基于零件应用的第 3 代高强钢——QP 钢的成形特性

连昌伟[1,2]，陈新平[1,2]，叶又[3]

（1.宝山钢铁股份有限公司研究院，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；3.泛亚汽车技术中心有限公司，上海 201201）

摘要：目的 研究第 3 代高强钢——QP 钢在实际零件上应用涉及的成形特性问题。**方法** 通过微观组织分析、单向拉伸、成形极限、V 形弯曲回弹等试验，分析探讨了 QP 钢的力学性能、成形性能、成形极限和弯曲特性，并与广泛应用的 DP 钢对比。**结果** QP 钢 HC600/980QP 的成形性能好于相同强度级别的 DP 钢 HC550/980DP，与 HC420/780DP 相当；QP 钢弯曲回弹量比同等强度级别 DP 钢大。通过 2 个试冲零件的分析，验证了 QP 的成形特性，并从零件应用角度提出了 QP 钢的零件适用范围和零件设计要点。**结论** QP 钢具有综合的强度和塑性性能，有助于解决局部特征复杂的难成形零件和具有等截面特征的零件，在汽车车身结构件上有较大的应用前景。

关键词：QP 钢；成形特性；冲压；高强钢

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2017.04.014

中图分类号：TG386 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)04-0079-06

Formability of the 3rd Generation High Strength Steel——QP Steel Based on Part Application

LIAN Chang-wei[1,2], *CHEN Xin-ping*[1,2], *YE You*[3]

(1.Research Institute of Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China; 2.State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels (Baosteel), Shanghai 201900, China; 3.Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201201, China)

ABSTRACT: The paper aims to study forming characteristics of the third generation high strength steel——QP steel. By comparing with DP steel, mechanical properties, forming properties, forming limit and bending properties of QP steel were analyzed with microstructure analysis, tensile test, forming limit and V-shape bending test. QP steel had excellent formability. HC600/980QP performed better than the same strength level of HC550/980DP, and was equal to HC420/780DP. For bending springback, QP steel was slightly larger than the same strength grade DP steel. Forming characteristics of QP were verified through analysis of the two stamped parts. Range of application and key point of design of parts for QP steel were proposed from application of QP steel parts. QP steel has comprehensive strength and plastic properties, and is helpful to solve the forming problems for parts with complex local features or equal section characteristics. It has a great application prospect in structure parts for car body.

KEY WORDS: QP steel; stamping; formability; high strength steel

随着市场对汽车节能、环保、安全、舒适等要求的提高，汽车车身轻量化成为当今汽车技术发展的重

收稿日期：2017-06-13

作者简介：连昌伟（1982—），男，硕士，工程师，宝山钢铁股份有限公司研究院研究员，主要研究方向为高强钢成形技术。

要趋势，而采用高强钢材料是目前最经济有效的轻量化途径之一，越来越多的高强度钢材料被开发并应用到汽车工业中。宝钢根据汽车行业用户的需求，不断开发更高塑性的超高强度钢产品，如新开发的淬火延性钢（QP 钢）等。将这些材料应用到车身上，综合考虑使用性能，要求设计阶段能够准确掌握材料的性能和在成形过程的特性。

