

The Influence of Heat Treatment Process on the Wear Resistance and Thermal Fatigue Performance of Mechanical Gears

Jianwen Li

BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen, Guangdong, 518122, China

Abstract

The paper mainly explores the influence of heat treatment processes on the wear resistance and thermal fatigue performance of mechanical gears. In the specific analysis, the influence of different heat treatment processes on the properties of gear materials will be explored first. Then, through designing experimental methods, 17CrNiMoV steel mechanical gears will be selected as the research object, and different induction quenching and composite heat treatment processes will be set to clarify their effects on the wear resistance and thermal fatigue performance of gears. According to the final experimental results, in order to ensure the performance of the gear, a composite heat treatment process of 150kW induction quenching and deep cold treatment should be adopted. To verify the actual influence of the heat treatment process on the wear resistance and thermal fatigue performance of the gear, as well as the optimal process, this paper will study it through experimental design.

Keywords

heat treatment process; mechanical gear; wear resistance; thermal fatigue performance

热处理工艺对机械齿轮耐磨和热疲劳性能的影响

黎健文

比亚迪汽车工业有限公司, 中国·广东深圳 518122

摘要

论文主要针对热处理工艺对机械齿轮耐磨性和热疲劳性能影响进行探究, 具体分析中将首先对不同热处理工艺对齿轮材料性能的影响进行探究, 随后通过设计实验方式, 选取17CrNiMoV钢机械齿轮作为研究对象, 设定采用不同感应淬火与复合热处理工艺, 明确其对齿轮耐磨性能以及热疲劳性能的影响。由最终实验结果可知, 为保障齿轮性能, 应采用150kW感应淬火后深冷处理的复合热处理工艺, 为验证热处理工艺对齿轮耐磨以及热疲劳性能的实际影响以及最优工艺, 论文研究中将通过设计实验方式对其进行研究。

关键词

热处理工艺; 机械齿轮; 耐磨性能; 热疲劳性能

1 引言

机械齿轮作为传动系统中的重要组成部分, 其性能直接对机械系统整体运行效率和可靠性造成影响。在实际应用中, 机械齿轮通常需承受复杂工况条件, 如高负载、高速运转以及频繁的温度变化等, 相关因素均会对齿轮耐磨性以及热疲劳性能提出相应挑战。由此提高机械齿轮耐磨性以及热疲劳性能, 在延长机械系统使用寿命、降低维护成本方面具有重要现实意义。而热处理工艺作为改善金属材料性能的重要手段之一, 其被广泛应用于机械齿轮的制造过程中。通过对加热温度、保温时间、冷却速度等热处理工艺参数进行控制, 可有效实现对齿轮材料微观组织进行精确调控目标, 进而有效实现优化齿轮力学性能目标。

【作者简介】黎健文(1982-), 男, 中国广东江门人, 本科, 工程师, 从事热能与动力工程研究。

2 热处理工艺对齿轮材料性能的影响分析

受金属固有属性多样性以及齿轮材料内在不稳定性影响, 热处理作为提升材料性能的关键步骤, 其不可避免地会对齿轮力学性能、耐磨性、抗疲劳强度等多方面造成较大影响, 且不论采用何种制造工艺, 均难以完全规避技术本身对齿轮最终质量的潜在作用。

2.1 正火工艺的影响

正火工艺作为热锻成型后的重要热处理步骤, 其对齿轮材料微观结构及性能调控方面发挥至关重要的作用。考虑到正火过程中对温度、时间控制存在较为严格的要求, 同时此环节处理中对外部环境因素较为敏感, 由此制定精细化的操作方案具有重要意义^[1]。通过精确控制正火温度以及随后的冷却速率, 可以有效避免组织结构生成粒状贝氏体和针状铁素体等, 进而最大化发挥材料固有优势, 减少环境因素对材料性能造成的负面影响。

2.2 渗碳工艺的影响

渗碳热处理是齿轮从锻坯到成品的转变的关键环节。该过程直接对齿轮综合机械性能造成影响，具体包括强度、硬度及韧性等关键指标。为有效达成预期性能标准，实际作业中必须对渗碳工艺中的温度控制、碳浓度选择、淬火介质及温度优化进行重点控制。渗碳参数设置不科学可能会导致网状碳化物过度形成，进而诱发齿轮裂纹等质量问题，严重影响产品质量。由此深入研究并精确调控渗碳工艺参数，是保障齿轮性能达标的关键。

