

# 基于正交试验与响应面法汽车转向节模具结构优化

胡祚麻, 刘淑梅, 毛欣然

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 以某汽车转向节为研究对象, 使用 Deform-3D 有限元软件进行热锻成形数值模拟, 通过分析金属填充效果发现转向节在长枝叉处出现塌角缺陷。针对此缺陷设计阻力墙结构, 利用正交试验筛选出对于转向节的预锻成形载荷与飞边长度影响显著的结构因素, 依次为阻力墙斜度  $D$ 、阻力墙间隙  $C$  和阻力墙宽度  $G$ , 确定了桥边宽度为 15 mm, 阻力墙高度为 25 mm, 阻力墙圆角半径为 15 mm, 再利用响应面法, 建立了阻力墙间隙  $C$ 、阻力墙斜度  $D$  和阻力墙宽度  $G$  与预锻成形载荷  $Z_1$  和飞边长度  $Z_2$  的二阶响应面模型, 从而获得最优阻力墙参数组合为: 阻力墙间隙为 2.5 mm、阻力墙斜度为  $13^\circ$ 、阻力墙宽度为 44 mm, 实际生产结果表明, 该阻力墙结构设计合理, 锻件充填完整, 未出现塌角缺陷。

**关键词:** 转向节; 正交试验; 响应面法; 塌角缺陷; 阻力墙

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.027

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 08-0178-07

## Structural optimization on automobile steering knuckle mold based on orthogonal test and response surface method

Hu Zuoxiu, Liu Shumei, Mao Xinran

(College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** For the automobile steering knuckle, the hot forging was simulated numerically by finite element software Deform-3D, and the stepping angle defect of steering knuckle at the long fork was found by analyzing the metal filling effect. Then, in view of this defect, the resistance wall structure was designed, and the significant structural factors affecting pre-forging load and flash length of steering knuckle were screened out by the orthogonal test, namely, slope of resistance wall  $D$ , clearance of resistance wall  $C$  and width of resistance wall  $G$ . Furthermore, it was determined that the width of bridge side was 15 mm, the height of resistance wall was 25 mm and the fillet radius of resistance wall was 15 mm, and the quadratic response surface model for clearance of resistance wall  $C$ , slope of resistance wall  $D$ , width of resistance wall  $G$  and pre-forging load  $Z_1$  and flash length  $Z_2$  was established by the response surface method to obtain the optimal resistance wall parameter combination with the resistance wall clearance of 2.5 mm, the resistance wall slope of  $13^\circ$  and the resistance wall width of 44 mm. The actual production results show that the structural design of resistance wall is reasonable, and the forgings are filled completely without stepping angle defect.

**Key words:** steering knuckle; orthogonal test; response surface method; stepping angle defect; resistance wall

随着我国汽车行业的迅速发展, 市场对于汽车零部件的需求也迅速增加。转向节作为汽车转向桥的关键构成部分, 它不仅需要传递方向, 同时也承载车身载荷, 对于汽车的安全行驶及灵活转向具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。在国家标准 GB/T 12363—2021<sup>[3]</sup> 中将其列为安全件, 为确保转向节的重要性能, 目前主要通过锻造方式进行生产<sup>[4]</sup>。汽车转向节种类繁

多, 属于典型的臂叉类锻件, 主要由臂叉部、法兰部和轴杆部等部分组成<sup>[5]</sup>。

## 1 转向节热锻成形工艺

### 1.1 转向节结构分析

本文研究的汽车转向节如图 1 所示, 其外形形状复杂, 共拥有 5 个枝叉结构, 其中 a 为长枝叉, b、c、d、e 为短枝叉, 整体为非对称结构, 且在长臂处为弯曲形状。因此, 其热锻成形工艺设计较为复杂。

### 1.2 转向节材料

非调质钢是一种在锻制后可以不经过调质处理

收稿日期: 2021-09-08; 修订日期: 2021-12-05

作者简介: 胡祚麻 (1995-), 男, 硕士

E-mail: 15320505446@163.com

通信作者: 刘淑梅 (1968-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: 1814618623@qq.com

