DOI: 10.11883/bzycj-2016-0286
文章编号: 1001-1455(2018)03-0596-07

Q235B 钢动态本构及在 LS-DYNA 中的应用*

支旭东[1,2],张 荣[2],林 莉[3],范 峰[1,2]
(1. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090;
2. 哈尔滨工业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090;
3. 哈尔滨理工大学建筑工程学院土木工程系,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 采用万能材料试验机和分离式霍普金森拉杆(SHTB)装置,对我国钢结构建筑中最常用的 Q235B 钢进行准静态拉伸实验、高温拉伸实验和动态拉伸实验。基于实验数据对 LS-DYNA 常用的 3 种动态材料模型——Cowper-Symonds 本构模型、Johnson-Cook 本构模型、Zerilli-Armstrong 本构模型进行了拟合,通过 Taylor 杆实验对 3 种本构模型进行验证和对比分析。结果表明:Q235B 钢具有较为明显的高温软化和应变率强化效应;Cowper-Symonds 本构模型可以较好地适用于工程领域低速碰撞的模拟;Johnson-Cook 本构模型可适用于较大应变率范围内的模拟;不推荐 Zerilli-Armstrong 本构模型在工程低速碰撞领域中使用。

关键词: 动态本构模型;Q235B 钢;应变率效应;Taylor 杆
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

材料在动力荷载下的性能与静荷载下明显不同,在高应变率下塑性变形存在应变率效应、应变历史效应和温度效应[1],准确考虑这些因素对于采用数值方法模拟材料乃至构件在动荷载下的力学行为至关重要。Q235B 钢由于具有优良的力学性能、焊接性能以及价格低廉等优点被广泛应用于我国建筑结构领域,本文中正是以该类建筑钢结构反恐抗冲击为背景,对 Q235 钢的动态本构及其数值模拟技术开展研究。

对于 Q235B 钢等延性金属材料的动态本构模型,比较适用的主要有宏观唯象经验模型(如 Johnson-Cook(J-C)本构模型[2]、Cowper-Symonds(C-S)本构模型[3])和具有物理基础的本构模型(如 Zerilli-Armostrong(Z-A)本构模型[4]、MTS 本构模型)两大类。J-C 和 C-S 两种材料本构模型均为基于实验结果建立的经验性本构关系,其中 J-C 本构模型可以考虑应变率效应、应变强化和温度软化的影响,但忽略了 3 种因素的耦合作用;C-S 本构模型概念明确,以较为简单的形式考虑了应变率的影响,这两类本构模型在工程领域获得了较为普遍的应用。如 J-C 本构模型在结构抗爆炸、冲击领域受到了较多学者青睐[5-7],其中林莉等[7]对 Q235B 钢开展了 4 个系列的材性实验,结合数值模拟标定了 J-C 强度模型和 J-C 失效模型的参数,并在此基础上对这两类模型进行了适当修改,但其探讨的应变率范围较小,最大仅为 275 s^{-1},应用存在局限性。C-S 本构模型由于概念明确且形式简单,目前在船舶领域和钢结构抗冲击荷载领域也有较多应用[8-11],例如在文献[10-11]中,作者在对网壳结构和钢管的抗冲击有限元模拟中均使用了 C-S 本构模型,材料模型中的参数来源于文献[12]中对低碳钢的推荐数值,数据的来源及针对建筑结构钢的研究未见任何文献。与之相比,Z-A 本构模型基于热激活位错运动的本构关系,该类模型物理意义明确,考虑了材料的晶格结构的影响,如位错滑动、机械孪生、相变,同时该模型将应变率效应、应变强化和温度软化等因素影响进行耦合考虑,在航空航天和材料领域得到较多应用[13-15]。但由于其参数过多,在建筑结构抗冲击领域尚未有应用。综上可见,对 Q235B 钢在冲击荷载下的不同动态本构关系进行研究,并提出具体的数值模拟方法建议具有重要的工程价值。

