

冲击载荷下 022Cr18Ni14Mo2 不锈钢动态力学特性及其本构模型研究

贾海深¹, 罗文翠², 张继林², 易湘斌^{1,2*}

(1. 兰州工业学院绿色切削加工技术及应用甘肃省高校重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州工业学院甘肃省机械装备先进制造协同创新中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 利用 UTM5305 万能试验机和剖分式 Hopkinson 压杆装置, 对 022Cr18Ni14Mo2 不锈钢进行了准静态及动态下的压缩试验研究, 探讨了其应变硬化特征及流动应力对应变率的依赖程度, 并结合应变强化指数 n 和应变率敏感性系数 β 两个参量进行定量分析。依据上述分析结果, 对传统的 J-C 本构模型进行修正, 构建了一种新型的本构模型。借助试验数据对修正后的本构模型进行参数识别, 将模型预测值与试验值进行对比分析, 运用本构模型的相关系数 (R) 和平均相对误差 ($AARE$) 两个参量对其评价。结果表明: 该试样具有明显应变硬化特性和显著的应变率敏感性, 应变强化指数受应变、应变率的支配, 应变率敏感性系数随应变率的增加而增加, 且增加的幅度逐渐减小。修正后本构模型的相关系数 (R) 为 0.989 6, 平均相对误差 ($AARE$) 为 3.29%, 能够较好地描述试样高温、高应变率下的流变行为。

关键词: 不锈钢; 动态力学性能; 应变强化指数; 应变率敏感性; 本构模型

中图分类号: TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)02-0178-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.02.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on dynamic mechanical properties and constitutive model of 022Cr18Ni14Mo2 stainless steel under impact load

Jia Haishen¹, Luo Wencui², Zhang Jilin², Yi Xiangbin^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Green Cutting Technology and Application in Gansu Province, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Gansu Province Mechanical Equipment Advanced Manufacturing Collaborative Innovation Center, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: The quasi-static and dynamic compression tests of 022Cr18Ni14Mo2 stainless steel were performed by using UTM5305 universal testing machine and split Hopkinson compression bar. The strain hardening characteristics and the dependence of flow stress on strain rate were discussed. The quantitative analysis was carried out by taking two parameters of strain hardening index and strain rate sensitivity coefficient into account. Based on the above analysis results, the traditional J-C constitutive model was revised and a new type of constitutive model was constructed. The parameters of the modified constitutive model are identified with the help of experimental data. The predicted values from the model

收稿日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51865026); 甘肃省高等学校创新基金项目(2021A-156、2021B-319); 甘肃省高等学校产业支撑(2021-CYZC-52); 兰州工业学院“启智”人才培养计划(2018QZ-03)。

作者简介: 贾海深(1982—), 男, 河南周口人, 讲师, 硕士, 主要从事金属材料力学性能研究与切削加工, E-mail: jhsk9365@126.com; *通讯作者: 易湘斌(1979—), 男, 甘肃兰州人, 副教授, 硕士, 主要从事金属切削与力学性能研究, E-mail: 530064133@qq.com。

are compared with the experimental values, and the correlation coefficient (R) and average relative error ($AARE$) of the constitutive model are used to evaluate it. The results show that the sample has obvious strain hardening characteristics and remarkable strain rate sensitivity. The strain hardening index is dominated by strain and strain rate, and the strain rate sensitivity coefficient increases with the increase of strain rate, and the increase amplitude decreases gradually. The correlation coefficient (R) and average relative error ($AARE$) of the modified constitutive model are 0.9896 and 3.29%, respectively, which can better describe the rheological behavior of specimens at high temperature and high strain rate.

Key words: stainless steel, dynamic mechanical properties, strain hardening index, strain rate sensitivity coefficient, constitutive model

0 引言

022Cr18Ni14Mo2 不锈钢具有耐腐蚀性强、抗氧化性高以及优良的可焊接性、成形性和应变硬化特性,在工程结构设备(如建筑、核工业、航空等领域)中具有广泛的应用前景^[1-5]。然而,在不同的冲击载荷作用下,该材料所制备的工程结构件呈现出不同的动态力学特性。剖分式 Hopkinson 压杆装置作为研究各类工程材料在高速冲载下力学性能的主要手段,在工程中已得到广泛的应用^[6-9]。国内外学者借助该装置已对不锈钢开展了诸多的研究,并取得了一定研究成果。闫秋实等人^[10]研究了高温、高应变率下建筑不锈钢的动态力学性能,并建立了修正的 J-C 本构模型,结果表明该建筑不锈钢具有应变率敏感性、温度软化效应,所建立的本构模型能较好地描述其力学性能。吴亮等人^[11]对马氏体沉淀硬化不锈钢 FV520 B 进行了动态力学性能研究,结果表明该材料具有典型的应变硬化、应变率强化和温度软化效应,所构建的 P-L 本构模型较 J-C 本构模型的预测精度更高。Lee 等人^[12]从温度、应变率两个方面对医用 316L 不锈钢展开了力学性能的研究,表明其动态流变行为及微观组织演变均与温度、应变率有关,经 SEM 观察,其断面为穿晶状的酒窝状结构。何著等人^[13]基于 C-S 本构模型对 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢动态力学性能进行描述,结果表明从工程应用的安全方面考虑,该模型对工程应力-应变曲线预测较好;Peng Jian^[14]等人在温度范围为 20~300 °C,应变率分别为 5×10^{-4} 、 1×10^{-3} 、 5×10^{-3} 、 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下研究了 316L 不锈钢的应变率敏感度和温度敏感度,并考虑温度敏感度构建了修正的 J-C 本构模型,所建立的 J-C 本构模型可用于描述其拉伸行为的应变率敏感性和温度敏感性行为。

