

基于齿轮箱轴承失效影响因素相关探究

栾博翰

南京高速齿轮制造有限公司, 江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090006

摘 要： 本文旨在深入探讨齿轮箱轴承失效的影响因素，通过对轴承失效的基本原理进行详细分析，包括失效模式的分类、磨损、疲劳与断裂的机理，以及载荷、应力与寿命之间的关系，为后续的失效原因探究奠定理论基础。进一步地，文章系统性地分析了导致齿轮箱轴承失效的多种影响因素，涵盖设计因素中的轴承选择与配置、结构设计与载荷分布，材料与制造质量中的材料性能及制造缺陷，以及工作条件中的载荷变化、温度、润滑与腐蚀环境等。在此基础上，文章提出了针对性的预防策略与维护实践，涉及设计优化、材料与工艺改进、润滑与冷却系统优化以及预测性维护与状态监测等方面。

关 键 词： 齿轮箱轴承；失效分析；影响因素；预防策略；维护实践

Research on the Influencing Factors of Gearbox Bearing Failure

Luan Bohan

Nanjing High-Speed Gear Manufacturing Co., LTD., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： This paper aims to deeply explore the influencing factors of gearbox bearing failure. Through a detailed analysis of the basic principles of bearing failure, including the classification of failure modes, the mechanisms of wear, fatigue and fracture, as well as the relationship between load, stress and life, it lays a theoretical foundation for the subsequent exploration of failure causes. Furthermore, the article systematically analyzes various influencing factors that lead to the failure of gearbox bearings, covering aspects such as bearing selection and configuration in design factors, structural design and load distribution, material properties and manufacturing defects in materials and manufacturing quality, as well as load variations, temperature, lubrication and corrosive environments in working conditions. Based on this, the article proposes targeted prevention strategies and maintenance practices, covering aspects such as design optimization, material and process improvement, lubrication and cooling system optimization, as well as predictive maintenance and condition monitoring.

Keywords： gearbox bearing; failure analysis; influencing factors; preventive strategy; maintenance practice

一、轴承失效的基本原理

（一）轴承失效模式分类

轴承失效模式分类是理解轴承失效问题的关键。常见的失效模式包括疲劳剥落、磨损、变形、热损伤和润滑失效等。疲劳剥落通常发生在经过数以亿计的循环载荷后，轴承表面形成微小裂纹并最终导致金属疲劳脱落。磨损则是由于颗粒污染、腐蚀或长期摩擦导致材料逐渐损失。变形可能源于重载、安装不当或轴承座刚度不足，导致轴承内外圈或滚动体发生形状改变。热损伤多发生在轴承工作温度过高时，可能导致材料退火、硬度降低甚至烧伤。润滑失效则可能是由于润滑剂选用不当、污染或供应不足，导致轴承部件间直接接触，加速磨损和失效。每种失效模式都有其特定的原因和预防措施，深入了解这些模式对于提高齿轮箱轴承的可靠性和延长使用寿命至关重要^[1]。

（二）磨损、疲劳与断裂的机理

轴承失效往往由多种因素引起，其中磨损、疲劳与断裂是三

个关键的机理。在实际应用中，磨损通常源于轴承内部的相对运动，导致表面材料的持续损失。例如，在重载工况下，轴承的滚动接触可能会导致微小金属碎片的剥落，长期积累会降低轴承的精度和效率，严重时甚至引发润滑失效和进一步的摩擦损伤。疲劳失效则是一个渐进的过程，它涉及材料在重复应力或应变作用下的逐渐弱化。这种弱化最终导致微裂纹的形成和扩展，直至轴承部件完全断裂。断裂失效通常具有突发性，可能导致设备的意外停机，对生产安全和效率构成严重威胁。因此，深入理解磨损、疲劳与断裂的机理，对于制定有效的预防策略和维护计划至关重要，有助于减少轴承失效的发生，提高设备的可靠性和运行效率^[2]。

（三）载荷、应力与寿命的关系

载荷、应力与轴承的寿命之间存在着密切的联系。载荷是轴承所承受的外力，它直接影响轴承内部的应力分布。在较高的载荷作用下，轴承各部件所受的应力会相应增大，从而加速了磨损、疲劳和断裂等失效机理的进程。应力的集中和分布不均会进