* **收稿日期**: 2016-09-20; **修回日期**: 2017-02-14
基金项目: 国家自然基金面上项目(51478144);国家杰出青年科学基金项目(51525802);
中国地震局创新团队发展计划项目
第一作者: 支旭东(1977—),男,博士,博导; **通信作者**: 张 荣,zhangrong6636747@163.com。

本文中基于 Q235B 钢的动态材料性能万能材料试验机和霍普金森拉杆装置的系列实验，对实验数据进行整理分析，结合有限元程序 LS-DYNA，拟合建立了 J-C、C-S、Z-A 等 3 种本构模型，最后通过 Taylor 杆实验验证并讨论各模型的适用性。

1　LS-DYNA 中的材料本构模型

材料在冲击荷载下的响应按其产生的应力水平分为 3 个范围[16]，工程领域发生的碰撞冲击往往处于塑性变形级别，材料发生大变形、热效应及断裂失效等，其本构关系为一种复杂的非线性形式。M. A. Meyers[17]指出金属材料在高应变率下存在热激活滑移、黏性阻尼控制位错运动及相对论运动 3 种位错响应机制，其中涉及金属晶格结构在不同位错速度下的塑性变形形式、势垒类型等。

在有限元软件 LS-DYNA 中共有超过 200 种材料本构模型，而其中可以考虑金属材料应变率效应的本构模型有 13 种，同时考虑应变率效应、材料失效的本构模型有 7 种，同时考虑应变率效应、温度效应、材料失效的本构模型有 2 种[18]。在 LS-DYNA 材料库中这些本构模型主要被分为两类，即经验型本构方程和基于位错理论的半经验半理论本构方程。本文中基于 Q235B 钢的系列实验，对使用较为广泛的 3 种本构模型进行了拟合，分别为：MAT15 Johnson/Cook plasticity model、MAT24 piecewise linear plasticity (isotropic) model、MAT65 Zerilli-Armstrong (rate/temp plasticity) model。

2　实验方法及结果

试件选用直径 15 mm 的钢棒加工而成，为拟合得到上述 3 种本构方程，开展了高温拉伸、室温准静态拉伸、室温高应变率 SHTB 拉伸、Taylor 杆等 4 个系列实验，试件形状和尺寸如图 1 所示[7]。准静态拉伸和 SHTB 拉伸实验下，可近似认为试件处于一维应力状态，即 $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$，$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_1/2$，由此可知 $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_1$，$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_1$。高温拉伸和室温准静态拉伸实验在 Inston 5569 万能试验机上进行，SHTB 装置和 Taylor 杆装置详细说明参照文献[19]。试件照片及破坏后的典型图片如图 2 所示。

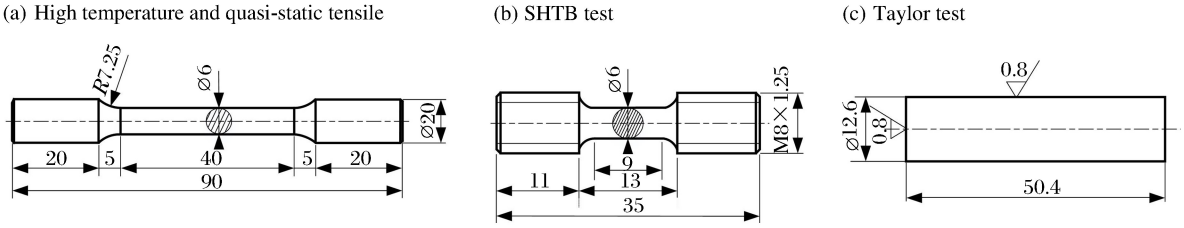


图 1　试件形状和尺寸(单位：mm)

Fig. 1　Geometry and dimensions of specimens(unit: mm)

