

# 汽车前地板纵梁高强钢应用及回弹控制技术

郭运<sup>1,2</sup>, 吴彦骏<sup>1,2</sup>, 陈新平<sup>1,2</sup>

(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** 研究造型相对复杂的前地板纵梁高强钢(HSS)应用回弹变形特点, 探寻回弹控制方法。**方法** 借助 CAE 分析技术, 对零件进行全工序和回弹仿真分析, 深入探讨零件回弹特点, 提出回弹整改控制措施。**结果** 通过整改措施的落实, 样件尺寸精度达到 1 mm 控制要求, 零件平均合格率达到 90%以上, 满足质量要求。**结论** 数值仿真分析可以对零件的成形性及回弹进行预测, 为工艺设计及模具开发提供有益参考。提出的回弹控制技术可用于指导同类型高强钢零件的模具开发工作。

**关键词:** 回弹控制; 高强钢; 前地板纵梁; CAE 分析

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.010

**中图分类号:** TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0047-06

## Application and Springback Control Technique for HSS from Front Floor Side Rail of Automobile

GUO Yun<sup>1,2</sup>, WU Yan-jun<sup>1,2</sup>, CHEN Xin-ping<sup>1,2</sup>

(1. Central 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 study the springback deformation characteristics of a complex side rail under front floor made from High Strength Steel (HSS) and seek measures for springback control. CAE analysis technology was employed to simulate whole forming processes and predict springback. Springback features and influence factors were discussed. Several springback control measures were proposed. By application of springback control measures, the size accuracy of specimen reached the quality requirement of 1mm. The average qualified rate reached 90%. The requirement on quality of sample product was met. Numerical simulation analysis can predict formability and springback of parts and provide useful reference to process design and mold development. Springback control measures proposed in this paper can be used to guide mold development of other similar parts.

**KEY WORDS:** springback control; HSS; side rail under front floor, CAE analysis

随着汽车工业的发展, 汽车轻量化技术越来越成为各方关注的焦点<sup>[1-3]</sup>。设计轻量化、结构轻量化和材料轻量化是汽车轻量化的主要技术路径。其中, 采用高强度钢板来实现车身减重是当前相对经济且有效的方法。提升高强钢在车身上的应用比例已成为各家车厂的首选。高强钢具有较高的强度

( $T_s > 340$  MPa)、较好的韧性、适当的伸长率和较高的加工硬化率。应用高强钢不仅可以通过高强减薄来实现减重, 而且结合设计和结构优化可大幅提高整车的安全性。

与传统汽车板相比, 高强钢因为具有更高的屈服强度, 导致冲压成形后回弹增大, 造成冲压件尺寸精

收稿日期: 2017-09-20

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

度不良,为后续的焊接组装等造成不利影响,进而影响整车精度。影响冲压回弹的因素非常广泛,涉及板材性能、板材厚度、零件造型以及冲压工艺条件等。影响因素的多耦合性导致高强钢的回弹控制相对困难<sup>[4-5]</sup>。如何有效控制回弹,更好的应用高强钢已成为各主机厂和材料供应商面临的共同课题。

文中从某车型高强钢前地板纵梁的冲压工艺设计入手,结合数值模拟分析技术,对零件进行全工序的仿真分析<sup>[6]</sup>。通过对回弹控制技术的研究,建立了近似结构的回弹控制策略,为同类高强钢零件的模具开发提供现实参考。

## 1 工艺性分析及成形工艺排布

### 1.1 零件特征及材料特性

前地板纵梁数模见图1。该前地板纵梁相对复杂,主要体现在 $x$ 方向上为一端开口一端闭口, $y$ 方向上两侧翻边长度不同,且长翻边侧翻边形状更加复杂,整体呈现非对称结构。两侧立壁拔模角度为 $4^\circ\sim 5^\circ$ 。

