

# 基于 GA-Arrhenius 本构模型的 EA4T 钢高温变形行为

白 杰<sup>1</sup>, 霍元明<sup>1</sup>, 何 涛<sup>1</sup>, 任 旭<sup>1</sup>, 卞志远<sup>1</sup>, 王宝雨<sup>2</sup>, 杜向阳<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 通过 Gleeble-3800 热模拟实验机, 对 EA4T 车轴钢分别在变形温度为 970、1070 和 1170 °C 及应变速率为 0.01、0.1 和 1.0 s<sup>-1</sup> 的条件下进行热压缩实验, 压缩至最大真应变为 0.8。以得到的真应力-真应变实验数据为基础, 分别建立了考虑应变补偿的 Arrhenius 本构模型和经过遗传算法优化后的 Arrhenius 本构模型 (GA-Arrhenius), 用于预测真应力与真应变的关系。为了验证 GA-Arrhenius 本构模型在真应力预测中的优越性, 使用相关系数  $R$ 、平均绝对误差  $AARE$  和均方根误差  $RMSE$  来说明其预测精度。实验结果表明: 采用 Arrhenius 本构模型时,  $R=0.9970$ 、 $AARE=3.4232\%$ 、 $RMSE=2.8773$  MPa; 采用 GA-Arrhenius 本构模型时,  $R=0.9982$ 、 $AARE=2.6577\%$ 、 $RMSE=2.2110$  MPa。说明相较 Arrhenius 本构模型, GA-Arrhenius 本构模型能够更好地预测 EA4T 钢热成形过程中的真应力与真应变的关系, 可以实现更高精度的有限元数值模拟。

**关键词:** EA4T 钢; 热压缩; 高温变形行为; Arrhenius 本构模型; 遗传算法

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.034

**中图分类号:** TG142      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 11-0246-08

## High-temperature deformation behavior for EA4T steel based on GA-Arrhenius constitutive model

Bai Jie<sup>1</sup>, Huo Yuanming<sup>1</sup>, He Tao<sup>1</sup>, Ren Xu<sup>1</sup>, Bian Zhiyuan<sup>1</sup>, Wang Baoyu<sup>2</sup>, Du Xiangyang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The thermal compression experiments of EA4T axle steel were conducted under the deformation temperatures of 970, 1070 and 1170 °C and the strain rates of 0.01, 0.1 and 1.0 s<sup>-1</sup> by thermal simulation testing machine Gleeble-3800, and compressed to the maximum true strain of 0.8. Then, based on the obtained true stress-true strain experimental data, the Arrhenius constitutive model considering strain compensation and the Arrhenius constitutive model optimized by genetic algorithm (GA-Arrhenius) were established respectively to predict the relationship between true stress and true strain. In order to verify the superiority of GA-Arrhenius constitutive model in the prediction of true stress, correlation coefficient  $R$ , average absolute error  $AARE$  and root mean square error  $RMSE$  were used to illustrate its prediction accuracy. The experimental results show that when the Arrhenius constitutive model is used,  $R=0.9970$ ,  $AARE=3.4232\%$ ,  $RMSE=2.8773$  MPa, meanwhile, when the GA-Arrhenius constitutive model is used,  $R=0.9982$ ,  $AARE=2.6577\%$ ,  $RMSE=2.2110$  MPa, which shows that the GA-Arrhenius constitutive model can better predict the relationship between true stress and true strain in the thermal forming process of EA4T steel than the Arrhenius constitutive model, and achieve the higher precision finite element numerical simulation.

**Key words:** EA4T steel; hot compression; high-temperature deformation behavior; Arrhenius constitutive model; genetic algorithm

随着我国铁路运输朝着高速和重载的方向快速发展, 对机车上各部件的质量和性能提出了更高的要求。车轴作为列车的重要零部件之一, 其质量的

好坏不仅决定了列车的运行速度, 还直接影响着列车的运输安全<sup>[1]</sup>。材料的本构关系是可以描述材料的真应力对变形温度、应变速率与应变等参数的响应, 是设计热成形工艺的重要依据<sup>[2-3]</sup>。常用的方法为建立本构方程, 并将其应用于有限元软件中来预测材料在加载条件下的响应, 而有限元模拟结果很大程度上依赖于本构模型的建立<sup>[4]</sup>, 因此, 建立准确的本构方程对于获得精确的有限元模拟结果十分重要。

目前, 本构模型类型可以分为: 基于物理本构

收稿日期: 2021-11-04; 修订日期: 2022-02-06

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFB1307900); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51805314)

作者简介: 白 杰 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2216801589@qq.com

通信作者: 霍元明 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: yuanming.huo@sues.edu.cn

