

## 汽车齿轮轴锻造工艺研究与仿真优化

宋慧啟<sup>1</sup>, 崔四芳<sup>2</sup>

(1. 新乡职业技术学院 交通学院, 河南 新乡 453006; 2. 新乡职业技术学院 数控技术学院, 河南 新乡 453006)

**摘要:** 为提高一款车用齿轮轴的生产质量和生产效率, 采用锻造工艺进行生产。首先, 初步制定了两种锻造成形方案, 分别采用整体式冲头结构和组合式冲头结构, 并通过 Deform-3D 分析了齿轮轴的成形情况, 同时对锻件温度、冲头受力以及最小合模力进行了全面对比; 其次, 对组合式冲头的挤压方式进行了优化, 优化后锻件质量仍能得到保证, 同时冲头受力和最小合模力得到了大幅降低, 有效提升了模具寿命; 最后, 开展了齿轮轴的锻造试制, 得到的不同阶段齿轮轴锻件的样件与仿真结果高度一致, 证实了仿真过程的准确性。经检验, 成形的齿轮轴无明显缺陷, 质量较好, 尺寸达到工艺要求, 表明所开发的锻造工艺切实可行。

**关键词:** 齿轮轴; 锻造成形; 冲头结构; 挤压方式; 最小合模力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.009

**中图分类号:** TG316.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 05-0072-07

## Research and simulation optimization on forging process for automotive gear shaft

Song Huiqi<sup>1</sup>, Cui Sifang<sup>2</sup>

(1. College of Transportation, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453006, China;

2. College of Numerical Control Technology, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453006, China)

**Abstract:** To enhance the production quality and efficiency of an automotive gear shaft, the forging process was conducted for manufacturing. Firstly, two forging forming schemes were proposed, utilizing integral punch and combined punch structures, respectively. The forming conditions of gear shaft were analyzed by using Deform-3D, and the forgings temperature, punch force and minimum clamping force were compared comprehensively. Secondly, the extrusion method of the combined punch was optimized, and the quality of forgings could still be guaranteed after optimization. At the same time, the punch force and the minimum clamping force reduced significantly, effectively improving the service life of die. Finally, the trial forging of gear shaft was conducted, the produced samples of gear shaft at various stages could match the simulation results, confirming the accuracy of the simulation process. Inspection reveals that the formed gear shafts have no obvious defects and are of good quality, which fully meets the dimensional requirements of the process, demonstrating the feasibility of the developed forging process.

**Key words:** gear shaft; forging forming; punch structure; extrusion method; minimum clamping force

齿轮轴是汽车上非常常见的一类机械零件, 不仅起到支撑作用, 也是传递扭矩、弯矩等的重要载体, 其工作环境非常恶劣, 需承受各类载荷、剪切应力等, 所以, 对强度、韧性、表面硬度、耐磨性等均有一定的要求, 对加工工艺来说是一个非常大的难题。目前, 市场上对齿轮轴的加工手段主要包括切削加工、激光加工、锻造加工和楔横轧加工等<sup>[1-3]</sup>, 但激光加工成本较高, 楔横轧加工则更适

合加工阶梯轴类零件, 锻造加工工艺虽然多样, 能适合各种齿轮轴的生产, 但生产质量、生产效率以及生产成本受零件结构复杂程度的影响较大, 因此, 绝大部分齿轮轴的制造仍然以切削加工为主, 虽然精度较高, 但是在强度、耐磨性等方面均不太理想, 同时材料浪费多, 批量生产时效率低下。河南某齿轮轴制造厂的一款齿轮轴产品面临着此类问题, 该齿轮轴的结构及关键特征示意图如图 1 所示, 其属于比较复杂的零件, 采用的生产方式为切削或者锻造制坯后再切削。受切削影响, 成形的齿部由于组织的连续性被破坏<sup>[4]</sup>, 强度相对较弱, 同时加工工序较多, 极大影响了生产效率, 因此, 尝试通过模

收稿日期: 2024-11-25; 修订日期: 2025-03-06

作者简介: 宋慧啟 (1988-), 男, 本科, 讲师

E-mail: yicheng3366@aliyun.com

锻工艺一次成形该齿轮轴，以有效解决这些问题，并大幅降低材料损耗。在开展工艺研究时，为确保工艺的可靠性，需要进行试模试验，但毫无根据的试模偶然性较大，会损失大量成本。因此，利用有