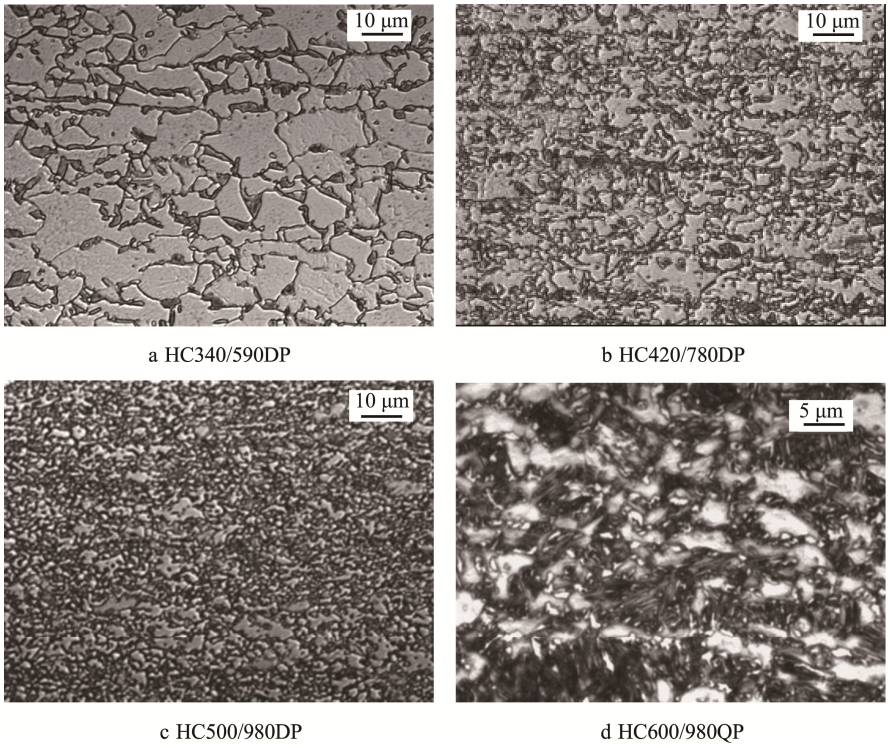
钢板的可成形性能一般随着强度的提高而降低，低的延伸率给冷冲压成形带来了极高的难度和挑战[1]，需要通过 CAE 分析优化设计，改善高强度钢板普遍存在的冲压成形缺陷[2—3]。宝钢冷轧超高强钢在实际使用过程也发生了开裂、回弹及尺寸超差、边部开裂和表面拉毛等问题，因此有必要深入研究 QP 钢超高强钢的成形特性，并与已广泛应用的的双相钢（DP 钢）对比[4—5]。在 QP 钢的性能研究方面，丁磊等建立了考虑 TRIP 效应的 QP980 多相本构模型[6]，并使用 DIC 技术研究了 QP 钢单向拉伸中的颈缩现象[7]；ZHANG L 等基于全局应变分布，对比分析了 DP 钢和 QP 钢等 4 种材料的成形极限结果，提出了一种新的成形性能评价方法[8]。在 QP 钢零件应用方面，刁可山等基于成形特性，进行了 QP 钢与 DP 钢的性能对比，并在骨架件上试冲验证[9]；陈新平等对超高强钢 QP980 液压成形汽车 B 柱的可成形性进行了研究[10]。文中从零件应用角度出发，对宝钢生产的冷轧双相钢（DP 钢）和淬火延性钢（QP 钢）进行显微组织、力学性能、成形极限和回弹特性的深入分析，为 QP 钢的零件设计、冲压成形工艺和模具设计优化提供理论支持。

1 试验方法和结果

为开展基于零件应用的材料成形特性研究，从材料组织、力学性能、成形性能和回弹特性角度开展试验。

1.1 微观组织分析

双相钢（DP 钢）作为综合性能较优的高强钢，被广泛应用于各类结构类零件。对宝钢生产的 HC340/590DP（厚度为 1.6 mm）、HC420/780DP（厚度为 1.4 mm）、HC550/980DP（厚度为 1.4 mm）、HC600/980QP（厚度为 1.6 mm）4 种材料进行金相组织观察，结果见图 1。图 1a—c 是 3 个牌号 DP 钢的微观组织照片，主要由马氏体和铁素体组成，马氏体组织以岛状弥散分布在铁素体基体上，马氏体是硬质强化相，提升钢材的强度，DP 钢的强度随着马氏体含量的提高而增加。连续的软质铁素体提供了优异的延展性，应变集中在低强度的铁素体相上，使其具有独特的高加工硬化率。QP 钢通过淬火和配分处理后，最终形成马氏体+残余奥氏体组织或铁素体+马氏体+残余奥氏体组织，见图 1d。在成形过程中，残余奥氏体会逐渐转变为硬的马氏体相，有利于均匀变形，在高抗拉强度下有更好的延展性。



a HC340/590DP　b HC420/780DP　c HC500/980DP　d HC600/980QP

图 1 QP 钢与 DP 钢微观组织

Fig.1 Microstructure of QP and DP steel

1.2　力学性能试验和分析

金属准静态拉伸试验是力学性能测试中最重要的方法之一，可以测定材料的强度和塑性参数，为材料评价和选材提供依据。文中采用 Instron 拉伸试验机对以上 4 种材料进行准静态拉伸试验，试验标准采用 ISO 6892-1—2009[11]，试样标距为 80 mm，3%应变内试验速度为 3 mm/min，3%之后的拉伸速度为 30 mm/min，得到的轧制方向工程应力应变曲线见图 2。试验结果表明，在沿轧制方向上，DP 钢在 600, 800, 1000 MPa 的强度级别上分别达到大于 30%, 20%和 10%的断裂延伸率，并且随着强度等级的提升，延伸率随之下降；QP 钢(HC600/980QP)在 1000 MPa 的强度级别上实现了更高的延伸率，达到 20%，与 HC420/780DP 相当。

