

基于 AUTOFORM 模拟的顶盖前边梁加强板 热冲压工艺

朱帅, 孙福臻, 张泉达, 贾瑞鹏

(先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044)

摘要: **目的** 研究顶盖前边梁加强板热冲压成形过程中不同参数对零件成形的影响规律, 为生产提供技术指导。**方法** 通过 AUTOFORM 模拟零件热成形过程, 并对模拟结果对比分析, 得到了板料尺寸、成形温度、保压时间、成形压力、冷却时间等工艺参数对成形性能的影响。**结果** 优化了板料尺寸及板料定位, 并通过调节模具间隙保证了零件的成形性, 得到零件最大减薄率小于 15%, 平均抗拉强度达到 1450 MPa, 平均硬度达到 HV475, 从而确定了顶盖前边梁加强板的热冲压工艺。**结论** 结合此有限元分析方法试制出抗拉强度大于 1450 MPa 的合格零件, 为此类零件批量化生产提供理论依据。

关键词: AUTOFORM; 热成形; 有限元; 工艺参数

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.04.018

中图分类号: TG306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)04-0146-06

Hot Stamping Process for the Front Side Beam Strengthening Plate of the Roof Based on AUTOFORM

ZHU Shuai, SUN Fu-zhen, ZHANG Quan-da, JIA Rui-peng

(State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the influence of different parameters in the hot stamping forming process of the front side beam strengthening plate of the roof to provide technical guidance for production. The hot forming process of parts was simulated through AUTOFORM. The influence of process parameters such as blank size, forming temperature, holding time, forming pressure and cooling time during the hot forming process were obtained by comparing and analyzing the simulation results. The blank metal size and blank positioning were optimized, and the formability of the parts was ensured by adjusting the die gap. The largest thinning ratio of the parts was less than 15%; the average tensile strength reached 1450 MPa; and the average hardness reaches HV475, thus determining the hot stamping process of the front side beam strengthening plate of the roof. Qualified parts with tensile strength greater than 1450 MPa are produced on the basis of this finite element analysis method, providing a theoretical basis for the mass production of such parts.

KEY WORDS: AUTOFORM; hot stamping; finite element; process parameters

当今汽车轻量化依然是众多车企共同追求的目标, 在保证汽车安全性的前提下, 研究超高强度钢板热成形技术以降低车重是目前解决轻量化的

有效方法之一^[1]。目前国内热成形技术也成为车企关注的重要方向, 高强钢热成形零件已成为汽车竞争的重要手段, 稳定高效的热成形工艺技术成为生

收稿日期: 2020-04-01

基金项目: 国家科技重大专项 (2018ZX04023002)

作者简介: 朱帅 (1991—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为超高强钢热成形工艺仿真和模具设计。

产线建设的重中之重。顶盖前边梁加强板作为重要的承力件，传统冷冲压工艺生产的零件强度较差，在车辆发生翻滚时，不能对人员进行有效保护，所以文中对顶盖前边梁加强板进行热成形工艺研究，有效提高零件的强度，为该零件生产工艺提供理论基础^[2]。

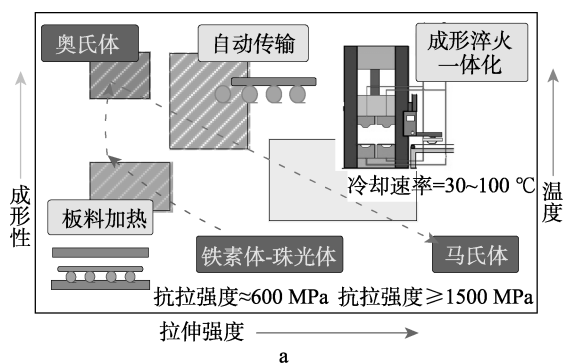


图 1 热冲压生产工艺路线及量产线

Fig.1 Hot stamping production process route and mass production line

2 有限元分析

2.1 模型搭建

图 2 是某汽车顶盖前边梁加强板，零件整体尺寸为 1781 mm×575 mm×275 mm，零件整体结构细长，并且两端不规则，局部拔模角度较小。该零件厚度为 1.2 mm，材质选用 HS1300T/950Y 进行冲压数值模拟，HS1300T/950Y 高强板的密度为 7370 kg/m³，膨胀系数为 $1.3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ，弹性模量为 105 GPa，泊松比为 0.3，体积热容为 4.37 mJ/(mm³·K)，20 °C 下的热传导系数为 20 W/(m²·K)，950 °C 下的热传导系数为 75 W/(m²·K)，库伦摩擦因数为 0.35，抗拉强度为 666 MPa，伸长率为 19%。

