

变速箱齿轮热处理变形控制方法分析

王 鑫

中车北京南口机械有限公司 北京 102202

摘 要：变速箱齿轮热处理变形是影响传动精度与使用寿命的核心问题，直接制约齿轮装配质量与整车传动稳定性。本文系统剖析齿轮热处理变形的机理与类型，从材料预处理、工艺参数、工装装夹、前后工序等维度，探究引发变形的关键影响因素。结合齿轮结构与工艺特性，从源头管控、工艺优化、工装适配、闭环质控多方面，提出精准的变形控制与工艺优化方案，可为变速箱齿轮热处理精度提升、降低变形缺陷率提供实用的工艺参考。

关键词：变速箱齿轮；热处理；变形控制方法

引言：变速箱齿轮作为汽车传动系统的核心零部件，其尺寸与形位精度直接决定车辆传动的平稳性、可靠性与噪音表现。热处理是强化齿轮力学性能的关键工序，但加热冷却过程中产生的热应力、组织应力易引发各类变形缺陷，是齿轮加工的主要误差来源。当前齿轮高精度制造对热处理变形控制要求持续提升，传统工艺管控方式难以适配高精度生产需求。基于此，本文深入分析齿轮热处理变形规律，针对性制定优化控制策略，助力提升齿轮热处理加工质量。

1 变速箱齿轮热处理变形机理及类型分析

1.1 齿轮热处理核心工艺原理

(1) 变速箱齿轮常用热处理工艺：渗碳淬火、调质、高频淬火的工艺流程与适用场景。渗碳淬火：930℃富碳介质中保温渗碳后直接淬火，适用于重载变速箱齿轮，显著提升齿面硬度与抗疲劳性。调质：淬火加高温回火，适用于中低负载齿轮或预备热处理，获得均匀回火索氏体，改善整体力学性能。高频淬火：感应加热齿面至临界温度以上后快速冷却，仅硬化表层，适用于齿面磨损为主的失效形式，变形小、效率高^[1]。(2) 热处理过程中齿轮金属组织转变规律，奥氏体化、马氏体相变的核心特性。加热至Ac3以上，珠光体转变为面心立方奥氏体，碳原子充分固溶。快速冷却至Ms点以下，奥氏体发生非扩散切变转变，生成体心正方马氏体，硬度与强度急剧上升，但体积膨胀显著，是组织应力的主要根源。(3) 热处理温度场、组织场、应力场的动态演变机制。加热与冷却中，齿轮截面温度分布不均，形成瞬时温度梯度，引发热应力场。温度跨越相变临界点时，组织相变伴随体积变化产生组织应力。三者时空上相互耦合、动态演变，共同决定最终变形行为与尺寸稳定性。

1.2 齿轮热处理变形核心机理

(1) 热应力变形：加热冷却不均导致的齿轮内外温差产生的热塑性变形。快速加热或冷却时，齿轮表层与心部形成显著温差，表层膨胀或收缩受心部制约，当热应力超过材料高温屈服强度时，即产生不可逆的塑性变形，表现为齿形畸变与尺寸波动。(2) 组织应力变形：金属相变过程中体积膨胀与收缩引发的结构性变形。齿轮各部位冷却速度不同，导致马氏体转变不同步，体积膨胀量差异显著，产生内应力并引起局部伸长或压缩变形，是齿向扭曲、端面翘曲的主要诱因。(3) 残余应力释放变形：前期机加工残余应力在热处理过程中释放引发的二次变形。锻造、切削、磨削等工序遗留的残余应力在加热时因原子活动能力增强而松弛释放，打破原有应力平衡，导致齿轮发生无规则尺寸变化与形状畸变。

1.3 变速箱齿轮常见热处理变形类型

(1) 几何尺寸变形：齿厚、齿顶圆、分度圆尺寸偏差及轴向、径向尺寸伸缩。淬火后马氏体相变引起体积膨胀，齿厚通常增厚，齿顶圆与分度圆直径呈规律性增大或缩小，轴向与径向尺寸伸缩直接影响后续装配精度。(2) 几何形状变形：齿轮椭圆度、端面翘曲、齿向扭曲、锥度偏差等畸变。因冷却不均或组织转变不一致，齿坯呈现非对称变形，端面翘曲影响啮合接触均匀性，齿向扭曲加剧传动噪声与振动。(3) 位置精度变形：齿圈径向跳动、端面圆跳动超差等位置偏差问题。热处理导致齿轮基准轴线偏移或齿圈相对位置变动，径向跳动与端面圆跳动超差会降低齿轮副啮合质量，严重时导致传动失效。

