

# 基于修正 Johnson - Cook 本构模型的奥氏体 不锈钢高温流变行为

邬宇轩, 刘朋成, 冯海涛, 卢晓禹, 徐涛, 王俊刚, 郝娟娟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 文章研究了修正的 Johnson - Cook (m - JC) 本构模型对 304 奥氏体不锈钢高温流变行为的表征能力。利用不同温度、应变和应变速率等温热压缩试验的试验真应力 - 应变数据来计算本构模型的材料常数, 建立了关于 304 奥氏体不锈钢的 m - JC 本构模型。通过比较预测结果的相关系数、平均相对误差以及均方差, 评估了模型的适用性。结果表明, 修正的 JC 模型预测结果和试验结果之间的平均相对误差绝对值为 6.77%, 相关系数为 0.987, 均方差为 11.2 MPa, m - JC 本构模型可以较为准确的描述 304 奥氏体不锈钢的流变行为。

**关键词:** 304 奥氏体不锈钢; 变形行为; 修正的 Johnson - Cook 模型; 本构方程; 流变应力

中图分类号: TG142.71

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438 (2023) 04 - 0006 - 05

## High Temperature Rheological Behavior of Austenitic Stainless Steel Based on Modified Johnson - Cook Constitutive Model

Wu Yu - xuan, Liu Peng - cheng, Feng Hai - tao, Lu Xiao - yu, Xu Tao, Wang Jun - gang, Hao Juan - juan

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In the paper, the representational capacity of modified Johnson - Cook (m - JC) constitutive model on the high temperature rheological behavior of 304 austenitic stainless steel is studied. The material constants of constitutive model are calculated with the data of experimental true stress - strain for isothermal compression test at different temperatures, strains and strain rates so that the m - JC constitutive model of 304 austenitic stainless steel is established. The applicability of the model is evaluated by comparing the correlation coefficient, average relative error and mean square error of predicted results. The results showed that the average absolute relative error between the predicted results and experimental results of m - JC model was 6.77%, correlation coefficient was 0.987 as well as mean square error was 11.2 MPa so that the m - JC constitutive model could more accurately describe the rheological behavior of 304 austenitic stainless steel.

**Key words:** 304 austenitic stainless steel; deformation behavior; modified Johnson - Cook model; constitutive equation; flow stress

奥氏体不锈钢由于优异的综合性能被广泛应用于各行各业,尤其 304 奥氏体不锈钢,在国内的需求量十分巨大<sup>[1]</sup>。近年来,随着研究的不断深入,人们发现,材料的高温流变行为对于正确设计热加工工艺参数至关重要,这些参数直接影响组织演变<sup>[2-3]</sup>,并最终影响成型构件的力学性能。杨成曦等<sup>[4]</sup>建立了锻态 7050 铝合金的修正 JC 模型,将不同的本构模型输入到 DEFORM - 3D 中进行有限元模拟,确定修正 JC 模型对锻态 7050 铝合金热变形行为的有限元模拟是可行的。罗刚等<sup>[5]</sup>通过静态拉伸及 SHPB 试验获取船用 Q345B 钢在  $0.0002 \sim 1.680 \text{ s}^{-1}$  应变速率范围内材料的应力 - 应变曲线,基于试验数据构建了修正的 Johnson - Cook 本构模型具有良好适应性。叶建华等<sup>[6]</sup>通过 TA12 钛合金在温度范围为  $700 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为  $0.001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$  的高温拉伸试验数据构建了修正的 JC 本构模型,可准确地描述 TA12 钛合金的高温流变行为。本研究的目的是分析修正 Johnson - Cook 本构模型

对 304 奥氏体不锈钢高温流变行为的表征能力,利用等温热压缩试验数据确定模型的材料常数。随后,对模型用于预测 304 奥氏体不锈钢在特定热加工区域内的流变应力的适用性进行了评估。通过比较预测结果的相关系数、平均绝对误差以及跟踪变形行为的能力等,来评估该模型的适用性。

