

基于有限元的法兰传动轴锻造工艺仿真及模具结构改进

曾义聪¹, 徐海良²

(1. 长沙民政职业技术学院 电子信息工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 某法兰传动轴经镦粗、一次挤压、二次挤压、预锻、终锻等 5 道工序成形, 经长期生产发现其中工序 3 的模具磨损失效快、换模频率高, 严重影响了产品的生产效率。为解决该问题, 尝试对工序 3 的模具结构进行改进, 根据其结构特征设计了两种改进方案, 并基于 Deform-3D 分别进行了建模与仿真。首先, 对原工艺进行了数值分析, 初步验证了 Archard 修正模型的可靠性; 其次, 对改进后方案中锻件成形的完整度以及金属流线变化进行了分析, 判断锻件是否存在成形缺陷, 并比较了改进前、后模具磨损的变化情况; 最后, 对模拟分析结果进行了试模验证。结果表明: 试验结果与模拟结果一致性较好, 建模分析准确, 改进后方案能够实现锻件的成形, 其中方案 1 的成形效果更好, 在不影响工序 4 的模具寿命的前提下, 工序 3 的模具平均寿命从 3472 件提高至 6235 件, 很好地解决了企业的难题。

关键词: 法兰传动轴; 建模仿真; 金属流线; Archard 修正模型; 模具磨损

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.026

中图分类号: TG315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 11-0187-09

Forging process simulation and die structure improvement on flange drive shaft based on finite element

Zeng Yicong¹, Xu Hailiang²

(1. School of Electronic Information Engineering, Changsha Social Work College, Changsha 410004, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A flange drive shaft was formed by five processes, including upsetting, primary extrusion, secondary extrusion, pre-forging and final forging, and after long-term production, it was found that the mold wear and failure of process 3 was fast and the mold change frequency was high, which seriously affected the production efficiency of product. Then, in order to solve this problem, the mold structure of process 3 was improved. Furthermore, two improvement schemes were designed according to its structural characteristics, and the modeling and simulation were carried out respectively based on Deform-3D. Firstly, the original process was numerically analyzed to preliminarily verify the reliability of Archard modified model. Secondly, the forming integrity and the change of metal streamline for forgings in the improved scheme were analyzed to judge whether there were forming defects in forgings, and the change conditions of mold wear before and after improvement were compared. Finally, the simulation analysis results were verified by test. The results show that the test results are in good agreement with the simulation results, the modeling analysis is accurate, the improved scheme can realize the forming of forgings, and the forming effect of scheme 1 is better. Thus, in the premise of not affecting the mold life of process 4, the average mold life of process 3 is increased from 3472 pieces to 6235 pieces, which solves the problem of enterprise very well.

Key words: flange drive shaft; modeling and simulations; metal streamline; Archard modified model; mold wear

随着能源问题的到来, 节能减排已成为汽车工业界研究的重点, 主要表现为汽车轻量化研究以及对新能源汽车的探索, 因此, 一定程度上促进了汽

车零件制造技术的升级, 尤其是汽车关键部位的零件。本文研究的法兰传动轴, 是车辆传动系统中输出动力的重要零件, 对强度、刚度、冲击韧性、耐磨性等要求较高, 需要其性能稳定, 因此, 其生产方式逐步从传统的机加工方式转向更为精密的锻造。法兰传动轴的多工位锻造成形过程如图 1 所示, 包含镦粗、一次挤压、二次挤压、预锻以及终锻 5 道工序, 但经长期批量生产后发现, 工序 3 (二次挤压工序) 中模具磨损失效较快。随机选取

收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51375499)

作者简介: 曾义聪 (1973-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: zycg0075@163.com

