

## 车用齿轮轴闭式模锻工艺仿真及优化

王鸿志

(上海应用技术大学 工程训练中心, 上海 201418)

**摘要:** 为解决一种车用齿轮轴采用闭式模锻生产存在模具寿命短的问题, 利用 Deform-3D 模拟了齿轮轴的模锻成形过程。首先, 对齿轮轴材料的力学性能及模具材料的磨损性能进行了研究, 并拟合得到了曲线模型。其次, 以建立的各模型为基础, 完成了现行工艺下的齿轮轴成形仿真, 以验证模型的准确性, 同时以模具寿命最大化为目标, 对模锻工艺进行了局部调整和优化。最后, 对优化后的工艺进行了检验。结果表明: 当上、下冲头采用差速进给且速度分别为  $36$  和  $54 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 同时坯料初始温度和模具预热温度分别为  $1100$  和  $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 模具的受力和磨损程度均更小, 齿轮轴锻件的成形质量有一定提高, 且试制生产的齿轮轴能够达到目标质量, 有效提高了模具寿命。

**关键词:** 齿轮轴; 闭式模锻; 模具寿命; 差速进给; 坯料初始温度; 模具预热温度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.003

中图分类号: TG316.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 06-0018-09

## Simulation and optimization on closed die forging process for automotive gear shaft

Wang Hongzhi

(Engineering Training Center, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of poor die life for an automotive gear shaft produced by closed die forging, the die forging process of the gear shaft was simulated by Deform-3D. Firstly, the mechanical properties of the gear shaft material and the wear properties of the die material were studied, and the curve model was fitted. Secondly, based on the established models, the gear shaft forming simulation under the current process was completed to verify the accuracy of the model. At the same time, with the aim of maximizing the die life, the forging process was partially adjusted and optimized. Finally, the optimized process was tested. The results show that when the upper and lower punches adopt differential feed with the speeds of  $36$  and  $54 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  respectively, and the initial billet temperature and the preheating temperature of die are  $1100$  and  $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively, the force and wear of the die are smaller, and the forming quality of the gear shaft forgings is improved to some extent. The trial-produced gear shaft achieves the target quality, which effectively improves the die life.

**Key words:** gear shaft; closed die forging; die life; differential feed; initial temperature of billet; preheating temperature of die

齿轮轴是汽车上的常用零件, 主要负责动力、弯矩、扭矩的传递, 是实现汽车正常行驶及各类功能运转的保证, 这类齿轮轴通常质量要求较高, 要同时满足精度、强度、刚度和耐磨性等诸多要求, 因此, 对材料和加工方式的选择均非常重要。本文研究的齿轮轴如图 1 所示, 为差速器机构中的关键零件, 采用硬度较高、耐磨性较好的 42CrMo 合金钢制作, 能有效延长其使用寿命。该齿轮轴最常用的生产方式为切削和多工位锻造<sup>[1-2]</sup>, 其中, 切削

生产比较费材且加工速度慢, 仅适合在单件生产时使用; 多工位锻造虽然能够满足批量生产需求, 但由于中间工位较多, 各工位零件的最优外形很难确定, 因此, 容易出现成形缺陷<sup>[3-4]</sup>, 并且个别工位的模具寿命也难以保证, 同时, 成形后的零件仍需要进行少量切削加工, 生产成本较高。基于上述原因, 设计了闭式锻造工艺<sup>[5-6]</sup>, 如图 2 所示, 在封闭式模腔下利用上下冲头同时挤压坯料, 使坯料能够产生较大的变形, 一次成形各类复杂特征, 有效避免了切削加工, 最终应用于生产的结果表明, 该工艺生产的齿轮轴的尺寸精度和性能均能达到设计要求, 且稳定性较好, 但受封闭式模腔的影响, 仍然暴露出了模具寿命的问题, 考虑到模具失效主要是由受力大导致

收稿日期: 2024-10-29; 修订日期: 2025-01-28

作者简介: 王鸿志 (1990-), 男, 学士, 助理实验师

E-mail: wanghz212@163.com

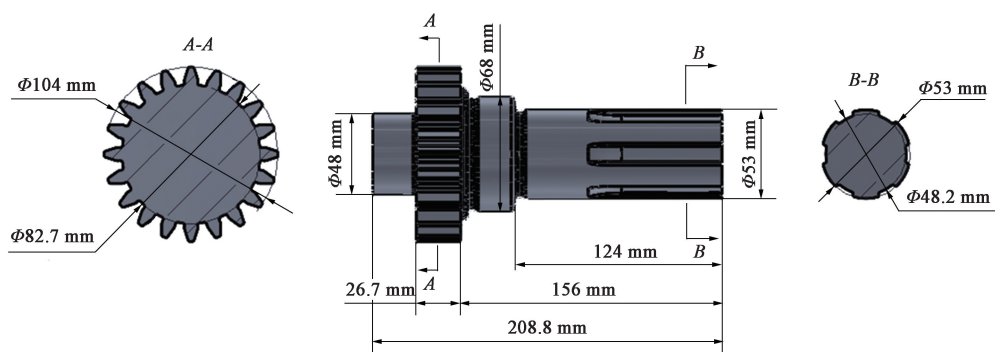


图1 齿轮轴的零件图

Fig. 1 Part drawing of gear shaft

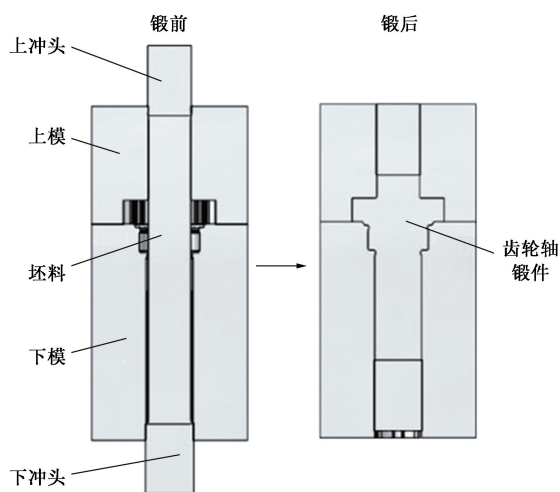


图2 齿轮轴的闭式模锻工艺

Fig. 2 Closed die forging process of gear shaft

磨损严重引起的,同时,为减少大量的试模试验,利用 Deform-3D 模拟齿轮轴的模锻成形过程,分析模具受力、磨损等情况以完成工艺调整,包括冲头进给方式的选择以及重点工艺参数的优化。