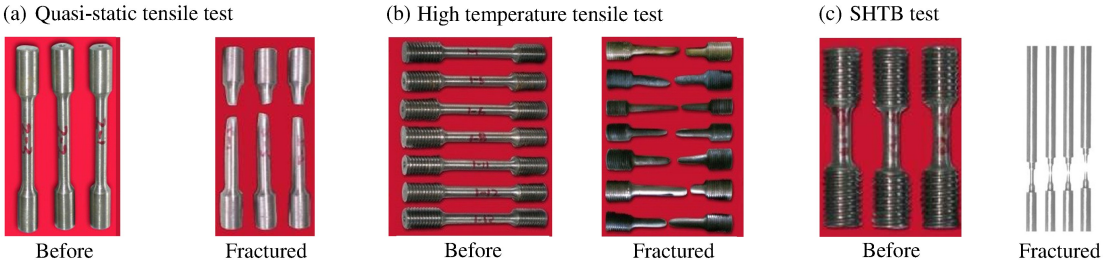


图 2　不同工况下拉伸原试件及破坏后试件

Fig. 2　Original and fractured conditions of specimens

图 3 为不同应变率下拉伸实验得到的真实应力应变曲线，忽略试件尺寸不同的影响；图 4 为不同温度下 Q235B 钢拉伸实验的真实应力应变曲线。由图 3～4 可知，Q235B 钢的流动应力对温度和应变率的变化都非常敏感。由图 3 可以看出，随着应变率的增加，Q235B 钢的屈服强度提高较大：在应变率为

0.008 s^{-1}时，钢材屈服强度为 310 MPa，当应变率为 1 756 s^{-1}时，屈服强度接近 700 MPa，提高了 1 倍；随着应变率的增加，钢材的塑性性能降低，由准静态时的 0.2 下降至 1 756 s^{-1}时的 0.14；由曲线的斜率可以看出，应变率对钢材的弹性模量影响不大。由图 4 可以看出，Q235B 钢的应力对温度变化非常敏感，呈现出显著的温度软化效应：常温下材料屈服应力约为 270 MPa，随着温度的升高屈服应力急剧下降，升温至 1 223 K 时，屈服应力降为 20 MPa；随着温度的升高，钢材的塑性性能提高，极限应变由常温时的 0.2 提高至 1 223 K 时的 0.5；由弹性段斜率可知，随着温度的升高，Q235B 钢的弹性模量降低。

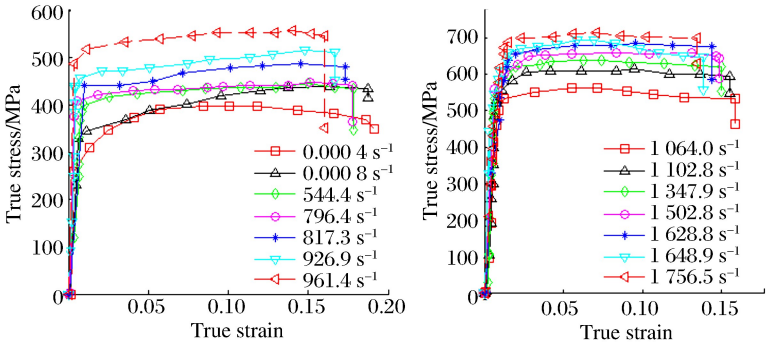


图 3 不同应变率下 Q235B 钢的真实应力应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curves of Q235B steel at different strain-rates

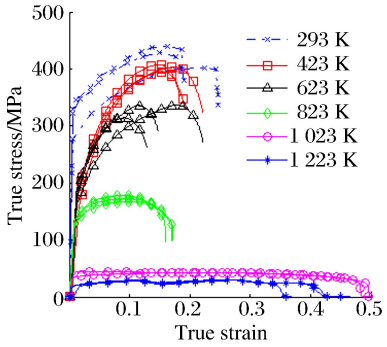


图 4 不同温度下 Q235B 钢的拉伸实验真实应力应变曲线

Fig. 4 True stress-true strain curves of Q235B steel at different temperatures

3 本构方程拟合

通过软件 MATLAB 采用最小二乘法根据上述 3 种材性实验获得的数据，对 Q235B 钢的动态本构进行拟合，拟合时选用的数据忽略了 3 种材性实验试件尺寸的影响。拟合本构模型选用在 LS-DYNA 有限元程序中较为常用的 3 种材料模型。

