

# 基于 AutoForm 模拟的汽车 B 柱加强板热冲压工艺 分析与优化设计

梁发周, 钟圣滔

(南昌航空大学科技学院 机械材料学部, 江西 九江 332020)

**摘要:** 利用 AutoForm 软件对 B 柱加强板热冲压过程进行成形工艺模拟, 并针对分析过程中出现的起皱现象, 分析其起皱原因后对零件模面进行调整、优化, 通过在法兰边处增加拉伸槛和拉伸筋以及优化下模压料板的压料间隙值来解决 B 柱法兰边起皱以及侧壁局部减薄的问题, 对结果进行优化设计、对比优化前后的分析结果, 选出最优的设计方案。通过分析和优化改进, 采用 B 柱大头端上模压料板的压料力为 60 kN、中间压料板的压料力为 20 kN、下模压料板的压料间隙为 1.4 mm、保压力为 3000 kN、保压时间为 7 s 的工艺参数进行拉伸成形仿真模拟, 得到的零件无开裂和起皱缺陷, 表面质量较好, 满足加工工艺要求, 可有效缩短模具的开发周期和成本。

**关键词:** B 柱加强板; 法兰边起皱; 热冲压工艺; 拉伸槛; 拉伸筋

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.011

**中图分类号:** TH162      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0075-06

## Analysis and optimization design on hot stamping process for automobile B-pillar reinforcement plate based on AutoForm simulation

Liang Fazhou, Zhong Shengtao

(Department of Mechanical Engineering, Science and Technology College of NCHU, Jiujiang 332020, China)

**Abstract:** The hot stamping process of B-pillar reinforcement was simulated by software AutoForm, and for the phenomenon of wrinkling in analysis process, the causes of wrinkling were analyzed. Then, the die surface of part was adjusted and optimized, and the problems of wrinkling at the flange edge for B-pillar and local thinning of the side wall were solved by adding edge-bead and draw bead at the flange edge and optimizing the pressing gap value of lower die pressing plate. Furthermore, the results were optimized and designed by comparing the analysis results before and after optimization, and the best design scheme was chosen. Through analysis and optimization, the drawing simulation was carried out by using the process parameters that the pressing force of upper die pressing plate in the big end of B-pillar is 60 kN, the pressing force of middle pressing plate is 20 kN, the pressing gap of lower die pressing plate is 1.4 mm, the holding pressure is 3000 kN and the holding time of 7 s. The parts are obtained without cracking and wrinkling defects, and the surface quality is good, which meets the requirements of process and effectively shortens the development cycle and cost of die.

**Key words:** B-pillar reinforcement plate; wrinkling of flange edge; hot stamping process; edge-bead; draw bead

热冲压成形技术是支撑汽车轻量化最重要的先进加工技术之一, 代表了汽车关键零部件制造技术的发展趋势<sup>[1]</sup>, 也是汽车工业节能减排最直接、最有效的手段。而冲压成形技术前期主要是利用 AutoForm 等有限元分析软件对零件进行成形性分析, 得到的模拟结果与实际生产结果的差别不大, 所以, 利用软件对零件做好前期的分析工作能够较大程度

地减少试模时产品出现的问题, 从而减低研发阶段的生产成本。

本文以某汽车 B 柱加强板零件为例, 利用 AutoForm 软件对其进行成形性分析, 主要针对 B 柱加强板在成形过程中法兰边起皱问题提出解决方法, 优化设计方案, 得出最好的优化结果。

### 1 汽车 B 柱加强板成形基本要求

材料选择热成形常用的超高强度钢 22MnB5, 料厚为 1.8 mm, 零件的整体形状尺寸为 1281 mm×

收稿日期: 2022-07-29; 修订日期: 2022-10-12

基金项目: 江西省教育厅科技项目 (GJJ218703)

作者简介: 梁发周 (1975-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 471057366@qq.com

456 mm×150 mm。要求冲压成形后工件的形状尺寸较好、表面质量较高,平均抗拉强度不低于 1400 MPa,马氏体能够完全转化;不能出现起皱、开裂等缺陷;零件冲压成形完成后的最大减薄率不大于 16%<sup>[2]</sup>。图 1 为零件的三维模型。



