DOI: 10.11883/bzycj-2017-0163
文章编号: 1001-1455(2018)06-1325-08

基于 J-C 模型的 Q235 钢的失效准则*

郭子涛[1],舒开鸥[1],高 斌[1],张 伟[2]
(1. 九江学院土木工程与城市建设学院, 江西 九江 332005;
2. 哈尔滨工业大学高速撞击研究中心,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 使用 Instron 材料试验机、霍普金森拉杆(SHTB)对 Q235 钢试件进行了不同温度下的准静态和动态拉伸实验,研究了温度、应变率及应力三轴度对 Q235 钢失效应变的影响,结果表明:Q235 钢失效应变随温度的升高而增加,随应变率的增加而减小,随应力三轴度的增加先减小后增加再减小。基于实验结果对 Q235 钢 J-C 失效模型中的温度项进行了修正,并结合数值模拟提出了基于 J-C 失效模型的应力三轴度三分段式失效准则,通过 Taylor 撞击实验和数值模拟对给出的模型相关参量进行了验证,实验与模拟结果吻合较好。

关键词: Q235 钢;失效准则;应力三轴度;Taylor 撞击
中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

金属结构因为具有强度高、可塑性好、价格低廉等优点,在军事和民用结构防护领域有着广泛的应用。金属靶受到载荷冲击、爆炸及结构碰撞等作用时将汇聚高温、高压、冲击波的传播等瞬态物理现象,同时在高温高应变率下金属靶板会产生大塑性变形、断裂破坏以至熔化和气化等相变过程。因此研究适用于描述金属材料在大应变、大应变率下及宽温度范围的力学行为失效准则,对于模拟防护结构在弹体高速撞击下的瞬态响应至关重要,对于现代防护结构的设计也有着重要意义。

材料的失效与多种因素有关并夹着复杂的物理机制,常见的有常塑性应变断裂准则、最大剪应力/主应力断裂准则、基于塑性功的 C-L 断裂准则以及经验型 Johnson-Cook 断裂准则[1]等。Y. B. Bao 等[2]通过对各种形状的 2024 铝合金试件的材料性能实验,发现断裂应变随应力三轴度并不是单调变化,提出了一个分段函数表示的 B-W 断裂准则以描述断裂应变与应力三轴度的关系,陈刚等[3]在对 TC4 钛合金材料的破坏特性研究中也得到了类似的现象。Q235 钢作为一种低碳钢材料,由于含碳适中、综合性能较好,强度、塑性和焊接等性能配合较好且价格低廉,在建筑、桥梁、船舶及结构防护领域应用广泛。对 Q235 钢的冲击及抗冲击性能已有一些研究,如陈小伟等[4]、陈刚等[5]对 Q235 钢弹体撞击 45 号钢板后的破坏模式进行了实验和数值模拟研究,X. W. Chen 等[6]还对金属玻璃基复合材料长杆弹对 Q235 厚靶的侵彻进行了实验研究,Y. F. Deng 等[7-8]、张伟等[9]、郭子涛等[10]对单层和多层 Q235 钢板在不同弹体撞击后的防护性能和失效特性进行了实验研究。但到目前,国内关于 Q235 钢的断裂失效准则的研究报道并不多见,文献[5]根据部分实验数据给出了 Q235 钢的 J-C 本构和失效模型的近似选取参量,但失效模型中没有考虑温度软化效应;林莉等[11]对 Q235-B 钢进行了详细的力学性能测试,给出了修正的 J-C 本构和失效模型,但实验中应变率范围较低,最大仅为 275 s^{-1},其在穿甲冲击等高应变率问题中的应用有待进一步检验。

本文中使用 Instron 材料试验机、霍普金森拉杆(SHTB)对 Q235 钢试件进行不同温度下的准静态和动态拉伸实验,实验中应变率最大为 2 854 s^{-1},研究温度、应变率及应力三轴度对 Q235 钢失效应变的影响,基于实验和数值模拟结果提出修正的 Q235 钢的 J-C 失效模型,并通过 Taylor 撞击实验与相应的数值模拟结果对实验给出的模型相关参量进行确定和验证。本文中所用的 Q235 钢材料均来自吉林通化钢铁有限公司生产的同一批次的 3~20 mm 厚钢板。

