

Experimental and Analytical Study of Vehicular High Strength Steel under High Strain Rate Loading

Lai Xinghua¹, Yin Bin¹

¹Suzhou Automobile Research Institute (Xiangcheng) of Tsinghua University, Suzhou, China, 215000

Abstract: Vehicular steel sheet has strain rate effect. The mechanical behavior of the material subjected to high strain rate tensile loading is important for vehicle crash simulation. Using hydraulic-servo high speed testing machine, the tension tests of high strength steel at the intermediate-to-high strain rate (0.1/s-500/s) were carried out. The obtained stress-strain curves from experiments were fitted with Swift-Hockett-Sherby hardening law, and the linear elastic plastic constitutive model was calibrated. Finite element simulation of the material under high rate tensile loading condition was performed in the virtual environment of LS-DYNA. Good correlation between test and simulation was achieved, showing the accuracy of the dynamic mechanical properties of the material obtained from tests and the reliability of the calibrated material model.

Keywords: High strength steel; Dynamic tension; Strain rate; Finite element

车用高强钢高应变率拉伸的试验与仿真方法研究

赖兴华¹, 尹斌¹

¹清华大学苏州汽车研究院(相城), 苏州, 中国, 215000

摘要: 汽车用钢材料具有应变率效应, 整车碰撞模拟需要考虑材料在高应变率下的拉伸力学性能。本文基于液压伺服高速拉伸试验机, 对某合金高强钢进行了中高应变率(0.1/s-500/s)动态拉伸试验。使用 Swift-Hockett-Sherby 硬化准则对材料应力-应变曲线进行拟合外推, 标定了可用于有限元仿真的线弹塑性本构模型。使用 LS-DYNA 软件进行了材料高应变率拉伸模拟, 验证了材料动力学属性数据的准确性和所标定的材料模型的可靠性。

关键词: 高强钢; 动态拉伸; 应变率; 有限元

1 引言

汽车碰撞过程是一个瞬时的动态过程, 在典型的汽车正面碰撞测试中车身材料的应变率可达 500s^{-1} 甚至更高^[2]。因此, 车身材料的动态大变形力学行为研究对于车身安全设计中合理的材料选择和材料分布设计具有重要的指导意义。动态载荷下材料表征, 尤其是中高应变率下材料力学行为测试与模拟是行业研发和应用的难点^[3]。一方面, 材料高应变率下测试经常出现力信号的振荡, 这个振荡现象的发生依赖于测试系统的质量和刚度的匹配。提升测试系统的固有频率可以提高信号振荡发生的应变率上限^{[4][5]}。另一方面, 材料高速测试经常是在极端的时间尺度内发生大变形, 这要求变形测量系统具备较快响应速度及较高的采样频率, 基于图像处理数字图像相关法比较适合材料高应变率测试变形测量^[6]。此外, 高速测试中载荷测量和变形测量需要同步进行, 否则可能导致力信号和位移信号匹配不准确, 导致材料力学响应失真。国内外许多学者都对高强钢动力学性能及相关试验方法开展了大量的试验研究^{[7][13]}。

在获得真实准确的材料高应变率力学性能响应基础上, 还需要对试验数据进行仔细处理, 包含计算工程应力应变和真实应力应变, 以及选择合适的硬化准则对不同应变率下材料的颈缩段力学响应进行拟合外推。Thompson^[14]对 DDQ, DP600, HSLA350 三种材料的板材和管材分别进行了多种应变率下的拉伸试验, 采用 Johnson-Cook, Zerilli-Armstrong 等模型进行了参数拟合与仿真探究。殷为洋^[15]等人使用优化方法标定了高强钢 DP600 的 Johnson-Cook(JC)模型参数, 研究高强钢的应变率效应。有限元仿真软件里对材料应变率的模拟也

有多种方法，选择含应变率本构模型的好处是不同应变率下材料曲线不会发生交叉，其不足是仅需要使用一小部分试验数据对本构模型的标定，丢失了大部分试验信息。选择直接输入不同应变率下材料应力应变曲线是最直接而充分的应变率模拟方法，但需要注意应变率范围要涵盖研究对象在应用过程中的响应，且不同应变率下应力应变曲线不同交叉，否则可能导致仿真计算不稳定。