图 1 零件三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of part

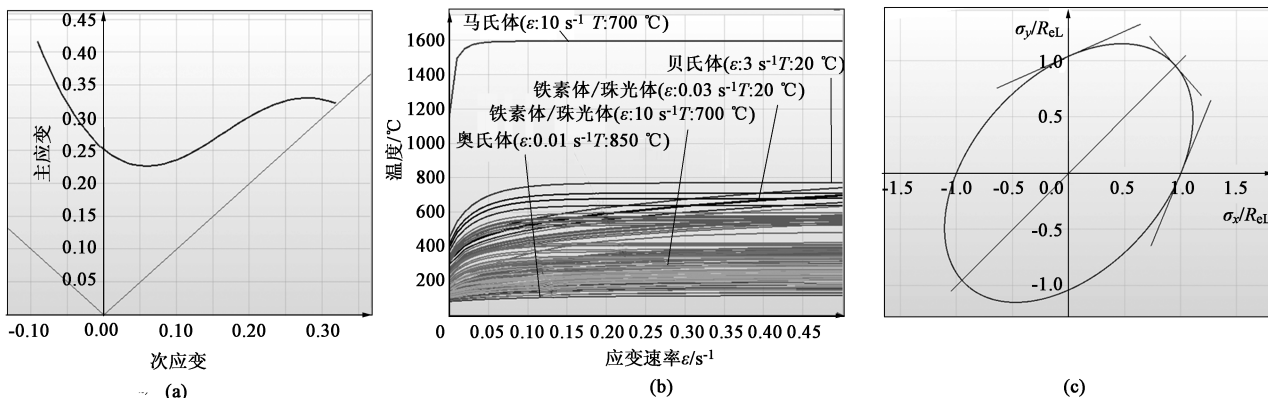


图 2 材料的特性曲线

(a) 成形极限曲线模型 (b) 硬化曲线模型 (c) 屈服面曲线模型

Fig. 2 Characteristic curves of material

(a) Forming limit curve model (b) Hardening curve model (c) Yield surface curve model

动拉伸、机械手模冲压→淬火阶段快速冷却(使组织全部马氏体化)<sup>[4]</sup>。设置摩擦因数为 0.45,保压时间为 7 s(第 1 次成形分析先暂时设置保压时间,以保证成形完成后形状尺寸良好,然后再尝试不同的保压时间进行分析结果对比,选出最优的保压时间),保压力为 3000 kN。设置定位针的高度及位置,保证定位效果。模具主定位针的直径为  $\Phi 20$  mm,高度超过坯料起始位置 10~15 mm,模具副定位针的直径为  $\Phi 20$  mm,高度超过坯料起始位置 5 mm 左右且距离坯料边线 3~5 mm,防止定位针与坯料发生干涉。

设计上模压料板时,压料面应尽量选择平整面,避免大程度的弯曲,压料板的行程因与拉伸成形深度保持大致高度,且行程略大于上模的最大高度,

## 2 有限元模拟分析准备

### 2.1 模型创建

通过 UG 11.0 对 B 柱加强板零件进行工艺补充面的绘制,通过分析结果再对工艺补充面进行优化,将导出的 stp 格式文件再导入到 AutoFormR8 软件中,摆正冲压角度,不能存在冲压负角度。进行有限元网格精度划分,设置缝合距离为 0.25 mm,最大边长设置为 22.5 mm。选择板料的材质为 22MnB5 钢,料厚为 1.8 mm。材料的硬化曲线、屈服面曲线及成形极限曲线模型如图 2 所示<sup>[3]</sup>,其中  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  分别为  $x$ 、 $y$  两个方向的主应力,  $R_{eL}$  为屈服强度。

