

# 基于克里金模型和多目标遗传算法的转向节模具参数优化

徐 杰

(重庆工商职业学院 智能制造与汽车学院, 重庆 401520)

**摘要:** 为了解决某转向节成形后存在填充不满、折叠、成形载荷太大以及表面成形质量差等缺陷, 提出了基于克里金模型、多目标遗传算法和数值模拟技术相结合的优化策略。选取模具冲头斜度、冲头头部长羊角侧圆角半径、杆部与法兰盘连接处圆角半径 3 个参数作为设计变量, 杆部末端欠填充距离和终锻最大成形载荷作为优化目标。首先, 通过正交实验设计方法得到实验方案; 其次, 使用 Deform-3D 对每组实验进行数值模拟, 得到设计变量与优化目标之间的响应数据; 再次, 使用克里金模型近似设计变量与优化目标之间的映射关系, 并用多目标遗传算法对该近似模型进行全局寻优, 获得前沿最优解集; 最后, 将优化的最优参数进行数值模拟和生产验证, 模拟结果和生产结果证明了优化策略的有效性。采用最优模具参数能够得到成形效果良好的产品, 且可将材料利用率从原来的 75% 提高至 85%。

**关键词:** 转向节; 克里金模型; 多目标遗传算法; 数值模拟; 成形载荷

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.030

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 07-0213-07

## Optimization on steering knuckle mold parameters based on Kriging model and multi-objective genetic algorithm

Xu Jie

(Institute of Intelligent Manufacturing and Automotive, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China)

**Abstract:** In order to solve the defects of insufficient filling, folding, too large forming load and poor surface forming quality of a steering knuckle after forming, an optimization strategy based on Kriging model, multi-objective genetic algorithm and numerical simulation technology was proposed. The punch draft angle, the fillet radius of long sheep horn side for punch head and the fillet radius of connection between rod and flange were selected as the design variables, and the unfilled distance at the end of rod and the maximum forming load of final forging were selected as the optimization objectives. Firstly, the experimental scheme was obtained by orthogonal experimental design method. Secondly, each group of experiments was simulated by Deform-3D, and the response data between design variables and optimization objectives was obtained. Thirdly, the mapping relationship between design variables and optimization objectives was approximated by Kriging model, and the approximate model was globally optimized by multi-objective genetic algorithm to obtain the frontier optimal solution set. Finally, the optimized parameters were simulated and verified in production. The results show that the simulation results and production results prove the effectiveness of the optimization strategy. Therefore, the products with good forming effect are obtained by the optimized mold parameters, and the material utilization rate is increased from 75% to 85%.

**Key words:** steering knuckle; Kriging model; multi-objective genetic algorithm; numerical simulation; forming load

近年来, 随着国产汽车工业的快速发展, 转向节作为汽车的重要部件之一, 其成形工艺引起了广泛的重视。数值模拟技术是研究转向节成形工艺的重要手段, 许多学者采用这一技术对转向节的成形工艺进行了深入的研究。王冬良等<sup>[1]</sup>使用数值

模拟技术对转向节成形过程中的预锻工序进行了热力耦合数值模拟, 从多个角度分析了开式预锻和闭式预锻的优劣情况, 解决了原始工艺存在的折叠、欠填充等问题。潘成海等<sup>[2]</sup>针对异形转向节的结构特点和成形难点, 提出了由“镦粗-压扁-预锻-终锻”4 个锻造工序构成的异形转向节精锻工艺, 并进行了数值仿真模拟, 该新工艺能够得到符合要求的异形转向节。刘江等<sup>[3]</sup>使用 Deform-3D 对 SG 转向节的预锻和终锻进行了模拟分析, 得出了长杆类转向节最好采用辊锻、弯曲、模锻的复合成形工艺的

收稿日期: 2022-02-21; 修订日期: 2022-05-20

基金项目: 重庆自然科学基金资助项目 (cstc2020jcj-msxmX0940)

作者简介: 徐 杰 (1981-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: xujie6896@163.com

