DOI：10.11883/bzycj-2016-0333　　**文章编号**：1001-1455(2018)04-0804-07

基于 J-C 模型的 Q235 钢的动态本构关系*

郭子涛[1]，高　斌[1]，郭　钊[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. 哈尔滨工业大学航天学院高速撞击研究中心，黑龙江 哈尔滨 150080）

摘要：采用万能材料试验机、分离式霍普金森压杆和拉杆系统，研究了 Q235 钢在常温至 900 ℃的准静态和动态压缩及拉伸力学性能。基于实验结果，修正了 Johnson-Cook（J-C）本构模型中的温度软化项，提出了 Q235 钢的修正 J-C 本构模型，并利用 Taylor 撞击实验和数值仿真验证了其动态本构关系。

关键词：动态力学性能；本构关系；Taylor 撞击；Q235 钢；Johnson-Cook 本构模型
中图分类号：O347.3　　**国标学科代码**：13015　　**文献标志码**：A

在金属快速成型、冲击载荷、爆炸及结构碰撞等作用过程中常常汇集高温、高压等瞬态物理现象，而在高温高应变率下金属材料将产生很大的塑性变形。相对于传统的实验方法，数值模拟方法不但成本低、扩展性强，而且能给出材料各种物理参量的历程信息，因此适用于描述金属材料在大应变、高应变率和宽温度范围内力学行为的本构关系，对于研究防护结构在冲击载荷下的瞬态响应以及现代防护结构设计都具有重要意义。目前，各种材料的动态本构模型大多基于等效应力-应变关系提出，主要分为经验型本构模型和高度物理化的本构模型，常见的有 Johnson-Cook（J-C）模型[1]、Zerilli-Armstrong 模型[2]、Steinberg 模型[3]等。其中，J-C 本构模型因包含应变率强化效应和温度软化效应，且具有形式简单、各项物理意义明确、参数容易测试标定等特点，在冲击侵彻问题研究中得到了广泛而成功的应用。

Q235 钢材料的含碳量适中，强度、塑性和焊接等性能的配合度较好，且价格低廉，在建筑、桥梁、船舶及结构防护领域有着广泛的应用。许多学者对 Q235 钢的冲击及抗冲击性能进行了研究，例如：陈小伟等[4-6]对 Q235 钢弹体撞击 45 钢板后的破坏模式进行了实验和仿真研究，对金属玻璃基复合材料长杆弹对 Q235 钢厚靶的侵彻进行了实验研究；张伟等[7-10]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。然而到目前为止，国内关于 Q235 钢动态力学性能的研究报道并不多见。陈小伟等[5]虽给出了 Q235 钢的 J-C 本构参量，但只是基于部分实验数据的近似取值；最近，陈俊岭等[11]对 Q235 钢在不同应变率下的力学性能进行了实验研究，给出了 Q235 钢的修正 J-C 本构模型，但实验中的应变率范围过小，且未考虑温度软化效应。

本研究中使用 Instron 万能材料试验机、霍普金森压杆（SHPB）和霍普金森拉杆（SHTB）系统，研究 Q235 钢在常温至 900 ℃的准静态和动态压缩及拉伸性能，并利用 Taylor 撞击实验验证该动态本构关系；基于实验和数值仿真结果，提出 Q235 钢的修正 J-C 本构模型。本研究中所用的 Q235 钢材料均来自吉林通化钢铁有限公司生产的同一批次 3～20 mm 厚钢板。

1　常温下的本构关系

1.1　常温准静态拉伸实验结果

材料在常温下的应力-应变关系由板材试件的准静态单向拉伸实验获得。试件分别取自与钢板边呈 0°、45°、90°方向的 3 和 5 mm 厚 Q235 钢板，具体尺寸如图 1 所示。使用 Instron 万能材料试验机，对

* **收稿日期**：2016-11-01；**修回日期**：2017-02-15
基金项目：国家自然科学基金项目（11072072）
第一作者：郭子涛（1979－　），男，博士；**通信作者**：张　伟，zhdawei@hit.edu.cn。