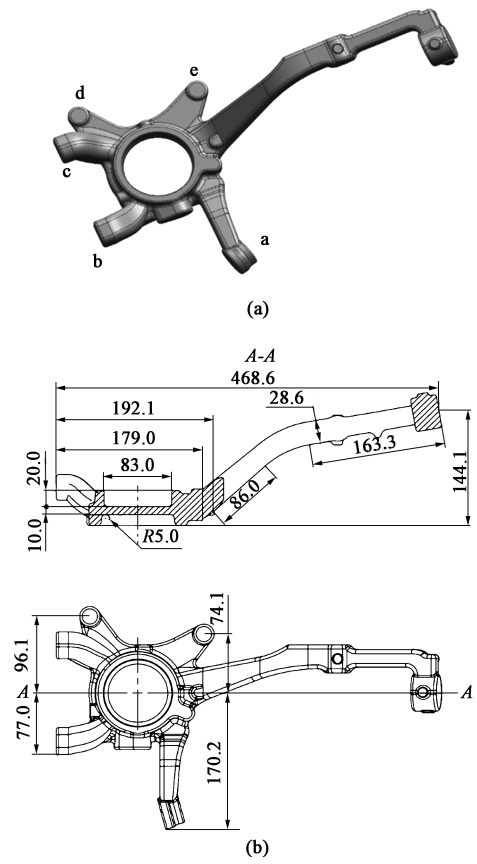


图 1 转向节模型  
(a) 三维模型 (b) 二维尺寸  
Fig. 1 Steering knuckle model  
(a) Three-dimensional model (b) Two-dimensional size

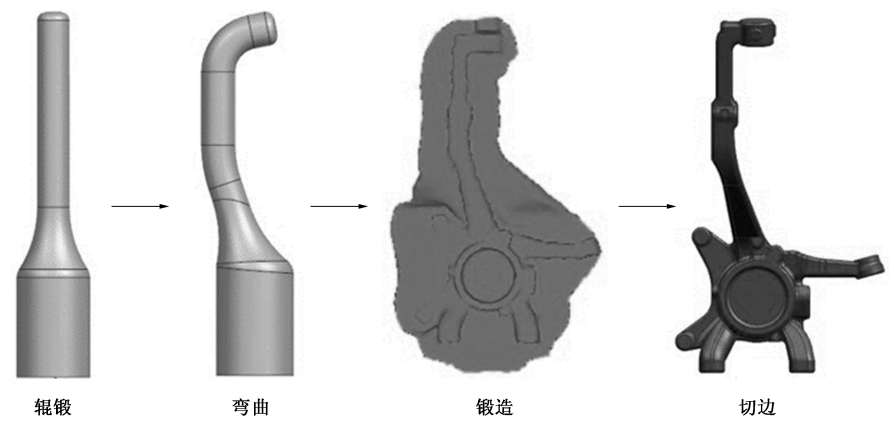


图 2 转向节加工过程  
Fig. 2 Machining process of steering knuckle

转向节模型，该转向节坯料的材料为 38MnSiVS5 钢，在 Deform 软件中需要额外添加材料的本构方程，模具材料指定为 H13 钢。在进行数值模拟时，考虑到实际加工的生产情况，需在 Deform 软件中进行参数设置。

根据转向节二维尺寸，选用直径为  $\Phi 95\text{ mm}$ 、

即可获得碳素结构钢或合金结构钢经调质热处理后所能达到的力学性能的钢种<sup>[6]</sup>。本文研究的汽车转向节所用材料为 38MnSiVS5 非调质钢，其化学成分如表 1 所示。随着非调质钢的发展与应用，采用非调质钢替代调质钢用来制造曲轴、转向节等汽车锻件，具有节能减排、简化制造工序等优点<sup>[7]</sup>。

表 1 38MnSiVS5 钢的化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of 38MnSiVS5 steel  
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	V
0.34~0.41	0.15~0.80	1.20~1.60	0.08~0.20

### 1.3 热锻成形工艺设计

由于转向节结构的复杂性，且大多数转向节锻件为 S4 复杂级汽车锻件<sup>[8-9]</sup>。为了避免出现充填不满、金属折叠以及塌角等缺陷，确保转向节成形质量良好，因此，设计的转向节热锻成形工艺为：辊锻—弯曲—预锻—终锻—切边，如图 2 所示。

