

# 基于响应面法和 NSGA-II 的接线盒仿真优化

叶恒昌, 龚红英, 张志强, 赵江波  
(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 在接线盒的成形过程中, 为了解不同因素对接线盒成形质量的影响, 获得最佳的成形参数, 通过 Dynaform 建立有限元模型, 结合 Design-Expert 软件设计响应面试验, 通过试验获得最大减薄率和最大增厚率的多项式回归响应模型, 进一步得出虚拟压边力、模具间隙和摩擦因数对工件最大减薄率和最大增厚率的影响程度, 利用带精英策略的非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 对最大减薄率和最大增厚率进行优化求解, 得到最优工艺参数为: 压边力为 21400 N, 模具间隙为 1.25 mm, 摩擦因数为 0.08。最后在 Dynaform 中进行仿真试验, 并结合实际生产进行验证。研究结果为接线盒的实际生产提供了理论基础。

**关键词:** 接线盒; 响应面法; NSGA-II; 压边力; 模具间隙; 摩擦因数

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.010

**中图分类号:** TG386.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0072-05

## Simulation optimization on junction box based on response surface method and NSGA-II

Ye Hengchang, Gong Hongying, Zhang Zhiqiang, Zhao Jiangbo

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In the forming process of junction box, in order to understand the influences of different factors on the forming quality of junction box and obtain the optimal forming parameters, the finite element model was established by Dynaform, and combining with Design-Expert software to design the response surface test, and a polynomial regression response model for maximum thinning rate and maximum thickening rate was obtained by experiments. Then, the influence degrees of virtual blank holder force, die clearance and friction coefficient on the maximum thinning rate and the maximum thickening rate of workpiece were further determined, and the maximum thinning rate and the maximum thickening rate were optimized and solved by the non-dominated sorting genetic algorithm with elitist strategy (NSGA-II) to obtain the optimal process parameters as the blank holder force of 21400 N, the die clearance of 1.25 mm and the friction coefficient of 0.08. Simulation experiments were conducted by Dynaform, and the results were validated in the actual production. The study result provides a theoretical basis for the actual production of junction box.

**Key words:** junction box; response surface method; NSGA-II; blank holder force; die clearance; friction factor

接线盒主要应用于家具装修中, 起到保护电线和连接电路的作用。铝合金容易产生氧化膜, 其防腐性能比铁质材料更好<sup>[1]</sup>, 因此, 铝合金接线盒能够更好地应用于日常生活。在冲压成形中, 选择合适的加工工艺方案能够有效提升产品质量并节约生产成本<sup>[2-3]</sup>。于传浩等<sup>[4]</sup>对通过结合正交试验, 利用 Dynaform 对圆筒件拉深过程进行模拟, 获得了圆筒件拉深的最佳工艺参数。邱超斌等<sup>[5]</sup>通过 Dy-

naform 和灰度关联分析法对深腔型零件进行模拟, 并通过 BP 神经网络算法验证了模型的精确性。宋杰<sup>[6]</sup>通过 Dynaform 模拟了盘体件的成形过程, 得出了加大模具圆角有利于工件成形的结论。梁发周等<sup>[7]</sup>通过 AutoForm 对 B 柱加强板进行模拟, 并对结果进行优化设计, 获得了最佳工艺参数组合。

