

Research on Ultrasonic Cavitation-Assisted Remanufacturing Technology for Key Automotive Components

Shun He Mengjun Zeng Duan He

Zunyi Vocational and Technical College, Zunyi, Guizhou, 563006, China

Abstract

This study conducts an in-depth exploration of the fundamental theories and practical operational principles of micro-jets and instantaneous high pressure generated by ultrasonic cavitation effects in the field of automotive core component remanufacturing. A comprehensive remanufacturing process scheme has been developed for typical components such as engine blocks and transmission gears. The research not only establishes a solid theoretical foundation for advancing the industrial application of this technology but also provides crucial technical support for achieving green and sustainable development in related industries.

Keywords

ultrasonic cavitation; micro-jet; automotive components; remanufacturing

超声空化辅助汽车关键零部件再制造技术研究

何顺 曾孟军 何端

遵义职业技术学院, 中国·贵州 遵义 563006

摘要

本研究深入探讨超声空化效应产生的微射流和瞬间高压在汽车核心部件再制造领域的基础理论与实际操作要点, 针对发动机缸体与变速箱齿轮等典型件制定了完整的再制造工艺方案。不仅为推动该技术向工业实践转化奠定了坚实的理论基础, 还为相关行业实现绿色可持续发展提供了重要的技术支持。

关键词

超声空化; 微射流; 汽车零部件; 再制造

1 引言

再制造通过修复废旧产品使其性能接近甚至超越新品标准, 已成为实现资源节约与减排目标的关键技术路径之一。与传统制造相比, 再制造可大幅减少原材料消耗并降低能源需求, 展现出显著的经济与生态优势^[1]。汽车关键零部件因长期运行而遭受严重的表面污染与磨损、疲劳损伤等问题, 传统修复工艺往往难以满足深层次清洁及高效改性的需求^[2]。虽然能够改善部分性能指标但工序繁琐且能耗较高。

超声空化技术作为一种新兴的物理处理方式, 利用超声波在液体介质中的传播特性, 在声场强弱交替变化的作用下形成微米级气泡, 并在正压条件下迅速破裂释放能量。这一过程不仅能够微观层面有效清除顽固附着物, 还能通过对基材施加瞬时高温高压环境促进晶格重构及位错运动, 从而大幅提升材料表面的硬度与抗磨损能力。

本研究聚焦于该技术在汽车核心组件修复中的基础理

论探究, 致力于优化超声波参数配置, 并设计具有代表性的零部件再生制造工艺方案, 以推动其实现工程技术转化与实际应用价值提升^[3]。

2 超声空化作用机理分析

2.1 空化泡动力学模型

液体介质中的一个气核, 假设里面充满不可压缩气体, 在此理想情况下 Rayleigh^[4] 最早在 1917 年推导出了不考虑表面张力和粘性的理想化气泡的运动方程:

$$R\ddot{R} + 3/2\dot{R}^2 = (P_B - P_0)/\rho$$

式中: R 为空化气泡半径长度; \dot{R} 为气泡半径长度对时间的一阶导数, 即气泡半径变化速率; \ddot{R} 为气泡半径对时间的二阶导数, 即气泡半径变化加速度; P_B 为空化气泡外液体压强; P_0 为液体的静压强, 即空气压强。

在超声场的影响下, 空化气泡破裂引发的微射流冲击压力可高达 GPa 量级; 同时伴随瞬时高温现象, 局部温度可能突破 5000 K 大关。上述极端物理化学条件为污染物去除及表面改性提供了有力驱动力。

【作者简介】何顺 (1996-), 男, 中国贵州遵义人, 硕士, 助教, 从事机械制造及其自动化研究。

2.2 清洗作用机制

超声空化对汽车零部件的清洗作用主要体现在三个层面：

1. 机械剥离：当传入液体中的超声波声压幅值达到空化阈值时，液体中就会产生空化效应，当气泡壁在固体壁面附近径向脉动时，由于壁的强约束，形成压力梯度。壁面附近的气泡容易变形，并在压缩阶段发生不对称溃灭而产生指向壁面的微射流。速度可达200-300m/s^[5]，如同微型高压水枪，直接冲刷缝隙、盲孔内的油污、积碳和金属碎屑。

