

文章编号:1671-6833(2023)01-0070-07

18CrNiMo7-6 合金钢 J-C 损伤模型失效参数研究

吴少洋¹, 张建伟², 卢凤强¹, 李元鑫², 秦瑾鸿¹

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 力学与安全工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对高速冲击、机械成型加工等数值模拟中广泛应用的 Johnson-Cook (J-C) 损伤模型失效参数求取问题,对 18CrNiMo7-6 合金钢材料开展了 3 个系列的力学实验。通过缺口试样准静态拉伸实验和有限元模拟,确定了既考虑空间分布效应,又考虑应变累积效应的应力三轴度的计算方法。结果表明:失效应变随应力三轴度的增大而减小;通过 10^{-3} 、 10 、 10^3 s^{-1} 应变率下的拉伸实验与霍普金森拉杆 (SHTB) 冲击实验,发现随着应变率的增大,材料屈服强度有所增加,表明了材料有明显的应变率强化效应,并且失效应变随着应变率的增大而增大;在 25、200、300、400 °C 的拉伸实验中发现随着温度的升高,材料屈服强度逐渐降低,但材料的抗拉强度在 300 °C 时要高于 200 °C 下的结果,并且随着温度的升高失效应变逐渐减小。根据上述实验结果拟合得到了 J-C 损伤模型失效参数,从拟合优度可以看出拟合所得参数的可靠性。最后通过 Taylor 冲击实验与有限元模拟进行验证,结果表明,当冲击速度为 430 m/s 时,实验与仿真得到的冲击试样均发生了破坏,并且有限元模拟得到的试样破坏形态与实验结果最大误差为 6.3%,结果吻合良好,验证了所选用的 J-C 损伤模型的合理性以及实验所得参数的有效性。

关键词: 18CrNiMo7-6 合金钢; J-C 损伤模型; 应力三轴度; 失效应变; Taylor 冲击实验

中图分类号: O346.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2022.04.015

材料力学行为的合理描述对准确模拟结构在不同加载工况下的响应尤为重要,而材料的损伤是材料行为描述的一个重要方面^[1]。金属材料的损伤一直备受关注,诸多学者和研究人员对损伤准则进行了相关研究。

目前常用的损伤准则包括 Johnson-Cook (J-C) 损伤模型、Cockcroft-Latham (C-L) 断裂准则以及 Hillerborg 等基于断裂能提出的损伤准则等^[2]。由于 J-C 损伤模型^[3]考虑了应力三轴度、应变率与温度的影响,模型参数含义清晰且易于通过实验进行获取,因此被广泛应用于众多涉及材料失效破坏的有限元模拟研究中。李成等^[4]采用 J-C 本构及损伤模型对子弹侵彻防弹钢板进行了数值模拟,再现了侵彻的动态过程,并分析了分层及间隙作用对钢板的抗侵彻能力的影响。Vasu 等^[5]采用 J-C 损伤模型对 Al7075-T6 材料进行了正交切削仿真研究,所预测切屑厚度与实验结果吻合良好。对材料的 J-C 损伤模型参数进行细致的实验测定是获得良好预测结

果的重要前提。门建兵等^[6]通过相关实验获得了 EFP 材料 J-C 损伤模型参数并进行了参数验证。Hu 等^[7]通过实验获得 45CrNiMoVA 材料的 J-C 损伤模型参数并通过 SHTB 对比实验验证了参数的有效性。

虽然目前国内外学者对众多不同材料的 J-C 损伤模型参数的获取和验证做了诸多相关研究,但依然缺乏针对 18CrNiMo7-6 合金钢材料的 J-C 损伤模型描述以及相关参数的实验测定。18CrNiMo7-6 合金钢材料由于其出色的机械和加工性能,是重型机械装备变速箱中传动齿轮等关键构件加工制造的首选钢种^[8-9]。因此确定其 J-C 损伤模型参数对于该材料在机械成型加工等数值模拟中有着重要的意义和价值。本文针对 Johnson-Cook 损伤模型开展了 3 个系列的力学实验,根据实验结果拟合标定了 Johnson-Cook 损伤模型参数,并通过 Taylor 冲击实验与有限元模拟验证了所得参数的有效性。

