

文章编号: 1004-4353(2022)03-0267-06

# 基于多工序回弹补偿的大型汽车 覆盖件成形优化

李晶<sup>1</sup>, 林福<sup>1</sup>, 柯桂颜<sup>2</sup>

( 1. 闽西职业技术学院 信息与制造学院, 福建 龙岩 364000;

2. 黎明职业大学 智能制造工程学院, 福建 泉州 362000 )

**摘要:** 针对某品牌 SUV 汽车大型覆盖件成形过程存在的易起皱、破裂和回弹等质量问题,进行了工艺参数多目标优化和回弹补偿优化. 首先,以最大增厚率和最大减薄率为评价目标,利用正交试验和 Design-Expert 软件对压边力、模具间隙、冲压速度和摩擦系数进行多目标优化,并确定最优工艺参数组合;其次,以最大回弹量为评价目标,利用多工序补偿法对拉伸模和修边冲孔模进行回弹补偿,并对最优冲压工艺参数组合和回弹补偿面进行仿真分析和试模实验. 研究表明:优化后的成形工艺参数能够防止零件破裂,减少起皱以及降低最大增厚率和最大减薄率;多工序回弹补偿能够有效控制回弹量,减少整形工序. 本文的优化方案可为提高大型汽车覆盖件的成形质量和节约成本提供参考.

**关键词:** 冲压成形; 回弹补偿; 多工序补偿; 多目标优化; 正交试验

**中图分类号:** TG386.1

**文献标识码:** A

## Forming optimization of large automobile panel based on multi-process springback compensation

LI Jing<sup>1</sup>, LIN Fu<sup>1</sup>, KE Guiyan<sup>2</sup>

( 1. School of Information and Manufacturing, Minxi Vocational & Technical College, Longyan 364000, China;

2. Intelligent Manufacturing Engineering, Liming Vocational University, Quanzhou 362000, China )

**Abstract:** Aiming at the quality problems of wrinkling, cracking and springback in the forming process of a brand SUV large panel, multi-objective optimization of process parameters and springback compensation optimization were carried out. Firstly, taking the maximum thickening rate and the maximum thinning rate as the evaluation objectives, the multi-objective optimization of blank holder force, die clearance, stamping speed and friction coefficient was carried out by using orthogonal test and design expert software, and the optimal combination of process parameters was determined; Secondly, taking the maximum springback as the evaluation objective, the multi-process compensation method is used to compensate the springback of the drawing die and trimming punching die, and the optimal stamping process parameter combination and the springback compensation surface are simulated and tested. The results show that the optimized forming process parameters can prevent parts from cracking, reduce wrinkling, and reduce the maximum thickening rate and the maximum thinning rate; multi-process springback compensation can effectively control the springback and reduce the shaping process. The optimization scheme in this paper can provide a reference for improving the forming quality of large automobile panels and saving costs.

收稿日期: 2022-06-14

基金项目: 福建省省级职业院校教师教学创新团队项目(闽教师[2021]49号)

作者简介: 李晶(1974—),女,硕士,副教授,研究方向为机械工程、检测控制.

**Keywords:** stamping; springback compensation; multi-process compensation; multi-objective optimization; orthogonal test

0 引言

为减轻车身的重量,车企通常采用高强钢作为汽车的覆盖件. 高强钢虽然具有较高的屈服强度,但其在冲压成形过程中容易发生起皱、破裂和回弹等问题,尤其是在大型覆盖件的冲压成形过程中<sup>[1]</sup>. 减少覆盖件在冲压成形过程中出现上述问题的传统方法主要是通过调整冲压工艺参数(依赖于工程师的个人经验)和在修边冲孔工序结束后增加一道整形工序来实现;但该方法不仅耗时,而且开发模具的成本较高<sup>[2-3]</sup>. 近年来,CAE 技术逐渐被应用于零件成形的预测中,并取得了较好效果. 例如:尤晋等<sup>[4]</sup>利用 Dynaform 软件和响应面法对散热壳体冲压成形参数进行了分析,并确定了最优工艺参数组合,仿真表明该最优工艺参数组合可大幅提高零件的成形质量;王康康等<sup>[5]</sup>利用 Dynaform 软件和 GA-BP 神经网络模型以最大减薄率为评价目标,对汽车行李箱盖内板的冲压成形参数进行了优化分析,仿真显示该方法可有效控制零件的最大减薄率;张凌云等<sup>[6]</sup>利用 Pam-stamp 2G 软件对橡皮囊进行了成形和回弹仿真分析,并通过小波神经网络模型对其进行了回弹预测,仿真结果显示该方法可有效控制零件的回弹量;H.J.Yan 等<sup>[7]</sup>利用 Dynaform 软件以最大减薄率为评价目标对板梁零件的压边力和拉延筋布置方式进行了优化分析,仿真显示该方法可有效降低零件的最大减薄率和零件发生开裂的现象;R.K.Lal 等<sup>[8]</sup>利用 Dynaform 软件以回弹为评价目标对汽车前盖的模具尺寸和冲压工艺参数进行了优化分析,仿真结果显示该方法可有效控制零件的回弹量. 本文以某品牌 SUV 汽车后排座椅下的横梁为实例,利用正交试验和多工序回弹补偿法获取其最优工艺参数组合和补偿面,并通过实验验证了该方案的有效性.

