

# 模具加载方式对传动用螺旋伞齿轮闭式锻造工艺的影响

徐 伟<sup>1</sup>, 万 轶<sup>2</sup>, 沙鑫美<sup>1</sup>

(1. 三江学院 机械与电气工程学院, 江苏 南京 210012; 2. 南京晓庄学院 环境科学学院, 江苏 南京 211171)

**摘要:** 闭式锻造通常存在多个动模, 而各个动模之间的加载方式是影响锻件成形质量的重要因素之一。针对螺旋伞齿轮闭式锻造工艺中, 存在的模具寿命低、锻件填充不满等缺陷, 在原模具结构基础上增加了1个动模, 并通过有限元软件 Deform-3D 对螺旋伞齿轮的闭式锻造过程进行了建模仿真, 研究了上、下凸模的4种加载方案对锻件成形质量及模具的影响, 分别从材料的流动和填充规律、锻件的温度分布规律以及模具载荷的变化规律等方面进行了分析。结果表明: 采用改进后的模具结构可以获得质量良好的锻件, 消除了填充不满缺陷; 同时, 采用第3种加载方案, 获得的锻件质量更好, 模具的寿命更长。

**关键词:** 闭式锻造; 加载方式; 螺旋伞齿轮; 金属流动; 温度; 模具载荷

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.010

**中图分类号:** TG315.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0075-06

## Influence of mold loading mode on closed forging process for transmission spiral bevel gear

Xu Wei<sup>1</sup>, Wan Yi<sup>2</sup>, Sha Xinmei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China;

2. School of Environmental Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

**Abstract:** There are usually multiple moving molds in closed forging. Therefore, the loading mode between moving molds is one of the important factors affecting forgings quality. In closed forging process of spiral bevel gears, there were defects such as low mold life and insufficient filling of forgings. For this problem, a moving mold was added on the basis of original mold structure, and the closed forging process of spiral bevel gear was modeled and simulated by finite element software Deform-3D. Furthermore, the influences of four loading schemes of upper and lower punches on forgings quality and mold were studied, and the flow and filling law of material, the temperature distribution law of forgings and the variation law of mold load were analyzed respectively. The results show that the forgings with good quality can be obtained by adopting the improved mold structure, and the defects of insufficient filling can be eliminated. Meanwhile, the forgings with better quality and mold with longer life can be obtained by adopting the third loading scheme.

**Key words:** closed forging; loading mode; spiral bevel gear; metal flow; temperature; mold load

闭式锻造又被称为无飞边锻造, 其工作原理是利用模具形成封闭模腔, 使得毛坯在1个或多个动模的挤压作用下成形为指定的形状<sup>[1-3]</sup>。与开式锻造<sup>[4-5]</sup>相比, 闭式锻造不需要后续进行切边, 材料的使用率和生产效率大幅提升; 其次因为未经切边

的缘故, 保证了金属组织的连续均匀, 避免了金属流线外露, 使得锻件的精度更高、性能更好、抗疲劳能力更强; 同时, 金属成形时由于处于三向压应力状态, 使得金属的可塑性大大提高<sup>[6-7]</sup>, 因此, 闭式锻造特别适合成形形状复杂的精密锻件。

本文研究的螺旋伞齿轮是汽车差速器机构中重要的组成零件之一, 用于速度差的调整, 是车辆安全行驶的保证, 对其精度要求和强度要求非常高, 因此, 常采用闭式锻造的生产工艺, 但目前采用3个动模的方式仍存在一些潜在问题, 例如模具的寿命较低、锻件有填充不满的风险等。因此, 为解决以上问题, 对原闭式锻造模具结构进行了改进, 以有限元软件 Deform-3D 作为辅助工具, 对改进前后的闭式锻造过

收稿日期: 2021-05-06; 修订日期: 2021-08-03

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金项目 (19KJB460006, 17KJB460011); 三江学院机械与电气工程学院“136工程”科研项目 (21SJJD001)