2 变速箱齿轮热处理变形关键影响因素分析

2.1 材料与毛坯预处理因素

(1) 钢材材质影响：化学成分、淬透性、纯净度对变形稳定性的影响。合金元素波动改变淬透性带宽，淬透性每增加2HRC变形离散度扩大约30%；非金属夹杂物

及偏析带在淬火时成为应力集中源,诱发微裂纹与异常畸变。(2)毛坯原始组织:晶粒均匀度、带状组织、疏松缺陷引发的变形差异。晶粒度相差3级以上导致相变不同步,产生齿向不均匀扭曲;带状组织引发各向异性,淬火后呈非对称椭圆变形;疏松、缩孔等缺陷在应力下扩展,引起局部塌陷。(3)预处理工艺:正火、调质预处理质量对后续热处理变形的抑制作用。等温正火可细化晶粒、消除网状碳化物,晶粒度稳定在7~8级,使奥氏体化进程同步;调质提供均匀回火索氏体,显著减小原始组织差异对相变体积变化的影响,降低变形分散度。

2.2 热处理工艺参数因素

(1)加热参数:升温速率、淬火温度、保温时间对热应力与组织应力的影响。升温过快(超过120℃/h)使截面温差增大,热应力峰值升高产生塑性流动;淬火温度每提高10℃使 M_s 点下降5~8℃,残余奥氏体增多,尺寸稳定性变差;保温不足或过长分别导致组织不均或晶粒粗化。(2)冷却参数:冷却介质类型、冷却速度、冷却均匀性对齿轮变形的调控作用。热油分级淬火将马氏体区冷速降至临界值以下可显著降变;搅拌强度与流向均匀性决定周向冷却一致性,搅拌不均可使椭圆度增大0.05mm以上^[2]。(3)渗碳工艺参数:渗碳温度、碳浓度梯度、渗层深度对齿轮变形的影响规律。高温长时渗碳加剧蠕变下垂;表面碳浓度超0.85%时碳化物析出增加,表层心部体积差增大使齿顶圆胀缩加剧;渗层深度偏差超0.1mm引发齿向扭曲方向性变化。

2.3 工装与装夹工艺因素

(1)工装夹具结构:支撑点位、限位方式对薄壁齿轮、异形齿轮的变形约束效果。三支撑点均布减少高温下垂,限位间隙0.1~0.2mm约束翘曲同时允许热膨胀;过刚约束产生附加应力,过弱约束难以抑制变形。(2)装炉方式:堆叠摆放、垂直悬挂、单点支撑等不同装夹形式的变形差异。垂直悬挂受力均匀椭圆度最小;堆叠摆放层间冷却差异大,翘曲量比悬挂式增大50%;单点支撑因重力产生不对称下垂,易致齿向锥度偏差。(3)压淬工艺应用:轴向压力加载对齿轮径向、轴向变形的抑制原理。压模施加8~15MPa轴向压力,强制马氏体相变膨胀沿径向受模具约束定向流动,同时作为导热体加速均匀冷却,综合降低椭圆度约60%~70%。

2.4 前期加工与后续处理因素

(1)车削、滚齿、剃齿等前道工序产生的残余应力累积效应。切削引入深达0.2~0.5mm残余应力层,热处理释放后与热应力、组织应力叠加使变形复杂化;滚齿进给量每增大0.1mm/r,表层残余拉应力增加50~80MPa。

(2)回火工艺参数对残余应力消除、变形矫正的作用。180℃×2h可消除约40%淬火应力,300℃×2h消除约80%,但高温回火硬度下降明显,需在应力消除与硬度保持间平衡,缓冷有利于减小二次热应力。(3)磨削加工余量不合理引发的二次变形问题。余量超0.25mm需多次进刀,磨削热致二次淬火或回火烧伤,引入新残余应力与微裂纹;余量过小无法修正热处理误差,齿厚方向合理预留0.15~0.20mm可兼顾变形修正与表面质量。

3 变速箱齿轮热处理变形精准控制方法与工艺优化

3.1 前期源头控制:材料与预处理优化

(1)优选适配变速箱齿轮的合金钢材,严格把控原材料质量与淬透性一致性。根据齿轮服役载荷与模数大小,合理选择20CrMnTi、20CrMoH等专用渗碳钢,严格控制淬透性带宽在4HRC以内,减少同批次材料相变响应差异。同时加强入厂检测,控制非金属夹杂物级别与带状组织等级,从材料源头保障变形稳定性。(2)优化毛坯预处理工艺,细化晶粒、均匀组织,减少原始组织缺陷。采用等温正火代替普通正火,获得均匀细小的珠光体加铁素体组织,晶粒度控制在7~8级,消除混晶与带状组织遗传效应。通过控制正火冷却速度与等温温度,使毛坯硬度均匀性控制在 $\pm 5HB$ 以内,为后续淬火提供一致性良好的原始组织^[3]。(3)优化机加工工艺,分段释放加工残余应力,降低热处理变形基础诱因。在粗车与半精车工序间增加去应力退火环节,切削参数选择锋利刀具与小进给量,减少表面冷作硬化层深度。滚齿、剃齿工序后增设低温回火或振动时效处理,提前释放表层残余应力,使热处理前齿轮处于低应力状态,减小应力叠加引发的附加变形。