结论。徐皓等<sup>[4-6]</sup>使用数值模拟技术和经验对转向节成形工艺进行了研究,显著提高了材料利用率和成品合格率。代璐蔚<sup>[7]</sup>利用 UG 和 Deform-3D 对制坯、预锻和终锻工序建立了三维热力耦合模型,得到了成形过程中的金属流动规律,以及应力、应变、温度等变量的分布情况;并且通过分析得到了较优的成形工艺方案,为转向节生产工艺的制定提供了参考。张强等<sup>[8]</sup>使用 Forge 软件对某汽车转向节的预锻、终锻工艺进行了数值仿真,得到了转向节成形过程中的规律,并且用实验进行了验证,验证结果表明数值仿真具有较高的精度。齐羿<sup>[9]</sup>使用 Deform 软件对拟定的转向节成形工艺方案进行了数值模拟,模拟结果和实际吻合,经过模拟优化,将废品率降低了 6.35%。尽管这些学者提出了各种解决转向节成形质量问题的方法,然而目前为止,转向节的锻造成形工艺还是面临着许多挑战。目前的优化策略大多仍为试错法,缺乏有效的优化理论研究。

为了解决这些问题,提出了一种基于智能算法和代理模型相结合的优化策略。首先,运用数值模拟技术和实验设计得到设计变量与优化目标之间的响应数据;其次,用克里金模型来近似设计变量与优化目标之间的非线性关系;再次,多目标遗传算法被用于优化计算,并得到帕累托最优前沿解集;最后,将优化得到的参数进行数值模拟和生产验证,结果表明该策略能够有效地优化转向节的挤压模具参数。

## 1 成形工艺分析

汽车转向节按照其形状可大致分为 3 类:中心孔类、套筒类、长轴类。不同类型的转向节,其成形难度和缺陷位置均不同。中心孔类转向节的成形难点在于孔壁高径比较大,填充较为困难,此外叉形结构的形状复杂,其金属流动较为复杂、填充也较为困难。对于长轴类转向节,其杆部端头和叉形末端填充较为困难,且容易发生折叠缺陷。套筒类转向节的成形难点在于:对于长杆端头和中间高径比较大的法兰区域,因材料不容易流动到这些位置,故易产生欠填充缺陷。尽管转向节的种类各不相同,但是影响不同类型转向节成形质量的因素大致相同。通常润滑条件、材料流动特性、锻造温度、模具结构等是影响转向节成形质量的核心因素。对于特定的转向节产品而言,材料、润滑条件及锻造温度通常已确定或改动空间较小,因此,模具结构设计优

化是提升转向节成形质量的关键。因此,本文将转向节成形模具的优化设计作为工艺优化的核心。

### 1.1 锻件及模具

某汽车转向节锻件如图 1 所示,其类型为长轴类转向节,其材质为 42CrMo 钢。该转向节主要有杆部、盘部和分叉组成,分模面方向与杆部方向相同,并与分叉最大部位重合。该转向节盘部的顶端、杆部端头以及分叉端头的填充比较困难。

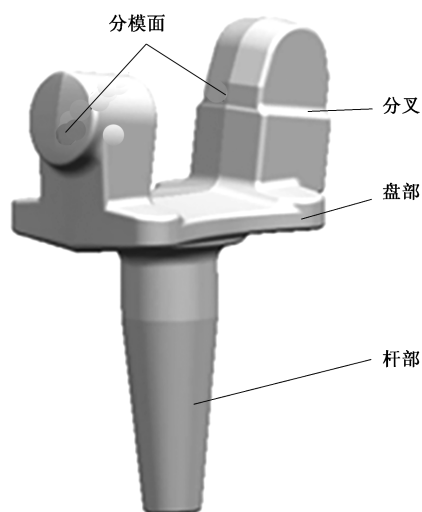


图 1 某汽车转向节锻件图

Fig. 1 Forgings drawing of an automobile steering knuckle

根据该转向节的特点,选取挤压制坯、模锻成形的成形工艺。由于分叉区域的材料是由中间区域向两端挤压成形,而杆部区域的材料在杆部的径向被压缩、长度方向被挤长;因此,在挤压制坯工艺中,上模被设计为从分叉区域向长杆方向进行挤压。此外,终锻工艺沿着锻件最大截面进行设计,即沿着图 1 所示的中间分模面进行设计。

