# 超高强钢 QP980 液压成形 B 柱仿真及试验研究

陈新平<sup>1,2</sup>, 胡晓<sup>1,2</sup>, 宋晨<sup>3</sup>, 蒋浩民<sup>1,2</sup>, 逯若东<sup>1,2</sup>

(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.宝钢高新技术零部件有限公司,上海 201908)

摘要:目的 研究超高强钢 QP980 液压成形汽车 B 柱的可成形性。方法 基于 Autoform 有限元模拟软件, 仿真对比了宝钢第三代超高强钢 QP980 及当前广泛应用的 DP980 超高强钢液压成形 B 柱的可成 形性, 通过试验试制了 QP980 液压成形 B 柱,并与仿真结果进行对比。结果 在相同工艺条件下, QP980 具有较高安全裕度, DP980 具有开裂风险,采用 2 种材料模拟壁厚减薄率及回弹趋势一致, DP980 壁厚减薄率大于 QP980, QP980 回弹大于 DP980; QP980 液压成形 B 柱模拟及试验对比显示, 壁厚减薄率和回弹变化趋势一致,试验壁厚减薄率大于模拟,样件实际回弹小于模拟, QP980 液压 成形 B 柱实测最大壁厚减薄率 7.6%,一端施加约束,另一端回弹约 6 mm。结论 超高强钢 QP980 液压成形 B 柱成形性良好,满足零件性能要求。

关键词:液压成形;B柱;超高强钢;QP980

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.05.009

中图分类号: TG394 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457 (2016)05-0060-05

## Simulation and Experiment Analysis of AHSS QP980 Hydroforming B Pillar

CHEN Xin-ping<sup>1,2</sup>, HU Xiao<sup>1,2</sup>, SONG Chen<sup>3</sup>, JIANG Hao-min<sup>1,2</sup>, LU Ruo-dong<sup>1,2</sup>

(1.Research Institute of Baosteel, Shanghai 201900, China; 2.State Key Laboratory of Development and Applicaton Technology of Automotive Steels(Baosteel), Shanghai 201900, China; 3.Baosteel High-tech Components Co., Ltd., Shanghai 201908, China)

**ABSTRACT:** By using Autoform software, the formability of the independent developed Baosteel AHSS QP980 and widely used Baosteel DP980 by simulation and experiment was Compared. The QP980 B pillar prototype was developed, and the results were compared with the simulation results. Results indicate that the safety margin of QP980 is higher, however, DP980 has potential cracking risk. The wall thinning and springback of two kinds of material are in similar tendency. Wall thinning and springback is higher than DP980. There is same variation trend of wall thinning and springback between simulation and experiment. The experiment wall thinning is larger than simulation, the most of which is 7.6%. Meanwhile the experiment springback is lower than simulation, while the largest springback of QP980 B pillar tryout is 6mm with one side of the part constrained. In conclusion, the mechanical performance of QP980 is good enough to meet requirements of B pillar component in terms of hydroforming process.

KEY WORDS: hydroforming; B pillar; AHSS; QP980

在汽车安全碰撞及节能减排法规驱动下,高强 轻质材料以及轻量化结构的应用成为汽车发展的 必然趋势<sup>[1-3]</sup>。液压成形技术适用于生产空心变截 面轻体构件,以管件液压成形设计取代冲压焊接形 式设计可以取消法兰连接,在有限的空间内使截面 积最大化,具有更好的刚度性能及结构连续性,是 提高碰撞性能,实现结构轻量化的有效手段<sup>[4-7]</sup>。

液压成形技术在汽车前后悬架、排气管上的应 用已较为普遍,近年来,液压成形在车身骨架件上 也逐步得到应用,如A柱、B柱、D柱、机舱边梁、 前纵梁等<sup>[8-11]</sup>,上述零件均为车身安全结构件,特 别对车身B柱,如采用超高强钢液压成形管件,在 侧碰过程中,通过高强钢与管件液压成形技术结合 传递冲击力,同时可以有效减小B柱变形,从而保 护乘员安全。本文将宝钢全球首发的第三代超高强 钢 QP980 应用于液压成形 B柱,通过仿真模拟及 试验来研究其可成形性。