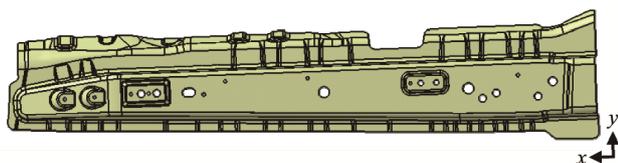
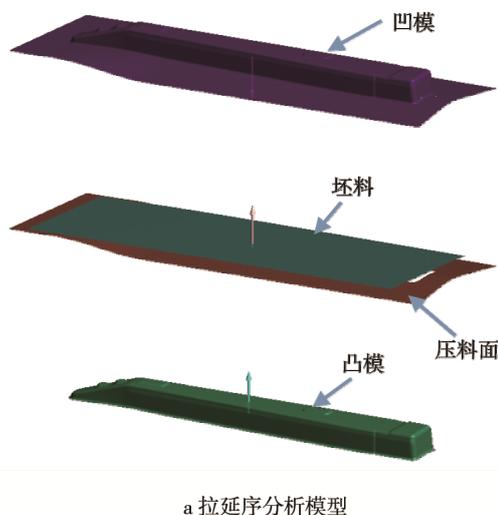


图1 前地板纵梁  
Fig.1 Side rail under front floor

前地板纵梁采用宝钢生产的冷轧高强度低合金钢板,材料牌号为HC340LA,厚度为1.4 mm,材料主要特性见表1。



a 拉伸序分析模型

表1 HC340LA 钢板机械性能  
Tab.1 Mechanical property of HC340LA steel sheet

方向	屈服/MPa	抗拉/MPa	均匀伸长率/%	硬化指数 $n$	塑性应变比 $r$
$0^\circ$	375	485	18	0.174	0.694
$45^\circ$	397	483	17.8	0.171	1.121
$90^\circ$	398	493	17.9	0.171	0.98

### 1.2 成形工艺排布

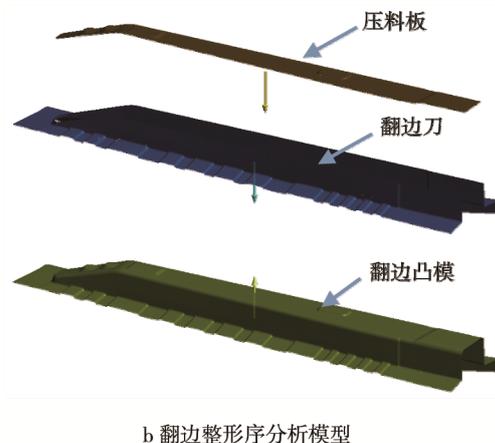
该零件的非对称结构以及高强钢的应用决定了零件回弹控制难度较大。零件两侧立壁设计有 $4^\circ\sim 6^\circ$ 的拔模角度,为回弹控制留有了一定的补偿空间。从节约成本的角度考虑,该零件的模具开发不设置专门的整形工序,而是充分发挥拉延成形对零件定型的关键作用,最大限度地拉延序进行回弹控制。

经综合评估,对该零件采用了3序成形的工艺排布,即:拉延-修边-冲孔-翻边-整形。按照上述工艺,利用商业软件 AutoForm 对零件进行了全工序数值仿真分析。

## 2 全工序分析及回弹结果

### 2.1 全工序仿真分析

为了提高模具开发效率,根据经验对可能发生回弹的立壁和法兰边的模面型面进行了预先补偿。将靠近开口端的拔模角度由 $4^\circ\sim 5^\circ$ 补偿至 $2^\circ$ 左右,两侧法兰边压料面反向向下补偿 $8^\circ$ 左右。靠近零件闭口端模面未予补偿。采用单动拉延,压边力为800 kN,摩擦因数为0.15。该零件拉延和翻边整形的仿真分析模型见图2。



b 翻边整形序分析模型

图2 仿真分析模型  
Fig.2 FEM model

### 2.2 成形性及回弹分析结果

拉伸成形性及安全裕度见图3。可以看到，在拉伸序中材料变形均处于安全状态，产品面无开裂和明显起皱的情况，零件能够顺利成形。翻边整形序分析结果以及回弹结果见图4和图5。其中，闭口端两侧

立壁和顶部平面的回弹量较小，不大于1 mm。在开口端，短法兰边一侧的立壁呈现出卷曲回弹的特征，顶部平面出现了扭曲。两端的法兰边在回弹后均出现了精度超差的情况，而且开口端尺寸偏差要大于闭口端。回弹后零件尺寸精度超差，无法满足装车质量要求，需要进一步整改。

