

Q355ND 钢静动态力学行为与 Johnson-Cook 本构参数拟合

魏继锋¹, 李新菊¹, 吉耿杰², 韩璐³

(1. 北京理工大学 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081; 2. 中国空空导弹研究院, 河南, 洛阳 471009; 3. 西安近代化学研究所, 陕西, 西安 710065)

摘要: 采用 INSTRON5985 材料测试机和 SHPB 实验系统分别开展 Q355ND 钢的静态和动态力学性能实验, 获得了 Q355ND 钢在 0.001、2 600、3 600、4 100 s⁻¹ 应变率下的力学性能参量. 研究表明, Q355ND 钢材料屈服强度随应变率的增大而增大, 表明该材料为应变敏感材料, 具有应变率强化效应. 基于实验结果拟合得到 Q355ND 的屈服应力参数 A 、应变强化系数 B 、应变强化指数 n 和应变率强化参数 C 等参量, 从而构建出 Q355ND 钢材料的 Johnson-Cook 本构模型, 可较好地描述 Q355ND 钢材料在静、动态载荷下的力学行为, 为该材料的相关应用研究提供了基础数据.

关键词: 本构模型; Q355ND 钢; 屈服强度; 应变率强化效应

中图分类号: O347.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2025)05-0437-07

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2024.162

Static and Dynamic Mechanical Properties of Q355ND Steel and Determination of Johnson-Cook Model Parameters

WEI Jifeng¹, LI Xinju¹, JI Gengjie², HAN Lu³

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China; 3. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The static and dynamic mechanical property experiments of Q355ND steel were carried out using INSTRON5985 material testing machine and SHPB experimental system, respectively, and the mechanical property parameters of Q355ND steel at 0.001, 2 600, 3 600 and 4 100 s⁻¹ strain rate were obtained. The results show that the yield strength of Q355ND material increased with the increase of strain rate, indicating that the material is a strain sensitive material with strain rate strengthening effect. The yield stress parameter A , strain strengthening coefficient B , and strain strengthening exponent n , as well as the strain rate strengthening parameter C , were obtained. A Johnson-Cook model of Q355ND steel was constructed, which provides a more accurate description of the material's mechanical behavior under static and dynamic loads, and provide basic data for related application research of this material.

Key words: constitutive model; Q355ND steel; yield strength; strain rate strengthening effect

钢材料在工程领域应用广泛, 常面临着高速冲击等强载荷的作用, 钢材料的力学特性是相关研究与分析的基础^[1]. 材料的力学特性参数需要通过相应的力学性能实验获得, CADONI 等^[2]、KERILENG

等^[3]、WANG 等^[4]通过对 S690QL 结构钢、S31803 钢、Q345 结构钢开展一系列力学实验, 获得了这些钢材料的力学特性参数, 为相关设计和材料选择提供了重要依据. 钢材料因其质量等级和处理工艺上的区

收稿日期: 2024-10-28

基金项目: 国防科研项目(70902)

作者简介: 魏继锋(1977—), 男, 博士, 副教授, E-mail: weijifeng@bit.edu.cn.

别,会导致其力学性能差异较大^[5-8], Q355 钢亦是如此. 准静态、动态力学实验研究发现, Q355B 钢的弹性模量为 206 GPa, 屈服强度为 339.5 MPa^[9-10]; Q355NE 结构钢的弹性模量为 208 GPa, 屈服强度为 430 MPa^[11]; Q355GNHD 高耐候钢的屈服强度为 324.87 MPa^[12]; Q355D 钢材的弹性模量为 207 GPa, 屈服强度为 356 MPa^[13]. 目前, 尚缺乏 Q355ND 钢材的力学性能参数.

