

模具

## 爪极精锻模具的耐久性研究

杨程<sup>1</sup>, 张金虎<sup>1</sup>, 许晨<sup>1</sup>, 庄晓伟<sup>2</sup>, 刘武<sup>2</sup>, 王玲<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 江苏龙城精锻集团有限公司, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 为防止爪极精锻下模凸筋处产生局部尺寸偏差而导致模具过早失效, 利用有限元分析了导致爪极精锻模具使用寿命低的原因, 发现磨损失效是导致爪极精锻下模凸筋处易产生尺寸偏差的主要因素。基于爪极锻造模具型腔的特点, 对成形工艺进行了改善, 在爪极预锻上模设置与精锻下模凸筋位置和大小相对应的凸起, 可有效降低精锻下模凸筋处的温度、相对滑动速度和接触应力, 使单个锻次的磨损量由优化前的  $1.08 \times 10^{-5}$  mm 减小为  $3.65 \times 10^{-6}$  mm, 且优化后的锻件未出现折叠、湍流和涡流等缺陷。根据该优化方案加工出模具并进行实际生产验证, 结果显示, 该优化方案使爪极精锻下模的平均使用寿命由优化前的 5000 件提高至 6000 件。

**关键词:** 爪极; 精锻模具; 磨损失效; 模具使用寿命; 凸筋

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.025

**中图分类号:** TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0168-07

## Durability research on precision forging die for claw pole

Yang Cheng<sup>1</sup>, Zhang Jinhui<sup>1</sup>, Xu Chen<sup>1</sup>, Zhuang Xiaowei<sup>2</sup>, Liu Wu<sup>2</sup>, Wang Ling<sup>2</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
2. Longcheng Precision Forging Group Co., Ltd., Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In order to prevent the premature failure of die caused by the local dimensional deviation at the convex rib of lower die for claw pole precision forging, the reasons for the low service life of precision forging die for claw pole were analyzed by the finite element method, and it was found that the wear failure was the main factor causing the dimensional deviation at the convex rib of lower die for claw pole precision forging. Then, based on the characteristics of forging die cavity for claw pole, the forming process was improved, and the protrusion corresponding to the position and size of convex rib in the precision forging lower die was set in the pre-forging upper die for claw pole, which could effectively reduce the temperature, relative sliding speed and contact stress at the convex rib of precision forging lower die, and make the wear amount of a single forging pass from  $1.08 \times 10^{-5}$  mm before optimization reduce to  $3.65 \times 10^{-6}$  mm. Furthermore, the improved forgings had no defects such as folds, turbulence and eddy currents, and according to the optimized scheme, the die produced under the optimized scheme was verified in actual production. The results show that the optimized scheme increases the average service life of the precision forging lower die for claw pole from 5000 pieces before optimization to 6000 pieces.

**Key words:** claw pole; precision forging die; wear failure; die service life; convex rib

爪极是汽车发电机中的关键零件, 通常采用热锻工艺成形<sup>[1-3]</sup>。在热锻成形过程中, 模具处于高温和高应力的工作状态, 且模具与坯料之间具有非常大的相对滑动, 因此, 在模腔上容易出现热机械疲劳开裂、塑性变形和磨损等失效形式<sup>[4]</sup>。对于爪极这类精密锻件来说, 在这些模具失效形式中, 磨

损是影响尺寸精度的最主要因素。

为了保证锻件精度和提高模具的使用寿命, 研究者对模具的磨损做了大量的研究<sup>[4-6]</sup>。张京<sup>[7]</sup>利用有限元模拟, 对模具硬度和模具过渡圆角半径、挤压速度等进行分析, 结果表明, 适当提高模具硬度和优化模具过渡圆角半径可有效提高模具的磨损寿命。蔡力钢等<sup>[8]</sup>基于正交试验法, 确定了坯料温度、锻造速度和模具初始温度对模具磨损的影响程度, 并通过优化这些工艺参数使模具的磨损量减小了 53.7%。