转向节成形工序为:挤压制坯→模锻成形,其成形模具如图 2 所示,挤压模具分为冲头和下模,其中为了坯料脱模方便,下模被分为前后两个部分。根据文献 [10] 和文献 [11] 的研究表明,挤压模具的冲头斜度  $\alpha$ 、冲头头部长半径侧圆角半径  $r_2$  和杆部与法兰盘连接处的圆角半径  $r_1$  对终锻成形效果的影响较大。因此,将这 3 个参数作为优化变量。

### 1.2 成形过程模拟仿真

由于成形工艺参数对成形质量的影响比较复杂,因此,采用实验试错法进行优化的方法具有成本高、周期长的缺点。此外,有限元仿真技术在锻造行业中的精度已得到了普遍的认可和推广<sup>[3,5,8,10]</sup>,因此在锻造试制前使用 Deform-3D 软件对该转向节产品的成形工艺进行分析,是降低生产成本、节省

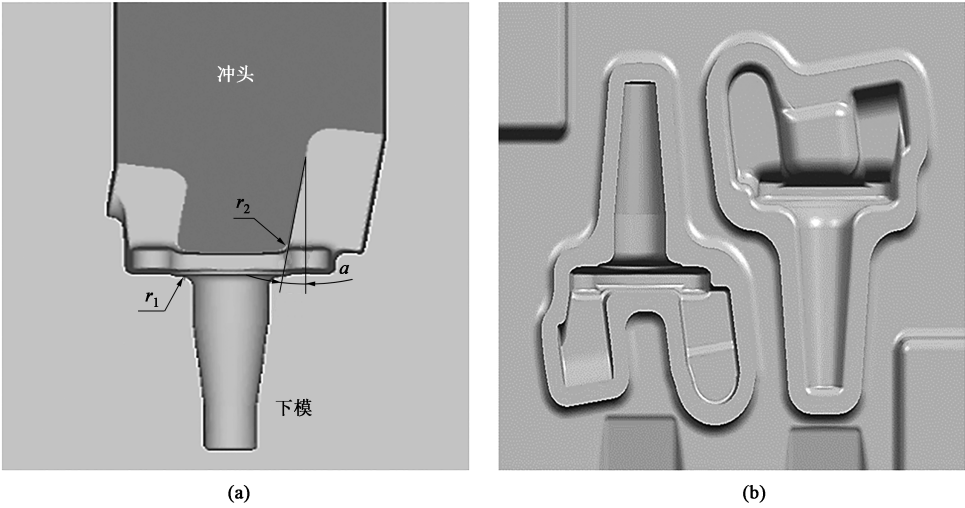


图 2 挤压制坯 (a) 和终锻模具 (b) 设计

Fig. 2 Design of extrusion preform (a) and final forging die (b)

试错时间的有效手段。根据文献[3]和文献 [12], 在 Deform-3D 中数值模拟的参数设置如表 1 所示。

表 1 有限元模拟参数

Table 1 Finite element simulation parameters

参数	初始锻造温度/℃	坯料材料	下压速度/(mm · min <sup>-1</sup> )	坯料网格 数目	摩擦条件 (混合模型)		传热系数/(W · (m <sup>2</sup> · K) <sup>-1</sup> )
					库伦	剪切	
数值	1100	AISI-4140 钢	250	50000	0.15	0.30	20000

其中, 锻件的材质为 42CrMo 钢, 对应于 Deform 软件中的 AISI-4140 钢。根据锻造厂的经验, 初始锻造温度设置为 1100 ℃。模具与坯料之间的摩擦模型选择混合摩擦模型, 即库伦摩擦因数取值为 0.15, 剪切摩擦因数取值为 0.30。坯料与模具之间的传热条件为金属间强传热, 其传热系数取值为 20000 W · (m<sup>2</sup> · K)<sup>-1</sup>。此外, 挤压模具的初始参数取值为:  $\alpha$  为 5°、 $r_2$  为 5 mm、 $r_1$  为 5 mm。