模型<sup>[5-6]</sup>、唯象经验本构模型<sup>[7]</sup>和人工神经网络本构模型<sup>[8-9]</sup>。这些本构模型可以反映材料在不同热加工条件下的硬化和软化行为。其中, 唯象经验本构模型因其简单的方式而得到了快速的发展。最常见的两个唯象经验本构模型分别为 Arrhenius 本构模型和 Johnson-Cook 本构模型<sup>[10-13]</sup>。于鑫等<sup>[14]</sup>基于 Johnson-Cook 本构模型建立了 EA4T 车轴钢在高温、高应变速率和大变形条件下的动态应力、应变本构方程。李定远等<sup>[15]</sup>通过改进的 Johnson-Cook 本构模型描述了 42CrMo 钢的动态力学特性。王敏婷等<sup>[16]</sup>采用 Arrhenius 双曲正弦本构方程建立了 EA4T 钢的热变形本构方程。陈园园等<sup>[17]</sup>采用考虑应变补偿的 Arrhenius 双曲正弦本构方程研究了 42CrMo 钢的高温拉伸成形工艺。江洋等<sup>[18]</sup>采用基于应变补偿的 Arrhenius 双曲正弦本构方程研究了 25CrMo4 钢的热压缩变形行为。

本文研究旨在能够更好地预测金属热成形时真应力与真应变的关系。在 Gleeble-3800 热模拟实验机上对 EA4T 钢分别在 970、1070 和 1170 °C 变形温度和 0.01、0.1 和 1.0 s<sup>-1</sup> 应变速率条件下进行高温压缩实验, 获得真应力-真应变实验数据, 并分别建立 Arrhenius 本构模型和 GA-Arrhenius 本构模型,

通过统计学方法来说明本构模型的预测精度。

## 1 热压缩实验

在热压缩实验之前, 需要将 EA4T 钢棒材通过线切割加工为 10 mm×15 mm 的压缩试样, 将制得的试样置于 Gleeble-3800 热模拟实验机上进行实验。首先, 将每个试样以 20 °C·s<sup>-1</sup> 的速度加热至 1200 °C, 保温 1 min, 再以 10 °C·s<sup>-1</sup> 的速度冷却至需要的变形温度 (970、1070 和 1170 °C)。为了获得变形温度的均匀性, 样品在热压缩前需在等温条件下保持 1 min, 然后分别在应变速率为 0.01、0.1 和 1.0 s<sup>-1</sup> 的条件下压缩至最大真应变为 0.8。在热压缩过程中, 真应力与真应变关系曲线由 C-gauge 自动记录。

## 2 结果与讨论

### 2.1 EA4T 钢的高温流变行为分析

将热压缩得到的真应力与真应变数据输入 Origin 中进行汇总和处理, 得到如图 1 所示的真应力-真应变曲线。

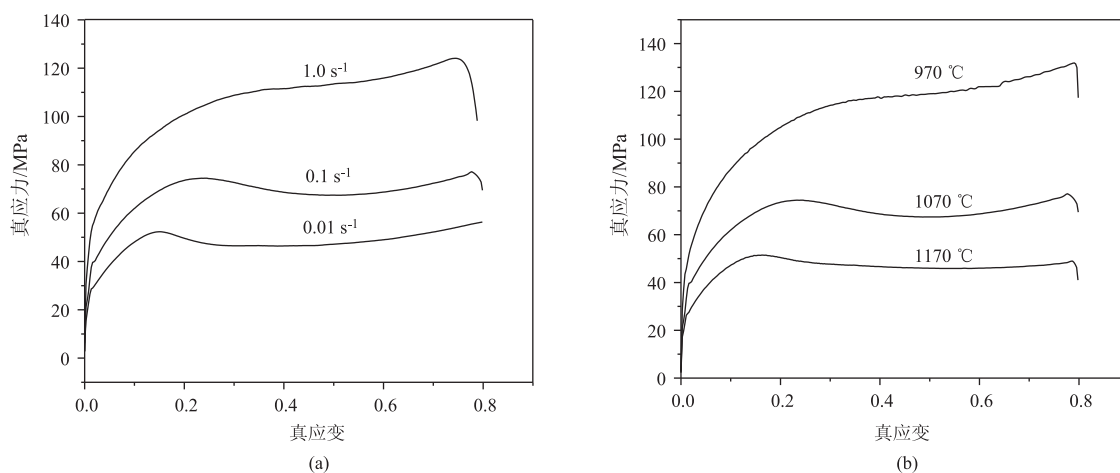


图 1 不同变形条件下的真应力-真应变曲线

(a) 1070 °C (b) 0.1 s<sup>-1</sup>

Fig. 1 Curves of true stress-true strain under different deformation conditions

从图 1a 中可以看出: 当变形温度一定时, 真应力随着应变速率的增加而增加。这是由于当应变速率增大时, 变形的时间减小, 加工硬化产生的位错密度增快导致位错不断塞积, 材料的动态回复和动态再结晶时间减小, 从而使真应力升高。从图 1b 中可以看出: 当应变速率一定时, 真应力随着变形温度的增加而减小。这是由于当应变速率一定时, 随

着变形温度的升高, 材料原子的热变形激活能增大, 从而促进了动态回复和动态再结晶较早的发生, 从而使真应力减少。由此可见, 变形温度和应变速率对 EA4T 钢的真应力影响显著, 因此, EA4T 车轴钢是一种对变形温度和应变速率敏感的材料。

