考虑应变、应变率和温度耦合作用下航空不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 本构模型的建立

张继林[1], 张又铭[2], 罗文翠[1*], 易湘斌[3], 唐林虎[3], 姚家宝[4]

(1. 兰州工业学院, 甘肃省精密加工技术及装备工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 大连交通大学机车车辆工程学院, 辽宁 大连 116000; 3. 兰州工业学院, 甘肃省绿色切削加工技术及其应用重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 4. 兰州工业学院机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘　要: 航空不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 具有优良的特性, 广泛应用在各个机械的重要零部件上, 零件的加工过程伴随着大应变、高温和高应变率, 基于此考虑耦合关系建立能够真实反映切削力学性能的本构模型, 为切削仿真提供可靠的数据。以航空不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 为研究对象, 利用万能试验机(UTM5305)和高温分离式霍普金森试验装置(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB, ALT1000)分别进行准静态压缩试验(温度为 25 ℃, 应变率为 0.1、0.01、0.001s^{-1})和动态冲击试验(温度为 25、350、500、650 ℃, 应变率为 750、1 500、2000、2 600、3 500、4 500 s^{-1}), 获得该材料的应力应变关系, 并分析其力学性能, 结果表明该材料具有应变硬化效应、温度软化效应、应变率强化效应和增塑效应。综合应变、应变率和温度三者相互作用, 建立耦合作用下的 Johnson-Cook(JC)本构方程, 统计分析了试验数据与预测数据(原 JC 本构方程和修正 JC 本构方程数据), 原 JC 本构方程的相关系数(R)和平均相对误差(AARE)分别为 0.968 33 和 4.77%; 修正 JC 本构方程的相关系数(R)和平均相对误差(AARE)分别为 0.987 513 和 0.51%, 表明修正 JC 本构方程更加准确、可靠预测高应变率下应力应变的关系。

关键词: 航空不锈钢; 0Cr17Ni4Cu4Nb; JC 本构模型; 应变率强化; 增塑效应; 耦合作用
中图分类号: TG115.5,TG142.1　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004−7638(2023)06−0149−11
DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.06.021　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研　与作者互动

Establishment of a constitutive model of aviation stainless steel 0Cr17Ni4Cu4Nb considering the coupling effects of strain, strain rate and temperature

Zhang Jilin[1], Zhang Youming[2], Luo Wencui[1*], Yi Xiangbin[3], Tang Linhu[3], Yao Jiabao[4]

(1. Gansu Provincial Precision Machining Technology and Equipment Engineering Research Center, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. School of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116000, Liaoning, China; 3. Key Laboratory of Green Cutting Technology and Application in Gansu Province, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730070, Gansu, China)

收稿日期: 2023−02−06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51965031); 甘肃省青年科技基金计划项目(21JR7RA351); 甘肃省科技计划项目(22JR11RA156); 甘肃省高等学校产业支撑(2021-CYZC-52); 甘肃省重点人才项目 (甘组通字 [2022]77 号); 国家级大学生创新创业训练计划项目(DC2201-07)。

作者简介: 张继林, 1987 年出生, 男, 甘肃民乐人, 硕士, 副教授, 主要从事材料的动态力学性能、材料疲劳性能以及切削性能研究, E-mail: zjl-0111@163.com;　*通讯作者: 罗文翠, 1969 年出生, 男, 甘肃靖远人, 硕士, 教授, 主要从事材料的动态力学性能、材料疲劳性能以及切削性能研究, E-mail: 496021016@qq.com。

Abstract: The aviation stainless steel 0Cr17Ni4Cu4Nb has excellent characteristics and is widely used in important parts of various machines. The machining process of these parts is accompanied by large strain, high temperature and high strain rate. Based on this coupling relationship, a constitutive model that can truly reflect the cutting mechanical properties is established to provide reliable data for cutting simulation. This paper sets the aviation stainless steel 0Cr17Ni4Cu4Nb as the research object, and uses the universal testing machine (UTM5305) and the split Hopkinson Pressure Bar (SHPB, ALT1000) to carry out the quasi-static compression tests (temperature: 25 ℃, strain rate: 0.1, 0.01, 0.001 s^{-1}) and dynamic impact tests (temperature: 25, 350, 500 and 650 ℃, strain rate: 750, 1 500, 2 000, 2 600, 3 500 and 4 500 s^{-1}), respectively. The stress-strain relationship of the material is obtained, and its mechanical properties are analyzed. It is shown that the material exhibits strain hardening effect, temperature softening effect, strain rate strengthening effect and plasticizing effect. Combining the interaction of strain, strain rate and temperature, the Johnson-Cook (JC) constitutive equation under the coupling action is established. The test data and prediction data (the original and modified JC constitutive equation) are statistically analyzed. The correlation coefficient (R) and the average phase error (AARE) of the original JC constitutive equation are 0.968 33 and 4.77%, respectively. The correlation coefficient (R) and average relative error (AARE) of the modified JC constitutive equation are 0.987 513 and 0.51%, respectively, indicating that the modified JC constitutive equation is more accurate and reliable in predicting the stress-strain relationship at high strain rates.

Key words: aviation stainless steel, 0Cr17Ni4Cu4Nb, JC constitutive model, strain rate strengthening, plasticizing effect, coupling effect

0 引言

航空不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 具有高的强度、韧性、耐腐蚀性和焊接性能等优点，广泛应用在尖端工业和民用工业的核心部分，可用作齿轮、阀、泵以及叶片等零件[1−4]。上述零件在工作过程中，经常处于高温高压、高应变率和大冲击载荷作用下，区别于静态载荷作用下的力学性能，研究复杂环境下的动态力学性能显得非常必要和极具价值。同时它们作为重要零件，其精度和质量要求较高，通常采用切削加工的方法，切削加工是一个高温、大应变和高应变率的过程。随着仿真技术引入切削加工，在研究材料的加工机理和切削参数优化等方面发挥着巨大的作用，其具有成本低、效率高等优点[5−7]。材料的本构方程是材料在塑性变形过程中流变应力与应变、应变率和温度之间的函数关系，能够反映材料在动态加载过程中对热力参数的动态响应，也是仿真技术对材料的塑性变形数值模拟的重要基础[8−10]。基于仿真技术的切削不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 的研究，对其本构模型日益关注，越来越多的学者从事该方向的研究。

到目前为止，国内外针对不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 的研究主要集中在不同热处理工艺对力学性能、组织、腐蚀性能的影响以及疲劳性能等方面[11−14]，但是对不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 的动态力学性能和本构模型研究较少。笔者等人曾利用高温分离式霍普金森试验装置和万能试验机对不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 分别进行冲击试验和压缩试验，获得并分析应力应变关系，结果表明该材料具有应变率强化效应和温度软化效应[8]。同时建立 Johnson-Cook（JC）和 Power-Law（PL）本构模型，并对比两种本构模型的相关系数（R）和平均相对误差（AARE），结果表明，本构模型曲线与试验曲线吻合度较好，PL 模型拟合精度略优于 JC 模型。何著[15] 等人首先利用分离式 Hopkinson 压杆试验设备获得多种应变率下的应力应变关系，然后构建 Cowper-Symonds 动态强化模型，同时分析了工程应力应变曲线和真实应力应变曲线参数之间的相同点和不同点。材料的本构关系通常有经验型/唯象本构关系和物理概念本构关系[16]，其中唯象本构关系的 Johson-Cook（JC）模型具有形式简单、通过少量试验可以求得材料常数的优点，广泛在工程中应用[17−19]。何著等人对不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 进行了研究，但是没有建立 JC 本构模型；笔者之前虽然构建了 JC 本构模型，但没有对应变、应变率和温度耦合关系进行考虑。因此有必要考虑耦合作用修正 JC 本构模型。

