

基于热流固耦合仿真的大型重载齿轮淬火变形的研究

裴 帮¹ 张海博^{1,2} 陈生超¹ 张建伟³ 余飞鹏² 位超长¹ 师陆冰¹

[1. 郑机所(郑州)传动科技有限公司, 郑州 450001]

(2. 中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司, 郑州 450001)

(3. 郑州大学 力学与安全工程学院, 郑州 450001)

摘要:【目的】针对大型重载齿轮淬火过程中冷却不均、畸变严重及易产生热应力裂纹等问题,探究搅拌转速与工装位置对淬火效果的影响规律,以提升齿轮热处理质量。【方法】首先,采用42CrMo钢大型齿轮为对象,构建了热流固耦合仿真模型;然后,利用动网格预计算了等效入口速度,系统分析了400、500、580 r/min三种螺旋桨转速以及6件串装工装下不同位置齿轮的介质流场、温度场及变形量分布。【结果】结果表明,提高搅拌转速可显著增强对流换热,使轮齿流速提升至0.605 m/s,最大变形量由0.54 mm降至0.42 mm(降低22.2%);工装底部与顶部齿轮因流场紊流度高,其冷却均匀性与变形控制优于中间位置;建议类似工况下螺旋桨转速控制在500~550 r/min,并优化工装间距以消除端面流动死区。

关键词: 大型重载齿轮; 淬火过程; 热流固耦合; 变形分析; 工艺优化

中图分类号: TG151 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.05.012

0 引言

大型重载齿轮是重工业领域的核心基础零部件,属于齿轮中的高端产品,广泛应用于风电、航天、轨道交通、矿山机械和起重运输等重载、高负荷、严苛工况领域,承担着传递大转矩、实现减速或增速的关键功能,其齿面硬度、耐磨性、抗疲劳性以及加工精度将会直接影响整套设备的运行效率和安全稳定性。对大型重载齿轮进行淬火热处理,促使其内部发生组织转变,是提升齿轮力学性能的关键工艺^[1]。在淬火过程中,由于大型重载齿轮尺寸和厚度较大,淬火槽内介质流场分布的不均匀性使齿轮表面各处以及内部不同层深的冷却速度出现严重差异,导致齿轮在冷却过程中温度分布不均匀以及组织转变不均匀,造成齿轮畸变和残余应力过大等问题,大大影响了齿轮的可靠性和使用寿命^[2-3]。因此,开展大型重载齿轮淬火过程流场和温度场耦合分析,对优化淬火槽结构以及研究齿轮淬火后的组织、硬度、应力分布和变形量控制等具有重要意义。

在淬火过程中,为了达到工件临界冷却速度以及使工件冷却均匀,淬火槽一般均设有搅拌器、导流筒和均流板等结构,使淬火介质尽可能均匀循环流

动。淬火油槽通常装有百吨的淬火介质,且介质与工装之间的影响以及齿轮与齿轮之间的工装距离过小均会使淬火介质产生涡流和流动死区,造成齿轮冷却不均匀。此外,齿轮在淬火过程中,影响监测点的流速和温度的不确定因素多且金属工件温度高,很难对其进行实时监测。通过有限元仿真软件对齿轮淬火过程进行仿真分析,不但可以监测整个淬火过程中的淬火介质流场和工件温度场的分布情况,还可以指导淬火槽结构和热处理工艺的优化。俞福超等^[4]通过对20CrMnTi钢螺旋锥齿轮硬齿面热处理过程进行数值模拟,研究了螺旋锥齿轮硬齿面热处理过程流场和温度场的变化规律,为了使螺旋锥齿轮淬火冷却过程温度均匀,对淬火槽结构进行了优化设计。陶凤云等^[5]利用Derorm热处理模块模拟了17Cr2Ni2Mo齿轮轴淬火过程中的温度场、应力场及变形量随时间的变化规律,通过研究不同淬火保温时间对齿轮轴应力场及变形量的影响,为17Cr2Ni2Mo材料淬火工艺参数的确定提供了一定的理论依据。WANG等^[6]以18Cr2Ni2MoVNbA钢制的齿轮为研究对象,测定了其在不同流量条件下的冷却曲线,通过计算相应的传热系数,采用有限元模拟方法研究了在压力淬火冷却过程中,不同流量组合对齿轮温度场分布规律的影响,

收稿日期: 2025-11-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3406202)

作者简介: 裴帮,男,1978年生,河南新安人,硕士,研究员; 主要研究方向为齿轮热处理; E-mail: peibang@163.com。

余飞鹏(通信作者),男,1983年生,河南邓州人,高级工程师; 主要研究方向为机械传动与机械强度、科技期刊出版; E-mail: 280201617@qq.com。

引用格式: 裴帮,张海博,陈生超,等. 基于热流固耦合仿真的大型重载齿轮淬火变形的研究[J]. 机械强度,2026,48(5):97-104.

PEI Bang, ZHANG Haibo, CHEN Shengchao, et al. Study on quenching deformation of large heavy-duty gears based on thermal-fluid-solid coupling simulation[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(5): 97-104.



