

# 基于 Deform 的汽车法兰盘体零件锻造成形工艺

黄晶晶

(盐城工业职业技术学院 汽车与交通学院, 江苏 盐城 224005)

**摘要:** 精密锻件在工艺设计初期通常存在多种成形工艺方案, 为确定最合适的工艺, 以汽车法兰盘体零件为研究对象, 应用 CAE 分析软件 Deform-3D 进行了热力耦合数值模拟。由于零件结构复杂, 通过分析可知无法一次成形, 结合塑性成形技术, 初步确定了 3 种成形工艺方案。首先, 从锻件的成形质量及模具使用寿命方面进行了全面的分析和比较。然后, 通过建立数学评估模型从应力值、应变值、模具载荷值、零件损伤值等多方面进行优选。结果表明, 方案 3 在锻件质量、模具使用寿命等各方面均存在优势。最后, 采用方案 3 成形工艺进行了生产试验, 获得的法兰盘体零件成形饱满, 外形良好、无缺陷。通过有限元技术与数学模型的有机结合, 能够高效地获得最佳工艺, 大大降低试模成本。

**关键词:** 精密锻件; 法兰盘体; 模具磨损; 教学评估模型; CAE 分析

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.011

**中图分类号:** TG316.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0081-06

## Forging process for automobile flange body part based on Deform

Huang Jingjing

(College of Automobile and Transportation, Yancheng Polytechnic College, Yancheng 224005, China)

**Abstract:** In the early stage of process design, there are many kinds of forming process schemes for precision forgings. In order to determine the most suitable process, for automobile flange body part, the thermo-mechanical coupling numerical simulation was carried out by CAE analysis software Deform-3D. Due to the complex structure of part, it could not be formed at one time by analysis, and combined with the plastic forming technology, three forming process schemes were preliminarily determined. Firstly, the forming quality of forgings and the service life of mold were comprehensively analyzed and compared. Then, the stress value, strain value, load value of mold and damage value of part were optimized by established mathematical evaluation model. The results show that scheme 3 has advantages in forgings quality, service life of mold and other aspects. Finally, the production test was carried out by using the forming process of scheme 3, and the flange body parts were fully formed with good shape and without defects. Thus, through the organic combination of finite element technology and mathematical model, the best process could be obtained efficiently, and the cost of die test is greatly reduced.

**Key words:** precision forgings; flange body; die wear; mathematical evaluation model; CAE analysis

精密锻件在外形结构方面通常比较复杂, 从坯料到成品的成形过程中变形量较大, 在实际生产中难以一次成形, 通常需要通过多道工序才能获得满足尺寸要求和精度要求的零件<sup>[1-2]</sup>, 而工艺设计的难点就在于中间工序的确定, 如何合理地分配各道工序间材料的变形程度, 获得最合适的工艺方案, 是每个科研人员重点研究的问题。

金属的塑性成形问题是一个复杂多变的非线性问题, 评判工艺好坏的因素很多, 包括设备吨位的选择、锻件的成形质量、模具的使用寿命等<sup>[3-4]</sup>,

而以往通常是经过不断的工艺计算、实际试验、试错排除、反复修正来确定工艺, 工作量大、周期长、成本高, 且不确定性较高, 很难获得最优工艺。近年来, 随着计算机仿真技术的不断完善, 有限元技术弥补了传统的弊端, 在工艺优化问题上得到广泛应用, 大大降低了试模成本。柴民杰等<sup>[5]</sup>运用有限元软件 ANSYS 对锥齿轮轴的两种模锻工艺进行了研究, 发现采用两步成形工艺能有效地解决一次成形工艺中出现的齿部充不满问题, 并且降低了模具的载荷; 陈凌翔等<sup>[6]</sup>通过 Deform-3D 对六角球销的锻粗失稳问题进行了研究, 基于多目标优化, 确定了合适的预成形方案, 获得了符合性能要求的零件, 降低了试模成本; 姜天亮等<sup>[7]</sup>采用有限元技术模拟了花键轴的成形过程, 针对齿部及锻粗部位容易产

收稿日期: 2021-04-21; 修订日期: 2021-07-26

基金项目: 2022 年江苏省产学研合作项目 (BY2022473)

作者简介: 黄晶晶 (1989-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: 755458419@qq.com



