相对误差为 5.5358%, 有效提高了本构模型的预测精度。

关键词: 18CrNiMo7-6 合金钢; Zerilli-Armstrong 本构模型; 热变形行为; 等温压缩试验; 模型修正

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.031

中图分类号: TG386.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 04-0235-07

Establishment and modification on Zerilli-Armstrong constitutive model for 18CrNiMo7-6 alloy steel

Guo Ziyang¹, Wang Wei^{1,2}, Ma Shibo^{1,2}, Yan Huajun^{1,2}, Mu Zhenkai^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. Hebei Key Laboratory of Material Near-net Forming Technology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: For 18CrNiMo7-6 alloy steel, the isothermal compression tests were conducted under the conditions of the strain rate of $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ and the deformation temperature of $700 \sim 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ by Gleeble-3500 thermal simulation test machine, and the true stress-true strain curves of 18CrNiMo7-6 alloy steel under different conditions were obtained. Then, the thermal deformation behavior of 18CrNiMo7-6 alloy steel was analyzed, and the Zerilli-Armstrong (Z-A) constitutive model of 18CrNiMo7-6 alloy steel was constructed to describe its thermal deformation behavior. By comparing and analysing the predicted value of Z-A constitutive model with the test value of isothermal compression test, it was found that the linear correlation coefficient between the predicted and test values was 0.9750, and the average relative error was 8.1792%. In order to further improve the prediction accuracy of the model, the fifth-order polynomial of strain was used to describe the material parameters related to strain in Z-A constitutive model, and the model was modified. The linear correlation coefficient between the predicted value of the modified Z-A constitutive model and the test value was 0.9853, and the average relative error was 5.5358%, which effectively improved the prediction accuracy of the constitutive model.

Key words: 18CrNiMo7-6 alloy steel; Zerilli-Armstrong constitutive model; thermal deformation behavior; isothermal compression test; model modification

18CrNiMo7-6 合金钢具有高强度、高耐磨性、高冲击韧性等特点^[1], 因此在机械领域具有广泛的应用, 是齿轮、轴承和传动轴等关键零部件的重要

选材^[2-5]。高温本构模型是描述金属材料热变形行为的数学表达式, 建立更加准确的本构模型来描述 18CrNiMo7-6 合金钢的热变形行为, 对于该材料热成形工艺的研究是极为重要的。

目前, 对于 18CrNiMo7-6 合金钢本构模型的研究集中于 Arrhenius 和 Johnson-Cook 本构模型。Cao R Z 等^[6]分析了 18CrNiMo7-6 合金钢的热变形和动态再结晶行为, 构建了表征参数和物理基参数 Arrhenius 本构模型, 这两种模型的预测值与实测值之间的相关系数分别为 0.98378 和 0.97613。吴少洋

收稿日期: 2023-08-17; 修订日期: 2023-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52205353); 河北省自然科学基金资助项目 (E2021208025, E2020208044)

作者简介: 郭自洋 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 15613314604@163.com

通信作者: 王 伟 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: 18631175658@163.com

等^[7]研究了 18CrNiMo7-6 合金钢 Johnson-Cook 损伤模型,并验证了所选用的 Johnson-Cook 损伤模型的合理性以及试验所得参数的有效性。徐广涛等^[8]选用 Johnson-Cook 模型描述了 18CrNiMo7-6 合金钢的动态力学性能,并通过离式霍布金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 试验的有限元模拟验证了模型的可靠性。谢一夔等^[9]研究了 18CrNiMo7-6 合金钢的热变形行为及组织的演变规律,并建立了唯象型 Arrhenius 本构方程,模型预测的峰值应力与试验数据比较吻合。此外,王刚等^[10]基于晶体塑性有限元方法对 18CrNiMo7-6 合金钢室温下的晶体塑性参数进行了研究,结果表明,有限元得到的应力-应变曲线与试验曲线有很好的 consistency。

除了 Arrhenius 和 Johnson-Cook 模型, Zerilli-Armstrong (Z-A) 本构模型亦常用于描述金属材料的热变形行为。Zerilli-Armstrong 本构模型是基于位错动力学的,但模型的参数仍然是通过拟合材料的应力-应变曲线来确定,这与 Johnson-Cook 模型类似。因此, Zerilli-Armstrong 本构模型仍是一种半经验模型。由于 Zerilli-Armstrong 本构模型不仅考虑了应变速率和温度的耦合效应,而且考虑了特定结构的位错特征,因此一些学者更倾向于采用 Zerilli-Armstrong 本构模型^[11]。