通信作者: 徐海良 (1965-), 男, 博士, 教授

E-mail: csuxhliang@aliyun.com

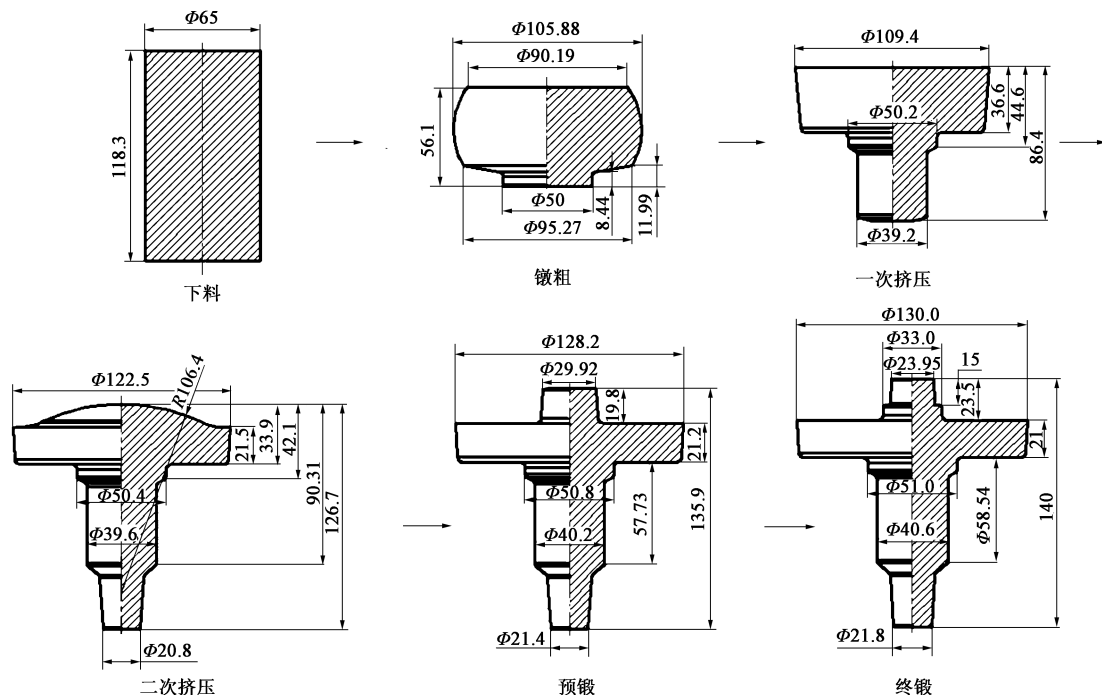


图 1 法兰传动轴成形工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of forming technology for flange drive shaft

各道工序的 10 套模具进行寿命统计, 模具寿命以上、下模寿命较短者为准, 结果如图 2 所示, 各工序的模具寿命稳定在 6000~7000 件之间, 而工序 3 的模具平均寿命仅为 3472 件, 模具更换频繁, 直接增加了模具的制造成本, 同时也无法保证锻件精度及锻造工艺的稳定性, 对产品的生产效率存在极大影响, 不利于企业占据市场。因此, 为解决该难题, 在原工艺基础上, 以保证锻件成形和不影响工序 4 的模具寿命为前提, 尝试改进工序 3 的锻件形状, 并通过对模具结构的改进来改善金属的流动情况^[1-2], 以达到降低磨损的目的。此外, 目前对于各类传动轴精锻成形方面的研究工作主要针对新工艺的开发、成形质量的优化、缺陷的消除等^[3-7], 而对于降低模具磨损、提高寿命方面的研究相对较少, 因此, 具有一定的研究价

值。本文通过 Deform-3D 对改进前、后的工序 3 和工序 4 的锻件成形过程进行数值仿真, 并基于 Archard 修正模型, 对锻模磨损进行对比分析, 以指导设计研究, 同时结合生产实际进行试模与验证。

1 有限元建模与分析

1.1 仿真模型与 Archard 修正模型的建立

改进前工序 3、工序 4 的模具结构简图如图 3 所示, 先通过 Solidworks 完成三维建模, 根据锻件的对称性, 建立 1/4 模型并导入 Deform-3D 中进行有限元建模。选择坯料材质为 45 钢, 设为塑性体, 采用四面体网格划分, 坯料温度为 1150 °C。模具材料为 H13 钢, 热处理过程为: 淬火温度为 1020~1070 °C, 保温后油淬, 并经 2 次回火, 回火温度为 550~580 °C, 后空冷。模具设为刚体, 由于需要进行磨损分析, 因此, 模具同样需要进行网格化, 初始硬度为 49 HRC, 模具预热温度为 350 °C, 上模设定为主模并施加速度, 下模静止。设定坯料与模具之间的热摩擦系数为 0.3, 热传导系数为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

在进行锻模磨损研究时必须建立 Archard 磨损模型^[8], 该模型由 Archard J F 教授^[9]在 1953 年首次提出, 较好地表达了模具磨损与模具硬度、变形中金属流速以及模具表面正压力之间的关系, 成功地实

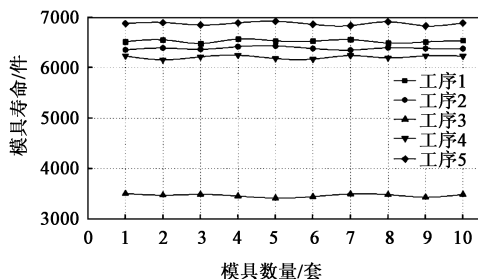


图 2 各工序的模具的寿命记录结果

Fig. 2 Record results of mold life for each process

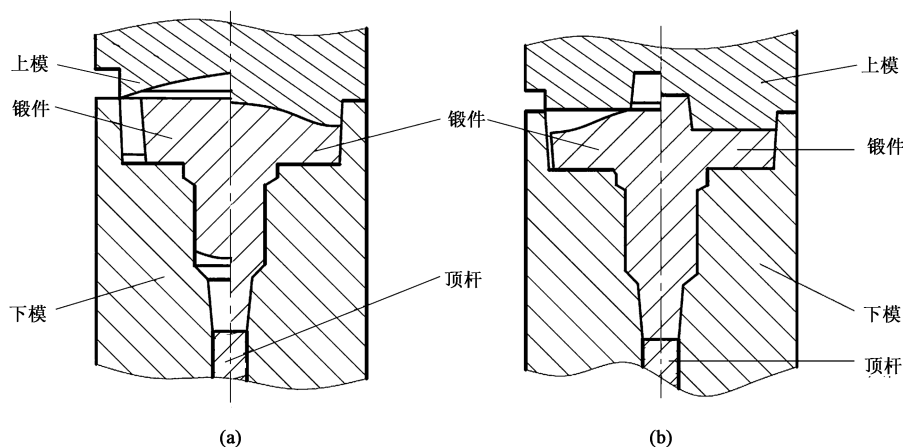


图 3 改进前工序 3 (a) 及工序 4 (b) 的模具结构简图

Fig. 3 Schematic diagrams of mold structures for process 3 (a) and process 4 (b) before improvement