如图 3 所示, 初步数值仿真结果显示, 得到的锻件不理想, 存在如下缺陷: 杆顶部欠填充 (欠填充距离为  $d$ )、羊角飞边不合理、羊角内部材料折叠, 预成形模具参数还需要进一步优化。

1.3 模具参数的影响

$\alpha$ 、 $r_1$  和  $r_2$  直接影响材料的流动, 因此选取这 3 个参数进行研究。当分析其中一个参数对端头欠填充距离的影响时, 其余参数取值与初步仿真中的参数值一致。如图 4 所示, 随着  $r_1$  的增加,  $d$  逐渐减小, 随着  $\alpha$  和  $r_1$  的增加,  $d$  先减小后增加, 这 3 个参数与填充之间具有比较复杂的非线性关系。 $d$  越

小, 分布于杆部的材料越多, 因此终锻后杆部的飞边越大, 材料浪费越多。实际上  $d$  小于一个临界值时, 终锻后杆部型腔能够完全填充, 因此, 在优化工艺参数时, 只要约束  $d$  小于终锻能够完全填充的阈值距离即可。

2 参数优化

2.1 实验设计

多因素之间的完全实验数据量较大, 正交实验设计通过选取具有代表性样本的思路, 减少了实验的次数。本文中  $\alpha$ 、 $r_1$  和  $r_2$  对填充的影响不具备单一性、单调性, 其影响比较复杂且可能存在一定的交互作用。因此设计了 3 因素 4 水平的正交实验, 用于获取因素对填充性和成形载荷的影响。其中,  $\alpha$ 、 $r_1$ 、 $r_2$  的取值见表 2。

根据表 2, 采用 3 因素 4 水平正交表来获得数值模拟实验方案。使用各个参数组合在 Deform-3D 中进行数值模拟分析, 并以  $d$  和终锻最大成形载荷  $F$  为优化目标进行模拟分析, 得到的正交实验方案

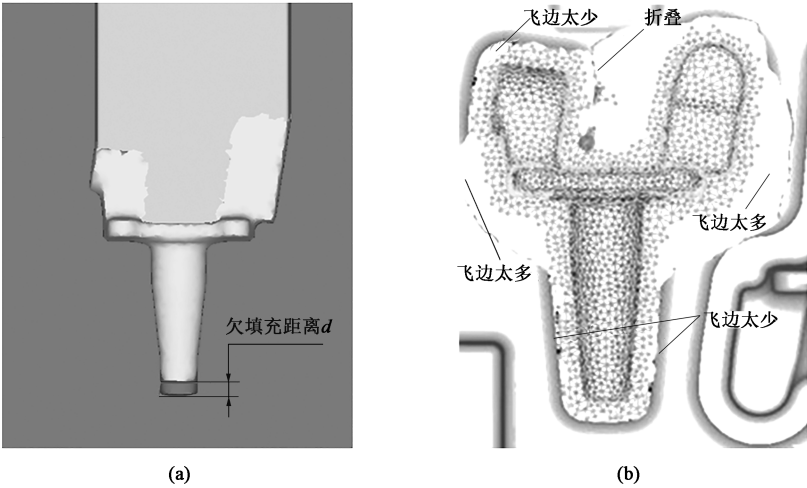


图 3 初步仿真结果  
(a) 挤压后的坯料 (b) 终锻后的锻件

Fig. 3 Preliminary simulation results  
(a) Billet after extrusion (b) Forgings after final forging