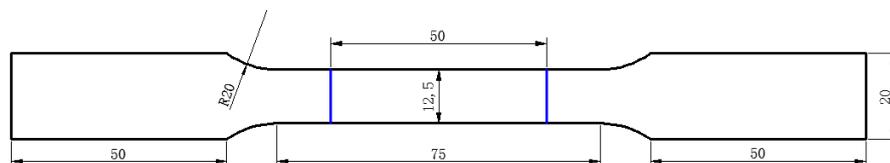
精确的有限元仿真是高强钢材料在汽车上应用的前提。为保证有限元仿真的准确性，要求所输入的材料模型能够准确地描述材料的力学行为。相关的工作包括材料力学试验、数据处理以及输入曲线的拟合、材料卡标定。本文以某主机厂提供的一种合金高强钢材料为研究对象，借助液压伺服高速拉伸试验机测试系统，开展了7种不同应变率下的单向拉伸试验。根据不同应变率测试条件选取合适的载荷测量方法，使用高速相机拍摄试验试样变形过程，使用数字图像相关法(digital image correlation, DIC)计算材料应变全场。通过试验获得了高强钢的应力应变曲线。使用 Swift-Hockett-Sherby 硬化准则对材料应力-应变曲线进行拟合外推，标定了可用于有限元仿真的线弹性本构模型。最后，基于非线性动态显示求解平台 LS-DYNA，将标定的仿真材料卡应用于材料单向拉伸模拟对标，验证了试验数据和材料模型的准确性。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

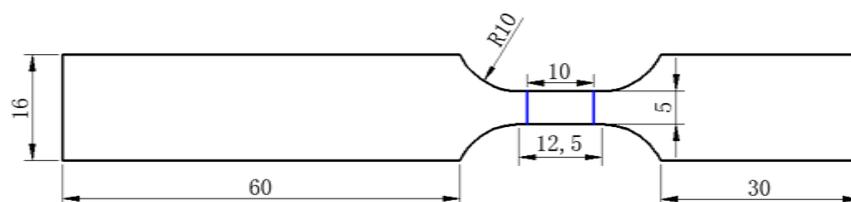
本试验中的所有试件均是从厚度为 1.2 mm 的冷轧钢板上获得，加工方式为线切割，加工时试件长度方向与钢板轧制方向一致，加工过程中保证低温，防止温度对材料性能产生影响。

单向拉伸试件如图 1 所示，试件按照准静态（应变率 0.001 s^{-1} ）和动态（应变率 0.1 s^{-1} 、 1 s^{-1} 、 10 s^{-1} 、 100 s^{-1} 、 200 s^{-1} 和 500 s^{-1} ）分为两类，对应平行段长度分别为 75 mm 和 12.5 mm。



(a) Uniaxial tensile specimen drawing test long 75 mm(Quasi-static test)

(a) 测试段长 75 mm 的单向拉伸试件图纸（准静态）



(b) Test 12.5 mm long uniaxial tensile specimen drawings(Dynamic test)

(b) 测试段长 12.5 mm 的单向拉伸试件图纸（动态）

Figure1 .Details of the tensile test specimens (Unit: mm)

图 1.单向拉伸试件图纸（单位：mm）

2.2 试验方法

针对准静态与动态试验分别采用了万能试验机与 Zwick 高速拉伸试验机进行测试，试验设备如图 2 所示。准静态试验（Static）在万能试验机上进行，可直接从试验机上获得载荷数据。动态试验均在 Zwick 高速拉伸试验机上完成，其中低应变率 0.1 s^{-1} 、 1 s^{-1} 和 10 s^{-1} ，可直接从试验机上获得载荷数据；对于高应变率 100 s^{-1} 、 200 s^{-1} 和 500 s^{-1} ，为降低测量噪声及系统震荡，采用粘贴应变片的方式。贴片试件需要通过准静态试验下的

