

机械零部件失效模式分析与质量控制

杨 帆

武汉船舶通信研究所（中国船舶集团有限公司第七二二研究所） 湖北 武汉 430000

摘 要：机械零部件在服役周期内受多重因素耦合作用，断裂、磨损、腐蚀、变形及疲劳等失效模式交替显现，严重制约装备运行可靠性。本文围绕零部件失效类型与产生机理展开系统梳理，构建由外及内的失效识别与溯源分析方法，剖析各环节质量控制要点，并从工艺优化、结构选材及管控体系完善等维度提出针对性防控策略，为提升零部件全生命周期质量水平提供技术支撑。

关键词：机械零部件；失效模式；质量控制；溯源分析；全流程管控

引言：机械零部件长期处于交变载荷、腐蚀介质及温变环境等复杂工况中，断裂、磨损、腐蚀、变形及疲劳等失效模式交替显现。各类失效之间存在衍生与并发关系，单一或多因素叠加均可触发故障。深入剖析失效机理与演化规律，并嵌入设计、制造、装配及运维全流程质量管控，对降低早期失效概率、延长服役寿命具有重要工程价值。

1 机械零部件基础失效类型与产生机理

1.1 机械零部件常见失效类型分类

依据机械零部件常规服役工况，失效可分为结构性失效与功能性失效两类。结构性失效涵盖零部件本体结构破损、形变等实质性损伤，功能性失效体现为使用性能衰减、功能不达标且结构无明显破损。具体可细化为断裂、变形、磨损、腐蚀、疲劳五类基础失效形式，如图1所示。断裂失效表现为构件开裂、分体破损；变形失效包含构件可逆与不可逆形态、尺寸改变；磨损失效体现为零部件配合表面材质逐层损耗、表面形貌劣化；腐蚀失效为外部介质引发的构件表层材质变质损伤；疲劳失效表现为长期服役后构件隐性开裂、突发破损^[1]。各类失效形式对应适配轴类、齿轮、轴承、紧固件等不同机械零部件的服役特性。

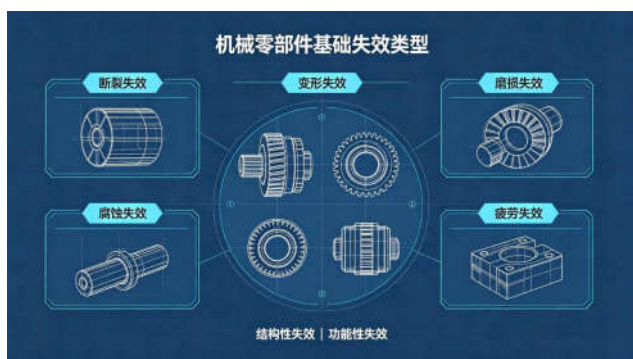


图1

1.2 各类失效模式的形成机理

断裂失效源自材料微观晶体结构变化，外力作用下晶格发生错位、解离，催生微观裂纹并持续扩展，造成构件整体断裂。变形失效分为弹性变形与塑性变形，弹性变形时构件晶格受力产生可逆位移，卸力后可恢复原始形态；塑性变形发生在载荷超出材料弹性极限时，晶格形成永久性错位，构件形态无法复原。磨损失效产生于零部件配合面的相对运动，接触面持续挤压、刮擦，造成表层材质剥离、表面磨损、形貌劣化。腐蚀失效由水、空气、化学介质接触构件表面引发，介质与材料发生作用，破坏表层结构与材质，形成点状、片状腐蚀损伤。疲劳失效源于循环交变载荷持续作用，构件内部不断累积细微应力，滋生微观裂纹并持续扩张，最终造成构件突发损坏。

1.3 零部件失效的内部影响因素

零部件失效的内部诱因包含材质属性、内部组织结构、加工纹理、尺寸精度、表面状态等固有条件。材料硬度、韧性、强度等属性，决定构件抗形变、抗磨损、抗断裂的基础性能，材质与工况不匹配会提升失效概率。材料内部晶粒排布不均、组织结构杂乱，会形成局部性能薄弱区域，滋生裂纹与结构损伤。机械加工产生的内外纹理，会改变构件局部受力状态，产生应力集中现象。零部件尺寸精度偏差会导致装配间隙异常、受力不均，加速各类损伤产生。构件表面粗糙度、表层硬化程度，直接影响构件耐磨、抗腐蚀与抗疲劳能力，对应诱发不同类型失效。

1.4 零部件失效的外部影响因素

零部件失效的外部诱因包含运行载荷、工作温度、环境介质、装配状态、运行工况。超量程载荷与波动载荷会持续破坏材料内部结构，损伤构件本体性能。高低温及温度交变环境，会改变材料力学性能与结构稳定

