# 齿轮加工中对锻造及热处理的要求

王　鑫

中车北京南口机械有限公司　北京　102202

**摘　要：**本文聚焦齿轮加工过程中锻造与热处理两大核心工序，系统性梳理了齿轮锻造的总体工艺要求与关键控制要点，明确了锻造温度、变形量、锻后预处理环节的管控逻辑，从组织性能、成型精度、内部质量三个维度划定了齿轮毛坯的合格判定基准。同时针对不同服役场景的齿轮需求，分别阐述了调质、表面硬化两类主流热处理工艺的核心管控要求，细化了热处理变形抑制与全维度质量检测的技术规范，构建了覆盖齿轮毛坯成型到最终性能核验的完整工艺管控体系，可有效规避齿轮加工过程中的隐性质量缺陷，保障齿轮的综合力学性能与尺寸精度满足各类工况的长期运行要求。

**关键词：**齿轮加工；锻造工艺；热处理；要求

**引言：**齿轮作为各类机械传动系统的核心承载构件，其加工质量直接决定整套传动装置的运行稳定性与服役寿命。锻造与热处理是齿轮全加工流程中决定内部组织性能的两大核心工序，二者的工艺管控水平，直接影响齿轮的力学性能分布、尺寸精度稳定性与长期抗疲劳能力。当前工业场景下，高速、重载、高精度传动装备对齿轮的综合性能要求持续提升，仅依靠单一工序的局部管控已无法满足高端装备的使用需求，必须建立覆盖锻造全流程、热处理全环节的系统性工艺规范。本文围绕齿轮锻造与热处理的核心技术要求展开系统性梳理，明确各工序的关键控制节点与质量判定准则，为齿轮加工全流程的质量管控提供可落地的专业技术依据。

## 1 齿轮锻造工艺总体要求

齿轮加工中，锻造环节作为毛坯成型的首道核心工序，直接决定了后续切削加工与热处理的工艺稳定性，是保障齿轮最终服役性能的基础前提。齿轮锻造的核心目标是获得组织致密、晶粒均匀、应力分布均衡、无内部缺陷的优质毛坯，为后续切削加工和热处理奠定良好基础。齿轮锻造需严格遵循金属塑性成型规律，根据齿轮规格、材质、使用工况制定匹配的锻造方案，整体需满足组织性能、成型精度、内部质量三大核心要求，杜绝毛坯出现残余缺陷，影响后续工序质量。（1）在组织性能层面，需通过合理的锻造比控制，使坯料内部的柱状晶、树枝晶充分破碎，完成再结晶过程，消除铸态组织中的疏松、偏析等原始缺陷，让材料内部形成连续均匀的等轴晶组织。针对不同材质的齿轮，需匹配对应的始锻与终锻温度区间，严格把控温度波动范围，避免因终锻温度过高导致晶粒异常长大，或因终锻温度过低引发形变残余应力超标，保证毛坯整体力学性能沿齿向、齿廓方向分布均匀，避免出现局部强度、韧性不达标问题。（2）在成型精度层面，需根据齿轮后续切削的加工余量要求，精准控制锻件的外径、内孔、端面等关键尺寸公差，同时保证分模面位置设置合理，减少后续飞边打磨的工作量，避免因加工余量分布不均导致后续切削工序出现局部缺料、刀具异常磨损等问题。（3）在内部质量层面，需通过探伤检测排查毛坯内部的微裂纹、折叠、白点等隐性缺陷，同时对锻造后的毛坯进行预正火处理，提前释放部分锻造残余应力，降低后续热处理过程中齿轮的变形倾向性，从源头减少因毛坯质量问题引发的最终齿轮精度失效、服役断裂等风险[1]。

## 2 齿轮锻造关键工艺控制要求

### 2.1 锻造温度控制要求

锻造温度是直接决定齿轮毛坯金相组织状态与塑性变形性能的核心工艺参数，需按工艺阶段划分为始锻温度与终锻温度两个核心控制节点，不同材质的齿轮锻件需对应匹配专属的温度控制区间，实施全流程精准把控。始锻温度的管控需保障金属材料具备充足的塑性变形能力，维持较低的变形抗力，确保锻造全过程中金属流动行为均匀稳定，能够充分填充模具的复杂型腔结构，同时规避温度过高引发的晶粒异常长大、过烧、表面氧化脱碳等质量缺陷。终锻温度需严格高于对应材料的再结晶温度阈值，保证锻造工序结束后，金属基体可完成充分的静态再结晶行为，有效细化锻造过程中产生的变形晶粒，彻底消除冷变形带来的加工硬化现象。若终锻温度管控不当处于过低区

间，齿轮毛坯内部会残留大量未释放的锻造内应力，晶粒变形程度分布不均，后续切削加工过程中极易出现变形、开裂问题，最终热处理工序后也会产生非预期的组织畸变，大幅降低齿轮的整体力学性能。针对常规合金结构钢类齿轮，需严格限定整体锻造温度区间，推行全程恒温锻造管控模式，最大程度降低温度波动对毛坯内部组织均匀性的负面影响[2]。

