

细长变截面非轴对称工件模锻模具优化设计

余归城^{1,2}, 阮金华^{1,2}, 张健民^{1,2}, 张宏煜^{1,2}, 林继彬^{1,2}, 郭万富^{1,2}

(1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;

2. 武汉科技大学 精密制造研究院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 提出采用辊锻后模锻工艺生产细长变截面非轴对称剑条, 并采用有限元法分析剑条的模锻过程。以剑条最复杂截面的模锻过程为研究对象, 对比了一道次模锻成形和两道次模锻成形过程中金属材料的流动规律。结果表明: 一道次模锻成形过程中, 金属材料变形量大且分布不均匀, 最大等效应变区域的最大主应力为拉应力, 该区域易产生裂纹; 预锻和终锻两道次成形后, 锻件截面最大等效应变和等效应变的标准差均较大幅度降低。通过正交实验对预锻模具结构开展优化, 结果表明, 上模凹槽深度对锻件横截面等效应变分布的影响最为显著。与一道次模锻成形相比, 预锻模具优化后二道次成形锻件的最大等效应变和等效应变的标准差均显著降低。将上述优化方法用于剑条模锻模具其他截面的设计, 制造出了满足实际生产需求的模锻模具。

关键词: 模锻; 细长变截面非轴对称工件; 金属流动规律; 等效应力; 等效应变; 预锻模具

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.032

中图分类号: TG316.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 10-0229-07

Optimization design of die forging mold for slender non-axisymmetric workpiece with variable cross section

Yu Guicheng^{1,2}, Ruan Jinhua^{1,2}, Zhang Jianmin^{1,2}, Zhang Hongyu^{1,2}, Lin Jibin^{1,2}, Guo Wanfu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Precision Manufacturing Institute, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The process of die forging after roll forging was proposed to produce slender non-axisymmetric sword strips with variable cross section, and the die forging process of sword strips was analyzed by finite element method. Then, for the die forging process of the most complex cross section of sword strips, the metal flow laws in the processes of one-pass die forging and two-pass die forging were compared. The results show that the metal deformation is large and unevenly distributed during the one-pass die forging process, and the maximum principal stress in the maximum equivalent strain region is tensile stress, which is prone to cracks. The maximum equivalent strain and its standard deviation for the cross section of the forgings are greatly reduced after pre-forging and finish forging, and the structure of pre-forging mold was optimized by the orthogonal experiment. The results show that the groove depth of upper mold has the most significant effect on the equivalent strain distribution for the cross section of the forgings. Compared with the one-pass die forging, the maximum equivalent strain and its standard deviation of the two-pass forming forgings after the optimization of pre-forging mold are significantly reduced. The above optimization method is used for the design on the other cross sections of die forging mold for sword strips, and the die forging mold that meets the actual production needs is designed and manufactured.

Key words: die forging; slender non-axisymmetric workpiece with variable cross section; metal flow law; equivalent stress; equivalent strain; pre-forging mold

细长变截面轴对称工件常采用楔横轧或辊锻等自动半自动工艺生产, 而细长变截面非轴对称工件

的生产主要还是采用自由锻和手工打磨^[1-5]。图 1c 所示的重剑是典型的细长变截面非轴对称工件, 其长宽比可达 60~80, 传统生产方式主要是采用自由锻和手工打磨, 其成形精度、成材率、生产效率等经济技术指标不高。本文提出图 1 所示成形工艺, 首先对直径为 $\Phi 14$ mm 的棒材坯料进行辊锻拔长, 以实现金属材料轴向均匀分布, 而后通过热模锻压力机模锻成形出工件的非轴对称截面特征, 该工艺

收稿日期: 2021-09-23; 修订日期: 2021-12-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (51701145)

作者简介: 余归城 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: guicheng@wust.edu.cn