然而,上述针对不锈钢的研究主要集中在低应

变率下或较窄应变率范围,较少涉及依据应变硬化、应变率敏感性等动态力学特性而开展其修正本构模型的研究。因此,为丰富不锈钢动态力学性能的研究成果,用于其结构件的设计,成形工艺分析及成形过程的数值模拟研究,笔者以 022Cr18Ni14Mo2 不锈钢为研究对象,借助 UTM5305 万能试验机和剖分式 Hopkinson 压杆装置,对其进行准静态及动态下的力学性能试验研究。依据获取的试验数据,分析了其应变硬化特性,应变率敏感性,并结合分析的结果构建了修正的 J-C 本构模型,从相关性系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 两个指标对构建的 J-C 本构模型进行了评价。研究成果为分析其成形机理,优化成形工艺参数,建立成形工艺过程的数值模拟提供了一定的理论依据和技术支撑,进而促进了该材料在工程结构中的应用前景。

1 试验部分

试验中所用的 022Cr18Ni14Mo2 不锈钢,除 Fe 元素以外的名义成分如表 1 所示。试验前对材料进行 1 050 °C 加热+保温 40 min+空冷的固溶处理,经线切割制备成 $\text{O}3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 圆柱形试样。为了确保试验精度,试样两端面应保证一定的平行度要求,且两端面表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ 。

表 1 022Cr18Ni14Mo2 不锈钢主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of 022Cr18Ni14Mo2 stainless steel %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.08	0.75	2.00	0.045	0.03	8.22	18.89

在温度为 25 °C,应变率为 0.001、0.01 s^{-1} 和 0.1 s^{-1} 下,在型号为 UTM5305 的试验机上进行准静态试验。在温度分别为 25、150、275 °C 和 400 °C,应变率为 2000、3 000、4 000、5 000 s^{-1} 下,由型号为 ALT1000 的剖分式 Hopkinson 压杆试验平台完

成动态试验。为确保试验数据的有效性,每种条件下进行三次平行试验,并取三次试验数据的平均值作为分析数据。对冲击后的试样表面进行研磨、抛光处理制备成金相试样,用王水进行 15~20 s 左右的腐蚀,经清洗干燥后在扫描电子显微镜(FEI In-spect F50)下进行显微组织观察。

2 试验结果与分析

2.1 室温条件下试样的应变硬化效应分析

图 1 为测试温度为 25 °C,准静态下的真应力-真应变曲线,图 2 为温度在 25 °C 下不同应变率的真应力-真应变曲线。结果表明:试样均具有一定的应变硬化效应,高应变率下这种应变硬化效应较为显著,且应变强化效果随着应变的增加逐渐减小。具体表现为应力-应变曲线的斜率逐渐减小。应变硬化效应从宏观上表征了试样内部微观组织变化特征,试样在塑变过程中,随着应变的增加,晶粒内部位错运动增值并集聚,其密度增加,以及变形孪晶的产生,致使晶粒内部出现较多的以变形孪晶为主并包含位错的变形带,如图 3 所示。而变形孪晶的出现进一步阻碍了位错运动,致使晶粒内变形带的增加,变形困难,导致试样的应变硬化现象加剧^[15-16]。

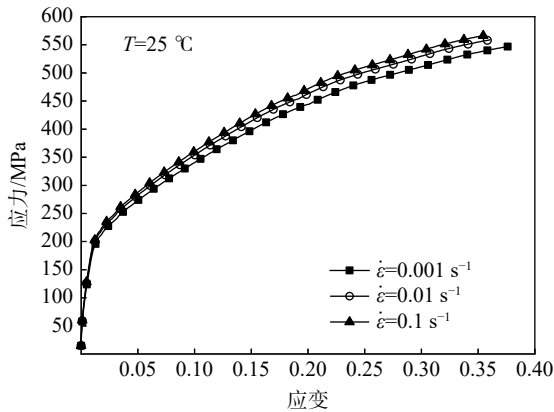


图 1 准静态下的应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curve in quasi-static state

应变硬化指数作为表征材料应变硬化能力强弱的重要参量,其定义如下^[17-18]:

$$n = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \epsilon} \quad (1)$$

对式(1)进行微分的差分处理可得:

$$n = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \epsilon} \approx \frac{\Delta \ln \sigma}{\Delta \ln \epsilon} = \frac{\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1}{\ln \epsilon_2 - \ln \epsilon_1} \quad (2)$$

