齿轮渗碳淬火热处理变形的改进及优化研究

王 鑫
中车北京南口机械有限公司 北京 102202

摘 要：渗碳淬火是齿轮表面强化的核心工艺，热处理过程产生的尺寸偏差与形貌畸变，会大幅降低齿轮啮合精度与装配性能，制约精密齿轮加工质量提升。本文结合渗碳淬火工艺流程与金属相变特性，系统梳理齿轮热处理过程的变形类别与外观表现，剖析温度场波动、金相相变、残余应力及结构差异带来的变形生成机理。探究渗碳参数、淬火条件、冷却体系及前置加工工序对变形状态的影响规律，从工艺参数调整、温保温制度改良、冷却体系优化、前置工序规整多个维度，构建热处理变形的改良方案，有效改善齿轮热处理精度缺陷，提升齿轮加工成型稳定性。

关键词：齿轮；渗碳淬火；热处理变形；金相相变；工艺优化

引言：齿轮是机械传动系统的重要基础构件，加工精度与结构稳定性直接决定传动设备的运行品质与服役周期。渗碳淬火工艺能够有效强化齿轮表层硬度与耐磨性能，提升构件承载能力，广泛应用于精密齿轮加工生产。热处理过程的温度骤变与金相组织重构，容易引发不同程度的结构变形，难以实现完全规避。变形问题贯穿热处理及前置加工全流程，成因错综复杂。厘清变形产生的内在机制，完善工艺优化手段，能够减少热处理带来的精度损耗，保障精密齿轮的加工与使用品质。

1 齿轮渗碳淬火完整工艺与变形表现形式

1.1 齿轮渗碳淬火成套工艺流程

齿轮渗碳淬火属于表面强化类热处理工艺，整体流程遵循阶段性作业逻辑完成工序推进。工艺实施前期会开展齿轮毛坯预处理，消除前期机械加工残留的内部缺陷，稳定材料初始组织状态。渗碳阶段依托高温炉内环境，让碳原子持续渗透至齿轮表层金属结构内部，改变表层化学成分分布，形成高碳硬化层。渗碳结束后实施保温过渡处理，均衡工件整体温度场，规避局部温度差异带来的组织突变。淬火阶段通过快速降温方式，让表层高碳组织完成硬化转变，提升齿轮表面硬度与耐磨性能[1]。后续回火处理能够调整内部组织状态，弱化热处理产生的不稳定应力，保障齿轮整体力学状态趋于稳定。整套工序循序渐进，各阶段工艺动作相互衔接，构成齿轮表面强化的完整作业链路。

1.2 齿轮热处理过程组织结构转变过程

齿轮钢材在常温环境下保持稳定的金相组织结构，内部晶粒排布规整，材质力学状态均匀。升温至渗碳温度区间后，基体组织逐步发生晶粒活化现象，金属内部晶格活跃度提升，为碳原子渗透扩散提供结构条件。碳原子持续渗入表层金属后，表层碳含量逐步上升，形成区别于芯部的高碳组织结构。淬火快速降温阶段，表层高温组织发生相变重构，细密硬化组织逐步成型，赋予齿轮表层高强度特性。芯部金属冷却速度相对平缓，保留原有强韧兼备的基体组织。温度变化带动金相组织持续更迭，不同温区的相变差异，造就齿轮表层与芯部差异化的组织结构特征。

1.3 齿轮热处理变形的主要分类方式

齿轮渗碳淬火引发的热处理变形可依据形态特征划分为两类主流形式。第一类为尺寸维度变形，集中体现为齿轮整体外径、齿厚、孔径等基础尺寸出现偏移，属于体量参数的整体变动。第二类为几何形貌变形，聚焦齿轮外形结构的形态偏差，涵盖齿向、齿形、端面平整度等结构位置的异常改变。两类变形的产生诱因存在区分，尺寸变形多源于整体温度变化引发的体积胀缩，形貌变形更多来自局部组织相变与应力分布不均。科学划分变形类型，能够为后续偏差成因分析提供清晰的研判方向。

1.4 齿轮结构维度与形貌偏差表现特征

热处理作业完成后，齿轮结构维度偏差多表现为整体尺寸的单向偏移，孔径收缩、齿体增厚或减薄等问题较为常见，整体体量参数偏离标准设计区间。形貌偏差的表现形式更为多元，轮齿工作面出现弯曲、倾斜、凹凸畸变等形态问题，端面产生翘曲不平，齿轮同轴度、平面度出现异常波动。各类偏差会单独出现或交错叠加，破坏齿轮啮合精度与装配适配性。结构与形貌的双重偏差，直接改变齿轮成型状态，对后续机械传动精度与设备运行稳定性形成直接影响。