## 2 数值模拟及结果分析

### 2.1 有限元模型的建立

在 NX 三维建模软件中建立转向节三维实体模型，并导出 Stl 格式。在 Deform 有限元软件中导入

长度为 220 mm 的圆柱坯料；选用 63 MN 的热模锻压力机；为提升数值模拟的效率，对坯料进行网格划分，单元数目为 50000 个；由于坯料与模具间存在热传递，模具同样进行网格划分，单元数目为 10000 个；在转向节热锻过程中，初始环境温度为 20 ℃，坯料初始温度为 1220 ℃，模具温度为

200 ℃, 压力机的下压速度为  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 坯料与模具间的摩擦模型设定为剪切模型, 摩擦因数设为 0.3, 热传导系数选择  $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

## 2.2 数值模拟结果分析

(1) 填充效果分析: 图 3 为转向节终锻成形结束时的金属填充效果图, 由图 3 可知, 由于转向节的结构复杂, 在中间孔以及长枝叉处金属未能充填饱满, 由于中间孔不作为成形部分, 因此不影响转向节的成形质量, 但在长枝叉处会造成严重的锻件质量缺陷。

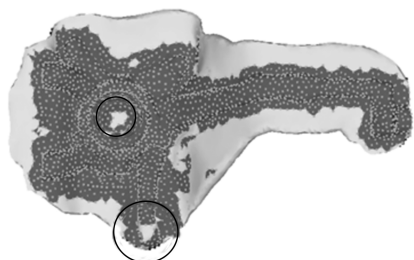


图 3 金属填充效果  
Fig. 3 Metal filling effect

(2) 成形载荷分析: 图 4 为转向节预锻与终锻过程的成形载荷曲线, 由图 4 可知在热锻过程中, 最大成形载荷为 31200 kN, 在热模锻压力机安全载荷内。

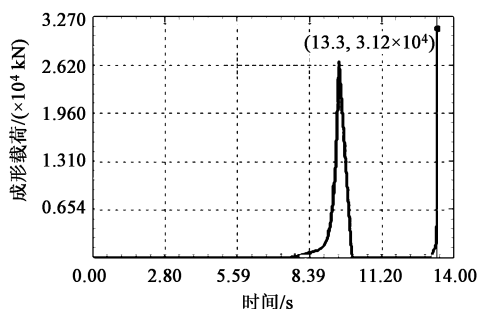


图 4 热锻成形载荷曲线  
Fig. 4 Load curve of hot forging

## 3 阻力墙结构设计及优化

为了解决金属充填不满的问题, 本文研究设计了阻力墙结构。阻力墙是一种能够阻碍非必要方向的金属流动, 从而增加所需方向的金属流动, 以促进金属充填的新型结构。由于阻力墙用于转向节模锻的资料较少, 在实际应用中, 可选择的阻力墙结构形式较多, 设计的参数也较多, 从而使得模具的设计周期延长, 同时由于参数设计的不合理, 容易引起转向节在模锻成形过程中的成形载荷大幅增加,

降低模具的使用寿命。

### 3.1 设计变量筛选

本文研究设计的阻力墙结构如图 5 所示, 图中,  $A$  为桥部宽度,  $B$  为阻力墙高度,  $C$  为阻力墙间隙,  $D$  为阻力墙斜度,  $E$  为阻力墙圆角半径,  $G$  为阻力墙宽度,  $R_1$  为桥部入口圆角半径,  $R_2$ 、 $R_3$  为过渡圆角半径。在实际生产中, 参考锻压手册<sup>[10]</sup>的常规飞边槽取值, 设定  $R_1$  为 3.5 mm, 根据文献<sup>[11]</sup>可知,  $R_2$ 、 $R_3$  对金属的充填能力、模具及成形载荷的影响不明显, 故设定  $R_2$ 、 $R_3$  为 4 mm。最后确定本文设计的阻力墙优化参数为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $G$ 。