限元模拟方法对设计的方案进行成形结果预测<sup>[5-7]</sup>，然后通过缺陷检查、相互比较等方法完成方案的改进与择优，最后基于优选方案完成齿轮轴的试锻试验来确定方案的可靠性。

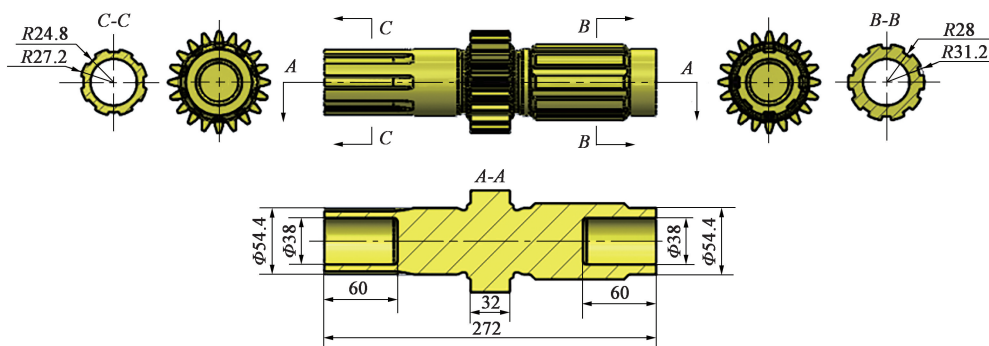


图1 齿轮轴结构及关键特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure and key features for gear shaft

## 1 锻造成形方案设计

为了能一次性成形齿轮轴的所有特征，采用封闭式模具结构最为有效，因此，根据齿轮轴的结构特点初步制定了图2所示的两种成形方案。两种方案的主要区别为采用了不同的冲头结构，

分别为整体式冲头结构和组合式冲头结构，通过对冲头施加外力即可促使锻件成形。两方案均采用水平分模，有利于坯料的放置、定位以及最终成形锻件的取出<sup>[8]</sup>。由体积不变原理可确定坯料尺寸为 $\Phi 49.6 \text{ mm} \times 308 \text{ mm}$ ，虽然坯料的高径比超出了允许范围，但由于模具的限制可以有效避免失稳的问题。

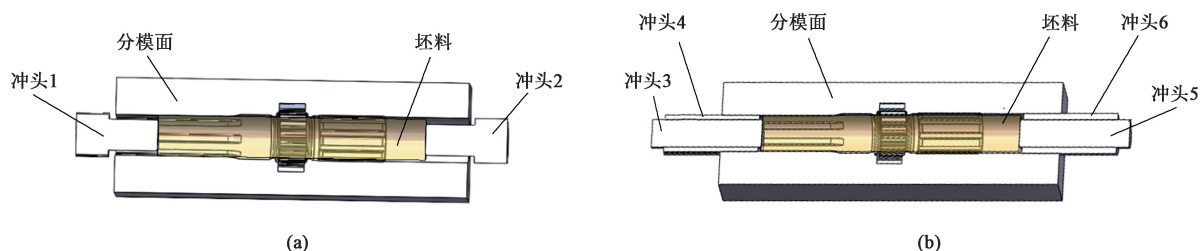


图2 齿轮轴锻造成形方案

(a) 整体式冲头结构 (b) 组合式冲头结构

Fig. 2 Forging schemes for gear shaft

(a) Integral punch structure (b) Combined punch structure

## 2 锻造有限元建模

对图2中的两种方案依次进行有限元建模，由于图2中的锻造装配模型是通过Solidworks绘制的，需要转为STL格式导入至Deform-3D中。另外，为更直观地观察锻件成形过程中的金属流动情况，根据锻件的对称性，采用1/2模型进行后续模拟，同时也利于提升模拟的精度。Deform-3D中的建模过程具体如下。

(1) 坯料作为变形对象设置为塑性体，坯料材

料为20MnCr5HH钢，为提高坯料的形变量，降低其变形抗力、避免开裂问题，须对坯料进行加热，按生产经验设置坯料温度为 $1080^\circ\text{C}$ ；由于材料库中无匹配的材料模型，因此，需要进行不同条件下的高温压缩试验以得到20MnCr5HH钢的实际流动性能<sup>[9]</sup>，对所有数据进行整合后，绘制得到图3所示曲线，并全部导入软件中创建材料模型。