无论在理论计算还是在数值仿真中, 材料的力学特性参数均须表述为本构方程的形式. 常见的本构模型有 Johnson-Cook 模型(J-C 模型)^[14-17]、Cowper-Symonds 模型(C-S 模型)^[4, 18]、Fields & Fields 模型^[19]、Void Growth Model 模型(VGM 模型)^[20]、Gurson-Tvergaard-Needleman 模型(GTN 模型)^[13]等. 其中, J-C 模型因其考虑应变硬化和应变率强化等效应、形式简单、适用性好等优点而被广泛使用, 能够较准确描述金属材料大应变、高应变率内的力学行为, 被很多数值仿真软件内置, 是目前应用广、计算效果好的本构模型之一^[21-25]. 目前尚缺乏 Q355ND 钢材的 J-C 模型.

本文采用 INSTRON5985 材料测试机开展 Q355ND 结构钢的准静态力学实验, 基于 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)实验系统研究 Q355ND 钢的动态力学特性, 得到该钢材在不同应变率下的应力-应变关系和应变率强化特性. 在 Q355ND 结构钢静态、动态实验数据基础上, 拟合得出其 J-C 本构模型相关参数.

1 准静态实验研究

1.1 准静态实验试件

采用 INSTRON5985 材料测试机对 Q355ND 结构钢进行准静态拉伸实验. 试件为标准哑铃形状, 尺寸符合 GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》标准要求, 准静态拉伸试件结构及尺寸如图 1 所示.

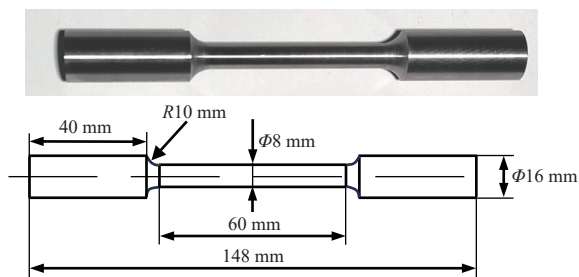


图 1 准静态拉伸试件及示意图

Fig. 1 Quasi-static tensile sample and schematic diagrams

实验在室温下进行, 环境温度为 25 ℃. 将试件插入夹具中固定, 再将引伸计连接到试件上测量并记录实验过程中的应变, 确保数据的准确性. 设置拉伸速率为 0.038 mm/s, 在准静态条件下(参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$ 为 0.001 s^{-1}), 逐渐加大拉伸载荷. 开展 3 次实验, 记录试件的应力-应变数据, 取 3 次数据的平均值作为实验结果.

1.2 准静态实验结果

图 2 为某拉伸试件结果图, 可以发现试件断裂处出现明显的颈缩现象. Q355ND 钢作为低碳钢, 端口呈现明显的塑性破坏, 试件先在中心开裂, 随后向外延伸, 接近试件表面时, 沿最大切应力方向的斜面断开, 断口形状类似于杯口状. 可观察到断裂面既有撕裂痕迹, 也存在剪切唇, 说明 Q355ND 的断裂同时受剪切断裂和韧性断裂的影响.



图 2 某拉伸试件结果图

Fig. 2 Results of a tensile sample

图 3 是准静态拉伸实验的力-位移曲线, 根据准静态实验原理, 工程应变和工程应力可以表示为:

$$\sigma_n(t) = \frac{F(t)}{S} \quad (1)$$

$$\epsilon_n(t) = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

式中: σ_n 为工程应力; ϵ_n 为工程应变; F 为外部载荷; S 为试件实验段的截面积; t 为时间; ΔL 为标距长度变化量; L_0 为试件的标距长度.

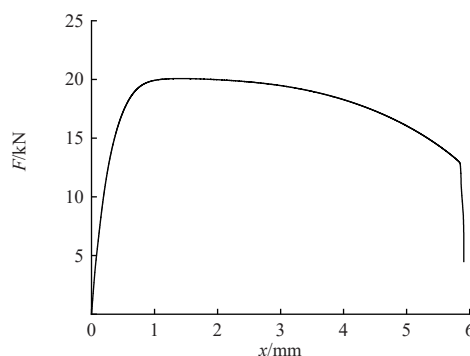


图 3 准静态拉伸实验的载荷-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve for quasi-static tensile experiments

