机械传动部件磨损故障及钳工修复工艺改进研究

张红运　李长玉

安阳钢铁股份有限公司运输作业部　河南　安阳　455004

摘　要：机械传动部件在长期运行中不可避免产生磨损，直接影响设备精度、可靠性与使用寿命。本文针对齿轮、轴类、轴承、联轴器等典型传动部件的磨损故障，系统分析了磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损与腐蚀磨损的形成机理及影响因素，归纳了磨损故障的诊断方法与判定标准。在此基础上，从钳工修复工艺角度，探讨了传统修复方法（补焊、镶套、研磨、刮研）的适用条件与局限，提出了表面强化、尺寸恢复与精度修整相结合的工艺改进方案，并结合实际修复案例验证了改进工艺的效果。结果表明，优化后的钳工修复工艺可有效恢复传动部件尺寸精度与配合性能，延长使用寿命，降低维修成本。

关键词：机械传动部件；磨损故障；钳工修复；工艺改进

引言：机械传动部件是各类机械设备的核心组成部分，其运行状态直接决定设备的整体性能与生产效率。在长期服役过程中，齿轮、轴、轴承、联轴器等传动部件因承受交变载荷、相对运动与恶劣工况，不可避免地产生磨损，进而导致振动加剧、噪声增大、精度下降甚至突发失效。钳工修复作为设备维修的重要手段，具有成本低、周期短、适用性强的优势，在传动部件修复中应用广泛。随着设备向高精度、高可靠性方向发展，对钳工修复工艺提出了更高要求。本文在分析传动部件磨损机理与故障诊断方法的基础上，重点探讨钳工修复工艺的改进措施，并结合实际案例验证改进效果，为设备维修实践提供参考。

1 机械传动部件磨损故障机理与诊断

1.1 典型传动部件磨损形式与特征

机械传动部件的磨损形式因部件类型与工况不同而存在差异。齿轮磨损主要表现为齿面磨粒磨损、点蚀、胶合与齿端磨损，其中点蚀多发生在齿面节线附近，胶合则常见于高速重载工况。轴类零件磨损主要集中在轴颈与轴承配合面，表现为直径减小、圆度与圆柱度超差。轴承磨损包括滚动体与滚道磨损、保持架磨损，严重时出现剥落与卡死。联轴器磨损则以齿式联轴器齿面磨损、弹性元件老化为主。此外，键连接、花键连接等也常因微动磨损导致配合松动。各类磨损形式虽表现不同，但均会导致配合间隙增大、传动精度下降、振动与噪声上升。

1.2 磨损形成机理与影响因素

传动部件磨损的形成机理主要包括磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损与腐蚀磨损四类。磨粒磨损由硬质颗粒进入摩擦副引起，如粉尘、金属屑等，其磨损速率与颗粒硬度、尺寸及载荷相关。粘着磨损发生在润滑不良或局部高温条件下，摩擦副表面微凸体焊合后撕裂，形成材料转移。疲劳磨损源于交变接触应力反复作用，表面或次表面产生裂纹，扩展后形成点蚀或剥落。腐蚀磨损则由润滑剂变质、水分侵入或环境腐蚀介质引起。影响磨损的关键因素包括载荷大小与性质、相对滑动速度、润滑状态、材料硬度与表面质量、工作温度及环境清洁度等。合理控制这些因素，可显著减缓磨损进程[1]。

1.3 磨损故障诊断方法与判定标准

磨损故障诊断应结合振动分析、油液分析、温度监测与性能参数检测等手段。振动分析通过频谱特征识别齿轮啮合频率、轴承故障频率，判断磨损部位与程度；油液分析通过检测润滑油中铁谱含量、颗粒尺寸分布，评估磨损速率与类型；温度监测可发现润滑不良或过载引起的异常温升；性能参数检测则通过传动精度、噪声、效率等指标变化反映磨损状态。判定标准应综合振动烈度、油液金属含量、间隙增量等参数，划分轻微、中等、严重三个等级，分别对应继续使用、计划维修与立即停机处理，为修复决策提供依据。

2 钳工修复工艺现状与传统方法分析

2.1 钳工修复的基本流程与适用条件

钳工修复的基本流程包括故障检测与评估、拆卸与清洗、尺寸测量与损伤确认、修复方案制定、修复加工与精度检验、装配与试运行。其适用条件为：部件磨损量未超过修复极限、基体材料未产生严重疲劳裂纹、修

复后能满足使用精度要求。对于磨损量过大、基体损伤严重或修复经济性差的部件，应考虑更换而非修复。钳工修复的优势在于设备简单、操作灵活、成本较低，尤其适用于单件或小批量修复，但修复精度受操作者技能水平影响较大。