一步缩短轴承的寿命。因此，合理控制载荷，优化轴承的设计以分散应力，是提高轴承寿命的关键。同时，轴承的寿命也反映了其承受载荷和应力的能力，是评估轴承性能的重要指标之一。通过深入研究载荷、应力与寿命的关系，可以为轴承的设计、制造和维护提供科学依据，确保轴承在复杂多变的工作条件下仍能保持良好的性能和可靠性^[3]。

二、影响因素分析

（一）设计因素

1. 轴承选择与配置

轴承选择与配置是影响齿轮箱轴承失效的关键因素之一。在实际应用中，轴承类型必须根据齿轮箱的运行条件和载荷特性来确定。例如，高转速和轻载荷的场合可能适合选用滚珠轴承，而重载荷和冲击载荷下，滚柱轴承可能更为合适。此外，轴承的尺寸和额定载荷能力必须与齿轮箱的输出扭矩和轴向力相匹配，以确保在预期寿命内稳定运行。

正确的轴承配置同样至关重要。轴承的排列方式、预紧力以及游隙的调整都会显著影响轴承的性能和寿命。例如，适当的预紧力可以减少轴承内部的间隙，提高旋转精度和刚度，但过大的预紧力则可能导致过度磨损和早期失效。因此，在进行轴承配置时，必须综合考虑齿轮箱的整体结构、运行条件以及预期寿命，以确保轴承的选择与配置能够最大限度地发挥其性能，延长齿轮箱的使用寿命^[4]。

2. 结构与载荷分布

结构设计在齿轮箱轴承失效中起着至关重要的作用。不合理的载荷分布可能导致轴承过早磨损或疲劳失效。例如，当轴承承受过大的局部应力时，这可能是由于设计时未充分考虑载荷的均匀分布，使得轴承在工作过程中承受了不适当的集中载荷。为了避免这种情况，设计师需要在齿轮箱的结构设计阶段就充分考虑载荷的分布。通过精确的力学分析和模拟，可以预测轴承在工作过程中可能承受的载荷，并据此优化结构设计，确保载荷能够均匀分布到各个轴承上。此外，结构设计还应考虑到齿轮箱的整体刚度和强度，以确保在承受各种载荷时，齿轮箱的整体结构不会发生过度变形或损坏，从而进一步保护轴承免受不必要的应力和磨损。

（二）材料与制造质量

1. 材料性能对失效的影响

材料性能在轴承失效中起着至关重要的作用。轴承通常由内圈、外圈、滚动体和保持架等部分组成，这些组件的材料质量直接影响轴承的耐磨性、抗疲劳强度和耐腐蚀性。例如，高碳铬轴承钢因其高硬度和良好的淬透性，被广泛用于制造滚动体，以抵抗在高接触应力下的滚动疲劳。然而，如果材料的纯净度不足，含有过多的杂质或内部缺陷，可能会成为应力集中点，加速疲劳裂纹的形成^[5]。

此外，轴承材料的热处理工艺也极为关键。合适的热处理能够提升材料的硬度和韧性，从而增强轴承的整体性能。例如，淬火和回火处理可以显著提高轴承钢的硬度和耐磨性，而表面渗碳

或渗氮处理则可以增加轴承表面的硬度和耐腐蚀性，进一步提高轴承的使用寿命。

另一方面，保持架的材料选择同样重要。它不仅需要具有足够的强度和刚度以支撑滚动体，还需要具备良好的耐磨性和耐腐蚀性，以确保轴承在恶劣工作条件下的稳定运行。如果保持架材料性能不佳，可能会导致其过早变形或损坏，进而影响轴承的整体性能和寿命。

2. 制造过程中的缺陷

在制造过程中，轴承的缺陷往往是导致其失效的重要原因之一。这些缺陷可能源于加工误差、表面处理不当或者装配过程中的问题。例如，微小的加工痕迹可能导致润滑剂的不均匀分布，进而加速磨损。此外，如果热处理工艺控制不精确，轴承内部的应力分布可能不均，降低其抵抗疲劳载荷的能力。同时，装配过程中的偏差，如轴承座与轴的配合间隙过大或过小，都可能导致轴承在运转中产生异常摩擦和振动，从而影响其使用寿命。因此，制造商需要严格控制每个生产环节，采用高精度的加工设备和先进的检测技术，以确保轴承的制造质量。只有这样，才能最大限度地减少制造缺陷，提高轴承的可靠性和耐久性^[6]。