将工程应力-应变按照如下计算公式转化为真实应力-应变曲线,如图4所示。

$$\sigma_T(t) = \sigma_n(t)(1 + \varepsilon_n(t)) \quad (3)$$

$$\varepsilon_T(t) = \ln(1 + \varepsilon_n(t)) \quad (4)$$

式中: σ_T 为真实应力; ε_T 为真实应变。

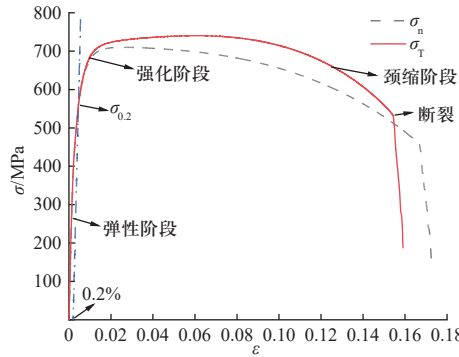


图4 准静态拉伸实验的工程应力-应变和真实应力-应变曲线

Fig. 4 Engineering stress-strain and true stress-strain curves for quasi-static tensile experiments

可以看出, Q355ND 钢的准静态应力-应变曲线可分为4个阶段: 初始阶段为弹性阶段, 即材料的变形是可逆的, 在此阶段应力与应变呈正比, 直线的斜率即代表 Q355ND 钢的弹性模量; 随后为条件屈服阶段, 无明显的屈服平台, 取对应 0.2% 残余应变的应力值作为其屈服极限; 再次为强化阶段, 力开始增加, 曲线继续上升, 这是由于塑性变形增长, 材料内部晶体结构重新进行排列, 导致材料硬化, 抗拉强度不断增加, 材料体现出应变硬化现象; 最后为颈缩断裂阶段, 当达到最大抗拉强度时, 材料会产生颈缩现象, 材料截面积减小, 最终断裂。

2 动态压缩实验研究

2.1 动态压缩实验方法

为研究该材料在高应变率下的力学性能, 采用 SHPB 实验系统进行动态压缩实验, 实验装置示意图如图5所示。实验系统主要由气室、撞击杆、入射杆和透射杆、吸收杆等部分组成, 入射杆和透射杆直接

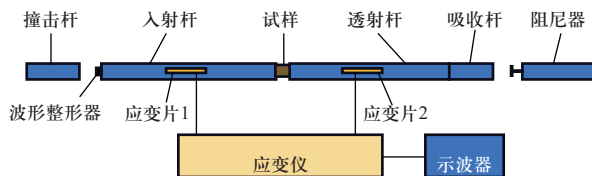


图5 动态压缩实验原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of SHPB experiments

同轴接触, 并在两杆上分别粘贴一个应变计用于采集波导杆上的应变情况。

根据国家军用标准 GJB 8 799-2015《金属材料动态压缩试验方法》, 动态压缩实验的试件尺寸为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的圆柱, 材料为 Q355ND, 见图6。实验时, 首先在入射杆与透射杆之间夹持试样, 使用凡士林润滑并将试件固定在入射杆端面上; 随后在气室中填充高压气体, 推动撞击杆撞击入射杆, 在入射杆端部产生入射脉冲 ε_i , 试件在该应力脉冲作用下发生变形并撞击透射杆, 应力脉冲被界面反射, 在透射杆中生成透射脉冲 ε_t , 入射杆中出现反射脉冲 ε_r , 应力波传播如图7所示。入射杆和透射杆上粘贴的应变片采集信息并经应变仪传输到数据处理系统上, 应变标定值为 1 V 对应 1 000 $\mu\varepsilon$ 。通过调节气压大小改变撞击杆的发射速度可完成不同应变率的材料力学实验, 进行 3 组实验, 每组重复 4~5 次, 最终得到了 2 600、3 600、4 100 s^{-1} 应变率下的材料应力-应变曲线。

