

## 某汽车减震器支架冲压质量分析与控制

魏熹鸣<sup>1</sup>, 王 匀<sup>1</sup>, 滕士意<sup>1</sup>, 杨 进<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏力野精工科技有限公司, 江苏 泰州 214199)

**摘要:** 汽车减震器支架的凹凸面和空间曲线众多, 尺寸和形位精度要求高, 采用 QStE460TM 热轧酸洗钢进行冲压成形时易出现开裂、回弹量大等问题。基于响应面法建立以冲压件的最大减薄率和最大回弹量为优化目标, 以压边力、冲压速度、模具单边间隙和摩擦因数为设计变量的响应面模型, 结合二阶响应面法与 Design Expert, 采用 Box-Behnken 实验设计方法, 通过增设预翻边工序对支架冲压件的工艺参数进行优化, 确定最佳参数为: 压边力为 383.7 kN, 冲压速度为 385.9 mm·s<sup>-1</sup>, 模具单边间隙为 3.36 mm, 摩擦因数为 0.16。试产结果表明, 改进后的工艺规程可以有效控制支架冲压成形质量, 为复杂曲面零件成形工艺优化提供了依据。

**关键词:** 减震器支架; 冲压成形; QStE460TM 钢; 预翻边; 响应面模型

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.003

**中图分类号:** TG386.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 11-0016-08

## Analysis and control of stamping quality for an automobile shock absorber bracket

Wei Ximing<sup>1</sup>, Wang Yun<sup>1</sup>, Teng Shiyi<sup>1</sup>, Yang Jin<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;  
2. Alloy Seiko Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Taizhou 214199, China)

**Abstract:** The automotive shock absorber bracket with the characteristics of numerous concave and convex surfaces, spatial curves, as well as high dimensional and positional accuracy was prone to cracking and large springback amount during stamping for QStE460TM hot-rolled pickling steel. Then, based on the response surface method, taking the maximum thinning rate and maximum springback amount of stamping part as the optimization objectives, and the blank hold force, stamping speed, die one-sided clearance and friction factor as the design variables, the response surface model was determined. Furthermore, combining the second-order response surface method and Design Expert, the experiment design method of Box-Behnken was used to optimize the process parameters of stamping part for bracket by adding the pre-flanging process, and the optimal parameters that the blank hold force of 383.7 kN, the stamping speed of 385.9 mm·s<sup>-1</sup>, the die one-sided clearance of 3.36 mm and the friction factor of 0.16 were determined. The results of the trial production show that the improved process can effectively control the stamping quality of bracket and provide the basis for optimizing the forming process of complex curved parts.

**Key words:** shock absorber bracket; stamping; QStE460TM steel; pre-flanging; response surface model

减震器是车辆最为重要的结构之一, 可以缓解汽车行驶过程中产生的震动, 保证车辆的转向和刹车功能, 对驾驶安全性和舒适性非常关键。减震器支架作为连接减震器和车体的关键零部件, 同时受到来自减震器和车体的作用力, 要求其强度和精度

高, 同时耐磨损、长寿命。

减震器支架型面复杂, 成形难度高, 开裂回弹等缺陷严重, 如何控制其成形质量和提高成形性能是关键。由于数值仿真技术的发展, 原试错模式逐渐被数值仿真所替换, 大量学者通过数值仿真技术对冲压件成形质量问题进行研究。

Silva D F A 等<sup>[1]</sup>以变速器横梁为例, 提出了一种改良响应面模型, 将经验函数系数的不确定性加入考虑, 通过数值仿真验证其所提方法可以减少额外验证实验的次数。高孝书等<sup>[2]</sup>提出结合响应面模型和多目标粒子群优化算法的方法, 以镁合金方形薄壳件为例, 在正交试验的基础上构造以开裂和起皱为目标函数的二次多项式响应面模型进行寻优并

收稿日期: 2024-01-11; 修订日期: 2024-04-15

基金项目: 泰州市科技成果转化项目 (SCG202220); 泰州市科技支撑计划 (TG202247); 扬州市重点研发项目 (SCY2022010022); 无锡市科技攻关项目 (G20222007)

作者简介: 魏熹鸣 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1262081429@qq.com

通信作者: 王 匀 (1975-), 男, 博士, 教授

E-mail: wangyun@ujs.edu.cn

找到最优解。蒋磊等<sup>[3]</sup>以某车型侧围外板为研究对象,通过分析零件成形工艺性,针对 4 种冲压质量问题分别提出了优化方案,通过数值模拟确认了优化方案的效果,生产验证了成形工艺方案优化的可行性。

