# 复相钢 CP800 典型零件冲压开裂原因分析与改进

陈东辉[1,2]，张玉龙[1,2]，陈明[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** 解决热轧酸洗复相钢 CP800 在底盘拖曳臂外壳零件应用过程中出现的开裂问题。**方法** 借助有限元软件 AUTOFORM 对零件进行仿真评估，研究材料性能、润滑状态、模具圆角、坯料尺寸等对开裂的影响，分析影响开裂的原因。**结果** 通过提升材料性能、降低摩擦因数、放大凹模圆角以及优化坯料边界，可以有效改善开裂区域的成形性能，其中优化坯料边界效果最佳，开裂风险可完全消除。**结论** 材料性能按均匀伸长率≥5%控制，同时通过优化开裂区域坯料边界及放大凹模圆角，开裂得到了有效解决。

关键词：CP800；开裂；仿真分析

**DOI**：10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.020

中图分类号：TG386 文献标识码：A 文章编号：1674-6457(2020)02-0121-06

## Analysis and Improvement of Stamping Cracking of Typical Part for Complex Phase Steel CP800

*CHEN Dong-hui*[1,2], *ZHANG Yu-long*[1,2], *CHEN Ming*[1,2]

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

**ABSTRACT:** The paper aims to solve the cracking problem of hot rolled pickling dual phase steel CP800 in the application of chassis drag arm shell parts. Based on the simulation assessment with AUTOFORM software, the effects of material properties, lubrication state, die fillet and blank size on cracking were studied, and the causes of cracking were analyzed. By improving material properties, reducing friction coefficient, enlarging die fillet and optimizing blank boundary, the formability of the cracked area was be effectively improved. Among them, optimizing blank boundary had the best effect and cracking risk can be completely eliminated. The uniform elongation of the material is controlled by 5%. By optimizing the blank boundary of the cracking area and enlarging die fillet, the cracking is effectively solved.

**KEY WORDS:** CP800; crack; simulation analysis

随着碰撞法规及能源环保的日益严格，高强度钢板在汽车上的应用比例越来越高。常规的先进高强钢如双相钢、复相钢、马氏体钢等各具特点，已广泛应用于各种车身和底盘类零件[1—3]。复相钢（CP）作为第一代先进高强钢的一种，与其他同级别钢种相比，具有优异的扩孔性能、良好的弯曲性能和翻边成形性，更适用于制造形状复杂的汽车底盘类零件[4—5]。

近年来，热轧酸洗复相钢 CP800 在底盘件中的应用越来越多[6—7]，然而随着零件强度的提高，冲压成形质量缺陷也日益增多，高强度复相钢在底盘结构件上的应用研究也得到挑战。文中以底盘拖曳臂外壳零件为研究对象，从冲压开裂问题入手，借助 CAE 仿真手段分析了材料、工艺、模具等对开裂的影响，提出优化改进方案，对冲压开裂缺陷进行改善，为同

收稿日期：2019-09-03

作者简介：陈东辉（1982—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为高强钢应用技术。

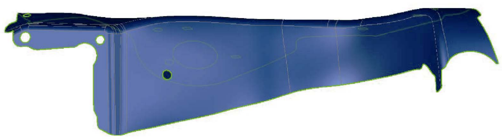
类复相钢零件的冲压工艺设计提供现实参考。

## 1 工艺性分析及开裂现状

### 1.1 零件特征

拖曳臂外壳是汽车底盘零件中比较典型的拉延类结构件，零件数模如图 1 所示。从零件特征进行分析，发现左右两侧不对称，空间上存在扭曲，表面有较多特征，采用成形工艺不易实现，只能考虑拉延成形工艺。由于拉延深度较深，可以预估该零件成形具有一定风险。

a *z* 轴方向



b *x* 轴方向

图 1 拖曳臂外壳

Fig.1 Outer shell of trailing arm

### 1.2 开裂现状

该零件采用五序成形的工艺排布，一模两件，工艺方案为拉延-修边-修边冲孔-分离-翻边整形，用户反馈该零件自投产开始，生产即不稳定，报废率在 0.5%左右，个别材料开裂率达到 100%。生产现场对开裂卷进行冲压调试，发现零件在拉延序即出现开裂，开裂发生在底部拐角圆弧处，拉延工序模面和开裂区域如图 2 所示。