2.2 传统修复方法及其局限性

传统钳工修复方法主要包括补焊修复、镶套修复、研磨修复与刮研修复。补焊修复适用于轴颈、齿面局部磨损，通过堆焊恢复尺寸后再加工，但焊接热影响区易产生裂纹与变形。镶套修复适用于轴颈磨损，通过加工新套并压装恢复配合尺寸，但套与轴的结合强度与同心度需严格控制。研磨修复用于恢复表面精度与配合间隙，但对操作者手法要求高，效率较低。刮研修复用于恢复滑动配合面的接触精度，但劳动强度大、周期长。上述方法的共同局限在于：修复精度依赖经验、工艺参数缺乏量化控制、修复层与基体结合性能不稳定、修复后寿命往往低于原部件[2]。

2.3 修复质量评价指标体系

修复质量评价应从尺寸精度、形位精度、表面质量、结合强度与使用寿命五个方面建立指标体系。尺寸精度包括修复后直径、宽度等尺寸偏差；形位精度包括圆度、圆柱度、同轴度、平行度等；表面质量包括表面粗糙度、硬度与残余应力；结合强度针对补焊、喷涂等修复层，评估其与基体的结合力；使用寿命则通过修复后运行时间与磨损速率评估。评价方法可采用测量检测、无损探伤、硬度测试与台架试验相结合，确保修复质量满足使用要求。

3 钳工修复工艺改进方案

3.1 修复前检测与评估工艺改进

修复前检测的准确性直接决定修复方案的有效性与经济性，是避免盲目修复和二次损伤的首要环节。传统检测多依赖卡尺、千分尺等单点测量工具，难以全面反映磨损部位的实际形貌与磨损量分布，容易造成修复方案偏差。改进措施首先引入三维扫描仪或激光测量仪对磨损部位进行精确测绘，获取磨损量分布云图，直观呈现磨损深度、范围与形态，为修复量确定提供量化依据。其次采用超声波探伤或磁粉探伤检测基体裂纹、夹渣与内部缺陷，避免修复后因基体隐患导致失效。同时采用硬度计检测基体硬度，为修复材料选择与工艺参数制定提供基础数据。此外建立修复评估数据库，将检测数据与历史修复记录对比分析，量化判定修复可行性与预期寿命。通过检测工艺改进，可实现修复方案的精准制定，减少盲目修复导致的二次损伤，提高一次修复成功率。

3.2 表面强化与尺寸恢复工艺改进

尺寸恢复是钳工修复的核心环节，其质量直接决定修复后部件的配合性能与使用寿命。传统补焊修复存在热影响区大、变形明显、结合强度不稳定等缺陷，改进方向为表面强化与尺寸恢复相结合。对于轴类零件，可采用电弧喷涂、等离子喷涂或激光熔覆技术，在磨损表面制备耐磨涂层，既恢复尺寸又提升表面硬度与耐磨性。相比传统补焊，喷涂与熔覆热输入小、变形小、结合强度高，尤其激光熔覆可实现冶金结合，稀释率低，修复层性能接近甚至优于基体。对于齿轮齿面，可采用激光淬火或渗氮处理，提高齿面硬度与疲劳强度，延缓点蚀与胶合发生[3]。对于轴承配合面，可采用电刷镀技术，实现局部精确修复，镀层厚度可控、结合牢固。修复材料选择应与基体材料匹配，兼顾结合强度与耐磨性能。修复后进行精加工与抛光，确保尺寸精度与表面粗糙度达标。

3.3 精度修整与装配工艺改进

修复后的精度修整与装配质量控制是保证配合性能与运行可靠性的关键环节。传统手工锉削、刮研依赖操作者经验，精度一致性差、效率低。改进措施包括：采用精密磨削或研磨替代手工锉削，提高尺寸精度与表面质量，尺寸精度可达 IT6~IT7 级；采用专用工装保证修复部位与基准的同轴度、平行度，避免装夹误差；采用压装力-位移曲线监控镶套或轴承装配过程，实时判断压装质量，确保装配一致性；采用间隙测量仪精确控制配合间隙，避免过盈量过大导致装配损伤或过松导致松动。装配工艺方面，应严格控制清洗、加热、压装、紧固等环节，采用扭矩扳手与加热炉保证装配参数准确，加热温度与保温时间按材料与过盈量确定。装配后进行空载与负载试运行，检测振动、噪声、温升等指标，验证修复效果，确保设备运行平稳可靠。

3.4 工艺参数优化与质量控制体系

工艺参数优化应基于试验与数据分析，建立修复工艺参数库，实现工艺参数的量化控制与稳定复现。以激光熔覆为例，需优化激光功率、扫描速度、送粉速率、搭接率、光斑直径等参数，确保熔覆层与基体冶金结合良好、稀释率低、无裂纹气孔。以电刷镀为例，需优化电压、电流密度、镀液浓度、相对运动速度、镀笔压力等参数，保证镀层均匀致密、结合力强。以喷涂为例，需优化喷涂距离、喷枪角度、送粉气流量、基体预热温

