

液压传动密封结构改进与渗漏治理

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：针对液压传动系统密封渗漏频发、设备运行稳定性差、运维成本偏高的问题，本文剖析静动密封结构工作原理，明确内外漏及隐性渗漏的失效路径。结合工况适配、长效可靠等原则，开展密封结构、材料选型优化改进，通过有限元仿真验证方案可行性，搭建全流程渗漏治理技术体系。工程应用表明，改进后渗漏量大幅下降，设备停机次数减少，有效提升液压系统运行可靠性与经济性。

关键词：液压传动密封；结构改进；渗漏治理

引言：液压传动凭借传动平稳、动力强劲的优势广泛应用于各类工业设备，密封系统是保障液压设备稳定运行的核心部件。受结构设计、材料性能、装配工艺及复杂工况影响，液压系统极易出现各类渗漏故障，不仅造成油液损耗、环境污染，还会引发设备出力不足、突发停机等问题，严重制约生产效率。为解决密封渗漏难题，本文系统分析渗漏失效机理，针对性开展结构优化与渗漏治理研究，为液压设备长效运行提供技术支撑。

1 液压传动密封结构及渗漏失效机理分析

1.1 液压系统密封结构类型及工作原理

（1）静密封：法兰连接用平垫圈或金属缠绕垫，靠压紧力使垫片塑性变形填充密封面微观沟槽；管接头用扩口式或卡套式，靠螺纹预紧力使密封副弹性变形形成初始密封；端盖密封用O形圈沟槽结构，圈受轴向压缩产生回弹，接触应力大于介质压力时密封。（2）动密封：活塞杆往复密封用Y形圈或组合圈，Y形圈靠唇口压力自紧，压力越高贴合越紧；阀杆密封用O形圈或V形填料，靠压盖轴向压紧产生径向扩张；柱塞密封用矩形截面密封环，靠介质压力推动扩张贴紧配合面^[1]。（3）常用密封件：O形圈用于静密封及低速往复，温度-40℃~120℃，压力≤35MPa；组合密封由PTFE耐磨环与橡胶弹性体复合，用于高压往复（≤80MPa）；骨架油封用于旋转轴，线速度≤15m/s，耐介质性取决于唇口橡胶。

1.2 液压渗漏的主要类型与产生路径

（1）外泄漏：表现形式为管接头渗油、阀板结合面渗油、缸端盖漏油、油封唇口渗油，发生部位集中于各静密封面和旋转轴伸出端；危害表现为油液损耗、环境污染及火灾隐患。（2）内泄漏：阀组内泄漏表现为滑阀间隙窜油，阀芯与阀体配合间隙增大导致压力油从高压腔窜至回油腔；液压缸内泄漏为活塞密封失效使高压腔油液窜入低压腔，引发输出力不足和速度下降。（3）隐

性渗漏：微渗漏表现为密封界面存在亚微观通道，渗漏量低于目视可辨阈值（<0.1mL/h）；间歇式渗漏与温度循环、压力波动相关，冷态密封热态渗漏或低压不漏高压渗漏，识别需依赖油液消耗量统计和气泡检漏法，潜在风险为突发性失效引发设备停机。

2 液压传动密封结构优化改进设计

2.1 密封结构整体优化设计原则

（1）工况适配原则：针对高压（>35MPa）工况增设挡圈或选用高压级密封圈防止间隙咬伤，针对高速（>1m/s）往复工况选用低摩擦系数密封材料并优化润滑结构以降低摩擦热积聚，针对高低温交变工况（-40℃~150℃）选取耐温域相匹配的密封材料，避免材料在极限温度下发生玻璃化转变或永久变形增大。（2）长效可靠原则：提升配合面表面光洁度至 $Ra \leq 0.2\mu m$ ，合理设定密封件压缩率（往复密封15%~20%、静密封20%~25%），选用抗老化性能优异的密封材料延缓热氧化进程，增设防尘圈隔离外部污染物，目标将密封结构平均首次失效时间提升至8000小时以上。（3）易维护经济性原则：简化密封装配结构，避免过盈量过大导致装配困难；采用模块化密封组件设计，使现场更换无需专用工装；统筹考虑密封件采购成本、更换工时与停机损失，在保证可靠性的前提下实现全生命周期成本最低。