### 2.2 第 1 次成形模拟

按工艺顺序设置生产过程和工序,坯料加热(温度为 930 ℃ 左右,奥氏体转化温度为 850 ℃)→单

以保证成形过程中压料板先接触到板料,从而先固定住板料,降低成形时的难度。一般 B 柱加强板零件的上模压料板一个压中间部位、一个压 B 柱大头端,最后还应尽量使两块压料板能够同时接触到板料,也同时固定住板料。由于 B 柱加强板零件中间部位的形状,导致压料板设计的形状尺寸比较小,相应的压料力设计也要小,中间压料板的压料力为 20 kN,足够压住板料即可,避免成形过程中板料左右移动,行程为 160 mm。B 柱大头端压料板的压料力为 60 kN,在能压住板料的同时也可解决 B 柱大头端的起皱问题,压料力过大会造成成本的浪费,行程为 130 mm。主要参数设置完成后开始模拟分析<sup>[5]</sup>,初次成形模拟分析以最节省生产成本的方式设计,仅按照零件边界延伸辅助工艺面。初次模拟到底前

10 mm 的起皱结果如图3所示。板料严重起皱，模具

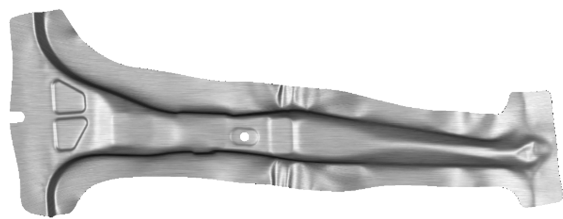


图 3 初次模拟到底前 10 mm 板料起皱严重  
Fig.3 Serious wrinkling of sheet material in last 10 mm to end in initial simulation

打到底有叠料的风险，需进行优化<sup>[6]</sup>。

根据软件分析结果，确定零件此处起皱的原因：由于 B 柱法兰边为弧形，成形时法兰边最高点的应力最大，导致两边进料不均而引起法兰边起皱，局部的流料情况如图 4 所示。成形未完成时材料需要向四周拉扯材料，从图 4 中可以，看出随着向下冲压过程的进行，左右两边材料流动随意、进料不均。解决的方法有：（1）增大法兰边的压料力及压料行程高度；（2）在起皱区域局部增加拉伸槛，使板料成形过程中进料均匀。

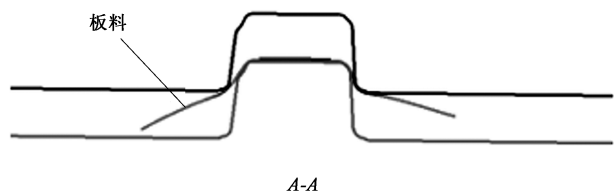
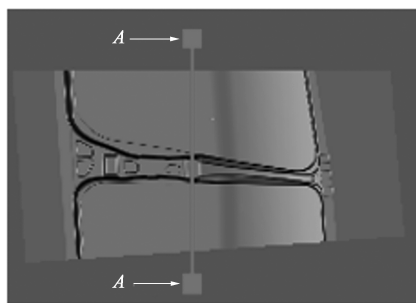


图 4 局部流料情况  
Fig.4 Local material flow situation

2.3 增加拉伸槛分析

根据第 1 次分析结果提出起皱缺陷解决方法，首先尝试第 1 种方法，增大法兰边的压料力和压料行程，分析结果无明显的改善，法兰边依旧起皱，此方法无法解决。因此，进行第 2 种方法的尝试。

拉伸槛的作用是使板料在成形过程中控制其在凹、凸模之间的流动，减小成形时法兰边最高点的应力，从而解决法兰边的起皱问题。在设计 B 柱法兰边的拉伸槛时首先要确定拉伸方向，B 柱加强板一般均为向下拉伸，一般取拉伸槛与其他平面过渡的 R 角半径为 10 mm 左右，R 角尽量设计大些，如果 R 角太小不仅会增加凹、凸模的加工难度，而且随着后期生产模具冲压次数的增加，R 角会越磨越尖锐，从而影响模具的使用寿命。拉伸槛上部靠近零件边线的 R 角需与零件边线有 5 mm 左右的距离，以便于成形完成后镭射切割多余的废料。拉伸槛侧壁面要求有 15°的拔模角度，保证零件成形后脱料时不卡料。设计时最下方的下模压料面设计为与零件随形，使坯料成形时上模能几乎同时接触到坯料，使其进料均匀<sup>[7]</sup>。设计流程如图 5 所示，增加拉伸槛优化后的模面如图 6 所示。

