

## 基于响应面法冲压工艺过程图应用研究

马旭东<sup>1</sup>, 侯国东<sup>2</sup>, 李 昕<sup>1</sup>

(1. 长春汽车工业高等专科学校 机械工程学院, 吉林 长春 130013;

2. 一汽富维零部件股份有限公司冲压件分公司 技术部, 吉林 长春 130011)

**摘要:** 针对一汽主机厂汽车内板件模具在调试过程中存在的调试效率低、工艺寻优困难、过度依赖人员经验等问题, 结合汽车内板件的成形特点, 运用 Dynaform 软件和 Box-Behnken 设计模拟不同工艺参数下板料的成形过程, 采用响应面法建立压边力、拉延筋阻力系数、摩擦因数与产品减薄率之间的二次拟合模型, 从而获得合理的工艺参数, 完成二元工艺过程图的绘制。结合模型开展全面试验法, 以三角形为边界区域完成三元工艺过程图的绘制。试验结果表明, 利用响应面法建立的工艺过程图能够真实地反映板料冲压成形过程中产品的减薄率情况, 并对模具调试人员在实际生产中有着很强的指导作用。

**关键词:** 汽车内板件; 冲压; 工艺过程图; 模具调试; 减薄率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.012

中图分类号: TG386.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 04-0090-07

## Application research on stamping process drawing based on response surface method

Ma Xudong<sup>1</sup>, Hou Guodong<sup>2</sup>, Li Xin<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Changchun Automobile Industry Institute, Changchun 130013, China;

2. Technical Department, FAW Fuwei Parts Co., Ltd. Stamping Parts Branch, Changchun 130011, China)

**Abstract:** In view of the problems of low debugging efficiency, difficulty in process optimization and over-reliance on personnel experience in the debugging process of automobile inner panels die in FAW main engine factory, combined with the forming characteristics of automobile inner panels, the forming process of sheet metal under different process parameters was simulated by Dynaform software and Box-Behnken design, and the response surface method was used to establish the quadratic fitting model between blank holder force, resistance coefficient of drawing rib, friction factor and thinning rate of product so as to obtain reasonable process parameters and complete the binary process drawing. Then, the ternary process drawing was completed by a comprehensive test method combined with the model taking the triangle as the boundary region. Test results demonstrate that the process drawing established by the response surface method can accurately reflect the thinning rate of product in the stamping process of sheet metal, and provide valuable guidance to die debugging staff in the actual production.

**Key words:** automobile inner panels; stamping; process drawing; die debugging; thinning rate

冲压板料成形是一类复杂的非线性问题, 选择合理的工艺参数对冲压质量、制造成本和生产效率有着重要影响<sup>[1]</sup>。目前, 模具制造厂针对工艺参数的优选主要依赖生产经验、模具 CAE (Computer Aided Engineering) 以及试错法调试<sup>[2-3]</sup>。依据冲压产品的特性, 现场技术人员可以凭经验或试错法来确定最优的工艺参数, 仍然需要大量调试<sup>[4]</sup>。冲压

模具调试对个人的经验要求很高, 若涉及多目标工艺参数调试、大范围寻优时, 不仅耗时耗力, 而且很难准确确定最优工艺参数<sup>[5-6]</sup>。

目前, 国内外学者对冲压工艺寻优的研究集中于神经网络优化、响应面法优化以及智能算法优化。过程图的研究更是集中在物理化学和材料科学领域。对于冲压工艺过程图的研究仍然比较匮乏, 夏玉峰等<sup>[7]</sup>在汽车内板件完成了工艺过程图的绘制, 并将其应用到冲压工艺设计中, 验证了过程图的指导作用。闫盖等<sup>[8]</sup>以冲压成形极限为基础, 完成了冲压板料成形区域图的绘制, 通过试验对比验证了板料区域成形图的有效性, 确定了其对实际生产的指导作用。崔俊佳等<sup>[9]</sup>提出了一种裕度的计算方法, 从

收稿日期: 2023-09-19; 修订日期: 2023-12-27

基金项目: 长春市科技局市属高校专项 (21ST04); 一汽富维校企产学研项目 (2023084)

