

大型柴油发动机油底壳预成形工艺设计及优化

岳峰丽¹, 张鑫¹, 陈大勇², 徐勇², 宋鸿武², 马彦², 张士宏²,
李经明³, 李永辉³

(1. 沈阳理工大学汽车与交通学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016;
3. 河南孟电集团, 河南 新乡 453621)

摘要: 由于新型大容量柴油发动机油底壳具有薄壁、大尺寸和非对称深腔的外观特征, 传统的油底壳成形工艺已不适用。采用充液拉深成形工艺来成形最终胀形所用的坯料, 工艺分为两步, 先局部拉深, 再整体拉深。借助有限元模拟软件建立计算模型, 结合响应面法和正交试验法, 探究凹模圆角半径、板/凸模间摩擦因数、板/凹模间摩擦因数、压边力和液压力等关键工艺参数对油底壳充液拉深的影响, 并以最大减薄率和最大增厚率作为优化目标, 得到最佳工艺参数组合。对最佳工艺参数组合进行试验验证, 最终成功制成符合质量要求的新型龙门口式预成形件, 最大减薄率与模拟结果基本吻合, 验证了工艺方案的正确性和模拟仿真的可靠性。

关键词: 柴油发动机油底壳; 充液拉深; 响应面法; 正交试验法; 减薄率; 增厚率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.011

中图分类号: U464.172; TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0066-09

Design and optimization on preforming process for high-capacity diesel engine oil pan

Yue Fengli¹, Zhang Xin¹, Chen Dayong², Xu Yong², Song Hongwu², Ma Yan², Zhang Shihong²,
Li Jingming³, Li Yonghui³

(1. College of Automobile and Transportation, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Shi Changxu Advanced Material Innovation Center, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Henan Mengdian Group, Xinxian 453621, China)

Abstract: Due to the appearance features of thin wall, large size and asymmetric deep cavity for the new type large-capacity diesel engine oil pan, the traditional forming process of oil pan is no longer applicable. Therefore, the billet used in final bulging was formed by hydro-mechanical deep drawing process, and the hydro-mechanical deep drawing process was developed into two steps, that is first partial deep drawing, and then overall deep drawing. With the help of finite element simulation software, the calculation model was established, and combined with the response surface method and orthogonal test method, the influences of the crucial process parameters such as die fillet radius, friction factor between blank and punch, friction factor between blank and die, blank holder force and hydraulic pressure on the hydro-mechanical deep drawing for oil pan were investigated. Furthermore, taking the maximum thinning rate and the maximum thickening rate as the optimization goals, the best combination of process parameters was obtained and verified, and a new type of gantry-type preformed part that met the quality requirements was successfully manufactured, and the maximum thinning rate was basically consistent with the simulation results, which verified the correctness of the process plan and the reliability of the simulation.

Key words: diesel engine oil pan; hydro-mechanical deep drawing; response surface method; orthogonal test method; thinning rate; thickening rate

油底壳作为汽车发动机的重要零部件, 除了起

到机油散热的作用外, 最主要的作用是储存和回收润滑油, 防止氧化, 同时密封整个机体^[1]。发动机油底壳的外观形状主要有平底式和带有台阶的龙门口式两种^[2]。对于龙门口式的油底壳, 由于其具有两级台阶特征, 不同位置所需的变形量不同, 因此, 通常需要多个道次分步成形^[3]。同时, 为进一步提高汽车的续航能力和保养周期, 增大油底壳的储油

收稿日期: 2021-09-07; 修订日期: 2021-12-12

基金项目: 中国科学院青年创新促进会专项 (2019195)

作者简介: 岳峰丽 (1970-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: flyue@163.com

通信作者: 陈大勇 (1987-), 男, 博士, 助理研究员

E-mail: dychen15b@imr.ac.cn

容量，在设计上要进一步提高油底壳零件的底部深度，并且在两侧进行外扩以增加容积^[4]。因此，传统的油底壳成形工艺已不适用于新型大容量油底壳。传统的油底壳成形方法多由薄板金属材料冲压和拉深而成，形状复杂，部分大型机器的油底壳一般采用铸铁或铸铝制成，部分超大型机器的油底壳采用规格不等的钢板焊接而成^[5-7]。针对该种具有“大鼓肚”的龙门口式油底壳，拟采用充液拉深和液压胀形相结合的板材复合液压成形技术。这样不仅能够减少起皱和裂纹，提高零件的尺寸精度和表面质量，而且能够减轻零件的重量，有利于汽车轻量化技术的发展^[8-9]。

新型柴油发动机油底壳分为充液拉深和液压胀形两阶段成形，其中，充液拉深阶段作为该油底壳的预成形阶段，是整个复合工艺的关键。因此，本文针对该新型油底壳的充液拉深阶段进行工艺设计和优化研究。通过有限元分析，研究凹模圆角半径、润滑条件、加载路径等关键工艺参数对成形的影响，并得出最佳的工艺参数组合。

1 工艺分析及模型建立

1.1 充液拉深成形工艺分析

新型大容量柴油发动机油底壳的最终几何模型如图 1 所示。本文研究的是充液拉深阶段具有非对称腔体的龙门口式油底壳预成形件（简称为预成形件），其深腔和浅腔的高度差超过 220 mm，目标预成形件的几何模型如图 2 所示。

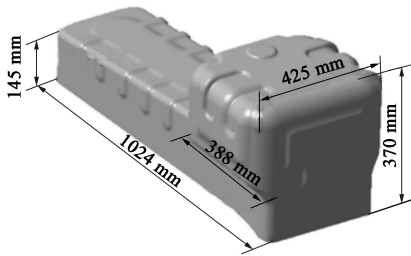


图 1 新型大容量柴油发动机油底壳几何模型

Fig. 1 Geometric model of new type high-capacity diesel engine oil pan

预成形件采用的材料为 304 不锈钢，板料初始厚度为 2 mm。对单向拉伸试验得到的数据进行计算和处理，导入 Origin 中生成 304 不锈钢板材的工程应力-工程应变曲线，如图 3 所示，并利用软件对板材的真应力-真应变曲线进行拟合，得到 304 不锈钢板材的材料力学参数^[10]，如表 1 所示。