通信作者: 阮金华 (1985-), 男, 博士, 副教授

E-mail: Ruan_Jinhua@wust.edu.cn

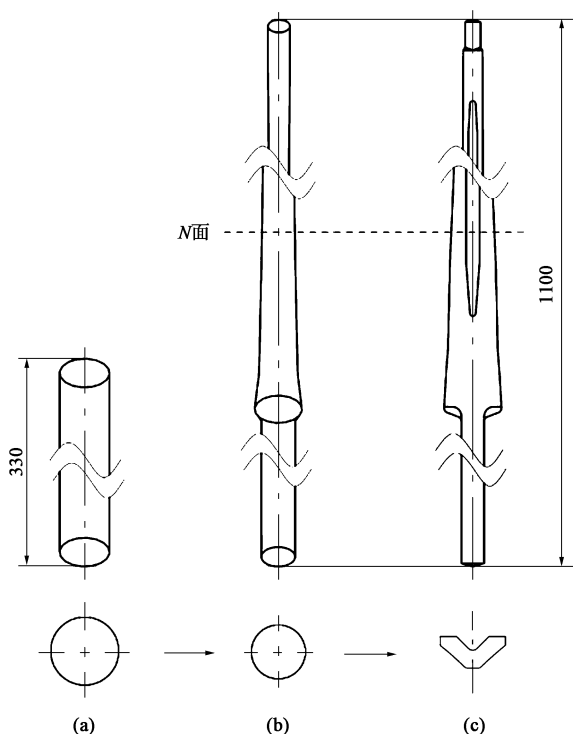


图 1 细长变截面非轴对称工件成形工艺

(a) 棒材坯料 (b) 辊锻制坯 (c) 模锻成形

Fig. 1 Forming process of slender non-axisymmetric workpiece with variable cross section

(a) Blank of bar material (b) Blanking by roll forging (c) Die forging

便于实现自动半自动化生产。

通过对金属流动规律进行分析,可以有效地进行模锻模具的优化设计。徐皓等^[6]通过在平板模锻过程中对飞边桥四周增设半圆形截面阻力槽的方式来促进金属流动,提高了材料利用率。张琦等^[7]通过改善金属成形中的摩擦条件来促进金属流动,并提出了改善摩擦条件的方法。孙晓明等^[8]模拟了不同型腔结构预锻模具下车轮的成形情况,分析了模具形状对工件金属流动的影响,得到了最佳成形方案。Tomov B 等^[9]研究了飞边尺寸对锻件成形过程中金属流动的影响,并给出了飞边结构的设计建议。Zhao X 等^[10]通过优化预锻模具结构,降低了成形过程中锻件内部的有效应变,使锻件获得了更加均匀的变形。可见,细长类工件的比表面积(表面积/体积)大,模锻过程中模具形状和表面状态对金属流动规律的影响更为显著。

本文采用刚塑性有限元法建立了重剑剑条模锻过程的有限元模型,对比一道次模锻成形和预锻+终锻成形两种情况下金属流动过程中的等效应力场和等效应变场,确定采用预锻和终锻工艺来降低金属流动的不均匀性,并采用正交实验优化了预锻模具结构。

1 有限元模型的建立

剑条的材料为 60Si2Mn 弹簧钢,采用双曲正弦 Arrhenius 函数将其流变应力模型表示为^[11]:

$$\dot{\varepsilon} = 2.94 \times 10^3 [\sinh(0.003\sigma)]^{1.6820} \exp\left(-\frac{85151.58}{8.314T}\right) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为应力, MPa; T 为变形温度, K。

根据剑条的整体结构选择合适的分模面,拔模斜度设定为 5° ,并按照相关资料^[12]设计飞边槽的结构。根据 N 截面(图 1)形状、拔模斜度以及飞边槽结构设计上、下模,并对尖角处进行倒角处理,以方便成形。

在剑条模锻过程中,忽略金属轴向变形,利用图 1 所示 N 截面成形过程的镜面对称性,建立起如图 2 所示的剑条模锻过程的平面应变 1/2 有限元模型,其中 $R_1 \sim R_5$ 为上、下模具各处位置的倒角半径。将辊锻制坯加热至 1100°C ^[12]后进行模锻,模具预热至 300°C ,模具与工件之间的摩擦因数设置为 0.6,上模压下速率为 $20 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ 。