现了模具磨损值的量化, 其表达式如式 (1) 所示:

$$W = \zeta \frac{Nv}{H} \Delta t \quad (1)$$

式中: W 为模具磨损值; ζ 为磨损系数; N 为模具表面正压力; v 为金属流速; H 为模具硬度; Δt 为磨损接触时间。

其中, ζ 、 H 均为恒量, 因此, 仅适用于冷成形过程。而本文研究的法兰传动轴锻造属于热成形过程, 涉及温度较高且变化较大, ζ 和 H 均会随温度的变化发生变化, 为变量。如仍采用式 (1) 显然是不合适的, 误差过大, 故 Lee R S 等^[10]对原式进行了修正, 考虑了温度的影响, 修正后的表达式如式 (2) 所示:

$$W = \zeta(T) \frac{Nv}{H(T)} \Delta t \quad (2)$$

式中: $\zeta(T)$ 、 $H(T)$ 分别为关于模具温度 T 的磨损系数和模具硬度函数。

其中, $\zeta(T) = (29.29 \ln T - 168.73) \times 10^{-6}$, $H(T) = 9216.4T^{-0.505}$ 。锻造过程中, 各变量值的大小均是由时间进程决定的, 因此, 模具在 j 处位置、 k 时刻的磨损值 W_{jk} 可描述为式 (3), 其中, N_{jk} 、 v_{jk} 以及 T 均可经有限元数值分析获得。

$$W_{jk} = \zeta_{jk}(T) \frac{N_{jk} v_{jk}}{H_{jk}(T)} \Delta t_k \quad (3)$$

式中: $\zeta_{jk}(T)$ 、 $H_{jk}(T)$ 分别为模具在 j 处位置、 k 时刻的关于温度 T 的磨损系数和模具硬度函数; N_{jk} 为模具在 j 处位置、 k 时刻的表面正压力; v_{jk} 为模具在 j 处位置、 k 时刻的金属流速; Δt_k 为 k 时刻的磨损接触时间。

1.2 模拟结果初步验证及改进方案的提出

经数值分析可知, 改进前工序 3 和工序 4 的

上、下模一次锻造后的磨损结果见图 4, 两道工序中上模最大磨损深度均大于下模, 失效较快, 与现场结果相符, 模具寿命以上模为准。按企业工艺要求, 模具的最大磨损深度必须限制在 0.5 mm 以内, 而由图 4 可知工序 3 和工序 4 中上模的最大磨损深度分别为 1.52×10^{-4} 和 8.16×10^{-5} mm, 因此, 可预估模具寿命分别为 3289 件和 6127 件, 与图 2 统计结果的平均寿命相比, 误差值分别为 5.27% 和 1.39%, 说明模型预测精度高, 验证了上述建模结果的可靠性。

由图 4a 知, 工序 3 中上模外圈圆弧过渡区域磨损最剧烈, 经分析可能是模具结构不佳使得模具表面正压力大或金属流动不畅造成的, 因此, 尝试通过改进模具外形来降低磨损, 并提出了两种改进方案。改进后的工序 3 的锻件图如图 5 所示, 与原方案相比, 两种改进方案均对头部结构进行了改进, 而杆部结构保持不变。通过 Deform-3D 依次进行成形试验验证及模具磨损分析。

2 改进后锻件的成形质量分析

锻件成形良好必须保证表面的完整性以及内部无缺陷^[11], 其中成形的完整性可通过锻件与模具的接触情况来分析, 而内部是否存在成形缺陷可通过金属流线变化情况进行判断^[12]。图 6 为改进后两种方案下的锻件成形图, 图 6 中两种方案中上、下表面不存在空腔, 锻件与上、下模组成的型腔完美契合, 能够实现锻件的完整成形, 均能达到锻件的尺寸要求。

