

文章编号: 1001-1455(2007)02-0131-05

45 钢的 J-C 损伤失效参量研究*

陈 刚, 陈忠富, 徐伟芳, 陈勇梅, 黄西成

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了在结构碰撞效应的有限元分析中描述材料行为, 通过开展 45 钢在不同应力状态和温度下的准静态材料力学性能实验及拉伸 SHB 实验, 考察了应力状态三轴度、温度和应变率对材料失效应变的影响。由实验数据得到了 Johnson-Cook 失效模型参量, 并通过出现失效的 Taylor 撞击实验和数值模拟进行了一定的验证, 表明模型描述与实验结果的趋势一致。

关键词: 固体力学; 韧性失效; Johnson-Cook 模型; Taylor 撞击; 应力三轴度

中图分类号: O346.5 **国标学科代码:** 130 · 1540 **文献标志码:** A

1 引 言

目前, 数值模拟方法在工程和科学研究中的作用已得到广泛的认同, 其中, 在爆炸和高速碰撞效应分析中, 形成和发展了数十种有限元程序, 成为人们分析各种效应的一种强有力的工具。爆炸与撞击过程汇聚了很多典型的物理现象, 包括应力波和冲击波的传播、材料的崩落、厚靶的成坑、中厚靶的侵彻与冲塞、薄靶的鼓包、破裂和破片的形成与演化等等。在这些物理现象中, 材料经受塑性屈服、大变形、断裂以至熔化和气化等相变过程。要较为准确地模拟结构的瞬态响应, 材料的力学行为描述是一个至关重要的基础。

在有限元分析中, 材料的失效参量是材料行为描述的一个重要方面。金属材料的强度依赖于应变、应变率和温度, 同时很多实验研究表明材料的失效参量还明显依赖应力状态三轴度^[1-3]。本文中拟针对 45 钢开展不同应力状态、温度和应变率下的实验, 得到相应加载条件下材料性能和失效参量的数据, 并结合动力学有限元程序 DYNA 所提供的 Johnson-Cook(J-C) 损伤失效准则, 对材料的失效参量进行分析。通过圆柱试件撞击实验(Taylor 撞击)和数值模拟, 对所得参量开展进一步的讨论。

2 动力学有限元程序的失效准则

材料的失效是一种具有复杂物理力学机制的现象。在动力学有限元中, 对失效的模拟引进了侵蚀的概念, 当某一单元的特征参量(应力、应变或其他参量)达到指定的临界数值时, 便认为该单元完全破坏, 丧失承载能力, 将单元进行删除。各商用有限元程序提供了较多的失效判据, 主要包括最大塑性应变、最大主应变、最大主应力、最大等效应力、应力阈值、应力冲量、最小时间步长、最大压力等, 以及其他专用失效准则。

J-C 材料模型中的损伤失效模型是应用较广的专用失效准则。基于 J. R. Rice 等^[4]提出的空洞增长方程, G. R. Johnson 等^[5]提出了考虑应力三轴性、应变率和温度效应的 J-C 失效模型。J-C 模型定义单元的损伤

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f} \quad (1)$$

式中: D 为损伤参数, $D=0 \sim 1$, 初始时 $D=0$, 当 $D=1$ 时材料失效; $\Delta \epsilon_p$ 为一个时间步的塑性应变增量;

* 收稿日期: 2005-12-07; 修回日期: 2006-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(10232040)

作者简介: 陈 刚(1971—), 男, 助理研究员, 博士研究生。

ϵ_f 为当前时间步的应力状态、应变率和温度下的破坏应变。破坏应变 ϵ_f 的表达式为

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 + D_5 T^*) \quad (2)$$

式中: D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 和 D_5 为材料参数; $\sigma^* = p/\sigma_{eff} = -\sigma_{kk}/\sigma_{eff} = -R_e$, p 为压力, σ_{eff} 为等效应力, R_e 为应力三轴度; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 为无量纲塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考塑性应变率; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ 为无量纲温度, T_r 为参考温度(室温), T_m 为材料的融化温度。