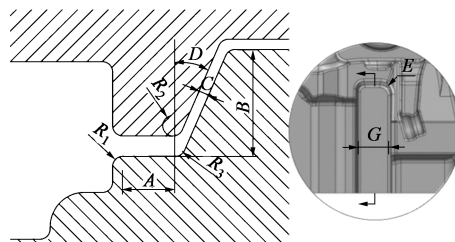


图 5 阻力墙结构  
Fig. 5 Resistance wall structure

(1) 建立正交试验方案, 选取桥部宽度  $A$ 、阻力墙高度  $B$ 、阻力墙间隙  $C$ 、阻力墙斜度  $D$ 、阻力墙圆角半径  $E$  和阻力墙宽度  $G$  为设计变量, 根据实际生产经验, 各因素的设计水平设置如表 2 所示, 选取预锻成形载荷与飞边宽度为试验目标。

表 2 正交试验因素水平表  
Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素					
	$A/\text{mm}$	$B/\text{mm}$	$C/\text{mm}$	$D/(\text{^\circ})$	$E/\text{mm}$	$G/\text{mm}$
1	10	20	2.0	5	10	30
2	15	25	3.5	15	15	40
3	20	30	5.0	25	20	50

(2) 试验涉及 6 因素 3 水平, 不考虑交互作用, 采用  $L_{18}(3^6)$  正交表。

(3) 在设计添加阻力墙后, 利用 Deform 进行数值模拟, 各因素的数值模拟结果如表 3 所示。

### (4) 试验结果分析

表 4 和表 5 分别为飞边长度和预锻成形载荷极差  $R$  的分析结果,  $K_i$  表示第  $i$  水平所对应的试验指标的数值之和 ( $i=1, 2, 3$ )。由表 4 可知, 各因素对于金属充填能力的影响顺序为: 阻力墙斜度 > 阻力墙间隙 > 阻力墙宽度 > 阻力墙高度 > 桥部宽度 > 阻力

表 3 正交试验数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation results of orthogonal test		
组号	飞边长度/mm	预锻成形载荷/( $\times 10^4$ kN)
1	0.0	3.16
2	5.1	3.68
3	5.5	3.61
4	0.0	3.21
5	3.4	3.29
6	2.2	3.29
7	3.5	3.52
8	1.8	3.14
9	2.4	3.42
10	2.6	3.52
11	1.5	3.33
12	4.8	3.44
13	0.0	3.48
14	4.5	3.19
15	7.1	3.55
16	1.5	3.04
17	1.3	3.38
18	0.0	3.22

表 4 飞边长度极差分析结果

Table 4 Range analysis results of flash length						
因素	A/mm	B/mm	C/mm	D/( $^{\circ}$ )	E/mm	G/mm
$K_1$	2.70	2.48	3.15	1.57	2.78	2.25
$K_2$	2.77	3.18	2.87	3.80	2.52	2.20
$K_3$	2.40	2.20	1.85	2.50	2.57	3.42
R	0.37	0.98	1.30	2.23	0.27	1.22

表 5 预锻成形载荷极差分析结果

Table 5 Range analysis results of pre-forging load						
因素	A/mm	B/mm	C/mm	D/( $^{\circ}$ )	E/mm	G/mm
$K_1$	3373.33	3361.67	3425.00	3228.33	3406.67	3255.00
$K_2$	3395.33	3391.67	3391.67	3410.00	3335.00	3386.67
$K_3$	3310.00	3325.00	3261.67	3440.00	3336.67	3436.67
R	85.00	66.67	163.33	211.67	71.67	181.67

墙圆角半径；由表 5 可知，各因素对于成形载荷的影响顺序为：阻力墙斜度>阻力墙宽度>阻力墙间隙>桥部宽度>阻力墙圆角半径>阻力墙高度。综合试验结果可知，阻力墙斜度、阻力墙间隙和阻力墙宽度对于飞边长度和预锻成形载荷的影响最为显著；确定桥部宽度为 15 mm、阻力墙高度为 25 mm、阻

力墙圆角半径为 15 mm。

3.2 响应面模型建立

响应面试验是一种利用合理的试验设计方法并通过试验得到一定的数据，采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系，通过对回归方程的分析来寻求最优工艺参数，是解决多变量问题的一种统计方法<sup>[12]</sup>。本文采取响应面常用的试验方法——中心组合试验设计（Central Composite Design, CCD）方法，以正交试验筛选出的具有显著影响的变量即阻力墙间隙  $C$ 、阻力墙斜度  $D$  和阻力墙宽度  $G$  为设计变量，以预锻成形载荷  $Z_1$  与飞边长度  $Z_2$  为响应目标。其设计变量的水平因素如表 2 所示，试验方案结果如表 6 所示。

