

双相钢 DP600 帽型梁碰撞实验与数值模拟

李亚^{1,2}, 陈新平^{1,2}, 连昌伟^{1,2}

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201900;
2. 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室(宝钢), 上海 201900)

摘要: **目的** 分析双相钢 DP600 的烘烤特性对碰撞实验的影响, 以及验证修正的 Johnson-Cook 模型对双相钢 DP600 动态力学性能描述的准确性。**方法** 对 DP600 帽型薄壁梁结构试件在轴向冲击下的压溃变形模式与吸能特性进行实验研究, 采用前处理软件 HyperWorks 和 LS-Dyna 求解器对 DP600 帽型梁轴向压溃实验进行有限元分析。**结果** 通过对比烘烤前后的碰撞实验结果, 发现烘烤前后压溃力、位移与时间曲线吻合较好, 变形结果基本一致。将实验与仿真结果进行对比分析发现, 有限元模拟结果与实验结果吻合较好。**结论** 烘烤温度为 180 °C, 时间为 20 min 的烘烤工艺对材料特性影响不显著。验证了修正的 Johnson-Cook 模型能够较好地描述 DP600 的动态力学性能, 可以应用于整车碰撞仿真中。

关键词: DP 钢; 有限元分析; 帽型梁; 碰撞; 烘烤效应; 高速拉伸

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.017

中图分类号: TB302.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0087-06

Collision Experiment and Numerical Simulation on Hat-shape Beam by Dual Phase Steel DP600

LI Ya^{1,2}, CHEN Xin-ping^{1,2}, LIAN Chang-wei^{1,2}

(1. Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China

2. State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steel (Baosteel), Shanghai 201900, China)

ABSTRACT: In order to analyze the effect of baking hardenability of dual-phase steel DP600 on the axial crushing test and to verify the accuracy of the modified Johnson-Cook model which describes the dynamic mechanical properties of DP600 steel under different strain rates, experiments were carried out on the hat-shape beam of DP600 steel under the axial crushing to investigate its collapsing deformation mode and energy absorption characteristics. Pre-processing software HyperWorks and LS-Dyna were applied to have finite element analysis on axial crushing test of DP600 hat shaped beam. The force-time curves and displacement-time curves were consistent and the collapsing deformation modes were basically the same between unbaked and baked according to the comparison of the results of the collision test between unbaked and baked. The properties of the steel by baking of 180 °C and 20 min are almost unchanged. It is demonstrated that the modified Johnson-Cook model can well describe the dynamic mechanical properties of DP600 and can be applied to the simulation of the vehicle crash.

KEY WORDS: dual-phase steel; finite element analysis; hat-shaped beam; collision; baking hardenability; high speed tensile

汽车安全性作为汽车车身的重要指标, 车身结构的耐撞性直接决定了碰撞过程中汽车的安全性能, 帽

型薄壁梁结构简单, 吸能能力强, 作为汽车纵梁的一种典型形式, 是汽车车身的一种主要承载结构, 其耐

收稿日期: 2017-09-15

作者简介: 李亚(1989—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为材料性能与材料成形技术。

撞性能很大程度上影响着车身正面碰撞的被动安全性能^[1-2]。双相钢(DP钢)兼具良好的碰撞性能和成形性能,被广泛应用于各类结构类试件^[3-5],因此研究DP钢帽型梁在碰撞时的变形特点和吸能特性,对汽车安全设计意义重大^[6-7]。

由于实际工程中汽车碰撞变形较为复杂和实验成本消耗巨大,因此台车碰撞实验来代替实车碰撞实验,不仅可以大幅度降低实验成本,还可以简化实验模型,为实现有限元分析过程提供了简便,而有限元分析又可以反过来验证实验结果,为实验结果提供更多的理论依据。若采用汽车碰撞安全性常用仿真分析方法来预测碰撞性能,则高应变速率下材料性能参数的准确性关系到汽车碰撞仿真分析的精度,因而需要进一步验证材料性能,确定其是否可以满足整车碰撞要求^[8-10]。

文中开展了基于双相钢DP600材料制作的帽型薄壁梁轴向冲击压溃实验研究与有限元分析,获得了其在碰撞冲击下的基本变形模式及力学响应特性,验证了材料动态性能参数设置的准确性。