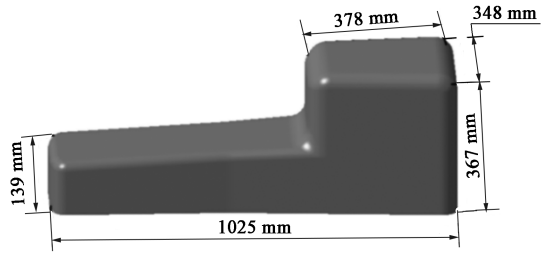


图 2 龙门口式预成形件几何模型

Fig. 2 Geometric model of gantry-type preformed part

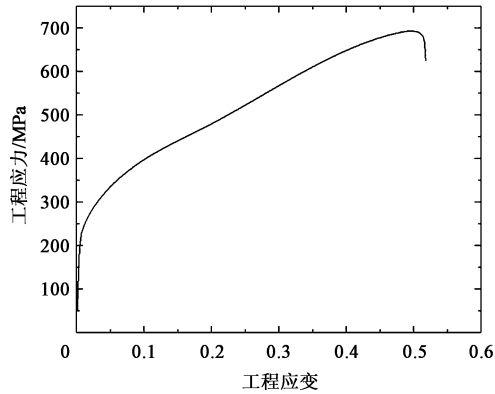


图 3 304 不锈钢工程应力-工程应变曲线

Fig. 3 Engineering stress-engineering strain curve of 304 stainless steel

表 1 304 不锈钢板材的材料力学参数

Table 1 Material mechanical parameters of 304 stainless steel sheet

| 参数 | 杨氏模量/ GPa | 屈服应力/ MPa | 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 泊松比 | 应变强化 指数 n |
|----|--------------|--------------|--|------|----------------|
| 数值 | 207.00 | 239.00 | 7.83×10^3 | 0.28 | 0.23 |

由于预成形件具有壁薄和腔体不对称的结构特征，本文采用充液拉深工艺成形，整体的工艺流程分为两步：（1）局部充液拉深；（2）整体充液拉深。即先成形出深腔部分，再拉深出整个工件，最后对多余的法兰部分进行切边处理，大致的工艺流程如图 4 所示，图 4 中空心箭头为凸模行进方向，实心箭头为液压方向。

1.2 有限元模型

将 CATIA 软件中建立好的模型输出为 IGES 格式，并导入 Dynaform 软件中，利用 Dynaform 软件进行有限元分析，对凹凸模、板料和压边圈进行网格划分，综合考虑计算速度和精度，网格的类型为 BE-LYTSCHKO-TSAY 单元，充液拉深工艺两个阶段的有限元模型如图 5 所示，图 5 中空心箭头为凸模行进方向。

在 Dynaform 软件中采用 BSE 模块里的板料设计功能^[11]，自动计算出初始板状坯料的形状和尺寸，

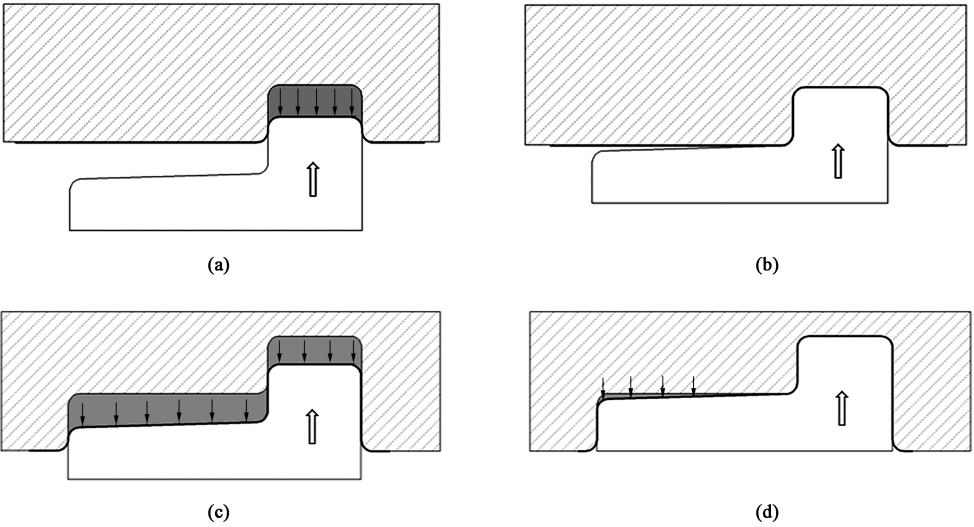


图 4 充液拉深工艺示意图

(a) 第 1 阶段液室充液 (b) 局部拉深成形 (c) 第 2 阶段液室充液 (d) 整体拉深成形

Fig. 4 Schematic diagrams of hydro-mechanical deep drawing process

(a) Liquid chamber filling in the first stage (b) Local deep drawing (c) Liquid chamber filling in the second stage (d) Overall deep drawing

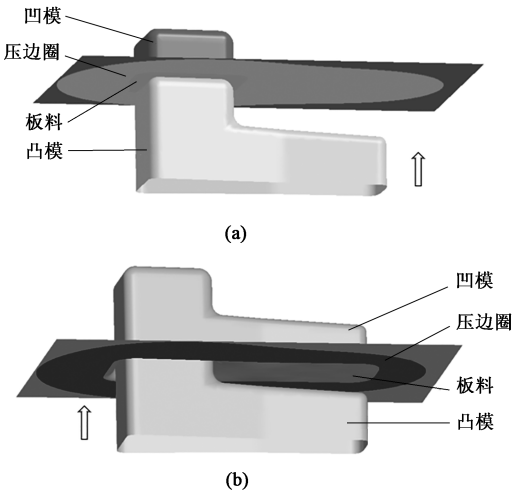


图 5 油底壳预成形件充液拉深有限元模型

(a) 第 1 阶段 (b) 第 2 阶段

Fig. 5 Finite element models of hydro-mechanical deep drawing for oil pan preformed part

