

工程机械齿轮加工与热处理工艺研究

贾俊豪¹ 丁树猛¹ 何俞霖² 王娜娜²

1. 杭州临江前进齿轮箱有限公司 浙江 杭州 310000

2. 杭州前进齿轮箱集团股份有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 工程机械齿轮制造涉及多环节协同。本文首先阐述齿坯、齿形、齿端及精加工核心工艺,明确各环节参数与控制要点;接着分析预备、最终及辅助热处理工艺,强调参数调控依据;然后探讨加工与热处理工艺协同配合,提出优化方向;最后指出工艺质量控制要点,涵盖加工、热处理过程及全过程管控逻辑。通过研究,为提升工程机械齿轮制造质量与效率提供理论支持与实践指导。

关键词: 工程机械齿轮; 加工工艺; 热处理工艺; 工艺协同; 质量控制

引言: 工程机械齿轮作为关键传动部件,其性能直接影响设备运行稳定性与可靠性。齿轮制造涵盖加工与热处理两大核心工艺板块,各环节紧密关联、相互影响。加工工艺的精度与表面质量为热处理奠定基础,热处理工艺则决定齿轮最终力学性能。当前,随着工程机械向高性能、高精度方向发展,对齿轮制造工艺提出更高要求。深入探究齿轮加工与热处理工艺及其协同配合,对提升齿轮质量、推动行业发展具有重要意义。

1 工程机械齿轮加工核心工艺

1.1 齿坯加工工艺

齿坯加工是齿轮制造的基础环节,直接影响后续工序的精度与效率。齿坯加工流程通常包含毛坯准备、粗加工、半精加工及检测调整四个阶段。毛坯选择需根据材料特性与齿轮设计要求确定,常见形式包括锻件、铸件或棒料^[1]。粗加工阶段以去除多余材料为主,通过车削、铣削或刨削完成齿坯外形的基本成型,重点控制尺寸余量与表面平整度,避免后续加工中因材料不均导致振动或变形。半精加工阶段需进一步提高齿坯的形位精度,尤其是基准面的加工质量,为齿形加工提供稳定定位基础。检测调整环节贯穿整个流程,通过三坐标测量仪或专用检具验证关键尺寸,确保齿坯各部位符合设计公差要求,为后续工序奠定基础。

1.2 齿形加工工艺

齿形加工是齿轮制造的核心,直接影响传动精度与承载能力。成形法齿形加工通过刀具切削刀形直接复制齿槽轮廓,常见方法包括铣齿与拉齿。铣齿适用于单件小批量生产,刀具成本低但效率有限,单件铣齿时间约为30-60分钟;拉齿则通过拉刀一次性完成齿槽加工,效率高但刀具制造复杂,多用于大批量生产,单件拉齿时间可缩短至5-15分钟。展成法齿形加工基于齿轮啮合

原理,通过刀具与工件的相对运动包络出齿形,滚齿与插齿是典型代表。滚齿加工连续性强,适合外齿轮批量生产,单件滚齿时间约为10-30分钟;插齿则可加工内齿轮或复杂齿形,灵活性更高,单件插齿时间约为15-40分钟。齿形加工工序衔接需严格遵循“先粗后精”原则,粗加工阶段预留足够余量以补偿热处理变形,粗加工余量一般控制在0.3-0.8mm,精加工阶段通过剃齿或磨齿修正齿形误差,最终达到设计要求的精度等级。

1.3 齿端加工工艺

齿端加工旨在优化齿轮啮合性能并消除加工缺陷。常见加工方式包括倒角、去毛刺及齿端修形。倒角可去除齿端锐边,降低应力集中风险,倒角角度一般为30°-45°,深度为0.5-1.5mm;去毛刺通过砂轮或振动光饰消除加工残留,提升表面质量,砂轮粒度一般选用80-120目;齿端修形则通过数控机床对齿顶或齿根进行微量修整,改善载荷分布均匀性,修形量一般为0.05-0.2mm。工艺控制要点包括加工角度与深度的精确控制,避免过度修形导致齿形误差超差。此外,齿端加工需与齿形加工紧密配合,确保修形区域与齿形过渡平滑,避免产生局部应力峰值。

1.4 精加工工艺

精加工是提升齿轮精度的最后环节,直接影响传动平稳性与噪声水平。齿面精加工方式包括剃齿、磨齿及珩齿等。剃齿通过交错轴螺旋齿轮啮合实现微量切削,效率高但仅适用于软齿面,剃齿进给量一般控制在0.05-0.15mm/r;磨齿利用砂轮磨削去除硬化层,可获得高精度与高硬度齿面,但成本较高,磨齿砂轮线速度一般控制在30-50m/s;珩齿则通过珩磨轮的微细磨粒对齿面进行抛光,适合批量生产中的光整加工,珩齿时间一般控制在5-15分钟/件。精加工对齿轮精度的调控主要通过控制切