收稿日期:2021-11-17;修订日期:2022-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12072324);河南省优秀青年科学基金项目(212300410087)

通信作者:张建伟(1989—),男,河南中牟人,郑州大学副教授,博士,博士生导师,主要从事表面变质层力学性能表征方法研究,E-mail:zhangjianwei@zzu.edu.cn。

引用本文:吴少洋,张建伟,卢凤强,等. 18CrNiMo7-6 合金钢 J-C 损伤模型失效参数研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023,44(1):70-76. (WU S Y, ZHANG J W, LU F Q, et al. Investigation on failure parameters of J-C damage model of 18CrNiMo7-6 alloy steel[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2023,44(1):70-76.)

1 实验相关

1.1 Johnson-Cook 损伤模型

J-C 损伤模型^[4]是应用较为广泛的失效准则之一。模型中损伤参数定义如下式:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{\varepsilon_f} \tag{1}$$

式中: $\Delta \varepsilon_{eq}$ 为积分周期等效塑性应变增量; ε_f 为当前时间步长失效应变。当损伤参数 $D=1$ 时,材料失效。失效应变的表达形式如下:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) \left(1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \cdot (1 + D_5 T^*) \tag{2}$$

式中: $D_1、D_2、D_3、D_4、D_5$ 为模型常量; σ^* 为应力三

轴度; $\dot{\varepsilon}_{eq}$ 为实际应变率, s^{-1} ; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, s^{-1} ; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度, T 为瞬时温度, $^{\circ}C$, T_r 为参考温度, $^{\circ}C$, T_m 为材料的融化温度, $^{\circ}C$ 。J-C 损伤模型 3 个部分之间为乘积关系,互不耦合。

1.2 实验材料与试样制备

本研究选用 18CrNiMo7-6 合金钢材料,密度为 $7\,830\,kg/cm^3$,采用锻造加工工艺。表 1 为 18CrNiMo7-6 合金钢主要化学成分,实验所用材料均取自同一批次材料。

图 1 为不同缺口圆棒试样的形状和尺寸图,为了获取较大范围的应力三轴度,设计缺口尺寸 $R=1.5、2.5、3.5、5.5\,mm$,并加工有光滑圆棒试样,视 R 为无穷大。对每种工况进行 3 次重复实验。

表 1 18CrNiMo7-6 合金钢化学成分

Table 1 Chemical composition of 18CrNiMo7-6 alloy steel								%
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
0.15~0.21	0.4	0.50~0.90	≤0.035	≤0.035	1.50~1.80	1.40~1.70	0.25~0.35	Bal.

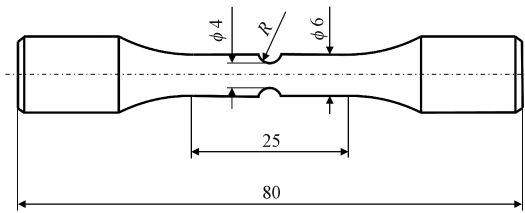


图 1 缺口试样尺寸 (mm)

Figure 1 Size of the notched specimen (mm)

本文室温下准静态拉伸实验均在 MTS 250 KN 轴向疲劳试验系统上进行。高温下准静态拉伸实验所用设备由 WPS-25H 材料性能动静分析测试试验机与 HSYS-300A 型高低温环境试验箱组成。对于动态拉伸实验,本文采用 ALT 1200 分离式霍普金森拉杆,其实验装置简图如图 2 所示,其中拉杆的杆径为 15 mm,数据的采集与分析由 ALT1200 型超动态数据采集系统完成。

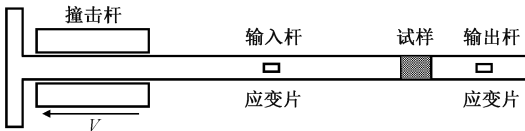


图 2 霍普金森拉杆实验装置简图

Figure 2 Schematic diagram of SHTB devices

2 实验结果与讨论

2.1 应力三轴度对失效应变的影响

采用缺口试样拉伸实验是获取不同应力三轴度的简单有效的方法,根据 Bridgman 原理^[10]可采用

式(3)近似计算缺口拉伸试件的应力三轴度:

$$\sigma^* = \frac{1}{3} + \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \tag{3}$$