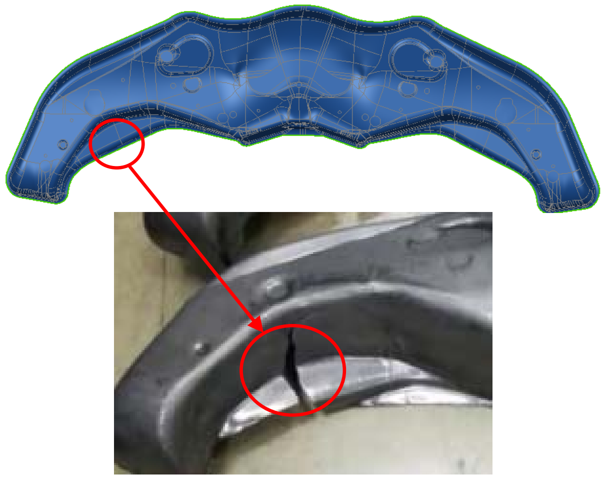


图 2 拉延序模面及开裂区域

Fig.2 Drawing die surface and cracking region

## 2 原因分析及改进方案

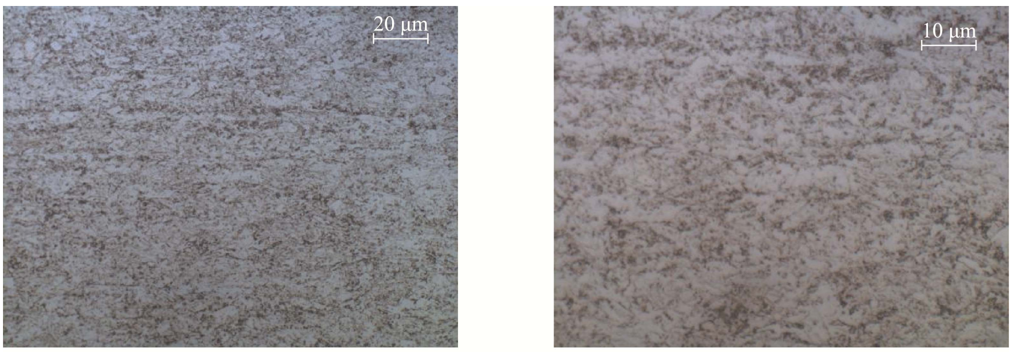
### 2.1 材料性能检测

该零件采用宝钢热轧酸洗 CP800 材料，对开裂卷取样进行力学性能检测，见表 1。整体来讲此卷的强度偏高，抗拉强度约 890 MPa，断裂伸长率虽然满足大于 10%的技术指标要求，但是均匀伸长率相对较低，为 4.0%~4.5%。对开裂处显微组织进行分析，没有发现偏析和断层，显微组织没有明显异常，如图 3 所示。

表 1 力学性能检测结果

**Tab.1 Test results of mechanical properties**

| 方向 | 厚度/mm | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 均匀伸长率/% | 断裂伸长率/% |
|---|---|---|---|---|---|
| CP800-1 | 2.65 | 795 | 893 | 4.5 | 11 |
| CP800-2 | 2.65 | 790 | 890 | 4.0 | 10.5 |
| CP800-3 | 2.64 | 796 | 895 | 4.0 | 10.5 |




a 20 μm　　b 10 μm

图 3 显微组织分析结果

Fig.3 Microstructure analysis results

### 2.2 CAE 仿真分析

采用数值模拟软件 AUTOFORM 进行拉延序成形分析。将初始拉延模面导入 AUTOFORM 软件中，按照工艺方案完成定义，如图 4 所示。分析所用材料为宝钢热轧酸洗 CP800 材料，厚度为 2.6 mm。仿真

