



基于J-C模型的11MnNiMo钢本构参数标定及验证

何沐阳, 韦家祥, 尹佳静, 隆霞, 周琛

引用本文:

何沐阳, 韦家祥, 尹佳静, 等. 基于J-C模型的11MnNiMo钢本构参数标定及验证[J]. *应用科技*, 2021, 48(6): 121-126.

HE Muyang, WEI Jiaxiang, YIN Jiajing, et al. Calibration and verification of constitutive parameters of 11MnNiMo steel based on J-C model[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(6): 121-126.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202103018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击作用下核用Q390D钢的裂纹扩展阻力曲线研究

Study on the crack growth resistance curve of nuclear Q390D steel under impact
应用科技. 2021, 48(6): 102-108 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202106032>

铁素体钢材韧脆转变温度数值分析

Numerical analysis of ductile brittle transition temperature of ferritic steel
应用科技. 2021, 48(2): 110-115 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202009016>

铝合金地铁车体边梁机加工裂纹仿真分析与研究

Simulative analysis and research on machining cracks of side beams of an aluminum alloy metro car body
应用科技. 2021, 48(2): 95-99 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202010009>

基于约束参数的断裂韧性转化研究

Transformation of fracture toughness based on constraint parameters
应用科技. 2021, 48(1): 98-102 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202009017>

钢-砼连续组合梁截面优化设计

Section optimum design of the steel-concrete continuous composite beam
应用科技. 2018, 45(4): 121-123 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201710008>

胶层厚度对CFRP-混凝土界面性能影响的数值分析

Numerical analysis for influence of adhesive thickness on the interfacial properties of CFRP-concrete
应用科技. 2018, 45(2): 96-100 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201704006>



微信公众平台



期刊网址

DOI: 10.11991/yykj.202103018

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20210611.1112.006.html>

基于 J-C 模型的 11MnNiMo 钢本构参数标定及验证

何沐阳, 韦家祥, 尹佳静, 隆霞, 周琛

哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要:为了合理描述 11MnNiMo 钢材的动态断裂性能, 利用 INSTRON-5500R 万能实验机和霍普金森压杆分别进行准静态和高应变率下的材料力学性能测试, 获得了 11MnNiMo 钢的基本力学性能参数, 通过实验结果拟合出 J-C 本构模型; 基于仪器化夏比 V 型缺口冲击试验获得了材料的冲击断裂性能。结果表明, 夏比冲击实验中的起裂时间为 0.69 ms, 所对应的位移为 3.55 mm; 而有限元模拟过程中, 0.69 ms 时所对应的位移为 3.667 mm。实验与模拟的误差为 3.3%, 证明了本文所获得的 J-C 本构模型能够准确预测 11MnNiMo 钢材的冲击特性。本文内容可以为材料 J-C 本构模型参数的确定和 11MnNiMo 钢材结构的有限元模拟提供参考。

关键词: 11MnNiMo 钢; J-C 本构模型; 霍普金森压杆; 夏比冲击实验; 有限元; 模拟

中图分类号: TG146.21

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2021)06-0121-06

Calibration and verification of constitutive parameters of 11MnNiMo steel based on J-C model

HE Muyang, WEI Jiaxiang, YIN Jiajing, LONG Xia, ZHOU Chen

College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: In order to reasonably describe the dynamic fracture properties of 11MnNiMo steel, the mechanical properties of 11MnNiMo steel under quasi-static and high strain rate are tested by INSTRON-5500R universal testing machine and Hopkinson compression bar respectively, due to which the basic mechanical properties parameters and the J-C constitutive model of 11MnNiMo steel are obtained. The impact fracture properties of the material are obtained by instrumented Charpy V-notch impact test. The results show that the crack initiation time in Charpy impact test is 0.69 ms, and the corresponding displacement is 3.55 mm, while the corresponding displacement at 0.69 ms in finite element simulation process is 3.667 mm. The error between experiment and simulation is 3.3%, which proves that the obtained J-C constitutive model can accurately predict the impact characteristics of 11MnNiMo steel. This paper can provide a reference for the determination of the parameters of J-C constitutive model and the finite element simulation of 11MnNiMo steel.