本文针对现有减震器支架进行冲压工艺性分析,并针对其冲压质量问题,进行数值仿真分析,提出通过增设预翻边工序来控制冲压成形质量的规程。结合改进后的工艺,通过 Design-Expert 软件建立了响应面模型,采用数值仿真技术对成形质量进行分析以获得最佳工艺参数,最后通过实际生产以验证改进型工艺规程的正确性。

1 成形性分析

1.1 冲压件结构分析

减震器支架所用材料为 QStE460TM 热轧酸洗钢,其化学成分和力学性能如表 1 和表 2 所示。QStE460TM 钢具有良好冷成形性,主要用于制造要求具有良好冷成形性能和高强度的汽车结构件。

表 1 QStE460TM 钢的化学成分 (%, 质量分数)  
Table 1 Chemical compositions of QStE460TM steel  
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
≤0.12	≤0.35	≤1.6	≤0.030	≤0.025	≥0.015	≤0.22

表 2 QStE460TM 钢的力学性能  
Table 2 Mechanical performance of QStE460TM steel

参数	上屈服强度/ MPa	下屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断后伸长率/ %
数值	550~690	460~520	520~670	19~26

减震器支架结构如图 1 所示,厚度为 2.8 mm,主要包括两个翻边,一个不规则凹凸面及多个孔,其中支架前端(图 1b 中 1 处)通过螺杆与减震器

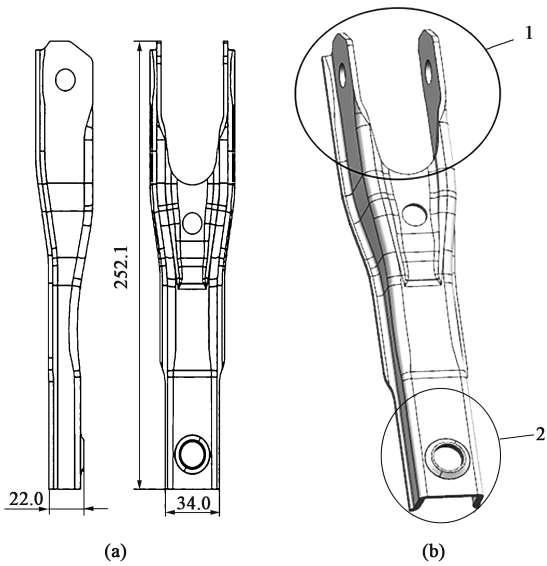


图 1 减震器支架零件图

(a) 二维图 (b) 三维图

Fig. 1 Part drawings of shock absorber bracket

(a) Two-dimension drawing (b) Three-dimension drawing

相连接,后端(图 1b 中 2 处)连接固定于底盘。冲压过程中,由于零件表面存在凹凸不规则面,同时成形过程中两个 90°翻边角度较大,导致材料流动量过大,在翻边处易产生开裂回弹等缺陷,并且生产工序繁多,前后互相影响,易导致尺寸不良。

1.2 成形工艺分析

现有减震器支架工艺流程为:落料冲孔—翻边成形 1—切口 1—翻边成形 2—打凸—冲孔刻字—抽孔—挤孔—切口 2—切边—整开档—侧冲孔,如图 2 所示。实际生产结果发现,翻边成形 2 容易出现成形质量问题,需具体研究分析,因此,需要通过改善工艺研究翻边成形 2,优化工艺参数以控制冲压质量。