两种厚度 3 个方向的平板试件进行单向准静态拉伸。实验用引伸计的标距段长度为 25 mm；由于 Q235 钢的延性较好，因此加载试验机的拉伸速度稍大，为 5 mm/min，即名义应变率为 $2.1\times10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}$。根据实验得到的载荷-位移曲线，经过简单转换，可以得到材料的工程应力-应变曲线，见图 2。从图 2 中可以看到：Q235 钢有明显的屈服平台，平均屈服强度为 295 MPa；对于不同厚度和切割方向的 Q235 钢，其屈服强度和延伸率都相差不大，故不考虑各向异性对 Q235 钢性能的影响。

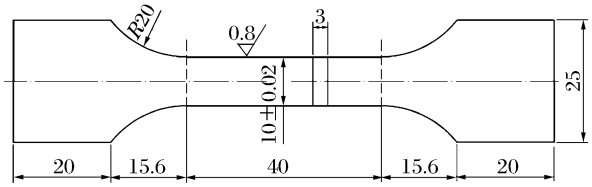

图 1　常温准静态拉伸试件尺寸(单位：mm)

Fig. 1　Specimen sizes for quasi-static tensile test at room temperature (Unit: mm)

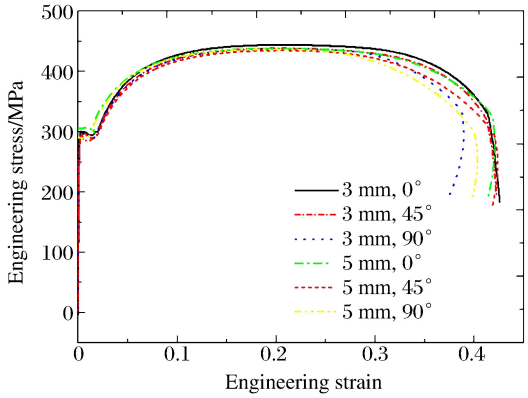

图 2　实验获得的工程应力-应变曲线

Fig. 2　Engineering stress-strain curves obtained by experiments

1.2　颈缩前后的等效应力-应变关系

从图 2 可看出：Q235 钢在单向拉伸时的延伸率较大，一般在应力达到最大时，试样发生颈缩现象；颈缩之前的真应力-真应变关系即为对应的等效应力-应变关系；试样发生颈缩之后，变形集中在颈缩区域，颈缩处的应力状态由单向应力状态向多轴应力状态转变，此后单向真应力-应变关系与等效应力-应变关系将不存在对等关系。

对于瞬态冲击问题，研究材料在大应变下的等效应力-应变关系具有非常重要的意义。材料的等效应力-应变关系可采用 J-C 本构模型 $\sigma=A+B\varepsilon_{\mathrm{eq}}^{n}$（其中 σ 为应力，A 为屈服强度，$\varepsilon_{\mathrm{eq}}$ 为等效应变，B、n 为材料参数）表示，而在去除弹性段后的等效应力-应变关系还可以用 Swift 幂律模型描述[12]：

$$\sigma=K(\varepsilon_0+\varepsilon_{\mathrm{p}})^{N} \tag{1}$$

式中：K 为强度系数，可认为 $K=\sigma_0/\varepsilon_0^N$，$\sigma_0$ 为屈服应力；N 为硬化指数；ε_0 为初始屈服时的名义等效应变；ε_{p} 为等效塑性应变。需要说明的是，ε_0 相对于 ε_{p} 很小。

试样在颈缩前的真应力-真应变数据很容易确定，而对于平板试样在颈缩后的等效应力-应变关系，则需考虑试样在颈缩时的拉伸不稳定性条件，即：

$$\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\varepsilon=\sigma \tag{2}$$

此时，J-C 本构模型中 A、B、n 将存在关系式 $B\varepsilon_{\mathrm{j}}^{n-1}(n-\varepsilon_{\mathrm{j}})=A$，同时式(1)可转变为：

$$\sigma=\sigma_0\left(1+\frac{\varepsilon_{\mathrm{p}}}{\varepsilon_0}\right)^{\varepsilon_0+\varepsilon_{\mathrm{j}}} \tag{3}$$