3.1 Johnson/Cook plasticity model 参数拟合

LS-DYNA 程序中该材料模型选用 Johnson-Cook 本构模型，该模型需要拟合的参数有 5 个，拟合后公式为：

$$\sigma_{\mathrm{eff}}=(3.06\times10^{8}+3.03\times10^{10}\ \bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}}^{0.013})(1+0.005\ 3\ln\dot{\varepsilon}^{*})(1-T^{*0.079}) \tag{1}$$

式中：σ_{eff} 为等效应力；$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}}$ 为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}^{*}$ 为量纲一等效塑性应变率，$T^{*}=(T-T_{\mathrm{r}})/(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{r}})$ 为量纲一温度，其中 T_{r}、T_{m} 分别为参考温度和材料的熔点，T 为当前温度。式(1)右边 3 项分别代表等效塑性应变、应变率和温度对流动应力的影响。

3.2 Piecewise linear plasticity (isotropic) model 参数拟合

LS-DYNA 中 24 号材料模型采用 Cowper-Symonds 本构方程对材料的应变率效应进行考虑，需要拟合的参数为 C、P。通过已获得的实验数据拟合后得到 $C=5\ 000$，$P=1.2$，拟合后的本构方程为：

$$\sigma_{\mathrm{eff}}(\varepsilon_{\mathrm{p,eff}},\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p,eff}})=\sigma_{\mathrm{s,y}}(\varepsilon_{\mathrm{p,eff}})\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p,eff}}}{5\ 000}\right)^{\frac{1}{1.2}}\right] \tag{2}$$

式中：σ_{eff} 为等效应力，$\varepsilon_{\mathrm{p,eff}}$ 为等效塑性应变值，$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p,eff}}$ 为等效塑性应变率，$\sigma_{\mathrm{s,y}}$ 为准静态应力。

3.3 Zerilli-Armstrong (rate/temp plasticity) model 参数拟合

该材料模型选用的本构方程为修正后的 Zerilli-Armstrong 本构方程。文献[20-21]指出，当 Z-A 模型适用于应变率在 $10^{2}\sim10^{4}$ 范围时，在该应变率范围内材料的压力较小，剪切模量和体积模量变化较小，故此处选用将 LS-DYNA 本构模型方程修正为：

$$\sigma_{\mathrm{eff}}=C_{1}+C_{2}\mathrm{e}^{(-C_{3}+C_{4}\ln(\dot{\varepsilon}^{*}))T}+C_{5}\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n} \tag{3}$$

该方程需要拟合的参数为 C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、n 共 6 项，拟合后的方程为：

$$\sigma_{\mathrm{eff}}=3.46\times10^{8}+2.4\times10^{7}\mathrm{e}^{(0.002\ 8+0.001\ 5\ln(\dot{\varepsilon}^{*}))T}+1.90\times10^{8}\varepsilon_{\mathrm{p}}^{0.289} \tag{4}$$

式中：σ_{eff} 为等效应力，$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为量纲一应变率，$\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率，ε_p 为累积塑性应变。

选取常温(293 K)时拟合后 3 种本构模型部分应变率下真实应力应变曲线与实验曲线进行对比，3 种模型误差均较小，如图 5 所示。由曲线对比可看出，J-C 本构模型在不同应变率下、不同应变时拟合误差均比较小；C-S 本构模型在材料应变率较小时吻合较好，随着应变和应变率的增大，误差逐渐增大；Z-A 本构模型拟合后精度随着应变率的增加而增加。