2 数值仿真

2.1 模型建立

在 UG 中完成支架建模后将其导入 Autoform 进

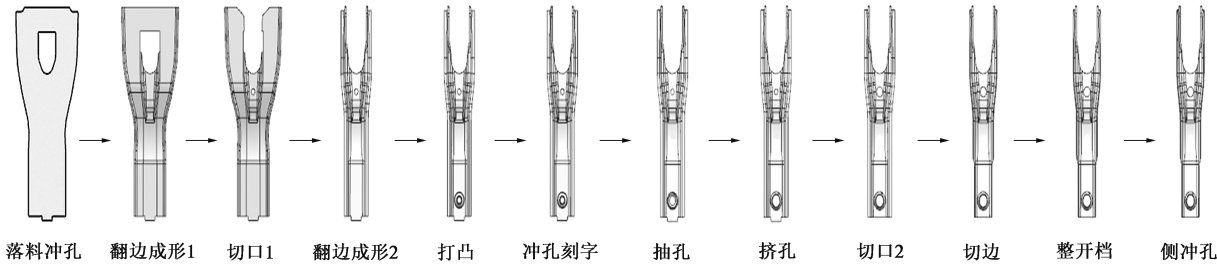


图 2 减震器支架冲压工艺流程

Fig. 2 Stamping process flow of shock absorber bracket

行模拟<sup>[4]</sup>。翻边成形 2 工序的数值模拟模型如图 3 所示。

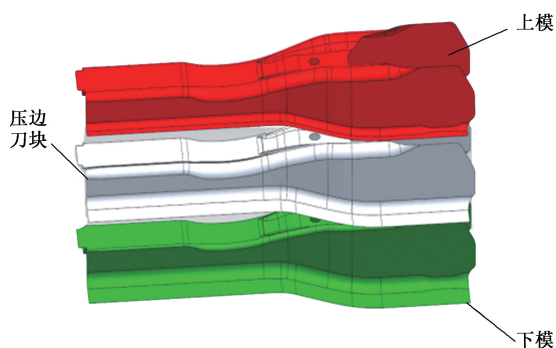


图 3 翻边成形 2 的仿真分析模型

Fig. 3 Simulation analysis model of flanging 2

所有模型均是由零件本身偏置得到的, 从上到下 3 个部分分别为上模、压边刀块和下模, 板料则是将零件模型导入至 Autoform 中由软件自动计算生成的, 工具体和板料网格划分为 40 mm 初始网格, 最大自适应等级设置为 7, 单元类型为 BEM-5<sup>[5-6]</sup>。

仿真软件中的材料模型设置为 Hill48 屈服准则, 该模型考虑了板料的各向异性, 与实际生产相符, 成形极限图通过 Keeler 模型理论获得<sup>[7]</sup>。根据实际生产状况, 将各工序凹凸模间隙均设定为料厚的 1.1 倍, 摩擦因数为 0.15, 行程为 700 mm, 冲压速度为  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 压边力为 300 kN。

