

Vague 集在 C15 不锈钢变薄拉深工艺参数优化中的应用

张辰锐, 李 辉

(吕梁学院 物理系, 山西 吕梁 033000)

摘要: 在 Simufat. forming 软件中进行 C15 不锈钢变薄拉深成形过程有限元仿真模拟, 以变薄率、凹模锥角和拉深速度为工艺参数变量, 设计 3 因素 3 水平 $L_9(3^3)$ 正交试验, 以工件变薄拉深过程中的拉深力、残余应力与壁厚回弹量为成形质量评价指标, 采用变异系数法对 3 个评价指标进行客观权重分配, 引入 Vague 集对正交试验结果进行多目标优化, 得到最优工艺参数组合以及各工艺参数对综合评价指标的影响顺序。结果表明: 变薄率为 42%、凹模锥角为 9° 、拉深速度为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, C15 不锈钢变薄拉深工件的成形质量较高。各工艺因素对变薄拉深件的综合成形质量的影响顺序为: 拉深速度>变薄率>凹模锥角。对仿真结果进行试验验证, 仿真和试验结果的最大相对误差(壁厚回弹量)不大于 7.61%, 仿真结果具有良好的可靠性, 可对实际生产提供理论指导。

关键词: 变薄拉深; Vague 集; C15 不锈钢; 变薄率; 凹模锥角; 拉深速度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.016

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 01-0115-06

Application of Vague set in ironing process parameter optimization of C15 stainless steel

Zhang Chenrui, Li Hui

(Department of Physics, Lyuliang University, Lyuliang 033000, China)

Abstract: Finite element simulation of ironing process for C15 stainless steel was carried out in Simufat. forming software. Taking ironing rate, concave mold cone angle and ironing speed as the process parameter variables, $L_9(3^3)$ orthogonal experiment with three factors and three levels was designed. Taking ironing force, residual stress and wall thickness springback amount as the evaluation indexes of forming quality, the variation coefficient method was adopted to objective weight distribution of three evaluation indexes. The Vague set was introduced to the orthogonal test results for multi-objective optimization, the optimal combination of process parameters and the influence order of each process parameter on the comprehensive evaluation index were obtained. The results show that when the ironing rate is 42%, the concave mold cone angle is 9° and the ironing speed is $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the forming quality of C15 stainless steel ironing workpiece is higher. The influence order of process factors on comprehensive forming quality for ironing parts is as follows: ironing speed > ironing rate > concave mold cone angle. The maximum relative error (wall thickness springback amount) of the simulation and test results is not more than 7.61%. The simulation results have good reliability, which can provide theoretical guidance for practical production.

Key words: ironing; Vague set; C15 stainless steel; ironing rate; concave mold cone angle; ironing speed

变薄拉深是目前常用的一体塑性成形工艺, 经变薄拉深加工而成的零件不仅具有较高的尺寸精度, 同时具有良好的力学性能, 是轴承、弹壳、电池壳

等高精度无缝薄壁零件的重要成形工艺之一^[1-4]。变薄拉深工艺参数与其成形质量息息相关, 所以, 优化工艺参数对得到高质量变薄拉深工件具有重要意义。天津市精密级进模具成型技术工程中心邵振江等^[4]研究了汽车连接件局部变薄拉深冲压件的成形工艺; 安徽工业大学李妍妍等^[5]基于 ABAQUS 研究了模具参数对深筒件多步变薄拉深过程的影响; 燕山大学杜冰等^[6]研究了高盒件的多道次变薄拉深工艺机理; 中科院王瑞等^[7]基于正交试验对铝瓶盖的冲压成形工艺参数进行了优化; 南京理工大学张跃等^[8]通过有限元分析实现了阶梯盒件拉深成形的工艺优化; 西北工业大学的王俊彪等^[9]对变薄拉

