

# 基于响应面法与灰狼优化算法的壳体拉深成形模具优化设计

胡开元<sup>1</sup>, 王雷刚<sup>2</sup>

(1. 成都理工工程技术学院 自动化工程系, 四川 乐山 614000; 2. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 为解决壳体拉深成形模具优化设计的实际问题, 提出一种基于响应面法和灰狼优化算法的优化凹模尺寸参数的优化方法。以模口圆角半径  $R_a$ 、中间带直径  $D_m$ 、入模角  $\alpha$  和定径带宽度  $B$  为设计变量, 采用中心复合设计进行实验安排, 以壳体的外径、高度、中心底厚及口部不平整度作为优化指标, 并联合运用灰色关联分析法和熵权法, 构建设计变量与优化指标之间的响应面模型, 最后借助灰狼优化算法对预测模型进行寻优。最优凹模尺寸参数组合为:  $R_a = 12$  mm,  $D_m = \Phi 19.3$  mm,  $\alpha = 20^\circ$  和  $B = 1.4$  mm。采用优化后的凹模尺寸参数进行模拟验证和工艺实验, 结果显示壳体所有尺寸指标均满足设计要求。

**关键词:** 壳体; 拉深成形; 模具优化; 响应面法; 灰狼优化算法

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.034

**中图分类号:** TG389      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0244-07

## Optimization design on shell deep drawing die based on response surface methodology and grey wolf optimization algorithm

Hu Kaiyuan<sup>1</sup>, Wang Leigang<sup>2</sup>

(1. Department of Automation Engineering, Engineering and Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to solve the practical problem of optimization design for deep drawing die for shell, a optimization method was proposed to optimize the size parameters of die based on response surface methodology and grey wolf optimization algorithm. Then, taking die fillet radius  $R_a$ , diameter of intermediate zone  $D_m$ , angle  $\alpha$  entering the die and width  $B$  with constant diameter as the design variables, the experimental arrangement was conducted by central composite design, and taking outer diameter, height, center bottom thickness and mouth roughness of shell as the optimization indexes, the response surface models between design variables and optimization indexes was constructed by combining grey relational analysis method and entropy weight method. Furthermore, the prediction model was optimized by gray wolf optimization algorithm, and the optimal combination of die size parameters were  $R_a = 12$  mm,  $D_m = \Phi 19.3$  mm,  $\alpha = 20^\circ$  and  $B = 1.4$  mm. Finally, the optimal die size parameters were verified by numerical simulation and process test. The results show that all the size indexes of shell meet the design requirements.

**Key words:** shell; deep drawing; die optimization; response surface methodology; grey wolf optimization algorithm

拉深成形作为黄铜类壳体零件加工的前期工序之一, 属于冷冲压过程<sup>[1-2]</sup>, 其成形质量决定着后续工序是否能顺利进行。常规的拉深模具设计主要根据设计人员的经验及参考相似零件的设计完成。随着模拟仿真技术的快速发展, 模具设计数字化、智能化和高效化成为未来的发展方向之一。

近年来, 有限元模拟仿真技术发展迅速, 同时结合相关优化算法对冲压成形工艺参数进行多

目标优化的研究成为热点。Nejad S H 等<sup>[3]</sup>采用响应面法 (Response Surface Methodology, RSM) 对某覆铜钢壳体的拉深工艺参数进行了多目标优化。Mrabti I E 等<sup>[4]</sup>提出了一种基于有限元-人工神经网络-粒子群优化相结合的拉深工艺参数优化设计方法。Feng Y X 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于支持向量机的壳体拉深可变压延力的优化方法。龚红英等<sup>[6-8]</sup>分别基于 RSM-遗传算法、RSM-非支配分类遗传算法对油箱托盘、燃气灶外壳和圆筒件冲压成形工艺参数进行了优化。罗艳等<sup>[9-10]</sup>针对某型号封头拉深成形过程中出现的鼓包、厚度不均和回弹严重的问题, 应用 RSM 对不同的工艺参

收稿日期: 2022-02-27; 修订日期: 2022-05-15

基金项目: 2021 年乐山市重点科技研究项目 (21GZD007)

作者简介: 胡开元 (1983-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 626489509@qq.com