(a) The first stage (b) The second stage

初始坯料近似“鞋垫”形状，该种形状非常利于龙门口式预成形件的拉深成形，预成形件的初始最大长度和最大宽度分别为 1618 和 1026 mm，如图 6 所示。

2 充液拉深第 1 步工艺优化

2.1 试验方案的设计

响应面法 (Response Surface Method, RSM) 是

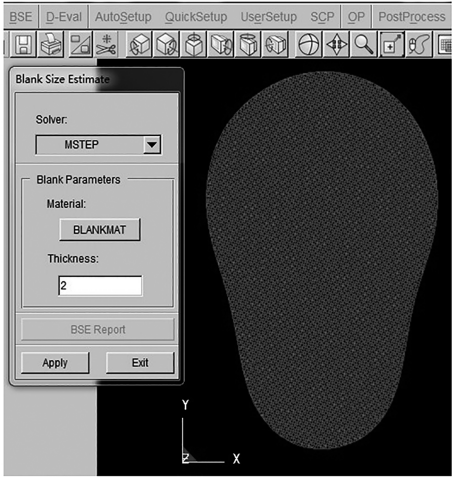


图 6 油底壳预成形件的初始坯料形状

Fig. 6 Initial blank shape of oil pan preformed part

一种通过使用回归分析对收集到的数据进行处理
的统计与数学方法，可以通过响应面图直观地分析变量与目标之间的关系，还可以通过分析得到设计变量的最优组合^[12]。在 Design-Expert 软件中选用中心复合设计 (Central Composite Design, CCD) 进行试验方案的设计^[13]，以凹模圆角半径 x_1 、板/凸模间的摩擦因数 x_2 、板/凹模间的摩擦因数 x_3 、压边力 x_4 以及液压力 x_5 作为试验因素，以最大减薄率 y_1 和最大增厚率 y_2 作为工艺优化指标，即响应量，建立 5 因素 5 水平的中心复合试验方案，得到 43 组不同试验因素的试验组合。试验因素及水平如表 2 所示，部分设计的试验方案及得到的结果如表 3 所示。

表 2 第 1 步工艺优化的因素水平表

Table 2 Factors and levels in the first step of process optimization

| 因素 | 水平 | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
| 凹模圆角半径 x_1/mm | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 板/凸模间的摩擦因数 x_2 | 0.075 | 0.100 | 0.125 | 0.150 | 0.175 |
| 板/凹模间的摩擦因数 x_3 | 0.025 | 0.050 | 0.075 | 0.100 | 0.125 |
| 压边力 x_4/kN | 573 | 1146 | 1719 | 2292 | 2865 |
| 液压力 x_5/MPa | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |

表 3 部分试验方案和有限元模拟结果

Table 3 Partial experimental schemes and finite element simulation results

| 序号 | 因素 | | | | | 响应量 | |
|----|-----------|------------|------------|--------|---------|---------|---------|
| | 凹模圆角半径/mm | 板/凸模间的摩擦因数 | 板/凹模间的摩擦因数 | 压边力/kN | 液压力/MPa | 最大减薄率/% | 最大增厚率/% |
| 1 | 30 | 0.125 | 0.050 | 1146 | 3 | 27.81 | 24.64 |
| 2 | 50 | 0.125 | 0.050 | 1146 | 3 | 26.51 | 16.52 |
| 3 | 30 | 0.175 | 0.050 | 1146 | 3 | 27.99 | 30.89 |
| 4 | 50 | 0.175 | 0.050 | 1146 | 3 | 24.52 | 16.82 |
| 5 | 30 | 0.125 | 0.100 | 1146 | 3 | 53.15 | 19.85 |
| 6 | 50 | 0.125 | 0.100 | 1146 | 3 | 46.92 | 12.70 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 40 | 40 | 0.150 | 0.075 | 2865 | 5 | 26.78 | 24.78 |
| 41 | 40 | 0.150 | 0.075 | 1719 | 1 | 26.22 | 16.05 |
| 42 | 40 | 0.150 | 0.075 | 1719 | 9 | 28.71 | 27.12 |
| 43 | 40 | 0.150 | 0.075 | 1719 | 5 | 25.78 | 22.16 |

根据试验设计点数据，得出最大减薄率目标函数 y_1 和最大增厚率目标函数 y_2 的二阶响应面模型，如式（2）和式（3）所示：

$$y_1 = 164.89162 - 1.43234x_1 - 1287.88375x_2 + 335.88288x_3 - 16.73759x_4 - 5.53937x_5 - 4.75825x_1x_2 - 5.345x_1x_3 - 0.041863x_1x_4 - 0.02665x_1x_5 - 2961.8x_2x_3 + 13.715x_2x_4 + 28.0125x_2x_5 + 12.3x_3x_4 - 20.21875x_3x_5 + 0.2245x_4x_5 + 0.030839x_1^2 + 4787.7125x_2^2 + 4461.1125x_3^2 + 5.03528x_4^2 + 0.358143x_5^2 \quad (2)$$

$$y_2 = 14.07786 - 0.060468x_1 + 294.26075x_2 - 345.80756x_3 + 0.769959x_4 + 5.00034x_5 + 0.434125x_1x_2 + 2.30262x_1x_3 - 0.053856x_1x_4 + 0.128345x_1x_5 + 1038.55x_2x_3 - 9.1275x_2x_4 - 6.45812x_2x_5 + 39.4625x_3x_4 - 7.72812x_3x_5 - 1.63834x_4x_5 - 0.011301x_1^2 - 1174.09375x_2^2 - 370.29375x_3^2 + 1.54227x_4^2 - 0.480077x_5^2 \quad (3)$$