收稿日期: 2022-11-22; 修订日期: 2022-12-30

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目 (51422404); 山西省高等学校科技创新项目 (2020L0683); 山西省高等学校教学改革创新项目 (J20221165); 吕梁市重点研发项目 (2021GXYP-2-60)

作者简介: 张辰锐 (1988-), 男, 博士, 讲师

E-mail: zhangchenrui@llu.edu.cn

通信作者: 李 辉 (1985-), 男, 博士, 副教授

E-mail: 453943175@qq.com

深成形次数和各道次变薄量的分配对成形质量的影响进行了研究。

Vague 集作为一种新兴的不确定系统智能信息处理方法,它能够兼顾隶属与非隶属两方面信息,对于不确定性具有较强的表达能力,可以更全面地表达事件目标决策中的模糊信息,目前被广泛地应用于信息处理、管理决策与工程优化等诸多方案评价与决策中^[10-13]。在变薄拉深工艺质量优化过程中,由于影响工件质量的因素较多,且过程中存在诸多不确定性,所以,本文将 Vague 集优化决策方法引入变薄拉深工艺中进行工艺参数优化,将 Vague 集理论应用于 C15 不锈钢变薄拉深成形工艺,设计 $L_9(3^3)$ 正交试验,以变薄率、凹模锥角及拉深速度为工艺参数变量,以拉深力、残余应力与壁厚回弹量作为评价指标,在 Simufact. forming 有限元软件中进行变薄拉深成形工艺数值仿真,通过计算评价指标与最优理想值之间的相似度进行工艺参数优化,为 C15 不锈钢变薄拉深成形工艺的实际生产提供理论依据。

1 有限元仿真设计

1.1 有限元建模

在 Solidworks 软件中建立变薄拉深三维模型,在 Simufact. forming 软件中进行有限元仿真,采用 3 道次变薄拉深冷成形工艺,变薄拉深过程如图 1 所示。毛坯材料选用 C15 不锈钢,毛坯相关参数如表 1 所示。

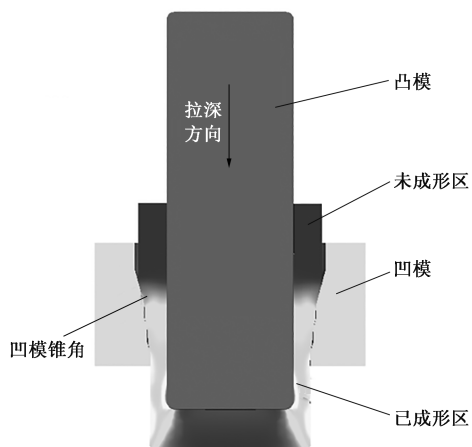


图 1 变薄拉深成形过程
Fig. 1 Ironing forming process

1.2 边界条件

C15 不锈钢变薄拉深成形过程中,金属材料在凹模锥角处受轴向拉应力发生拉深运动,受径向压

表 1 毛坯参数

Table 1 Blank parameters

参数	外径/ mm	壁厚/ mm	长度/ mm	底厚/ mm	弹性模量/ MPa	泊松 比	屈服强度/ MPa
数值	Φ69.4	10.6	70	15	215000	0.283	349.687

应力发生变薄运动,发生大面积塑性变形,所以,为更贴合实际摩擦状态,本次有限元仿真采用剪切摩擦模型^[3],如式(1)所示。

$$\tau = m\tau_{\text{yield}} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切摩擦力,MPa; m 为摩擦因数; τ_{yield} 为材料的剪切屈服应力,MPa。

C15 不锈钢实际变薄拉深过程中的润滑介质为特 211 润滑脂,考虑其实际润滑效果,所以,本次仿真将毛坯与凸模之间的摩擦因数设置为 0.1,毛坯与凹模之间的摩擦因数设置为 0.13。