(2) 模具不发生变形，设置为刚体，为降低模具与坯料表面的温差，保护模具和锻件，须对模具进行预热，按生产经验设置模具预热温度为 $280^\circ\text{C}$ 。

(3) 对坯料和模具进行网格划分，这是有限元

建模的关键,坯料采用相对网格划分,网格数量会随着坯料变形而变化,能更好地构建出成形过程中锻件的复杂特征;模具采用绝对网格划分,直接定义网格数量,网格类型均采用四面体网格。

(4) 对各模具的运动情况进行设置,整体式冲头方案中仅有冲头 1 和冲头 2 为运动模,挤压方向均朝向坯料,挤压速度均设置为  $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;组合式冲头方案中冲头 3、冲头 4、冲头 5 和冲头 6 均为运动模,挤压方向同样朝向坯料,冲头 3 和冲头 5 始终以  $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的挤压速度挤压,冲头 4 和冲头 6 在  $0 \sim 0.6 \text{ s}$  内以  $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的挤压速度挤压,然

后不再进行挤压。

(5) 完成边界条件设置,由于模拟时采用了对称模型,因此,需要设置对称面以防止金属越过对称面。

(6) 完成接触条件设置,坯料变形时与模具之间的传热和摩擦是不可避免的,根据文献 [10] 设定传热系数为  $11 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ,摩擦因数为 0.3。

(7) 完成控制条件的设置,包括主模、模拟步数、步长、停止条件的设定,然后生成模拟文件,开始模拟。两种方案的有限元模型如图 4 所示。

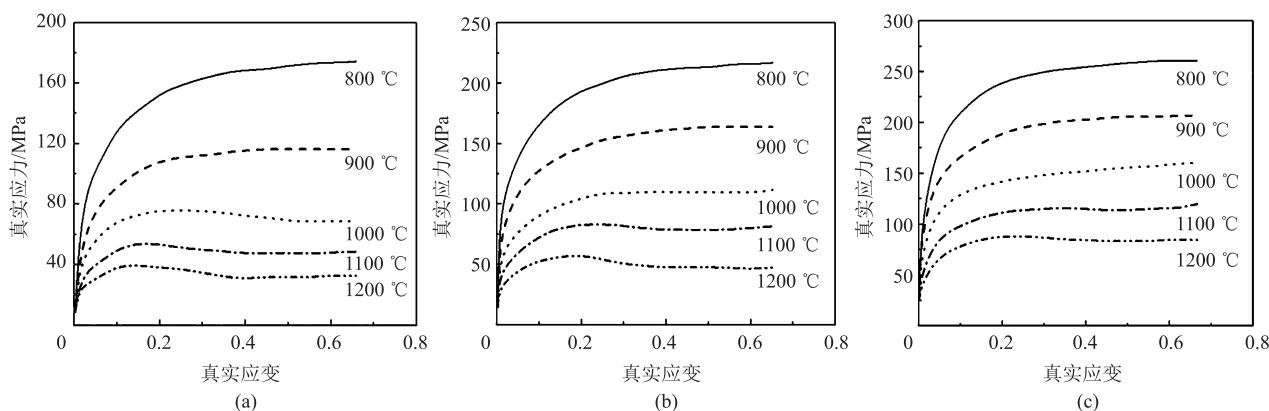


图 3 不同应变速率下 20MnCr5HH 钢的流变曲线

(a)  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b)  $1 \text{ s}^{-1}$  (c)  $10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 3 Rheological curves of 20MnCr5HH steel at different strain rates

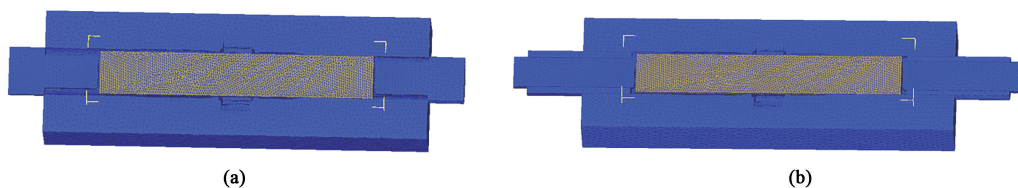


图 4 齿轮轴锻造有限元模型

(a) 整体式冲头结构 (b) 组合式冲头结构

Fig. 4 Finite element models of forging for gear shaft

(a) Integral punch structure (b) Combined punch structure

### 3 成形结果分析与比较

#### 3.1 齿轮轴成形情况

两种方案下成形的齿轮轴的成形过程如图 5 所示。整体式冲头结构中,在左右冲头的同时挤压下,柱形坯料被压缩,受模具限制,不会出现金属材料失稳型折叠,部分金属向中间聚拢成形齿轮轴中部齿形,部分金属沿着左右冲头逆向流动成形两端齿形及内孔,虽然成形时金属同时存在 3 个流动方向,