2.3 淬火工艺的影响

淬火过程中的温度、介质及时间控制是齿轮性能控制的主要难点。针对齿轮的多样化外形特征，需对淬火工艺实际应用方案进行灵活调整以满足不同部位冷却需求，切实避免因冷却速度过快或过慢导致的裂纹或形变问题发生。此外，淬火后的回火处理也需进行精心设计，以切实降低热应力，并进一步提升齿轮耐用性和可靠性。此即要求淬火工艺在技术从呢过面具备高度的灵活性以及精确性。

2.4 回火工艺的影响

在齿轮制造的最终阶段，低温回火处理不仅可有效巩固渗碳和淬火环节效果，同时还可有效提升齿轮强韧性以及使用寿命。该过程可有效缓解热处理过程中产生的内应力，切实增强材料稳定性，为齿轮在实际工作中的长期稳定运行奠定坚实保障^[2]。同时，优化回火工艺也可显著增强产品安全性，进行有效保障使用者的利益。

总而言之，金属齿轮热处理过程属于复杂而精细的系统工程，其涉及多个工艺环节协同作用。通过对正火、渗碳、淬火及回火等关键工艺进行深入理解和精确控制，可最大限度地发挥金属材料实际潜能，切实提升齿轮综合性能，并满足日益严苛的应用需求。

3 试验设计

本次试验研究中主要采用 17CrNiMoV 钢制机械齿轮为研究对象，其外观形态如图 1 所示。该型号齿轮规格为：模数 12、齿数 20 及齿厚 10mm。其具体化学成分构成（以质量百分比计）主要涵盖以下元素：碳（C）0.18%、硅（Si）0.23%、锰（Mn）0.51%、铬（Cr）1.55%、镍（Ni）1.47%、钼（Mo）0.98%、钒（V）1.06%，以及微量的硫（S）0.004%和磷（P）0.013%，剩余部分为铁（Fe）基体。



图 1 机械齿轮外形及取样位置

该齿轮的热处理流程主要采用箱式热处理炉实施，具体工艺细节可参见表 1。在感应淬火阶段，技术人员确保移动速度、加热功率密度 $55.25\text{kW} \cdot \text{s}/\text{mm}$ ，以及冷却水流速 $25\text{L}/\text{min}$ 等指标保持不变。同时采用特制的、浓度为 5% 的聚合物溶液作为淬火介质，并保障喷水装置与试件保持 50mm 的恒定距离。

为深入探究不同热处理工艺对 17CrNiMoV 钢齿轮性能的影响，此次试验中依照图 1 所示位置进行精确取样，并在此基础上开展磨损试验与热疲劳试验。为切实提高数据可靠性，所有测试均基于三个独立试样平均结果。磨损与热疲劳试验的样本均被设计为统一的圆柱状，规格为直径 25mm，高度 5mm。

所有试验均在标准室温条件下进行，其中磨损性能测试主要利用 MG1000 型摩擦磨损测试仪进行，设定磨轮转速为 $220\text{r}/\text{min}$ ，持续时间为 10min，相对滑动速度设定为 $90\text{mm}/\text{min}$ ，加载力设定为 100N，对磨材料为试样自身。磨损试验结束后，试验人员将采用 JSM6510 型高分辨率扫描电子显微镜，对试样表面形貌细微变化进行细致分析。

在热疲劳测试方面，设定利用硅碳棒作为加热源，采用辐射加热方式，在 $25^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 温度区间内进行循环加热与冷却共 1000 次。每次加热至 500°C 后保持 30s，随后迅速浸入流动冷水中骤冷至 25°C 。完成测试后，利用精密光学显微镜准确测量并记录试样主裂纹平均尺寸，具备内容包括深度和宽度。

4 试验结果与讨论

通过对不同热处理工艺对 17CrNiMoV 机械齿轮材料耐磨性能影响进行分析可得出如图 2 所示结果。

表 1 机械齿轮热处理工艺

试样	热处理工艺	具体工艺参数
1#	120kW 感应淬火	加热功率 120kW、移动速度 2.5min/s、加热工速比 $55.25\text{kW} \cdot \text{s}/\text{mm}$ 、冷却水流程 25L/min
2#	140kW 感应淬火	加热功率 140kW、移动速度 2.5min/s、加热工速比 $55.25\text{kW} \cdot \text{s}/\text{mm}$ 、冷却水流程 25L/min
3#	150kW 感应淬火	加热功率 150kW、移动速度 2.5min/s、加热工速比 $55.25\text{kW} \cdot \text{s}/\text{mm}$ 、冷却水流程 25L/min
4#	160kW 感应淬火	加热功率 160kW、移动速度 2.5min/s、加热工速比 $55.25\text{kW} \cdot \text{s}/\text{mm}$ 、冷却水流程 25L/min
5#	复合热处理	150kW 感应淬火（工艺同 3#）后深冷处理（ $-196^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ ）