笔者针对不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb，通过万能试验机（UTM5305）和高温分离式霍普金森试验装置

(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB, ALT1000)分别进行准静态压缩试验和动态冲击试验研究其力学性能, 基于试验数据考虑应变、应变率和温度之间耦合关系构建本构模型, 获得不锈钢高温变形时精度高的真应力真应变关系, 为今后切削加工工艺确定、仿真分析提供理论和试验依据。

1　试验

试验材料选用上海宝钢集团有限公司生产的尺寸为Ø30 mm 的 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢棒料, 其化学成分如表 1 所示。经过 1 040 ℃ 加热+保温 10 ~ 15 min+空冷的固溶处理, 根据 GB/T7314-2017《金属材料室温压缩试验方法》和《金属材料高应变速率室温压缩试验方法》[6], 准静态压缩试样和动态冲击试样尺寸分别为Ø6 mm×6 mm、Ø3 mm×3 mm。为了保证试样的尺寸、精度及质量要求, 首先用线切割加工成圆柱坯料, 然后用碳化硅研磨纸抛光试样的两个端面和圆柱面。试验用的子弹、入射杆和投射杆的材质为 18Ni, 尺寸分别为Ø8 mm×100 mm、Ø8 mm×190 mm、Ø8 mm×790 mm, 综合考虑实际加工中的应变率、温度和试验设备, 进行准静态压缩试验(温度: 25 ℃; 应变率: 0.001、0.01、0.1 s^{-1})和动态冲击试验(温度: 25、350、500、300 ℃; 应变率: 750、1 500、2000、2 600、3 500、4 500 s^{-1})。试验过程中调节气泵压力改变子弹的速度来控制试样应变率, 采用加热炉控制试验温度。试样两端涂抹耐高温的润滑油, 以降低它与入射杆和透射杆之间的摩擦。为了降低试验的随机误差, 每组试验至少重复三次, 以保证真应力真应变关系曲线的正确性。

表 1　0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢化学成分

Table 1　Chemical composition of 0Cr17Ni4Cu4Nb stainless steel　%

C	Si	Cr	Ni	Mn	P	S	Cu	Nb	Fe
0.06	0.80	16.25	3.60	0.82	0.030	0.022	3.83	0.28	Bal.

2　试验结果与分析

2.1　应变硬化效应和温度软化效应

不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 材料在温度 25 ℃ 时, 应变率为 0.1、0.01、0.001 s^{-1} 准静态条件下, $\varepsilon-\sigma$曲线关系如图 1 所示; 在一定应变率(750、1 500、2 000、2 600、3 500 和 4 500 s^{-1})、不同温度(25、350、500 ℃ 和 650 ℃)下的动态冲击试验$\varepsilon-\sigma$曲线关系如图 2 所示; 在一定温度, 不同应变率下的动态冲击试验$\varepsilon-\sigma$曲线关系如图 3 所示。

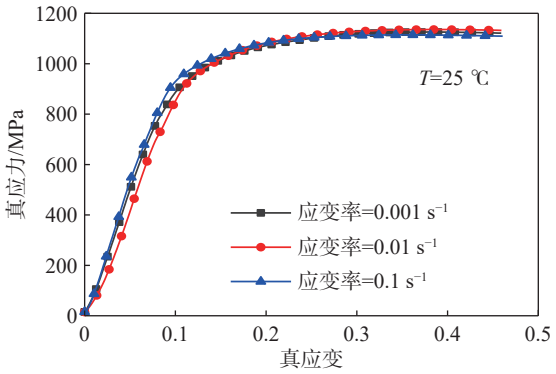


图 1　准静态压缩试验的$\varepsilon-\sigma$曲线

Fig. 1　$\varepsilon-\sigma$ curves by quasi-static compression tests

从图 1 和图 2 看出, 在一定的温度下, 应变逐渐增加时, 应力逐渐增加, 增加到某一数值时上下波动, 弹性阶段和塑性阶段明显, 但是屈服阶段不明显, 表现出应变强化效应[6], 且与应变和应变率具有一定关系。这是由于变形量增加, 材料的位错逐渐演变为位错缠结、位错胞和位错墙等, 致使密度显著[20]。为了定量分析上述关系, 特引入应变强化指数n(应变率和试验温度是定值), 定义为[21−22]:

$$n=\left.\frac{\partial \ln\sigma}{\partial \ln\varepsilon}\right|_{\dot{\varepsilon},T} \tag{1}$$

式中, n为材料的应变强化指数; σ为试验应力, MPa; ε为试验应变; $\dot{\varepsilon}$为试验应变率, s^{-1}; T为试验温度, ℃。

利用公式(1)计算不同条件下的应变强化指数, 见表 2。在同一应变率下, 当应变的增量相等时, 应变强化指数降低; 在同一应变下, 应变率增加, 应变强化指数降低。应变强化指数降低, 表明应变硬化程度降低。从图 2 和图 3 看出, 在一定的应变率下, 试验温度逐渐增加时, 塑性变形阶段的应力下降, 表现出温度软化效应[6]。这是由于温度增加使得材料发生动态再结晶, 产生一定的位错滑移, 变形抗力降低[23−24]。