2 齿轮渗碳淬火变形的产生机理

2.1 温度场变化引发的热变形产生机理

齿轮渗碳淬火全程跨度20℃～950℃的大范围温度升

降变化，炉内高温加热与淬火快速降温，会让金属材料产生规律性的热胀冷缩反应。加热阶段，齿轮各部位受热程度存在区别，厚壁区域升温速度偏慢，薄壁轮齿区域升温更快，工件整体温度场处于不均衡分布状态，厚薄区域最大温差可达到80℃～120℃。不同区域的热膨胀程度存在差距，金属内部会产生初始热应变，引发微观形态的轻微偏移[2]。淬火冷却阶段，表层金属接触冷却介质后温度快速回落，体积收缩速率更快，芯部温度下降速度更为平缓。内外区域收缩节奏不一致，会让齿轮内部产生相互约束的力学作用，逐步形成不可逆的热变形，改变齿轮原始结构形态。

2.2 金相组织相变引发的组织变形机理

高温渗碳与淬火冷却的温度区间变化，会驱动齿轮钢材金相组织发生多次相变重构，各类组织结构的体积参数存在固有差异。高温状态下形成的奥氏体组织具备稳定的晶格结构，碳原子均匀固溶于金属基体之中。淬火降温过程中，表层高碳奥氏体逐步转化为马氏体组织，新生成的组织结构晶格体积更大。基体组织相变带来的体积膨胀，会改变齿轮表层结构体量。芯部金属相变进程更为温和，组织体积变化幅度较小。表层与芯部的相变体量差异，会打破工件结构平衡，诱发齿轮齿形、端面等位置出现结构性变形，属于热处理变形的核心内在诱因。

2.3 残余应力累积与释放的变形生成逻辑

渗碳淬火的温度变化与组织相变过程，会在齿轮内部持续滋生各类内应力，未得到消解的应力会以残余应力形式留存于工件内部。加热升温阶段的热应变、冷却阶段的相变应变，都会为残余应力的生成提供基础条件。各类应力会在金属晶格间隙、晶粒边界等位置逐步聚集，长期留存于齿轮基体内部。齿轮脱离热处理工况后，内部应力会随环境温度、放置状态缓慢释放。应力释放的过程会带动金属微观结构缓慢位移调整，逐步转化为宏观形态偏差，最终形成肉眼可辨识的尺寸与形貌变形。

2.4 齿轮结构差异带来的变形差异化机理

齿轮自身的结构形制，会直接影响热处理变形的程度与形式。轮齿、齿根、轮毂、辐板等不同区域的壁厚尺寸、结构形态各不相同，热传导效率存在明显区别。简单规整的结构区域温度传导均匀，相变进程平稳，变形幅度相对微弱。齿根过渡、薄壁轮齿等结构薄弱区域，热传导与组织相变稳定性较差，应力聚集效应更为突出。结构分布不均会让齿轮各部位变形趋势互不统一，部分区域以收缩变形为主，部分区域以膨胀翘曲为主。结构属性带来的变形差异，最终造成齿轮整体精度出现多元化偏差。

3 渗碳淬火工艺要素对齿轮变形的影响机制

3.1 渗碳工艺参数对齿轮变形的干预作用

渗碳阶段的工艺参数直接改变齿轮表层碳浓度分布与渗透深度，间接干预热处理变形的产生程度。渗碳温度高低会改变碳原子扩散活跃程度，温度数值偏高会加快表层渗碳进度，加深硬化层渗透厚度，让表层相变后的体积膨胀幅度出现明显变化。温度数值偏低会弱化扩散效率，造成渗层厚度分布不均，引发局部组织相变差异。渗碳时长决定碳原子累积总量，持续过久的渗碳作业会提升表层碳含量，扩大表层与芯部的材质性能差距[3]。碳势参数波动会改变表层碳浓度梯度，让不同位置的组织相变体量存在偏差。参数变动带来的渗层状态差异，会改变齿轮内部应力分布格局，对后续冷却阶段的变形趋势形成直接干预。

3.2 淬火升温与保温条件对变形的影响规律

淬火阶段的升温速率与保温状态，是影响齿轮组织均匀性与变形状态的关键条件。升温速率过快会让齿轮表层与内部形成明显温度梯度，厚壁位置升温滞后，各区域奥氏体化进程不一致，金属组织均匀性大幅下降。缓慢升温能够弱化温度差值，但过长升温流程会改变晶粒生长状态，引发晶粒粗大问题。保温时长不足会造成局部区域奥氏体转化不彻底，组织成分存在残留差异。保温时长过量会让晶粒持续长大，弱化材料结构稳定性。温度与保温条件的不合理调控，会让齿轮内部组织稳定性失衡，冷却过程中极易出现不规则形变，扰乱齿轮成型精度。

3.3 冷却介质与冷却方式的变形影响逻辑

冷却环节的介质类型与作业方式，决定齿轮降温速率与温度场演变状态，主导最终变形的生成趋势。不同冷却介质具备差异化的换热能力，换热强度更高的介质会带来极速降温效果，齿轮表层收缩速率大幅提升，内外温差持续拉大，应力积累程度显著提升。换热偏弱的介质降温过程更为平缓，温度场演变均匀性更好，应力聚集程度相对温和。冷却方式的区别会改变齿轮整体受热散热格局，整体浸入式冷却与分区定点冷却的温度传导路径存在明显区别。不合理的冷却模式会加剧局部收缩差异，让齿轮翘曲、尺寸偏移等变形问题进一步凸显。

