

滚动轴承失效形式分析与日常选用维护研究

曾宪之

中国葛洲坝集团易普力股份有限公司 中国葛洲坝集团易普力股份有限公司禹州分公司 河南 许昌 452570

摘要: 滚动轴承是旋转机械的核心基础件,其运行状态直接影响整机的可靠性、精度与使用寿命。本文从滚动轴承的服役条件与失效演化规律出发,系统梳理了接触疲劳、磨损、塑性变形、腐蚀及断裂等典型失效形式的宏观特征、微观机理与主导诱因,揭示了失效形式的相互关联与级联演化规律。在此基础上,将失效分析与工程实践相衔接,从选用匹配、安装调整、润滑管理及状态监测等维度,提出了以“预防前置”为核心的日常选用维护策略框架。研究认为,滚动轴承的服役寿命不是单一因素决定的静态属性,而是选型合理性、安装精度、润滑维护与工况适应性的综合体现,应从“事后失效分析”转向“事前预防维护”的系统化管理模式。

关键词: 滚动轴承;失效形式;接触疲劳;磨损;选用维护;润滑管理

引言

滚动轴承作为机械设备中应用最为广泛的关键零部件之一,承担着支承旋转轴、传递载荷、减少摩擦的重要功能。无论是高速精密机床主轴、重型矿山机械,还是风力发电机、汽车变速箱,其运行可靠性与滚动轴承的状态密切相关。旋转机械中约30%~50%的故障可追溯至轴承失效,因此对轴承失效形式的深入认知和日常选用维护的科学化管理,是保障设备长周期安全运行的基础性课题。滚动轴承的失效并非单一模式主导,而是受材料、载荷、润滑、安装及环境等多因素交互作用的复杂结果。长期以来,工程实践中对轴承失效的处理多侧重于“损坏后的更换”,对失效形式的系统性识别和根源分析重视不足,导致同类失效重复发生。同时,在轴承选用和维护环节缺乏与失效机理的关联意识,选型偏重经验类比、维护偏重固定周期,难以实现精准管理。本文旨在整合滚动轴承典型失效形式的物理本质与识别特征,并将失效认知融入日常选用与维护决策中,构建从失效分析到预防控制的闭环思路,为工程实践提供理论参考。

1 滚动轴承典型失效形式及其机理分析

1.1 接触疲劳失效

接触疲劳是滚动轴承最常见的失效形式,主要发生在套圈滚道和滚动体表面,表现为麻点、剥落和龟裂。其物理本质是滚动接触表面在交变接触应力反复作用下,次表层(约最大剪切应力深度处,通常距表面0.1~0.5mm)发生局部塑性累积,形成微观裂纹,裂纹扩展至表面后造成材料片状剥落。接触疲劳的萌生寿命受材料纯净度(夹杂物含量)、硬度匹配、表面粗糙度和润滑状态显著影响。工程中常将剥落形态作为判断依

据:浅层剥落多与表面缺陷或润滑不良有关,深层剥落则更多源于材料内部夹杂或过大的接触应力。疲劳失效的累积性特征决定了它通常不会突然发生,而是经过相当长的运行周期后才显现,这为状态监测预留了干预窗口。

1.2 磨损失效

磨损失效表现为轴承配合面之间的材料逐渐损失,导致游隙增大、旋转精度下降和振动加剧。按机理可分为磨粒磨损、粘着磨损和腐蚀磨损。磨粒磨损由外界侵入的硬质颗粒(粉尘、金属碎屑)或润滑剂中的固体污染物引起,在滚道和滚动体表面形成平行划痕或犁沟。粘着磨损发生于油膜破裂时,金属表面微凸体直接接触、局部冷焊后又撕裂,形成材料转移和粘结斑痕,严重时导致轴承卡死^[1]。腐蚀磨损是摩擦与腐蚀介质协同作用的结果,常见于潮湿或有化学侵蚀性气氛的工况。磨损失效的特征是渐进的、有预警期的,其严重程度与密封效果、润滑过滤精度和运行工况直接相关。

1.3 塑性变形失效

塑性变形失效是指轴承零件在超过材料屈服极限的静载或冲击载荷作用下,滚道表面产生永久性压痕或凹坑。典型表现包括:过载引起的滚道压痕(多为与滚动体间距一致的等间距凹痕)、安装冲击造成的伤痕以及外来硬质颗粒压入形成的压坑。塑性变形本身并不一定导致轴承立即失效,但压痕引起的应力集中和局部几何突变会显著缩短轴承的接触疲劳寿命,成为疲劳剥落的优先萌生点。此类失效的根源在于载荷评估失准或异常冲击事件,因此在选用阶段需对实际工况中的峰值载荷和冲击系数给予充分估计。