但相互独立,因此,不会出现金属汇流或对流折叠的问题<sup>[11]</sup>,成形过程中的金属流动情况是合理的,成形锻件的内部质量能够得到保证。由于齿轮轴左端体积小于右端,因此左端须先成形,最终得到的齿轮轴如图 6a 所示,根据显示的节点情况可知,锻件与模具表面已完全接触<sup>[12]</sup>,说明齿轮轴所有特征均已成形完全。组合式冲头结构中,金属的流动情况与整体式冲头结构大体相似,因此,同样能够避免因金属流动不合理引起的折叠缺陷,同时组合式冲头结构能够使金属较多地向中间聚拢,便于

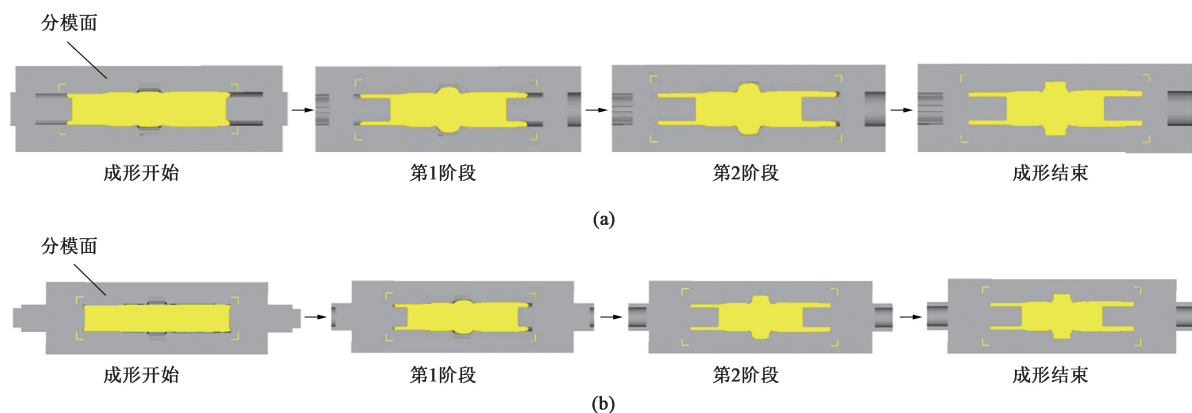


图5 齿轮轴的锻造成形过程

(a) 整体式冲头结构 (b) 组合式冲头结构

Fig. 5 Forging processes of gear shaft

(a) Integral punch structure (b) Combined punch structure

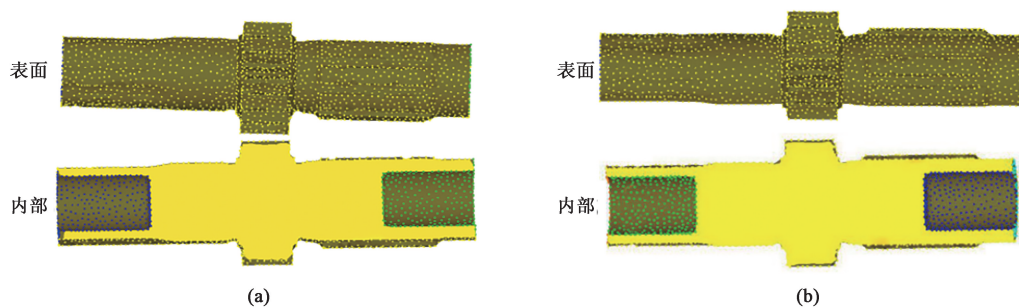


图6 齿轮轴的填充情况

(a) 整体式冲头结构 (b) 组合式冲头结构

Fig. 6 Filling situations of gear shaft

(a) Integral punch structure (b) Combined punch structure

齿轮轴中部齿形的成形,有利于降低模具受力,最终得到的齿轮轴如图6b所示,同样成形较好。分析表明,两种方案均能满足齿轮轴的成形要求。

### 3.2 方案比较

由于成形锻件各部位的变形量不同,并且各部位的成形先后顺序也不同,所以,通过热传递损失的热量、产生的变形热以及摩擦产生的热量是完全不同的,导致热锻成形过程中存在大量的温度变化,成形后锻件各处的温度差异非常大,当局部温差过大时,冷却过程中会产生较大的温度应力<sup>[13]</sup>,达到一定程度时会引起裂纹的产生,因此要进行一定的控制。根据图7所示的两种方案下齿轮轴锻后温度分布情况来看,齿轮轴两端成形相对较快,中间成形较慢,并且组合式冲头方案的温度分布更均匀,其最大温差为349℃,而整体式冲头方案的最大温差为407℃,因此,采用组合式冲头方案能更好地控制温差,从而避免产生较大的温度应力。

在工艺评定中,模具寿命也非常重要,而模具寿命与模具的受力情况直接相关,因此,必须对各模的受力情况进行对比。两方案中冲头1和冲头3负责成形左端内孔,冲头2和冲头5负责成形右端内孔,因此各自形成对比,冲头受力情况如图8a所示。各冲头受力随着锻件的成形不断增大,冲头1和冲头2的最大受力分别为723和661kN,冲头3和冲头5的最大受力分别为565和503kN。合模力的变化情况如图8b所示,为保证锻件成形,整体式冲头方案的最小合模力不得低于987kN,组合式冲头方案的最小合模力不得低于825kN。对比图7和图8的数据,均是组合式冲头方案更优,说明采用组合式冲头方案后,在成形前期对金属进行了较好的预分配,有效减小了后期金属流动的难度,降低了成形阻力。