## 1 仿真用模型的建立

### 1.1 材料模型的建立

齿轮轴材料为 42CrMo 合金钢,构建其真实的材料模型是模拟是否准确的关键,因此,在模拟前首先需获得 42CrMo 合金钢的实际锻造性能并将其导入 Deform-3D。获取方法可采用热压缩试验<sup>[7-8]</sup>,试验设备采用热模拟试验机,由于 42CrMo 合金钢适宜的锻造温度为 900~1150 ℃,因此,变形温度选取 900、950、1000、1050、1100 和 1150 ℃,在应变速率  $\dot{\epsilon}$  为 0.1、1 和 10 s<sup>-1</sup> 的条件下依次进行试验,根据各试验结果拟合出了如图 3 所示的曲线模型,在曲线上各取 20 组数据输入软件中即可生成所

需的材料模型。

### 1.2 齿轮轴闭式锻造仿真模型建立

利用 UG 按图 2 所示完成坯料及各模的建模与装配,各模除了影响齿轮轴外形形成的关键特征需要精确建模,其余特征均可简化,另外,考虑到齿轮轴的高度对称性,锻造时各对称部分产生的各种变化是完全一致的,因此,也可进行适当简化,这对仿真精度和仿真速度的提高均非常有利<sup>[9]</sup>,最终选取 1/2 模型导入 Deform-3D 中进行模拟前各条件的设置,建模结果如图 4 所示。相关具体条件设置如下:坯料因变形需要设置为塑性体,材料选择前文建立的 42CrMo 合金钢材料模型,按现场情况设定其初始温度为 950 ℃,并通过四面体单元完成网格划分,单元数量为 80000 个,另外,在 Properties 模块中完成体积补偿设置,能有效避免因网格畸变重划分造成的体积损失;模具几乎不产生变形,设置为刚体,材料选择为 SKD61 钢,硬度为 52 HRC,按现场情况设定模具预热温度为 300 ℃,通过四面体单元完成网格划分,上下模网格划分数量为 100000 个,同时为提高上下模的齿形精度,对关键部位分别进行了网格细化,采用了圆环方式细化,如图 4 所示,其中, C1 和 C2 分别为圆环两端的圆心, R1 和 R2 为圆环的内外半径, 0.01 为细化的比例;上下冲头网格划分数量为 25000 个;模型中,上下模直接装配为合模状态,因此,不参与运动,上下冲头按现场情况设置为等速相向挤压,挤压速度为 24 mm·s<sup>-1</sup>;在边界条件模块中为模型设置好对称面,起到约束变形范围的作用,同时,在仿真结束后通过该功能能够恢复为整个模型;由于在锻造中坯料和模具之间存在相互摩擦和换热的现象,因此,在接触条件模块中必须设置好热传递系数和摩擦因数,其中热传递系数设为 40.2 W·(m·℃)<sup>-1</sup>,摩擦因数则根据现场的润滑情况设定为 0.25;最终在模拟控制