标定试验，建立电压-载荷之间的关系，即获得比例系数。高应变率试验中，将动态应变仪采集到的应变片电压信号乘以标定的比例系数，即可得到对应载荷值。

试验过程中的应变信息采用数字图像相关法（DIC）获取，试件表面需点上散斑，并采用高速相机对试验过程进行记录，通过 VIC-2D 软件进行计算，获取试验相关信息。

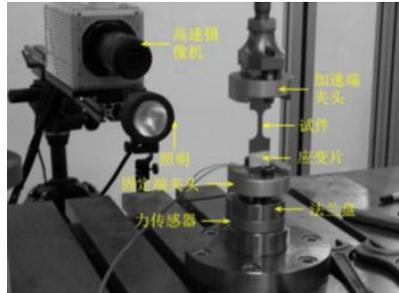


Figure2. Zwick/Roell HTM5020 hydraulic testing machine
图 2.Zwick 高速拉伸试验机

3 数据处理

对于高强钢的单向拉伸试验，原始数据为准静态试验万能试验机记录的载荷数据、低应变率高速拉伸试验机记录的载荷数据、高应变率动态应变仪记录的电压信号（即载荷数据，需乘以标定的比例系数）和高速摄像采集的图像（即试件的变形信息，需经过 VIC-2D 软件处理）。

不同采集系统采样频率往往并不相同，需要通过时间插值的方式将载荷数据及应变数据整合到一起，再通过一定计算即可获取试验应力-应变曲线。通过载荷测量与应变测量（高速摄像+非接触图像处理）同步同频采集，对载荷曲线简单处理，即可获得应力-应变曲线。

3.1 工程应力-应变曲线

载荷除以试件初始横截面积得到工程应力（也称名义应力），非接触测量可以同时获得轴向应变和横向应变。该高强钢工程应力-应变曲线如图 3 所示，随着应变率的提高，该高强钢的应力水平和应变硬化特性均发生显著变化，屈服强度和抗拉强度显著提高，表现出非常明显的应变率敏感性。

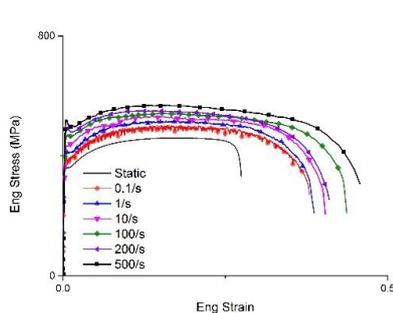


Figure3. Comparison of engineering stress-strain curves
图 3.不同应变率下材料的工程应力-应变曲线

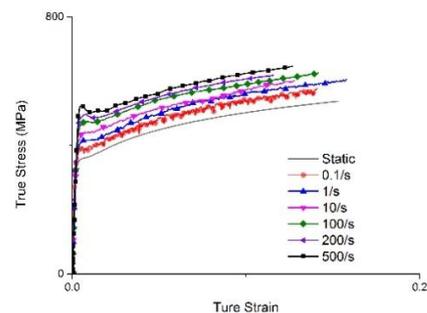


Figure4. Comparison of true stress-strain curves
图 4.不同应变率下材料的真实应力-应变曲线

3.2 真实应力-应变曲线

真实应变使用公式 $\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$ 计算获得，真实应力使用公式 $\sigma_T = \sigma (1 + \epsilon)$ ，其中 σ 、 ϵ 分别为工程应力、工程应变。

4 真实应力-塑性应变曲线拟合

4.1 屈服点至颈缩点间曲线的提取

考虑到颈缩现象的存在，典型高强度钢板材拉伸试验过程可分为四个阶段：弹性阶段、强化阶段、分散型颈缩阶段及局部颈缩阶段^[16]。实际应用中，发生局部颈缩的材料已无实用价值，故在金属板材成形等过程中以颈缩的出现作为许用变形的极限。由颈缩段的定义可知，分散型颈缩的起始点对应于载荷-位移曲线的峰值（即工程应力-工程应变曲线峰值点），因此可以通过寻找工程应力-工程应变峰值点的方法确定颈缩起始点。此外，以所产生的塑性应变达 0.2%时的应力值作为屈服起始点。屈服点至颈缩点间的试验结果是真实的单向拉伸状态力学行为，通常作为真实的材料曲线进行输入。