## 1 试验材料与方法

本研究所用的材料为 304 奥氏体不锈钢,其化学成分如表 1 所示。试验为单向压缩,样品取自工业生产连铸坯,尺寸为  $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  圆柱形试样,柱体轴线与连铸坯厚度方向平行。在 Gleeble - 3500 热模拟试验机上进行温度为  $1173 \text{ K}$ 、 $1273 \text{ K}$ 、 $1373 \text{ K}$  和  $1473 \text{ K}$  的等温热压缩试验,应变速率分别设为  $0.01 \text{ s}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \text{ s}^{-1}$  和  $10 \text{ s}^{-1}$ 。利用石墨片来减小试样与压头之间的表面摩擦,以提高试验结果的准确性。热压缩试验过程如图 1 所示。

表 1 304 不锈钢的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe	%
0.04	0.42	1.13	0.03	0.001 1	18.16	8.02	0.04	其他	

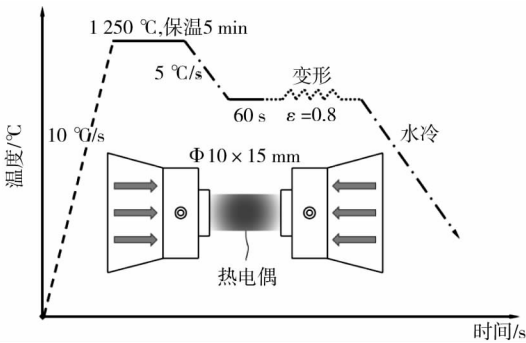


图 1 热压缩试验工艺示意图

度,  $K$ ;  $T_m$  为熔点温度,  $T_m = 1673 \text{ K}$ ;  $T_r$  为参考温度,  $T \geq T_r$ , 以试验结果的最低温度作为参考温度<sup>[8-9]</sup>;  $C$ 、 $m$  为材料常数, 分别表示材料应变速率硬化系数和热软化指数。

JC 模型假设应变、应变速率和变形温度为独立参数。这种假设降低了它的准确性。为了解决这一问题, Li<sup>[10]</sup> 考虑了应变、应变速率和温度对流变应力的耦合作用, 提出了修正的 JC 模型:

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

式中:  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为材料常数;  $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ ; 其他符号含义与式(1)中所述含义相同。

以  $1173 \text{ K}$  为参考温度,  $0.01 \text{ s}^{-1}$  为参考应变速率, 材料常数的推导如下。

在参考变形条件下, 式(2)可以简化为  $\sigma = A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2$ , 采用最小二乘法对试验数据  $\sigma - \varepsilon$  进行拟合, 拟合关系曲线如图 2(a) 所示。根据拟合结果可以确定  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  分别为:  $A_1 = 87.8$ ,  $B_1 = 122.4$ ,  $B_2 = -92.9$ 。

## 2 试验结果及讨论

JC 模型的流变应力表示为<sup>[7]</sup>:

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) [1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \{1 - [(T - T_r)/(T_m - T_r)]^m\} \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为 (Von Mises) 流变应力, MPa;  $\varepsilon$  为塑性应变;  $A$  为参考温度和应变速率下的屈服应力, MPa;  $B$  为材料应变硬化系数;  $n$  为材料应变硬化指数;  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $T$  为试验温

