

一种高强钢的 Johnson-Cook 本构模型构建 与参数标定

张天翼¹, 徐鹏¹, 赵生伟^{2*}

(1. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 为研究一种高强钢的静动态力学特性并构建 Johnson-Cook 本构模型, 利用电子万能试验机进行了准静态压缩和拉伸试验, 获取了材料在室温准静态条件下的应力-应变曲线、弹性模量和泊松比。通过分离式霍普金森压杆, 在 293~1 073 K 5 种温度和 800~2 100 s⁻¹ 4 种应变率下开展动态压缩试验, 获得了材料在不同条件下的动态应力-应变曲线。最后, 基于试验数据构建其 Johnson-Cook 本构模型, 并对模型的准确性进行验证。结果表明: 材料的屈服应力随着应变率的增加而增加, 但增长幅度较小, 应变率强化效应不显著; 当应变率为 1 000 s⁻¹ 时, 材料的屈服应力随温度升高而显著降低。通过本构模型计算得到的应力-应变曲线与试验结果吻合良好, 表明模型能够较准确地预测材料的应力行为。

关键词: 静动态力学特性; 分离式霍普金森压杆; Johnson-Cook 本构模型

中图分类号: TB301; O346.3

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025076

引用格式: 张天翼, 徐鹏, 赵生伟. 一种高强钢的 Johnson-Cook 本构模型构建与参数标定[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 662-671.

ZHANG Tianyi, XU Peng, ZHAO Shengwei. Construction and parameter calibration of Johnson-Cook constitutive model for a high-strength steel[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(6): 662-671.

Construction and Parameter Calibration of Johnson-Cook Constitutive Model for A High-Strength Steel

ZHANG Tianyi¹, XU Peng¹, ZHAO Shengwei^{2*}

(1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To investigate the static and dynamic mechanical characteristics of a high-strength steel and establish the Johnson-Cook constitutive model, quasi-static compression and tensile experiments were carried out using an electronic universal testing machine, obtaining the stress-strain curves, elastic modulus, and Poisson's ratio of the material under quasi-static conditions at room temperature. Dynamic compression tests were conducted using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) at five temperatures ranging from 293 K to 1 073 K and four strain rates spanning from 800 s⁻¹ to 2 100 s⁻¹. Dynamic stress-strain curves of the material under various conditions were obtained. Finally, based on the experimental data, a

收稿日期: 2024-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12272356)

作者简介: 张天翼(2000-), 男, 硕士生, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: 13073525395@163.com。

* 通信作者: 赵生伟(1978-), 男, 副研究员, 主要从事爆炸及冲击动力学研究。E-mail: zhaoshengwei@nint.ac.cn。

Johnson-Cook constitutive model was constructed and its accuracy was verified. The results indicate that the yield stress of the material increases with the increase in strain rate, albeit at a relatively small rate, resulting in a non-significant strain rate strengthening effect. At a strain rate of $1\ 000\ \text{s}^{-1}$, The yield stress of the material decreases significantly with increasing temperature. The stress-strain curve derived from the constitutive model aligns well with the experimental results, suggesting that the model can accurately predict the stress behavior of the material.

Key words: static and dynamic mechanical properties; split Hopkinson pressure bar; Johnson-Cook constitutive model

0 引言

近年来,高强度金属材料被广泛用于汽车^[1]、航空^[2-4]和国防领域^[5],常用于承受复杂的外部载荷。其中,动态载荷(如爆炸、冲击、碰撞)下的力学响应与准静态加载条件下的行为存在显著差异,并往往伴随着塑性变形和断裂破坏。因此,研究其静动态力学性能和本构关系,不仅能揭示其在高应变率条件下的变形与失效机制,还为防护结构的材料选择、设计优化及动态本构模型完善提供理论支持。

金属的力学性能直接决定了其工程应用的广度,因此,研究金属的力学特性并掌握其高速变形过程中的热变形规律尤为重要。塑性应力是表征金属高速变形力学行为的关键参数之一,而本构方程是表征金属动态塑性流动行为的一个重要数学模型,能有效预测金属的应力行为,揭示其演化规律,反映其力学特性^[6-7]。研究人员提出了多种本构模型来描述材料的力学特性,常见的有 Cowper-Symonds 模型、Johnson-Cook 模型、Zirilli-Armstrong 模型等^[5]。其中,Johnson-Cook 本构模型是具有形式简洁、物理意义明确且参数易于获取等优点的经验型本构模型^[8-10]。该模型包含应变硬化、应变率强化和温度软化等特性,能够描述材料在高应变率、大变形以及高温条件下的力学特性^[11-12],适用于多种合金材料,并被广泛应用于金属塑性变形、切削仿真以及冲击载荷下材料力学行为的研究中。此外,它已在有限元模拟软件中实现,用于预测高温和高应变率等恶劣条件下的应力行为,以及优化热变形过程中的热加工参数。

目前,国内外学者针对高强度金属材料的静动态力学特性以及其 Johnson-Cook 本构模型的构建已展开相关研究^[13-14]。其中包含了应用在不同领域不

同型号的高强度金属,通过不同应变率、不同温度的准静态和动态试验分析其力学特性,并根据不同金属的特性,通过不同的参数修正^[15-17]方式获得合适的 Johnson-Cook 本构模型。结构在强动载荷的影响下,常常会经历显著的塑性变形,这种变形可能进一步引发结构的失效甚至断裂。为描述金属材料的失效行为,研究者通过缺口拉伸或压缩试验,测定材料在不同应力三轴度、温度和应变率下的失效应变^[18-19],从而获取 Johnson-Cook 本构模型在不同条件下的失效参数。

