

## 汽车座椅对称件冲压成形仿真设计及优化

任维泽, 段绪星, 林益文, 雷鹏英, 裴泽宇

(中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213)

**摘要:** 为了解决高强度钢作为汽车零件材料在冲压成形过程中存在的成形缺陷, 以某品牌汽车座椅的调角器边板为例, 针对其几何结构和对称件的特征进行了冲压工艺流程设计及优化、零件成形精度优化。首先, 确定零件的冲压工序, 根据其结构特点将冲孔工序的工作内容与其他工序合并, 合理减少总工序数, 并一次对两个零件同时进行冲压, 优化后的冲压工艺流程为: 落料、拉深、修边、翻边。然后, 通过调整压边力、摩擦因数和拉深模具间隙3个工艺参数对零件的成形精度进行优化, 降低其回弹量, 使零件满足实际尺寸精度要求, 优化后的工艺参数组合为压边力为33 kN、摩擦因数为0.13、拉深模具间隙为2.70 mm, 仿真结果中零件的最大回弹量为1.264 mm。最后, 进行样件试冲, 零件实际的最大回弹量为1.270 mm, 与仿真结果基本一致, 验证了仿真结果的有效性。

**关键词:** 汽车座椅; 对称件; 冲压成形; 压边力; 摩擦因数; 拉深模具间隙; 回弹

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.010

**中图分类号:** TH162

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 01-0075-07

## Simulation design and optimization on stamping of symmetrical parts for automobile seats

Ren Weize, Duan Xuxing, Lin Yiwen, Lei Pengying, Pei Zeyu

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** In order to solve the forming defects in the stamping process of high-strength steel as the material of automobile part, for the side panel of angle adjuster for automobile seat of a certain brand, according to its geometric structure and the characteristics of symmetrical parts, the design and optimization on the stamping process flow and the optimization of part forming accuracy were carried out. First, the stamping process of parts is determined, the work content of punching process is merged with other processes according to its structural characteristics so as to reduce the total number of processes reasonably and complete the stamping of two parts simultaneously and the optimized stamping process is blanking, deep drawing, trimming and flanging. Then, the forming accuracy of part is optimized by adjusting blank holder force, friction coefficient and deep drawing die clearance to reduce its springback amount and make the part meet the actual dimensional accuracy requirements. The optimized combination of process parameters is that the blank holder force is 33 kN, the friction coefficient is 0.13 and the deep drawing die clearance is 2.70 mm, and the maximum springback amount of part in the simulation results is 1.264 mm. Finally, the test stamping of sample shows that the actual maximum springback amount of part is 1.270 mm, which is basically consistent with the simulation results and verifies the validity of the simulation results.

**Key words:** automobile seats; symmetrical parts; stamping; blank holder force; friction coefficient; deep drawing die clearance; springback

汽车工业的发展推动着经济的增长, 但同时会使资源和环保问题更加严峻<sup>[1]</sup>。针对上述汽车工业发展带来的问题, 轻量化已成为汽车工业发展方向<sup>[2]</sup>。研究表明, 汽车每减重100 kg, 油耗每百公里降低0.3~0.6 L, 二氧化碳排放量每百公里降低

8.5 g<sup>[3]</sup>。实现汽车的轻量化有以下途径<sup>[4-7]</sup>:

(1) 材料方面。使用轻质材料, 如铝合金、碳纤维复合材料等, 该类材料的密度较低, 可以帮助汽车合理减重。或者使用高强度材料, 如高强度钢, 可以有效降低汽车零件厚度, 达到减重的目的;

(2) 制造工艺方面。采用先进的制造技术, 如激光焊接技术、液压成形技术等制造零件, 提高质量, 减少零件组合工作, 减轻汽车整体质量;