作者简介: 马旭东 (1987-), 男, 硕士, 中级讲师

E-mail: 279667122@qq.com

理论分析和仿真模拟两个路径构建高强钢板热冲压的安全裕度云图，用于预测热冲压过程中制件的开裂和减薄程度。Cheol D K 等<sup>[10]</sup>提出一种由无断裂和褶皱组成的安全区域为基础的成形区域图，以进行快速有效的冲压工艺设计。经过汽车某冲压件可成形性图的验证，确定了可成形性图的设计指导工艺选择的有效性。Zhang J W 等<sup>[11]</sup>基于工艺参数的成形性图，用于精确评估复杂冲压件的成形性。与传统的成形性极限图相比，该成形性极限图能更准确地量化成形性状态，可用于解决金属流动过程中的开裂问题。在模具调试中可以精准地预测汽车后翼子板的成形过程。

针对冲压工艺过程图相关研究比较匮乏的情况，本文以一汽主机厂某产品为例，结合成形性极限图，对产品的可成形性进行分析。运用 Dynaform 进行 CAE 分析，利用 Box-Behnken 设计快速构建响应面模型，获得工艺参数的匹配集合。以二元工艺参数为坐标轴，绘制二元工艺过程图，结合三角形等高线图绘制了三元工艺过程图，直观地预测了成形过程中的减薄率，扩展了过程图在冲压领域的应用，为模具调试人员提供了重要参考，具有较高的生产效益。

## 1 建立产品有限元分析模型

### 1.1 工艺参数的确定

冲压板料材料的选择，通常要根据设计要求确定。在板料冲压成形过程中，影响产品成形质量的工艺参数众多，在模具调试中多优先考虑模具的凸凹模几何尺寸（ $R$  角、间隙）、拉延筋几何尺寸、压边力、摩擦因数（润滑、表面质量）和冲压速度等。本文结合一汽主机厂的实际生产情况，主要研究压边力、拉延筋阻力系数和摩擦因数 3 个工艺变量对减薄率的影响，进而绘制出冲压减薄率工艺过程图。

对于厚度大于 0.5 mm 的冷轧钢板，压边力的初始选择主要通过经验公式式（1）<sup>[8]</sup>确定。

$$F = Aq \quad (1)$$

式中： $F$  为压边力，N； $q$  为单位面积上的压边力，MPa，对于厚度为 0.5~3.0 mm 的冷轧钢板， $q$  通常取 2~2.5 MPa； $A$  为压边圈与板料的接触面积，mm<sup>2</sup>。

摩擦因数的初始选择来源于板料与模具的接触状态，小的摩擦因数表示材料流动阻力较低；根据板材性质、模具表面粗糙度及润滑条件，确定初始摩擦因数为 0.115。冲压速度的初始选择应充分考虑材料的

加工硬化特性和成形极限，冲压速度的变化会影响板料与模具之间的摩擦状态。根据实际生产中每分钟的行程次数，确定初始冲压速度为 4500 mm·s<sup>-1</sup>。

### 1.2 模型的设计

研究对象为一汽主机厂卡车用刮水器电机盒冲压产品，利用 UG 软件进行分模面的绘制，如图 1 所示。该产品为汽车内板件，材料为 ST14 冷轧钢板，板料尺寸为 350 mm×265 mm×1.5 mm。查阅 Dynaform 材料库，得到的材料性能如表 1 所示，其中  $r_0$ 、 $r_{45}$ 、 $r_{90}$  为与轧制方向成 0°、45°和 90°角度的塑性应变比。尺寸和形状精度要求较高，特别是对成形区域内的减薄率，要求低于 22%。

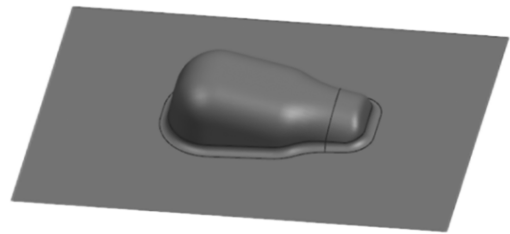


图1 产品三维图

Fig. 1 3D diagram of product

表1 ST14 钢材料性能参数

Table 1 Performance parameters of ST14 steel material

参数	屈服强度/ MPa	泊松比	杨氏模量/ GPa	塑性应变比 $r$		
				$r_0$	$r_{45}$	$r_{90}$
数值	≤220	0.28	207	1.88	1.22	2.17

将该冲压产品导出为 IGS 格式的数模，并将其导入到 Dynaform 软件中。在 Dynaform 软件中完成板料、凸模、凹模、压边圈的网格划分，网格形状为四边形，完成板料、凹模、凸模和压边圈属性的定义，设置冲压速度、摩擦因数、压边力等工艺参数。如图 2 所示，完成有限元模型的建立。