3.4 前期加工工序对热处理变形的前置影响

齿轮热处理前的机械加工工序，会为后续热变形产生预埋式影响，提前奠定变形发展基础。车削、滚齿、磨削等加工操作会让金属表层产生加工应变，晶粒结构出现挤压错位，工件内部留存初始加工应力。各类加

工工序产生的应力会隐匿留存于金属基体中，热处理高温环境会激活不稳定的微观结构。初始应力会在升温、降温过程中逐步释放重组，带动齿轮结构产生微量位移调整。加工余量分布不均会让齿轮各区域材料致密性存在区别，热处理相变过程中呈现差异化变形趋势。前期工序留下的结构与应力缺陷，会在热处理过程中持续放大，加剧齿轮最终的精度偏差。

4 齿轮渗碳淬火变形的工艺改进与优化路径

4.1 渗碳阶段工艺参数的调整优化方式

渗碳工艺参数的科学调配能够稳定表层渗层状态，缩减碳浓度梯度不均引发的齿轮变形问题。结合齿轮结构厚度与设计渗层深度，合理设定渗碳温度区间，把控碳原子扩散速率，规避高温带来的渗层过厚、晶粒粗大问题，也能避免低温扩散不足造成的渗层偏薄缺陷[4]。依据工件材质特性匹配适宜渗碳时长，精准控制表层碳原子累积量，弱化表层与芯部材质性能差异，缓解相变阶段的体积应变偏差。稳定炉内碳势运行状态，弱化参数波动带来的局部渗层不均问题，让齿轮各区域金相组织相变程度趋于统一。规范的参数调控模式可以平衡渗层结构分布，优化内部应力排布，从源头降低渗碳工序诱发的变形偏差。

4.2 淬火加热与保温工艺的改良方式

淬火加热与保温工序的改良，可提升齿轮奥氏体组织均匀性，弱化温度梯度带来的结构形变。遵循梯度升温原则调控加热速率，缓解齿轮厚薄区域的升温差值，让整体工件受热更为均匀，保障各位置奥氏体转化进程保持一致。摒弃过快升温或低效升温的极端工艺模式，维持晶粒生长的稳定状态，规避晶粒粗大或组织转化不完整的问题。结合齿轮规格尺寸与结构复杂度设定保温时长，保障金属组织充分转化，消除局部未转化组织带来的结构失衡隐患。精准把控保温工艺阈值，能够稳定基体组织结构，减少冷却阶段不规则形变的产生，有效维持齿轮原始结构精度。

4.3 冷却工艺体系的优化与调整策略

冷却工艺的系统性优化，能够平衡齿轮降温速率，弱化内外温差引发的应力堆积与结构变形。根据齿轮工况用途与结构特点筛选适配冷却介质，匹配合理的换热强度，避免强换热介质造成的极速降温应力激增问题，也能规避换热效率偏低导致的组织性能不足缺陷。改良传统单一浸入式冷却模式，结合齿轮结构形态调整冷却作业形式，均衡各区域散热效率，缩减局部收缩差异。规范冷却作业流程，统一工件入炉、出炉及冷却摆放标准，减少人为操作差异带来的降温不均问题。稳定可控的冷却体系可以平缓温度场演变过程，降低翘曲、尺寸偏移等变形问题的发生概率。

4.4 齿轮预处理与工序搭配的优化手段

热处理前期的工件预处理与工序排布优化，能够消除前置工艺遗留的应力缺陷，规避隐性变形隐患。对齿轮毛坯开展前期调质处理，均匀基体金相组织，细化晶粒结构，提升材料整体稳定性，弱化后续热处理的形变倾向。优化车削、滚齿、磨削等机械加工流程，均匀各区域加工余量，减少局部材料挤压错位产生的加工应变。规范加工工序排布顺序，错开高应力加工流程的集中排布，逐步释放加工产生的残余应力。针对精密齿轮工件，增设应力消除预处理工序，清除前期加工留存的微观应力。完善的前置工艺体系可以筑牢工件结构稳定性，大幅削弱热处理阶段的变形叠加效应。

结束语

齿轮渗碳淬火变形由热胀冷缩、金相相变与残余应力释放共同诱发，结构特征与全流程工艺条件都会干预变形的发展趋势。梳理温度场变化、组织演变与应力累积的变形逻辑，明确各工艺要素对齿轮成型精度的影响规律，可精准定位精度偏差的产生源头。优化渗碳、淬火、冷却及前置预处理工艺体系，能够有效抑制热处理畸变问题，稳定齿轮尺寸与形貌精度，为齿轮热处理质量管控与工艺提质提供可靠的技术参考。

参考文献

[1]段晶晶.渗碳淬火过程中装炉方式对齿轮变形的影响[J].数字农业与智能农机,2022(14):117-119.

[2]麻梦梅.渗碳齿轮渐变搅拌淬火冷却工艺研究[J].热处理技术与装备,2023,44(6):32-35.

[3]陈志远.基于多工位同步传动的齿轮渗碳淬火装置设计及工艺优化研究[J].创新科技研究,2026,4(2):37-38.

[4]段晶晶.渗碳淬火齿轮的变形分析及控制措施[J].山西冶金,2026,49(5):255-257.