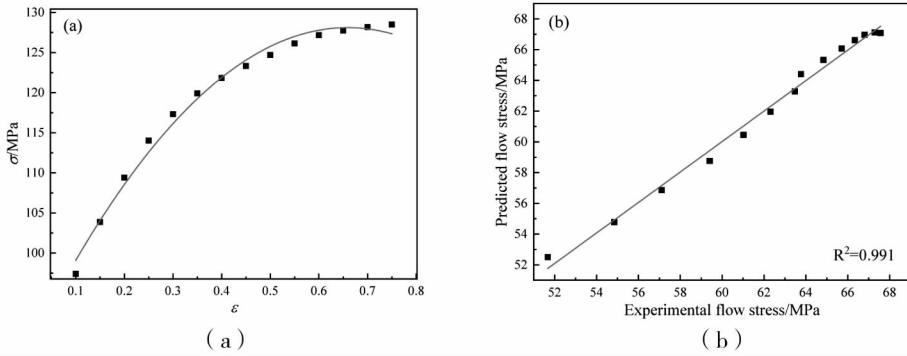


图 2 修正 JC 模型的应变 - 应力关系二次拟合曲线

准静态数据由式  $\sigma = A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2$  预测,与试验数据对比,对比结果如图 2(b)所示。修正后的模型能较好地拟合试验数据,且相关性较好,相关系数达到 0.991。因此,我们使用二次函数来建立 JC 模型。

### 2.1 m-JC 模型中参数 $C_1$ 的确定

在变形温度为参考变形温度  $T_r = 900\text{ }^\circ\text{C}$  的条件下,式(2)可以转化为:

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

转换式(3)可得  $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2) = (1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)$ ,在  $0.01\text{ s}^{-1}$ 、 $0.1\text{ s}^{-1}$ 、 $1\text{ s}^{-1}$  和  $10\text{ s}^{-1}$  四种不同应变速率下,选取了 14 个应变值对应的应力值。将 56 组数据代入,绘制  $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)$  与  $\ln \dot{\varepsilon}^*$  之间的关系曲线,并进行线性拟合,结果如图 3 所示。因此,  $C_1$  的值可以通过拟合曲线的斜率得到。

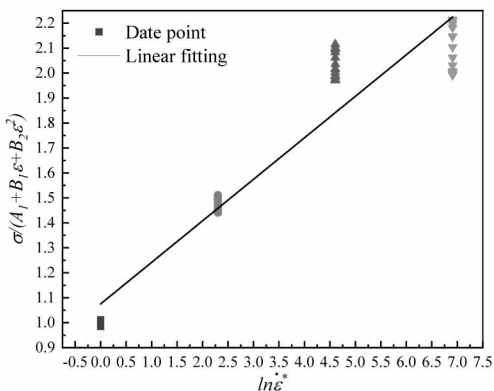


图 3 参考变形温度下  $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)$  与  $\ln \dot{\varepsilon}^*$  之间的关系曲线

### 2.2 m-JC 模型中参数 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的确定

当应变速率为参考应变速率  $\dot{\varepsilon} = 0.01\text{ s}^{-1}$  时,式(2)可以简化为:

$$\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*) = \exp[(\lambda_1 + \lambda_2) \ln \dot{\varepsilon}^*](T - T_{ref}) \quad (4)$$

引入一个新参数  $\lambda: \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*$ 。将上面的方程重新排列,两边取自然对数,得到式(5):

$$\ln[\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)] = \lambda(T - T_{ref}) \quad (5)$$

在应变速率分别为  $0.01\text{ s}^{-1}$ 、 $0.1\text{ s}^{-1}$ 、 $1\text{ s}^{-1}$  和  $10\text{ s}^{-1}$  的四种应变速率下,在  $1\text{ }173\text{ K}$ 、 $1\text{ }273\text{ K}$ 、 $1\text{ }373\text{ K}$  和  $1\text{ }473\text{ K}$  的四种变形温度下,分别取每种应变速率和温度下 14 种应变对应的 14 个应力值,得到一组数据。将上述数据代入式(5),分别画出各应变速率下  $\ln[\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)]$  和  $T - T_{ref}$  之间的关系曲线,并进行线性拟合,最终得到不同应变速率下  $\ln[\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)]$  和  $T - T_{ref}$  的关系曲线。然后,得到了在这四种应变速率下  $\lambda$  的值。通过绘制  $\lambda$  和  $\ln \dot{\varepsilon}^*$  曲线,并进行线性拟合,得到  $\lambda$  和  $\ln \dot{\varepsilon}^*$  的关系曲线,然后根据拟合直线的截距和斜率,得到  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的值。具有耦合关系的二次函数修正 JC 模型的相关参数如表 2 所示。根据本构模型相关参数的计算结果,图 4 给出了在  $0.01 \sim 10\text{ s}^{-1}$  应变速率范围内,依据修正的 JC 本构模型计算出的流变应力预测值和实验值的对比曲线。