表 6 响应面试验设计及结果

Table 6 Response surface test design and results					
序号	C/mm	D/( $^{\circ}$ )	G/mm	$Z_1/(\times 10^4$ kN)	$Z_2/\text{mm}$
1	2.0	15	40	3.05	9.2
2	3.5	15	50	2.84	6.3
3	5.0	15	40	2.99	7.8
4	3.5	15	40	2.88	7.5
5	2.0	25	50	3.12	7.3
6	3.5	5	40	2.94	6.7
7	5.0	25	50	3.18	4.9
8	2.0	25	30	3.26	5.7
9	3.5	15	30	3.04	4.8
10	2.0	5	30	3.23	6.1
11	5.0	5	30	3.28	3.9
12	3.5	25	40	2.98	5.1
13	2.0	5	50	3.01	7.7
14	5.0	5	50	3.09	5.2
15	5.0	25	30	3.34	3.5

3.3 响应面试验结果分析

(1) 响应面模型拟合

根据表 6 所得的试验数据进行拟合分析，得到预锻成形载荷与阻力墙间隙  $C$ 、阻力墙斜度  $D$  和阻力墙宽度  $G$  之间的响应面函数，如式（1）所示。

$$Z_1 = 54388.04012 - 4658.91975C - 303.25D - 696.76389G + 0.83333CD + 0.83333CG + 1.375DG + 679.01235C^2 + 9.27778D^2 + 7.27778G^2 \quad (1)$$

飞边长度与阻力墙间隙  $C$ 、阻力墙斜度  $D$  和阻力墙宽度  $G$  之间的响应面函数如式（2）所示。



$$Z_2 = -16.34048 - 4.48262C + 0.36275D + 1.43782G + 0.000833CD - 0.004167CG + 0.000125DG + 0.560494C^2 - 0.013389D^2 - 0.016889G^2 \quad (2)$$

## (2) 响应面模型分析

响应面三维图能够更加直观地反映各设计变量与响应目标之间的关系,图6为不同设计变量下预锻成形载荷的响应面图。根据图6a可知,当阻力墙

宽度为定值时,预锻成形载荷随着阻力墙间隙的增大先减小后增加,随着阻力墙斜度的增加先减小后增加,当阻力墙间隙为3.5 mm且阻力墙斜度为25°时,预锻成形载荷达到最小,为29800 kN;根据图6b可知,当阻力墙斜度为定值时,阻力墙宽度在取较大值时,预锻成形载荷降低,当阻力墙间隙为3.5 mm且阻力墙宽度为50 mm时,预锻成形载荷最小,为28400 kN。

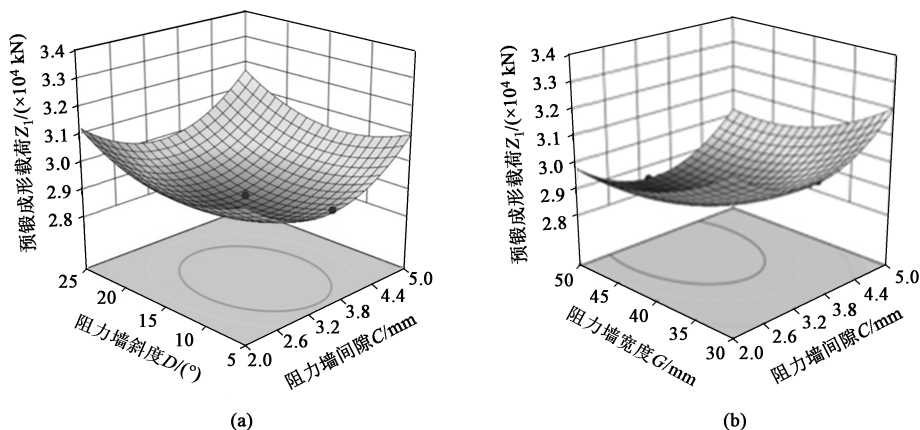


图6 预锻成形载荷响应面图

(a) C-D (b) C-G

Fig. 6 Response surface diagrams of pre-forging load

图7为不同设计变量下飞边长度的响应面图。根据图7a可知,当阻力墙宽度为定值时,飞边长度随着阻力墙斜度的增加先增加后减小,阻力墙间隙对飞边长度的影响不大,当阻力墙间隙为2 mm且阻力墙