2.2 关键密封结构针对性改进方案

（1）静密封结构改进：优化密封槽尺寸方面，精密控制槽底直径与槽宽公差（ $\pm 0.05mm$ ），沟槽拐角处采用R0.3~R0.5圆角过渡消除应力集中；升级密封面贴合结构方面，法兰密封面加工微锯齿同心圆弧槽以增加接触比压；增设辅助限位结构方面，高压端盖中设置金属限位台阶防止密封圈被挤出，同时作为装配定位基准确保安装位置准确。（2）动密封结构改进：采用PTFE耐磨环与O形圈组合密封替代单一密封，O形圈提供预紧

和补偿力, PTFE环作为主密封面降低摩擦系数, 适用于高压 ($\leq 80\text{MPa}$) 和宽温域工况; 严控活塞与缸筒配合间隙 ($H9/f8$)、阀杆与导向套间隙, 配合面精加工至 $Ra0.1\mu\text{m} \sim 0.2\mu\text{m}^{[2]}$ 。(3) 异形连接部位密封改进: 卡套式接头采用双层卡套设计增强抓持力, 扩口式接头采用

带角度补偿的弹性密封垫防止振动松脱; 快速接头增设自动对中导向机构确保插拔过程密封圈不受剪切损伤, 内置双向截止阀实现断开时自动封堵。为直观展示改进思路, 图1 对比了静密封与动密封结构的典型型式及其主要渗漏路径。

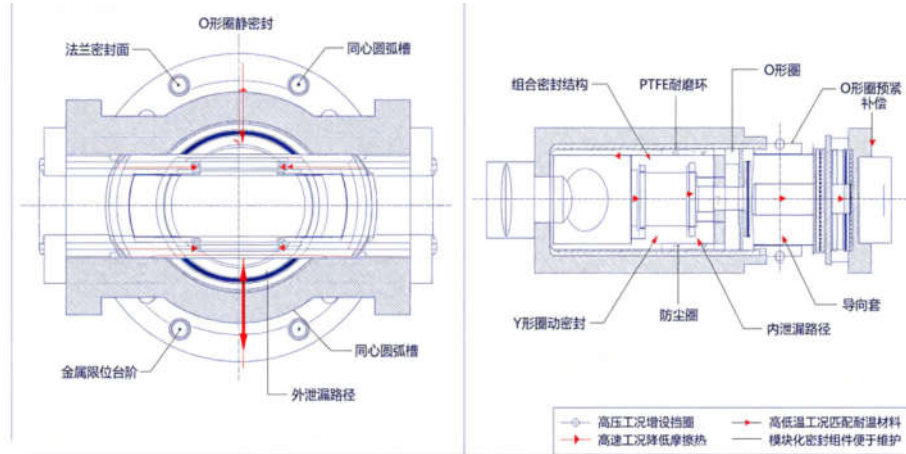


图1 液压传动静密封与动密封结构及渗漏路径示意图

2.3 密封材料选型优化与匹配

(1) 常规工况: 丁腈橡胶调整丙烯腈含量 ($33\% \sim 38\%$) 平衡耐油与耐寒, 炭黑补强提升拉伸强度 ($\geq 15\text{MPa}$), 添加防老剂提升耐热氧老化性能, 适用于矿物油介质、 $-30^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 、 $\leq 25\text{MPa}$ 工况, 综合性价比最优。(2) 复杂工况: 氢化丁腈橡胶 (HNBR) 耐热达 150°C , 耐磨性优于 NBR3 ~ 5 倍, 适于高温高速工况; 氟橡胶 (FKM) 耐 200°C 及耐酸碱, 适于强腐蚀工况, 注意低温脆性 (-15°C) 与成本限制; 聚四氟乙烯 (PTFE) 添加玻纤/碳纤维改性后耐磨性提升, 适于高压宽温域 ($-60^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$) 低摩擦工况, 需 O 形圈弹性补偿。(3) 匹配优化: 矿物油基介质选 NBR/HNBR, 水-乙二醇选 EPDM/聚氨酯, 磷酸酯选 EPDM/FKM; 温度按连续工作上限留 $15\% \sim 20\%$ 裕度, 压力按额定值校核硬度 (高压选邵氏硬度 90 ± 5)^[3]。