* **收稿日期:** 2017-05-10; **修回日期:** 2017-08-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(11072072);江西省自然科学基金项目(20161BAB211001)
第一作者: 郭子涛(1979—),男,博士,副教授; **通信作者:** 张 伟,zhdawei@hit.edu.cn。

1 金属材料的 J-C 失效准则描述

金属材料的延性断裂与材料中空洞形核、扩展和聚合有关，而微孔洞的产生和增长与材料的应力状态即应力三轴度显著相关，温度和应变率对材料的断裂也有很大影响。G. R. Johnson 等[1]考虑应力三轴度、温度及应变率效应，扩展了 Hancock-Mackenzie 的断裂模型形式[12-13]：

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)](1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 + D_5 T^*) \tag{1}$$

式中：$D_1 \sim D_5$ 为材料参数；σ^* 为应力三轴度，定义为 $\sigma^* = \sigma_m / \sigma_{eq}$，其中静水压力 $\sigma_m = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$，$\sigma_{eq}$ 为等效应力；$\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲等效塑性应变率；T^* 为无量纲温度参数。

J-C 失效模型利用累积损伤的思想考虑了应力状态、应变率及温度变化对材料破坏的影响，且认为损伤并不影响材料强度，损伤变量初始值为 0，当达到 1 时，材料即失效。单元的损伤演化定义为：

$$D = \sum (\Delta \varepsilon_{eq} / \varepsilon_f) \tag{2}$$

式中：D 为损伤变量，$\Delta \varepsilon_{eq}$ 为一个时间步的等效塑性应变增量。

此外，假设加载过程为绝热的，材料温度的升高可以用塑性功的消耗来表示，即 $\Delta T = \frac{\chi}{\rho c_p} \int \sigma_{eq} \mathrm{d}\varepsilon_{eq}$，其中 ρ 为材料密度，c_p 是比定压热容，χ 是塑性功转热经验系数，通常取 $\chi = 0.9$[11]。

2 应力三轴度对失效应变的影响

主要通过对 5 mm 厚的平板缺口试件的单向拉伸实验，来考察应力状态即应力三轴度对失效应变的影响，缺口试件示意图如图 1 所示，通过对缺口拉伸试件的单向拉伸实验实现大于 1/3 的应力三轴度范围，通过对剪切试件的单向拉伸实现对中间部位的剪切，应力三轴度在 0 附近。缺口拉伸试件长度 $L = 110$ mm，$d = 10$ mm 保持不变，R 分别为 0.5、1.0、2.0、5.0 和 15.0 mm，对于光滑平板试件，R 则视为无穷大，剪切试件尺寸如图 1 所示。

