

工业齿轮箱渗碳淬火齿轮的磨削工艺与表面完整性分析

李亚甲

南京高精齿轮集团有限公司，江苏南京

DOI:10.62836/gse.v3i2.1272

摘要：工业齿轮箱是重型装备传动系统的核心部件，其渗碳淬火齿轮的服役寿命和传动可靠性高度依赖磨削加工后的齿面表面完整性。本文针对不同磨削工艺参数加工的渗碳淬火齿轮开展试验研究，分析砂轮粒度、进给速度、磨削深度对齿面粗糙度、残余应力、微观形貌、显微硬度及表层金相组织的影响规律，进一步明确表面完整性各项指标对齿轮接触疲劳强度、磨损性能、传动噪声与精度的作用机制，最终提出面向高可靠性齿轮加工的磨削工艺参数匹配与优化方案，可为工业齿轮箱渗碳淬火齿轮的磨削加工工艺改进提供技术参考。

关键词：工业齿轮箱；渗碳淬火齿轮；磨削工艺；表面完整性

Milling Process and Surface Integrity Analysis of Carburized and Quenched Gears in Industrial Gearboxes

Yajia Li

Nanjing High-Speed & Accurate Gear Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

Abstract: Industrial gearboxes are core components of transmission systems in heavy-duty equipment, where the service life and transmission reliability of carburized and quenched gears are highly dependent on the surface integrity of the tooth surfaces after grinding. This study conducts experimental investigations on carburized and quenched gears processed under varying grinding parameters, analyzing the effects of wheel grain size, feed rate, and grinding depth on tooth surface roughness, residual stress, microstructure, microhardness, and surface metallographic morphology. It further elucidates how these surface integrity parameters influence gear contact fatigue strength, wear performance, transmission noise, and accuracy, ultimately proposing optimized grinding parameter configurations tailored for high-reliability gear manufacturing, which provides technical guidance for improving grinding processes of carburized and quenched gears in industrial gearboxes.

Keywords: industrial gearbox; carburized and quenched gears; grinding process; surface integrity

1 渗碳淬火齿轮磨削试验方案设计

1.1 试验齿轮的材料参数与渗碳淬火预处理工艺

本次试验所用齿轮采用适合渗碳淬火处理的合金结构钢制造,其主要化学成分为碳、铬、钼、锰等元素,具备良好的淬透性与渗碳后表面硬化能力,能够满足工业齿轮箱齿轮对芯部韧性、齿面硬度的服役要求。试验齿轮的核心模数、齿数、压力角均参照工业齿轮箱常用通用规格确定,保证试验结论可对应实际生产应用场景。渗碳淬火预处理流程按照齿轮生产常规工艺开展,首先对齿轮毛坯进行正火处理,均匀组织、消除锻造应力,改善毛坯的切削加工性能;完成粗加工后进入渗碳工序,控制渗碳层深度达到设计要求,渗碳处理后先进行预冷淬火,随后开展低温回火处理,最终得到表面高硬度、芯部强韧结合的组织状态,为后续磨削加工提供合格的预处理坯件。

1.2 不同磨削工艺参数(砂轮粒度、进给速度、磨削深度)设置

本次试验围绕三种核心磨削工艺参数分别设置多组梯度变量,探究参数变化对齿面质量的影响。其中砂轮粒度按照粗磨到精磨的常用生产规格,依次设置为三个梯度,分别适配不同的磨削精度要求;进给速度以齿轮磨床常用加工区间为基础,设置等间距梯度数值,覆盖低速到高速的常规加工范围;磨削深度同样设置多组梯度,从浅磨到深磨覆盖生产中常见的加工余量区间。所有试验均在同一台高精度齿轮磨床上开展,保持其余磨削条件一致,仅改变本次设置的对应变量,排除其他加工条件差异对试验结果的干扰,保证各组试验结果具备可比性。