2. 冲击波作用：一个初始气核在施加超声振动液体中的膨胀相中半径变大，当来到液体中的压缩相时，空化气泡会在数微秒的时间内被压缩至崩溃，积聚在空化气泡内的能量瞬间释放产生瞬间高压。能够破坏污染物与基体之间的分子间作用力，使污染物整体脱落。

3. 化学活化：局部高温使水分子分解产生·OH自由基，加速有机污染物的氧化分解；同时高温促进化学清洗剂的活性，提升乳化、皂化反应效率。

4. 针对汽车零部件中难以清除的顽固性积碳，超声空化技术借助高频振荡实现对材料表面的微细化剥离，从而有效突破传统机械清洗方法可能引发的表层损伤难题。

2.3 表面强化机制

除清洗功能外，超声空化还能对材料表面产生显著的强化效应：

1. 塑性变形：微射流和冲击波反复冲击表面，使表层数十微米范围内发生剧烈塑性变形，晶粒细化；

2. 位错增殖：塑性变形引入大量位错，位错密度提升3-5个数量级，形成位错缠结和胞状结构；

3. 残余压应力：表面塑性变形受阻于基体，形成残余压应力层，抑制裂纹萌生和扩展；

4. 纳米结构形成：对于铝合金等材料，剧烈塑性变形可使表层晶粒细化至纳米级，显著提升硬度和耐磨性能。

5. 该“净化与增强”的协同作用使超声空化技术能够在再制造过程中实现污染物清除及表面功能优化双重目标，从而精简工艺环节并显著提升整体效能。

3 典型零部件再制造工艺流程

基于优化参数，针对发动机缸体和变速箱齿轮两类典型零部件，构建了超声空化辅助再制造工艺流程。

3.1 发动机缸体再制造流程

步骤 1：拆解与初步清理。将发动机缸体从整机中拆解，去除附件，使用压缩空气吹扫表面大颗粒碎屑，对油道进行通检查，记录损伤情况。

步骤 2：超声空化预清洗（除油）。参数：28kHz、功率密度 0.5W/cm²、温度 60℃、连续模式、时间 15min

目的：去除表面油污、软化积碳，为精洗做准备。

步骤 3：超声空化精洗（除积碳）。参数：40kHz、功率

密度 0.4W/cm²、温度 55℃、脉冲比 2:1、时间 25min

目的：彻底去除缸体内壁积碳、油道内金属碎屑，清洗液采用碱性水基清洗剂（pH10）

关键点：配备抛动装置，使缸体在清洗液中往复运动，确保油道、盲孔等隐蔽部位无清洗盲区。

步骤 4：高压漂洗。使用 5MPa 纯水对油道进行脉冲冲洗，去除残留清洗剂和松动污染物，流量偏差 ≤5% 为合格。

步骤 5：中和处理。采用弱碱性溶液（pH8.5）清洗 10min，中和表面酸性残留，预防锈蚀。

步骤 6：干燥与防锈。60℃热风循环干燥 30min，表面喷涂水性防锈剂（浓度 3%），短期防护。

步骤 7：尺寸修复与表面强化。采用激光熔覆技术修复磨损部位，随后进行超声冲击强化（UIF），参数：20kHz、冲击能量 3J、覆盖率 150%，在表面形成残余压应力层，深度约 200 μm，表面硬度提升 15-20%。