式中: a 为缺口试样最小横截面处的半径, mm ; R 为缺口底部曲率半径, mm 。高玉龙等^[11]研究发现在缺口试样拉伸实验初始加载时,通过式(3)计算得到的应力三轴度值较为吻合,但是随着加载过程中等效应变的不断增大,应力三轴度值发生变化。余万千等^[12]在拉伸实验的基础上结合有限元模拟得到了不同时刻缺口试样的应力三轴度,并以试样断裂时刻的应力三轴度 σ_{end}^* 或考虑应变积累效应的平均应力三轴度 σ_{savg}^* 进行分析,其计算方法分别如式(4)和(5)所示:

$$\sigma_{end}^* = \sigma^* | \varepsilon_{eq} - \varepsilon_f; \tag{4}$$

$$\sigma_{savg}^* = \frac{1}{\varepsilon_f} \int_0^{\varepsilon_f} \sigma^*(\varepsilon_{eq}) d\varepsilon_{eq} \tag{5}$$

式中: ε_{eq} 为等效应变。同时 Goto 等^[13]发现,应力三轴度在缺口试样最小横截面上也是变化的。因此为了考虑这些因素带来的影响,本文通过缺口试样拉伸实验并结合有限元分析的方法进行应力三轴度以及失效应变的计算。首先进行光滑试样准静态拉伸实验,根据如图 3 所示的应力-应变曲线拟合得到 18CrNiMo7-6 材料的幂硬化本构模型^[14]参数,其中材料屈服应力为 338 MPa,杨氏模量为 189 GPa,应变硬化指数为 0.21。

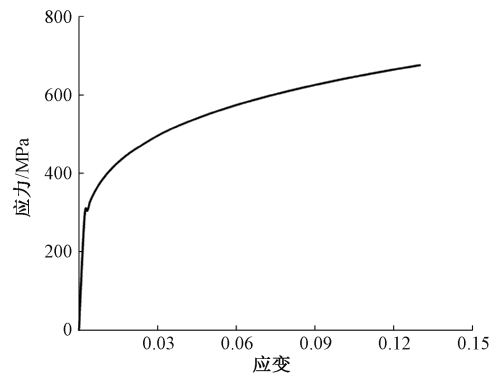


图3 18CrNiMo7-6合金钢的应力-应变曲线

Figure 3 Stress-strain curve of 18CrNiMo7-6 alloy steel

随后对不同缺口试样进行准静态拉伸实验,并利用 ABAQUS/Standard 以相同的加载工况对不同缺口试样拉伸实验进行仿真分析。图 4 为缺口尺寸 $R=1.5\text{ mm}$ 时仿真与实验的力-位移曲线对比,对比结果可以看出模拟与实验所得载荷位移曲线相吻合。并且从图 4 中可以获得试样断裂位置处所对应的位移,根据此位移在仿真中确定试样发生断裂时刻的最大等效应变,并以此应变值作为不同缺口试样拉伸下的失效应变,不同缺口尺寸试样结果如表 2 所示。对模拟结果进行应力三轴度的分析,图 5 为不同缺口试样缺口底部横截面中心点的应力三轴度随等效应变的变化曲线,其中断裂位置点即为图 4 所给出的失效应变位置点。从图 5 中发现在缺口试样初始加载段,应力三轴度值与文献[10]计算结果一致,而随着应变的增加,应力三轴度整体上呈增大趋势,并且随着缺口尺寸的增大其应力三轴度值随之减小。

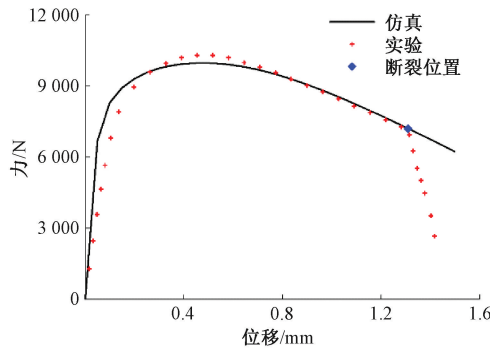


图4 仿真与实验的力-位移曲线

Figure 4 Force-displacement curve of experiment and simulation

进一步分析应力三轴度在缺口试样最小横截面上的分布规律,根据式(3)~(5)计算方法以及数值模拟结果得到对应的应力三轴度沿径向的分布。图 6 为缺口尺寸 $R=1.5\text{ mm}$ 时应力三轴度变化情况。其中 r 为最小横截面上距中心处的距离。从图 6 中