削参数、机床刚度及夹具定位精度实现。例如，磨齿过程中需动态调整砂轮修整频率与进给速度，以补偿齿面热变形，砂轮修整频率一般控制在1-3次/分钟；珩齿则需优化珩磨轮转速与压力，确保齿面粗糙度达到设计要求。

2 工程机械齿轮核心热处理工艺

2.1 预备热处理工艺

预备热处理是齿轮加工中的关键环节，旨在优化材料组织结构，为后续工序提供稳定基础^[2]。正火工艺通过控制加热温度与冷却速度，使材料获得均匀细小的珠光体组织，提升切削性能并减少热处理变形，正火加热温度一般控制在850-920℃，空冷冷却。退火工艺则针对高硬度或内应力较大的材料，通过缓慢加热与冷却消除残余应力，改善材料塑性，便于后续加工，退火加热温度一般控制在680-720℃，保温时间3-5小时。预备热处理工艺参数设定需综合考虑材料成分、齿轮尺寸及后续加工要求。例如，加热温度需高于临界点以完全奥氏体化，但需避免过热导致晶粒粗化，临界点温度一般控制在720-760℃；冷却方式选择空冷或风冷，需平衡硬度与韧性需求。参数优化还需通过试验验证，确保组织均匀性满足设计要求，为最终热处理提供理想初始状态。

2.2 最终热处理工艺

最终热处理直接决定齿轮的力学性能与使用寿命。淬火工艺通过快速冷却使材料获得马氏体组织，显著提升硬度与耐磨性，但需严格控制冷却介质与速度以避免开裂。回火工艺紧随淬火进行，通过加热至适当温度并保温一定时间，消除淬火应力，调整硬度与韧性比例，使齿轮达到最佳综合性能。渗碳与碳氮共渗工艺适用于表面高硬度、心部强韧性的需求，通过在高温下向材料表面渗入碳或碳氮元素，形成高碳浓度梯度，淬火后获得硬化的表层与韧性心部。最终热处理工艺参数调控需结合材料特性与齿轮服役条件。例如，渗碳温度与时间影响渗层深度，需根据齿轮模数与载荷类型确定；淬火介质选择需兼顾冷却能力与变形控制，油冷适合复杂形状齿轮，水冷则用于简单结构以提升效率。

2.3 辅助热处理工艺

辅助热处理工艺用于优化齿轮的局部性能或消除加工缺陷。去应力处理通过低温加热与长时间保温，降低齿轮在机加工或热处理过程中产生的残余应力，减少后续使用中的变形风险，去应力处理温度一般控制在150-200℃，保温时间4-6小时。该工艺参数设定需考虑材料应力状态与齿轮尺寸，温度过低则效果有限，过高可能引发组织变化。表面强化处理工艺包括喷丸、滚压等，通过机械作用在齿面引入压应力层，提升抗疲劳性

能。喷丸处理利用高速弹丸冲击齿面，形成细小凹坑与压应力区，有效抑制裂纹扩展，弹丸直径一般控制在0.2-0.6mm，冲击速度50-80m/s；滚压则通过滚轮碾压使齿面金属塑性变形，提升表面硬度与光洁度，滚压力一般控制在500-1500N。表面强化工艺参数需根据齿面精度要求与材料特性调整，确保强化效果与尺寸精度平衡。

3 加工与热处理工艺的协同配合

3.1 加工工艺对热处理效果的影响路径

加工工艺的精度与表面状态直接影响热处理阶段的组织演变与性能表现^[3]。粗加工阶段若残留较大切削应力或表面粗糙度超差，会导致热处理时应力分布不均，加剧变形倾向。例如，车削或铣削过程中刀具磨损引发的振动，可能在齿坯表面形成微裂纹或加工硬化层，这些缺陷在淬火时易成为裂纹源，降低齿轮疲劳寿命。半精加工阶段的形位精度控制同样关键，基准面偏移或尺寸超差会改变热处理时的装夹方式，进而影响加热均匀性与冷却速率，导致渗层深度或硬度分布不均。此外，加工余量的设定需与热处理变形量匹配，余量过小可能因热处理收缩导致尺寸不足，余量过大则增加磨削量，影响表面完整性。

3.2 热处理工艺对后续加工的适配要求

热处理后的材料硬度与组织状态对后续加工的刀具选择与参数设定提出特定要求。淬火后的高硬度齿面需采用硬质合金或立方氮化硼刀具进行磨削，刀具几何角度需优化以减少切削热积聚，避免烧伤或裂纹，刀具前角一般控制在-5°至5°。渗碳齿轮的表层高碳马氏体与心部低碳马氏体组织差异，要求磨削时分层切削，先去除硬化层再精修尺寸，以控制表面残余应力，分层切削厚度一般控制在0.1-0.3mm。回火工艺虽降低了硬度，但可能引发材料韧性提升，需调整切削速度与进给量以防止粘刀或振动，切削速度一般控制在10-30m/min。对于需进行齿端修形或倒角的齿轮，热处理后的变形需通过数控补偿技术修正加工路径，确保修形区域与理论设计一致，数控补偿量一般控制在0.05-0.15mm。此外，热处理后的清洁度要求亦影响后续加工，氧化皮或脱碳层需通过喷砂或酸洗去除，避免影响装配精度。