2.2 二阶响应面模型的建立

建立各响应量与工艺参数之间的经验函数，通常选用一阶模型或二阶模型来对数据进行拟合。在工程应用中，通常采用二阶响应曲面模型来减少优化过程的工作量，从而节省计算的时间，二阶响应面模型的表达式如式（1）所示：

$$y(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中： $y(x)$ 为目标函数； x_i 、 x_j 为自变量， $i, j = 1, 2, 3, \dots, n, i < j$ ； n 为试验测试次数； β_0 、 β_i 、 β_{ii} 、 β_{ij} 为多项式系数。

2.3 模型的分析

为了检验响应面模型拟合的有效性和各影响因素及其交互作用影响的显著性，需分别对两个响应面模型进行方差分析，即采用方差分析方法分别对最大减薄率响应模型和最大增厚率响应面模型进行显著度分析和模型回归的分析。 F 值为方差齐性检验值，可用来判断模型的有效性和各因子项的显著性， F 值越大，则模型更有效性。当 F 值大于某一临界值 F_0 时，则认为该模型是有效的。 P 值为概率，现常使用 P 值来代表 $F < F_0$ 的概率， P 值越小， $F > F_0$ 的概率越大，一般规定 $P < 0.050$ 时，模型是有效的。对于因子项来说， $P < 0.050$ 表示该因素对响应量的影响是显著的，当 $P < 0.001$ 时表示该因素的影响是极其显著的^[14]。在检验模型拟合有效性时，也常会参考决定系数 R^2 的值，其值在 0~1 之间，且越接近 1，表示工艺参数引起的变动占总变动的百分比越高，则模拟数据点在回归直线附近越密集。当模型中的变量较多时，

可使用校正决定系数 R^2_{adj} 来检验模型拟合的有效性^[15]。

在显著性分析过程中有些因素会对响应结果的影响不显著，通过 Design-Expert 软件分析出不显著的影响因素，去除不显著项后得到的分析结果如表 4 和表 5 所示。在最大减薄率响应面模型中，模型的 P 值小于 0.0001，且 R^2 和 R^2_{adj} 均接近 1，各因子项中， x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_1x_5 、 x_2x_3 、 x_2x_5 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 这几项对响应量的影响是显著的；在最大增厚率响应面模型的方差中，模型的 P 值为 0.0046，小于 0.0500，且 R^2 和 R^2_{adj} 均接近 1，各因子项中， x_1 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_1x_5 这 5 项对响应量的影响是显著的。

表 4 最大减薄率因素显著性分析结果
Table 4 Significance analysis results of maximum thinning rate factor

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 | 显著性 |
|----------|----------|-----|---------|--------|---------|-----|
| 模型 | 2906.563 | 20 | 145.33 | 5.63 | <0.0001 | 显著 |
| x_1 | 304.360 | 1 | 304.36 | 32.74 | <0.0001 | 显著 |
| x_2 | 267.290 | 1 | 267.29 | 28.75 | <0.0001 | 显著 |
| x_3 | 1746.840 | 1 | 1746.84 | 187.92 | <0.0001 | 显著 |
| x_1x_2 | 45.280 | 1 | 45.28 | 4.87 | 0.0380 | 显著 |
| x_1x_3 | 57.140 | 1 | 57.14 | 6.15 | 0.0213 | 显著 |
| x_2x_3 | 109.650 | 1 | 109.65 | 11.80 | 0.0024 | 显著 |
| x_2x_5 | 62.780 | 1 | 62.78 | 6.75 | 0.0164 | 显著 |
| x_1^2 | 162.320 | 1 | 162.32 | 17.46 | 0.0004 | 显著 |
| x_2^2 | 152.810 | 1 | 152.81 | 16.44 | 0.0005 | 显著 |
| x_3^2 | 132.680 | 1 | 132.68 | 14.27 | 0.0010 | 显著 |

选取影响两个响应量最显著的交互因素进行分析，对最大减薄率 y_1 影响最为显著的为板/凸模间

表 5 最大增厚率因素显著性分析结果

Table 5 Significance analysis results of maximum thickening rate factor

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 | 显著性 |
|----------|---------|-----|--------|-------|--------|-----|
| 模型 | 1401.98 | 20 | 70.10 | 3.22 | 0.0046 | 显著 |
| x_1 | 109.90 | 1 | 109.90 | 5.04 | 0.0351 | 显著 |
| x_3 | 441.63 | 1 | 441.63 | 20.27 | 0.0002 | 显著 |
| x_4 | 112.81 | 1 | 112.81 | 5.18 | 0.0330 | 显著 |
| x_5 | 281.98 | 1 | 281.98 | 12.94 | 0.0016 | 显著 |
| x_1x_5 | 210.85 | 1 | 210.85 | 9.68 | 0.0051 | 显著 |

摩擦因数 x_2 和板/凹模间摩擦因数 x_3 ，对最大增厚率 y_2 影响最为显著的为凹模圆角半径 x_1 和液压力 x_5 。图 7 为 x_2 、 x_3 对最大减薄率 y_1 影响规律的三维曲面图和等值线图。由图 7 可知，最大减薄率随着 x_2 的增加而减小，而与 x_3 呈正比例关系，较大的 x_2 和较小的 x_3 有利于降低油底壳的减薄程度。图 8 为 x_1 、 x_5 对最大增厚率 y_2 影响规律的三维曲面图和等值线图。由图 8 可知，最大增厚率受 x_1 的影响不大，而受 x_5 的影响很大，表现为随着 x_5 的减小而减小。由图 9 可知，在保持其他参数不变的条件下，改变压边力和液压力对最大减薄率的影响很小；最大增厚率受压边力的影响不大，但是会随着液压力的减小而有所减小。