在以上这些提升锻模磨损寿命的研究中, 研究对象以及锻造工艺较为简单, 而在爪极热锻工艺中, 不仅锻件的形状复杂, 且塑性变形过程涉及多个工

收稿日期: 2021-12-17; 修订日期: 2022-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51874226); 西安市科技局科技创新引导项目 (201805033YD11CG17); 陕西省重点研发计划项目 (2018ZDXM-GY-120)

作者简介: 杨程 (1976-), 男, 博士, 副教授

E-mail: yang.cheng@stu.xjtu.edu.cn

序,包括镦粗、预锻和精锻,如图 1 所示。另外,在实际生产中,为了减少机加工以节约成本和提高生产效率,零件上的一些细节常通过锻造获得,且往往在精锻工序控制爪极上细小特征的尺寸和精度;而在精锻过程中,精锻下模的凸筋处易出现磨损,从而导致模具因局部尺寸超差而过早失效,如图 2 所

示。因此,为了提高精锻下模的使用寿命并保证爪极锻件的质量,基于实际的生产工况和复杂的爪极热锻工艺条件,结合有限元模拟,本文探究了精锻下模凸筋处易产生尺寸偏差的原因,提出了改善精锻下模使用寿命的优化方案,对优化前后的工艺参数进行对比和分析,并通过试验验证了优化方案的可行性。

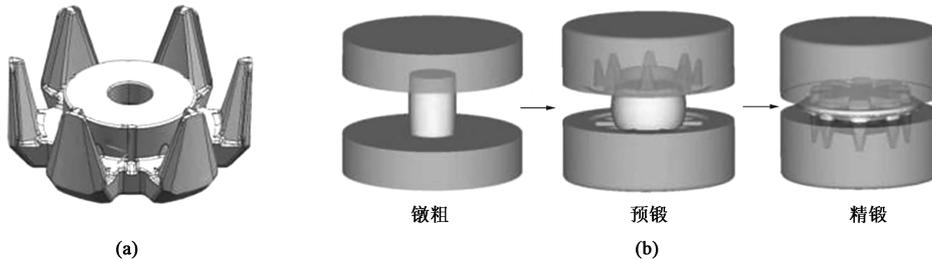


图 1 爪极 (a) 及其锻造过程 (b)  
Fig. 1 Claw pole (a) and its forging process (b)



图 2 精锻下模的凸筋  
Fig. 2 Convex rid of precision forging lower die

## 1 模具失效分析

如前所述,在爪极热锻成形过程中,由于温度和应力的作用,塑性变形和磨损均有可能导致模具出现尺寸偏差,因此,在提出优化方案之前需首先确定模具失效的主要原因。利用有限元软件,对爪极整个成形过程进行模拟和分析,探究塑性变形和磨损对模具寿命的影响。

### 1.1 有限元模型的建立

爪极为轴对称结构,为了提高模拟的效率和精度,采用坯料和模具的 1/6 进行模拟,模拟参数如表 1 所示。成形模拟完成后,将精锻过程结束时坯料所受的力映射到精锻下模上,进行模具应力分析。另外,在爪极热锻工艺中,为降低模腔应力,通常采用组合模具,为此在进行模具分析时需在模芯与

表 1 爪极锻造模拟参数

Table 1 Simulation parameters of claw pole forging

参数	数值
模具材料	H13 钢
模具温度/℃	250
坯料材料	08 钢
坯料温度/℃	1250
摩擦因数	0.3
传热系数/( $N \cdot (s \cdot mm \cdot ^\circ C)^{-1}$ )	11
锻压速度/( $mm \cdot s^{-1}$ )	50

预应力环之间添加过盈量,过盈量设置为 0.2 mm。

### 1.2 精锻下模的塑性变形分析

当模具上某点的应力大于屈服强度时,即会发生塑性变形<sup>[4]</sup>。精锻下模在锻造完成时的模具温度和等效应力分布如图 3 所示,从图 3 中可以看到,精锻下模凸筋处的温度最高,达到了 654 ℃,等效应力为 392 MPa。在热锻成形过程中,模具的屈服强度随着温度的升高而降低,H13 钢在 654 ℃时的屈服强度约为 700 MPa<sup>[9]</sup>,远大于精锻下模凸筋处所受的等效应力,因此,在精锻过程中该区域未发生塑性变形。