式中:  $W$  为模具磨损深度, mm;  $P$  为接触压力, MPa;  $v$  为金属流动速度, ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $t$  为时间, s;  $H(T)$  为不同温度  $T$  下的模具硬度, HRC,  $H(T) = 9216.4T^{-0.505}$ ;  $K(T)$  为不同温度  $T$  下的磨损系数,  $K(T) = [29.29\ln(T) - 168.73] \times 10^{-6}$ 。

## 2.2 仿真结果分析

由于3种方案中工序1获得的锻件的形状相同, 因此, 不将其进行比较, 主要对比工序3及工序4中锻件的成形情况及模具的磨损情况。由仿真结果可知, 3种方案均可成形法兰盘体零件, 各方案预锻、终锻仿真后锻件的整体温度分布情况如图3所示。由图3可以看出, 3种方案中各工序的温度分布均表现为心部温度高而外表面温度低, 锻件的上部分温度较高而下部分温度较低。其原因为: 锻造时, 锻件表面与模具及空气间存在热交换, 而锻件心部承受挤压, 并且不与模具、空气接触, 散热较慢, 使得锻件的心部温度高于表面温度; 同时, 锻件是由下至上逐渐成形的, 因此, 下部分材料最先接触模具, 散热时间更长, 并且由锻件结构可知, 上部分材料的变形更为剧烈, 变形时产生的热量更多, 使得锻件的上部分温度高于下部分温度, 该规律与实际锻造结果一致。总体分析可知, 各方案中工序3和工序4中锻件的最高温度和最低温度的差距不大, 温差相近, 冷却后应力相近, 锻件的质量

差别不大。

各方案中工序3和工序4的上、下模具的锻后磨损分布情况如图4和图5所示。工序3中各模具的磨损明显小于工序4中各模具的磨损, 3种方案的工序3中上模单次最大磨损深度分别为  $3.81 \times 10^{-6}$ 、 $4.09 \times 10^{-6}$  和  $4.11 \times 10^{-6}$  mm, 下模单次最大磨损深度分别为  $4.14 \times 10^{-6}$ 、 $4.20 \times 10^{-6}$  和  $4.09 \times 10^{-6}$  mm。其中, 方案1的上模磨损深度最小, 方案3的上模磨损深度最大, 下模磨损深度最小。但是, 考虑到方案3的上、下模具的磨损深度非常接近, 模具使用寿命更为接近, 同时换模更利于保证锻件的质量, 长期来看方案3的换模次数也比方案1和方案2更少。3种方案中工序4的上模单次最大磨损深度分别为  $3.57 \times 10^{-5}$ 、 $3.78 \times 10^{-5}$  和  $3.44 \times 10^{-5}$  mm, 下模单次最大磨损深度分别为  $2.71 \times 10^{-5}$ 、 $2.95 \times 10^{-5}$  和  $2.61 \times 10^{-5}$  mm, 可知方案3中工序4的上、下模具的磨损深度均最小, 寿命更长。综合数值仿真结果分析可知, 采用方案3更佳。