1 横梁的成形工艺分析

图 1 为某品牌 SUV 汽车后排座椅下的横梁. 该横梁的钢板牌号为 HC340/590DP,厚度为

1.2 mm,截面呈“L”形状,长度为 1 900 mm,属于大型汽车覆盖件. 零件最大增厚率的设计要求为小于 10%,最大减薄率的设计要求为小于 15%,最大回弹量的设计要求为小于 1.5 mm. 由于零件长度较大,在左右两侧容易发生回弹,所以本文暂定其生产工序为拉延—修边冲孔—整形.



图 1 后排座椅下的横梁

根据零件的特点和工艺要求,首先利用 UG12.0 软件创建拉延工序的工艺补充面、压料面拉延筋和模具型面,如图 2 所示. 图 3 为利用有限元软件 Dynaform 创建的拉延工序仿真模型,模型包含凸模、凹模、压边圈和板料. 为确保仿真的准确性,本文选取汽车厂商指定的钢板作为拉伸样件. 利用拉伸实验获得的钢板力学参数和钢板的应力应变曲线见表 1 和图 4.



图 2 模具型面



图 3 拉延工序仿真模型

表 1 HC340/590DP 钢板的力学参数

厚度 / mm	弹性 模量 $E/\text{GPa}$	泊松 比 $\nu$	硬化 系数 $K/\text{MPa}$	硬化 指数 $n$	塑性应变比 $\gamma$			屈服 强度 $\sigma_s/\text{MPa}$
					$r_0$	$r_{45}$	$r_{90}$	
1.2	203.32	0.60	1 024.33	0.18	0.61	0.69	0.87	640.00

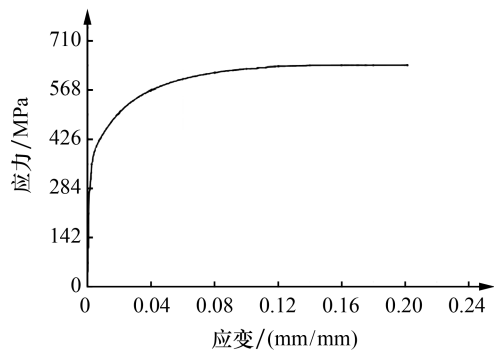


图 4 HC340/590DP 钢板的应力应变曲线

2 成形工艺的参数优化

2.1 正交试验方案的设计

影响冲压件成形质量的因素主要有材料参数、成形工艺参数以及成形设备等<sup>[9]</sup>,其中通过对成形工艺参数进行优化是提高其质量的一种有效和经济的方法.影响成形工艺的主要参数有压边力、模具间隙、冲压速度和摩擦系数<sup>[10]</sup>,因此本文选取这 4 个参数作为正交试验因素进行优化.各因素的优化参数取值见表 2.其中,压边力水平的选取由公式(1)计算得出(计算得出的压边力为 175~222 kN),模具间隙水平参考文献[11]选取(通常为板料厚度的 1.0~1.2 倍),冲压速度试验水平根据试验现场条件选取,摩擦系数水平参考文献[12]选取(推荐取值范围为 0.15~0.19).

$$f = S \times K. \tag{1}$$

式中:  $f$  为压边力(kN);  $S$  为压边圈与板料接触的面积( $\text{mm}^2$ ),经计算其接触的面积为  $279\,010\,\text{mm}^2$ ;  $K$  为单位压边力(MPa),取值范围为 2.0~2.5 MPa.