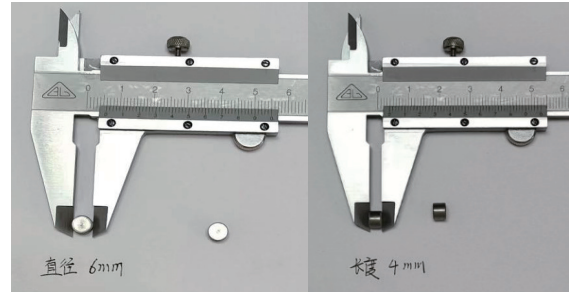


图6 动态压缩试件

Fig. 6 Dynamic compression sample

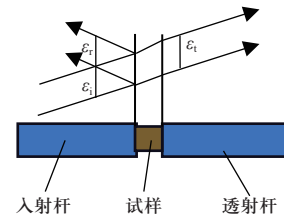


图7 应力波传播示意图

Fig. 7 Schematic of stress wave propagation

2.2 动态实验结果与分析

试件结果如图8所示, 随着应变率的增加, 试件变形量越来越大, 墩粗现象越来越明显, 未发生剪切破坏, 说明 Q355ND 钢在高应变率载荷作用下拥有良好的韧性, 可以依靠变形吸收较大的能量。

动态压缩实验采集到的典型波形曲线如图9所示, 图中 in 代表入射杆, out 代表透射杆。从图中可以看出, 首先出现的应力波为入射波, 波形为向下的梯

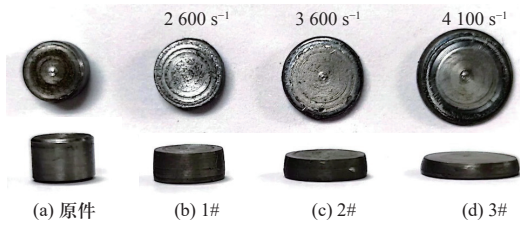


图 8 动态压缩实验试件结果图

Fig. 8 Dynamic compression experimental sample results

形;随后出现的为反射波与透射波,反射波与入射波方向相反,且均为入射杆上的应力波,波形为向上的梯形,透射波为透射杆被撞后产生的应力波,波形幅值小于入射波与反射波,且与入射波方向相同.波形曲线表明,动态压缩测试过程中对应力波的散布、惯性效应及端面摩擦影响控制较好.

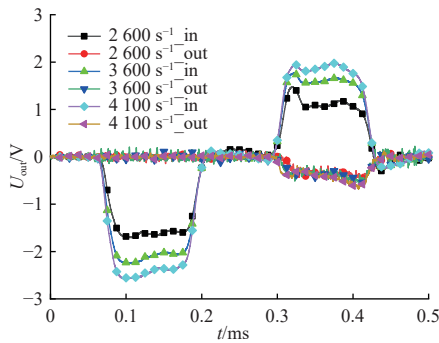


图 9 不同应变率的波形曲线图

Fig. 9 Waveform curves for different strain rates

利用测得的入射波 ε_i 、反射波 ε_r 和透射波 ε_t ,基于一维应力假定和均匀性假定,采用反射波 ε_r 和透射波 ε_t 的两波法,可以计算得到试样的应变率 $\dot{\varepsilon}$ 、应变 ε 和应力 σ 随时间变化的关系为

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c}{l_0}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) = -\frac{2c}{l_0}\varepsilon_r \quad (5)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt = \frac{2c}{l_0} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (6)$$

$$\sigma(t) = \frac{S}{2S_0} E_b (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) = \frac{S}{S_0} E_b \varepsilon_i \quad (7)$$

式中: c 为纵波在压杆中的弹性波速, $c=5\,172\text{ m/s}$; S 、 E_b 分别为压杆的横截面面积和弹性模量, $S=314.16\text{ mm}^2$, $E_b=210\text{ GPa}$; S_0 和 l_0 分别为试样的初始横截面面积和初始长度, $S_0=28.27\text{ mm}^2$, $l_0=4\text{ mm}$.

对得到的应力-应变数据使用 Origin 2019b 软件进行处理,绘制真实应力-应变曲线,并进行“Smoothing”平滑处理,得到不同应变率下的真实应力-应变曲线,如图 10 所示.对真实应力-应变曲线中的弹性阶段和塑性阶段进行拟合,两条直线的交

点即为试件的屈服强度 σ_s ,不同应变率下的屈服强度如表 1 所示.