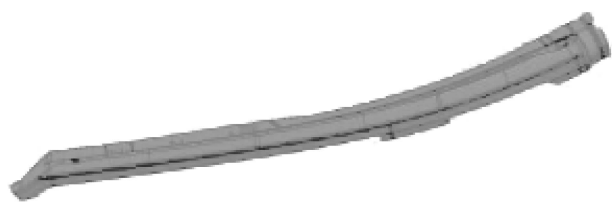


图 2 顶盖前边梁加强板

Fig.2 Top cover front side beam strengthening plate

在 UG 中对该零件进行工艺模面补充，通过 IGS 格式导入软件，并应用软件默认尺寸精度对产品和工艺模面进行自适应网格划分^[4]，如图 3 所示。

2.2 有限元模拟实施路线

通过分析，该零件成形所需工艺路线为：板料加热（加热温度超过亚共析钢奥氏体化临界温度以上，使其充分奥氏体化^[5]）、零件成形（定义模具工具体

1 热成形工艺

超高强度钢板热冲压工艺是将超高强度钢板加热到奥氏体化温度以上，适当保温后，快速移动到模具上并快速冲压，成形的同时进行淬火冷却，最后获得超高强度热冲压件的一种成形工艺^[3]。

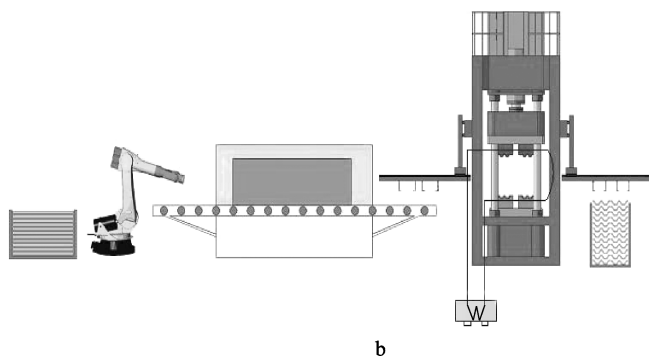


图 3 零件工艺补充和有限元网格划分

Fig.3 Part process supplementation and finite element meshing

及其运动方式）、淬火（均匀快速冷却使奥氏体转变为均匀板条状马氏体）、激光切割落料（由于淬火后零件硬度较高只能通过激光切割实现产品最终结构）。图 4 为工艺模拟实施路线。

该零件模拟分析中对冲压速度分别设置为 50, 100, 150, 200, 250 mm/s，研究冲压速度对成形的影响，根据初始成形温度对热冲压件力学性能的研究表明，板料初始成形温度为 750~850 °C 时，钢板的抗拉强度和硬度会明显提高^[6]，所以设置钢板加热温度为 900~930 °C，板料转移时间设置为 3 s^[7]；分别设置保压力为 500, 800, 1000, 1500 kN，研究压力对冷却速率的影响，由于冷却时需要保证马氏体转变初始温度（大约 200 °C），所以设置板料最终温度为 85 °C。