硬化模型采用 APROXIMATION，屈服模型为 Barlat，成形极限 FLD 采用实测曲线输入，单元类型采用壳单元进行计算[8—9]。

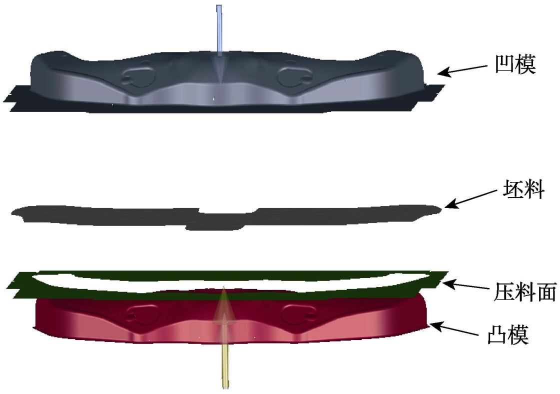



图 4　拉延序分析模型
Fig.4 Analysis model of stamping process

拉延序成形性分析结果如图 5 所示。成形极限图（Forming limit diagram，简称 FLD）是薄板成形工艺分析和工艺设计的有效工具[10]，从零件变形最终应变在 FLD 中的分布及安全裕度可知，底部拐角圆弧处安全裕度偏低，成形极限图（见图 5c）中已接近 FLC 曲线，处于临界状态，成形过程有开裂风险，分析结果与现场实际开裂位置一致。另外，从应变状态分布可知，零件变形兼有单向拉伸、平面应变和胀形 3 种状态，其中开裂区域的变形为单向拉伸状态，最大减薄率为 16.7%。

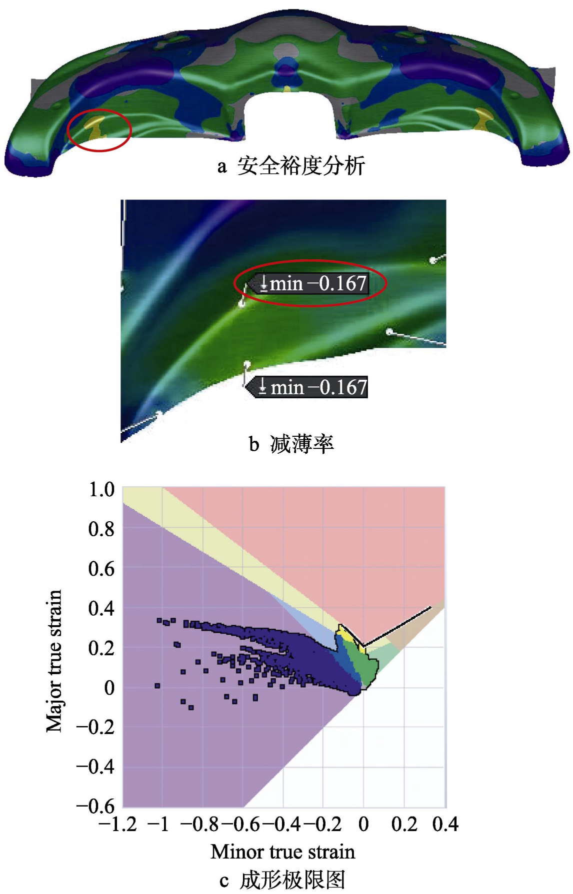



图 5　成形仿真分析结果
Fig.5 Simulation results of drawing process

## 2.3　影响因素分析

通过上述对初始模面的仿真分析，再现了现场冲压时出现的开裂问题，说明该零件自投产之初模具与材料匹配性便不佳，原工艺参数存在不合理之处。冲压成形过程中，材料、工艺和模具等影响开裂的因素较多，如材料、压边力、板料形状、板料厚度、润滑状态、模具圆角、板料性能等[11—12]，使变形过程异常复杂。为解决开裂问题，需要从多方面进行分析，改善材料流动和应力应变状态，确定有效的改进措施，以确保成形质量。