在 AutoForm 软件中将工具体替换为优化后的模面，其他参数不变，进行分析。到底前 10 mm 的起

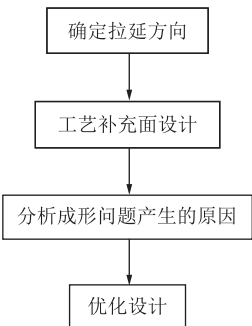


图 5 设计流程图  
Fig.5 Flow chart of design

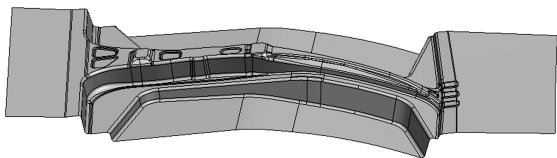


图 6 增加拉伸槛后的模面  
Fig.6 Die surface after adding edge-bead

皱情况如图 7 所示。增加拉伸槛后，局部流料情况如图 8 所示，从图 8 中可以看出，拉伸槛对材料流动起到了明显的控制作用，但是避空的地方还是比较多，能够提供的约束力还不够，起皱现象依旧明显，需要继续优化。

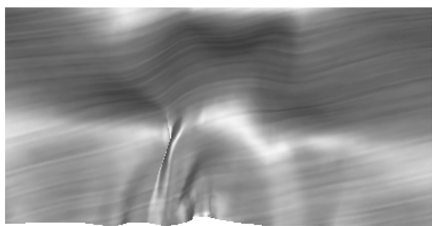


图 7 增加拉延槛后到底前 10 mm 的起皱情况  
Fig. 7 Wrinkling condition in last 10mm to end after adding edge-bead

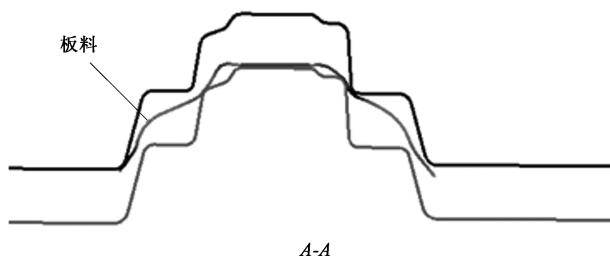
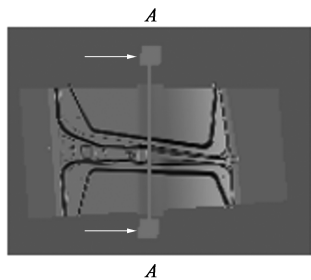


图 8 增加拉延槛后局部流料情况  
Fig. 8 Local material flow situation after adding edge-bead

和料片的流动量，进而防止坯料成形过程中出现起皱现象。下模压料板则提供较大的约束力，来防止成形过程中的起皱现象。一般将拉延筋的高度设计为 3 mm 左右<sup>[9]</sup>。

由于增加压料板的优化成本会明显高于辅助面的优化成本，所以首先尝试第 1 种方法，在前一次分析结果增加了拉延槛的基础上增加拉延筋优化后的模面，如图 9 所示。到底前 10 mm 的起皱情况如图 10 所示。根据图 10 可以看出，起皱情况明显改善，但是变形量比较大，有较大的鼓包，说明材料的流动仍然不平稳，判定为起皱明显，需要继续优化。