2.2 锻造变形量控制要求

锻造变形量是决定齿轮毛坯内部金属纤维组织连续性与致密性的核心工艺参数，是消除原材料内部疏松、气孔等冶金原始缺陷的关键控制环节。变形量需严格控制在合理工艺区间内，确保金属纤维沿齿轮轮廓连续分布，完全贴合齿轮实际受力轨迹，有效提升齿轮的抗疲劳强度与静态承载能力。若锻造变形量过小，材料内部原始缺陷无法得到充分压实闭合，动态再结晶过程中的晶粒细化效果无法充分发挥，毛坯整体组织致密度不足，后续服役过程中易在缺陷位置产生应力集中引发早期损坏。若锻造变形量过大，会造成金属纤维走向异常扭曲、晶粒破碎程度不均，诱发大量非均匀分布的锻造残余应力，最终导致毛坯不同部位的组织与力学性能出现显著差异化。针对大模数、大尺寸齿轮构件，需采用分次锻造、渐进变形的工艺方案，保证毛坯整体变形均匀，有效规避局部变形不足或局部过度变形的工艺缺陷。

2.3 锻造后预处理要求

齿轮锻造工序完成后，毛坯内部会留存锻造过程中形成的非平衡组织，这类组织存在明显的晶粒尺寸差异与分布不均问题，同时伴随有较高水平的残余锻造应力，若不做针对性处理，将直接对后续全流程加工质量造成隐性影响，因此必须在进入下道工序前完成规范化预处理工作。所有锻造完成的齿轮毛坯，需统一执行正火或退火类预处理工艺，通过受控的温度场与保温冷却过程，消解锻造过程中产生的粗大晶粒，使整体金相组织趋于均匀化，同步降低毛坯的整体硬度，有效改善材料的切削加工适配性，从根源上避免因硬度过高引发的刀具异常磨损、切削表面纹路不均等加工缺陷。与此同时，该预处理环节可充分释放毛坯内部积存的残余锻造应力，规避毛坯在存放、转运及后续切削加工过程中出现的非预期形变，保障齿轮毛坯全流程的尺寸稳定性。预处理完成后，需逐件确认毛坯状态，确保表面无氧化皮堆积、无可见表面裂纹，内部不存在超标冶金缺陷，整体组织均匀一致，为后续最终热处理改性提供稳定可靠的前置组织基础[3]。

## 3 齿轮热处理工艺核心要求

3.1 调质热处理工艺要求

调质处理多用于中低速、中等载荷的普通齿轮，是齿轮基础热处理工艺，包含淬火与高温回火两个阶段。该工艺作为齿轮后续加工与性能保障的前置基础工序，核心目标是通过全流程的参数管控，让齿轮整体获得均匀的回火索氏体组织，同步实现强度与韧性的协同匹配，提升齿轮整体承载能力与抗冲击性能，也为后续可能开展的表面强化工序提供稳定可控的原始组织状态。（1）淬火阶段需严格依据齿轮材质、结构特征与单批次装炉状态，确定适配的加热温度、保温时长与冷却控制逻辑，保证齿轮整体受热充分均匀，避免局部区域奥氏体化进程不一致导致的后续组织性能差异。冷却过程需全程维持稳定的冷却速率区间，匹配对应淬透性要求的冷却介质，杜绝局部冷速异常引发的淬火开裂与残余应力超标问题。（2）高温回火阶段需精准设定回火温度区间与保温周期，保证齿轮整体完全透热，让淬火形成的非平衡组织充分完成转变，彻底释放淬火过程中累积的内应力，稳定内部金相组织，降低齿轮的脆性倾向。调质完成后需对批次内齿轮开展全维度性能核验，保证同批次齿轮硬度分布均匀，整体韧性满足设计要求，齿轮形位状态符合后续加工基准，无肉眼可见的开裂缺陷，内部组织均匀无异常析出相，完全适配常规传动工况的长期运行需求。

3.2 表面硬化热处理工艺要求

对于高速、重载、高精度齿轮，需采用表面硬化热处理工艺，在不破坏齿芯原有强韧性的前提下，针对性提升齿面耐磨与抗疲劳性能，使齿轮同时具备表层高硬度、芯部高韧性的匹配性能，该类工艺目前以渗碳淬火、高频淬火为两类主流应用方案。（1）渗碳淬火工艺主要适配低碳合金钢材质的齿轮，工艺实施过程中需全程管控炉内气氛状态，严格控制渗碳温度、渗碳阶段的碳势分布与有效渗碳层深度，保证齿面全轮廓的渗碳层均匀一致，避免局部区域出现过渗导致的脆性上升，或是脱渗引发的硬度不足问题。渗碳工序完成后衔接配套的淬火与回火处理，使齿面区域转变为高硬度马氏体组织，齿芯区域仍保留强韧性良好的基体组织，实现表层与芯部的性能梯度匹配。（2）高频淬火工艺主要适配中碳钢材质的齿轮，工艺实施过程中需精准匹配感应加热频率、加热时长与冷却介质的喷射状态，保证齿面全轮廓的硬化层深度分布均匀，齿顶、齿根区域的硬化效果保持一致，避免齿根位置硬化层深度不足引发的弯曲疲劳断裂风险。表面硬化处理完成后，需对齿轮开展全项