### 2.3.1　材料性能

对于超高强钢而言，屈服强度、抗拉强度、加工硬化指数 $n$ 和伸长率[13—14]是影响成形的重要参数。在实际生产过程中，供货的材料性能必然存在波动，对零件安全裕度造成影响。通过对不同批次 CP800 材料性能及冲压情况跟踪，发现均匀伸长率参数波动较大，借助有限元仿真分析，验证不同均匀伸长率对开裂区域成形性影响，以确定合理的控制指标。

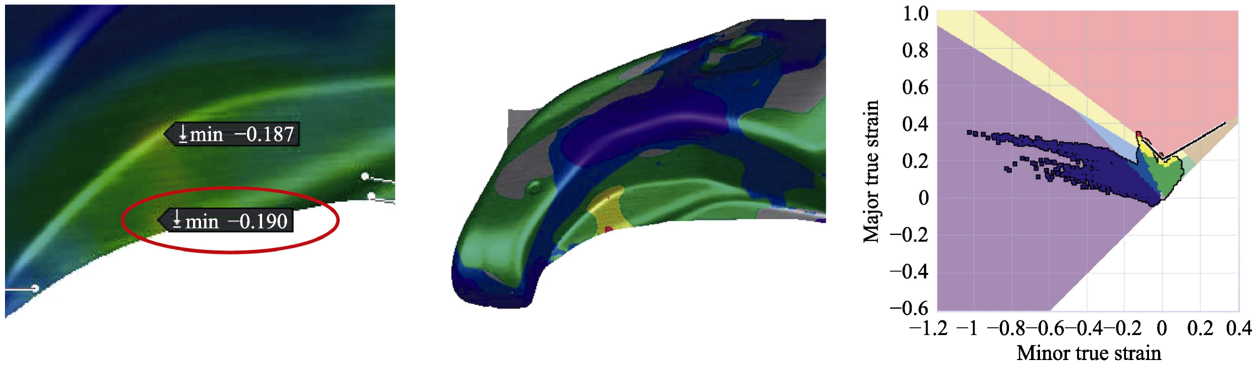
保持材料性能参数抗拉强为 813 MPa，摩擦因数为 0.15 和 $r$ 值不变，分别取材料均匀伸长率为 8%, 6%, 5%, 3%进行仿真计算。结果表明，随着均匀伸长率的减小，开裂区域最大减薄增大，成形后零件的最大减薄率分别为 16.7%, 18.3%, 19%, 22.5%。当均匀伸长率减少至 5%时，部分网格应变已超过 FLC 曲线，表明零件已处于破裂状态，如图 6 所示。仿真分析结果说明随着材料均匀伸长率的下降，材料成形性能降低，增大了破裂的可能性。

### 2.3.2　凹模圆角

在模具中对应开裂区域放大凹模圆角，可以减少局部坯料流动阻力，降低冲压开裂风险。针对开裂区域，在 CAE 分析中将凹模特征圆角半径从 $R9$ mm 放到 $R12$ mm，分析结果显示开裂风险有所改善，最大减薄率由 16.7%下降至 16.3%，如图 7 所示。在不影响产品特征的前提下，放大该区域圆角对于开裂有改善作用。

### 2.3.3　润滑效果

在冲压过程中，无润滑条件下，钢板与模具之间摩擦因数较大，使材料在模具表面流动时产生很大的摩擦和发热，影响成形性能。提高钢板表面润滑效果，可以降低冲压摩擦因数，从而提高钢板的成形性能[15—16]。在 CAE 分析中，将摩擦因数由 0.15 降为 0.12，验证对冲压开裂的影响。分析结果显示最大减薄率由 16.7%下降至 15.7%，如图 8 所示，开裂风险有明显改善。