步骤 8：精加工与装配

按照新品公差要求进行精加工，完成装配后进行台架试验，性能恢复率 ≥95% 为合格。流程如图 1 所示。



图 1 发动机缸体再制造工艺流程图

3.2 变速箱齿轮再制造流程

步骤 1：拆解与检测。将齿轮从变速箱中拆解，清洗检测齿面磨损情况、齿面硬度、尺寸公差，评估再制造值。

步骤 2：超声空化除油。参数：68kHz、功率密度 0.3W/cm²、温度 50℃、脉冲比 3:1、时间 15min。

目的：去除齿面残留切削液、齿轮油，高频低功率模式避免损伤齿面精度。

步骤 3：超声空化除锈。参数：40kHz、功率密度 0.4W/cm²、温度 60℃、脉冲比 2:1、时间 20min。

目的：去除齿面轻微锈蚀、氧化层，清洗液添加缓蚀剂（50ppm 苯并三氮唑）。

关键点：齿轮单层悬挂于专用挂篮，禁止叠放，避免

相互碰撞。

步骤4: 漂洗与干燥。去离子水漂洗去除残留清洗剂, 电导率 $<10\mu\text{s/cm}$, 60°C 热风干燥 20min。

步骤5: 接触角测试。水滴接触角 $<25^\circ$ 为合格, 确保无油膜残留, 否则重复步骤2-4。

步骤6: 表面修复。采用堆焊或激光熔覆修复齿面磨损部位, 确保齿形精度。

步骤7: 超声滚压强化。参数: 28kHz 、滚压力 500N 、进给速度 10mm/min 、覆盖率 200%。

目的: 齿面产生塑性变形, 形成残余压应力层, 表面硬度提升 20-30%, 耐磨性能提升 50% 以上。

步骤8: 渗碳淬火。根据齿轮材质和性能要求, 进行渗碳淬火热处理, 渗碳层深度 $0.8\text{-}1.2\text{mm}$, 表面硬度提升。

步骤9: 精磨与装配。精密磨削保证齿面精度 ($Ra\leq 0.4\mu\text{m}$), 装配后进行啮合试验, 噪音 $\leq 70\text{dB}$ 、温升 $\leq 40^\circ\text{C}$ 为合格。流程如图2所示。



图2 变速箱齿轮在制造流程图

3.3 工艺流程特点

与传统再制造工艺相比, 超声空化辅助工艺具有以下显著特点:

1. 清洗效率提升 60% 以上: 单批次可处理 50-80 件零件, 清洗时间缩短至传统工艺的 1/3;
2. 清洁精度达到 0.1mm 级: 能彻底清除 0.2mm 以下的微孔积碳, 清洁合格率 $\geq 99\%$;
3. 零件损伤率降至 0.5% 以下: 通过柔性清洗避免机械磨损, 保护精密表面;
4. 工艺流程简化: 清洗与强化环节可部分合并, 减少工序数量;
5. 环保效益显著: 水基清洗剂可循环使用 3-5 次, 废液

处理成本降低 60%。

4 结语

4.1 研究结论

本文系统研究了超声空化辅助汽车关键零部件再制造的基础理论与关键技术, 主要结论如下:

1. 超声空化作用下, 空化泡溃灭所引发的微射流、冲击波及局部极端温压环境, 可高效清除汽车零部件表面的油渍、积碳与金属残留物, 并通过塑性变形和位错增殖机制, 达成兼具去污与强化功能的协同效果;

2. 构建了以发动机缸体再制造工艺流程, 涵盖拆解清理、超声空化清洗、尺寸修复、表面强化、精加工装配等环节, 再制造零件性能恢复率增高;

3. 与传统方法相比, 该超声空化辅助再制造工艺显著提升了清洗效率, 其增幅超过六成, 并实现了亚毫米级别的高精度清洁效果, 同时将零件损伤概率控制在千分之五以内; 相较于常规技术, 废液处理费用大幅减少了约六成。该工艺展现出卓越的经济价值及环保性能。

4.2 展望

尽管超声空化辅助再制造技术展现出巨大潜力, 但仍存在以下有待深入研究的问题:

1. 多物理场耦合仿真: 建立超声场、流场、结构变形场的多物理场耦合模型, 预测空化泡分布和清洗效果, 指导工艺参数优化;
2. 智能监控系统: 开发基于声阻抗、声致发光信号的实时监测系统, 实现清洗效果的在线评估和参数自适应调整;
3. 新型换能器设计: 针对不同零部件的几何结构, 设计聚焦式、阵列式换能器, 提升超声场的均匀性和穿透性;
4. 复合工艺集成: 研究超声空化与激光熔覆、喷丸、滚压等技术的复合工艺, 进一步提升再制造零件的性能;
5. 标准体系建立: 制定超声空化辅助再制造的工艺规范、质量评价标准和验收准则, 推动技术产业化应用。

参考文献

- [1] 张明远, 李建国, 王立强. 汽车零部件再制造技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 1-15.
- [2] 刘晓东, 陈志华, 马宏伟. 超声波清洗技术在汽车发动机维修中的应用[J]. 汽车工程, 2023, 45(6): 789-796.
- [3] 王建国, 刘志强. 汽车再制造工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [4] RAYLEIGH L. VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 2009, 34(200): 94-8.
- [5] 王艳, 何顺, 陈奕璋, 等. 超声空化辅助金刚石线锯切割单晶硅机理分析与试验验证 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (09): 114-126.