可以发现不论是采用哪种方法计算得到的应力三轴度都是随着半径的变化而发生改变的,并且在横截面中心处总是最大,并随半径的增大而逐渐减小。

表 2 失效应变与应力三轴度计算结果

Table 2 Result of fracture strain and stress triaxiality			
试样	缺口半径/mm	失效应变	累积应变、空间分布的应力三轴度
光滑圆棒	∞	0.98	0.40
缺口试样 A	1.5	0.86	0.52
缺口试样 B	2.5	0.81	0.56
缺口试样 C	3.5	0.78	0.61
缺口试样 D	5.5	0.70	0.73

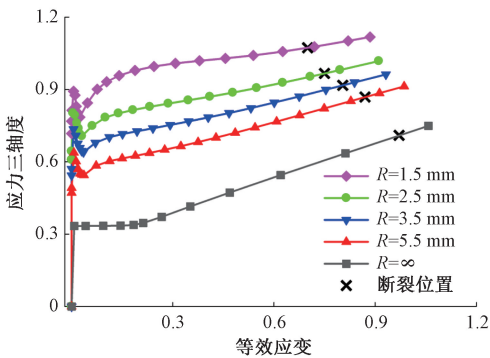


图5 应力三轴度变化规律

Figure 5 Evolution of stress triaxiality

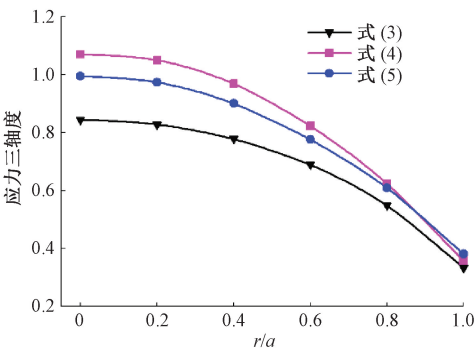


图6 应力三轴度的径向分布

Figure 6 Radial distribution of stress triaxiality

通过上述分析,为了考虑应力三轴度在截面不同位置以及随应变的增加而发生变化所带来的影响,采用贾东等^[15]提出的既考虑空间分布效应,又考虑应变累积效应的应力三轴度计算方法,其计算公式如下:

$$\sigma_{avg}^* = \frac{2}{\varepsilon_f} \int_0^1 \int_0^{\varepsilon_f} \sigma^*(\varepsilon_{eq}, \gamma) \gamma d\varepsilon_{eq} d\gamma. \quad (6)$$

式中: $\gamma = \frac{r}{a}$ 。计算得到的应力三轴度如表 2 所示。

根据表 2 的数据对式(2)第 1 部分的参数进行拟合,得到失效参数 $D_1 = 0.47$ 、 $D_2 = 1.31$ 、 $D_3 = -2.36$,失效应变随应力三轴度变化的拟合曲线与

所得数据点对比见图 7,其中拟合优度为 0.99。

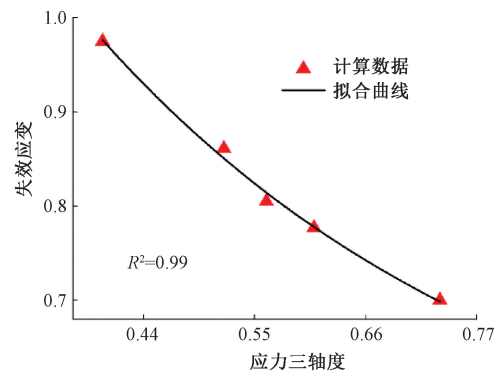


图 7 失效应变与应力三轴度的关系

Figure 7 Curve of failure strain and stress triaxiality

2.2 应变率对失效应变的影响

在 MTS 试验机上进行室温下应变率为 10^{-3} 、 10 s^{-1} 的拉伸实验,由拉伸速度对应变率进行控制,应变率的计算参考规范^[16]所提方法。在 SHTB 装置上进行高应变率下的冲击实验,由贴在弹性杆上的应变片进行动态应力、应变数据的采集,通过改变打击杆的速度得到不同应力波下的应变率($1\,276\text{ s}^{-1}$ 、 $2\,100\text{ s}^{-1}$ 、 $2\,828\text{ s}^{-1}$)。得到不同应变率下的应力-应变曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出随着应变率的增加,材料屈服应力也随之增大,表明材料有明显的应变率强化效应。