表 2 优化参数的取值

水平	压边力 /kN	模具间隙/mm	冲压速度/(mm/s)	摩擦系数
1	180	1.22	4 000	0.15
2	200	1.32	5 000	0.17
3	220	1.42	6 000	0.19

2.2 正交试验分析

2.2.1 试验结果

由于零件的最大增厚率要小于 10%,最大减薄率要小于 15%,因此本文以最大增厚率和最大减薄率为优化目标设计正交试验方案.根据各因

素设计的正交试验方案为  $L_9(3^4)$ .

利用 Dynaform 软件对各组正交试验方案分别进行拉延成形试验的结果见表 3.从表 3 可知,零件的最大增厚率为 5.26%~8.45%,最大减薄率为 10.42%~14.23%,均在设计允许范围内.图 5 为 9 组正交试验方案的成形极限图.从图 5 可以看出,零件的整体成形质量较好,起皱主要发生在零件中间区域,其中方案 1、方案 4 和方案 8 的零件起皱面积相对较小,方案 4、方案 8 和方案 9 的零件边缘有明显的破裂现象.

表 3 正交试验的结果

方案	压边力/kN	冲压速度/(mm/s)	模具间隙/mm	摩擦系数	最大增厚率/%	最大减薄率/%
1	180	4 000	1.22	0.15	6.81	10.42
2	180	5 000	1.32	0.17	7.67	10.89
3	180	6 000	1.42	0.19	7.99	11.01
4	200	4 000	1.32	0.19	7.23	13.45
5	200	5 000	1.42	0.15	8.45	11.51
6	200	6 000	1.22	0.17	8.17	12.38
7	220	4 000	1.42	0.17	7.85	11.95
8	220	5 000	1.22	0.19	5.26	14.23
9	220	6 000	1.32	0.15	6.97	14.01

2.2.2 多目标优化

以压边力  $f$ 、模具间隙  $t$ 、冲压速度  $v$  和摩擦系数  $a$  作为优化因素,最大增厚率和最大减薄率作为评价目标建立的多目标优化的约束方程和多目标优化模型为:

$$\begin{cases} \text{Min 最大增厚率,} \\ \text{Min 最大减薄率.} \end{cases}$$

s. t. 最大增厚率  $\leq 10\%$ ,

最大减薄率  $\leq 15\%$ ,

$180 \leq f \leq 220, 1.22 \leq t \leq 1.42,$

$4\,000 \leq v \leq 6\,000, 0.15 \leq a \leq 0.19.$

为了使两个评价目标的取值同时达到最小,利用 Design-Expert 软件对正交试验结果和多目标优化模型进行最优求解.表 4 为利用 Design-Expert 软件进行多目标优化得到的前 6 组中期望值较大的参数组合.由表 4 可以看出,第 1 组的期望值最大,因此本文将其作为最优工艺参数组合,即压边力为 220 kN,冲压速度为 5 000 mm/s,模具间隙为 1.22,摩擦系数为 0.17.

