

CR1200/1800HS 汽车热成形钢高应变速率力学性能和材料模型分析

杨 浩¹, 杨兴国^{1,2}, 韩中海³

(1. 重庆工商职业学院 智能制造与汽车学院, 重庆 401520; 2. 武汉理工大学 汽车工程学院, 湖北 武汉 430070;
3. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要: 以 1800 MPa 级车身用热成形钢 CR1200/1800HS 为研究对象, 开展了其在动态载荷下的力学性能与本构模型的研究。首先, 获取了 6 种应变速率下热成形钢的力学性能, 并分析了关键参数的变化规律。然后, 采用 Voce+ 和 Hockett-Sherby 混合硬化模型获得了基准应变速率的有效应力-塑性应变的外延曲线, 采用胀形试验与仿真对标, 获取了混合模型的最优参数, 并与各应变速率变化系数进行耦合, 获取高应变速率材料模型。最后, 采用车门防撞梁落锤冲击试验与仿真对比分析验证了模型的精度。结果表明: CR1200/1800HS 钢的应变速率敏感性较低; 高应变速率材料模型部分点位有效应力与试验对比偏差最大值小于 3%; 仿真获得的载荷-位移曲线与试验结果一致, 关键参数偏差在 5% 以内, 而采用准静态材料模型的偏差则在 9% 左右。结果表明所搭建的高应变速率模型精度较高, 为此类碰撞分析提供了参考。

关键词: 热成形钢; 高应变速率; 碰撞; 材料模型; 落锤冲击

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.030

中图分类号: TG142.1; U465.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 02-0242-08

Analysis on mechanical properties and material model under high strain rate for CR1200/1800HS automobile hot formed steel

Yang Hao¹, Yang Xingguo^{1,2}, Han Zhonghai³

(1. College of Intelligent Manufacturing and Automobile, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China;
2. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: For 1800 MPa grade hot formed steel CR1200/1800HS for automotive body, its mechanical properties and constitutive model under dynamic loading were researched. Firstly, the mechanical properties of hot formed steel were obtained under six kinds of strain rates, and the variation laws of key mechanical parameters were analyzed. Then, the effective stress-plastic strain extension curve of the reference strain rate was obtained by using Voce+ and Hockett-Sherby hybrid hardening model, and the optimal parameters of the hybrid model were obtained by using bulging test and simulation benchmarking, which coupled with various strain rate variation coefficients to obtain the high strain rate material model. Finally, the accuracy of the model was verified by comparing and analyzing the impact test of door anti-collision beam and the simulation. The results show that the strain rate sensitivity of CR1200/1800 HS steel is relatively low. The maximum deviation of the effective stress at certain points of the high strain rate material model compared with the test is less than 3%. The load-displacement curve obtained from simulation is consistent with the test results, and the deviation of the key parameters is within 5%, while the deviation using the quasi-static material model is about 9%. The results indicate that the accuracy of the high strain rate model constructed is high, which provides a reference for such collision analysis.

Key words: hot formed steel; high strain rate; collision; material model; drop hammer impact

热成形钢是利用高温加热后快速成形, 又迅速冷却降低温度来提高材料强度, 材料的屈服强度超

过 1000 MPa, 而抗拉强度可以达到 2000 MPa, 在具有超高强度的同时, 还保留了一定量的钢板韧性^[1]。此类材料被应用于白车身框架结构件上, 如门环、地板横梁、中通道等, 极大提升了车身的碰撞安全性, 给车内人员提供了更好的保护。在碰撞、冲击等动态外载荷作用下, 材料所呈现出的力学特征与静态过程中的存在较大差异, 其存在一定的应变速率敏感性, 而热成形钢的基体组织为马氏体, 作为硬质相, 其与残余奥氏体、铁素体等组织存在

收稿日期: 2024-09-24; 修订日期: 2024-12-26

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202304013, KJQN202404004)

作者简介: 杨 浩 (1989-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 727366124@qq.com

通信作者: 杨兴国 (1986-), 男, 博士研究生, 讲师

E-mail: wuyuewu111@126.com

较大的差异^[2], 因此, 热成形钢在动态载荷下的力学性能与传统双相钢、增强成形双相钢等存在较大差异。选取屈服强度为 1800 MPa 的车用热成形钢 CR1200/1800HS 开展高应变速率力学性能和本构模型研究, 为此类安全设计和分析提供参考。