（三）工作条件

1. 载荷变化与冲击

载荷变化与冲击是导致齿轮箱轴承失效的重要因素之一。在实际运行中，齿轮箱可能承受非恒定的载荷，例如在重载启动、负载突变或机械冲击时，轴承需要承受瞬时增加的应力。这种非恒定的载荷条件对轴承的材料和结构设计提出了严峻的挑战。重载启动可能导致轴承在短时间内承受远超其设计极限的载荷，从而加速磨损和疲劳。负载突变则可能引发轴承内部的应力重新分布，造成局部应力集中，增加失效的风险。机械冲击，如设备运行中突然遇到的障碍物或意外碰撞，会产生瞬间的巨大冲击力，这种冲击力可能导致轴承的瞬时过载，甚至直接造成损坏。因此，在设计和制造齿轮箱时，必须充分考虑载荷变化与冲击的影响，采用适当的材料和结构设计，以提高轴承的耐冲击能力和适应非恒定载荷的能力^[7]。

2. 温度、润滑与腐蚀环境

在齿轮箱轴承的工作过程中，温度、润滑与腐蚀环境是三个关键的外部因素，它们对轴承的性能和寿命有着显著影响。温度的升高可能导致润滑剂失效或轴承材料性能退化，从而影响轴承的正常运转和承载能力。过高的温度还可能加速轴承内部的化学反应，导致润滑脂老化、氧化，进而增加轴承的摩擦和磨损。润滑状况的好坏直接关系到轴承的运转效率和寿命。缺乏适当的润滑或润滑剂选用不当，都会增加轴承的摩擦系数，导致热量积聚和温度升高，从而加速轴承的磨损和失效。此外，腐蚀环境也是影响轴承性能的重要因素。在潮湿、酸性或碱性环境中，轴承材料容易发生化学反应，导致表面腐蚀和性能下降。这种腐蚀不仅会降低轴承的精度和运转平稳性，还可能引发应力集中和裂纹扩展，最终导致轴承失效。因此，在齿轮箱轴承的设计和运行过程中，必须充分考虑温度、润滑与腐蚀环境的影响，采取相应的措施来保障轴承的正常运转和延长使用寿命。

三、预防策略与维护实践

（一）设计优化与标准更新

在设计齿轮箱轴承时，应充分考虑轴承的工作环境和使用需求，采用先进的设计理念和技术手段，对轴承的结构、材料和润滑方式进行优化。通过设计优化，可以减少轴承的应力集中，提高轴承的承载能力和运转平稳性。同时，随着科技的进步和行业的发展，轴承的设计标准也在不断更新和完善。因此，在设计和制造过程中，应及时了解和掌握最新的设计标准和技术规范，确保轴承的质量和性能符合行业要求^[8]。

（二）材料与工艺改进

在齿轮箱轴承的失效预防中，材料与工艺改进是至关重要的环节。轴承通常由内圈、外圈、滚动体和保持架等部分组成，这些组件的材料性能直接影响到轴承的耐磨损性和疲劳寿命。例如，采用高碳铬轴承钢可以显著提高滚动接触的耐疲劳性能，但需确保其硬度、韧性与淬透性的平衡。此外，表面处理技术如渗碳淬火、渗氮和表面涂层等，也能有效提升轴承的耐磨性和耐腐蚀性。这些技术通过改变轴承材料表面的化学组成和微观结构，增强了材料的硬度、润滑性和抗腐蚀能力。同时，在工艺方面，采用精密锻造、精密加工和热处理等先进技术，可以进一步减少轴承的制造误差和内部缺陷，从而提高轴承的精度和可靠性。通过材料与工艺的双重改进，我们可以更有效地预防齿轮箱轴承的失效。

除了上述提到的材料和工艺改进措施，还应关注新材料的应用研究。近年来，随着材料科学的不断发展，一些新型高性能材料，如陶瓷、复合材料以及特种合金等，正在逐渐应用于轴承制造中。这些新材料往往具有更优异的机械性能、热稳定性和耐腐蚀性，能够在极端工况下保持轴承的稳定运行，进一步延长其使用寿命^[9]。

此外，工艺创新也是不可忽视的一环。例如，采用先进的数控加工技术和自动化生产线，可以实现对轴承制造过程的精准控制，减少人为因素导致的误差。同时，引入智能化检测技术，如超声波检测、磁粉检测等，可以在生产过程中及时发现并排除潜在缺陷，确保每一批次轴承的质量稳定可靠。