2.4 改进后密封结构仿真分析

(1) 有限元仿真建模: 采用 Abaqus/ANSYS 建立二维轴对称模型, 设置密封材料超弹性本构 (Mooney-Rivlin), 定义接触对与摩擦系数, 施加装配预紧及介质压力载荷, 接触区域网格加密至 $\leq 0.05\text{mm}$, 求解接触应力、VonMises 应力及压缩变形量。(2) 工况仿真分析: 低压 ($1 \sim 5\text{MPa}$) 校核初始接触应力 ≥ 1.2 倍介质压力确保密封性; 高压 ($35 \sim 80\text{MPa}$) 校核根部最大应力是否超许用值及挤入间隙风险; 并进行压力循环加载下的应力松弛分析评估长期稳定性。(3) 改进对比验证: 建立原

方案与改进方案对比模型, 输出接触应力峰值及分布均匀性、根部最大应力、间隙挤入变形量及接触应力裕度 (≥ 1.2 合格), 验证改进后接触应力提高 $\geq 30\%$ 且根部应力控制在屈服强度以内。

3 液压渗漏综合治理技术与工程应用验证

3.1 液压渗漏常态化治理技术体系

(1) 前期预防: 密封件选型阶段严格依据工况参数 (压力、温度、介质、速度) 匹配适宜材料与结构型式, 杜绝选型不当引入先天缺陷; 装配工艺标准化方面, 制定密封件安装操作规范 (专用工装压入、避免滚动扭曲、润滑剂涂抹标准), 建立装配扭矩量化标准与验收规范; 系统油液清洁度控制方面, 将油液污染度维持在 NAS7 级以内, 定期更换滤芯, 从源头减少磨粒对密封副的损伤。(2) 中期监测: 建立渗漏隐患日常巡检制度, 对管接头、阀组结合面、油封部位实行目视检查与擦拭法检测; 微渗漏检测采用荧光示踪检漏或压力衰减法 (保压 24h 压降 $\leq 0.5\text{MPa}$ 为合格), 红外热成像辅助识别早期渗漏温差异点, 建立渗漏趋势数据库实现早期预警。(3) 后期治理: 针对局部渗漏采取带压堵漏或紧固扭矩补偿等快速修复措施; 对达到老化寿命的密封件制定更换方案并批量更换; 对反复渗漏部位开展结构缺陷根本原因分析 (RCA), 按“检测→诊断→修复→验证”闭环工艺整改, 确保渗漏点修复合格率 100%。

3.2 典型渗漏故障专项治理方案

(1) 固定连接部位渗漏: 法兰及管接头紧固扭矩实

施量化管控,按标准扭矩值 $\pm 5\%$ 控制,消除因预紧不均或扭矩不足导致的密封失效;将普通石棉垫片升级为金属缠绕垫或PTFE包覆垫,耐温耐压性能提升;贴合面存在划伤或腐蚀坑时采用研磨修复或刷涂金属修复剂后精加工,恢复表面平整度。(2)运动部件渗漏:活塞杆磨损后采用镀铬修复或刷镀工艺恢复尺寸,配以加厚唇口密封圈实现磨损补偿;将普通Y形圈替换为组合密封(PTFE环+O形圈),降低摩擦系数、提升耐磨寿命;对

缸筒内壁划伤采用衍磨修复,改善摩擦副配合状态,治理后渗漏量控制在0.5mL/h以内。(3)老化失效型渗漏:依据密封件材料老化寿命和工况严重程度制定差异化定期更换周期(NBR密封件建议每2年更换,FKM/HNBR每4年更换);实施预防性治理策略,在密封件临近寿命末期时主动安排计划停机更换,避免突发失效造成的非计划停机损失。图2给出了改进前后密封结构的细节对比,清晰展示了组合密封的装配关系与防挤出结构设计。