a 减薄率　　b 安全裕度分析　　c 成形极限图

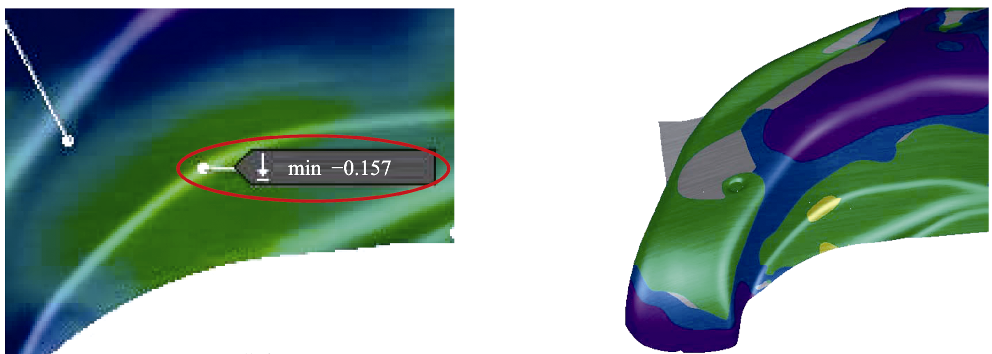
图 6　均匀伸长率为 5%时成形仿真分析结果

Fig.6 Simulation results of drawing process at 5% uniform elongation


a 减薄率　　b 安全裕度分析

图 7　放大凹模圆角后成形仿真分析结果

Fig.7 Simulation results of drawing process after enlarging the die fillet




a 减薄率　　b 安全裕度分析

图 8　减小摩擦因数后成形仿真分析结果

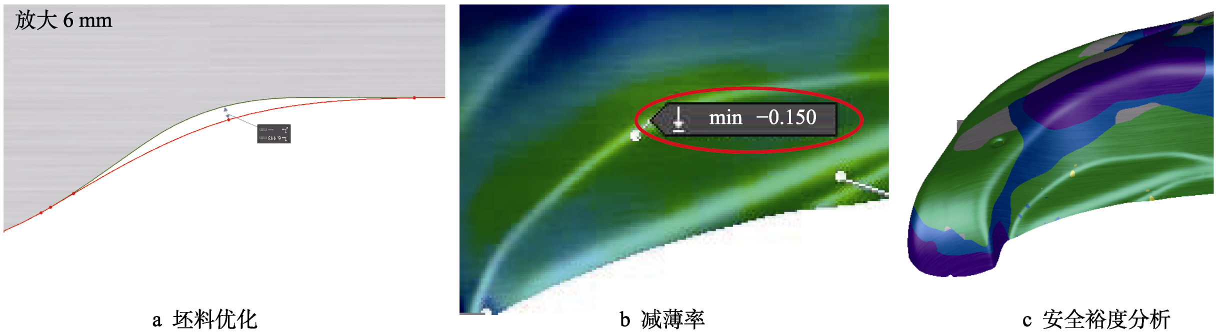
Fig.8 Simulation results of drawing process after reducing friction coefficient

### 2.3.4　坯料边界

开裂区域处于拐角圆弧处，在冲压过程中受到多重拉应力，在成形过程中该区域材料流动过快，钢板迅速变薄，在某点产生应力集中，当拉应力超过钢板允许最大强度时，板材迅速失稳，产生开裂。在 CAE 分析中对坯料拐角边界优化做顺，圆弧半径外扩放大 6 mm，结果显示开裂风险明显改善，最大减薄率由 16.8%下降至 15%，如图 9 所示。对坯料圆弧半径进一步外扩放大至 15 mm，结果显示开裂风险可完全消除，最大减薄率由 16.8%下降至 14.3%，如图 10 所示。从分析结果可知，开裂区域坯料外扩做顺后，材料流动性得到改善，成形性改善效果显著。