学者们对热成形钢开展了多方面的研究。冯毅等^[3]对微合金化 1.8 GPa 热成形钢与传统普通成分热成形钢开展从材料到零件级的安全性能测评, 结果表明: 微合金化材料具有更加明显的安全性优势和抗碰撞侵入及碰撞吸能性能; 武欣等^[4]对 CR950/1300HS 钢的静态和高应变速率下的力学性能进行测试, 构建了应变速率相关的混合本构模型, 并基于车身 B 柱侧面碰撞进行验证, 表明关键点应力与实测结果误差小于 5%, 优于采用其他模型的结果; 路洪洲等^[5]开展了不同铝硅镀层热成形钢零件的落锤冲击测试评价, 采用碰撞断裂指数分析零件抗开裂能力, 结果发现: 随着热成形钢的极限尖冷弯角度增大, 碰撞断裂指数值显著提高; 朱建琳等^[6]对车身热成形钢进行了不同应力三轴度下的试验研究, 获取了材料的基本力学特性, 提出了一种获取待优化参数初始值并采用不同应力三轴度区间开展模型系数优化的方法, 从而验证了模型参数的正确性; 张思婉等^[7]基于修正后的强度等效公式, 对汽车 B 柱原材料进行热成形钢替换设计, 采用整车侧碰试验对轻量化效果进行验证, 在保证成形性和安全性的前提下, 实现材料厚度由 2.2 mm 降低至 1.6 mm, 轻量化减重达 27.3%。分析发现热成形钢应用于轻量化、碰撞、失效等领域的研究较多, 集中在 1300 和 1500 MPa 强度级, 而对 1800 MPa 级热成形钢的高应变速率特性的研究则较少。

本文选取 1800 MPa 级车身用热成形钢 CR1200/1800HS 开展高应变速率力学特性和本构模型研究。对材料的基体组织和静态拉伸力学性能进行分析; 基于液压伺服高速拉伸试验机, 对 6 种应变速率下的材料力学性能开展测试, 并对屈服强度、抗拉强度、断后伸长率及强塑积等关键参数变化进行分析; 基于应变速率的幂函数关系, 获取材料的应变速率敏感性指数变化; 采用 Voce+和 Hockett-Sherby 混合硬化模型获得基准应变速率外延曲线, 采用胀形试验与仿真对标, 获取混合模型的最优参数; 将混合硬化模型与各应变速率变化系数进行耦合, 获得不同应变速率的外延曲线, 并对部分点位的有效应力与试验值进行对比, 验证高应变速率材料模型的准确性; 采用车门防撞梁落锤冲击试验与仿真对比分

析, 对高应变速率模型和准静态模型的仿真结果进行对比分析, 验证所搭建材料模型在零件碰撞仿真分析时的精度。

1 材料组织和静态力学性能

选取厚度为 1.4 mm 的 CR1200/1800HS 钢材料为研究对象, 其经过热处理和冷却后, 屈服强度 ≥ 1200 MPa, 抗拉强度 ≥ 1800 MPa, 材料的断后伸长率不低于 5%^[8]。原材料在 950 °C 加热炉内保温 3 min, 取出后水冷淬火处理, 沿着板材轧制方向进行制样, 经过镶样、粗抛、精抛等工序后, 采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对试样抛光表面进行腐蚀, 利用 JEM 2100 透射电子显微镜对材料组织进行观察, 显微组织如图 1 所示。

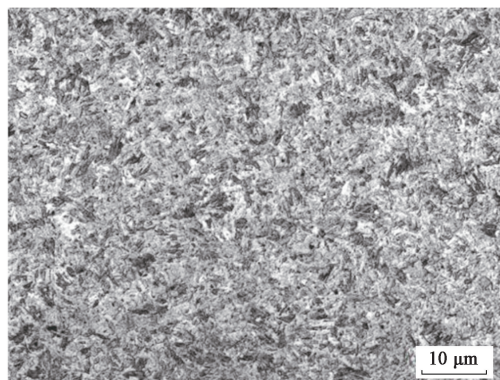


图1 CR1200/1800HS 钢的显微组织

Fig. 1 Microstructure of CR1200/1800HS steel

由图 1 可知, 材料的基体组织为全马氏体组织, 并呈现板条状分布, 这保证了材料在热成形后具有较高的强度和硬度。

根据 GB/T 228.1—2021^[9], 分别沿钢板轧制方向 (0°)、45° 夹角方向 (45°) 和垂直于轧制方向 (90°), 采用线切割设备加工 A50 力学拉伸试样, 试样尺寸如图 2 所示。采用 Zwick 电子万能拉伸试验机, 开展不同方向的静态力学性能拉伸测试, 获得工程应力-工程应变曲线如图 3 所示, 提取关键力学性能参数如表 1 所示。

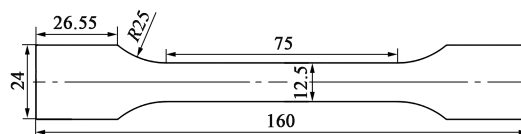


图2 静态拉伸试样尺寸

Fig. 2 Static tensile specimen sizes

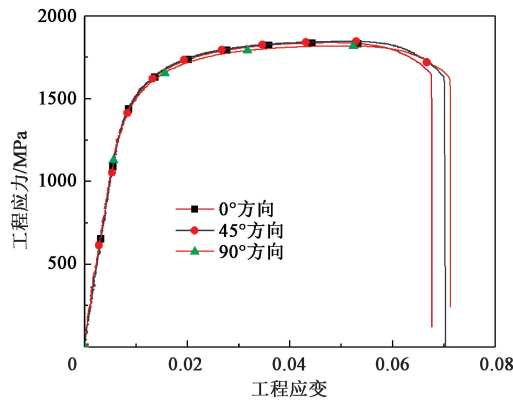


图3 CR1200/1800HS 钢的工程应力-工程应变曲线
Fig. 3 Engineering stress-engineering strain curves of CR1200/1800HS steel