## 3 基于数学评估模型的工艺优化

在进行工艺参数优化时, 通常采用正交试验、响应面模型、粒子群算法、神经网络等方法, 而本文主要进行的是多工艺之间的优化, 因此, 本文采

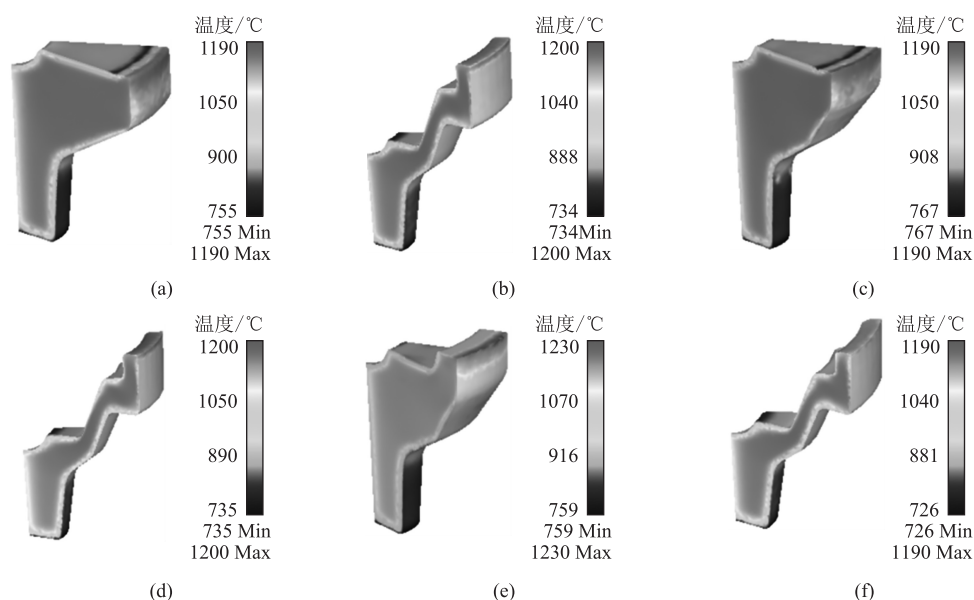


图3 锻件温度分布

(a) 方案1工序3 (b) 方案1工序4 (c) 方案2工序3 (d) 方案2工序4 (e) 方案3工序3 (f) 方案3工序4

Fig. 3 Temperature distributions of forgings

(a) Process 3 in scheme 1 (b) Process 4 in scheme 1 (c) Process 3 in scheme 2 (d) Process 4 in scheme 2

(e) Process 3 in scheme 3 (f) Process 4 in schemes 3

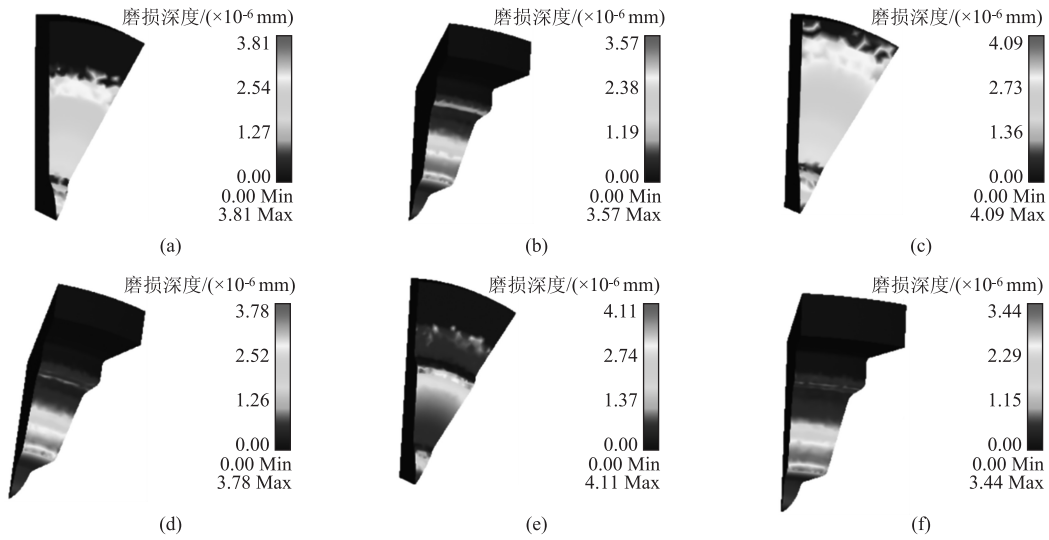


图 4 上模磨损分布情况

(a) 方案 1 工序 3 (b) 方案 1 工序 4 (c) 方案 2 工序 3 (d) 方案 2 工序 4 (e) 方案 3 工序 3 (f) 方案 3 工序 4