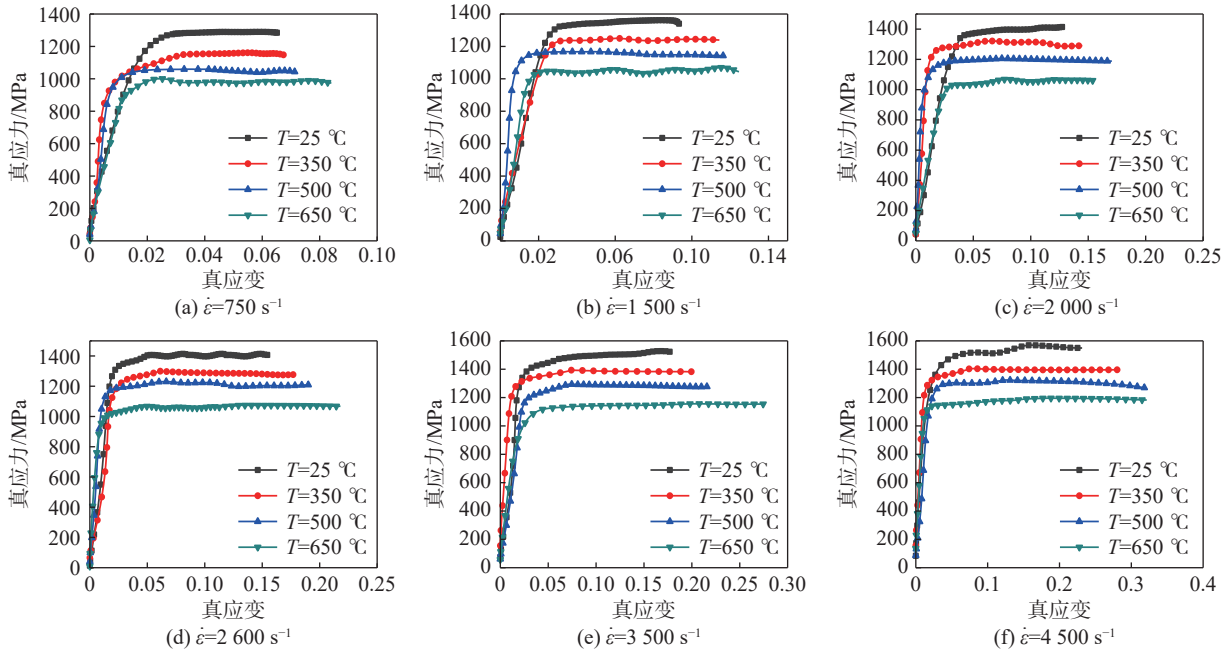


图 2　不同应变率下 SHPB 试验$\varepsilon-\sigma$曲线

Fig. 2　$\varepsilon-\sigma$ curves of SHPB under different strain rates

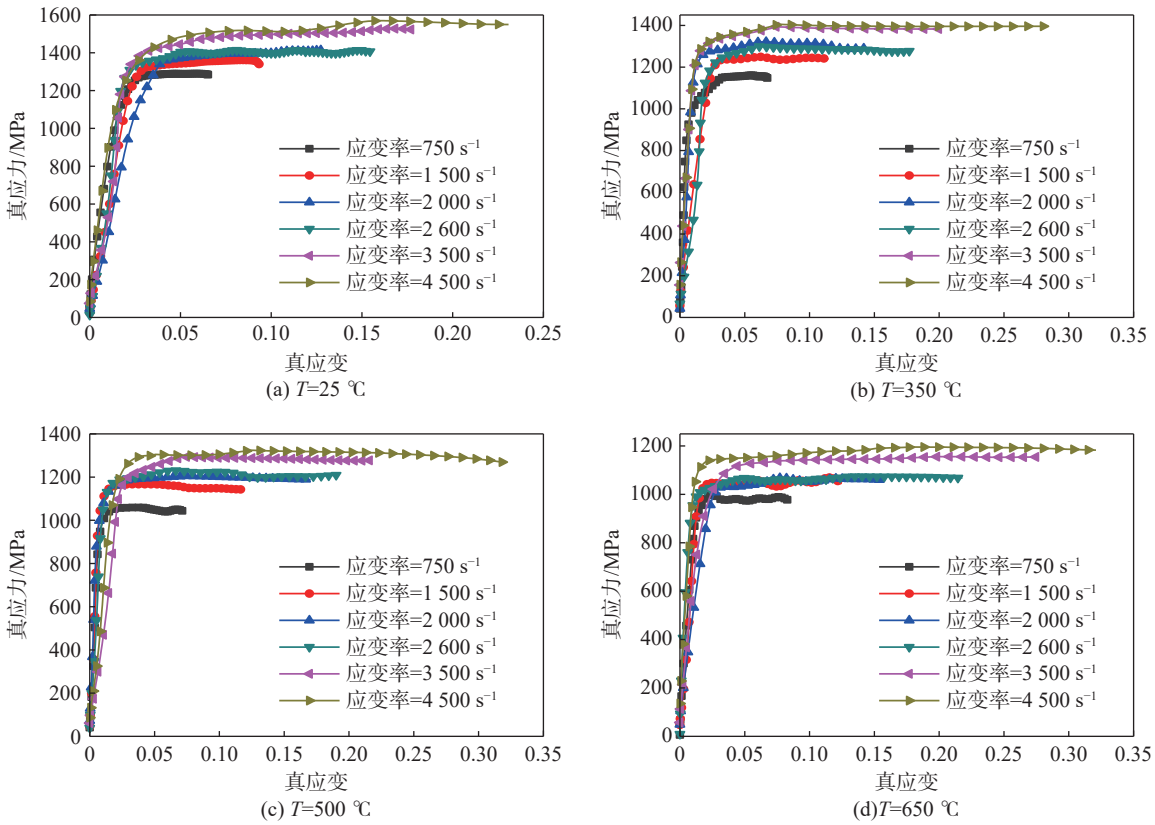


图 3　不同温度下 SHPB 试验$\varepsilon-\sigma$曲线

Fig. 3　$\varepsilon-\sigma$ curves of SHPB under different temperatures

2.2　应变率强化效应和增塑效应

从图 3 还可以看出，在一定温度下，当应变率增大时，0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢的应力也逐渐增加，但是变化幅度相对小，表现出应变率强化效应[6]，它

与应变和应变率具有一定关系。这是由于应变率增大, 材料的位错密度逐渐增大, 同时出现位错缠绕、交割等障碍, 阻碍位错运动, 阻力变大、变形抗力增加, 导致应变率强化效应[25]。为了进一步分析应变率强化效应, 特引入应变率敏感指数 m(应变率和试验温度是定值), 定义为[26]:

$$m = \left.\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}}\right|_{\varepsilon,T} \tag{2}$$

式中, m为材料的应变率敏感指数; σ为试验应力, MPa; ε为试验应变; $\dot{\varepsilon}$为试验应变率, s^{-1}; T为试验温度, ℃。

表 2　准静态下不同应变率和应变处的强化指数n
Table 2　Strengthening exponent n at different strain rates and strains under quasi-static state

$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	n					
	ε=0.20	ε=0.25	ε=0.30	ε=0.35	ε=0.40	ε=0.45
0.001	0.141 8	0.125 0	0.062 5	0.033 5	0.021 0	0.042 5
0.01	0.161 2	0.084 9	0.061 1	0.023 9	0.011 9	0.039 0
0.1	0.118 7	0.064 4	0.026 0	0.000 4	0.014 5	0.026 7

根据公式(2)计算应变率敏感指数, 在 25 ℃ 动态冲击下应变与应变率敏感指数的变化关系、应变率的对数与应变率敏感指数的变化关系分别如图 4、5 所示。从图 4 可以看出, 应变率在 750～2 600 s^{-1} 范围内, 应变逐渐增加时, 应变率敏感指数逐渐减小, 其降幅分别为 197.55%、59.87%、28.39%、6.13%; 应变率在 3 500 ～4 500 s^{-1} 范围内, 应变逐渐增加时, 应变率敏感指数逐渐增大, 其增幅分别为 27.79%、13.93%。从图 5 可以看出, 应变的对数增加时, 应变率敏感指数逐渐增加, 其增幅分别为 178.96%、386.03%、669.29%、426.14%。

