

## 基于 Dynaform 的凸缘圆筒件拉深工艺有限元分析

于传浩, 张 毅

(武汉工程大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430205)

**摘要:** 针对带凸缘圆筒件在拉深试模生产中出现的凸缘起皱、零件拉裂问题, 通过 Dynaform 软件对圆筒件的拉深成形过程进行建模与仿真计算, 根据模拟结果预测了可能出现缺陷的区域, 分析了影响圆筒件成形效果的关键因素。为消除缺陷, 研究了压边力、拉深速度、摩擦因数、凸凹模间隙 4 个因素对凸缘起皱及最大减薄率的影响。以工件最大减薄率最小为目标, 采用正交试验方法, 获得了各影响因素对厚度指标的关键程度, 并结合影响趋势图获得了最优工艺参数组合, 即压边力为 700 kN、拉深速度为  $5500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.100、凸凹模间隙为 2.10 mm。试模后获得了合格的产品, 凸缘起皱、零件拉裂问题得到明显改善, 有限元模拟结果正确可靠, 具有一定的借鉴性。

**关键词:** 凸缘圆筒件; 拉深工艺; 起皱; 拉裂; 压边力; 正交试验

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.008

**中图分类号:** TG386.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0056-06

## Finite element analysis on drawing process for cylinder parts with flange based on Dynaform

Yu Chuanhao, Zhang Yi

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** For the problems of flange wrinkling and part cracking in the test die production of drawing for the cylinder parts with flange, the drawing process of cylinder parts was modeled, simulated and calculated by software Dynaform. According to the simulation results, the possible defect areas were predicted, and the key factors affecting the forming effect of cylinder parts were analyzed. In order to eliminate the defects, the influences of blank holder force, drawing speed, friction coefficient and clearance between punch and die on the flange wrinkling and the maximum thinning rate were studied. The aim was to minimum the maximum thinning rate of workpiece, the key degrees of various influencing factors on the thickness index were obtained by orthogonal test method, and combined with the influence trend diagram, the optimal combination of process parameters was obtained as the blank holder force of 700 kN, the drawing speed of  $5500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , the friction coefficient of 0.100, and the clearance between punch and die of 2.10 mm. After the test die, the qualified products were obtained, and the flange wrinkling and part cracking problems were obviously improved. Thus, the finite element simulation results are correct and reliable, which has a certain reference.

**Key words:** cylinder parts with flange; drawing process; wrinkling; cracking; blank holder force; orthogonal test

拉深工艺是利用模具将平板毛坯加工为开口空心件的一种重要的板材成形加工方法<sup>[1]</sup>, 是冲压工艺的基本工艺之一, 在航天航空、汽车、家用电器等领域应用广泛<sup>[2-3]</sup>。在竞争激烈的市场环境下, 企业要想立足, 其产品质量的优劣起着决定性的作用, 因此, 对拉深工艺的研究具有极其重要的意义。在拉深成形工艺中, 零件的成形质量受到诸多因素

的影响, 例如坯料形状、凸凹模结构、压边力、压边方式、摩擦因数等<sup>[4-5]</sup>, 因此, 需要获得各因素之间的最佳组合才能成形出质量最佳的拉深件。

而传统的凭借单一经验的试验法弊端严重, 周期长、试验成本高, 随着有限元技术的发展, 通过该技术的应用, 结合设计者的经验及实际工艺试验, 在工艺研究方面起到了非常便捷、有效的作用。熊文韬等<sup>[6]</sup>针对某种汽车幅板在拉深过程中出现的回弹问题, 采用 Dynaform 软件对其拉深成形过程进行了仿真模拟, 并结合正交试验、神经网络遗传算法、拉丁超立方抽样等技术确定了关键工艺参数并进行了优化, 最终有效地降低了零件的回弹量, 满足了

收稿日期: 2020-12-17; 修订日期: 2021-03-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51605343)

作者简介: 于传浩 (1972-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: yuchuanhao147@163.com

生产要求。靳阳<sup>[7]</sup>研究了内凹形零件的冲压成形过程，并以壁厚为评价指标，对冲压成形参数进行了优化，最后将最优模拟结果与试模生产结果进行了对比，验证了模拟结果的准确性；杨树财等<sup>[8]</sup>为获得电机壳体的最优拉深工艺参数，利用 Dynaform 软件对正交试验获得的各组试验分别进行数值仿真，通过极差分析确定了各参数的重要性，并以厚度为优化目标，最终获得了最佳参数组合。