本文对铝合金接线盒进行有限元仿真, 结合响应面法和 NSGA-II 优化算法对零件的最大减薄率和最大增厚率进行多目标优化, 为接线盒的生产提供理论依据。

### 1 工艺分析及有限元模型建立

#### 1.1 工艺分析

接线盒零件的几何模型如图 1 所示, 加工工艺依

收稿日期: 2022-07-13; 修订日期: 2022-10-13

基金项目: 上海工程技术大学校企合作资助项目 ((19)CL-

041); 上海工程技术大学高水平高峰学科项目

作者简介: 叶恒昌 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1692591090@qq.com

通信作者: 龚红英 (1974-), 女, 博士, 教授

E-mail: ghyyw@163.com

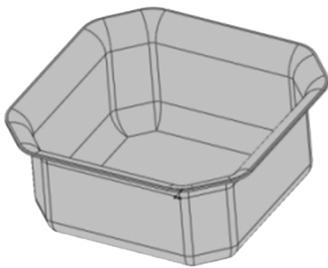


图1 接线盒零件的几何模型  
Fig.1 Geometric model of junction box part

次为拉深、冲孔、修边。本文仅考虑拉深和修边。

零件材料为 6061 铝合金，材料厚度为 1 mm，该材料耐腐蚀性能良好，屈服强度较低，具有良好的冲压成形性能。6061 铝合金的化学成分如表 1 所示，依据 GB/T 228.1—2021<sup>[8]</sup> 进行试样制备，制备试样的标距宽度为 12.5 mm、长度为 50 mm，其尺寸如图 2 所示。在常温下通过岛津拉伸机获得 6061 铝合金的真实应力-真实应变曲线，如图 3 所示。

表 1 6061 铝合金的化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of 6061 aluminum alloy  
(%, mass fraction)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.4~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.2~5.0	0.1~5.0	余量

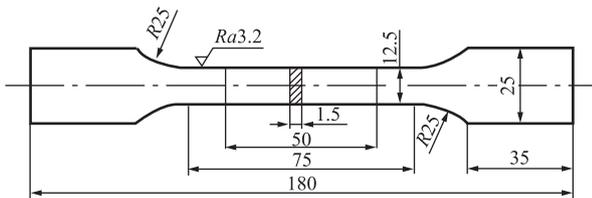


图2 拉伸试样尺寸示意图  
Fig.2 Schematic diagram of tensile specimen sizes

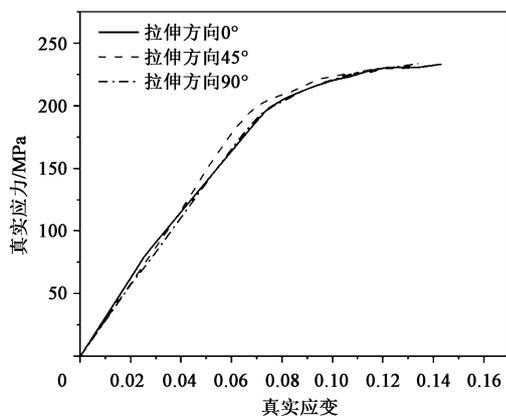


图3 6061 铝合金的真实应力-真实应变曲线  
Fig.3 True stress-true strain curves of 6061 aluminum alloy

## 1.2 有限元模型的建立

在 Dynaform 中构建有限元模型，并将处理后的 6061 铝合金的真实应力-真实应变曲线导入材料库，模型采用双动拉深，以凹模为基准，通过偏置凹模获得凸模和压边圈。凸模、凹模、压边圈和板料划分网格大小均为 4 mm。压边圈的闭合压边速度设置为  $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，通过 Solidworks 计算出压边圈面积为  $21138.9 \text{ mm}^2$ ，通过查询冲压手册<sup>[9]</sup> 得出单位压边力为  $0.8 \sim 1.2 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ，工件压边力为  $17000 \sim 26000 \text{ N}$ ，摩擦因数取  $0.02 \sim 0.12$ 。接线盒的有限元模型如图 4 所示。

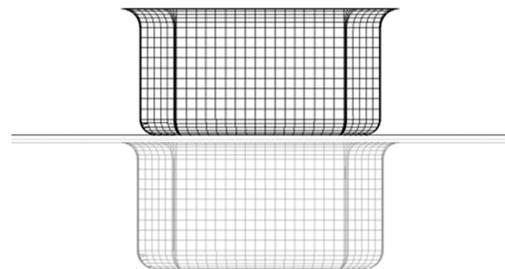


图4 接线盒的有限元模型  
Fig.4 Finite element model of junction box

## 2 试验设计及分析

### 2.1 试验设计

将虚拟压边力  $X_1$ 、模具间隙  $X_2$  和摩擦因数  $X_3$  设为试验自变量，将最大减薄率  $Y_1$  和最大增厚率  $Y_2$  作为模型响应值，各因素水平如表 2 所示，根据 B-Benhnken 设计工艺参数方案，得到 17 组工艺参数方案的模拟仿真结果如表 3 所示。

