

# 基于汽车差速器齿轮热锻二次成形齿顶面折叠缺陷的成形数字仿真及工艺研究

李林鑫<sup>1</sup>, 崔志亮<sup>2</sup>, 赖丽莉<sup>1</sup>, 冯 铃<sup>1</sup>

(1. 四川化工职业技术学院 智能制造学院, 四川 泸州 646005; 2. 四川众友机械有限责任公司, 四川 雅安 625000)

**摘要:** 针对汽车差速器齿轮热锻二次成形中出现的齿顶面折叠缺陷, 利用UG和Deform-3D软件进行了有限元三维建模和仿真模拟, 发现了缺陷产生的原因。在此基础上, 首先, 通过调整毛坯尺寸获得了较为理想的成形效果。然后, 研究了摩擦因数对成形质量的影响, 确定摩擦因数为0.3时会再次出现折叠缺陷。再以毛坯温度和锻压速度为变量, 研究了两者对成形质量的影响, 得到最大成形载荷随着毛坯温度和锻压速度的增加而减小, 并且当金属变形抗力低于一定程度时会再次出现缺陷。最后, 确定了最佳的工艺参数, 并通过真实生产得到了无缺陷的产品, 验证了最佳工艺参数的正确性, 提高了生产效率。

**关键词:** 汽车差速器齿轮; 热锻二次成形; 折叠缺陷; 毛坯温度; 数字仿真

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.003

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0023-05

## Forming digital simulation and process research based on tooth top surface folding defect in hot forging secondary forming for automobile differential gear

Li Linxin<sup>1</sup>, Cui Zhiliang<sup>2</sup>, Lai Lili<sup>1</sup>, Feng Ling<sup>1</sup>

(1. Intelligent Manufacturing College, Sichuan Vocational College of Chemical Technology, Luzhou 646005, China;

2. Sichuan Zhongyou Machinery Limited Liability Company, Yaan 625000, China)

**Abstract:** For the folding defect of tooth top surface in the hot forging secondary forming of automobile differential gear, the finite element three-dimensional modeling and simulation were carried out by software UG and Deform-3D, and the cause of the defect was found. On this basis, by adjusting the blank size, an ideal forming effect was obtained. Then the influence of friction factor on the forming quality was investigated, and it was concluded that the defect appeared again when the friction factor was 0.3. Furthermore, taking the blank temperature and forging speed as variables, the influences of the two on the forming quality were investigated, it was obtained that the maximum forming load decreased with the increase of blank temperature and forging speed, and the defects appeared again when the metal deformation resistance was lower than a certain degree. Finally, the optimal process parameters were determined. At last, through the real production, the products without defects were obtained, which verified the correctness of the optimized process parameters and improved the production efficiency.

**Key words:** automobile differential gear; hot forging secondary forming; folding defect; blank temperature; digital simulation

差速器是汽车传动系统中的重要一环, 能够实现在不平路面和转弯时驱动轮的差速转动。差速器包含壳体、半轴齿和行星齿轮等零件, 其中, 半轴齿轮由行星齿轮带动, 将转矩传递给车轮轴。差速器中的半轴齿轮要承受较大的冲击载荷, 其齿轮的性能在一定程度上决定了整车的安全性和可靠性<sup>[1-4]</sup>。

目前, 最常用的半轴齿轮的生产工艺流程为先温锻再精加工, 精加工时仅针对背锥和内孔等回端面, 齿面是在温锻时直接成形, 后续只进行表面处理, 不再精加工, 因此, 温锻时的成形质量很大程度上决定了半轴齿轮的使用质量。本文针对某公司二次成形工艺生产的半轴齿轮齿面的折叠问题(图1), 利用Deform-3D软件, 以原始工艺参数模拟了成形过程, 发现缺陷产生的原因, 然后在此基础上, 研究毛坯尺寸以及毛坯温度、锻压速度等工艺参数对折叠缺陷的影响, 以消除成形时的折叠缺陷, 并进一步优化工艺参数, 提高产品质量和生产效率<sup>[5-12]</sup>。

收稿日期: 2021-03-03; 修订日期: 2021-06-10

基金项目: 四川省教育厅课题(17ZB0277)

作者简介: 李林鑫(1984-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 179207987@qq.com

