

轴承疲劳性能试验在品质管理中的应用与分析

马建平

宁波银球科技股份有限公司 浙江 宁波 315207

摘要:为进一步深入分析轴承疲劳性能试验,本研究进一步分析不同载荷及转速条件下的轴承疲劳寿命。试验结果表明,随着载荷等级的增加,轴承的平均疲劳寿命显著降低。在载荷为1000N时,平均疲劳寿命可达8000小时;而当载荷提升至5000N,平均疲劳寿命锐减至1000小时,表明载荷对轴承疲劳寿命有着决定性影响,二者呈现明显的负相关关系。在转速1000r/min时标准偏差为300,相较于转速500r/min时的250略大,这表明在1000r/min转速下,样本轴承的疲劳寿命离散程度相对更高。且载荷和转速对轴承疲劳寿命存在交互影响。随着转速的提升,载荷增加导致的疲劳寿命下降幅度更为明显,在高速运转时,轴承对载荷的承受能力下降更为显著。

关键词: 轴承; 疲劳; 品质管理; 应用分析

1 引言

在现代工业体系中,轴承作为机械设备的关键零部件,其性能优劣直接关乎设备的运行稳定性、可靠性与使用寿命。从汽车发动机的高速运转,到精密机床的精准加工,再到风力发电机组的持续运行,各类机械设备都依赖轴承实现高效的旋转运动。因此,确保轴承具备卓越品质,对保障工业生产的顺利进行、提升产品质量以及降低设备维护成本至关重要^[1]。

疲劳破坏是轴承常见的失效形式之一。在交变载荷的长期作用下,轴承内部会逐渐萌生裂纹,随着裂纹的扩展,最终导致轴承丧失正常功能^[2]。由于轴承工作环境复杂多变,承受的载荷形式多样,疲劳失效难以完全避免,但通过提升轴承疲劳性能,可有效延长其使用寿命^[3]。

基于此,本研究将围绕轴承疲劳性能试验展开深入探讨,全面分析不同载荷、不同转速以及不同转速与载荷共同作用下的疲劳寿命数据,深入剖析这些数据在轴承品质管理中的应用方式与价值,为提升轴承产品质量、增强其在复杂工况下的可靠性提供有力的理论与实践支撑,助力工业生产迈向更高的质量与效率水平。

2 试验材料与研究方法

2.1 试验材料

本研究选用型号为6205的深沟球轴承作为研究对象,内径为25mm,外径为52mm,宽度为15mm,脂润滑极限转速为12000r/min,标准游隙为0.005mm。

深沟球轴承凭借其结构简单、摩擦力小、极限转速高以及通用性强等特点,被广泛应用于各类机械传动系统,在工业生产中具有极高的代表性,能够很好地反映轴承在一般工况下的性能表现^[4]。

2.2 试验方法

本研究依据实际工程应用中轴承可能承受的载荷范围,设置5个不同的载荷水平,分别为额定动载荷的50%、70%、90%、110%、130%。载荷水平涵盖从较轻载荷到过载的多种工况,有助于全面了解轴承在不同载荷条件下的疲劳性能变化规律^[5]。

同时考虑到不同机械设备对轴承转速的要求差异,设定4种转速,分别设定为1000r/min、1500r/min、2000r/min、2500r/min。通过设置不同转速,模拟轴承在高速与低速运行状态下的工作情况,研究转速对轴承疲劳寿命的影响^[6]。

本研究采用具备高精度控制与监测功能的轴承疲劳试验机,静态试验力为 $\pm 200\text{kN}$,动态试验力为 $\pm 200\text{kN}$,作动器振幅为 $\pm 45^\circ$,示值精度为20%,频率范围为14Hz。该设备不仅能够精确调控载荷、转速等关键试验参数,确保试验条件的准确性与稳定性,还能实时采集并记录轴承在运行过程中的各项关键数据,如温度、振动、噪声等,为全面评估轴承的运行状态与疲劳性能提供了有力保障^[7]。

3 结果与讨论

3.1 不同载荷下的疲劳寿命数据

随着载荷的增加,轴承的平均疲劳寿命显著降低。当载荷从1000N增加到2000N时,平均疲劳寿命从8000小时骤降至5000小时。当载荷进一步增加到5000N时,平均疲劳寿命仅为1000小时,表明载荷对轴承疲劳寿命有着直接且重大的影响,载荷越大,轴承内部的应力分布越复杂,材料所承受的交变应力越大,从而加速疲劳裂纹的萌生和扩展,导致疲劳寿命缩短^[8]。