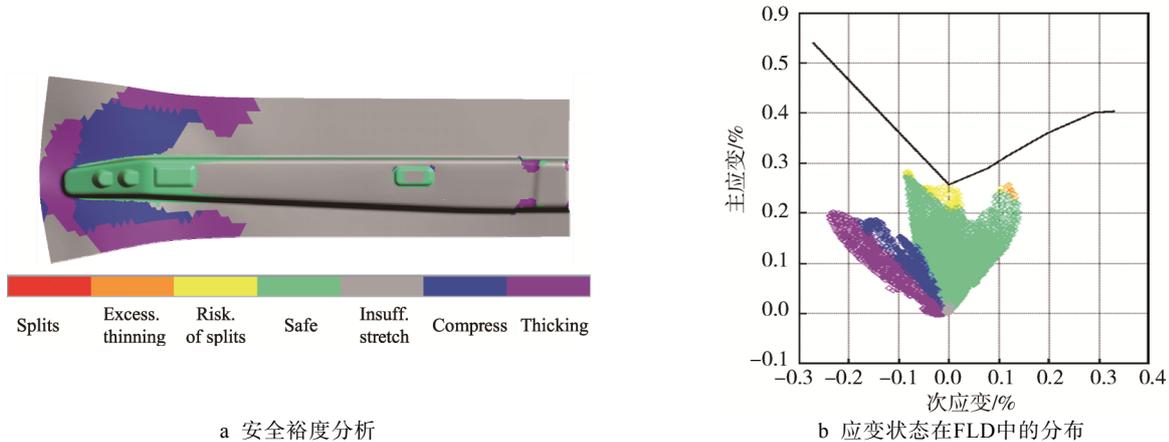


图3 拉伸序仿真分析结果  
Fig.3 Simulation results of drawing process

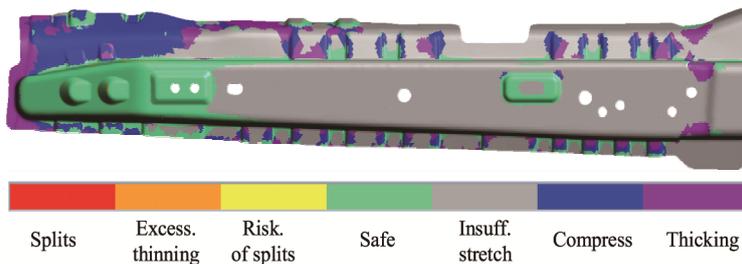


图4 翻边整形序仿真分析结果  
Fig.4 Simulation results of flange process

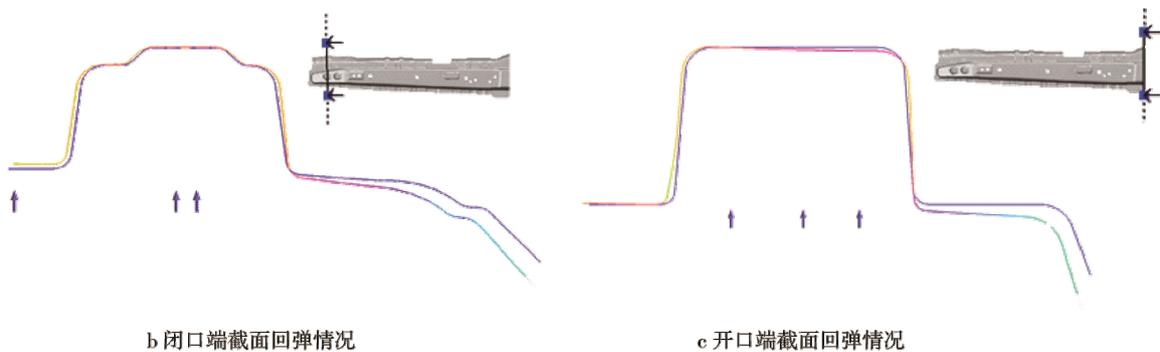
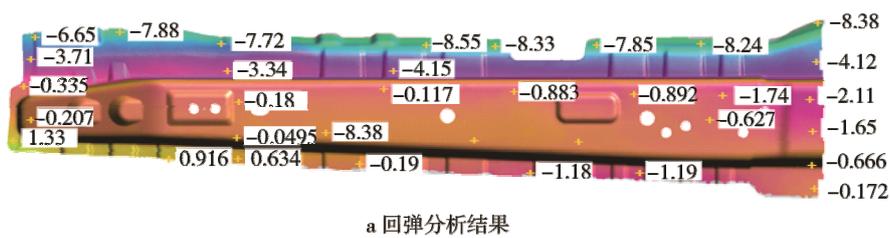