本次有限元仿真采用 Ringmesh 网格划分,单元网格边长为 1.8 mm,共计划分为 43859 个网格,结果如图 2 所示。

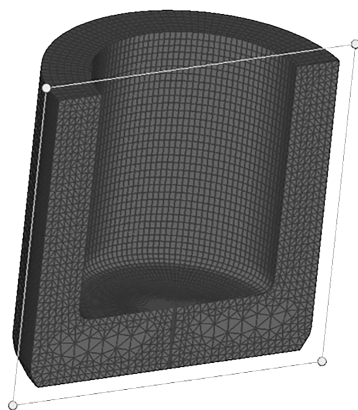


图 2 Ringmesh 网格划分
Fig. 2 Ringmesh meshing

1.3 正交试验设计

本次研究采用 Vague 集与正交试验结合的优化方案,设计 3 因素 3 水平正交试验表 $L_9(3^3)$,选取变薄率、凹模锥角、拉深速度为工艺参数变量,工艺参数水平如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	变薄率 $\varepsilon/\%$	凹模锥角 $\varphi/^\circ$	拉深速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
-1	30	9	10
0	36	15	14
+1	42	21	18

本次研究以拉深力 F 、残余应力 S 与壁厚回弹量 δ 作为 C15 不锈钢变薄拉深工件成形质量的评价指标, 结果见表 3。在变薄拉深过程中, 拉深力 F 较大时会降低模具寿命, 且导致工件表面质量较低。残余应力 S 是引发变薄拉深工件变形的关键因素, 在脱模与存储过程中随着残余应力的释放,

会导致工件变形, 残余应力越小, 则变形越小。壁厚回弹量 δ 是变薄拉深工件重要的尺寸精度指标, 由于变薄拉深过程中存在大量弹塑性形变, 会导致工件壁厚发生一定的弹性回复, 回弹量越小, 则实际壁厚与理论壁厚的偏差越小, 尺寸精度越高。

表 3 正交试验方案和结果
Table 3 Schemes and results of orthogonal test

试验序号	工艺参数			评价指标		
	变薄率 $\varepsilon/\%$	凹模锥角 $\varphi/(\circ)$	拉深速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	拉深力 F/kN	残余应力 S/MPa	壁厚回弹量 δ/mm
1	30 (-1)	9 (-1)	10 (-1)	582.406	783.411	0.092
2	30 (-1)	15 (0)	14 (0)	677.294	827.323	0.088
3	30 (-1)	21 (+1)	18 (+1)	886.593	853.631	0.082
4	36 (0)	9 (-1)	18 (+1)	691.348	830.554	0.089
5	36 (0)	15 (0)	10 (-1)	741.862	820.012	0.074
6	36 (0)	21 (+1)	14 (0)	840.264	825.783	0.064
7	42 (+1)	9 (-1)	14 (0)	744.979	796.482	0.070
8	42 (+1)	15 (0)	18 (+1)	817.524	810.046	0.062
9	42 (+1)	21 (+1)	10 (-1)	837.795	813.325	0.042

2 Vague 集优化与验证

1965 年创立了一种描述模糊现象的方法, 即模糊集理论^[11]。在模糊集理论中, 将待评价的对象与反映它的模糊概念作为一定的模糊集合, 建立他们之间适当的隶属函数, 通过模糊集合的有关运算和变换, 对模糊对象进行分析。1993 年, 在模糊集理论上进一步提出 Vague 集理论, 相比传统模糊集, Vague 集理论可以更好地处理具有不完整或不确定性信息的对象, Vague 集同时定义真假隶属函数两个值, 对于不确定性具有更强的表达能力^[12]。

2.1 Vague 集优化

Vague 集理论的核心是通过计算多个评价指标 Vague 集之间的相似度, 对评价指标之间存在的耦合关系进行分析优化。

假设存在两个 Vague 集: $O = [t_o(x_{ij}), 1 - f_o(x_{ij})]$, $P = [t_p(x_{ij}), 1 - f_p(x_{ij})]$ 。计算集合 O 与集合 P 之间的相似度, 相似度计算公式如式 (2) 所示:

$$M_{OP} = 1 - \left[\frac{t_o(x_{ij}) - t_p(x_{ij})}{1 + t_o(x_{ij}) + t_p(x_{ij})} + \frac{f_o(x_{ij}) - f_p(x_{ij})}{1 + f_o(x_{ij}) + f_p(x_{ij})} \right]$$