## 2.4　改进方案及实施效果

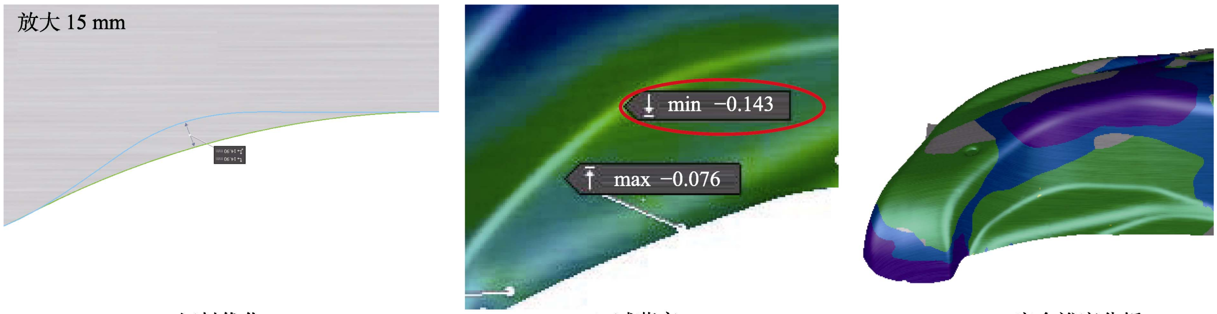
基于以上 CAE 仿真结果，针对拖曳臂内壳零件，通过提升材料性能、降低摩擦因数、放大凹模圆角以及优化坯料边界，可以有效改善开裂区域的成形性能，其中优化坯料边界效果最佳，开裂风险可完全消除。提升材料性能有利于成形，但相应增加了钢厂的生产成本和控制难度，通过综合考虑，针对该零件提出了均匀伸长率≥5%的控制指标。降低摩擦因数需要加大零件表面涂油量，一定程度上增加了配套厂生产成本，暂不实施。




a 坯料优化　　　　b 减薄率　　　　c 安全裕度分析

图 9　坯料圆弧半径放大 6 mm 后成形仿真分析结果

Fig.9 Simulation results of drawing process after enlarging the radius of blank arc by 6 mm




a 坯料优化　　　　b 减薄率　　　　c 安全裕度分析

图 10　坯料圆弧半径放大 15 mm 后成形仿真分析结果

Fig.10 Simulation results of drawing process after enlarging the radius of blank arc by 15 mm

针对该零件冲压开裂问题，最后确定改进方案如下：① 放大开裂区域凹模圆角，改善局部区域材料流动；② 优化坯料边界尺寸（放大圆弧半径 6~15 mm)，提高开裂区域整体安全裕度；③ 加严 CP800 材料性能控制，均匀伸长率按≥5%要求。生产实践验证，在后续的底盘拖曳臂外壳零件批量冲压生产过程中，未再出现开裂现象，现场生产稳定性得到了大幅度提高。

## 3　结论

1）针对热轧酸洗复相钢 CP800 在底盘拖曳臂外壳零件应用过程中的开裂问题，借助 CAE 分析手段，分析了影响其成形性的主要因素，提出加严材料性能控制标准、优化坯料边界，及适当放大凹模圆角的改进措施，其中优化坯料边界效果最佳，开裂风险可完全消除。

2）均匀伸长率是复相钢 CP800 材料的一个重要性能指标，对于典型拉延零件，稳定冲压所需的均匀伸长率控制范围为≥5%。

参考文献：

[1] CARLA L, SIMOES R, FIGUEIREDO D S, et al. Environmental and Economic Performance of a Car Component: Assessing New Materials, Processes and Designs[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 118: 105—117.

[2] 王利，陆匠心．汽车轻量化及其材料的经济选用[J]. 汽车工艺与材料, 2013(1): 1—6.
WANG Li, LU Jiang-xin. Automobile Lightweight and Economical Choice of Materials[J]. Automobile Technology & Material, 2013(1): 1—6.

[3] 蒋浩民，陈新平，石磊，等．先进高强度钢板的冲压成形特性及其应用[J]．塑性工程学报，2009，16(4): 183—186.
JIANG Hao-min, CHEN Xin-ping, SHI Lei, et al. Forming Characteristics and Application of Advanced High Strength Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 183—186.