式中, n 为应变强化指数, σ_1 、 σ_2 、 ϵ_1 、 ϵ_2 为应力-应变曲线上所选定的两点应力(MPa)和相应的应变。

表 2 为利用式(2)所计算出的应变强化指数 n 随应变、应变率的变化关系。由表 2 可知:随着应变的增加,在相同的应变率变化范围内,应变强化指数 n 的值逐渐减小,表明试样的应变强化程度在逐渐减弱。随着应变率的增加,应变强化指数 n 逐渐减小,表明试样在高应变率下的应变强化程度低于低应变率下的应变强化程度,即该试样在低应变率下,表现出较强的应变率强化效应。应变强化指数 n 的这种变化特征也说明了图 2 所呈现出的应力-应变曲线的变化规律。此外,应变硬化指数的变化特征对构建描述其应力-应变强化关系的本构模型有重要指导意义。

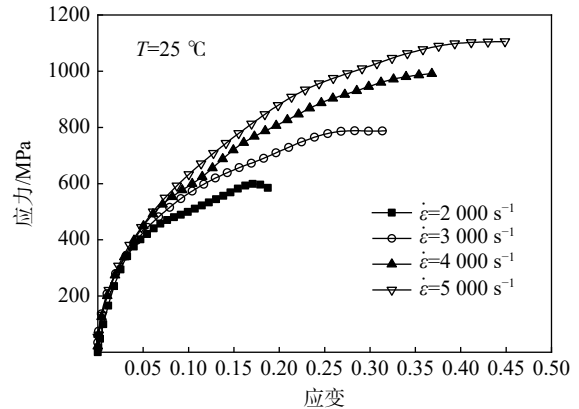


图 2 温度在 25 °C 不同应变率下的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves at different strain rates ($T=25\text{ }^\circ\text{C}$)

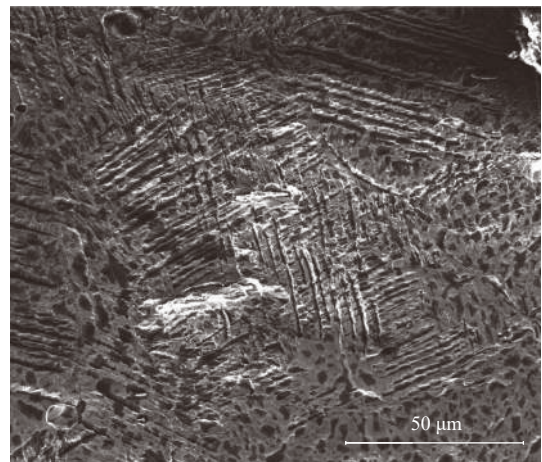


图 3 温度在 25 °C 时 5 000 s⁻¹ 下试样冲击后的微观组织
Fig. 3 The microstructure of the sample after impact at 5 000 s⁻¹ and at 25 °C

2.2 应变率敏感性分析

图 4 为 400 °C 不同应变率下应力-应变曲线。由图 2、图 4 表明:试样在室温和高温下均表现出显著的应变率敏感性,即随着应变率的增加,流动应力

逐渐增加,且增加的幅度逐渐减弱。试样的应变率强化效应主要归结于随着应变率的增加,晶粒内部位错运动的产生及位错密度的增多,变形孪晶的产

生使应力增加,同时应变率强化程度也受到塑变过程产生的绝热温升影响,致使产生部分热软化效应的抑制作用。

表 2 不同应变率、应变处的应变硬化指数
Table 2 The strain hardening index of steel impacted at different strain rate and strain

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	n				
	$\epsilon=0.1$	$\epsilon=0.15$	$\epsilon=0.20$	$\epsilon=0.25$	$\epsilon=0.30$
0.01	0.862 5	0.802 5	0.725 8	0.698 4	0.612 7
2 000	0.845 8	0.867 9			
3 000	0.794 6	0.760 9	0.691 8	0.653 9	0.556 9
4 000	0.765 4	0.740 1	0.645 9	0.601 6	0.540 9
5 000	0.753 7	0.730 7	0.632 9	0.584 6	0.528 4

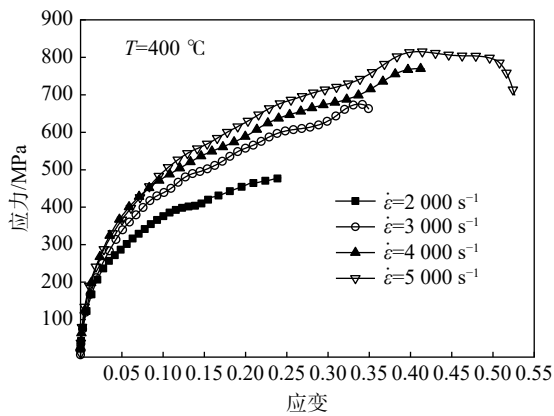


图 4 温度在 400 °C 时不同应变率下应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves at different strain rates (T=400 °C)