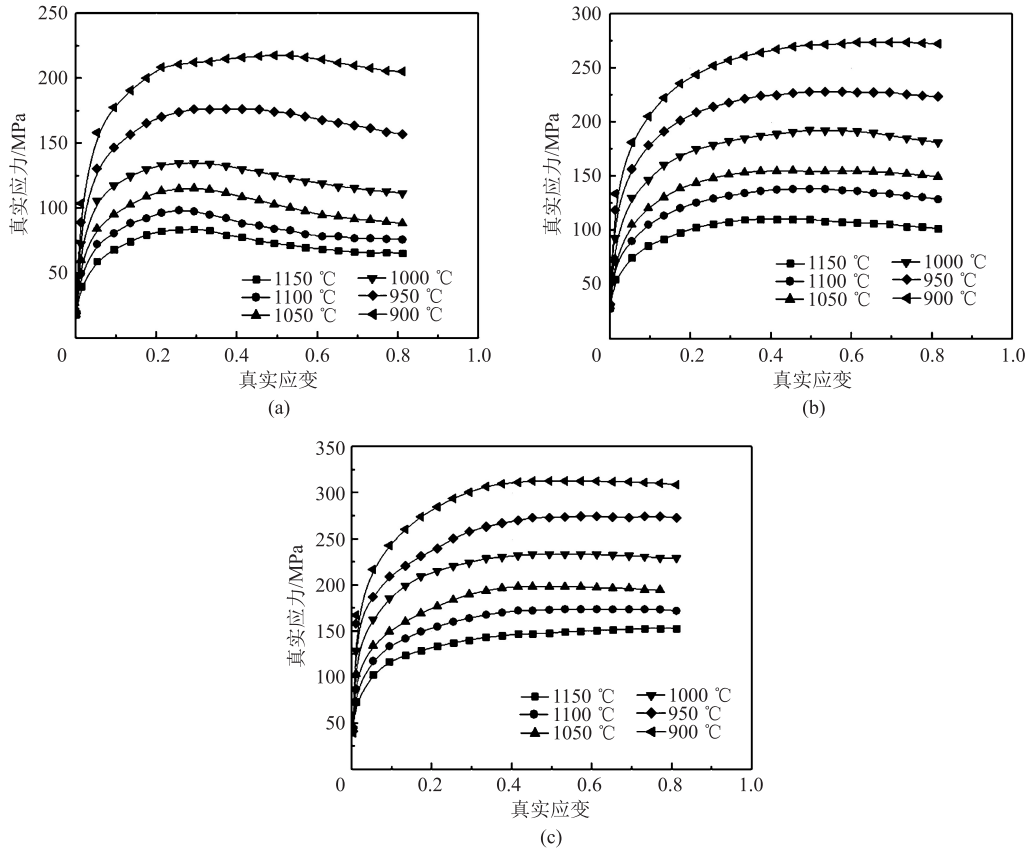


图 3 42CrMo 合金钢在不同条件下的真实应力-真实应变曲线

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

Fig. 3 True stress-true strain curves of 42CrMo alloy steel under different conditions

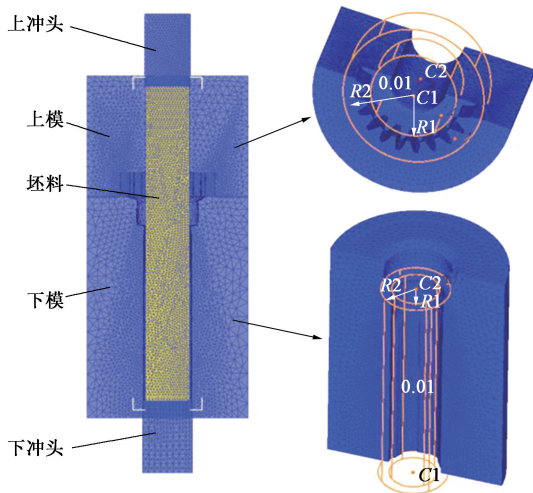


图 4 齿轮轴闭式模锻仿真模型

Fig. 4 Simulation model of closed die forging for gear shaft

条件中将上冲头定为主模，其挤压行程作为模拟结束的唯一条件。

### 1.3 模具磨损模型的建立

因坯料加热、模具预热，以及锻造中的摩擦影响，成形期间必然存在大量的温度变化，而 SKD61

钢的磨损性能受温度的影响较大，因此，磨损模型必须考虑温度的影响，最终选择了修正后的 Archard 磨损模型<sup>[10-11]</sup>，此模型不仅能较好地反映锻造中模具的磨损情况，也适用于 Deform-3D 软件，详细公式见式 (1)。

$$W(T) = \int K(T) \frac{PV}{[H(T)]^2} dt \quad (1)$$

式中： $W(T)$  为模具的磨损深度，是模拟目标； $K(T)$ 、 $H(T)$  分别为磨损系数和硬度，均为与温度有关的变量； $P$  为模具与材料接触部位的法向压力； $V$  为锻造过程中的材料流速； $T$  为温度； $t$  为接触的时间。

$K(T)$ 、 $H(T)$  是模拟数据是否准确的关键，因此，必须通过硬度试验和摩擦磨损试验测量和推出不同温度下的硬度和磨损系数<sup>[12]</sup>，再拟合出曲线模型，拟合结果如图 5 所示，模型公式为： $H(T) = -1.887 \times 10^{-7} T^3 + 2.326 \times 10^{-4} T^2 - 0.097 T + 53.952$ ， $K(T) = 9.810 \times 10^{-8} T^3 - 4.165 \times 10^{-5} T^2 + 0.009 T + 4.848$ 。利用 Fortran 语言完成该模型的程序编写，然后通过 Deform-3D 的程序接口导入到模型库。

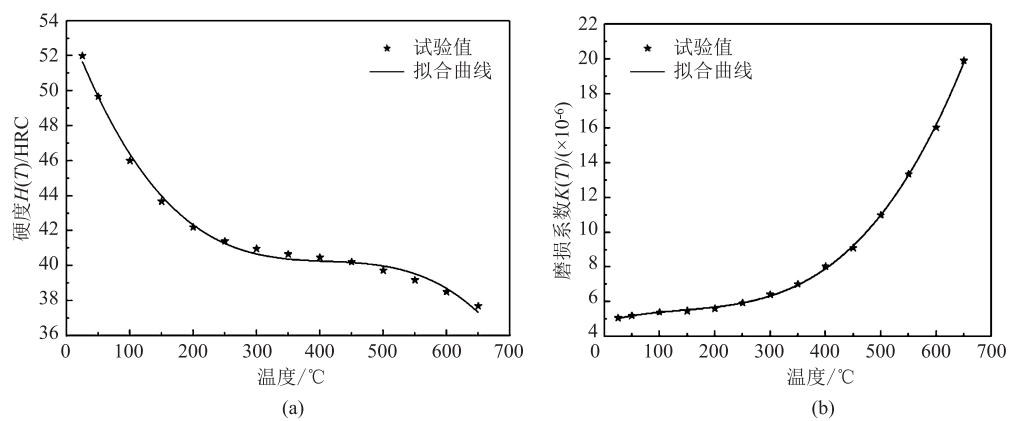


图 5 硬度 (a) 及磨损系数 (b) 随温度变化的曲线模型

Fig. 5 Curve models of hardness (a) and wear coefficient (b) varying with temperature

2 现行工艺仿真及模型的可靠性验证

以建立的各模型为基础，完成了现行工艺下齿轮轴的成形仿真，齿轮轴成形过程如图 6a 所示，坯料依靠上下模型腔和下冲头完成定位，在上下冲头的等速挤压下，坯料被压缩，材料只能向中间聚集，流向空腔完成成形，齿轮轴最终成形外形如图 6b 所示，外形轮廓清晰，表面被接触节点全面覆盖，说明锻造饱满，成形结果与实际比较相符。实际生产