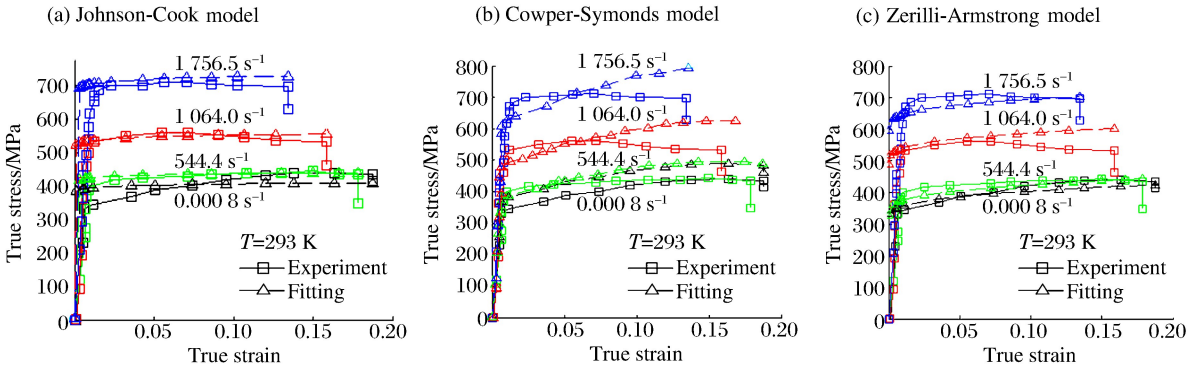


图 5　3 种本构方程拟合结果

Fig. 5　Fitted results of three constitutive functions

4　有限元分析及本构模型验证

Taylor 杆实验是 G. I. Taylor[22] 于 1948 年建立的一种估算材料动态屈服应力的实验方法，广泛应用于军事工程等领域。在 Taylor 杆实验中涉及较为宽泛的应变率范围，子弹存在镦粗、开裂、花瓣形式等 5 种不同的变形和失效模式[23]，合适的材料本构和断裂准则可对子弹的最终形态形成较好的预测。20 世纪 80 年代后，通过与数值模拟相结合，Taylor 杆实验主要用于材料动态本构关系及参数的验证[19,24-25]。

共开展了 6 组 Taylor 杆实验，试件材料与前文材性实验试件取自于同一根圆钢棒。实验发现在子弹撞击速度小于 225 m/s 时，子弹发生墩粗的变形模式；速度继续增加，子弹发生开裂。本构模型主要描述材料在失效前的应力应变行为，若实现对开裂的模拟需进一步探讨 Q235B 钢的断裂准则。在 LS-DYNA 中选用已拟合得到的 3 种本构模型进行 Taylor 杆实验的数值模拟。通过对子弹最终形态的测量将实验数据与数值模拟进行对比，对这 3 种本构模型的有效性进行验证，部分形态对比如图 6 所示。

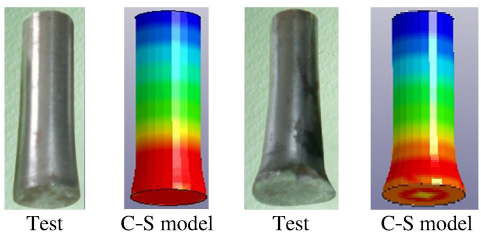


图 6　Taylor 杆实验与数值模拟形态对比

Fig. 6　Appearances as compared between simulation and Taylor test results

在整个撞击过程中，子弹的应变率逐渐降低，而应变率的值对本构的影响最大。要分析本构模型的正确性必须对撞击过程中子弹的应变率进行分析。由文献[17]，可对 Taylor 杆撞击中子弹的瞬时应变率进行估计，本文分析中选取整个持时的 1/4 时刻、1/2 时刻、3/4 时刻求取应变率，然后取该 3 个时刻应变率平均值，子弹应变率随撞击速度的变化如图 7 所示，应变率计算公式为：

$$\dot{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta L/L}{\Delta L/V} = \frac{V}{L} \tag{5}$$