图 7 为改进后两种方案下的金属流线变化图, 方案 1 中工序 3 的变形过程见图 7a, 主要包括头部

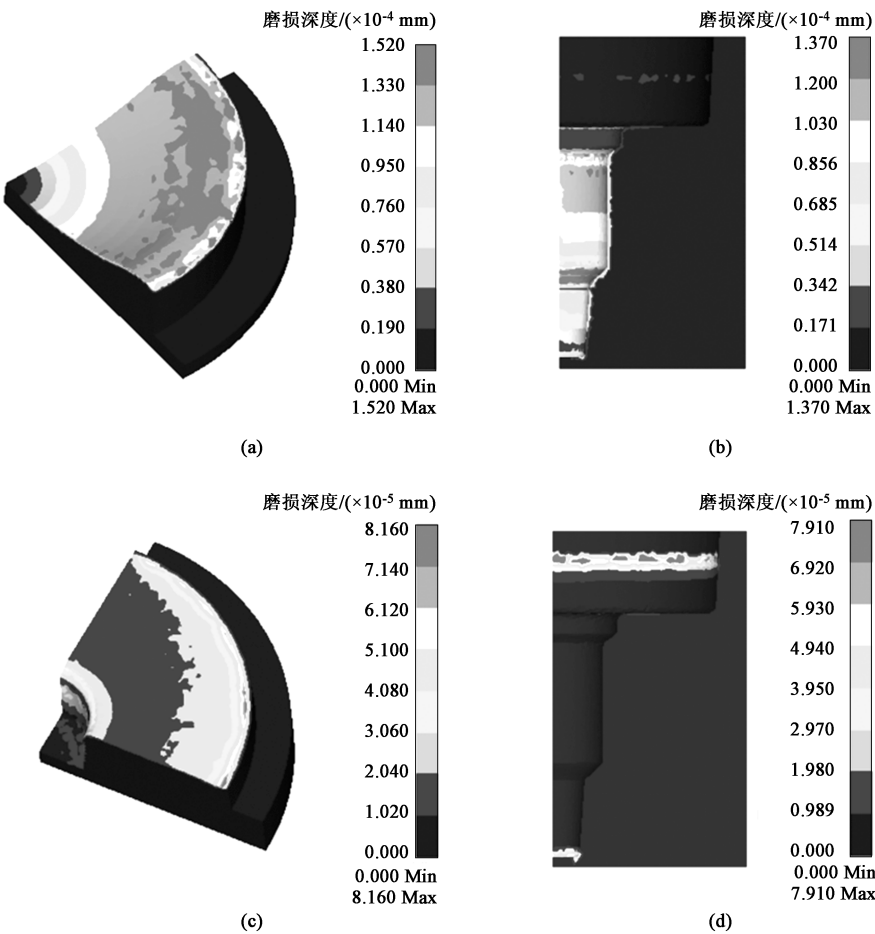


图 4 改进前工序 3 和工序 4 的模具磨损结果

(a) 工序 3, 上模 (b) 工序 3, 下模 (c) 工序 4, 上模 (d) 工序 4, 下模

Fig. 4 Mold wear results of process 3 and process 4 before improvement

(a) Upper mold of process 3 (b) Lower mold of process 3 (c) Upper mold of process 4 (d) Lower mold of process 4

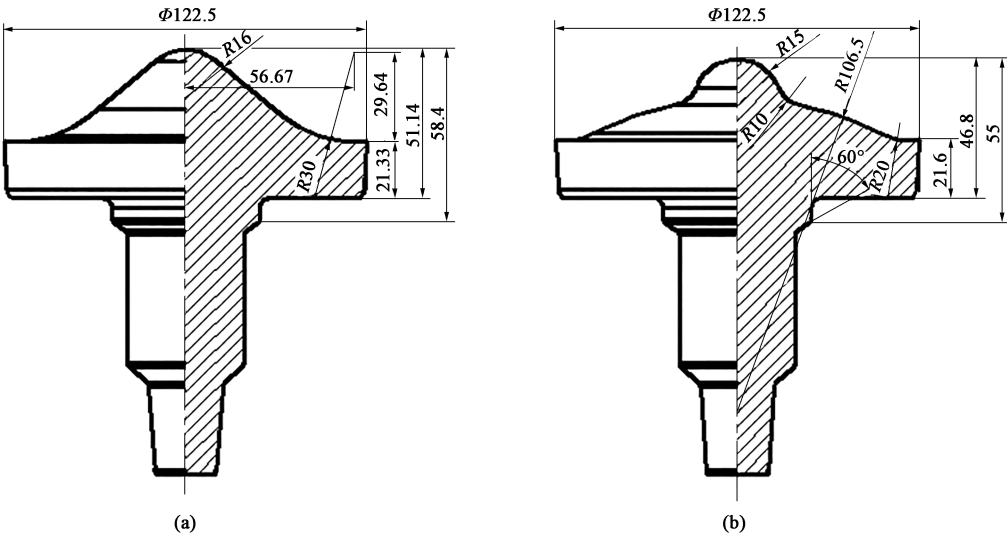


图 5 改进后工序 3 的锻件图

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 5 Forgings drawings of process 3 after improvement