中，为保证齿轮轴的生产质量，上下模是同时更换的，上下冲头也是同时更换的，其失效形式均为磨损失效，锻造中下模的磨损大于上模，下冲头的磨损大于上冲头，因此，上下模寿命以下模为准，实际平均寿命为 2870 件左右，上下冲头寿命以下冲头为准，实际平均寿命为 3950 件左右，和预期相比，均不理想。由质检反馈可知，模具的磨损总深度不能超过  $60\text{ }\mu\text{m}$ ，否则会引起锻件不合格，因此，可推出下模和下冲头的实际单次磨损深度分别为  $2.091\times 10^{-5}$  和  $1.519\times 10^{-5}\text{ mm}$ 。根据模拟可得各模的磨损

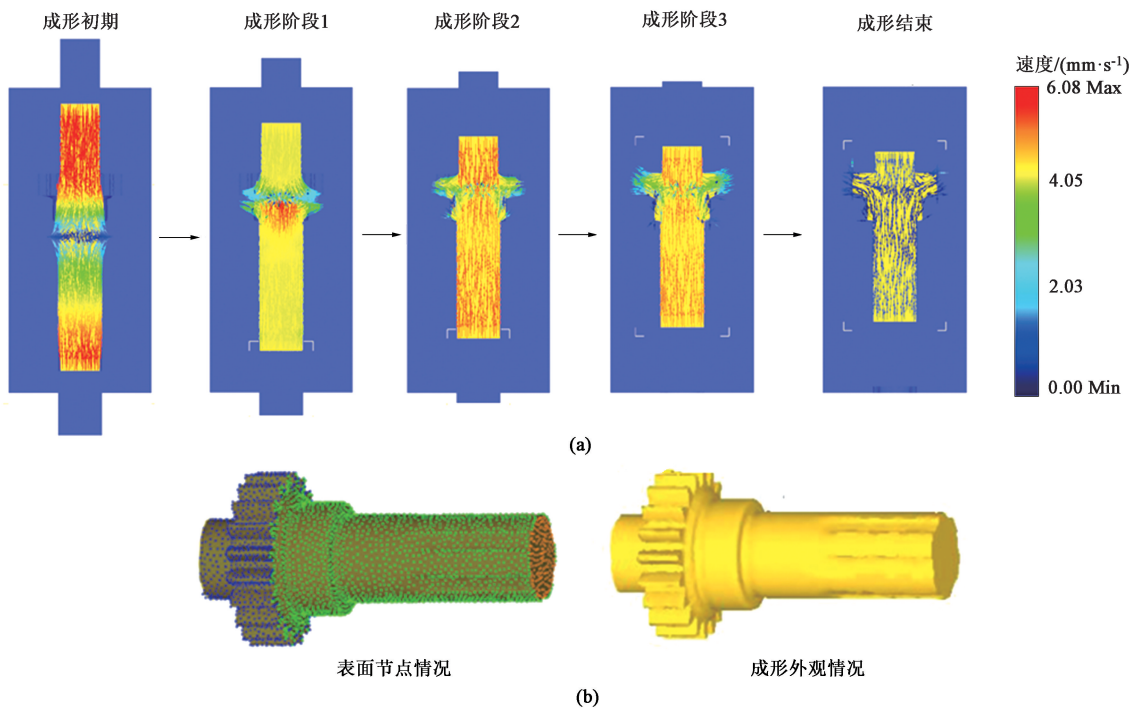


图 6 齿轮轴模拟成形示意图

(a) 成形过程 (b) 成形外形

Fig. 6 Schematic diagrams of simulated forming for gear shaft

(a) Forming process (b) Formed appearance



情况如图 7 所示, 与实际情况完全一致, 下模磨损大于上模, 表面最大磨损深度为  $2.192 \times 10^{-5}$  mm, 下冲头磨损大于上冲头, 表面最大磨损深度为  $1.583 \times 10^{-5}$  mm, 与实际磨损深度数据的误差均在合理范围内, 说明建立的磨损模型较为准确, 预测精度较高。图 8 为实际载荷和模拟载荷的对比

情况, 上下冲头载荷及合模力的变化趋势极为吻合, 从数据来看, 上下冲头的实际最大受载分别为 544 和 761 kN, 实际最小合模力为 802 kN, 上下冲头的模拟最大受载分别为 563 和 784 kN, 模拟最小合模力为 827 kN, 误差极小, 说明模拟数据具有可靠的分析价值。