在试验温度和应变率范围内, 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢表现出优异的塑性, 准静态压缩试验和动态冲击试验的试样变形为圆饼状, 但没有发生断裂, 如图 6、7 所示, 随着应变率的增加, 试样的直径变大, 厚度减小。定量分析其数据(表 3、4)发现, 在准静态下, 温度为 25 ℃、应变率为 0.1 s^{-1} 时, 压缩后的试样直径变为原来的 1.28 倍, 高度变为原来的 0.63 倍; 在动态下, 温度为 650 ℃、应变率为 4 500 s^{-1} 时, 压缩后的试样直径变为原来的 1.49 倍, 高度变为原来的 0.26 倍。应变率增加, 试样变形量增加, 材料的塑性变形阶段增长, 这正好与图 3 结果相一致, 应变率增大, 材料的塑性变形阶段明显变长。原因是材料出现孪生变形, 并产生绝热温升, 温度的升高使晶粒容易滑移, 导致材料塑性增大, 即增塑效应[27]。

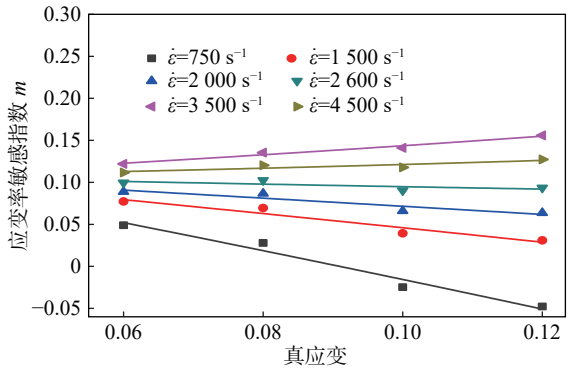


图 4　动态冲击时应变 (ε) 与应变率敏感指数 (m) 的关系
Fig. 4　Relationship between strain (ε) and strain rate sensitivity index (m)

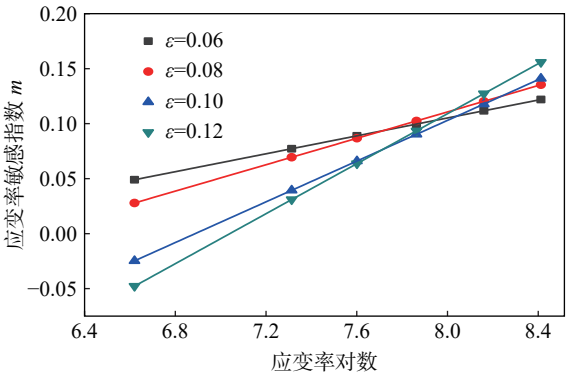
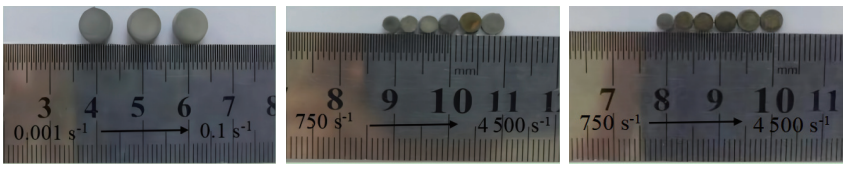
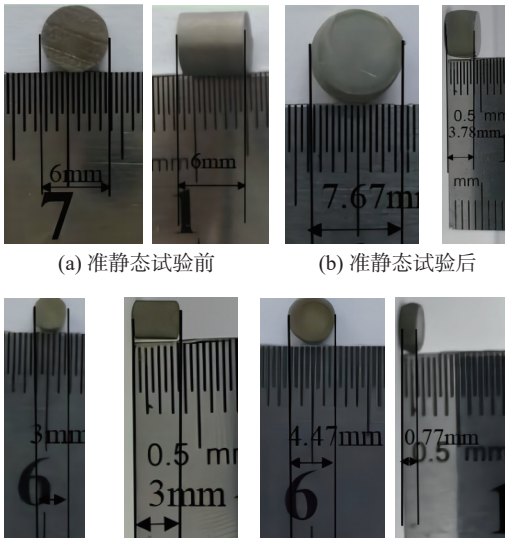


图 5　动态冲击时应变率的对数 (lg$\dot{\varepsilon}$) 与应变率敏感指数 (m) 的关系
Fig. 5　The relationship between the logarithm of the strain rate (lg$\dot{\varepsilon}$) and strain rate sensitivity index (m)



(a) 准静态 T=25 ℃　(b) 动态 T=500 ℃　(c) 动态 T=650 ℃

图 6　不同条件下试样变形
Fig. 6　Specimen deformation under different conditions



(a) 准静态试验前　(b) 准静态试验后

(c) 动态试验前　(d) 动态试验后

图 7　试验前后的试样

Fig. 7　Samples before and after the tests

表 3　准静态试样变形量

Table 3　Deformation of quasi-static specimens

应变率/s^{-1}	直径/mm	厚度/mm
0.001	7.29	4.31
0.01	7.43	4.11
0.1	7.67	3.78

表 4　动态试样变形量 (T=25 ℃ 和 T=650 ℃)

Table 4　Deformation of quasi-static specimens

T/℃	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	d/mm	h/mm
25	750	3.12	2.68
	1 500	3.18	2.47
	2 000	3.64	2.06
	2 600	3.77	1.86
	3 500	4.01	1.65
	4 500	4.42	0.76
650	750	3.36	2.40
	1 500	3.55	2.22
	2 000	3.71	1.97
	2 600	4.13	1.56
	3 500	4.37	1.51
	4 500	4.47	0.77

3　应变、应变率和温度耦合作用下 JC 本构模型

3.1　原 JC 本构模型

Johnson-Cook 模型能够反应金属材料在大应变、高应变率和高温条件下的力学性能[17, 28−29]，包括应变项、应变率项和温度项三项[30]，其基本形式为：

$$\overline{\sigma}(\overline{\varepsilon_p},\ \dot{\varepsilon}^*,\ T^*) = g(\overline{\varepsilon_p})\Gamma(\dot{\varepsilon}^*)\Theta(T^*) = (A + B(\overline{\varepsilon_p})^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - (T^*)^m) \tag{3}$$

$$T^* = (T - T_m)(T_m - T_r) \tag{4}$$

式中，$\overline{\sigma}$为材料塑性应力；$\overline{\varepsilon}_p = \varepsilon_p/\varepsilon_0$为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$为量纲一塑性应变率；$\varepsilon_p$为塑性应变；$\varepsilon_0$为参考应变；$\dot{\varepsilon}_0$为参考应变率，$s^{-1}$；$\dot{\varepsilon}$为塑性应变率，$s^{-1}$；$A$为参考温度和参考应变率(准静态)下的屈服强度；$B$为应变硬化率；$n$为应变硬化指数；$C$为应变率硬化系数；$m$为温度软化指数；$T^*$为相对温度，℃；$T_r$为参考温度，℃；$T_m$为材料的熔点；$T$为当前温度，℃。

文献 [8] 中取参考应变$\varepsilon_0 = 0.01$、参考应变率$\dot{\varepsilon}_0 = 100\ s^{-1}$、参考温度$T_r = 25$ ℃、材料的熔点$T_m = 1\,420$ ℃时，求得高应变率下马氏体不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 材料的 Johnson-Cook 本构方程为：

$$\overline{\sigma} = \left(1\,050.95 + 17.677\left(\frac{\varepsilon_p}{0.01}\right)^{0.530\,2}\right)\left(1 + 0.101\,8\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{100}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{T - 25}{1\,395}\right)^{1.409\,09}\right) \tag{5}$$