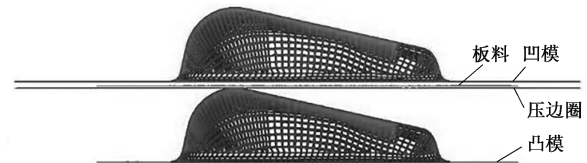


图2 有限元分析模型的建立

Fig. 2 Establishment of finite element analysis model

## 2 响应面试验方案的设计

Box-Behnken 试验设计（Box-Behnken Design,

BBD) 是响应面设计法中一种, 与中心复合试验设计 (Central Composite Design, CCD) 相比, 其具有模型简单和准确性高等特点, 且不需要大量试验即可以建立起响应值与因素的非线性关系<sup>[12-13]</sup>。在多组试验中选择 Box-Behnken 试验方法进行试验设计, 结合试验中各因素的影响程度, 以产品减薄率为响应目标, 选择压边力、拉延筋阻力系数和摩擦因数这 3 个因素作为复选试验因素。

以 ST14 冷轧钢板材成形的工艺参数推荐值作为试验参数的取值范围, 分别选择压边力  $x_1$  为 60~90 kN、拉延筋阻力系数  $x_2$  为 10%~20%、摩擦因数  $x_3$  为 0.105~0.125。采用 BBD 法设计 3 因素 3 水平的试验方案, 复选工艺参数因素水平表 2 所示。

表 2 复选 BBD 试验因素水平表  
Table 2 Factors and levels of checked BBD test

水平	因素		
	$x_1/\text{kN}$	$x_2/\%$	$x_3$
1	90	20	0.125
0	75	15	0.115
-1	60	10	0.105

利用 Design Expert 软件完成 BBD 试验方案设计, 其中设计 12 组析因试验和 5 组中心重复试验。充分结合一汽主机厂冲压产品成形的实践经验, 确定了 CAE 成形分析的可行性和有效性。运用 Dynaform 进行有限元分析并开展 BBD 试验, 以 CAE 的方式快速获得响应面法所需要的可靠数据。具体的试验方案和试验结果如表 3 所示, 其中,  $J$  为冲压制件的减薄率。

响应面法是利用二次回归方程, 结合最小二乘法拟合多项式来构造近似表达式, 以代替设计问题中的目标函数。冲压件减薄率与工艺参数间存在未知的联系, 可以将减薄率设为响应值, 建立减薄率与工艺参数的二阶函数数学关系<sup>[14-15]</sup>, 其表达式为:

$$J_{\text{fun}} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^k \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^k \alpha_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式中:  $J_{\text{fun}}$  为冲压产品减薄率的响应面函数;  $\alpha_0$ 、 $\alpha_i$ 、 $\alpha_{ii}$ 、 $\alpha_{ij}$  为回归方程系数;  $x_i$ 、 $x_j$  为工艺参数变量;  $k$  为工艺参数的数量, 本文取  $k=3$ 。

结合式 (2) 和分析结果, 进行二项式拟合获得减薄率与工艺参数的二次响应面模型为:

表 3 BBD 分析方案及结果  
Table 3 BBD analysis schemes and results

试验 序号	因素			$J/\%$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	0	0	0	23.985
2	0	0	0	23.985
3	-1	1	0	23.797
4	0	1	-1	24.078
5	1	0	-1	23.878
6	-1	-1	0	22.014
7	1	1	0	26.022
8	0	1	1	25.991
9	0	-1	1	24.507
10	0	0	0	23.985
11	0	-1	-1	22.297
12	0	0	0	23.985
13	1	0	1	26.470
14	-1	0	1	23.663
15	1	-1	0	24.364
16	0	0	0	23.985
17	-1	0	-1	21.859

$$J_{\text{fun}} = 20.749875 - 0.004275x_1 + 0.180675x_2 - 143.9625x_3 - 0.416667 \times 10^{-3} \times x_1x_2 + 1.313333x_1x_3 - 1.485x_2x_3 - 0.414444 \times 10^{-3} \times x_1^2 + 0.63 \times 10^{-2} \times x_2^2 + 757.5x_3^2 \quad (3)$$