He A 等^[12]采用改进的 Zerilli-Armstrong 本构模型描述了 20CrMo 合金钢的热变形行为,实测流变应力与计算流变应力的相关系数为 0.989,平均相对误差为 7.71%。Gurusamy M M 等^[13]采用改进的 Zerilli-Armstrong 本构模型对金属切削过程中的性能进行了模拟研究,验证了所提出的本构模型的有效性。Cai J 等^[14]分别采用 Johnson-Cook、修正的 Zerilli-Armstrong 和应变补偿的 Arrhenius 模型预测了 Ti-6Al-4V 合金 $\alpha+\beta$ 相的高温流动行为,结果表明, Johnson-Cook 本构模型不能很好地描述 Ti-6Al-4V 合金 $\alpha+\beta$ 相的流变行为,而修正的 Zerilli-Armstrong 和 Arrhenius 模型除在某些变形条件外,其预测结果与试验值吻合较好。此外,改进的 Zerilli-Armstrong 本构模型在整个温度和应变速率范围内,比其他模型能够更准确地跟踪变形行为。Samantaray D 等^[15]分别采用 Johnson-Cook、修正的 Zerilli-Armstrong 和 Arrhenius 模型预测了 9Cr-1Mo 钢的高温流动行为,结果表明 Johnson-Cook 模型不能很好地描述改性 9Cr-1Mo 钢的流动行为,另外两个模型的预测结果与试验数据吻合较好。

目前,尚缺乏采用 Zerilli-Armstrong 本构模型描述 18CrNiMo7-6 合金钢热变形行为的相关研究报道,因此,本文以 18CrNiMo7-6 合金钢为研究对象,通

过等温压缩试验获得了其真实应力-真实应变曲线,构建了 18CrNiMo7-6 合金钢的 Zerilli-Armstrong 本构模型,并对模型进行了修正,以提高模型的预测精度。

1 试验材料及试验方案

试验材料为 18CrNiMo7-6 合金钢,采用直读光谱仪测定其化学成分,结果列于表 1。使用 Gleeble-3500 热模拟试验机实施试验材料的等温压缩试验,试样尺寸为 $\Phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,试验前在试样的端面涂抹高温润滑膏并覆盖钼片,以减小摩擦的影响^[16]。压缩前以 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的升温速率分别升温至变形温度为 700、800、900 和 1000 $^{\circ}\text{C}$,并保温 2 min,以消除试样各区域的温度梯度,压缩应变速率分别为 0.001、0.01、0.1 和 1 s^{-1} ,试样高度方向的压缩量为 60%。通过等温压缩试验获得的 18CrNiMo7-6 合金钢在不同变形条件下的真实应力-真实应变曲线如图 1 所示。该材料的流变曲线呈现出流变应力随着应变速率的上升或变形温度的下降而增加的规律,遵循典型钢铁材料的热变形行为。

表 1 18CrNiMo7-6 合金钢化学成分 (% , 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of 18CrNiMo7-6 alloy steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.21	0.34	0.72	0.01	0.004	1.58	1.4	0.26	余量

需要指出的是,当变形温度为 700 $^{\circ}\text{C}$ 时 (图 1a),在压缩变形初期,流变应力会随应变的增加而迅速升高,达到屈服强度后呈缓慢下降趋势,其曲线特征与其他变形温度存在明显区别。根据铁碳相图可知,碳钢的共析转变温度为 727 $^{\circ}\text{C}$,而合金元素的添加会引起共析转变温度的变化,特别是 Ni 元素具有扩大奥氏体相区的作用,即 Ni 元素的添加会导致共析转变温度降低。由于 18CrNiMo7-6 合金钢中含有 Ni 元素,因此,其共析转变温度可能降低至 700 $^{\circ}\text{C}$ 左右,在此温度下 18CrNiMo7-6 合金钢未完全奥氏体化,这可能是导致该变形温度下真实应力-真实应变曲线特殊的原因。

2 Zerilli-Armstrong 本构模型的建立

2.1 模型参数求解

Zerilli-Armstrong 本构模型如式 (1) 所示:

$$\sigma = (C_1 + C_2 \varepsilon^n) \exp[-(C_3 + C_4 \varepsilon) T^* + (C_5 + C_6 T^*) \ln \dot{\varepsilon}^*] \quad (1)$$