[4] 黄玉龙，张玉龙．超高强度复相钢 CP800 的相变行为及热轧工艺研究[J]．上海金属, 2018, 40(4): 68—73.
HUANG Yu-long, ZHANG Yu-long. Phase Transformation Behavior and Hot Rolling Process of Ultra High Strength Composite Steel CP800[J]. Shanghai Metals,2018, 40(4): 68—73.

[5] 王韬．超高强度复相钢 CP800 冲压工艺适用性研究[D]. 上海：上海交通大学, 2015.
WANG Tao. Applicability of Ultra-high Strength Multiple Phase Steel CP800 Stamping Process[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.

[6] MORI K, AKITA K, ABE Y. Spring Back Behaviour in Bending of Ultra-high-strength Steel Sheets Using CNC Servo Press [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(2): 321—325.

[7] 张帆，李芳，华学明，等．冷轧复相钢与低合金高强钢差厚板激光拼焊的焊缝组织与力学性能研究[J]．中

国激光, 2015(49): 1—7.
ZHANG Fan, LI Fang, HUA Xue-ming, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joint of Cold-rolled Duplex Steel and Low-alloy High-strength Steel Plates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015(49): 1—7.

[8] 侯文彬, 张红哲, 徐金亭, 等. 基于概念设计的客车车身结构设计与优化系统[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(10): 58—63.
HOU Wen-bin, ZHANG Hong-zhe, XU Jin-ting, et al. System of Design and Optimization System for Bus Body Structure Based on Concept Design[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(10): 58—63.

[9] 崔振祥, 杨丹. 超高强钢前纵梁零件冲压开裂分析与处理[J]. 精密成形工程, 2017, 9(6): 32—36.
CUI Zhen-xiang, YANG Dan. Analysis and Treatment of Stamping Cracking of Front Longitudinal of Ultra-High Strength Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(6): 32—36.

[10] 陈新平, 蒋浩民. 汽车钢板胀形区成形极限图的预测与验证[J]. 金属成形工艺, 2003, 21(6): 86—88.
CHEN Xin-ping, JIANG Hao-min. The Prediction and Validation of Bulging Region of Forming Limit Diagram (FLD) of Steel Sheet[J]. Metal Forming Technology, 2003, 21(6): 86—88.

[11] 曾利奎, 李彩霞, 王敬. 汽车前地板后段零件拉延成形工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2017, 42(8): 42—44.
ZENG Li-kui, LI Cai-xia, WANG Jing. Optimization on Drawing Process Parameters for Rear Parts of Automobile Front Floor[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(8): 42—44.

[12] 肖景荣, 姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 151—171.
XIAO Jing-rong, JIANG Kui-hua. Sheet Metal Forming[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999: 151—171.

[13] 刁克山, 曹猛, 蒋浩民, 等. DP600 高强钢零件冲压成形有限元仿真及试验[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(3): 66—69.
DIAO Ke-shan, CAO Meng, JIANG Hao-min, et al. FEM and Experiment Analyses of Stamping Process for AHSS Part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 17(3): 66—69.

[14] MCEWAN C, UNDERHILL R, LANGERAK N, et al. A New Approach to Predicting Edge Splits-The Combined FLD/HEC Diagram[J]. International Deep Drawing Research Group (IDDRG), 2009: 65—72.

[15] 杜蓉, 雷泽红, 钟如涛, 等. 汽车用自润滑合金化板的综合应用性能[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(7): 74—78.
DU Rong, LEI Ze-hong, ZHONG Ru-tao, et al. Comprehensive Application Properties of Self-lubricated Galvannealed Steel Sheet for Automobile[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(7): 74—78.

[16] 王雷刚, 周建芬, 许亚婷, 等. 基于平板滑动摩擦实验的镀锌板摩擦特性研究[J]. 塑性工程学报, 2016, 23(2): 87—91.
WANG Lei-gang, ZHOU Jian-fen, XU Ya-ting, et al. Friction Characteristic of Galvannealed Sheet Steel Based on Flat Sliding Friction Test[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23(2): 87—91.