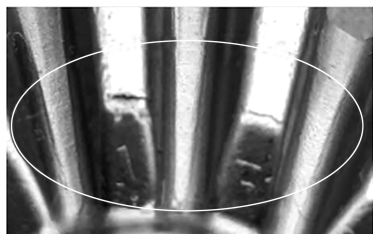


图 1 半轴齿轮齿面的折叠缺陷

Fig. 1 Folding defect on tooth surface of half shaft gear

## 1 模拟模型建立

本文研究的半轴齿轮材料为 20CrMnTi 钢, 该材料的性能与 Deform-3D 材料库中的 20MnCr5 钢材料的性能接近, 因此, 本例中采用 20MnCr5 钢的参数替代分析。半轴齿轮的三维模型如图 2 所示, 其体积利用 UG 软件可直接得出, 为  $7.76 \times 10^4 \text{ mm}^3$ 。模具结构如图 3 所示。



图 2 半轴齿轮 (锻压工序零件) 三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of half shaft gear (Part in forging process)

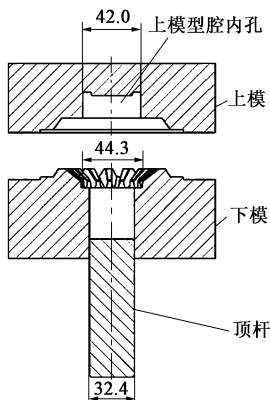


图 3 模具结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of die structure

## 2 原始条件下仿真模拟结果分析

### 2.1 原始条件下模拟参数设置

原始条件下分析时, 将上模、下模和顶杆均设

置为刚体。第 1 次成形为: 上模首先向下模方向移动, 直至合模完成; 第 2 次成形为: 合模后模具继续下行, 顶杆开始顶入型腔, 直至金属充满型腔。锻压速度为  $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。毛坯为圆钢剪切下料, 为了保证分析精度, 毛坯的最小网格尺寸设置为  $0.7 \text{ mm}$ , 每个分析步长为  $0.3 \text{ mm}$  (为最小网格的  $1/2 \sim 1/3$  时, 分析精度较高), 首次分析时毛坯温度为  $720 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。原始工艺中为了方便定位, 毛坯直径设置为  $\Phi 44 \text{ mm}$ , 锻压时将毛坯放入下模中直径为  $\Phi 44.3 \text{ mm}$  的凹腔位置进行定位 (见图 3), 模拟毛坯体积比零件体积稍大, 为  $7.8 \times 10^4 \text{ mm}^3$ , 多余材料仅影响预锻内孔 (盲孔) 深度, 会在后续加工车削内孔时被切除, 不会对齿轮轮齿成形尺寸产生影响。按照正常生产时的条件, 模具温度设置为  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 环境温度设置为  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 对流系数设置为  $20 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ , 摩擦因数首次设置为  $0.7$ , 热传系数设置为  $100 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1[5]}$ 。

### 2.2 原始条件下模拟结果分析

如图 4 中圆圈所示位置, 在缺陷位置的成形过程中, 可以看到该位置的速度向量之间形成一个较大的夹角, 即有两个方向上的金属同时向该位置流动, 因此, 可能会产生折叠 (压痕) 缺陷。

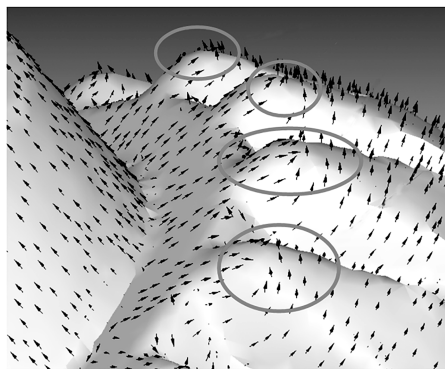


图 4 缺陷成形时的速度向量

Fig. 4 Velocity vector during forming of defects

模拟合模过程中, 当上模下行时因其内孔直径 (图 3) 比毛坯小, 在将毛坯挤入内孔的同时, 毛坯受到压力被墩粗。真实生产时, 毛坯上、下平面有一定的平行度误差, 为了模拟真实的锻压过程, 本文将毛坯上端面设置  $0.5^{\circ}$  的倾斜。如图 5 所示, 当上模继续下行时, 对应缺陷位置处既有从中间横向挤出的金属填充, 也有被墩粗后从上方压入的金属, 当这两个方向的夹角足够大时, 即会造成折叠缺陷 (压痕)。在上平面高度较低的一侧, 墩粗更为明显, 更易产生缺陷。