斜度为15°时,飞边长度最大,为9.2 mm;根据图7b可知,当阻力墙斜度为定值时,飞边长度随着阻力墙宽度的增加先增加后减小,当阻力墙间隙为2 mm且阻力墙宽度为40 mm时,飞边长度最大,为9.2 mm。

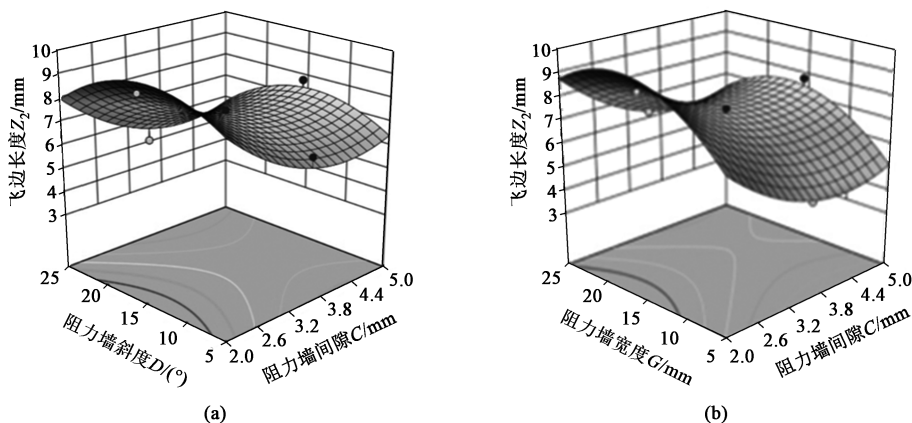


图7 飞边长度响应面图

(a) C-D (b) C-G

Fig. 7 Response surface diagrams of flash length

表7为预锻成形载荷的方差分析结果,由表7可知,模型的 $P$ 值为0.0016,表明模型的显著性较高。因素 $D$ 、 $G$ 、 $C^2$ 、 $D^2$ 和 $G^2$ 的 $P$ 值均小于0.0500,表明因素 $D$ 、 $G$ 、 $C^2$ 、 $D^2$ 和 $G^2$ 为该模型

的重要影响项。模型的相关系数和校正系数分别为0.933、0.744,差值小于0.200,表明模型是合理的,拟合程度高。模型的信噪比为14.7083,表明模型的分辨能力强。

表 7 预锻成形载荷方差分析结果

Table 7 Variance analysis results of pre-forging load						
因素	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	$3.093\times10^7$	9	$3.436\times10^6$	22.6500	0.0016	显著
C	$4.410\times10^5$	1	$4.410\times10^5$	2.9100	0.1490	
D	$1.089\times10^6$	1	$1.089\times10^6$	7.1800	0.0439	
G	$8.281\times10^6$	1	$8.281\times10^6$	54.5700	0.0007	
CD	1250.000	1	1250.000	0.0082	0.9312	
CG	1250.000	1	1250.000	0.0082	0.9312	
DG	$1.513\times10^5$	1	$1.513\times10^5$	0.9968	0.3639	
C <sup>2</sup>	$6.002\times10^5$	1	$6.002\times10^6$	39.5500	0.0015	
D <sup>2</sup>	$2.213\times10^6$	1	$2.213\times10^6$	14.5900	0.0124	
G <sup>2</sup>	$1.362\times10^6$	1	$1.362\times10^6$	8.9800	0.0302	
残差	$7.587\times10^5$	5	$1.517\times10^5$			
总误差	$3.168\times10^7$	14				
相关系数 $N=0.933$ , 校正系数 $N_0=0.774$ , 信噪比 $r=14.7083$						

表 8 为飞边长度的方差分析结果，由表 8 可知，模型的  $P$  值为 0.0023，表明模型的显著性较高。因素  $D$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  和  $G^2$  的  $P$  值均小于 0.0500，表明因素  $D$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  为该模型的重要影响项。模型的相关系数和校正系数分别为 0.9208、0.7571，差值小于 0.200，表明模型是合理的，拟合程度高。模型的信噪比为 16.8119，表明模型的分辨能力强。