### 2.2 基于 Arrhenius 建立的本构模型及分析

Arrhenius 本构模型<sup>[19]</sup>可以描述:

$$\dot{\varepsilon} = AF(\sigma)\exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

$$F(\sigma) = \begin{cases} \sigma^{n_1} & (\alpha\sigma < 0.8) \\ \exp(\beta\sigma) & (\alpha\sigma > 1.2) \\ [\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2} & (\text{所有水平}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $F(\sigma)$  为真应力函数;  $\sigma$  为真应力, MPa;  $Q$  为热变形激活能, 与材料有关;  $R$  为摩尔气体常数, 为  $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $T$  为热力学温度, K;  $A$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $n_1$  和  $n_2$  为与材料有关的常数, 且  $\alpha = \beta/n_1$ 。

温度补偿的应变速率因子  $Z^{[20]}$  表征为:

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp[Q/(RT)] = A[\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2} \quad (3)$$

对式 (3) 取对数, 可以得到关于 EA4T 钢的本构方程:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \{ (Z/A)^{1/n_2} + [(Z/A)^{2/n_2} + 1]^{1/2} \} \quad (4)$$

本文根据文献 [21] 建立了考虑应变补偿的 Arrhenius 本构模型, 并利用在不同变形温度、真应变

和应变速率条件下的热压缩实验的真应力与真应变速率关系来计算 Arrhenius 本构模型的材料常数。以真应变为 0.35 条件下的材料常数计算过程为例来具体说明。

对于低真应力或高真应力水平, 分别将式 (2) 的第 1 与第 2 项带入到式 (1) 中, 得到式 (5) 和式 (6):

$$\dot{\varepsilon} = B\sigma^{n_1} \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon} = C\exp(\beta\sigma) \quad (6)$$

式中:  $B$  和  $C$  为材料常数。

对式 (5) 和式 (6) 取对数, 可得:

$$\ln\sigma = \frac{1}{n_1} \ln\dot{\varepsilon} - \frac{1}{n_1} \ln B \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{1}{\beta} \ln\dot{\varepsilon} - \frac{1}{\beta} \ln C \quad (8)$$

图 2a 和图 2b 分别为  $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$  以及  $\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$  的关系曲线。可以看出, 在图 2a 和图 2b 中的关系曲线均几乎平行。

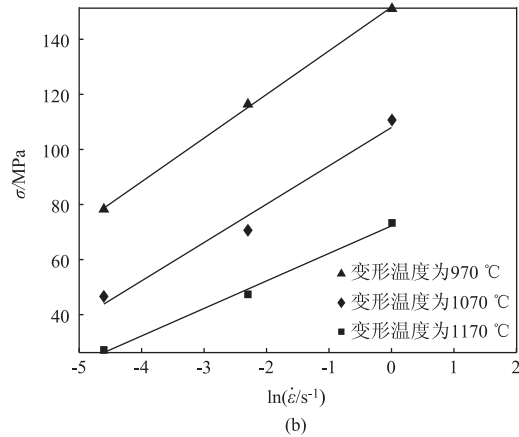
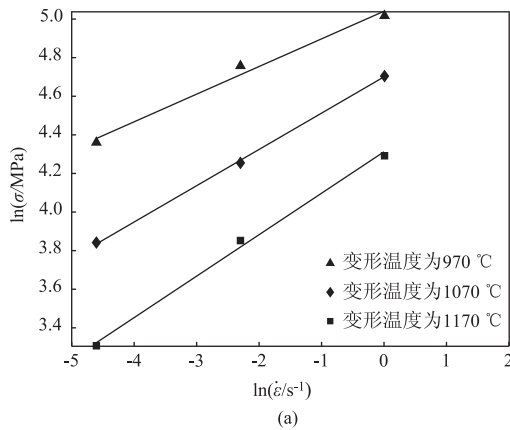


图 2  $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$  (a) 和  $\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$  (b) 的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of  $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$  (a) and  $\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$  (b)

$1/n_1$  和  $1/\beta$  可以分别通过图 2a 和图 2b 中拟合直线斜率的平均值求得, 进而得到  $n_1$  和  $\beta$  的值, 分别为 5.6517 和 0.0783。之后, 可以计算得到材料常数  $\alpha = \frac{\beta}{n_1} = \frac{0.0783}{5.6517} = 0.0138$ 。

无论是高真应力水平还是低真应力水平, 均可以用式 (2) 中的第 3 项来代替式 (1) 中的  $F(\sigma)$ , 本构方程可以写为:

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2}\exp[-Q/(RT)] \quad (9)$$

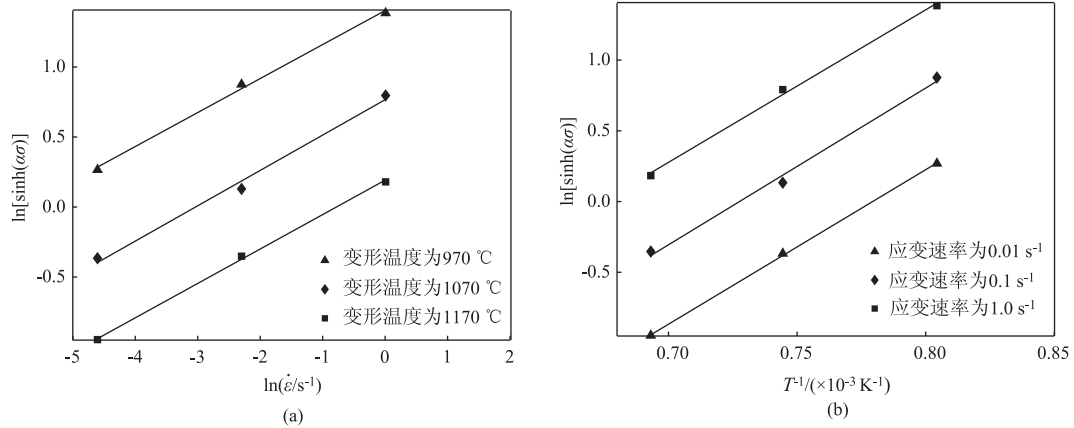
对式 (9) 两边取对数得:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{\ln\dot{\varepsilon}}{n_2} + \frac{Q}{n_2RT} - \frac{\ln A}{n_2} \quad (10)$$