### 3 工艺过程图的建立

#### 3.1 响应面模型分析

对试验结果和模型的有效性进行方差分析, 从而确定各个因素与响应值的关系, 结果如表 4 所示, 其中,  $x_1x_2$ 、 $x_1x_3$ 、 $x_2x_3$  为两因素交互作用项,  $x_1^2$ 、 $x_2^2$ 、 $x_3^2$  为各个因素二次项。整个模型中的  $P$  值小于 0.0001, 说明对应的显著性强<sup>[16-18]</sup>。如表 5 所示, 模型拟合度 (决定系数)  $R^2$  为 0.9992, 校正拟合度  $R_{\text{adj}}^2$  为 0.9982, 两者的值越接近 1, 模型的拟合精度越高。复选的 3 个因素  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  对冲压产品减薄率的响应度高, 99.92% 的响应值来源于这 3 个因素, 说明模型的拟合效果好, 有着较好的预测能力。该模型中一次项的影响均非常显著; 交互作用项  $x_1x_3$  的影响极显著, 而其他项  $x_1x_2$  和  $x_2x_3$  的影响不显著; 二次项中  $x_2^2$  影响显著,  $x_1^2$  和  $x_3^2$  的影响不显著。模型中各个因素的影响作用关系较为复杂。

表 4 回归模型的方差分析

Table 4 Variance analysis for regression model						
来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	26.0800	9	2.9000	963.14	< 0.0001	非常显著
$x_1$	11.0500	1	11.0500	3671.39	< 0.0001	非常显著
$x_2$	5.6200	1	5.6200	1868.14	< 0.0001	非常显著
$x_3$	9.0700	1	9.0700	3014.81	< 0.0001	非常显著
$x_1x_2$	0.0039	1	0.0039	1.30	0.2920	不显著
$x_1x_3$	0.1552	1	0.1552	51.59	0.0002	显著
$x_2x_3$	0.0221	1	0.0221	7.33	0.0303	不显著
$x_1^2$	0.0366	1	0.0366	12.17	0.0102	不显著
$x_2^2$	0.1044	1	0.1044	34.71	0.0006	显著
$x_3^2$	0.0242	1	0.0242	8.03	0.0253	不显著
残差	0.0211	7	0.0030			
失拟项	0.0211	3	0.0070			
纯误差	0	4	0			
总误差	26.1	16				

表 5 模型的精度参数

Table 5 Accuracy parameters of model				
参数	决定系数 $R^2$	校正拟合度 $R_{adj}^2$	预测拟合度 $R_{pred}^2$	信噪比
数值	0.9992	0.9982	0.9871	106.4851

3.2 二元工艺过程图

通过响应面模型生成与工艺相关的冲压工艺过程图，图 3 中的曲面变化可以有效地反映各工艺参数对减薄率的影响<sup>[5-6]</sup>。以减薄率为响应值，寻优后固定 1 个因素，进行响应曲面的拟合，拟合的结果如图 3 所示。由图 3a 可以得到，减薄率与压边力成正相关，说明调试过程中压边力越大，减薄率越大。由图 3b 可以得到，减薄率与摩擦因数成正比，摩擦因数越大，减薄率越大。从图 3c 可以看出，减薄率与拉伸筋阻力系数成正比，拉伸筋阻力系数越大，减薄率越大。通过响应面模型曲面拟合完成了