原 JC 本构模型中三项彼此相乘耦合，在求解各项参数时认为是相互独立的，没有考虑应变、应变率和温度三者之间的耦合关系，其实切削加工或冲压成型是一个复杂热力等因素耦合作用的过程，为了更加准确描述材料动态力学性能，必须对原 JC 本构方程进行修正，以便精确指导实际生产。

3.2　JC 本构模型修正

由图 1 和图 3 表现出的应力应变关系，依据本文 2.1 和 2.2 中应变硬化效应、温度软化效应、应变率强化效应以及增塑效应分析与讨论，对原 JC 本构方程进行以下修正：

1) 应变项修正为应变的多项式函数。在准静态下，当温度为 25 ℃、应变率为 0.01 s^{-1} 时，材料的应变强化指数与应变、应变率有一定关系，应变和应变率增加时，它均减小，应变率对应力的影响在应变率强化项中考虑，所以将应变项修正为应变的多项式。

$$g(\overline{\varepsilon_p}) = B_0 + B_1(\overline{\varepsilon_p}) + B_2(\overline{\varepsilon_p})^2 + B_3(\overline{\varepsilon_p})^3 + B_4(\overline{\varepsilon_p})^4 \tag{6}$$

2)应变率项应变率硬化系数 C 修正为应变和应变率的二元三次多项式函数。在动态 25 ℃ 下，材料的应变率敏感指数与应变和应变率有关系，当应变增加时，应变率在 750 ~ 2 600 s^{-1} 范围内，应变

率敏感指数减小, 应变率在 3 500 ~ 4 500 s^{-1} 范围内, 应变率敏感指数增大, 表现出类似多项式, 所以将应变率项应变率硬化系数 C 修正为应变和应变率的二元三次多项式函数。

$$C = f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p}) = C_0 + C_1\ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_2\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + C_3\ln^3(\dot{\varepsilon}^*) + C_4\overline{\varepsilon_p} + C_5(\overline{\varepsilon_p})^2 + C_6(\overline{\varepsilon_p})^3 + C_7\overline{\varepsilon_p}\ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_8\overline{\varepsilon_p}\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + C_9(\overline{\varepsilon_p})^2\ln(\dot{\varepsilon}^*) \tag{7}$$

3)温度项温度软化指数 m 修正为应变、应变率和相对温度的三元三次多项式函数。第三项是温度项, 严格意义上与应变和应变率有关联, 考虑相互耦合作用, 所以温度项温度软化指数 m 修正为应变、应变率和相对温度的三元三次多项式函数。

$$m = f(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*) = a_0 + a_1\overline{\varepsilon_p} + a_2(\overline{\varepsilon_p})^2 + a_3(\overline{\varepsilon_p})^3 + a_4\ln(\dot{\varepsilon}^*) + a_5\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + a_6\ln^3(\dot{\varepsilon}^*) + a_7T^* + a_8(T^*)^2 + a_9(T^*)^3 + a_9\overline{\varepsilon_p}\dot{\varepsilon}^*T^* \tag{8}$$

基于上述论述, 修正后的 JC 本构模型为:

$$\bar{\sigma}(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*) = g(\overline{\varepsilon_p})\Gamma(\dot{\varepsilon}^*)\Theta(T^*) = g(\overline{\varepsilon_p})(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - (T^*)^m) = g(\overline{\varepsilon_p})(1 + f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p})\ln\dot{\varepsilon}^*)\left(1 - (T^*)^{f(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*)}\right) \tag{9}$$

其中:

$$f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p}) = C_0 + C_1\ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_2\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + C_3\ln^3(\dot{\varepsilon}^*) + C_4\overline{\varepsilon_p} + C_5(\overline{\varepsilon_p})^2 + C_6(\overline{\varepsilon_p})^3 + C_7\overline{\varepsilon_p}\ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_8\overline{\varepsilon_p}\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + C_9(\overline{\varepsilon_p})^2\ln(\dot{\varepsilon}^*) \tag{10}$$

$$f(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*) = a_0 + a_1\overline{\varepsilon_p} + a_2(\overline{\varepsilon_p})^2 + a_3(\overline{\varepsilon_p})^3 + a_4\ln(\dot{\varepsilon}^*) + a_5\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + a_6\ln^3(\dot{\varepsilon}^*) + a_7T^* + a_8(T^*)^2 + a_9(T^*)^3 + a_9\overline{\varepsilon_p}\dot{\varepsilon}^*T^* \tag{11}$$

3.3　修正 JC 本构模型应变项参数的确定

首先不考虑应变率强化效应和温度软化效应, JC 模型的应变率项和温度项均为 1, 公式(9)变为:

$$\bar{\sigma}(\overline{\varepsilon_p}) = g(\overline{\varepsilon_p}) = B_0 + B_1(\overline{\varepsilon_p}) + B_2(\overline{\varepsilon_p})^2 + B_3(\overline{\varepsilon_p})^3 + B_4(\overline{\varepsilon_p})^4 \tag{12}$$

此时取参考应变$\varepsilon_0 = 1$, 参考应变率$\dot{\varepsilon}_0 = 0.01\ s^{-1}$, 参考温度$T_r = 25$ ℃, 材料的熔点$T_m = 1\ 420$ ℃, 利用准静态下, 温度$T = 25$ ℃、应变率$\dot{\varepsilon}_0 = 0.01\ s^{-1}$的试验数据, 代入公式(12)进行多项式拟合, 如图 8 所示, 可得多项式参数 B_0、B_1、B_2、B_3、B_4, 见表 5。

3.4　修正 JC 本构模型应变率项参数的确定

然后不考虑温度软化效应, JC 模型的温度项均为 1, 公式(9)变为:

$$\bar{\sigma}(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*) = g(\overline{\varepsilon_p})\Gamma(\dot{\varepsilon}^*) = g(\overline{\varepsilon_p})(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*) = g(\overline{\varepsilon_p})(1 + f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p})\ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{13}$$

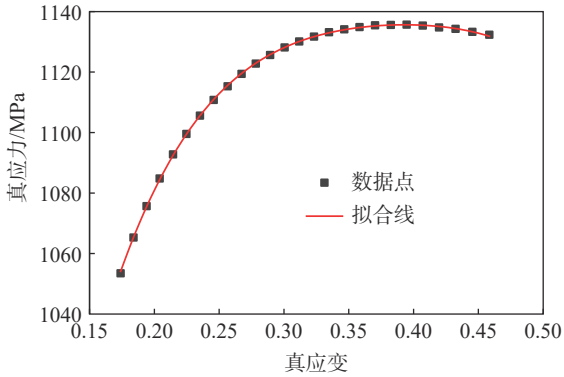


图 8　应变项拟合曲线
Fig. 8　Fitting curve of strain item

表 5　应变项参数值
Table 5　Parameter values of strain item

B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
509.015 81	5 908.285 8	−21 498.54	35 937.295	−23 318.67

公式(13)变形为:

$$\frac{\bar{\sigma}(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*)}{B_0 + B_1(\overline{\varepsilon_p}) + B_2(\overline{\varepsilon_p})^2 + B_3(\overline{\varepsilon_p})^3 + B_4(\overline{\varepsilon_p})^4} - 1 = f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p})\ln\dot{\varepsilon}^* \tag{14}$$