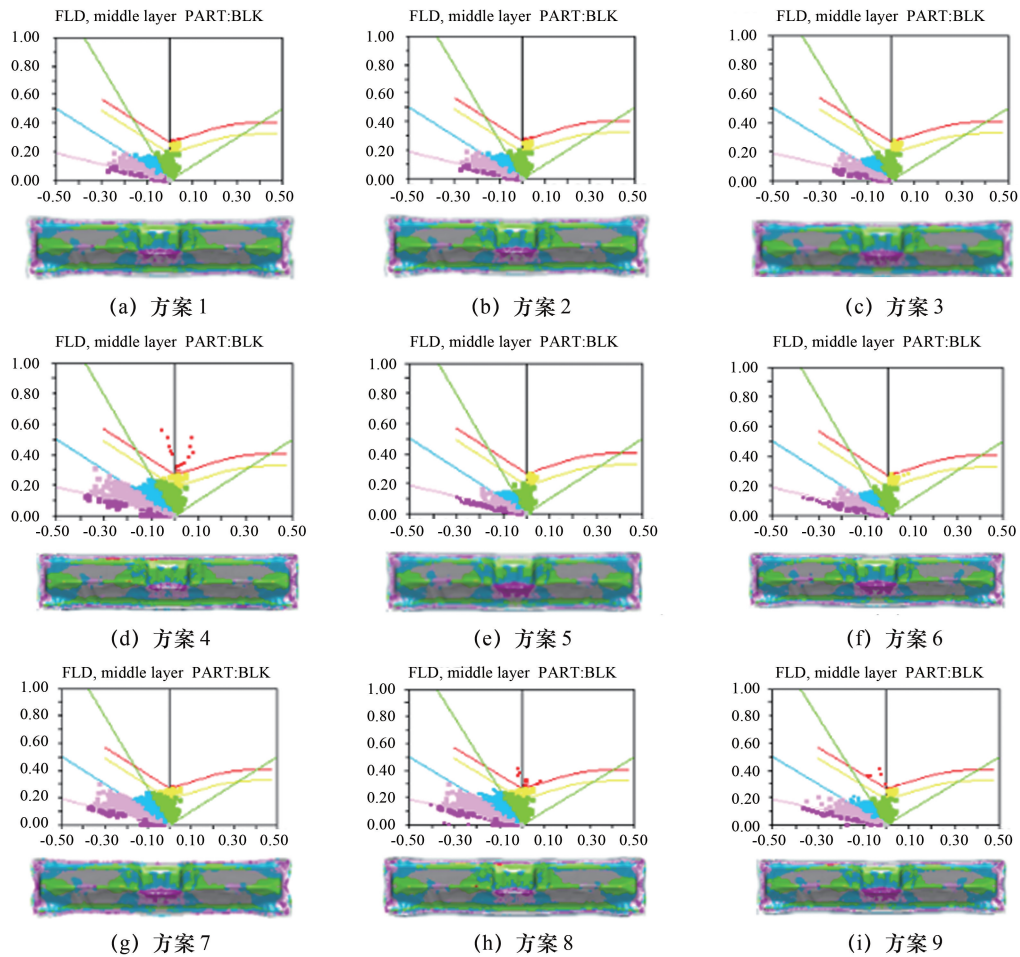


图 5 不同实验方案的成形极限图

表 4 多目标优化的结果					
序号	压边力/ kN	冲压速度/ (mm/s)	模具间 隙/mm	摩擦 系数	期望 值
1	220	5 000	1.22	0.17	0.898
2	180	5 000	1.32	0.17	0.862
3	200	5 000	1.42	0.15	0.858
4	200	6 000	1.22	0.17	0.850
5	220	4 000	1.42	0.17	0.796
6	220	6 000	1.32	0.15	0.784

2.2.3 最优成形工艺参数的仿真分析

图 6 为对最优成形工艺参数进行成形仿真和回弹的分析结果. 从图 6 可以看出, 零件无开裂, 起皱面积较小, 但回弹现象较为明显. 回弹主要发生在零件的左右两侧, 其中左侧最大回弹量(7.9 mm)超过产品设计要求(小于 1.5 mm), 因此需要进行回弹控制.

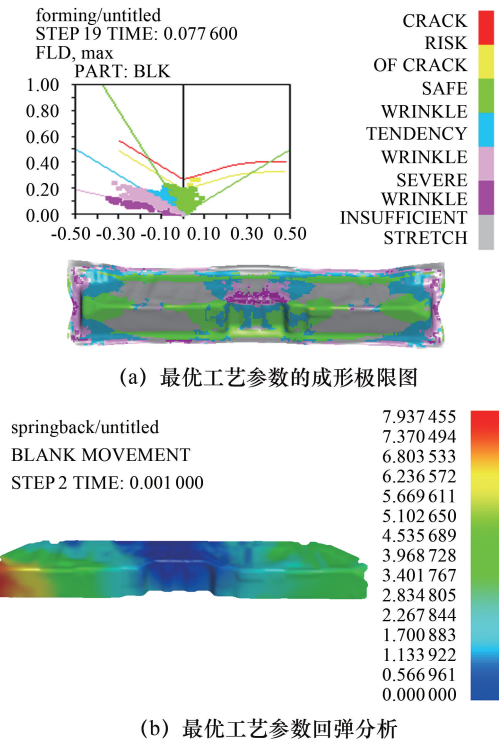


图 6 最优工艺参数的成形和回弹分析结果



### 3 多工序回弹补偿研究

#### 3.1 多工序回弹补偿的方法

为解决传统整形工序控制回弹量存在的精度低、成本高等问题,本文提出了多工序回弹补偿方法.该方法的主要思路为将上一道工序的回弹量作为补偿量应用于下一工序的模具型面补偿,以此达到分解补偿量的效果,提高补偿精度和效率以及节约成本.多工序回弹补偿的具体流程如图7所示.