表 2 304 奥氏体不锈钢的修正 Johnson - Cook 模型参数

$A_1$	$B_1$	$B_2$	$C_1$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
87.7	122.4	-92.9	0.160	-0.004 05	0.000 117

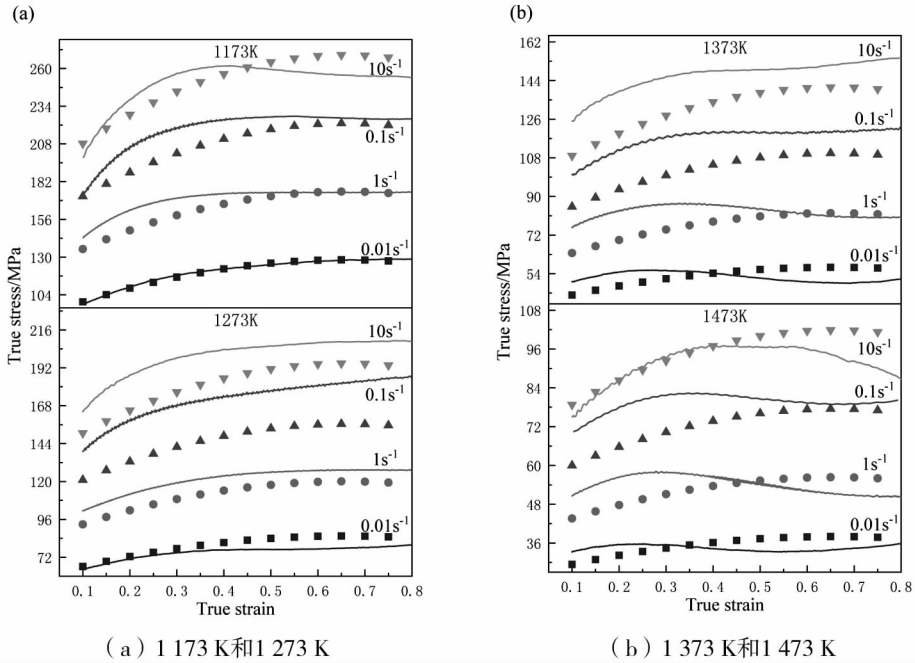


图4 不同变形温度条件下基于修正的 JC 模型的试验和预测流变应力的比较

为了比较本文所建立的本构方程的预测精度, 采用了相关系数 (R)、平均相对误差 (AARE) 和均方差 (RMSE) 对本构方程的可预测性进行量化。它们的表达式表示为<sup>[11-13]</sup>:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (6)$$

$$AARE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100 \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - P_i)^2} \quad (8)$$

式中: $E_i$  为试验应力值; $P_i$  为预测应力值; $\bar{E}$  和  $\bar{P}$  分别是  $E_i$  和  $P_i$  的平均值; $N$  为样本中包含的数据个数。