数进行了优化设计。以上研究表明，采用 RSM 和优化算法结合的方式对成形工艺参数及模具进行优化是可行的。

本文以某 H70 黄铜壳体拉深成形凹模作为研究对象，以成形壳体的形状和尺寸作为目标，基于灰色关联分析 (Grey Relational Analysis, GRA) 和熵值法 (Entropy Method, EM)，将多个目标优化问题转化为关于灰色关联度 (Grey Relational Degree, GRD) 的单一目标优化问题，并运用 RSM 构建灰色关联度预测模型。最后，借助灰狼优化 (Grey Wolf Optimization, GWO) 算法寻找最优的凹模尺寸参数组合，并将其应用于工艺实验中进行验证。

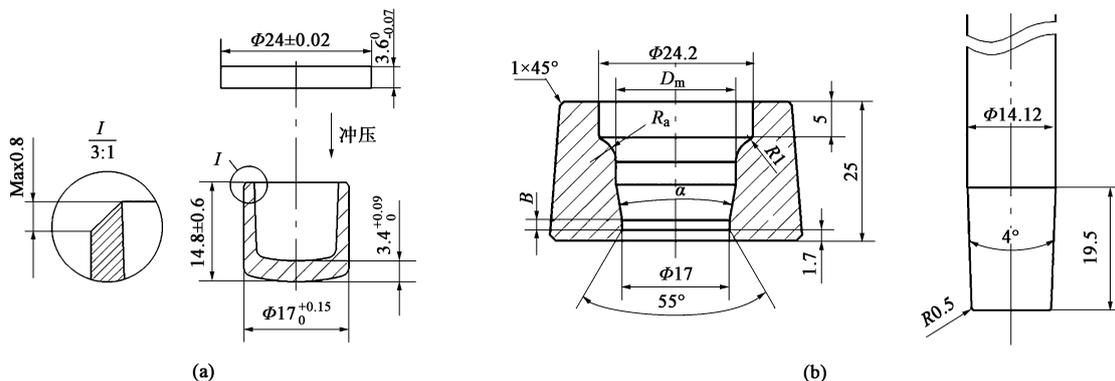


图1 零件尺寸 (a) 及模具示意图 (b)

Fig. 1 Part dimensions (a) and schematic diagram of die (b)

为了对壳体拉深成形过程及成形后壳体的主要尺寸进行分析，根据以往设计经验进行凹模的初步设计，并应用 DEFORM 软件进行成形模拟仿真。图2为构建的拉深成形有限元模型，考虑到壳体为轴对称零件及仿真计算的效率，选择构建二维有限元模型，材料选择软件材料库中的 H70 黄铜，网格划分为 2000 个，摩擦系数为 0.08，压制速度为  $80 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，凸模行程为 32 mm。

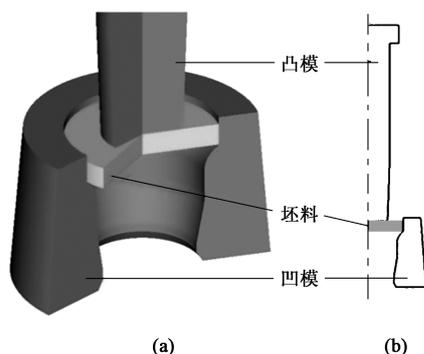


图2 拉深成形有限元模型

(a) 三维模型 (b) 二维模型

Fig. 2 Finite element model of deep drawing

(a) 3D model (b) 2D model

## 1 成形分析与模具设计

某款 H70 黄铜壳体的尺寸如图 1a 所示，由板厚  $t=3.6 \text{ mm}$  的板料经落料后 (规格为  $\Phi 24 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ ，下料质量为  $(13.8 \pm 0.15) \text{ g}$ ) 直接拉深成形。拉深成形下凹模如图 1b 所示，凸模则根据壳体内形随形设计，其中， $R_a$  为模口圆角半径、 $D_m$  为中间带直径、 $\alpha$  为入模角、 $B$  为定径带宽度。成形后壳体的主要尺寸要求有：外径  $D$ 、高度  $H$ 、中心底厚  $t_B$  及口部不平整度  $W$ ，而影响拉深成形后壳体尺寸的主要因素为凹模型腔的设计。