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

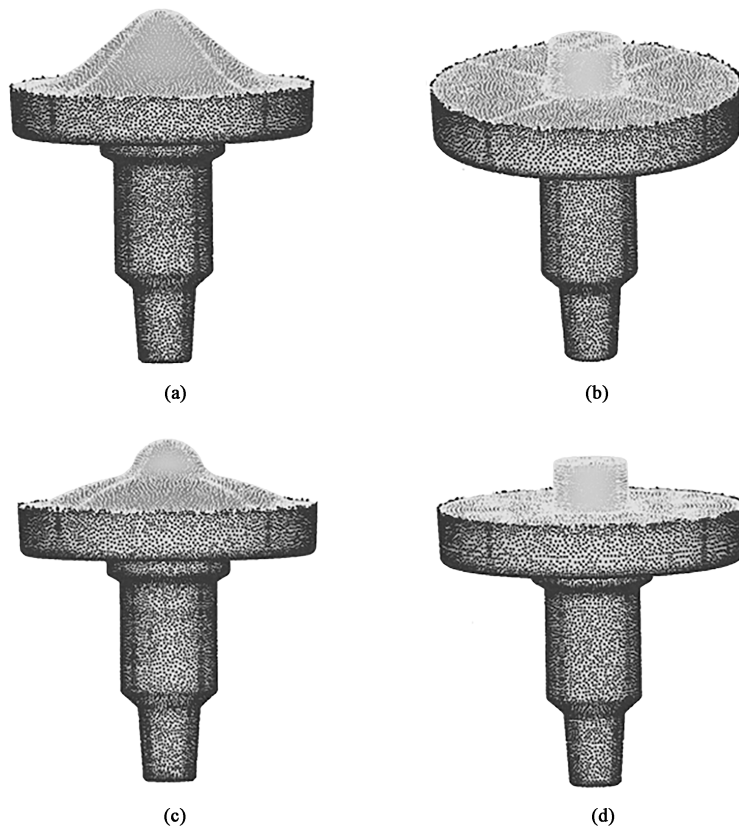


图 6 改进后两种方案的锻件成形图

(a) 方案 1, 工序 3 (b) 方案 1, 工序 4 (c) 方案 2, 工序 3 (d) 方案 2, 工序 4

Fig. 6 Forming drawings of forgings for two schemes after improvement

(a) Process 3 of scheme 1 (b) Process 4 of scheme 1 (c) Process 3 of scheme 2 (d) Process 4 of scheme 2

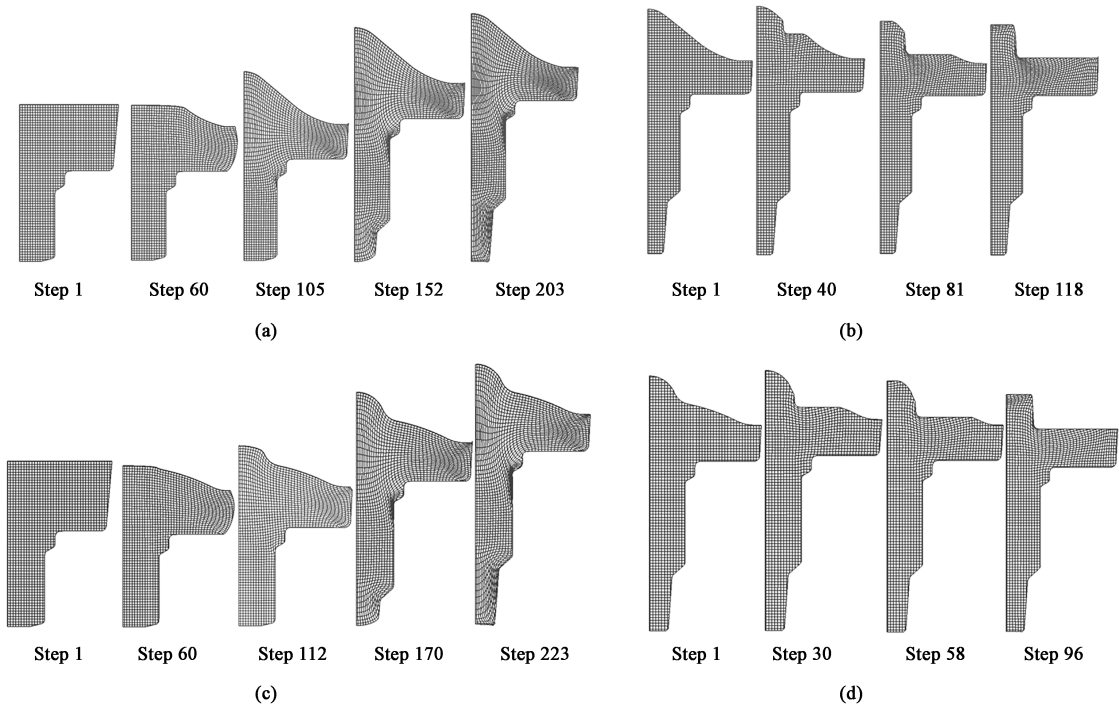


图 7 改进后两种方案的金属流线变化图

(a) 方案 1, 工序 3 (b) 方案 1, 工序 4 (c) 方案 2, 工序 3 (d) 方案 2, 工序 4

Fig. 7 Metal streamline change diagrams of two schemes after improvement

(a) Process 3 of scheme 1 (b) Process 4 of scheme 1 (c) Process 3 of scheme 2 (d) Process 4 of scheme 2

填充和杆部填充两个阶段：(1) 头部填充阶段，材料主要斜向下流动成形圆形法兰以及向上流动成形“伞型”结构，外圈材料受上模挤压变形剧烈，网格畸变要大于心部，网格也更为密集，同时由于坯料与上模之间存在摩擦，外部的材料流动要落后于心部的材料，因此，横向网格线向上拱起；(2) 杆部填充阶段，一部分材料做刚性平移，不参与变形，另一部分材料正向挤压变形，圆弧过渡处的网格畸变严重，同时由于坯料与下模间的摩擦作用，外部材料滞后于心部，横向网格线向下拱起，幅度较小。方案 1 中工序 4 的变形过程见图 7b，杆部做刚性平移，不参与变形，头部在上模挤压下轴向压缩，仅靠近上模部分网格发生一定变形。结合图 7a 和图 7b 分析可知，方案 1 锻件的整个成形过程中，材料流动合理，不存在对流现象，无折叠、断裂等缺陷产生，金属流线具有连续性、分布较好。

方案 2 中工序 3 和工序 4 的变形过程分别如图

7c 和图 7d 所示，与方案 1 基本类似，工序 3 同样包括头部填充和杆部填充两个阶段：(1) 头部填充时，外圈材料受上模挤压后开始剧烈变形，网格集中畸变大，心部材料由于流动较快，网格线向上拱起；(2) 杆部填充，与方案 1 相同。工序 4 与方案 1 相比，变形更为简单，网格畸变程度更小，变形较大部位同样为靠近上模部分，杆部不参与变形。整个成形过程中，材料无不合理流动的现象，因此采用方案 2，成形锻件内部同样不会出现折叠等缺陷。综上分析可知，改进后两种方案均能获得符合成形尺寸要求且内部无缺陷的锻件。