性,降低构件服役性能。环境中的湿度、粉尘、化学介质会持续侵蚀构件表面,诱发腐蚀与磨损损伤。装配精度不足、松紧度不当、构件对位偏移,会改变零部件受力分布,造成局部过载、接触面异常摩擦。工况参数异常波动,会持续干预构件结构与使用性能,加速各类失效模式滋生与演化。

2 机械零部件失效模式系统分析方法

2.1 失效模式的识别思路

结合零部件的结构特点与实际功能表现,结合设备实际服役状态搭建适配性更强的失效识别逻辑。识别过程围绕构件结构状态、功能输出情况、工况适配程度展开逐项排查,从失效外观特征、失效发生部位、失效萌生阶段三个维度,建立清晰的识别判定标准^[2]。针对零部件常见的表面损伤、结构形变、功能衰减等不同故障表现,区分对应的判定方式。通过核查结构运行状态、部件配合接触情况、实际载荷承受条件,全面筛查构件的显性故障与隐性损伤。

2.2 失效诱因的溯源分析逻辑

以零部件实际失效表象为切入点,由表及里逐层推进诱因排查,搭建完整的溯源分析逻辑。溯源工作贯穿零部件全生命周期,完整覆盖加工制造、装配调试、现场运行、日常维保等各个阶段。加工环节重点核查工艺处理瑕疵、加工精度偏差、材料热处理不到位等问题。装配环节重点检查部件配合间隙、安装对位精度、装配工艺匹配度。运行环节着重关注载荷波动、环境介质、温度变化对构件产生的持续影响。维保环节排查检修方式、养护周期、缺陷修复工艺的适配情况。区分单一诱因独立触发故障与多诱因叠加引发故障的不同情况,梳理各类影响因素的作用路径,明确不同诱因与失效类型的对应关系。

2.3 失效模式的关联规律分析

拆解各类零部件失效模式的内在联系,梳理失效之间的衍生、递进与并发关系。零部件局部位置出现的轻微损伤,会改变构件整体受力分布与配合运行状态,逐步引发其他类型的配套失效。磨损、腐蚀这类初期轻微损伤,会在持续工况作用下不断恶化,最终演变为疲劳开裂、整体断裂等严重结构失效。部分特殊工况异常会同时激活多种失效形式,让不同故障同步发生、协同发展。

2.4 失效分析的标准化流程

机械零部件失效分析需遵循规范、连贯的实操流程开展工作。全面收集失效部位、失效外观特征、设备运行工况、构件服役时长等基础信息,依托真实工况与故障特征判定具体失效类型。按照逐层溯源的排查逻辑,

精准定位失效产生的核心诱因,区分主要诱发因素与次要关联因素。结合故障表现与诱因来源,梳理失效在整个运行过程中的演化脉络与传导特征。明确每个分析步骤的实操重点与执行要求,理顺各工序之间的衔接关系,搭建一套逻辑连贯、落地性强的系统化失效分析流程。

3 机械零部件全流程质量控制体系

3.1 零部件设计阶段质量控制

零部件设计阶段质量管控围绕结构设计、材质选型、参数设计核心环节展开,从源头把控零部件服役质量。结构设计过程中结合设备实际服役工况,优化构件整体构型与局部细节,规避应力集中、结构承载力不足等先天设计隐患。材质选型依托零部件承载需求、运行环境特性匹配对应基材,兼顾材料力学性能、耐磨损、耐腐蚀等核心指标,适配不同工况的服役要求^[3]。参数设计结合载荷范围、运行温度、接触配合条件精准核定各项结构参数,保证参数匹配度贴合设备运行标准。依托各核心设计环节的管控要点,细化设计工作的约束准则,通过规范化的设计管控,从前期设计层面规避各类潜在失效风险,筑牢零部件质量基础。

3.2 零部件加工制造阶段质量控制

零部件加工制造质量管控覆盖毛坯制备、精密加工、表面处理、热处理等全工序流程,针对各加工环节的特性制定针对性管控要求。毛坯制备环节严控原材料成型状态,排查毛坯内部气孔、杂质、组织不均等基础缺陷,保障毛坯基体的完整性与均匀性。精密加工环节把控构件尺寸精度、形位公差、加工纹理状态,降低加工偏差带来的受力不均、配合异常等问题。表面处理环节规范打磨、镀膜、硬化等工艺操作标准,优化零部件表面性能,提升构件耐磨、抗腐蚀能力。

3.3 零部件装配调试阶段质量控制

零部件装配调试阶段聚焦装配精度、装配顺序、配合间隙、固定状态四大核心要点开展质量管控。严格遵循零部件适配特性规划装配流程,按照合理工序完成构件拼装,打乱装配顺序引发的结构错位、装配残余应力等问题。精准把控零部件配合间隙参数,依据设备运行标准调整间隙大小,规避间隙过大造成的运行松动、间隙过小引发的摩擦过载等问题。校准构件装配对位精度,保证各零部件贴合状态达标,规范螺栓紧固、构件固定的操作标准,把控固定力度与固定均匀度。通过全维度装配管控,规避装配缺陷带来的应力集中、异常磨损、运行卡顿等各类服役故障。