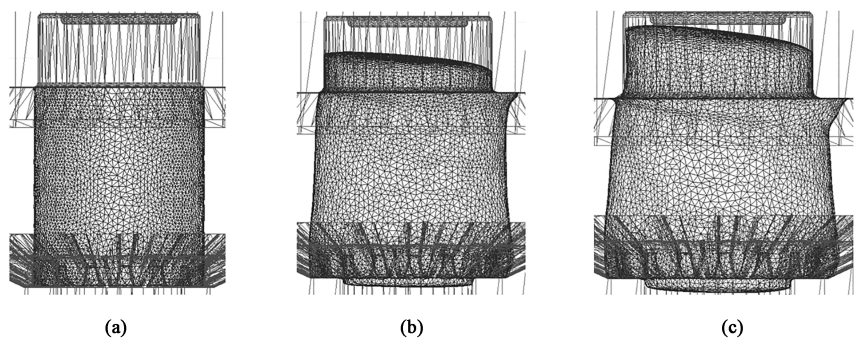


图 5 原始条件下的锻造过程  
(a) 上模行程为 0 mm (b) 上模行程为 6 mm (c) 上模行程为 15 mm  
Fig. 5 Forging process under original conditions  
(a) Upper die stroke of 0 mm (b) Upper die stroke of 6 mm (c) Upper die stroke of 15 mm

### 3 工艺参数调整及仿真结果分析

#### 3.1 调整毛坯直径 $D$ 值

从上文分析中可以看出，当缺陷成形时的材料流

动填充方向一致时，即可避免折叠缺陷的出现。为了实现这一目标，本文调整了毛坯直径，分别对直径为  $\Phi 40$  和  $\Phi 56$  mm 的毛坯展开模拟，并对直径为  $\Phi 56$  mm 的毛坯底圆倒斜  $25^\circ$  角（与齿面斜角对应），用于定位。仿真模拟结果如图 6 所示。

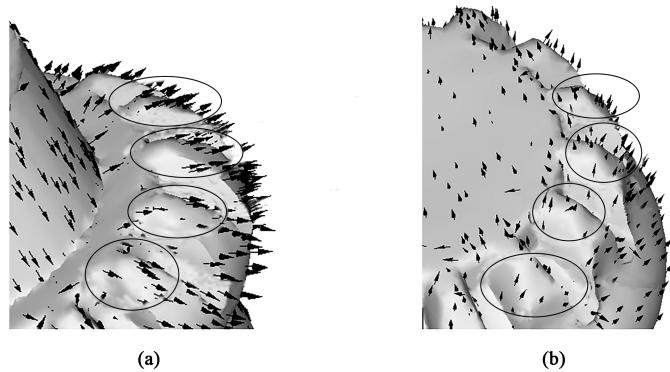


图 6 调整毛坯直径后缺陷成形时的速度向量  
(a) 毛坯直径为  $\Phi 40$  mm (b) 毛坯直径为  $\Phi 56$  mm  
Fig. 6 Velocity vector during forming of defects after adjusting blank diameter  
(a) Blank diameter of  $\Phi 40$  mm (b) Blank diameter of  $\Phi 56$  mm

从图 6a 中可以看出，毛坯直径为  $\Phi 40$  mm 时，毛坯直径小于上模孔，上模下行过程中，毛坯接触到上模孔底部之前，毛坯不会被镦粗，缺陷在顶杆上行时才会开始成形，缺陷位置处（图 6a 圆圈）的金属只有从中间向外沿的流动，不会产生缺陷。从图 6b 中可以看出，毛坯直径为  $\Phi 56$  mm 时，上模下行时，毛坯会被先镦粗后挤入下模齿间间隙，缺陷成形时金属只有从上模到下模方向的流动，也不会产生缺陷；但随着上模下行，在齿顶面位置处会出现明显的折叠缺陷，如图 7 所示。