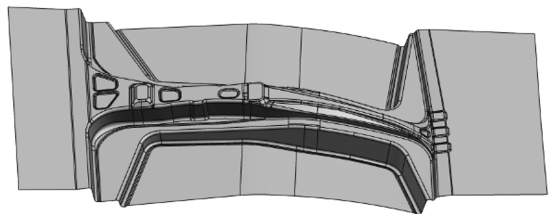


图 9 拉延槛和拉延筋配合使用的模面  
Fig. 9 Die surface using edge-bead and drawbead

## 2.5 拉延槛、拉延筋和下模压料板综合使用分析

根据图 10 可知，零件法兰边的起皱问题仍旧比较严重，但已经有了明显的改善，说明拉延筋的约束力还不够大，还需要进一步增加料片流动的阻力。在拉延槛、拉延筋的基础上增加下模压料板，进一

## 2.4 拉延槛和拉延筋配合使用分析

图 7 显示法兰边依旧起皱严重，但有一侧的起皱情况有一定的改善。说明拉延槛的作用效果还不够，有以下两种解决方法：（1）在拉延槛的基础上增加拉延筋；（2）在拉延槛的基础上既增加拉延筋，又增加压料板<sup>[8]</sup>。

拉延筋可以提供较小的约束力，增加料片流动的阻力，使得材料的变形程度提高，增加径向拉应力，减小切向压应力。从而调整料片流动的阻力

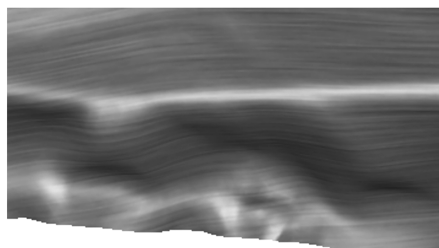


图 10 拉延槛和拉延筋配合使用后到底前 10 mm 的起皱情况  
Fig. 10 Wrinkling condition in last 10 mm to end after using edge-bead and drawbead

步增加料片流动的约束力，由于起皱处上模压料板的 20 kN 的力已经能够压住板料，且由于此处零件形状的原因导致压料板大小受限制，所以，此处上模压料板的压料力的增加不予考虑<sup>[10]</sup>。

增加下模压料板后需要相应地调整坯料的尺寸，以防止下模压料板起不到脱料的作用。设置压料板时选择间隙调节控制，设置压边圈的压料间隙后压边力会随其自动调节，间隙值越小压边力越大，首先设置间隙值为 0.9 mm 进行分析，并根据分析结果判断起皱问题是否解决，再针对零件减薄进行优化。压料行程的设置一般不超过下模的最大高度，具体的行程高度根据起皱的严重程度确定，在起皱前托住板料即可，如果行程过高，随着拉深深度的增加，板料被拖住，流料受阻，从而会引起侧壁的严重减薄，经过多次分析和尝试，设置压料行程为



100 mm<sup>[11]</sup>。分析结果如图 11 所示, 增加拉伸槛、拉伸筋和下模压料板后, 随着拉伸深度的增加局部流料情况如图 12 所示。

根据图 11 可知, 法兰边的起皱问题已经解决, 但是侧壁减薄率为 17.4%, 超过了 16.0%, 说明提供的约束力过大, 料片在成形过程中的流动阻力偏大, 使得侧壁进料更困难, 导致侧壁减薄。尝试将间隙控制参数增加, 从而降低阻力, 设置间隙值为 0.9、1.0、1.1、1.2、1.3 和 1.4 mm, 保持其他参数

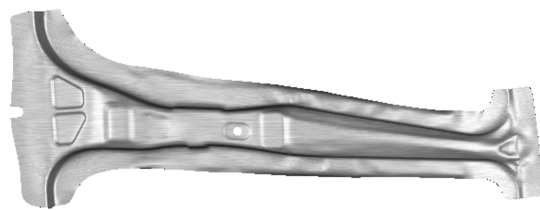


图 11 拉伸槛、拉伸筋和下模压料板综合使用到底前 5 mm 的起皱情况

Fig. 11 Wrinkling condition in last 5 mm to end after comprehensive use of edge-bead, drawbead and lower die pressing plate