为表征流动应力对应变率的依赖程度,引入应变率敏感性系数(β)来量化应变率对流动应力的强化效应。其定义为^[19-20]:

$$\beta = \frac{\partial \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\ln(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)} \quad (3)$$

式中, σ_1 、 σ_2 为同一温度下,应变率为 $\dot{\epsilon}_1$ 、 $\dot{\epsilon}_2$ 所对应的流动应力值; $\dot{\epsilon}_1$ 、 $\dot{\epsilon}_2$ 为同一温度下的两种应变率。

表 3 为 25 °C,应变为 0.15 时,由式(3)所计算出不同应变率下应变率敏感性系数的值。由表 3 表明应变率敏感性系数受应变率的影响,随着应变率的增加,其值逐渐变小。试样应变率敏感性系数的变化特征表明:应变率强化效应随着应变率的增加在减弱,即该试样在较高应变率加载下,应力对应变率的敏感度相对较低。试样呈现出应变率敏感性变化的特征,为后文构建描述其应力与应变率强化

效果的关系提供了一定的理论依据。

表 3 不同应变率下的应变率敏感性系数
Table 3 Strain rate sensitivity coefficient at different strain rates

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	应变率敏感性系数 β
2 000	11.153 8
3 000	18.661 9
4 000	22.945 8
5 000	25.015 9

3 本构模型

3.1 传统 J-C 本构模型

传统 J-C 本构模型^[21-22]包含应变强化项,应变率强化项和温度软化项,广泛用于描述材料的动态塑变过程,其应力(σ)与应变(ϵ)、应变率($\dot{\epsilon}$)和温度(T)间的变化关系以如下表达式所示:

$$\sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^*, T^*) = g(\bar{\epsilon}^p) \Gamma(\dot{\epsilon}^*) \Theta(T^*) \quad (4)$$

$$g(\bar{\epsilon}^p) = A + B(\bar{\epsilon}^p)^n \quad (5)$$

$$\Gamma(\dot{\epsilon}^*) = 1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*) \quad (6)$$

$$\Theta(T^*) = 1 - (T^*)^m \quad (7)$$

$$T^* = (T - T_m) / (T_m - T_r) \quad (8)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为材料流动应力(MPa); A 为准静态下的屈服强度; B 为应变硬化系数; n 为应变硬化指数; C 为应变率强化系数; m 为温度软化指数; $\bar{\epsilon}^p = \epsilon^p / \epsilon_0$ 为等效塑性应变; ϵ^p 为塑性应变; ϵ_0 为参考应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 为量纲一塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率; T^* 为相对温度(°C); T_r 为参考温度(°C); T_m 为材料的熔点(°C); T 为测试温度(°C)。

然而,在传统的 J-C 本构模型中,模型参数确定

的过程是假定上述三项之间相互独立,忽略了应变、应变率温度以及其相互间的耦合效应对模型参数的影响程度,致使针对不同材料呈现出不同动态力学性能,不能较准确地描述其流动应力与应变、应变率和温度的变化关系。为此,为了建立能够准确描述试样的流动应力与应变、应变率和温度的变化关系,需对传统 J-C 本构模型进行修正。

3.2 修正 J-C 本构模型

根据 2.1、2.2 节分析的结果,对传统 J-C 本构模型进行如下修改:

1) 考虑到该试样的应变强化系数随应变、应变率变化而变化,依据应变硬化项中,应力与应变的关系通常为多项式或指数模型^[23],故将传统 J-C 本构模型的应变强化项修正为应变的多项式模型,即:

$$g(\bar{\epsilon}^p) = (B_0 + B_1(\bar{\epsilon}^p) + B_2(\bar{\epsilon}^p)^2 + B_3(\bar{\epsilon}^p)^3) \quad (9)$$

2) 基于对试样应变率敏感性系数的分析,为了较准确地描述其应力与应变率强化程度的关系,将应变率强化系数 C 看作应变率的函数,即:

$$C = f(\dot{\epsilon}) = C_0 + C_1\dot{\epsilon} + C_2\dot{\epsilon}^2 \quad (10)$$

至此,修正的 J-C 本构模型的表达式如下:

$$\sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^*, T^*) = g(\bar{\epsilon}^p)\Gamma(\dot{\epsilon}^*)\Theta(T^*) = (B_0 + B_1(\bar{\epsilon}^p) + B_2(\bar{\epsilon}^p)^2 + B_3(\bar{\epsilon}^p)^3) \cdot (1 + (C_0 + C_1\dot{\epsilon} + C_2\dot{\epsilon}^2)\ln(\dot{\epsilon}^*)) \cdot (1 - (T^*)^m) \quad (11)$$

$$T^* = (T - T_m)/(T_m - T_r)$$

3.3 本构模型参数的确定

3.3.1 参数 B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 的确定

选参考应变为 1,参考应变率为 0.01 s^{-1} ,参考温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。以准静态(应变率为 $\dot{\epsilon}_0=0.01$ 、 $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$)的试验数据确定上述参数时,修正的本构方程中应变率项和温度项的值均为 1,则(11)式可简化为:

$$\sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}_0, T) = (B_0 + B_1(\bar{\epsilon}^p) + B_2(\bar{\epsilon}^p)^2 + B_3(\bar{\epsilon}^p)^3) \quad (12)$$