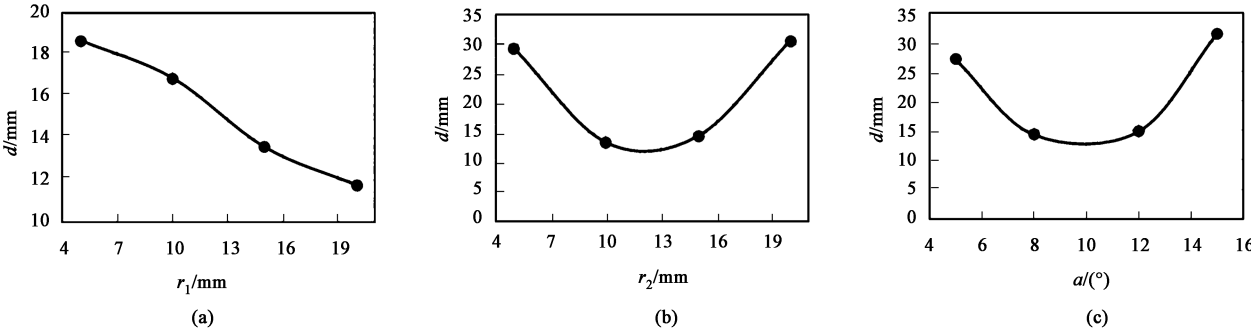


图 4 不同模具参数对欠填充距离的影响  
(a)  $r_1$  (b)  $r_2$  (c)  $a$

Fig. 4 Effects of different die parameters on unfilled distance

表 2 因素水平表

Table 2 Factors and levels

水平	因素		
	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$a/(\text{°})$
1	5	5	5
2	10	10	8
3	15	15	12
4	20	20	15

及结果如表 3 所示。

2.2 近似模型

根据 2.1 节的正交实验数据可知, 3 个因素与两个优化目标之间的关系比较复杂, 通常克里金模型被用于构建这种小样本响应关系<sup>[13]</sup>。克里金回归模型如下:

$$y(\boldsymbol{x}) = f(\boldsymbol{x})^T \boldsymbol{\beta} + z(\boldsymbol{x}) \quad (1)$$

式中:  $y(\boldsymbol{x})$  为响应函数;  $\boldsymbol{x}$  为自变量, 在本文中为

表 3 正交实验设计结果

Table 3 Results of orthogonal experiment design

方 案	因素			响应	
	$r_1$	$r_2$	$a$	$d/\text{mm}$	$F/(\times 10^4 \text{ kN})$
1	1	1	1	23.28	2.6361
2	1	2	2	21.21	3.7067
3	1	3	3	20.76	2.7068
4	1	4	4	22.83	3.3431
5	2	2	3	14.69	2.3028
6	2	1	4	19.23	3.9693
7	2	4	1	16.65	2.9492
8	2	3	2	20.88	3.3734
9	3	3	4	18.25	2.8381
10	3	4	3	15.67	4.6460
11	3	1	2	20.55	2.9694
12	3	2	1	27.82	3.6663
13	4	4	2	25.95	2.1109
14	4	3	1	21.77	2.8280
15	4	2	4	26.64	3.2118
16	4	1	3	29.92	2.1917

向量  $[r_1, r_2, a]$ ;  $\beta$  为回归系数;  $f(\mathbf{x})$  为回归基函数;  $z(\mathbf{x})$  为高斯平稳随机过程, 其期望  $E$ 、方差  $Var$ 、协方差  $cov$  分别为:

$$\begin{cases} E[z(\mathbf{x})] = 0 \\ Var[z(\mathbf{x})] = \sigma^2 \\ cov[z(w), z(\mathbf{x})] = \sigma^2 R(w, \mathbf{x}, \theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\sigma^2$  为方差;  $R(w, \mathbf{x}, \theta)$  为  $w$  与  $\mathbf{x}$  之间的关联函数;  $w$  为正太分布自变量;  $\theta$  为未知的关联参数;  $z(w)$  为高斯平稳随机过程。因此, 在  $\mathbf{x}$  位置

的预测值  $\hat{y}$  为:

$$\hat{y} = f(\mathbf{x})^T \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x}) A^{-1} (Y - b \hat{\beta}) \quad (3)$$

式中:  $A$  为关联矩阵;  $Y$  为回归数据的输出;  $b$  为系数;  $\hat{\beta}$  为回归系数的估计值;  $\mathbf{r}^T(\mathbf{x})$  为未知点与已知点的关系向量。

