

大型螺旋锥齿轮热处理变形的数值模拟与测量

王火生, 王乾廷, 黎文峰

(福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 应用计算流体力学软件 Flow3D 对大型螺旋锥齿轮在淬火过程中的变形情况进行数值模拟, 并通过逆向反求和数模比对技术测定实际的热处理变形量, 结果表明数值计算与实际测量结果较吻合, 数值模拟可以有效地预测热处理后轮齿的变形情况。轮齿的热处理变形具有不均匀性, 大端的变形量大于小端的变形量。凸齿面和凹齿面表现出不同的变形趋势, 凸齿面主要产生负偏移, 凹齿面主要产生正偏移。

关键词: 螺旋锥齿轮; 热处理变形; 数值模拟; 逆向反求

中图分类号: TG162.73; TG132.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2015)04-0338-04

Numerical simulation and measurement of heat treatment deformation for large spiral bevel gear

Wang Huosheng, Wang Qianting, Li Wenfeng

(College of Material Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The CFD software Flow3D was used to simulate the deformation of large spiral bevel gear during quenching. The displacements of gear teeth were measured by reverse engineering, which were compared with that of computer aided design (CAD) model. The displacement of numerical simulation is consistent that of the measurement, which can well predict the heat treatment deformation of the gear teeth. The deformation is non-uniform with the heel displacement being higher than that of the toe. The displacements are different between convex and concave tooth surfaces, which is negative on the convex side and positive on the concave side.

Keywords: spiral bevel gear; heat treatment deformation; numerical simulation; reverse engineering

大型螺旋锥齿轮副由于具有重合度大、传动平稳、承载能力高等优点, 广泛应用于各种设备的相交和相错轴传动, 是冶金机械、矿山机械、能源开采机械、发电机组、盾构掘进机械等核心传动系统^[1-2]。为提高齿轮性能, 粗加工后需进行表面渗碳和淬火等热处理。齿轮淬火过程中由于快速冷却易产生变形, 轮齿尺寸会产生偏差, 在后续的精加工过程中, 应充分考虑热处理后的齿形变化,

并通过调整加工参数进行修正, 使齿轮符合设计要求, 保证齿轮工作时主动轮和从动轮的啮合区域处于理想范围^[3-5]。本研究应用计算流体力学软件 Flow3D 中的 FSI 功能分析大型螺旋锥齿轮在淬火过程中齿形的变形趋势, 该功能用有限差分法计算温度场, 用有限元法计算由温度变化引起的应力场和应变场, 可以较准确地进行温度场和应力场的耦合计算。为验证数值模拟结果的准

收稿日期: 2015-06-13

基金项目: 福建省工业科技重点项目(2012H0001); 福建省科技重大专项(2014H0004-1)

第一作者简介: 王火生(1978-), 男, 福建永春人, 副教授, 硕士, 研究方向: 金属材料热加工。

确性,利用逆向反求技术对热处理后的齿面进行测量和重构,并通过数模比对测量齿面的实际变形量。

1 螺旋锥齿轮热处理过程数值模拟

1.1 齿轮建模

本研究对象是格里森齿制的大型螺旋锥齿轮,其参数和三维模型如图1所示,该齿轮为从动轮,基本参数为模数12,齿数45,齿形角20°,分度圆Φ540 mm,中点螺旋角35°(右旋),节锥角64.986°,齿宽99.318 mm,材料为20CrMnTi。

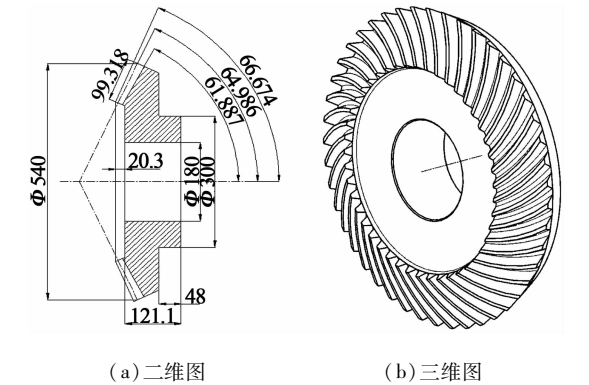


图1 大型格里森螺旋锥齿轮示意图
Fig.1 Diagrams of large spiral bevel gear

1.2 数值模拟参数设置

本研究应用 Flow3D 软件的 FSI 功能进行齿轮淬火过程的数值模拟,淬火介质为普通油,物性参数如表1,齿轮的物性参数如表2,淬火油温度为60℃,齿轮加热温度为880℃,齿轮与淬火介质的综合传热系数取2 000 W/(m²·K)^[6]。