为了研究一种高强钢的静动态力学特性并构建 Johnson-Cook 本构模型,本文基于上述研究方法,通过准静态压缩/拉伸试验、不同应变率和温度下的动态压缩试验,分析其在静态和动态条件下的力学特性,建立 Johnson-Cook 本构模型并确定其参数,然后将模型的理论计算值与试验值进行对比,从而验证参数的准确性,为评估该材料的应用价值提供参考。

1 静动态力学特性

1.1 静态力学特性

1.1.1 准静态压缩试验方案

常温准静态压缩试验在 SUNS 电子万能试验机上进行,其最大加载力为 200 kN,可进行拉伸、压缩等多种力学测试,并配备有电子控制系统,可以通过预设测试程序进行自动化测试,搭载有力传感器、位移传感器等精密测量仪器。压缩试样的直径和长度分别为 8 mm 和 8 mm,为保证试验后数据处理的准确性,试验前用游标卡尺测量试样尺寸并确保其表面光滑无瑕疵。为提升测量精度,在试样两端放置光滑平整的垫片,并在试验机压缩头处放置两个千分尺对试样轴向应变进行精确测量。试验温度为室温且加载速率设定为 $0.5\ \text{mm}/\text{min}$,对应试样的应变率为 $0.001\ \text{s}^{-1}$ 。试

样加载如图 1 所示, 加载后的试样变形如图 2 所示。重复试验, 以保证试验数据的准确性。



图 1 准静态压缩试验加载图

Fig. 1 Loading diagram for quasi-static compression test



图 2 准静态压缩试样变形图

Fig. 2 Quasi-static compression specimen deformation diagram

1. 1. 2 准静态压缩试验结果分析

利用 SUNS 电子万能试验机获取试样的压缩载荷 P 和压缩位移 ΔL , 并利用式(1)和式(2)计算试样的工程应力和应变。然后, 引入体积不变假设与应变均匀假设, 并依据式(3)和式(4)得到试

样的真实应力和应变。最后将其拟合成真应力-应变曲线(图 3), 分析其力学特性。

$$\sigma_E = \frac{P}{A_0}, \quad (1)$$

$$\epsilon_E = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (2)$$

$$\sigma_T = \sigma_E(1 - \epsilon_E), \quad (3)$$

$$\epsilon_T = -\ln(1 - \epsilon_E), \quad (4)$$

式中: σ_E 为工程应力; ϵ_E 为工程应变; P 为压缩载荷; ΔL 为压缩位移; A_0 和 L_0 为试样的初始横截面积和初始长度; σ_T 为真实应力; ϵ_T 为真实应变。

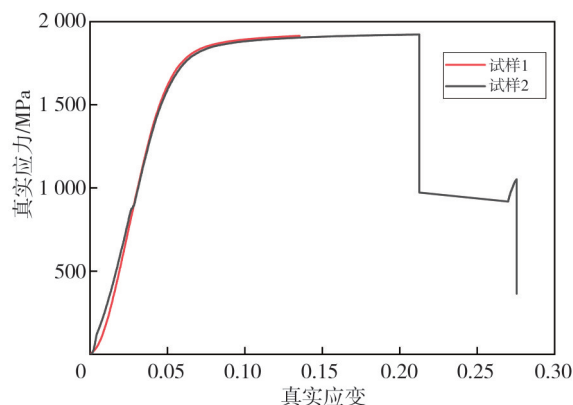


图 3 准静态压缩试验的真实应力-应变曲线

Fig. 3 Real stress-strain curve of quasi-static compression test

由图 3 可知, 初始阶段, 应力随应变呈线性增加, 无明显屈服阶段, 随着应变持续增加, 应力缓慢增长并维持在一个较高的水平, 最后急剧下降。

1. 1. 3 准静态拉伸试验方案

常温准静态拉伸试验在 SUNS 电子万能试验机上进行。试验前确保试样无瑕疵且夹持紧密不动, 试样尺寸如图 4 所示, 厚度为 2 mm。

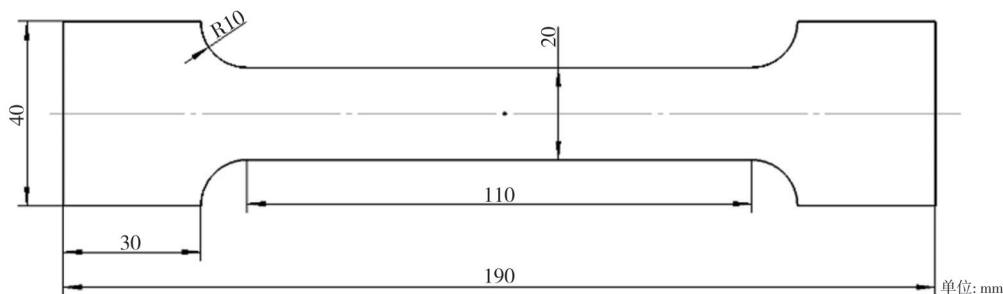


图 4 单轴拉伸试样

Fig. 4 Uniaxial tensile test specimen

为提升测量精度, 对试样的有效拉伸区域夹持引伸计。测试材料的杨氏模量和泊松比时, 在试件中间正反两面沿轴线和横向方向粘贴 4 片应变片, 基于惠斯通电桥设计原理, 采用 1/4 桥接线

法, 对拉伸过程中的实时应变进行测量, 信号通过 DH3820 准静态测试系统收集(图 5)。应变片确保与试样表面光滑贴合以避免干扰, 试样加载过程如图 6 所示。