拉深成形的数值模拟结果如图 3 所示，根据拉深成形仿真结果中的行程-载荷曲线可将成形过程大致分为 4 个阶段：第 1 阶段为坯料的弯曲阶段，此阶段在凸模的作用下坯料向内发生弯曲，弯曲变形持续发生，成形载荷也逐渐增加；第 2 阶段为进入阶段，此时坯料逐渐进入凹模型腔内，发生塑性变形的区域减少，成形载荷快速降低；第 3 阶段为减薄阶段，此时坯料进入锥形过渡段，壁厚逐渐减薄至指定尺寸；第 4 阶段为脱离阶段，坯料逐渐脱离凹模型腔，完成整个拉深成形。对成形后的壳体进行测量，壳体外径  $D = \Phi 17.05 \text{ mm}$ ，高度  $H = 15.09 \text{ mm}$ ，中心底厚  $t_B = 3.36 \text{ mm}$ ，口部不平整度  $W = 0.78 \text{ mm}$ ，中心底厚未达到设计要求，口部不平整度接近上限。因此，需要对经验法设计的凹模进行优化设计。

## 2 响应面模型的构建

### 2.1 实验设计

由第 1 节分析可知，影响壳体拉深成形的主要

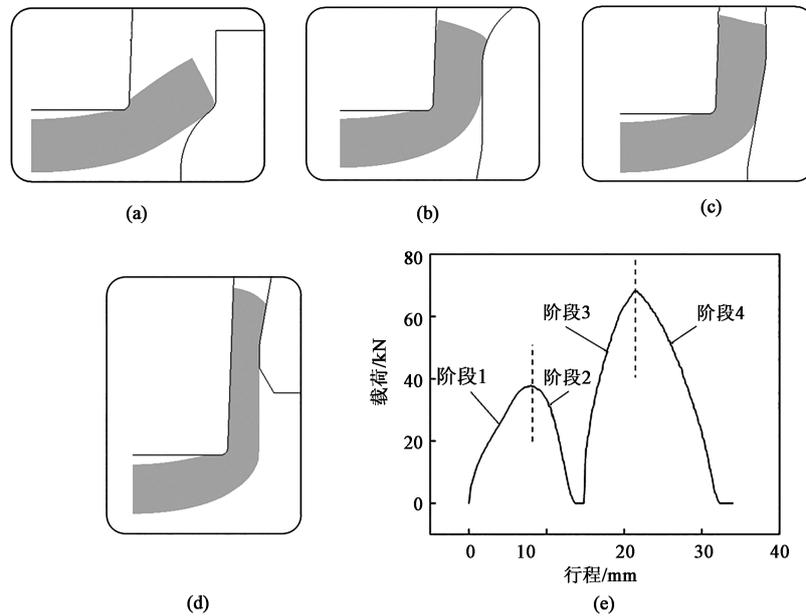


图 3 拉深成形数值模拟结果

(a) 阶段 1 (b) 阶段 2 (c) 阶段 3 (d) 阶段 4 (e) 行程-载荷曲线

Fig. 3 Numerical simulation results of deep drawing

(a) Stage 1 (b) Stage 2 (c) Stage 3 (d) Stage 4 (e) Load-stroke curve

因素为凹模型腔的尺寸参数，同时考虑到凹模总体尺寸的限制以及壳体内外形尺寸的要求，可分离出的凹模型腔的尺寸参数为：模口圆角半径  $R_a$ 、中间带直径  $D_m$ 、入模角  $\alpha$  和定径带宽度  $B$ 。优化目标为壳体的外径  $D$ 、高度  $H$ 、中心底厚  $t_B$  及口部不平整度  $W$ ，相关优化目标尺寸可在模拟仿真后直接测量获取。各因素及水平取值见表 1。

表 1 因素及水平取值

Table 1 Values of factors and levels

水平	因素			
	$R_a/mm$	$D_m/mm$	$\alpha/(\circ)$	$B/mm$
1	5	$\Phi 18.5$	18	1.0
2	8	$\Phi 19.0$	19	1.3
3	10	$\Phi 19.5$	20	1.5
4	12	$\Phi 20.0$	21	1.7
5	15	$\Phi 20.5$	22	2.0