由图 7 可以看出，在子弹撞击速度为 122 m/s 时，平均应变率已达到 1 000 s^{-1} 以上，随撞击速度的增加子弹变形应变率增加较大，撞击速度达到 290 m/s 时，平均应变率在 3 500 s^{-1} 左右；在这些数值模拟中，选用不同的材料模型应变率存在差别，在撞击速度较小的时候差别较大，随着撞击速度的增大，3

种材料模型的应变率水平逐渐接近。实验结束后,对试件的尺寸进行测量,主要测量子弹撞击结束后直径 D_F 及长度 L_F,并与数值模拟结果进行了对比。图 8 为测量尺寸的说明,表 1 为数据结果对比。

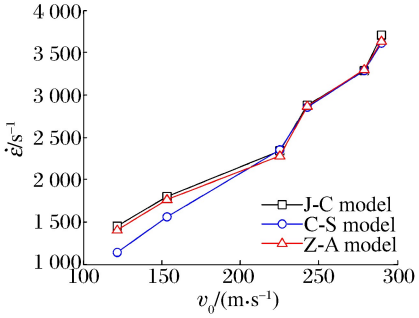


图 7 子弹应变率随速度变化曲线

Fig. 7 Strain-rate curves of projectile at different impact velocity

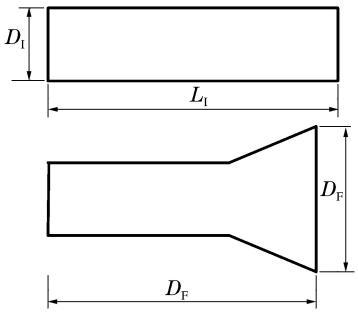


图 8 试件尺寸说明

Fig. 8 Dimensions of specimens

表 1 Taylor 杆数值模拟与实验对比

Table 1 Parameters as compared between simulation and Taylor test results

撞击速度	Taylor 杆实验			数值模拟				误差/%	
$v_0/(m\cdot s^{-1})$	L_F/mm	D_F/mm	变形模式	本构模型	L_F/mm	D_F/mm	变形模式	L_F	D_F
122.0	47.8	16.8	镦粗	C-S	48.2	15.9	镦粗	−0.8	5.3
				J-C	48.3	15.0	镦粗	−1.0	10.7
				Z-A	48.8	14.9	镦粗	−2.0	11.3
153.5	46.8	16.6	镦粗	C-S	47.4	15.8	镦粗	−1.2	4.8
				J-C	47.5	15.7	镦粗	−1.5	5.4
				Z-A	47.9	15.2	镦粗	−2.3	8.4
225.0	43.1	20.0	镦粗	C-S	45.1	17.4	镦粗	−4.6	13.0
				J-C	44.8	18.4	开裂	−3.9	8.0
				Z-A	45.3	17.2	镦粗	−5.1	14.0
242.5	42.7	22.3	开裂	C-S	43.4	19.6	开裂	−2.1	12.1
				J-C	43.5	20.9	开裂	−1.9	6.3
				Z-A	43.3	19.9	开裂	−1.4	10.8
279.0	38.9	26.1	开裂	C-S	40.3	23.1	开裂	−7.9	11.4
				J-C	40.0	24.1	开裂	−2.8	7.6
				Z-A	40.4	23.6	开裂	−3.8	9.6
290.0	38.5	26.8	开裂	C-S	39.9	23.7	开裂	−3.6	11.5
				J-C	39.2	24.5	开裂	−1.8	8.6
				Z-A	39.3	23.8	开裂	−2.1	11.1