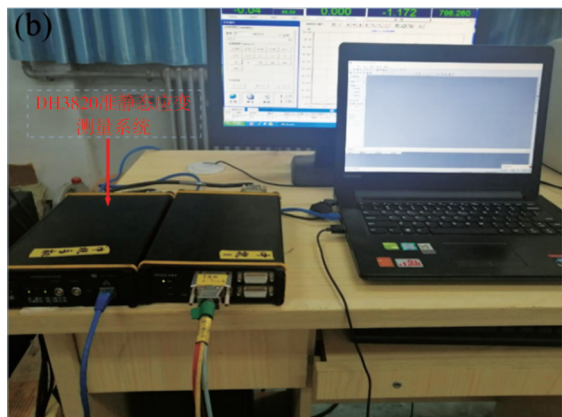


图 5 准静态信号采集系统

Fig. 5 Quasi static signal acquisition system



图 6 准静态拉伸试验加载图

Fig. 6 Loading diagram for quasi-static tensile test

1.1.4 准静态拉伸试验结果分析

利用电子万能试验机的拉伸数据,通过式(1)~式(4)拟合得到试样的真实应力-应变曲线如图 7 所示。

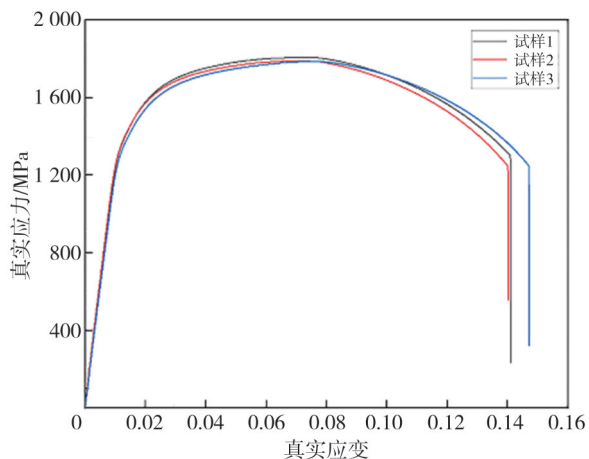


图 7 准静态拉伸试验的真实应力-应变曲线

Fig. 7 True stress-strain curve of quasi-static tensile test

观察图 7 可以发现:材料呈典型的双线性弹塑性特性,没有明显的屈服点,材料的屈服应力由 0.2% 偏移屈服应力($\sigma_{0.2}$)确定。在初始阶段,应力迅速增大,表现出线弹性变形特征;随着应变的继续增加,应力增长逐渐减缓,随后开始下降。

由轴向应变测量桥和横向应变测量桥的矢量数据得到试样的横向真实应变 ϵ_{Tx} 和轴向真实应变 ϵ_{Ty} ,从而进一步计算得到材料的泊松比 $\mu = \epsilon_{Tx} / \epsilon_{Ty}$ 。接着,对准静态拉伸试验数据进行处理。由于初始加载阶段仪器与试样之间可能存在配合不紧密的问题,因此,舍弃初始阶段数据,对后续弹性阶段进行最小二乘法线性拟合,拟合曲线的斜率即为材料的杨氏模量。以多次试验的均值作为杨氏模量(E)及泊松比(μ)的精度指标。拟合结果及误差见表 1。

表 1 材料杨氏模量与泊松比

Tab. 1 Young's modulus and Poisson's ratio of materials

编号	E /GPa	误差/%	μ	误差/%
1	195.575	0.9	0.274	1.1
2	195.292	1.1	0.274	1.1
3	194.387	1.5	0.274	1.1
4	196.938	0.2	0.284	2.5
5	203.277	3.0	0.284	2.5
6	202.262	2.5	0.284	2.5
7	196.937	0.2	0.274	1.1
8	196.444	0.5	0.274	1.1
9	195.386	1.0	0.265	4.3
平均值	197.389	1.2	0.277	1.9

1.2 动态力学特性

1.2.1 动态压缩试验方案

为研究不同温度和应变率条件下材料的动态力学特性,使用直径为 14.5 mm 的分离式霍普金森压杆装置进行动态压缩试验,该装置包括气压加载系统、子弹、入射杆、透射杆、吸能杆和数据采集系统。利用气压控制装置间接调节子弹的发射速度,从而实现不同应变率的加载。试样的直径和长度为 6 mm 和 8 mm,加载应变率分别设置为 800、1 100、1 700 和 2 100 s^{-1} 。高温试验时,通过电热炉加热试样至所需试验温度,并确保试样温度稳定后进行试验,温度分别设置为 293、473、673、873 和 1 073 K。为保证试验数据的准确性,每种应变率和温度条件下均进行 4 次重复试验。

1.2.2 动态压缩试验结果分析

通过霍普金森杆数据采集系统得到的应变信号,根据一维应力波理论,在符合均匀性假设的条件下采用二波法计算材料的工程应力-应变,并结合式(3)、

式(4)获取不同条件下的真实应力-应变曲线。图8为室温不同应变率下的真实应力-应变曲线,图9和图10则分别呈现了应变率为 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 时,不同温度下的真实应力-应变曲线和屈服应力的变化趋势。