## 2.2 仿真结果分析

图 4 为落料冲孔到翻边成形 2 的各道工序的成

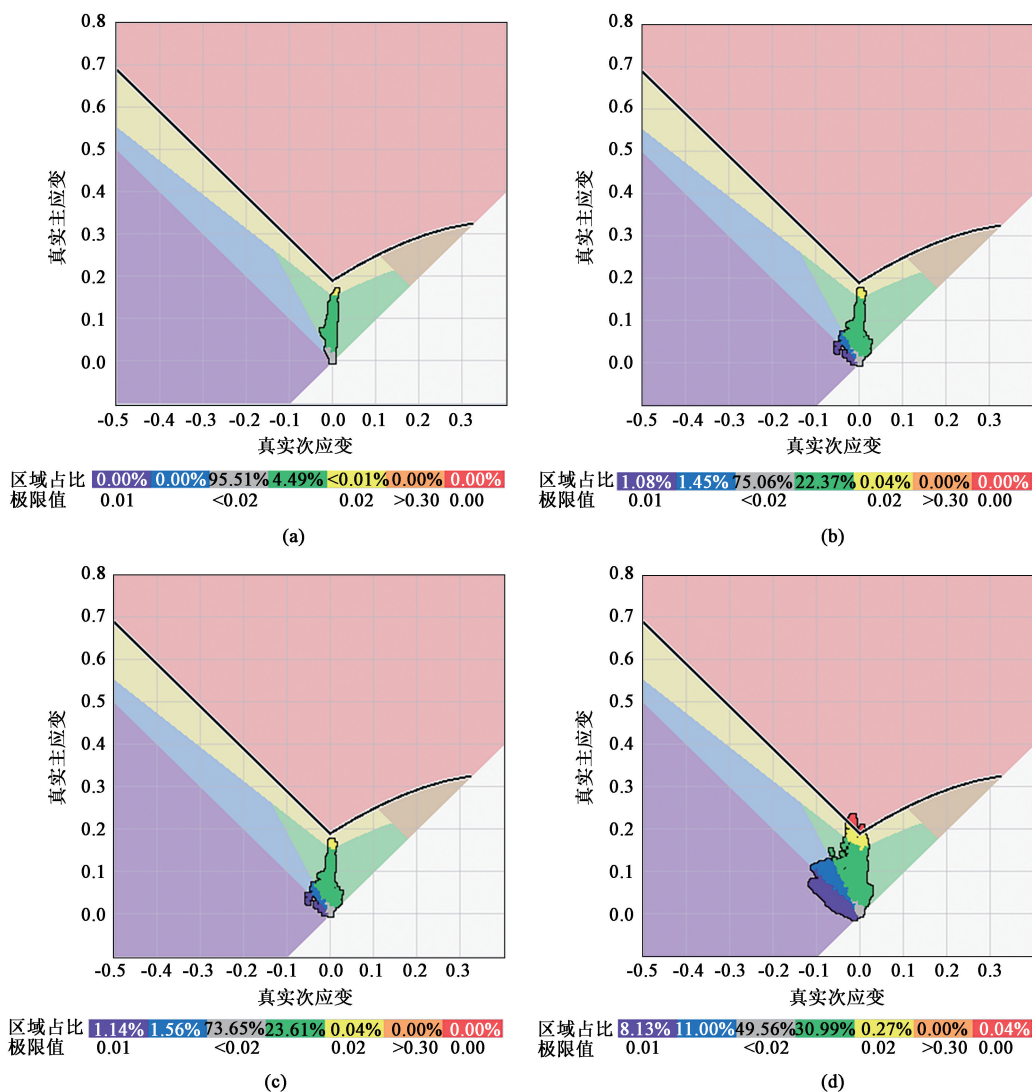


图 4 成形极限图

(a) 冲孔落料 (b) 翻边成形 1 (c) 切口 1 (d) 翻边成形 2

Fig. 4 Forming limit diagrams

(a) Punching and blanking (b) Flanging 1 (c) Trimming 1 (d) Flanging 2

形极限图。由图 4 可知, 零件开裂出现在翻边成形 2 工序, 其余工序的成形性良好, 且零件应力、应变变化较为稳定。翻边成形 2 工序的最大减薄率为 25.31%。此外, 后续工序可能导致开裂现象进一步严重, 所以, 开裂的主要原因在翻边成形 2 这一工序中。

通过比较发现, 数值仿真结果与实际生产实验结果一致, 均为翻边成形 2 中一次性翻边角度过大导致零件开裂。因此, 提出在翻边成形 2 前增设一道预翻边工序。

### 3 工艺优化

#### 3.1 成形工艺优化

根据生产经验, 同时综合考虑制造成本 ( $45^\circ$  预翻边模具的维护成本较低) 和生产效率问题, 确定优化方案为在翻边成形 2 前先预翻边至  $45^\circ$ 。

图 5 为优化后的工艺方案, 在翻边成形 2 前增加一道预翻边工序, 防止一次性翻边角度过大导致材料流动量过大, 进而控制冲压质量。

#### 3.2 优化结果

在原有工艺基础上增添一道预翻边工序, 对优化后的工艺建立模型并导入 Autoform 软件中进行模拟, 模拟结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 使用优化后的工艺进行生产, 零件开裂现象明显减少, 最大减薄率为 20.34%, 最大回弹量为 1.566 mm。成形工艺优化使得开裂现象

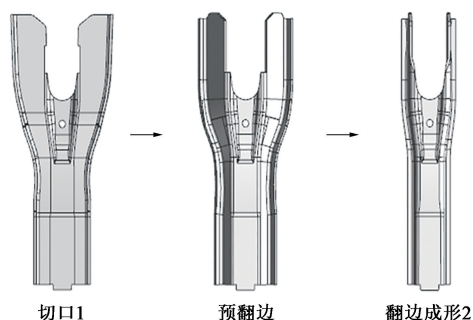


图 5 优化工艺方案

Fig. 5 Optimized process scheme

减少, 最大减薄率得到降低。但根据图 6b 可知, 零件部分位置的开裂趋势严重, 可能在后续工序中出现开裂, 无法满足生产要求, 需进一步对于工艺参数进行优化, 尽可能减小最大减薄率的同时使最大回弹量也尽可能变小。