将抽样表的数据代入克里金模型中, 克里金模型的响应曲面如图 5 所示。可知, 克里金模型得到的曲面与抽样点数据之间的误差很小, 抽样点均落在克里金模型曲面之上。

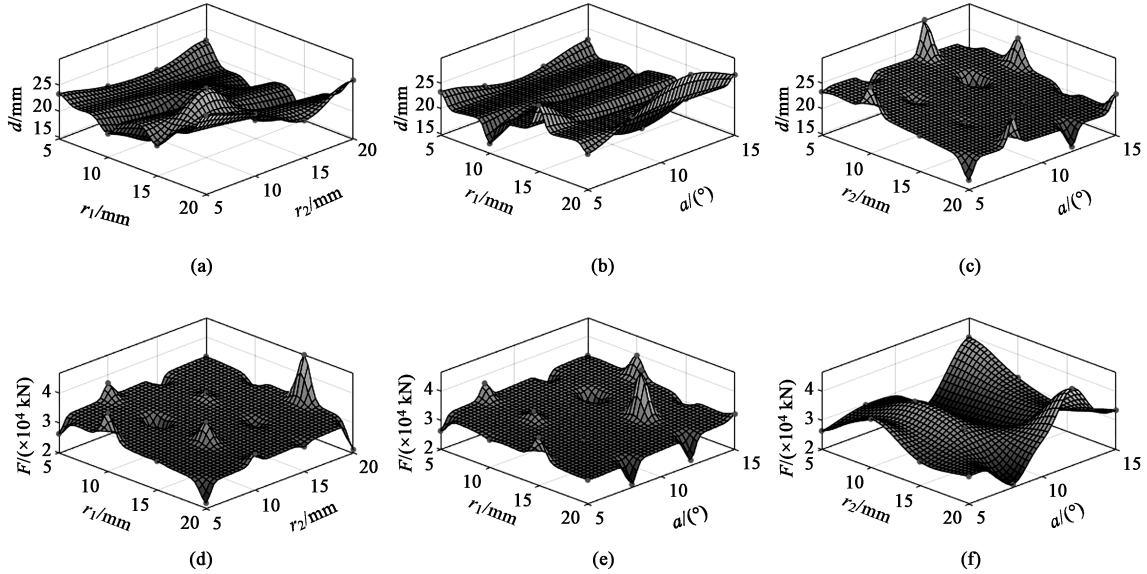


图5 克里金响应面与抽样点对比

(a)  $d$  在  $r_1$  和  $r_2$  上的分布 (b)  $d$  在  $r_1$  和  $a$  上的分布 (c)  $d$  在  $r_2$  和  $a$  上的分布  
(d)  $F$  在  $r_1$  和  $r_2$  上的分布 (e)  $F$  在  $r_1$  和  $a$  上的分布 (f)  $F$  在  $r_2$  和  $a$  上的分布

Fig. 5 Comparison between Kriging response surface and sampling points

(a) Distribution of  $d$  on  $r_1$  and  $r_2$  (b) Distribution of  $d$  on  $r_1$  and  $a$  (c) Distribution of  $d$  on  $r_2$  and  $a$   
(d) Distribution of  $F$  on  $r_1$  and  $r_2$  (e) Distribution of  $F$  on  $r_1$  and  $a$  (f) Distribution of  $F$  on  $r_2$  and  $a$

此外, 对比图 5a、图 5b、图 5c 和图 5d、图 5e、图 5f 可知,  $F$  与  $d$  之间有一定的互斥关系, 即两个量很难同时最小。 $F$ 、 $d$  与 3 个因素之间的响应关系比较复杂, 不存在简单的线性关系。

### 2.3 优化策略

根据相关研究<sup>[14-15]</sup>, 挤压工序的  $d$  对终锻的填充性的影响存在极限值, 即当  $d$  小于一个临界值后, 转向节的填充性受到该长度的影响可忽略不计。因此, 尽管在优化过程中  $d$  和  $F$  均需要最小化, 但这两个指标却有不同优先级, 即必须保证  $d$  小于临界值的情况下, 两个指标均尽可能小。这是一个典型的多目标优化问题, 使用多目标遗传算法 (NSGA-II) 对克里金模型进行优化, 得到的 Pareto 前沿解集如图 6 所示。