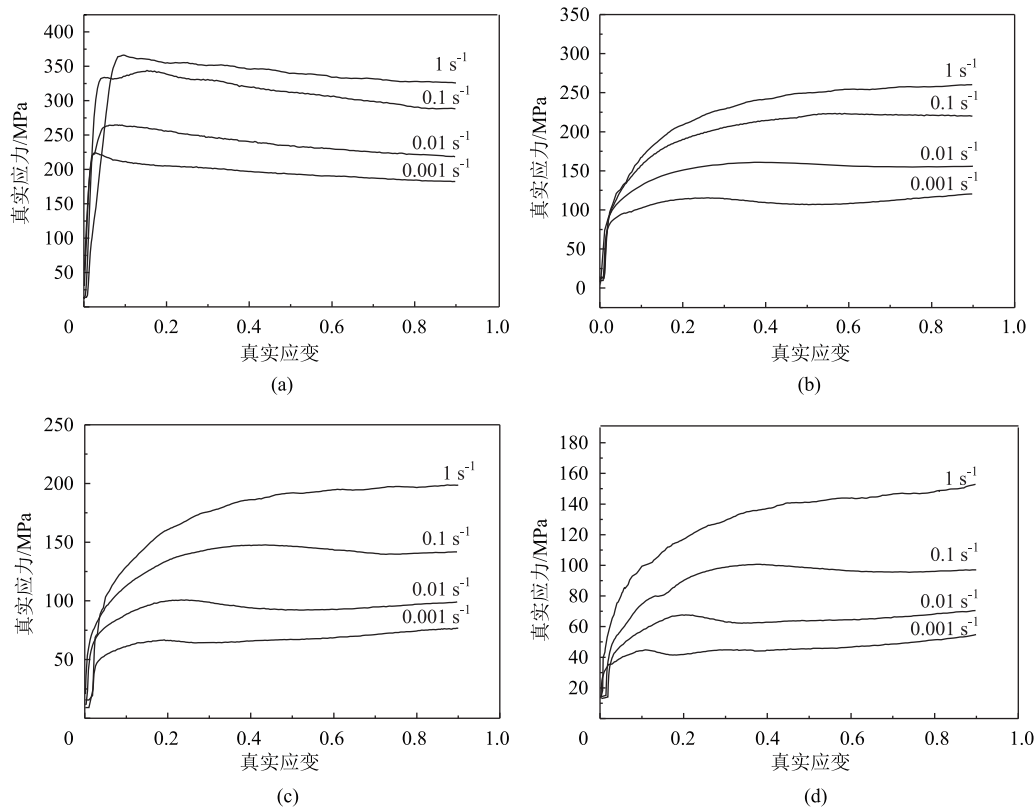


图1 18CrNiMo7-6 合金钢的真实应力-真实应变曲线

(a) 700 °C (b) 800 °C (c) 900 °C (d) 1000 °C

Fig.1 True stress-true strain curves of 18CrNiMo7-6 alloy steel

式中: σ 为应力; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲的塑性应变速率, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_r$; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; $\dot{\varepsilon}_r$ 为参考应变速率; T^* 为试验温度与参考温度的差值, $T^* = T - T_{ref}$; T 为试验温度; T_{ref} 为参考温度; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 和 n 为材料常数。

以最低变形温度 700 °C 为参考温度、最小应变速率 0.001 s^{-1} 为参考应变速率, 将式 (1) 取对数可简化为式 (2)。 C_1 在数值上等于参考温度和参考应变速率下的屈服应力值 (应变为 0.2% 时的应力值), 其值为 64.15 MPa, 即 $C_1 = 64.15$ 。当应变速率等于参考应变速率 0.001 s^{-1} 时, $\dot{\varepsilon}^*$ 为 1, $\ln \dot{\varepsilon}^* = 0$, 式 (2) 可以进一步化简为式 (3)。

$$\ln \sigma = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^n) - (C_3 + C_4 \varepsilon) T^* + (C_5 + C_6 T^*) \ln \dot{\varepsilon}^* \quad (2)$$

$$\ln \sigma = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^n) - (C_3 + C_4 \varepsilon) T^* \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 取 4 组温度下与之对应的真实应力值, 线性拟合 $\ln \sigma$ 与 T^* 的关系曲线, 其截距 B_1 和斜率 K_1 分别为 $\ln(C_1 + C_2 \varepsilon^n)$ 和 $-(C_3 + C_4 \varepsilon)$, 如式 (4) 和式 (5) 所示。