1 帽型薄壁梁台车碰撞实验

帽形薄壁梁的加工方式为折弯-点焊-堆焊,薄壁梁端部堆焊刚性板,牌号为510L,刚性板垂直于薄壁梁并且质心与薄壁梁同轴,帽型梁矩形单帽结构与腹板经点焊连接而成,点焊间距为25 mm,见图1。试样尺寸截面见图2,试样截面的厚度为1.8 mm,截面高度为60 mm,截面宽度为70 mm,法兰边宽度为25 mm,圆角半径为7 mm,长度为400 mm。

帽型薄壁梁轴向冲击压溃实验在宝钢台车碰撞实验设备上,将试件用夹具固定于刚性墙,牵引台车的碰撞块与试件碰撞,见图3,台车质量范围为500~900 kg,速度范围为0~20 m/s。实验中,在刚性

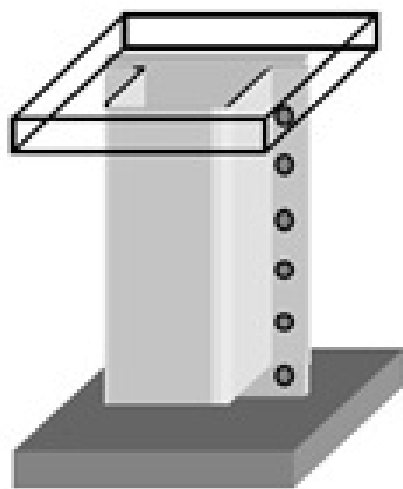


图1 帽形梁试样

Fig.1 Specimen of hat shape beam

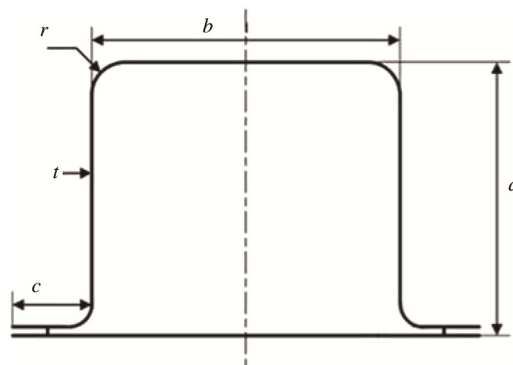


图2 试样截面

Fig.2 Cross-section of specimen

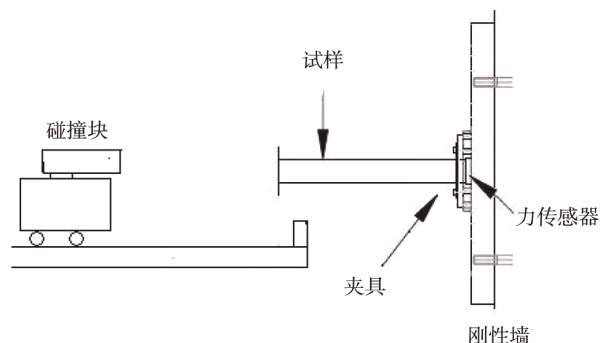


图3 台车碰撞系统

Fig.3 Experiment device for impact test

墙和帽型梁之间安装应力传感器,用于测量试件所受的载荷;采用高速摄像系统记录试件变形过程和台车的运动过程,并结合专用视频处理软件测量试样的位移。对实验数据进行处理和分析,得到帽型梁轴向冲击过程中压溃力和位移的相应曲线,从而得到试件的能量吸收特性。

2 结果及分析

厚度为1.8 mm,材料为HC340/590DPD+Z的帽型梁在800 kg碰撞块,台车速度7 m/s时实验条件下测到的试件力-时间和位移-时间曲线见图4。整个冲击过程包括冲击压缩变形阶段和试件弹性回复阶段。塑性屈曲失稳发生在与台车接触端,产生折叠变形,其实物见图5。可以看出典型的塑性屈服变形发生在台车碰撞块的冲击端,而固定端几乎没有发生塑性失稳变形。

吸收能量可通过一定压溃距离下的平均压溃力与压溃距离的乘积得到,据此可绘制能量-位移曲线。能量-位移曲线见图6。

$$E_d = F_m x \quad (1)$$

式中: E_d 为吸收能量; F_m 为平均压溃力; x 为压溃距离。

对试件在温度180 °C下烘烤20 min前后进行台车碰撞实验,对比6 m/s和7 m/s碰撞速度下实验过程中位移-时间、压溃力-时间曲线、最大压溃距离及

最终结果，可以看出，烘烤前后碰撞力与位移变化基本一致，表明该烘烤条件下对材料特性影响不显著。位移-时间曲线见图 7，可以看出，在不同速度下，试件烘烤前后位移变化路径和最大位移基本一致。压溃