考虑实验方案的准确性、合理性及高效性，本文应用中心复合设计法进行实验方案的制定。部分实验方案及测量结果见表 2。

### 2.2 灰色关联分析

模拟仿真及测量完成后，需要对实验数据进行预处理及灰色关联分析，具体步骤如下。

(1) 步骤 1：数据归一化处理。由于 4 个优化

表 2 部分实验方案及测量结果

Table 2 Part of test schemes and measurement results

实验号	尺寸参数				测量结果/mm			
	$R_a/mm$	$D_m/mm$	$\alpha/(\circ)$	$B/mm$	$D$	$H$	$t_B$	$W$
1	10	$\Phi 19.5$	20	2.0	$\Phi 17.03$	14.92	3.42	0.69
2	12	$\Phi 19.0$	19	1.7	$\Phi 17.04$	14.56	3.45	0.61
3	8	$\Phi 19.0$	19	1.3	$\Phi 17.02$	14.84	3.40	0.49
4	10	$\Phi 19.5$	20	1.5	$\Phi 17.02$	14.84	3.42	0.77
5	12	$\Phi 20.0$	19	1.3	$\Phi 17.02$	14.62	3.45	0.90
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
26	10	$\Phi 20.5$	20	1.5	$\Phi 17.03$	14.69	3.46	0.92
27	10	$\Phi 19.5$	20	1.5	$\Phi 17.02$	14.84	3.42	0.77
28	10	$\Phi 19.5$	20	1.5	$\Phi 17.02$	14.84	3.42	0.77
29	8	$\Phi 19.0$	19	1.7	$\Phi 17.02$	14.84	3.40	0.49
30	10	$\Phi 19.5$	22	1.5	$\Phi 17.04$	14.91	3.41	0.73

目标的量级差异会对后续分析产生不利影响，因此，需要进行数据预处理，即归一化处理。由于工作过程中，凹模型腔会逐渐磨损，导致壳体外径  $D$  逐渐增大，同时考虑到影响生产的不确定因素较多，因此，希望壳体外径  $D$  更接近尺寸下限，即壳体外径  $D$  越接近  $\Phi 17.04$  mm 越好。壳体高度  $H$  则越接近其公称尺寸 14.8 mm 越好。中心底厚  $t_B$  则越接近 3.45 mm 越好。因此，这 3 个优化目标采用望目标值型归一化方式（式 (1)）进行数据处理。优化

目标壳体口部不平整度  $W$  则越小越好，因此，采用望小型归一化方式（式（2））进行数据处理。

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{|x_i(k) - \lambda(k)|}{\max |x_i(k) - \lambda(k)|} \quad (1)$$

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (2)$$

式中： $x_i(k)$  和  $x_i^*(k)$  分别为第  $i$  组实验的第  $k$  个

$$\xi(x_i^*(k), x_0^*(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_i^*(k) - x_0^*(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i^*(k) - x_0^*(k)|}{|x_i^*(k) - x_0^*(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i^*(k) - x_0^*(k)|} \quad (3)$$

式中： $\xi(x_i^*(k), x_0^*(k))$  为第  $i$  组实验的第  $k$  个目标的 GRC； $x_0^*(k)$  为第  $k$  个目标的参考序列； $|x_i^*(k) - x_0^*(k)|$  为  $x_i^*(k)$  和  $x_0^*(k)$  的偏差序列； $\min_i \min_k |x_i^*(k) - x_0^*(k)|$  为极差最小值； $\max_i \max_k |x_i^*(k) - x_0^*(k)|$  为极差最大值； $\rho = 0.5$ ，为灰色系统的分辨系数。

(3) 步骤 3：确定权重。GRC 为不同优化目标下参考数列与比较数列的关联程度，而不同优化目标的重要程度，即各优化目标的 GRC 权重值，将直接影响后续灰色关联度 GRD 的计算。因此，本文通过 EM 分别计算不同优化目标的熵值，判断各优化目标的变异程度，从而确定 GRC 权重值。

分别计算 30 组实验中 4 个优化目标的比重值  $p_i(k)$ ，计算方法如式（4）所示：

$$p_i(k) = \frac{\xi(x_i^*(k), x_0^*(k))}{\sum_{i=1}^m \xi(x_i^*(k), x_0^*(k))} \quad (4)$$