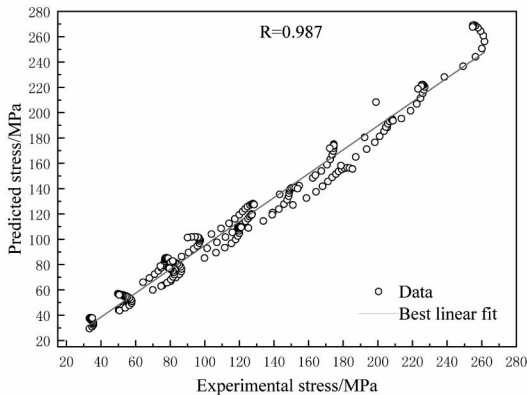


图5 修正 JC 模型预测值与试验值的相关性

修正 JC 模型在整个变形范围内的试验和预测流变应力之间的相关性如图 5 所示。通过计算可以得到试验值与预测值之间的相关系数为 0.987, 平均相对误差为 6.77%, 均方差为 11.2 MPa。在本研究中观察到, 修正的 JC 模型能够在整个变形温度和应变速率附近的范围内较为准确的预测 304 奥氏体不锈钢高温变形的流变应力。

### 3 结论

(1) 基于 m - JC 模型建立了 304 奥氏体不锈钢的本构模型, m - JC 本构模型预测得到真应力与试验结果间的平均相对误差绝对值为 6.77%, 相关系数为 0.987, 均方差为 11.2 MPa, 预测精度高, 泛化能力好, 可以较好地描述 304 奥氏体不锈钢的高温流变行为。

(2) 基于修正的 Johnson - Cook 方程, 304 奥氏体不锈钢的应力和应变、应变速率以及变形温度的关系为  $\sigma = (87.7 + 122.4\varepsilon - 92.9\varepsilon^2)(1 + 1.160\ln\dot{\varepsilon}^*) \exp[(-0.00405 + 0.000117\ln\varepsilon^*)(T - T_{ref})]$ 。

### 参 考 文 献

[1] 廖喜平, 谢其军, 胡成亮, 等. 304 奥氏体不锈钢热变形行为及热加工图 [J]. 锻压技术,

- 2017, 42(12):150-156.
- [2] Bansod A V, Patil A P, Moon A P, et al. Intergranular Corrosion Behavior of Low-Nickel and 304 Austenitic Stainless Steels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(9):3615-3626.
- [3] 吴琨, 邹德宁, 韩英, 等. 304Cu 奥氏体不锈钢热变形本构模型[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(14):15-17.
- [4] 杨成曦, 王姝伊, 吴道祥. 锻态 7050 铝合金修正 JC 本构模型建立与模拟应用[J]. *铝加工*, 2022(4):47-51.
- [5] 罗刚, 谢伟, 李德聪. 基于修正 JC 模型的船用 Q345B 钢动态本构研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2020, 44(5):823-826.
- [6] 叶建华, 陈明和, 王宁, 等. 基于修正 JC 模型的 TA12 钛合金高温流变行为[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(4):733-741.
- [7] 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, 21:541-548.
- [8] Mirzadeh, Hamed. Constitutive Modeling and Prediction of Hot Deformation Flow Stress under Dynamic Recrystallization Conditions[J]. *Mechanics of materials*, 2015, 85:66-79.
- [9] Sani S A, Ebrahimi G R, Vafaenezhad H, et al. Modeling of Hot Deformation Behavior and Prediction of Flow Stress in a Magnesium Alloy Using Constitutive Equation and Artificial Neural Network (ANN) Model[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, 6(2):134-144.
- [10] Li H Y, Wang X F, Duan J Y, et al. A Modified Johnson Cook Model for Elevated Temperature Flow Behavior of T24 Steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 577(10):138-146.
- [11] 胡德勇, 高志伟, 王小东, 等. 热轧带钢力学性能在线预测模型的开发与应用[J]. *轧钢*, 2021, 38(3):9.
- [12] Gupta A K, Anirudh V K, Singh S K. Constitutive Models to Predict Flow Stress in Austenitic Stainless Steel 316 at Elevated Temperatures[J]. *Materials & Design*, 2013, 43:410-418.
- [13] 易振, 柴琳, 刘惠康, 等. 基于 AO-ENN 的 LF 炉 C、Mn 合金收得率预报模型[J]. *中国冶金*, 2022, 32(5):40.