图 3a 为不同变形温度下的  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln\dot{\varepsilon}$  关系曲线, 图 3b 为不同应变速率下的  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$  关系曲线。

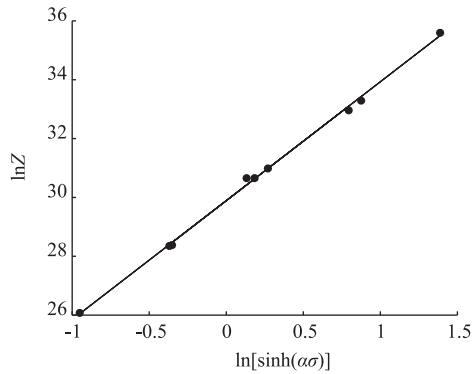
图 3a 中 3 条拟合直线斜率的平均值为  $1/n_2$ , 则可以得到  $n_2$ , 在真应变为 0.35 条件下的  $n_2$  的值为 4.0493。图 3b 中 3 条拟合直线斜率的平均值为  $Q$ , 在真应变为 0.35 条件下的  $Q$  值为  $367.9750 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

通过式 (3) 和式 (10), 整理可以得到式 (11):

图 3  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (a) 与  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$  (b) 的关系曲线Fig. 3 Relationship curves of  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (a) and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$  (b)

$$\ln Z = \ln A + n_2 \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (11)$$

根据式 (11), 材料常数  $A$  可以通过  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  拟合直线的截距来计算。图 4 为  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  的线性关系曲线。

图 4  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  的关系曲线Fig. 4 Relationship curve of  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 

分别计算出在真应变  $\epsilon$  为 0.035~0.700、间隔为 0.035 条件下的材料常数值, 并对数据进行五次多项式拟合, 如图 5 所示。将每个材料参数表示为以真应变为参量的五次多项式, 如式 (12) 所示。每个材料参数的多项式拟合系数如表 1 所示。

$$\begin{cases} \alpha(\epsilon) = H_5\epsilon^5 + H_4\epsilon^4 + H_3\epsilon^3 + H_2\epsilon^2 + H_1\epsilon + H_0 \\ \ln A(\epsilon) = D_5\epsilon^5 + D_4\epsilon^4 + D_3\epsilon^3 + D_2\epsilon^2 + D_1\epsilon + D_0 \\ n_2(\epsilon) = E_5\epsilon^5 + E_4\epsilon^4 + E_3\epsilon^3 + E_2\epsilon^2 + E_1\epsilon + E_0 \\ Q(\epsilon) = F_5\epsilon^5 + F_4\epsilon^4 + F_3\epsilon^3 + F_2\epsilon^2 + F_1\epsilon + F_0 \end{cases} \quad (12)$$

由式 (3)、式 (4) 和式 (12), 可以得到 EA4T 钢考虑应变补偿及  $Z$  参数修正的 Arrhenius 本构模型为:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha(\epsilon)} \ln \left\{ \left[ \frac{Z}{A(\epsilon)} \right]^{1/n_2(\epsilon)} + \left\{ \left[ \frac{Z}{A(\epsilon)} \right]^{2/n_2(\epsilon)} + 1 \right\}^{1/2} \right\} \quad (13)$$

式中:  $Z = \dot{\epsilon} \exp[Q(\epsilon)/(RT)]$ 。

根据式 (13) 的 Arrhenius 本构模型可以获得热压缩实验数据的真应力预测值, 图 6 为 Arrhenius 本构模型分别在 970、1070 和 1170 °C 变形温度下的真应力预测值与实验值对比。

### 2.3 基于 GA-Arrhenius 建立的本构模型及分析

由 Deng C Y 等<sup>[22]</sup> 提出的 GA-Arrhenius 本构模型是用遗传算法来计算在不同变形条件下 Arrhenius 本构模型的最佳材料常数, 使得预测的真应力与实验得到的真应力之间的差值最小。预测值和实验值之间的差值由均方根误差 ( $MSE$ ) 来衡量, 表示如下:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_i^e - \sigma_i^p)^2 \quad (14)$$

式中:  $\sigma_i^e$  为真应力实验值;  $\sigma_i^p$  为真应力预测值;  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为实验获得的真应力个数。