式中：ε_{j} 为颈缩发生时的等效塑性应变，并满足近似关系式 $\varepsilon_{\mathrm{j}}=\ln(1+\varepsilon_{\mathrm{j,e}})$，其中 $\varepsilon_{\mathrm{j,e}}$ 为颈缩时的工程应变。因此考虑试样在拉伸时的颈缩条件时，材料在颈缩前的等效应力-应变关系可用式(3)描述。

以 5 mm 厚、0°方向 Q235 钢的拉伸实验结果为例，$\sigma_0=292.2$ MPa，$\varepsilon_{\mathrm{j}}=0.1796$。考虑颈缩条件，分别用 J-C 本构模型和式(3)对颈缩前的真应力-应变数据进行拟合，拟合结果如图 3 所示。由图 3 可见：考虑颈缩条件的 J-C 本构模型并不能很好地拟合试

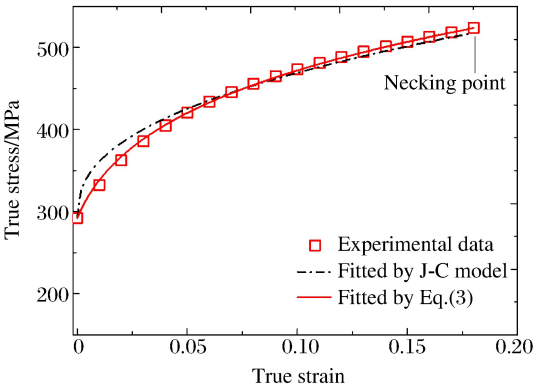

图 3　实验以及两种模型拟合得到的真应力-应变曲线对比

Fig. 3　Comparison of experimental true stress-strain curves with fitted results by two models

样在颈缩前的等效应力-应变曲线；而式(3)与实验结果的拟合度为 99.9%，说明式(3)能很好地描述材料在颈缩前的等效应力-应变关系。因此将式(3)的计算值作为参考等效应力-应变曲线，采用与文献[12-14]相同的有限元数值仿真迭代方法，获得平板试件在颈缩后的等效应力-应变关系。

图 4 为实验和仿真迭代得到的载荷-位移曲线对比。可见，经过 4 次以上迭代，仿真已经非常逼近实验结果。图 5 为仿真得到的试样颈缩前后的等效应力-应变数据。在 A 值确定的情况下，采用 J-C 本构模型 $\sigma=A+B\varepsilon^n$ 对图 5 中获得的试样颈缩前后的等效应力-应变关系进行拟合，得到准静态压缩条件下的参数 $B_1=598.86$ MPa 和 $n_1=0.5753$，拟合后的结果也在图 5 中显示。

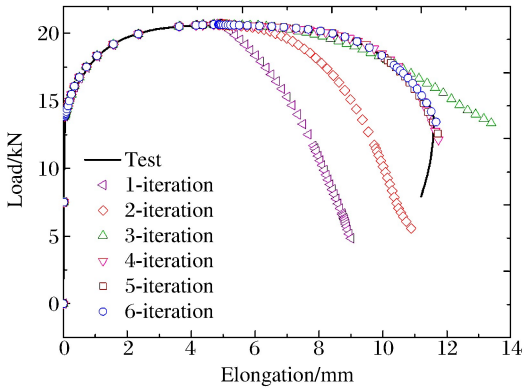

图 4 实验和仿真得到的载荷-位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of experimental load-elongation curves with numerical iterations