根据式(7)对不同应变率下被拉断试样的断口截面积进行失效应变的计算^[17]。

$$\varepsilon_f = 2\ln \frac{A_0}{A}.$$

(7)

式中: A_0 为试样初始横截面积; A 为试样断裂时断口处横截面积。

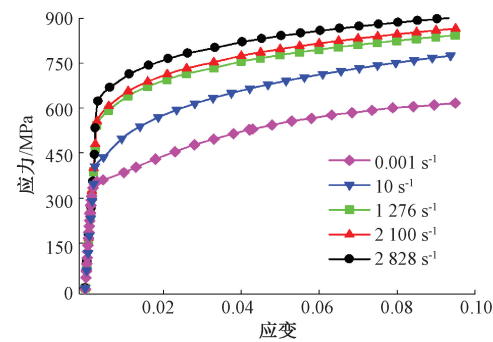


图 8 不同应变率下应力-应变曲线

Figure 8 Stress-strain curves at different strain rates

根据得到的数据对式(2)第 2 部分的参数进行拟合,实验数据及拟合曲线如图 9 所示,从图 9 中可以看出失效应变随着应变率的上升有所增加。拟合得到失效参数 $D_4 = 0.012$,其中拟合优度为 0.90。

由于在进行高应变率冲击拉伸时,试样在实验

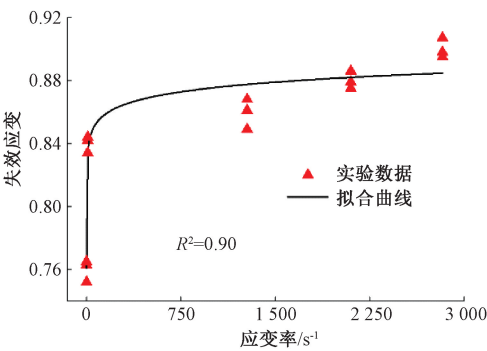


图 9 失效应变与应变率的关系

Figure 9 Relationship between failure strain and strain rate

过程中产生较大温升,容易引起材料软化、韧性提高,并且 SHTB 实验中对于断裂应变较高的试样较难保证在一次脉冲下将试样冲断,也可能由此产生一定的误差。因此综合上述情况在拟合应变率项的参数时,拟合误差相对增大。

2.3 温度对失效应变的影响

在准静态下进行不同温度的光滑试样拉伸实验,实验中选取的温度为 25、200、300、400 ℃。不同温度下的应力应变关系如图 10 所示。

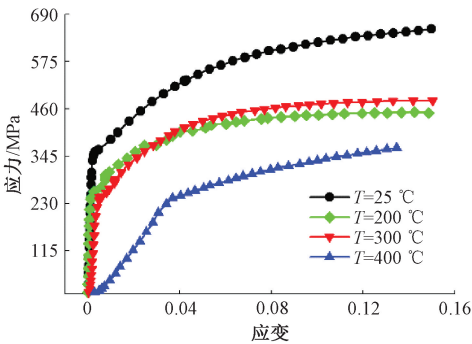


图 10 不同温度下拉伸实验结果

Figure 10 Tensile test results at different temperatures

从图 10 可以看出随着温度的升高,材料的屈服应力逐渐降低,但是在 300 ℃ 时,材料的抗拉强度要高于 200 ℃ 条件下的结果,并且在此温度下其断口的颜色与其他温度拉伸所得断口颜色有所不同,断口处呈现蓝色,该现象被一些学者称为蓝脆效应^[18]。当材料处于蓝脆温度时其强度增加、延性降低,原因是在塑性变形过程中位错被氮和碳原子钉住以及整体位错密度的增加^[19]。本实验表明 18CrNiMo7-6 合金钢具有蓝脆效应,且蓝脆温度在 300 ℃ 左右。实验结果表明随着温度的增大失效应变有所下降。拟合曲线与所得数据点对比见图 11,对式(2)第 3 部分进行拟合,其中参考温度为 25 ℃,材料融化温度为 1 510 ℃,得到 $D_5 = -0.84$,其中拟合优度值为 0.97。至此本文得到了 18CrNiMo7-6 合金钢所有 J-C 损伤模型失效参数。