### 1.3 精锻下模的磨损分析

对精锻下模进行磨损分析,磨损量分布如图 4 所示。从图 4 中可以看到,在温度和机械应力的作用下,当精锻过程完成时,精锻下模凸筋处单个锻次的磨损量达到了  $1.08 \times 10^{-5}$  mm,磨损较为严重。

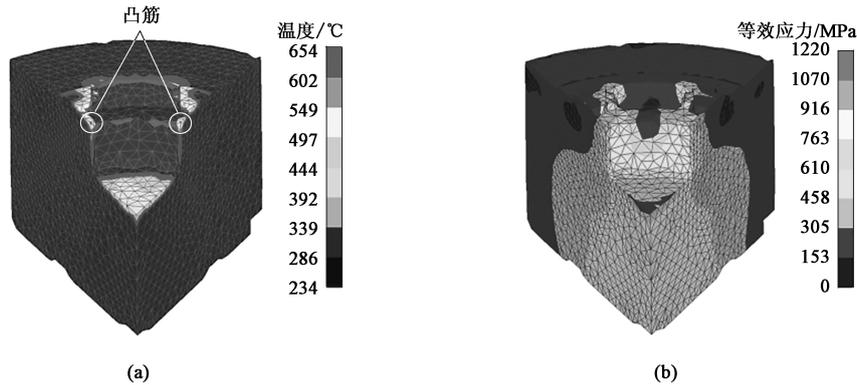


图 3 精锻下模的温度 (a) 和等效应力 (b) 分布

Fig. 3 Temperature (a) and equivalent stress (b) distributions of precision forging lower die

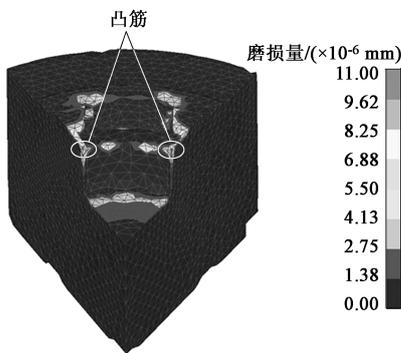


图 4 精锻下模磨损分布

Fig. 4 Wear distribution of precision forging lower die

综上所述,在精锻过程完成时,精锻下模凸筋处的等效应力未超过模具材料的屈服强度,不易发生塑性变形,而该处的磨损较为严重。因此,在爪极精锻过程中,造成精锻件下模凸筋处出现尺寸偏差的主要因素为磨损。

## 2 优化方案

在热锻模具的磨损分析中,常采用修正后的

Archard 磨损模型<sup>[10]</sup>,其表达式为:

$$W(T) = K(T) \frac{LP}{H(T)} \quad (1)$$

$$H(T) = 9216.4T^{-0.505} \quad (2)$$

$$K(T) = (29.29 \ln T - 168.73) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中:  $W$  为磨损量;  $T$  为温度;  $K$  为磨损系数;  $L$  为滑动距离;  $P$  为模具与坯料之间的接触压力;  $H$  为硬度。

从该磨损模型中可以看出,模具的磨损量主要与温度、模具与坯料之间的接触压力、相对滑动距离等因素有关,而这些因素往往又与模具和坯料之间的接触时间有关。在爪极锻造成形过程中,预锻过程完成后,预锻件将被转运到精锻模具上,预锻件会先与精锻下模的凸筋接触,且在整个锻造过程中均保持接触,如图 5a 和图 5d 所示。因此,为了减小预锻件与精锻下模凸筋的接触时间,本文提出了一个优化方案:在预锻上模上设置与精锻下模凸筋位置相同、但尺寸略大于凸筋的凸起,从而使预锻件上形成相对应的凹槽,如图 6 所示。