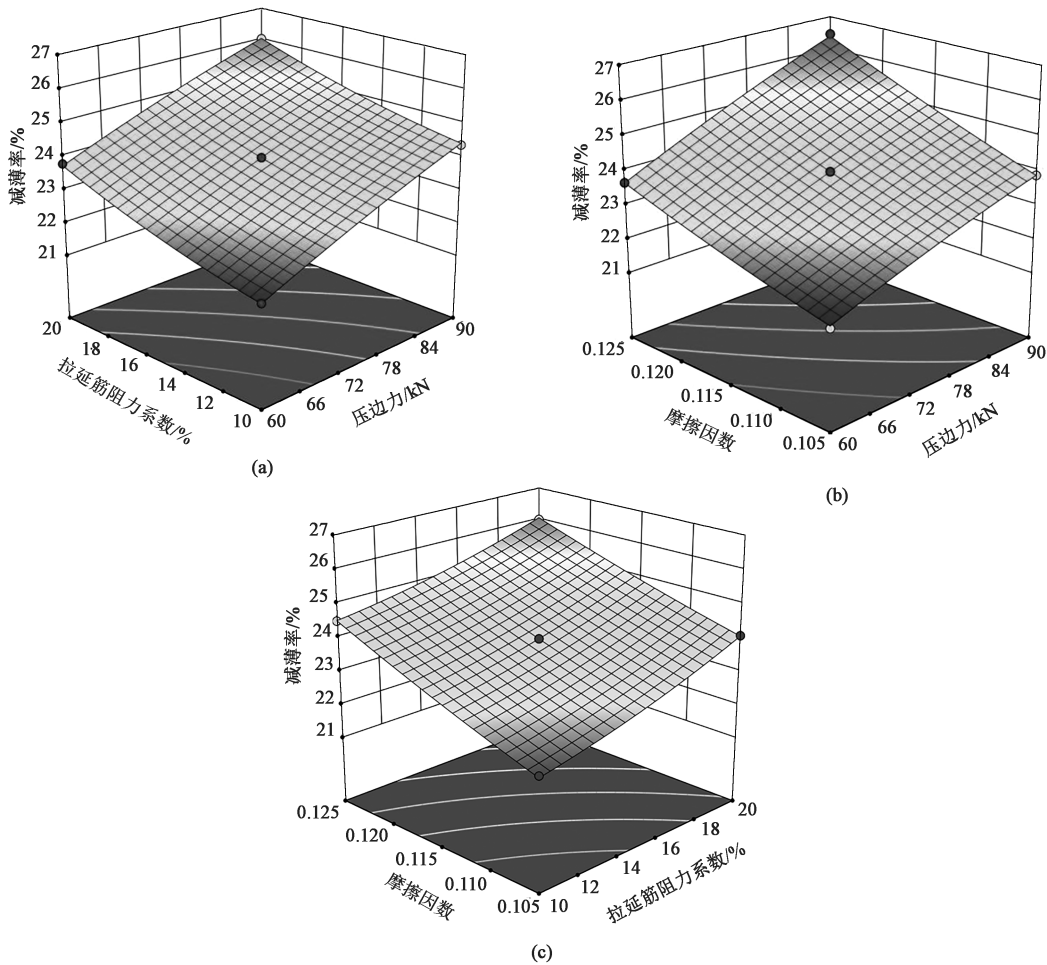


图 3 以减薄率为响应值的工艺过程图

(a) 拉伸筋阻力系数与压边力 (b) 摩擦因数与压边力 (c) 摩擦因数与拉伸筋阻力系数

Fig. 3 Process drawings with thinning rate as response value

(a) Resistance coefficient of drawing rib and blank holder force (b) Friction factor and blank holder force  
(c) Friction factor and resistance coefficient of drawing rib



工艺过程图的绘制，得到了二元之间变化的关系，并得到了两者数值变化的具体等高曲线。绘制工艺过程图使工艺参数匹配更加直观，辅助了三元工艺过程图参数的对比与分析。

3.3 三元工艺过程图

结合二元工艺过程图的特征，基于三元等高线图法利用响应面模型进行三元工艺过程图设计<sup>[19-20]</sup>。使用全面试验法对 3 因素 3 水平进行试验，得出 27 组排列组合方式，将这些工艺变量组合数据代入式（3），获得减薄率的响应值，组成一个 27×4 的矩阵。全面试验法设计方案及结果如表 6 所示。

表 6 全面试验法设计方案及结果  
Table 6 Design schemes and results of comprehensive test method

试验序号	因素			J/%
	$x_1/\text{kN}$	$x_2/\%$	$x_3$	
1	75	10	0.115	22.886
2	60	15	0.125	22.688
3	90	20	0.105	22.652
4	90	15	0.125	25.618
5	60	20	0.115	21.523
6	90	20	0.115	24.058
7	75	15	0.125	24.246
8	60	15	0.115	21.524
9	75	15	0.115	22.885
10	60	15	0.105	20.511
11	90	15	0.105	22.653
12	90	15	0.115	24.059
13	60	20	0.105	20.511
14	75	20	0.105	21.675
15	60	10	0.105	20.511
16	90	10	0.105	22.653
17	75	15	0.105	21.675
18	90	10	0.125	25.620
19	75	20	0.125	24.244
20	75	10	0.105	21.675
21	75	10	0.125	24.248
22	60	10	0.125	22.689
23	60	20	0.125	22.686
24	75	20	0.115	22.884
25	90	10	0.115	24.061
26	60	10	0.115	21.524
27	90	20	0.125	25.616

根据工艺参数数据的边界特征，结合式（4）将其进行线性归一化处理映射到 [0, 1]，对数据进行无量纲表达。

对数据进行进一步处理，使用矩阵变换，令每一行数据的和为 1，即每组数据中 3 个变量按照其影响程度确定比例因子，保证了每 1 组数据变量的和为 1。

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \tag{4}$$

式中： $x_{\text{norm}}$  为归一化结果数据； $x$  为待处理数据； $x_{\text{max}}$  为样本数据的最大值； $x_{\text{min}}$  为样本数据的最小值。