Keywords: 11MnNiMo steel; J-C constitutive model; Hopkinson compression bar; Charpy impact test; finite element; simulation

由于动态载荷的瞬态特性, 动态断裂与准静态断裂有很大的不同^[1-4]。自 20 世纪 70 年代以来, 材料动态断裂力学与相关的断裂问题逐渐被学者关注。在金属材料受到冲击、爆炸、碰撞等高速撞击载荷作用时, 应变速率达到 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$, 此时金属材料会产生巨大的塑性变形。在高应变

率加载下, 材料的力学性能呈现明显的率相关性。针对冲击载荷, 材料瞬态响应的本构模型常见的有 Johnson-Cook(J-C) 模型^[5]、Steinberg 模型^[6]和 Zerilli-Armstrong 模型^[7]等。

在高应变率下延性金属材料的断裂模拟中, 由于 J-C 模型各项物理意义明确, 且相对容易获得, 得到了广泛的应用。Gambirasio 等^[8]评估了 5 种可用于校准 J-C 强度模型参数的方法。Banerjee 等^[9]通过实验确定了典型装甲钢材料的 J-C 模型的模型参数, 利用实测参数模拟了装甲钢试件的冲击试验, 得到了可靠的结果。文献 [10-11] 基

收稿日期: 2021-03-13. 网络出版日期: 2021-06-11.

基金项目: 国家级大学生创新训练计划项目 (202010217524).

作者简介: 何沐阳, 女, 本科.

周琛, 男, 博士研究生.

通信作者: 周琛, E-mail: zhouchen@hrbeu.edu.cn.

于 J-C 模型分别成功地实现了马氏体时效钢 300 和 6061 铝合金的夏比冲击试验建模与仿真。

本文通过试验方法研究了支承结构常用的 11MnNiMo 钢在不同加载条件下的性能,通过试件的准静态单轴拉伸试验和霍普金森压杆试验确定了 J-C 本构关系的模型参数,最后通过夏比冲击实验和有限元模拟对比验证了参数的准确性,为支承结构材料的动态断裂分析和安全设计提供了参考。

1 J-C 参数标定

MnNiMo 合金钢广泛应用于压力容器及其支承结构等关键部位,本实验选用 11MnNiMo 钢对支承结构断裂性能进行探究,所涉及材料均由同一钢板制备而成。

1.1 准静态材料拉伸实验

本实验依据《金属材料 拉伸实验 第 1 部分: 室温实验方法》^[12] 标准进行测试。

试件尺寸如图 1 所示,为保证准确性,每组实验重复 3 次。实验仪器采用 INSTRON-5500R 万能实验机,设置加载速率为 2.4 mm/min,应变率为 0.001 s⁻¹。

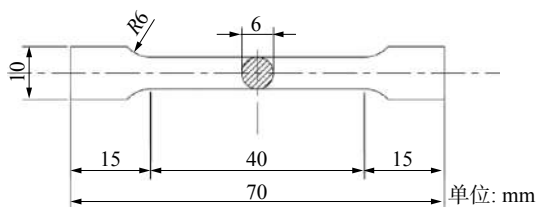


图1 拉伸试件尺寸示意

根据实验得到常温下 11MnNiMo 钢的工程应力-应变曲线如图 2 所示。

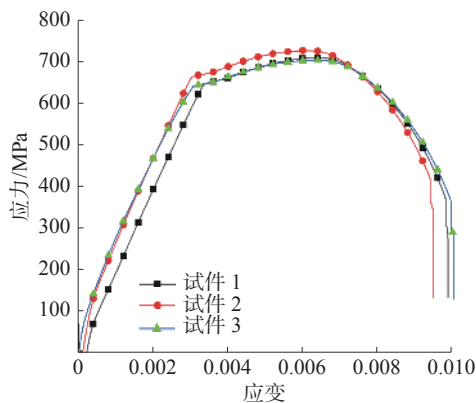


图2 11MnNiMo 钢拉伸应力-应变曲线

结合材料的出厂报告,整理得到 11MnNiMo 钢的各项材料力学性能:密度 ρ 为 8144 kg/m³,弹性模量为 195 GPa,泊松比为 0.28,屈服强度为

644 MPa,极限强度为 728 MPa,伸长率为 20%。

1.2 霍普金森压缩实验

压缩试样选取截面为 7 mm×7 mm 正方形、高为 3.5 mm 的长方体试件。所测试的应变率分别为 486、1012、1456 s⁻¹,相对应的测试试件编号分别为 D1、D2、D3、E1、E2、E3、F1、F2 和 F3,如图 3 所示。