2.3 有限元模拟过程和成形结果分析

模型采用单动模具拉伸类型，冲压过程中凸模、凹模设置为刚体，板料为三维可变形实体^[8]，通过反

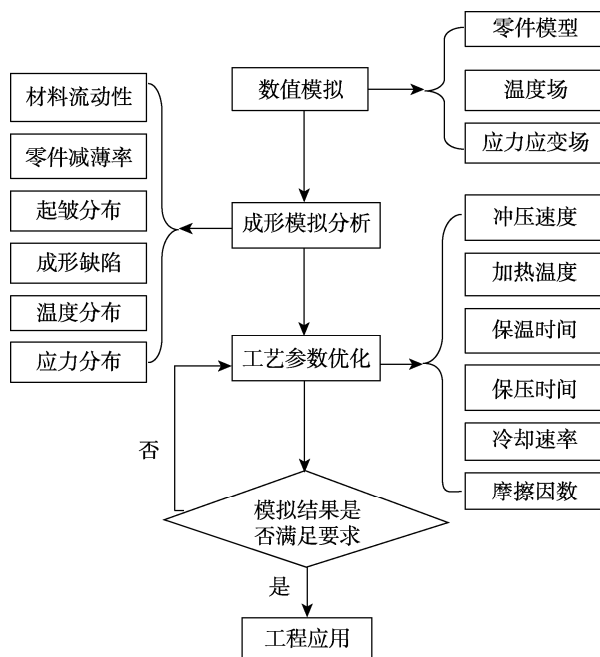


图4 有限元模拟工艺路线

Fig.4 Process route of finite element simulation

算功能计算零件展开初始板料尺寸,并将单边扩大5 mm 作为料片尺寸。图5所示为冲压开始阶段各个工具体的位置状态,由于加热后板料较软,凸模的最高点与最低点落差较大,所以板料转移至凸模时会产生位置偏移和倾斜,需要在凸模的4个方向增加板料定位约束,如图5所示。

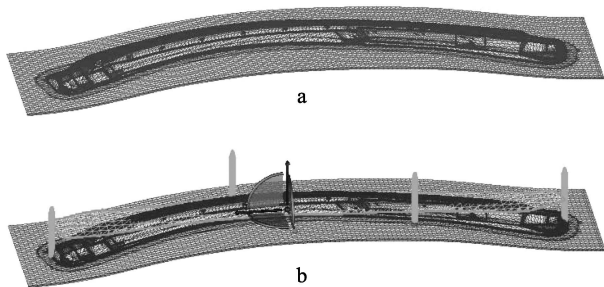


图5 冲压初始阶段

Fig.5 Initial stage of stamping

顶盖前边梁加强板较窄侧位于零件最低点,并且存在轻微转角,所以零件在到底前10 mm 时出现剧烈褶皱,如图6所示;并在到底前3 mm 出现叠料,

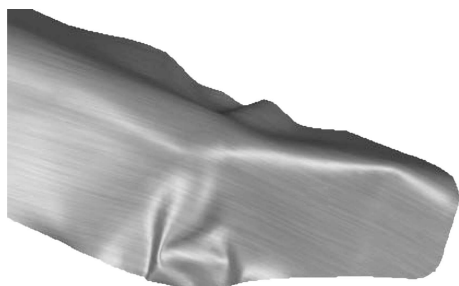


图6 到底前10 mm 板料褶皱

Fig.6 The last 10 mm sheet folds

如图7所示。该结果是因为最低点翻折成形时与旁边台阶出现叠料,所以需要对此处模面优化的同时增加压边圈,用来拖料,控制材料的流动^[9]。

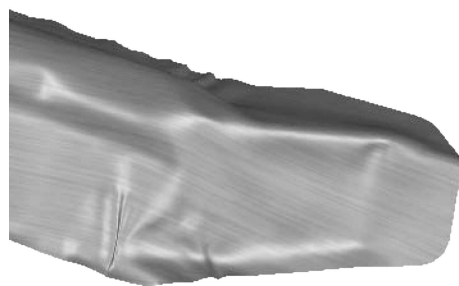


图7 到底前3 mm 叠料

Fig.7 The last 3 mm stack

因为板料尺寸较小,增加压边圈后起不到拖料的作用,所以需要相应的增大板料尺寸,如图8所示,压边圈通过间隙调节,设置压边圈与凹模的间隙为1.0~1.1 倍料厚^[10],取值1.26 mm,控制较窄处板料流动,使板料均匀流出,从而解决叠料问题。

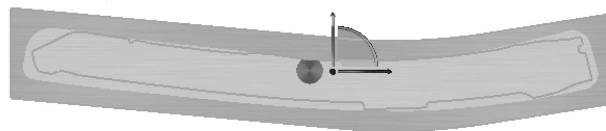


图8 板料线前后对比

Fig.8 Sheet line comparison

增加压边圈后叠料起皱问题得以解决,零件成形过程如图9所示,分别为板料重力状态(便于板料定位设计)、凸模接触板料、到底前30 mm 状态、到底前10 mm 状态、到底前3 mm 状态(无明显起皱^[11])、到底状态(无开裂现象)。