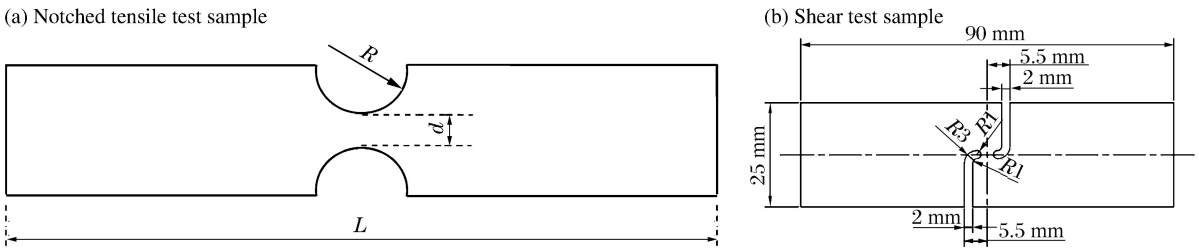


图 1 平板缺口试件示意图

Fig. 1 Sketches of notched flat samples

使用万能材料试验机对试件进行准静态单向拉伸实验。实验后的试件如图 2 所示。利用有限元软件 Abaqus/Standard 分别建立了拉伸试样的三维轴对称模型和剪切试样的全尺寸模型，以试样中间断裂截面为研究对象，并按与文献[14-15]相同的方法，从模拟载荷位移曲线上找出 N 个与实验中具有相同位移时对应的载荷值和模拟位移，通过比较实验和模拟的 N 个载荷值大小以修正模拟中每个点对应的 Misses 应力，然后保持颈缩之前的应力应变不变，并加上修正后的 N 个点的等效应力应变再次进行数值模拟，依次反复迭代直到模拟得到的载荷位移曲线和实验结果十分逼近为止。平板试件的有限元模型及在发生颈缩时的 Mises 应力云图如图 3 所示，图 4(a)～(b)分别为拉伸试样和剪切试样的实验和模拟的载荷位移曲线对比。

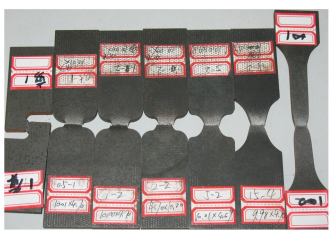


图 2 拉伸及剪切实验后的试样

Fig. 2 Samples after tensile and shear tests

数值模拟中每个时刻的试样等效塑性应变取自试件断口截面上的所有单元的塑性应变平均值，当模拟的载荷位移曲线达到实验的断裂点时，试样等效塑性应变为试样的模拟断裂应变。由于现有的文献并没有关于平板缺口试件的应力三轴度的计算公式，因此每个缺口试样的应力三轴度随时间的变化由数值模拟获得。本文中每个试样的应力三轴度定义为自初始时刻到试样断裂时段内应力三轴度随试样等效塑性应变变化的平均值，文献[2,16]也采用了相同的处理方法。平均应力三轴度的计算公式表示为：

$$\sigma^* = \frac{1}{\varepsilon_f}\int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} d\varepsilon \tag{3}$$

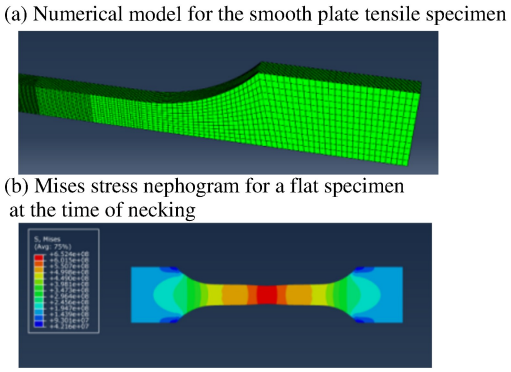


图 3　有限元模型及计算 Mises 应力云图

Fig. 3　Numerical model and Mises stress nephogram for a flat specimen at the time of necking