## 1 第三代超高强钢 QP980 研发及性能 特点

QP980 为淬火延性钢, 是宝钢全球首发的第三 代超高强钢。如图1所示为高强钢按照研发时间及 强塑积的划分方法, 第一代高强钢随着强度的提升 塑性逐渐下降,强塑积在20000左右,包括双相钢 (DP钢)、马氏体钢、应变诱发塑性钢(Trip钢)等; 第二代高强钢通过一定量合金元素的添加,在获得 高强度的同时具有极高的塑性,强塑积在 60 000 左右,典型钢种为孪晶诱发塑性钢(Twip 钢),强度 为 1000 MPa 级别时,延伸率高于 50%,但由于较 多合金元素的添加,导致材料成本升高,且焊接及 涂装性极具挑战; 第三代超高强钢在保障较高强度 的同时, 塑性在第一代及第二代超高强钢之间, 强 塑积在 40 000 左右, 汽车的某些结构件, 在要求高 强度的同时又具有一定的成形难度, 第三代超高强 钢为此类零件成形提供了可能的选择<sup>[12-13]</sup>, QP 钢 为典型的第三代超高强钢。



QP 钢原理由美国科罗拉多矿业大学 Speer 教 授在 2003 年提出,宝钢 2010 年在全球率先实现该 钢种的工业化开发,目前在宝钢,该钢种已逐步得 到推广和应用。QP 钢通过材料生成过程淬火和配 分处理,形成马氏体+铁素体+残余奥氏体组织, 在成形过程中残余奥氏体转变为硬的马氏体,从而 提高了材料塑性,同时该组织转变有利于变形均匀, 具有更高的加工硬化指数,液压成形过程对材料加 工硬化指数较为敏感,因而 QP 钢适宜应用于液压 成形工艺<sup>[14-15]</sup>。

DP980 的强度为 1000 MPa 级别,是当前应用 最广泛的钢种,宝钢 QP980 及宝钢 DP980 力学性 能的典型值如表 1 所示,力学性能曲线如图 2 所示, QP980 延伸率、加工硬化指数均远高于 DP980,成 形性能更好。

#### 表 1 QP980 与 DP980 力学性能典型值 Table 1 Typical parameters of QP980 and DP980

材料	屈服强度	抗拉强度	加工硬化	断裂延伸率
	/MPa	/MPa	指数 n	1%
QP980	737	1072	0.162	20
DP980	680	1053	0.091	10.7



图 2 QP980 与 DP980 应力应变曲线对比 Fig.2 Engineering Strains of QP980 and DP980

图 3 所示为 QP980 与 DP980 各项目性能对比 情况, QP980 与 DP980 具有相近的弯曲性能及扩孔



图 3 QP980 与 DP980 各项性能对比 Fig.3 Property comparison of QP980 and DP980

性能,QP980 焊接性能略差于 DP980,但通过实验研究及 QP980 在当前汽车冲压成形中的应用表明,可以通过焊接工艺的调整,使 QP980 焊接满足使用要求。

## 2 QP980 及 DP980 液压成形 B 柱成 形仿真分析

### 2.1 可成形性仿真分析对比

借助 CAE 分析软件 Auroform,分别采用 QP980 及当前应用较多的 DP980 对液压成形 B 柱进行成 形仿真分析,如图 4、图 5 所示分别为 QP980 和 DP980 液压成形模拟成形极限图,其中成形极限图 中 FLC 曲线为对应板材 FLC 曲线下移后的结果, 根据经验制管后管材 FLC 曲线低于板材 FLC 曲线, 管材 FLC 曲线测量成本较高且周期较长,本文根据 经验对板材 FLC 曲线进行了向下偏移。



图 4 QP980 液压成形模拟 FLD Fig.4 FLD of QP980 hydroforming simulation



图 5 DP980 液压成形模拟 FLD Fig.5 FLD of DP980 hydroforming simulation

从图 4、图 5 模拟结果可以看到,采用 QP980 成形安全,具有较高的成形安全域度,采用 DP980

存在成形风险,局部靠近 R角区域可能发生开裂。

### 2.2 壁厚减薄率仿真分析对比

图 6、图 7 分别为 2 种材料壁厚减薄率的模拟 结果,图 6 及图 7 采用相同的视图方向,其中负值 代表壁厚减薄,正值代表壁厚增厚,由图 6 和图 7 可以看出,2 种材料模拟的壁厚变化率具有相同的 分布规律,均在所示 B 区域处壁厚减薄率最大, QP980 模拟最大壁厚减薄率为 5.5%, DP980 模拟 最大壁厚减薄率为 6.2%。