表 2 因素水平表

Table 2 Factors and levels

水平	压边力 $X_1/\text{N}$	模具间隙 $X_2/\text{mm}$	摩擦因数 $X_3$
1	17000	1.10	0.20
0	21500	1.25	0.70
-1	26000	1.40	0.12

### 2.2 方差分析

在成形过程中，工艺参数对接线盒的成形质量具有非线性影响，因此，采用二次多项式构造响应面模型，响应函数  $f(x)$ <sup>[10]</sup> 如式 (1) 所示。

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中： $\beta_0$ 、 $\beta_i$ 、 $\beta_{ii}$ 、 $\beta_{ij}$  均为待定系数； $k$  为设计变量

表 3 模拟仿真结果

Table 3 Simulation results

试验 序号	压边力 $X_1/\text{N}$	模具间隙 $X_2/\text{mm}$	摩擦因数 $X_3$	最大减薄 率 $Y_1/\%$	最大增厚 率 $Y_2/\%$
1	21500	1.25	0.07	25.213	19.473
2	21500	1.25	0.07	25.211	19.476
3	21500	1.25	0.07	25.220	19.475
4	21500	1.10	0.07	23.285	20.354
5	21500	1.40	0.02	23.086	20.262
6	26000	1.25	0.02	23.379	20.280
7	21500	1.25	0.07	25.058	19.395
8	17000	1.40	0.07	24.705	19.622
9	21500	1.10	0.12	27.183	18.703
10	26000	1.40	0.07	25.392	19.406
11	17000	1.10	0.07	24.594	19.610
12	21500	1.40	0.12	27.083	18.538
13	17000	1.25	0.12	26.301	18.932
14	26000	1.25	0.12	28.072	18.485
15	21500	1.25	0.07	25.028	19.388
16	26000	1.10	0.07	25.454	19.408
17	17000	1.25	0.02	23.020	20.266

总数;  $x_i, x_j$  为设计变量,  $i \neq j^{[10]}$ 。

对表 3 中的 17 组数据进行分析, 得出目标减薄率  $Y_1$  和增厚率  $Y_2$  的响应函数如式 (2) 所示:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 15.67782 + 1.53101 \times 10^{-4} X_1 + 8.91048 X_2 - \\
 & 2.94361 X_3 - 6.40741 \times 10^{-5} X_1 X_2 + 1.56889 \times \\
 & 10^{-3} X_1 X_3 + 3.30000 X_2 X_3 - 1.87654 \times 10^{-9} X_1^2 - \\
 & 3.18889 X_2^2 + 34.00000 X_3^2 \\
 Y_2 = & 22.84046 - 8.38648 \times 10^{-5} X_1 - 2.34624 X_2 - \\
 & 2.26436 X_3 - 5.18519 \times 10^{-6} X_1 X_2 - 5.12222 \times \\
 & 10^{-4} X_1 X_3 - 2.43333 X_2 X_3 + 2.38519 \times 10^{-9} X_1^2 + \\
 & 0.96889 X_2^2 + 0.42000 X_3^2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

两模型的方差分析如表 4 和表 5 所示, 两模型的  $P$  值均小于 0.0001, 由此可以得出所建模型具有良好的精度。由表 4 和表 5 可以得出, 影响铝合金接线盒成形质量的主要影响因素为压边力  $X_1$  和摩擦因数  $X_3$ 。

图 5 和图 6 为模具间隙  $X_2$  为 1.25 mm 时, 压边力和摩擦因数交互作用下的最大减薄率和最大增厚率三维响应图。可知, 当模具间隙为定值时, 增大压边力和摩擦因数, 会导致工件的最大减薄率和最大增厚率增大。随着压边力的增大, 板料的流动性降低, 使得板料更难进入凹模, 增大了工件破裂的可能性。当其他工艺参数一定时, 随着摩擦因数的增加, 工件受到的径向拉应力增大, 过大的