3 改进前后方案对比

基于方案 1 的模具经历一次锻造后磨损深度分布如图 8 所示，由图 8 可知，工序 3 上、下模的最大磨损深度分别为 8.220×10^{-5} 和 7.860×10^{-5} mm，

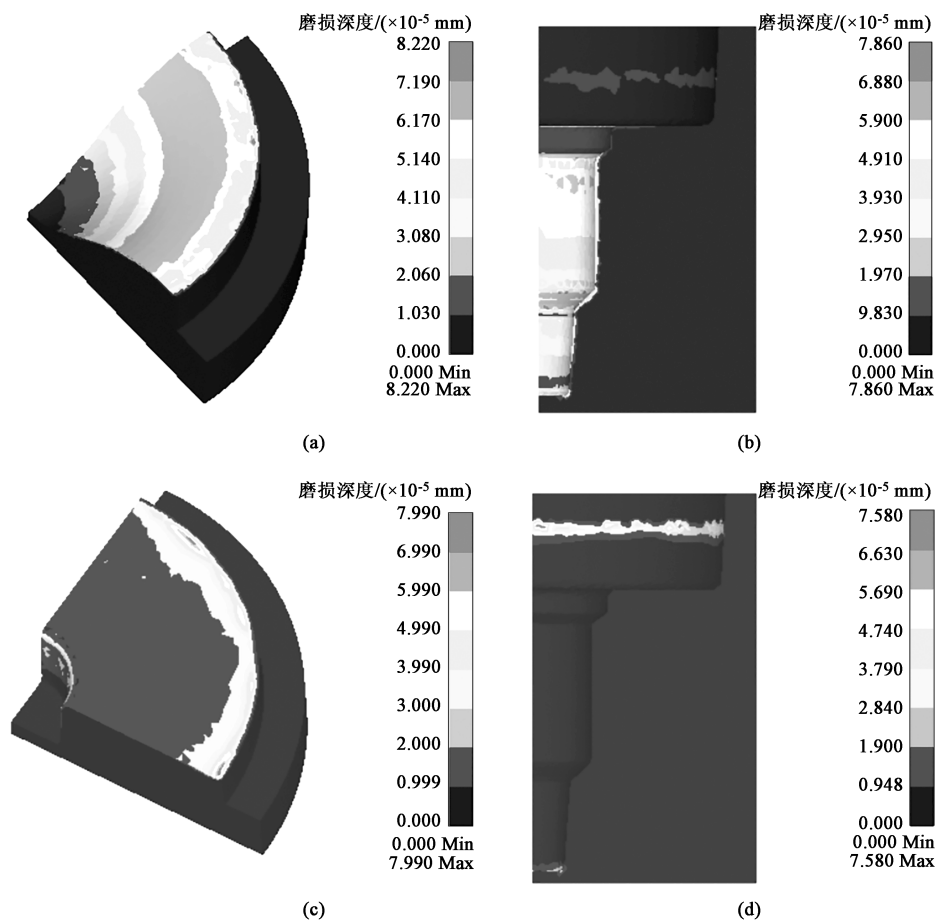


图 8 方案 1 中工序 3 和工序 4 的模具磨损结果

(a) 工序 3，上模 (b) 工序 3，下模 (c) 工序 4，上模 (d) 工序 4，下模

Fig. 8 Mold wear results of process 3 and process 4 in scheme 1

(a) Upper mold of process 3 (b) Lower mold of process 3 (c) Upper mold of process 4 (d) Lower mold of process 4

工序 4 上、下模的最大磨损深度分别为 7.990×10^{-5} 和 7.580×10^{-5} mm，上模磨损均大于下模，因此，以磨损较大者上模作为预估整套模具寿命的对象。工序 3 的上模最大磨损深度与改进前相比，下降了 45.9%，而工序 4 的上模最大磨损深度下降了 2.1%，因此，采用方案 1 能够达到降低磨损的目的，同时未对工序 4 的模具寿命造成影响。

基于方案 2 的模具经历一次锻造后磨损深度分布如图 9 所示，由图 9 中最大磨损深度数据可知，工序 3 和工序 4 的模具寿命依然以上模为准，工序 3、工序 4 上模最大磨损深度分别为 1.080×10^{-4} 和 7.740×10^{-5} mm，与改进前相比，工序 3 的上模最大磨损深度下降了 28.9%，工序 4 的上模最大磨损深度下降了 5.1%，说明采用方案 2 同样能够达到降低磨损的目的。