表1 淬火油的物性参数	
Tab.1 Thermophysical parameters of quench oil	
比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
4.18×10 ³	0.60

1.3 数值模拟结果

1.3.1 凸齿面变形量

图2为凸齿面变形量的数值计算结果,为便于比较齿面变形前后的位置,将变形前的齿面设为着色面,变形后的齿面设为网格线。可以看出,在齿轮进入淬火油后,从轮齿的大端开始变形,冷却至第19 s时(如图2(a)),大端处的网格线开始被着色面覆盖,表明该位置齿面产生负偏移,随后变形向轮齿小端推进。冷却至第39 s时(如图2(b)),轮齿的大部分网格面均被着色面覆盖,只有小端处的网格线还有部分没被覆盖。随着冷却

表2 20CrMnTi 钢的物性参数						
Tab.2 Thermophysical parameters of 20CrMnTi steel						
比热/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	热膨胀系数/ K ⁻¹	剪切模量/ GPa	弹性模量/ GPa	泊松比
687	30	7.8×10 ³	1.2×10 ⁻⁵	7.9×10 ¹⁰	2×10 ¹¹	0.26

时间延长(如图2(c)),凸齿面的变形量不断增大,但大端的变形量明显大于小端。冷却至203 s时(如图2(d)),大端的负偏移量约为0.88 mm,小端的负偏移量约为0.48 mm。

为进一步分析凸齿面变形规律,从凸齿面上取3个观测点P1、P2、P3,如图2(a)。提取这3点在不同时间的变形量数据,结果如图3。可以看出从小端P1、中部P2、大端P3,变形量依次增大。冷却19 s时,P1、P2、P3的变形量分别为-0.08、-0.11、-0.13 mm,P1和P3点的变形量相差0.05 mm;冷却102 s时,P1、P2、P3的变形量分别为-0.30、-0.41、-0.57 mm;冷却203 s时,P1、P2、P3的变形量分别为-0.48、-0.64、

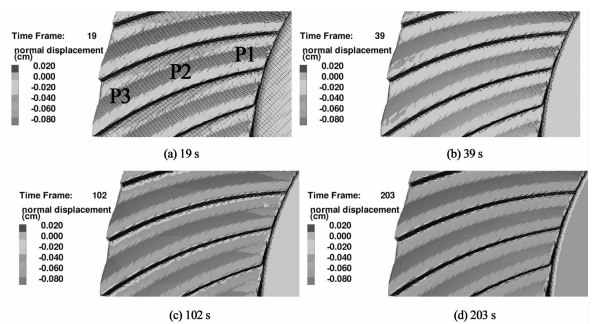


图2 凸齿面的变形量
Fig.2 Deformation of convex geartooth surface
-0.88 mm,P1 和 P3 点的变形量相差 0.40 mm。

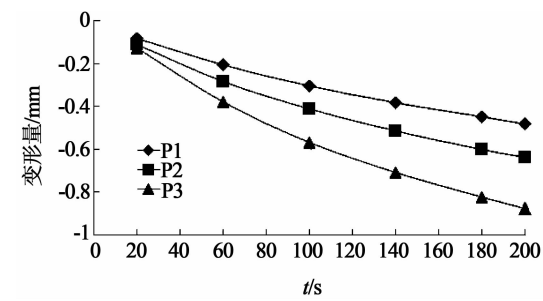


图 3 凸齿面沿齿长方向变形量的变化
Fig. 3 Deformation variation of convex gear-tooth surface along the gear-tooth length