作者简介: 徐 伟 (1982-), 男, 学士, 高级实验师

E-mail: xu\_wei@sju.edu.cn

通信作者: 万 轶 (1982-), 女, 博士, 副教授

E-mail: yiwang@njztc.edu.cn

程进行了建模仿真，并全面分析、比较了改进后工艺的不同模具加载方式对锻件成形质量及模具的影响。

1 螺旋伞齿轮闭式锻造工艺分析

螺旋伞齿轮锻件图如图 1 所示，由齿部和轴部两部分组成，带有 40 个螺旋齿，两端各有 1 个盲孔，外形复杂。在实际工作过程中，处于扭矩多变的工况，因此，选取强度和刚度较高、塑性良好的 20CrMnTi 合金钢作为伞齿轮材料，其力学性能如表 1 所示<sup>[8]</sup>。原闭式锻造模具结构如图 2a 所示，有凸模、上凹模、下凹模 3 个动模，其工作过程为：待上、下凹模合模形成闭式模腔后，利用凸模向坯料施加压力成形伞齿轮锻件。经 Deform-3D 模拟获得的锻件成形图与实际锻造试验获得的锻件图如图 3 所示，模拟锻件与实际锻件在同一部位（前锥面）均存在填充不满的缺陷，造成该种现象的原因为：随着锻件的逐渐成形，坯料与模具之间的摩擦力越来越大，阻碍了金属的流动，导致锻件下部无法完全填充。因此，根据分析结果，在原闭式锻造模具的基础上，增加 1 个动模，如图 2b 所示，上、下凹模合模形成模腔后，上、下凸模同时对坯料施

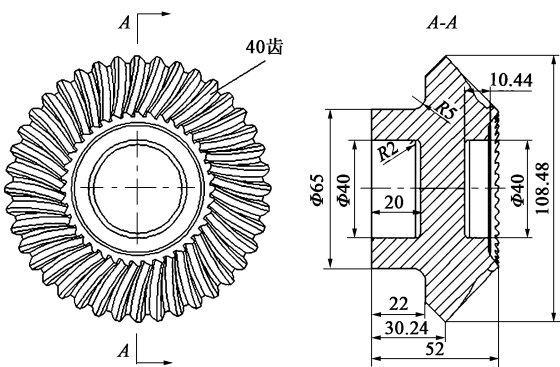


图 1 螺旋伞齿轮锻件示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of spiral bevel gear forgings

表 1 20CrMnTi 钢的力学性能  
Table 1 Mechanical properties of 20CrMnTi steel

参数	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	冲击功/J	硬度/ HB	弹性模量/GPa	泊松比	热导率/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
数值	1100	835	15	65	249	207	0.25	$1.26\times 10^{-5}$

压，由于坯料部分金属在下凸模的作用下相对凹模有向上运动的趋势，因此摩擦力方向向下，有利于推进锻件下部的填充，消除填充不满的问题。但是，动模的加载方式同样会对锻件的质量及模具造成影响，因此，以下将通过 Deform-3D 软件进行全面分析。

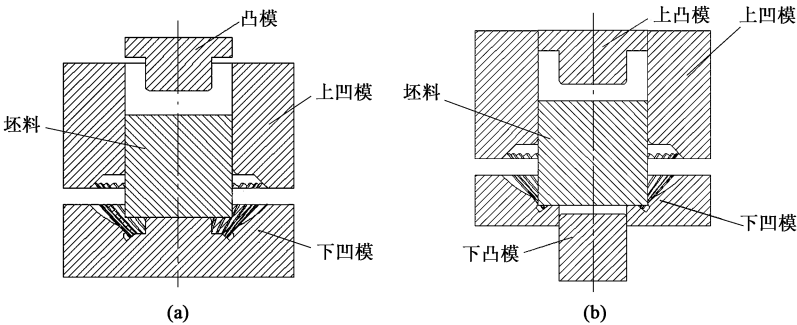


图 2 闭式模锻模具结构简图  
(a) 改进前 (b) 改进后  
Fig. 2 Schematic diagram of die structure for closed die forging  
(a) Before improvement (b) After improvement