根据响应面分析得出，最佳的工艺参数组合为：凹模圆角半径为 50 mm、板/凸模间摩擦因数为 0.175、板/凹模间摩擦因数为 0.050、压边力为 1146 kN、液压力为 3 MPa。在 Dynaform 软件中设置优化后的参数，成形极限图（Forming Limit Diagram, FLD）以及壁厚减薄率模拟结果如图 10 和图 11 所示。最大减薄率为 24.522%，最大增厚率为

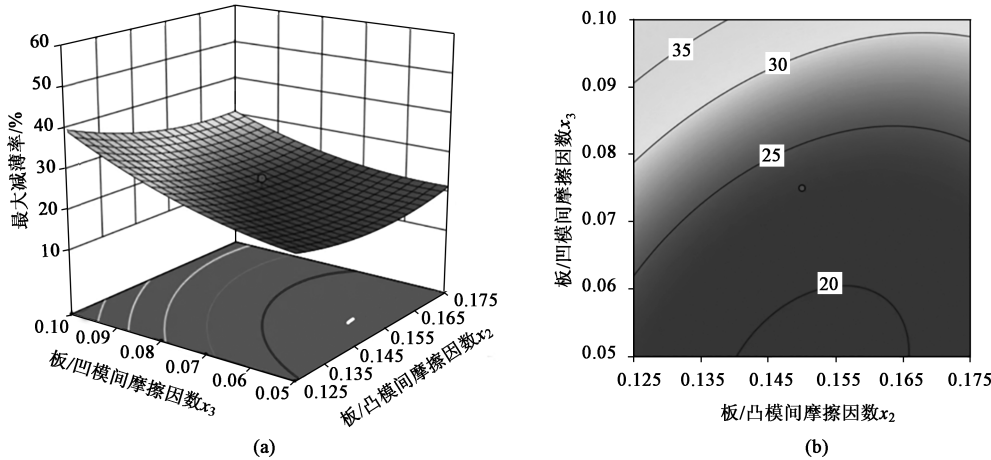


图 7 最大减薄率 y_1 的三维响应面图 (a) 与等值线图 (b)

Fig. 7 3D response surface (a) and contour (b) maps of maximum thinning rate y_1

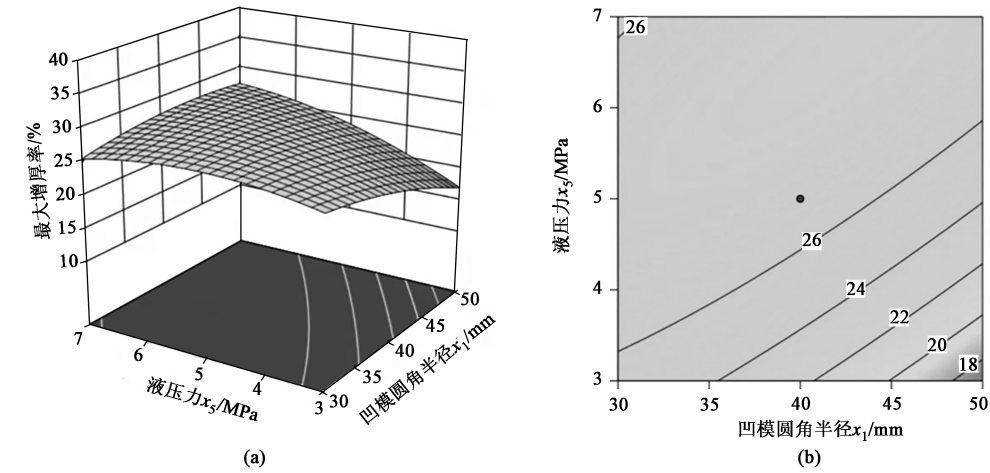


图 8 最大增厚率 y_2 的三维响应面 (a) 与等值线图 (b)

Fig.8 3D response surface (a) and contour (b) maps of maximum thickening rate y_2

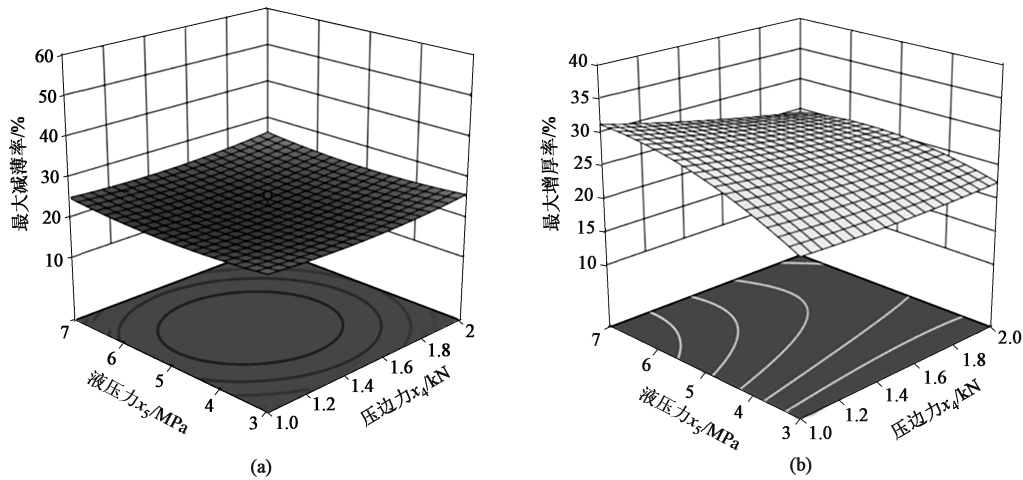


图 9 压边力 x_4 和液压力 x_5 对最大减薄率 y_1 (a) 和最大增厚率 y_2 (b) 的影响

Fig.9 Effect of blank holder force x_4 and hydraulic pressure x_5 on maximum thinning rate y_1 (a) and maximum thickening rate y_2 (b)