将式 (4) 变形为式 (6), 线性拟合 ε 与

$\ln(\exp B_1 - C_1)$ 的关系曲线, 其截距 B_2 和斜率 K_2 分别为 $\ln C_2$ 和 n , 经计算, $C_2 = 116.42066$, $n = -0.05186$ 。同理, C_3 、 C_4 的值可通过求解式 (5) 的截距和斜率求得, $C_3 = 0.00565$, $C_4 = -0.00168$ 。

$$B_1 = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^n) \quad (4)$$

$$K_1 = -(C_3 + C_4 \varepsilon) \quad (5)$$

$$\ln(\exp B_1 - C_1) = \ln C_2 + n \ln \varepsilon \quad (6)$$

令 $S_2 = C_5 + C_6 T^*$, 再对式 (1) 两侧取自然对数, 可得式 (7)。

$$\ln \sigma = \ln B_1 + K_1 T^* + S_2 \ln \dot{\varepsilon}^* \quad (7)$$

将上述所求的 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 和 n 的值代入式 (7) 并取自然对数, 对不同温度条件下的 $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 进行线性拟合, 采用线性回归求解模型参数 C_5 和 C_6 。对变形温度为 700 °C (即 $T^* = 0$) 条件下的数据进行线性拟合, 通过求解平均斜率, 可求得该条件下 $S_2 = 0.0827466$ 。再以相同的方式, 求得其他 3 个变形温度下的 S_2 分别为 0.107012777、0.140725611 和 0.153073888, 再根据 $S_2 = C_5 + C_6 T^*$ 将 S_2 与 T^* 进行线性拟合, 可得截距 $C_5 = 0.08419$, 斜率 $C_6 = 0.000244$ 。

通过上述参数求解，Zerilli-Armstrong 本构模型的 7 个待定参数已全部完成求解，各参数的值列于表 2，本研究的热变形条件下 18CrNiMo7-6 合金钢的

Zerilli-Armstrong 本构模型如式（8）所示。
$$\sigma = (64.15 + 116.42066\varepsilon^{-0.05186})\exp[-(0.00565 - 0.00168\varepsilon)T^* + (0.08419 + 0.000244T^*)\ln\dot{\varepsilon}^*] \quad (8)$$

表 2 Zerilli-Armstrong 本构模型参数

Table 2 Parameters of Zerilli-Armstrong constitutive model

参数	n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
数值	-0.05186	64.15	116.42066	0.00565	-0.00168	0.08419	0.000244

2.2 模型精度检测

在试验的应变范围内，每间隔 0.05 取值，将其代入式（8）计算应力的预测值。将预测值与试验值对

比，如图 2 所示，结果发现所构建的 Zerilli-Armstrong 本构模型并不能很好地描述所有变形条件下的热变形行为，尤其在低应变区（0~0.2）的预测精度较差。