在子弹发生开裂失效之前,其力学性能主要通过材料本构方程进行描述,即子弹速度小于 225 m/s 时,子弹发生墩粗变形。由表 1 可以看出,3 种材料模型均可模拟出子弹的变形模式,且对最终子弹长度的模拟误差均小于 5%,但对变形后直径模拟的误差稍大。当速度达到 242.5 m/s 时子弹开裂,断裂准则对子弹端部开裂形式影响较大,本文中未对断裂准则进行细致探讨。通过对试件长度和直径测量发现,3 种材料模型对其开裂后外形尺寸也具有一定的预测作用,但误差稍大于开裂之前的模拟。分析表明:C-S 本构模型在平均应变率小于 1 500 s^{-1} 时对子弹变形形态模拟精度高于 J-C 本构模型和 Z-A 本构模型;J-C 本构模型适用应变率的范围较大,在应变率大于 2 000 s^{-1} 时精度明高于 C-S 本构模型;Z-A 本构模型在不同的应变率下,其精度均不能达到最佳,且其拟合过程中参数较多,不推荐在工程中使用。

5 结　论

(1)通过常温准静态拉伸实验、高温拉伸实验、SHTP 实验 Q235B 钢进行了动态力学性能研究，发现 Q235B 钢的流动应力对温度和应变率的变化非常敏感，具有明显的高温软化和应变率强化效应。

(2)对有限元软件 LS-DYNA 中常用的 3 种材料模型 Cowper-Symonds 本构模型、Johnson-Cook 本构模型、Zerilli-Armstrong 本构模型进行了拟合得到了本构方程参数。

(3)通过 Taylor 杆实验对 3 种本构模型进行了验证分析，发现 Cowper-Symonds 本构模型在应变率小于 1 500 s^{-1}时可较好地适用于数值模拟，且参数较少，推荐在工程领域低速碰撞中使用；Johnson-Cook 本构模型适用应变率的范围较大，在应变率大于 2 000 s^{-1}时其精度大于 Cowper-Symonds 本构模型；Zerilli-Armstrong 本构模型物理概念较为明确，但其模拟精度在不同应变率下均不是最佳，且参数较多，不推荐在工程低速碰撞领域中使用。

参考文献：

[1] 杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 北京：清华大学出版社，2013.

[2] 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 seventh international Symposium on Ballistic. The Hague, 1983:541-547.

[3] COWPER G R, SYMONDS P S. Strin hardening and strain rate effect in the impact loading of cantilever beams [J]. Small Business Economics, 1957,31(3):235-263.

[4] 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.

[5] 邓高涛，王焕然，陈大年. 一种钢板材料动态拉伸本构方程确定以及试件尺度效应研究[J]. 工程力学，2014,31(1):236-242.
DENG Gaotao, WANG Huanran, CHEN Danian. Determination of dynamic tensile constitutive for steel sheet material and discussion of effects of specimen scale on experimental results engineering mechanic[J]. Engineering Mechanics, 2014,31(1):236-242.

[6] 于文静，史健勇，赵金城. Q345 钢材动态力学性能研究[J]. 建筑结构，2011,41(3):28-30.
YU Wenjing, SHI Jianyong, ZHAO Jincheng. Research of dynamic mechanical behavior of Q345 steel[J]. Building Structure, 2011,41(3):28-30.

[7] 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.

[8] 李营，李晓彬，吴卫国，等. 基于修正 CS 模型的船用低碳钢动态力学性能研究[J]. 船舶力学，2015,19(8):944-949.
LI Ying, LI Xiaobin, WU Weiguo, et al. Dynamic mechanic behavior of low-carbon steel on improved Cowper-Symonds models[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015,19(8):944-949.

[9] CHEN Z J, YUAN J H, ZHAO Y. Impact experiment study of ship building steel at 450 MPa level and constitutive model of Cowper-Symonds[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007,11(6):933-940.

[10] FAN F, WANG D, ZHI X, et al. Failure modes of reticulated domes subjected to impact and the judgment[J]. Thin-Walled Structures, 2010,48(2):143-149.