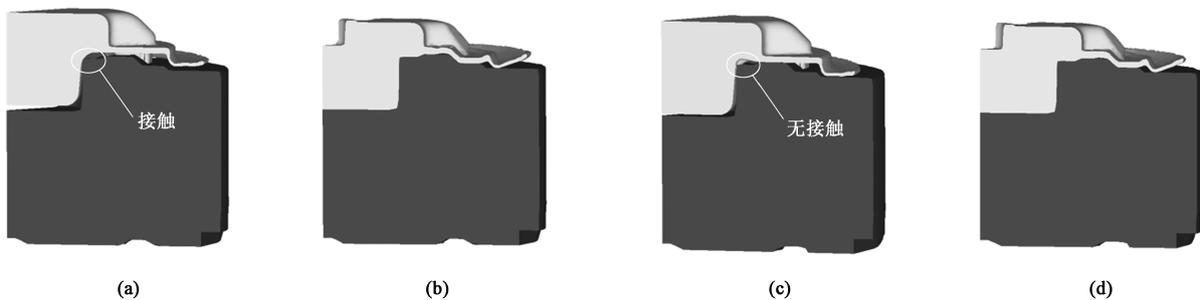


图 5 优化前后的精锻下模与锻件接触位置对比

(a) 优化前,开始阶段 (b) 优化前,结束时刻 (c) 优化后,开始阶段 (d) 优化后,结束时刻

Fig. 5 Comparison of contact position for precision forging lower die and forgings before and after optimization

(a) Before optimization, initial stage (b) Before optimization, end time (c) After optimization, initial stage (d) After optimization, end time

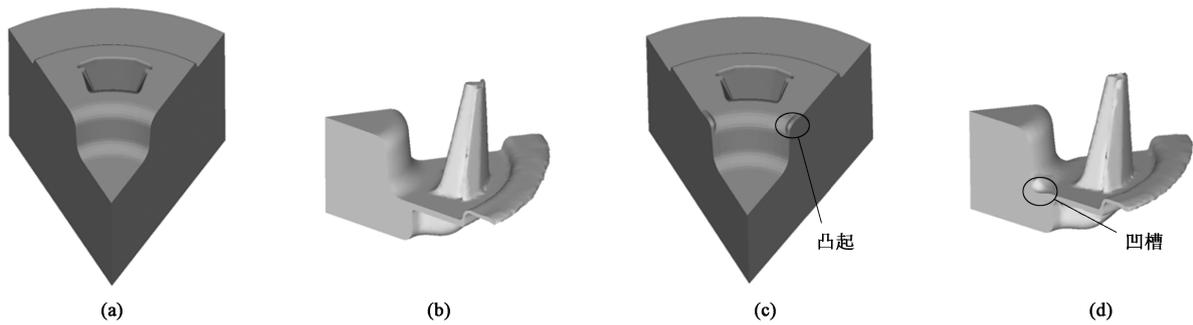


图 6 优化前后的预锻上模和预锻件形状对比

(a) 优化前, 预锻上模 (b) 优化前, 预锻件 (c) 优化后, 预锻上模 (d) 优化后, 预锻件

Fig. 6 Comparison of shapes between pre-forging upper die and pre-forgings before and after optimization

(a) Before optimization, pre-forging upper die (b) Before optimization, pre-forgings (c) After optimization, pre-forging upper die (d) After optimization, pre-forgings

由于预锻件上凹槽的存在, 改变了精锻下模与预锻件的接触位置。在精锻开始阶段, 预锻件与精锻下模的凸筋不接触, 接触位置由优化前的凸筋处变为飞边区, 只有在精锻结束阶段, 预锻件与精锻下模的凸筋才发生接触, 如图 5c 和图 5d 所示。

### 3 优化结果对比

#### 3.1 成形载荷对比

在模锻过程中, 载荷是制定工艺流程的一个重要指标, 载荷过大不仅会增大压力机的负担, 而且会导致模具过早失效, 影响锻件质量。优化前后的成形载荷对比如图 7 所示。从图 7 中可以看到, 优化前后预锻和精锻过程的载荷基本保持一致。