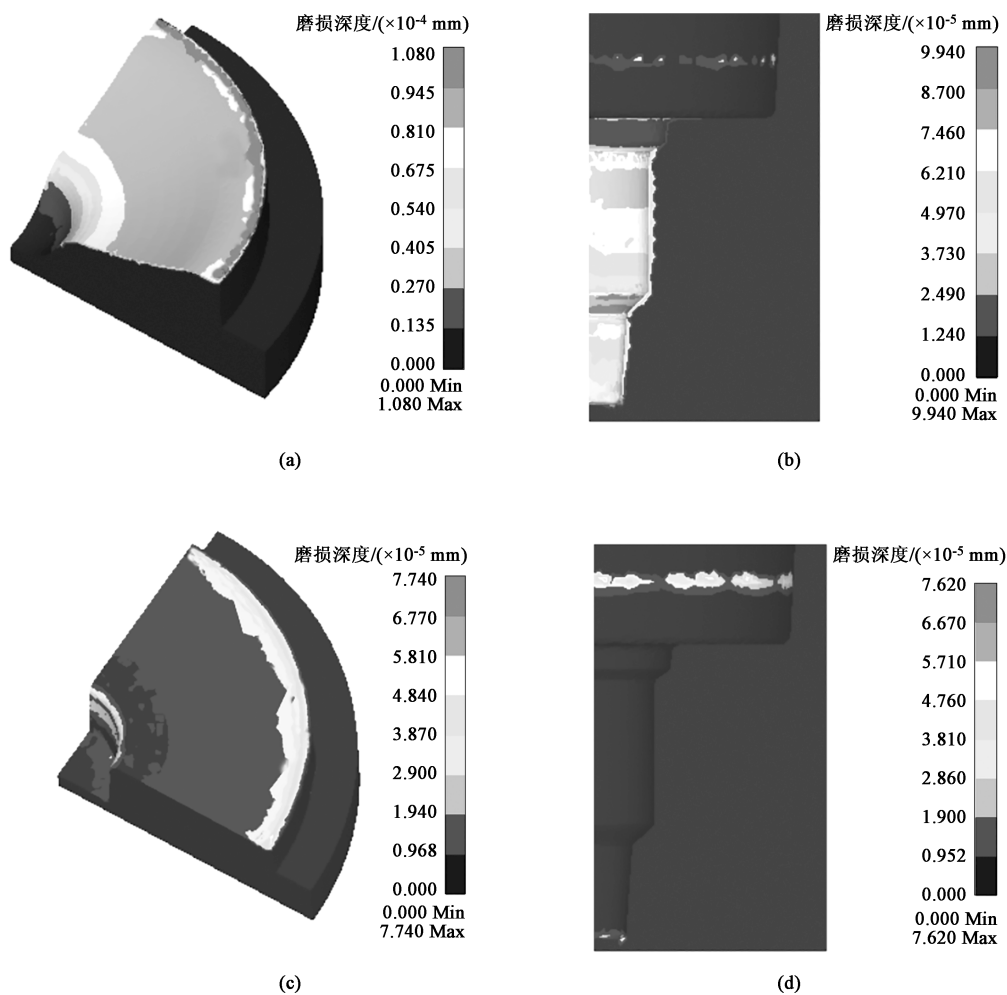


图 9 方案 2 中工序 3 和工序 4 的模具磨损结果

(a) 工序 3, 上模 (b) 工序 3, 下模 (c) 工序 4, 上模 (d) 工序 4, 下模

Fig. 9 Mold wear results of process 3 and process 4 in scheme 2

(a) Upper mold of process 3 (b) Lower mold of process 3 (c) Upper mold of process 4 (d) Lower mold of process 4

按企业工艺要求，同样以模具最大磨损深度为 0.5 mm 为限，可计算得出方案 1 中两工序的模具寿命分别为 6082 件和 6257 件，方案 2 中两工序的模具寿命分别为 4630 件和 6460 件。虽然方案 2 中工序 4 的模具寿命更长，但本文研究主要为提高工序 3 的模具寿命，且两种改进方案中工序 4 的模具寿命差别不大，因此，采用方案 1 更好。

4 试模验证

依照上述两种改进方案进行模具设计与制造，并进行试模试验，与有限元模拟结果进行对照分析，以确保上述模拟结果以及分析的正确性。两种改进方案中工序 3 和工序 4 锻件的实际锻出结果如图 10 所示，经抽检，锻件尺寸较稳定，误差小，能



(a)

(b)

图 10 改进后两种方案的锻件试验结果

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 10 Test results of forgings for two schemes after improvement

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

够达到企业要求,同时经超声探伤检测未发现锻件内部存在缺陷,验证了改进后两种方案的可成形性,能够实现对原工艺的替代,进行法兰传动轴的生产。

此外,通过长期锻造试验来观察改进后工序 3 和工序 4 的模具寿命情况,各取 5 套模具进行统计,模具实际失效结果与模拟分析相符,上模寿命较短,最终结果如图 11 所示。平均模具寿命分别为 6235 件(方案 1 工序 3)、6364 件(方案 1 工序 4)、4784 件(方案 2 工序 3)和 6574 件(方案 2 工序 4),与模拟预估值值的误差分别为 2.5%、1.7%、3.3%以及 1.8%,误差极小,说明上述建模精度较高。综合分析,显然方案 1 更好,与模拟结果一致,模具平均寿命较原工艺提高了 2763 件。3 种方案的上模现场磨损情况如图 12 所示,各磨损严重部位(图 12 中圆圈处)均与模拟