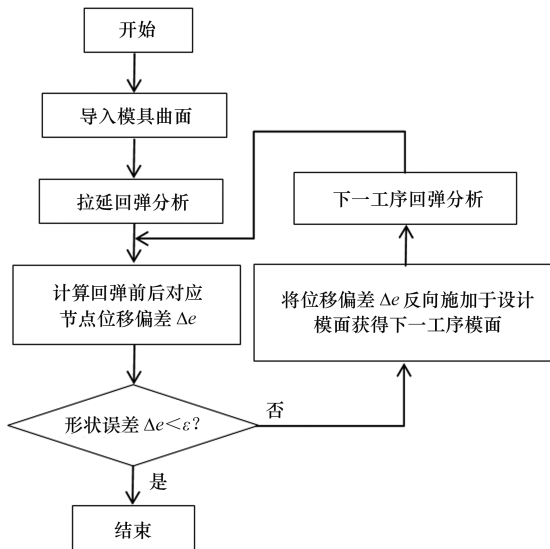


图7 多工序回弹补偿流程图

#### 3.2 多工序回弹补偿及其仿真分析

##### 3.2.1 拉伸模回弹补偿及其仿真

拉伸模回弹补偿型面的构建方法为:首先采用节点位移法计算回弹前后对应节点的偏差以获得回弹量,然后将回弹量反向施加于拉伸模型面.为了控制零件的回弹量,对拉伸模共进行了6次回弹补偿,并分别进行成形仿真和回弹分析.回弹分析显示,零件回弹量均超过允许值(小于1.5 mm),且在第4次至第6次的成形仿真中有明显的开裂现象,所以本文选取第3次的回弹补偿面作为拉伸模型面,如图8所示.采用最优成形工艺参数和拉伸模型面对零件进行成形仿真和回弹分析显示,零件的最大回弹量为3.68 mm,即仍无法满足设计要求(小于1.5 mm),如图9所示.

##### 3.2.2 修边模回弹补偿及其仿真

将拉伸工序的回弹量作为回弹补偿量构造了修边冲孔模型面.图10为使用补偿后的修边冲孔

模型面的修边冲孔件与设计件的偏差.从图10可以看出,最大回弹量为1.34 mm,满足设计要求(小于1.5 mm).