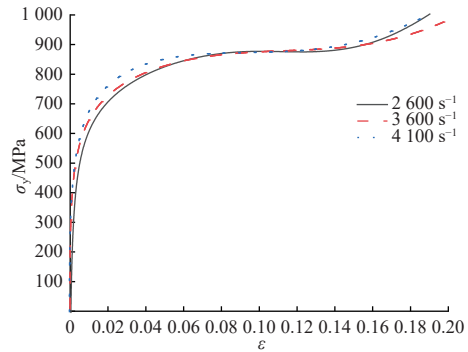


图 10 不同应变率时 Q355ND 钢的应力-应变曲线图

Fig. 10 Stress-strain curves of Q355ND steel at different strain rates

表 1 Q355ND 钢动态力学性能实验结果

Tab. 1 Q355ND steel dynamic mechanical properties experimental results

试件	$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$	σ_s/MPa
1#	2 600	2 600 000	618
2#	3 600	3 600 000	624
3#	4 100	4 100 000	635

3 本构模型及参数确定

3.1 J-C 本构模型

J-C 模型综合考虑金属材料的应变率效应、应变硬化效应和温度软化效应,其形式为

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (8)$$

式中: σ_y 为材料塑性应力; ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为相对应变率,文中 $\dot{\varepsilon}_0$ 为准静态拉伸实验应变率 10^{-3} s^{-1} ; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$, 其中 T_r 为室温, T_m 为材料的熔化温度; A 、 B 、 n 、 C 和 m 为模型本构参数,其中 A 为材料在参考应变率和参考温度下的初始屈服应力, B 和 n 分别为材料的应变硬化系数和硬化指数, C 为应变率硬化参数, m 为温度软化系数.由于没有考虑温度的影响,本文忽略不计.

3.2 本构参数 A 、 B 、 n 的确定

A 、 B 、 n 3 个参数可以通过在室温、准静态条件下进行拉伸实验而得到.在不考虑应变率和温度影响的情况下,量纲一温度 T^* 在室温条件下为 0, J-C 本构方程可简化为

$$\sigma_y = A + B\varepsilon_p^n \quad (9)$$

分析准静态拉伸实验得到的应力-应变曲线,弹

性阶段直线的斜率即代表 Q355ND 的弹性模量, 经线性拟合得到杨氏模量 $E=222$ GPa. 准静态应变率 (0.001 s^{-1}) 下拉伸实验产生的真实应力与真实应变数据表明, Q355ND 钢具有高屈服点和适度的应变硬化. 取发生微量变形时 (应变为 0.2%) 的塑性应力作为 Q355ND 结构钢准静态拉伸实验的初始屈服点, 线性拟合结果如图 11 所示, 得 $\sigma_s=555$ MPa, 即 $A=555$ MPa.

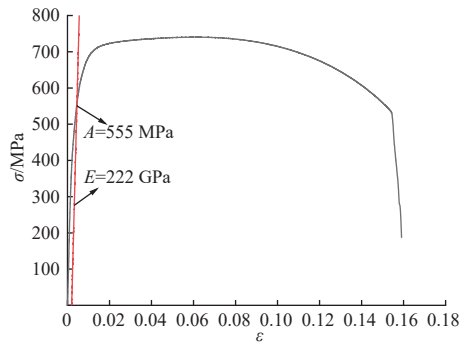


图 11 Q355ND 钢的准静态真实应力-应变曲线

Fig. 11 Quasi-static true stress-strain curve of Q355ND steel

使用屈服点后到颈缩点前的真实应力-塑性应变数据来确定应变硬化系数 B 和硬化指数 n , 拟合公式如式 (10) 所示, 拟合曲线如图 12 所示, 可以确定出 $B=371.258\text{ 3 MPa}$, $n=0.206\text{ 9}$.