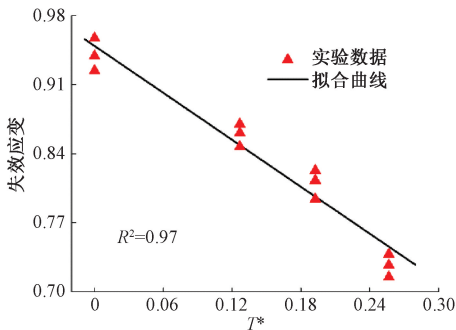


图 11 失效应变与温度的关系

Figure 11 Relationship between fracture strain and temperature

2.4 参数检验

为了验证实验所得的 J-C 损伤模型失效参数是否合理,开展了 18CrNiMo7-6 合金钢 Taylor 冲击实验。该实验主要用于检验其他方式所获得的材料动态本构关系、损伤模型及其参数^[1]。本文中 Taylor 冲击实验在南阳理工学院一级轻气炮上进行,装置介绍见文献[20]。实验中采用型号为 FASTCAM SA-Z 高速摄像机监控发射试样的运行姿态和破坏情况。实验中弹体尺寸为 $\phi 6\times 30\text{ mm}$,靶体尺寸为 $\phi 55\times 20\text{ mm}$,靶体材料为高强装甲钢板,在实验后没

有出现明显变形,可认为其在碰撞中保持弹性。采用有限元软件对冲击实验进行模拟,模型参数由实验所获取,并按照实验情况进行建模计算。其中杆弹为可变形体,靶板设为刚体。杆弹和靶板的网格划分均为八节点线性六面体单元(C3D8R),网格尺寸为 $0.2\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ 。对靶板添加固定约束,对工件添加平行于轴线方向的初速度,大小与实验保持一致。

设置弹体速度分别为 290 m/s 和 430 m/s 。在 290 m/s 速度下试样底部未发生破坏;当速度增大至 430 m/s 时,观察到试样底部发生破坏,其破坏形式为花瓣开裂模式。图 12 给出了不同速度下数值模拟结果与实验结果的比较,可以看出两种结果下试样变形情况一致。实验与数值模拟得到冲击后的弹体高度 h 与底部直径 M 记录如表 3 所示。从表 3 中试样的变形数据以及相对误差可以看出,模拟结果与实验结果吻合较好,表明了对于 18CrNiMo7-6 合金钢材料在高速冲击等涉及材料失效行为的模拟时,所选用的 J-C 损伤模型是合适的,能够对该材料的失效行为进行合理的描述,并且也验证了本文针对此模型所开展的一系列实验得到的损伤参数是合理有效的。

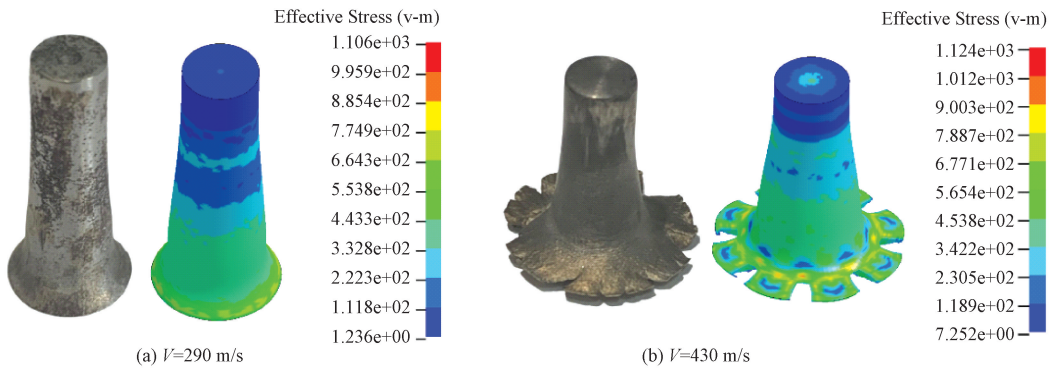


图 12 数值模拟与实验结果形态对比

Figure 12 Comparison of numerical simulation and finite element results

表 3 数值模拟与实验结果比较

Table 3 Comparison of experimental and numerical simulation results						
速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	M/mm		误差 1/ %	h/mm		误差 2/ %
	实验	数值模拟		实验	数值模拟	
290	10.66	10.07	5.5	22.60	22.38	1.0
430	16.70	15.66	6.3	17.50	17.07	2.5