本文使用的是 Matlab2016a 中的遗传算法工具箱, 在使用遗传算法优化 Arrhenius 本构模型之前, 先根据图 5 获得的各材料常数关于真应变的拟合曲线确定  $\alpha$ 、 $\ln A$ 、 $n_2$  和  $Q$  的上、下界 ( $\alpha$  为 0.01~0.03,  $\ln A$  为 20~50,  $n_2$  为 2~8 和  $Q$  为 200~500 kJ·mol<sup>-1</sup>), 然后再设定遗传算法的相关参数, 种群大小和交叉比例分别设为 100 和 0.2, 算法终止的最大迭代数设为 1000, 以避免程序过早的终止, 从而能够获得更好的结果, 其他参数为 Matlab 默认值。图 7 为 GA-Arrhenius 本构模型在不同变形温度下得到的真应力的预测值和实验值的对比。

从图 7 可以看出预测值与实验值之间吻合较好, 与图 6 相比, GA-Arrhenius 本构模型预测的真应力更接近实验值, 预测精度更高。

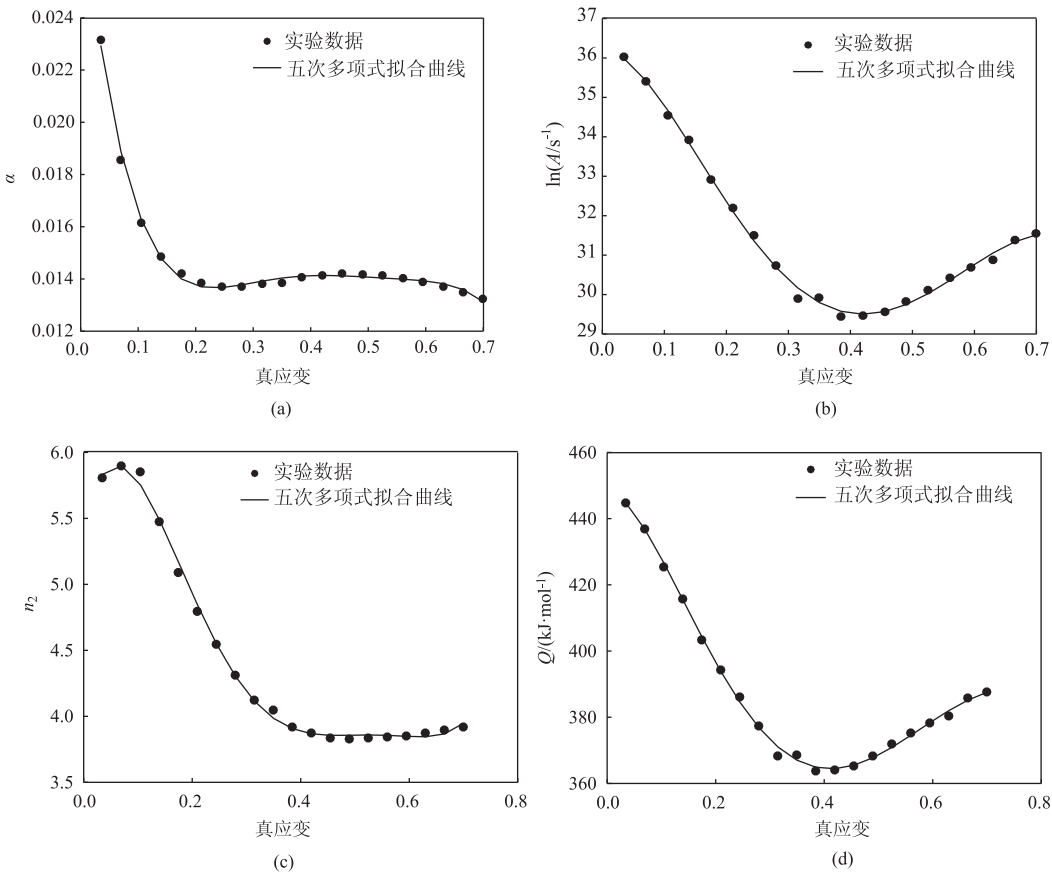


图 5 真应变与 4 个材料参数的多项式拟合图  
(a)  $\alpha$  (b)  $\ln A$  (c)  $n_2$  (d)  $Q$

Fig. 5 Polynomial fitting diagrams of true strain and four material parameters

表 1 各材料参数的多项式拟合系数

Table 1 Polynomial fitting coefficients of various material parameters

材料参数	$\alpha(\varepsilon)$	$\ln A(\varepsilon)$	$n_2(\varepsilon)$	$Q(\varepsilon)$
多项式拟合系数	$H_5 = -1.2805$	$D_5 = 121.9399$	$E_5 = 358.0824$	$F_5 = 2889.7417$
	$H_4 = 2.8703$	$D_4 = -453.3479$	$E_4 = -750.6666$	$F_4 = -7793.8776$
	$H_3 = -2.5013$	$D_3 = 484.4622$	$E_3 = 574.7141$	$F_3 = 7005.4988$
	$H_2 = 1.0459$	$D_2 = -164.9909$	$E_2 = -184.2040$	$F_2 = -2111.9094$
	$H_1 = -0.2062$	$D_1 = -2.4402$	$E_1 = 16.6867$	$F_1 = -62.8990$
	$H_0 = 0.0290$	$D_0 = 36.2527$	$E_0 = 5.4523$	$F_0 = 449.1509$