$$\sigma_y = 555 + 371.258\text{ 3} \varepsilon_p^{0.206\text{ 9}} \quad (10)$$

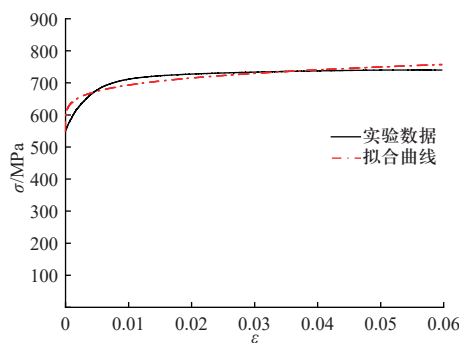


图 12 Q355ND 的屈服点后到颈缩前的真实应力-应变曲线拟合

Fig. 12 Fitting of true stress-strain curves after yield point and before necking for Q355ND

3.3 本构参数 C 的确定

应变率硬化参数 C 可以通过不同应变率下的动态压缩实验得到. 当塑性应变 $\varepsilon_p^n = 0$ 时, 室温下屈服应力与应变率的关系为

$$\sigma_y = A \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (11)$$

图 13 为不同应变率下 Q355ND 钢的屈服强度变化曲线. 从实验结果来看, Q355ND 结构钢高应变率下的屈服强度高于准静态应变率下的屈服强度; Q355ND 的屈服强度随着应变率的增大而增大; 这表明 Q355ND 结构钢表现出应变敏感性, 具有一定的应变率强化效应.

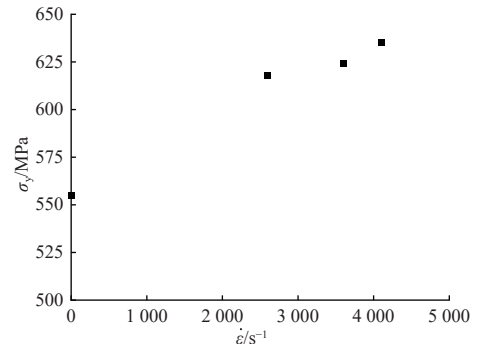
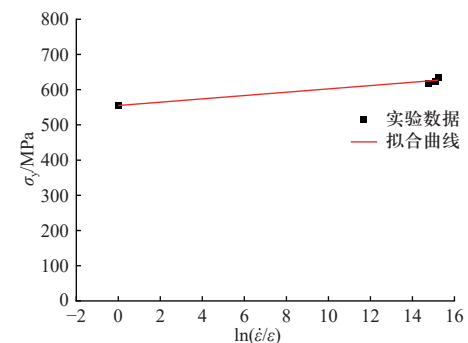


图 13 不同应变率下 Q355ND 钢的屈服强度变化曲线

Fig. 13 Yield strength variation curve of Q355ND steel at different strain rates

根据式 (11), 基于 Q355ND 结构钢屈服应力与应变率的关系进行拟合, 拟合曲线如图 14 所示; 拟合得到式 (12), 相关系数为 0.970 2, 可以确定出应变率硬化参数 $C=0.008\text{ 5}$.

$$\sigma_y = 555 \left(1 + 0.008\text{ 5} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (12)$$

图 14 应变率硬化参数 C 拟合曲线Fig. 14 Strain rate hardening parameter C fitting curve

综上所述, Q355ND 结构钢的 J-C 本构模型参数 A 、 B 、 n 、 C 均已由实验数据拟合得到, 具体数值如表 2 所示.

表 2 Johnson-Cook 模型参数拟合结果

Tab. 2 Results of parameter fitting of Johnson-Cook model

材料	A/MPa	B/MPa	n	C
Q355ND	555	371.258 3	0.206 9	0.008 5

据此,得到 Q355ND 结构钢的 J-C 本构方程具体表达式为

$$\sigma_y = (555 + 371.258 3 \varepsilon_p^{0.2069}) \left(1 + 0.008 5 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (13)$$

基于式(13)描述的 J-C 本构方程,拟合得出 4 种不同应变率下的应力-应变曲线,与实验结果进行比较,如图 15 所示.可以看出, J-C 本构方程拟合曲线与实验曲线吻合良好,能够较好地预测 Q355ND 钢材的力学行为.