免费获取

并将模拟结果与试验数据进行对比,验证了压力淬火温度场模型的可靠性,为压力淬火工艺的优化提供了理论指导。

大型重载齿轮淬火过程中,介质流速是确保工件淬火性能的重要影响因素。适当的流动速度不仅能确保介质达到工件淬火所需的冷却能力,还能保证工件表面各处介质流速的均匀,避免由于冷却不均导致的工件畸变和开裂^[7]。淬火介质的流速由淬火槽螺旋桨的转速控制,生产车间淬火过程常用的螺旋桨转速为400、500、580 r/min。为了进一步研究3种转速下以及同一批次不同淬火位置齿轮冷却过程中温度场的变化规律,通过有限元分析软件,基于热流固耦合数值仿真模拟,得到不同转速下和不同工装位置介质流场与齿轮的温度场及变形量分布,为生产车间大型重载齿轮淬火热处理工艺优化,提供理论指导和建议。

1 大型重载齿轮淬火前处理

1.1 几何模型

以某型大型重载齿轮为研究对象进行数值模拟,该齿轮的模数、齿数、压力角等关键结构参数如表1所示。

表1 某大型重载齿轮基本参数
Tab. 1 Basic parameters of large heavy-duty gear

参数	值
法向模数 m/mm	14
齿数 z	86
法向压力角 $\alpha^\circ/(^\circ)$	20
螺旋角 $\beta/(^\circ)$	8
旋向	左
齿顶高系数 h_{an}^*	10
变位系数 X^n	0.483 3

结合实际生产方式的布局与产能需求,淬火工序采用6件串装工艺。将齿轮依次固定在专用工装上,具体装配方式如图1所示。

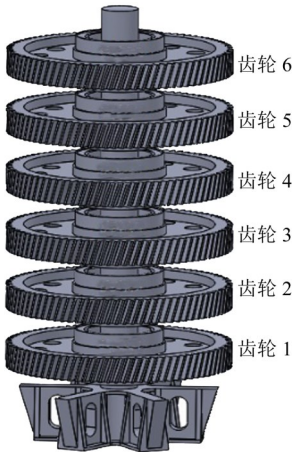


图1 淬火齿轮与工装

Fig. 1 Quenched gear and tooling

淬火过程中使用的淬火槽,直径为5 400 mm,深度为5 600 mm。淬火槽与大型重载齿轮的整体几何模型如图2所示。考虑到原始模型尺寸较大,全尺寸建模将导致计算量激增、资源消耗过大,在保证仿真精度的前提下,为提升计算效率、缩短求解周期,采用对称边界条件对模型简化,选取1/8模型作为最终仿真计算的模型。然而,在实际淬火过程中不可避免地存在诸多非对称因素,如齿轮工装装配偏差、淬火介质的流动状态,但其对大型重载齿轮淬火仿真的核心精度影响较小,且能通过提升局部网格质量弥补简化带来的误差。

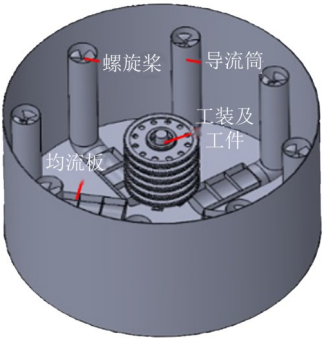


图2 大型重载齿轮淬火几何模型

Fig. 2 Geometric model for quenching of large heavy-duty gears

1.2 基本物理参数

本文研究的大型重载齿轮材料为42CrMo,其基本物理参数如表2所示。结合齿轮的服役工况与性能要求,确定其淬火工艺关键参数淬火温度为830℃。淬火过程中所使用的淬火油,其黏性、导热系数等物理性质参数会直接影响齿轮的温度场分布与淬火变形规律,相关参数如表3所示。

表2 42CrMo基本物理参数
Tab. 2 Basic physical parameters of 42CrMo

参数	值
密度/(kg/m^3)	7 850
比热容/[$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	465
导热系数/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	42.6
热膨胀系数/ K^{-1}	1.2×10^{-5}
弹性模量/Pa	2×10^{11}
泊松比	0.3

表3 淬火油物理性质参数(50℃)
Tab. 3 Physical property parameters of quenching oil (50℃)

参数	值
密度/(kg/m^3)	855
比热容/[$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	2 100
导热系数/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	0.25
黏性/[$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$]	0.012 825

1.3 入口边界条件

在带有螺旋桨的流场仿真中,用户自定义函数(User-Defined Function, UDF)与动网格耦合的计算方法是还原螺旋桨真实旋转运动及流场特性的常用方案。该计算方法能精准复现物理运动场景,保证流场计算的真实性。但该方法存在明显局限性,不仅对硬件算力和网格划分质量要求严苛,还会因计算量巨大导致求解效率大幅降低。在综合考虑仿真精度、计算效率及硬件资源约束下,首先通过 UDF 与动网格方法进行预计算,将不同工况下的螺旋桨转速等效转化为对应的入口速度参数,具体数值如表 4 所示;然后再将其作为入口边界条件,代入后续热流固耦合仿真计算过程。大型重载齿轮淬火过程仿真模型如图 3 所示。

表 4 螺旋桨不同转速对应的入口速度

Tab. 4 Inlet velocities corresponding to different rotational speeds of the propeller

转速/(r/min)	400	500	580
入口速度/(m/s)	0.9	1.2	1.5

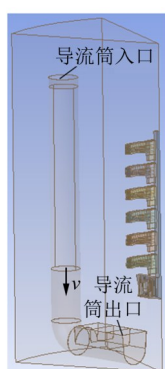


图 3 大型重载齿轮淬火过程仿真模型

Fig. 3 Simulation model of quenching process for large heavy-duty gears

2 流场模拟结果分析

淬火介质流场是调控齿轮淬火温度场分布的核心因素,其流速均匀性直接决定齿轮冷却过程中温度场分布的均匀性。大型重载齿轮结构复杂,淬火过程中易形成流场漩涡与流动死区,通过流场模拟的流速分析可精准定位这些区域,进而揭示温度场局部差异的内在成因。流场与温度场的耦合分析不仅能保障温度场研究的准确性,还能为齿轮淬火工艺优化及性能提升提供关键支撑。为此,选取齿轮 1、3、5 的轮齿及端面共 6 个特征测量点,通过对比各测点在淬火冷却过程中的流速大小与动态变化规律,系统探究螺旋桨搅拌转速以及不同工装位置对齿轮淬火流场分布的影响机制,如图 4 所示。