本文借鉴上述方法，以带凸缘圆筒件为研究对象，针对其在拉深成形过程中出现的凸缘起皱、拉裂等问题，采用 Dynaform 对拉深成形过程进行模拟，分析可能出现缺陷的区域，通过正交试验法，研究了压边力、拉深速度等工艺参数对凸缘起皱及最大减薄率的影响，确定了各参数的关键程度，并结合影响趋势图获得了最佳的参数组合。

1 带凸缘圆筒件工艺分析

带凸缘圆筒件如图 1a 所示，材料为 6016 铝合金，其力学性能如表 1 所示。料厚  $t=2\text{ mm}$ ，凸缘直

径  $d_{\text{凸}}=\Phi 350\text{ mm}$ ，筒部外径  $d_{\text{筒}}=\Phi 250\text{ mm}$ ，零件拉深高度  $h=115\text{ mm}$ ，毛坯直径  $D_0=\Phi 495\text{ mm}$ ，凸缘相对直径  $d_{\text{凸}}/d_{\text{筒}}=1.4$ ，坯料相对厚度  $t/D_0\times 100=0.4$ 。由文献 [9] 可知，拉深最大相对高度为 0.48。经计算可知，该拉深件的相对高度  $h/d_{\text{筒}}=0.46$ ，小于 0.48，因此，只需一次拉深即可成形。其总体工艺路线为：下料→拉深一切边→整形。根据式 (1) 初步确定压边力为 443~665 kN。

$$F_{\text{压}}=\pi/4\times [D_0^2-(d_{\text{筒}}+2R_{\text{凹}})^2]\times q\quad (1)$$

式中： $F_{\text{压}}$  为压边力，kN； $R_{\text{凹}}$  为凹模圆角半径，mm； $q$  为单位面积上的压边力，查文献 [9] 可知， $q$  为 0.8~1.2 MPa。

经初步试模生产获得的圆筒件的起皱现象严重，筒体下部有轻微拉裂现象，如图 1b 所示，而产品要求最终成形件的筒体最大减薄率不得超过 30%，采用有限元软件 Dynaform 对圆筒件的拉深过程进行建模仿真，旨在直观地了解零件产生缺陷的原因及其他可能出现缺陷的区域，进而有目的地进行工艺优化。

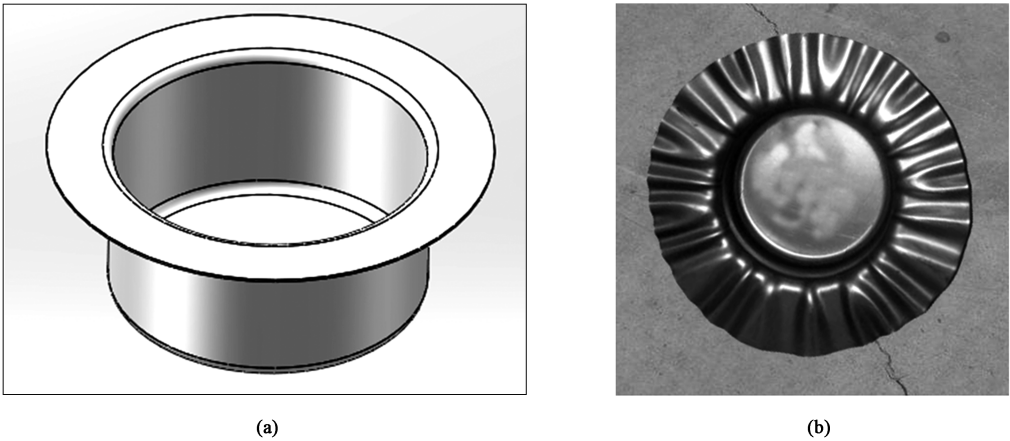


图 1 零件三维图 (a) 及不良零件图 (b)  
Fig. 1 3D drawing of part (a) and drawing of defective part (b)

表 1 6016 铝合金的力学性能参数  
Table 1 Mechanical property parameters of 6016 aluminum alloy

参数	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	泊松比	硬化指数	各向异性参数		
						$r_0$	$r_{45}$	$r_{90}$
数值	217	123	25	0.33	0.25	0.78	0.54	0.68

2 有限元模型建立及缺陷分析

采用 Solidworks 进行坯料、凸模、凹模的建模，

并保存为 IGES 格式导入 Dynaform 软件中，分别进行网格划分，在材料库中选择毛坯材料为 AA6016 铝合金，通过凹模分离出压边圈，调整好各工具之间的位置关系，定义凸模速度为  $5000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、拉