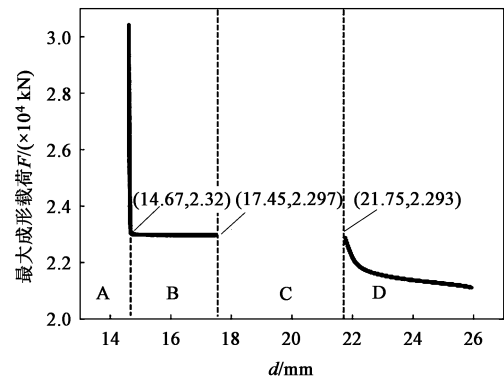


图6 Pareto 前沿解集对应的目标函数点

Fig. 6 Objective function points corresponding to Pareto front solution set

如图 6 所示, Pareto 前沿解集可分为 A、B、C、D 这 4 个区域。在 A 区域,  $d$  保持微小变化而  $F$  急

剧下降;在 B 区域,  $F$  不随  $d$  的增加而下降; C 区域内不存在可行解; D 区域, 随着  $d$  的增加,  $F$  先急剧减小后缓慢下降。由此可见, 当  $d$  大于 14.67 mm 且小于 17.45 mm 时,  $F$  变化极小。考虑到  $d$  不能大于 15 mm ( $d$  大于 15 mm 可能造成末端在终锻后出现欠填充现象)。因此, 最优解在 B 区域中选择, 选择的最优解如表 4 所示。

表 4 最优解取值

Table 4 Optimal parameter values

参数	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$a/(\circ)$	$F/(\times 10^4 \text{ kN})$	$d/\text{mm}$
数值	10.137	10.227	11.997	2.2992	14.954

### 3 生产验证

为了验证优化结果的合理性, 对优化后的模具参数利用有限元技术进行数值模拟分析 (其余参数使用表 1 中的参数)。图 7 为优化前后的转向节终锻模拟仿真结果。从图 7a 可见, 优化前锻件的飞边分布不均匀且大部分飞边分布于羊角附近, 这会导致成形载荷较高。从图 7b 可见, 优化后锻件的飞边较小且分布较均匀, 各个部位填充良好, 毛刺均得以排出, 分布均匀的飞边可减少成形载荷。如图 7 所示, 优化后的模具参数在保证成形质量的前提下, 将材料利用率从 75% 提高到了 85%。

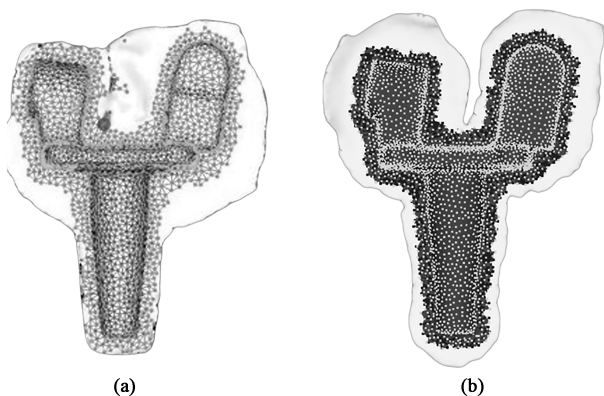


图 7 优化前后转向节终锻件仿真结果

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 7 Simulation results of final forgings for steering knuckle before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

使用优化后的模具参数进行模具试制, 并在 4000 t 热模锻压力机上进行终锻。实际生产表明: 坯料经过挤锻工艺成形后, 模具的难填充区域均能够充满, 成形所得锻件的各部位结构均在公差范围内, 在力学性

能方面完全达到要求, 实际生产锻如图 8 所示。



图 8 最优参数组合下的转向节锻件

Fig. 8 Steering knuckle forgings under optimal parameter combination

### 4 结论

(1) 冲头斜度、冲头头部长羊角侧圆角半径和杆部与法兰盘连接处的圆角半径对坯料杆部末端欠填充距离的影响比较复杂, 具有非单调性且具有复杂的交互作用。

(2) 克里金模型对模具参数和优化目标之间的近似精度较高, 应用于此类小样本近似问题具有较高的适应性。最优前沿解集可分为 4 个区域: A 区域内  $d$  保持微小变化, 而  $F$  急剧下降; B 区域内的  $F$  不随  $d$  的增加而下降; C 区域不存在可行解; D 区域内, 随着  $d$  的增加,  $F$  先急剧减小后缓慢下降。