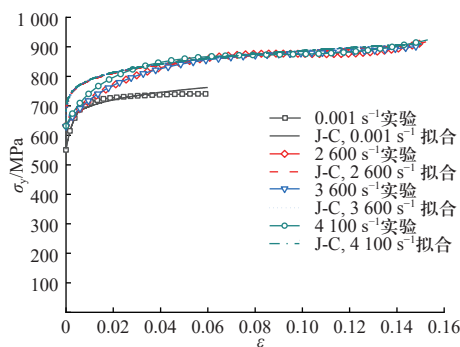


图 15 J-C 模型拟合结果与实验结果的比较

Fig. 15 Comparison between fitted results of Johnson-Cook model and experimental results

4 结 论

针对 Q355ND 结构钢,开展了静态和动态力学性能实验研究,并拟合构建出其 J-C 本构方程,主要结论如下:

① 静态拉伸实验表明, Q355ND 结构钢先后经历弹性、屈服、强化、颈缩断裂 4 个阶段,其弹性模量为 222 GPa,屈服强度为 555 MPa.

② 动态压缩实验表明,在 2 600、3 600、4 100 s⁻¹ 应变率条件下, Q355ND 材料动态屈服强度随应变率的增大而增大,这说明 Q355ND 为应变敏感材料,具有应变率强化效应.

③ 基于 J-C 模型拟合得到了 Q355ND 结构钢的屈服应力参数 A 、应变强化参数 B 及应变强化系数 n 和应变率强化参数 C 等相关参数,构建出 J-C 本构方程;据此拟合出不同应变率下的应力-应变曲线,与实验数据吻合良好;这表明该模型能够较好地描述 Q355ND 钢材料在静、动态载荷下的力学行为,为 Q355ND 钢的相关应用研究提供基础数据.

参考文献:

[1] 陈建良,李继承,屈明,等.爆炸冲击波对大型复杂舰船结构

毁伤效应数值模拟研究[J].北京理工大学学报,2023,43(11):1176-1186.

CHEN Jianliang, LI Jicheng, QU Ming, et al. A numerical simulation analysis for destruct effect of blast load on large complex warship structure[J]. Transactions of Beijing institute of Technology, 2023, 43(11): 1176-1186. (in Chinese)

[2] CADONI E, FORNI D. Strain-rate effects on S690QL high strength steel under tensile loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 175: 106348.

[3] KERILENG K, ZHI X D, DUNDU M. Strain-rate effect and constitutive models for S31803 duplex stainless steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 216: 108582.

[4] WANG Haitao, HUO Jingsi, LIU Yanzhi. Experimental study on dynamic tensile performance of Q345 structural steel considering thickness differences[J]. Structures, 2023, 47: 891-910.

[5] 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.

[6] LI Hang, LI Fanghui, ZHANG Rong, et al. High strain rate experiments and constitutive model for Q390D steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 206: 107933.

[7] 王迎春,杨彬,万程,等.冷处理对低碳马氏体不锈钢组织性能的影响[J].北京理工大学学报,2025,45(2):213-218.

WANG Yingchun, YANG Bin, WAN Cheng, et al. Cryogenic treatment effect on microstructure and tensile properties of a low-carbon martensite stainless steel[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2025, 45(2): 213-218. (in Chinese)

[8] 程军,吴巍,胡志明,等.加工工艺对高强度 15-5PH 钢力学性能与侵蚀性能的影响[J].北京理工大学学报,2024,44(3):251-259.

CHENG Jun, WU Wei, HU Zhiming, et al. Influence of processing technology on the mechanical and penetration properties of high strength 15-5PH steel[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(3): 251-259. (in Chinese)

[9] 朱昱.基于 Johnson-Cook 模型的 Q355B 钢动态本构关系研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.

ZHU Yu. Research on dynamic constitutive relationship of Q355B steel based on Johnson-Cook model[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[10] 林莉,黄博,肖新科,等.Q355B 钢动态材料性能研究[J].振动与冲击,2020,39(18):231-237.