此时利用动态下温度$T = 25$ ℃、应变率$\dot{\varepsilon}_0 = 750 \sim 4\ 500\ s^{-1}$的试验数据, 代入公式(14)计算$C = f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p})$的值, 并利用 Matlab 进行回归分析, 可得二元三次函数(7)的各项系数 C_0、C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6、C_7、C_8、C_9, 见表 6。

表 6　应变率项参数值
Table 6　Parameter values of strain rate item

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4
−2.422 66	0.699 41	−0.063 71	0.001 92	−11.180 17
C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
3.045 59	−9.696 15	1.586 25	0.180 26	−0.062 39

3.5　修正 JC 本构模型温度项参数的确定

最后考虑应变率和温度软化效应, 对公式(9)进行变形为:

$$1 - \frac{\bar{\sigma}(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*)}{g(\overline{\varepsilon_p})(1 + f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p})\ln\dot{\varepsilon}^*)} = (T^*)^{f(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*)} \tag{15}$$

公式(15)项取对数并变形得:

$$f(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*) = \frac{\ln\left[1 - \dfrac{\bar{\sigma}(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*)}{g(\overline{\varepsilon_p})(1 + f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p})\ln\dot{\varepsilon}^*)}\right]}{\ln T^*} \tag{16}$$

此时利用动态下温度$T = 25 \sim 650$ ℃、应变率

$\dot{\varepsilon}_0 = 750 \sim 4\,500\ \mathrm{s}^{-1}$的试验数据，代入公式(16)计算 $m = f(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*)$的值，并利用 Matlab 进行回归分析，可得二元三次函数(8)的各项系数 a_0、a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6、a_7、a_8、a_9、a_{10}，见表 7。

表 7　温度项参数值

Table 7　Parameter values of temperature item

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
−67.508 36	9.613 75	−118.521 29	333.902 02	15.061 35	−1.083 20
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	
0.025 52	1.079 63	0.000 00	−3.530 05	0.394 14	

因此，修正后的 JC 本构模型为：

$$\overline{\sigma}(\overline{\varepsilon_p},\ \dot{\varepsilon}^*,\ T^*) = g(\overline{\varepsilon_p})\left(1 + f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p})\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{0.01}\right)\left(1 - \left(\frac{T-25}{1\,395}\right)^{f(\overline{\varepsilon_p},\dot{\varepsilon}^*,T^*)}\right) \tag{17}$$

其中，

$$g(\overline{\varepsilon_p}) = 509.015\,81 + 5\,908.285\,8(\overline{\varepsilon_p}) - 21\,498.54(\overline{\varepsilon_p})^2 + 35\,937.295(\overline{\varepsilon_p})^3 - 23\,318.67(\overline{\varepsilon_p})^4$$

$$C = f(\dot{\varepsilon}^*, \overline{\varepsilon_p}) = -2.422\,66 + 0.699\,41\ln(\dot{\varepsilon}^*) - 0.063\,71\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + 0.001\,92\ln^3(\dot{\varepsilon}^*) - 11.180\,17\overline{\varepsilon_p} + 3.045\,59(\overline{\varepsilon_p})^2 - 9.696\,15(\overline{\varepsilon_p})^3 + 1.586\,25\overline{\varepsilon_p}\ln(\dot{\varepsilon}^*) + 0.180\,26\overline{\varepsilon_p}\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) - 0.06239\overline{\varepsilon_p})^2\ln(\dot{\varepsilon}^*)$$

$$m = f(\overline{\varepsilon_p}, \dot{\varepsilon}^*, T^*) = -67.508\,36 + 9.613\,75\overline{\varepsilon_p} - 118.52129(\overline{\varepsilon_p})^2 + 333.902\,02(\overline{\varepsilon_p})^3 + 15.061\,35\ln(\dot{\varepsilon}^*) - 1.083\,20\ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + 0.025\,52\ln^3(\dot{\varepsilon}^*) + 1.079\,63T^* + 0(T^*)^2 - 3.530\,05(T^*)^3 + 0.394\,14\overline{\varepsilon_p}\dot{\varepsilon}^*T^*$$

4　JC 本构模型修正前后的验证与对比

基于原 JC 本构模型[8](Original JC Model，简称为 OJC)和修正 JC 本构模型(Revised JC constitutive model，简称为 RJC)预测的应力应变曲线如图 9 所示。采用相关系数(R)和平均相对误差(AARE)进一步研究和分析两种模型的精度，AARE 能够反映试验数据的紧密程度和预测的准确性，R 反映试验值和预测值之间的线性关系的紧密性，其值越大，密切程度越高，它们定义为[31−34]：

$$\mathrm{AARE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{E_i - P_i}{E_i}\right| \tag{18}$$

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

其中 N 是本研究中使用的数据总数，E_i 和 P_i 分别是试验和预测的真应力(MPa)。$\bar{E}$ 和 $\bar{P}$ 分别是 E_i 和 P_i 的平均值。两种本构模型的相关系数(R)和平均相对误差(AARE)分别如图 10、11 所示。

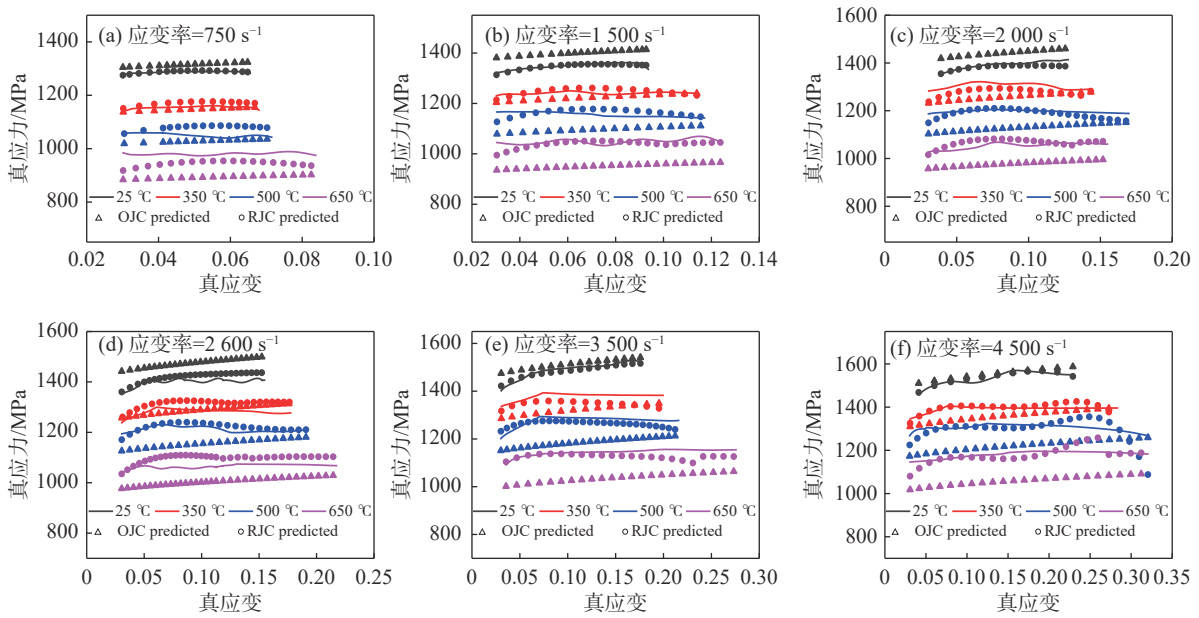


图 9　原 JC 本构模型、修正 JC 本构模型真应力预测和试验值比较

Fig. 9　Comparison of the predicted and tested true stress values between the original and modified JC constitutive models