(3) 采用最优前沿解集中选取的最优解, 能够得到合格的锻件产品。实际生产试制验证了该挤压制坯、终锻模锻工艺的可行性和合理性。

#### 参考文献:

- [1] 王冬良, 陈南. 基于数值模拟的汽车转向节精密成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 38-43.  
Wang D L, Chen N. Precision forming process for automobile steering knuckle based on numerical simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 38-43.
- [2] 潘成海, 曾琦, 董旭刚, 等. 汽车转向节精锻工艺设计与锻造主机选型 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 26-31.  
Pan C H, Zeng Q, Dong X G, et al. Design on precision forging process of automobile steering knuckle and selection of forging main press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 26-31.
- [3] 刘江, 徐皓. 基于 Deform 3D 的长杆类汽车转向节锻模设计与锻造工艺生产验证 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 9-13.  
Liu J, Xu H. Design on forging mold and production verification of forging process for automobile steering knuckle with long rod based on Deform 3D [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 9-13.

- [4] 徐皓, 刘江. 长城 2020 转向节锻模设计及其锻造工艺生产验证 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 24-28.  
Xu H, Liu J. Forging die design of Great Wall 2020 steering knuckle and production verification of its forging process [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 24-28.
- [5] 徐皓, 刘铭, 刘江. 基于 Deform 的依维柯汽车转向节的预锻优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (1): 30-34.  
Xu H, Liu M, Liu J. Pre-forging optimization on steering knuckle for IVEVO automobile based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (1): 30-34.
- [6] 徐皓, 刘江. JMC 轻卡汽车转向节锻件设计及 Deform 数值模拟分析 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 14-19.  
Xu H, Liu J. Design on steering knuckle forgings for JMC truck and analysis on numerical simulation of Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 14-19.
- [7] 代璐蔚. 非调质钢 38MnVTi 转向节热锻成形数值模拟及工艺优化 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.  
Dai L W. Numerical Simulation and Process Optimization of Hot Forging Process for Steering Knuckle of 38MnVTi Nonquenched and Tempered Steel [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019.
- [8] 张强, 刘阳. 基于 Forge 的汽车转向节模锻仿真分析 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (11): 114-116, 121.  
Zhang Q, Liu Y. Simulation analysis of die forging of automobile steering joint based on Forge [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (11): 114-116, 121.
- [9] 齐羿. 汽车盘式转向节锻造工艺及成形过程数值模拟研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.  
Qi Y. Research on Forging Process and Numerical Simulation of Forming Process of Automobile Disc Steering Knuckle [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [10] 林磊, 周杰, 肖红. 农用车转向节闭式挤锻新工艺多目标优化 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (13): 133-135.  
Lin L, Zhou J, Xiao H. Multi-objective optimization of closed extrusion-forging new technology for agricultural vehicles steering knuckle [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (13): 133-135.
- [11] 周江, 林 L, 罗 Y. The multi-objective optimization design of a new closed extrusion forging technology for a steering knuckle with long rod and fork [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72 (9-12): 1219-1225.
- [12] 栾伟, 孙燕, 骆俊廷, 等. 42CrMo 钢的本构关系与转向节臂成形工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (5): 173-178.  
Luan W, Sun Y, Luo J T, et al. Constitutive relationship of 42CrMo steel and forming technology of steering knuckle arm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (5): 173-178.
- [13] 付向辉, 张立刚, 李立, 等. 电絮凝除铊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] 杨海, 周杰, 黄亮, 等. 基于数值模拟的转向节挤压工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (1): 72-74.  
Yang H, Zhou J, Huang L, et al. Extrusion process optimization for steering knuckle based on numerical simulation [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (1): 72-74.
- [15] 林磊. 转向节闭式挤锻成形工艺研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
Lin L. Research on the Closed Extrusion Forging Technology of a Steering Knuckle [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

## 《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

**2022** 年广告征集工作已经开始。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

### (1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

### (2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst\_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