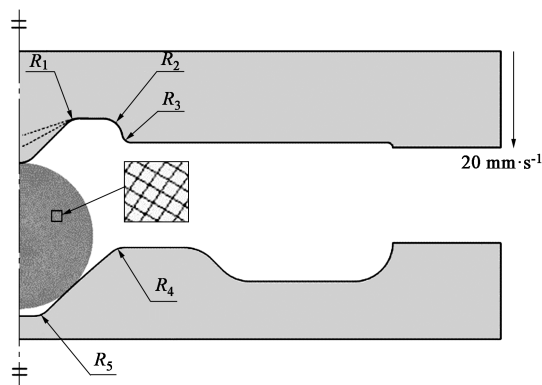


图 2 模锻过程的二维平面应变刚塑性有限元模型

Fig. 2 Rigid plastic finite element model with 2D plane strain of die forging process

2 一道次模锻成形模拟结果

图 3 为工件模锻后的等效应变分布,可见:在靠近上模的锻件凹槽处的等效应变较大,等值线 H 所围区域的等效应变高达 4.2,锻件凹槽处较密的等值线分布表明此区域变形严重;靠近下模的较大区域的等效应变值小于等值线 C 代表的 1.200。采用式(2)评价去除飞边后的锻件横截面的变形均匀性^[13]:

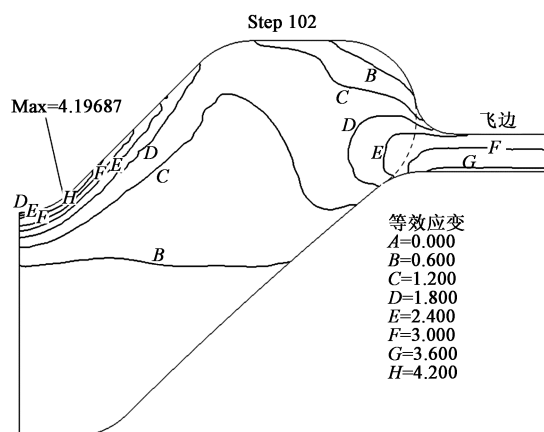


图 3 一道次模锻成形过程中工件的等效应变分布

Fig. 3 Equivalent strain distribution of workpiece during one-pass die forging

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{NE} (\bar{\varepsilon}_t - \bar{\varepsilon}_{ave})^2}{NE}} \quad (2)$$

式中: δ 为等效应变与其平均值的标准差; NE 为除去飞边部分后锻件的单元总数; $\bar{\varepsilon}_t$ 为单元 t 的实际等效应变, $t=1, \dots, NE$; $\bar{\varepsilon}_{ave}$ 为除去飞边部分后

锻件的平均等效应变, $\bar{\varepsilon}_{ave} = \frac{\sum_{t=1}^{NE} \bar{\varepsilon}_t}{NE}$ 。

计算得到一道次模锻成形的等效应变标准差为 0.687, 因此, 一道次模锻成形后锻件横截面的变形很不均匀。

图 4 为一道次模锻成形过程中锻件最大主应力分布图, 其中, σ_1 、 σ_3 为等值线 I 所围区域的第一主

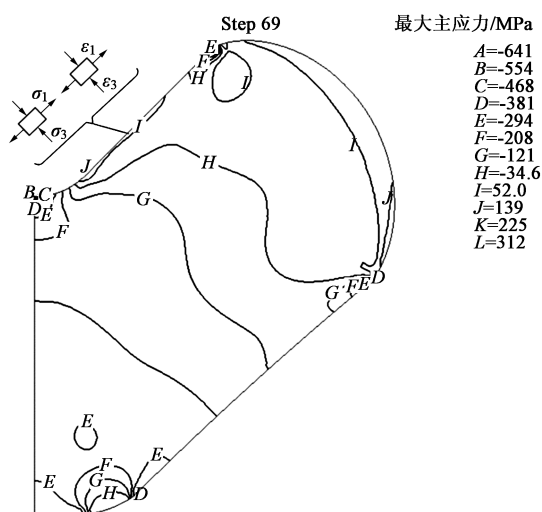


图 4 一道次模锻成形过程中工件最大主应力分布

Fig. 4 Maximum principal stress distribution of workpiece during one-pass die forging process