通过 Origin2021 绘制三元等高线图，生成以减薄率为目标的三元工艺过程图。三元工艺过程图以三角形为边界区域，内部反映各个工艺参数与减薄率的关系。通过设置三角网格线可以完成数据的分区和定位。将三元工艺过程图分为两部分进行分析，其中一部分如图 4a 所示，为等高线云图，反映减薄率大小分布；另外一部分如图 4b 所示，为工艺参数的确定。

由图 4a 可知，整体进行观察，目标点越靠近等高线内部区域，减薄率越高。目标点越靠近顶点，表明与此顶点相对的因素的值越大。如图 4b 所示，依据减薄率  $J$  的位置可以对工艺参数进行确定。例如，减薄率  $J$  所在位置为 21.905，确定了无量纲工艺参数，其中压边力  $x_1$  为 0.625，拉延筋阻力系数  $x_2$  为 0.25 和摩擦因数  $x_3$  为 0.125。

通过 Matlab 软件结合式（3）进行数据反归一化，计算得压边力  $x_1$  为 75 kN，拉延筋阻力系数  $x_2$  为 0.12 和摩擦因数  $x_3$  为 0.107，对工艺参数进行了快速确定。通过响应面模型绘制的三元工艺过程图，可以更加直观地表示出 3 个工艺参数对减薄率的影响。结合三元工艺过程图，可以指导人员的模具调试，在调试过程中合理选择工艺参数。

3.4 冲压工艺过程图实践

利用响应面模型进行工艺过程图绘制，可以有效地指导模具调试人员进行工艺参数组合与排列。当产品需要多目标调试时，对应响应值的工艺过程图可以作为模具调试的重要依据。如图 5 所示，结合 CAE 分析对比分析，寻找到一组优化参数。

产品型面的最大回弹量不超过 0.5 mm 和减薄率不超过 22%，在主机厂对两者均有要求的情况下，对回弹调试时，同时参考减薄率的工艺过程图，达到了调试事半功倍的效果。在将响应面法确定的最优工艺参数进行生产验证的过程中，完成该产品的调试。由对该冲压件检测结果得出减薄率最大值为 21.52%，回弹量为 0.46 mm，其实际减薄率结果与优化结果的相对误差为 1.12%，产品的最大回弹