### 3.3 挤压方式优化

从图5b可知,齿轮轴的中部齿形依靠封闭式模

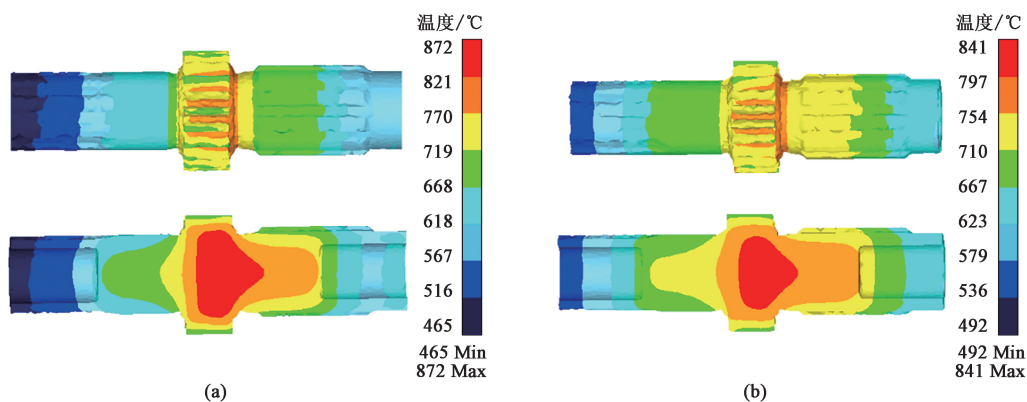


图 7 锻造结束后齿轮轴的温度分布情况

(a) 整体式冲头结构 (b) 组合式冲头结构

Fig. 7 Temperature distributions of gear shaft after forging

(a) Integral punch structure (b) Combined punch structure

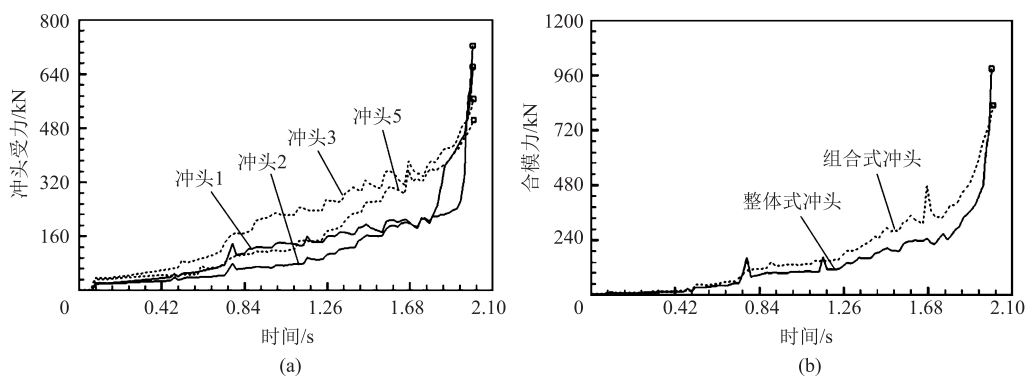


图 8 载荷随时间的变化曲线

(a) 冲头受力 (b) 合模力

Fig. 8 Change curves of load with time

(a) Force of punch (b) Clamping force

腔在最后完成成形，因此，可以考虑将金属预分配的时间延长，让金属能更多地向中间聚集，使中部齿形接近成形。之后冲头 4 和冲头 6 退出挤压工作，而冲头 3 和冲头 5 继续成形两端内孔，由于冲头 3 和冲头 5 与凹模之间的空间极小，因此，可以依靠其强大的阻力延缓金属流出的速度，从而顺利完成中部齿形的最终成形。随后冲头 3 和冲头 5 挤压结束，两端内孔顺利成形。优化后，原来的闭式模腔调整为半闭式模腔，能够大大降低模具受力。但是需要控制好金属预分配的时间，预分配时间过长会损坏模具，而过短则会出现填充不满的现象，如图 9 所示。另外，考虑到模具结构改为了半闭式模腔，齿轮轴成形后两端内孔端面必然是不平整的，后续需要进行修整，因此，需要适当地增加坯料长度，最终经过模拟确定，坯料长度需从 308 mm 增长至 328 mm，冲头挤压方式为冲头 3 和冲头 5 始终

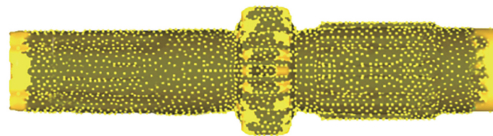


图 9 预分配时间过短引起的填充不满现象

Fig. 9 Insufficient filling phenomenon caused by short pre-dispensing time

以  $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的挤压速度挤压，冲头 4 和冲头 6 在  $0 \sim 1.5 \text{ s}$  内以  $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的挤压速度挤压，然后向反方向退出挤压，优化后齿轮轴具体成形过程如图 10a 所示。金属流动情况与优化前相似，因此不会出现内部缺陷问题，齿轮轴填充结果如图 10b 所示，虽然两端均存在节点缺失的情况，但黑实线以外是材料多余部分，获得的齿轮轴仍然符合要求。该方案下冲头的受力情况如图 10c 所示，冲头 3 和冲头 5 的最大受力分别为 383 和 428 kN，合模力的变化