在此基础上，分别计算各优化目标的信息熵值  $H_k$ （式（5））和信息冗余度  $e_k$ （式（6）），并计算出各优化目标的权重  $\omega_k$ （式（7）），计算结果见表 3。由表 3 可知，权重值较大的是中心底厚  $t_B$  和口部不平整度  $W$ ，权重值较小的是壳体外径  $D$  和高度  $H$ 。结合表 2 的实验结果可知，壳体拉深成形后，其外径  $D$  和高度  $H$  均在公差范围内，并且外径  $D$  的波动最小，高度  $H$  其次，反映出拉深成形壳体的总体尺寸较为稳定。而中心底厚  $t_B$  和口部不平整度  $W$  则随凹模型腔尺寸参数的变化有较大的波动。

$$H_k = -\frac{1}{\ln m} \times \sum_{i=1}^m [p_i(k) \times \ln p_i(k)] \quad (5)$$

$$e_k = 1 - H_k \quad (6)$$

$$\omega_k = \frac{e_k}{\sum_{k=1}^n e_k} \quad (7)$$

目标的原始数据序列和处理后的数据序列， $k = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m$ ； $n$  为优化目标个数， $n = 4$ ； $m$  为实验组数， $m = 30$ ； $\lambda(k)$  为对应  $D$ 、 $t_B$  和  $H$  的目标值，即  $\lambda(1) = 17.04$ ， $\lambda(2) = 14.8$ ， $\lambda(3) = 3.45$

(2) 步骤 2：灰色关联系数（Grey Relational Coefficient, GRC）计算<sup>[11]</sup>。其计算公式如下：

表 3 通过 EM 计算的各优化目标的权重值 (mm)

Table 3 Weight values of each optimization target calculated by EM (mm)

优化目标	$H$	$D$	$t_B$	$W$
$H_k$	0.995	$\Phi 0.999$	0.987	0.987
$e_k$	0.005	$\Phi 0.001$	0.013	0.013
$\omega_k$	0.156	$\Phi 0.040$	0.409	0.395

(4) 步骤 4：GRD 计算。根据式（8）计算 GRD，GRD 值越大，则采用对应的设计变量组合就能获得越接近预期的壳体，各设计变量对应不同水平的平均 GRD 越大，则表示该水平对应的优化目标响应越好。表 4 为各设计变量对应不同水平的平均 GRD，由表 4 可知，模口圆角半径  $R_a$  的最优水平为水平 4，中间带直径  $D_m$  的最优水平为水平 2，入模角  $\alpha$  的最优水平为水平 2、定径带宽度  $B$  的最优水平为水平 2。并且，由 4 个设计变量的平均 GRD 的最大值与最小值之差（Max-Min）可知，模口圆角半径对壳体拉深成形质量的影响最大，中间带直径和入模角次之，定径带宽度的影响最小。

$$\phi(x_i^*, x_0^*) = \sum_{k=1}^n \omega_k \xi(x_i^*(k), x_0^*(k)) \quad (8)$$

式中： $\phi(x_i^*, x_0^*)$  为 GRD。

表 4 各设计变量对应不同水平的平均 GRD

Table 4 Average GRD for each design variable of different levels

水平	平均 GRD			
	$R_a/\text{mm}$	$D_m/\text{mm}$	$\alpha/(\circ)$	$B/\text{mm}$
1	0.466	$\Phi 0.695$	0.600	0.576
2	0.570	$\Phi 0.744$	0.668	0.658
3	0.583	$\Phi 0.565$	0.579	0.580
4	0.743	$\Phi 0.569$	0.645	0.655
5	0.649	$\Phi 0.656$	0.566	0.585
Max-Min	0.277	$\Phi 0.179$	0.102	0.082

### 2.3 响应面模型及参数寻优

为了准确地构建壳体拉深成形凹模型腔尺寸参数与 GRD 之间的映射关系, 为后续凹模型腔尺寸参数寻优奠定基础。本文应用响应面法构建尺寸参数与 GRD 之间的映射关系, 获得如式 (9) 所示的函数关系:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & -59.993 - 0.175R_a + 5.556D_m + 0.432\alpha - \\ & 0.202B + 2.819 \times 10^{-3}R_a \cdot D_m + \\ & 4.328 \times 10^{-3}R_a \cdot \alpha + 2.266 \times 10^{-3}R_a \cdot B + 3.763 \times \\ & 10^{-3}D_m \cdot \alpha + 0.083D_m \cdot B + 1.969 \times 10^{-3}\alpha \cdot B + \\ & 2.76 \times 10^3R_a^2 - 0.14D_m^2 - 0.014\alpha^2 - 0.489B^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\hat{y}$  为响应面模型 GRD 的预测值。