2 改进后闭式锻造有限元分析

2.1 有限元模型建立及模具加载方式的确定

根据螺旋伞齿轮锻件的体积可确定坯料的尺寸为  $\Phi 65\text{ mm}\times 62\text{ mm}$ ，通过 UG 软件按照图 2b 完成建模，为简化模拟计算，直接将上、下凹模装配成合模状态，然后保存为 STL 格式，将其导入到 Deform-3D 中。坯料选择材料库中性能接近的 4120 钢，设

置为塑性体，为提高模拟精度，坯料网格数量划分为 80000 个，初始温度设置为  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，模具设置为刚体，模具温度设置为  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，锻造过程中传热系数设置为  $5\text{ N}\cdot(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$ ，考虑润滑的作用，参照文献 [9] 将摩擦因数设置为 0.3。由于上、下凹模已经为合模状态，因此速度设为 0，上、下凸模的加载方案如表 2 所示，模拟中忽略实际锻造过程中间凸模的无效行程，完成整个过程需要 2 s，设置上凸模为主模具，模拟步长选取最小网格边长的  $1/3$ <sup>[10]</sup>，

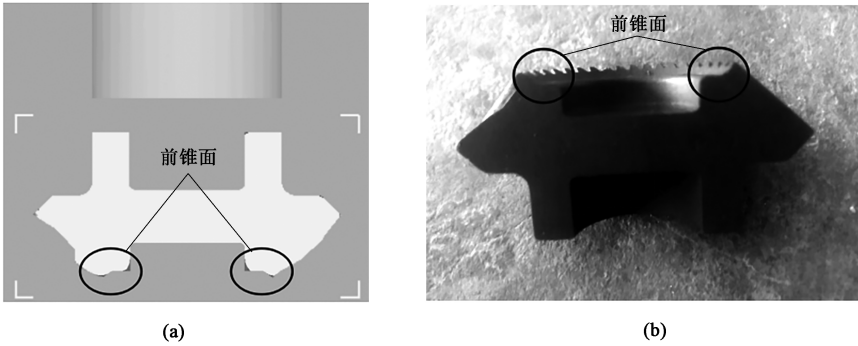


图 3  锻件成形效果图  
(a) 模拟锻件  (b) 实际锻件  
Fig. 3  Forming effect diagrams of forgings  
(a) Simulated forgings  (b) Actual forgings

表 2  上、下凸模加载方案  
Table 2  Loading schemes of upper and lower punches

方案	上凸模		下凸模	
	加载时间/s	加载速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	加载时间/s	加载速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )
1	0~2	17	0~2	5
2	0~2	17	0~1 1~2	0 10
3	0~2	17	0.000~1.375 1.375~2.000	0 16
4	0~2	17	0.0~1.5 1.5~2.0	0 20

为每步 0.1 mm，运动行程达到 34 mm 时仿真停止，即整个模拟过程为 340 步。

2.2  改进后闭式锻造材料流动规律分析

图 4 为改进后锻件成形结束时的速度分布情况，通过速度场分布可以直观地了解金属的填充规律<sup>[11]</sup>。改进前，模具结构为单凸模挤压方式，使得坯料上部的流速大于下部，存在较大的速度差<sup>[12]</sup>，最终导致金属材料在伞齿轮下端盲孔部位形成堆积，而前锥面出现填充不满的现象，见图 3。而改进后，金属材料在上、下凸模的挤压作用下由两端向中间流动，成形上、下端盲孔时，在模腔的束缚下，部分金属径向流动成形顶锥、根锥和背锥面，部分金属向左下方和右下方流动成形前锥面，整个过程材料流动合理；同时，根据图 4a 可知锻件内部的材料流速较为均匀，产生锻造缺陷的可能性较小。最终前锥面填充结果如图 4b 所示，根据箭头指向，材料能够顺利流到指定位置，充填饱满，消除了改进前图 3 所示的缺陷。