3 结论

(1) 针对 18CrNiMo7-6 合金钢材料开展了缺口试样拉伸实验,结合数值模拟确定了既考虑空间分布效应,又考虑应变累积效应的应力三轴度的计算

方法,得到了应力三轴度与失效应变的关系;通过不同温度下的拉伸实验发现了材料的屈服强度与失效应变随温度的升高而降低;从不同应变率下的实验结果可以看出随着应变率的升高,材料有较为明显的强化效应,其失效应变也随应变率的增大而增大。根据以上实验结果拟合得到了 18CrNiMo7-6 合金钢的 J-C 损伤模型参数,拟合优度表明拟合效果较好。

(2) 开展了 18CrNiMo7-6 合金钢的 Taylor 冲击实验,得到了弹体 290 m/s 和 430 m/s 冲击速度下的变形状态。根据拟合得到的损伤参数对 Taylor 冲击实验进行数值模拟。在弹体冲击速度为 430 m/s 时,实验与仿真得到的冲击试样均发生了破坏,对比

弹体的破坏状态发现两者吻合较好,表明了本文针对 18CrNiMo7-6 合金钢材料进行失效行为的模拟时,所选的 J-C 损伤模型是合适的,亦表明了通过实验所获得的损伤参数是合理有效的。

参考文献:

[1] 陈刚,陈忠富,徐伟芳,等. 45 钢的 J-C 损伤失效参量研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 131-135.
CHEN G, CHEN Z F, XU W F, et al. Investigation on the J-C ductile fracture parameters of 45 steel[J]. Explosion and shock waves, 2007, 27(2): 131-135.

[2] 张松,李斌训,李取浩,等. 切削过程有限元仿真研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(13): 14-28.
ZHANG S, LI B X, LI Q H, et al. Research development of application of finite element method on cutting process [J]. Aeronautical manufacturing technology, 2019, 62(13): 14-28.

[3] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering fracture mechanics, 1985, 21(1): 31-48.

[4] 李成,马志垒,王永涛. 冲击荷载下防弹钢板三维损伤分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(4): 85-88.
LI C, MA Z L, WANG Y T. Three-dimensional damage analysis of bullet-proof steel plate under impact loading [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2010, 31(4): 85-88.

[5] VASU C, THAWARE A, TIWARI G, et al. Experimental and numerical analysis of orthogonal cutting of high strength aluminium alloy Al7075-T6[J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2021, 1185(1): 012010.

[6] 门建兵,卢易浩,蒋建伟,等. 杆式 EFP 用钽钨合金 JC 失效模型参数[J]. 高压物理学报, 2020, 34(6): 136-143.
MEN J B, LU Y H, JIANG J W, et al. Johnson-Cook failure model parameters of tantalum-tungsten alloy for rod-shaped EFP [J]. Chinese journal of high pressure physics, 2020, 34(6): 136-143.

[7] HU X, XIE L J, GAO F N, et al. On the development of material constitutive model for 45CrNiMoVA ultra-high-strength steel[J]. Metals, 2019, 9(3): 374.

[8] 刘治华,张天增,杨孟俭,等. 超声滚压 18CrNiMo7-6 齿轮钢表面变质层性能分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(2): 44-49, 79.
LIU Z H, ZHANG T Z, YANG M J, et al. Performance analysis of surface modification layer of 18CrNiMo7-6 gear steel treated by ultrasonic rolling[J]. Journal of Zheng-

zhou university (engineering science), 2020, 41(2): 44-49, 79.

[9] 张银霞,刘修武,原少帅,等. 硬态车削工艺对 18CrNiMo7-6 钢表层硬度及微观组织的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(5): 59-64.
ZHANG Y X, LIU X W, YUAN S S, et al. Impact of hard turning process on surface hardness and microstructure of 18CrNiMo7-6 steel[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2022, 43(5): 59-64.