(3) 优化汽车结构。针对车身、顶盖横梁和前桥等零件进行结构优化设计和轻量化设计, 在满足

收稿日期: 2023-06-06; 修订日期: 2023-09-26

作者简介: 任维泽 (1995-), 男, 硕士, 研究实习生

E-mail: renwz7@163.com

通信作者: 段绪星 (1995-), 男, 硕士, 助理研究员

E-mail: xxing\_duan@163.com

承载能力的同时降低零件质量。

使用轻质和高强度材料制作零件是汽车轻量化的主要方式, 铝合金、碳纤维复合材料等轻质材料的成本较高, 其中铝合金成形工艺的复杂性制约着其在汽车制造方面的进一步应用, 而碳纤维复合材料更多使用在赛车、跑车中, 无法在汽车工业中进行大规模应用。高强度钢相比铝合金材料, 在抗碰撞性能、成形工艺和使用成本等方面有着突出的优势。高强度钢相较于普通钢具有更高的屈服和抗拉强度, 是实现汽车轻量化的重要手段。高强度钢已被广泛应用于制造汽车零件, 如中地板加强板、汽车后背门和前翼子板等<sup>[8-10]</sup>。但是, 高强度钢的成形性和塑性性能较差, 存在成形精度低、成形质量差的缺点, 在冲压过程中易产生开裂和回弹量大的成形缺陷<sup>[11]</sup>。

传统的“试错法”通过试冲样件, 根据样件的缺陷对冲压工艺进行反向修改, 该方法存在着生产效率低和产品合格率低的缺点, 不适用于现代工业的生产要求<sup>[12-13]</sup>。此外, 出于设计难度和成本控制的考虑, 汽车的多种部件均设计为对称件, 如靠背边板和座椅边板等。针对对称件, 实际生产制造过程中通过优化冲压工艺, 一次同时成形两个零件, 不仅可以使板料在冲压过程中受力更平衡, 还能提高实际生产效率、降低成本<sup>[14]</sup>。本文的研究对象——调角器边板也是对称件, 针对边板对称件的特点以及其在冲压过程中可能出现的成形质量问题, 利用有限元软件对调角器边板进行冲压成形数值仿真。设计和优化调角器边板的冲压工艺, 研究工艺参数对边板成形精度的影响, 对调角器边板的成形精度进行优化。

## 1 调角器边板工艺设计及优化

某品牌汽车座椅的调角器边板如图 1 所示, 该零件连接靠背边板和座椅边板, 其有以下两个功能<sup>[15]</sup>:

(1) 保证座椅坐垫和背部骨架的连接强度, 承受并传递力矩载荷, 提高汽车发生碰撞时座椅对乘员的保护;

(2) 调整座椅倾斜角度, 满足不同坐姿需要, 提高舒适度。

从图 1 中可以看出, 零件的整体形状较为复杂, 多处存在外凹和内凸的曲面结构, 表面起伏较大, 圆弧过渡较多, A 和 B 处的平面高度差较大, 导致零件整体拉深深度较大, 需要根据拉深件的仿真质

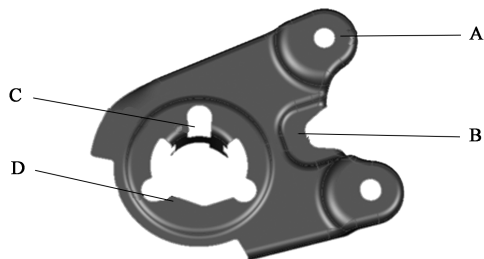


图 1 调角器边板模型

Fig. 1 Model for side plate of angle adjuster

量考虑是否需要进行多次的拉深或者调整板料相对位置以完成零件平面形状的成形; C 处存在复杂的翻边结构, 且该处零件形状不规则, 中间存在椭圆孔, 需要考虑该区域的翻边工序和冲孔工序的顺序问题, 此处为工艺设计中的难点; D 处存在复杂的冲孔结构, 需在进行冲孔的同时将 C 处复杂的翻边结构的形状冲出, 故需要保证该处复杂冲孔的尺寸精度。

零件材料为 SAPH440 钢, 长度约为 146.8 mm, 宽度为 117.4 mm, 高度为 34.7 mm, 零件厚度为 2.5 mm。通过对母材进行相关性能测试得到材料参数, 如表 1 所示。