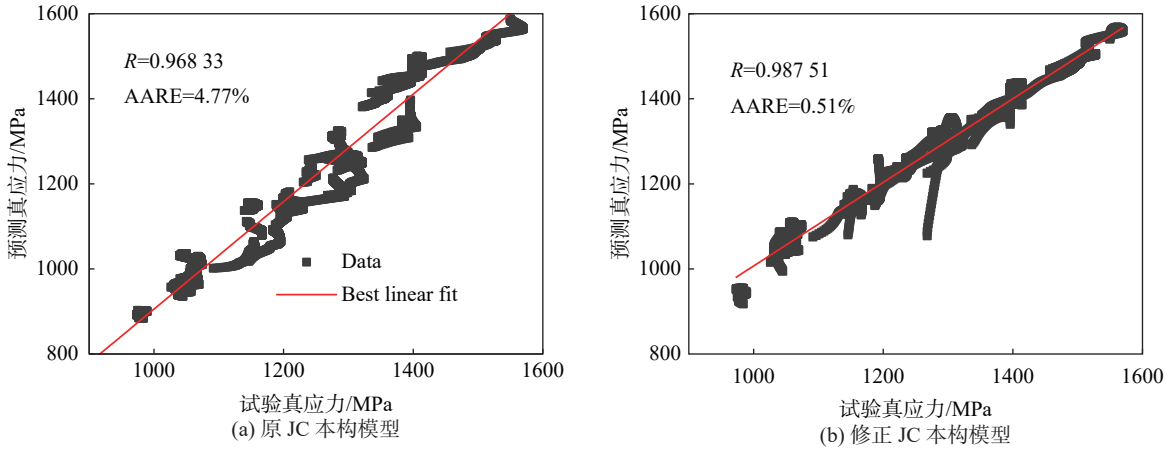


图 10　原 JC 本构模型、修正 JC 本构预测值和试验值之间的关系

Fig. 10　Relationship between the original and modified JC constitutive model prediction values and experimental values

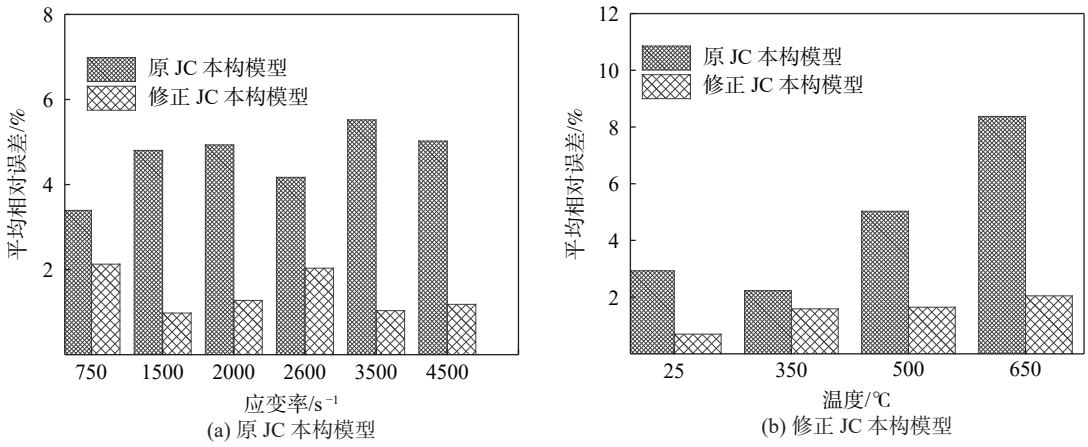


图 11　原 JC 本构模型、修正 JC 本构模型平均相对误差比

Fig. 11　Comparison of the average relative errors of the original and modified JC constitutive models

从图 9 可知, 没有考虑应变、应变率和温度之间的耦合关系下, 随着应变、应变率和温度的变化, 预测值与试验值相差较大; 考虑三者之间耦合关系, 预测曲线与试验曲线的吻合度较高。同时从图 10 看出, 原 JC 本构方程的相关系数(R)和平均相对误差(AARE)分别为 0.968 33 和 4.77%; 本文修正 JC 本构方程的相关系数(R)和平均相对误差(AARE)分别为 0.987 513 和 0.51%。进一步看图 11 可知, 在不同的应变率和温度下, 原 JC 本构方程的平均相对误差(AARE)比修正 JC 本构方程的要大, 具体表现在不同应变率下原 JC 本构方程的最大 AARE 和最小 AARE 分别是 5.52% 和 3.39%, 修正 JC 本构方程的最大 AARE 和最小 AARE 分别是 2.13% 和 0.98%。对比上述结果和图 9 ~ 11 可以看出, 本文修正的 JC 本构方程更精确预测结果, 相比原 JC 本构方程更可靠。

5　结论

1)该材料具有应变硬化效应和温度软化效应, 随着应变的增加, 应力逐渐增大, 增加到一定数值之后上下波动, 表现出应变强化; 随着温度的升高, 应力下降, 表现出温度软化。

2)该材料具有应变率强化效应和增塑效应, 随着应变率的增加, 应力升高, 表现出应变率强化效应; 随着应变率的增加, 应变增加, 表现出增塑效应。

3)考虑应变、应变率和温度三者之间的耦合, 建立修正后的 JC 本构模型, 其预测曲线与试验曲线更加吻合, 相关系数(R)和平均相对误差(AARE)分别为 0.987 513 和 0.51%, 比原 JC 本构模型更准确、更可靠。

参考文献

[1] Guo Yahuan. Effect of heat treatment processes on properties of 0Cr17Ni4Cu4Nb steel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
（郭亚欢. 0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢热处理工艺及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.）

[2] Lü Yilang. Bulging process of 0Cr17Ni4Cu4Nb stainless steel thin-walled ring research[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
（吕义郎. 0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢薄壁环形件胀形工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.）

[3] Xia Degui. Seawater corrosion resistance property of 0Cr17Ni4Cu4Nb martensitic precipitation hardening stainless steel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
（夏德贵. 0Cr17Ni4Cu4Nb马氏体沉淀硬化不锈钢耐海水腐蚀性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.）

[4] Zhu Kaixuan. Study on surface quality of the material 0Cr17Ni4Cu4Nb gas turbine blade ground by coated abrasive belt[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
（朱凯旋. 0Cr17Ni4Cu4Nb燃气轮机叶片材料砂带磨削的表面质量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.）

[5] Remington B A, Bazan G, Belak J, *et al*. Materials science under extreme conditions of pressure and strain rate[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2004, 35(9): 2587−2607.