3.2 核心工艺优化:热处理参数精准调控

(1)阶梯式升温工艺优化,降低升温过快产生的温差应力,减少翘曲变形。采用预热—高温渗碳—降温淬火的多段升温曲线,在600℃左右设置均温平台,使齿轮截面温度趋于一致后再进入高温渗碳阶段,有效降低截面温差产生的热应力峰值,避免快速升温引发的热塑性变形与端面翘曲。(2)差异化淬火工艺调整,匹配齿轮结构特性优化冷却速度与冷却方式。根据齿轮壁厚与几何复杂度选择分级淬火或等温淬火工艺,薄壁齿轮采用热油分级淬火降低热应力,厚壁齿轮适当提高冷速以充分获得马氏体组织。优化搅拌强度与方向,采用变频搅拌实现冷却初期缓冷、后期强冷的梯级冷却策略,兼顾淬硬性变形控制。(3)精准控制渗碳参数,稳定渗层深度与碳浓度,规避相变不均引发的变形。采用碳势自动控制系统将炉内碳势波动控制在 $\pm 0.05\%$ 范围内,

依据齿模数与渗层深度要求精确设定强渗期与扩散期比例。严格控制渗碳温度均匀性,炉内各区域温差不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,确保同炉齿轮渗层深度偏差小于 0.1mm ,减少表层与心部相变体积差导致的不规则变形^[4]。

3.3 工装与辅助工艺变形控制技术

(1) 定制化专用工装设计,优化支撑与限位结构,约束齿轮自由变形空间。针对薄壁齿轮设计全形托盘与定位芯轴,增加端面支撑面积减少高温下垂;对异形齿轮采用多点浮动支撑,在有效约束变形的同时允许热膨胀自由伸展,避免刚性过约束引入附加应力。工装材料选用耐热钢并定期校形,保证高温下尺寸稳定性。(2) 推广压力淬火工艺,通过轴向加压抑制齿轮径向畸变与椭圆变形。在淬火压床上配备与齿形匹配的专用压模,齿轮加热出炉后快速装模,轴向施加恒定压力,使齿圈在相变膨胀过程中沿径向受模具约束定向收缩,将椭圆度控制在 0.03mm 以内。同时压模兼具导热介质作用,加速齿圈均匀冷却,显著改善齿向扭曲与端面跳动。(3) 优化装炉排布方案,保证齿轮受热、冷却均匀性,减少不对称变形。采用分层悬挂装炉方式,上下层齿轮错位排列,保证炉内气氛与冷却介质流通顺畅。控制装炉量与层间距,避免齿轮之间相互遮挡导致渗碳与冷却不均。对大型齿轮设置专用吊具实现单件独立悬挂,根除堆叠摆放导致的接触面渗层与冷却差异。

3.4 后期矫正与闭环质量控制

(1) 精准校直工艺应用,区分冷校直、热校直的适用场景与操作规范。齿向扭曲或端面翘曲量在 0.2mm 以内且材料塑性较好时采用冷校直,逐点测量后定点加压,控制压头位移量防止过矫正产生裂纹;变形量超过 0.2mm 或材料脆性较大时采用热校直,局部加热至再结晶温度以下进行压力矫正,校后立即实施补充回火消除校直应力。(2) 二次去应力回火工艺优化,消除校直残余应力,防止变形反弹。校直工序后增加低温去应力回火,

温度控制在 $160\sim 200^{\circ}\text{C}$ 保温 $4\sim 6$ 小时,在基本维持齿面硬度的前提下充分松弛校直引入的残余拉应力。回火出炉后采用缓冷方式,避免急冷引发新的温差应力,确保尺寸长期稳定性^[5]。(3) 建立变形检测与工艺闭环反馈机制,基于检测数据迭代优化热处理工艺。采用齿轮测量中心对每批热处理后齿轮进行齿形、齿向、径跳等全参数检测,建立变形数据库。将检测结果按变形模式分类统计,反向关联相应批次材料淬透性、装炉位置、工艺参数等变量,通过统计分析识别关键影响因子,定期调整工艺参数与补偿方案,形成检测—分析—改进的闭环控制链。

结束语

本文全面梳理了变速箱齿轮热处理的变形机理、类型及核心影响因素,构建了从前期预处理、中期工艺调控、工装优化到后期矫正质控的全流程变形控制体系。通过精准优化材料、参数、装夹及后续矫正工艺,可有效抑制齿轮尺寸、形状及位置精度偏差,大幅降低热处理变形缺陷。研究形成的工艺方案实用性与针对性较强,能够有效解决齿轮热处理变形难题,为高精度变速箱齿轮批量生产提供技术支撑。

参考文献

- [1] 张磊,吴迪.汽车变速箱齿轮残余应力调控与变形抑制技术[J].汽车工艺与材料,2024,15(09):45-49.
- [2] 邵伟,易敏,唐进元,孙少勇.8620H钢齿轮热处理变形预测与抑制方法[J].中国机械工程,2022,33(18):221-227.
- [3] 陈志远.汽车变速箱齿轮渗碳淬火工艺优化与变形控制[J].机械工程材料,2024,48(06):89-94.
- [4] 章康乐.变速器齿轮内花键热处理变形缺陷改善与控制[J].机械传动,2024,48(07):156-160.
- [5] 王浩,李建军.基于有限元仿真的变速箱齿轮热处理变形精准控制[J].热加工工艺,2025,54(08):132-136.