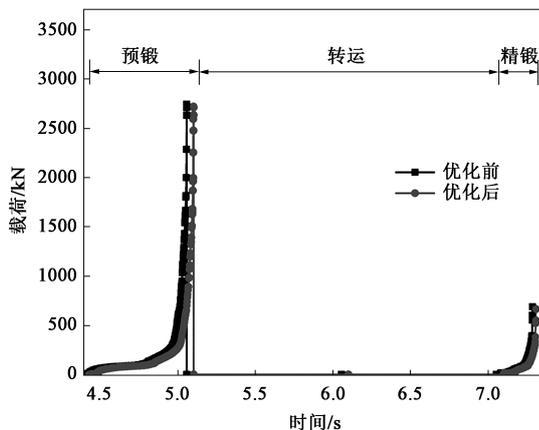


图 7 优化前后的成形载荷对比

Fig. 7 Comparison of forming loads before and after optimization

#### 3.2 磨损参数对比

利用有限元软件中的点追踪功能, 在精锻下模

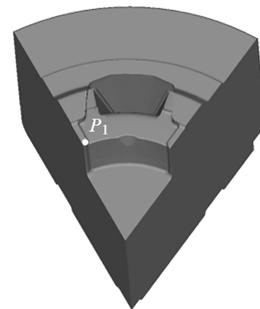


图 8 精锻下模凸筋处的  $P_1$  点

Fig. 8 Point  $P_1$  at convex rib of precision forging lower die

的凸筋上磨损量最大的位置选取  $P_1$  点, 如图 8 所示。以  $P_1$  点代表精锻下模的凸筋, 对整个精锻过程中凸筋处的磨损参数进行分析, 探究优化方案对模具磨损寿命的影响。

优化前后的模具温度对比如图 9 所示。从图 9 中可以看到: 优化前, 由于精锻下模的凸筋在整个精锻过程中均与预锻件有接触, 在热传导的作用下,

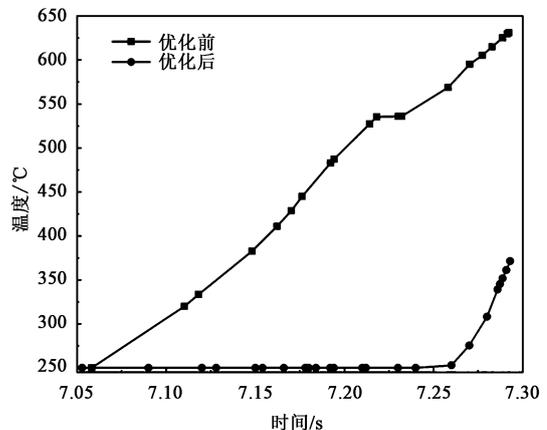


图 9 优化前后的模具温度对比

Fig. 9 Comparison of temperatures for die before and after optimization

凸筋处的温度不断升高,最高温度达到了 631 ℃;而优化后,由于精锻下模的凸筋只在精锻过程的后期与预锻件接触,接触时间较短,所以,模具的温升也较小,最高温度仅为 371 ℃。

根据式 (2) 和式 (3) 可知,模具硬度和磨损系数是与模具温度有关的函数,因此,模具温度的变化必然会引起硬度与磨损系数的变化。优化前后的硬度对比和磨损系数对比结果如图 10 所示,相比于优化前,由于优化方案中凸筋处的温升较小,所以,在精锻完成时磨损系数的增加量和硬度的减小量均较小。

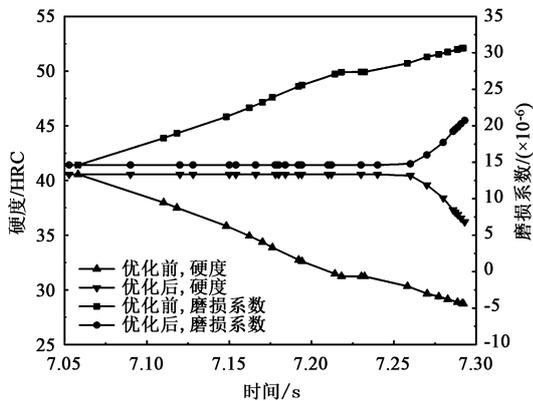


图 10 优化前后的硬度和磨损系数对比

Fig. 10 Comparison of hardnesses and wear factors before and after optimization

优化前后的接触应力对比结果如图 11 所示。从图 11 中可以看到:优化前,精锻下模的凸筋处在整个精锻过程中均受到接触应力,最大值为 871 MPa;优化后,精锻下模的凸筋处仅在精锻过程的后期受到接触应力,最大值为 830 MPa,略低于优化前。