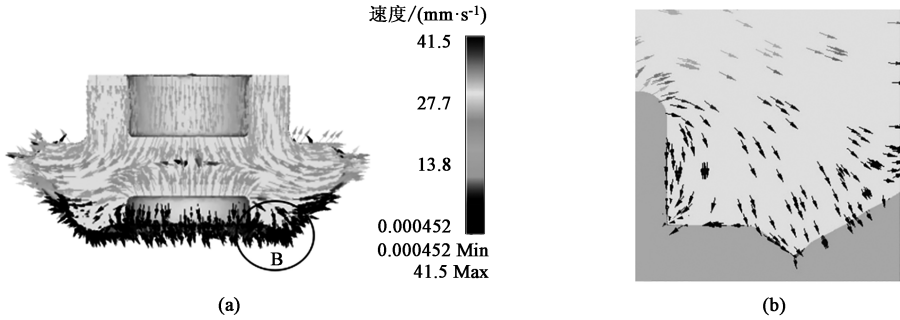


图 4  速度场分布情况  
(a) 成形结束时速度分布  (b) B 区域局部放大图  
Fig. 4  Distribution of velocity field  
(a) Velocity distribution at end of forming  (b) Partial enlarged diagram of B area

2.3  模具加载方式对锻件温度的影响

锻后零件的温度对锻件质量有极大的影响，冷却时，锻件内外温差过大，会形成较大的内应

力<sup>[13]</sup>，冷却后残余应力较大，超过材料抗拉强度时会引起锻件开裂，因此，对锻件温度分布的分析极其重要。通过 Deform-3D 的剖切功能，获得不

同模具加载方式下的锻造温度分布情况如图 5 所示。从各方案成形后锻件的整体温度分布来看,均表现为两端温度低而中间温度高,表面温度相对内部温度较低,因此,冷却时表面冷却较快而内部冷却较慢。各方案的最高温度均位于锻件心部,最低温度均位于锻件表面,由图 5 可知:方案 1 锻件的最高温度为 956 ℃、最低温度为 642 ℃,温差为 313 ℃;方案 2 锻件的最高温度为 989 ℃、最低温

度为 643 ℃,温差为 346 ℃;方案 3 锻件的最高温度为 872 ℃、最低温度为 637 ℃,温差为 235 ℃;方案 4 锻件的最高温度为 1030 ℃、最低温度为 666 ℃,温差为 364 ℃。明显可知,方案 3 的锻件的内外温差更小,冷却后产生的残余应力更小,致使锻件出现裂纹的可能性更小,此外,方案 3 中锻件整体温度分布更均匀,局部冷却速差更小,不易产生翘曲现象。

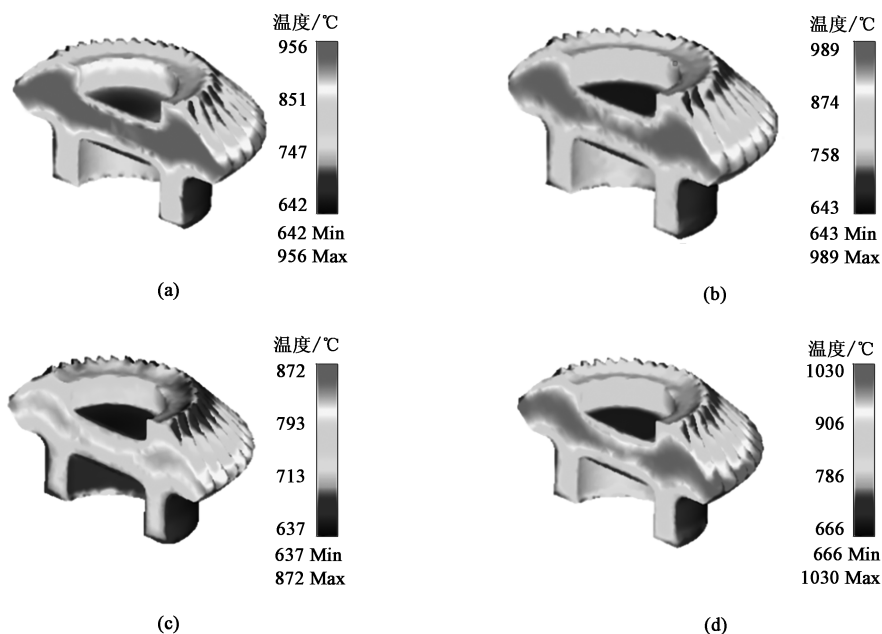


图 5 不同模具加载方式下锻件温度分布图

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3 (d) 方案 4

Fig. 5 Temperature distribution diagrams of forgings under different die loading modes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3 (d) Scheme 4