图5 回弹仿真分析结果  
Fig.5 Simulation results of springback

### 3 回弹控制策略及整改措施

#### 3.1 回弹控制策略

回弹与材料性能、零件结构和工艺参数等密切相关,影响因素众多。通过系统的实验研究,已经基本了解各种因素影响回弹的一般趋势,比如材料力学性能的影响、相对弯曲半径的影响、弯曲角的影响、模具几何形状与模具间隙的影响等等<sup>[7-11]</sup>。尽管如此,当前对回弹的控制更多依赖于工程手段<sup>[12-16]</sup>。在理论研究的基础上,在工程上已建立了应对回弹的一般控制方法,主要包括:① 补偿法,其原理是根据弯曲成形零件卸载后的回弹趋势和回弹量大小,预先在模具上作出等于零件回弹量的斜度,以补偿零件成形后的回弹,也可通过改变凸模的行程,使零件得以过量弯曲,借此使得回弹后的形状符合精度要求;② 拉弯法,其原理是在板料弯曲的同时施加拉力,改变板料内部的应力状态以及分布情况,使应力应变分布趋于均匀一致,从而可显著减少回弹,减小模具间隙可取得一定的拉弯效果,因此生产中有时采用小于板厚的负间隙,但摩擦、擦伤问题变得较为突出;③ 加压校正法,在有底凹模的限制弯曲时,当零件与模具贴合后,以附加压力校正弯曲变形区,使压区沿切向产生拉伸应变,卸载后拉压两区的回弹趋势相抵,可以减少回弹。

由仿真分析结果可以知,前地板纵梁的回弹超差主要表现在法兰法向回弹、侧壁卷曲回弹和顶部平面

扭曲回弹。其中,法兰法向负超差,应为压料面反向补偿过大所致。法兰的法向回弹除了自身的回弹效应外,立壁的回弹在一定程度上影响了该部位的回弹效应。对于该部位的回弹控制应和立壁的回弹控制进行综合考虑。

侧壁卷曲回弹是由薄板两侧内应力不同所致。在顶部圆角,内侧为压缩变形,而外侧则为拉伸变形。按照拉弯法的补偿策略,减少两侧应变差异,将“压-拉”变为“拉-拉”变形,可对回弹产生有效影响。

后地板纵梁为非对称件,回弹趋势也呈现出非对称性规律,由此造成顶部面内部应力分布不均,在卸载后顶部面出现扭曲回弹。从另一方面看,造成扭曲回弹的原因也可认为是料流不均造成的。扭曲回弹的成因较为复杂。针对本零件的回弹情况,主要通过补偿法,将拉延序模面进行反向调整,以补偿开口端平面回弹超差。

根据以上分析对零件的回弹控制制定了整改措施。

#### 3.2 回弹整改措施

整改措施一:优化压料面补偿角度至 $5^\circ$ ,见图6。此外,法兰边的法向回弹可视拉延后的回弹情况在翻边整形序进行二次补偿控制。

整改措施二:改变两侧立壁顶部圆角的材料变形状态,将拉延模下段拔模角度进一步优化至 $0^\circ\sim 1^\circ$ ,并在靠近上圆角处做一个台阶造型,见图7。台阶将使圆角处的板料下表面能够发生拉伸变形,从而减小壁厚两侧的应变差,增强零件形状定型,减少回弹。