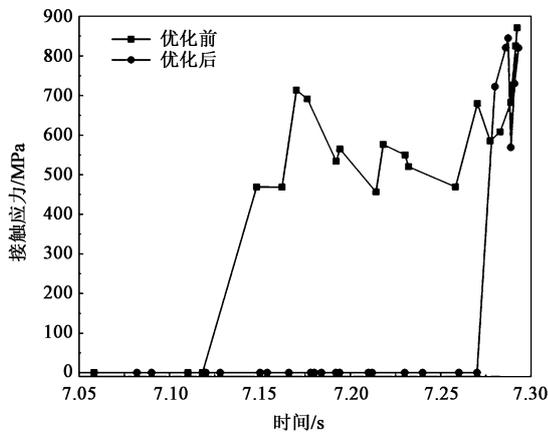


图 11 优化前后的接触应力对比

Fig. 11 Comparison of contact stress before and after optimization

优化前后的相对滑动速度对比结果如图 12 所示。从图 12 中可以看到:优化前,精锻下模的凸筋处与预锻件几乎在整个精锻过程均有相对滑动,最大相对滑动速度为  $38 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;优化后,精锻下模的凸筋处与预锻件的相对滑动仅出现在精锻过程的后期,最大相对滑动速度为  $31 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,小于优化前,这也意味着精锻下模的凸筋处与预锻件之间有更小的相对滑动距离。

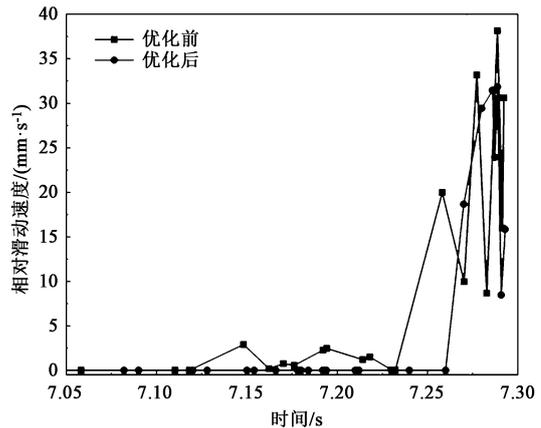


图 12 优化前后的相对滑动速度对比

Fig. 12 Comparison of relative sliding speeds before and after optimization

模具凸筋处的温度、相对滑动速度、接触应力等因素的变化最终会体现在磨损量的变化上,优化前后的磨损量对比结果如图 13 所示。从图 13 中可以看到:优化前,单个锻次的磨损量为  $1.08 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ,且在整个精锻过程均有磨损量的积累;而优化后,单个锻次的磨损量仅为  $3.65 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ,约为优化前的 1/3,且仅在精锻过程的后期有磨损量的增加。

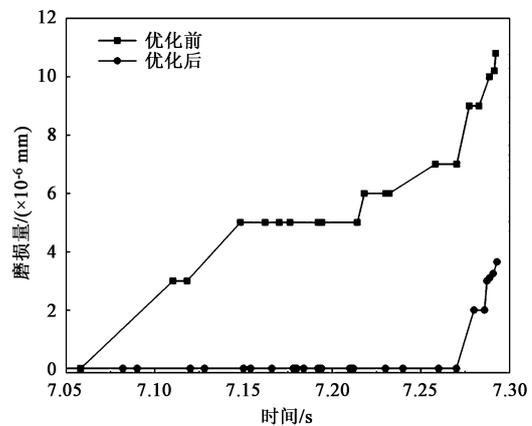


图 13 优化前后的磨损量对比

Fig. 13 Comparison of wear amounts before and after optimization

### 3.3 锻件质量对比

在模锻过程中，锻件的质量缺陷，例如折叠、流线紊乱、未充满等，会严重影响锻件的质量<sup>[11-12]</sup>。因此，需要在保证磨损量大幅度减小的同时，也应防止锻件出现质量缺陷。由于本文的优化方案改变了预