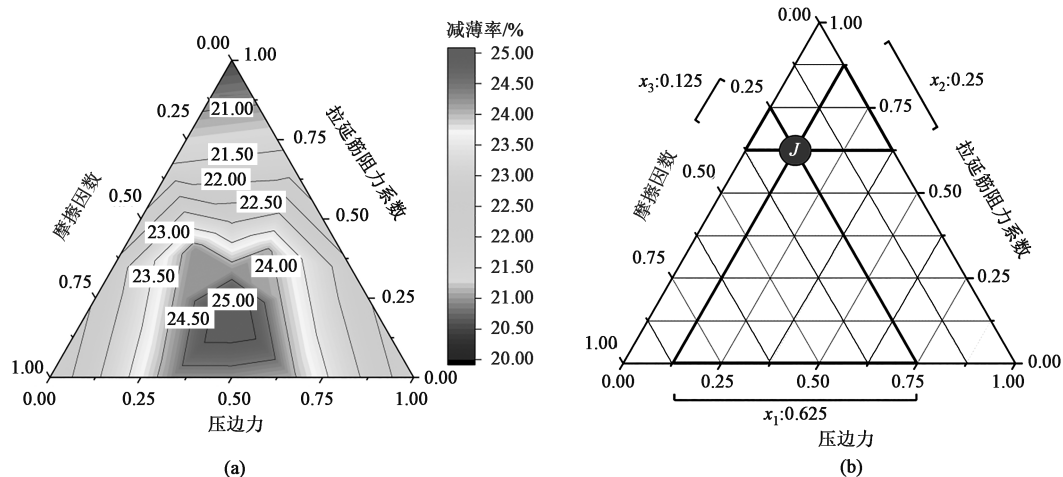


图4 三元冲压工艺过程图

(a) 三元等高线图 (b) 目标点工艺参数

Fig. 4 Process drawing of ternary stamping process

(a) Ternary contour map (b) Process parameters of target point

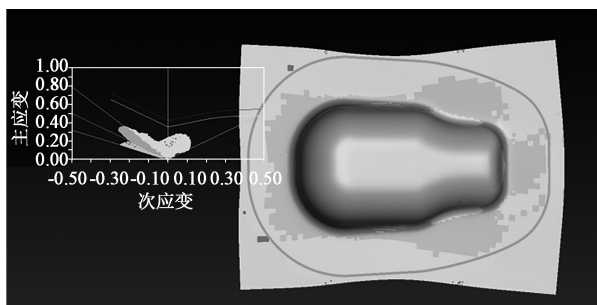


图5 优化后 CAE 分析结果

Fig. 5 CAE analysis results after optimization

量也在工艺要求的 0.5 mm 之内。证实了工艺过程图应用优化的有效性, 成功地完成了产品试制, 试模产品如图 6 所示。

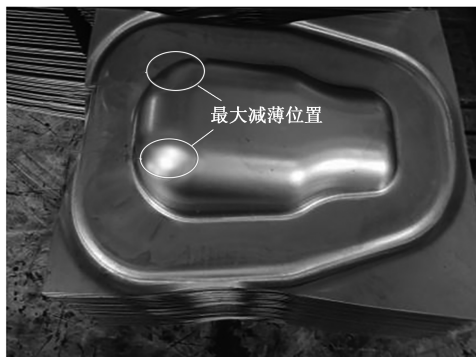


图6 现场实践试制产品图

Fig. 6 Trial product diagram in field practice

## 4 结论

(1) 通过 Design Expert 软件完成 BBD 试验的设

计, 建立了压边力、拉伸筋阻力系数和摩擦因数这 3 个工艺因素与减薄率的数学表达式, 完成了响应面模型的构建。

(2) 对响应面模型进行方差分析。结果表明, 压边力、拉伸筋阻力系数和摩擦因数对减薄率影响显著。压边力和摩擦因数交互项影响显著, 拉伸筋阻力系数二阶项影响显著。

(3) 通过响应面模型, 绘制了 3 个二元工艺过程图, 1 个三元工艺过程图, 确定了各个工艺参数对减薄率的影响过程。通过结合工艺过程图进行现场实践, 以图示等高线为依据, 模修工作人员成功地完成了回弹和减薄率两个目标的优化, 完成了冲压零件的试制。

### 参考文献:

- [1] 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.  
You J, Gong H Y, Liu S B, et al. Stamping forming and optimization of 6016 aluminum alloy cooling shell based on Dynaform and response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 54-58.
- [2] 孙元贵, 刘泓滨, 周双宁. 基于响应面法和 GS 理论的板料成形优化 [J]. 锻压装备与制造技术, 2017, 52 (1): 80-84.  
Sun Y G, Liu H B, Zhou S N. Optimization of sheet forming based on response surface method and GS theory [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2017, 52 (1): 80-84.
- [3] 韩龙帅, 郑学斌, 李学涛, 等. 冲压模具调试板料流入量影响因素分析 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (7): 82-86.  
Han L S, Zheng X B, Li X T, et al. Analysis of factors influen-