图 6 QP980 液压成形 B 柱壁厚减薄率模拟结果 Fig.6 Wall thinning of QP980 hydroforming simulation



图 7 DP980 液压成形 B 柱壁厚减薄率模拟结果 Fig.7 Wall thinning of DP980 hydroforming simulation

如图 8 所示为不同区域近似位置的特征点壁厚 减薄率对比,可以看到 2 种材料模拟壁厚减薄相近, 具有相同的变化规律, DP980 略大于 QP980, 分析



图 8 QP980 与 DP980 液压成形 B 柱模拟不同区域特征点 壁厚减薄对比

Fig.8 Comparison of wall thinning on measurement points between QP980 and DP980 simulation

62

认为这主要是由于 QP980 加工硬化指数高, 屈强比低, 成形过程中材料流动性优于 DP980, 变形更加均匀, 避免局部过度减薄。

#### 2.3 回弹仿真分析对比

超高强钢成形管件的技术难点是回弹控制。通 过仿真模拟对回弹进行预测,并在此基础上进行补 偿是超高强钢零件开发的有效手段,可以有效减少 修模次数,缩短模具开发周期和成本。回弹补偿首 先需要解决的问题是评估并提高回弹预测准确度, 本文对液压成形 B 柱回弹进行仿真模拟来预测回 弹,后续实际零件开发后再扫描零件,对比回弹模 拟精度。

图 9 所示为 QP980 回弹模拟结果,回弹约束条 件为对定位孔一侧一段区域进行拟合,如图 9 所示, 上图和下图分别为正反 2 个方向视图,结果显示, 该零件模拟在车身 X, Y 方向均存在较大的弯曲回 弹,一侧约束条件下,另一侧在车身 2 个方向上最 大回弹分别约 10 mm 和 8 mm,端部因后续切除未 进行分析,模拟显示该零件扭转回弹较小。



图 9 QP980 液压成形 B 柱回弹模拟 Fig.9 Simulation Springback of QP980 hydroforming B pillar

图 10 为 DP980 回弹模拟结果,由图 10 可知, DP980 与 QP980 具有相同的回弹规律,回弹大小整 体略小于 QP980,一侧约束条件下,另一侧在车身 2 个方向上最大回弹分别约 8 mm 和 6 mm。





## 3 QP980 液压成形 B 柱试验研究

#### 3.1 QP980 液压成形 B 柱实物零件开发

采用与仿真模拟相同的工艺试做 QP980 液压 成形 B 柱零件如图 11 所示,零件成形状态较好, 无起皱及开裂。



图 11 QP980 液压成形 B 柱零件开发 Fig.11 QP980 hydroforming B pillar tryout

## 3.2 QP980液压成形B柱模拟及试验壁厚减 薄对比

参照模拟最大壁厚减薄特征点的位置测量实际零件壁厚减薄,如图 12 所示,实际壁厚减薄率 与模拟具有相同的规律,说明模拟能较好的预测实际壁厚减薄率,所测特征点中J区域壁厚减薄率最大,最大值为 7.6%,两端区域壁厚增厚率较大,最大值为 9%。



图 12 QP980 特征点壁厚减薄率仿真值与试验值对比 Fig.12 Comparison of wall thinning on measurement points between simulation and experement

#### 3.3 QP980液压成形B柱模拟及试验回弹对比

如图 13 所示为 QP980 液压成形 B 柱实物样件 扫描结果,与模拟采用相同的约束方式,由图 13 可以看出,实物零件与模拟具有相同的回弹趋势, 一侧约束条件下,另一侧在 2 个方向上存在弯曲回 弹,2 个方向回弹最大值约 6 mm,小于模拟结果。 模拟与实际零件回弹对比表明,通过模拟可以较好

63

地预测液压成形 B 柱回弹, 作为零件开发过程中回 弹补偿依据。





### 4 结论

分别采用 QP980 及 DP980 仿真模拟分析显示, 采用 QP980 成形性较好,采用 DP980 局部存在开 裂风险;壁厚减薄率对比表明,2种材料壁厚减薄 及壁厚增厚分布趋势相近,采用 QP980 模拟最大壁 厚减薄率略小于 DP980;回弹模拟显示,采用 2种 材料回弹趋势相近,采用 QP980 回弹大于 DP980。 开发了 QP980 液压成形 B 柱实物样件,与模拟相 同工艺条件下,样件成形状态较好,无起皱开裂缺 陷,与模拟壁厚减薄对比具有相近的变化趋势,实 际壁厚减薄大于模拟,所测位置实际最大壁厚减薄 率为 7.6%,最大壁厚增厚率为 9%,实物零件与模 拟具有相近的回弹趋势,一端约束,另一端在 2 个 方向上存在弯曲回弹,回弹最大值约 6 mm。