表 1 CR1200/1800HS 钢的关键力学性能参数

Table 1 Key mechanical property parameters of CR1200/1800HS steel

方向	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
0°	1482.71	1841.10	6.76
45°	1504.72	1847.65	7.03
90°	1482.03	1820.63	7.13
平均值	1489.82	1836.46	6.97

由测试结果可知，材料无明显的屈服平台，3个方向的性能基本一致，屈服强度的平均值为1489.82 MPa，抗拉强度的平均值为1836.46 MPa，断后伸长率的平均值为6.97%，热处理后的强度较高，同时满足性能指标要求，可以开展下一步高应变速率性能测试。

2 高应变速率下力学性能

2.1 试验测试

材料的高应变速率性能反映了材料在高速冲击、碰撞等动态载荷作用下所呈现出的性能特征，因此，对CR1200/1800HS钢的高速拉伸力学性能进行分析。选用与前述相同的热处理方式，获取测试用料片。根据GB/T 30069.2—2016^[10]，选用Instron VHS 160/100-20 液压伺服型高速拉伸试验机开展测试，该设备的最大载荷为100 kN，试样的拉伸速度范围为0.1~20 m·s⁻¹，选用的应变速率为0.001、0.1、1、10、100和500 s⁻¹。采用激光切割设备加工测试试样，试样的平行段方向沿着钢板的轧制方向，试样尺寸如图4所示。

试验测试过程中，在平行段喷涂黑白散斑，配

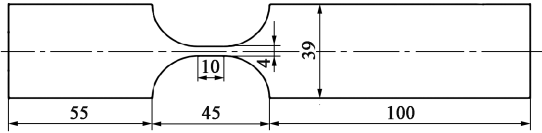


图4 高速拉伸测试试样尺寸
Fig. 4 Specimen sizes for high-speed tensile test

合DIC（Digital Image Correlation）高速照相机及图像处理系统，获取应变的变化。而载荷的测试，则根据不同的应变速率匹配不同的测试方式，低应变速率（≤10 s⁻¹）时，通过设备自带的压电传感器进行测量；而当应变速率>10 s⁻¹时，由于薄板测试的哑铃振荡作用，为尽量减少对测试结果的影响，需要在试样加持端、塑性变形较小的区域黏贴应变片，测量试样拉伸过程中载荷的变化。试验在常温环境下进行，每个应变速率重复3次测试。

通过测试系统图像处理和参数转换，获取各应变速率下的工程应力-工程应变曲线如图5所示，提取关键力学性能参数如表2所示。

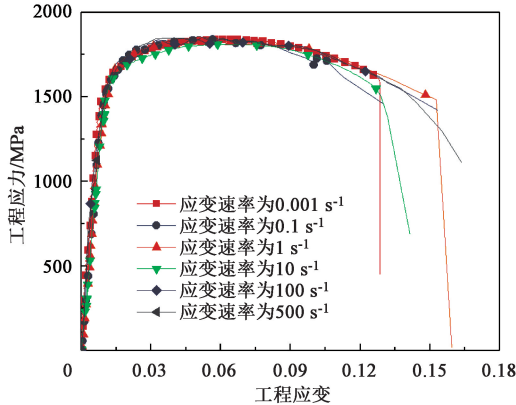


图5 不同应变速率下CR1200/1800HS 钢的工程应力-工程应变曲线
Fig. 5 Engineering stress-engineering strain curves of CR1200/1800HS steel under different strain rates

表 2 不同应变速率下CR1200/1800HS 钢的关键力学性能参数

Table 2 Key mechanical property parameters of CR1200/1800HS steel under different strain rates

应变速率/ s ⁻¹	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	屈强比	断后伸长 率/%	强塑积/ (GPa·%)
0.001	1512.72	1834.65	0.825	11.24	20.63
0.1	1530.56	1869.80	0.819	13.23	24.73
1	1537.52	1875.92	0.820	14.15	26.55
10	1563.21	1894.97	0.825	14.36	27.20
100	1589.76	1945.17	0.817	15.55	30.24
500	1601.96	1991.09	0.805	16.57	33.00