[10] BRIDGMAN P W. Studies in large plastic flow and fracture[M]. London: Harvard University Press, 1964.

[11] 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 Y L, SUN X H. 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.

[12] 余万千,郁锐,崔世堂. 考虑应力三轴度影响的 30CrMnSiNi2A 钢韧性断裂研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(3): 47-54.
YU W Q, YU R, CUI S T. On ductile fracture of 30CrMnSiNi2A steel considering effects of stress triaxiality [J]. Explosion and shock waves, 2021, 41(3): 47-54.

[13] GOTO D M, KOSS D A, JABLOKOV V. The influence of tensile stress states on the failure of HY-100 steel[J]. Metallurgical and materials transactions A, 1999, 30(11): 2835-2842.

[14] 徐广涛,孙博,陈海宽,等. 表面变质层硬度的压痕表征方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(4): 58-62.
XU G T, SUN B, CHEN H K, et al. Indentation characterization method for hardness of surface-modified layer [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2021, 42(4): 58-62.

[15] 贾东,黄西成,莫军. 基于应变路径和分布效应的应力三轴度确定方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2625-2629, 2634.
JIA D, HUANG X C, MO J. A method to determine stress triaxiality based on strain path and distribution effect[J]. Science technology and engineering, 2013, 13(10): 2625-2629, 2634.

[16] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 金属材料 高应变速率拉伸试验 第 2 部分:液压伺服型与其他类型试验系统: GB/T 30069.2—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Stand-

- ardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials—tensile testing at high strain rates—part 2: servo-hydraulic and other test systems; GB/T 30069.2—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [17] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt-and hemispherical-nosed projectiles[J]. International journal of impact engineering, 2006, 32(12): 1921–1944.
- [18] DOLZHENKOV I E. The nature of blue brittleness of steel[J]. Metal science and heat treatment, 1971, 13(3): 220–224.
- [19] YUSHKEVICH P M, MANANKOVA L V, STEPANOVICH V E. Blue brittleness of steel[J]. Metal science and heat treatment, 1974, 16(4): 344–345.
- [20] XIAO X K, MU Z C, PAN H, et al. Effect of the Lode parameter in predicting shear cracking of 2024-T351 aluminum alloy Taylor rods[J]. International journal of impact engineering, 2018, 120: 185–201.

Investigation on Failure Parameters of J-C Damage Model of 18CrNiMo7-6 Alloy Steel

WU Shaoyang¹, ZHANG Jianwei², LU Fengqiang¹, LI Yuanxin², QIN Jinhong¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this study, three series of mechanical tests were carried out on 18CrNiMo7-6 alloy steel materials to determine the damage parameters of the Johnson-Cook (J-C) damage model, which could be widely used in numerical simulations such as high-speed impact and mechanical forming. Through the quasi-static tensile test and finite element simulation of notched specimens, the calculation method of stress triaxiality considering both spatial distribution effect and strain accumulation effect was determined. The results showed that the failure strain decreased with the increase of stress triaxiality. Through the tensile test at 10^{-3} s^{-1} , 10 s^{-1} and 10^3 s^{-1} strain rates and the impact test of SHTB, it was found that the yield strength of the material increased with the increase of strain rate, indicating that the material had obvious strain rate strengthening effect, and the failure strain increased with the increase of strain rate. In the tensile tests at $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, it was found that the yield strength of the material decreased gradually with the increase of temperature, but the tensile strength of the material at $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ was higher than that at $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, and the failure strain decreased gradually with the increase of temperature. According to the above experimental results, the parameters of J-C damage model were fitted, and the reliability of the fitted parameters could be seen from the goodness of fit. Finally, experimental results and finite element results of Taylor test were compared. The results showed that when the impact speed was 430 m/s , the impact samples obtained from the experiment and simulation were damaged, and the maximum error between the failure mode of the samples obtained by finite element simulation and the experimental results was 6.3%. The rationality of the J-C damage model selected in this study and the effectiveness of the experimental parameters were verified.

Keywords: 18CrNiMo7-6 alloy steel; J-C damage model; stress triaxiality; failure strain; Taylor impact tests