2.4 本构模型比较

为了评估两种本构模型的预测能力，本文采用统计学中的相关性系数  $R$ 、平均绝对误差  $AARE$  以及均方根误差  $RMSE$  来综合评价本构模型性能：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i^e - \bar{\sigma}^e)(\sigma_i^p - \bar{\sigma}^p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_i^e - \bar{\sigma}^e)^2 - \sum_{i=1}^N (\sigma_i^p - \bar{\sigma}^p)^2}} \quad (15)$$

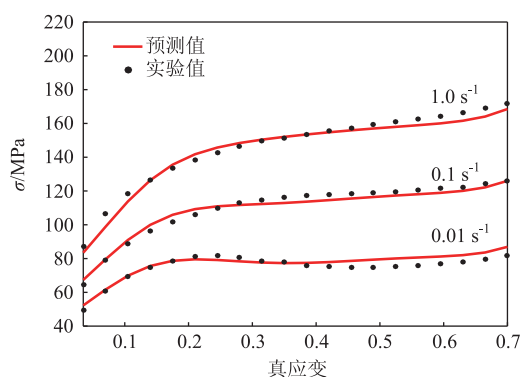
$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_i^e - \sigma_i^p}{\sigma_i^e} \right| \times 100 \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_i^e - \sigma_i^p)^2} \quad (17)$$

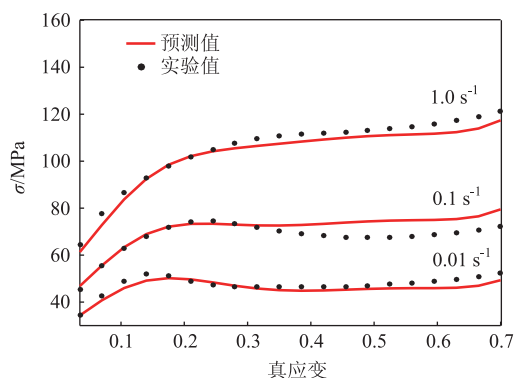
式中： $\bar{\sigma}^e$  和  $\bar{\sigma}^p$  分别为  $\sigma_i^e$  和  $\sigma_i^p$  的平均值。

图 8 为 Arrhenius 和 GA-Arrhenius 两种本构模型的真应力预测值与实验值之间的相关程度，可以看出，图 8b 中实验值和预测值之间的偏差小于图 8a

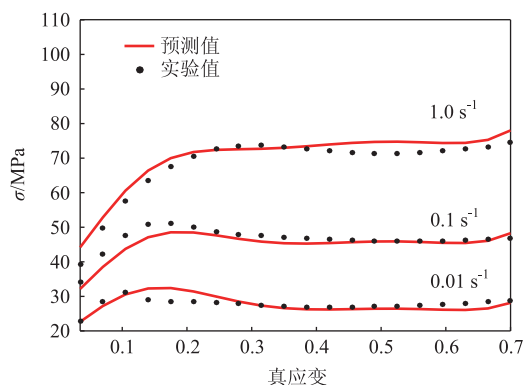




(a)



(b)



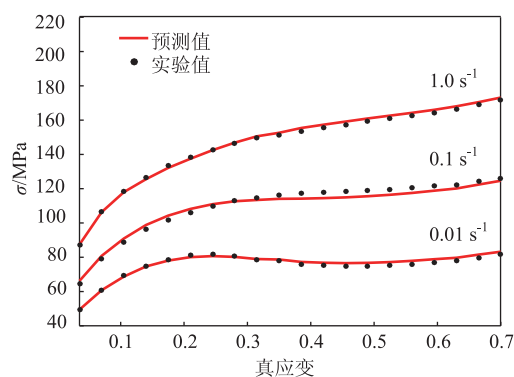
(c)

图 6 Arrhenius 本构模型在不同变形温度下的  
真应力预测值和实验值对比

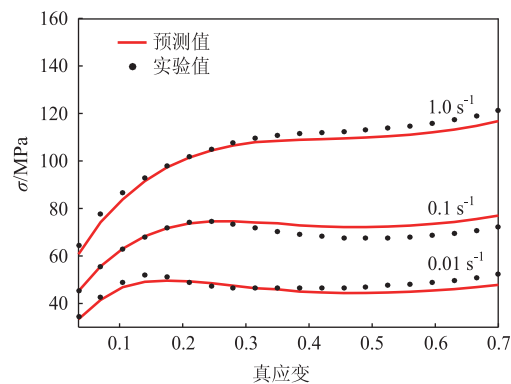
(a) 970 °C (b) 1070 °C (c) 1170 °C

Fig. 6 Comparison of true stress between predicted values and  
experimental values under different deformation temperatures  
based on Arrhenius constitutive model