表 1 SAPH440 钢的材料参数

Table 1 Material parameters of SAPH440 steel

参数	数值
屈服极限/MPa	440
强度极限/MPa	443.4
弹性模量/GPa	210
泊松比	0.3
硬化指数	0.0325

根据零件的结构特点设计冲压工艺, 冲压工艺对模具的设计、零件成形难度和实际成本均有着重要影响。冲压工艺流程是对冲压工序进行了合理规划的程序, 根据各冲压工序的工作特征, 在保证零件设计功能的同时, 使其顺利成形。冲压工序依据工序特征可分为冲裁、弯曲、拉深和成形 4 种工序, 而依据变形性质, 可分为分离和成形两种工序。分离工序是指通过冲裁力使板料应力超过材料强度极限, 将板料按轮廓线分离的冲压工序, 如落料和冲孔工序等; 成形工序是指通过冲压力, 使板料应力超过材料屈服极限, 板料发生塑性变形从而得到一定形状和尺寸精度的冲压工序, 如拉深和翻边工序等<sup>[16]</sup>。

零件冲压工艺的设计原则一般为从整体到局部, 根据模具的结构、板料的强度、零件的结构复杂程度等将冲压成形分成几个区域, 对每个区域进行一

至多道冲压工序成形,故初始冲压工艺流程为:1落料、2拉深、3修边、4翻边、5冲孔。结合零件结构和考虑实际成本对工艺流程进行优化,零件冲压工序越少,生产效率越高,生产成本越低,本文零件后续需要进行批量生产,合理减少冲压工序是重点关注问题。通过观察发现,本文零件边缘区域的翻边深度较低,可以通过合理设置板料形状并调整拉深模具边缘,在拉深工序中将零件边缘冲压成形。此外,可以将零件的冲孔工序与修边工序合并,在翻边工序前完成对复杂翻边区域(图1中C处)中椭圆孔的冲孔,在减少冲压工序数量的同时,椭圆孔可作为工艺切口,通过调整该处的变形强、弱区来减少应力集中区域,提高零件冲压成形质量,避免开裂,具体设置为:提取椭圆孔的平面曲线,导入仿真软件后对该处进行平面冲孔,冲孔后进行复杂翻边。通过仿真结果发现,成形方案1(先冲孔再翻边)与方案2(先翻边再进行斜冲孔)的零件的冲压质量大致相同,故从整体成形质量考虑,针对椭圆孔结构的成形选择方案1。综上,优化后零件的冲压工艺流程为:

(1) 落料,将板料从板类母材上沿零件外轮廓线分离出来;

(2) 拉深,通过模具对板料进行冲压,将板料成形为具有复杂结构的半成品工件;

(3) 修边,沿孔和拉深件轮廓线将所有孔冲出,并将板料边缘废料切除;

(4) 翻边,沿翻边结构的圆角区域将板料平面翻为竖直形状。

## 2 调角器边板仿真模型设计

将零件模型导入板料成形仿真软件 Autoform,导入后设置相关参数,如缝合距离为 0.10 mm、网格划分公差为 0.01 mm、冲压中心选择重心等。冲压方向的选择有以下要求<sup>[17]</sup>:

(1) 使零件在成形过程中无冲压负角,降低成形深度,使板料与模具安全贴合;