(2)

式中: M_{OP} 为集合 O 与集合 P 之间的相似度; x_{ij} 为第 i 个评价指标的第 j 个测量值; $t_o(x_{ij})$ 、 $t_p(x_{ij})$ 为集合 O 与集合 P 中第 i 个评价指标的第 j 个测量值的真隶函数; $f_o(x_{ij})$ 、 $f_p(x_{ij})$ 为集合 O 与集合 P 中第 i 个评价指标的第 j 个测量值的假隶函数。

本文利用 Vague 集对 C15 不锈钢变薄拉深工艺进行优化, 主要分为以下步骤。

- 步骤 1: 对评价指标数据进行 Vague 集转化;
- 步骤 2: 确定评价指标最优理想值;
- 步骤 3: 计算试验数据与评价指标最优理想值之间的相似度;
- 步骤 4: 计算各个评价指标的权重系数;
- 步骤 5: 计算总相似度;
- 步骤 6: 进行平均相似度极差计算分析, 得出最优工艺参数组合。

(1) Vague 集转化

对于评价指标的 Vague 集转化主要分为两种, 分别为效益型质量指标与成本型质量指标^[13], 本文评价指标拉深力 F 、残余应力 S 、壁厚回弹量 δ 皆属于成本型质量指标, 期望值均为越小越好, 故采用式 (3) 对表 3 中正交数据值进行 Vague 值转化处理, 结果如表 4 所示。

成本型质量指标 (望小型) Vague 值转化公式为:

特种成形栏目由北京机电研究所有限公司赞助刊出

表 4 Vague 集值

Table 4 Vague set values

序号	拉深力 $S_1(x_{1j})$		残余应力 $S_2(x_{2j})$		壁厚回弹量 $S_3(x_{3j})$	
	t_1	$1-f_1$	t_2	$1-f_2$	t_3	$1-f_3$
1	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000
2	0.688	0.733	0.375	0.385	0.080	0.107
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.20	0.260
4	0.642	0.689	0.329	0.338	0.060	0.081
5	0.476	0.527	0.479	0.489	0.360	0.446
6	0.152	0.179	0.397	0.407	0.560	0.652
7	0.466	0.517	0.814	0.820	0.440	0.532
8	0.227	0.263	0.621	0.631	0.600	0.690
9	0.160	0.188	0.574	0.585	1.000	1.000

$$S_i(x_{ij}) = [t_i(x_{ij}), 1 - f_i(x_{ij})] = \left[\frac{x_{imax} - x_{ij}}{x_{imax} - x_{imin}}, 1 - \frac{x_{ij}^Q - x_{imin}^Q}{x_{imax}^Q - x_{imin}^Q} \right] \quad (3)$$

式中: $S_i(x_{ij})$ 为第 i 个评价指标的 Vague 值集合; x_{imin} 为第 i 个评价指标集合中的最小值; x_{imax} 为第 i 个评价指标集合中的最大值; $t_i(x_{ij})$ 为第 i 个评价指标的第 j 个测量值的真隶属函数值; $f_i(x_{ij})$ 为第 i 个评价指标的第 j 个测量值的假隶属函数值; Q 为指数数值, 基本选择 2。