### 4 实验设计

减震器支架的冲压质量评价指标主要为最大减薄率和最大回弹量, 这两个指标之间相互影响, 所以, 零件的冲压参数优化是一个多目标多因素优化的问题。

响应面优化法<sup>[8-12]</sup>采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系, 可以通过较少实验次数来得到多因素间的相互作用和非线性关系,

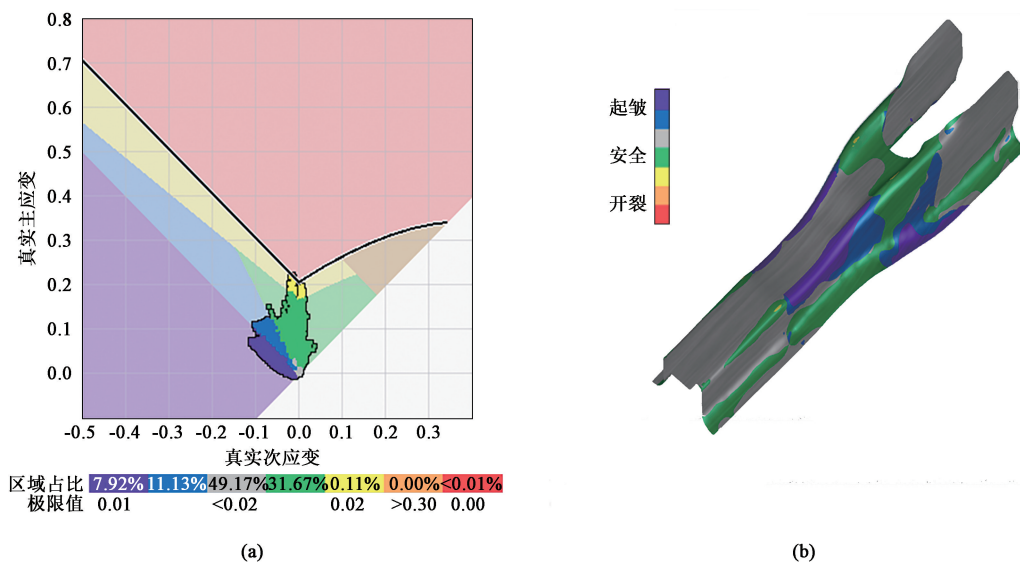


图 6 优化后的仿真结果

(a) 成形极限图 (b) 成形性图

Fig. 6 Simulation results after optimization

(a) Forming limit diagram (b) Formability diagram



适合多目标多因素优化。

针对减震器支架冲压生产过程中出现的开裂和回弹问题, 本文通过 Design-Export 软件的 Box-Behnken 实验设计法<sup>[10,12]</sup>进行实验设计, 选择零件的压边力  $A$ 、冲压速度  $B$ 、模具单边间隙  $C$ 、摩擦因数  $D$  这 4 个工艺参数作为影响因素, 以最大减薄率  $Y_1$  和最大回弹量  $Y_2$  作为实验目标寻找最优方案<sup>[13]</sup>。将上述参数输入至软件中得到 4 因素 3 水平的实验方案, 如表 3 所示, 其中,  $t$  为板厚, 通过软件得到 29 组实验方案并进行数值仿真, 部分结果如表 4 所示。

表 3 4 因素 3 水平正交实验设计方案  
Table 3 Design schemes of four-factor and three-level orthogonal experiment

水平	因素			
	压边力/ kN	冲压速度/ (mm · s <sup>-1</sup> )	模具单边间隙/ mm	摩擦因数
-1	200	200	2.80 (1.0 <i>t</i> )	0.14
0	300	300	3.08 (1.1 <i>t</i> )	0.15
1	400	400	3.36 (1.2 <i>t</i> )	0.16

表 4 实验方案部分结果  
Table 4 Partial results of experiment schemes

实验 方案	压边力 $A/\text{kN}$	冲压速度 $B$ / (mm · s <sup>-1</sup> )	模具单 边间隙 $C/\text{mm}$	摩擦 因数 $D$	最大减 薄率 $Y_1$ / %	最大 回弹量 $Y_2/\text{mm}$
1	300	300	3.36	0.16	19.81	1.179
2	300	300	3.08	0.15	22.42	1.636
3	200	200	3.08	0.15	21.01	1.599
4	300	300	3.08	0.15	22.14	1.566
5	200	300	3.36	0.15	20.01	1.356
6	400	400	3.08	0.15	22.46	1.623
7	300	300	2.80	0.16	23.91	1.659
8	300	300	3.08	0.15	22.42	1.636
9	200	300	2.80	0.15	23.63	1.680
10	300	400	2.80	0.15	23.71	1.650