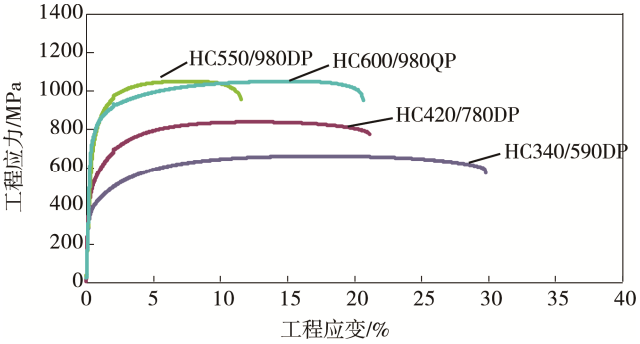


图 2　轧制方向工程应力-应变曲线

Fig.2 Engineering stress-strain curve of rolling direction

硬化指数 n 值是衡量材料抵抗局部变薄能力的关键参数，直接影响材料的成形极限 FLC。对于超高强钢来说，n 值具有明显的瞬态效应。文中以工程应变 1%为步长，对应力应变曲线进行分段拟合计算，得到不同应变范围的瞬态 n 值分布见图 3。结果表明，DP 钢在低应变时，具有较高的 n 值，随着变形程度的增加，n 值逐渐减少，因此 DP 钢在使用时不需要通过较大的应变来实现加工硬化效应，适用于零件造型相对简单、变形量不大又对强度要求较高的结构件，同时该特性也有利于车身发生碰撞时的能量吸收；QP 钢随着应变的增加，n 值稳步增长，并直至均匀变形结束时保持较高的 n 值，这是由于成形过程中残余奥氏体向马氏体转变，形成相变诱发塑性(TRIP)效应，因此 QP 更适用于零件造型相对复杂、变形量较大以及需要高强度的结构类零件。在零件的设计、加工和使用上，可结合瞬态 n 值的规律选择合适的材料，并针对材料进行产品设计、成形工艺和结构优化。

1.3　成形极限试验

成形极限 FLD 是判断和评定钢板成形性的最为简便和直观的判断方法，其准确度直接影响零件安全裕度的评判结果。对于软钢和传统高强钢而言，FLD 的研究已相当成熟，目前通过大量的试验建立了经验公式，可以预测得到 FLD 曲线。对于新开发的超高强钢板，其 FLD 的试验基本属于空白[12]。对以上 QP 钢和 DP 钢 4 种材料，采用 MTS866.72S 金属薄板成形试验系统进行成形极限试验，试验标准采用 ISO 12004-2—2008[13]，使用半球形冲头，通过改变试样宽度来获得不同的应变路径和应变状态，冲压速度为 0.25 mm/s，压边力范围为 200~400 kN，得到的 4 种材料的成形极限曲线分别见图 4。