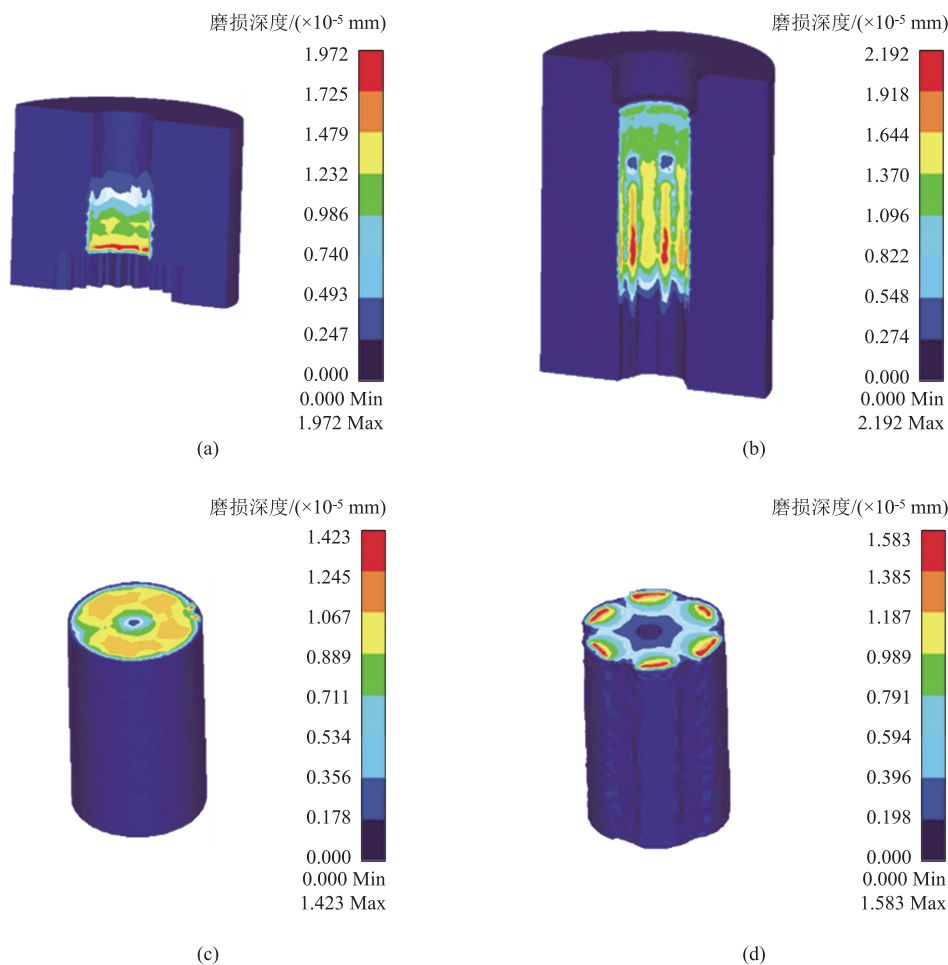


图 7 各模的磨损情况

(a) 上模 (b) 下模 (c) 上冲头 (d) 下冲头

Fig. 7 Wear conditions of each die

(a) Upper die (b) Lower die (c) Upper punch (d) Lower punch

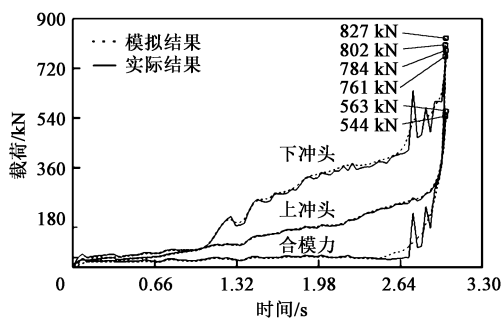


图 8 实际与模拟载荷对比

Fig. 8 Comparison between actual and simulated loads

### 3 工艺调整及参数优化

由于当前工艺是可靠的, 为减小模具受力和磨损, 首先想到改善锻造中材料的流动性, 而坯料的变形是由上下冲头的进给方式直接决定的, 因此, 优先对冲头的进给方式进行优化。通过对齿轮轴锻件的测量可知, 齿轮轴上部体积为下部体积的 1.5 倍左右, 所以, 在锻造前期应尽快让材料向上端集中才能降低成形阻力, 因此上下冲头的进给方式应调

整为差速进给。经过反复模拟确认可知, 当下冲头速度为上冲头速度的 1.5 倍时效果最好, 即下冲头的挤压速度为  $36 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由模拟可得下模的磨损仍大于上模, 下冲头的磨损仍大于上冲头, 但调整后的下模与下冲头的磨损情况得到了一定改善, 如图 9a 和图 9b 所示, 下模最大磨损深度降低了 8.9%, 下冲头最大磨损深度降低了 7.1%。工艺调整后的载荷情况如图 9c 所示, 最小合模力为 802 kN, 降低不明显, 但上下冲头的最大载荷得到了明显改善, 分别降低了 33.7% 和 16.5%。除冲头的进给方式外, 温度、挤压速度等对材料的流动性也存在较大影响, 因此, 采用单因素变量法依次对上下冲头的挤压速度、坯料初始温度和模具预热温度进行优化, 首先保持所有工艺参数不变, 在合理范围内取上下冲头挤压速度分别为 24/36、30/45、36/54、42/63、48/72、和 54/81  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$  依次进行模拟, 获得最大磨损深度及最大载荷等数据并绘制得到

图 10a, 所有折线均呈现为“V 型”变化趋势, 存在一个最低点, 由于所有折线的最低点对应的上下冲头挤压速度相同, 因此, 很容易确定上下冲头的最优挤压速度为 36 和 54  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。然后再以最优挤压速度为基础, 并保持其余工艺参数不变, 依次将坯料初始温度调整为 900、950、1000、1050、1100 和 1150  $^{\circ}\text{C}$  进行模拟, 获得最大磨损深度及最大载荷等数据并绘制得到图 10b, 所有折线的变化趋势均为先降低后增长, 并均在坯料初始温度为 1100  $^{\circ}\text{C}$  时达到最低点, 因此, 坯料的最优初始温度为 1100  $^{\circ}\text{C}$ 。最后, 以最优挤压速度和最优坯料初始温度为基础, 保持其余工艺参数不变, 依次将模具预热温度调整为 300、320、340、360、380 和 400  $^{\circ}\text{C}$  进行模拟, 获得最大磨损深度及最大载荷等数据并绘制得到图 10c, 各折线同样呈现为“V 型”变化趋势, 并均在模具预热温度为 360  $^{\circ}\text{C}$  时达到最低点, 因此, 模具的最优预热温度为 360  $^{\circ}\text{C}$ 。