优化数值模拟结果显示,顶盖前边梁加强板成形性良好,其厚度和减薄分布如图10—11所示,厚度分布集中在1.18~1.21 mm 附近,减薄最大不超过5%,厚度整体分布均匀^[12]。

由于增加了压边圈拖料,所以加热后的板料转移到压边圈上时,与压边圈接触的板料最先进行热传导,当压机速度为200 mm/s 时,凹模下降到与压边圈接触需要1.6 s 左右,接触压边圈的板料温度冷却较早,比未接触压边圈的板料温度低100℃左右,如图12所示;随着凹凸模闭合,零件整体冷却速率基本一致,当零件成形保压淬火阶段结束时,零件温度基本降到260℃左右,与压边圈接触的位置板料温度在140℃左右,如图13所示。

零件的不均匀冷却会导致马氏体转变不均匀,从而导致零件部分区域强度较低^[13],所以根据板料温度变化规律,应当适当提高压机快降速度,保证凹模与压边圈快速闭合,同时当板料放置在压边圈时

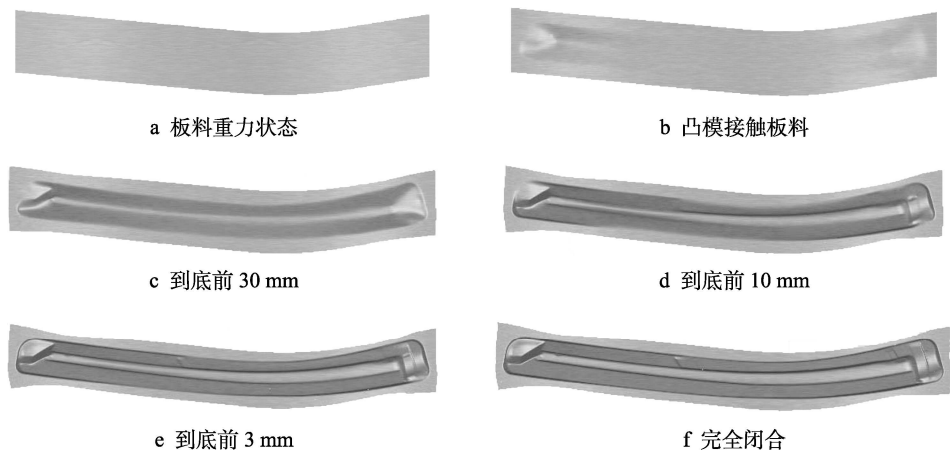


图 9 板料各个阶段成形过程
Fig.9 Forming diagram of each stage of sheet metal



图 10 厚度分布云图(mm)
Fig.10 Cloud map of thickness



图 11 减薄率分布云图
Fig.11 Cloud map of thinning rate

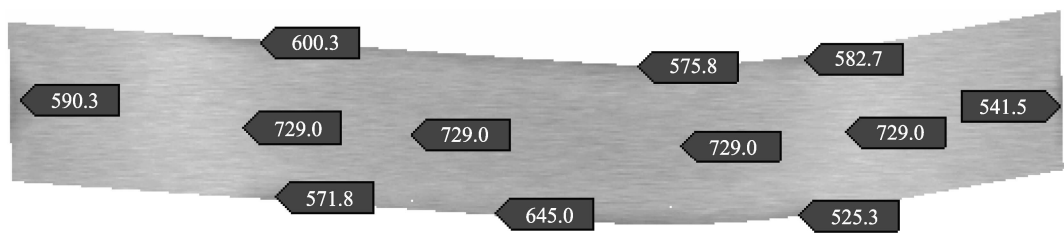


图 12 凹模与压边圈闭合时板料温度分布(℃)
Fig.12 Sheet temperature distribution when the die and blank holder are closed

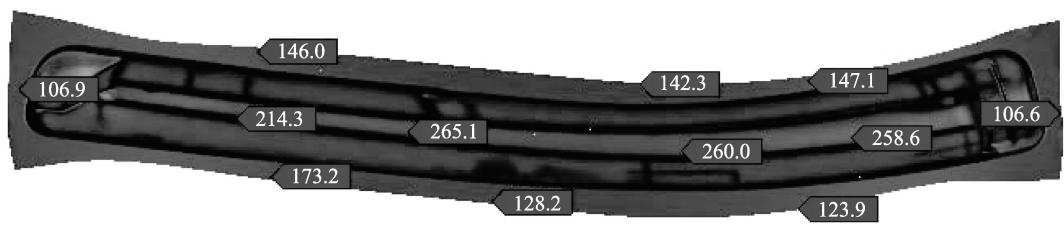


图 13 成形淬火结束时板料温度分布(℃)
Fig.13 Sheet temperature distribution at the end of forming and quenching