1.3 齿轮表面完整性各项指标的检测方法 with 设备选型

本次检测主要针对表面粗糙度、残余应力、微观形貌、表层显微硬度四项核心表面完整性指标开展。其中表面粗糙度采用触针式表面轮廓仪进行测

量,在单个齿面沿齿高方向选取3个不同测量位置多次测量后取平均值,保证测量结果的稳定性;残余应力采用X射线应力分析仪进行检测,针对齿面不同位置的残余应力状态进行采集,分析表层残余应力的分布特征;齿面微观形貌采用扫描电子显微镜进行观测,直观对比不同磨削参数加工后齿面的划痕、塑性变形等加工痕迹差异;表层显微硬度通过显微硬度计进行测量,对从齿面到芯部不同深度位置的硬度变化进行逐点检测,获取硬度沿渗碳层深度的分布曲线。所有检测设备均提前完成校准,保障检测数据的准确性与可靠性[1]。

2 不同磨削工艺参数对渗碳淬火齿轮表面完整性的影响分析

2.1 磨削参数对齿轮表面粗糙度的影响规律

本次试验分别考察砂轮粒度、进给速度和磨削深度三个参数变化对表面粗糙度的作用效果。检测结果显示,当保持其他磨削参数不变时,随着砂轮粒度编号增大,磨粒尺寸减小,加工后齿面的残留切削高度降低,表面粗糙度整体呈下降趋势,但粒度过细会增加砂轮磨耗,同时易引发磨屑堵塞,反而会导致粗糙度在粒度超过某一阈值后出现小幅上升;随着进给速度提升,单位时间内磨削区域的磨粒切削量增加,齿面留下的切削间距增大,表面粗糙度会随之逐渐升高;而磨削深度增加时,磨削过程中的切削力随之增大,齿面塑性变形程度加剧,会带动表面粗糙度呈现缓慢上升的变化趋势。整体来看,三个参数中进给速度对表面粗糙度的影响程度最为显著,砂轮粒度的影响次之,磨削深度的影响相对最弱。

2.2 磨削参数对齿面残余应力分布的影响分析

通过X射线衍射残余应力检测仪对不同工艺参数加工后的齿面残余应力进行检测后发现,本试验所有加工参数下获得的齿面均呈现残余压应力状态,这对于提升齿轮的接触疲劳性能较为有利,不同磨削参数对残余压应力的数值大小存在明显影响。保持其他参数不变时,随着砂轮粒度编号增大,磨粒切入深度更均匀,加工过程中齿面的塑性

挤压作用增强，齿面残余压应力数值呈现逐渐升高的趋势；随着进给速度提升，单颗磨粒的切削厚度增大，磨削热作用加剧，齿面热膨胀引起的塑性变形效应增强，冷却后残余压应力数值会逐渐降低；而随着磨削深度增加，磨削过程中的法向切削力增大，齿面的塑性变形程度提高，残余压应力数值随之呈现缓慢上升的趋势。在三个参数中，砂轮粒度对齿面残余压应力数值的影响程度最大，进给速度的影响次之，磨削深度的影响最小。

2.3 磨削参数对齿面微观形貌与表层显微硬度的影响

通过扫描电镜对不同参数加工后的齿面微观形貌观察可见，砂轮粒度编号增大时，磨粒的尺寸更小，加工后齿面留下的磨痕更细密均匀，齿面缺陷如微裂纹、磨削烧伤的出现概率显著降低；随着进给速度和磨削深度增加，单颗磨粒的切削载荷变大，齿面容易出现耕犁划痕、材料剥落等损伤，进给速度过高时还可能因磨削热累积引发轻微的磨削烧伤，破坏齿面微观完整性。对齿轮表层不同深度的显微硬度检测结果表明，所有工艺参数加工后，齿面表层均存在一定厚度的加工硬化层，这是磨削过程中塑性变形导致晶粒细化产生的。保持其他参数不变，随着砂轮粒度编号增大，齿面塑性挤压作用增强，加工硬化程度有所提升，表层显微硬度略有升高；随着进给速度提升，磨削热作用增强，会一定程度软化表层材料，加工硬化程度降低，表层显微硬度逐渐下降；而随着磨削深度增加，磨削法向力增大，塑性变形程度提高，表层显微硬度呈现缓慢上升的趋势，且加工硬化层厚度略有增加。整体来看，砂轮粒度对表层显微硬度的影响程度与进给速度相近，磨削深度的影响相对较小[2,3]。

2.4 不同磨削工艺下齿轮表层金相组织变化特征

磨削过程中，磨削热和机械力的共同作用会对齿轮渗碳淬火后的原有金相组织产生影响。在磨削热温度未超过材料相变温度时，表层组织不会发生明显的相变，但较大的磨削力会引发晶粒的塑性