（三）润滑与冷却系统的优化

润滑与冷却系统的优化在预防齿轮箱轴承失效中起着至关重

要的作用。润滑质量直接影响轴承的摩擦系数和温升，而冷却效率则决定了轴承工作温度的控制。良好的润滑系统能够减少轴承部件之间的摩擦和磨损，延长轴承的使用寿命。合适的润滑剂不仅可以降低摩擦系数，减少能量损失，还能在轴承表面形成一层保护膜，防止金属间的直接接触和腐蚀。同时，润滑剂还能带走轴承在工作中产生的热量，起到冷却作用，防止轴承过热导致的性能下降和失效。冷却系统的优化则着重于提高热交换效率，确保轴承工作温度保持在适宜的范围内，避免因高温引起的材料退化和润滑失效。因此，通过润滑与冷却系统的综合优化，我们可以显著提升齿轮箱轴承的运行效率和可靠性，进一步预防其失效。

（四）预测性维护与状态监测

预测性维护与状态监测是预防齿轮箱轴承失效的关键手段。通过实时监测轴承的运行状态，可以提前发现潜在的故障，从而减少非计划停机，提高设备的可靠性和生产效率。预测性维护依赖于先进的传感器技术和数据分析算法，能够实时监测轴承的振动、温度、声音等关键参数。当这些参数出现异常变化时，系统能够及时发出预警，提示维护人员进行检查和维修。这种方法不仅提高了维护的精准性，还大大减少了因过度维护或维护不足导致的资源浪费。状态监测则通过定期或不定期的数据采集和分析，评估轴承的健康状态和使用寿命。结合历史数据和趋势分析，可以预测轴承未来的性能变化，为制定合理的维护计划提供科学依据。预测性维护与状态监测的实施，不仅提升了齿轮箱轴承的运行效率，还为企业的生产安全和成本控制带来了显著效益^[10]。

四、结束语

随着工业技术的不断进步，齿轮箱轴承的性能和可靠性日益成为影响设备运行效率和生产成本的关键因素。通过对轴承失效影响因素的深入探究，我们不仅能够更好地理解失效的机理和过程，还能够采取针对性的预防策略和维护措施，延长轴承的使用寿命，提高设备的整体性能。本文详细分析了齿轮箱轴承失效的基本原理、影响因素以及预防策略与维护实践，特别是强调了预测性维护与状态监测在提升轴承运行效率中的重要性。未来，随着智能化和数字化技术的不断发展，我们有理由相信，齿轮箱轴承的失效问题将得到更为有效的解决。

参考文献

- [1] 董洋. 基于DCNN的齿轮箱轴承故障诊断与健康识别研究[D]. 沈阳工程学院, 2023.
- [2] 雍跃, 陈慧, 赖晓丽. 基于有限元的轮边齿轮箱破裂分析及改进[J]. 机械研究与应用, 2021(05).
- [3] 陈加国, 翁秀奇. 减速器齿轮箱拓扑优化及轴承有限元分析[J]. 化工时刊, 2022, 36(12): 5-9.
- [4] 孙鑫威, 纪爱敏, 杜占涛, 等. 动车组齿轮箱滚动轴承变转速故障诊断方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(01): 106-115.
- [5] 陈辉, 黄伟, 尚艳涛, 等. 大功率风电齿轮箱轴承试验和检测技术[J]. 轴承, 2023, (06): 121-126.
- [6] 郭晏麟. 基于同齿轮箱高度集成一体化理念开发的发电机轴承单元结构[J]. 机械管理开发, 2022, 37(11): 24-25+29.
- [7] 赖舒平, 李振华, 张义孔. 主动齿轮双支撑式电机齿轮箱输入轴轴承载荷分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(05): 36-41.
- [8] 孙海波, 沈峰. 风电齿轮箱轴承内部疲劳裂纹萌生与扩展方向研究[J]. 机械传动, 2022, 46(08): 33-38.
- [9] 张钟文. 齿轮箱滑动轴承损坏原因及解决措施[J]. 机电工程技术, 2021, 50(08): 284-285.
- [10] 杨林杰, 李俞峰, 李娜娜, 等. 高速齿轮箱可倾瓦轴承性能研究[J]. 河南科技, 2021, 40(21): 34-36.