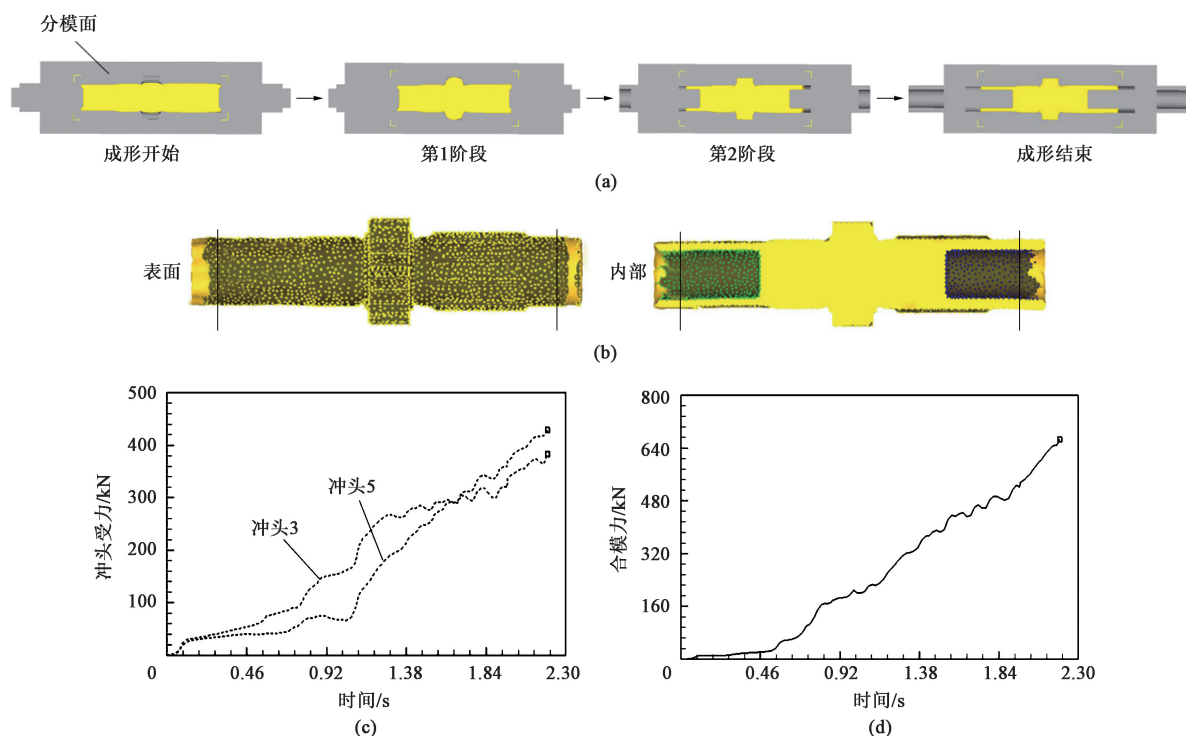


图10 优化后的组合式冲头挤压成形模拟结果

(a) 成形过程 (b) 填充情况 (c) 冲头受力情况 (d) 合模力变化情况

Fig. 10 Simulation results of extrusion forming with optimized combined punch

(a) Forming process (b) Filling situation (c) Force situation of punch (d) Change situation of clamping force

情况如图10d所示,最小合模力为666 kN,较优化前得到了大幅降低,有利于模具寿命的提高,降低了模具成本。

## 4 锻造试验

为验证上述齿轮轴锻造方案的可靠性以及仿真试验的正确性,参考分析结果,开展了齿轮轴的锻造试制试验,采用组合式冲头结构,同时冲头的挤压方式设置如下:冲头3和冲头5始终以 $40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的挤压速度挤压,冲头4和冲头6在 $0\sim 1.5\text{ s}$ 内以 $40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的挤压速度挤压,然后向反方向退出挤压,最小合模力参考666 kN设置,同时考虑1.5倍的安全系数。锻造材料为20MnCr5HH钢,坯料尺寸为 $\Phi 49.6\text{ mm}\times 328\text{ mm}$ ,由于后续会产生多余材料,因此坯料尺寸无需严格控制,坯料加热温度为 $1080\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,模具预热温度为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。锻造期间通过石墨乳润滑,最终得到不同阶段齿轮轴锻件的样件,如图11a所示,与仿真结果(图11b)高度一致。同时由液压机仪表盘数据可知,冲头3和冲头5的实际受力分别为351和401 kN,与仿真结果也非常接近,均证实了仿真过程的准确性。切除多余材料