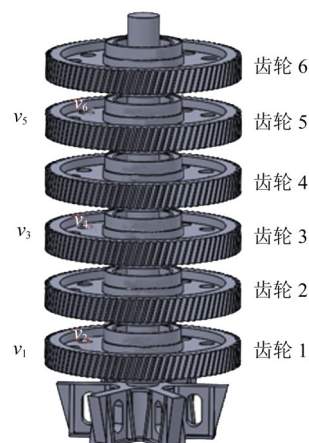


图 4 6 个特征测量点的标注

Fig. 4 Annotation of six feature measurement points

淬火油经过导流筒内搅拌装置和均流结构作用,实现从下向上的循环流动。图 5 为 3 种搅拌转速下齿轮冷却至 200 s 时淬火槽内介质的流速云图。结果表明,齿轮串周围流场整体分布均匀,但齿轮端面区域存在显著低速区。这是因为轮齿部位处于边缘位置,对淬火介质流速影响较小,而端面之间的淬火介质受工装距离的影响,上、下两个齿轮之间极易形成流动死区。为深入探究不同转速下各测点的流速分布规律,统计了上述 6 个测量点在 400、500、580 r/min 三种转速下,冷却至 1 000 s 内的流速达到相对稳定状态时的平均值,如图 6 所示。对比分析表明,流场达到稳定状态后,3 种转速下均呈现一致规律:距导流筒出口最近的测点 v_1 流速最高,最大值达 0.605 m/s;随着与导流筒出口距离的增加,测量点 v_3 、 v_5 的流速逐步递减。端面部位最高流速仅为 0.051 m/s,且工装中间位置端面的测点 v_4 ,其流速在 3 种转速下均低于工装底部测点 v_2 与顶部测点 v_6 。

针对不同工装位置的轮齿部位,由图 6 中测点 v_1 、 v_3 、 v_5 的流速变化规律可知,搅拌转速提升可显著提高轮齿区域流速:在介质流场相对稳定之后,400、500、580 r/min 转速下,工装底部测点 v_1 流速分别稳定在 0.376、0.495、0.605 m/s,中间测点 v_3 分别稳定在 0.318、0.435、0.553 m/s,顶部测点 v_5 分别稳定在 0.193、0.273、0.357 m/s。对于工件间的端面流速,搅拌转速提升仅能略微提高工装底部 v_2 与顶部 v_6 的流速,二者在不同转速下对应流速分别为 0.021、0.032、0.051 m/s 及 0.020、0.028、0.041 m/s,而工装中间端面测点 v_4 的流速在 3 种转速下分别为 0.018、0.022、0.013 m/s,表明提升搅拌转速对改善该区域流速效果甚微。综上所述,为避免大型重载齿轮淬火时工件间形成流动死区,需优化工装间距以增大介质流动空间,搅拌转速可根据实际需求适当提高。

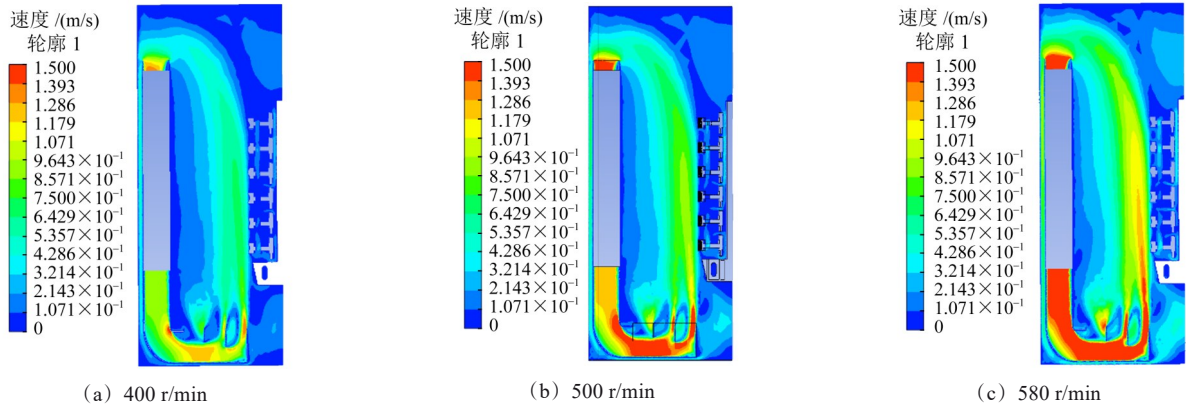


图5 3种转速工况下介质流速云图

Fig. 5 Cloud charts of medium flow velocity under three different rotational speed conditions

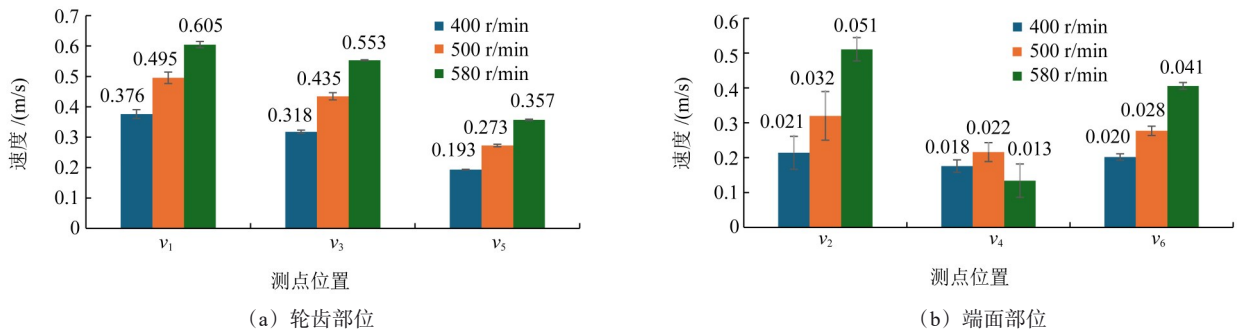


图6 3种转速下冷却至1 000 s内流速达到稳定时的平均值

Fig. 6 Average stable flow velocity within 1 000 s of cooling at three rotational speeds