应力和第三主应力, ε_1 、 ε_3 为等值线 I 所围区域的第一主应变和第三主应变。可见, 在图 3 所示的最大等效应变位置附近的 I 和 J 区的最大主应力为平行于该处外轮廓线的拉应力, 该区域处于拉伸变形状态。

上述等效应变分析和等效应力分析表明, 锻件凹槽处的变形量大, 变形不均匀, 且最大主应力为较大的拉应力, 在一道次模锻成形过程中可能产生微裂纹缺陷。

3 两道次模锻成形设计

为了避免一道次模锻成形过程中微裂纹缺陷的产生, 提高模锻过程中的金属流动均匀性, 现采用预锻和终锻两道次模锻成形工艺。终锻工步模具的设计依据热锻件图, 可采用一道次模锻成形时的模具。预锻工步模具设计在终锻模具的几何尺寸上做出调整。为使预锻后的锻件能够放入加热感应线圈, 其径向尺寸不应太大, 因此, 将预锻过程中锻件产生飞边的时刻视为预锻结束。预锻后的锻件将重新加热至 800 °C^[12], 以重新再结晶、消除内部应力, 之后再行终锻。

3.1 两道次模锻成形模拟结果

图 5 与图 6 分别为预锻成形与终锻成形时的等效应变分布图。可知, 两个道次锻件的最大等效应变分别为 2.91 和 2.68, 等效应变标准差分别为 0.46904 和 0.43945, 相对于一道次模锻成形有明显降低, 等效应变分布更加均匀。由此可见, 采用两道次模锻成形能改善等效应变的分布情况, 降低锻件的成形难度。

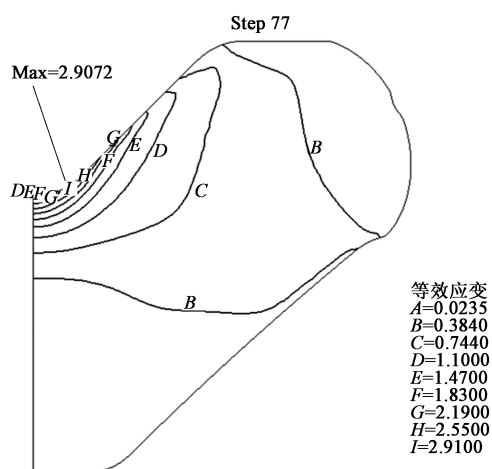


图 5 预锻成形过程中工件的等效应变分布图

Fig. 5 Equivalent strain distribution diagram of workpiece during pre-forging process

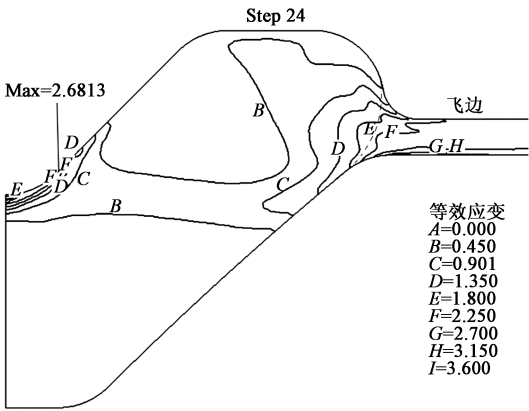


图 6 终锻成形过程中工件的等效应变分布图
Fig. 6 Equivalent strain distribution diagram of workpiece during finish forging process

3.2 预锻模具优化

为了进一步改善锻件内部的金属流动均匀性，对预锻模具结构进行优化。如图2所示， $R_1 \sim R_5$ 为

待优化的尺寸。为降低靠近上模的锻件凹槽处的成形难度，如图 2 中虚线部分所示，分别将凹槽深度减少 25% 和 50%。另外，飞边槽桥部的高度 h 也是一个设计变量。