(2) 使板料在成形过程中均匀流动,模具与板料的接触位置靠近模具中心,避免因接触位置不合理导致出现开裂、成形精度不足等缺陷。

根据上述原则,冲压方向选择平均法向(相对板料上表面垂直向下),经冲压负角度检查发现该方向合理,可以使板料流动均匀,提高成形质量,负角度检查结果如图2所示。

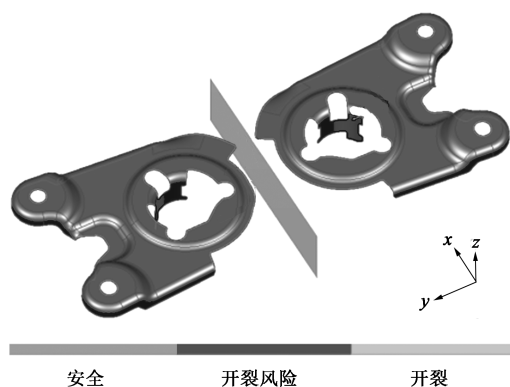


图2 冲压负角度检查结果

Fig. 2 Results of stamping negative angle check

合理的板料形状不仅可以降低成形风险,还能提高材料利用率。板料过小,零件无法成形,板料过大则会使边缘在成形过程中出现折皱,甚至产生皱裂。运用有限元技术,结合各冲压工序轮廓节点对板料形状尺寸进行逆运算,能够在极大程度上提高材料利用率,并降低质量缺陷出现的风险。提取零件外轮廓线,运用 Autoform 软件自带的板料逆运算功能生成板料,因零件为对称件,故选择同时对两个零件进行冲压成形,板料尺寸为 320 mm × 135 mm,形状如图3所示。



图3 板料形状

Fig. 3 Plate shape

确定板料形状后,设计拉深工序。由于拉深工序整体深度较大,选择将板料放置在零件中间的平面位置,并设计中间平面为压料面,将拉深凹模和凸模设计为零件整体形状,使零件整体形状一次成形。该方案可以有效降低拉深深度,防止在拉深过程中板料由于折弯区域拉应力过大而出现开裂。提取零件外表面生成模具,为提高板料成形质量和尺寸精度,在零件原整体形状的基础上,对模具进行工艺补充。工艺补充分为内工艺和外工艺补充,本文零件的工艺补充主要为内工艺补充,即对零件的内孔进行填孔处理,使拉深区域整体更加平顺。拉深方向与零件冲压方向一致,工艺补充后的零件拉

深模凹模如图 4 所示。

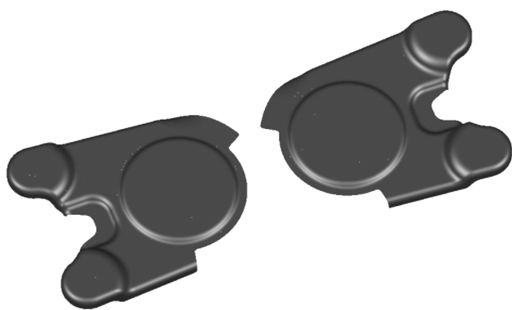


图 4 拉深模凹模

Fig. 4 Concave die of deep drawing die

设计修边工序前,为提高冲裁精度,在机械设计中提取零件翻边区域的平面展开孔位线并导入 Autoform 中,之后根据所有平面孔的孔位线和零件展开外轮廓线设置修边工具体。该道工序为复合工序,即在该道工序中完成修边和冲孔两道工序的冲压成形。其中冲孔工序中存在侧冲孔结构,将该冲孔方向设置为水平方向,切边深度依据零件厚度设置为 6 mm,侧冲孔工具体如图 5 所示。

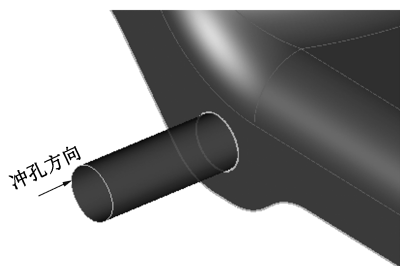


图 5 侧冲孔工具体

Fig. 5 Side punching tool body

其余孔均为平面孔,所以修边和冲孔方向均与

冲压方向一致,切边深度设置为 6 mm。修边工序分为 3 个工作阶段:弹性变形、塑性变形和断裂分离。在修边工具体冲切导致的裂纹穿透板料后,板料孔内和边缘的废料被切除,修边工具体如图 6 所示。