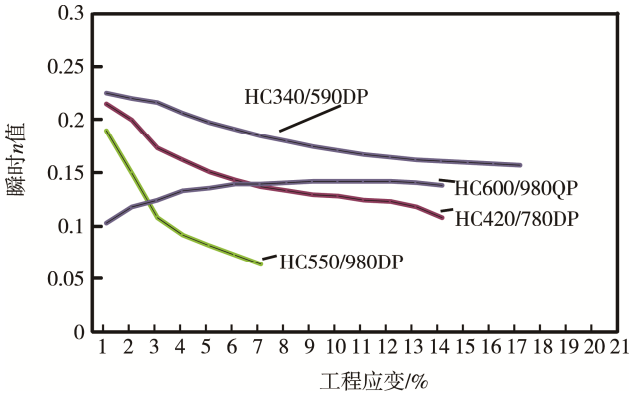


图 3　QP 钢与 DP 钢瞬态 n 值

Fig.3 Instantaneous n value of QP and DP steel

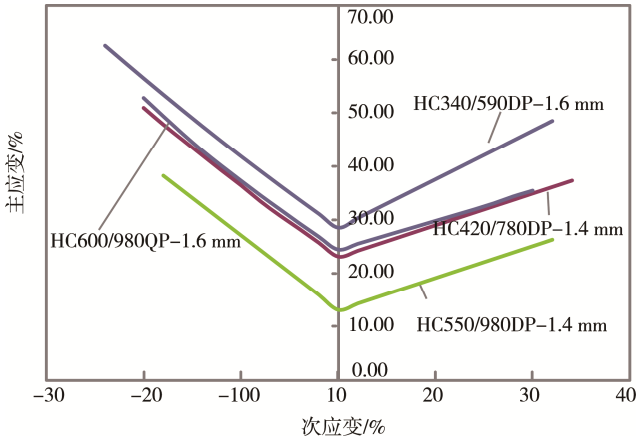


图 4　QP 钢和 DP 钢成形极限试验结果

Fig.4 FLD results of QP and DP steel

试验结果表明，DP 钢具有较优的成形极限特性，同厚度的 DP 钢，随着强度提高，成形极限略有下降；QP 钢具有优秀的成形能力，HC600/980QP 成形极限比同强度级别的 HC550/980DP 高，与 HC420/780DP 相当。

1.4　弯曲试验

回弹是高强钢应用中的难题，回弹造成的尺寸超差会造成零件尺寸不合格，还可能引发卡件、拉毛和模具磨损等其他问题。在板料实际冲压成形过程中，纯弯曲及拉弯回弹是板料回弹的 2 种主要形式。文中

采用 V 形弯曲对 QP 钢及 DP 钢的纯弯曲回弹特性进行分析对比。

试验采用上述试样，并增加不同厚度的 HC550/980DP 材料。试样采用线切割加工而成，试验设备采用超高强度钢板 V 形弯曲试验机。为考察凸模圆角半径对高强钢板 V 形弯曲回弹的影响，试验采用的凹模成形角度为 90°，采用的凸模圆角半径有 2, 4, 6, 8 mm。模具示意图见图 5。V 形弯曲时，冲压速度为 10 mm/min，矫正力为 20 kN 并保持 5 s。试验结果见图 6，其中 *R*2, *R*4, *R*6, *R*8 表示凸模圆角半径为 2, 4, 6, 8 mm，RD 和 TD 分别代表选取试样的长度方向平行于轧制方向和垂直于轧制方向，DP590-1.6 指板厚为 1.6 mm 的 HC340/590DP，DP780-1.4 指板厚为 1.4 mm 的 HC420/780DP，DP980-1.0 指板厚为 1.0 mm 的 HC550/980DP，DP980-1.4 指板厚为 1.4 mm 的 HC550/980DP，DP980-1.8 指板厚为 1.8 mm 的 HC550/980DP，QP980-1.6 指板厚为 1.6 mm 的 HC600/980QP。

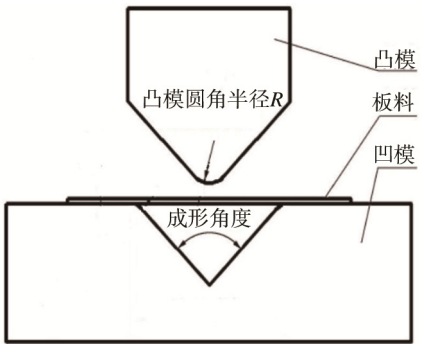


图 5 V 形弯曲试验模具
Fig.5 Mold of V-shape bending test

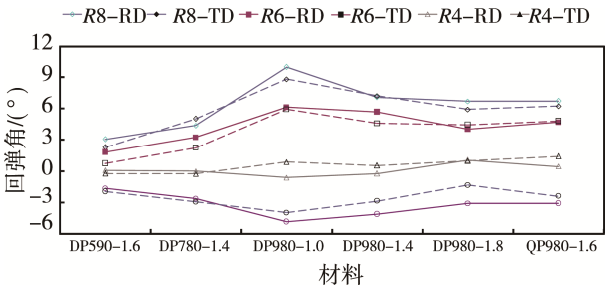


图 6 V 形弯曲试验结果
Fig.6 Test results of V-shape bending test

从 V 形弯曲回弹试验的结果可以看到，在相同的试验条件下，回弹角随着凸模圆角半径的增大而增大，随着强度的增加而增大；试样方向对回弹角趋势的影响较小。为对比同等强度的 QP 钢和 DP 的纯弯曲回弹角，采用板厚归一化对 8 mm 凸模圆角半径下的试验结果进行转换，得到相同厚度下的 QP 钢和 DP 钢回弹对比见图 7。其中 DP1.0 指板厚为 1.0 mm 的 HC550/980DP，QP1.6 指板厚为 1.6 mm 的 HC600/980QP，其余等同。板厚相同时，在相同的纯弯曲条件下，QP 钢的回弹量略大于同等强度的 DP 钢。