为了提高优化效率，采用正交实验法设计实验，从而找到最佳参数。采用 $L_{18}(3^7)$ 正交表，其设计变量的取值如表 1 所示。其中，因素 A 表示凹槽深度减少比例，简称“凹槽”。

按照表 1 给出的尺寸设计出 18 组上、下模具并进行模锻成形模拟，得到如表 2 所示的预锻后锻件的等效应变最大值 $\varepsilon_{\max 1}$ 及其标准差 δ_1 ，终锻后锻件的等效应变最大值 $\varepsilon_{\max 2}$ （除去飞边）及其标准差 δ_2 （除去飞边）。

表 3 采用极差分析法，评价了正交实验中各因素对锻件预锻后的等效应变最大值 $\varepsilon_{\max 1}$ 及其标准差 δ_1 以及终锻后的等效应变最大值 $\varepsilon_{\max 2}$ （除去飞边）及其标准差 δ_2 （除去飞边）的影响程度。

表 1 设计变量的水平

Table 1 Standard of designed variables

水平	A (凹槽) / %	B (R_1) / mm	C (R_2) / mm	D (R_3) / mm	E (R_4) / mm	F (R_5) / mm	G (h) / mm
1	0	1.0	0.50	0.250	1	1	0.5
2	-0.25	1.5	0.75	0.375	2	2	1.0
3	-0.50	2.0	1.00	0.500	3	3	1.5

表 2 正交实验方案和结果

Table 2 Schemes and results of orthogonal experiment

编号	A (凹槽) / %	B (R_1) / mm	C (R_2) / mm	D (R_3) / mm	E (R_4) / mm	F (R_5) / mm	G (h) / mm	$\varepsilon_{\max 1}$	δ_1	$\varepsilon_{\max 2}$	δ_2
1	0.00	1.0	0.50	0.250	1	1	0.5	3.110	0.45187	1.52	0.45023
2	0.00	1.5	0.75	0.375	2	2	1.0	3.160	0.45115	1.58	0.44195
3	0.00	2.0	1.00	0.500	3	3	1.5	3.130	0.46904	2.25	0.43945
4	-0.25	1.0	0.50	0.375	2	3	1.5	1.510	0.30553	1.86	0.42844
5	-0.25	1.5	0.75	0.500	3	1	0.5	1.370	0.26171	2.44	0.44950
6	-0.25	2.0	1.00	0.250	1	2	1.0	1.350	0.27323	2.15	0.43192
7	-0.50	1.0	0.75	0.250	3	2	1.5	0.985	0.25389	2.22	0.46523
8	-0.50	1.5	1.00	0.375	1	3	0.5	0.908	0.22664	2.54	0.50557
9	-0.50	2.0	0.50	0.500	2	1	1.0	1.060	0.24353	2.14	0.39650
10	0.00	1.0	1.00	0.500	2	2	0.5	3.040	0.45330	1.54	0.42961
11	0.00	1.5	0.50	0.250	3	3	1.0	3.200	0.42205	1.50	0.41635
12	0.00	2.0	0.75	0.375	1	1	1.5	3.220	0.47728	1.54	0.42850
13	-0.25	1.0	0.75	0.500	1	3	1.0	1.410	0.28346	2.13	0.43366
14	-0.25	1.5	1.00	0.250	2	1	1.5	1.400	0.28494	1.99	0.43466
15	-0.25	2.0	0.50	0.975	3	1	1.0	1.430	0.27808	2.22	0.44571
16	-0.50	1.0	1.00	0.375	3	1	1.0	0.925	0.23278	2.63	0.47023
17	-0.50	1.5	0.50	0.500	1	2	1.5	1.110	0.27020	2.34	0.44590
18	-0.50	2.0	0.75	0.250	2	3	0.5	1.250	0.281530	2.39	0.48862

