

盾构机主轴承密封失效的早期征兆与维护对策研究

王 岩

中铁隧道局集团有限公司大盾构分公司 河南 郑州 450001

【摘要】：盾构机主轴承作为核心传动部件，密封系统的可靠性直接决定设备运行稳定性与施工效率。密封失效易引发油脂泄漏、杂质侵入，进而导致主轴承磨损、烧蚀等严重故障，造成巨额维修成本与工期延误。本文结合盾构机施工工况特点，系统分析主轴承密封失效的早期征兆，从监测、油脂管理、密封件维护等方面提出针对性维护对策，为工程现场提前预警密封故障、延长主轴承使用寿命提供技术参考。

【关键词】：盾构机；主轴承；密封失效；早期征兆；维护对策

DOI:10.12417/2811-0528.26.09.103

1 引言

盾构机在隧道工程中广泛应用，主轴承承担着传递扭矩、支撑刀盘重量的关键作用，其工作环境恶劣，长期处于高载荷、高转速、强粉尘及泥水浸泡状态。密封系统作为主轴承的防护屏障，需同时实现油脂保留与杂质隔离双重功能。由于密封失效初期症状较隐蔽，若无法及时识别与处理，会快速加剧主轴承损伤。因此，精准捕捉密封失效早期征兆，建立科学的维护体系，对保障盾构机连续高效施工具有重要现实意义。

2 盾构机主轴承密封系统工作原理

盾构机主轴承密封多采用多层组合密封结构，常见形式为“迷宫密封+唇形密封”复合设计。迷宫密封通过内外环间隙形成油脂隔离带，利用油脂压力阻挡外部杂质侵入；唇形密封（如丁腈橡胶、聚氨酯材质）依靠弹性体与旋转件的紧密贴合，实现动态密封，同时留存润滑油脂。密封系统正常工作时，润滑油脂不仅起到润滑作用，还能维持密封腔体内正压力，形成一道额外防护屏障，三者协同保障主轴承内部清洁与润滑状态。

3 主轴承密封失效的早期征兆

3.1 密封部位温度异常升高

密封件与旋转件的动态摩擦是温度产生的主要原因，正常工况下密封部位温度与主轴承本体温度差值稳定在 5-8°C。当密封件磨损、老化或唇口变形时，摩擦阻力增大，局部温度会异常升高，差值超过 10°C 且持续上升。通过红外测温仪监测主轴承端盖密封环位置，可实时捕捉这一征兆，若伴随温度波动幅度超过 3°C/h，需警惕密封失效风险。

3.2 主轴承振动特征变化

密封系统完好时，主轴承振动信号呈现稳定规律。当密封件出现局部破损、异物卡滞时，会破坏旋转稳定性，导致振动幅值增大，且特定频率段出现异常峰值。通过振动传感器监测可知，密封失效初期，100-500Hz 频段振动幅值较正常工况上

升 20% 以上，且峰值随密封损伤程度逐步攀升，同时振动信号的谐波成分增多，规律性减弱。

3.3 密封部位出现泄漏现象

泄漏是密封失效最直观的早期征兆，分为油脂泄漏与泥水侵入两种形式。油脂泄漏多表现为密封端盖缝隙出现油迹，初期泄漏量较小，多附着于端盖表面并伴随粉尘凝结；泥水侵入则体现为密封腔体内油脂出现乳化、变色，当外部泥水压力大于密封腔压力时，端盖底部可能出现滴状泥水混合物。初期泄漏易被忽视，但随着密封损伤加剧，泄漏量会快速增加。

3.4 润滑油脂性能劣化加速

润滑油脂的性能状态直接反映密封系统有效性。密封失效初期，外部粉尘、泥水等杂质侵入密封腔，会导致油脂出现以下变化：一是颜色变深发黑，杂质含量超过 0.5%；二是粘度异常，要么因水分侵入出现乳化稀释，要么因杂质混合变得粘稠结块；三是油脂中金属磨粒含量升高，通过油液分析可知，铁、铜元素含量较正常水平上升 30% 以上，表明密封已出现间隙，杂质侵入引发局部磨损。

为清晰区分不同征兆的特征与识别方式，整理如下表：

表 1 不同征兆的特征与识别方式

早期征兆类型	具体表现特征	核心识别方式
温度异常	密封部位与主轴承本体温差超 10°C，温度波动>3°C/h	红外测温仪实时监测、温度传感器数据采集
振动异常	100-500Hz 频段振动幅值上升 20% 以上，谐波成分增多	振动传感器监测、振动信号频谱分析
泄漏现象	端盖缝隙油迹、底部滴状泥水混合物，初期泄漏量小	人工巡检、密封腔压力监测辅助判断
油脂劣化	颜色发黑、乳化/结块，金属磨粒含量上升 30% 以上	油液分析、定期油脂取样检测