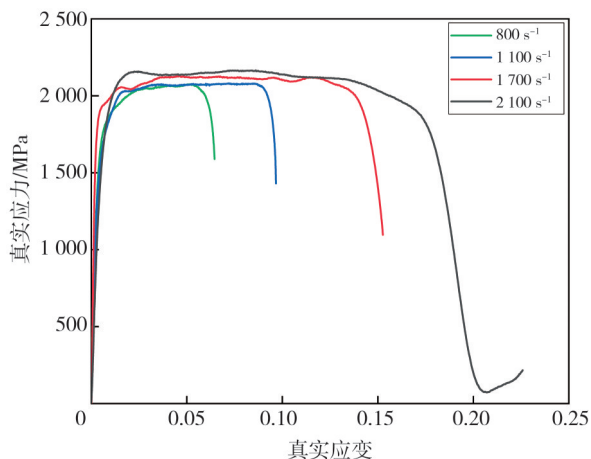


图8 室温不同应变率下的真实应力-应变曲线

Fig. 8 Real stress-strain curves at room temperature under varying strain rates

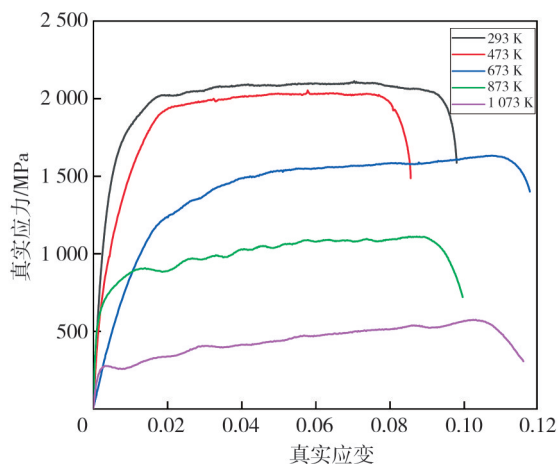


图9 应变率为 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 时不同温度下的真实应力-应变曲线

Fig. 9 Real stress-strain curves at different temperatures with a strain rate of $1\,000\text{ s}^{-1}$

由图8和图9可知,材料的屈服强度受到应变率和温度的共同影响。其应力先呈线性增长,随后在较小应变范围内达峰值。材料的屈服应力随应变率的增加而增加(图10),但其变化幅度较小,表明应变率强化效应并不显著。当应变率超过 $1\,700\text{ s}^{-1}$ 时,材料的应力在塑性变形阶段出现下降趋势,这主要是由于高应变率导致的塑性变形热引起温度升高,进一步增强了动态回复和再结晶过程中温度软化的影响。与此同时,温度升高会导致屈服强度的降低(图10),特别是在温度超过 473 K 时,屈服应力下降速度加快,表明温度软化效应在此时更明显。此外,高温下材料的应

力在塑性变形阶段呈上升趋势,并且这种趋势会随着温度的升高越来越明显。综合来看,高温和高应变率对材料的力学行为具有复杂的影响,尤其对是塑性变形阶段的应力响应。

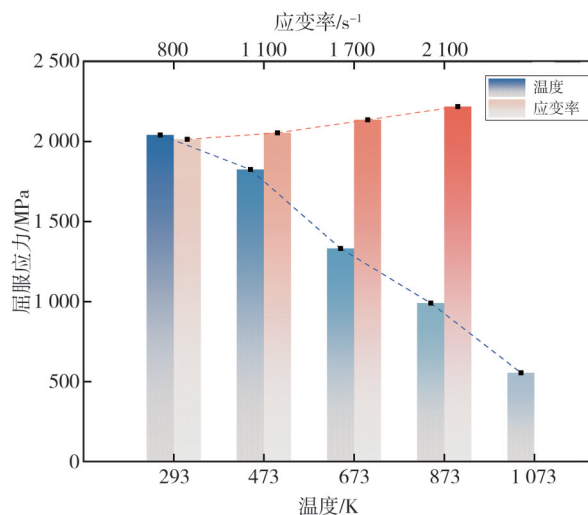


图10 不同温度和应变率下屈服应力的变化趋势

Fig. 10 Variation trend of yield stress under different temperatures and strain rates

2 Johnson-Cook 本构模型构建

本构模型不仅可以揭示应力、应变及其演化规律,还能表征材料的力学特性,预测材料在不同加载条件下的变形与破坏。Johnson-Cook本构模型具有形式简单、参数易获取等特点,被广泛用于描述材料在高温和高应变率下的力学行为,具体表达式为

$$\sigma = (A + B\epsilon_{\text{eq}}^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}_{\text{eq}}^*) (1 - T^{*m}), \quad (5)$$

式中: σ 为材料的塑性应力; A 为准静态条件下的初始屈服应力; ϵ_{eq} 为等效塑性应变; B 和 n 为应变硬化相关系数; C 为应变率强化系数; $\dot{\epsilon}_{\text{eq}}^*$ 为无量纲应变率,由 $\dot{\epsilon}_{\text{eq}}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 定义, $\dot{\epsilon}$ 为有效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,本文采用准静态试验时的应变率 0.001 s^{-1} 作为参考应变率; T^* 为无量纲温度, $T^* = \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)}$,其中, T_r 和 T_m 分别为参考温度和熔点温度; m 为材料的温度软化系数。

Johnson-Cook本构模型中的初始屈服应力 A 、应变硬化相关系数 B 和 n 、应变率强化系数 C 以及温度软化系数 m ,均需要结合准静态和动态试验数据并利用最小二乘法拟合得到,从而确定这种高强钢的本构模型具体表达形式。