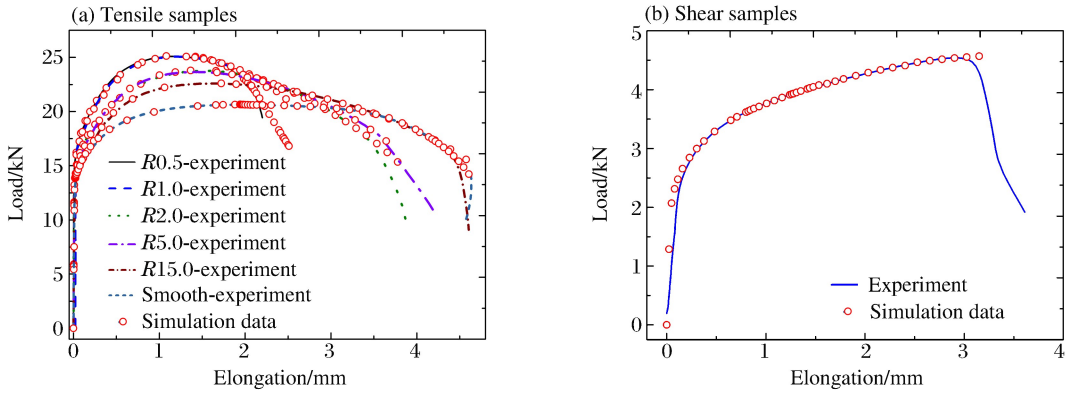


图 4　试件的实验和模拟的载荷位移曲线对比

Fig. 4　Comparison between tests and simulations of load-elongation curves

式中：σ_m 表示静水压力，σ_{eq} 表示等效应力即为数值模拟中的 Misses 应力。

本文中试样的断裂应变通过下式计算：

$$\varepsilon_f = \ln(A_0/A_f) \tag{4}$$

式中：A_0 为试样最小截面的初始面积，A_f 为试样断裂时的断口面积。平板试样的断口形式近似如图 5 所示，本文中 A_f 的计算由下式近似表示：

$$A_f = \frac{(l_1 + l_2 + 2l_3)(l_4 + l_5)}{8} \tag{5}$$

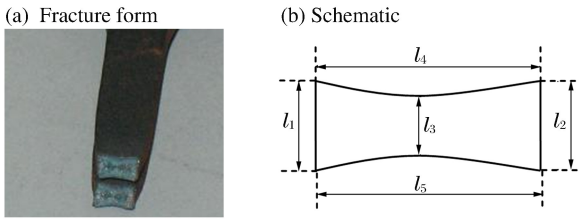


图 5　平板试样的断口形式及示意图

Fig. 5　Schematic plot of fracture in tested flat sample

本文中尝试做了圆柱试件的准静态压缩实验，由于 Q235 钢延性较好，在试验机的最大量程范围内试样件没有出现裂纹，最大的塑性屈服应变经计算为 1.8 左右，应力三轴度的值为 −1/3 附近时的断裂应变暂时未知。剪切试样剪切断裂面的断裂应变值由于不容易测量计算，断裂应变值由数值模拟获得。图 6 所示为数值模拟得到的不同缺口试样的应力三轴度在断裂时刻内随等效塑性应变的变化，最终得到的失效断裂应变随应力三轴度的变化趋势如图 7 所示。

由图 7 可知，Q235 钢的断裂应变并不随着应力三轴度的增大而单调递减，这与材料在不同应力状态下的破坏特性有关，在拉伸状态下，材料的断裂由材料内部孔洞形核、扩展、聚合造成，宏观上表现为韧性断裂破坏，在材料的剪切段时，材料失效主要表现为剪切破坏。Y. B. Bao 等[2]对 2024 铝合金的研究以及陈刚[3]对 TC4 材料的破坏特性研究中也得出了相同的结论。采用与文献[3]类似的分段函数对

图 7 中数据进行描述：

$$\varepsilon_f=\begin{cases}D_{01}\exp(D_{02}\sigma^*) & \sigma^*<0\\ D_{01}+D_{03}\sigma^* & 0\leqslant\sigma^*\leqslant 1/3\\ D_1+D_2\exp(D_3\sigma^*) & \sigma^*>1/3\end{cases}\tag{6}$$

参数 D_1、D_2、D_3 可以通过拟合拉伸段的数据获得，图中虚线圈标记的第 1 个点可以由拉伸段的拟合曲线外推至应力三轴度为 1/3 时获得，并结合剪切点确定 D_{01} 和 D_{03} 项，然后外推线性段至应力三轴度为 0 时，可以获得虚线圈标记的第 2 个点，第 3 个虚线圈标记的断裂应变应大于 1.8。