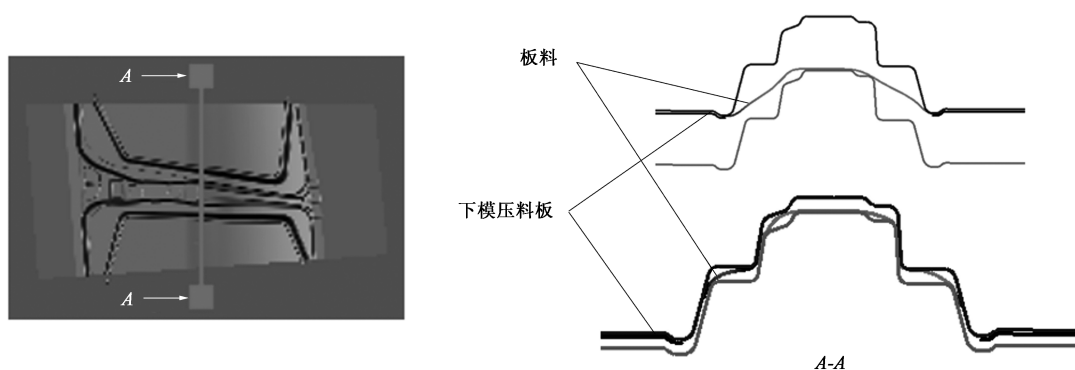


图 12 增加拉伸槛、拉伸筋和下模压料板后随着拉伸深度的增加局部流料情况

Fig. 12 Local material flow situation with increasing of drawing depth after adding edge-bead, drawbead and lower die pressing plate

不变分别进行分析。间隙值为 0.9 mm 时, 局部最大减薄率为 17.4%, 如图 13 所示。间隙值为 1.4 mm 时, 局部最大减薄率为 15.9%。整体成形性问题均解决后再对保压时间参数进行优化, 保压时间分别取 6、7、8、9 和 10 s 进行分析。在同时保证生产成本和生产效率的情况下保压时间取 7 s, 下模压料板间隙控制值取 1.4 mm<sup>[12]</sup>。最终成形后的减薄率为 15.7%, 控制在 16.0% 以内, 整体成形情况如图 14 所示, 马氏体转化情况如图 15 所示 (其中数据为马氏体转化率, 单位为%), 抗拉强度如图 16 所示 (数据单位为 MPa)。