模型的方差分析结果见表 5, 模型的显著性  $P$  值  $< 0.0001$ , 远小于 0.05, 表明模型可以正确反映响应值与设计变量之间的关系, 并且无失拟项。拟合优度的检验结果见表 6, 信噪比大于 4, 决定系数  $R^2$  和校正决定系数  $R_{adj}^2$  接近 1, 预测决定系数  $R_{pre}^2$  与  $R_{adj}^2$  的差值小于 0.2, 说明构建的模型可靠性高、

预测能力较出色<sup>[12-13]</sup>。模型残差的正态概率图如图 4a 所示, 其残差的分布大致为一条直线, 满足残差呈正态分布的假设。图 4b 为模型的拟合值与残差图, 所有残差点在 0 线左右波动, 变化幅度位于  $(0 \pm 0.04)$  水平带内, 未见异常点, 说明模型预测值与样本值的吻合度高。综上所述, 模型具有较好的预测精度, 具备了工艺参数寻优的条件。

表 5 方差分析结果

Table 5 Results of variance analysis

来源	自由度 <i>DF</i>	平方和 <i>SS</i>	均方值 <i>MS</i>	统计量 <i>F</i> 值	<i>P</i> 值
模型	14	0.75820	0.0542	59.45	<0.0001
误差	15	0.01370	0.0009	—	—
合计	29	0.07719	—	—	—

表 6 拟合优度检验结果

Table 6 Test results of fitting goodness

参数	信噪比	$R^2$	$R_{adj}^2$	$R_{pre}^2$
数值	30.646	0.982	0.966	0.898

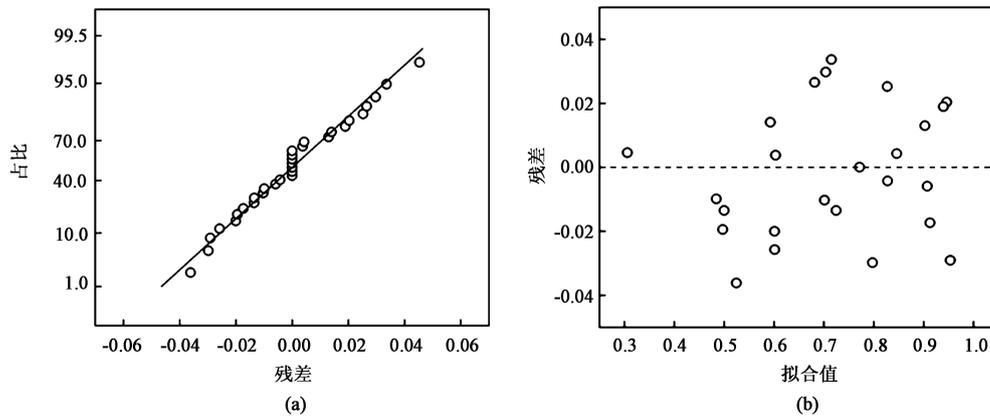


图 4 模型的残差图

(a) 残差的正态概率图 (b) 模型残差分布图

Fig. 4 Residual diagrams of model

(a) Normal probability diagram of residual (b) Distribution diagram of model residual

通过将上述已求得响应面模型进行优化求解, 获取壳体拉深成形凹模型腔的尺寸参数最优组合。本次寻优采用 GWO, 该算法是 2014 年由 Mirjalili S 等<sup>[14]</sup>提出的一种元启发式算法, 通过模拟野生狼群的社会等级和集群捕食策略而设计。经 300 次迭代后, 获得可行解范围内的最优解, 相应的尺寸参数组合圆整后为:  $R_a = 12$  mm,  $D_m = \Phi 19.3$  mm,  $\alpha = 20^\circ$  和  $B = 1.4$  mm。

### 3 实验验证

采用优化后的凹模尺寸参数进行模拟仿真, 其结果如图 5a 所示。经测量, 壳体外径  $D = \Phi 17.02$  mm, 高度  $H = 14.85$  mm, 中心底厚  $t_B = 3.46$  mm, 口部不平整度  $W = 0.36$  mm。采用优化后的尺寸参数进行凹模加工, 随后进行工艺试制, 图