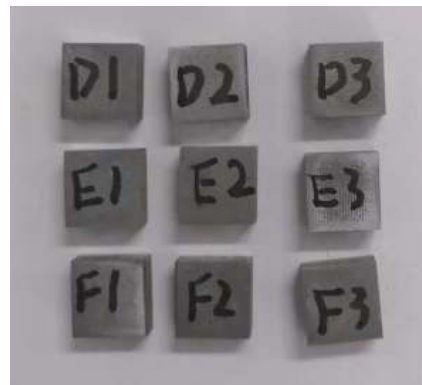


图3 霍普金森压缩实验试件

霍普金森压杆实验中导杆参数如表 1 所示,实验装置如图 4 所示。在入射杆和透射杆上分别粘贴一个应变计用于采集波导杆上应变情况,入射杆上应变计与试样端部的距离为 $a_1=1200$ mm,透射杆上应变计与试样端部的距离为 $a_2=600$ mm。动态应变仪应变标定值 1 V 对应 500×10^{-6} 应变,采样间隔时间为 0.8 μ s。

表1 霍普金森杆结构尺寸与材料性能

结构	直径/mm	杆长/mm	弹性模量/MPa	密度/(g·mm ⁻³)	泊松比
入射杆	16	2400	210	7800	0.33
透射杆	16	1200	210	7800	0.33

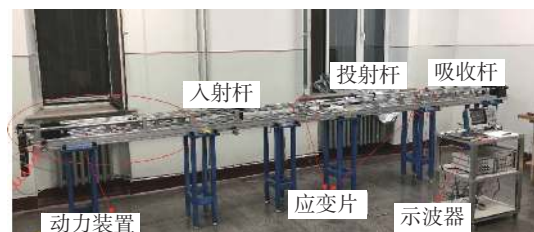


图4 霍普金森实验装置

实验中通过改变撞击子弹的长度实现输入载荷的调整。同时每次实验结束后应记录间隔测速仪的时间读数,计算撞击速度。实验数据如表 2 所示。

为使实验过程中试件可以保持在恒定应变率,应选用塑性较好的材料置于入射杆与子弹撞击的一端,以便对波形进行一定程度的整形优化。

表2 实验数据记录表

试件编号	撞击杆长度/mm	间隔仪距离/mm	测速仪时间/ms	撞击速度/(m·s ⁻¹)
D1	500	15	2.018	7.43
D2	500	15	2.113	7.10
D3	500	15	2.105	7.13
E1	300	15	1.810	8.28
E2	300	15	1.819	8.25
E3	300	15	2.018	7.43
F1	100	15	1.417	10.59
F2	100	15	1.422	10.55
F3	100	15	1.430	10.49

由于霍普金森实验的数据曲线震荡明显, 为便于计算应对曲线进行平滑处理, 通过霍普金森压缩实验获得常温下 486、1012、1456 s⁻¹ 这 3 种不同应变率情况工程应力-应变曲线, 如图 5 所示。

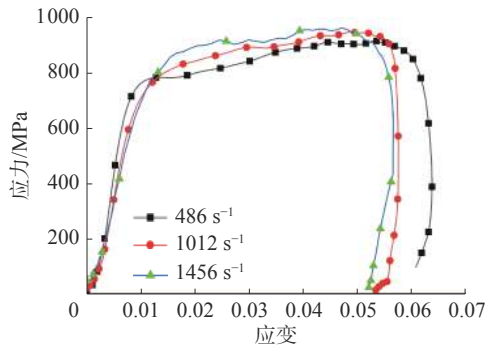


图5 不同速率下 11MnNiMo 钢的压缩应力-应变曲线

1.3 J-C 模型参数计算

上述拉伸实验与霍普金森压缩实验所获得的工程应力-应变曲线并没有考虑到拉伸过程中截面会随长度增加不断缩小, 试件受力面积时刻发生变化。在对 J-C 表达推导中应使用材料的真实应力-应变曲线, 即对瞬时的截面面积与长度进行求解。假设材料体积不变, 真实应力为

$$S = \frac{P}{A_i} = \frac{P l_i}{A l_0} = \sigma \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

式中: S 为真应力, l_0 为试件原始长度, l_i 为瞬时长度, P 为外载荷, A 为原始面积, A_i 为瞬时面积, σ 为工程应力, ε 为工程应变。