## 2.4 模具加载方式对模具载荷的影响

由于齿形模的结构复杂,生产制造更为困难,同时对锻件成形质量的影响也更大,因此,主要研究齿形模具的受载变化情况。图 6 为不同模具加载方式下齿形模载荷变化规律图。从图 6 可以看出,各方案齿形模的载荷变化规律大体一致,分为 3 个阶段:前期,坯料与齿形模具接触较少,摩擦力小,载荷缓慢上升;中期,随着接触面积逐渐增加,摩擦力变大,变形抗力增加,载荷稳定上升;后期,由于材料流动空间受限,同时坯料与齿形模的接触面积达到最大,载荷急剧上升至最大值。由图 6 可知,方案 1 中齿形模的最大载荷为 4170 kN,方案 2 中齿形模的最大载荷为 3860 kN,方案 3 中齿形模的最大载荷为 3470 kN,方案 4 中齿形模的最大载荷为 5110 kN。显然,采用方案 3 时,齿形模受载更小,更利于齿形模寿

命的延长。

## 3 锻造试验

综合上述分析可知,改进后模具结构能获得填充饱满的螺旋伞齿轮锻件,同时采用方案 3 加载方式(即上凸模以  $17 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  定速加载,下凸模在  $0.000 \sim 1.375 \text{ s}$  内不加载,在  $1.375 \sim 2.000 \text{ s}$  内以  $16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  定速加载),能够获得质量更好的锻件,也更有利于齿形模寿命的提高。根据改进后的模具结构加工获得的齿形模如图 7a 和图 7b 所示,棒料尺寸为  $\Phi 65 \text{ mm} \times 62 \text{ mm}$ ,按工艺要求加热至  $920 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,锻造时通过石墨乳润滑降低摩擦,上、下凸模的加载方式按方案 3 进行设置。最后通过压力机锻压获得的伞齿轮锻件如图 7c 和图 7d 所示,顶锥、根锥、前锥、背锥均填充完整,伞齿轮