(2) 评价指标最优理想值确定

表 4 中的 Vague 集值为按成本型质量指标 (望小型) 的转化结果, 根据式 (4) 进行质量指标最优理想值确定^[13]。可以得到 C15 不锈钢变薄拉深的 3 个评价指标拉深力 F 、残余应力 S 、壁厚回弹量 δ 的最优理想值为: $[1, 1]$, $[1, 1]$, $[1, 1]$ 。

$$A_i^+ = \{\max t_i(x_{ij}), \max [1 - f_i(x_{ij})]\} \quad (4)$$

式中: A_i^+ 为第 i 个评价指标的最优理想值。

(3) 相似度计算

将式 (2) 及 3 个评价指标的最优理想值进行联立推导, 得到相似度计算式式 (5), 对表 4 中的 Vague 集值进行相似度计算, 结果如表 5 所示。

$$m_{ij} = 1 - \left[\frac{1 - t_i(x_{ij})}{2 + t_i(x_{ij})} + \frac{f_i(x_{ij})}{1 + f_i(x_{ij})} \right] \quad (5)$$

式中: m_{ij} 为第 i 个评价指标的第 j 个测量值的 Vague 集值相似度。

(4) 权重系数计算

本文采用变异系数法确定拉深力 F 、残余应力 S 、壁厚回弹量 δ 这 3 个评价指标的权重系数。变异系数法是一种客观赋权方法, 是通过对评价指标所

表 5 最优理想值的相似度及总相似度

Table 5 Similarity and total similarity of optimal ideal values

序号	相似度			总相似度
	m_{1j}	m_{2j}	m_{3j}	
1	1.000	1.000	0.000	0.203
2	0.673	0.356	0.086	0.119
3	0.000	0.000	0.211	0.028
4	0.627	0.313	0.065	0.108
5	0.467	0.452	0.372	0.142
6	0.155	0.376	0.570	0.126
7	0.458	0.782	0.452	0.181
8	0.229	0.586	0.609	0.158
9	0.163	0.541	1.000	0.197

包含的客观信息进行计算, 得到各评价指标的客观权重系数, 其评价指标的差异性越大, 所包含的信息量也就越大, 相对应的权重也就越大^[13]。

变异系数公式为:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} \quad (6)$$

权重公式为:

$$\gamma_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (7)$$

式中: V_i 为第 i 个评价指标的变异系数; σ_i 为第 i 个评价指标的标准差; \bar{x}_i 为第 i 个评价指标的平均相似度; γ_i 为第 i 个评价指标的权重系数; n 为评价指标总数。

C15 不锈钢变薄拉深 3 个评价指标的平均相似度、标准差、变异系数分为: $\bar{x}_i = 0.419$ 、 0.489 、 0.374 , $\sigma_i = 0.315$ 、 0.287 、 0.323 , $V_i = 0.752$ 、 0.587 、 0.865 。

因此, 根据式 (7) 计算, 拉深力 F 、残余应力 S 、壁厚回弹量 δ 这 3 个评价指标的权重系数为: $\gamma_i = 0.341$ 、 0.266 、 0.392 。

(5) 总相似度计算

根据 3 个评价指标的权重系数, 利用式 (8) 计算总相似度, 结果如表 5 所示。

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i m_{ij} \quad (8)$$

(6) 工艺参数优化

计算 C15 不锈钢变薄拉深各工艺参数的平均相

似度, 结果如表 6 所示。其中, 平均相似度越大, 则代表该工艺参数所对应的水平越好。通过 Vague 集多目标优化得到的最优工艺参数组合为: 变薄率为 42%、凹模锥角为 9°、拉深速度为 10 mm · s⁻¹。根据表 6 中的平均相似度极差分析可知, 各工艺参数对质量综合评价指标的影响顺序为: 拉深速度> 变薄率>凹模锥角。

表 6 各工艺参数的平均相似度

Table 6 Average similarity of each process parameter

工艺参数	平均相似度			极值	最优水平
	水平-1	水平 0	水平+1		
变薄率 ε	0.117	0.125	0.179	0.062	水平+1
凹模锥角 φ	0.164	0.140	0.142	0.024	水平-1
拉深速度 v	0.181	0.117	0.098	0.083	水平-1