表 8 飞边长度方差分析

Table 8 Variance analysis results of flash length						
因素	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	34.5500	9	3.8400	19.0900	0.0023	显著
C	11.4500	1	11.4500	56.9400	0.0006	
D	0.9610	1	0.9610	4.7800	0.0805	
G	5.4800	1	5.4800	27.2300	0.0034	
CD	0.0012	1	0.0012	0.0062	0.9402	
CG	0.0313	1	0.0313	0.1554	0.7097	
DG	0.0012	1	0.0012	0.0062	0.9402	
C <sup>2</sup>	4.0900	1	4.0900	20.3400	0.0063	
D <sup>2</sup>	4.6100	1	4.6100	22.9300	0.0049	
G <sup>2</sup>	7.3300	1	7.3300	36.4800	0.0018	
残差	1.0100	5	0.2011			
总误差	35.5600	14				
相关系数 $N=0.9208$ , 校正系数 $N_0=0.7571$ , 信噪比 $r=16.8119$						

通过设计响应面试验法对模具设计参数进行优化分析，得到最优的设计变量组合。表9为最优设

表 9 最优设计变量取值

Table 9 Optimal design variable values					
参数	C/mm	D/(°)	G/mm	$Z_1/(\times10^4\text{ kN})$	$Z_2/\text{mm}$
数值	2.5	13	44	2.92	9.1

计变量取值。

4 优化后数值模拟结果分析

利用 Deform 软件对优化后的模型进行数值模拟分析，图 8 为优化后的转向节充填图。由图 8 可知，在添加阻力墙结构后，金属在充填过程中，靠近阻力墙结构外侧处的金属流动速度明显增加，在成形后，长枝叉处的金属填充完整且有多余飞边，长度为 8.6 mm。图 9 为阻力墙优化后的预锻成形载荷，由图 9 可知，在添加阻力墙结构后，预锻成形载荷为 28500 kN，处于设备安全成形载荷范围内。

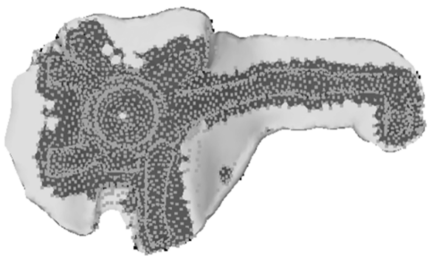


图 8 优化后金属填充效果

Fig. 8 Metal filling effect after optimization

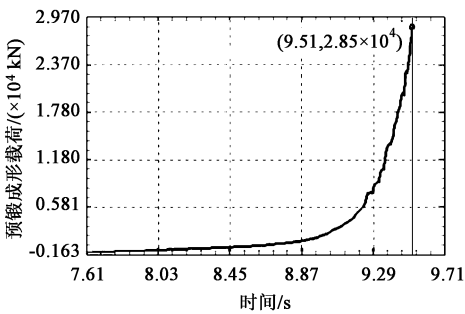
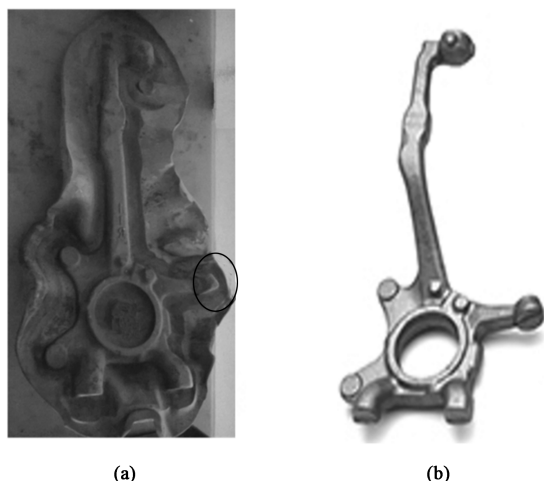


图 9 优化后预锻成形载荷

Fig. 9 Pre-forging load after optimization

5 实际生产验证

为了验证本次模具结构优化结果的准确性，使用该模具结构进行实际生产，结果如图 10 所示。由图 10 可知，转向节锻件在长枝叉处充填完整，有多



(a)