力-时间曲线见图 8，可以看出，在不同速度下，烘烤前后压溃力-时间曲线吻合较好。对比不同速度下烘烤前后变形模式与结果见图 9，可以看出，不同速度冲击后，变形结果基本一致。

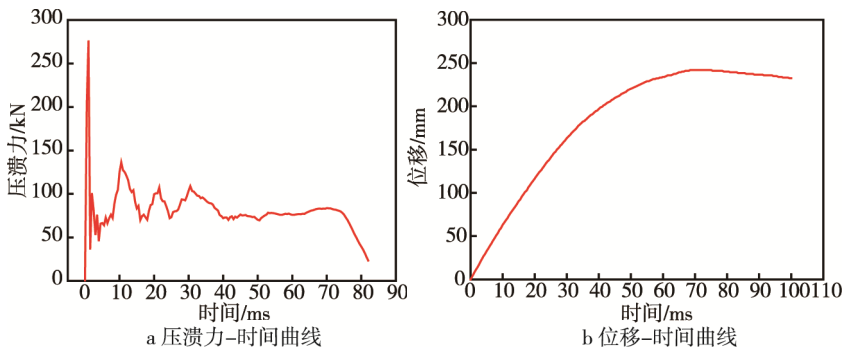


图 4 实验结果
Fig.4 Test result

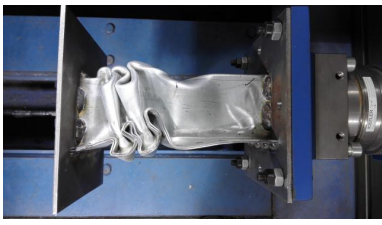


图 5 试件变形模式
Fig.5 Collapsing deformation mode

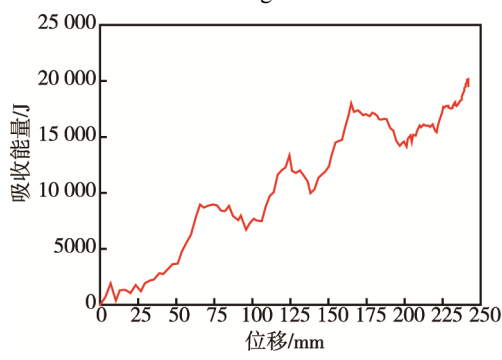


图 6 能量-位移曲线
Fig.6 Curves of energy absorption vs. displacement

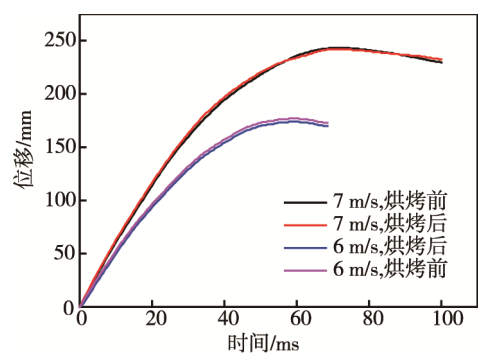


图 7 位移-时间曲线
Fig.7 Curves of displacement vs test time

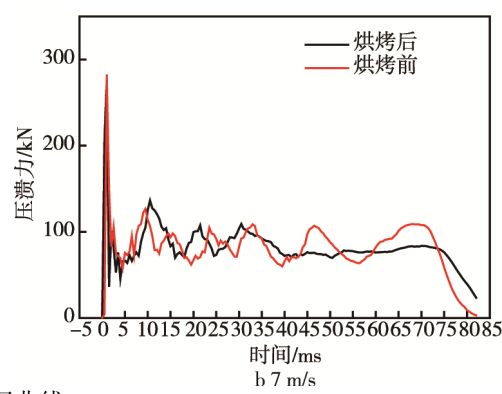
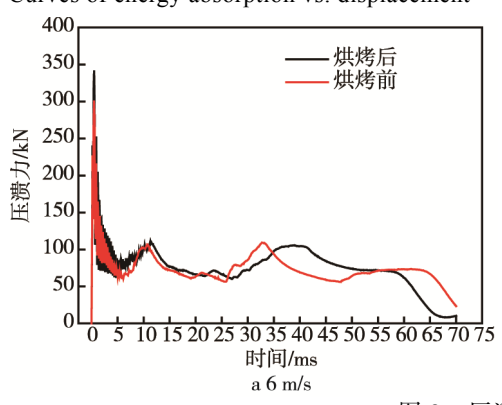