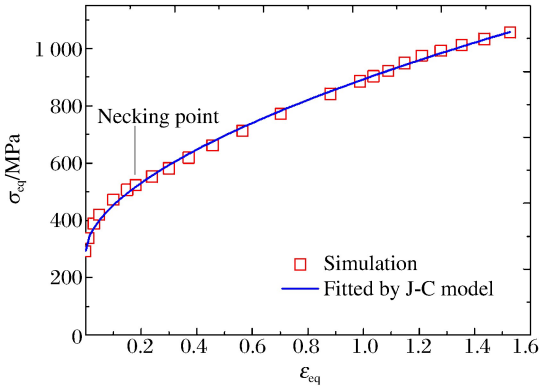

图 5 仿真得到的等效应力-应变关系

Fig. 5 Equivalent stress-strain relations obtained by numerical simulations

1.3 应变率的影响

在常温下分别研究了低应变率和高应变率下 Q235 钢的力学性能。通过拉伸试验机，对 5 mm 厚 Q235 钢平板试件进行了拉伸速度为 2～500 mm/min 的拉伸实验，获得了应变率在 10^{-4}～10^{-1} s^{-1} 范围内 Q235 钢的拉伸力学性能；通过 SHPB 动态压缩实验和改进的 SHTB 动态拉伸实验，获得了 Q235 钢在应变率为 10^2～10^3 s^{-1} 的动态压缩和动态拉伸性能。低应变率实验的试件尺寸与图 1 所示一致。在基于 SHPB 装置的动态压缩实验中，试样尺寸为∅5 mm×5 mm，来自 5 mm 厚 Q235 钢板。在基于 SHTB 装置的动态拉伸实验中，试样形状及中间卡口的连接如图 6 所示。

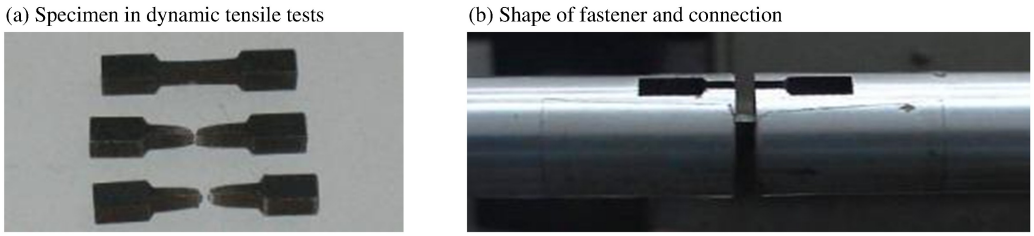

图 6 动态拉伸试样及卡口连接

Fig. 6 Specimen in dynamic tensile tests and shape of fastener and connection

图 7 显示了部分不同应变率下 Q235 钢的真应力-应变曲线。从图 7 中可见，Q235 钢对应变率比较敏感，应变率为 1 500 s^{-1} 左右时，屈服强度约为准静态时的 2 倍。以 $\dot{\varepsilon}=2.1\times10^{-3}$ s^{-1} 作为参考应变率，Q235 钢的屈服应力随无量纲应变率的自然对数 $\ln\dot{\varepsilon}^*$ 的变化见图 8，其中无量纲应变率 $\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$，图中数据采用 $\sigma=A(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)$ 进行最小二乘法拟合，其中 C 为应变率强化项。从图 8 中看出：Q235 钢在低应变率和高应变率下分别呈现出不同的线性关系，并且在高应变率下屈服应力对应变率的敏感程度加大。从位错动力学角度上看，这归因于塑性变形由热激活(thermal activation)机制向声子拖曳(phonon drag)机制转变。而在 J-C 本构模型中，屈服应力与应变率的对数成正比，显然 J-C 本构模型并没有考虑塑性变形机制转变这一问题。不过鉴于 J-C 本构模型的形式简单，且在穿甲问题上有大量成

功的应用，本研究中仍然采用 J-C 本构模型的原始形式描述屈服应力与应变率效应之间的关系。通过拟合确定的准静态屈服强度 $A=293.8$ MPa，应变率强化项 $C=0.065\,2$。