变形，使得渗碳层内的原马氏体组织出现一定程度的位错增殖，晶粒边界发生扭曲变形，细化表层晶粒。当磨削参数选取不当，磨削热大量累积导致表层温度超过相变温度后，快速冷却过程中会在齿面最表层形成二次淬火马氏体组织，次表层因温度未达到相变温度且被高温回火，会形成回火索氏体，这种不均匀的金相组织会导致表层应力分布不均，增加齿轮服役过程中裂纹萌生的风险。

对比不同参数下的金相观测结果可以发现，砂轮粒度增大时，磨粒更细密，单颗磨粒磨削力更小，热累积程度低，表层金相组织与基体渗碳淬火组织差异不明显；随着进给速度和磨削深度增大，单颗磨粒切削载荷提升，磨削热输出增加，表层出现组织变化的概率明显上升，磨削深度过大时可观测到明显的变质层，这也与前文齿面微观损伤和显微硬度的变化规律相互印证。

3 表面完整性对渗碳淬火齿轮服役性能的影响研究

3.1 表面完整性与齿轮接触疲劳强度的相关性分析

齿轮的接触疲劳失效是其服役过程中最常见的失效形式之一，表面完整性各指标的差异会直接改变齿面的应力分布与裂纹萌生扩展规律，最终体现为接触疲劳强度的明显区别。其中齿面残余应力是影响接触疲劳寿命的关键因素，当齿面存在较高的残余压应力时，能够抵消部分服役过程中产生的接触拉应力，延缓疲劳裂纹的萌生与扩展，有效提升齿轮的接触疲劳强度；若磨削工艺不当导致齿面出现残余拉应力，则会加速裂纹扩展，降低齿轮的接触疲劳寿命。表层金相组织的变化同样会对接触疲劳强度产生影响，当磨削参数不合理导致齿面产生较厚的回火软化层时，表层显微硬度下降，抗接触变形能力降低，更容易诱发疲劳裂纹，降低接触疲劳强度；而适度的塑性变形带来的晶粒细化，能够提升表层强度与韧性，对接触疲劳强度有一定的正向作用。此外，表面粗糙度越高，齿面的微观应力集中效应越明显，越容易提前萌生疲劳裂纹，进而降低齿轮的接触疲劳强度[4]。

3.2 表面完整性对齿轮磨损性能的影响机制

齿轮磨损是啮合过程中齿面间反复摩擦、挤压导致材料不断损失的渐进过程，不同表面完整性特征会通过改变齿面摩擦状态、材料性能直接影响磨损发展速率。

齿面粗糙度是影响磨损进程的首要因素，粗糙齿面存在大量微观凸起，啮合过程中凸起易发生挤压断裂和犁削作用，不仅会增大摩擦系数，还会不断刮削啮合齿面，加速材料剥落，使磨损量快速上升；而磨削获得较低粗糙度的齿面，啮合齿面接触更均匀，微观应力集中和犁削效应大幅减弱，磨损速率会显著降低。但过低的粗糙度会导致齿面存储润滑油的能力下降，容易发生润滑失效，反而会增大齿面黏着磨损风险。

残余应力同样会影响齿面磨损行为，残余压应力能够提升齿面的抗塑性变形能力，减少啮合过程中齿面材料的挤压剥落，抑制磨损发展；若存在残余拉应力，齿面材料更易发生形变开裂，会加快磨损速率。

表层金相组织与显微硬度决定了齿面本身的抗磨损能力，出现磨削回火软化层的齿面显微硬度偏低，抗咬合和抗磨粒磨损能力下降，磨损速率会明显升高；而晶粒细化且硬度均匀的磨削表层，能保持良好的强韧性配合，耐磨性更优异，磨损发展更缓慢。

3.3 不同表面状态下齿轮噪声与传动精度的变化规律

齿轮啮合过程中，齿面的微观形貌会直接影响啮合的平稳性，粗糙度过大的齿面微观凸起会导致齿对间啮合间隙不均匀，啮合过程中易产生冲击与振动，进而增大传动误差，使齿轮工作过程中的噪声水平明显升高。同时，不均匀的齿面接触会导致齿轮载荷分布不均，长期服役过程中不均匀磨损会进一步扩大齿形误差，降低传动精度，加剧振动噪声的产生。