表 4 最大减薄率的方差分析

Table 4 Variance analysis of maximum thinning rate

试验	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
模型	33.740	9	3.750	278.390	<0.0001
$X_1$	1.690	1	1.690	125.500	<0.0001
$X_2$	$7.813 \times 10^{-3}$	1	$7.813 \times 10^{-3}$	0.580	0.4711
$X_3$	31.480	1	31.480	2337.600	<0.0001
$X_1 X_2$	$7.482 \times 10^{-3}$	1	$7.482 \times 10^{-3}$	0.560	0.4803
$X_1 X_3$	0.500	1	0.500	37.015	0.0005
$X_2 X_3$	$2.450 \times 10^{-3}$	1	$2.450 \times 10^{-3}$	0.180	0.6825
$X_1^2$	$6.080 \times 10^{-3}$	1	$6.080 \times 10^{-3}$	0.450	0.5232
$X_2^2$	0.022	1	0.022	1.610	0.2451
$X_3^2$	0.030	1	0.030	2.260	0.1765
残差	0.094	7	0.013	—	—

表 5 最大增厚率方差分析

Table 5 Variance analysis of maximum thickening rate

试验	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
模型	5.450	9	0.610	170.790	<0.0001
$X_1$	0.091	1	0.091	25.520	0.0015
$X_2$	$7.626 \times 10^{-3}$	1	$7.626 \times 10^{-3}$	2.150	0.1860
$X_3$	5.290	1	5.290	1490.530	<0.0001
$X_1 X_2$	$4.900 \times 10^{-5}$	1	$4.900 \times 10^{-5}$	0.014	0.9097
$X_1 X_3$	0.053	1	0.053	14.980	0.0061
$X_2 X_3$	$1.332 \times 10^{-3}$	1	$1.332 \times 10^{-3}$	0.380	0.5594
$X_1^2$	$9.823 \times 10^{-3}$	1	$9.823 \times 10^{-3}$	2.770	0.1401
$X_2^2$	$2.001 \times 10^{-3}$	1	$2.001 \times 10^{-3}$	0.560	0.4771
$X_3^2$	$4.642 \times 10^{-6}$	1	$4.642 \times 10^{-6}$	$1.309 \times 10^{-3}$	0.9722
残差	0.025	7	$3.548 \times 10^{-3}$	—	—

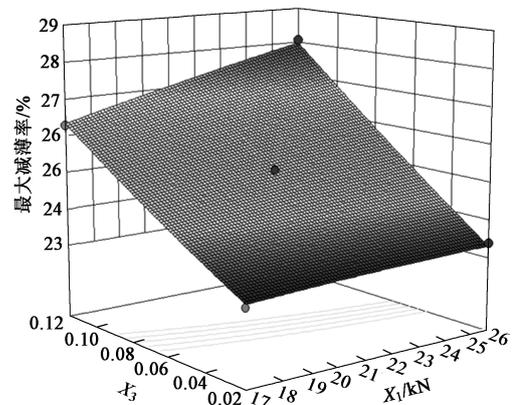


图 5 当模具间隙为 1.25 mm 时压边力和摩擦因数交互作用下的最大减薄率三维响应图

Fig. 5 Three-dimensional response map of maximum thinning rate under interaction of blank holder force and friction coefficient at die clearance of 1.25 mm

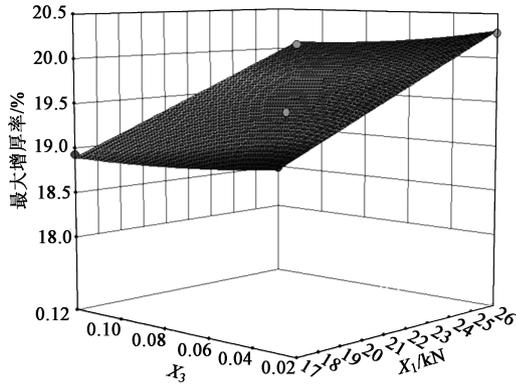


图6 当模具间隙为 1.25 mm 时压边力和摩擦因数交互作用下的最大增厚率三维响应图

Fig. 6 Three-dimensional response map of maximum thickening rate under interaction of blank holder force and friction coefficient at die clearance of 1.25 mm