(2)式的第一部分反映材料破坏应变随应力三轴度 R_e 的增大而减小,第二部分反映应变率对破坏应变的影响,第三部分反映温度的热软化效应对材料韧性的影响。(2)式将材料的失效应变 ϵ_f 的三个影响因素应力三轴度、应变率和温度表述为乘积关系,互不耦合,因而可以单独变化单一因素而确定材料参数。在同一应力状态、同一应变率下,材料的失效应变与温度呈线性关系,则通过对实验数据的线性拟合,其斜率即为 D_5 ;在参考温度下,同一应力状态,材料的失效应变与应变率的对数成线性关系,其斜率即为 D_4 ;在参考温度下,在确定 D_4 后,采用最小二乘非线性拟合即可得到 D_1 、 D_2 和 D_3 。

J-C 失效模型考虑了应力状态、应变率和温度等影响因素,具有更大范围的适应性。J-C 失效模型由于考虑因素比较全面,而且参数较容易获得,因而在商用有限元程序中得到了广泛的应用。

3 材料力学性能实验结果

采用尺寸完全相同的试件分别在 MTS 和拉伸 SHB 装置上开展拉伸实验,得到 45 钢在不同应变率下的实验数据,如图 1 所示。高应变率下的失效应变与准静态下的相比略有增大。对(2)式第二部分拟合得 $D_4 = 0.005$,拟合曲线也作于图 1 上。

其中,由于拉伸实验中试件存在颈缩失稳,应变在试件中不是均匀分布,材料失效时其最大应变在断口处。根据塑性体积不变,并假定断口截面的应变均匀,对材料的失效应变采用下式^[3,5]

$$\epsilon_f = 2 \ln \left(\frac{d_0}{d} \right)$$

式中: d_0 、 d 分别为试件的初始直径和最终直径。

为考察应力状态对 45 钢失效应变的影响,运用 MTS810 材料试验机、Instron1196 材料试验机和 NDS-1 扭转试验机开展了 45 钢的准静态常温压缩、扭转实验,以及标准(光滑)试件和缺口试件(如图 2 所示)的拉伸实验。

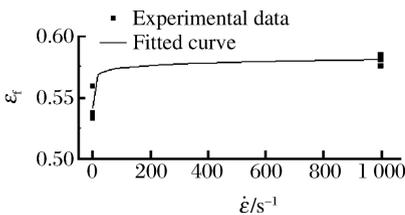


图 1 失效应变随应变率的变化

Fig. 1 Variety failure strain with strain rate

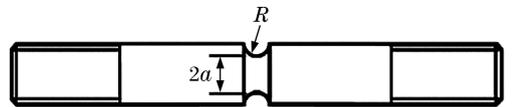


图 2 缺口试件

Fig. 2 Notched specimen

光滑试件拉伸实验、扭转实验和压缩实验中的 σ^* 分别对应于 $-1/3$ 、 0 、 $1/3$ 。通过缺口拉伸实验可以得到其他应力状态的结果^[5-6]

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

式中: a 为试件半径; R 为缺口半径。

压缩试件的尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,运用 INSTRON1196 压缩到接近试验机的最大载荷,达到约 240 kN,试件压缩到厚约 1.2 mm,没有出现整体的破坏,但在试件的圆周边缘出现了微小的裂纹。在这里仍将实验中最大应变作为材料在压缩应力状态下的失效应变。

图 3 为不同应力状态下 45 钢实验所得试件断裂时的失效应变数据,45 钢在准静态实验中的失效应变随应力三轴度的增加而减小。根据图 3 的数据对(2)式第一部分的参量进行拟合,并结合应变率效

应的结果,得到 $D_1=0.10, D_2=0.76, D_3=1.57$,相应的拟合曲线如图 3 所示。

采用不同温度下的拉伸实验考察了 45 钢的失效应变随温度的变化。实验数据如图 4 所示。45 钢的失效应变在常温至 450℃之间,随温度略有下降。对(2)式第三部分拟合得到, $D_5=-0.84$ 。