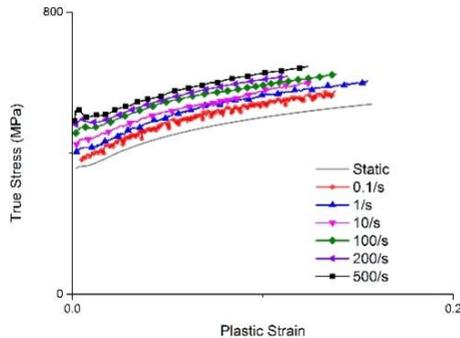


Figure5. True stress-plastic strain curves
图 5.屈服点至颈缩点间真实应力-塑性应变曲线

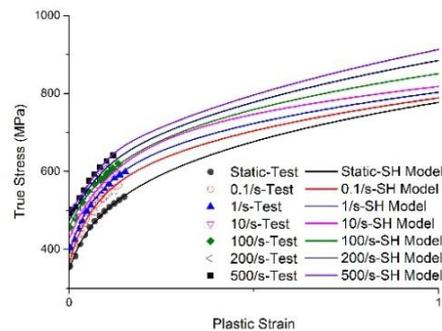


Figure6. Experimental data and the model correlation
图 6.试验曲线与拟合曲线对比

单向拉伸下的塑性应变可以通过以下公式计算：

$$\bar{\varepsilon}^P = \varepsilon_T - \frac{\sigma_T}{E} \quad (1)$$

其中， ε_T 为真实应变， σ_T 为真实应力，E 为杨氏模量。

通过以上方法处理之后的各应变率下屈服点至颈缩点间的应力-塑性应变曲线如图 5 所示。

4.2 有限元输入曲线平滑与拟合

通过上述方法处理获取的屈服点至颈缩点间的真实应力-塑性应变曲线直接用于有限元仿真可能会带来数值上的不稳定，有必要对曲线进行平滑处理再用于有限元仿真。通常曲线平滑的方法有平均平滑、低通滤波等，但在曲线变化相对复杂时，这些方法往往会严重改变曲线的变化趋势，无法真实地反映材料本身的特性。

对于钢、铝合金等常用金属材料，通常选用特定的材料本构模型对曲线进行拟合，在平滑曲线的同时，也很好地保留了材料的力学特性。通常采用的硬化准则^[17]有：Hollomon 准则、Ludwik 准则、Swift 准则、Voce 准则、Hockett/Sherby 准则、Gosh 准则以及综合考虑多种模型的 Swift-Hockett/Sherby 准则。其中 Ludwik、Swift 和 Gosh 整体塑性硬化偏硬，尤其是 Ludwik 硬化准则；Voce、Hockett/Sherby 和 Hollomon 相对偏软，尤其是 Voce 硬化准则几乎没有塑性硬化段，易提前发生颈缩和断裂。由于 Swift 模型拟合偏强，Hockett-sherby 拟合偏弱，本文采用加权组合的 Swift 和 Hocketty 的硬化模型，引入一个权重系数，综合考虑 Swift 模型和 Hockett-sherby 模型的作用（以下简称 SH 模型）。使用 Matlab 编程，程序能同时对多个应变率的试验曲线进行同步拟合外推，如上图 6 所示。由此获得的真实应力-塑性应变可直接输入到有限元中进行仿真分析。

$$\sigma = (1-\alpha)\{C \cdot (\varepsilon_{p1} + \varepsilon_D)\} + \alpha \left[\sigma_{Sat} - (\sigma_{Sat} - \sigma_i) e^{-\alpha \varepsilon_{p1}} \right] \quad (2)$$

5 有限元模拟对标

为验证试验数据和拟合获取的真实应力-塑性应变曲线的有效性，通过 LS-DYNA 软件对试验材料进行了有

有限元模拟仿真分析。考虑到材料模型对网格尺寸的敏感性，采用实体单元对试样进行网格划分，有限元模拟试件尺寸与实际试件相同（参见图 1（b））。参照试验条件，试件左端固支，右端采用 *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION 对试件加载（输入速度曲线）。通过在平行段设置横截面 *DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE 定义拉伸载荷输出，同时在标距段两端选取两个节点，定义 *DATABASE_HISTORY_NODE，通过计算这两个节点的相对位移获得拉伸变形，并将仿真获得的载荷对位移曲线和试验进行比对完成对标。