2.1 参数 A、B、n 的确定

Johnson-Cook 本构模型中的参数 A、B、n 由室温准静态拉伸试验数据确定。在室温准静态条件下, $T = T_r, \dot{\epsilon} = 1$, 此时应变率强化效应和温度软化效应的影响可忽略, 则式(5)可简化为仅包含应变硬化部分,

$$\sigma = (A + B\epsilon_{eq}^n) \quad (6)$$

对式(6)移项并两边同时取对数, 有

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \epsilon_{eq} \quad (7)$$

对于参数 A, 由于试样无明显屈服阶段, 因此采用 0.2% 偏移屈服应力 ($\sigma_{0.2}$) 来确定材料的初始屈服应力, 根据表 2, 材料的初始屈服应力 ($\sigma_{0.2}$) 为 1 311.11 MPa, 对应参数 A 的值为 1 311.11 MPa。

表 2 初始屈服应力记录表
Tab. 2 Initial yield stress record table

编号	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$
1	1 323.22
2	1 315.14
3	1 294.96
平均	1 311.11

对于参数 B 和 n, 从真实应力-应变曲线的屈服点开始选取线段, 并依据式(7)设定 $x = \ln \epsilon_{eq}, y = \ln(\sigma - A)$, 在 x-y 坐标平面上用方程 $y = k_1 x + b_1$ 对选定数据进行拟合, 得到直线斜率 k_1 即材料参数 n, 截距 b_1 为 $\ln B$ 。拟合得到的参数 B、n 列于表 3。

表 3 材料参数 B、n 拟合表
Tab. 3 Material parameters B, n fitting table

编号	k_1	b_1	n	B/MPa
1	0.334	6.9	0.334	992.27
2	0.368	7.0	0.368	1 096.63
3	0.442	7.3	0.442	1 480.30
平均	0.381	7.1	0.381	1 189.74

2.2 参数 C 的确定

为确定应变率强化效应的参数 C, 选取常温下应变率为 0.001 (静态)、800、1 100、1 700、2 100 s^{-1} (动态) 5 组压缩试验数据进行处理。在应变硬化和温度软化效应影响不显著的条件下, 材料的应力主要受应变率强化效应影响, 此时令 $\epsilon_{eq} = 0, T = T_r$, 式(5)可简化为

$$\sigma/A = 1 + C \ln \dot{\epsilon}_{eq}^* \quad (8)$$

令 $x = \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*, y = \sigma/A - 1$, 常温静态压缩和

常温动态压缩试验中的 5 个应变率在 x-y 平面对应 5 个点, 并用直线 $y = k_2 x$ 拟合, 设定截距为 0, 直线斜率 k_2 即为参数 C 的值。拟合结果见表 4 和图 11。最终得到 $k_2 = 0.02$, 即 $C = 0.02$ 。

表 4 材料参数 C 拟合表
Tab. 4 Material parameter C fitting table

编号	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}_{eq}^*$	σ/MPa	x	y
1	0.001	1	1 311.11	0	0
2	800	8×10^5	1 522.14	13.59	0.16
3	1 100	1.1×10^6	1 617.65	13.91	0.24
4	1 700	1.7×10^6	1 812.20	14.35	0.38
5	2 100	2.1×10^6	1 828.85	14.56	0.40

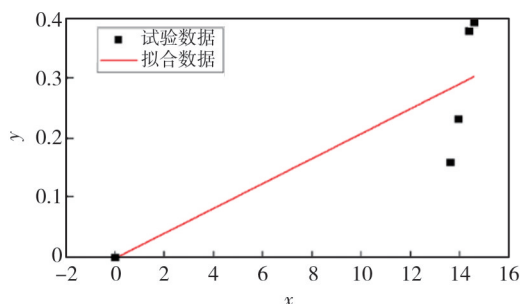


图 11 参数 C 的拟合

Fig. 11 Fitting of parameter C

2.3 参数 m 的确定

温度效应的具体参数 m 由相同应变率、4 组不同温度下的动态压缩试验拟合求得, 其温度分别为 473、673、873 和 1 073 K。在仅考虑温度的条件下, 令 $\epsilon_{eq} = 0$, 试验塑性应变率 $\dot{\epsilon}$ 为 1 000 s^{-1} , 则式(5)可写为

$$1 - \frac{\sigma}{A(1 + C \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*)} = T^{*m} \quad (9)$$

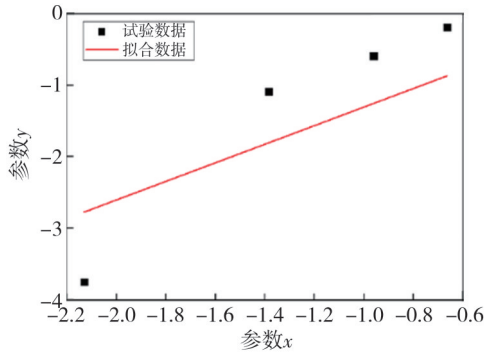
对式(9)两边同时取对数, 有

$$\ln \left(1 - \frac{\sigma}{A(1 + C \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*)} \right) = m \ln T^* \quad (10)$$

令 $y = \ln(1 - \sigma/A(1 + C \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*)), x = \ln T^*$, 用直线 $y = k_3 x$ 拟合, 则直线斜率 k_3 即为参数 m 值。拟合数据如表 5 所示, 设定截距为 0, 拟合得 $k_3 = 1.3$, 即 $m = 1.3$ 。拟合如图 12 所示。

表 5 参数 m 拟合数据表
Tab. 5 Parameter m fitting data table

编号	T^*	σ/MPa	x	y
1	0.118 6	1 453.49	-2.132 0	-3.746 3
2	0.250 3	985.20	-1.385 1	-1.084 2
3	0.382 1	662.16	-0.962 1	-0.588 4
4	0.513 8	247.77	-0.665 9	-0.182 1