根据表2中的关键力学性能参数，绘制关键力学性能参数随应变速率的变化曲线，如图6所示。

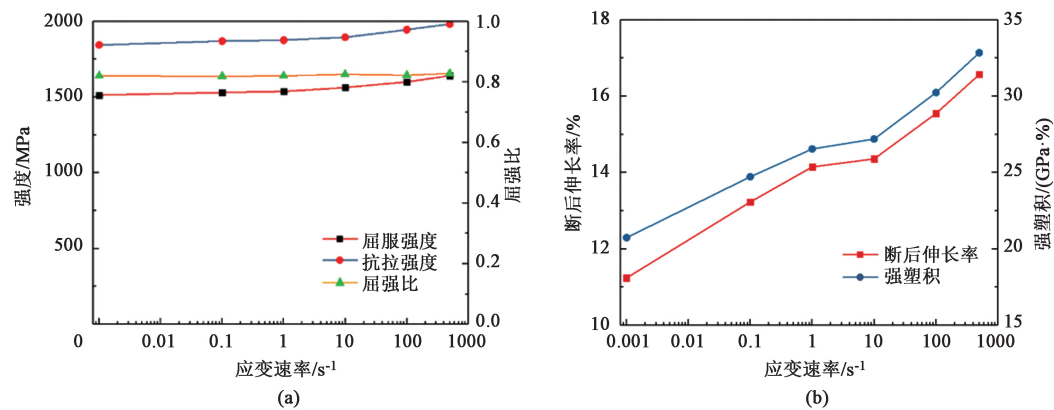


图 6 CR1200/1800HS 钢关键力学性能参数随应变速率的变化曲线
(a) 强度和屈服比 (b) 断后伸长率和强塑积

Fig. 6 Change curves of key mechanical property parameters for CR1200/1800HS steel with stain rate
(a) Strengths and yield ratio (b) Elongation after fracture and product of strength and plasticity

由不同应变速率下的测试结果可以发现，随着应变速率的增加，材料的强度和塑性均有一定程度的增加，表现出一定的应变速率敏感性。材料的屈服强度由 1512.72 MPa 增加至 1601.96 MPa，增幅达到 90 MPa，增大约 6.0%；而抗拉强度则由 1834.65 MPa 增加至 1991.09 MPa，增加幅度超过 156 MPa，增大约 8.5%。抗拉强度对应变速率的敏感性略高于屈服强度，究其原因主要是材料内部的基体组织主要为马氏体组织，随着应变速率增加，内部组织位错运动的塞积现象越来越严重，造成位错运动越来越困难，从而使得组织的强度升高，应变速率越高，这种现象越明显。

同时可以发现，材料的断后伸长率也随着应变速率的增加而增大，整体呈现逐渐增加的趋势，由 11.24% 增加至 16.57%，增大约 47.5%；对比可知，在 100、500 和 1000 s⁻¹ 时的增加幅度明显高于低应变速率，呈现出明显的应变速率敏感性。而表征金属材料强韧性水平的强塑积，则表现出与断后伸长率相同的变化趋势，整体呈现增大趋势。

2.2 应变速率敏感性指数

金属材料拉伸过程中，应力可表示为应变速率的幂函数关系式^[11]，写作：

$$\sigma = A_0 \cdot \dot{\epsilon}^m$$
 (1)

式中： σ 为工程应力； A_0 为材料常数； $\dot{\epsilon}$ 为应变速率； m 为应变速率敏感性指数。

对式 (1) 取对数，并进行微分得到：

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}}$$
 (2)

应变速率敏感性指数 m 值表征任意拉伸应力对应变速率的敏感性，由应力的对数与应变速率的对

数求导而得。

将测试所得的不同应变速率下的工程应力-工程应变曲线，根据工程值与真实值转变公式，获取不同应变速率下的真实应力-真实应变曲线。分别取真实应变为 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、5.0%、7.0% 和 9.0% 时所对应的真实应力值，根据式 (2)，绘制 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 曲线，如图 7 所示。

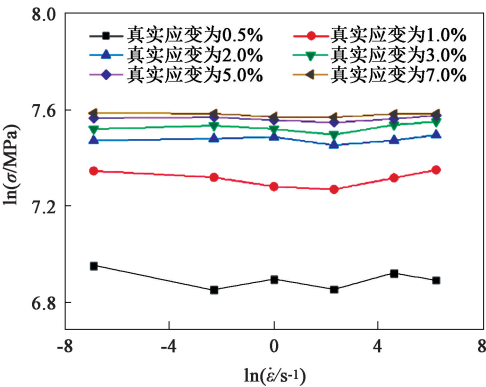


图 7 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$

将图 7 所示的曲线进行线性回归，曲线的斜率即为 m 值，结果如表 3 所示，其中 R^2 为回归平方和与总平方和的比值。

表 3 应变速率敏感性指数取值

Table 3 Values of stain rate sensitive index		
真实应变/%	m 值	R^2
0.5	0.00011	0.9322
1.0	0.00013	0.9367
2.0	0.00022	0.9463
3.0	0.00015	0.9501
5.0	0.00028	0.9439
7.0	0.00036	0.9538

由图 7 和表 3 可知,随着真实应变增加,应变速率敏感性指数也发生了变化,整体呈现增强的趋势,但指数的数值均较小,材料的整体应变速率敏感性较低,这与前述分析结果一致。

3 高应变速率材料模型

根据获得的不同应变速率下的真实应力-真实应变曲线,剔除弹性段,并将真实应变平移至 0 点,即获得有效应力-塑性应变曲线^[12],采用 Voce+和 Hockett-Sherby 混合硬化模型对曲线进行外延。

Voce+本构方程为:

$$\sigma_v = R_{el} + a[1 - \exp(-b\varepsilon)] + c\varepsilon^{0.5} \quad (3)$$