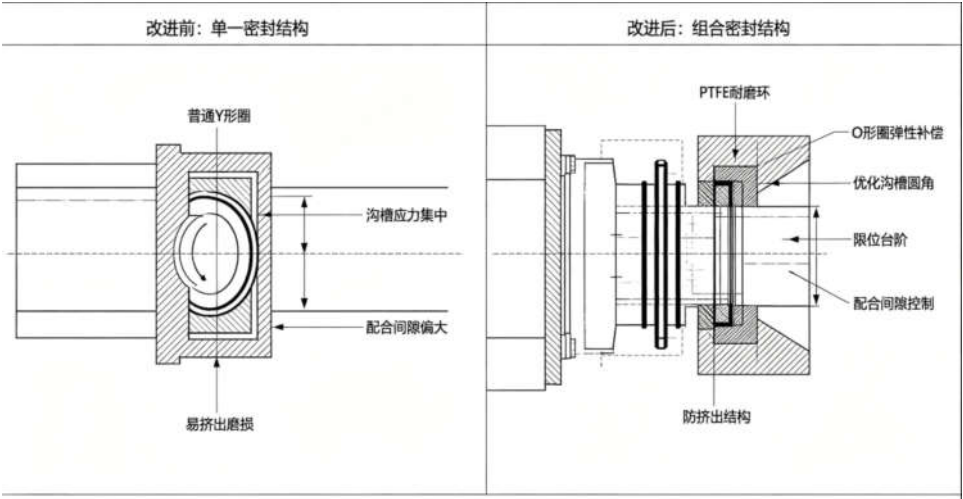


图2 密封结构改进前后对比图

3.3 工程试验与应用效果验证

(1) 试验方案设计:选取某型液压缸为试验对象,设定额定压力25MPa、往复频率10次/min、油温60℃的试验工况,检测指标包括静态渗漏量(静置24h)、动态渗漏量(连续运行100h累积)、密封部位温升及摩擦功耗;试验流程为改进前后各进行500h耐久性对比测试,每50h记录一次数据。(2) 现场应用测试:将改进后密封结构(优化槽型+组合密封+HNBR材料)装机投入实际生产线运行,连续运行2000h,每运行200h检测渗漏率和关键部位振动、温度等稳定性参数,记录渗漏发生时间及渗漏量变化趋势。(3) 应用效果分析:改进后静态渗漏量由原1.2mL/h降至0.15mL/h(降幅87.5%),动态渗漏量降低76%;系统压力波动范围由 ± 2.5 MPa收窄至 ± 1.0 MPa,设备运行平稳性改善;年度非计划停机次数由8次减至2次,综合运维成本较改进前下降约35%,验证了优化措施的有效性。

3.4 密封结构长效运维保障措施

(1) 建立密封件全生命周期管理制度:为每台设备建立密封件技术档案,记录选型信息、安装日期、更换履历、渗漏检测数据,利用信息化系统实现到期更换自

动提醒,实现从入库到报废的全程可追溯管理。(2) 规范设备操作与定期检修流程:制定液压系统标准化操作规程(避免长时间超载运行、禁止冷启动高负荷),将密封结构检查纳入月度点检和年度大修范畴,检修流程涵盖外观检查、尺寸测量(磨损量、永久变形量)和密封性测试,形成闭环检修记录。

结束语:本文完成了液压密封渗漏失效机理分析、结构优化改进、综合治理技术研究及工程验证,形成了一套适配多工况的密封改进与渗漏治理方案。通过优化密封结构、匹配专用材料、规范运维流程,显著改善了液压系统渗漏问题,提升了设备运行稳定性。后续可针对极端复杂工况,持续优化密封结构参数,完善动态运维机制,进一步延长密封部件使用寿命,拓展技术工程应用范围。

参考文献

[1]刘旭.液压系统静密封结构漏油故障分析与结构优化[J].失效分析与预防,2023,18(3):189-194.
[2]吕亚冬.液压滑阀动密封特性分析及试验研究[J].液压与气动,2025,49(9):25-31.
[3]马钊宁.液压缸内泄漏检测方法的应用及优化[J].液压气动与密封,2025,45(8):107-112.