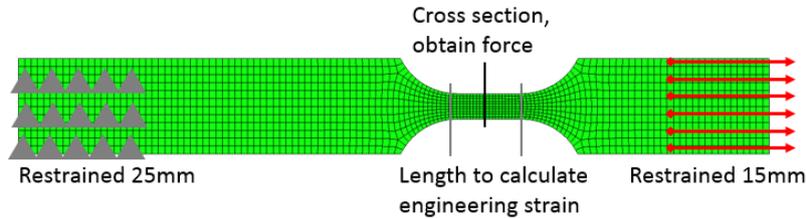


Figure7. Finite element of the specimen used in the high-speed tensile test
图 7. 有限元模型网格划分及边界条件

模型采用 LS-DYNA 24 号材料卡 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 描述高强钢材料力学特性，为考察材料的应变率效应对模拟结果的影响，分别使用 *DEFINE_TABLE 和 *DEFINE_CURVE 方法输入一组应变率下的多条流动应力-塑性应变曲线，及单条某个应变率下的流动应力-塑性应变曲线。依据输入流动应力-塑性应变曲线，分 3 种情况（1、输入完整的多个应变率的流动应力-塑性应变曲线；2、只输入 200s-1 应变率的流动应力-塑性应变曲线；3、只输入 0.001s-1 应变率的流动应力-塑性应变曲线）对 200s-1 应变率情况进行模拟，并与试验数据进行对标，模拟对标结果如图 8 所示。

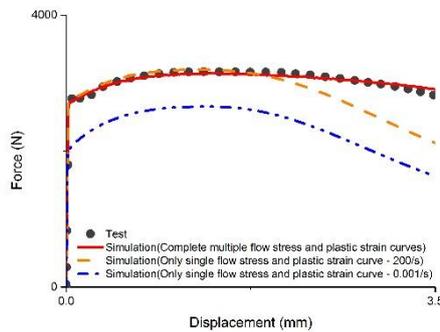


Figure8. Comparison of tensile force-Displacement-200/s
图 8. 200s-1 应变率下模拟对标结果

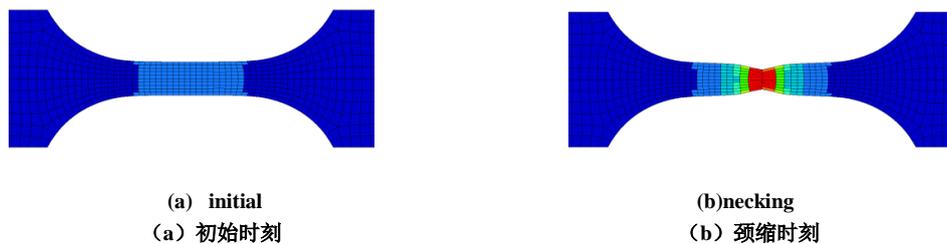


Figure 9. Effective plastic strain nephogram
图 9. 有效塑性应变云图

模拟对标结果显示，输入完整的多个应变率的流动应力-塑性应变曲线，仿真获取的载荷位移曲线与试验吻合较好，从而验证了试验测试方法和数据处理方法的合理性及所获得的不同应变率下应力应变曲线的准确性和可靠性；当不考虑应变率效应，仅输入 200s-1 应力应变曲线得到模拟结果在峰值载荷前与试验曲线对比合理，但略显偏强，且提前发生颈缩，软化趋势明显。仅输入 0.001s-1 应变率的流动应力-塑性应变曲线模拟结果和试验曲线相比整体偏小 20% 左右。因此，在汽车碰撞模拟中需要准确考虑材料的应变率效应对结果的影响，仅输入材料的准静态力学数据或仅输入某个应变率的试验曲线无法准确预测材料在动态大变形下的力学特性。

6 应变率相关本构模型研究

目前最为常用的率相关塑性模型是著名的 Johnson-Cook 模型^[18]（以下简称 JC 模型），

$$\bar{\sigma} = [A + B\varepsilon_p^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_p^0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (3)$$