2.2 试验验证

将本文 Vague 集优化得到的 C15 不锈钢变薄拉深最优工艺参数组合导入 Simufact. forming 软件进行仿真模拟, 在最优工艺参数组合下, 拉深力为 705.64 kN、残余应力为 803.02 MPa、壁厚回弹量为 0.056 mm, 均相对较小。将 Vague 集优化结果与正交试验结果进行对比, 结果如表 7 所示, 可以发现, 相比正交试验结果最大值, Vague 集优化后 3 个评价指标分别降低了 20.41%、5.93%、39.13%, 证明通过 Vague 集可对 C15 不锈钢变薄拉深工艺进行优化。

表 7 Vague 集优化结果与正交试验结果对比

Table 7 Comparison between Vague set optimal result and orthogonal test result

试验	拉深力	残余应力	壁厚回弹量
	F/kN	S/MPa	δ/mm
Vague 集	705.640	803.020	0.056
正交试验最大值	886.593	853.631	0.092
下降百分比/%	20.41	5.93	39.13

为了验证有限元仿真结果的可靠性, 分别选择正交试验 1、4 及最优工艺参数组合结果进行试验验证, 每组试验进行 3 次, 结果取平均值。残余应力采用 X 射线衍射仪测量; 壁厚回弹量采用深弓尺间接测量, 如图 3 所示, 对工件轴向 6 个截面处的壁厚进行测量, 取平均值。将试验结果与仿真结果进行对比, 结果如表 8 所示, 发现试验结果在数值上



图 3 变薄拉深工件壁厚测量

Fig. 3 Wall thickness measurement of ironing workpiece

表 8 仿真与试验结果对比

Table 8 Comparison between simulation and test results

试验 序号	残余应力 S			壁厚回弹量 δ		
	仿真值/ MPa	试验值/ MPa	相对误差/ %	仿真值/ mm	试验值/ mm	相对误差/ %
1	783.411	834.261	6.49	0.092	0.099	7.61
4	830.554	878.614	5.79	0.089	0.093	4.49
最优 组合	803.020	851.041	5.98	0.056	0.059	5.36

略大, 但规律上保持一致。这是由于实际变薄拉深过程中液压机会存在一定的退让, 且变薄拉深过程中工件与凹模之间的摩擦状态较为复杂, 多种摩擦状态交织变换, 综合摩擦因数要大于仿真结果, 弹塑性变形量更大, 使得残余应力与壁厚回弹量略大, 但仿真结果与试验结果之间的相对误差皆不大于 7.61%, 证明 C15 不锈钢变薄拉深的有限元仿真结果具有良好的可靠性。

3 结论

(1) 在 C15 不锈钢变薄拉深成形工艺中, 通过设计 $L_9(3^3)$ 正交试验, 采用变异系数法与 Vague 集结合的方法进行多目标优化, 得到最优变薄拉深工艺参数组合为: 变薄率为 42%、凹模锥角为 9°、拉深速度为 10 mm · s⁻¹。此时 C15 不锈钢变薄拉中的拉深力为 705.64 kN、残余应力为 803.02 MPa、壁厚回弹量为 0.056 mm, 均相对较小。Vague 集可有效实现 C15 不锈钢变薄拉深工件的质量优化。

(2) 在 C15 不锈钢变薄拉深成形工艺中, 工艺

参数对变薄拉深工件综合质量的影响顺序为:拉深速度>变薄率>凹模锥角。且试验证明,仿真结果具有较好的可靠性,仿真与试验结果的最大相对误差(壁厚回弹量)不大于 7.61%,可以为实际生产提供参考依据。

参考文献:

- [1] 南海,端木樊杰,李静媛,等.变薄拉深对 430 不锈钢表面起皱的影响[J].钢铁,2019,54(1):56-62.
Nan H, Duanmu F J, Li J Y, et al. Effect of thinning drawing on surface ridging of 430 stainless steel[J]. Iron and Steel, 2019, 54(1): 56-62.
- [2] 杨利,高大伟,王丹冰,等.薄壁深孔筒形件变薄拉深工艺设计[J].模具技术,2015,5:46-49.
Yang L, Gao D W, Wang D B, et al. Ironing process for the deep cylindrical and thin-wall part[J]. Die and Mould Technology, 2015, 5: 46-49.
- [3] 肖善超.弹壳多模一次连续变薄拉深工艺研究[D].秦皇岛:燕山大学,2012.
Xiao S C. Research on Multi-mode-one-off Ironing Process for Cartridge Cas[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [4] 邵振江,胡鹏飞,张建莹,等.局部变薄拉深冲压件成形工艺研究[J].机械设计,2018,35(1):320-321.
Shao Z J, Hu P F, Zhang J Y, et al. Forming process research on locally thinned drawing stamping parts[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(1): 320-321.
- [5] 李妍妍,白凤梅,宋孟,等.基于 ABAQUS 的模具参数对深筒件多步拉深过程的影响研究[J].热加工工艺,2022,51(13):86-89.
Li Y Y, Bai F M, Song M, et al. Study on effect of die parameters on multi-step drawing process of cylinder parts based on ABAQUS[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(13): 86-89.
- [6] 杜冰,汤胜强,黄秀东,等.高盒形件多道次变薄拉深工艺机理研究及数值模拟模型确立[J/OL].机械工程学报:1-15[2022-11-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220919.1706.024.html>.
Du B, Tang S Q, Huang X D, et al. Research on the mechanism of multi-pass ironing drawing process of high box-shaped parts and establishment of numerical simulation model[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering: 1-15[2022-11-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220919.1706.024.html>.
- [7] 王瑞,石明全,肖建军,等.基于正交实验的铝瓶盖冲压成型参数优化[J].机械设计与制造,2016,9:210-213.
Wang R, Shi M Q, Xiao J J. Optimization for stamping process parameters of aluminum bottle cap based on orthogonal experiments[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016, 9: 210-213.
- [8] 张跃,陆广华,蒋勇,等.阶梯盒件拉深成形有限元分析与正交优化[J].热加工工艺,2015,44(9):158-161.

Zhang Y, Lu G H, Jiang Y, et al. Finite element analysis and orthogonal optimization of ladder box pieces deep drawing forming[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(9): 158-161.

- [9] 王俊彪,贾建军.多道次变薄拉深的模拟与优化设计[J].西北工业大学学报,1997,3(15):348-354.
Wang J B, Jia J J. The simulation and optimization multi-step ironing process[J]. Journal of Northwestern Polytechnic University, 1997, 3(15): 348-354.
- [10] 薛茂远,梅益,罗宁康,等.基于模糊集的车用升降器开关面板注射成型保压曲线优化研究[J].中国塑料,2021,35(10):76-82.
Xue M Y, Mei Y, Luo N K, et al. Optimization of pressure-holding curve for injection molding of automotive lifter switch panel oriented to Vague set[J]. China Plastics, 2021, 35(10): 76-82.
- [11] 崔春生,曹艳丽,邱闯闯,等.基于证据理论和 Vague 集的多属性群决策方法研究[J].运筹与管理,2021,30(11):1-5.
Cui C S, Cao Y L, Qiu C C, et al. Research on multi-attribute group decision-making method based on evidence theory and Vague sets[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(11): 1-5.
- [12] 王鸿绪.单值数据转化为 Vague 值数据的定义和转化公式[J].计算机工程与应用,2010,46(24):42-44.
Wang H X. Definition and transforming formulas from single valued data to Vague valued data[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(24): 42-44.
- [13] 舒服华.Vague 集在 ZL201 消失模铸造工艺参数优化中的应用[J].铸造,2017,66(2):161-164.
Shu F H. Optimization of process parameters for ZL201 lost foam casting based on Vague set[J]. Foundry, 2017, 66(2): 161-164.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部