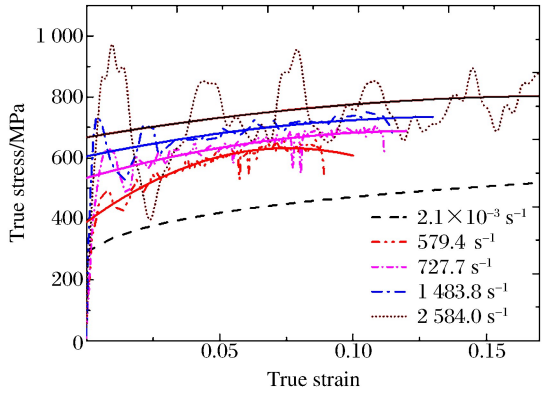

图 7　不同应变率下 Q235 钢的真应力-真应变曲线

Fig. 7　True stress-strain relations for Q235 steel at different strain rates

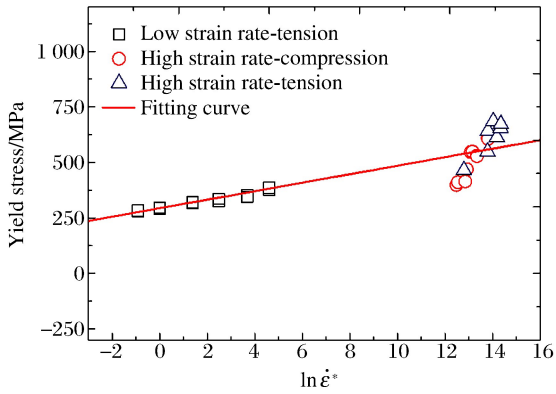

图 8　Q235 钢的屈服应力随无量纲应变率的变化

Fig. 8　Variation of yield stress of Q235 steel with dimensionless strain rate

保持确定的 A 值不变，在不考虑温升影响的情况下，采用 $\sigma=(A+B\varepsilon^n)(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)$ 分别对应变率为 727.7、1 483.8 和 2 584.0 s^{-1} 条件下的动态应力-应变曲线进行最小二乘法拟合，得到 3 组 B 和 n 值。结果发现，通过这 3 组 B、n、A 值确定的 Q235 钢应力-应变关系在变化趋势上十分接近，故可对 3 组数据分别取平均值，从而得到动态加载下的参数 $B_2=230.2$ MPa，$n_2=0.578$。

2　温度对应力的影响

常温拉伸实验结果表明，板厚对材料屈服强度的影响不大。在高温拉伸实验中，直接以 3 mm 厚平板试件作为实验对象，进行了 100～900 ℃的准静态拉伸实验，拉伸速度为 5 mm/min。受设备尺寸限制，高温试件尺寸与常温准静态试件尺寸稍有不同，具体见图 9。

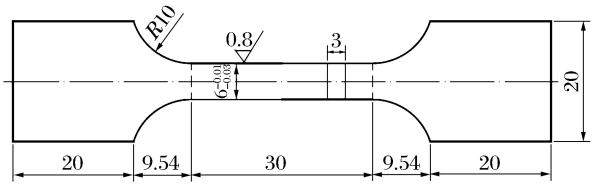

图 9　高温准静态拉伸试件尺寸(单位：mm)

Fig. 9　Specimen sizes for quasi-static tensile test at high temperature (Unit: mm)

图 10 给出了 Q235 钢在不同温度下的工程应力-应变曲线。注意到，当温度高于 300 ℃时，工程应力-应变曲线没有明显的屈服平台，此时的屈服应力取 0.2%塑性应变时的工程应力。材料的屈服应力随无量纲温度 T^* 的变化如图 11 所示。