真实应变为

$$e = \sum d\varepsilon = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_f}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

式中: e 为真应变, dl 为长度微增量, l_f 为最终变形长度。

通过工程应力应变转换得到的准静态拉伸与霍普金森压缩的真实应力-应变曲线分别如图 6 和图 7 所示。

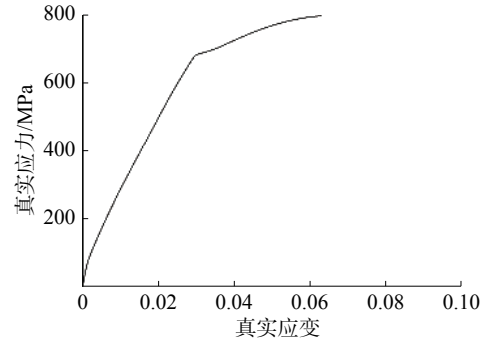


图6 准静态真实应力-应变曲线

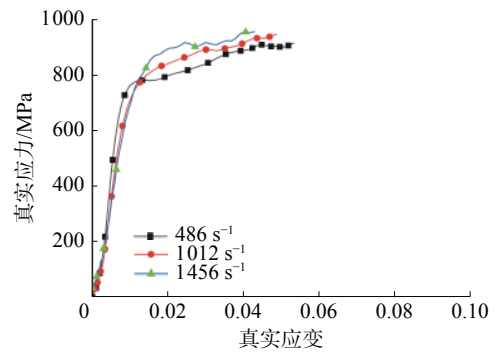


图7 霍普金森压缩实验的真实应力-应变曲线

由图 7 可以明显看到, 11MnNiMo 钢在应变率为 1456 s⁻¹ 时, 动态屈服应力为原来的 1.16 倍。在高应变速率下材料出现一定程度的应力强化效应。由准静态拉伸实验与霍普金森压缩实验得到的不同应变率下的应力应变曲线, 可以根据逐步估计法确定 J-C 模型参数, 即将硬化效应与应变率效应解耦, 分为 2 步进行参数求解。

1) 通过准静态拉伸实验估计参数 a 、 b 和 n 。

忽略应变率强化因素, 利用准静态应变率 $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 拉伸实验时的数据拟合解耦参数 C 后的 J-C 本构模型:

$$\sigma = a + b\varepsilon^n \tag{1}$$

式中 a 为准静态屈服强度, 其大小为 644 MPa。

对式 (1) 进行转换:

$$\ln(\sigma - a) = \ln b + n \ln \varepsilon$$

由真应力-应变曲线, 将应变减去屈服前的弹性应变得到真实应力-塑性应变关系, 利用最小二乘法进行拟合, 可推出: $n = 0.64$, $b = 1391 \text{ MPa}$ 。

2) 通过霍普金森压缩实验确定参数 C 。

选取应变为 0.04 时对应的各应变率下的应力值, 采用式 (2) 进行拟合。

$$\sigma / (644 + 1391 \times 0.04^{0.64}) = 1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-3}} \right) \tag{2}$$

根据式 (2), 左侧代入准静态拉伸应变率 $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时求解得的参数 a 、 b 和 n , 参考应变率为 $\dot{\varepsilon}_0 = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 线性拟合求得 $C = 0.0086$ 。

综上所述可以确定, 11MnNiMo 钢忽略温度项的

J-C 本构模型为

$$\sigma = \left(644 + 1391\varepsilon^{0.64} \right) \left[1 + 0.0086 \ln \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]$$

式中参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

2 J-C 参数验证

2.1 夏比冲击实验

本实验依据《金属材料 夏比摆锤冲击实验方法》^[13] 标准进行测试。

夏比 V 型缺口试件 (Charpy V-Notched) 尺寸为: 长度 $l=55 \text{ mm}$, 高度 $h=10 \text{ mm}$, 宽度 $w=10 \text{ mm}$; 在长方体中间预制 2.0 mm 的 V 型缺口。为确保动态断裂实验的准确性, 共选取 5 个试样进行实验, 编号为 1—5。试件尺寸示意图与测试试件分别如图 8 和图 9 所示。