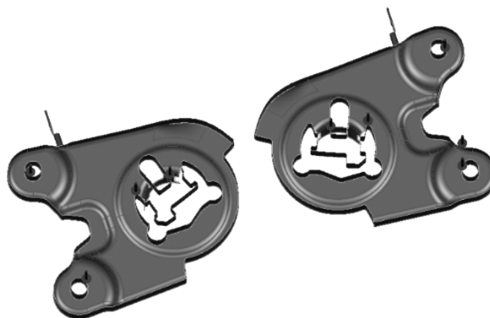


图 6 修边工具体

Fig. 6 Trimming tool body

最后设计翻边工序,本文零件的翻边区域主要为内孔翻边,即将孔的边缘翻为竖直形状。为提高成形质量先对翻边区域冲切出的椭圆孔进行工艺补充,然后根据预期成形结果选择翻边成形方式,并设计相应区域。翻边区域和工具体如图 7a 所示,其中 a 为圆角区, b 为成形区,根据相应区域的几何尺寸将翻边工具体的半径设置为 5 mm,高度和宽度分别设置为 32 和 10 mm。翻边工具体如图 7a 中区域 c 所示,完成设计后生成翻边模下模,如图 7b 所示。

完成工序设计后,对板料进行冲压成形仿真,冲压工艺流程图如图 8 所示,从图 8 中可以看出,在落料工序中将板料从母材中分离出来并完成板料形状的设计;在拉深工序中通过拉深模具在板料上将零件的整体形状进行冲压成形;在修边工序中通