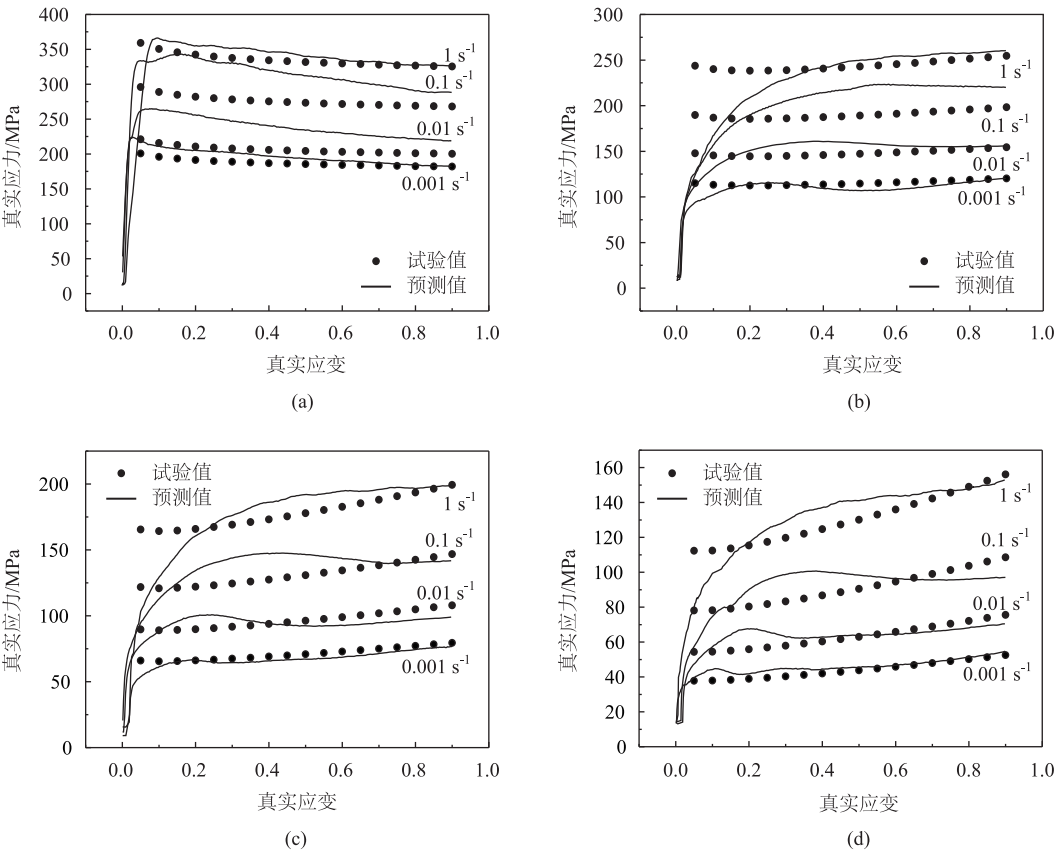


图 2 Zerilli-Armstrong 模型预测值与试验值对比分析
(a) 700 °C (b) 800 °C (c) 900 °C (d) 1000 °C

Fig. 2 Comparative analysis between predicted values of Zerilli-Armstrong constitutive model and test values

为了进一步量化分析构建的 Zerilli-Armstrong 本构模型的预测精度，采用相关系数 R （式（9））和平均相对误差 $AARE$ （式（10））定量分析模型的预测精度。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}}^i - \bar{\sigma}_{\text{exp}})(\sigma_{\text{p}}^i - \bar{\sigma}_{\text{p}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}}^i - \bar{\sigma}_{\text{exp}})^2 \sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{p}}^i - \bar{\sigma}_{\text{p}})^2}} \quad (9)$$

$$AARE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_{\text{p}}^i - \sigma_{\text{exp}}^i}{\sigma_{\text{exp}}^i} \right| \times 100\% \quad (10)$$

式中： σ_{exp}^i 为试验测得的第 i 个观测点的应力值； σ_{p}^i 为模型的第 i 个观测点的预测值； $\bar{\sigma}_{\text{exp}}$ 和 $\bar{\sigma}_{\text{p}}$ 分别为应力试验值和预测值的平均值； N 为选取的观测点的数量。

计算结果表明，本构模型的预测值与试验值的

相关系数为 0.9750, 平均相对误差为 8.1792%。

3 本构模型修正及精度分析

Zerilli-Armstrong 本构模型的部分材料参数, 如 B_1 、 K_1 、 C_5 、 C_6 , 会随应变的变化而波动, 这是导致模型预测精度低的主要原因。因此, 若要使模型预测的热变形行为与实际更加吻合, 还应探究应变对材料参数的影响。可以将本构模型中与应变相关的材料参数 (B_1 、 K_1 、 C_5 、 C_6) 通过应变的高阶多项式表示, 以提高材料参数的准确性, 进而提高本构模型的预测精度。

在式 (1) 的基础上, 令 $B_1 = C_1 + C_2\varepsilon^n$ 、 $K_1 = C_3 + C_4\varepsilon$, 并用应变的五阶多项式描述材料参数 B_1 、 K_1 、 C_5 、 C_6 , 构建修正的 Zerilli-Armstrong 本构模型, 如式 (11) 所示, 其中, $a_1 \sim a_6$ 、 $b_1 \sim b_6$ 、 $d_1 \sim d_6$ 、 $e_1 \sim e_6$ 分别为对应多项式的系数。

$$\begin{cases} \sigma = B_1 \exp[-(K_1)T^* + (C_5 + C_6 T^*) \ln \dot{\varepsilon}^*] \\ \exp B_1 = a_1 + a_2 \varepsilon + a_3 \varepsilon^2 + a_4 \varepsilon^3 + a_5 \varepsilon^4 + a_6 \varepsilon^5 \\ \exp K_1 = b_1 + b_2 \varepsilon + b_3 \varepsilon^2 + b_4 \varepsilon^3 + b_5 \varepsilon^4 + b_6 \varepsilon^5 \\ \exp C_5 = d_1 + d_2 \varepsilon + d_3 \varepsilon^2 + d_4 \varepsilon^3 + d_5 \varepsilon^4 + d_6 \varepsilon^5 \\ \exp C_6 = e_1 + e_2 \varepsilon + e_3 \varepsilon^2 + e_4 \varepsilon^3 + e_5 \varepsilon^4 + e_6 \varepsilon^5 \end{cases} \quad (11)$$