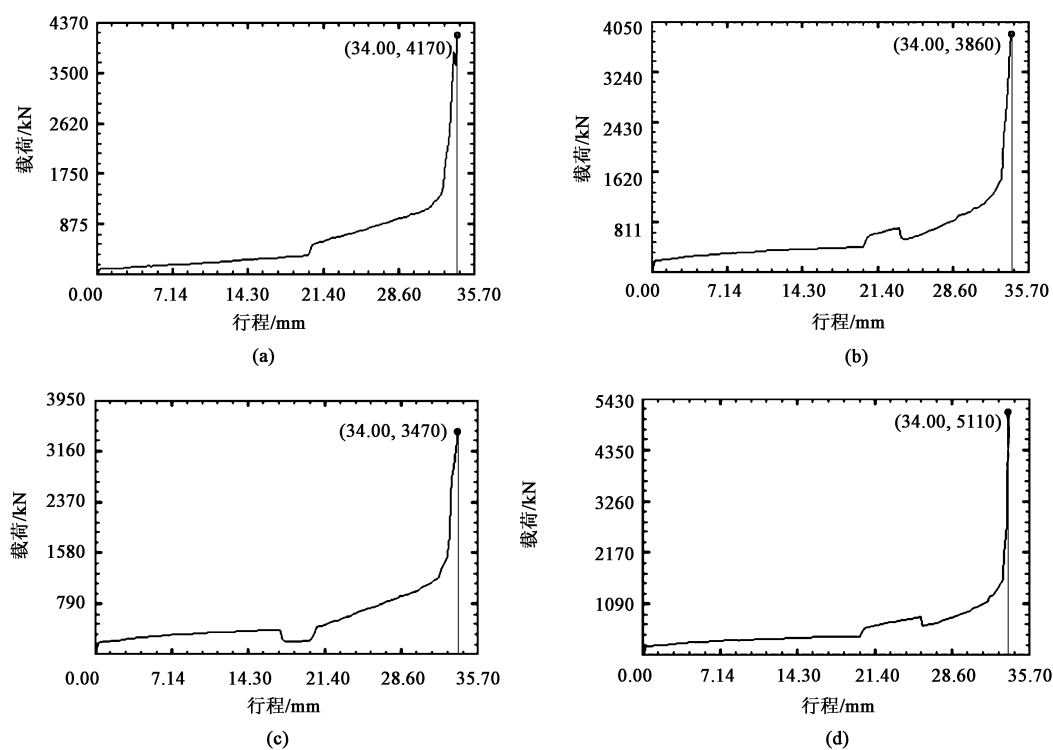


图6 不同模具加载方式下载荷变化规律图

(a) 方案1 (b) 方案2 (c) 方案3 (d) 方案4

Fig. 6 Diagrams of load variation law under different die loading modes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3 (d) Scheme 4

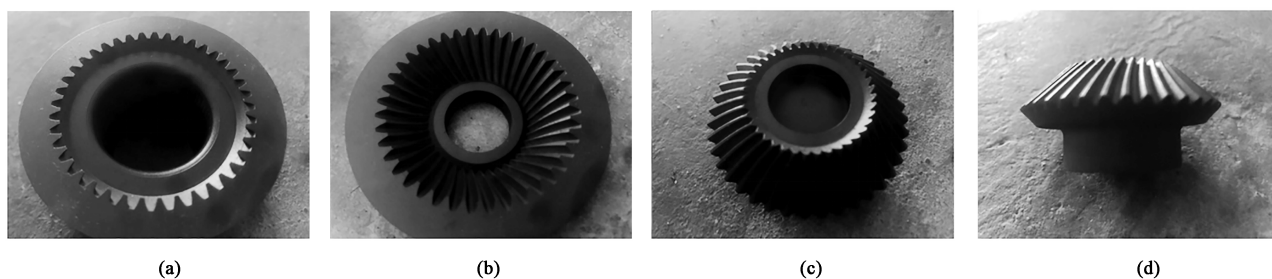


图7 模具与锻件实物图

(a) 上凹模 (b) 下凹模 (c) 伞齿轮锻件1 (d) 伞齿轮锻件2

Fig. 7 Physical maps of dies and forgings

(a) Upper die (b) Lower die (c) Bevel gear forgings 1 (d) Bevel gear forgings 2

质量良好, 消除了改进前结构导致的前锥面充不满缺陷, 与仿真结果一致。

## 4 结论

(1) 利用有限元软件 Deform-3D 对螺旋伞齿轮的闭式锻造过程进行了建模仿真, 并对原模具结构进行了改进, 在其基础之上增加了 1 个动模。改进后的模具结构能够改善锻造过程中材料的流动情况, 消除了原模具结构下出现的前锥面填充不满的缺陷。

(2) 在改进后模具的基础上, 进一步研究了动模加载方式对锻件质量及模具的影响。当上凸模以  $17 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  定速加载, 下凸模在  $0.000 \sim 1.375 \text{ s}$  内不加载、在  $1.375 \sim 2.000 \text{ s}$  内以  $16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  定速加载时, 能够获得质量更好的锻件, 同时更利于齿形模寿命的提高。