组织与性能核验，保证齿面硬度符合设计要求，硬化层向基体的过渡区域平缓连续，不存在残余奥氏体过量聚集、碳化物偏聚等影响服役寿命的组织缺陷[4]。

3.3 热处理变形控制要求

热处理变形是直接影响齿轮最终加工精度与服役性能的核心问题，齿轮在热处理全流程中，伴随温度场的持续变化与内部金相组织的相变过程，会同步产生体积与尺寸的非预期形变，这类形变一旦超出可控范围，将直接破坏齿轮的形位精度，需通过全链条的工艺管控严格抑制变形的产生。（1）热处理前需完成前置工序的质量核验，确认锻造毛坯内部组织均匀性达标，前期累积的残余应力已得到充分释放，同时确认齿轮前置切削加工的应力状态稳定，从全流程的源头层面减少后续热处理环节的变形诱因。热处理过程中采用分级加热、分级冷却的工艺逻辑，降低齿轮不同壁厚、不同结构区域之间的温差梯度，同步削弱温差应力与不同步组织转变带来的相变应力，避免局部区域形变速率不一致引发的整体精度偏差。（2）针对精度等级要求较高的齿轮，需严格管控装夹定位方式、炉内摆放姿态，避免加热与冷却过程中齿轮因自重或外力约束产生非自由形变。热处理工序完成后，需对齿轮的齿形、齿向、内孔等关键尺寸开展全检，保证所有形位偏差均处于工艺允许的范围内，不存在翘曲、扭曲、非均匀胀缩等异常变形，完全满足后续精磨、精加工工序的基准精度要求。

3.4 热处理质量检测要求

齿轮热处理工序完成后，需开展覆盖全维度的系统性质量检测，全面验证工件的力学性能与内部金相组织状态，确保所有指标完全匹配设计与工况要求，从检测环节阻断不合格品向下游流转[5]。（1）硬度检测需覆盖齿面、齿芯、齿根等所有承载关键部位，针对不同工艺类型的齿轮，分别核验表层硬化区域与芯部基体的硬度状态，保证各位置硬度分布与设计要求的性能梯度完全匹配，不存在局部硬度不均、软点、硬度过渡异常等缺陷。金相组织检测需通过制样观测确认晶粒尺寸、组织形态完全符合对应工艺的技术标准，排查是否存在粗大晶粒、微观裂纹、非金属夹杂、残余奥氏体过量等影响齿轮服役寿命的隐性缺陷，确认各类相组成的占比与分布状态合规。（2）需对齿轮的表层与深层残余应力状态开展检测，确认残余应力的类型与分布处于安全可控区间，避免齿轮在后续精加工或长期服役过程中，因残余应力非可控释放引发尺寸变形、结构开裂等失效问题。所有检测结果需形成可追溯的工艺记录，所有指标未达标的工件需按规范流程重新处理，杜绝带有隐性缺陷的产品流入后续加工工序。

**结束语**

齿轮锻造与热处理的工艺管控是一项贯穿全流程的系统性工作，任何单一环节的参数偏差都可能在后续工序中被持续放大，最终引发齿轮精度失效、早期断裂等不可逆的质量问题。建立标准化、全链条的工艺管控体系，不仅是保障齿轮加工一致性的基础，更是提升齿轮服役可靠性的核心路径。未来随着高端传动装备的性能要求持续升级，齿轮锻造与热处理的管控精度还需进一步向精细化、可追溯化方向延伸，通过全流程的组织状态与应力状态的动态管控，持续消除工艺过程中的隐性质量隐患，为各类重载、高精度传动装备的长期稳定运行提供坚实的核心构件性能支撑。

**参考文献**

[1] 冒新国, 陈旋, 翟庆华, 等. 锻造连接金具热处理开裂失效分析 [J]. 材料热处理学报,2026,47(5):122-127.

[2] 郭立才. 变速器齿轮精密加工中的误差补偿机制 [J]. 汽车电器,2026,(2):135-136.

[3] 邓宏盛, 刘雪垠, 张衡镜, 等. 高精密摆线齿轮加工专用磨床结构优化设计与研究 [J]. 机械工程师,2026,(2):127-131.

[4] 郝丰林, 张旭初. 基于预处理工艺优化的齿轮渗碳硬化层均匀性改善研究 [J]. 金属加工（热加工）,2026,(6):107-111.

[5] 夏茂浩, 董建鹏, 王时龙. 高精度齿轮机床研究现状与发展趋势 [J]. 制造技术与机床,2026,(2):5-17.