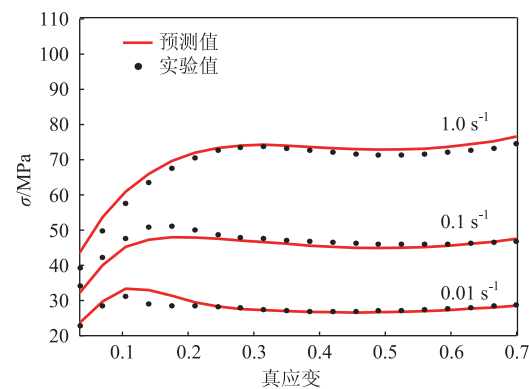
中的偏差。GA-Arrhenius 本构模型的相关系数为 0.9982, Arrhenius 本构模型的相关系数为 0.9970, 说明 GA-Arrhenius 本构模型的预测值与实验值之间的关系更加紧密。GA-Arrhenius 本构模型的平均绝对误差和均方根误差分别为 2.6577% 和 2.2110 MPa, Arrhenius 本构模型的平均相对误差和均方根误差分别为 3.4232% 和 2.8773 MPa。综上所述, GA-



(a)



(b)



(c)

图 7 GA-Arrhenius 本构模型在不同变形温度下的  
真应力预测值与实验值对比

(a) 970 °C (b) 1070 °C (c) 1170 °C

Fig. 7 Comparison of true stress between predicted values and  
experimental values under different deformation temperatures based on  
GA-Arrhenius constitutive model

Arrhenius 本构模型的预测精度优于 Arrhenius 本构模型, 能够更好地反映 EA4T 钢的高温流变行为。

### 3 结论

(1) 通过在 Gleeble-3800 热模拟实验机上进行热压缩实验, 来研究 EA4T 钢的 Arrhenius 本构模型

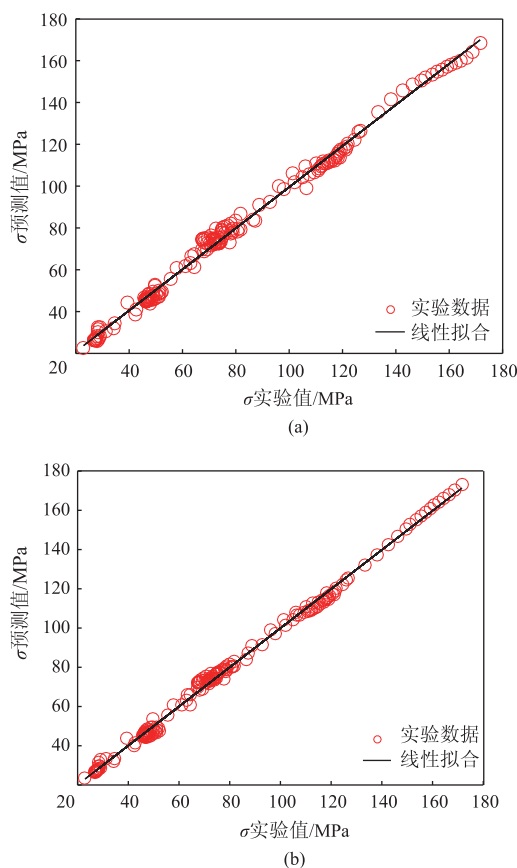


图 8 基于不同本构模型的真应力实验值与预测值之间的相关性

(a) Arrhenius 本构模型 (b) GA-Arrhenius 本构模型

Fig. 8 Correlations of true stress between experimental values and predicted values based on different constitutive models

(a) Arrhenius constitutive model (b) GA-Arrhenius constitutive model

和 GA-Arrhenius 本构模型。实验在 970、1070 和 1170 °C 变形温度和 0.01、0.1 和 1.0 s<sup>-1</sup> 应变速率条件下进行, 通过获得的真应力-真应变关系曲线可以得出变形温度和应变速率对 EA4T 钢的真应力具有显著影响。

(2) 基于实验数据分别构造了 Arrhenius 本构模型和 GA-Arrhenius 本构模型, 并引入统计学方法对两种本构模型进行预测精度评估, 得到两种本构模型的平均相对误差分别为 3.4232% 和 2.6577%, 均方根误差分别为 2.8773 和 2.2110 MPa。

(3) 通过比较两种本构模型, 说明 GA-Arrhenius 本构模型的预测能力更为准确, 可以更好地描述 EA4T 钢的高温流变行为, 并进一步应用于有限元数值模拟中。

#### 参考文献:

[1] 王少杰, 韩靖, 曾伟, 等. 低温对 ER8 车轮钢力学性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2018, 32 (6): 401-408.

响 [J]. 材料研究学报, 2018, 32 (6): 401-408.

Wang S J, Han J, Zeng W, et al. Effect of low temperature on mechanical properties of ER8 steel for wheel rim [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2018, 32 (6): 401-408.

[2] 周计明, 齐乐华, 陈国定. 热成形中金属本构关系建模方法综述 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24 (2): 212-216.

Zhou J M, Qi L H, Chen G D. Investigation on the constitutive of materials forming in high temperature [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24 (2): 212-216.

[3] Vo P, Jahazi M, Yue S, et al. Flow stress prediction during hot working of near- $\alpha$  titanium alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 447 (1-2): 99-110.

[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] Huo Y M, Bai Q, Wang B Y, et al. A new application of unified constitutive equations for cross wedge rolling of a high-speed railway axle steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 274-283.

[6] Huo Y, Lin J G, Bai Q, et al. Prediction of microstructure and ductile damage of a high-speed railway axle steel during cross wedge rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 359-369.

[7] 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.