式中: σ_v 为 Voce+拟合应力; ε 为塑性应变; R_{el} 为屈服强度; a 、 b 、 c 为待拟合系数。

Hockett-Sherby 本构方程为:

$$\sigma_{HS} = R_{el} + d[1 - \exp(-e\varepsilon^f)] \quad (4)$$

式中: σ_{HS} 为 Hockett-Sherby 拟合应力; d 、 e 、 f 为待拟合系数。

Voce+和 Hockett-Sherby 混合硬化模型本构方程为:

$$\sigma_{VHS} = \alpha\sigma_v + (1 - \alpha)\sigma_{HS} \quad (5)$$

式中: σ_{VHS} 为 Voce+和 Hockett-Sherby 混合模型拟合应力; α 为加权系数。

采用 Voce+和 Hockett-Sherby 混合硬化模型对有效应力-塑性应变曲线进行外延拟合,为得到更加精确的拟合结果,采用胀形试验与仿真对标进行系数标定。选取厚度为 1.4 mm 的料片,加工为 180 mm×180 mm 的试样,表面清洗后,喷涂黑白散斑;采用 BUP 1000 板材综合成形试验机进行测试,压边力设置为 700 kN,凸模的运行速度设置为 1 mm·s⁻¹;同时,基于 HyperWorks 和 LS-DYNA 搭建仿真分析模型,材料性能采用 MAT 24 弹塑性材料模型进行定义,其材料密度为 7.85 g·mm⁻³,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,中心部位发生变形区域的网格尺寸设置为 0.5,固定区域的网格尺寸设置为 1;以试验和仿真的载荷-位移曲线重合度最高作为目标,获取最优的硬化模型参数和加权系数值。试验和仿真残样及载荷-位移曲线对比如图 8 所示。

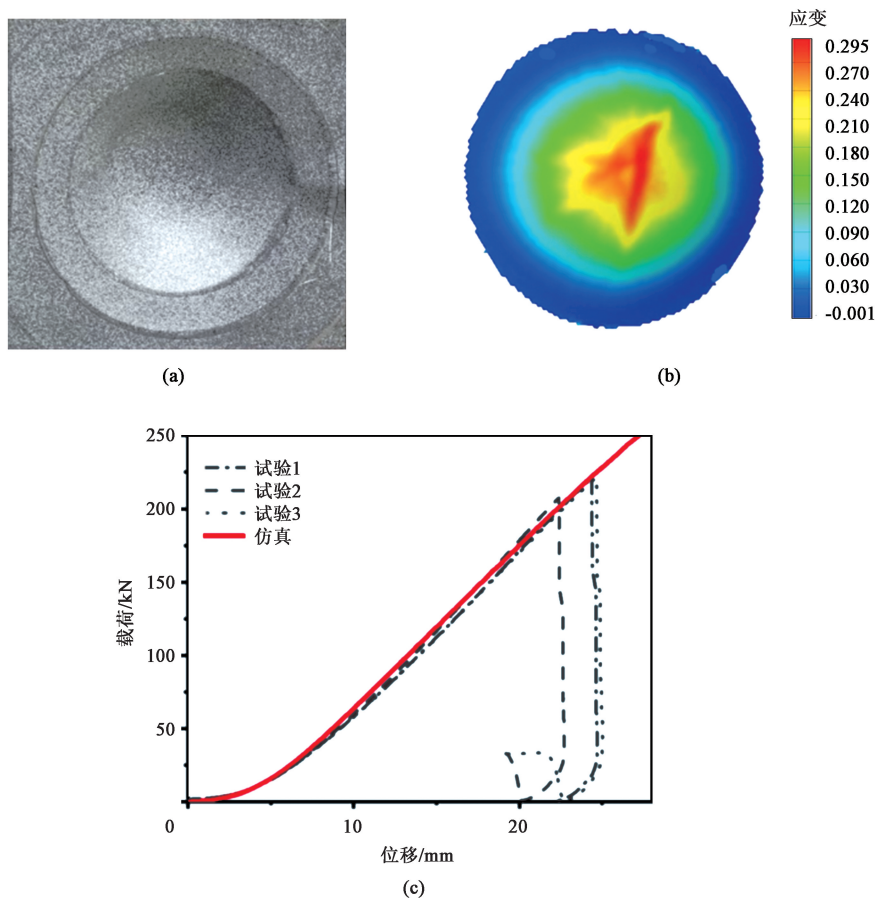


图 8 试验和仿真分析结果对比

(a) 试验后残样 (b) 仿真分析残样 (c) 载荷-位移曲线

Fig. 8 Comparison between test and simulation analysis results

(a) Residual sample after test (b) Residual sample of simulation analysis (c) Load-displacement curves

当载荷-位移曲线的重合度最高、特征值偏差最小时，即获得最优材料参数模型和加权系数，此时的特征值偏差如表 4 所示。

表 4 最优参数时载荷-位移曲线特征值偏差 (%)
Table 4 Deviation of characteristic values of load-displacement curves with optimal parameters (%)