[6] Tian Xianhua, Yan Kuicheng, Zhao Jun, *et al*. Properties at elevated temperature and high strain rate and establishment of Johnson-Cook constitutive model for GH2132[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(7): 872−881.
（田宪华, 闫奎呈, 赵军, 等. GH2132高温高应变率下力学性能分析与Johnson-Cook本构模型的建立[J]. 中国机械工程, 2022, 33(7): 872−881.）

[7] Jamwal A, Agrawal R, Sharma M, *et al*. Application of optimization techniques in metal cutting operations: A biliometric analysis[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 38(1): 365−370.

[8] Zhang Jilin, Jia Haishen, Yi Xiangbin, *et al*. Dynamic mechanical properties and comparison of two constitutive models for martensitic stainless steel 0Cr17Ni4Cu4Nb[J]. Materials Research Express, 2021, 8(10): 106501.

[9] Chen G, Ren C, Yang X, *et al*. Evidence of thermoplastic instability about segmented chip formation process for Ti-6Al-4V alloy based on the finite-element method[J]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering, 2011, 225(6): 1407-1417.

[10] Shi Jing, Zhang Weiqiang, Guo Jin. Constitutive model of plastic deformation for metal[J]. Materials Reports, 2010, 24(4): 82−85.
（是晶, 张伟强, 郭金. 金属塑性变形的本构模型研究[J]. 材料导报, 2010, 24(4): 82−85.）

[11] Zhan Lishui, Liu Cheng, Ye Junqing, *et al*. Research on refinement of heat treatment for improving hardness of 17-4PH (0Cr17Ni4Cu4Nb) forgings[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(9): 212−215.
（占立水, 刘成, 叶俊青, 等. 改善17-4PH(0Cr17Ni4Cu4Nb)锻件硬度的热处理精细化研究[J]. 锻压技术, 2021, 46(9): 212−215.）

[12] He Li. Vacuum heat treatment of 0Cr17Ni4Cu4Nb stainless steel base[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(8): 189−192.
（贺利. 0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢底座的真空热处理[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 189−192.）

[13] Zhang Xuezhen, Lü Kang, Shi Yaocheng, *et al*. Study on drill thrust and chip in ultrasonic vibration drilling of 0Cr17Ni4Cu4Nb[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(19): 53−55, 66.
（张学忱, 吕康, 史尧臣, 等. 0Cr17Ni4Cu4Nb超声振动钻削的钻削力和切屑研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(19): 53−55, 66.）

[14] Hu Chunyan, Liu Xinling, Tao Chunhu, *et al*. Failure analysis on 0Cr17Ni4Cu4Nb screws[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (12): 21−23, 28.
（胡春燕, 刘新灵, 陶春虎, 等. 0Cr17Ni4Cu4Nb钢制螺钉断裂原因分析[J]. 材料工程, 2012, (12): 21−23, 28.）

[15] He Zhu, Zhao Shougen, Yang Jialing, *et al*. Experimental investigation of the dynamic material property of stainless steel: 0Crl7Ni4Cu4Nb[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 25(3): 418−421.
（何著, 赵寿根, 杨嘉陵, 等. 0Crl7Ni4Cu4Nb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.）

[16] Wang Jianjun. Anomalous stress peak in the plastic flow of typical metals and its constitutive model[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.

（王建军. 典型金属塑性流动中反常应力峰及其本构关系[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.）

[17] 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.

[18] Liang R, 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): 869−890.

[19] Wang Lili. Advances in impact dynamics[M]. Beijng: University of Science and Technology of China Press, 1992.
（王礼立. 冲击动力学进展[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1992.）

[20] Fang Jian, Wei Yijing, Wang Chengzhong. Analytical measurement and mechanical study on the tensile strain hardening exponent[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]. 塑性工程报, 2003, 10(3): 12−17.）

[21] Sun Xuewei, Ling Yongzhuo, Sun Jisong, *et al*. A method of determinig strain-hardening exponents[J]. Journal of 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.）

[22] Cao Yuhan. Study on strain hardening of Ni-Co-Cr-Fe based high entropy alloys[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
（曹育菡. Ni-Co-Cr-Fe基高熵合金的应变强化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.）

[23] Wang Xiangyu. Study on cutting performance evaluation and constitutive model of superalloy GH4169[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
（王相宇. 高温合金GH4169的切削加工性评价方法和本构模型研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.）

[24] Ji Fangfang. Study on cutting performance evaluation and constitutive model of superalloy GH4169[D]. Changchun: Changchun Industrial College, 2018.
（姬芳芳. 高速切削GH4169切削区材料塑性行为研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.）

[25] Wang Xiangyu, Huang Chuanzhen, Zou Bin. Dynamic behavior and a modified Johnson–Cook constitutive model of Inconel 718 at high strain rate and elevated temperature[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 58(15): 385-390.

[26] Yang Xuemei, Guo Hongzhen, Yao Zekun. Strain rate sensitivity, temperature sensitivity, and strain hardening during the isothermal compression of BT25y alloy[J]. Journal of Materials Research, 2016, 31(18): 2863−2875.

[27] Tang Changguo, Zhu Jinhua, Zhou Huijiu. Phenomena and analysis of plastisity-increasing induced by high strain rate for some metallic materials[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1996, (1): 19−24.
（唐长国, 朱金华, 周惠久. 金属材料拉伸的高应变率增塑现象及分析[J]. 材料研究学报, 1996, (1): 19−24.）

[28] Feng Duan. Metal physics-metal mechanical properties[M]. Beijng: 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.）

[29] Li Qingsheng. Material strength[M]. Taiyuan: Shanxi Science Education Press, 1999.
（李庆生. 材料强度学[M]. 太原: 山西科学教育出版社, 1999.）

[30] Li Chuangping. The research on dynamic constitutive model of Ti6Al4V titanium alloy and finite element simulation of high-speed cutting[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
（李川平. Ti6Al4V钛合金动态本构模型与高速切削有限元模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.）

[31] Niu D X, Zhao C, Li D X, *et al*. Constitutive modeling of the flow stress behavior for the hot deformation of Cu-15Ni-8Sn alloys[J]. Frontiers in Materials, 2022, 7(12): 577867.

[32] Ma Bin, Li Ping, Liang Qiang. Comparison on high-temperature flow behavior of HNi55-7-4-2 alloy predicted by modified JC model and BP-ANN algorithm[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 45(1): 92−99.
（马斌, 李平, 梁强. 基于修正JC模型和BP-ANN算法预测HNi55-7-4-2合金高温流变行为的对比[J]. 机械工程材料, 2021, 45(1): 92−99.）

[33] Su Nan, Chen Minghe, Xie Lansheng, *et al*. Dynamic mechanical characteristics and constitutive model of TC2 Ti-alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 35(3): 201−208.
（苏楠, 陈明和, 谢兰生, 等. TC2钛合金的动态力学特征及其本构模型[J]. 材料研究学报, 2021, 35(3): 201−208.）

[34] Jia Haishen, Luo Wencui, Zhang Jilin, *et al*. Study on dynamic mechanical properties and constitutive model of 022Cr18Ni14Mo2 stainless steel under impact load[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(2): 178−185.
（贾海深, 罗文翠, 张继林, 等. 冲击载荷下022Cr18Ni14Mo2不锈钢动态力学特性及其本构模型研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(2): 178−185.）

编辑　杨冬梅