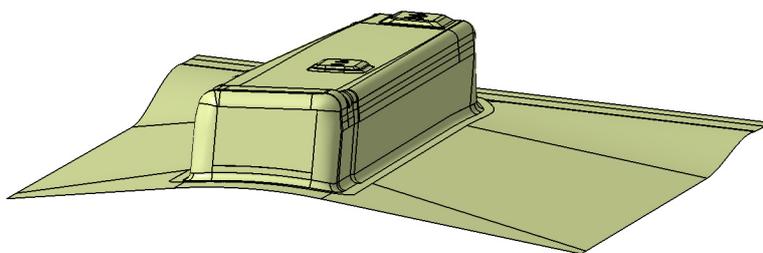


图6 压料面反向补偿  
Fig.6 Reverse compensation of binder surface

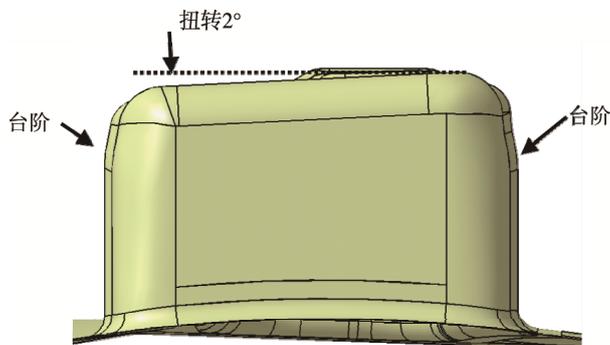


图7 拔模角补偿及顶部扭转补偿  
Fig.7 Draft angle and top distortion compensation

整改措施三: 在拉延序将凸模顶部平面扭转  $2^\circ$  以反向补偿回弹后的扭曲变形。

## 4 整改后回弹结果

### 4.1 整改后回弹分析结果

按照上述回弹控制措施对拉延模实施整改, 并进行全工序及回弹仿真分析, 回弹分析结果见图 8。整

改控制措施实施后, 除长法兰边局部存在较大回弹外(最大  $-2.86\text{ mm}$ ), 其他部位的回弹量均控制在  $1\text{ mm}$  左右, 回弹得到明显改善。