#### 参考文献:

- 李卫红,赵磊,李卫钊,等.Q&P 钢在汽车上应用性能的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(16): 68—73.
   LI Wei-hong, ZHAO Lei, LI Wei-zhao, et al. Research on Application Properties of Q&P Steel in Automobile[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(16): 68—73.
- [2] 陈龙,张超,曹婷婷,等.高强钢复杂曲面件充液拉深 工艺模拟研究[J].精密成形工程,2012,4(3):39—42. CHEN Long, ZHANG Chao, CAO Ting-ting, et al. Simulation Research of Sheet Hydroforming Process for High Strength Steel Complex Surface Part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(3): 39—42.
- [3] ABEDRABBO N, WORSWICK M, MAYER R. Optimization Methods for the Tube Hydroforming Process Applied to Advanced High-strength Steels with Experimental Verification[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 110–123.
- [4] PARSA M H, DARBANDI P. Experimental and Numerical Analyses of Sheet Hydroforming Process for Production of

an Automobile Body Part[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198: 381—390.

- [5] 周子钊,李新军,周应科,等.基于内高压成形方法的 航空发动机空心叶片工艺设计[J].精密成形工程,2015, 7(3):67—72.
   ZHOU Zi-zhao, LI Xin-jun, ZHOU Ying-ke, et al. Process Design of Aero Engine Hollow Blade Based on Hydroforming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015,
- 7(3): 67—72.
  [6] 王鸿基, 徐迎强, 周结魁. 加载路径对变径管内高压成形影响的模拟研究[J]. 精密成形工程, 2012, 4(3): 47—50.
  WANG Hong-ji, XU Ying-qiang, ZHOU Jie-kui. Simulation Study of the Impact of Loading Paths on Hydroforming of Tubes with Variable Cross Sections[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(3): 47—50.
- [7] 刘欣, 徐永超, 苑世剑. 铝合金复杂曲面薄壁件液压成 形技术[J]. 精密成形工程, 2010, 2(1): 42—45. LIU Xin, XU Yong-chao, YUAN Shi-jian. Hydroforming for Aluminum Alloy Complex shaped Components[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(1): 42—45.
- [8] 蒋浩民. 宝钢汽车零部件产业发展概述[C]. 天津: 全国 钢材深加工研讨会, 2014: 143—146. JIANG Hao-min. Overview of the Automobile Parts Industry Development in Baosteel[C]. Tian Jin: National Symposium on Deep Processing of Steel Products, 2014: 143—146.
- [9] 蒋浩民,陈新平,范频,等.管件液压成形技术及其在 车身轻量化中的应用[C].成都:中国钢铁年会,2007: 259—264.
  JIANG Hao-min, CHEN Xin-ping, FAN Pin, et al. Tube Hydroforming Technology and Its Application in Lightweight of Auto Body[C]. Chengdu: China Iron and Steel Annual Meeting, 2007, 259—264.
- [10] 王习文, 宗长富, 郭立书, 等. 管件液压成形技术及其 在汽车零部件制造中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2013(4): 17—22.
  WANG Xi-wen, ZONG Chang-fu, GUO Li-shu, et al. Tube Hydroforming Technology and Its Application in Automobile Parts Manufacturing[J]. Automotive Technology and Materials, 2013(4): 17—22.
- [11] DU Hui-jun, LI Shu-li, YANG Jie. The Automobile Steel of the Third Generation in B-pillar Reinforced Panel[J]. Engineering Sciences, 2012, 10(6): 20–22.
- [12] XIE Huan-yang, DONG Xiang-huai, WANG Qian. Investigation on Transient Electrically-assisted Stress Relaxation of QP980 Advanced High Strength Steel[J]. Mechanics of Materials, 2016, 93: 238–245.
- [13] DING Lei, LIN Jian-ping, MIN Jun-ying. Necking of Q&P Steel during Uniaxial Tensile Test with the Aid of DIC Technique[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 448—453.
- [14] 左敦桂, 阎启, 王利. 超高强 QP980 钢激光焊缝组织和 性能研究[J]. 金属加工, 2015(4): 47—48.
  ZUO Dun-gui, YAN qi, WANG Li. Study on Microstructure and Properties of AHSS QP980 by Laser Welding[J]. Metal Working, 2015(4): 47—48.
- [15] 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]. Forming & Stamping Technology, 2012, 37(6): 113—121.