图 12 参数 m 的拟合Fig. 12 Fitting of parameter m

至此, 已确定该材料 Johnson-Cook 本构模型的全部参数, 将其代入式(5), 得到该材料的 Johnson-Cook 本构模型为

$$\sigma = (1311.11 + 1189.74\epsilon_{eq}^{0.381})(1 + 0.02 \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*)(1 - T^{*1.3}). \quad (11)$$

3 Johnson-Cook 本构模型验证

将室温下 800 、 1100 、 1700 、 2100 s^{-1} 4种应变率和 1000 s^{-1} 下 473 、 673 、 873 、 1073 K 4种温度的试验条件和应变数据代入式(11)中, 在该条件下计算出材料的应力, 并通过最小二乘法将计算应力与试验应变进行拟合, 生成基于本构模型的应力-应变曲线, 随后, 将该计算曲线与试验获得的真实应力-应变曲线进行对比。图 13 和图 14 分别对比了室温下 4 种不同应变率的试验值与计算值, 以及应变率为 1000 s^{-1} 时 4 种不同温度下的试验值与计算值。

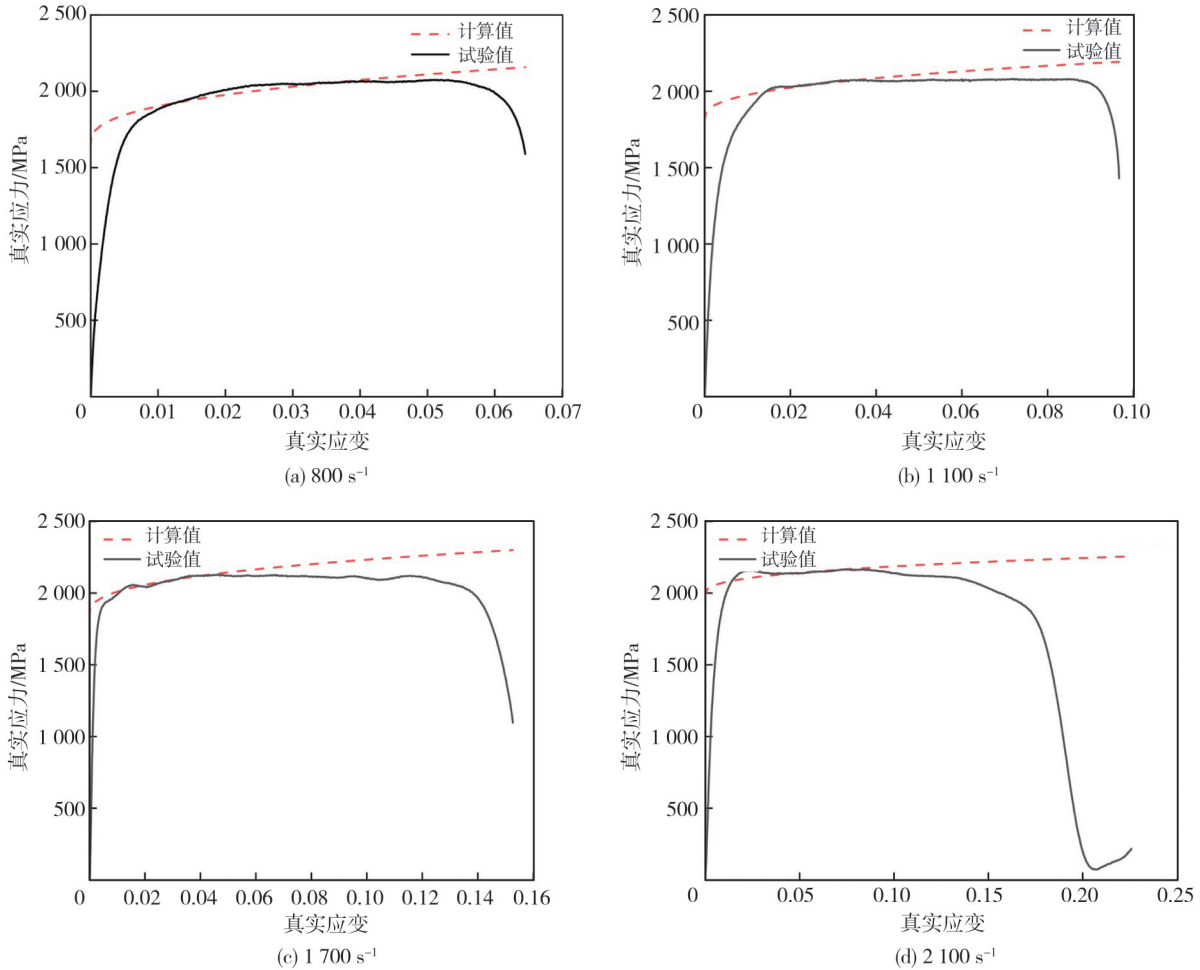


图 13 室温下 4 种不同应变率的试验值与计算值对比

Fig. 13 Comparison of experimental and calculated values of four different strain rates at room temperature

由图 13 与图 14 可知, Johnson-Cook 本构方程在材料变形过程中表现出不同的精度特征。在初始变形阶段, 由于材料的弹性变形较小且接近线性, 而该方程主要用于描述金属在大塑性变形和动态加载下的行为, 因此其精确性较差, 计算