其中， $\dot{\varepsilon}_p$ 是塑性应变率， $\dot{\varepsilon}_p^0$ 是参考应变率， T 是温度， T_r 和 T_m 分别是室温和材料熔点， A 、 B 、 C 、 n 和 m 为 JC 模型五个待定参数。JC 模型将应变强化效应、应变率效应和温度效应三者作为相互独立的量进行了描述。本文研究中，暂不考虑温度对材料力学性能的影响，JC 模型简化为：

$$\bar{\sigma} = [A + B\varepsilon_p^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_p^0} \right) \right] \quad (4)$$

模型中的应变强化项已被独立为 Ludwik 准则，类似于本文中采用的 Swift 准则和 Hockett-sherby 准则。其次，模型中的应变率效应项，常用的表达式有 Cowper-Symonds 模型^[19]（以下简称 CS 模型），

$$f_{rate}^{CS} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{c_1} \right)^{c_2} \quad (5)$$

其中， c_1 和 c_2 为待定参数。

Table1. Parameters of different strain rate effect models
表 1 不同应变率效应模型拟合参数

Model	A	B	n	C	C_1	C_2
JC	342.03	629.99	0.605	0.0183	-	-
CS				-	9.99e6	0.137

为了更好地分析材料的应变率效应，提取每组应变率下 10% 塑性应变（接近颈缩）所对应的流动应力，采用不同应变率效应模型对该高强度材料试验结果进行表征，拟合参数如表 1 所示，不同应变率效应模型拟合曲线如图 10 所示。

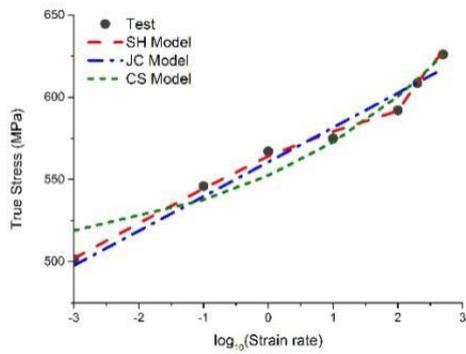


Figure10. Strain rate effect and different fitting curves

图 10.应变率效应及不同应变率模型拟合曲线

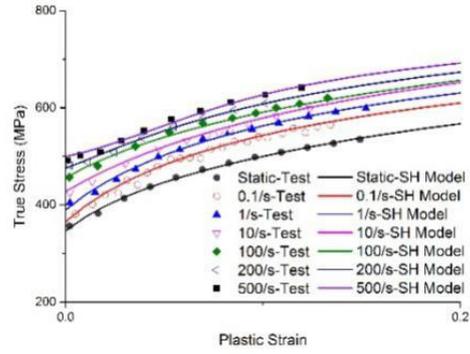


Figure11. Comparison of fitting curves between test and SH model

图 11. 试验曲线与 SH 模型拟合曲线对比

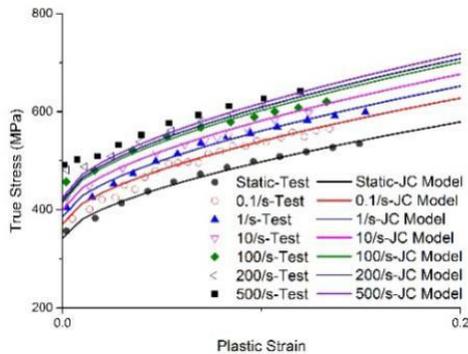


Figure12. Comparison of fitting curves between test and JC model

图 12.试验曲线与 JC 模型拟合曲线对比

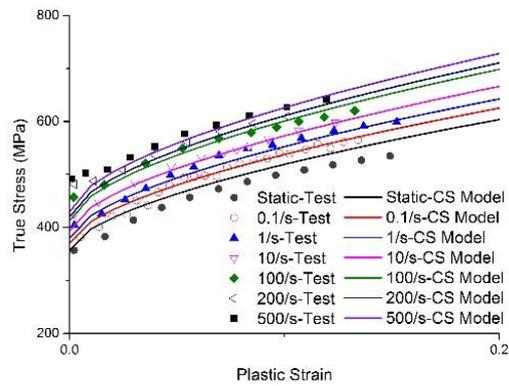


Figure13. Comparison of fitting curves between test and CS model

图 13.试验曲线与 CS 模型拟合曲线对比

采用上述两种应变率效应模型和本文采用的 SH 模型进行试验材料表征，3 种模型拟合曲线如上图 11-图 13 所示。JC 模型在对数横坐标下为一直线，无法很好地描述本文研究材料的应变率效应。CS 模型精度较高，尤其在低应变率范围内，可以很好地覆盖试验数据点，但相对中、低应变率范围表征一般，准静态情况下明显高于试验数据点。本文采用的 SH 模型能够同时较好地表征从低到高的整个应变率范围。