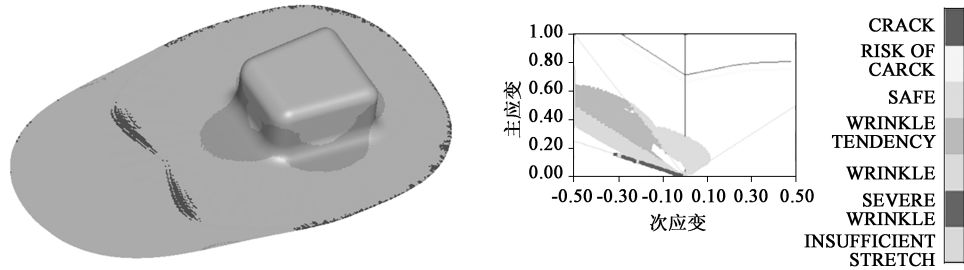


图 10 充液拉深第 1 步工艺优化后的成形极限图

Fig. 10 FLD after process optimization in the first step of hydro-mechanical deep drawing

16.816%，最大减薄处出现在深腔的 4 个圆角处和龙门口处，而增厚较多的地方均出现在坯料边缘，其余地方均未出现太过明显的减薄和增厚现象，成形区域也未出现任何折皱或者破裂现象。

3 充液拉深第 2 步工艺优化

3.1 试验方案的设计

由第 1 步的模拟分析及大量的模拟结果可知，

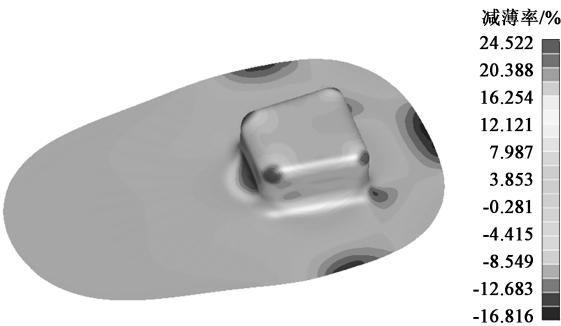


图 11 充液拉深第 1 步工艺优化后的减薄率云图

Fig. 11 Cloud diagram of thinning rate after process optimization in the first step of hydro-mechanical deep drawing

凹模圆角半径小于 50 mm 时,板料在成形时圆角部分均会出现折皱现象,而且较小的凹模与板料间的摩擦因数有利于降低油底壳成形时的减薄程度。故在充液拉深第 2 步的工艺参数研究时,将凹模圆角半径固定为 50 mm,板/凹模间摩擦因数固定为 0.05,结合正交试验法分析板/凸模之间摩擦因数、压边力和液压力这 3 个工艺参数对减薄率的影响,并得出最佳工艺参数组合。

以板/凸模间摩擦因数 X 、压边力 Y 以及液压力 Z 作为试验因素,以最大减薄率和起皱情况作为工艺优化指标,其中将起皱情况分为严重起皱、起皱和略微起皱或无皱 3 个等级,分别用+++、++和+表示。建立 3 因素 3 水平的试验方案,试验因素及水平如表 6 所示。

表 6 第 2 步工艺优化的因素水平表

Table 6 Factors and levels in the second step of process optimization

| 水平 | 因素 | | |
|----|---------------|-------------------|--------------------|
| | 板/凸模间摩擦因数 X | 压边力 Y/kN | 液压力 Z/MPa |
| 1 | 0.100 | 1404 | 1 |
| 2 | 0.125 | 1755 | 2 |
| 3 | 0.150 | 2106 | 3 |

3.2 模拟结果及分析

通过正交试验进行方案设计,得到 9 组不同试验因素的试验组合,设计的试验方案及得到的结果如表 7 所示。表 7 中, k_1 、 k_2 、 k_3 分别为各因素对应的不同水平下最大减薄率的平均值, S 为各因素的极差。由表 7 中极差数据可以确定,各因素对该预成形件最大减薄率的影响顺序依次为:压边力>板/凸模间摩擦因数>液压力。

在保证该预成形件圆角及成形区域不起皱的情况下,尽量追求较小的最大减薄率。综合考虑各因

表 7 正交试验方案及模拟结果

Table 7 Orthogonal test schemes and simulation results

| 序号 | X | Y | Z | 最大减薄率/% | 起皱情况 |
|-------|-------|-------|-------|---------|------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 24.72 | ++ |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 24.90 | ++ |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 27.99 | +++ |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 25.09 | +++ |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 26.89 | ++ |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 30.87 | + |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 26.61 | +++ |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 28.32 | ++ |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 31.89 | + |
| k_1 | 25.87 | 25.47 | 27.97 | | |
| k_2 | 27.62 | 26.70 | 27.29 | | |
| k_3 | 28.94 | 30.25 | 27.16 | | |
| S | 3.07 | 4.78 | 0.81 | | |

素对两个响应量的影响,认为最佳工艺参数组合为:板/凸模间摩擦因数为 0.125,压边力为 1755 kN,液压力为 1 MPa。图 12 和图 13 分别为充液拉深第 2 步参数优化后的 FLD 和最大减薄率云图,从图 11 和图 12 中可以看出,预成形件的最大减薄率为 26.283%,最大减薄出现在深腔的 4 个圆角和侧壁以及龙门口处,而增厚较多的地方均在法兰区域,圆角及成形区域也未出现折皱或者破裂现象。