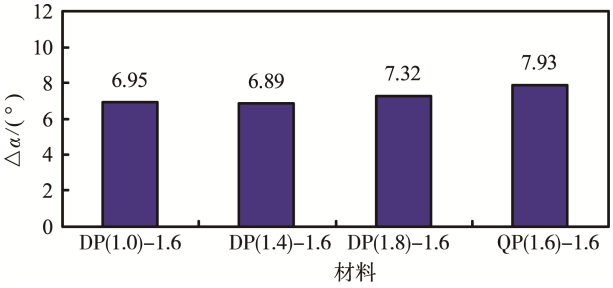


图 7 QP 和 DP 钢板厚归一化后的弯曲回弹角度比较
Fig.7 Comparision of springback angle after thickness normalization

2 零件试冲

选取某车型上的零件进行试冲验证，评估 QP 钢在实际零件冲压上的问题点。选取的 2 个零件分别为 A 柱下段加强板和前纵梁延伸板。这 2 种零件代表高强钢应用的典型零件，并分别采用拉延(Drawing)和成形(Form-forming)工艺。A 柱下段加强板原采用厚度为 1.2 mm 的 HC340/590DP 材料，现更改为厚度为 1.0 mm 的 HC600/980QP 材料；前纵梁延伸板原采用厚度为 1.8 mm 的 HC340/590DP 材料，现更改为厚度为 1.6 mm 的 HC600/980QP 材料。如 2 个零件成功应用 QP 钢，将实现减重分别为 0.58 kg 和减重 0.38 kg。

经过零件试冲调试，与原选用的材料 HC340/590DP 相比，前纵梁延伸板零件采用 QP 钢后侧壁和法向回弹量增大，并增加调试的工作量。通过模具的多次调试，该零件实现了无开裂、起皱等现象，达到零件的尺寸公差要求，并通过了量产稳定性测试[14]，试冲零件成品见图 8。

图 8 前纵梁延伸板 QP 钢试冲零件
Fig.8 Extension panel of front rail made by QP steel

对于 A 柱下段加强板零件，与原选用的材料相比，零件在调试过程中出现了由于顶面拉延不足引起的扭曲回弹，在增加压边力后又出现局部开裂的现象（见图 9 拐角处）。为此，更改了原零件的设计方案，在顶面增加较多的特征（见图 10），最终实现了零件无开裂和起皱缺陷[15]。

图 9　原设计方案 A 柱下段加强板 QP 钢试冲零件
Fig.9 Reinforcement of A pillar lower (original design) made by QP steel

图 10　优化设计方案 A 柱下段加强板 QP 钢试冲零件
Fig.10 Reinforcement of A pillar lower (optimized design) made by QP steel

3　结论

通过对 QP 钢和 DP 钢的试验分析和零件试冲对比可以得到以下结论。

1) 基于微观组织分析和力学性能试验，QP 钢具有综合的强度和塑性性能，QP 钢在高强度的同时具有更优的塑性。超高强钢的 n 值具有显著的瞬态效应，DP 钢具有初始的高 n 值并随应变增加而下降，QP 钢随应变增加 n 值缓升并保持到均匀变形结束。在相同强度级别上，QP 钢具有更好的均匀变形能力和加工成形性。

2) QP980 成形极限比同强度级别的 DP980 高，与 DP780 相当。在试验条件下，QP 钢的纯弯曲回弹量比同等强度的 DP 钢大。

3) QP980 材料强度高，屈强比大，零件回弹大，对零件形状设计有一定要求。对于顶面面积较大的零件，需要增加局部特征，以解决拉延不足和改善扭转回弹。对于等截面零件，QP980 材料的侧壁和法兰回弹量较大，需要较大的补偿角度。QP 钢有助于解决局部特征复杂的难成形零件和具有等截面特征的零件，但增加了零件设计和模具调试的难度，在应用时需要在零件设计阶段尽早介入，提出零件更改建议，以便于后期的量产稳定性。

参考文献：

[1] 钟茂莲. 高强度汽车钢板冲压成形的主要问题及模具对策[J]. 精密成形工程, 2014, 6(3): 20—24.
ZHONG Mao-lian. Key Problems of High-strength Steel in Stamping Forming Process and Corresponding Die Countermeasures[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(3): 20—24.