上文已求得 C_1 的值, 经公式转换, 可将 $\ln(\exp B_1 - C_1)$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 的关系转换为 $\exp B_1$ 与应变 ε 的关系, 在试验范围内, 应变每间隔 0.05, 采用线性回归的方法分别求解 $\exp B_1$ 的值, 并采用应变的五阶多项式描述 $\exp B_1$, 将式 (11) 中 $\exp B_1$ 多项式的系数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 列于表 3。采用相同的方法, 使用应变的五阶多项式分别描述 $\exp K_1$ 、 $\exp C_5$ 和 $\exp C_6$, 式 (11) 中对应的多项式系数亦列于表 3, 将表 3 中的各系数带入式 (11), 即得到 18CrNiMo7-6 合金钢修正的 Zerilli-Armstrong 本构模型。

表 3 Zerilli-Armstrong 本构模型的修正参数

Table 3 Modified parameters of Zerilli-Armstrong constitutive model

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
a_1	185.03061	b_1	-0.00617	d_1	-0.01781	e_1	0.00038804
a_2	113.14834	b_2	0.01474	d_2	1.31504	e_2	-0.00424
a_3	-171.59126	b_3	-0.08471	d_3	-6.42892	e_3	0.02799
a_4	-731.16451	b_4	0.21682	d_4	14.64844	e_4	-0.07032
a_5	1698.03647	b_5	-0.2405	d_5	-15.36686	e_5	0.07589
a_6	-931.03346	b_6	0.09692	d_6	5.9943	e_6	-0.02977

图 3 为修正的 Zerilli-Armstrong 本构模型的预测值与试验值的对比分析结果, 可以发现修正后模型的预测精度大幅提高, 可以较好地描述 18CrNiMo7-6 合金钢的热变形行为。

同样采用相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 定量分析模型的预测精度, 结果表明修正的 Zerilli-Armstrong 本构模型的预测值与试验值的相关系数为 0.9853, 平均相对误差为 5.5358%, 模型的预测精度较修正前得到了有效提升。

4 结论

(1) 18CrNiMo7-6 合金钢在应变速率为 $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为 $700 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下时, 流变应力随着应变速率的上升或变形温度的下降而增加, 遵循典型钢铁材料的热变形行为。但是, 当

变形温度为 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 在压缩变形初期, 流变应力随着应变的增加而迅速升高, 达到屈服强度后呈缓慢下降趋势, 其曲线特征与其他变形温度存在明显区别。

(2) 在应变速率为 $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为 $700 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 18CrNiMo7-6 合金钢的 Zerilli-Armstrong 本构模型为: $\sigma = (64.15 + 116.42066\varepsilon^{-0.05186}) \exp[-(0.00565 - 0.00168\varepsilon)T^* + (0.08419 + 0.000244T^*) \ln \dot{\varepsilon}^*]$ 。该模型对低应变区的预测精度偏低, 模型的预测值与试验值的相关系数为 0.9750, 平均相对误差为 8.1792%。

(3) 将 Zerilli-Armstrong 本构模型中与应变相关的材料参数通过应变的高阶多项式表示, 能够提高材料参数的准确性, 进而提高本构模型的预测精度。构建的修正的 Zerilli-Armstrong 本构模型的预测值与试验值的相关系数为 0.9853, 平均相对误差为