3 温度场模拟结果分析

结合之前流场模拟结论,不同搅拌转速、工装位置会导致淬火介质流速分布差异,轮齿区域流速显著高于端面,工装中间位置易形成流动死区,本节基于流热耦合仿真结果,系统对比分析搅拌转速与工装位置对大型重载齿轮温度场分布及冷却特性的影响。

3.1 搅拌转速对温度场的影响

螺旋桨转速是调控淬火介质流动状态的核心参数,其通过改变介质流速与流动状态影响对流换热强度,进而主导齿轮温度场变化^[8]。前文流场模拟已说明搅拌转速提升可以显著提高轮齿区域介质流速,400~580 r/min对应轮齿部位流速为0.20~0.60 m/s,但端面部位流速提升有限,最高仅0.05 m/s。基于此,选取生产常用的400、500、580 r/min三种转速,以工装中间位置的齿轮3为研究对象,通过分析其淬火过程中不同时间节点的温度分布特征,揭示搅拌转速对温度场的调控规律,仿真结果如图7所示。

淬火初期(0~30 s),转速对冷却速度的影响最为显著:转速越高,齿轮整体降温越快。冷却至20 s时,580 r/min工况下轮齿最低温度降至210℃,较500 r/min工况的233℃降低9.9%,较400 r/min工况的304℃降低30.9%;而3种工况下齿轮芯部温度刚开始有所

降低,均为827℃。这一现象的本质是,更高的转速使螺旋桨对淬火介质的搅拌动能增强,介质流速从400 r/min对应的0.9 m/s提升至580 r/min的1.5 m/s,流动状态从层流主导转变为强紊流状态,介质与齿轮表面的边界层厚度显著减薄,对流换热系数大幅提高,有效强化了热量传递效率,促使齿轮表面及内部热量快速导出。

进入淬火中期(30~600 s),不同转速下的冷却速度差异逐渐缩小,但高转速工况仍保持更快的降温速率。冷却至600 s时,580 r/min工况下齿轮芯部温度降至254℃,500 r/min和400 r/min工况分别为263℃和295℃,三者温差也在逐渐减小。这是因为随着齿轮温度不断降低,工件表面与介质的热驱动力 $\Delta T(\Delta T = T_{\text{工件表面温度}} - T_{\text{介质温度}})$ 逐渐减小,对流换热强度受温差的影响逐渐凸显,转速对换热效率的增益效果有所弱化,但高转速下介质的强流动状态仍能持续打破齿轮表面可能形成的局部蒸汽膜,避免换热效率大幅下降。在淬火后期(600 s后),各转速工况下齿轮轮齿部位温度趋近于淬火介质流场温度,各部位冷却速度开始趋于平缓,3种工况下冷却到800 s时,齿轮芯部温度分别为203、179、170℃,此时转速对温度场的影响进一步减小。