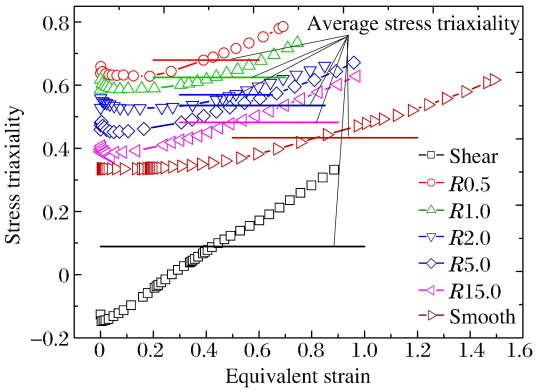


图 6 应力三轴度随等效应变的变化

Fig. 6 Variation of the stress triaxiality with equivalent strain

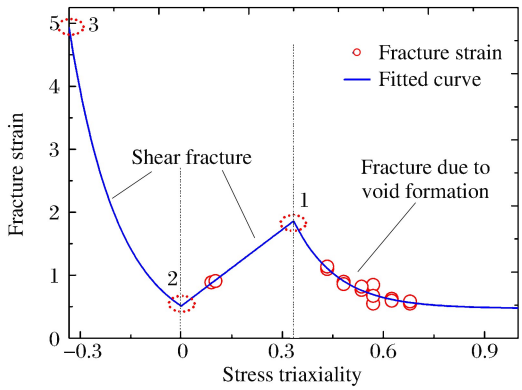


图 7 断裂应变随应力三轴度的变化

Fig. 7 Variation of fracture strain with the average stress triaxiality

3 应变率对失效应变的影响

在常温下通过材料拉伸试验机对 5 mm 厚平板试件进行速度 2～500 mm/min 的拉伸实验以及改进的 SHTB 动态拉伸实验，获得 Q235 钢材料在应变率为 10^{-4}～10^{3} s^{-1} 范围内的断裂应变值，实验中应变率最大为 2 854 s^{-1}。平板拉伸试件和通过 SHTB 装置进行的动态拉伸实验试样及中间卡口连接分别见图 8～9。以 $\dot{\varepsilon}_0=2.1\times10^{-3}$ s^{-1} 作为参考应变率，断裂应变随无量纲应变率的变化如图 10 所示，采用 J-C 失效模型原始形式对图中数据进行最小二乘法拟合可获得应变率项系数 $D_4=-0.019\ 3$。

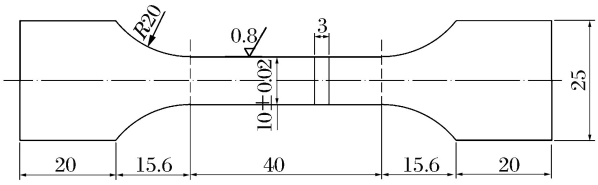


图 8 常温下拉伸试件尺寸(单位：)

Fig. 8 Dimensions of quasi-static tensile samples tested at room temperature (unit: mm)

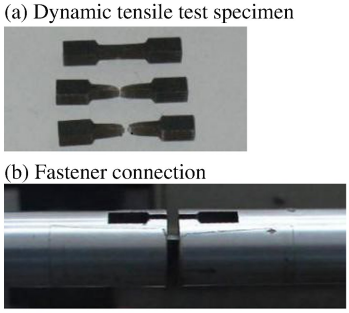


图 9 动态拉伸试样及卡口连接

Fig. 9 Specimen in dynamic tensile tests and the fastener connection

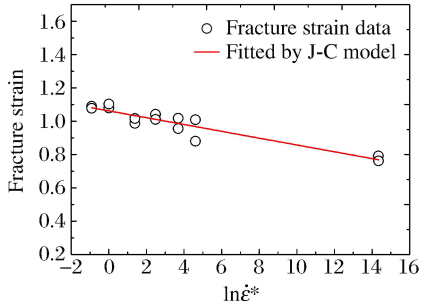


图 10 断裂应变随无量纲应变率的变化

Fig. 10 Variation of fracture strain with dimensionless strain rates

4　温度对失效应变的影响

以 Q235 光滑平板试件作为实验对象，进行了室温约 900 ℃的准静态拉伸实验，图 11 所示为高温试件在不同温度下的断口形式，常温试件断口与 100 °C 时相似而未列出，从图中可以看出，在温度为 900 ℃时，试样内部材质发生物理变化而引起试样的不规则脆断，故断裂点本文中未予考虑。图 12 给出了试样的断裂应变随无量纲温度的变化，可以看出自常温到 300 ℃时，断裂应变变化趋势不大，300～700 ℃时断裂应变随温度变化幅度增大。显然采用原始的 J-C 失效模型温度软化项 $(1+D_5T^*)$ 并不能准确描述断裂应变随温度变化的趋势，本文中提出一个温度软化项为 $(1+D_5T^{*D_6})$，采用原始的和修改的模型对图中数据的拟合效果如图 12 所示。通过拟合获得原始 J-C 模型温度项 $D_5=3.811$，而修改的 J-C 模型温度项 $D_5=13.017$，$D_6=2.338$。