表 3 极差分析结果
Table 3 Result of range analysis

目标		A (凹槽)	B (R_1)	C (R_2)	D (R_3)	E (R_4)	F (R_5)	G (h)
$\varepsilon_{\max 1}$	极差 R	2.103	0.077	0.111	0.03	0.063	0.055	0.042
	优水平	A3	B1	C2	D3	E1	F2	G1
	主次关系	$A>C>B>E>F>G>D$						
δ_1	极差 R	0.203	0.018	0.012	0.002	0.017	0.006	0.025
	优水平	A3	B2	C3	D1	E3	F1	G2
	主次关系	$A>G>B>E>C>F>D$						
$\varepsilon_{\max 2}$	极差 R	0.757	0.167	0.218	0.213	0.258	0.104	0.075
	优水平	A1	B1	C1	D1	E2	F2	G3
	主次关系	$A>E>C>D>B>F>G$						
δ_2	极差 R	0.044	0.009	0.005	0.005	0.005	0.012	0.022
	优水平	A1	B1	C1	D3	E2	F2	G3
	主次关系	$A>G>F>B>C=D=E$						

从表 3 中可见, 凹槽 (A) 的极差在各个目标中都是最大的, 这说明凹槽的结构尺寸对结果的影响是最显著的。对于凹槽, A1 和 A3 各出现了两次, 考虑到 A1 和 A3 分别是凹槽因素的两个极端水平, 因此, 选取 A2 作为最佳水平, 即相当于减小了靠近上模的锻件凹槽的深度。对于其他因素也采用相同的方法, 最终得到最佳组合为 A2B1C1D2E2F2G3, 即凹槽深度减少 25%、 $R_1=1.0\text{ mm}$ 、 $R_2=0.50\text{ mm}$ 、 $R_3=0.375\text{ mm}$ 、 $R_4=2\text{ mm}$ 、 $R_5=2\text{ mm}$ 、 $h=1.5\text{ mm}$ 。

3.3 优化结果对照

通过正交实验得到了预锻模具的最佳结构尺寸, 并按照该尺寸设计出预锻模具进行模锻成形模拟。预锻和终锻成形的等效应变分布如图 7 和图 8 所示。可见, 锻件在靠近上模的凹槽处的等效应变相对于一道次模锻成形 (图 3) 有显著降低, 预锻的最大等效应变为 1.51, 终锻的最大等效应变为 1.88 (除飞边部分外), 预锻和终锻等效应变的标准差分别为 0.31494 和 0.39913, 并且等效应变等值线的分布也变得更加均匀。

图 9 对比了正交实验与优化后的终锻锻件等效应变标准差, 可见优化后终锻锻件的等效应变标准差低于 18 组正交实验的数据, 表明优化后锻件内部的等效应变分布更加均匀。

图 10 比较了一道次模锻成形与优化后两道次模锻成形的等效应变及其标准差, 与一道次模锻成形对比, 两道次模锻成形时的等效应变及其标准差均大幅降低, 表明优化后的两道次模锻成形时锻件内部的金属流动更加均匀, 不易产生微裂纹缺陷, 更加适合于生产。

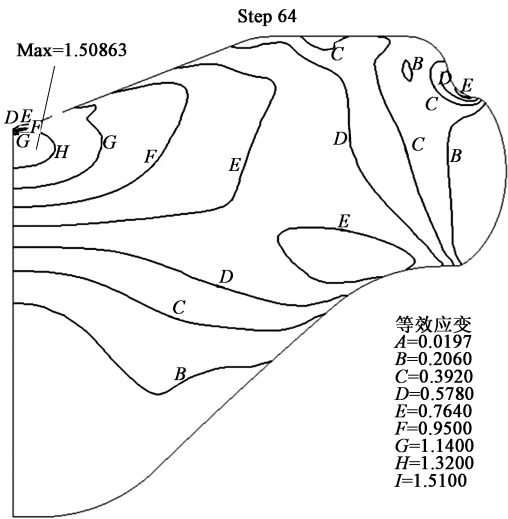


图 7 优化后预锻成形过程中工件的等效应变分布图
Fig. 7 Equivalent strain distribution diagram of workpiece during pre-forging process after optimization

将相同的截面模具设计方法用于其他截面, 并按照各截面之间的间距, 设计并制作出图 11 所示的预锻模具和终锻模具。经两道次模锻后, 对锻件进行去飞边、打磨等处理, 得到剑条成品。经检测, 剑条成品外形良好、无裂纹等缺陷, 与模拟结果吻合。结果表明, 该优化设计所得的模具结构参数可靠, 能够有效地指导生产。