1.4 腐蚀失效

腐蚀失效是滚动轴承在潮湿、化学介质或电化学环境中发生的表面损伤,包括锈蚀和点蚀。水分侵入是工业现场最常见的腐蚀诱因——当轴承内部含水量超过临界值时,滚道和滚动体表面形成锈斑,锈斑在后续运行中剥落产生颗粒,进而引发磨粒磨损和疲劳的双重加速。此外,电流腐蚀(轴电流)在电机和发电机轴承中较为特殊,由于轴电压放电产生的电火花会在滚道表面形成密集的搓板状熔融坑,其失效进程远比化学腐蚀迅猛。

1.5 断裂失效

断裂失效是滚动轴承最严重的失效形式,具有突发性和灾难性,主要表现为套圈开裂和保持架断裂。套圈开裂通常源于过大的装配应力、运行中的热应力集中或材料内部原有缺陷(锻造裂纹、淬火微裂纹)在循环应力下的扩展。保持架断裂则与润滑不足引起的摩擦载荷增大、共振、以及保持架材料的冲击韧性不足有关^[2]。断裂失效的突发性意味着其难以通过常规状态监测提前预警,因此预防重点在于安装过程质量控制、运行条件监控和合理选用保持架材质及结构。

1.6 失效形式的关联性与级联演化

上述失效形式并非孤立发生,而是呈现复杂的关联与级联特征。腐蚀产生的锈斑颗粒引发磨粒磨损,磨粒磨损增大游隙和振动,振动又加速接触疲劳的萌生;润滑失效先引起粘着磨损,局部粘着点脱落后形成压坑,进而诱发疲劳剥落。这种“一种失效形式启动另一种失效模式”的级联效应意味着轴承失效往往从单一原因开始,最终发展为混合失效模式。因此,失效分析不能仅凭最终现象简单定因,而应追溯整个演化链条,识别最初的诱发因素,这直接关系到后续选用和维护的改进方向是否精准。

2 基于失效机理的滚动轴承选用策略

2.1 轴承类型选择与工况的匹配原则

选用轴承的首要任务是确定合适的类型,不同类型对特定失效形式的敏感度差异显著。深沟球轴承适用于高速、中小载荷工况,但对偏心和冲击较为敏感;圆柱滚子轴承承载能力大、刚性好,但调心性能差,对安装对中要求高;角接触球轴承适应联合载荷,但需成对使用并预紧;调心滚子轴承能补偿轴挠曲和安装偏差,适用于重型低速工况。选型时应将最可能发生的失效形式作为反向约束条件——若工况中冲击载荷频繁,应优先选择滚子轴承并核算静安全系数;若高速运行是核心特征,则应选择球轴承并关注高速性能和发热控制。仅凭承载能力选型而忽视失效倾向,是工程中常见的选型偏误。

2.2 轴承精度等级与游隙的合理选配

轴承精度等级(P0~P2)和游隙组别(C2~C4)的选择直接影响失效模式倾向。精度等级并非越高越好——对旋转精度要求不高的通用机械选用P0级足矣,过度追求高精度不仅增加成本,其较小的游隙在热膨胀条件下反而可能引发卡滞失效。游隙选择更需谨慎:游隙过小,运行中因内外圈温差和轴热伸长导致的负游隙将引起过载和严重发热,加速疲劳和粘着磨损;游隙过大,承载区缩小、接触应力增大,且振动加剧,对疲劳寿命不利。合理的游隙选配应综合考虑转速、温差、配合过盈量和载荷大小,使运行游隙趋近于零或微正游隙,这是抑制多种失效形式的共性要求。

2.3 材料与热处理质量的选用鉴别

轴承钢的材质均匀性和热处理质量是抵抗疲劳失效和断裂失效的基础条件。选用时应重点关注轴承供应商的材料牌号与冶金工艺(如真空脱气、电渣重熔),优质钢材的氧含量和夹杂物等级显著低于普通钢材,对延长接触疲劳寿命具有决定性作用。热处理方面,套圈的硬度分布均匀性、表面脱碳层深度及残留奥氏体含量都是影响抗疲劳和抗磨损性能的隐性指标^[3]。虽然现场难以逐项检测,但选用时可通过供应商质量文件查阅其热处理工艺标准和出厂检验报告中的硬度散差范围,作为判断质量一致性的依据。

3 滚动轴承日常维护的关键控制环节

3.1 安装与拆卸的工艺控制

安装不当是引发早期失效的首要人为因素。安装过程中应严格控制以下几点:首先,安装前须确认轴和轴承座的尺寸公差、圆柱度和表面粗糙度符合配合要求,轴肩和座孔的倒角半径不能与轴承圆角干涉;其次,采用压入法安装时,施力方向须与轴心线一致,施力点应作用于过盈配合的套圈上,禁止通过滚动体传递安装力;再次,对尺寸较大的轴承应采用热装(油浴或感应加热,温度一般不超过120℃),加热温度需严格控制以防止回火软化。拆卸时应注意使用专用拉马,避免敲击造成滚道压痕和套圈变形。安装后的旋转灵活性检查和游隙测量是验证安装质量的有效手段,应在现场作为控制节点强制实施。