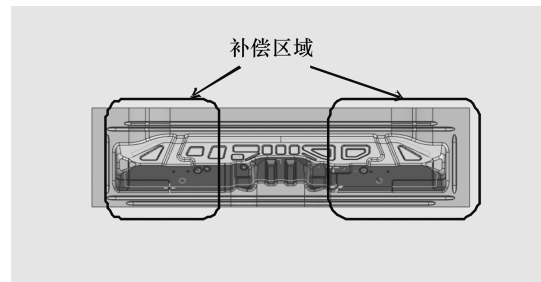


图8 补偿后的拉伸模型面

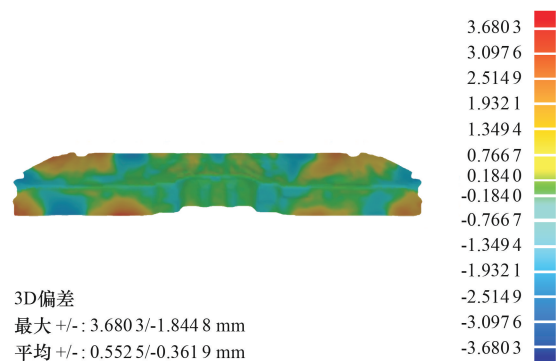


图9 回弹件与设计件的偏差

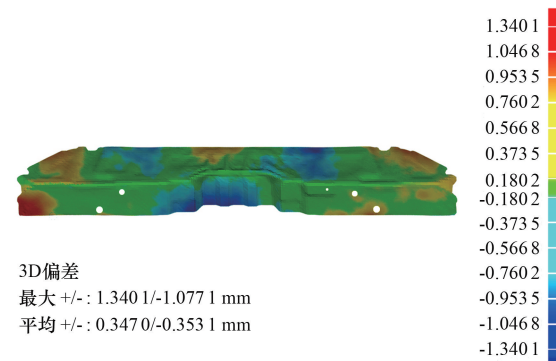


图10 修边冲孔件与设计件的偏差

## 4 实验验证

采用最优工艺参数对零件进行拉伸和修边冲孔的结果如图11所示.从图11可以看出,试模件成形充分,无开裂和起皱现象.采用超声波厚度测量仪测得零件的最大增厚率为5.89%,最大减薄率为9.48%,由此表明二者均符合设计要求(最大增厚率要小于10%,最大减薄率要小于15%).将试模件的数字模型(利用机器视觉设备对试模件进行3D扫描获取)与设计件的数字模型进行

对比可知(见图 12),试模件的最大回弹量为 1.49 mm,符合产品设计要求(小于 1.5 mm)。



图 11 试模件

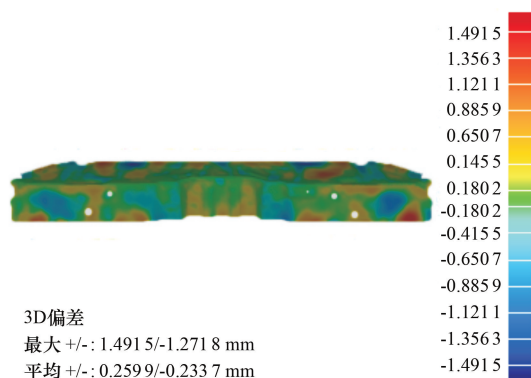


图 12 试模件数字模型与设计件数字模型的偏差

## 5 结论

利用本文提出的多工序回弹补偿方案对汽车后排座椅下的横梁进行仿真表明,此方案不仅能防止零件开裂,降低零件的最大增厚率和最大减薄率,还可以控制零件的回弹量;因此,本文研究可为大型汽车覆盖件的成形工艺参数优化和回弹补偿提供参考.本方案在回弹补偿时只采用了恒值补偿因子,因此在后续的研究中我们将研究不同补偿区域的补偿方法,以提高回弹补偿的精度.

## 参考文献:

- [1] 裴永生,张世哲,孟宁. QP980 超高强钢 A 柱补强板冲压成形性能分析[J]. 锻压技术, 2020, 45(12): 28-33.
- [2] 王海玲,陈世涛,崔礼春. 汽车车门内板冲压工艺方案及修边整形模设计[J]. 锻压技术, 2019, 44(1): 92-97.
- [3] 蒋磊,袁璐,王龙,等. 侧围外板全工序成形数值模拟与工艺优化[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(10): 50-60.
- [4] 尤晋,龚红英,刘尚保,等. 基于 Dynaform 及响应面法的 6016 铝合金散热壳体冲压成形及优化[J]. 锻压技术, 2022, 47(3): 54-58.
- [5] 王康康,陈泽中,江楠森,等. 基于 GA-BP 的汽车行李箱盖内板冲压成形工艺优化[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(9): 28-34.
- [6] 张凌云,黄杰,弥晓东,等. 基于小波神经网络的钣金件橡皮囊成形的回弹预测[J]. 热加工工艺, 2022(21): 75-79.
- [7] YAN H J, ZANG Q Q. Research on stamping process design and forming law of floor beam[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 34(7): 575-581.
- [8] LAL R K, CHOUBEY V K, DWIVEDI J P, et al. Study of factors affecting springback in sheet metal forming and deep drawing process[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 4353-4358.
- [9] 张新颖,余天明,栗彬琦,等. 侧围外板冲压成形仿真及影响因素分析[J]. 汽车工艺与材料, 2021(8): 61-65.
- [10] 汤云翔. 汽车大型外覆盖件冲压拉伸成形仿真与冲压工艺参数优化技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
- [11] 张建成. 车门外板冲压成形仿真分析和工艺参数优化方法研究[D]. 扬州:扬州大学, 2021.
- [12] 杨雁文. 某车型汽车顶盖冲压成形与抗外压能力的研究[D]. 长春:吉林大学, 2021.