将数据代入(12)式进行多项式拟合,拟合结果如图 5 所示,可得: B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 的值分别为 200.929 29、1 954.908 06、-3 295.405 34、2 096.688 5。

3.3.2 C_0 、 C_1 、 C_2 的确定

以温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,应变率为 $2\ 000 \sim 5\ 000 \text{ s}^{-1}$ 的数据确定应变率项各参数时,本构方程中温度项的值为 1,则(11)式可简化为:

$$1 - \frac{\sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^*, T^*)}{(B_0 + B_1(\bar{\epsilon}^p) + B_2(\bar{\epsilon}^p)^2 + B_3(\bar{\epsilon}^p)^3) \cdot (1 + (C_0 + C_1\dot{\epsilon} + C_2\dot{\epsilon}^2)\ln(\dot{\epsilon}^*))} = (T^*)^m \quad (15)$$

将上式两边同时取对数后,可得:

$$\ln\left(1 - \frac{\sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^*, T^*)}{(B_0 + B_1(\bar{\epsilon}^p) + B_2(\bar{\epsilon}^p)^2 + B_3(\bar{\epsilon}^p)^3) \cdot (1 + (C_0 + C_1\dot{\epsilon} + C_2\dot{\epsilon}^2)\ln(\dot{\epsilon}^*))}\right) = m \ln(T^*) \quad (16)$$

$$\sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^*) = (B_0 + B_1(\bar{\epsilon}^p) + B_2(\bar{\epsilon}^p)^2 + B_3(\bar{\epsilon}^p)^3) \cdot (1 + (C_0 + C_1\dot{\epsilon} + C_2\dot{\epsilon}^2)\ln(\dot{\epsilon}^*)) \quad (13)$$

对上式进行转化可得:

$$1 - \frac{\sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^*)}{(B_0 + B_1(\bar{\epsilon}^p) + B_2(\bar{\epsilon}^p)^2 + B_3(\bar{\epsilon}^p)^3)} = (C_0 + C_1\dot{\epsilon} + C_2\dot{\epsilon}^2)\ln(\dot{\epsilon}^*) \quad (14)$$

将 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,应变率变化范围为 $2000 \sim 5\ 000 \text{ s}^{-1}$ 处的试验数据代入式(6)进行多项式拟合,拟合结果如图 6 所示,进而求得 C_0 、 C_1 、 C_2 的值分别为: $-0.013\ 59$ 、 2.69×10^{-5} 、 -2.11×10^{-9} 。

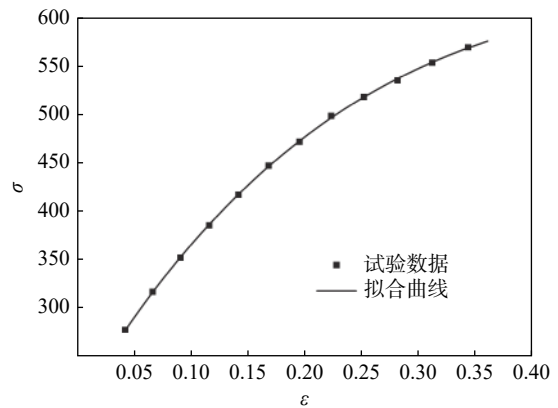


图 5 修正的 J-C 本构模型第一项拟合曲线
Fig. 5 The first fitting curve of the modified JC constitutive model

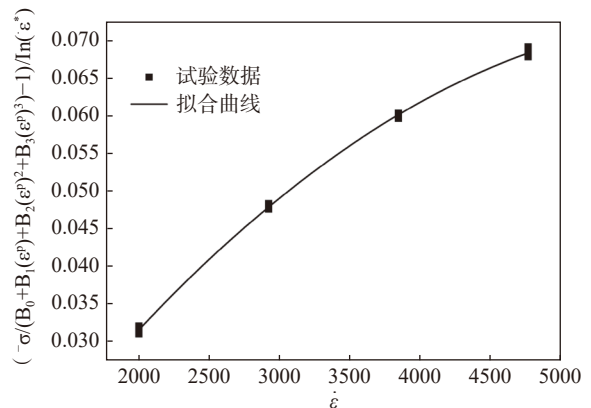


图 6 修正的 JC 本构模型第二项拟合曲线
Fig. 6 The second fitting curve of the modified JC constitutive model

3.3.3 参数 m 的确定

对(11)式进行转化可得:

将应变率为 $5\ 000\ \text{s}^{-1}$, 不同温度下的试验数据代入(16)式, 并进行线性拟合, 拟合结果如图 7 所示, 则 m 的值为 0.867 8。