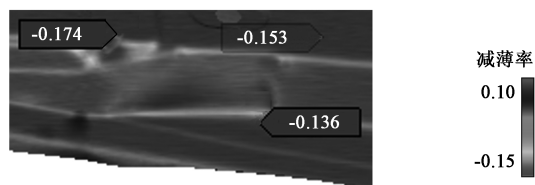


图 13 间隙值为 0.9 mm 时的最大减薄率

Fig. 13 Maximum thinning rate at gap value of 0.9 mm

### 3 结论

(1) 针对 B 柱法兰边的起皱问题, 通过对 B 柱

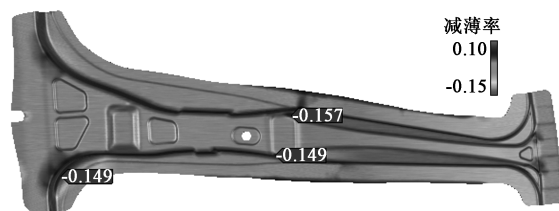


图 14 最终成形后的减薄情况

Fig. 14 Thinning condition after final forming

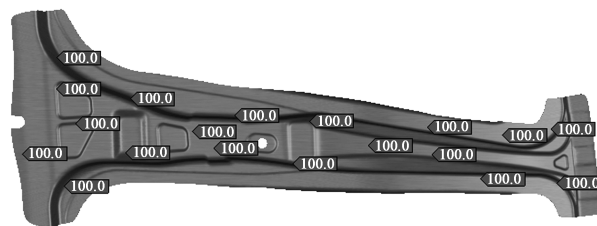


图 15 成形后马氏体转化分布

Fig. 15 Martensitic transformation distribution after forming

加强板零件的工艺性进行分析, 设计合理的优化方案, 根据仿真分析结果, 综合考虑确定最终成形方案。

(2) 由于 B 柱加强板零件的法兰边为弧形, 零件尺寸又比较大, 成形时法兰边的最高点的应力最



图 16 成形后抗拉强度分布

Fig. 16 Tensile strength distribution after forming

大,使得两边进料不均,引起法兰边起皱,通过增加拉延槛和拉延筋工艺辅助面以及下模压料板来控制板料的流动,使整体的成形性良好。

(3) 设计的模面优化方法可以快速解决 B 柱加强板法兰边的起皱问题,确定的成形方案可以缩短模具的开发周期,从而降低批量生产成本。

#### 参考文献:

- [1] 方昕. 基于全电伺服压力机及多层箱式加热炉的热冲压成形生产线整体解决方案 [J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53 (2): 23-26.  
Fang X. Brief discussion on overall solution of hot stamping production line based on all-electromechanical servo press and multi-layer box heating furnace [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2018, 53 (2): 23-26.
- [2] 李春友. 基于 Autoform 的加强板冲压工艺仿真与优化设计 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (3): 90-93.  
Li C Y. Simulation and optimization design on stamping process of reinforcing plate based on Autoform software [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (3): 90-93.
- [3] 朱帅, 孙福臻, 曹晓擎, 等. 基于 AutoForm 模拟的热冲压工艺优化设计 [J]. 模具工业, 2019, 45 (11): 1-5.  
Zhu S, Sun F Z, Cao X Q, et al. Optimization design of hot stamping process based AutoForm simulation [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (11): 1-5.
- [4] 朱帅, 孙福臻, 张泉达, 等. 基于 AUTOFORM 模拟的顶盖前边梁加强板热冲压工艺 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (4): 146-151.  
Zhu S, Sun F Z, Zhang Q D, et al. Hot stamping process for the front side beam strengthening plate of the roof based on AUTOFORM [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (4): 146-151.
- [5] 陈学健, 黄昭明. 车身覆盖件拉延模面优化与成形仿真 [J]. 韶关学院学报, 2018, 39 (6): 57-60.  
Chen X J, Huang Z M. Optimization and forming simulation of drawing die for a body panel [J]. Journal of Shaoguan University, 2018, 39 (6): 57-60.
- [6] 陈泽中, 李响, 刘欢, 等. 基于 Dynaform 的 SUV 汽车 B 柱热冲压成形仿真分析与工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (4): 113-119.  
Chen Z Z, Li X, Liu H, et al. Simulation analysis and process research of hot-stamped SUV B-pillar based on Dynaform [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (4): 113-119.
- [7] 李建军. 拉延筋与拉延槛的设计方法 [J]. 客车技术, 2009, (5): 35-36.  
Li J J. Design method of drawbead and edge-bead [J]. Bus & Coach Technology, 2009, (5): 35-36.
- [8] 李飞舟. 基于 Autoform 的汽车覆盖件成形有限元分析 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (15): 111-113.  
Li F Z. Analysis of forming simulation for automotive panel based on Autoform [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (15): 111-113.
- [9] 周志伟, 龚红英, 赵小云, 等. 基于 RSM 与 GA 的汽车后备箱盖板成形工艺参数多目标优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 75-81.  
Zhou Z W, Gong H Y, Zhao X Y, et al. Multi-objective optimization on process parameters for automobile trunk cover based on RSM and GA [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 75-81.
- [10] 赵运运. 汽车 B 柱加强板热成形工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.  
Zhao Y Y. Research on Hot Forming Process of Automobile B-pillar reinforcing Plate [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [11] 尤彬波, 林楷, 谢育涛, 等. A 柱加强板热成形拐角开裂起皱优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 105-110.  
You B B, Lin K, Xie Y T, et al. Optimization on wrinkle and crack at corner of A-pillar reinforcement panel in thermoforming [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 105-110.
- [12] 王章忠, 巴志新, 李琦, 等. 热冲压工艺参数对 22MnB5 马氏体钢汽车 B 柱性能影响的有限元模拟 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (5): 221-228.  
Wang Z Z, Ba Z X, Li Q, et al. Finite element simulation of influence of hot stamping process parameters on properties of 22MnB5 martensitic steel for automobile B-pillar [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (5): 221-228.