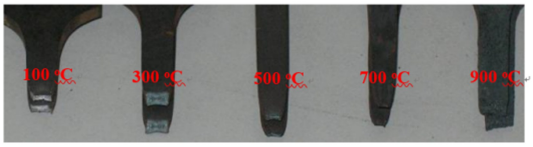


图 11　平板试件在不同温度下的断口形式

Fig. 11　Fracture patterns of flat specimens at different temperatures

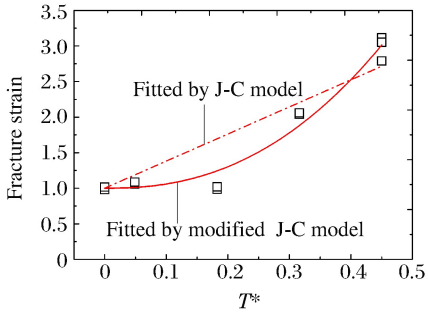


图 12　断裂应变随无量纲温度的变化

Fig. 12　Variation of fracture strain with dimensionless temperature

5　失效准则参量的 Taylor 实验和数值模拟验证

综上所述，可以获得基于 J-C 失效模型的修正形式：

$$\varepsilon_f=\begin{cases}D_{01}\exp(D_{02}\sigma^*)(1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)(1+D_5T^{*D_6}) & \sigma^*<0\\ (D_{01}+D_{03}\sigma^*)(1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)(1+D_5T^{*D_6}) & 0\leqslant\sigma^*\leqslant 1/3\\ [D_1+D_2\exp(D_3\sigma^*)](1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)(1+D_5T^{*D_6}) & \sigma^*>1/3\end{cases}\tag{7}$$

除 D_{02} 项外，失效模型参量其他项已全部获得。因为通过大应变率下的 Taylor 撞击实验是验证材料失效模型参数常用的方法[3,11]，故本文中开展了 Q235 钢的 Taylor 撞击实验，弹体取材于同一批次 20 mm 厚 Q235 钢板，名义直径和长度分别为 12.62、50.48 mm，屈服强度与先前测试的薄试样相同。实验结果发现撞击速度小于 253.5 m/s 时，弹体头部镦粗不发生开裂，当弹体速度大于 255.8 m/s 时，弹体头部即由初始开裂发展为花瓣型开裂。利用 Abaqus/explicit 建立 Taylor 撞击实验的三维有限元模型，弹体和靶板的单元类型为 C3D8R 即八节点线性六面体单元，模型如图 13 所示，弹体本构模型及参数通过同一系列实验得到[17]。由于裂纹发生在弹体头部，故弹体头部单元密度偏大。在失效模型其他项保持不变的情况下，调节 D_{02} 项使得弹体速度在 253.5 m/s 时弹体头部只发生镦粗，当弹体增大到 255.8 m/s 时，Q235 弹体头部发生临界开裂，如图 14 所示，此时获得的 D_{02} 项值为 −6.8，这时准静态压缩时失效应变经计算为 4.93。