至此, 修正的 J-C 本构表达式如下:

$$\begin{aligned} \sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^*, T^*) = & (200.929\ 29 + 1\ 954.908\ 06(\bar{\epsilon}^p) \\ & - 3\ 295.405\ 34(\bar{\epsilon}^p)^2 + 2\ 096.688\ 5(\bar{\epsilon}^p)^3) \cdot \\ & (1 + (-0.013\ 59 + 2.69 \times 10^{-5} \dot{\epsilon} - 2.11 \times 10^{-9} \dot{\epsilon}^2) \ln(\dot{\epsilon}^*)) \cdot \\ & (1 - (T^*)^{0.867\ 8}) \end{aligned} \quad (17)$$

3.4 修正的 J-C 本构模型验证

图 8 为不同测试条件下, 试验值与修正的 J-C 本构模型预测值间的对比, 表 4 为不同试验条件下修正 J-C 本构模型的平均绝对误差值。由图 8、表 4 可知: 修正的 J-C 本构模型对本试样的预测在室温下的误差相对较大, 但总体呈现出随应变率或温度的升高, 预测精度逐渐降低的趋势。造成此现象的主要原因为: 在确定本构模型参数时, 并没有考虑应

变、应变率与温度之间的相互耦合作用对本构模型参数值的影响, 以及没有考虑试样在快速加载下塑变过程中绝热温升对其流动应力的影响。

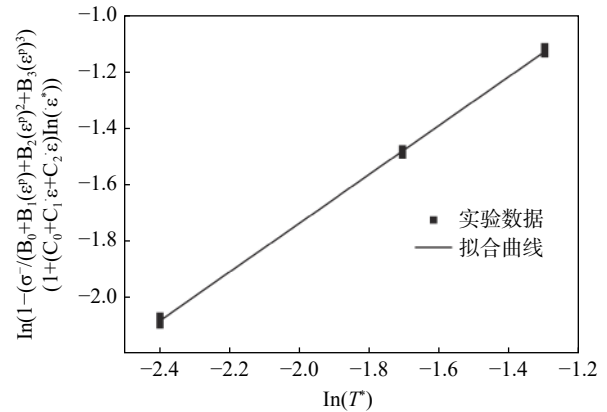


图 7 修正的 JC 本构模型第三项拟合曲线
Fig. 7 The third fitting curve of the modified JC constitutive model

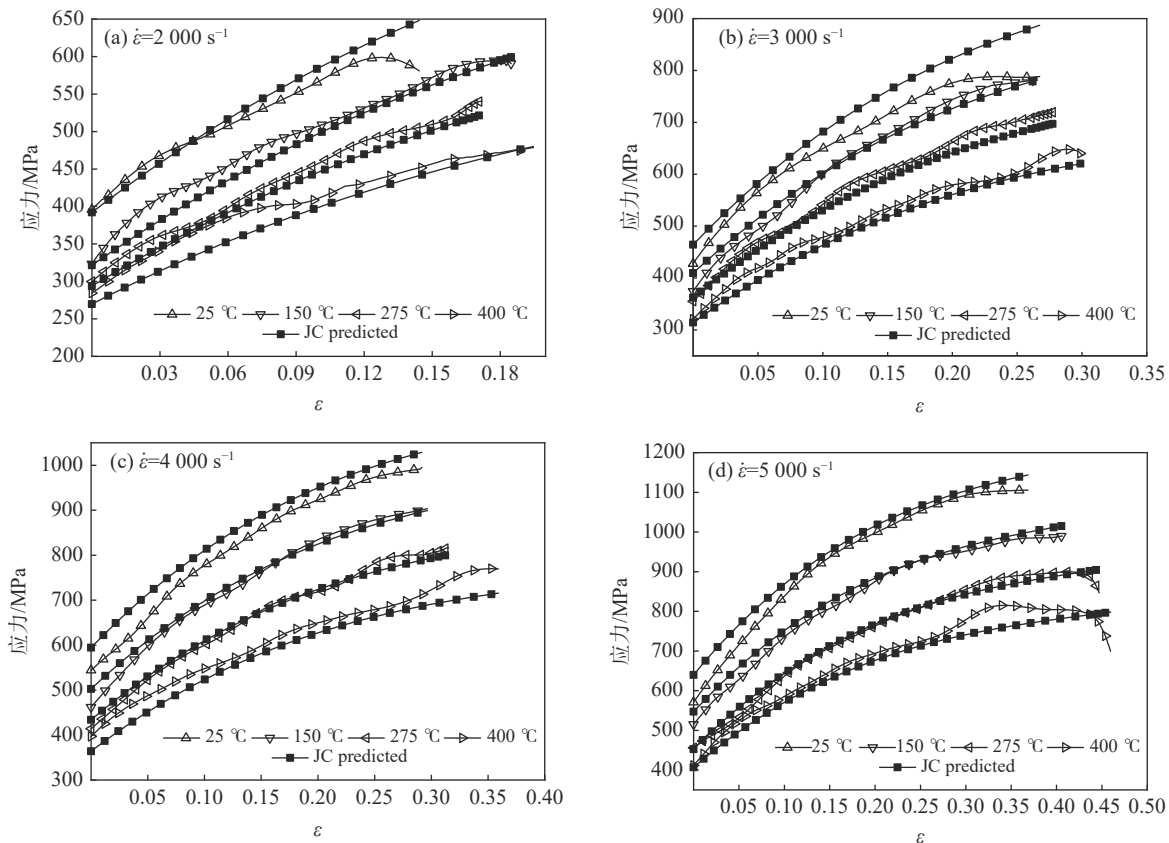


图 8 不同应变率下应力-应变曲线试验值与修正 J-C 模型预测值的对比

Fig. 8 Comparison of experimental values of stress-strain curves and predicted values of modified J-C model at different strain rates