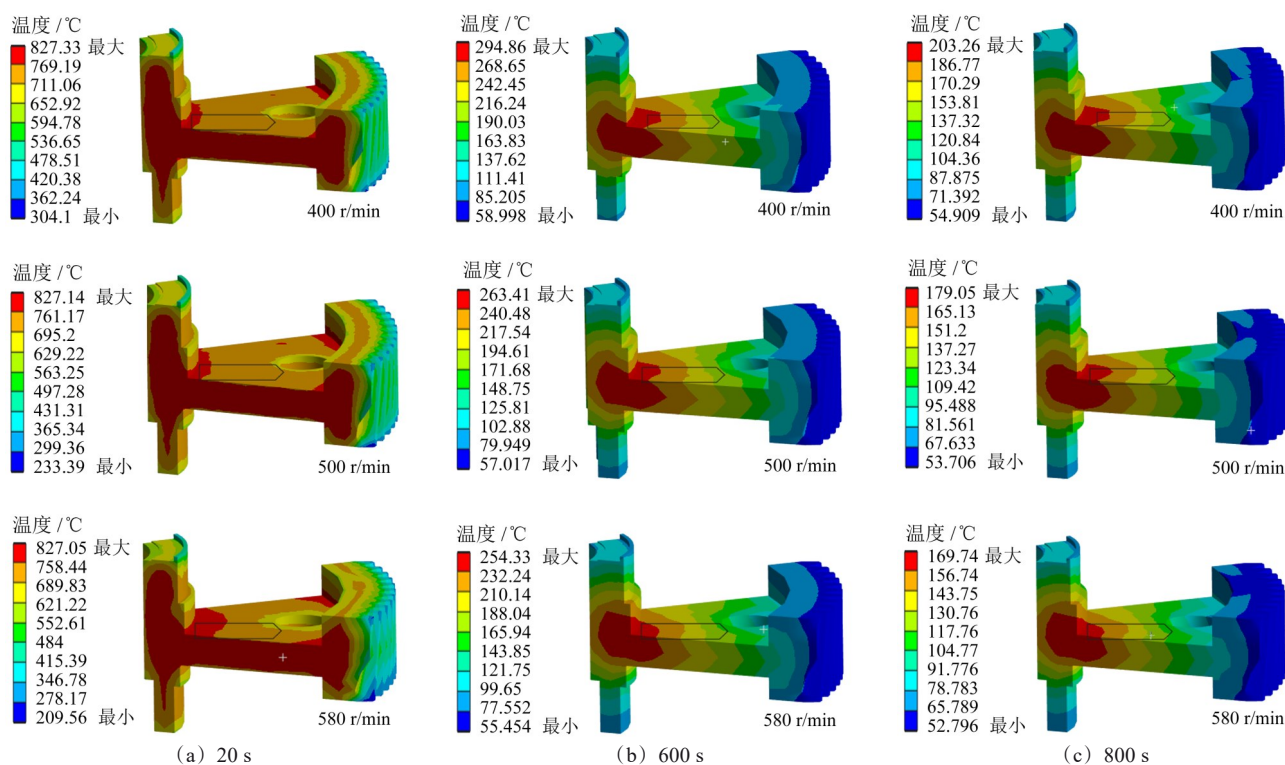


图 7 不同转速齿轮 3 淬火时温度分布随冷却时间的变化

Fig. 7 Transient temperature distribution of Gear 3 during quenching at different rotational speeds

3.2 工装位置对温度场的影响

在实际生产中,为了保证生产效率,通常会将尽可能多的工件同时淬火。在大型重载齿轮淬火过程中,受淬火槽和工件尺寸的影响,淬火介质紊流程度大大增加,不同位置的淬火介质流速差异大,导致同批次淬火齿轮不同工装位置的冷却速度差异较大。不同的冷却速度对工件的淬火工艺性能会产生较大的影响,冷却速度过快,会导致金属材料内部积累显著的热应力与组织应力,进而诱发材料变形乃至开裂;冷却速度过慢,则会导致金属材料在冷却过程中发生奥氏体向珠光体的转变,产生较大的体积变化,从而引发变形问题^[9-10]。为了研究同批次不同工装位置齿轮的冷却速度,基于前文流速分析以及流热耦合仿真结果,选取了淬火过程中齿轮 1、3、5 在螺旋桨转速为 500 r/min 工况下不同时间节点的温度场分布云图并进行对比分析。

图 8 所示为齿轮 1、3、5 冷却 5、10、800 s 时的温度场分布。在冷却到第 5 s 时,齿轮 1、3、5 的轮齿部位温度已由 830 °C 分别降到了 423、474、317 °C,齿轮芯部及端面大部分区域仍都保持在 830 °C。对于轮齿部位,位于工装底部的齿轮 1 和顶部的齿轮 5 冷却速度大于中间的齿轮 3。其中,齿轮 1 冷却速度快是因为其距离导流筒出口近,流速大,齿轮与淬火介质之间的对流换热系数更高;齿轮 5 冷却速度快则是因为顶部的淬火

介质受工装齿轮的影响小,且距离导流筒入口和液面近,介质紊流程度大,能促进齿轮表面蒸汽膜的破裂,使齿轮与介质能进行充分的换热。对于端面部位,其温度仍然保持在 830 °C,这是因为齿轮工装距离过近,上、下两个齿轮之间形成了流动死区,较慢的流速无法击破齿轮表面的蒸汽膜,使得齿轮与淬火介质之间的对流换热更弱,导致齿轮芯部及端面温度下降较慢。

在冷却到第 10 s 时,由于淬火介质被进一步搅动,齿轮芯部及端面温度开始降低,但是冷却速度缓慢,而齿轮 1、3、5 的轮齿部位温度已分别降到了 284、405、300 °C。此时,齿轮内、外出现了较大温差,其中,处于工装底部和顶部的齿轮 1、5 的内、外温差较大,最大温差分别为 546、529 °C。处于工装中间位置的齿轮 3 由于冷却速度较低,内外最大温差为 424 °C。较大的温差会导致齿轮内部形成较大的热应力,而且还会造成齿轮各部位因组织转变的不同时期性和不一致性而形成组织应力。当热应力和组织应力超过齿轮材料的屈服极限时,就会造成齿轮产生不同程度的塑性变形;而当热应力和组织应力超过齿轮材料的强度极限时,则会使齿轮产生各种裂纹^[11-12]。当冷却到第 800 s 时,齿轮 1、3、5 的轮齿部位的温度已与淬火介质流场温度相差不多,齿轮芯部及端面最高温度分别为 135、179、164 °C。齿轮内、外温差逐渐减小,温度分布变得更加均匀。