图5 模拟仿真与实际结果对比

(a) 模拟结果 (b) 实际样件

Fig. 5 Comparison between simulation and actual results

(a) Simulation result (b) Actual samples

5b 为试制样件，壳体内外表面均无成形缺陷。随机抽选 5 个样品进行测量，测量结果显示壳体所有尺寸指标均满足设计要求。

## 4 结论

(1) 以某款 H70 黄铜壳体拉深成形模具为研究对象，通过模拟仿真分析了壳体拉深成形过程，分离了凹模需要优化的尺寸参数为：模口圆角半径  $R_a$ 、中间带直径  $D_m$ 、入模角  $\alpha$  和定径带宽度  $B$ ，确认了优化目标为：壳体的外径  $D$ 、高度  $H$ 、中心底厚  $t_B$  及口部不平整度  $W$ 。

(2) 运用 GRA 和 EA，将多个目标优化问题转化为关于 GRD 的单一目标优化问题，并运用响应面法构建 GRD 预测模型。经方差分析和拟合优度检验，证明该模型可靠、精确。

(3) 应用 GWO 对预测模型进行寻优，并采用优化后的凹模尺寸参数进行模拟仿真和实际生产试制，测量结果显示壳体所有尺寸指标均满足设计要求。

本文提出的模具优化设计方法可为其他壳类零件的拉深成形模具设计提供借鉴。

### 参考文献：

- [1] 胡冶昌, 魏志芳, 李晓光, 等. 基于 NX 高级仿真的弹壳冲孟工序数字化模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (2): 122-127.  
Hu Y C, Wei Z F, Li X G, et al. Digital model study on the cartridge case extrusion forming based on NX advanced simulation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (2): 122-127.
- [2] 李晓光, 魏志芳, 高建中, 等. 枪弹弹壳挤孟组合模新型设计与研究 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (2): 82-85.

Li X G, Wei Z F, Gao J Z, et al. New design and research of bullet casting extrusion combined die [J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35 (2): 82-85.

- [3] Nejad S H, Hasanzadeh R, Doniavi A, et al. Finite element simulation analysis of laminated sheets in deep drawing process using response surface method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93 (9-12): 3245-3259.
- [4] Mrabti I E, Touache A, Hakimi A E, et al. Springback optimization of deep drawing process based on FEM-ANN-PSO strategy [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, (1): 1-13.
- [5] Feng Y X, Hong Z X, Gao Y C, et al. Optimization of variable blank holder force in deep drawing based on support vector regression model and trust region [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105 (1-3): 4265-4278.
- [6] 稽友迪, 龚红英, 贾星鹏, 等. 基于响应面与遗传算法的汽车油箱托盘仿真优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (12): 29-35.  
Ji Y D, Gong H Y, Jia X P, et al. Simulation and optimization of automobile fuel tank tray based on response surface and genetic algorithm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (12): 29-35.
- [7] 赵小云, 龚红英, 施为钟, 等. 基于 RSM 与 NSGA-II 的燃气灶外壳零件成形质量多目标优化 [J]. 轻工机械, 2021, 39 (1): 86-91.  
Zhao X Y, Gong H Y, Shi W Z, et al. Multi-objective optimization of forming quality of gas stove shell parts based on RSM and NSGA-II [J]. Light Industry Machinery, 2021, 39 (1): 86-91.
- [8] 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.  
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 Science, 2020, 34 (2): 168-173.
- [9] 周杰, 罗艳, 王珣, 等. 汽车内板件冲压成形工艺参数多目标优化 [J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38 (2): 15-17;  
Zhou J, Luo Y, Wang X, et al. Multi-objective optimization of stamping forming process of automobile inner panel [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38 (2): 15-17.
- [10] 周杰, 罗艳, 王珣, 等. 基于响应面的封头冲压成形工艺多目标优化 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46 (1): 205-212.  
Zhou J, Luo Y, Wang X, et al. Multi-objective optimization of stamping forming process of head based on response surface model [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46 (1): 205-212.
- [11] 洪旗, 史耀耀, 路丹妮, 等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化 [J]. 复合材料学报, 2019, 36 (12): 2822-2832.  
Hong Q, Shi Y Y, Lu D N, et al. Multi-response parameter optimization for the composite tape winding process based on grey relational analysis and response surface methodology [J]. Acta Materialae Compositae Sinica, 2019, 36 (12): 2822-2832.
- [12] 梁强, 周杰, 何雄, 等. 载重汽车用直齿轮冷挤压工艺参数多目标优化 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48 (12): 3216-3223.  
Liang Q, Zhou J, He X, et al. Multi-objective optimization of cold extrusion process parameters for spur gear of camion [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48 (12): 3216-3223.
- [13] 付向辉, 张立刚, 李立, 等. 电絮凝除砷工艺的响应曲面优化 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (5): 530-539.  
Fu X H, Zhang L G, Li L, et al. Optimization of electrocoagulation process for thallium removal from aqueous solutions by response surface methodology [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (5): 530-539.
- [14] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69 (3): 46-61.