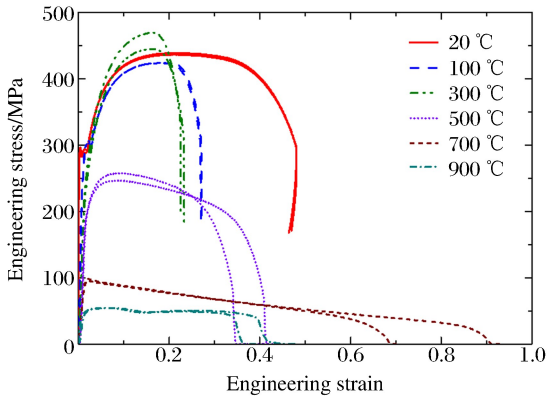

图 10　不同温度下的工程应力-应变曲线

Fig. 10　Engineering stress vs. strain at different temperatures

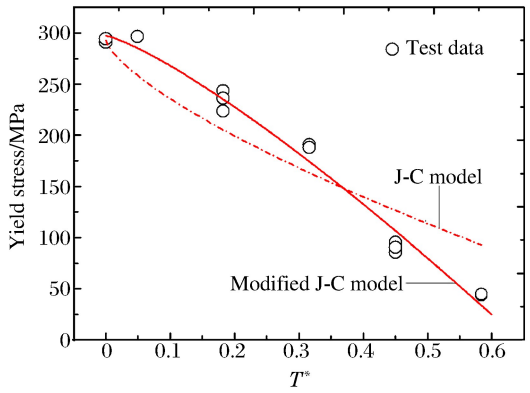

图 11　屈服应力随无量纲温度的变化

Fig. 11　Yield stress vs. dimensionless temperature

在参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0=2.1\times10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}$ 条件下，采用 J-C 原始模型 $\sigma=A(1-T^{*m})$，并使用最小二乘法，对图 11 中的数据进行拟合，得到 $m=0.706$。可见，原始 J-C 模型中的温度软化效应并不能很好地反映材料屈服应力随温度的变化。因此本研究中在原始 J-C 模型的基础上采用如下温度函数表示屈服应力随温度的变化：

$$\sigma=A(1-m_1T^{*m_2}) \tag{4}$$

式中：m_1 和 m_2 为拟合参数。采用式(4)对图 11 中的数据进行最小二乘法拟合，如图 11 所示。可见式(4)能更好地反映屈服应力随温度的变化趋势，拟合得到 $m_1=1.762$，$m_2=1.278$。

3 本构模型参量的 Taylor 实验和数值仿真验证

综合以上分析及获得的应变硬化项、应变率强化项及温度软化项，基于 J-C 强度模型，确定 Q235 钢的本构关系为以下形式：

$$\sigma_{\mathrm{eq}}=(A+B\varepsilon_{\mathrm{eq}}^{n})(1+C\ln\dot{\varepsilon}^{*})(1-m_1T^{*m_2}) \tag{5}$$

考虑到模型主要针对瞬态冲击仿真，而高速 Taylor 实验和数值仿真是验证本构参数的常用方法[15-16]，为此开展了 Q235 钢的 Taylor 撞击实验。实验中 Q235 钢弹体取材于同一批次 20 mm 厚钢靶，名义直径和长度分别为 12.62 和 50.48 mm。靶板为 25 mm 厚高强度装甲钢。实验结果显示：当撞击速度小于 253.5 m/s 时，弹体头部镦粗且不发生开裂；当弹体速度大于 255.8 m/s 时，弹体头部由初始开裂发展为花瓣型开裂。对这些变形弹体的典型特征尺寸(即弹体镦粗后的整体长度和头部变形后的最大直径)进行测量，并建立 Abaqus/Explicit-2D 轴对称模型，对相应速度的 Taylor 撞击实验进行数值仿真，仿真模型见图 12。由于装甲钢靶板在撞击过程中的变形很小，因此可以采用双线性硬化模型描述其本构关系，结构形式及相关参数见文献[16-17]。

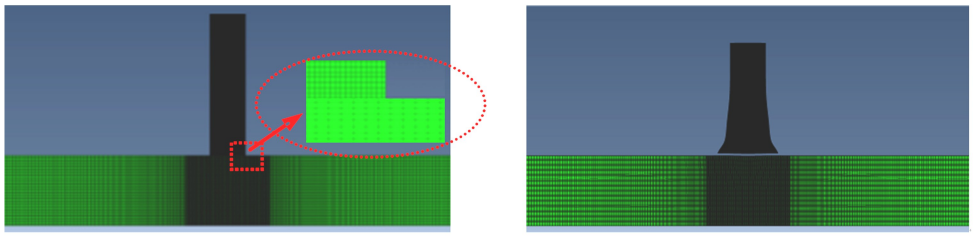

图 12 Taylor 实验的数值仿真模型

Fig. 12 Numerical model of Taylor tests

实验中回收的头部镦粗但未开裂的弹体以及实验和仿真得到的弹体变形对比如图 13 和图 14 所示。通过测量发现：利用准静态实验获得的参数 B_1、n_1 模拟出的弹体头部变形较小，与实验结果明显不符；而利用 B_2、n_2 仿真得到的弹体头部及长度尺寸与实验结果非常接近，且整体变形吻合很好，故选取 B_2、n_2 作为 Q235 钢的本构参数。表 1 总结了本研究中得到的 Q235 钢的 J-C 本构模型参数，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 为定压比热容，χ 为塑性功转热系数。