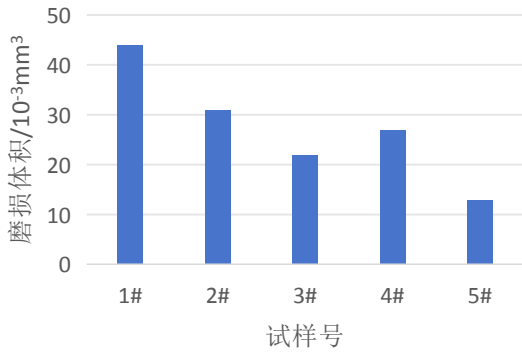


图2 不同工艺热处理试样磨损试验结果

由图2结果可知,当选择传统感应淬火作为热处理方式时,加热功率精细调控成为优化耐磨性能的核心要素。由实验数据结果可知,随着加热功率从120kW逐步提升至160kW,试样磨损行为呈现出显著先改善后恶化趋势。具体而言,在120kW加热功率作用下,试样磨损体积达到峰值,说明此时耐磨性能处于最低水平;而当加热功率提升至150kW时,试样磨损体积显著减少至最小值,相应耐磨性能达到最优状态。需注意的是,与120kW条件下的1#试样相比,150kW处理下的3#试样其磨损体积降低程度达到50%左右,整体减少约 $22 \times 10^3 \text{mm}^2$ 左右,该变化有效显现出加热功率优化的重要性,在常规感应淬火时应优先选优150kW加热效率。

通过对图2所示数据进行深入分析可知,感应淬火与深冷处理相结合的复合工艺在提升17CrNiMoV齿轮试样耐磨性能方面效果显著。相较于单独采用优化后的常规感应淬火(3#试样),复合热处理工艺(5#试样)在减少磨损体积方面表现出更优越性能,磨损体积减小由 $22 \times 10^3 \text{mm}^3$ 降低到 $13 \times 10^3 \text{mm}^3$,减幅达到41%,该数据结果充分证明

复合热处理在增强材料耐磨性方面具有独特优势。由此从提高耐磨性能角度出发,150kW感应淬火后辅以深冷处理的复合热处理工艺应为17CrNiMoV机械齿轮首选热处理方案^[3]。

5 结语

由试验研究结果可得出如下结论:①在常规感应淬火技术情况下,随着加热功率由120kW提升至160kW,17CrNiMoV机械齿轮磨损体积以及主裂纹的平均尺寸,均呈现出先优化后恶化趋势,齿轮耐磨性和抵抗热疲劳性能呈现先增强后减弱趋势。相较120kW加热功率下的试样表现,采用150kW进行感应淬火可显著将齿轮磨损体积降低约50%左右,同时主裂纹平均深度以及宽度也分别减少约47%和50%,表现出显著改善。②在传统150kW感应淬火基础上,引入深冷处理的复合热处理技术,所取得的效果更为优越,应用该工艺情况下,17CrNiMoV机械齿轮磨损体积再度大幅缩减,降低比例达到41%;主裂纹平均深度和宽度也分别减少35%和43%,此显著提升齿轮耐磨性以及热疲劳抵抗能力。③为最大限度地提升17CrNiMoV机械齿轮在耐磨性以及热疲劳抗性方面的表现,建议采用150kW感应淬火与深冷处理工艺相结合方式进行。此复合工艺不仅在各项性能指标上展现出更优越表现,同时可有效提升齿轮整体质量。

参考文献

- [1] 杨少朋,胡芳忠,尉文超,等.Nb微合金化对渗碳齿轮钢组织演变及接触疲劳性能的影响[J].表面技术,2022,51(1):10.
- [2] 刘怀举,张博宇,朱才朝,等.齿轮接触疲劳理论研究进展[J].机械工程学报,2022,58(3):95-120.
- [3] 张宵璐,海侠女,桂伟民,等.渗碳齿轮钢18CrNiMo7-6的疲劳性能及其影响因素[J].金属热处理,2023,48(1):60-67.