5 响应面模型分析和验证

将设计好的实验方案数据分别代入进行数值仿真, 将得到的结果填入 Design-Export 软件中继续运行, 得到响应面多元回归方程, 如式 (1) 和式 (2) 所示。通过软件得到的响应面模型方差分析如表 5 所示, 三维响应面曲面图如图 7 和图 8 所示。

$$Y_1 = 22.30 + 0.2000A + 0.1167B - 1.93C + 0.0500D - 0.3500AB - 0.3500AC + 0.1000AD + 0.1000BC - 0.2000CD - 0.1333A^2 - 0.0583B^2 - 0.3583C^2 + 0.016 \quad (1)$$

$$Y_2 = 1.67 + 0.0028A - 0.0234B - 0.1708C - 0.0447D - 0.0835AB - 0.1053AC + 0.0028AD + 0.0248BC - 0.0910CD - 0.0188A^2 + 0.0681B^2 - 0.1396C^2 \quad (2)$$

表 5 响应面模型方差分析  
Table 5 Variance analysis of response surface model

目标 函数	决定系数 $R^2$	修正决定系数 $R^2_{\text{adj}}$	统计量 $F$	概率 $P$	显著性
$Y_1$	0.9791	0.9582	46.89	<0.0001	显著
$Y_2$	0.7621	0.5242	3.20	0.0033	显著

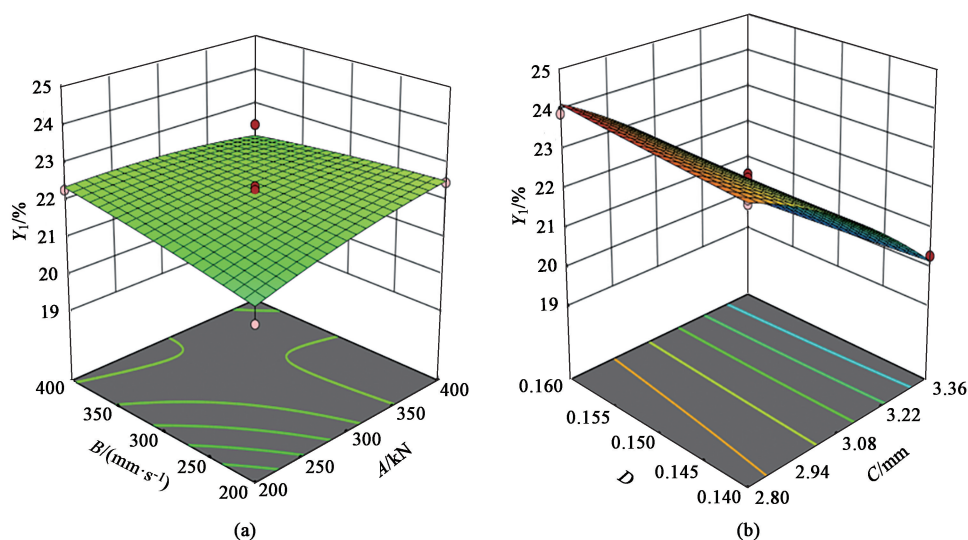
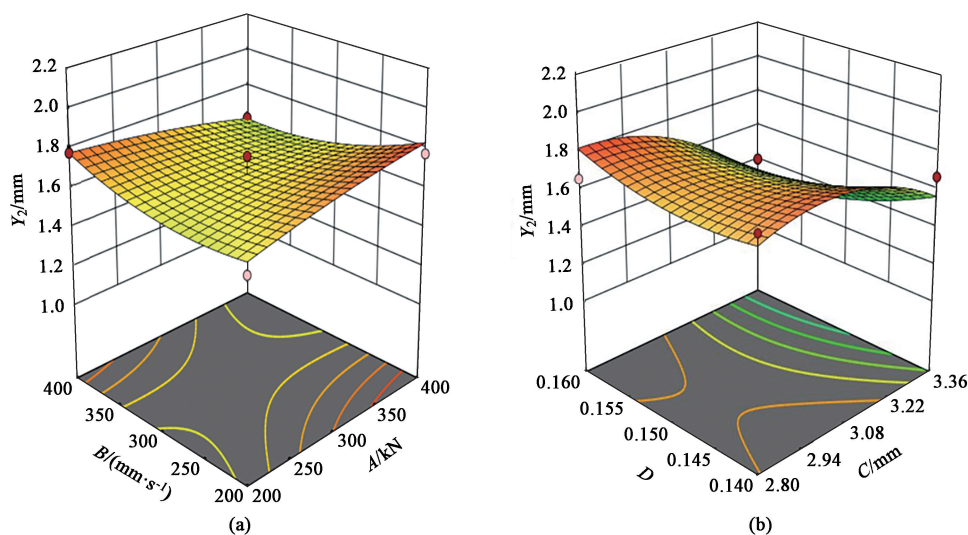
由表 5 数据可知,  $Y_1$  与  $Y_2$  回归方程的决定系数分别为 0.9791 和 0.7621, 统计量  $F$  均大于 1, 概率  $P$  均小于 0.05, 所以模型都是显著的, 说明模型拟合效果较好、预测精度高。该响应面模型说明了冲压工艺参数与产品成形质量之间的对应关系。