#### 3.2 摩擦因数、毛坯温度及锻压速度对成形的影响

为了进一步改善成形条件、减小最大成形载荷，

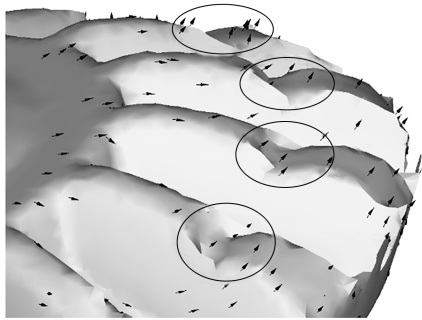


图 7 毛坯直径为  $\Phi 56$  mm 时的齿顶面  
Fig. 7 Tooth top surface with blank diameter of  $\Phi 56$  mm  
本文在毛坯直径为  $\Phi 40$  mm 的基础上，研究了摩擦

因数为 0.3 时,不同毛坯温度(620、720 和 820 ℃)条件下的成形过程,结果发现:摩擦因数为 0.3 时,各毛坯温度条件下,原折叠缺陷位置处再次出现折叠缺陷,如图 8 所示。

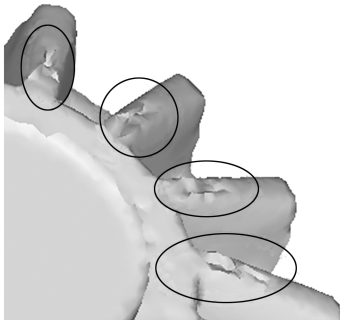


图 8 摩擦因数为 0.3 时模拟出现的缺陷

Fig. 8 Defects in simulation with friction coefficient of 0.3

如图 9 所示,当摩擦因数为 0.3 时,靠近齿面测得的金属流动速度比摩擦因数为 0.7 时更快,导致中间的金属不能及时填充型腔,后续成形时两边靠近齿面侧的金属向中间流动,从而产生折叠缺陷。因此,本文后续分析时采用的摩擦因数为 0.7。

在摩擦因数为 0.7 的基础上,本文对不同的毛坯温度和锻压速度进行了交叉试验,对应取值和最大成形载荷的模拟结果见表 1。

从表 1 中可以看出:随着毛坯温度的增高,金属的变形抗力减小,最大成形载荷呈现减小的趋势;随着锻压速度的增加,锻压产生的热量增大,提升了毛坯温度,最大成形载荷也呈现减小的趋势。同时,从表 1 中的 6#、8#、9# 试验样本可以看出:当金属变形抗力小于一定值时,会在原缺陷位置再次出现折叠缺陷。

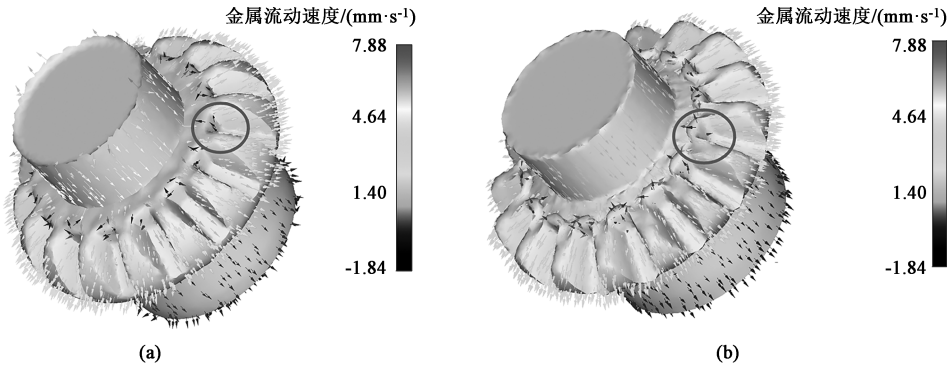


图 9 不同摩擦因数条件下缺陷位置的金属流动情况  
(a) 摩擦因数为 0.7 (b) 摩擦因数为 0.3

Fig. 9 Metal flow situations at defect location under different friction coefficients  
(a) Friction coefficient of 0.7 (b) Friction coefficient of 0.3

表 1 不同毛坯温度及锻压速度下的最大成形载荷和缺陷情况

Table 1 Maximum forming loads and defect situations under different blank temperatures and forging speeds

试验号	毛坯温度/℃	锻压速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	最大成形载荷/MPa	模拟是否出现缺陷
1#	620	3	4920	否
2#	720	3	4610	否
3#	820	3	4280	否
4#	620	6	4560	否
5#	720	6	4870	否
6#	820	6	3560	是
7#	620	9	4010	否
8#	720	9	3650	是
9#	820	9	3010	是