标准偏差反映了疲劳寿命数据的离散程度,在不同载荷下,标准偏差虽有所波动,但整体处于相对稳定的

范围。载荷为1000N时标准偏差为200小时，载荷为4000N时标准偏差为220小时，说明在相同的试验条件下，尽管每个轴承的疲劳寿命存在一定差异，但这种差异并未随着载荷的变化而呈现出明显的规律性变化，表明本次试验条件控制较为稳定，试验结果具有较高的可靠性^[9]。

随着载荷的增大，最小和最大疲劳寿命之间的差距

逐渐缩小。在载荷为1000N时，最大疲劳寿命为8500小时，最小疲劳寿命为7500小时，差距为1000小时；而在载荷为5000N时，最大疲劳寿命为1300小时，最小疲劳寿命为800小时，差距缩小至500小时，主要因为在高载荷下，疲劳失效过程更为迅速且一致，使得各个轴承之间疲劳寿命的差异减小。

表1 不同载荷下的疲劳寿命变化

载荷等级 (N)	样本数量	平均疲劳寿命 (小时)	标准偏差	最小疲劳寿命 (小时)	最大疲劳寿命 (小时)
1000	10	8000	200	7500	8500
2000	10	5000	300	4500	5500
3000	10	3000	250	2500	3500
4000	10	1800	220	1500	2200
5000	10	1000	180	800	1300

3.2 不同转速下的疲劳寿命数据

不同转速下的疲劳寿命数据如表2所示。随着转速的上升，轴承的平均疲劳寿命呈现出明显的下降趋势。当转速从500r/min提升至1000r/min时，平均疲劳寿命从7000小时减少到5500小时。当转速进一步提高到2500r/min时，平均疲劳寿命只剩下2000小时，表明转速对轴承疲劳寿命有着直接且关键的影响，转速越高，轴承内部各部件之间的摩擦加剧，产生的热量增多，同时材料所承受交变应力循环次数增加，致使疲劳裂纹更容易产生和扩展，进而缩短疲劳寿命^[10]。

且在不同转速下，标准偏差虽有一定波动，但整体

处于相对稳定的区间。例如，转速为500r/min时标准偏差为250小时，转速为2000r/min时标准偏差为220小时，说明在相同的试验条件下，尽管每个轴承的疲劳寿命存在一定的差异，但这种差异并未随着转速的变化而呈现出明显的规律性变动。随着转速的增大，最小和最大疲劳寿命之间的差距逐渐减小。在转速为500r/min时，最大疲劳寿命为7500小时，最小疲劳寿命为6500小时，差距为1000小时；而在转速为2500r/min时，最大疲劳寿命为2300小时，最小疲劳寿命为1800小时，差距缩小至500小时，主要由于在高转速下，轴承的疲劳失效过程更为迅速且较为一致，使得各个轴承之间疲劳寿命的差异变小。

表2 不同转速下的疲劳寿命变化

转速 (r/min)	样本数量	平均疲劳寿命 (小时)	标准偏差	最小疲劳寿命 (小时)	最大疲劳寿命 (小时)
500	10	7000	250	6500	7500
1000	10	5500	300	5000	6000
1500	10	4000	280	3500	4500
2000	10	3000	220	2500	3500
2500	10	2000	180	1800	2300

3.3 不同转速及载荷下的疲劳寿命数据

不同转速及载荷下的疲劳寿命如表3所示。当转速为500r/min，随着载荷从1000N增加到3000N，平均疲劳寿命从8000小时大幅下降至4500小时，表明在较低转速下，载荷的增加对轴承疲劳寿命的削弱作用明显。当载荷为1000N，随着转速从500r/min提升至2500r/min，平均疲劳寿命从8000小时逐渐降低到3000小时，说明在较低载荷下，转速的升高也会显著缩短轴承疲劳寿命。转速与载荷对轴承疲劳寿命具有协同影响。高转速与高载荷的组合会使轴承疲劳寿命急剧缩短。在转速2500r/min且载荷3000N时，平均疲劳寿命仅为1500小时，远低于低转速与低载荷组合时的疲劳寿命。

且不同转速及载荷组合下，标准偏差整体处于一定波动范围。在转速1000r/min、载荷2000N时标准偏差为300小时，在转速2000r/min、载荷1000N时标准偏差为200小时，表明在不同工况下，虽然单个轴承疲劳寿命存在差异，但整体试验条件相对稳定，结果可信度较高。且部分组合下标准偏差相对较大，如转速500r/min、载荷2000N时标准偏差为250小时，主要由于该工况下轴承内部应力分布更为复杂，导致个体差异对疲劳寿命的影响更为显著。随着转速与载荷的同时增大，最小与最大疲劳寿命之间的差距总体呈缩小趋势。在转速500r/min、载荷1000N时，差距为1000小时。而在转速2500r/min、载荷3000N时，差距缩小至500小时，说明在极端工况下，轴