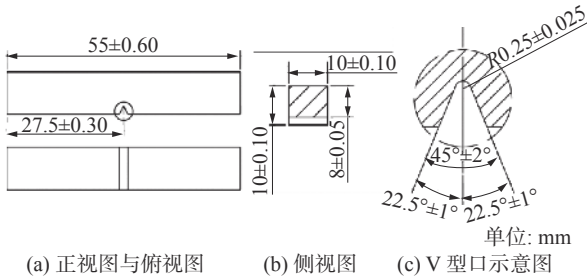


图8 夏比冲击试件尺寸示意

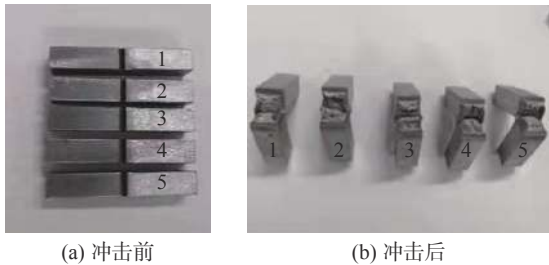


图9 冲击前后试件照片

本实验使用的摆锤实验机最大冲击能量为 300 J, 最大冲击速度为 5.23 m/s。整理数据后发现 4 号试件实验结果与其他相差较大, 这是由于实验过程种试件摆放位置有偏差, 因此本研究仅列出 4 个较统一的试件结果进行分析。11MnNiMo 钢夏比冲击试件的载荷-位移示波曲线如图 10 所示。

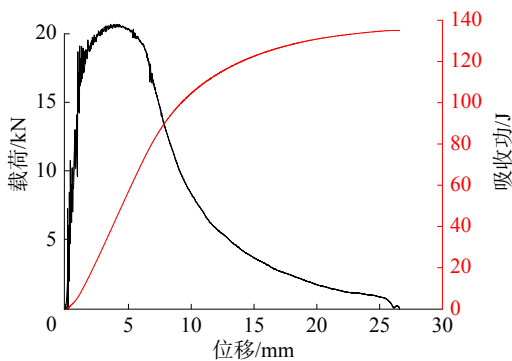


图10 夏比试件实验示波曲线图(1号试件)

夏比冲击特征值实验数据如表 3 所示。

表3 11MnNiMo 夏比冲击特征值实验数据

试样编号	最大力下的能量 W_m/J	总冲击能量 W_t/J	屈服力 F_{gy}/N	最大力 F_m/N	屈服位移 S_{gy}/mm	最大位移 S_m/mm
1	42683	135042	17758	20588	1.378	3.930
2	42505	136810	17677	20568	1.307	3.925
3	44260	133276	17463	20646	1.240	4.045
5	39219	134689	17132	20226	1.375	3.762

夏比冲击实验通常是为了获得材料在动态冲击下的断裂韧性。对于动态断裂韧性的计算, 最为重要的便是起裂时间的确定。本研究利用柔度法^[14] 确定试件的起裂时间。

柔度法表达式为

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{(B - B_{el})}{B_{el}}$$

式中: $B = \Delta d / \Delta P$ 为割线柔度; B_{el} 为切线柔度, $B_{el} = d / P$; d 为当前点位移; P 为载荷。

当试件开始起裂时, $\Delta B / B$ 的斜率会发生改变, 此拐点可以认为是起裂点。采用柔度变化率法对本实验进行处理, 得到曲线如图 11 所示, 柔度变化率的拐点发生在 3.55 mm 位移处, 由曲线积分至该点, 此时的吸收功为 38023 mJ。根据实验结果, 柔度拐点处载荷为 20444 N, 可知在最大载荷处之前已形成裂纹。根据柔度变化率法对应的裂纹形成处, 该点力占最大力值的 99%, 该点能量值占最大力点能量值的 89%, 与文献 [15] 中的结论一致。由柔度法测得的起裂时间为 0.69 ms。

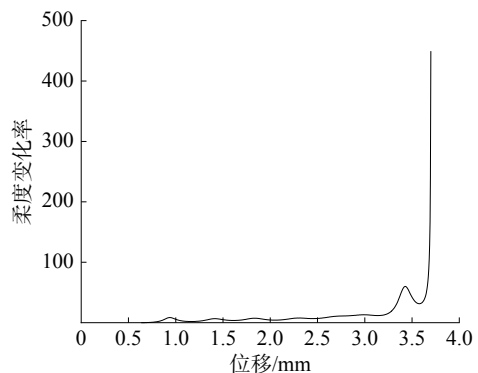


图11 柔度变化率曲线

2.2 有限元模拟

在 ABAQUS 软件中建立夏比冲击有限元模型, 如图 12 所示。材料参数与实验获得相关参数一致。分析步长设置为 8 ms, 分析类型为显式动力分析。锤头非加载方向位移为 0 mm, 锤头转角为 0°, 在锤头打击方向设置预定义速度场 5.23 m/s, 左右两支座完全固支。定义各接触面为切向接