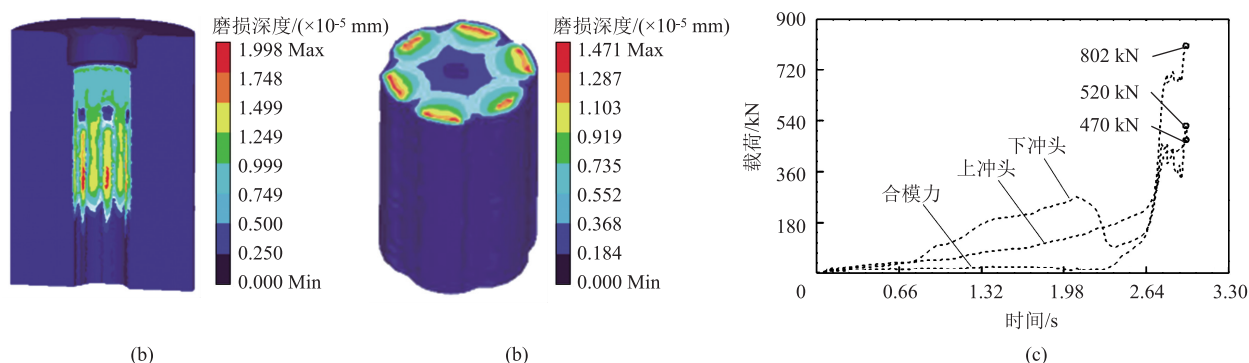


图9 工艺调整后模拟结果

(a) 下模磨损情况 (b) 下冲头磨损情况 (c) 载荷-时间曲线

Fig. 9 Simulation results after process adjustment

(a) Wear condition of lower die (b) Wear condition of lower punch (c) Curves of load-time

## 4 最终工艺与检验

综合分析可得, 在原工艺基础上应做出如下调整与优化: 上下冲头等速进给改为差速进给, 并分别施以 36 和 54  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的挤压速度, 在实际模具结构设计中可利用连杆机构来实现上下冲头以不同的速度挤压<sup>[13]</sup>, 同时, 将坯料初始温度和模具预热温度分别优化为 1100 和 360  $^{\circ}\text{C}$ 。优化后工艺对应的齿轮轴成形情况如图 11 所示, 可见, 仍能满足成形条件, 同时与现行工艺相比, 锻件温度分布更为均匀, 整体及局部温差均更小, 能有效防止锻件冷却时产生较大的温度应力<sup>[14]</sup>, 从而降低开裂风险, 因此, 优化后工艺对齿轮轴锻件的成形质量有一定的

提高。优化工艺下的下模及下冲头磨损数据如图 12a 和图 12b 所示, 最大磨损深度分别为  $1.101 \times 10^{-5}$  和  $0.873 \times 10^{-5} \text{ mm}$ , 对应的预测寿命分别为 5450 和 6872 件, 为优化前各自寿命的 1.9 和 1.7 倍, 寿命得到了大幅提升。最小合模力、上冲头最大载荷及下冲头最大载荷分别为 607、307 和 324 kN, 均得到了大幅降低, 这也是模具寿命得到提升的重要原因。最后, 对优化后工艺进行了试模检验, 得到的齿轮轴锻件如图 13 所示, 外观质量好, 无划痕、凹坑等缺陷, 齿形完整, 经质量检测完全符合使用要求, 说明优化后的工艺完全能够满足齿轮轴的生产。经过一段时间的生产追踪可知, 下模及下冲头的实际寿命分别为 5664 和 7180 件左右, 得到了大幅提升, 完全解决了现存的难题。