后即可获得最终齿轮轴,经检验,成形的齿轮轴无明显缺陷,质量较好,尺寸达到工艺要求,表明开发的工艺切实可行。采用该工艺后,该车用齿轮轴的生产质量和生产效率均得到大幅提高。

## 5 结论

(1) 为提高一款车用齿轮轴的生产质量和生产效率,设计了两套锻造方案,分别采用了整体式冲头结构和组合式冲头结构,同时通过Deform-3D对两套方案的成形可行性进行了验证。

(2) 对两套方案下的锻件锻后温度、冲头受力以及最小合模力进行了全面对比,结果表明,采用组合式冲头方案可避免较大的温度应力,更能保证锻件质量,并且有利于降低成形阻力,对模具寿命的延长更有帮助。

(3) 对组合式冲头的挤压方式进行了优化,优化措施为:冲头3和冲头5始终以 $40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的挤压速度挤压,冲头4和冲头6在 $0\sim 1.5\text{ s}$ 内以 $40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的挤压速度挤压,然后向反方向退出挤压。优化后,锻件质量仍能得到保证,同时冲头受力和最小合模力得到大幅降低。

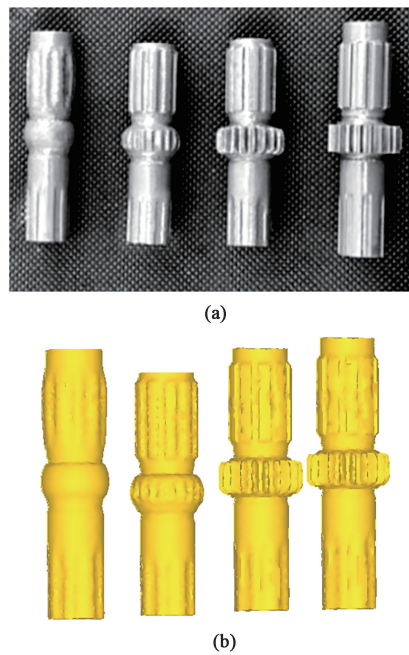


图 11 试验结果

(a) 实际锻造 (b) 模拟锻造

Fig. 11 Test results

(a) Actual forging (b) Simulated forging

(4) 开展了齿轮轴的锻造试验, 得到了不同阶段齿轮轴锻件的样件, 与仿真结果高度一致, 证实了仿真过程的准确性, 同时经检验, 成形的齿轮轴无明显缺陷, 质量较好, 尺寸达到工艺要求, 表明开发的工艺切实可行。