试样	相同位移时的载荷	最大载荷
1	2. 69	0. 33
2	3. 18	3. 10
3	3. 14	1. 61
平均值	3. 00	1. 68

由图 8c 和表 4 可知，材料模型的预测精度较高，相同位移时载荷的偏差平均值为 3.00%，而最大载荷偏差的平均值为 1.68%，偏差较小，此时即获得 0.001 s^{-1} 应变速率下的外延曲线模型。对于其他高应变速率曲线的拟合，根据所获得的各应变速率下的有效应力-塑性应变曲线，获取相对于基准应变速率 (0.001 s^{-1}) 的变化系数 C_i ：

$$C_i = \frac{\sum_{i=1}^5 B_i \cdot \dot{\varepsilon}_i^{m_i}}{B_0 \cdot \dot{\varepsilon}_0^{m_0}} \quad (6)$$

式中： $\dot{\varepsilon}_0$ 为基准应变速率， $\dot{\varepsilon}_0 = 0.001\text{ s}^{-1}$ ； $\dot{\varepsilon}_i$ 为当前应变速率， $i = 1 \sim 5$ ，分别为 0.1、1、10、100 和 500 s^{-1} ； B_0 为基准应变速率的应力-应变拟系数； B_i 为当前应变速率的应力-应变拟系数； m_0 为基准应变速率对应的应变速率敏感性指数； m_i 为当前应变速率对应的应变速率敏感性指数。

利用 Voce+和 Hockett-Sherby 混合硬化模型获得的基准应变速率外延曲线，与变化系数进行耦合，即得到不同应变速率的外延曲线，可写作：

$$\sigma_i = [\alpha \sigma_v + (1 - \alpha) \sigma_{\text{HS}}] \times C_i \quad (7)$$

式中： σ_i 为当前应变速率获得的真实应力。

根据式 (7)，获得高应变速率材料模型，所得不同应变速率下的有效应力-塑性应变拟合曲线如图 9 所示。

提取 0.001 和 500 s^{-1} 试验和拟合模型中部分点位的有效应力值进行对比，结果如表 5 所示。

由表 5 可知，外延模型拟合曲线的预测精度较高，在应变速率为 0.001 和 500 s^{-1} 的曲线中，部分点位的有效应力偏差最大值小于 3%。通过曲线和部分点位的有效应力对比可以发现，材料的应力虽然有一定程度的增加，但增加幅度较小，应变速率敏感性较弱。

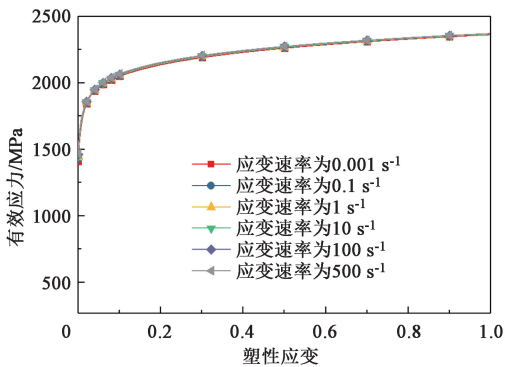


图 9 不同应变速率下有效应力-塑性应变拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of effective stress-plastic strain under different strain rates

表 5 试验和模型中部分点位的有效应力偏差分析
Table 5 Analysis of effective stress deviation at some points for test and model

塑性应变	应变速率为 0.001 s^{-1}			应变速率为 500 s^{-1}		
	试验/MPa	模型/MPa	偏差/%	试验/MPa	模型/MPa	偏差/%
	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%
0.02	1757.76	1804.17	2.64	1799.47	1840.34	2.27
0.03	1843.98	1892.96	2.66	1902.78	1914.10	0.59
0.05	1931.12	1947.19	0.83	1952.16	1980.48	1.45
0.07	1970.50	2001.92	1.59	1963.95	2012.98	2.50

4 车门防撞梁落锤冲击试验

拟合获取材料高应变速率模型曲线的目的在于开展碰撞仿真分析^[13]，因此，需要对模型的精度进行验证，这里采用 CR1200/HS1800 钢车门防撞梁落锤冲击试验对所获取的材料模型进行验证。

落锤冲击测试过程中，试样两端采用跨距为 480 mm 的支座进行支撑，支座上端的圆柱直径为 $\Phi 30\text{ mm}$ ，所采用的落锤质量为 130 kg，落锤下端的圆弧直径为 $\Phi 225\text{ mm}$ ，落锤提升的高度为 1.5 m，保证冲击的速度达到 $5.5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时，基于 HyperWorks 和 LS-DYNA 搭建零件落锤冲击仿真分析模型，材料性能参数采用 MAT 24 弹塑性材料模型进行定义。其中，材料力学性能曲线采用如图 9 所示的不同应变速率的外延曲线，而对比模型的材料定义则采用 0.001 s^{-1} 应变速率下的准静态外延曲线。试验台和仿真模型如图 10 所示。试验后的试样如图 11 所示。