P6 的变形量分别为 -0.05 、 0.17 、 0.38 mm。

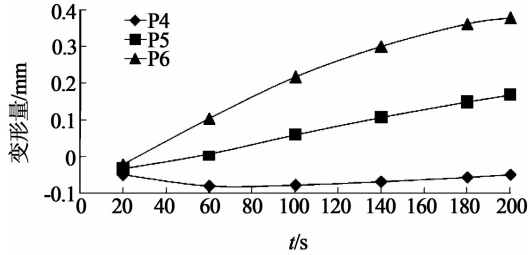


图 5 凹齿面沿齿长方向变形量的变化
Fig. 5 Deformation of concave geartooth surface along the gear-tooth length

1.3.2 凹齿面的变形量

图 4 为凹齿面变形量的数值计算结果,为便于比较齿面变形前后的位置,将变形前的齿面设为网格线,变形后的齿面设为着色面。可以看出,冷却 39 s 时(如图 4(a)),凹齿面的大端根部产生正偏移,随后向小端推进。由图 4(b)和图 4(c)可以较明显看出冷却 61 s 时和 102 s,大端处网格线逐渐被着色面覆盖,而小端主要产生负偏移。冷却 203 s 时(如图 4(d)),小端附近的网格线依然存在,没有被着色面覆盖,此时小端的变形量约为 -0.05 mm,大端变形量约为 0.38 mm。

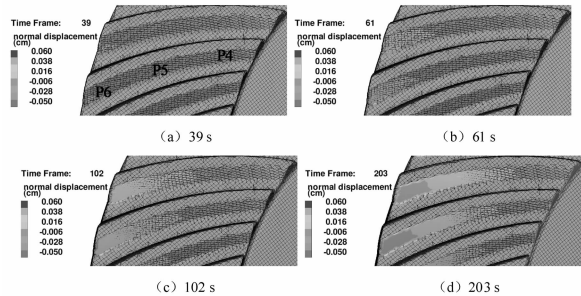


图 4 凹齿面的变形量
Fig. 4 Deformation of concave geartooth surface

为进一步分析凹齿面的变形规律,从凹齿面上取三个观测点 P4、P5、P6,如图 4(a)。测出这 3 点的变形量随时间变化,结果如图 5。可以看出冷却 19 s 时,P4、P5、P6 3 处的变形量均为负值,分别为 -0.05 、 -0.03 、 -0.02 mm,即表现为负偏移,随冷却时间延长,小端 P4 始终保持少量负偏移,而中部 P5 和大端 P6 的变形量逐渐由负值变为正值,产生了正偏移,且 P6 处的变形速率大于 P5 处;冷却 102 s 后,P4、P5、P6 的变形量分别为 -0.08 、 0.06 、 0.22 mm;冷却 203 s 后,P4、P5、

2 实际热处理变形量测量

螺旋锥齿轮在粗加工后进行淬火,处理工艺为加热温度 $880\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温约 3 h,在普通淬火油中冷却,冷却时间约 20 min。为保证加工精度,凹凸齿面均保留 0.5 mm 的精加工余量,淬火后齿轮如图 6(a)。通过激光扫描采集该齿轮的齿面,结果如图 6(b)。将测量齿面和设计齿面导入 Geomagic Qualify 软件中进行比对,为便于分析,在设计模型与测量模型完成比对定位后,取其中一个轮齿进行比对计算(如图 7)。

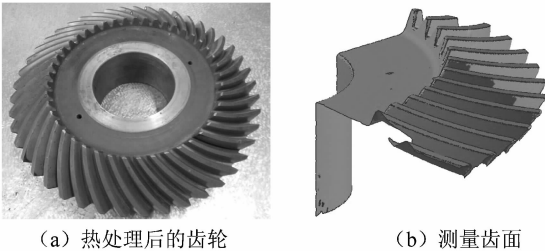


图 6 齿面的逆向反求
Fig. 6 Reverse engineering of geartooth

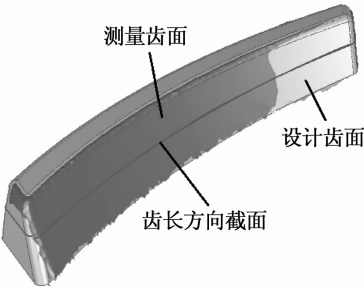


图 7 测量齿面与设计齿面对比
Fig. 7 Comparison between measured geartooth surface and that of CAD model