3.3 工艺协同优化的核心方向

工艺协同优化的目标在于实现加工精度与热处理性能的双向匹配。首要方向是建立加工-热处理全流程数据库，通过模拟分析不同加工参数对热处理变形的影响规律，反向优化粗加工余量与半精加工基准。例如，利用有限元分析预测滚齿后的残余应力分布，指导淬火时的装夹方式与冷却路径设计。另一方向是开发适应性热处

理工艺,根据加工状态动态调整参数。对于高精度齿轮,可采用分级淬火或等温淬火替代传统单液淬火,通过控制冷却阶段减少变形;对于复杂结构齿轮,可设计局部感应淬火工艺,仅硬化啮合区域以降低整体变形风险。此外,在线检测技术的集成应用可实现加工-热处理闭环控制,通过激光扫描或超声波检测实时监测尺寸变化,自动调整后续工序参数,最终提升齿轮的综合性能与生产效率。

4 工艺质量控制要点

4.1 加工过程质量控制

加工过程的质量控制需贯穿从毛坯准备到精加工的各环节^[4]。粗加工阶段需重点监控切削参数与刀具状态,通过实时监测切削力与振动信号,避免因刀具磨损或参数失配导致齿坯表面缺陷。半精加工阶段需强化形位精度检测,利用三坐标测量仪或激光跟踪仪验证基准面与关键尺寸的符合性,误差超差时及时调整加工路径或装夹方式。精加工阶段的质量控制以表面完整性为核心,通过控制切削液流量与主轴转速,减少磨削烧伤或剃齿划痕,同时采用在线粗糙度仪实时反馈表面质量,确保齿面粗糙度达到设计要求。此外,加工环境温湿度控制亦不可忽视,温度波动可能引发材料热胀冷缩,导致尺寸链累积误差,需通过恒温车间或补偿算法降低环境影响。

4.2 热处理过程质量控制

热处理过程的质量控制需围绕组织均匀性与性能稳定性展开。加热阶段需严格控制升温速率与保温时间,避免因温度梯度过大导致组织差异,例如渗碳工艺中碳势分布不均会引发表层硬度波动,需通过气氛传感器与氧探头实时监测并调整碳浓度。冷却阶段是控制变形与残余应力的关键,淬火介质的选择需匹配材料特性与齿轮结构,油冷适合复杂形状以减缓冷却速度,水冷则用于简单结构以提升效率,通过搅拌装置优化介质流动性,减少局部冷却差异。回火工艺需根据齿轮服役条件精准设定温度与时间,低温回火提升硬度,高温回火改善韧性,参数偏差可能直接导致接触疲劳强度下降。热处理后的质量检测需结合金相分析、硬度测试与残余应力测

量,全面验证组织与性能指标。

4.3 工艺全过程质量管控逻辑

工艺全过程质量管控需构建“预防-监测-反馈”的闭环体系。预防阶段通过工艺仿真与参数优化降低质量风险,例如利用有限元分析预测加工变形或热处理应力分布,提前调整余量或装夹方案。监测阶段依托多传感器集成技术实现全流程数据采集,加工环节通过力控系统与视觉检测捕捉异常信号,热处理环节通过温度场模拟与气氛控制确保工艺稳定性^[5]。反馈阶段以质量数据驱动工艺改进,建立加工-热处理参数关联模型,当检测到齿面硬度偏低时,可追溯至渗碳温度不足或冷却速度过快,进而优化后续批次参数。此外,跨工序质量追溯机制需完善,通过唯一标识编码实现从毛坯到成品的全生命周期数据关联,为质量分析与持续改进提供依据,最终形成覆盖全流程的动态质量管控网络。

结束语

工程机械齿轮加工与热处理工艺复杂且关键,各环节紧密相连。加工工艺的精准控制与热处理工艺的合理选择,以及二者协同优化,是保障齿轮性能的核心。严格的质量控制贯穿工艺全过程,通过预防、监测与反馈闭环体系,可有效降低质量风险,提升产品稳定性。持续完善工艺体系,强化质量管控,有助于提高工程机械齿轮制造水平,满足行业不断发展的需求,推动工程机械产业迈向新高度。

参考文献

- [1]舒心.工程机械齿轮加工与热处理工艺研究[J].造纸装备及材料,2023,52(4):43-45.
- [2]田新文.工程机械齿轮加工与热处理工艺研究[J].百科论坛电子杂志,2022(20):133-135.
- [3]李立群,王联进,王广超,等.16Ni3CrMoE钢输出齿轮的热处理工艺研究[J].金属加工(热加工),2025(5):89-94.
- [4]吴清雨,殷耀君,姚素娴,等.薄板齿轮加工工艺研究与改进[J].机械传动,2023,47(4):171-176.
- [5]刘斌,魏理林,杨昊东,等.行星减速器薄壁齿圈的加工工艺分析及优化[J].机械传动,2022,46(2):171-176.