图 8 压溃力-时间曲线
Fig.8 Curves of crushing force vs test time

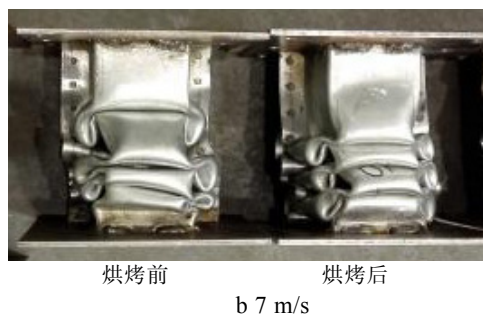
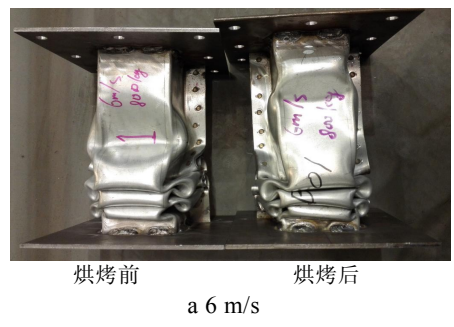


图 9 不同速度下烘烤前后的变形对比
Fig.9 Comparison of impact deformation between unbaked and baked at different speed

3 有限元分析

3.1 有限元模型

采用前处理软件 HyperWorks 和 LS-Dyna 求解器对帽型梁轴向压溃实验进行有限元分析, 网格基本尺寸为 5 mm; 碰撞块为表面壳单元, 20#材料, 刚体模型; 单元采用 16 号全积分; 焊点通过 spotweld 梁单元模拟; 帽形件与挡板自接触; 碰撞块与挡板刚性接触。

3.2 材料参数设置

实验用材料为 HC340/590DPD+Z, 其屈服强度为 382 MPa, 抗拉强度为 650 MPa, 均匀伸长率为 15.4%, 断裂伸长率为 21%, 加工硬化指数 n 为 0.167, 塑性应变比 r 为 0.93, 选用 24#材料, 进行了不同应变速率 ($1 \sim 500 \text{ s}^{-1}$ 范围内) 的高速拉伸试验, 不考虑温度变化效应, 利用修正的 Johnson-Cook 模型^[11-15], 见式(2), 对实验曲线进行数据处理, A, B, n, C_1, C_2, R_2 (拟合优度) 分别为 382, 805, 0.4262, 0.006, 0.0018, 0.96, 根据拟合参数得到的 HC340/590DPD+Z 钢动态应力-应变曲线见图 10。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C_1 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} + C_2 (\ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})^2) \quad (2)$$

式中: σ 为等效应力; ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为准静态下的应变速率; A, B, n, C_1, C_2 为常数。

4 实验与仿真结果对比

实验与有限元分析得到的帽型梁的位移和力的相应曲线对比见图 11。可以看出, 实验结果与有限元分析结果吻合较好, 因此可以用有限元方法对帽型梁的压溃变形及能量吸收过程进行仿真分析, 开展辅助设计, 节省时间与成本, 同时也验证了材料动态性能参数设置的准确度较高, 可以应用于整车碰撞仿真中。实验和有限元分析结果均表明, 碰撞瞬间, 冲击力迅速增大并达到峰值, 一旦发生屈曲失稳, 则冲击力在振荡中不断减小, 直到冲击结束减小为 0, 而帽形梁试样首先在冲击端产生屈曲失稳, 随后不断折叠, 直至在冲击端产生皱褶。帽型梁在台车速度为 7 m/s 下轴向冲击作用的有限元模拟的变形屈服模式与实验结果对比见图 12, 其中左侧为实验结果, 右侧为仿真结果。