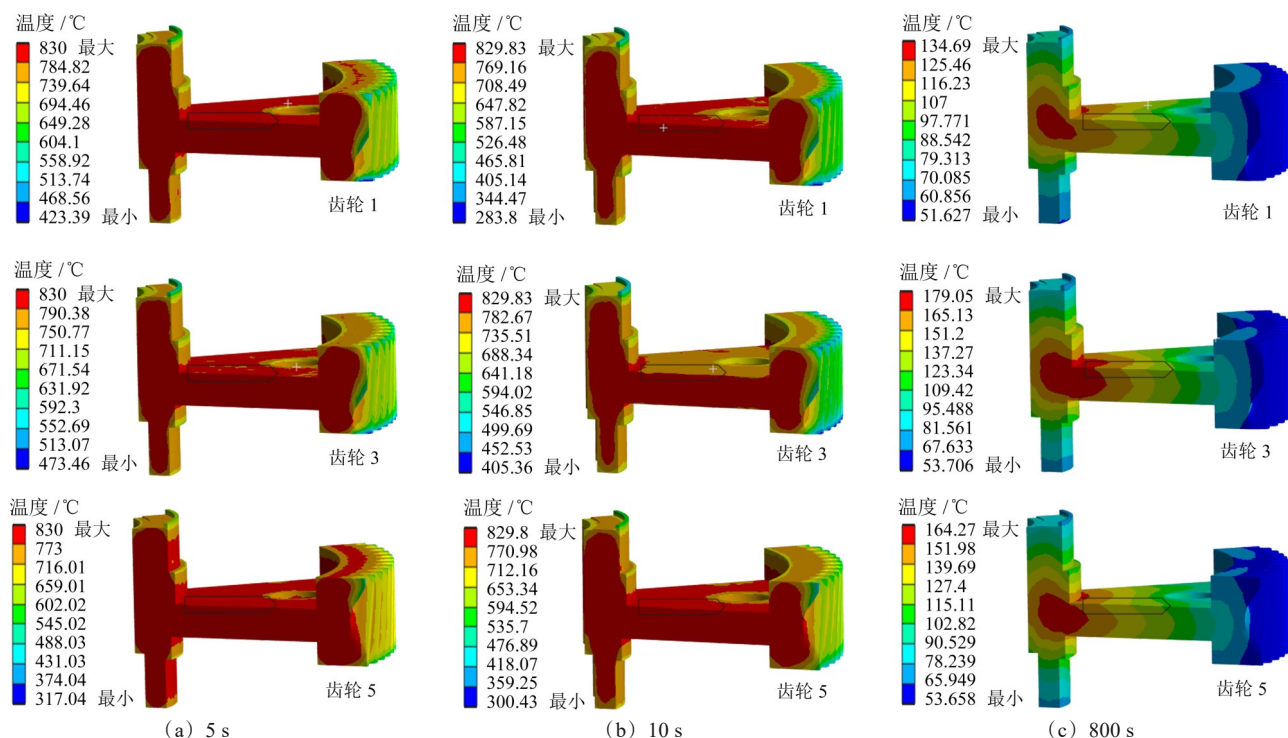


图8 齿轮1、3、5淬火过程温度场分布随冷却时间变化

Fig. 8 Temperature distribution of Gears 1, 3, 5 during quenching as a function of cooling time

4 变量模拟结果分析

淬火变形是大型重载齿轮生产中的关键质量问题,其本质是冷却过程中温度场不均匀引发的热应力与组织应力共同作用的结果^[13-14]。本文基于流热耦合仿真的温度场分布规律,进一步探究螺旋桨搅拌转速和工装位置对齿轮淬火变形量的影响机制,为工艺优化提供更全面的理论支撑。

螺旋桨搅拌转速通过调控淬火介质流场的流速大小与均匀性,间接改变齿轮冷却速率及温度场分布特征,进而主导淬火变形量的大小和分布规律。选取工装中间位置的齿轮3,聚焦冷却至1 000 s时的淬火变形特性,对比400、500、580 r/min这3种转速下变形量差异,结果如图9所示。由图9可知,随着搅拌转速的提升,齿轮3的最大淬火变形量呈逐步递减趋势,400 r/min工况下最大变形量为0.54 mm,500 r/min工况下降至0.46 mm,580 r/min工况下进一步减小至0.42 mm,高转速较最低转速变形量降低22.2%。淬火变形的核心

诱因是冷却过程中产生的热应力与组织应力,二者的分布状态与叠加效应直接决定变形程度。

基于流热耦合分析结果,统计了齿轮3在3种转速下轮齿与芯部的最大温差随冷却时间的变化规律,如图10所示。在400 r/min工况下,由于流场均匀性差,在芯部温度开始快速降低之后,其轮齿与芯部的最大温差大于500、580 r/min工况,导致热应力集中现象更为显著;同时,温度分布的不均匀性使得齿根、端面等流动死区附近部位冷却速度滞后,组织转变存在明显时序差,引发组织应力与热应力叠加,最终导致低转速工况下齿轮变形量最大。而随着转速提升,介质紊流程度增强,流场均匀性改善,轮齿与芯部的最大温差降低,热应力分布更平缓;且流动死区范围缩小,齿轮各部位组织转变同步性提升,组织应力与热应力的叠加效应弱化,变形量随之逐步减小。