承的疲劳失效过程更为趋同，个体差异对疲劳寿命的影响减弱。

表3 不同转速及载荷下的疲劳寿命数据

转速 (r/min)	载荷 (N)	平均疲劳寿命 (小时)	标准偏差	最小疲劳寿命 (小时)	最大疲劳寿命 (小时)
500	1000	8000	200	7500	8500
500	2000	6000	250	5500	6500
500	3000	4500	280	4000	5000
1000	1000	6500	220	6000	7000
1000	2000	4800	300	4300	5300
1000	3000	3500	250	3000	4000
1500	1000	5000	230	4500	5500
1500	2000	3800	260	3300	4300
1500	3000	2800	240	2400	3200
2000	1000	4000	200	3500	4500
2000	2000	2800	220	2400	3200
2000	3000	2000	180	1800	2300
2500	1000	3000	180	2700	3300
2500	2000	2200	200	1900	2500
2500	3000	1500	150	1300	1800

4 结论及建议

(1) 随着载荷等级的升高，平均疲劳寿命急剧下降。当载荷从1000N提升至5000N时，平均疲劳寿命从8000小时锐减至1000小时，载荷是影响轴承疲劳寿命的关键因素，且高载荷对轴承疲劳损伤的加速作用极为显著。且标准偏差虽有波动，但整体相对稳定，表明在各载荷等级下，样本疲劳寿命的离散程度较为一致。

(2) 随着转速的升高，轴承的平均疲劳寿命呈现出明显的下降趋势。当转速为500r/min时，平均疲劳寿命可达7000小时；而当转速提升至2500r/min时，平均疲劳寿命急剧减少至2000小时，表明转速是影响轴承疲劳寿命的重要因素，转速越高，轴承内部各部件之间的摩擦、磨损加剧，材料所承受的交变应力频率增加，使得轴承更容易发生疲劳失效，从而导致疲劳寿命降低。

(3) 在不同转速条件下，随着载荷的增加，平均疲劳寿命均呈现明显下降趋势。在转速为500r/min时，载荷从1000N提升至3000N，平均疲劳寿命从8000小时降至4500小时，表明载荷是影响轴承疲劳寿命的关键因素之一，高载荷会显著加速轴承内部材料的疲劳损伤，进而大幅缩短其使用寿命。

(4) 针对高载荷、高转速的使用场景，持续研发和选用新型材料，这些材料应具备更高的强度、韧性以及抗疲劳性能。例如，采用高性能合金钢或陶瓷材料等，并优化与之匹配的热处理工艺，使材料内部组织结构更加均匀致密，提高其综合性能。在制造过程中，利用先进的加工技术进一步提高加工精度，将表面粗糙度降低

至合理水平，以减少摩擦损耗。同时，加强对生产过程中工艺参数的精确控制，通过自动化控制系统和实时监测技术，确保每一批次产品质量的稳定性和一致性。

参考文献

[1]于海涛,刘明刚,周元莉,等.9Cr18轴承钢超声振动光整加工性能试验研究[J].机械工程与自动化,2024,(05):50-51+55.

[2]唐杰.低速重载可倾瓦径向轴承润滑性能及可靠性研究[D].西安理工大学,2024.

[3]张向泽.GCr15Si1Mo纳米贝氏体轴承钢的断裂韧性及疲劳裂纹扩展性能研究[D].燕山大学,2024.

[4]王文雪,沙磊,杨晓峰,等.Si3N4陶瓷球与8Cr4Mo4V轴承钢接触疲劳和摩擦性能研究[J].摩擦学学报(中英文),2024,44(11):1516-1527.

[5]徐文文.稀土Y对GCr15轴承钢组织结构及疲劳性能影响研究[D].江西理工大学,2024.

[6]董高尚.梯度结构高碳铬轴承钢的疲劳性能与失效机理研究[D].中国科学技术大学,2024.

[7]胡洪.缺陷球轴承摩擦学特性及疲劳行为研究[D].重庆交通大学,2024.

[8]新一代长寿命轴承钢抗疲劳组织性能调控技术[J].中国冶金,2024,34(03):152.

[9]王鹏.GCr15轴承钢高周疲劳损伤机制与疲劳性能优化研究[D].中国科学技术大学,2023.

[10]王悦勇.表面织构滚动轴承摩擦磨损及接触疲劳可靠性研究[D].沈阳工业大学,2023.