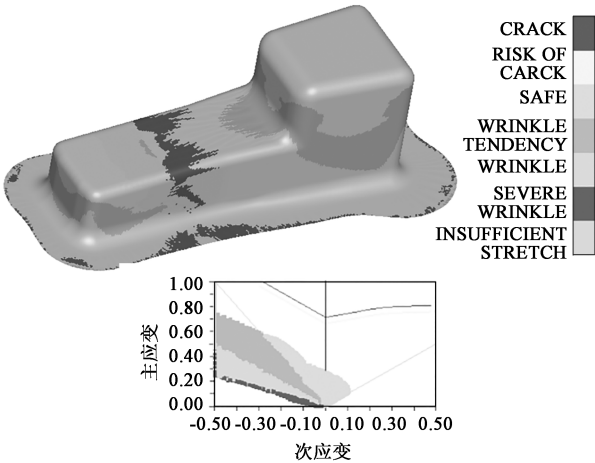


图 12 充液拉深第 2 步工艺优化后的成形极限图

Fig. 12 FLD after process optimization in the second step of hydro-mechanical deep drawing

4 试验验证

为了验证工艺方案和模拟仿真的可靠性,采用

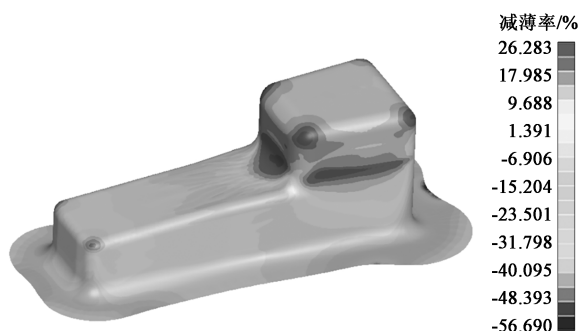


图13 充液拉深第2步工艺优化后的减薄率云图

Fig. 13 Cloud diagram of thinning rate after process optimization in the second step of hydro-mechanical deep drawing

优化的工艺参数对龙门口式预成形件的充液拉深工艺进行数值模拟和试验试制。本次试验使用的设备为1500 t 液压机，该设备适用于板材液压成形和管材内外高压成形。

试验分两步进行：首先充液拉深第1步时选用凹模圆角半径为50 mm 的模具，在模具型腔和表面以及板料上涂抹润滑剂以达到与模拟同等的试验条件，设置压边力为1146 kN，液压力为3 MPa；第2步时改变凸模的润滑条件，设置压边力为1755 kN，液压力为1 MPa。为进一步比较模拟和试验结果，对模拟和试验成形的预成形件进行修边，修去法兰及多余部分。沿着预成形件的对称面，选取各个单元的厚度作为输出信息，并且沿着预成形件的轮廓将壁厚大致分为直段、圆角段共9个分区，分别记为A~I，图14a和图14b分别为处理后的龙门口式预成形件的成形图和实物图。采用超声波测厚仪测量预成形件各区域的壁厚，重复3次以减小误差，以轮廓线长度为横坐标，壁厚尺寸为纵坐标，做出壁厚尺寸随轮廓线长度的变化曲线，如图15所示。

由图15可知，各区域的壁厚分布不均匀并且局部壁厚差距较大，在侧壁A区和I区内均出现随着轮廓长度的增加，壁厚整体先减小后增大的趋势，壁厚最小的位置基本均出现在直壁段中间稍偏向底部处，这是由于深壳体拉深的过程中两个直壁段处于明显的拉伸状态，靠近底部的材料在先行的拉深过程中发生硬化而得到加强，不会发生断裂，中间段强度相对较弱，在拉应力状态下极易过度减薄甚至断裂。A区直壁段的最大壁厚减薄率为21.58%，I区直壁段的最大壁厚减薄率为7.63%。另外，由E区向F'区过渡区域的壁厚急剧减小，在圆弧中间段壁厚减小至整个对称截面的最小值，壁厚减薄率为21.84%，这是由于浅腔体侧坯料相对较长，受坯料长度和摩擦等因素的

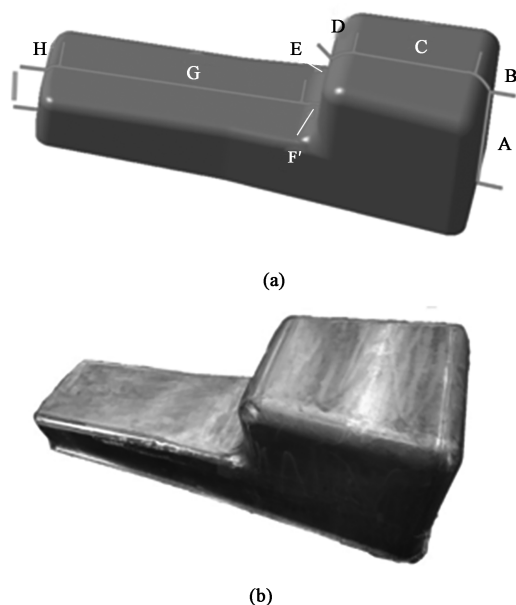


图14 模拟(a)和试验(b)所得的结果

Fig. 14 Results of simulation (a) and experiment (b)