径向拉应力会导致工件破裂。由于各工艺参数对成形质量的影响程度不同，为了获得工件成形的最优参数，需要对各工艺参数进一步优化。

### 3 多目标遗传算法优化及验证

遗传算法是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法。遗传算法通过对自然遗传过程中繁殖、交叉和基因突变现象进行模拟，在每次迭代中获取候选解，重复迭代多次，直至获得最优解。带精英策略的非支配排序遗传算法（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm with Elitist Strategy, NSGA-II）是 NSGA 的改进型遗传算法，能进一步提高模型精度<sup>[11-12]</sup>。根据目标函数，建立多目标优化模型和模型约束条件：

$$F_{\min} = [Y_1(\%), Y_2(\%)]$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 17000 \text{ N} \leq X_1 \leq 26000 \text{ N} \\ 1.10 \text{ mm} \leq X_2 \leq 1.40 \text{ mm} \\ 0.02 \leq X_3 \leq 0.12 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $F_{\min}$  为  $Y_1$ 、 $Y_2$  的折中解。

基于优化目标函数和约束条件，借助 Matlab2016b 软件进行相关程序的设置，定义目标函数 M 文件，根据目标函数及变量范围，设定相关参数，如表 6 所示，运行程序后获得 NSGA-II 多目标优化的 Pareto 前沿解，如图 7 所示。

由图 7 可知，整体上工件的增厚率和减薄率成负相关。在 I 区域，增厚率和减薄率成负相关，且

表 6 函数相关参数

Table 6 Function related parameters

参数	数值
种群规模	100
迭代次数	50
交叉概率	0.9
变异概率	1/3

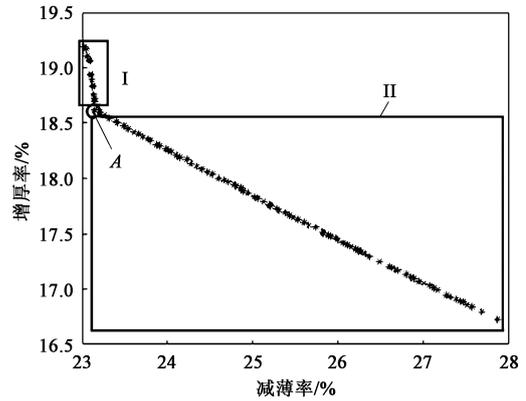


图7 NSGA-II 多目标优化 Pareto 前沿解

Fig. 7 Pareto frontier solution of NSGA-II multi objective optimization

变化率较大，当拐点 A 出现后，增厚率与减薄率的变化率有所减小。为了保证工件的成形质量，必须在合适范围内选取合适的工艺参数，最终选取工艺参数为：压边力为 21400 N、模具间隙为 1.25 mm、摩擦因数为 0.08。

在 Dynafrom 中对所选参数进行模拟验证，所得成形极限图（FLD）和减薄云图如图 8a 和图 8b 所示。由图 8a 和图 8b 可知，工件成形质量良好，工件的最大减薄率和最大增厚率分别为 25.591% 和 19.348%，因此模型精度较高。最终得到的实际零件如图 9 所示，符合实际生产要求。

### 4 结论

(1) 采用响应面法结合遗传算法对盒型件拉深工艺参数进行优化，借助 Design-Expert 软件进行 RSM 设计，取压边力为 17000~26000 N、模具间隙为 1.10~1.40 mm、摩擦因数为 0.02~0.12，针对这 3 个因素设计了 17 组试验，得到关于最大减薄率  $Y_1$  和最大增厚率  $Y_2$  的二次响应目标函数，并对响应面进行方差显著性分析，得出了影响工件成形质量的主要因素为摩擦因数和压边力。

(2) 基于  $Y_1$  和  $Y_2$  的二次响应目标函数，结合 NSGA-II 算法进行多目标优化，得到多目标 Pareto 最优解集，即减薄率的增大导致增厚率的减小，确定合

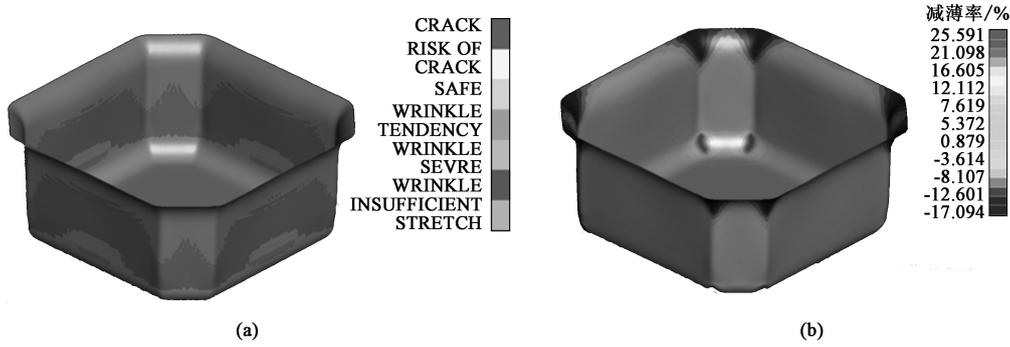


图 8 优化后的 FLD (a) 与减薄云图 (b)