提取整个过程中车门防撞梁的载荷-位移曲线，如图 12 所示。提取最大载荷和最大载荷时的位移进行对比，结果如表 6 所示。

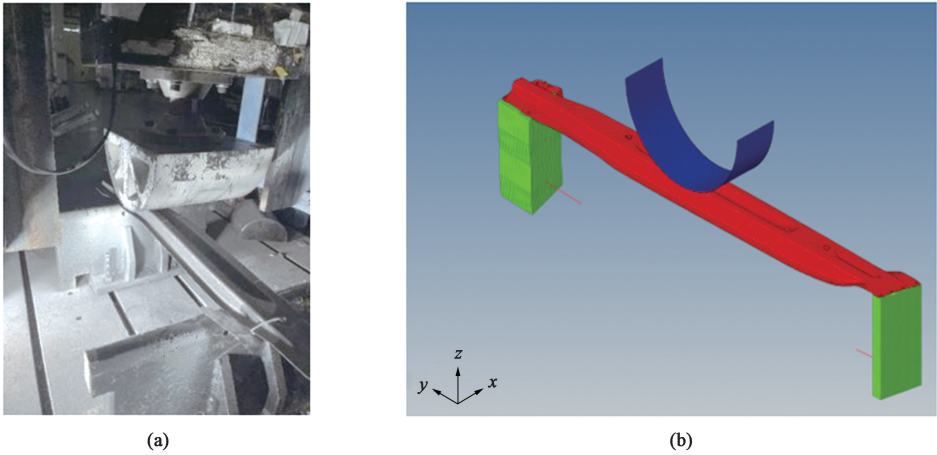


图 10 车门防撞梁落锤冲击试验台 (a) 和仿真模型 (b)
Fig. 10 Bench (a) and simulation model (b) of drop hammer impact test for door anti-collision beam

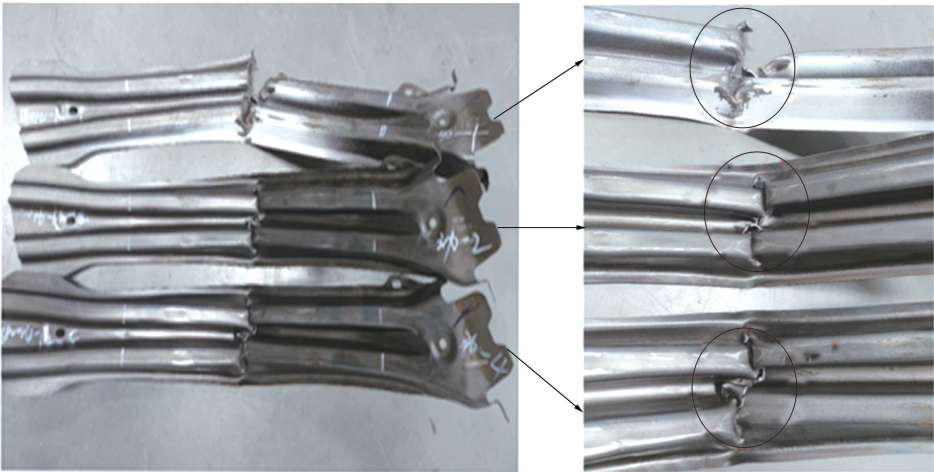


图 11 试验后试样
Fig. 11 Samples after test

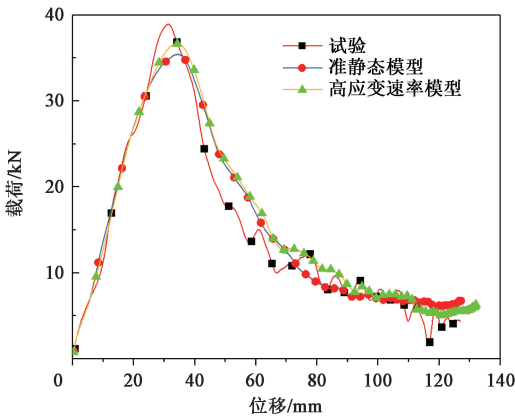


图 12 车门防撞梁的载荷-位移曲线
Fig. 12 Load-displacement curves of door anti-collision beam

由图 12 和表 6 可知, 所搭建仿真模型获取的载荷-位移曲线与试验测试曲线基本保持一致。对比关键力学性能参数偏差可知, 采用高应变速率材料

表 6 车门防撞梁的最大载荷和最大载荷时的位移偏差对比
Table 6 Deviation comparison of maximum load and displacement at maximum load for door anti-collision beam

方案	最大载荷/ N	偏差/%	最大载荷时的 位移/mm	偏差/%
试验	38557.04	—	31.72	—
准静态模型	35435.97	8.81	34.00	7.53
高应变速率模型	36977.85	4.27	33.17	4.58

本构模型仿真获得的偏差在 5% 以内, 模型精度较高, 为此类碰撞仿真分析提供了材料模型参考。而采用准静态材料模型仿真获得的偏差在 9% 左右, 精度略低于高应变速率模型, 但这种差距较小, 究其原因主要为 CR1200/HS1800 钢的应变速率敏感性较低, 高应变速率的应力值相对准静态时的增幅较小。同时, 对比可以知道, 试验测试结果的最大

载荷高于仿真分析结果,究其原因主要为在零件加工过程中,出现了一定的加工硬化作用,使得材料性能得到一定提升,而这最终呈现在零件的承载特性方面。因此,可以根据实际分析精度要求,采用准静态的材料性能进行碰撞仿真分析。