为了定量探讨所修正的本构模型的预测精度, 引出了平均值相对误差 (AARE) 和相关系数 (R) 两

种参数来进行分析, 其参数的表达式如下^[24-25]:

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (18)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (19)$$

式中, E_i 、 P_i 分别为流动应力的试验值、预测值 (MPa); \bar{E} 、 \bar{P} 分别为 E_i 和 P_i 的平均值; N 为研究对象

的数据总数。

将试验数据和修正模型的预测值代入 (19)、(20) 式中, 试验值与修正 J-C 模型预测值间的相关性如图 9 所示。所建立的修正模型的预测值与试验值的相关性系数 (R) 为 0.989 6, 平均相对误差 (AARE) 分别为 3.29%。由此可知: 该修正的本构模型能够较好地描述 022Cr18Ni14Mo2 不锈钢的流动应力与应变、应变率和温度间的变化关系。

表 4 修正的 J-C 本构模型平均绝对误差值
Table 4 The average absolute error value of the modified J-C constitutive model

$\dot{\varepsilon} / s^{-1}$	平均绝对误差/MPa			
	25 °C	150 °C	275 °C	400 °C
2 000	15.660 777 54	14.221 306 79	22.070 332 263 291 9	19.518 644 392 075 7
3 000	46.804 948 41	13.124 390 42	15.300 280 186 534 9	18.328 867 187 617 3
4 000	35.889 389 85	12.006 044 71	10.044 091 979 694 5	29.068 729 700 320 3
5 000	27.737 778 16	16.334 866 36	10.751 980 414 012 6	24.803 471 263 589 3

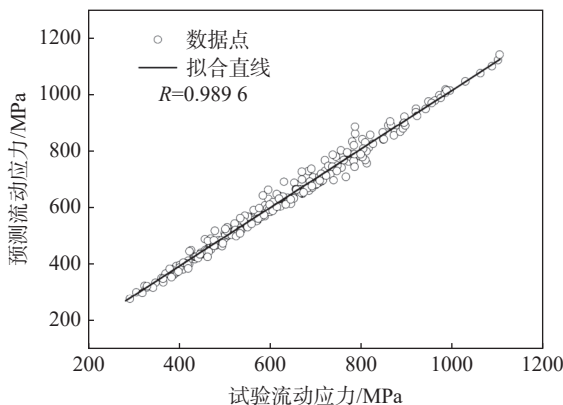


图 9 试验值与修正 J-C 模型预测值间的相关性

Fig. 9 Correlation between experimental values and modified J-C model prediction values

4 结论

1) 022Cr18Ni14Mo2 不锈钢具有明显的应变硬化特性和显著的应变率敏感性, 应变强化指数受应变、应变率的支配, 应变率敏感性系数随应变率的增加而增加, 且增加的幅度逐渐减小。

2) 建立的修正本构模型相关性系数 (R) 分别为 0.989 6, 平均相对误差 (AARE) 分别为 3.29%, 能够较好地描述试样高温、高应变率下的流变行为。

3) 建立的修正本构模型随应变率和温度的变化, 仍存在一定的误差, 主要因为为在确定本构模型参数时, 并未考虑应变、应变率与温度之间相互耦合作用的影响。

参考文献

[1] Elmeslamy A S, Francis J A, Li L. A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L stainless steel[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2014, 113: 49–59.

[2] Shang Y, Yuan Y, Li D, et al. Effects of scanning speed on in vitro biocompatibility of 316L stainless steel parts elaborated by selective laser melting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9): 4379–4285.

[3] Otero E, Pardo A, Utrilla M V, et al. Corrosion behaviour of AISI 304 L and AISI 316L stainless steels prepared by powder metallurgy in the presence of sulphuric and phosphoric acid[J]. *Corrosion Science*, 1998, 40(8): 1421–1434.

[4] Ehab Ellobody, Ben Young. Structural performance of cold-formed high strength stainless steel columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(2): 1631–1649.

[5] Liu Zhenbao, Liang Jianxiong, Su Jie, et al. Research and development status of high-strength stainless steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4): 449–554.
(刘振宝, 梁剑雄, 苏杰, 等. 高强度不锈钢的研究及发展现状[J]. *金属学报*, 2020, 56(4): 449–554.)