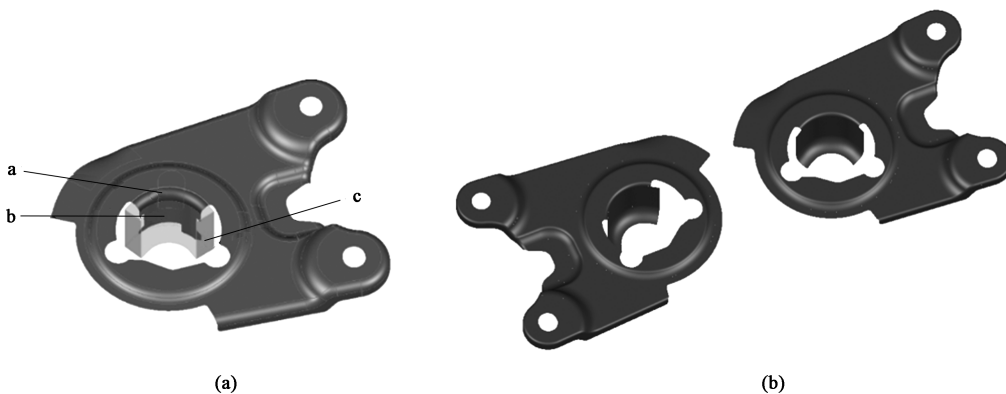


图 7 翻边工序

(a) 翻边区域和工具体 (b) 翻边模下模

Fig. 7 Flanging process

(a) Flanging area and tool body (b) Lower die of flanging die



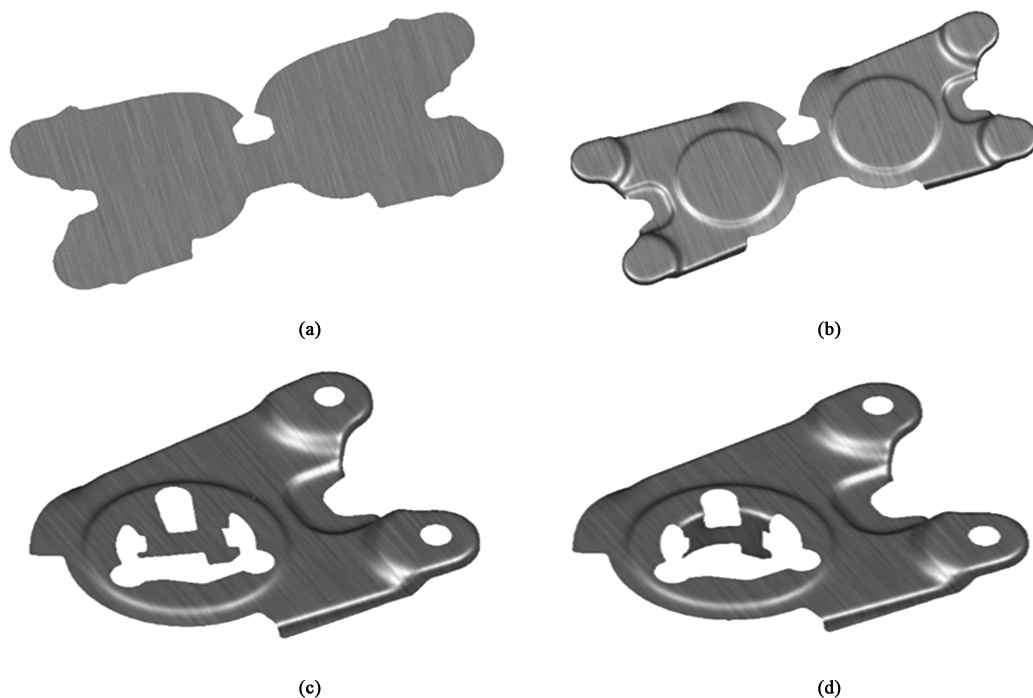


图 8 冲压工艺流程图

(a) 落料工序 (b) 拉深工序 (c) 修边工序 (d) 翻边工序

Fig. 8 Flow chart of stamping process

(a) Blanking process (b) Deep drawing process (c) Trimming process (d) Flanging process

过修边工具体将零件孔内和边缘的废料切除，提高尺寸精度的同时完成零件的整体冲孔；在翻边工序中，将已切除废料的板料翻为竖直状态。通过各工序的冲压成形，板料逐步被加工为最终零件。

完成零件冲压成形仿真后，对零件的仿真成形质量进行评定。成形极限图通过测量板料的表面应变显示零件的最终成形状态，如图 9 所示，发现零件无开裂风险和开裂区域，整体成形质量良好。

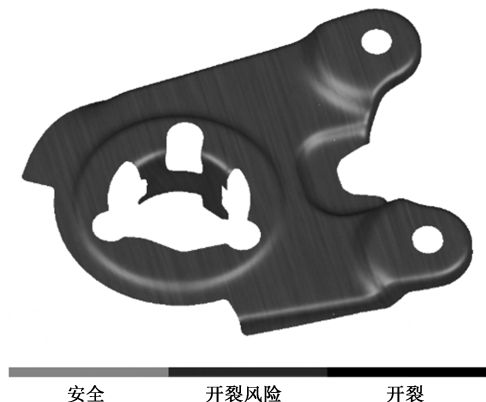


图 9 成形极限图 (非线性)

Fig. 9 Forming limit diagram (Non-linear)

### 3 调角器边板成形精度优化

零件的成形精度主要受板料的回弹影响。回弹是指外力去除后，板料塑性变形保留，弹性变形恢复，从而导致零件与标准件存在尺寸偏差的现象<sup>[18]</sup>。回弹过大会造成零件无法装配，并严重影响生产效率。回弹主要与零件结构、材料性能和冲压工艺参数有关。通过优化工艺参数，改变零件各区域应力状态以抑制回弹是零件成形精度优化的主要方式。主要的工艺参数有压边力、摩擦因数和拉深模具间隙，选择上述 3 个工艺参数进行正交试验，通过研究工艺参数对回弹的影响，从而得到最优的工艺参数组合，降低零件的回弹量。零件的压边力通过改变板料内部应力以调整零件成形精度，压边力的选择范围由式 (1) 确定。