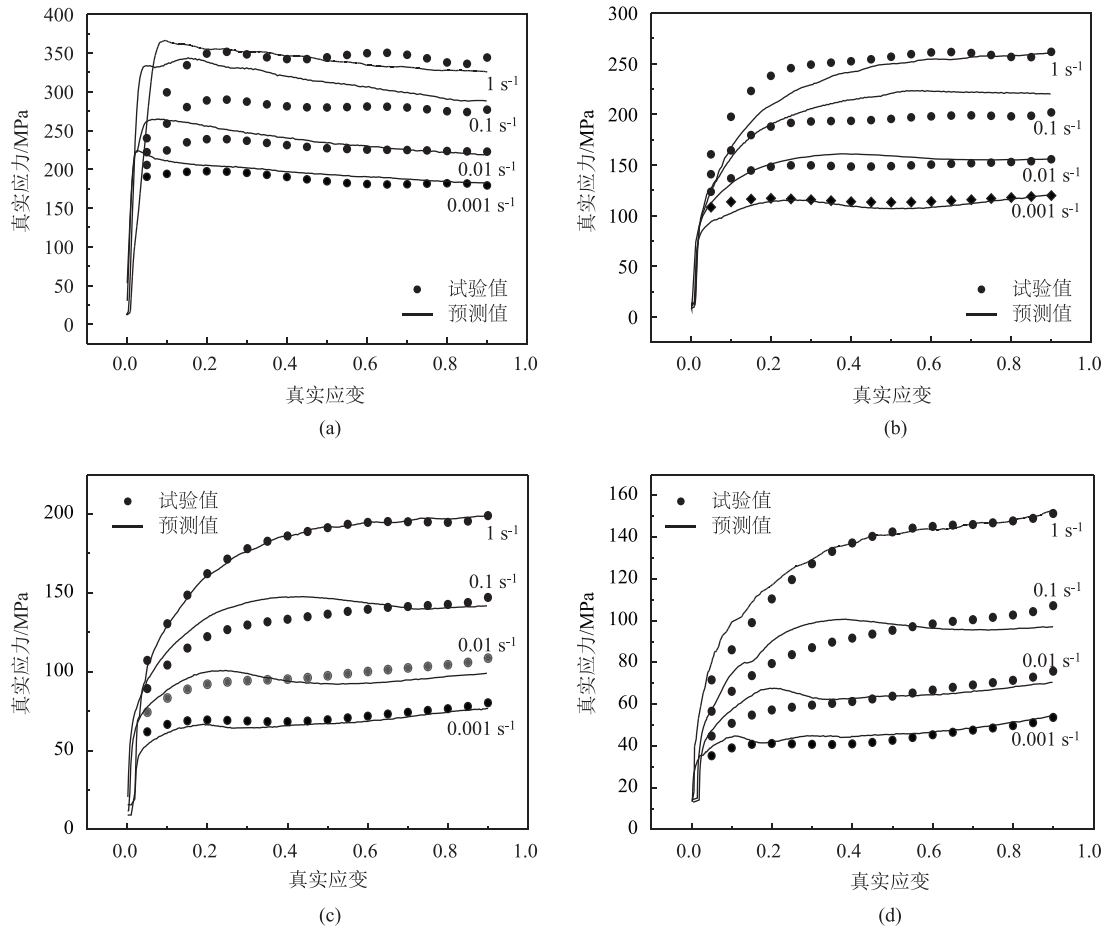


图3 修正的 Zerilli-Armstrong 本构模型预测值与试验值对比分析

(a) 700 °C (b) 800 °C (c) 900 °C (d) 1000 °C

Fig. 3 Comparative analysis between predicted values of modified Zerilli-Armstrong constitutive model and test values

5.5358%，修正后的模型在整个应变范围内具有较好的预测精度。

参考文献：

- [1] Wu J Z, Wei P T, Liu H J, et al. Effect of shot peening intensity on surface integrity of 18CrNiMo7-6 steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127194.
- [2] Xu G T, Luo J, Lu F Q, et al. Characterization of fracture toughness for surface-modified layer of 18CrNiMo7-6 alloy steel after carburizing heat treatment by indentation method [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 269: 108508.
- [3] Qin S W, Wang L X, Di L Y, et al. Effect of carburizing process on bending fatigue performance of notched parts of 18CrNiMo7-6 alloy steel [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 147: 107161.
- [4] Krawczyk J, Pawłowski B, Bała P. Banded microstructure in forged 18CrNiMo7-6 steel [J]. Metallurgy and Foundry Engineering, 2009, 35 (1): 45-53.
- [5] Fu P, Jiang C. Residual stress relaxation and micro-structural development of the surface layer of 18CrNiMo7-6 steel after shot peening during isothermal annealing [J]. Materials & Design, 2014, 56: 1034-1038.
- [6] Cao R Z, Wang W, Ma S B, et al. Arrhenius constitutive model and dynamic recrystallization behavior of 18CrNiMo7-6 steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 6334-6347.
- [7] 吴少洋, 张建伟, 卢凤强, 等. 18CrNiMo7-6 合金钢 J-C 损伤模型失效参数研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2023, 44 (1): 70-76.
Wu S Y, Zhang J W, Lu F Q, et al. Investigation on failure parameters of J-C damage model of 18CrNiMo7-6 alloy steel [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering and Technology Edition, 2023, 44 (1): 70-76.
- [8] 徐广涛, 卢凤强, 吴少洋, 等. 18CrNiMo7-6 合金钢的动态本构参数确定 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (8): 49-53.
Xu G T, Lu F Q, Wu S Y, et al. Determination of dynamic constitutive parameters for 18CrNiMo7-6 alloy steel [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (8): 49-53.
- [9] 谢一夔, 王启丞, 陈子坤, 等. 18CrNiMo7-6 齿轮钢的热变形行为