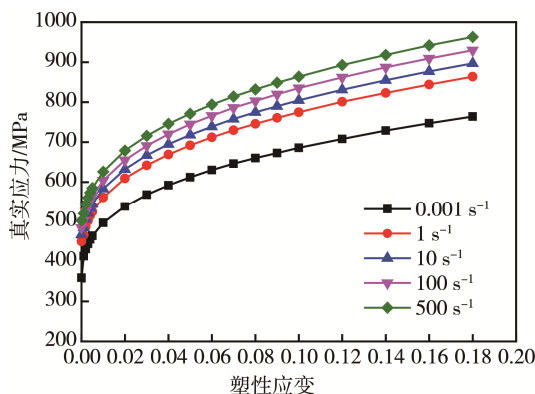


图 10 HC340/590DPD+Z 高速拉伸曲线
Fig.10 High speed tensile curve of HC340/590DPD+Z

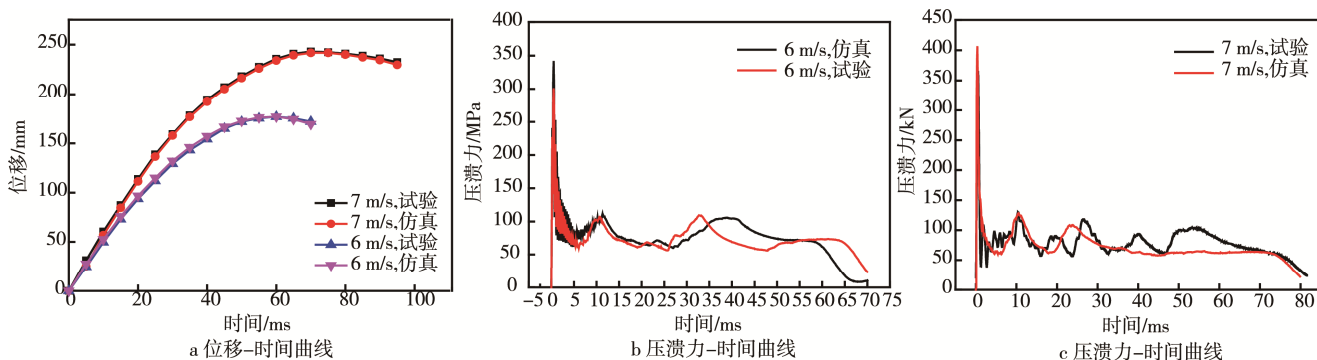


图 11 实验与仿真结果对比
Fig.11 Comparison of the results between the experiment and FEM

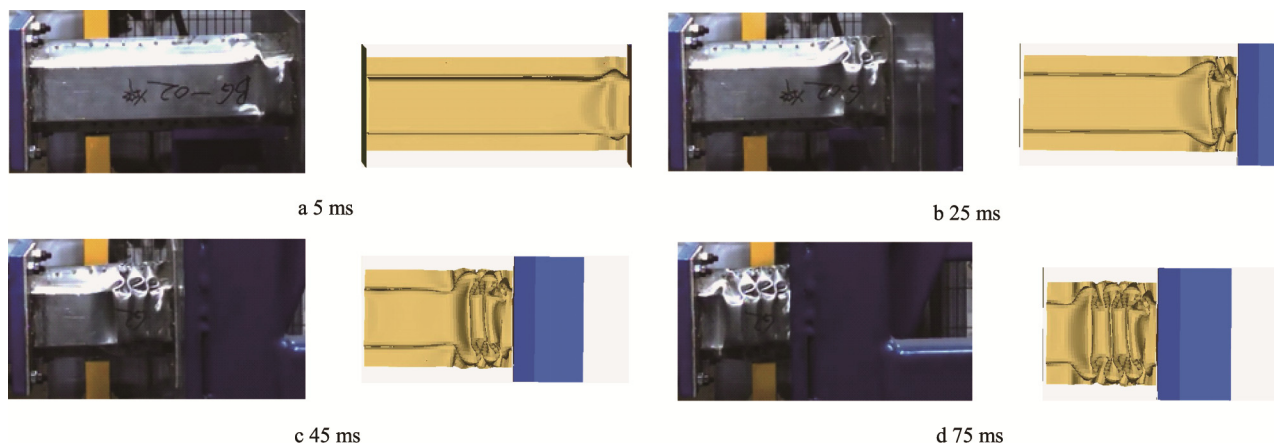


图 12 实验与仿真变形模式对比

Fig.12 Comparison of impact deformation between the experiment and FEM

5 结论

1) 对试件在温度 180 °C 下烘烤 20 min 前后进行台车碰撞实验,可以看出,烘烤前后碰撞力与位移基本一致,表明该烘烤条件下对材料特性影响不显著。

2) 利用修正的 John-cook 模型,数值模拟得到的变形模式、力-位移曲线均与实验结果吻合较好,表明修正的 John-cook 模型与 DP 钢在不同应变速率下的动态力学性能拟合度较高,可以应用到整车碰撞仿真中。

参考文献:

- [1] ABEDRABON, MAYERR, THOMPSON, et al. Crash Response of Advanced High Strength Steel Tubes: Experiment and Model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(8): 1044—1057.
- [2] ZHANG X W, SU S, YU T X. Energy Absorption of an Axially Crushed Square Tube with a Buckling Initiator[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(3): 402—417.
- [3] 刁可山, 蒋浩民, 谢坚强. 1000 MPa 级 DP 钢的成形特性实验[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(4): 95—98.
DIAO Ke-shan, JIANG Hao-min, XIE Jian-qiang. Experimental Research on Mechanical Properties and Formability of 1000 MPa DP Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(4): 95—98.
- [4] 蒋浩民, 陈庆欣, 陈新平, 等. 双相钢板应变强化和烘烤硬化特性实验研究[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(1): 173—175.
JIANG Hao-min, CHEN Qing-xin, CHEN Xin-ping, et al. Experimental Study on the Strain Hardening and Bake Hardening Properties of Dual Phase Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(1): 173—175.
- [5] 江海涛, 康永林, 王全礼, 等. 高强度汽车板的烘烤硬化特性[J]. 钢铁研究, 2006, 34(1): 54—57.
JIANG Hai-tao, KANG Yong-lin, WANG Quan-li, et al. Experimental Study on the Strain Hardening and Bake Hardening Properties of Dual Phase Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 34(1): 54—57.
- [6] BAG A, RAY K K, DWARAKADASA E S. Influence of Martensite Content and Morphology on Tensile and Impact Properties of High Martensite Dual Phase Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(5): 1193—1202.
- [7] 陈贵江, 康永林, 朱国明, 等. 高强度双相钢 DP800 成形件碰撞性能仿真分析[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(4): 91—95.
CHEN Gui-jiang, KANG Yong-lin, ZHU Guo-ming, et al. The Influence of Stamping, Springback and Strain Rate on Collision Performance of High-strength Dual-phase Steel DP800 Parts[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(4): 91—95.
- [8] FYLLINGEN, HOPPERSTADOS, LANGSETH. Robustness Study on the Behavior of Top Hat Thin Walled High Strength Steel Sections Subjected to Axial Crushing[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 12—24.
- [9] 王特捷, 付应乾, 俞鑫炉, 等. 帽型梁落锤轴向冲击实验及有限元分析[J]. 现代应用物理, 2014, 5(1): 59—63.
WANG Te-jie, FU Ying-qian, YU Xin-lu, et al. Experiment and the Finite Element Analysis for Ha-Beam Structure Under Axial Crash of Dropping Hammer[J]. Modern Applied Physics, 2014, 5(1): 59—63.
- [10] 代启峰, 宋仁伯, 蔡恒君, 等. 超高强冷轧双相钢 DP1000 高速应变速率下的拉伸性能[J]. 材料研究学报, 2013, 27(1): 25—31.
DAI Qi-feng, SONG Ren-bo, CAI Heng-jun, et al. Tensile Mechanical Behavior of Ultra-high Strength Cold Rolled Dual Phase Steel DP1000 at High Strain Rates[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2013, 27(1): 25—31.
- [11] 代启峰, 宋仁伯, 范午言, 等. DP1180 双相钢在高应

- 变速率下应变硬化行为及机制[J]. 金属学报, 2012, 48(10): 1160—1165.
- DAI Qi-feng, SONG Ren-bo, FAN Wu-yan, et al. Behaviour and Mechanism of Strain Hardening for Dual Phase Steel DP1180 Under High Strain Rate Deformation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(10): 1160—1165.
- [12] 连昌伟, 陈新平, 俞宁峰. 高伸长率 QP 钢在高应变速率下的力学特性[J]. 锻压技术, 2017, 42(7): 163—168.
- LIAN Chang-wei, CHEN Xin-ping, YU Ning-feng. Mechanical Properties on High Elongation Steel QP Under High Strain Rate[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(7): 163—168.
- [13] 余海东, 郭永进. 双相钢 DP600 塑性率相关效应实验及本构模型[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(10): 1672—1675.
- YU Hai-dong, GUO Yong-jin. Plastic Rate-Dependent Experiment and Constitutive Model for Dual Phase Steel 600[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(10): 1672—1675.
- [14] 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): 102—106.
- TIAN Cheng-da, LI Da-yong, PENG Ying-hong, et al. Research on the Dynamic Deformation Behavior of the DP780 Advanced High Strength Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(6): 102—106.