### 4.2 效果验证

依据整改后方案进行模具开发和调试, 尺寸精度按照  $1\text{ mm}$  的控制要求, 零件平均合格率达到  $90\%$  以上, 合格样件见图 9。

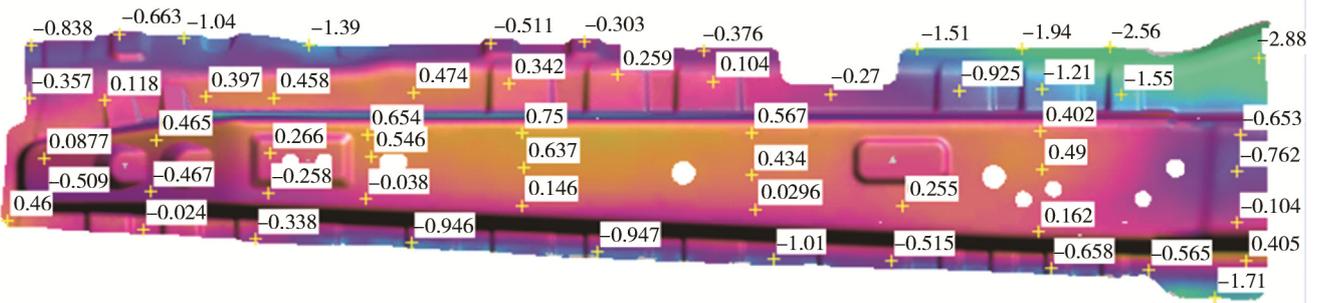


图 8 补偿后回弹仿真分析结果

Fig.8 Simulation results of springback after compensation

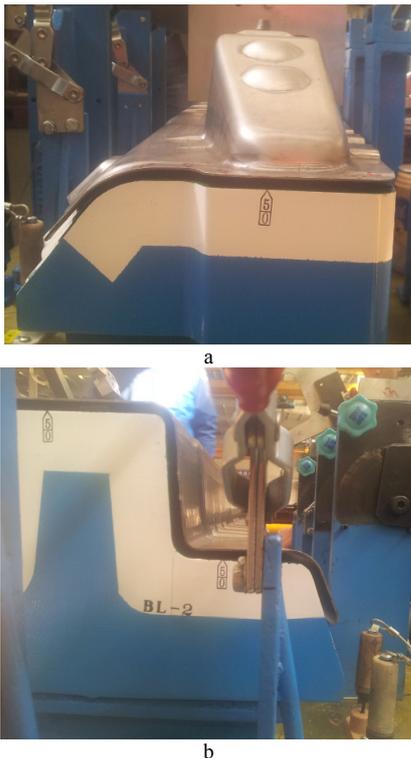


图 9 合格样件

Fig.9 Qualified sample

## 5 结论

1) 通过对零件进行全工序仿真分析, 获得了零件的回弹特征, 为模具开发和回弹补偿提供参考依据。

2) 根据零件的回弹特征进行了回弹控制策略分

析, 提出了回弹整改措施。这些整改措施可用于指导近似结构高强度零件的设计开发工作。

3) 借助 CAE 分析手段, 在保证产品质量的前提下, 实现前地板纵梁高强度钢模具的高效开发。

### 参考文献:

- [1] CARLA L, SIMÕES R, FIGUEIRÊDO De Sá, 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] 路洪洲, 王智文, 陈一龙, 等. 汽车轻量化评价[J]. 汽车工程学报, 2015, 5(1): 1—8.  
LU Hong-zhou, WANG Zhi-wen, CHEN Yi-long, et al. Evaluation Methodology for Automotive Lightweight Design[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2015, 5(1): 1—8.
- [4] KUZIAK R, KAWALLA R, WAENGLER S. Advanced High Strength Steels for Automotive Industry[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, 8(2): 103—117.
- [5] 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.
- [6] 雷正保. 汽车覆盖件冲压成形 CAE 技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.  
LEI Zheng-bao. CAE Technique of Sheet Metal Forming for Automotive Body Panels[M]. Changsha: National University Defence Technology of Press, 2003.
- [7] 李贵, 柳玉起, 柯俊逸, 等. 先进高强度钢板 DP590 回弹试验及数值模拟研究[J]. *锻压技术*, 2013, 38(5): 50—55.  
LI Gui, LIU Yu-qi, Ke Jun-yi, et al. Experimental Research and Numerical Simulation of Springback for Advanced High-strength Steel-DP590[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2013, 38(5): 50—55.
- [8] 刁可山, 蒋浩民, 曹猛, 等. 基于CAE的DP600高强度钢零件回弹特征分析及控制[J]. *锻压技术*, 2010, 35(5): 47—51.  
DIAO Ke-shan, JIANG Hao-min, CAO Meng, et al. Springback Analysis and Control of DP600 AHSS Part Based on CAE Technology[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2010, 35(5): 47—51.
- [9] INGARAO G, LORENZO R D, MICARI F. Analysis of Stamping Performances of Dual Phase Steels: A Multi-objective Approach to Reduce Springback and Thinning Failure[J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 4421—4433.
- [10] 常桂静, 曾兵华, 江明洁, 等. 纵梁前段全工序回弹预测与控制[J]. *精密成形工程*, 2015, 7(4): 37—41.  
CHANG Gui-jing, ZENG Bing-hua, JIANG Ming-jie, et al. Springback Prediction and Control in the Whole Process of Front Longitudinal Beam[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2015, 7(4): 37—41.
- [11] 吴磊, 李光耀, 曹昭展. 高强度材料性能对汽车零件扭曲回弹的影响[J]. *塑性工程学报*, 2009, 16(3): 13—17.  
WU Lei, LI Guang-yao, CAO Zhao-zhan. The Effect of Material Properties Influenced on Torsion Springback of High Strength Steel Parts[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(3): 13—17.
- [12] 张继军, 王才, 张卫峰. 高强度制件回弹控制方法[J]. *汽车工程师*, 2013(5): 56—59.  
ZHANG Ji-jun, WANG Cai, ZHANG Wei-feng. Control Method on High Strength Steel Part Resilience[J]. *Auto Engineer*, 2013(5): 56—59.
- [13] 朱东波, 孙琨, 李涤尘, 等. 基于模具补偿的高强度钢冲压回弹控制方法研究[J]. *塑性工程学报*, 2000, 7(1): 11—17.  
ZHU Dong-bo, SUN Kun, LI Di-chen, et al. The New Research Program of Sheet Metal Stamping Springback[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2000, 7(1): 11—17.
- [14] WEINSCHEK A, VOLK W. Decrease of Springback by Geometrical Modification of the Sheet Metal Part[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1018: 277—284.
- [15] 阳德森. 基于可控拉深筋技术的高强度钢板拉深性能优化及回弹分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
YANG De-sen. The Drawability Optimization and Springback Analysis of High Strength Steel Based on Controllable Drawbead[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [16] GAN W, WAGONER R W. Die Design Method for Sheet Springback[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(7): 1097—1113.