度等参数。质量控制体系应涵盖修复全过程：修复前检测记录、修复过程参数记录、修复后检验记录，形成可追溯的质量档案。同时建立修复工艺标准与操作规程，明确各工序的技术要求与检验方法，减少人为因素影响，提高修复质量的一致性，为传动部件修复提供可靠的技术保障。

4 修复工艺应用案例与效果验证

4.1 案例一：减速机齿轮轴磨损修复

某钢厂减速机齿轮轴轴颈在长期运行中出现磨损，实测直径减少 0.35mm，圆度超差 0.05mm，齿面伴随轻微点蚀。原修复方案采用补焊后车削，但补焊热影响区大，焊接变形导致同轴度超差，修复后运行不足 6 个月即再次出现振动超标。改进方案采用激光熔覆恢复尺寸，熔覆材料为镍基合金粉末，熔覆层厚度 0.5mm，分两层熔覆以控制稀释率与内应力，熔覆后磨削至设计尺寸。修复后检测：直径偏差 ±0.01mm，圆度 0.008mm，表面硬度 HRC55，同轴度 0.015mm，均满足设计要求。装机运行 12 个月后复检，磨损量仅 0.02mm，使用寿命达到原补焊方案的 2 倍，修复效果显著。

4.2 案例二：大型轴承配合面磨损修复

某矿山设备大型轴承配合面在长期重载运行中出现磨损，实测配合间隙增大 0.4mm，导致设备振动值超标，影响正常运行。原修复方案采用镶套工艺，即加工新套后压装于磨损轴颈，但套与轴结合面在交变载荷作用下存在微动，运行仅 3 个月后便出现松动，修复效果不理想。改进方案采用电刷镀技术，在配合面分多次刷镀镍层，累计厚度 0.4~0.5mm，单次刷镀厚度控制在 0.05mm 以内，以降低镀层内应力，镀后精磨至过盈配合要求。电刷镀层与基体结合牢固，热输入小，不产生变形，且镀层厚度可精确控制。修复后配合间隙控制在 0.02~0.04mm，振动值从修复前的 8.5mm/s 降至 2.3mm/s，达到设备运行标准。运行 6 个月后复检，配合面无松动、无磨损，效果良好。

4.3 案例三：联轴器齿面磨损修复

某轧机齿式联轴器在长期运行中齿面磨损，齿厚减少 0.3mm，传动噪声明显增大，影响轧机运行平稳性。原方案为更换整台联轴器，但采购成本高、订货周期长，难以满足生产急需。改进方案采用堆焊 + 齿形修整工艺：先对齿面进行局部堆焊，恢复齿厚至设计尺寸，堆焊材料选用与基体匹配的合金焊丝；再用专用铣刀修整齿形，保证齿廓精度与啮合性能；最后进行渗氮处理，提高齿面硬度与耐磨性。修复后齿厚偏差 ±0.02mm，齿面硬度 HRC58，装机后噪声从 95dB 降至 82dB，运行平稳。修复成本仅为更换新件的 30%，修复周期缩短至 5 天，经济性与时效性显著。

4.4 改进工艺综合效果评价

综合三个案例，改进后的钳工修复工艺在尺寸精度、表面硬度、结合强度与使用寿命方面均优于传统方法。修复后尺寸精度可达 IT6~IT7 级，表面硬度提高 30%~50%，修复层结合强度满足使用要求，使用寿命平均提升 1.5~2 倍。经济性方面，修复成本较更换新件降低 40%~70%，修复周期缩短 30%~50%。实践表明，表面强化与尺寸恢复相结合、精密加工与量化控制相结合的修复工艺，可有效提升传动部件修复质量，具有显著的技术与经济效益[4]。

结束语

机械传动部件磨损故障是设备运行中的常见问题，钳工修复作为重要的维修手段，其工艺水平直接影响修复质量与设备寿命。本文系统分析了传动部件磨损机理与诊断方法，剖析了传统钳工修复方法的局限，提出了检测评估、表面强化、尺寸恢复、精度修整及质量控制等方面的工艺改进方案，并结合齿轮轴、轴承配合面、联轴器等修复案例验证了改进效果。未来，随着激光熔覆、电刷镀、智能检测等技术的推广应用，钳工修复工艺将向精密化、标准化、智能化方向发展，为设备维修提供更可靠的技术支撑。

参考文献

[1] 陈威良, 周仕城. 汽车机械传动轴动平衡故障维修及检测方法研究 [J]. 汽车电器,2026(6):172-174.

[2] 赵昌龙, 杨俊宝, 李明, 等. 轴类零件表面激光熔覆再制造技术的研究进展 [J]. 制造技术与机床,2023(7):32-37.

[3] 孔艺一, 章翔峰, 姜宏, 等. 考虑裂纹与磨损故障的齿轮传动系统动态特性分析 [J]. 西安交通大学学报,2023,57(3):150-159.

[4] 毕俊召, 邹红亮. 农业机械零件表面硬度强化的新型辉光离子氮化工艺系统研究 [J]. 南方农机,2023,54(14):31-32,36.