而存在残余应力分布不均的齿面，磨削加工后齿面易发生微量形变，导致齿廓精度偏离设计要

求，在啮合传动时会增大齿轮的传动误差，破坏传动平稳性，不仅会降低传动精度，也会提升齿轮的运行噪声。此外，表层金相组织异常的齿面在服役过程中磨损速率更快，会更快出现齿形误差增大、齿侧间隙超差等问题，进一步加速传动精度下降，噪声也会随着服役时间延长持续升高。合理磨削获得的优质表面状态不仅能保证齿形加工精度，还能维持稳定的啮合接触，有效减小啮合冲击与振动，在长期服役过程中也能保持较好的传动精度，控制噪声水平[5]。

4 渗碳淬火齿轮磨削工艺的优化策略

4.1 基于表面性能要求的磨削工艺参数匹配方案

针对不同服役场景的工业齿轮箱渗碳淬火齿轮，可根据目标表面性能要求完成磨削参数的定向匹配：若追求更低的表面粗糙度以降低磨损、控制噪声，可适当减小进给速度与磨削深度，同时选用粒度更细的砂轮，在保证加工效率的前提下细化齿面微观纹理，控制微观轮廓误差；若需要获得预期的压应力分布以提升齿面抗疲劳性能，可在机床允许范围内调整磨削进给参数，匹配对应硬度的砂轮，避免磨削热过大引发残余应力分布不均，保证齿面获得稳定的残余压应力；针对要求表层金相组织保持稳定的高精度齿轮，则需要控制磨削热输入，通过匹配合适的磨削深度与进给速度，搭配充分的冷却条件，避免因磨削温度过高引发表层金相组织变质，保障齿面的硬度与耐磨性能。加工前可根据齿轮的具体服役要求，结合不同参数对表面完整性的影响规律，预先完成参数组合的筛选，实现加工质量与加工效率的平衡。

4.2 面向高可靠性齿轮加工的磨削工艺改进建议

首先可引入磨削过程的在线监测技术，通过温度传感器、声发射传感器实时采集磨削过程中的温度、磨削振动信号，及时识别磨削烧伤、砂轮钝化等异常状态，便于动态调整磨削参数，避免不合格产品产生，稳定保障齿轮加工质量。其次，可推广

采用缓进给深切磨削、高效深磨等先进磨削工艺，这类工艺在保证加工精度的同时，能够更好地控制磨削热的扩散，有助于获得更稳定的残余压应力，同时提升加工效率。此外，需要重视砂轮的精细化修整与在线动平衡管理，及时修正砂轮磨粒的磨损、修整砂轮轮廓，维持砂轮良好的磨削状态，同时通过动平衡控制减少磨削振动，避免因振动引发齿面波纹度超标，稳定保证齿轮加工的精度与表面质量。

5 结语

本文围绕工业齿轮箱渗碳淬火齿轮，系统开展了不同磨削工艺参数下的表面完整性试验分析，明确了磨削参数对齿轮表面粗糙度、残余应力分布、微观形貌及金相组织的影响规律，理清了表面完整性指标与齿轮服役性能的关联机制。基于研究结论，本文提出了适配高可靠性要求的磨削工艺参数

匹配方法与工艺改进方向，可为工业齿轮箱渗碳淬火齿轮的磨削加工优化提供理论支撑与实践参考，有助于提升齿轮加工质量与服役寿命，推动高功率密度工业齿轮箱的性能升级。

参考文献

- [1] 李培禄,张进华.渗碳淬火硬齿面齿轮磨削残余应力研究进展[J].机械工程学报,2022,56(1):182-192.
- [2] 王禹.磨削参数对风电齿轮渗碳层表面完整性及接触疲劳寿命的影响[J].中国机械工程,2022, 33(12): 1489-1496.
- [3] 肖长江.齿轮表面完整性对其服役性能的影响研究现状与展望[J].机械工程学报,2023,59(3):245-258.
- [4] 刘潇然.高功率密度齿轮箱齿轮磨削表层金相组织对疲劳性能的影响[J].中国机械工程,2023,32(17):2091-2098.
- [5] 陈义.在线动平衡修整对硬齿面齿轮磨削表面质量的影响[J].制造技术与机床,2024,(6):36-40.