工装位置对齿轮淬火变形量的影响同样具有规律性,其本质是通过改变齿轮周围淬火介质的流场分布特征,导致同批次齿轮的换热条件产生差异,进而影响

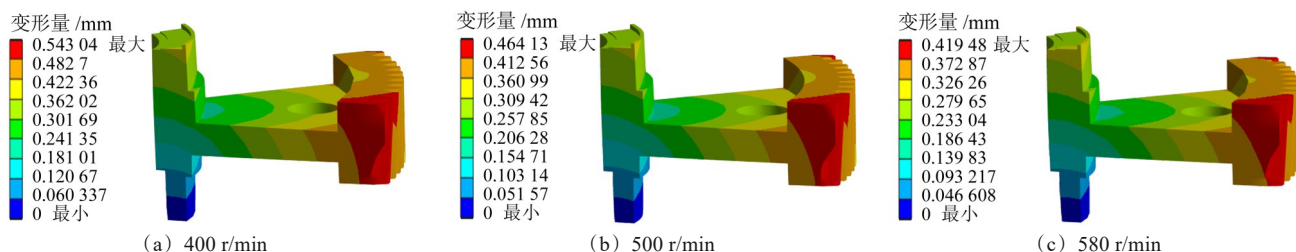


图9 3种转速齿轮3的变形量分布

Fig. 9 Distribution of deformation amount of Gear 3 at three rotational speeds

温度场均匀性与应力演化规律,最终造成淬火变形量的空间分化。图11所示的400、500、580 r/min这3种工况变形数据均印证了底部位置齿轮变形量最小,中间位置最大,顶部位置介于二者之间。底部位置的齿轮1在400 r/min工况的变形量为0.35 mm,580 r/min时降至0.31 mm,这得益于其距导流筒出口最近,淬火介质流速最高,对流换热效率高且热应力释放相对及时,同时受上、下齿轮的遮挡影响最小,流场干扰弱,避免了局部热堆积,最终实现最小变形。中间位置的齿轮3变形量始终最大,400 r/min时达0.54 mm,即便在高转速下仍有0.42 mm,根源在于上、下齿轮形成的流动死区叠加,导致中间齿轮端面之间介质更新受阻,端面流速仅为0.022 m/s,齿轮各部位冷却速率差异悬殊,轮齿与芯部形成较大温差,热应力与组织应力叠加效应突出,最终引发更大变形。顶部位置的齿轮5变形量则介于底部和中间之间,其变形特征主要受液面扰动与导流筒回流双重影响,虽然介质紊流程度较高,但换热条件稳定性弱于底部,且齿根部位易因温度波动出现组织转变滞后,导致变形量略高于齿轮1,但低于齿轮3。

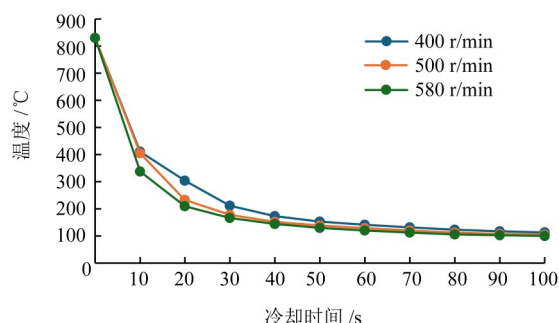


图10 3种转速齿轮3轮齿与芯部最大温差随时间的变化

Fig. 10 Maximum temperature difference between gear teeth and core of Gear 3 versus time under three rotational speeds

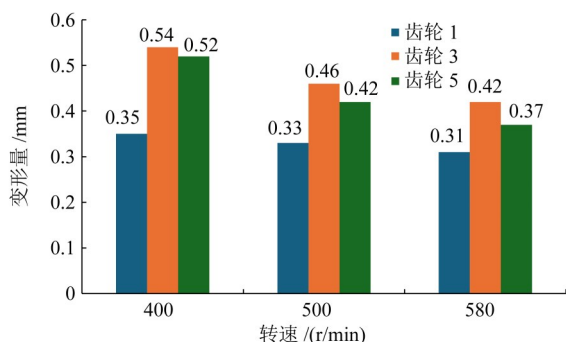


图11 不同工装位置齿轮在3种转速下的变形量

Fig. 11 Deformation amount of gears at different tooling positions under three rotational speeds

5 结论

为解决大型重载齿轮淬火过程中冷却不均、变形量大等关键问题,基于有限元仿真以及金属学与热处理基本理论,采用有限元分析软件,构建适配工业生产场景的热流固耦合仿真模型,系统揭示了淬火介质流场与齿

轮温度场、变形量的动态耦合机制,重点探究了淬火槽搅拌转速与工装位置对介质流速分布、齿轮冷却特性及淬火变形情况的量化影响规律,为现场类似工况齿轮淬火过程螺旋桨转速的调节、工装距离和工装顺序的调整提供直接的技术依据。得出以下主要结论:

1)螺旋桨搅拌转速的提升可以显著提高轮齿区域流速,改善齿轮淬火时的冷却速度和温度分布的均匀性,降低齿轮淬火后的变形量。但对齿轮端面区域流速改善效果有限,为避免淬火时齿轮端面之间形成流动死区,应优化齿轮之间的工装距离,如增大齿轮工装的间距、在工装的齿轮间隔处增设环形导流板等。此外,应注意转速并不是越高越优,淬火初期高转速会导致轮齿部位温度快速下降而芯部降温缓慢,二者温差过大易产生显著热应力,可能诱发齿轮裂纹,因此类似工况下螺旋桨转速应控制在500~550 r/min。

2)工装位置对齿轮的冷却特性与变形量也会造成显著影响。工装底部和顶部周围介质流速大于中间部位,使得底部、顶部齿轮的冷却速度更快、温度分布更均匀,最终变形量小于中间齿轮。因此,淬火前可进行工装位置优化分配,对渗碳后的齿轮用卡尺进行径向的尺寸测量,可将变形量大的工件放置在工装底部或顶部,变形量小的工件置于工装中间,以实现同批次齿轮整体变形量的均衡控制。

热流固耦合仿真为大型重载齿轮淬火工艺优化提供了可靠的理论支撑。通过有限元软件实现的热流固耦合分析,能够精准模拟淬火过程中介质流场、齿轮温度场的动态变化规律,以及齿轮淬火后的变形情况,揭示转速、工装位置对冷却效果和淬火变形量的影响机制。所提方法弥补了实际生产中高温环境下难以实时监测的技术缺陷,为淬火槽结构改进、工艺参数确定及工装布局优化提供了明确的理论依据,对提升大型重载齿轮淬火质量与使用可靠性具有一定的实践意义。

参考文献(References)

- [1] KIM N K, BAE K Y. Analysis of deformation in the carburizing-quenching heat treatment of helical gears made of SCM415H steel [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(1): 73-79.
- [2] 屈小波, 安金敏, 王林, 等. 汽车用齿轮钢16MnCrS5热处理变形机理[J]. 金属学报, 2025, 61(4): 597-607.
- QU Xiaobo, AN Jinmin, WANG Lin, et al. Quenching deformation of the 16MnCrS5 gear steel for automobile [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(4): 597-607. (In Chinese)
- [3] 刘赣华, 钱锦年, 邹洋, 等. 淬火冷却介质流速对弧齿锥齿轮渗碳淬火热处理的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(2): 152-160.
- LIU Ganhua, QIAN Jinnian, ZOU Yang, et al. Influence of quenchant flow velocity on carburizing and quenching treatment of