[11] 杨庆丰，张荣. 基于 LS-DYNA 圆钢管抗侧向冲击性能分析[J]. 低温建筑技术，2014,36(12):38-41.
YANG Qingfeng, ZHANG Rong. Study of the lateral impact of circular steel tubes based on LS-DYNA[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014,36(12):38-41.

[12] JONES N. Structural impact[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

[13] 蔡恒君，胡靖帆，宋仁伯，等. 800 MPa 级冷轧双相钢的动态变形行为及本构模型[J]. 工程科学学报，2016,38(2):213-222.
CAI Hengjun, HU Jingfan, SONG Renbo, et al. Constitutive model and dynamic deformation behavior of 800 MPa grade cold-rolled dual phase steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016,38(2):213-222.

[14] 张宏建,温卫东,崔海涛,等. Z-A 模型的修正及在预测本构关系中的应用[J]. 航空动力学报,2009,24(6):1311-1315.
ZHANG Hongjian, WEN Weidong, CUI Haitao, et al. Modification of Z-A model and the prediction of the constitutive model[J]. Journal of Aerospace Power, 2009,24(6):1311-1315.
[15] 彭建祥. 钽的本构关系研究[D]. 四川绵阳:中国工程物理研究院,2001.
[16] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1992.
[17] MEYERS M A. Dynamic behavior of materials[M]. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc., 1994.
[18] HALLQUIST J O. LS-Dyna theory manual[Z]. Michigan: LSTC, 2006.
[19] 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.
[20] 陈大年,王焕然,陈建平,等. 高加载率 SHPB 试验分析原理的再研究[J]. 工程力学,2005,22(1):82-87.
CHEN Danian, WANG Huanran, CHEN Jianping, et al. Re-examination of split Hopkinson pressure bar analyses at high loading rate[J]. Engineering Mechanics, 2005,22(1):82-87.
[21] CHEN Danian, FAN Chunlei, XIE Shugang, et al. Study on constitutive relations and spall models for OFHC copper under planar shock tests[J]. Journal of Applied Physics, 2007,101(6):063532-1-9.
[22] TAYLOR G I. The use of flat ended projectiles for determining yield stress I: theoretical considerations[J]. Proceedings of Royal Society of London: A, 1948,194:289-299.
[23] RAKVAG K G, BORVIK T, WESTERMANN I, et al. An experimental study on the deformation and fracture modes of steel projectiles during impact[J]. Materials & Design, 2013,51(5):242-256.
[24] WOODWARD R L, BURMAN N M, BAXTER B J. An experimental and analytical study of the taylor impact test[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(4):407-416.
[25] JOSEPH C F, 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.

Dynamic constitutive model of Q235B steel and its application in LS-DYNA

ZHI Xudong[1,2], ZHANG Rong[2], LIN Li[3], FAN Feng[1,2]
(1. *Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150090, *Heilongjiang, China*;
2. *School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150090, *Heilongjiang, China*;
3. *College of Civil Engineering and Architecture, Harbin University of Science and Technology, Harbin* 150080, *Heilongjiang, China*)

Abstract: In this work we conducted a quasi-static tensile test, a high temperature tensile test and a dynamic tensile test on Q235B steel, the most widely used in steel structures in China, using a multi-functional material testing machine and a split Hopkinson tension bar (SHTB) and, based on the test data obtained, fitted three frequently used material models, i. e. the Cowper-Symonds model, the Johnson-Cook model and the Zerilli-Armstrong model, in LS-DYNA. We then verified their validity by conducting Taylor impact tests. The results showed that Q235B steel was temperature and strain-rate sensitive, that the Cowper-Symonds model was applicable in low velocity impact simulations, that the Johnson-Cook model was suitable for simulations with a wider range of strain-rates, and that the Zerilli-Armstrong model was not recommendable for low velocity impact simulation.

Keywords: dynamic constitutive model; Q235B steel; strain-rate effect; Taylor bar

(责任编辑 曾月蓉)