Fig. 4 Wear distributions of upper die

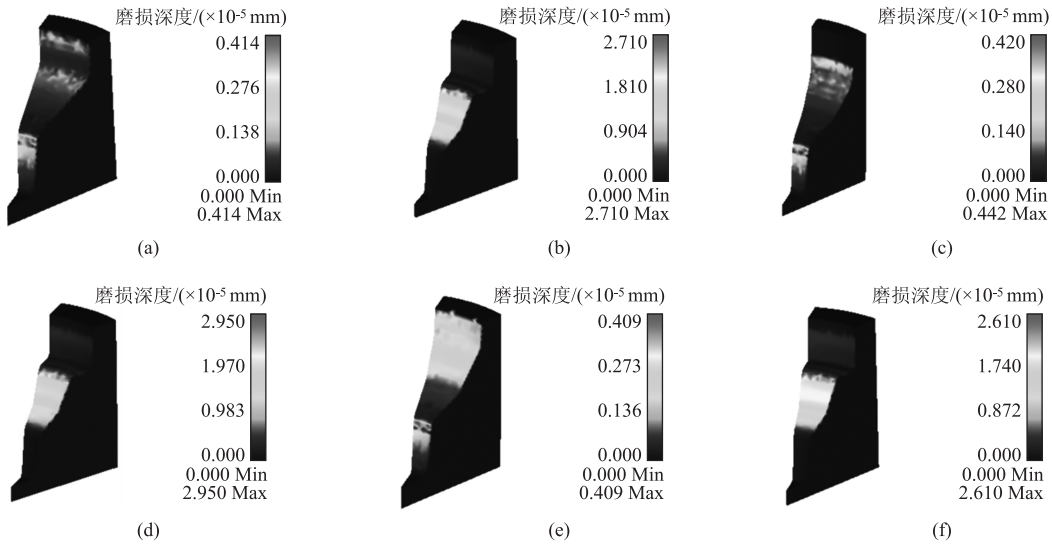
(a) Process 3 in scheme 1 (b) Process 4 in scheme 1 (c) Process 3 in scheme 2 (d) Process 4 in scheme 2  
(e) Process 3 in scheme 3 (f) Process 4 in scheme 3

图 5 下模磨损分布情况

(a) 方案 1 工序 3 (b) 方案 1 工序 4 (c) 方案 2 工序 3 (d) 方案 2 工序 4 (e) 方案 3 工序 3 (f) 方案 3 工序 4

Fig. 5 Wear distributions of lower die

(a) Process 3 in scheme 1 (b) Process 4 in scheme 1 (c) Process 3 in scheme 2 (d) Process 4 in scheme 2  
(e) Process 3 in scheme 3 (f) Process 4 in scheme 3

用林新波等<sup>[12]</sup>研究的数学评估模型,从应力值、应变值、模具载荷值、零件损伤值等多方面进行分析,进而获得最合适的工艺方案。函数模型如式(2)和式(3)所示:

$$\min F_j(n) = \min \sum_{k=1, j=1}^{k=4, j=m} w_k f_{k,j}(n) \quad (2)$$

$$f_{k,j}(n) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(\varphi_{i,j} - \bar{\varphi}_j)^2}{n}} \quad (3)$$

式中:  $F_j(n)$  为各考察参数偏离最优解的程度;  $j$  为优化方案编号,  $j=1, \dots, m$ ;  $m$  为优化方案数量;  $k$  为考察的参数, 包含应力值、应变值、载荷值、损伤值共 4 个参数;  $w_k$  为加权系数, 表示考察参数的重要程度,  $w_k = 1/f_k^0$ ;  $f_k^0$  为各考察参数的不均匀程度中的最小值,  $f_k^0 = \min_{k,j} f_{k,j}(n)$ ;  $f_{k,j}(n)$  分别为应力值、应变值、载荷值、损伤值分布的不均匀程度;  $i$  为某个方案的第  $i$  道工序,  $i=1, \dots, n$ ;  $n$  为工序

数； $\varphi_{i,j}$  为某个考察参数的数值； $\overline{\varphi_j}$  为某个考察参数的平均值。

通过 Deform 获取各方案各道工序需要考察的参数数值，结果如表 1 所示，将数据依次代入函数模型式 (2) 和式 (3) 中进行计算，获得的结果如表 2 所示。由表 2 可知，各方案的评估值分别为 6.056、8.939、4.376，因此，可得出方案 3 为最佳方案，方案 1 次之，而方案 2 最不理想。

表 1 3 种方案的考察参数对比

Table 1 Comparison of investigation parameters for three schemes

方案	工序	最大应力/ MPa	最大应变	最大载荷/ ( $\times 10^6$ N)	最大损伤值
1	3	419	4.31	2.41	3.020
	4	361	9.65	2.83	1.100
2	3	422	4.50	2.03	0.381
	4	346	13.5	3.05	2.490
3	3	373	4.15	1.66	0.380
	4	322	8.53	2.24	1.090

表 2 基于数学评估模型的各参数计算结果

Table 2 Calculation results of various parameters based on mathematical evaluation model