(3) 通过压力机进行了锻造试验, 试验结果与仿真结果一致, 获得了填充饱满、质量良好的伞齿轮锻件, 说明有限元技术的应用有效地降低了试模成本。

## 参考文献:

- [1] 王以华. 锻模设计技术及实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Wang Y H. Forging Die Design Technology and Examples [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [2] 夏巨湛, 余国林, 詹金辉, 等. 可分式无飞边模锻的研发与应用 [J]. 模具工业, 2019, 45 (5): 52-57.
- Xia J C, Yu G L, Zhan J H, et al. Development and application of flashless assembled forging die [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (5): 52-57.
- [3] 黄珍媛, 章弦, 郭雷, 等. 基于成形过程的闭塞式冷锻工艺优化 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 40 (7): 57-61.
- Huang Z Y, Zhang X, Guo L, et al. Optimization of block-type cold forging process based on forming procedure [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40 (7): 57-61.
- [4] 高畅, 金俊松, 王新云, 等. 弧齿锥齿轮开式冷精锻工艺优化设计 [J]. 模具工业, 2020, 46 (12): 40-45.
- Gao C, Jin J S, Wang X Y, et al. Process optimization of closed cold precision forging of spiral bevel gear [J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (12): 40-45.
- [5] 郑书华, 占斐龙. 基于 Deform 的飞边槽结构参数对曲轴平衡块模锻质量的影响 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (21): 187-190.
- Zheng S H, Zhan F L. Influence of structural parameters of flash groove on die forging quality of crankshaft balance block based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (21): 187-190.
- [6] 彭长贵, 莫竟芳, 黄林春, 等. 离合器外壳闭式模锻工艺设计 [J]. 新技术新工艺, 2018, (9): 68-70.
- Peng C G, Mo J F, Huang L C, et al. Process design of closed die forging of clutch shells [J]. New Technology & New Process, 2018, (9): 68-70.
- [7] 周杰, 齐文涛, 陶亚平, 等. 转向节闭式挤锻工艺多目标优化设计 [J]. 北京工业大学学报, 2015, 41 (7): 1108-1113.
- Zhou J, Qi W T, Tao Y P, et al. Closed extrusion-die forging process of steering knuckle for multi-objective optimization design [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41 (7): 1108-1113.
- [8] 曹国英. 工艺参数对汽车变速器驱动齿轮轴温锻质量的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (21): 109-111, 115.
- Cao G Y. Effect of process parameters on warm forging quality of driving gear shaft of automotive transmission [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (21): 109-111, 115.
- [9] 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-forging lower die of steering knuckle during hot forging [J]. Journal of Anhui University of Technology: Natural Science, 2019, 36 (3): 244-249.
- [10] 盛育东. 汽车半轴螺母冷锻成型工艺研究 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2017.
- Sheng Y D. Research on Cold Forging Process of Automobile Half Shaft Nut [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2017.
- [11] 陈磊, 王廷坤, 王宗申, 等. 气门成形过程数值模拟与挤压模具结构优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (9): 105-112.
- Chen L, Wang T K, Wang Z S, et al. Numerical simulation on valve forming process and structure optimization on extrusion mold [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (9): 105-112.
- [12] 赵伟平, 刘江涛, 贾倩. 基于 Deform 的齿轮泵从动齿轮轴闭式模锻数值模拟分析 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (13): 93-95, 99.
- Zhao W P, Liu J T, Jia Q. Numerical simulation and analysis of closed die forging of gear pump follower gear shaft based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (13): 93-95, 99.
- [13] 方秀荣, 邵艳茹, 陆佳, 等. 锻造工艺参数对 TC4 钛合金锻件残余应力的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 1-8.
- Fang X R, Shao Y R, Lu J, et al. Influence of forging process parameters on residual stress of TC4 titanium alloy forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 1-8.

## 警惕不法网站, 保障投稿安全

近期, 本刊接到多名作者投诉, 网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站, 如 [www.dyjszz.cn](http://www.dyjszz.cn), 这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息, 误导和欺骗广大投稿作者, 骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息, 侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明, 本刊唯一官方网站为 [www.fstjournal.net](http://www.fstjournal.net), 投稿方式为网站注册登录投稿, 不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站, 谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为, 否则将严肃对待, 并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为, 一经发现, 请联系本刊, 本刊将及时处理, 共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式: [fst@263.net](mailto:fst@263.net); 010-62920652。

《锻压技术》编辑部