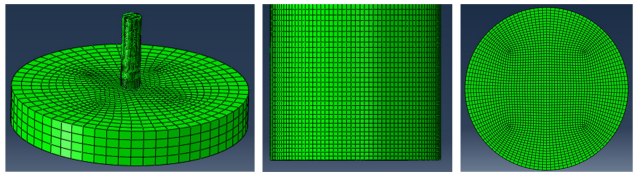


图 13　Taylor 撞击数值模拟有限元模型

Fig. 13　Geometrical model of FEM modelling for Taylor impact tests

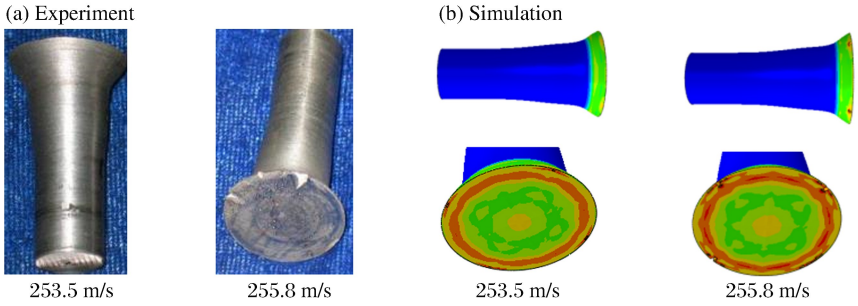


图 14 Taylor 撞击实验弹体临界开裂实验和数值模拟对比

Fig. 14 Critical fractures obtained in Taylor experiments and predicted by simulation

为进一步验证 Q235 的本构和失效模型的正确及适用性，对 Q235 弹体在高速下的 Taylor 撞击实验进行了数值模拟，实验的和模拟的弹体花瓣型裂纹对比见图 15 所示，可以发现两者结果吻合较好，最终确定的 Q235 钢的失效模型相关参数如表 1 所示，其中：E 为弹性模量，ν 为泊松比，ρ 为密度，T_r 为参考温度，T_m 为熔点，c_p 为比定压热容，χ 为塑性功转热系数。

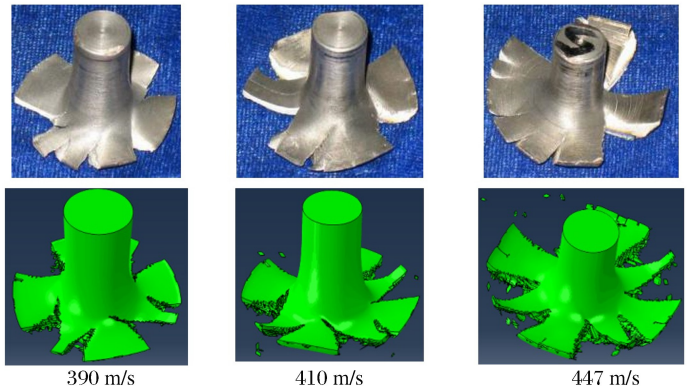


图 15 Q235 弹在高速下的 Taylor 撞击实验结果与数值模拟结果对比

Fig. 15 Rod fracture patterns obtained in Taylor experiments and predicted by simulation for Q235 projectiles at high velocities

表 1 Q235 钢的失效模型相关参数

Table 1 Material parameters for Q235 steel

E/GPa	ν	ρ/(kg·m^{-3})	T_r/K	T_m/K	c_p/(J·kg^{-1}·K^{-1})	χ	$\dot{\varepsilon}_0$/s^{-1}
200	0.33	7 800	293	1 795	469	0.9	2.1×10^{-3}

D_{01}	D_{02}	D_{03}	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
0.511	−6.80	4.047	0.472	18.728	−7.805	−0.019 3	13.017	2.338

6 结 论

对 Q235 钢试件进行了不同温度下的准静态和常温动态拉伸实验，研究了温度、应变率及应力三轴度对 Q235 钢失效应变的影响，结果表明，材料断裂应变随温度和应变率的增加分别呈递增和递减，同时由于 Q235 钢材料在不同应力状态下破坏机制不同，材料断裂应变随着应力三轴度的增加呈先减小后增大再减小的变化趋势。本文基于实验和数值模拟结果对失效应变温度项进行了修正，并提出了 Q235 钢的基于 J-C 失效模型的应力三轴度三分段式失效准则，最后通过 Taylor 撞击实验与相应的数值模拟对实验给出的模型相关参量进行了确定和验证，实验结果与模拟结果吻合较好。

参考文献：

[1] 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.

[2] BAO Y B, WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004,46:81-98.

[3] 陈刚. 半穿甲战斗部弹体穿甲效应数值模拟与实验研究[D]. 四川绵阳：中国工程物理研究院，2006.

[4] 陈小伟，张方举，梁斌，等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的试验研究[J]. 爆炸与冲击，2006,26(3):199-207.
CHEN Xiaowe, ZHANG Fangju, LIANG bin, et al. Three modes of penetration mechanics of A3 steel cylindrical projectiles impact onto 45 steel plates[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(3):199-207.