不均匀程度 $f_{k,j}(n)$	方案			$f_k^0$	$w_k$
	1	2	3		
应力值	29	38	25.5	25.5	0.039
应变值	2.67	4.50	2.19	2.19	0.457
载荷值	0.21	0.51	0.29	0.21	4.762
损伤值	0.960	1.055	0.355	0.355	2.817
$F_j(n)$	6.056	8.939	4.376		
$\min F_j(n)$	4.376				

4 生产试验

通过数值仿真分析及数学评估模型分析均得出方案 3 为最优工艺的结论，参考方案 3 进行模具设计，凹模采用组合式结构，可提高其承载能力。法兰盘体的成形工艺为下料—感应加热—坯料镦挤—预锻成形—终锻成形，坯料采用 45 钢，尺寸为  $\Phi 95\text{ mm}\times 226.5\text{ mm}$ ，坯料加热至  $1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，模具预热至  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最终获得的各工序的锻件如图 6 所示，法兰盘体锻件成形饱满，外形良好、无缺陷，性能满足要求，充分验证了成形工艺的正确性以及仿真



图 6 法兰盘体各工序锻件

Fig. 6 Forgings of each process for flange body

分析和数学评估模型的准确性，可指导类似盘体零件的工艺设计及生产。

5 结论

(1) 应用 CAE 分析软件 Deform-3D 对汽车法兰盘体零件进行了热力耦合数值模拟，通过建立 Archard 磨损模型、有限元模型，从锻件成形质量及模具使用寿命方面对比分析了 3 种成形工艺方案，得出了方案 3 为最优方案的结论。

(2) 建立了数学评估模型，结合数值分析，从应力值、应变值、模具载荷值、零件损伤值等角度进行了分析、计算、优选，同样得出了方案 3 为最优方案的结论。

(3) 通过实际试模生产，获得了符合性能要求的汽车法兰盘体零件，验证了成形工艺的正确性以及仿真分析和数学评估模型的准确性。

参考文献：

[1] 林雅杰, 仲太生, 丁武学. 车用齿轮毛坯多工位精密热模锻工艺分析及模具设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54 (3): 82–87.  
Lin Y J, Zhong T S, Ding W X. Process analysis and die design of multi-station precision hot die forging for automotive gear blank [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2019, 54 (3): 82–87.

[2] 胡锦玲, 胡强. 基于有限元的转轴多级锻造成形仿真及试验研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (7): 164–167.  
Hu J L, Hu Q. Simulation and experimental research on multi-stage forging forming of rotary shaft based on finite element [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (7): 164–167.

[3] 李彦奎, 吕彦明, 倪明明. 航空叶片模具设计参数对模具磨损影响分析 [J]. 材料科学与工艺, 2019, 27 (3): 79–84.  
Li Y K, Lyu Y M, Ni M M. The analysis of influence of design parameters of air blades on die wear [J]. Materials Science and Technology, 2019, 27 (3): 79–84.

[4] 陈鑫, 王匀, 张太良, 等. 基于数值模拟和响应面法的 CVT 带轮轴终锻成形优化研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27