深行程为 115 mm, 按上述计算设置压边力大小为 600 kN, 建立的有限元模型如图 2 所示, 通过动画预览, 模拟模具动作是否正确, 确认后通过 Ly-Dyna 进行计算。计算结束后, 通过后处理文件, 获

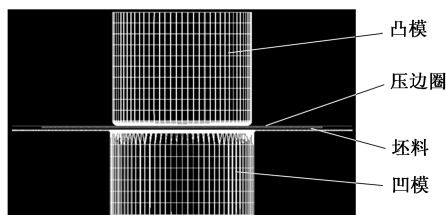


图 2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element model

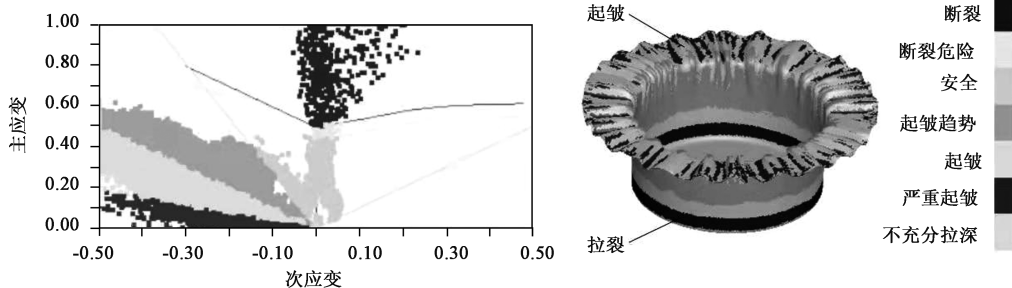


图 3 成形极限图  
Fig. 3 Forming limit diagram

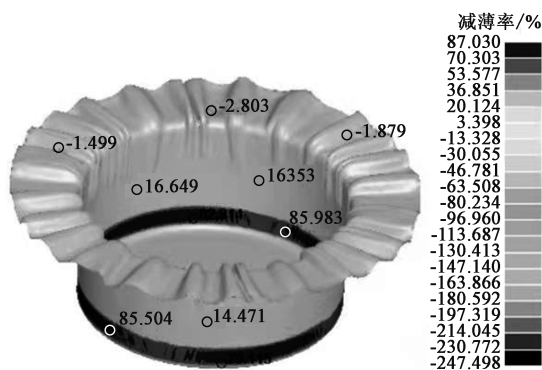


图 4 减薄率分布图  
Fig. 4 Distribution diagram of thinning rate

### 3 正交试验设计及参数选优

#### 3.1 因素选取及正交试验设计

带凸缘圆筒件在拉深成形过程中, 受模具结构、润滑条件、外部因素等多方面的影响。模具结构如图 5 所示, 主要工艺参数为凸凹模间隙  $D$ 。凸凹模间隙过大时, 易造成材料流动不均匀, 使工件侧壁沿周向产生起皱, 并且零件侧壁会出现一定的锥度;

得 FLD 成形极限图及减薄率分布图, 分别如图 3 和图 4 所示。从图 3 中可以明显看出, 零件凸缘部分起皱严重且筒体下部圆角附近存在拉裂现象, 与上述试模结果一致。从图 4 中可以看出, 凸缘部分板料厚度有微量的增厚, 而零件成形后最大减薄率达到 87%, 筒体下部附近板料减薄率均大于 30%, 拉裂风险极大。由于从零件的工艺分析中得出该产品能够实现一次拉深成形, 因此, 导致零件凸缘起皱及拉裂的原因根本在于压边力、拉深速度、凸凹模间隙等工艺参数设置的不合理<sup>[10]</sup>, 为尽量减少试验次数, 采用正交试验法<sup>[11]</sup>, 选取关键因素进行试验, 进行拉深工艺参数的优选。

而凸凹模间隙过小时, 易造成工件严重变薄, 导致工件拉裂。润滑条件的主要工艺参数为工件与模具间的摩擦因数  $f$ 。外部因素的主要工艺参数为压边力  $F_{\text{压}}$  和拉深速度  $V$ , 其中: 压边力的选择可根据上述工艺分析中计算获得的压边力区间进行选择, 压边力过大, 易造成零件拉裂, 而压边力过小则易出现起皱; 而拉深速度主要影响材料的流动速度, 材料流速的不合理同样会造成零件的起皱与开裂。因此, 本文选取凸凹模间隙  $D$ 、摩擦因数  $f$ 、压边力  $F_{\text{压}}$  以及拉深速度  $V$  作为试验因素, 每个因素取 4 个水平, 建立 4 因素 4 水平正交试验表, 如表 2 所示。