Fig. 8 FLD (a) and thinning cloud map (b) after optimization



图 9 实际零件图

Fig. 9 Actual part drawing

适的工艺参数方案为：压边力为 21400 N，模具间隙为 1.25 mm，摩擦因数为 0.08，在 Dynaform 中进行模拟得到最大减薄率为 25.591%、最大增厚率为 19.348%，并在实际生产中进行验证，工件成形质量良好。

#### 参考文献：

- [1] 周启航. 铝合金接线盒压铸工艺及模具数值模拟研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2020.  
Zhou Q H. Research on Die-casting Process and Mold Numerical Simulation of Aluminum Alloy Junction Box [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [2] 施为钟, 龚红英, 王斌, 等. 基于响应面法与 NSGA-II 的汽车 C 柱零件成形质量多目标优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (8): 30-37.  
Shi W Z, Gong H Y, Wang B, et al. Multi-objective optimization of forming quality of automotive C-pillar parts based on response surface methodology and NSGA-II [J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28 (8): 30-37.
- [3] 张忠芳, 刘棒棒, 宗珂. 某覆盖件冲压成形工艺分析及仿真模拟 [J]. 锻造与冲压, 2021, (24): 50-53.  
Zhang Z F, Liu B B, Zong K. Analysis and simulation of stamping forming process for a cover part [J]. Forging & Metalforming, 2021, (24): 50-53.
- [4] 于传浩, 张毅. 基于 Dynaform 的凸缘圆筒件拉深工艺有限元分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 56-61.  
Yu C H, Zhang Y. Finite element analysis of deep drawing process of flange and cylindrical parts based on Dynaform [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 56-61.
- [5] 邱超斌, 张猛, 郎利辉, 等. 基于神经网络遗传算法的深腔型零件拉深工艺参数优化 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (5): 173-179.  
Qiu C B, Zhang M, Lang L H, et al. Optimization of drawing process parameters for deep cavity parts based on neural network genetic algorithm [J]. Precision Forming Engineering, 2021, 13 (5): 173-179.
- [6] 宋杰. 基于 Dynaform 的 AZ91D 镁合金盘体冲锻工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (7): 89-91, 96.  
Song J. Optimization of punching and forging process for AZ91D magnesium alloy plate based on Dynaform [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (7): 89-91, 96.
- [7] 梁发周, 钟圣滔. 基于 AutoForm 模拟的汽车 B 柱加强板热冲压工艺分析与优化设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 75-80.  
Liang F Z, Zhong S T. Analysis and optimized design of hot stamping process for automotive B-pillar reinforcement plate based on AutoForm simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 75-80.
- [8] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].  
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [9] 王孝培. 冲压手册 [M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1990.  
Wang X P. Stamping Manual [M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 1990.
- [10] 覃柏英, 秦文东, 林贤坤, 等. 响应面法在发动机隔热罩冲压成形工艺参数优化中的应用 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (3): 22-28.  
Qin B Y, Qin W D, Lin X K, et al. Application of response surface methodology in optimization of process parameters for stamping and forming of engine heat shields [J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41 (3): 22-28.
- [11] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展 [J]. 计算机应用研究, 2012, (4): 1201-1206.  
Ma Y J, Yun W X. Research progress of genetic algorithm [J]. Research on Computer Application, 2012, (4): 1201-1206.
- [12] 李宇, 赵博宁. 基于遗传算法的冲压工艺参数优化研究 [J]. 今日制造与升级, 2022, (4): 109-112.  
Li Y, Zhao B N. Research on stamping process parameter optimization based on genetic algorithm [J]. Today's Manufacturing and Upgrade, 2022, (4): 109-112.