结果一致,说明数值分析能够有效地描述模具实际的磨损行为。

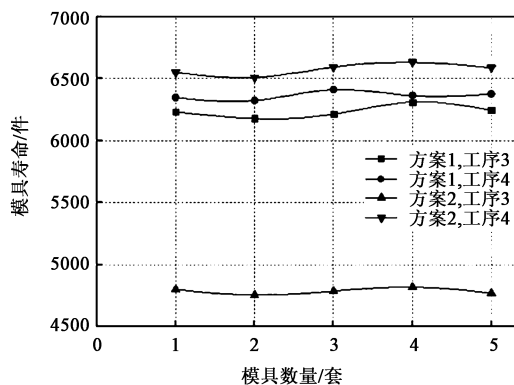
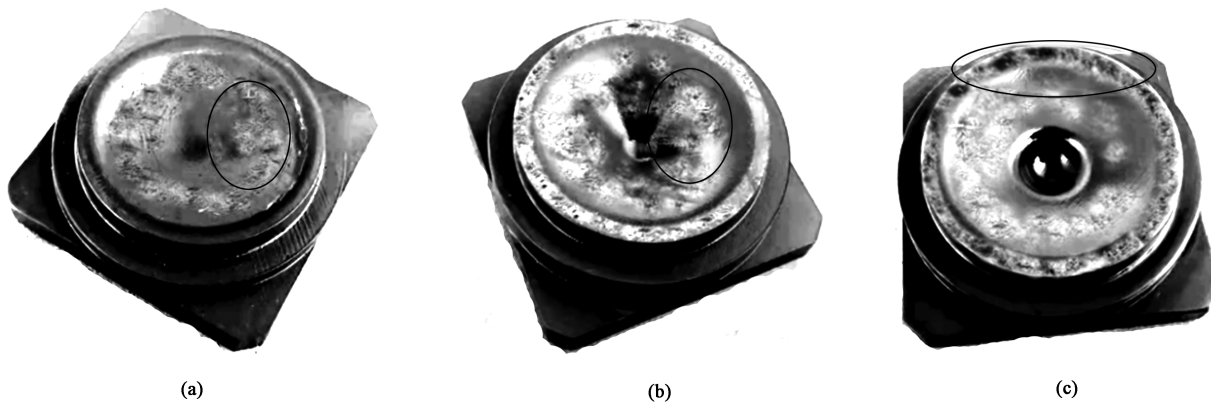


图 11 改进后方案 1 和方案 2 的模具寿命统计结果

Fig. 11 Statistical results of mold life of scheme 1 and scheme 2 after improvement



(a)

(b)

(c)

图 12 各方案的上模磨损结果

(a) 原方案 (b) 改进后方案 1 (c) 改进后方案 2

Fig. 12 Wear results of upper mold for each scheme

(a) Original scheme (b) Scheme 1 after improvement (c) Scheme 2 after improvement

5 结语

针对法兰传动轴锻造成形过程中工序 3 的模具磨损严重的问题, 通过 Deform-3D 进行了数值分析, 同时考虑温度的影响作用, 采用修正的 Archard 磨损模型, 并以原工艺为模拟对象, 验证了模型的准确性。在原工艺基础上, 对工序 3 的模具结构进行了改进, 并对锻件成形的完整性及金属流线变化情况进行了分析。结果表明: 改进后两种方案均能获得满足尺寸要求、并且无缺陷的锻件, 最终通过现场试验进行了验证。比较了改进前、后的模具磨损情况, 方案 1 中工序 3 的模具的最大磨损深度下降了 45.9%, 方案 2 中工序 3 的模具的最大磨损深度下降了 28.9%, 经现场磨损验证, 误差极小, 改进后方案达到了降低磨损的目的, 其中方案 1 的成形效果更佳, 有效地解决了企业的难题。

参考文献:

- [1] 银俊鹰, 赵勇桃. 汽车用法兰面螺母冲孔仿真试验及优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (4): 114-120.
Yin J Y, Zhao Y T. Simulation test and optimization of punching for flange nut in automobile [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (4): 114-120.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 王宝雨, 左斌, 杨乐毅, 等. 油泵齿轮轴精锻成形工艺研究及缺陷分析 [J]. 北京科技大学学报, 2014, 36 (8): 1087-1093.
Wang B Y, Zuo B, Yang L Y, et al. Forming process study and defect analysis of precision forging for the gear shafts of oil pumps [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36 (8): 1087-1093.
- [5] Pang H, Ngaile G. Development of a non-isothermal forging process for hollow power transmission shafts [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47 (11): 22-31.
- [6] Bulzak T, Tomczak J, Pater Z. A comparative analysis of hot and cold flashless forging of a stepped shaft using vertically-parted dies [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116 (7-8): 2521-2530.
- [7] 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.
- [8] 钟流发, 刘祚时, 高秀琴, 等. 基于修正 Archard 模型的 45 钢感应淬火后磨损量计算与验证 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 203-208.
Zhong L F, Liu Z S, Gao X Q, et al. Wear amount calculation and verification of 45 steel after induction quenching based on modified Archard model [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (10): 203-208.
- [9] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24 (8): 981-988.
- [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] 梁强. 活塞销冷锻挤成形微折叠缺陷分析及改进措施 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 99-104.
Liang Q. Micro-folding defect analysis and improvement of cold upsetting-extruding process for piston-pin [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 99-104.
- [12] 李天兴, 张迅雷, 傅建中, 等. 轿车用齿坯精锻工艺参数与模具结构对金属流线的影响 [J]. 机械传动, 2015, 39 (10): 154-157, 175.
Li T X, Zhang X L, Fu J Z, et al. Influence of the technological parameter and die structure on metal flow line for precision forging car gear blank [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39 (10): 154-157, 175.