- (12): 30-36.
- Chen X, Wang Y, Zhang T L, et al. Research on optimization of final forging forming of CVT pulley shaft based on numerical simulation and response surface method [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27 (12): 30-36.
- [5] 柴民杰, 于华丽. 基于 ANSYS 的锥齿轮轴闭式模锻数值模拟及工艺优化 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48 (5): 151-153, 157.
- Chai M J, Yu H L. Numerical simulation and process optimization of closed die forging for bevel gear shaft based on ANSYS [J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48 (5): 151-153, 157.
- [6] 陈凌翔, 李月超. 汽车六角球头冷锻工艺优化与数值仿真 [J]. *材料科学与工艺*, 2020, 28 (5): 75-82.
- Chen L X, Li Y C. Optimization and numerical simulation of cold forging process for automobile hexagonal ball head [J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 28 (5): 75-82.
- [7] 姜天亮, 龚红英, 赵小云, 等. 基于 DEFORM-3D 的花键轴坯料结构尺寸优化设计 [J]. *塑性工程学报*, 2020, 27 (6): 111-115.
- Jiang T L, Gong H Y, Zhao X Y, et al. Optimum design of spline shaft blank structure dimension based on DEFORM-3D [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27 (6): 111-115.
- [8] 蔡力钢, 刘海东, 程强, 等. 基于正交试验法的模锻模具磨损分析 [J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46 (1): 1-9.
- Cai L G, Liu H D, Cheng Q, et al. Analysis and optimization of die forging wear based on orthogonal test method [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46 (1): 1-9.
- [9] 陈光伟, 于泽琦. 工艺参数对齿轮坯锻造质量的影响 [J]. *热加工工艺*, 2021, 50 (7): 108-110.
- Chen G W, Yu Z Q. Effect of technological parameters on forging quality of gear blank [J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50 (7): 108-110.
- [10] 赵震, 陈军, 吴公明. 冷温热挤压技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- Zhao Z, Chen J, Wu G M. Cold/Warm/Hot Extrusion Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [11] 王雷刚, 黄瑶, 孙宪萍, 等. 基于修正 Archard 磨损理论的挤压模具磨损分析 [J]. *润滑与密封*, 2006, (3): 10-12.
- Wang L G, Huang Y, Sun X P, et al. Wear analysis of extrusion die based on Archard's theory [J]. *Lubrication Engineering*, 2006, (3): 10-12.
- [12] 林新波, 李荣先, 柳百成, 等. 基于数值模拟的工艺评估与优化 [J]. *塑性工程学报*, 2005, 12 (1): 58-63.
- Lin X B, Li R X, Liu B C, et al. Process evaluation and optimization based on numerical simulation [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2005, 12 (1): 58-63.
- +++++
- (上接第 46 页)
- [10] 黄礼琳, 高英俊, 邓芊芊, 等. 预变形条件下纳观裂纹扩展的微观机制研究 [J]. *稀有金属*, 2020, 44 (1): 63-71.
- Huang L L, Gao Y J, Deng Q Q, et al. Study of microscopic mechanism of nano-crack propagation under pre-deformation [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2020, 44 (1): 63-71.
- [11] 王铎. 一种杠杆式精密剪切模的虚拟设计 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- Wang D. Virtual Design of a Lever Precision Shearing Die [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [12] Wang T, Ren Z K, He D P. Equivalent numerical algorithm for the strip-rolling process of a continuous variable crown mill using the coupled rigid-plastic finite element method [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 27 (2): 561-567.
- [13] Kumar A M, Parameshwaran R, Rajasekar R. Simulation of 1.2765 DIN steel billet and crack analysis during the forging process using DEFORM-3D software [J]. *Material Wissenschaft und Werkstofftechnik*, 2021, 52 (3): 77-79.
- [14] 黄皓, 付彭怀, 彭立明, 等. 模具温度和浇注温度对 AZ91D 镁合金热裂和流动性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2012, 32 (1): 81-84.
- Huang H, Fu P H, Peng L M, et al. Effect of mold temperature and casting temperature on hot cracking and flow properties of AZ91D magnesium alloy [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloy*, 2012, 32 (1): 81-84.
- [15] Bagliuk G A, Kyrlyuk S F. Numerical analysis of the die forging of porous blanks in a die with the implementation of active friction forces [J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2021, 62 (1), 21-25.
- [16] Khasidashvili Z, Norman A J. Feature range analysis [J]. *International Journal of Data Science and Analytics*, 2021, 27 (2): 33-38.
- [17] 张启森, 彭桂枝, 王晓莉. 基于正交试验的铝钢材料自冲铆接成形质量的多指标优化 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (3): 87-91.
- Zhang Q S, Peng G Z, Wang X L. Multi-index optimization on forming quality of self-piercing riveting for aluminium-steel materials based on orthogonal experiment [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (3): 87-91.
- [18] Wang Z Z, Adam Sobey. A comparative review between genetic algorithm use in composite optimisation and the state-of-the-art in evolutionary computation [J]. *Composite Structures*, 2020, 233, 237-251.
- [19] Manoochehri M, Kolahan F. Integration of artificial neural network and simulated annealing algorithm to optimize deep drawing process [J]. *Springer London*, 2014, 73 (1-4): 288-289.
- [20] 元莎, 白玉冰, 周乐育, 等. 热处理工艺参数对 Cr8 冷作模具钢组织和性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (1): 168-172.
- Yuan S, Bai Y B, Zhou L Y, et al. Influence of heat treatment parameters on microstructure and property of Cr8 cold working die steel [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (1): 168-172.