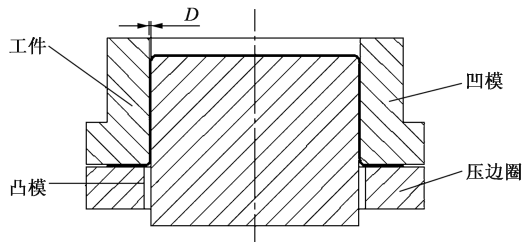


图 5 模具结构图  
Fig. 5 Structure diagram of die

表 2 正交试验方案及起皱程度、最大减薄率模拟结果

试验号	因素				模拟结果	
	压边力 $F_{\text{压}}/\text{kN}$	拉深速度 $V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	摩擦因数 $f$	凸凹模间隙 $D/\text{mm}$	起皱程度	最大减薄率/%
1	500	4500	0.100	2.05	起皱严重	31.23
2	500	5000	0.125	2.10	起皱严重	59.62
3	500	5500	0.150	2.15	起皱严重	73.17
4	500	6000	0.175	2.20	起皱严重	79.87
5	600	4500	0.150	2.20	起皱严重	58.14
6	600	5000	0.175	2.15	起皱严重	75.33
7	600	5500	0.100	2.10	起皱严重	28.53
8	600	6000	0.125	2.05	起皱严重	46.39
9	700	4500	0.175	2.10	起皱不明显	41.54
10	700	5000	0.150	2.05	起皱不明显	52.37
11	700	5500	0.125	2.20	起皱不明显	28.36
12	700	6000	0.100	2.15	起皱不明显	26.37
13	800	4500	0.125	2.15	无起皱	90.64
14	800	5000	0.100	2.20	无起皱	53.38
15	800	5500	0.175	2.05	无起皱	90.24
16	800	6000	0.150	2.10	无起皱	79.35

3.2 模拟结果分析

通过 Dynaform 软件对正交试验各方案分别进行模拟,从表 2 中可知:压边力为 500 和 600 kN 时,工件成形后起皱严重,这与通过经验公式计算获得的压边力进行产品试模结果一致;压边力为 700 kN 时,工件起皱不明显;压边力为 800 kN 时,工件无起皱,但此时压边力选取已过大,拉深困难,工件被拉裂。通过极差分析来反映各试验因素对工件最大减薄率的影响程度,其结果如表 3 所示,极差值越大,代表对应的因素越关键<sup>[12]</sup>。因此,各因素对工件最大减薄率的重要程度排列为:压边力  $F_{\text{压}} >$  摩擦因数  $f >$  凸凹模间隙  $D >$  拉深速度  $V$ 。图 6 为各试验因素对最大减薄率的影响趋势图,从图 6 中可以看出,当压边力为 700 kN (由上述分析可知该压边力下工件起皱不明显)、拉深速度为  $5500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.100、凸凹模间隙为 2.10 mm 时,工件最大减薄率在各水平内均最小,即为最优参数组合。

3.3 最优参数组合验证

采用最优参数组合进行建模仿真,通过 Dynaform 软件进行求解,获得的工件成形极限图及减薄率分布图,分别如图 7 和图 8 所示。从图 7 中可

表 3 最大减薄率极差分析结果

Table 3 Range analysis results of maximum thinning rate				
参数	压边力 $F_{\text{压}}/\text{kN}$	拉深速度 $V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	摩擦因数 $f$	凸凹模间隙 $D/\text{mm}$
均值 1/%	60.972	55.388	34.878	55.058
均值 2/%	52.097	60.175	56.252	52.260
均值 3/%	37.160	55.075	65.757	66.377
均值 4/%	78.403	57.995	71.745	54.938
极差	41.243	5.100	36.867	14.117
最优水平	37.160	55.075	34.878	52.260
对应参数	700	5500	0.100	2.10