[5] 陈刚，陈小伟，陈忠富，等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击，2007,27(5):390-397.
CHEN Gang, CHEN Xiaowei, CHEN Zhongfu, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting 45 steel plates[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(5):390-397.

[6] CHEN X W, WEI L M, LI J C. Experimental research on the long rod penetration of tungsten-fiber/Zr-based metallic glass matrix composite into Q235 steel target[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015,79(2):102-116.

[7] DENG Yunfei, ZHANG Wei, CAO Zongsheng. Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against ogival-nosed rigid projectiles impact[J]. Materials and Design, 2013,44:228-239.

[8] DENG Yunfei, ZHANG Wei, YANG Y, et al. Experimental investigation on the ballistic performance of double layered plates subjected to impact by projectile of high strength[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014,70(8):38-49.

[9] 张伟，肖新科，郭子涛，等. 双层 A3 钢靶对平头杆弹的抗侵彻性能研究[J]. 高压物理学报，2012,26(2):163-170.
ZHANG Wei, XIAO Xinke, GUO Zitao, et al. Investigation on the ballistic resistance of double-layered A3 steel targets against blunt projectile impact[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26(2):163-170.

[10] 郭子涛，郭钊，张伟. 单层 A3 钢薄靶在不同头型弹体斜撞击下的失效模式和防护性能研究[J]，振动与冲击，2018,37(1):27-31.
GUO Zitao, GUO Zhao, ZHANG Wei. Study on failure patterns and ballistic resistance of thin single A3 steel targets obliquely impacted by different nose shape projectiles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018,37(1):27-31.

[11] 林莉，支旭东，范锋，等. Q235B 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定[J]. 振动与冲击，2014,33(9):153-158.
LIN Li, ZHI Xudong, FAN Feng, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235B steel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(9):153-158.

[12] HANCOCK J W, MACKENZIE A C. On the mechanisms of ductile failure in high strength steels subjected to multi-axial stress-states[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1976,24(2):147-169.

[13] MACKENZIE A C, HANCOCK J W, BROWN D K. On the influence of state of stress on ductile failure initiation in high strength steels[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1977,9(1):167-188.

[14] CHOUNG J M, CHO S R. Study on true stress correction from tensile tests[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008,22(6):1039-1051.

[15] JOUN M, EOM J G, LEE M C. A new method for acquiring true stress-strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method[J]. Mechanics of Materials, 2008,40(7):586-593.

[16] LEE Y W, WIERZBICKI T. Fracture prediction of thin plates under localized impulsive loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(10):1277-1308.

[17] 郭子涛，高斌，郭钊，等. 基于 J-C 模型的 Q235 钢的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击，2018,38(4):804-810.
GUO Zitao, GAO Bin, GUO Zhao, et al. Study on the J-C model based dynamic constitutive relation of Q235 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2018,38(4):804-810.

J-C model based failure criterion and verification of Q235 steel

GUO Zitao[1], SHU Kaiou[1], GAO Bin[1], ZHANG Wei[2]
(1. *School of Civil Engineering & Urban Construction, Jiujiang University, Jiujiang* 332005, *Jiangxi, China*;
2. *Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *Helongjiang, China*)

Abstract: In this paper, we conducted quasi-static and dynamic tensile tests on Q235 steel at different temperatures using the Instron tensile strength tester and the split Hopkinson bar and studied the effects of temperature, strain rates and stress triaxiality on the steel's failure strains of Q235. The results show that Q235 steel's failure strains increase with a rise in temperature but decrease with a rise the strain rates while, with a rise in the stress triaxiality, they decrease at first but then increase. Based on these results and combining them with numerical simulation, we modified the item of temperature effects and proposed a revised three-section failure criterion of stress triaxiality for J-C failure model, with relevant parameters determined and verified using Taylor impacting experiments and corresponding numerical simulations. The experimental results accord well with those from simulation.

Keywords: Q235 steel; failure criterion; stress triaxiality; Taylor impact

(责任编辑 曾月蓉)