锻件的形状，需对爪极精锻件进行折叠和流线分析，优化前后的折叠分布和流线对比结果如图 14 所示。从图 14 中可以看到，优化前与优化后的精锻件的折叠分布基本相同，均仅出现在飞边区域，优化方案在凹槽处未出现新的折叠缺陷，两者的金属流线也保持一致。

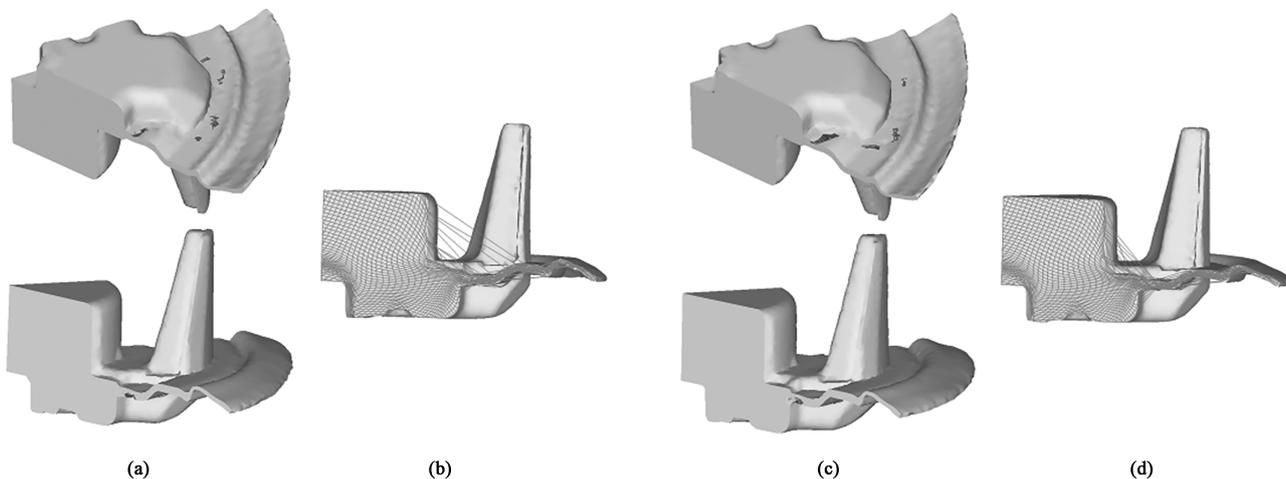


图 14 优化前后流线和折叠分布对比

(a) 优化前，折叠分布 (b) 优化前，流线分布 (c) 优化后，折叠分布 (d) 优化后，流线分布

Fig. 14 Comparison of flow line and folding distributions before and after optimization

(a) Before optimization, folding distribution (b) Before optimization, flow line distribution (c) After optimization, folding distribution

(d) After optimization, flow line distribution

综上所述，通过对磨损参数和锻件质量进行全面的对比和分析后可以得出，根据本文所提出的优化方案，在提高精锻模具寿命的同时，还可保证锻件质量与优化前一致。

### 3.4 实际生产验证

根据本文所提出的优化方案，加工出预锻上模，如图 15 所示，并进行实际生产验证。经现场统计，优化后，精锻模具的平均使用寿命达到了 6000 件左右，相比于优化前的 5000 件左右，使用寿命提高了约 20%。



图 15 优化后的预锻上模

Fig. 15 Pre-forging upper die after optimization

## 4 结论

(1) 爪极精锻下模的凸筋处所受应力未超过模具材料的屈服强度，而模拟得到的单个锻次的磨损量较大，得出该处易产生尺寸偏差的主要原因为磨损。

(2) 在预锻上模设置与精锻下模凸筋处位置和大小相对应的凸起，减小了精锻下模凸筋处与预锻件的接触时间，磨损量从优化前的单个锻次  $1.08 \times 10^{-5}$  mm 减小至  $3.65 \times 10^{-6}$  mm，平均使用寿命由优化前的 5000 件左右提高至 6000 件左右。

(3) 相较于优化前的精锻件，优化后的精锻件上未出现新的折叠缺陷，且折叠均仅分布在飞边区域；另外，两者的金属流线保持一致，均未出现穿流、涡流等缺陷。

### 参考文献：

[1] 孙昊. 汽车发电机爪极组合模具结构及工艺优化 [D]. 镇江：江苏大学，2016.  
 Sun H. Optimization of Automobile Claw Pole Compositied Die Structure and Process [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.