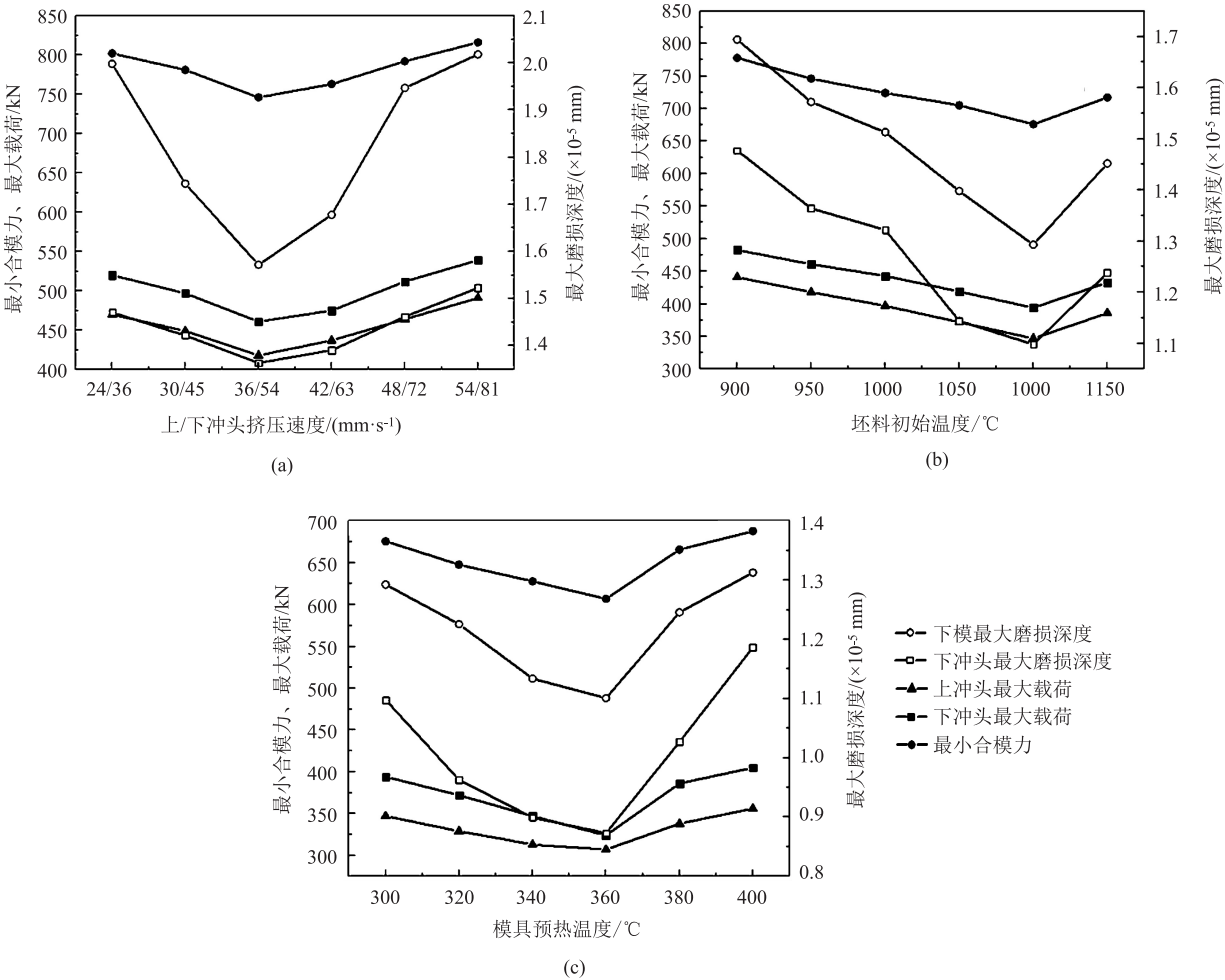


图 10 工艺参数变化对最大磨损深度及最大载荷的影响

(a) 上下冲头挤压速度 (b) 坯料初始温度 (c) 模具预热温度

Fig. 10 Effect of process parameter variation on maximum wear depth and maximum load

(a) Extrusion speeds of upper and lower punches (b) Initial temperature of billet (c) Preheating temperature of die

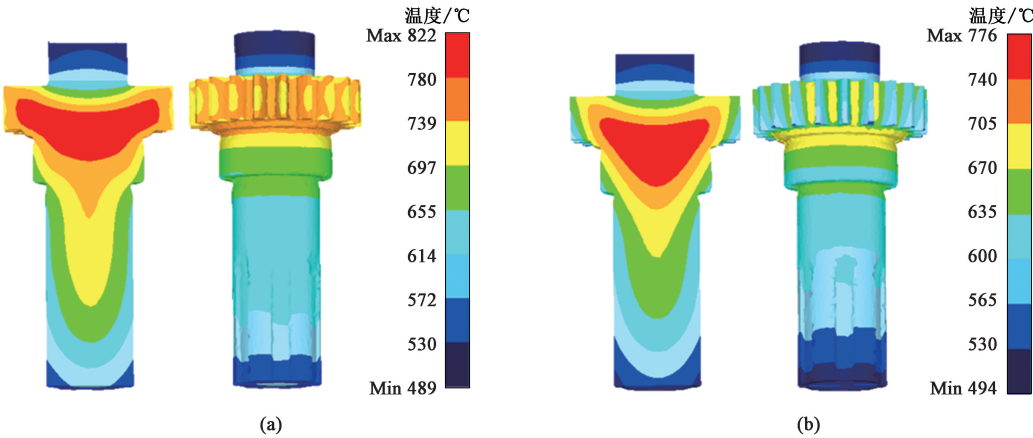


图 11 齿轮轴温度分布

(a) 现行工艺 (b) 优化后工艺

Fig. 11 Temperature distributions of gear shaft

(a) Current process (b) Optimized process

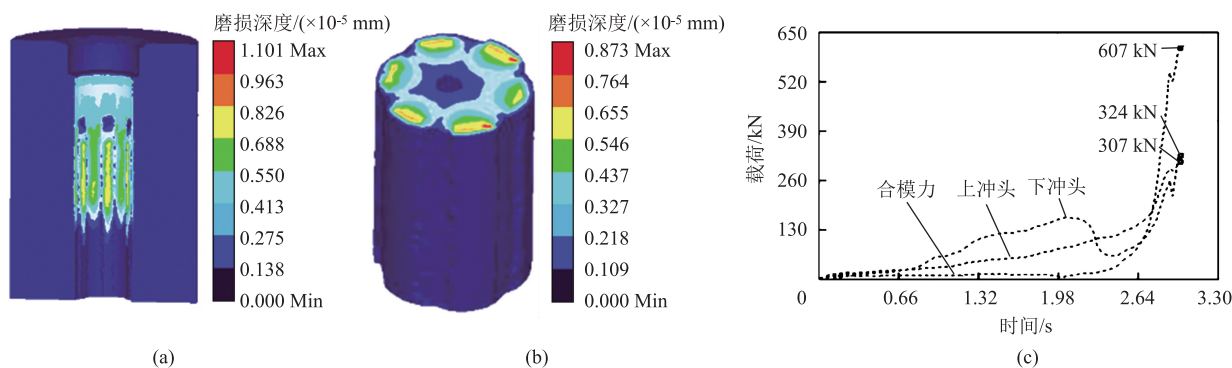


图 12 工艺优化后的模拟结果

(a) 下模磨损情况 (b) 下冲头磨损情况 (c) 载荷-时间曲线

Fig. 12 Simulation results after process optimization

(a) Wear condition of lower die (b) Wear condition of lower punch (c) Load-time curves