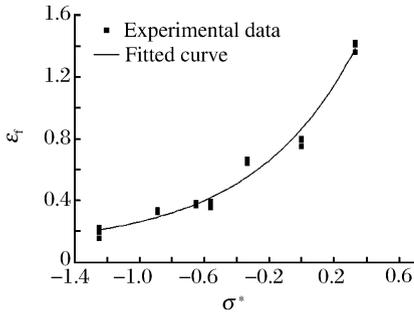


图 3 45 钢失效应变随应力状态的变化

Fig. 3 Failure strain of 45 steel vs stress state

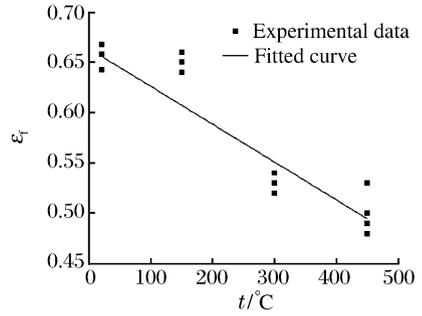


图 4 45 钢拉伸失效应变随温度的变化

Fig. 4 Tension failure strain of 45 steel vs temperature

4 45 钢 Taylor 撞击实验

G. I. Taylor^[7]采用圆柱试件垂直撞击刚性靶体,测量圆柱试件的变形,运用一维波传播理论的基本概念,发展了一种测试材料动态屈服强度的方法。在 Taylor 理论建立之后,有许多学者从不同角度对此方法进行了修正,使计算结果更进一步接近实际情况。应该看到,Taylor 圆柱撞击实验包含着复杂的二维轴对称的波传播过程,尽管一维分析已经提出一种用来求得材料性能数据的简易方法,但是这种实验本身要求更详细的分析及更完整的装置,以便研究瞬时的变形情况;同时,试件材料发生塑性大变形时,塑性温升对材料的软化效应不容忽视;而且,在这种实验中,应变率不是常数,应变率也难以通过简单分析测定。自 20 世纪 80 年代以来,与数值模拟相结合,Taylor 实验主要用于对其他方式测量得到的材料动态本构关系及其参数的检验^[5,8]。

运用∅25 mm 滑膛火炮开展了 45 钢的 Taylor 圆柱撞击实验。实验系统由火炮、电磁测速系统、数字式高速相机和靶板等组成。所使用的室内火炮装置为∅25 mm 滑膛炮,炮口弹速在 100~1 200 m/s 范围可调,弹速的调整根据装药量控制;电磁测速系统采用网靶的通断信号测试试件的速度;所用高速数字式相机最高幅频为 $4.05 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$,可以测试试件的初始速度和反弹速度,并检测试件的撞击姿态,拍摄结果可直接传入计算机;靶体为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体钢靶,在实验后靶体没有出现明显的变形,可认为撞击过程中保持为弹性。

试件主体为圆柱形,在尾部为配合发射装置,设计有压弹槽和倒角。直径为 25 mm。共开展长度为 100 mm 的 45 钢 Taylor 撞击实验七发,高速摄影和回收后的试件显示撞击状态保持为垂直撞击,结果具有较好的对称性。45 钢试件反弹速度在 19 m/s 左右。实验数据列于表 1, v_0 为初始速度, L 为最终长度, d_{max} 为最大直径。实验中采用 5、10 和 15 g 三种装药量控制初始撞击速度,从回收的试件来看,5 g 装药的试件变形较小,而 15 g 装药的试件在撞击端出现明显的局部化变形,并在边缘处产生裂缝。

表 1 45 钢 Taylor 撞击结果

Table 1 Taylor impact results

$v_0/(m/s)$	L/mm	d_{max}/mm
154	91.2	32.1
164	90.9	32.1
205	87.0	35.5
217	85.7	38.1
227	84.3	38.2
290	77.9	47.5
319	76.3	50.6

图 5 给出了实验原始试件及三种撞击速度下的残余试件的照片,

试件撞击端出现蘑菇形墩粗,并且速度越高越明显。图 6 给出了三种速度下 45 钢试件的撞击端面情况照片,试件在 217 m/s 的速度下,在端面边缘开始出现小的裂缝,发生局部失效;在 290 m/s 时,端面出现多处裂缝,并且有部分材料断裂脱落;提高到 319 m/s 时,端头直径膨胀更大,裂缝更长。图 7 为试件端部的侧面照片,在撞击速度为 290 和 319 m/s 时,试件侧面出现有 45°方向的失效,而从图 6 可见,试件端部失效为沿径向发展。