#### 4 优化参数确定和锻压试验

根据前文的分析结果,为了更好的成形质量和更高的生产效率,本文采用直径为  $\Phi 56$  mm 的毛坯(为了保证工件定位、防止飞出,在毛坯底部车削  $\Phi 32$  mm $\times$ 3 mm 的轴颈),按照表 1 中 7# 试验样本的工艺参数(摩擦因数为 0.7、毛坯温度为 620 ℃、锻压速度为 9 mm·s<sup>-1</sup>),材料为 20CrMnTi 钢,在螺旋压力机上进行真实锻压试验。得到如图 10 为所示的产品(放大后的齿面)。可以看出,原有的折叠缺陷消失,符合模拟结果。

#### 5 结论

(1) 利用 Deform-3D 软件模拟锻造过程,分析



图10 参数优化后的实际产品1/4局部放大图

Fig. 10 1/4 partial enlarged drawing of actual product after parameter optimization

金属流动时的形态和速度向量,发现了半轴齿轮折叠缺陷的产生原因。

(2) 其他工艺参数不变的条件下,调整毛坯直径,通过进行仿真模拟,在毛坯直径小于上模中间盲孔直径时,获得了较理想的速度向量和金属流动形态。

(3) 研究了摩擦因数对成形质量的影响,发现当有润滑条件(摩擦因数取0.3)时,会再次出现折叠缺陷。

(4) 摩擦因数为0.7时,以毛坯温度、锻压速度为变量进行了交叉试验,发现最大成形载荷随着毛坯温度和锻压速度的增加而减小,当金属变形抗力低于一定程度时,折叠缺陷会再次出现。

(5) 以节约能源和提高生产效率为原则,得到了最优的工艺参数为:摩擦因数为0.7、毛坯温度为620℃、锻压速度为 $9\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 蒋磊,龚剑,王龙,等. 侧围外板浅拉延成形工艺数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(9): 73-81.  
Jiang L, Gong J, Wang L, et al. Numerical simulation of shallow drawing for body side outer panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(9): 73-81.
- [3] 陈云,倪俊芳,花维维,等. 基于DEFORM-3D直齿锥齿轮锻造模具的精确设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(2): 86-88.  
Chen Y, Ni J F, Hua W W, et al. Accurate design of forging die for straight bevel gears based on DEFORM-3D [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(2): 86-88.
- [4] 赵利民,任云晖. 基于UG和ANSYS的齿轮模具设计及有限元仿真[J]. 煤矿机械, 2019, 40(12): 180-182  
Zhao L M, Ren Y H. Design and finite element simulation of gear mold based on UG and ANSYS [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(12): 180-182
- [5] 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. Structural optimization simulation of engine gear shaft hot forging based on Deform-3D [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(6): 42-49.
- [6] 周梦娟,冯玮. 圆柱螺旋齿轮热精锻过程齿变形规律的研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(7): 84-88.  
Zhou M J, Feng W. Study on tooth deformation law of cylindrical helical gear during hot precision forging [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(7): 84-88.
- [7] 陈金霞,吕文春,赵春来. 基于Deform的螺旋伞齿轮轴楔横轧工艺的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 96-98.  
Chen J X, Lyu W C, Zhao C L. Numerical simulation of cross wedge rolling process for spiral bevel gear shaft based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(1): 96-98.
- [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] 夏玉峰,杨建兵,田永生,等. 基于响应面法的汽车离合器盘毂温锻-冷精整工艺多目标优化[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(9): 3203-3210.  
Xia Y F, Yang J B, Tian Y S, et al. Multi-object optimization of warm forging-cold sizing technology for automobile clutch disc-hub based on response surface model [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(9): 3203-3210.
- [10] 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.
- [11] 董奇,金飞翔,秦强,等. 基于正交试验齿圈座热锻成形工艺优化[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(8): 18-22.  
Dong Q, Jin F X, Qin Q, et al. Optimization of hot forging forming process based on orthogonal test for gear ring seat [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(8): 18-22.
- [12] 段海龙. 42CrMo结合齿热锻成形机理及微观组织演变规律研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.  
Duan H L. Study on the Mechanism and Microstructure Evolution of 42CrMo Conjunction Gear During Forging Process [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2021.