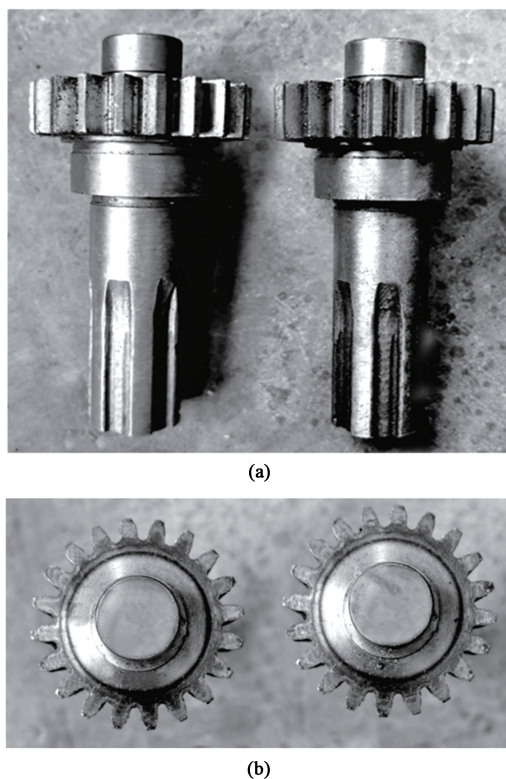


图 13 齿轮轴锻造实物

(a) 齿轮轴外形 (b) 齿形示意图

Fig. 13 Forged physical object of gear shaft

(a) Appearance of gear shaft (b) Schematic diagram of tooth shape

## 5 结论

(1) 为解决一种车用齿轮轴采用闭式模锻生产存在的模具寿命短的问题, 利用 Deform-3D 模拟了齿轮轴的模锻成形过程, 同时为确保试验数据的分析价值, 对齿轮轴材料的力学性能及模具材料的磨

损性能进行了研究, 并拟合得到了曲线模型。

(2) 完成了现行工艺下的齿轮轴成形仿真, 并详细对比了模拟锻造结果和实际锻造结果, 验证了各模型的准确性。

(3) 以模具寿命最大化为目标, 对模锻工艺进行了局部调整和优化, 结果表明: 当上下冲头采用差速进给, 且速度分别为  $36$  和  $54 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 同时, 坯料初始温度和模具预热温度分别为  $1100$  和  $360^\circ\text{C}$  时, 模具的受力和磨损程度均更小, 对齿轮轴锻件的成形质量有一定的提高。

(4) 完成了齿轮轴的锻造试验, 生产的齿轮轴能够达到目标质量, 且模具寿命得到有效提高, 验证了优化后工艺的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 林雅杰, 仲太生, 丁武学. 车用齿轮毛坯多工位精密热模锻工艺分析及模具设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54 (3): 82-87.  
Lin Y J, Zhong T S, Ding W X. Process analysis and die design of multi-station precision hot die forging for automotive gear blank [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2019, 54 (3): 82-87.
- [2] 田亚丁, 朱绘丽. 基于有限元分析的汽车法兰盘连接件精密锻造工艺 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (12): 9-17.  
Tian Y D, Zhu H L. Precision forging process on automotive flange connection part based on finite element analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (12): 9-17.
- [3] 夏琴香, 彭冲, 刘梅华, 等. 深轮辐齿坯多工位闭式模锻材料流动规律研究 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (9): 35-41.  
Xia Q X, Peng C, Liu M H, et al. Research on material flow behavior of gear blank with deep spoke during multi station close die forging [J]. Journal of South China University of Technology



- (Natural Science Edition), 2024, 52 (9): 35-41.
- [4] 郭静, 李明星. 基于 Deform-3D 的汽车差速器壳体模锻工艺改进 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (4): 38-47.  
Guo J, Li M X. Improvement on die forging process for automobile differential housing based on Deform-3D [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (4): 38-47.
- [5] 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.
- [6] 杨程, 丁伯良, 庄晓伟, 等. 不对称喷油器体闭塞锻造成形 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 21-25.  
Yang C, Ding B G, Zhuang X W, et al. Closed die forging of asymmetry fuel injector body [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 21-25.
- [7] 林利, 李宝顺, 朱国明, 等. 38MnB5 热成形钢高温变形行为及本构方程 [J]. 工程科学学报, 2019, 41 (4): 470-478.  
Lin L, Li B S, Zhu G M, et al. High-temperature deformation behavior and constitutive relationship of press-hardening steel 38MnB5 [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41 (4): 470-478.
- [8] 吴昊, 孔祥伟, 罗平. GH4169 合金高温变形过程本构方程 [J]. 机械设计与制造, 2020 (8): 163-167.  
Wu H, Kong X W, Luo P. Constitutive equation for high-temperature deformation of GH4169 alloy [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020 (8): 163-167.
- [9] 胡建军, 李小平. DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.  
Hu J J, Li X P. DEFORM-3D Plastic Forming CAE Application Tutorial [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [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 (1-3): 43-48.
- [11] 李彦奎, 吕彦明, 倪明明. 航空叶片模具设计参数对模具磨损影响分析 [J]. 材料科学与工艺, 2019, 27 (3): 79-84.  
Li Y K, Lyu Y M, Ni M M. The analysis of influence of design parameters of air blades on die wear [J]. Materials Science and Technology, 2019, 27 (3): 79-84.
- [12] 张智华. 冷挤压凸模磨损数值模拟及涂层强化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
Zhang Z H. Wear Simulation of Cold Extrusion Punch and Research of Coating Strengthening [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [13] 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.
- [14] 万轶, 陈林. 汽车盘体零件小飞边模锻成形工艺开发及数值分析 [J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (3): 44-50.  
Wan Y, Chen L. Development and numerical analysis of small flash die forging process for automobile disc part [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30 (3): 44-50.

## 《锻压技术》全文获取通道全线开通!

方式1: 官方网站

方式2: 《锻压技术》杂志微信公众号