- cing the inflow of plate material for stamping die commissioning [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29 (7): 82-86.
- [4] 张冀川. 拉伸模调试缺陷及解决方案 [J]. *模具制造*, 2018, 18 (9): 33-35.
- Zhang J C. Tension die commissioning defects and solutions [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2018, 18 (9): 33-35.
- [5] 刘强, 俞国燕, 梅端. 基于 Dynaform 与 RBF-NSGA-II 算法的冲压成形工艺参数多目标优化 [J]. *塑性工程学报*, 2020, 27 (3): 16-25.
- Liu Q, Yu G Y, Mei D. Multi-objective optimization of stamping and forming process parameters based on Dynaform and RBF-NSGA-II algorithms [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27 (3): 16-25.
- [6] 赵洪林, 姜金花, 赵永顺, 等. 基于熵权 TOPSIS 决策的汽车吸能盒冲压成形质量多目标优化 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (10): 67-74.
- Zhao H L, Jiang J H, Zhao Y S, et al. Multi-objective optimization of forming quality of automotive energy absorption box based on entropy weight TOPSIS decision [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (10): 67-74.
- [7] 夏玉峰, 陈邦华, 杨建兵, 等. 工艺相图在汽车内板件冲压工艺设计中的应用 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2014, 42 (2): 292-297.
- Xia Y F, Chen B H, Yang J B, et al. Application of process phase diagram in the design of stamping process for automotive inner plate parts [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42 (2): 292-297.
- [8] 闫盖, 郑燕萍, 何镇翌, 等. 冲压板料可成形性区域图的研究与应用 [J]. *锻压技术*, 2013, 38 (4): 40-44.
- Yan G, Zheng Y P, He Z G, et al. Research and application of formability region diagram of stamping sheet [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2013, 38 (4): 40-44.
- [9] 崔俊佳, 胡明, 李光耀. 汽车零部件热成形极限裕度云图的构建与应用 [J]. *中国机械工程*, 2017, 28 (3): 358-365.
- Cui J J, Hu M, Li G Y. Construction and application of thermal forming limit margin cloud map for automobile parts [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28 (3): 358-365.
- [10] Cheol D K, Cha S H, Lee S K, et al. Application of a feasible formability diagram for the effective design in stamping processes of automotive panels [J]. *Materials & Design*, 2009, 31 (3): 1262-1275.
- [11] Zhang J W, Xu Y W, Hu P, et al. Development and applications of forming-condition-based formability diagram for split concerns in stamping [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 17: 151-161.
- [12] 姚忠, 谭鹤群, 叶金虎. 响应面法优化 SKD11 电火花线切割工艺参数研究 [J]. *制造技术与机床*, 2019, (9): 91-94.
- Yao Z, Tan H Q, Ye J H. Study on optimization of SKD11 EDM wire-cutting process parameters by response surface method [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2019, (9): 91-94.
- [13] 王刚, 王馨, 宋小三, 等. 响应曲面法中 BBD 和 CCD 在优化巯基乙酰化壳聚糖制备条件中的比较 [J]. *环境工程学报*, 2018, 12 (9): 2502-2511.
- Wang G, Wang X, Song X S, et al. Comparison of BBD and CCD in response surface method for optimizing the preparation conditions of mercaptoacetylated chitosan [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12 (9): 2502-2511.
- [14] 高志国, 徐流杰. 基于响应面法的 700 MPa 高强度低合金钢带冷冲压回弹分析 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (17): 147-150.
- Gao Z G, Xu L J. Cold stamping rebound analysis of 700 MPa high-strength low-alloy steel strip based on response surface method [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47 (17): 147-150.
- [15] 徐天娇, 张天寅, 韩先洪. 基于响应面法的铝合金波纹管热屈曲成形工艺参数分析 [J]. *塑性工程学报*, 2022, 29 (9): 69-79.
- Xu T J, Zhang T Y, Han X H. Analysis of thermal buckling forming process parameters of aluminum alloy bellows based on response surface method [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29 (9): 69-79.
- [16] 郎利辉, 杨希英, 孙志莹, 等. 基于响应面法的汽车覆盖件充液成形工艺参数多目标优化 [J]. *汽车工程*, 2015, 37 (4): 480-484.
- Lang L H, Yang X Y, Sun Z Y, et al. Multi-objective optimization of automotive covering part fluid-filled forming process parameters based on response surface method [J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37 (4): 480-484.
- [17] 王俊, 王克鲁, 鲁世强, 等. 基于响应面法的 NiTi 形状记忆合金热成形工艺参数优化 [J]. *塑性工程学报*, 2022, 29 (6): 157-164.
- Wang J, Wang K R, Lu S Q, et al. Optimization of NiTi shape memory alloy hot forming process parameters based on response surface method [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29 (6): 157-164.
- [18] 马旭东, 高文婧, 谢允聪. 基于 RSM 和 GA-PSO 塑件变形优化 [J]. *塑料工业*, 2020, 48 (11): 66-70, 50.
- Ma X D, Gao W Q, Xie Y C. Deformation optimization of plastic parts based on RSM and GA-PSO [J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48 (11): 66-70, 50.
- [19] 靳鹏伟, 石荣莹. 利用三元等高线图研究表面活性剂配方和温度对黏度的影响 [J]. *中国洗涤用品工业*, 2021, (4): 38-43.
- Jin P W, Shi R Y. Study on the effect of surfactant formulation and temperature on viscosity using ternary contour plots [J]. *China Cleaning Industry*, 2021, (4): 38-43.
- [20] 丁永祥, 夏巨湛, 王英, 等. 塑性有限元分析中的等值线图生成算法 [J]. *计算机辅助工程*, 1993, (4): 69, 71-76.
- Ding Y X, Xia J C, Wang Y, et al. An algorithm for contour map generation in plastic finite element analysis [J]. *Computer Aided Engineering*, 1993, (4): 69, 71-76.