[2] 徐迎强, 韩永志, 崔礼春. 基于 Autoform 的汽车前围横梁连接板的数值分析与实验研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(3): 15—19.
XU Ying-qiang, HAN Yong-zhi, CUI Li-chun. Numerical Analysis and Experimental Study of Front Beam Connecting Part Based on Autoform[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(3): 15—19.

[3] 吉宏选, 陈文琳, 牛彤. 汽车防撞梁外板冲压工艺设计[J]. 精密成形工程, 2016, 8(3): 57—60.
JI Hong-xuan, CHEN Wen-lin, NIU Tong. Stamping Process Design of Anticollision Beam Plate for Automobile[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(3): 57—60.

[4] 刁可山, 蒋浩民, 谢坚强. 1000 MPa 级 DP 钢的成形特性试验[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

[5] 吴信涛, 丁方强, 刘国凯, 等. DP800 双相高强钢折弯及回弹研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(4): 38—42.
WU Xin-tao, DING Fang-qiang, LIU Guo-kai, et al. Bending and Springback of High-strength Dual Phase Steel DP800[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(4): 38—42.

[6] 丁磊, 林建平, 庞政, 等. 考虑 TRIP 效应的 QP980 超高强度钢多相本构模型[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(4): 23—26.
DING Lei, LIN Jian-ping, PANG Zheng, et al. Multiphase Constitutive Model of Ultra-high Strength Steel QP980 Coupling with TRIP Effect[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(4): 23—26.

[7] DING L, LIN J P, MIN J Y, et al. Necking of Q&P Steel During Uniaxial Tensile Test with the Aid of DIC Technique. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 448—453.

[8] ZHANG L, LIN J P, MIN J Y, et al. Formability Evaluation of Sheet Metals Based on Global Strain Distribution[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(6): 2296—2306.

[9] 刁可山, 蒋浩民, 陈新平. 基于成形特性的宝钢 QP980 试

验研究及典型应用[J]. 锻压技术, 2012, 37(6): 113—121.
DIAO Ke-shan, JIANG Hao-min, CHEN Xin-ping. Research and Typical Application of QP980 Steel Produced by Baosteel Based on Formability[J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(6): 113—121.

[10] 陈新平, 胡晓, 宋晨, 等. 超高强钢 QP980 液压成形 B 柱仿真及试验研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(5): 38—42.
CHEN Xin-ping, HU Xiao, SONG Chen, et al. Simulation and Experiment Analysis of AHSS QP980 Hydroforming B Pillar[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(5): 38—42.

[11] ISO 6892-1-2009, Metallic Material-Tensile Testing-Part 1: Method of Test at Room Temperature[S].

[12] STOUGHTON T B, CARSLEY J E, MIN J, et al. Advances in Characterization of Sheet Metal Forming Limits[J]. 2016, 734(3): 032073.

[13] ISO 12004-2-2008, Metallic Materials-Sheet and Strip-Determination of Forming-limit Curves-Part 2: Determination of Forming-Limit Curves in the Laboratory[S].

[14] 郑德兵, 柳一凡, 吴纯明, 等. 第 3 代高强钢 QP980 冲压稳定性研究[J]. 模具工业, 2015, 41(2): 16—18.
ZHENG De-bing, LIU Yi-fan, WU Chun-ming, et al. Research on Stamping Stability of the Third Generation High Strength Steel QP980[J]. Die & Mould Industry, 2015, 41(2): 16—18.

[15] 郑德兵, 柳一凡, 吴纯明, 等. 汽车用第三代高强度钢 QP980 冲压成形性研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2810—2813
ZHENG De-bing, LIU Yi-fan, WU Chun-ming, et al. Study on Stamping Formability of Third Generation HSS QP980 for Vehicle Car Body Applications[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(20): 2810—2813.