由式 (1)、式 (2)、图 7 与图 8 可知, 压边力、冲压速度和摩擦因数的增大均会使最大减薄率增加, 模具单边间隙的增大则会使最大减薄率下降。压边力的增大会使最大回弹量增大, 而冲压速度、模具单边间隙和摩擦因数的增大均会使最大回弹量降低。其中, 对于最大减薄率和最大回弹量影响最大的因素均为模具单边间隙, 模具单边间隙的增大使得零件的变形量减小, 材料流动量减小, 从而使零件厚度变化变小, 最大减薄率和最大回弹量降低。

此外, 还存在几个因素之间的相互作用的影响, 压边力和模具单边间隙的共同作用对最大减薄率的影响仅次于模具单边间隙单个因素的影响。

综合上述实验所得数据, 同时确定优化目标为最大减薄率和最大回弹量, 通过 Design-Export 软件得到最优参数, 当压边力为 383.7 kN、冲压速度为 385.9 mm · s<sup>-1</sup>、模具单边间隙为 3.36 mm 和摩擦因数为 0.16 时, 最大减薄率为 19.53%, 最大回弹量为 1.156 mm。将上述参数导入至 Autoform 软件中运行得到的成形极限图和成形性图如图 9 所示。

由图 9 可知, Autoform 软件运行后得到的零件表面无开裂产生, 成形效果良好, 最大减薄率为 19.81%, 最大回弹量为 1.161 mm。将响应面预测

图 7  $Y_1$  与设计变量的关系(a)  $Y_1$ -A-B (b)  $Y_1$ -C-DFig. 7 Relationships between  $Y_1$  and design variables图 8  $Y_2$  与设计变量的关系(a)  $Y_2$ -A-B (b)  $Y_2$ -C-DFig. 8 Relationships between  $Y_2$  and design variables

结果与仿真结果对比, 得到误差值为 1.43%, 该误差值表明响应面法对减震器支架的冲压成形质量的预测较为准确。

针对优化后的工艺及冲压参数进行生产验证, 所得实物图如图 10 所示。使用优化后的工艺和工艺参数进行生产, 产品表面无开裂, 最大回弹值为 1.16 mm, 在可接受回弹误差内, 其余尺寸良好。生产实验结果说明, 结合响应面法和数值仿真软件针对工艺参数进行优化, 可以有效分析和控制零件冲压生产质量。

## 6 结论

(1) 针对减震器支架冲压质量问题, 通过数值模拟和成形极限图分析, 发现其关键工序翻边成形 2, 并针对翻边成形 2 工序进行成形性分析, 分析了开裂现象的产生原因。通过优化生产工艺方案, 增设预翻边工序以减少零件开裂的产生。