## 参考文献:

- [1] 束学道, 陈啸谷, 连奇杰, 等. 楔横轧齿轮轴轴齿一体化成形机理研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45 (9): 1800-1809.  
Shu X D, Chen X G, Lian Q J, et al. A study on the integrated forming mechanism of cross-wedge rolling gear shaft and tooth [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45 (9): 1800-1809.
- [2] 霍天枢, 潘鸣宇. 汽车空心齿轮轴闭塞式锻造工艺仿真与优化 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (6): 10-16.  
Huo T S, Pan M Y. Simulation and optimization on closed forging process for automobile hollow gear shaft [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (6): 10-16.
- [3] 王彩英. 斜齿轮轴向剃齿加工成形及动力学特性研究 [J]. 煤矿机械, 2020, 41 (10): 104-106.  
Wang C Y. Research on machining-forming and dynamic characteristics for axial shaving of helical gear [J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41 (10): 104-106.
- [4] 刘乐, 殷银银, 金宏, 等. 行星齿轮架中空多向锻造工艺及模具设计 [J]. 制造技术与机床, 2022 (6): 140-146.
- [5] 王兵, 刘飞, 胡婉婷, 等. 超高强韧稀土镁合金直筒段锻造成形工艺 [J]. 宇航材料工艺, 2023, 53 (3): 82-86.  
Wang B, Liu F, Hu W T, et al. Forging process of ultra-high strength and toughness rare earth magnesium alloy in straight tube section [J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53 (3): 82-86.
- [6] 金晟, 白玉, 张文会, 等. 新能源汽车底盘后上摆臂多次锻造自动化模拟计算 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (1): 12-22.  
Jin S, Bai Y, Zhang W H, et al. Automatic simulation calculation on multi-pass forging for rear upper swing arm for new energy vehicle chassis [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (1): 12-22.
- [7] 赵江波, 龚红英, 叶恒昌, 等. 基于 RSM 与 NSGA-II 的法兰件挤压成形工艺的多目标优化 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (3): 9-14.  
Zhao J B, Gong H Y, Ye H C, et al. Multi-objective optimization of extrusion forming for flange based on RSM and NSGA-II [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (3): 9-14.
- [8] 安轲, 黄亦其. 模具加载方式对不规则阀体多向模锻工艺的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 16-23.  
An K, Huang Y Q. Influence of die loading mode on multi-directional die forging process for irregular valve body [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 16-23.
- [9] 王向杰, 徐绍勇, 董春法. 热压缩试验条件下 12Cr1MoV 钢的流变行为研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (20): 47-49.  
Wang X J, Xu S Y, Dong C F. Research on flow behavior of 12Cr1MoV steel under condition of hot compression experiment [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (20): 47-49.
- [10] 何伟, 董万鹏, 孙礼宾, 等. 基于 Deform-3D 的发动机齿轮轴热锻成形结构优化模拟 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 42-49.  
He W, Dong W P, Sun L B, et al. Optimization simulation of hot forging structure of engine gear shaft based on Deform-3D [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 42-49.
- [11] 张巍. 车用 2A12 铝合金连接锻件变形规律分析与工艺设计 [J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (1): 90-96.  
Zhang W. Deformation analysis and process design of 2A12 aluminum alloy connecting forgings for vehicles [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30 (1): 90-96.
- [12] 闫中原, 张晓波, 徐洪磊, 等. 齿套闭塞式锻造成形研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 33-38.  
Yan Z Y, Zhang X B, Xu H L, et al. Closed die forging forming of the truncated tooth sleeve [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 33-38.
- [13] 殷华英. 基于有限元模拟的四通阀体多向模锻工艺研究 [J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (2): 81-90.  
Yin H Y. Multi-directional die forging process for four-way valve body based on finite element simulation [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30 (2): 81-90.