3.4 零部件运维阶段质量控制

零部件运维阶段质量管控聚焦运行监测、定期保

养、故障排查、部件检修核心工作,搭建常态化管控模式。设备运行过程中持续监测零部件运行状态,捕捉载荷异常、温度波动、振动异常等细微工况变化,及时识别构件运行隐患。依据零部件服役特性制定专项保养机制,针对性完成清洁、润滑、紧固、防锈等养护操作,延缓构件性能衰减速度。常态化开展零部件故障排查工作,重点筛查易损耗、高负荷构件的损伤状态,精准定位隐性缺陷。部件检修过程规范拆解、检测、修复、更换的操作标准,保证检修后构件的运行性能与装配状态,维持零部件长期运行的稳定性。

4 基于失效模式的质量优化与防控策略

4.1 针对各类失效模式的专项防控策略

结合磨损、腐蚀、疲劳、断裂、变形等不同失效模式的诱发规律与作用特点,匹配专属的前置防控实施方案。针对磨损失效,调整零部件配合工况参数,优化接触面加工工艺,强化表面防护处理,减少构件接触摩擦带来的材质损耗。针对腐蚀失效,根据设备运行环境介质特性,选用适配的防护处理工艺,阻隔有害介质与构件表面的接触路径,弱化介质侵蚀作用。针对疲劳失效,优化构件受力工况,规避长期交变载荷的持续冲击,规整运维检修节奏,及时处理构件表层细微损伤。

4.2 零部件加工工艺质量优化路径

结合各类零部件失效的核心诱因,针对性迭代升级各类核心加工工艺。优化基础机械加工工艺,细化加工精度管控标准,修正加工过程中产生的纹理缺陷与尺寸偏差,规避加工误差引发的受力不均问题。依托零部件服役性能需求调整热处理工艺参数,精准管控升温速率、恒温时长与冷却流程,稳定材料内部晶粒结构,消除热处理不当产生的材质薄弱区域,强化材料整体力学性能。升级构件表面防护工艺,根据服役环境差异适配硬化、喷涂、防锈处理等不同工艺方式,弥补表层性能短板。

4.3 零部件结构与选材优化方案

参照前期失效模式与诱因分析结果,针对性优化零部件结构设计、尺寸配比与材质选型。调整零部件局部结构形态,优化构件过渡位置的结构设计,改善零部件

运行过程中的应力分布状态,避免局部应力过度集中。精准校核构件尺寸配比参数,结合实际承载需求优化结构厚薄、配合尺寸等核心参数,提升构件整体承载均匀性。根据零部件运行载荷、环境介质、温度条件筛选适配基材,依据工况需求侧重材料的韧性、硬度、耐腐蚀性等关键性能指标。从结构与材质源头改善零部件受力条件、表层防护性能与抗疲劳特性,提升零部件长期服役的质量稳定性。

4.4 质量管控体系的完善与升级

整合零部件设计、加工、装配、运维全流程管控要点,梳理各环节质量管控的薄弱盲区。补齐单一环节管控缺失、工序衔接管控疏漏等问题,打通全流程质量管控链路。结合不同零部件的结构特性、服役工况与高频失效类型,划分差异化管控等级,定制适配各类型构件的专项管控内容。细化不同工况场景下的质量核查标准,针对性强化高负荷、高腐蚀、高磨损工况下的质控力度。规整各工序质控操作规范,固化常态化管控流程,构建适配各类零部件、贴合多元工况的系统化质控机制,实现失效防控与质量管控贯穿零部件全服役周期。

结束语

机械零部件失效模式分析与质量控制是一项贯穿设计、制造、装配及运维全周期的系统性工作。断裂、磨损、腐蚀、变形与疲劳五类失效形式相互关联、逐级演化,单一环节的管控缺失均可能引发连锁故障。唯有将失效机理研究与各工序质量控制深度融合,从结构优化、工艺升级、选材匹配及管控体系完善等多个层面协同发力,方能有效遏制各类失效模式的萌生与扩散,保障零部件在复杂服役条件下的运行稳定性与使用寿命。

参考文献

- [1]张大宇.极端工况下机械零部件的可靠性设计与失效预测[J].模型世界,2025(28):43-45.
- [2]牛轶群,金映丽,闫明,等.考虑机械零部件密集冲击失效的动态可靠性分析[J].振动与冲击,2026,45(6):164-171.
- [3]张建路.农业机械零件断裂失效的类型及改进措施[J].山东农机化,2023(2):34-36.