LIN Li, HUANG Bo, XIAO Xinke, et al. Behavior of dynamic material Q355B steel based on the Johnson-Cook model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(18): 231-237 (in Chinese)

- [11] LI Wei, CHEN Hao. Tensile performance of normal and high-strength structural steels at high strain rates[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 184: 110457.
- [12] 张志龙, 肖合婷, 周伟. Q355GNHD 高耐候钢的动态高应变率塑性本构模型 [J]. 机车电传动, 2021(1): 63 – 68.
ZHANG Zhilong, XIAO Heting, ZHOU Wei. Dynamic high strain rate plastic constitutive model of Q355GNHD high weathering steel[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2021(1): 63 – 68. (in Chinese)
- [13] 白静涵. Q355D 钢材及其焊缝材料本构关系及微观断裂模型参数校准与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2022.
BAI Jinghan. Calibration and application of constitutive relationship and micro fracture model parameters of Q355D steel and its welding[D]. Tianjin : Tianjin University, 2022. (in Chinese)
- [14] 张杜江, 赵振宇, 贺良, 等. 基于 Johnson-Cook 本构模型的高强度装甲钢动态力学性能参数标定及验证 [J]. 兵工学报, 2022, 43(8): 1966 – 1976.
ZHANG Dujiang, ZHAO Zhenyu, HE Liang, et al. Calibration and verification of dynamic mechanical properties of high-strength armored steel based on Johnson-Cook constitutive model[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(8): 1966 – 1976. (in Chinese)
- [15] 马铭辉, 余毅磊, 蒋招绣, 等. 675 装甲钢的静态力学行为与 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)
- [16] 乔文靖, 杨帆, 胡启涵, 等. 强腐后 Q345 钢力学性能退化试验 [J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(5): 231 – 246.
QIAO Wenjing, YANG Fan, HU Qihan, et al. Experiment on mechanical property degradation of Q345 steel after strong corrosion[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(5): 231 – 246. (in Chinese)
- [17] HU Fengquan, LIU Xin, WANG Boshi, et al. Investigations on the Johnson-Cook constitutive and damage-fracture model parameters of a Q345C Steel[J]. *Metals*, 2024, 14(5): 509.
- [18] YANG X Q, YANG H, GARDNER L, et al. A continuous dynamic constitutive model for normal-and high-strength structural steels[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 192: 107254.
- [19] ZHOU Xuhong, YANG Jingjie, WANG Weiyong, et al. Mechanical properties and creep strain of Q355 cold-formed steel at elevated temperature[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 180: 106577.
- [20] 葛建舟, 黄学伟, 赵军, 等. Q690D 高强钢基于循环微孔扩展模型的断裂预测分析 [J]. 钢结构 (中英文), 2021, 36(7): 18 – 28.
GE Jianzhou, HUANG Xuewei, ZHAO Jun, et al. Fracture prediction and analysis of Q690D high strength steel based on cyclic void growth model[J]. *Steel Construction (Chinese & English)*, 2021, 36(7): 18 – 28. (in Chinese)
- [21] SIRIGIRI V K R, GUDIGA V Y, GATTU U S, et al. A review on Johnson Cook material model[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62: 3450 – 3456.
- [22] ZHU Hongjie, ZHANG Chuntao, CHEN Shicai, et al. A modified Johnson-Cook constitutive model for structural steel after cooling from high temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 340: 127746.
- [23] SAHU S, MONDAL D P, GOEL M D, et al. Finite element analysis of AA1100 elasto-plastic behaviour using Johnson-Cook model[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2): 5349 – 5353.
- [24] SAXENA A, DWIVEDI S P, KUMARASWAMY A, et al. Influence of SD effect on Johnson-Cook hardening constitutive material model: numerical and experimental investigation for armor steel[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(2): 285 – 302.
- [25] KORKMAZ M E. Verification of Johnson-Cook parameters of ferritic stainless steel by drilling process: experimental and finite element simulations[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 6322 – 6330.

(责任编辑: 匡梅)