4 结语

辊锻圆棒后再模锻成形工艺可以用于生产细长

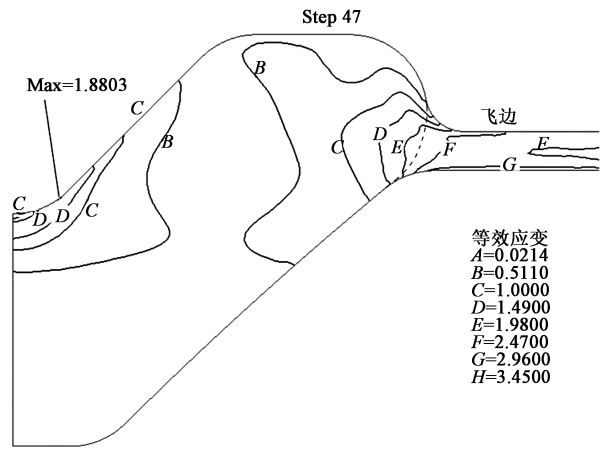


图 8 优化后终锻成形过程中工件的等效应变分布图

Fig. 8 Equivalent strain distribution diagram of workpiece during finish forging process after optimization

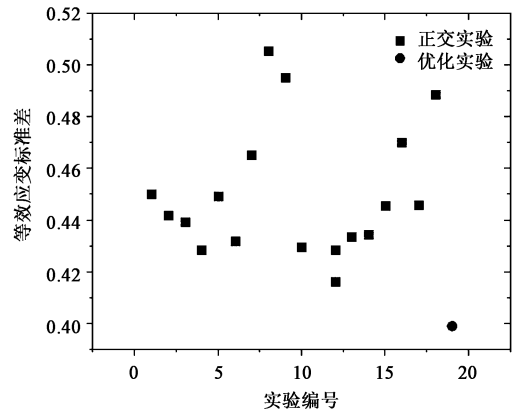


图 9 正交实验与优化实验的终锻成形工件的等效应变标准差对比

Fig. 9 Comparison of equivalent strain standard deviation between orthogonal experiment and optimized experiment for workpiece during finish forging

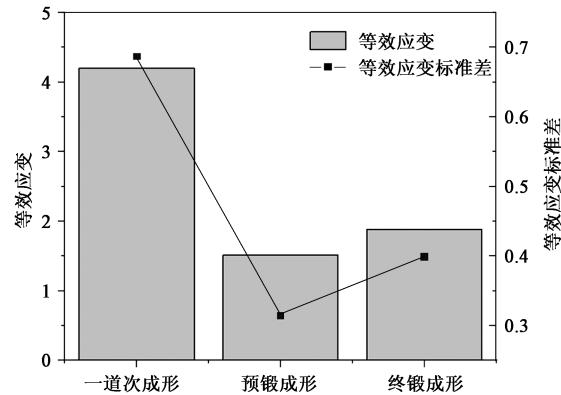


图 10 一道次模锻成形与优化后两道次模锻成形工件的等效应变及其标准差对比

Fig. 10 Comparison of equivalent strain and its standard deviation for workpiece between one-pass die forging and optimized two-pass die forging