4 密封失效的主要诱因

4.1 密封件自身老化与磨损

密封件材质受施工环境温度、油脂化学作用影响,长期使用后会出现老化、硬化、龟裂等问题,唇口弹性下降,密封贴合度降低。同时,旋转件表面的微小杂质会加剧密封件唇口磨损,形成不规则划痕,破坏密封完整性。

4.2 润滑油脂管理不当

油脂型号选用错误、加注量不足或过量,都会影响密封效果。油脂量不足无法维持密封腔正压力,易导致杂质侵入;油脂过量则会增加摩擦阻力,引发局部过热,加速密封件老化。此外,油脂污染、变质后未及时更换,会直接破坏密封系统防护功能。

4.3 施工工况影响

盾构机穿越砂卵石层、富水地层时,外部泥水压力较大,若密封腔压力调节不当,易出现泥水侵入。同时,施工过程中刀盘振动、主轴承载荷波动,会导致密封件受力不均,加剧局部损伤,诱发密封失效。

4.4 安装与维护偏差

密封件安装时若存在错位、变形,或螺栓紧固力矩不均,会导致密封面贴合不严,形成间隙。日常维护中,未及时清理密封部位杂质,或巡检不到位,无法发现早期微小损伤,会使密封缺陷逐步扩大。

5 密封失效的针对性维护对策

5.1 建立多维度监测预警体系

结合早期征兆特征,构建“人工巡检+在线监测”双重体系。在线监测方面,在密封端盖安装温度、振动传感器,实时采集数据,通过控制系统设置阈值报警,当温度差值超 10°C 、振动幅值上升20%时,自动触发预警。人工巡检需重点检查密封部位是否存在泄漏,每周至少开展2次全面排查,穿越复杂地层时增加巡检频次。同时,定期进行油液分析,每半月取样检测油脂杂质含量、粘度及金属磨粒指标,提前预判密封状态。

5.2 优化润滑油脂管理

根据施工工况选用适配型号的润滑油脂,优先选择抗磨

损、抗乳化、密封性强的专用油脂。严格控制加注量,按照主轴规格及密封腔容积精准加注,确保油脂充满密封间隙且不过量。建立油脂更换周期表,正常工况下每3个月更换一次,穿越复杂地层时缩短至1-2个月,更换前彻底清理密封腔杂质,避免污染新油脂。此外,实时监测密封腔压力,保持压力高于外部泥水压力 $0.1\text{--}0.2\text{MPa}$,防止泥水侵入。

5.3 规范密封件安装与更换

密封件安装前,检查密封面是否平整、有无杂质,确保安装位置准确,螺栓紧固力矩均匀,避免出现错位、变形。更换密封件时,优先选用原厂配套产品,确保材质、尺寸与原部件一致,安装后进行密封性测试,无泄漏后方可投入使用。针对老化、磨损的密封件,制定定期更换计划,正常工况下每6个月全面检查一次,发现唇口磨损、龟裂时立即更换,穿越复杂地层时缩短更换周期。

5.4 适配工况优化施工参数

穿越砂卵石层、富水地层时,适当降低刀盘转速与推进速度,减小主轴承载荷波动,避免密封件受力不均。同时,优化泥水仓压力控制,根据地层水压动态调整密封腔压力,维持压力平衡。施工过程中,及时处理刀盘振动问题,通过调整推进参数、清理刀盘卡滞杂质,减少振动对密封系统的影响。

5.5 强化日常维护管理

建立密封系统维护台账,详细记录监测数据、油脂更换、密封件更换等信息,形成全生命周期管理。定期清理密封部位杂质,采用高压气体吹扫结合毛刷清理,避免杂质堆积加剧密封磨损。加强维护人员专业培训,提升对早期征兆的识别能力与维护操作规范性,确保各项维护措施落实到位。

6 结论

盾构机主轴承密封失效的早期征兆具有隐蔽性、渐进性特点,需构建针对性维护体系。通过建立多维度监测预警体系、优化润滑油脂管理、规范密封件安装更换、适配工况调整参数及强化日常维护,可有效提前预警密封失效风险,延长密封系统及主轴承使用寿命,保障盾构机连续高效施工,为隧道工程顺利推进提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 李润军,单仁亮,李润圣,等.盾构机主驱动密封维修改造关键技术[J].西安科技大学学报,2014,34(05):579-584.
- [2] 孙灵巧.盾构主驱动密封失效的原因及预防措施[J].机械工程师,2012,(07):207-209.