[8] 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.

Zhou F, Wang K L, Lu S Q, et al. Flow behavior and BP neural network high temperature constitutive model of Ti-22Al-24Nb-0.5Y alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47 (8): 141-146.

[9] 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.

[10] Xu L, Chen L, Chen G J, et al. Hot deformation behavior and microstructure analysis of 25Cr3Mo3NiNb steel during hot compression tests [J]. Vacuum, 2017, 147: 8-17.

[11] Quan G Z, Li G S, Wang Y, et al. A characterization for the flow behavior of as-extruded 7075 aluminum alloy by the improved Arrhenius model with variable parameters [J]. Materials Research, 2013, 16 (1): 19-27.

- [12] Zhang D N, Shanguan Q Q, Xie C J. A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics, 2014, 619: 186-194.
- [13] Maheshwari A K, Pathak K K, Ramakrishnan N, et al. Modified Johnson-Cook material flow model for hot deformation processing [J]. Journal of Materials Science, 2010, 45 (4): 859-864.
- [14] 于鑫, 韩芹会, 刘春, 等. EA4T 材料动态力学特性与本构关系模型 [J]. 工具技术, 2016, 50 (12): 20-25.  
Yu X, Han Q H, Liu C, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive model establishment of EA4T axle materials [J]. Tool Engineering, 2016, 50 (12): 20-25.
- [15] 李定远, 朱志武, 卢也森. 冲击加载下 42CrMo 钢的动态力学性能及其本构关系 [J]. 高压物理学报, 2017, 31 (6): 761-768.  
Li D Y, Zhu Z W, Lu Y S. Mechanical properties and constitutive relation for 42CrMo steel under impact load [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31 (6): 761-768.
- [16] 王敏婷, 李学通, 张祥玉, 等. EA4T 钢热变形行为及组织演变规律研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (1): 224-232.  
Wang M T, Li X T, Zhang X Y, et al. Investigation on hot deformation behavior and microstructure evolution of EA4T steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (1): 224-232.
- [17] 陈园园, 李永堂, 庞晓龙, 等. 考虑应变补偿的铸态 42CrMo 钢本构模型 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 246-252.  
Chen Y Y, Li Y T, Pang X L, et al. Constitutive model of as-cast 42CrMo steel based on strain compensation [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 246-252.
- [18] 江洋, 王宝雨, 霍元明, 等. 25CrMo4 钢热压缩变形行为及流变应力本构方程 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (5): 167-173.  
Jiang Y, Wang B Y, Huo Y M, et al. Thermal compressive deformation behavior and flow stress constitutive equation of 25CrMo4 steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (5): 167-173.
- [19] Shi H, McLaren A J, Sellars C M, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminium alloys [J]. Materials Science and Technology, 1997, 13 (3): 210-216.
- [20] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation [J]. Acta Metallurgica, 1966, 14 (9): 1136-1138.
- [21] Cai J, Li F G, Liu T Y, et al. Constitutive equations for elevated temperature flow stress of Ti-6Al-4V alloy considering the effect of strain [J]. Materials & Design, 2011, 32 (3): 1144-1151.
- [22] Deng C Y, Dong S J, Tan W. Modelling for the flow behavior of a new metastable beta titanium alloy by GA-based Arrhenius equation [J]. Materials Research Express, 2019, 6 (2): 26544.

## 2022 年发布的 5 项锻压领域国家及团体标准内容简介

### GB/T 22131—2022 筒形锻件内表面超声波检测方法

本文件描述了采用脉冲反射法, 从锻件内表面使用纵波双晶探头进行超声波检测的基本方法, 包括检测人员要求、一般要求、超声波检测器材、超声波检测锻件的准备、检测程序、记录要求和检测报告。

本文件适用于内径尺寸 $\geq 64$  mm 筒形锻件的手工检测方式, 但不限制使用其他检测方式, 如机械化或自动化检测方式。

### GB/T 41857—2022 金属板料精冲挤压复合成形件 通用技术条件

本文件规定了金属板料强力压边精冲挤压复合成形件 (以下简称“精冲挤压件”) 的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输及贮存。

本文件适用于采用强力压边精冲与挤压复合成形方法生产的钢质精冲挤压件。

### GB/T 41859—2022 金属板材精密冷弯成形 工艺规范

本文件规定了金属板材精密冷弯成形工艺规范, 包括一般要求、弯曲件展开长度、弯曲件精度、弯曲回弹控制、模具设计和工艺过程。

本文件适用于金属板材在压力机上精密冷弯成形的工艺编制。

### GB/T 41982—2022 电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件

本文件规定了电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件的技术要求、试验方法、检验规则、订货内容及包装、标志和质量证明书。

本文件适用于热挤压或锻造工艺生产的电站用高合金耐热钢大口径厚壁 (外径不小于  $\Phi 219$  mm、壁厚不小于 25 mm) 管道和锻件。

### T/CMES 03001—2022 铜及铜合金热模锻件 通用技术条件

本文件规定了铜及铜合金热模锻件 (以下简称“锻件”) 的原材料、技术要求、订单信息、检验规则、标志、包装、运输、贮存和质量证明书。

本文件适用于通过热模锻方法生产的铜及铜合金锻件。