[6] Guo Pengcheng, Cao Shufen, Ye Tuo, et al. Mechanical constitutive equation and simulation of AM80 magnesium alloy under high speed impact load[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(6): 1075–1082.
(郭鹏程, 曹淑芬, 叶拓, 等. 高速冲击载荷下 AM80 镁合金的力学本构及仿真模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(6):

- 1075–1082.)
- [7] Noble J P, Goldthorpe B D, Church P. The use of the Hopkinson bar to validate constitutive relations at high rates of strain[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1999, 47(5): 1187–1206.
- [8] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split hopkinson pressure bar[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994, 77(1): 263–267.
- [9] Li Yulong, Suo Tao, Guo Weiguo, *et al.* Hopkinson pressure bar system for determining the dynamic performance of materials at high temperature and high strain rate[J]. *Explosion and Shock*, 2005, 25(6): 487–492.
(李玉龙, 索涛, 郭伟国, 等. 确定材料在高温高应变率下动态性能的Hopkinson压杆系统[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(6): 487–492.)
- [10] Yan Qiushi, Sun Bowen, Yang Lu. Study on dynamic mechanical behavior of structural stainless steel at elevated temperature and high strain rate[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 128–132.
(闫秋实, 孙博文, 杨璐. 高温高应变率下建筑不锈钢动态力学性能研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 128–132.)
- [11] Wu Liang, Hu Yisen, Ji Xiang, *et al.* Research on dynamic mechanical properties and constitutive model of martensitic precipitation hardening stainless steel FV520B[J]. *Mechanical Strength*, 2018, 40(3): 79–83.
(吴亮, 胡毅森, 纪翔, 等. 马氏体沉淀硬化不锈钢FV520B动态力学性能及本构模型的研究[J]. *机械强度*, 2018, 40(3): 79–83.)
- [12] Lee W S, Chen T H, Lin C F, *et al.* Dynamic mechanical response of biomedical 316L stainless steel as function of strain rate and temperature[J]. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2011, 2011(8): 1–13.
- [13] He Zhu, Zhao Shougeng, Yang Jialing, *et al.* Research on dynamic mechanical properties of 0Cr17Ni4Cu4Nb stainless steel[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2007, 25(3): 418–421.
(何著, 赵寿根, 杨嘉陵, 等. 0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢动态力学性能研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2007, 25(3): 418–421.)
- [14] Peng J, Li K S, Pei J F, *et al.* Temperature-dependent SRS behavior of 316 L and its constitutive model[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2018, 31(3): 234–244.
- [15] Zhou Huijiu, Huang Mingzhi. *Strength of metal materials*[M]. Beijing: Science Press, 1989.
(周惠久, 黄明志. *金属材料强度*[M]. 北京: 科学出版社, 1989.)
- [16] Li Qingsheng. *Material strength*[M]. Taiyuan: Shanxi Science Education Press, 1990.
(李庆生. *材料强度学*[M]. 太原: 山西科学教育出版社, 1990.)
- [17] Fang Jian, Wei Yijing, Wang Chengzhong. Analytical measurement and mechanical analysis of tensile strain hardening index[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2003, 10(3): 12–17.
(方健, 魏毅静, 王承忠. 拉伸应变硬化指数的解析测定及力学分析[J]. *塑性工程学报*, 2003, 10(3): 12–17.)
- [18] Sun Xuewei, Ling Yongzhuo, Sun Jisong, *et al.* A method of determining strain-hardening exponents[J]. *Mechanical Strength*, 1995, 17(4): 27–28.
(孙学伟, 令永卓, 孙吉松, 等. 材料硬化指数n的确定方法[J]. *机械强度*, 1995, 17(4): 27–28.)
- [19] Feng Duan. *Metal physics-mechanical properties of metals*[M]. Beijing: Science Press, 1999.
(冯端. *金属物理学-金属力学性能*[M]. 北京: 科学出版社, 1999.)
- [20] Shi Juyuan. *The dynamic mechanical properties and application of steel*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
(史巨元. *钢的动态力学性能及应用*[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.)
- [21] 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.
- [22] Shu Chang, Cheng Li, Xu Yu. Research on Johnson-Cook constitutive model parameter estimation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(5): 1073–1083.
(舒畅, 程礼, 许煜. Johnson-Cook本构模型参数估计研究[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(5): 1073–1083.)
- [23] Shokry, Abdallah. A modified Johnson–Cook model for flow behavior of alloy 800 H at intermediate strain rates and high temperatures[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(12): 5723–5730.
- [24] Zhang Bing, Yue Lei, Chen Hanfeng, *et al.* Hot deformation behavior of as-cast GH4169 alloy and comparison of three constitutive models[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(1): 212–222.
(张兵, 岳磊, 陈韩锋, 等. 铸态GH4169合金热变形行为及三种本构模型对比[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(1): 212–222.)
- [25] Sheikhali A H, Morakkabati M. Constitutive modeling for hot working behavior of SP-700 titanium alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(10): 6525–6537.

实习编辑 唐肖

编辑 杨冬梅