(上接第 238 页)

● 图片、表格、公式、定理等的序号均要按其在正文中引用的顺序, 分别用阿拉伯数字顺序编码, 例如: 图 1、图 2……, 表 1、表 2……。

● 图片、表格应随文给出, 先见文后见图、表。

● 图题 (包括 (a)、(b) 等分图题)、表题要求同时用中、英文标注。

● 照片或灰度图应反差适当, 鲜明可见; 金相照片放大倍数均用比例尺表示, 如 5  $\mu\text{m}$ 。

● 双栏排图片的宽度应控制在 7.8 cm 左右; 通栏排图片宽度应控制在 16 cm 左右。

● 表格使用三线表, 必要时可加横线, 但一般不得有竖线; 表格的宽度最好设计成 25 个汉字 (相当于 48 个字符) 以内; 表中所有文字一律左齐。

● 公式后应当注明公式中各符号的含义。

● 计量单位一律采用法定计量单位 (国际单位制)。

● 参考文献应按其在正文中被引用的顺序依次列出 (在正文中引用处务必用“[序号]”标注); 列出的参考文献应是重要的、近期的、已正式发表的文献资料, 每篇论文应列出 12 篇以上参考文献; 作者不多于 3 个的姓名全部写出, 多于 3 个的, 余者用“、等 (, et al)”表示; 无论中外署名、一律姓 (首字大写) 先名后 (例如: Zhang Y H)。

原文为非英文的参考文献, 需要同时用英文著录。

格式如下:

[1] 期刊 文章作者. 论文题目 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 起页码-终页码。

[2] 专著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 版本. 出版地: 出版社, 出版年。

[3] 译著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 译者, 译. 版本. 出版地: 出版社, 出版年。

[4] 论文集 论文作者. 论文题目 [A]. 论文集编者. 论文集名 (英文实词首字大写) [C]. 出版地: 出版者, 出版年。

[5] 技术报告 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [R]. 地名: 责任单位, 出版年。

[6] 学位论文 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [D]. 所在城市: 保存单位, 年份。

[7] 专利文献 专利申请者或所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 公告日期或公开日期 (如, 2008-02-03)。

[8] 技术标准 标准号, 标准名称 [S]。

[9] 在线文献 作者. 论文题目 [EB/OL]. 获取和访问路径 [http:// ...](http://...), 发表或更新日期 (如, 2008-02-03)。

[10] 光盘文献 (数据库) 作者. 论文题目 [DB/CD]. 出版地: 出版者, 出版年。

原文为非英文的参考文献著录举例:

[1] 王博, 张凯锋, 赖小明, 等.  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$  复合材料板材脉冲电流辅助拉深成形 [J]. 锻压技术, 2012, 37 (5): 22-26.

Wang B, Zhang K F, Lai X M, et al. Pulse current auxiliary deep drawing of  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$  composites sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37 (5): 22-26.

### 3 投稿方式及要求

(1) 请通过本刊网站的“作者投稿”系统投稿。

(2) 来稿文责自负, 请勿抄袭他人论文, 请勿一稿多投。对抄袭者和一稿多投者, 一经发现, 本刊将无条件退稿, 并作不良作者记录; 同时, 本刊将保留追查抄袭者浪费本刊资源和其他纷争的权利。

(3) 编辑部对来稿拥有修改权, 遇重大删改时将与作者协商; 排版后的清样将通过 E-mail 发给作者进行核对。

### 4 编辑部联系方式

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部

邮编: 100083 电话: 010-62920652, 010-82415085

E-mail: fst@263.net

网址: <http://www.fstjournal.net/>