值与实验值之间存在较大误差。然而, 随着变形进入塑性阶段, 特别是在塑性变形增大时, 模型的表现显著改善, 计算值逐渐接近实验结果, 这说明 Johnson-Cook 本构模型在这些极端条件下的力学行为预测中具有较好的适用性和准确性。

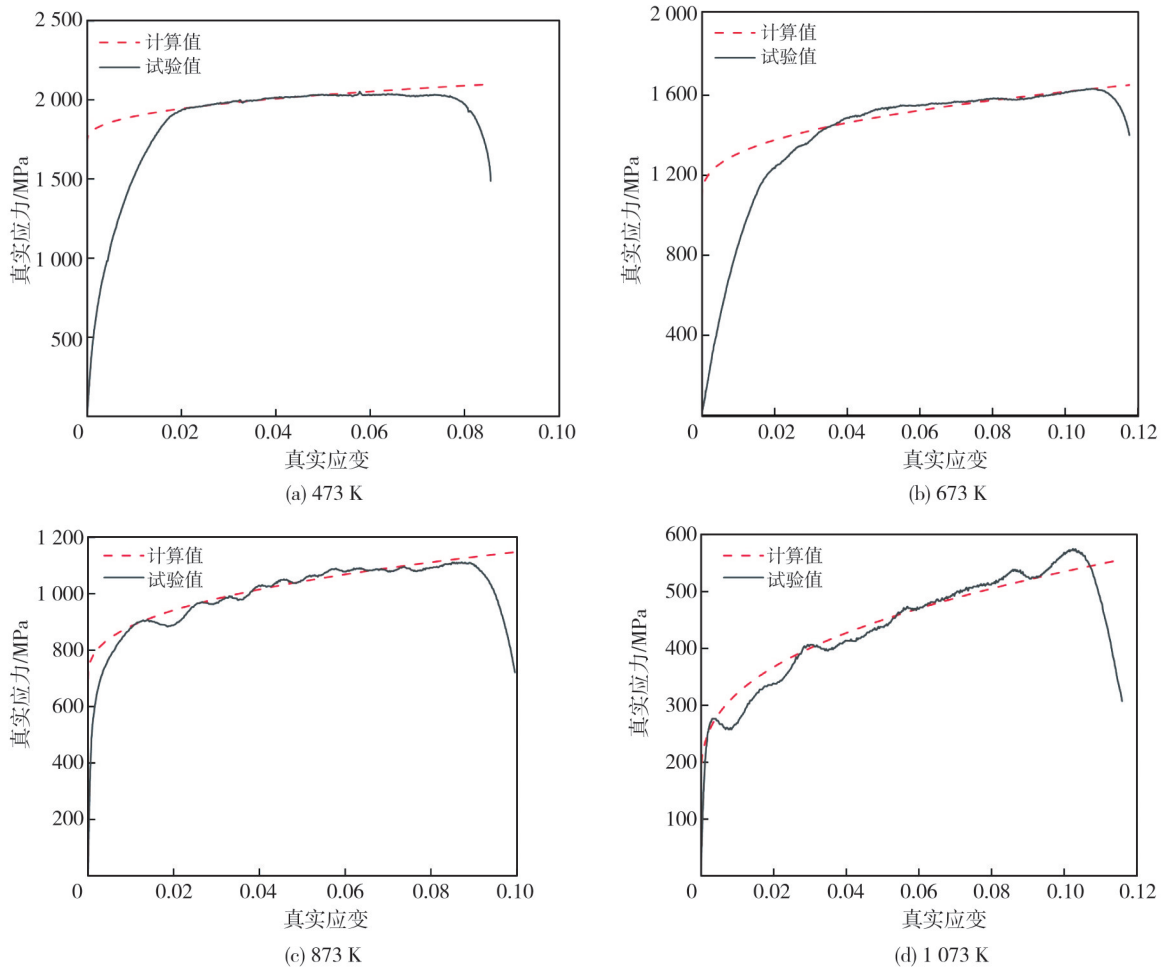


图 14 应变率为 1 000 s⁻¹时 4 种不同温度下的试验值与计算值对比

Fig. 14 Experimental and calculated values at four different temperatures with a strain rate of 1 000 s⁻¹

4 结 论

以一种高强钢为研究对象,通过准静态拉伸和压缩试验以及不同温度和应变率条件下的动态压缩试验,分析了其静动态力学特性,构建出 Johnson-Cook 本构模型并验证了模型的准确性,得到的结论如下:

1) 材料没有明显的屈服阶段,呈现出典型的双线性弹塑性特性。这种特性表明该材料在实际应用中可能具备较强的抗变形能力和较高的断裂韧性,尤其适用于高强度要求的结构件。

2) 材料的屈服应力随应变率的增加呈上升趋势,但增长幅度较小,应变率强化效应不显著。在塑性变形阶段,应力随应变的增加而逐渐增大,但当应变率高于 1 700 s⁻¹时,材料的应力会因温度软化效应的增强而逐渐下降。

3) 在应变率为 1 000 s⁻¹的条件下,材料的屈服应力随着温度的升高而降低,这表明材料的强

度受温度影响较为显著。在高温下,材料在塑性变形阶段的应力随温度的增加呈现出上升趋势,且这种趋势随着温度的进一步升高愈加明显。

4) 通过对比不同温度和应变率条件下的计算值与实验值,发现 Johnson-Cook 本构模型在初期变形阶段精度较低,但随着塑性变形的进行,其预测精度逐步提高,这表明在高温、高应变率条件下,此模型能够有效描述材料的力学特性且具有较好的预测能力。

参考文献:

[1] 高玉龙,孙晓红. 高速列车用 6008 铝合金动态变形本构与损伤模型参数研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(3): 118-129.