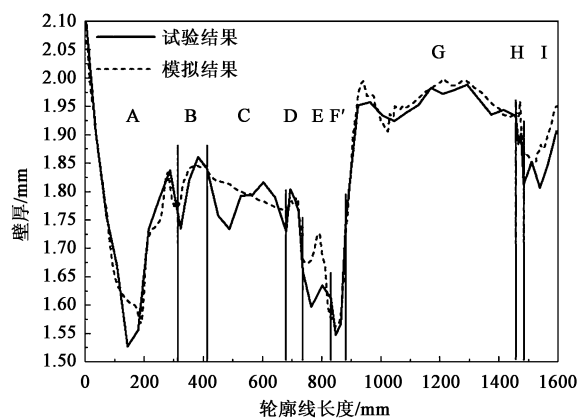


图15 壁厚随轮廓线长度的变化曲线

Fig. 15 Variation curves of wall thickness with contour length

影响，此侧材料流入深腔的难度大，造成圆角区域的壁厚减薄率大，也体现出非对称盒形件充液拉深工艺的难度。通过整个零件壁厚分布的试验与模拟值对比，二者相差较大的位置为E区，可能的原因由于试验过程中由于深腔与浅腔交汇的圆角处几何结构的限制，使得润滑条件较为复杂，会一定程度地增加直壁E区材料的流动难度，造成该区域试验获得的壁厚相对较小，而模拟中采用所有位置均一的摩擦因数设置，相对而言会产生一些偏差，也是由于这个原因，I区模拟获得的壁厚值高于试验值。但是整体而言，实际零件壁厚与模拟结果的具体数值和分布较为符合，二者的最大相对误差为-4.9%，说明该充液拉深工艺的模拟可以反映实际成形工艺过程中零件壁厚的变化趋势，并对实际成形提供一定程度上的理论指导。

5 结论

(1) 针对该预成形件的外观特征, 采用两步充液拉深工艺, 先成形出深腔部分, 再拉深出整个工件, 可以实现对新型油底壳预成形件的加工。

(2) 利用 Dynaform 软件建立充液拉深第 1 步有限元模型, 并采用中心复合设计构建响应面模型, 以最大减薄率和最大增厚率为优化目标, 获得的最佳工艺参数组合为: 凹模圆角半径为 50 mm、板/凸模间摩擦因数为 0.175、板/凹模间摩擦因数为 0.050、压边力为 1146 kN、液压力为 3 MPa, 按照优化后的参数进行模拟, 最大减薄率和最大增厚率分别为 24.522% 和 16.816%。

(3) 利用 Dynaform 软件建立充液拉深第 2 步的有限元模型, 采用正交试验法进行试验方案设计, 以最大减薄率作为优化目标, 获得的最佳工艺参数组合为: 板/凸模间摩擦因数为 0.125、压边力为 1755 kN、液压力为 1 MPa, 预成形件最终的最大减薄率为 26.28%。

(4) 采用优化的工艺参数对龙门口式预成形件的充液拉深工艺进行数值模拟和试验试制, 试制预成形件的最大减薄率与仿真结果较为吻合, 且符合预成形件的设计和质量要求, 验证了工艺方案的正确性和模拟仿真的可靠性。

参考文献:

- [1] 张宏双. 发动机油底壳的结构分析及优化设计研究 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2014.
Zhang H S. Research on the Structure Analysis and Optimization Design of the Engine Oil Pan [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2014.
- [2] 郭冬生, 张峰昌, 孙中伟, 等. 现代发动机油底壳设计思路 [J]. 内燃机与配件, 2017, (15): 9-10.
Guo D S, Zhang F C, Sun Z W, et al. Modern engine oil pan design ideas [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2017, (15): 9-10.
- [3] Jeswiet J, Geiger M, Kleiner M, et al. Metal: Forming progress since 2000 [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 1: 2-17.
- [4] Chen D Y, Xu Y, Zhang S H, et al. Evaluation of numerical and experimental investigations on the hybrid sheet hydroforming process to produce a novel high-capacity engine oil pan [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97 (9-12): 3625-3636.
- [5] 张杨, 丁培林, 黄嘉靖, 等. 工程车油底壳失效过程动态仿真与优化 [J]. 重型汽车, 2020, (3): 26-29.
- Zhang Y, Ding P L, Huang J J, et al. Dynamic simulation and optimization of oil pan failure process for construction vehicles [J]. Heavy Truck, 2020, (3): 26-29.
- [6] 安肇勇, 万里, 黄志垣, 等. 油底壳压铸成形的缺陷分析及对策 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (6): 607-609.
An Z Y, Wan L, Huang Z Y, et al. Defects analysis and counter-measures of die-casting aluminum alloy sump [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35 (6): 607-609.
- [7] 孙百来. 柴油机油底壳塑性成形数值模拟与工艺分析 [D]. 吉林: 吉林大学, 2016.
Sun B L. Numerical Simulation and Analysis of the Diesel Engine Oil Pan Plastic Forming Process [D]. Jilin: Jilin University, 2016.
- [8] Lang L H, Li T, Zhou X B, et al. The effect of the key process parameters in the innovative hydroforming on the formed parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187 (4): 304-308.
- [9] 张晗, 赵军, 王敏, 等. 基于 Dynaform 的薄板阶梯盒形件拉深成形缺陷模拟研究 [J]. 内燃机与配件, 2019, (14): 162-163.
Zhang H, Zhao J, Wang M, et al. Simulation study on deep forming defects of thin plate stepped box parts based on Dynaform [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019, (14): 162-163.
- [10] 叶丽燕, 李细锋, 陈军. 不同拉伸速率对 SUS304 不锈钢室温拉伸力学性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (2): 89-93.
Ye L Y, Li X F, Chen J. Influence of tensile strain rates on mechanical properties of 304 austenitic stainless steel at room temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (2): 89-93.
- [11] Starman Bojan, Cafuta Gašper, Mole Nikolaj. A method for simultaneous optimization of blank shape and forming tool geometry in sheet metal forming simulations [J]. Metals, 2021, 11 (4): 544.
- [12] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2015, 34 (8): 41-45.
Li L, Zhang S, He Q, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34 (8): 41-45.
- [13] Hu W, Enying L, Yao L G. Optimization of drawbead design in sheet metal forming based on intelligent sampling by using response surface methodology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206 (1-3): 45-55.
- [14] 方俊涛. 响应曲面方法中试验设计与模型估计的比较研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
Fang J T. Comparison for Experimental Designs and Modeling in Response Surface Methodology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [15] Zhou J, Zhuo F, Huang L, et al. Multi-objective optimization of stamping forming process of head using Pareto-based genetic algorithm [J]. Journal of Central South University, 2015, 22 (9): 3287-3295.