图 13 Taylor 撞击实验的回收弹体

Fig. 13 Recovered projectiles in Taylor impact tests

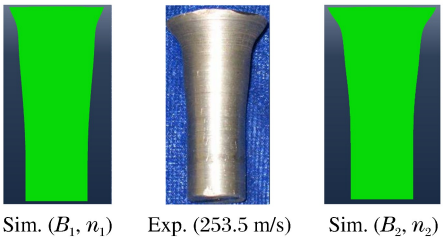

图 14 Taylor 实验和仿真得到的弹体变形对比

Fig. 14 Comparison of projectile deformation between Taylor test and numerical simulations

表 1 Q235 钢的本构模型参数

Table 1 Parameters of constitutive model for Q235 steel

$\rho/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	E/GPa	ν	T_r/K	T_m/K	$\dot{\varepsilon}_0/\mathrm{s^{-1}}$	χ	$c_p/(\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}})$
7.8	200	0.33	293	1795	2.1×10^{-3}	0.9	469
A/MPa	B/MPa	n	C	m_1	m_2	m	
293.8	230.2	0.578	0.0652	1.762	1.278	0.706	

4 结　论

采用万能材料试验机、霍普金森压杆和拉杆系统，结合数值仿真技术，对 Q235 钢在常温和高温下的准静态及动态本构关系进行了研究。结果表明，Q235 钢的应变及应变率强化效应和温度软化效应显著。基于实验结果，对 J-C 本构模型中的温度项进行了修正，并通过 Taylor 撞击实验及相应的数值仿真进行对比验证，对实验得出的模型参量进行了确定。结果表明，修正后的 J-C 本构模型可以较好地描述 Q235 钢在高速变形下较大应变范围的力学行为。

参考文献：

[1] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands, 1983:541-547.

[2] 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.

[3] 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.

[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 Xiaowei, 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, 2015,79:102-116.

[7] DENG Y F, ZHANG W, CAO Z S. 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 Y F, ZHANG W, YANG Y G, 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, 2014,70:38-49.

[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] 陈俊岭，舒文雅，李金威. Q235 钢材在不同应变率下力学性能的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2016,

44(7):1071-1075.
CHEN Junling, SHU Wenya, LI Jinwei. Experimental study on dynamic mechanical property of Q235 steel at different strain rates[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016,44(7):1071-1075.

[12] JOUN M S, 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.

[13] EHLERS S, VARSTA P. Strain and stress relation for non-linear finite element simulations[J]. Thin-Walled Structures, 2009,47(11):1203-1217.

[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] 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 Zhongfu, TAO Junlin, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):451-456.

[16] 肖新科.双层金属靶的抗侵彻性能和 Taylor 杆的变形与断裂[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

[17] BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration[J]. European Journal of Mechanics: A/Solids, 2001,20(5):685-712.

Dynamic constitutive relation based on J-C model of Q235 steel

GUO Zitao[1], GAO Bin[1], GUO Zhao[1], ZHANG Wei[2]

(1. *School of Civil Engineering and Urban Construction, Jiujiang University, Jiujiang* 332005, *Jiangxi, China*;
2. *Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *Heilongjiang, China*)

Abstract: In this paper, we studied the quasi-static performance and the dynamic compression and tensile properties of the Q235 steel at temperatures ranging from the room temperature to 900 ℃ using a universal testing machine and the split Hopkinson bar system. Based on the experimental results, we modified the thermal softening item in the Johnson-Cook (J-C) constitutive model and proposed a revised J-C constitutive model for Q235 steel, which we then validated using Taylor impact experiments and corresponding numerical simulations.

Keywords: dynamic mechanical properties; constitutive relation; Taylor impact; Q235 steel; Johnson-Cook constitutive model

(责任编辑 王 影)