3.2 润滑剂的选择、加注与更换制度

润滑是轴承维护中调节空间最大、投入产出比最高的环节。润滑剂选型应以运行温度、转速和载荷为依据——高温工况选用基础油粘度高且抗氧化性强的润滑油或耐高温润滑脂;高速工况宜选用低粘度合成油以降低搅油温升;重载工况需要高粘度油或含极压添加剂的

润滑脂以保证油膜强度。润滑量同样关键：润滑脂填充量一般为轴承腔体容积的30%~60%，过量填充会导致搅油发热和加速氧化，反而缩短寿命。应建立基于运行小时数或状态监测的润滑维护制度，包括定期清洗轴承并更换润滑剂，同时保留每次换油时对旧油脂外观、颜色和异味的目视检查记录，这些信息是判断轴承内部状态的宝贵线索。

3.3 密封与污染控制的日常管理

防止污染物侵入是延长轴承寿命最有效的维护措施之一。密封选型应根据工况选择接触式密封（唇形密封）或非接触式密封（迷宫密封、甩油环），接触式密封效果好但摩擦发热大，适合低速重载；非接触式密封适合高速但需保证较小的间隙。日常管理中应定期检查密封件的磨损情况和弹性，发现唇部硬化、开裂或密封弹簧松弛时应及时更换^[4]。对于采用开式轴承和稀油循环润滑的系统，应确保过滤器的过滤精度不低于20 μm ，并按照压差指示定期更换滤芯。轴承安装和维护操作过程中应始终保持清洁环境，避免棉纱纤维、灰尘或手套碎屑等异物进入轴承内部。

3.4 运行状态监测与失效预警

状态监测是从“定期维护”向“视情维护”转变的技术基础。最常用的监测手段包括振动监测、温度监测和声发射检测。振动监测通过加速度传感器拾取轴承运行中的振动信号，在时域上可以捕捉冲击脉冲，在频域上可根据特征频率（BPFO、BPFI、BSF、FTF）识别具体损坏部件，是诊断疲劳剥落和磨损的首选方法。温度监测简单直接，当轴承温度较正常运行值突升10 $^{\circ}\text{C}$ 以上时，往往预示润滑失效或间隙异常，需立即排查。对高价值或安全关键设备，可考虑部署在线监测系统，设置多级报警阈值，在故障尚处早期阶段时触发预警，为有计划停机检修争取时间。

3.5 故障失效档案的建立与维护知识的迭代

每台设备或每个轴承位的失效记录和维护历史是最宝贵的知识资产。建议建立轴承失效档案，记录每次更

换轴承的型号、制造商、安装日期、运行小时数、失效时的现象描述和初步原因判断。同一设备位或同一工况条件的多次失效记录积累后，可通过统计规律识别是否存在系统性选型或维护缺陷——例如，同一位点的轴承频繁出现保持架断裂，提示可能应选用铆接保持架或更换保持架材料；若更换周期普遍低于预期寿命的60%，则应重新核算载荷或加大选型规格。失效档案的价值在于它将每一次“故障”转化为“改进输入”，使选用和维护经验得以积累和传承，避免同类问题重复发生。

4 结语

滚动轴承的失效是接触疲劳、磨损、塑性变形、腐蚀及断裂等多种形式交织作用的结果，每种失效形式都有其特定的微观机理、主导诱因和特征表现，且不同形式之间存在着复杂的级联演化关系。本文在系统梳理各类失效形式的基础上，将失效机理的认知应用于选用和维护实践，明确了选型匹配、精度游隙选配、安装工艺控制、润滑与密封管理、状态监测及失效档案建设等环节的技术要点。核心认识在于：轴承的服役表现不是孤立环节决定的，从选型到报废的全过程中每一个决策都可能影响失效模式的走向。应将失效分析从“事故后的归因”转变为“维护前的预警”，以失效机理为逻辑纽带，将选用、安装、润滑、监测、检修串联为闭环管理系统。未来随着传感技术和数据分析方法的不断进步，滚动轴承的维护管理将进一步向智能化、精准化方向发展。

参考文献

- [1]高殿斌,王振忠,李刚.滚动轴承接触疲劳失效机理及寿命预测研究进展[J].轴承,2022(6):1-8.
- [2]杨晓平,刘朝晖,马威.润滑条件对滚动轴承磨粒磨损行为的影响研究[J].润滑与密封,2021,46(8):56-62.
- [3]赵联春,曹晓峰,陈海英.滚动轴承失效分析的逻辑方法与工程应用[J].轴承工业,2020(4):33-39.
- [4]王家序,肖科,李敏.混合润滑状态下滚动轴承游隙与疲劳寿命的关联性[J].机械工程学报,2022,58(15):112-120.