(2) 通过 Design-Expert 软件的 Box-Behnken 实验设计法设计了实验方法来优化工艺参数, 建立了响

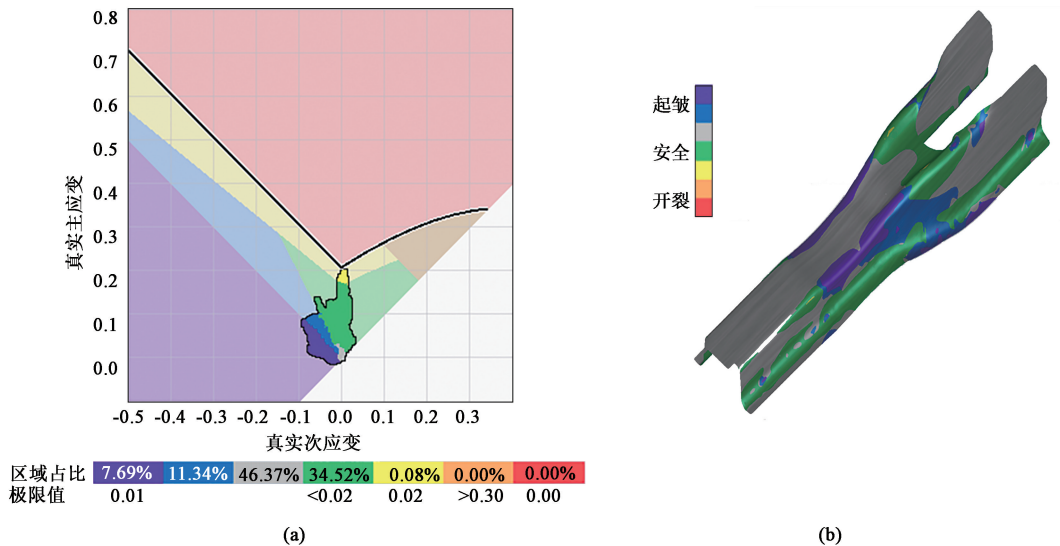


图 9 最优参数组合下的成形图

(a) 成形极限图 (b) 成形性图

Fig. 9 Forming diagrams under optimal parameter combination

(a) Forming limit diagram (b) Formability diagram



图 10 试制零件实物图

Fig. 10 Physical drawing of trial part

应面模型, 确认了模型的显著性, 确定最佳工艺参数为: 压边力为 383.7 kN、冲压速度为  $385.9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具单边间隙为 3.36 mm、摩擦因数为 0.16。

(3) 通过实际生产确定了工艺参数优化的可行性, 结合响应面模型优化工艺参数可以有效控制零件冲压质量, 为解决相关零件的冲压质量问题提供一定参考。

#### 参考文献:

- [1] Silva D F A, Marins S A F, Dias X E, et al. Modeling the uncertainty in response surface methodology through optimization and Monte Carlo simulation: An application in stamping process [J]. Materials & Design, 2019, 173: 107776.
- [2] 高孝书, 吕云. 基于 RSM 和 MPSO 的镁合金薄板冲压工艺参数优化 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (15): 79-83, 87.  
Gao X S, Lyu Y. Optimization of stamping process parameters of magnesium alloy sheet based on RSM and MPSO [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (15): 79-83, 87.
- [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] Jiang L, Yuan L, Wang L, et al. Numerical simulation and process optimization of full process forming of side outer panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (10): 50-60.
- [5] 周均, 王勇. 基于 Autoform 软件的冲压成形工艺参数优化 [J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40 (1): 73-76.
- [6] Zhou J, Wang Y. Optimization of stamping forming parameters based on Autoform software [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40 (1): 73-76.
- [7] 韩龙帅, 王刚, 郑学斌, 等. 基于 Autoform 的门内板冲压仿真分析 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (4): 82-88.
- [8] Han L S, Wang G, Zheng X B, et al. Simulation analysis of door inner panel stamping based on Autoform [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (4): 82-88.
- [9] Starman B, Cafuta G, Mole N. A method for simultaneous optimization of blank shape and forming tool geometry in sheet metal forming simulations [J]. Metals, 2021, 11 (4): 544-544.
- [10] 舒致航, 黄本生, 李天宁, 等. 基于正交试验的储罐封头成形数值模拟及工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 75-82.
- [11] Shu Z H, Huang B S, Li T N, et al. Numerical simulation and process parameter optimization on tank head forming based on orthogonal test [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 75-82.
- [12] 施为钟, 龚红英, 姜天亮, 等. 基于 Dynaform 和响应面法的带凸缘圆筒件拉深工艺优化 [J]. 上海工程技术大学学报, 2020, 34 (2): 168-173.
- [13] Shi W Z, Gong H Y, Jiang T L, et al. Drawing process optimization of cylinder with flange based on Dynaform and response surface method [J]. Journal of Shanghai University of Engineering, 2020, 34 (2): 168-173.