可以降低压边圈上冷却水流速,当成形淬火阶段再提高冷却水流速^[14],这样就能保证零件整体冷却的均匀性。成形仿真结果如图 14—16,成形后零件马氏体

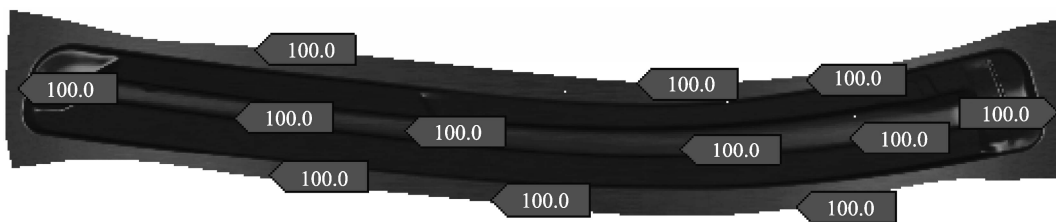


图 14 成形后马氏体分布(%)

Fig.14 Martensite distribution after forming

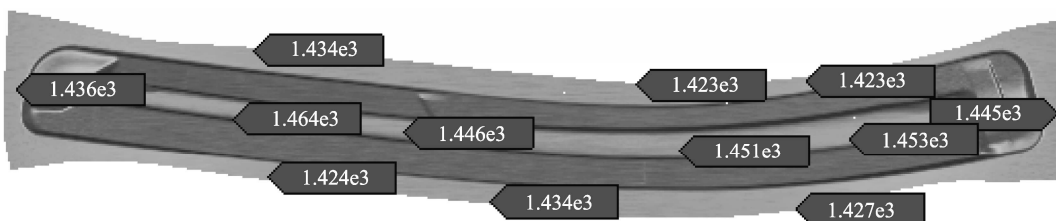


图 15 成形后抗拉强度分布(MPa)

Fig.15 Tensile strength distribution after forming

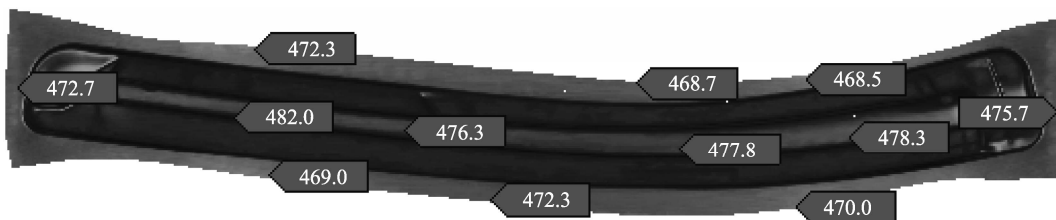


图 16 成形后维氏硬度分布(HV)

Fig.16 Vickers hardness distribution after forming

转变率平均达到 98%以上, 抗拉强度平均不低于 1400 MPa, 维氏硬度平均不低于 HV475, 模拟结果均满足超高强钢热冲压工艺的国家标准要求^[15]。

结合仿真模拟工艺进行零件试制, 模拟分析的目的在于生产加工应用, 通过模拟分析选择最优生产工艺, 才能为现场生产提供有力依据, 零件最终试制结果如图 17 所示。



图 17 顶盖前边梁加强板实物

Fig.17 Physical drawing of top cover front side beam strengthening plate

3 结论

试验表明, 顶盖前边梁加强板热成形工艺需要增加拖料体, 以控制材料流动, 并且需要对冷却水流速度进行智能调节, 才能保证冷却的均匀性, 提高零件的整体性能, 分析表明经过该热成形分析方法, 可达到性能要求, 并满足批量化生产, 为同类型零件热成形分析提供了技术指导。

参考文献:

- [1] 苑雪雷, 叶明礼, 尹诗崭. 浅谈热冲压成形技术[J]. 模具制造, 2016, 16(6): 8—11.
YUAN Xue-lei, YE Ming-li, YIN Shi-zhan. Talking about Hot Stamping Forming Technology[J]. Die & Mould Manufacture, 2016, 16(6): 8—11.
- [2] 夏益新, 王娜, 陈新平, 等. 热冲压和液压成形技术在宝钢汽车轻量化服务中的应用及发展趋势[J]. 精密成形工程, 2017, 9(6): 104—110.
XIA Yi-xin, WANG Na, CHEN Xin-ping, et al. Application and Development Trend of Lightweight Technology for Vehicle with Hot Stamping and Hydroforming in Baosteel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(6): 104—110.
- [3] WONSEOG Y, EUNHYE H, HYEJIN K, et al. A Study of Annealing Time to Surface Characteristics and Hydrogen Embrittlement on AlSi Coated 22MnB5 during Hot Stamping Process[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 378(8): 10—17.
- [4] 吕嘉豪, 应苑松. 热成形钢防撞梁性能研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(1): 44—48.
LYU Jia-hao, YING Yuan-song. Study on the Performance of the Crash Beam Making through Hot Stamping Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(1): 44—48.

- [5] 孟炬, 朱彬, 张宜生, 等. 高强度热冲压成形过程宏观数值模拟综述[J]. 河北工业科技, 2015, 32(3): 272—276.
MENG Ju, ZHU Bin, ZHANG Yi-sheng, et al. Review on Macro-and Micro-modeling of High Strength Steel Hot Stamping Process[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2015, 32(3): 272—276.
- [6] 解焕阳, 马治军, 毛晴伟, 等. 某车型后防撞梁热冲压工艺研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 93—97.
XIE Huan-yang, MA Zhi-jun, MAO Qing-wei, et al. Hot Stamping Process of Rear Bumper from a Certain Car Model[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(1): 93—97.
- [7] 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 Ze-zhong, LI Xiang, LIU Huan, 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.
- [8] 毛安, 穆传坤, 王彬, 等. B柱无水道热冲压模拟及试验研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(6): 56—64.
MAO An, MU Chuan-kun, WANG Bin, et al. Investigation of Simulation and Experiment on B-pillar Hot Stamping Process without Water Channel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(6): 56—64.
- [9] CHEN X D, LI Y Y, HAN X H, et al. Size Effect Studies on Tensile Tests for Hot Stamping Steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(2): 640—647.
- [10] 周威佳, 刘洪伟, 叶知春, 等. 高强度分区热冲压U形件梯度性能[J]. 精密成形工程, 2016, 8(6): 44—48.
ZHOU Wei-jia, LIU Hong-wei, YE Zhi-chun, et al. Gradient Properties of High Strength Steel U Shape Parts with Partition Hot Stamping[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(6): 44—48.
- [11] 王志超, 李永丰, 罗爱辉, 等. 硼钢热冲压模具CAE顺序耦合建模及强度校核[J]. 精密成形工程, 2017, 9(1): 86—90.
WANG Zhi-chao, LI Yong-feng, LUO Ai-hui, et al. CAE Sequential Coupling Modeling and Strength Checking of Hot Stamping Die for Boron Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(1): 86—90.
- [12] 邹伟, 张立强, 暂志伟, 等. 超高强度钢热冲压成形过程仿真研究[J]. 锻压技术, 2018, 43(8): 75—79.
ZOU Wei, ZHANG Li-qiang, ZAN Zhi-wei, et al. Simulation Research on Hot Stamping Process of Ultra High Strength Steel[J]. Forging Stamping Technology, 2018, 43(8): 75—79.
- [13] BEHRENS B A, HUBNER S, SUNDERKÖTTER C, et al. Influence of Process Parameters on the Hot Stamping of Carbon-Martensitic Chromium Steel Sheets[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 418(1): 012007.
- [14] SUNGHO Y, JUNHO K, WONHEE C, et al. Performance Improvement of Hot Stamping Die for Patchwork Blank Using Mixed Cooling Channel Designs with Straight and Conformal Channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 165(1): 114562.
- [15] LIU S, LONG M J, AI S Y, et al. Evolution of Phase Transition and Mechanical Properties of Ultra-High Strength Hot-Stamped Steel during Quenching Process[J]. Metals, 2020, 10(140): 1—18.