GAO Yulong, SUN Xiaohong. On the parameters of dynamic deformation and damage models of aluminum alloy 6008-T4 used for high-speed railway vehicles [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(3): 118-129. (in Chinese)

- [2] RAJENDRA KUMAR R T P, JAYABAL K, KAMARAJ M, et al. Hot tensile deformation behaviour of AA2524-T3 alloy and prediction of Johnson-Cook model parameters[J]. *Metals and Materials International*, 2025, 31(2): 467-488.
- [3] 王运, 张昌明, 张昱. 航空Al7050合金的静动态力学特性研究及JC本构模型构建[J]. *材料导报*, 2021, 35(10): 10096-10102.
WANG Yun, ZHANG Changming, ZHANG Yu. Study on static and dynamic mechanical properties of aviation Al7050 alloy and construction of JC constitutive model [J]. *Materials Reports*, 2021, 35 (10) : 10096-10102. (in Chinese)
- [4] 谭毅, 杨书仪, 孙要兵, 等. ZL114A铝合金本构关系与失效准则参数的确定[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44 (1): 88-107.
TAN Yi, YANG Shuyi, SUN Yaobing, et al. Determination of constitutive relation and fracture criterion parameters for ZL114A aluminum alloy[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44 (1) : 88-107. (in Chinese)
- [5] 马铭辉, 余毅磊, 蒋招绣, 等. 675装甲钢的静动态力学行为与J-C模型参数拟合确定[J]. *北京理工大学学报*, 2022, 42(6): 596-603.
MA Minghui, YU Yilei, JIANG Zhaoxiu, et al. Static and dynamic mechanical properties of 675 armor steel and determination of J-C model parameters [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(6): 596-603. (in Chinese)
- [6] 周古昕, 郎玉婧, 杜秀征, 等. 高强7A62铝合金动态力学响应及其J-C本构关系[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(1): 21-29.
ZHOU Guxin, LANG Yujing, DU Xiuzheng, et al. Dynamic mechanical response and J-C constitutive equation of high strength 7A62 aluminum alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31 (1): 21-29. (in Chinese)
- [7] 卢涛, 高玉波, 秦国华, 等. WC-Co金属陶瓷含损伤的本构模型及失效机理研究[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(1): 11-18.
LU Tao, GAO Yubo, QIN Guohua, et al. Study on the damage-containing constitutive model and failure mechanism of WC-Co cermet [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2022, 43(1): 11-18. (in Chinese)
- [8] SU X, ZHOU L, JING L, et al. Experimental investigation and constitutive description of railway wheel/rail steels under medium-strain-rate tensile loading [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29(3): 2015-2025
- [9] JING L, SU X, ZHAO L. The dynamic compressive behavior and constitutive modeling of D1 railway wheel steel over a wide range of strain rates and temperatures [J]. *Results in Physics*, 2017, 7: 1452-1461.
- [10] 常变红, 刘同鑫, 尹建平, 等. AZ80镁合金的动态力学性能研究[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(3): 389-392.
CHANG Bianhong, LIU Tongxin, YIN Jianping, et al. Research on dynamic mechanical properties of AZ80 magnesium alloy [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2015, 36(3): 389-392. (in Chinese)
- [11] SHOKRY A, GOWID S, MULKI H, et al. On the prediction of the flow behavior of metals and alloys at a wide range of temperatures and strain rates using Johnson-Cook and modified Johnson-Cook-based models: a review[J]. *Materials*, 2023, 16(4): 1574.
- [12] 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.
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. (in Chinese)
- [13] GUO L, ZHANG L, ANDERSSON J, et al. Modified Johnson-cook constitutive model for dynamic compressive behaviors of C250 maraging steel at different temperatures[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 34(8): 6926-6937.
- [14] 张涛, 陈伟, 关玉璞. 2A70合金动态力学性能与本构关系的研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45 (3): 367-372.
ZHANG Tao, CHEN Wei, GUAN Yupu. Dynamic mechanical behavior and constitutive relations of aluminum alloy 2A70 [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(3) : 367-372. (in Chinese)
- [15] 邓云飞, 张永, 吴华鹏, 等. 6061-T651铝合金动态力学性能及J-C本构模型的修正[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(20): 74-81.
DENG Yunfei, ZHANG Yong, WU Huapeng, et al. Dynamic mechanical properties and modification of J-C constitutive model of 6061-T651 aluminum alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 74-81. (in Chinese)

- [16] 冯振宇, 李恒晖, 刘义, 等. 中低应变率下 7075-T7351 铝合金本构与失效模型对比[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12088-12093.
FENG Zhenyu, LI Henghui, LIU Yi, et al. Comparison of constitutive and failure models of 7075-T7351 alloy at intermediate and low strain rates[J]. Materials Reports, 2020, 34(12): 12088-12093. (in Chinese)
- [17] 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.
YE Jianhua, CHEN Minghe, WANG Ning, et al. Flow behavior of TA12 titanium alloy based on modified JC model at high temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (4) : 733-741. (in Chinese)
- [18] 汤祁, 熊良山, 邢万强, 等. 反求材料 JC 本构方程系数方法的改进[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(3): 73-76.
TANG Qi, XIONG Liangshan, XING Wanqiang, et al. Improvement in inverse identification of JC constitutive equation parameters[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(3): 73-76. (in Chinese)
- [19] SHI L, WANG T, WANG L, et al. Research on Johnson-cook constitutive model of γ -TiAl alloy with improved parameters[J]. Materials, 2023, 16(20): 6715.