为考察三种模型对模拟结果的影响，针对准静态低应变率（0.001/s）和动态高应变率（200/s）进行仿真模拟，并与试验数据进行对标，模拟对标结果如图 14-图 15 所示。

模拟对标结果显示，采用本文选用的 SH 模型进行仿真，对于低应变率（0.001/s）和高应变率（200/s）获取的载荷位移曲线与试验吻合均较好，明显优于 JC 模型和 CS 模型。从而验证了试验测试方法和数据处理方法的合理性及所获得的不同应变率下应力应变曲线的准确性和可靠性。

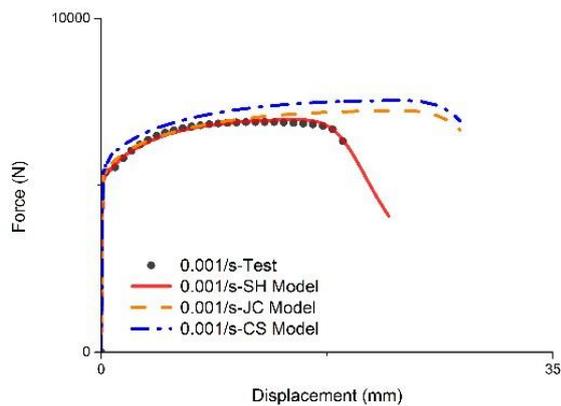


Figure14. Comparison of tensile force-Displacement-0.001/s

图 14. 0.001s-1 应变率下模拟对标结果

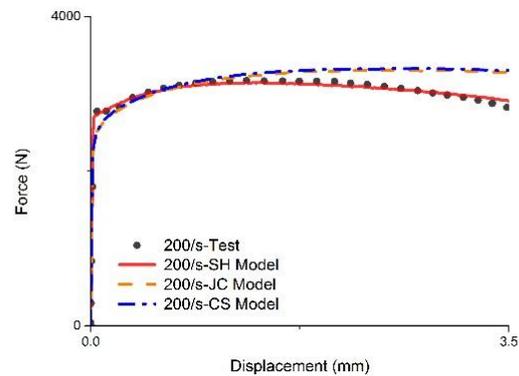


Figure15. Comparison of tensile force-Displacement-200/s

图 15. 200s-1 应变率下模拟对标结果

7 总结

本文对一种合金高强钢板材进行了 7 个应变率水平的高速拉伸试验，获得一组多应变率水平的真实应力-塑性应变曲线，标定了弹塑性材料模型，通过仿真分析，验证了试验数据和材料模型的准确性。

(1) 参考标准进行动态拉伸试验，获取材料相关参数（杨氏模量、屈服强度、抗拉强度等），并通过相关公式计算出真实应力-真实应变曲线；

(2) 通过确定屈服点、颈缩点，提取屈服点至颈缩点间的真实应力-塑性应变曲线；

(3) 采用 Swift-Hoockett-Sherby 本构模型，对提取的曲线进行拟合外插，获取可直接输入有限元仿真的真实应力-塑性应变曲线；

(4) 采用线弹塑性本构模型，进行有限元仿真分析，并与常用的 HC 模型和 CS 模型进行结果对比，验证了本文所采用的 SH 模型的优越性及试验数据和材料模型的准确性。

参考文献 (References)