- 及组织演变规律 [J]. 金属热处理, 2023, 48 (2): 103-109.
- Xie Y K, Wang Q C, Chen Z K, et al. Hot deformation behavior and microstructure evolution of 18CrNiMo7-6 gear steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48 (2): 103-109.
- [10] 王刚, 宋建, 张建伟, 等. 基于多晶体模型的 18CrNiMo7-6 合金钢本构参数确定 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2020, 41 (2): 38-43.
- Wang G, Song J, Zhang J W, et al. Constitutive parameters of 18CrNiMo7-6 alloy determined by a polycrystalline model [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering and Technology Edition, 2020, 41 (2): 38-43.
- [11] Zhan H Y, Wang G, Kent D, et al. Constitutive modelling of the flow behaviour of a β titanium alloy at high strain rates and elevated temperatures using the Johnson-Cook and modified Zerilli-Armstrong models [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 612: 71-79.
- [12] He A, Xie G L, Zhang H L, et al. A modified Zerilli-Armstrong constitutive model to predict hot deformation behavior of 20CrMo alloy steel [J]. Materials & Design, 2014, 56: 122-127.
- [13] Gurusamy M M, Rao B C. On the performance of modified Zerilli-Armstrong constitutive model in simulating the metal-cutting process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 28: 253-265.
- [14] Cai J, Wang K S, Han Y Y. A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict high-temperature flow behavior of Ti-6Al-4V alloy in $\alpha+\beta$ phase [J]. High Temperature Materials and Processes, 2016, 35 (3): 297-307.
- [15] Samantaray D, Mandal S, Bhaduri A K. A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behaviour in modified 9Cr-1Mo steel [J]. Computational Materials Science, 2009, 47 (2): 568-576.
- [16] 王伟, 王波, 闫华军, 等. 基于等温压缩试验的 20Cr2Ni4A 钢 Johnson-Cook 本构模型及热加工图 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (13): 103-108, 119.
- Wang W, Wang B, Yan H J, et al. Johnson-Cook constitutive model and hot processing map of 20Cr2Ni4A steel based on isothermal compression tests [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (13): 103-108, 119.

(上接第 234 页)

三、论文提交时间及方式

网上投稿截止时间: 2024 年 7 月 1 日

投稿网址: <https://conference.cstp-cmes.org.cn/site/index.html?siteid=10243>

新用户需注册, 注册成功后, 请点击左侧“参会投稿”, 进行后续操作;

曾在该会议系统中注册过的代表可直接登录。

四、展览展示

活动周期间, 将设立展览展示区, 为有意向的企业/机构进行单位形象、新技术、新装备、人才招聘等宣传, 诚邀广大企业/机构积极参加展览。参展单位也可在会议资料袋、程序册、《2024 中国锻压活动周摘要集》(纸质版) 等进行企业宣传和产品推介。

五、成果转化和技术需求对接

为推动我国锻压领域产学研用协同融合, 加强高校、科研院所与企业需求对接, 促进先进科技成果转化, 为企业解决实际需求, 活动周面向全国塑性工程领域的高校、科研院所及相关企业征集科技创新成果和技术需求, 征集的成果将在本次活动设置的“科创中国”高端装备制造领域科技成果展上进行展示, 优秀成果有机会被推荐参加“中国科协‘科创中国’系列榜单”评选; 技术需求可在现场进行展示, 并与参会专家学者进行交流。

有意向者请按照要求撰写文件, 并在 7 月 30 前发送至 duanya@cmes.org。

六、联系方式

联系人: 李世龙 (注册、投稿, 15210857179)、秦思晓 (成果、需求, 15201461873)、

刘修苹 (展览、展示, 13126752672)、周 林 (13811919643)

电话: 010-62920654, 82415084

E-mail: duanya@cmes.org

中国机械工程学会塑性工程分会