触, 考虑为接触约束, 摩擦设置为罚函数, 系数设为 $0.2^{[16]}$ 。

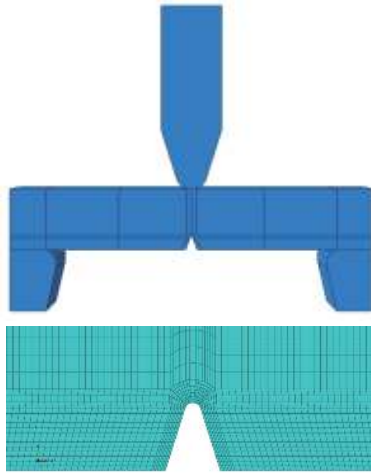


图 12 夏比冲击有限元模型示意

实验获得的起裂时间为 0.69 ms , 此时刻锤头位移为 3.55 mm 。根据有限元模型的输出结果, 提取 0.69 ms 时的变形与应力云图, 分别如图 13 和图 14 所示。

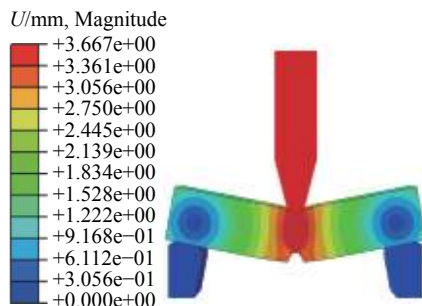


图 13 夏比试件 0.69 ms 时的变形云图

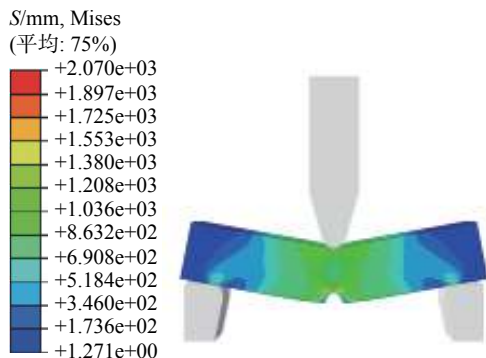


图 14 夏比试件 0.69 ms 时的应力云图

与实验结果进行对比可知, 在裂纹起裂前, 试件对锤头速度的影响不大, 试件的裂尖最大位移与锤头位移一致, 位移变形与实验情况相同。在 0.69 ms 时锤头位移为 3.667 mm , 实验与有限元锤头位移结果的误差为 3.3% , 故在试件起裂前, 有限元模型能够较好地模拟试件的变形状态。

3 结论

通过准静态单轴拉伸实验和霍普金森压杆实验确定了 11MnNiMo 钢的 Johnson-Cook 本构模型参数, 并通过夏比冲击实验以及有限元模拟验证了实验测得的参数的准确性。具体结论如下:

1) 通过准静态拉伸实验和霍普金森杆压缩实验确定了 11MnNiMo 钢忽略温度项的 J-C 本构参数: $a=644\text{ MPa}$, $b=1391\text{ MPa}$, $n=0.64$, $C=0.0086$ 。

2) 夏比冲击实验中的起裂时间为 0.69 ms , 所对应的位移为 3.55 mm 。而有限元模拟过程中, 0.69 ms 时所对应的位移为 3.667 mm , 误差为 3.3% , 证明了本文所测得的 J-C 参数能够较准确地预测 11MnNiMo 钢材的冲击特性。

参考文献:

- [1] 李一磊, 姚迪, 乔红威, 等. 金属材料中低加载速率下的动态韧脆转变及断裂韧性测量 [J]. *力学学报*, 2021, 53(2): 424–436.
- [2] 姬晨濛, 戚承志. II 型 III 型动态裂纹尖端断裂过程区近似评估方法 [J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 223–229.
- [3] 郑昌达, 杨立云, 丁晨曦, 等. 含倾斜裂纹三点弯动态断裂试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(8): 165–171.
- [4] 湛赫, 邹广平. 静态渐近解在动态断裂问题中的适用性分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(6): 824–831.
- [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] STEINBERG D J, COCHRAN S G, GUINAN M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate [J]. *Journal of applied physics*, 1980, 51(3): 1498–1504.
- [7] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. *Journal of applied physics*, 1987, 61(5): 1816–1825.
- [8] GAMBIRASIO L, RIZZI E. On the calibration strategies of the Johnson–Cook strength model: discussion and applications to experimental data [J]. *Materials science and engineering: A*, 2014, 610: 370–413.
- [9] BANERJEE A, DHAR S, ACHARYYA S, et al. Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel [J]. *Materials science and engineering: A*, 2015, 640: 200–209.
- [10] MADHUSUDHAN D, CHAND S, GANESH S, et al. Modeling and simulation of Charpy impact test of maraging steel 300 using Abaqus [J]. *IOP conference*

- series: materials science and engineering, 2018, 330: 012013.
- [11] PERVAIZ S, KANNAN S, RAM K, et al. Numerical modeling of Charpy impact test to determine the fracture characteristics of aluminium alloy 6061[M]//CARROLL J, XIA Shuman, BEESE A M, et al. Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Volume 6. Cham, Switzerland: Springer, 2019: 85–88.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 228.1–2010, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 229–2007, 金属材料夏比摆锤冲击试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] KOBAYASHI T, YAMAMOTO I, NIINOMI M. Introduction of a new dynamic fracture toughness evaluation system[J]. *Journal of testing and evaluation*, 1993, 21(3): 145–153.
- [15] 姜风春, 刘瑞堂, 刘殿魁. 船用 921A 钢动态断裂韧性测试研究 [J]. *试验力学*, 1999, 14(1): 96–101.
- [16] OSCAR P, EDUARDO R L. Impact performance of advanced high strength steel thin-walled columns [C]//Proceedings of the World Congress on Engineering 2008. London, UK, 2008.

本文引用格式:

- 何沐阳, 韦家祥, 尹佳静, 等. 基于 J-C 模型的 11MnNiMo 钢本构参数标定及验证 [J]. *应用科技*, 2021, 48(6): 121–126.
- HE Muyang, WEI Jiexiang, YIN Jiajing, et al. Calibration and verification of constitutive parameters of 11MnNiMo steel based on J-C model[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(6): 121–126.

(上接第 115 页)

- [13] 曹伍富, 胡愈, 姚爱军, 等. 地铁隧道下穿建筑地基基础的灾变特征与控制 [J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(S2): 2037–2041, 2048.
- [14] 牛晓凯, 张顶立, 高西洋, 等. 地铁车站顺行密贴下穿既有隧道安全风险评估 [J]. *北京交通大学学报*, 2018, 42(3): 95–102.
- [15] 张浩, 施成华, 彭立敏, 等. 浅埋多连拱隧道下穿管廊施工方案比选研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(S1): 147–154.
- [16] 沈小辉, 魏云杰, 陶连金, 等. 隧道密贴下穿地铁车站结构变形数值分析 [J]. *铁道建筑*, 2012(5): 85–87.
- [17] 郭宏博, 李少友. 新建地铁车站大断面密贴暗挖下穿既有地铁车站施工方案 [J]. *施工技术*, 2018, 47(S1): 576–580.
- [18] 王剑晨, 张顶立, 张成平, 等. 北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(5): 947–956.
- [19] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [20] 国家能源局. DL/T 5219–2014, 架空输电线路基础设计技术规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007–2011, 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [22] 国家能源局. DL/T 741–2010, 架空输电线路运行规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [23] 许春彦. 盾构隧道开挖面稳定性的数值模拟研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [24] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [25] 刘毅. 地下工程施工与地表既有建筑物的相互影响 [D]. 西安: 西安科技大学, 2009.

本文引用格式:

- 谷任国, 朱奕曜, 房营光. 隧道施工对既有高压电塔的影响分析及数值模拟研究 [J]. *应用科技*, 2021, 48(6): 109–115, 126.
- GU Renguo, ZHU Yiyao, FANG Yingguang. Study on the influence of tunnel construction on the existing high voltage pylon and numerical simulation[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(6): 109–115, 126.