以看出,零件凸缘部分起皱现象较改进前得到明显改善,仅边缘有略微起皱,由于后续还需切边,因此影响不大,且筒体无拉裂现象,成形质量良好。从图 8 中可以看出,零件的最大减薄率为 24.902%,小于 30%,满足要求,且小于表 2 中各组试验组合结果,为最优方案。采用液压机进行拉深试模试验,获得的带凸缘圆筒件如图 9 所示,产品成形质量较好,无起皱、拉裂等不良现象,经检验,各部位的厚度减薄率均满足工艺要求,且与冲压仿真结果中的减薄率分布情况吻合度较高,表明

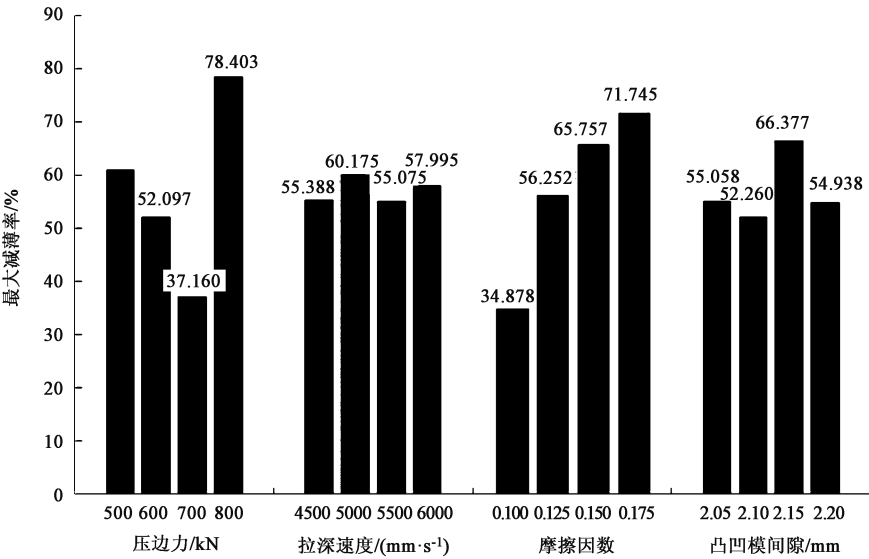


图 6 各试验因素对最大减薄率的影响趋势图  
Fig. 6 Influence trend chart of test factors on maximum thinning rate