5 结论

(1) CR1200/1800HS 钢的基体组织为全马氏体组织。随着应变速率的增加,材料的强度和塑性均有一定程度的增加,表现出一定的应变速率敏感性;抗拉强度增幅约为 8.5%,幅度较小;断后伸长率则增加约 47.5%,呈现出明显的应变速率敏感性。

(2) 随着应变增加,CR1200/1800HS 钢的应变速率敏感性指数呈现增加的趋势,但数值较小,材料的整体应变速率敏感性较低。

(3) 利用 Voce+和 Hockett-Sherby 混合硬化模型获得的基准应变速率外延曲线,与变化系数进行耦合,获得不同应变速率下的外延曲线,部分点位有效应力对比偏差最大值小于 3%,高应变速率材料模型的拟合精度较高。

(4) 车门防撞梁落锤冲击试验与仿真分析的载荷-位移曲线基本保持一致,采用高应变速率材料本构模型获得关键力学参数的偏差在 5%以内,而采用准静态材料模型的偏差在 9%左右。所搭建的高应变速率模型的精度较高,为此类碰撞分析提供了参考。

参考文献:

- [1] 王鹏程,赵桢,路洪洲,等. 超高强度热成形钢研究进展及展望 [J]. 中国冶金, 2023, 33 (11): 12-28.
Wang P C, Zhao Y, Lu H Z, et al. Research progress and prospect of ultra-high strength hot-formed steel [J]. China Metallurgy, 2023, 33 (11): 12-28.
- [2] 许伟,方刚,张钧萍,等. 面向汽车碰撞安全的热成形钢断裂失效表征与验证 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6): 121-128.
Xu W, Fang G, Zhang J P, et al. Fracture failure characterization and verification of hot forming steel for vehicle crash safety [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 121-128.
- [3] 冯毅,黄光杰,路洪洲,等. 微合金化超高强度热成形车门防撞梁性能验证 [J]. 汽车工艺与材料, 2023 (8): 29-37.
Feng Y, Huang G J, Lu H Z, et al. Performance verification of microalloyed ultra high strength for hot stamped door crash beam [J]. Automobile Technology & Material, 2023 (8): 29-37.
- [4] 武欣,方正,李国. 1300 MPa 级热成形钢高应变速率本构模型分析 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (7): 118-126.
Wu X, Fang Z, Li G. Analysis of high strain rate constitutive model of 1300 MPa hot-stamped steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (7): 118-126.
- [5] 路洪洲,范体强,方刚,等. 热成形钢极限冷弯性能及零件碰撞断裂指数关系研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2022 (8): 41-45.
Lu H Z, Fan T Q, Fang G, et al. Research on the relationship between bending angles of press hardening steel and crash cracking index of hot stamping parts [J]. Automobile Technology & Material, 2022 (8): 41-45.
- [6] 朱建琳,王超超,王秋月. 基于 Gissmo 失效准则的 DP590 双相钢和热成形钢的断裂特性研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (2): 163-172.
Zhu J L, Wang C C, Wang Q Y. Research on fracture characteristics of DP590 double-phase steel and hot-formed steel based on Gissmo failure criterion [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (2): 163-172.
- [7] 张思婉,申超. 基于热成形技术和耐撞性汽车 B 柱轻量化设计 [J]. 机械设计与制造, 2022 (7): 192-196.
Zhang S W, Shen C. Lightweight design of vehicle B-pillar based on hot-forming technology and crashworthiness [J]. Machinery Design & Manufacture, 2022 (7): 192-196.
- [8] 刘爽,陈慧琴,曹苗,等. 1800 MPa 级超高强度热成形钢组织性能演变及奥氏体化工制度研究 [J]. 钢铁钒钛, 2023, 44 (6): 133-138.
Liu S, Chen H Q, Cao M, et al. Study on microstructure evolution and austenitizing process of 1800 MPa grade ultra-high strength hot stamping steels [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44 (6): 133-138.
- [9] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature test [S].
- [10] GB/T 30069.2—2016, 金属材料 高应变速率拉伸试验第 2 部分: 液压伺服型与其他类型试验系统 [S].
GB/T 30069.2—2016, Metallic materials—Tensile testing at high strain rates—Part 2: Servo-hydraulic and other test systems [S].
- [11] 冉谋,李轲,陈敏,等. 40Mn 钢高温高应变速率塑性本构行为 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (11): 67-72.
Ran M, Li K, Chen M, et al. Plastic constitutive behavior of 40Mn steel at high temperatures and high strain rates [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (11): 67-72.
- [12] 孔玉强,张晓莹,段朋,等. 基于 GISSMO 断裂失效模型的高强钢落锤压溃仿真分析 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (3): 230-239.
Kong Y Q, Zhang X Y, Duan P, et al. Simulation analysis on drop hammer crush of high-strength steel based on GISSMO fracture failure model [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (3): 230-239.
- [13] 靳阳,胡晓,樊华,等. 铌元素对 DP980 钢断裂性能的影响与应用研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 222-234.
Jin Y, Hu X, Fan H, et al. Research on effect and application of niobium element on fracture performance of DP980 steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 222-234.