(b)

图 10 转向节产品

(a) 锻件 (b) 切边

Fig. 10 Knuckle product

(a) Forgings (b) Cut edge

余飞边。实际生产表明,本文通过正交试验与响应面法优化后,阻力墙结构设计合理,能够保证在安全的成形载荷范围内获得充填完整的锻件。

## 6 结论

(1) 通过利用正交试验获得对锻件飞边长度与预锻成形载荷影响显著的阻力墙结构因素,为阻力墙间隙  $C$ 、阻力墙斜度  $D$  以及阻力墙宽度  $G$ ,其余因素确定数值为:桥部宽度为 15 mm、阻力墙高度为 25 mm、阻力墙圆角半径为 15 mm。

(2) 通过响应面法优化阻力墙结构后获得的最优参数组合为:阻力墙间隙  $C$  为 2.5 mm、阻力墙斜度  $D$  为  $13^\circ$ 、阻力墙宽度  $G$  为 44 mm。

(3) 实际生产验证表明使用的优化方法具有良好的可靠性,对转向节锻件的生产具有实际指导意义。

### 参考文献:

- [1] 成林,张文明,隋美丽. 热锻参数对汽车转向节力学性能的影响分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (9): 148-151.  
Cheng L, Zhang W M, Sui M L. Effect of hot forging parameters on mechanical properties of automobile steering knuckle [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (9): 148-151.
- [2] 刘琥珀,黄昌文,吴玉国,等. 转向节预锻下模热锻过程中的磨损研究[J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2019, 36 (3): 244-249.  
Liu H P, Huang C W, Wu Y G, et al. Research on wear of pre-

forged lower die of steering knuckle during hot forging [J]. Journal of Anhui University of Technology: Natural Science, 2019, 36 (3): 244-249.

- [3] GB/T 12363—2021, 锻件功能分类 [S].  
GB/T 12363—2021, Classification of forging functions [S].
- [4] 刘雅辉,刘淑梅,何文涛,等. 阻力墙设计对转向节模锻成形工艺的影响[J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (3): 44-48.  
Liu Y H, Liu S M, He W T, et al. Effect of resistance wall design on the drop forging for steering knuckle [J]. Journal of Plastic Engineering, 2015, 22 (3): 44-48.
- [5] 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.
- [6] 吴元徽. 浅析非调质钢的应用前景[J]. 机械制造, 2009, 47 (9): 66-67.  
Wu Y H. Analysis on application prospect of non-quenched and tempered steel [J]. Machinery, 2009, 47 (9): 66-67.
- [7] 郝震宇,胡芳忠,汪开忠,等. 曲轴用非调质钢 38MnVS 失效分析[J]. 冶金动力, 2021, (3): 103-106.  
Hao Z Y, Hu F Z, Wang K Z, et al. Failure analysis of 38MnVS non-quenched non-tempered steel for crankshaft [J]. Metallurgical Power, 2021, (3): 103-106.
- [8] 赵毅,刘淑梅,何文涛,等. 基于正交试验的转向节热模锻工艺参数优化[J]. 上海工程技术大学学报, 2016, 30 (2): 117-121.  
Zhao Y, Liu S M, He W T, et al. Optimization of process parameters in steering knuckle forging based on orthogonal tset [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2016, 30 (2): 117-121.
- [9] 付翔. 汽车转向节的锻造工艺[J]. 锻压装备与制造技术, 2012, 47 (1): 58-62.  
Fu X. Forging process of truck knuckle [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2012, 47 (1): 58-62.
- [10] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.  
Plastic Engineering Society of Chinese Mechanical Engineering Society. Forging Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [11] 何文涛. 汽车转向节热锻成形数值模拟及模具优化[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2016.  
He W T. The Numerical Simulation of Hot Forging and Die Optimization for Automobile Steering Knuckle [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016.
- [12] 高冲,刘淑梅,霍文军. 基于响应面法的铝合金连杆锻造工艺优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (11): 97-100.  
Gao C, Liu S M, Huo W J. Optimization of forging process of aluminum alloy connecting rod based on response surface method [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (11): 97-100.