图8为数模比对计算结果,可看出,在凸齿面一侧出现较大负偏移(如图8(a)),其中轮齿小端偏移量较小,为-0.49 mm,大端偏移量较大,为-0.97 mm,且大端顶部偏移量大于根部偏移量。凹齿面在小端处产生少量负偏移,为-0.19 mm,大端产生较大的正偏移,为0.57 mm,且大端根部的偏移量大于顶部的偏移量。该齿轮的实际热处理变形趋势和变形量与图2、图4的数值计算结果较一致。

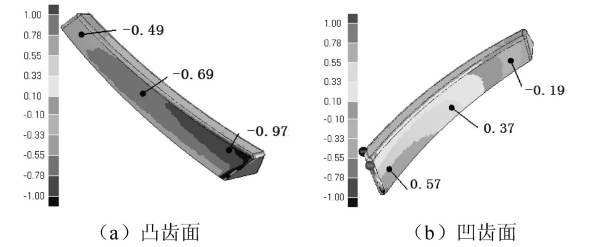


图8 齿面偏差3D比对结果(单位:mm)
Fig.8 3D comparison results of gear tooth surface displacement

为更清楚比较齿面变形情况,沿齿长方向做一截面(如图7),数模比对计算结果如图9。图中虚线为测量齿面的截线,实线为设计齿面的截线,可以看出,在凸齿面一侧出现了负偏移,会使得后续精加工余量变小。凹齿面一侧主要出现了正偏移,使得后续精加工余量变大。综合以上分

析,为了保证精加工余量和加工效率,需要适当增加凸齿面的精加工余量,减少凹齿面的精加工余量。

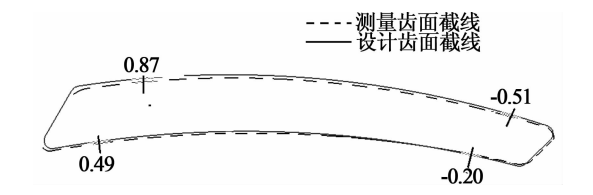


图9 齿面偏差2D比对结果(单位:mm)
Fig.9 2D comparison results of gear tooth surface displacement

3 结论

1)大型螺旋锥齿轮热处理变形的数值模拟结果和测量结果较一致,表明通过数值分析可以有效预测轮齿热处理后的变形情况,为后续制定精加工工艺提供参考。

2)轮齿的热处理变形具有不均匀性,从小端到大端,从齿根到齿顶的变形量都不一样。其中大端的变形量大于小端的变形量。

3)凸齿面和凹齿面表现出不同的变形趋势,凸齿面主要产生负偏移,凹齿面主要产生正偏移。为了保证精加工余量和加工效率,需要适当增加凸齿面的精加工余量,减少凹齿面的精加工余量。

参考文献:

[1] 李兆文,王勇,陈正洪.螺旋锥齿轮技术的研究现状[J].工具技术,2007,41(10):3-6.
[2] 张瑞亮,王铁,李纯明.双圆弧弧齿锥齿轮技术的研究现状[J].机械传动,2009,33(1):97-100.
[3] 黄宝宏,刘志锋.弧齿锥齿轮热处理过程变形的控制[J].机械工人,2008(1):72-73.
[4] 吴奇,潘晓东.高淬透性材料齿轮热处理变形的控制[J].机械传动,2014,38(10):78-80.
[5] 杨文明.热处理中影响齿轮变形的因素研究[J].装备制造技术,2014(4):1-3.
[6] 王伟佳.多种常用钢在不同淬火介质中换热系数的测算[D].大连:大连理工大学,2007.

(责任编辑:陈雯)