- [1] ITABASHI M, KAWATA K. Carbon content effect on high-strain-rate tensile properties for carbon steels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000(24): 117-131.
- [2] Tarigopula V, Langseth M, Hopperstad O S, et al. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(5): 847-882.
- [3] J.E. Field, S.M. Walley, W.G. Proud, H.T. Goldrein, C.R. Siviour, Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies, International Journal of Impact Engineering, Volume 30, Issue 7, August 2004, Pages 725-775
- [4] Yong Xia, Juner Zhu, Kai Wang, Qing Zhou, Design and verification of a strain gauge based load sensor for medium-speed dynamic tests with a hydraulic test machine, International Journal of Impact Engineering, Volume 88, February 2016, Pages 139-152
- [5] Yong Xia, Juner Zhu, Qing Zhou, Verification of a multiple-machine program for material testing from quasi-static to high strain-rate, International Journal of Impact Engineering, Volume 86, December 2015, Pages 284-294
- [6] Kentaro Sato, Qiang Yu, Jiro Hiramoto, Toshiaki Urabe, Akihide Yoshitake, A method to investigate strain rate effects on necking and fracture behaviors of advanced high-strength steels using digital imaging strain analysis, International Journal of Impact Engineering, Volume 75, January 2015, Pages 11-26
- [7] S Oliver, G Fourlaris, T B Jones. Dual Phase versus TRIP strip steels: a comparison of dynamic properties for automotive crash performance [J]. Materials Science and Technology. 2007. 23(4): 423-431.
- [8] WEI X.C. XIE Q. AND FU R.Y., etc. To study the dynamic tensile deformation behavior of TRIP steel [J]. Journal of materials science and technology, 2008, 16 (5) : 625-630.
韦习成, 谢群, 符仁钰, 等. TRIP 钢的动态拉伸变形行为研究 [J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(5): 625-630.
- [9] TIAN D.C. LI D.Y. AND PENG Y.H. etc. DP780 dynamic deformation mechanical behavior of high strength steel plate study [J]. Journal of plastic engineering, 2008, 15 (6) : 103-106
田成达, 李大永, 彭颖红, 等. DP780 高强钢板动态变形力学行为研究 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15(6): 103-106.
- [10] HU M, HAN F, and Li Q, etc. To study the dynamic mechanical properties and fracture behavior of identity [J]. Journal of forging technology, and practices of 2012:116-121.
胡猛, 韩飞, 李茜, 王婷, 林少挺, 周青. 高强钢动态力学性能及断裂行为研究 [J]. 锻压技术, 2012, 06: 116-121.
- [11] ZHU C. Q, XU C, HE Y. L., etc. High dynamic mechanical properties of TRIP steel [J]. Journal of Beijing university of science and technology,

2014, 11:189-193.

朱超群,徐超,何燕霖,朱娜琼,李麟. 高强 TRIP 钢的动态力学性能[J]. 北京科技大学学报,2014,02:189-193.

- [12] HUY. Z. LIU X, and HUANG J, etc. A method of identity of dynamic mechanical properties test and application [J]. Science, technology and engineering, 2014, 28:130-134.
胡远志,刘西,黄杰,冯擎峰,刘卫国. 一种高强度钢动态力学特性测试方法与应用[J]. 科学技术与工程,2014,28:130-134.
- [13] MENG X.M, XIE S.G, FANG R, and QIAO S.H. B340-590 dp dual phase dynamic deformation behavior of high strength steel [J]. Journal of iron and steel research, 2015 practices: 51 -55.
孟宪明,谢书港,方锐,乔胜华. B340-590DP 双相高强度钢板的动态变形行为[J]. 钢铁研究学报,2015,06:51-55.
- [14] Thompson A C. High Strain Rate Characterization of Advanced High Strength Steels [D]. Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo, 2006.
- [15] YIN W.Y, WANG H,and FENG H, etc. High strength steel material parameters based on RBF - HDMM reverse [J]. China mechanical engineering, 2014, 20:2801-2805
殷为洋,王琥,冯慧,李恩颖,汤龙. 基于 RBF-HDMM 的高强度钢材料参数反求[J]. 中国机械工程,2014,20:2801-2805.
- [16] Zhang Z L, Hauge M, et al. Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(23): 3497-3516.
- [17] Patrick Larour. Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain [D]. aus Villeneuve la Garenne, Paris, 2010.
- [18] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures The Hague, Netherlands: International Ballistics Committee, 1983.
- [19] Cowper G R, Symonds P S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams. DTIC Document, 1957.