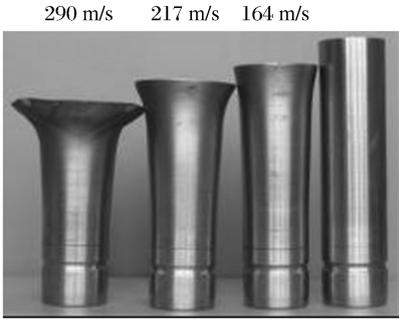


图 5 试件照片

Fig. 5 Photo of specimens

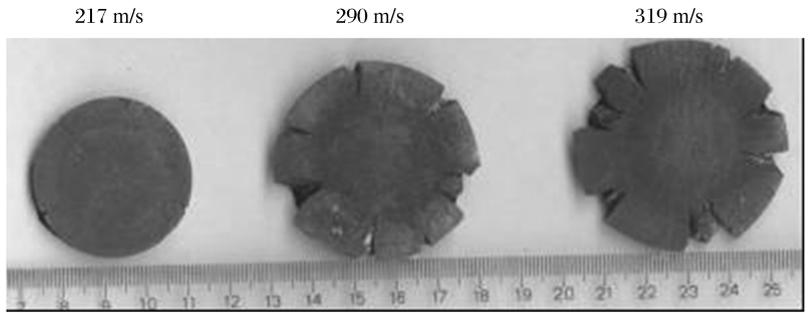


图 6 三种撞击速度下试件端部的失效情况

Fig. 6 The impact end failure of specimens

5 45 钢 Taylor 撞击实验的数值模拟

选取 217、290 和 319 m/s 三个速度,运用 LS-DYNA 对 45 钢 Taylor 模拟,按照实验实际情况建模,靶体取为弹性,试件材料模型采用 J-C 模型描述,材料参数分别为: $D_1 = 0.10, D_2 = 0.76, D_3 = 1.57, D_4 = 0.005, D_5 = -0.84$,参考应变率取为 $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 。其中强度部分的表达式为

$$\sigma = (A + B(\epsilon_{p,eff})^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - (T^*)^m) \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{p,eff}$ 为等效塑性应变;强度参数分别为^[9]: $A = 507 \text{ MPa}, B = 320 \text{ MPa}, C = 0.28, n = 0.064, m = 1.06$ 。图 8 给出了三种速度下数值模拟的撞击结束后的变形图像和损伤分布。

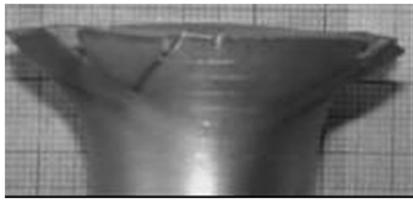


图 7 试件侧面失效特征

Fig. 7 Lateral failure of a specimen

在 217 m/s 撞击速度下,试件最大的损伤数为 0.6,没有出现失效,但损伤的最大值出现在撞击端的边缘;在 290 m/s 撞击速度下,试件撞击端边缘出现了失效,与实验现象一致,但失效的程度不如实验大;在 319 m/s 撞击速度下,试件失效破坏进一步加剧,并可观测到与实验一致的侧面 45°失效破坏。