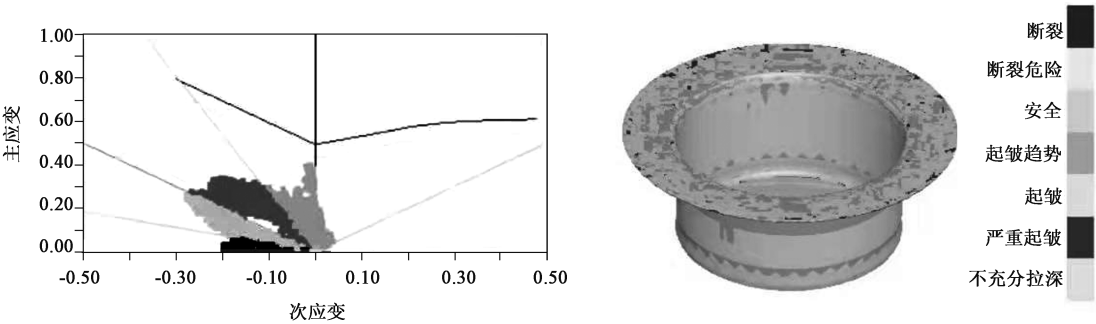


图 7 最优方案成形极限图  
Fig. 7 Forming limit diagram of optimal scheme



图 8 最优方案减薄率分布图  
Fig. 8 Distribution diagram of thinning rate for optimal scheme

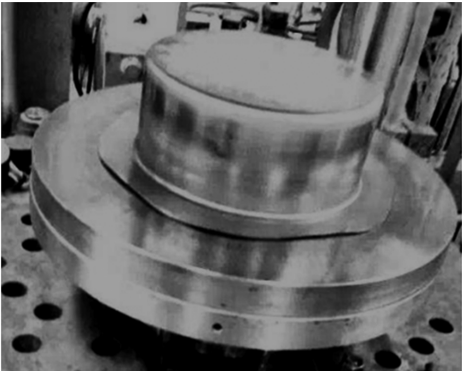


图 9 试模结果  
Fig. 9 Result of test die

有限元技术应用于产品工艺设计优化是可靠的，较好地解决了凸缘圆筒件在实际拉深过程中出现的凸缘起皱、零件拉裂问题。

4 结语

采用 Dynaform 软件对带凸缘圆筒件的拉深成形

过程进行了建模与仿真,直观地了解了零件可能出现起皱、拉裂等缺陷的区域,分析了影响产品质量的关键因素,并通过正交试验法,获得了各因素对工件最大减薄率影响的关键程度,即压边力>摩擦因数>凸凹模间隙>拉深速度。并结合影响趋势图分析,获得了凸缘圆筒件的最优拉深工艺参数,即压边力大小为 700 kN、拉深速度为  $5500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.100、凸凹模间隙为 2.10 mm。最后通过试模生产验证了最优参数的合理性以及仿真结果的正确性,凸缘圆筒件在实际生产中出现的起皱与拉裂问题得到了很好的解决,对类似冲压类产品工艺缺陷的解决提供了良好的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 付泽民, 乔涛涛, 张锁怀, 等. 基于变压边力的方盒形工件拉深工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (3): 106-109.  
Fu Z M, Qiao T T, Zhang S H, et al. Study on drawing process of square box workpiece based on variable blank holder force [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (3): 106-109.
- [2] 张强, 沈忠良, 李国富. 基于正交试验的半球形拉深成形工艺参数优化 [J]. 机械设计与研究, 2020, 36 (1): 138-140, 148.  
Zhang Q, Shen Z L, Li G F. Optimization of process parameters of hemispherical deep drawing based on orthogonal test [J]. Machine Design & Research, 2020, 36 (1): 138-140, 148.
- [3] 王东涛. 缸体拉深工艺分析与成形优化的研究 [J]. 模具技术, 2019, (5): 26-30.  
Wang D T. Study on deep drawing process analysis and forming optimization of a cylinder body [J]. Die and Mould Technology, 2019, (5): 26-30.
- [4] 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.
- [5] 温俊杰. 毛坯形状及压边力对方盒形件拉深粘模行为的影响 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.  
Wen J J. Effect of Blank Shape and Blank Holder Force on the Galling Behavior in Square Cup Drawing Produce [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [6] 熊文韬, 谢三山, 黄兆飞, 等. 基于神经网络遗传算法函数寻优与回弹补偿技术的某型汽车前幅拉延成形优化 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6): 38-45.  
Xiong W T, Xie S S, Huang Z F, et al. Optimization of drawing forming for front panel of an automobile based on neural network genetic algorithm function optimization and SCP technology [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 38-45.
- [7] 靳阳. 基于正交试验的内凹形零件成形工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 105-109.  
Jin Y. Optimization on forming process parameters for concave part based on orthogonal test [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 105-109.
- [8] 杨树财, 李强, 杨松涛. 基于 Dynaform 数值模拟的电机壳体拉深成形参数影响规律研究 [J]. 航空精密制造技术, 2018, 54 (3): 1-6.  
Yang S C, Li Q, Yang S T. Research on influence law of motor shell drawing parameters based on dynaform numerical simulation [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2018, 54 (3): 1-6.
- [9] 华玉培, 李恒权. 冷冲压及模具设计 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1990.  
Hua Y P, Li H Q. Cold Stamping and Die Design [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1990.
- [10] 曹克浩, 杨凤霞, 孙刚. 基于 Dynaform 的盒形件拉深仿真分析 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (11): 2757-2759.  
Cao K H, Yang F X, Sun G. Simulation analysis on rectangle box in deep drawing process based on dynaform software [J]. Foundry Technology, 2015, 36 (11): 2757-2759.
- [11] 褚忠, 瞿伟, 刘铭心, 等. 冷挤压模具磨损优化设计 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (12): 2895-2899.  
Chu Z, Qu W, Liu M X, et al. Optimum design of cold extrusion die wear [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (12): 2895-2899.
- [12] 吴淑芳, 王培安, 郭欢欢, 等. 基于正交试验的梭心冷挤压成形工艺研究及模具优化设计 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2018, 37 (1): 92-101.  
Wu S F, Wang P A, Guo H H, et al. Bobbin cold extrusion forming process and mold optimum design based on orthogonal test [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2018, 37 (1): 92-101.

## 《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益,坚决抵制学术不端行为,积极倡导优良学风,努力为学术创新营造良好氛围,本刊郑重声明:对一稿多投,重复发表,存在署名有争议,引用他人著述未注明出处,抄袭、剽窃、弄虚作假,或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章,坚决拒绝刊登。一经发现,立即撤稿,并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚,情节严重者,将以适当方式予以公布,该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部