变截面非轴对称剑条。剑条在一道次模锻成形过程

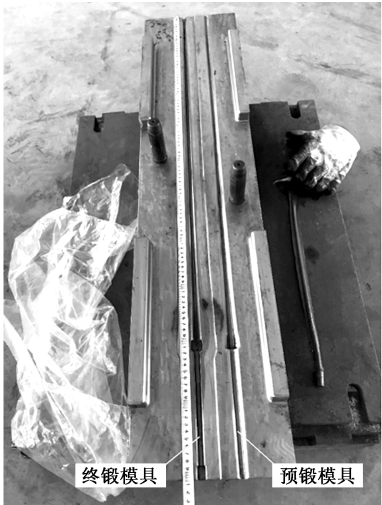


图 11 预锻模具和终锻模具

Fig. 11 Pre-forging and finish forging molds

中，锻件横截面上的等效应变分布极不均匀，靠近上模的锻件凹槽区的等效应变最大，极易产生微裂纹。采用预锻和终锻两个工步，能有效地降低锻件的等效应变及其标准差，提高锻件内部金属流动的均匀性。通过正交实验法得出预锻模具结构尺寸的最佳组合为 $A2B1C1D2E2F2G3$ ，即凹槽深度减少 25%、 $R_1=1.0\text{ mm}$ 、 $R_2=0.50\text{ mm}$ 、 $R_3=0.375\text{ mm}$ 、 $R_4=2\text{ mm}$ 、 $R_5=2\text{ mm}$ 、 $h=1.5\text{ mm}$ 。模具优化后，锻件在预锻和终锻成形过程中的等效应变和等效应变标准差均得到了减小，锻件内部的金属流动更加均匀。

参考文献：

[1] 庄燕, 马丽, 毛洪辉. 细长轴数控车削加工质量分析研究 [J]. 机械工程与自动化, 2021, (1): 17-18, 22.
Zhuang Y, Ma L, Mao H H. Long and thin axis numerical control turning processing quality analysis and research [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021, (1): 17-18, 22.

[2] 张军改, 崔松松, 秦思晓, 等. 国内楔横轧技术现状与发展趋势 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (6): 1-7.
Zhang J G, Cui S S, Qin S X, et al. Current situation and development trend of cross wedge rolling technology in China [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (6): 1-7.

[3] 孙浩. 细长轴加工工艺研究 [J]. 内燃机与配件, 2020, (9): 119-120.
Su H. Study on machining technology of slender shaft [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020, (9): 119-120.

[4] 杨翠苹, 胡正寰, 张康生, 等. 楔横轧件轴向变形研究 [J]. 机械工程学报, 2004, 40 (9): 80-83.
Yang C P, Hu Z H, Zhang K S, et al. Study on axial deformation of workpiece in cross wedge rolling [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40 (9): 80-83.

- [5] 朱春东, 王辉. 拉杆辊锻制坯有限元模拟 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (9): 108-110, 119.
Zhu C H, Wang H. Finite element simulation of roll forging for rod blank [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (9): 108-110, 119.
- [6] 徐皓, 刘江. 基于 Deform 的平板锻模型腔四周增加半圆形阻力槽的研究实践 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 179-184.
Xu H, Liu J. Research and practice on adding semi-circular resistance groove around forging mold cavity of lining plate based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 179-184.
- [7] 张琦, 王仲仁. 改善摩擦条件以实现省力成形 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (18): 106-113.
Zhang Q, Wang Z R. Improve the friction condition to realize less-loading forming [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (18): 106-113.
- [8] 孙晓明, 魏华成, 杜晓钟, 等. DEFORM-3D 在整体辗钢车轮预锻模具型腔分析中的应用 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 23-31.
Sun X M, Wei H C, Du X Z, et al. Application of DEFORM-3D in cavity analysis of pre-forging mold for integral steel wheel [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 23-31.
- [9] Tomov B, Radev R, Gagov V. Influence of flash design upon process parameters of hot die forging [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157-158: 620-623.
- [10] Zhao X, Zhao G, Wang G, et al. Preform die shape design for uniformity of deformation in forging based on preform sensitivity analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 128 (1-3): 25-32.
- [11] 孙伟, 谢广平, 吴波. 60Si2Mn 弹簧钢热变形行为研究 [J]. 轧钢, 2013, 30 (3): 29-31, 37.
Sun W, Xie G P, Wu B. Research on hot deformation behavior of 60Si2Mn spring steel [J], Steel Rolling, 2013, 30 (3): 29-31, 37.
- [12] 张永军, 韩静涛. 锻压工艺学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
Zhang Y J, Han J T. Forging Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [13] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
China Society for Technology of Plasticity, CMES. Forging Manual [M]. The 3rd Edition. Beijing: China Machine Press, 2007.