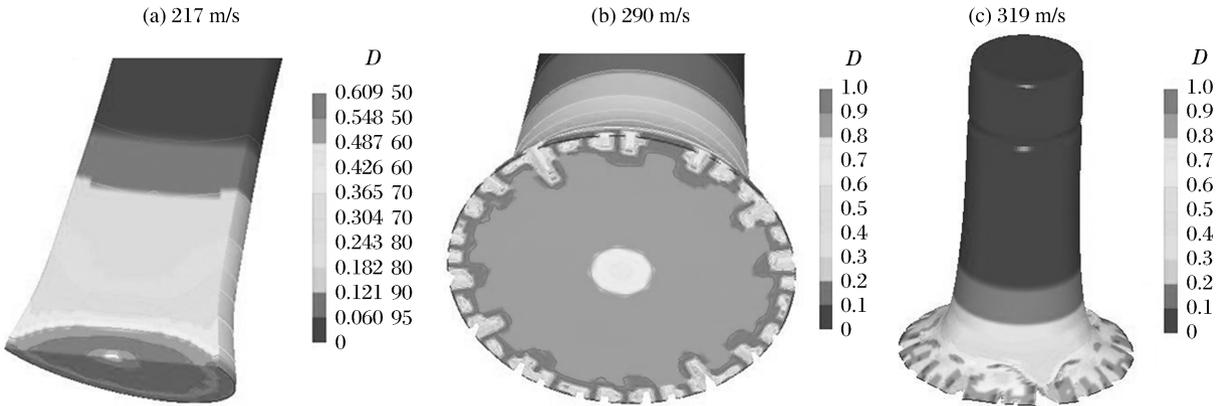


图 8 不同速度下 45 钢 Taylor 撞击数值模拟所得试件变形与损伤

Fig. 8 Final shape and damage value of specimens from FEM

6 小 结

通过不同温度的拉伸、常温准静态拉伸、压缩和扭转实验,和拉伸 SHB 实验,研究了应力状态、应变率和温度对 45 钢材料失效的影响。结果显示,在三个因素中,应力三轴度是最重要的影响因素,材料失效应变随应力三轴度的增大而显著减小。结合动力学有限元程序 DYNA 所提供的 J-C 失效准则,对 45 钢的失效参量进行了分析。

利用室内小型滑膛火炮,开展了 45 钢的 Taylor 圆柱撞击实验,得到了不同初始撞击速度下试件的变形和破坏数据。运用材料实验数据所得参量,对 Taylor 撞击实验开展了三维数值模拟。结果显示,参量所反映的趋势与 Taylor 撞击实验是一致的。

参考文献:

- [1] Hancock J W, Brown D K. On the role of strain and stress state in ductile failure[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1983,31:1-24.
- [2] Mirza M S, Barton D C, Church P. The effect of stress triaxiality and strain-rate on the fracture characteristics of ductile materials[J]. *Journal of Materials Science*, 1996,31:453-461.
- [3] Børvik T, Hopperstad O S, Dey S, et al. Strength and ductility of weldox 460E steel at high strain rates, elevated temperatures and various stress triaxialities[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005,72:1071-1087.
- [4] Rice J R, Tracey D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969,17:210-217.
- [5] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985,21:31-48.
- [6] 王仁,熊祝华,黄文彬. 塑性力学基础[M]. 北京:科学出版社,1998:365-372.
- [7] Taylor G I. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress[J]. *Proceedings of Royal Society: Series A*, 1948,194:289-299.
- [8] Joseph C F J, Martin G, Wilson L L. The use of the Taylor test in exploring and validating the large-strain, high-strain-rate constitutive response of materials[C]//Furnish M D. *Shock compression of condensed matter—2001*. American Institute of Physics, 2002:1318-1322.
- [9] 陈刚,陈忠富,陶俊林,等. 45 钢动态塑性本构参量与验证[J]. *爆炸与冲击*, 2005,25(5):451-456.
CHEN Gang, CHEN Zhong-fu, TAO Jun-lin, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(5):451-456.

Investigation on the J-C ductile fracture parameters of 45 steel

CHEN Gang^{*}, CHEN Zhong-fu, XU Wei-fang, CHEN Yong-mei, HUANG Xi-cheng
(*Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics,*
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: In the FEM analysis of structure response under dynamic loading such as high velocity impact, the failure parameter is a important aspect of material behavior. With split Hopkinson tension bar tests and static material test at various stress states and temperatures, the effects of high strain rate, elevated temperature and stress triaxiality on the fracture behavior of 45 steel were studied. The Johnson-Cook damage fracture model parameters were experimentally determined. The parameters were validated by comparison between the Taylor experiments and the simulations. The consistency between the experimental observation and numerical simulation indicates that the obtained parameters can describe the failure behavior of 45 steel under high speed deformation.

Key words: solid mechanics; ductile fracture; Johnson-Cook model; Taylor impact; stress triaxiality

^{*} Corresponding author: CHEN Gang
E-mail address: chengang@caep.ac.cn
Telephone: 86-816-2495604