- spiral bevel gear [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(2): 152-160. (In Chinese)
- [4] 俞福超, 刘赣华. 20CrMnTi 钢螺旋锥齿轮硬齿面热处理过程中的温度场分析[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(4): 191-201.
- YU Fuchao, LIU Ganhua. Analysis of temperature field of hard-tooth surface of 20CrMnTi steel spiral bevel gear during heat treatment [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(4): 191-201. (In Chinese)
- [5] 陶风云, 刘忠明, 杨磊, 等. 基于变形和应力场控制的大型齿轮轴淬火工艺研究[J]. 大型铸锻件, 2025(3): 28-32.
- TAO Fengyun, LIU Zhongming, YANG Lei, et al. Research on quenching process of large gear shaft based on deformation and stress field control [J]. Heavy Casting and Forging, 2025(3): 28-32. (In Chinese)
- [6] WANG Y, ZHAO Z H, LIU J G, et al. A temperature field simulation of the pressure quenching process of 18Cr₂Ni₂MoVNbA gears [J]. Metals, 2025, 15(4): 443.
- [7] BORISOV I A. Selection of optimum quenching parameters for large rotors of steel 25KhN3MFA [J]. Metal Science and Heat Treatment, 1980, 22(12): 857-861.
- [8] ZHOU Z F, GU J F, WANG X Y, et al. Sensitivity analysis of thermal properties on numerical simulation results of quenching process [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, 16(6): 759-762.
- [9] 高耀, 周坚. 浅析金属材料热处理变形及开裂问题[J]. 冶金与材料, 2025, 17(5): 64-66.
- GAO Yao, ZHOU Jian. Analysis on deformation and cracking of metal materials during heat treatment [J]. Metallurgical and Materials, 2025, 17(5): 64-66. (In Chinese)
- [10] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 282-292.
- CUI Zhongqi, QIN Yaochun. Metallurgy and heat treatment [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2007: 282-292. (In Chinese)
- [11] 夏期成. 谈谈淬火变形与裂纹 第一讲 热处理变形和裂纹概述 [J]. 机械工人, 1980(9): 49-54.
- XIA Qicheng. Talking about quenching deformation and cracks: the first lecture: overview of heat treatment deformation and cracks [J]. Machinist Metal Forming, 1980(9): 49-54. (In Chinese)
- [12] LI Y N, ZHANG Y A, LI X W, et al. Quenching residual stress distributions in aluminum alloy plates with different dimensions [J]. Rare Metals, 2019, 38(11): 1051-1061.
- [13] 林锐怡, 殷超超, 师陆冰, 等. 齿轮制造中的残余应力及其对疲劳性能的影响 [J]. 机械强度, 2024, 46(5): 1216-1227.
- LIN Ruiyi, YIN Chaochao, SHI Lubing, et al. Residual stress in gear manufacturing and its influence on fatigue properties [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(5): 1216-1227. (In Chinese)
- [14] 丰瑞博, 徐红玉, 张丰收, 等. 18Cr₂Ni₄WA 钢弧齿锥齿轮淬火工艺参数优化研究 [J]. 机械传动, 2025, 49(6): 124-130.
- FENG Ruibo, XU Hongyu, ZHANG Fengshou, et al. Optimization of quenching process parameters for 18Cr₂Ni₄WA steel spiral bevel gears [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(6): 124-130. (In Chinese)

Study on quenching deformation of large heavy-duty gears based on thermal-fluid-solid coupling simulation

PEI Bang¹ ZHANG Haibo^{1,2} CHEN Shengchao¹ ZHANG Jianwei³ YU Feipeng² WEI Chaozhang¹ SHI Lubing¹
(1. ZRIME Gearing Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

(2. China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

(3. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the influence of stirring rotational speed and fixture position on quenching outcomes in the context of large heavy-duty gear quenching processes, which are characterized by uneven cooling, severe distortion, and susceptibility to thermal stress cracking, with the aim of improving gear heat treatment quality. [Methods] Firstly, a thermo-fluid-solid coupling simulation model was established for 42CrMo large gears. Then, the medium flow field, temperature field, and deformation distribution under three propeller speeds (400, 500, and 580 r/min) and six-piece series tooling positions were analyzed. The inlet velocities were equivalent to 0.9, 1.2, and 1.5 m/s based on user-defined function (UDF) and dynamic mesh pre-calculations. [Results] The results indicate that increasing the stirring speed from 400 to 580 r/min significantly improves cooling uniformity, with the maximum flow velocity at the gear teeth reaching 0.605 m/s and the maximum deformation decreasing from 0.54 mm to 0.42 mm (a reduction of 22.2%). However, excessively high speeds may increase the temperature difference between the core and the surface (up to 516 °C), potentially inducing thermal stress cracks. Gears at the top and bottom of the tooling exhibit better cooling performance than those in the middle due to higher turbulence and proximity to the medium inlet. It is recommended that the optimal stirring speed be maintained between 500 and 550 r/min to balance deformation control and crack prevention.

Key words: Large heavy-duty gear; Quenching process; Thermal-fluid-solid coupling; Deformation analysis; Process optimization

Corresponding author: YU Feipeng, E-mail: 280201617@qq.com

Fund: National Key Research and Development Program (2023YFB3406202)

Received: 2025-11-18

(编辑: 李立)