$$F = S \times K \quad (1)$$

式中：\$F\$ 为压边力；\$S\$ 为压边圈与板料的接触面积；\$K\$ 为单位面积上的压力，取值范围为 2.0~3.0 MPa。

通过式 (1) 确定压边力范围为 25.0 ~ 37.5 kN，选择 25、29、33 和 37 kN 为正交试验水平。摩擦因数通过改变冲压模具和板料间的摩擦力

来影响成形结果，摩擦因数选择为 0.11、0.13、0.15 和 0.17。拉深模具间隙指拉深凸、凹模的单边模具间隙，取值范围由式（2）确定。

$$d = (1.0 \sim 1.1)t \tag{2}$$

式中： $d$  为拉深模具间隙； $t$  为板料厚度。

通过式（2）选择拉深模具间隙为 2.55、2.60、2.65 和 2.70 mm。根据所选择的工艺参数及具体数值，确定正交试验为 3 因素 4 水平，如表 2 所示。

表 2 正交试验因素和水平  
Table 2 Factors and levels of orthogonal tests

水平	因素		
	压边力/kN	摩擦因数	拉深模具间隙/mm
1	25	0.11	2.55
2	29	0.13	2.60
3	33	0.15	2.65
4	37	0.17	2.70

将正交试验设计为  $L_{16}$ ，以零件的最大回弹量为衡量指标，表 3 为正交试验结果。通过调整工艺参数组合，发现在第 10 组试验中取得衡量指标的最小值 1.264 mm，满足零件实际 $\pm 1.5$  mm 的尺寸精度要求。

表 3 正交试验结果  
Table 3 Results of orthogonal test

序号	因素			最大回弹量/mm
	压边力	摩擦因数	拉深模具间隙	
1	1	1	1	1.553
2	1	2	2	1.439
3	1	3	3	1.664
4	1	4	4	1.444
5	2	1	2	1.349
6	2	2	3	1.450
7	2	3	4	1.426
8	2	4	1	1.459
9	3	1	3	1.388
10	3	2	4	1.264
11	3	3	1	1.473
12	3	4	2	1.396
13	4	1	4	1.553
14	4	2	1	1.436
15	4	3	2	1.407
16	4	4	3	1.396

根据优化后的冲压工艺对零件进行实际冲压成形，其中工艺流程为落料、拉深、修边、翻边，工艺参数组合为：压边力为 33 kN、摩擦因数为 0.13、拉深模具间隙为 2.70 mm。对冲压件进行防锈处理后，零件成品如图 10 所示，零件成形质量良好，经专业检具检测，零件最大回弹量为 1.270 mm，与仿真结果基本一致，零件成品满足尺寸精度要求。



图 10 零件成品图  
Fig. 10 Finished part drawing

4 结 论

（1）针对工艺流程的优化，主要考虑了零件的几何特点，将冲孔工序的工作内容与其他工序合并，合理减少冲压工序，并对椭圆孔结构进行了详细冲压方案设计。最终将零件的冲压工艺流程设计为 4 序，冲压顺序为落料、拉深、修边和翻边。

（2）针对零件成形精度的优化，选择优化工艺参数，对压边力、摩擦因数和拉深模具间隙进行了正交试验，以零件最大回弹量为衡量指标得到优化后的工艺参数组合。优化后工艺参数组合为：压边力为 33 kN、摩擦因数为 0.13、拉深模具间隙为 2.70 mm，此时零件的最大回弹量为 1.264 mm。

（3）对零件进行了实际冲压成形，零件成形质量良好，最大回弹量为 1.270 mm，与仿真结果基本一致，满足尺寸精度要求，可进行实际生产使用。

参考文献：

[1] 兰博. 汽车铝合金覆盖件冲压成形数值模拟研究 [D]. 长春：吉林大学，2015.  
Lan B. Numerical Simulation Study on Stamping and Forming of Automotive Aluminum Alloy Coverings [D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[2] 武万斌，年雪山. 汽车轻量化技术发展趋势 [J]. 汽车工程师，2017，（1）：15-17.  
Wu W B, Nian X S. Development trend of automotive lightweighting technology [J]. Automotive Engineer, 2017, (1): 15-17.