- [2] Yang C, Zhao S D, Zhang J. A single stage hot forging process and die sets of alternator poles [J]. International Journal of Material Forming, 2013, 6 (4): 511-517.
- [3] 王蕾. 混合励磁发电机槽式爪极热锻冷挤成形关键技术研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2018.  
Wagn L. Key Technologies in Hot Forging and Cold Extrusion of Slot Claw Pole for Hybrid Excitation Generator [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2018.
- [4] Gronostajski Z, Kaszuba M, Polak S, et al. The failure mechanisms of hot forging dies [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 657: 147-160.
- [5] Kim D H, Lee H C, Kim B M, et al. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166 (3): 372-380.
- [6] Choi C, Groseclose A, Altan T. Estimation of plastic deformation and abrasive wear in warm forging dies [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (8): 1742-1752.
- [7] 张京. 突缘类锻件复合挤压过程数值模拟及工艺优化研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019.  
Zhang J. Numerical Simulation and Process Optimization Study on Co-extrusion Process for Flange Forgings [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [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及优化 [J]. 北京工业大学学报, 2020, 46 (1): 1-9.
- [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] 张丝雨. 最新金属材料牌号、性能、用途及中外牌号对照速查实用手册 [M]. 北京: 中国科技文化出版社, 2005.  
Zhang S Y. The Latest Metal Material Brand, Performance, Use and Comparison Between Chinese and Foreign Brands Quick Reference Practical Manual [M]. Beijing: China Science, Technology and Culture Press, 2005.
- [10] Lee R S, Jou J L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140 (1): 43-48.
- [11] Wei K, Zhan M, Fan X, et al. Unequal-thickness billet optimization in transitional region during isothermal local loading forming of Ti-alloy rib-web component using response surface method [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31 (4): 845-859.
- [12] Zhang Y, Shan D, Xu F. Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (2): 745-753.



### 欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

1958年创刊。中国机械工业联合会主管，中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会合办。

全国锻压行业会刊，全国中文核心期刊。中文核心期刊要目总览(北京大学)、中国科学引文数据库(核心版, CSCD)、中国科技期刊引证报告(核心版, CJKR)、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、RCCSE中国核心学术期刊、中国学术期刊文摘数据库(核心版, CSAD-C)、中国学术期刊文摘数据库(英文版)、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)、中国知网、万方数字化期刊群、美国剑桥科学文摘(GSA)、美国化学文摘(GA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、俄罗斯文摘杂志(AJ)。

金属塑性工程行业专业技术(月刊)期刊 国内外公开发行

地址: 北京市海淀区学清路18号《锻压技术》编辑部 100083

电话: 010-62920652 82415085

E-mail: fst@263.net (稿件咨询) fst\_linyutong@163.com (广告咨询)

发表文章请登录网站在线投稿 <http://www.fstjournal.net>

我们藉行业 翘楚之势  
为您搭建 广阔的信息桥梁



### 主要栏目

综 述	技 术 交 流
锻 造	节 能 技 术
模 具	摩 擦 与 润 滑
轧 制	计 算 机 应 用
标 准 化	装 备 与 成 套 技 术
管 材 成 形	加 热 与 热 处 理
板 料 成 形	材 料 与 成 形 性 能
特 种 成 形	理 论 与 实 验 研 究
试 验 技 术	

全国各地邮局均可订阅，逾期未订上者可与编辑部联系邮购

- ◆ 国内邮发代号: 2-322
- ◆ 国外邮发代号: BM5549
- ◆ 国内定价: 25元/册, 300元/年
- ◆ 国内刊号: CN 11-1942/TG
- ◆ 国际刊号: ISSN 1000-3940
- ◆ 广告许可证: 京海工商广登字20170021号 杂志网站 微信公众号

