

液压启闭机油缸密封结构优化及泄漏故障排查分析

周 勇

湖北金石炼化建设有限公司, 湖北 荆门 448000

[摘要] 液压启闭机油缸长期承受高水头荷载、频繁启停、低速重载与潮湿腐蚀环境的共同作用, 活塞杆密封、活塞密封及静密封一旦出现选型失配、沟槽精度不足、偏载磨损或油液污染, 容易形成外泄漏、内泄漏和保压漂移, 进而影响闸门启闭同步性与水工建筑物运行安全。本文依据现行液压启闭机设计、液压缸试验、往复密封沟槽和防尘圈沟槽标准, 分析油缸密封系统的载荷传递及失效机理, 提出由重载防尘、缓冲减压、主密封、回油控制和导向支承组成的组合密封优化方案, 并构建“现象确认—边界隔离—压力复核—拆检验证—闭环验收”的泄漏故障排查流程。研究认为, 密封优化不能停留于更换密封圈, 而应同步控制活塞杆直线度、表面粗糙度、导向间隙、油液清洁度与瞬态压力。通过结构、材料、加工、装配及状态监测协同, 可降低重复泄漏风险, 为水利水电工程液压启闭机检修与技术改造提供参考。

[关键词] 液压启闭机; 油缸密封; 组合密封; 内泄漏; 外泄漏; 故障排查

DOI: 10.64635/ja.2026.1366

中图分类号: TV664

文献标识码: A

Optimization of Cylinder Seal Structure and Leakage Fault Troubleshooting for Hydraulic Gate Hoists

Zhou Yong

Hubei Jinshi Refining and Chemical Construction Co., Ltd., Jingmen, Hubei 448000, China

Abstract: Hydraulic gate hoist cylinders are subject to the combined effects of high water-head loads, frequent start-stop operation, low-speed heavy-load conditions, and humid corrosive environments over long-term service. Once rod seals, piston seals, and static seals suffer from improper selection, insufficient groove accuracy, eccentric-load wear, or oil contamination, external leakage, internal leakage, and pressure-holding drift may easily occur, thereby affecting the synchronization of gate opening and closing as well as the operational safety of hydraulic structures. Based on current standards for hydraulic hoist design, hydraulic cylinder testing, reciprocating seal grooves, and wiper ring grooves, this paper analyzes the load transfer and failure mechanisms of cylinder sealing systems. It proposes an optimized combined sealing scheme consisting of heavy-duty dust prevention, buffering and pressure reduction, primary sealing, oil return control, and guiding support, and constructs a leakage fault troubleshooting process of “phenomenon confirmation—boundary isolation—pressure recheck—disassembly inspection and verification—closed-loop acceptance.” The study argues that seal optimization should not remain limited to the replacement of sealing rings, but should also involve the coordinated control of piston rod straightness, surface roughness, guide clearance, oil cleanliness, and transient pressure. Through coordination among structure, materials, machining, assembly, and condition monitoring, the risk of repeated leakage can be reduced, providing reference for the maintenance and technical renovation of hydraulic gate hoists in water conservancy and hydropower projects.

Keywords: hydraulic gate hoist; cylinder seal; combined seal; internal leakage; external leakage; fault troubleshooting

引言

液压启闭机以液压缸作为直接执行元件, 具有布置紧凑、输出力大、调速平稳和远程控制便利等特点, 广泛用于泄洪闸、进水口闸门、船闸及泵站闸门。与一般工业液

压缸相比, 水工启闭机油缸行程较长、负载变化幅度大, 部分设备需在长期停机后迅速投入, 活塞杆还可能暴露于雨水、粉尘、盐雾和温差环境中。密封失效不仅造成油液损失和环境污染, 还会引起闸门下滑、双缸不同步、启闭

速度下降以及压力冲击。现行 GB/T 14627—2011 和 NB/T 10341.4—2023 对液压式启闭机及其设计提出了系统性要求,GB/T 15622—2023 进一步明确液压缸验收试验方法,说明油缸密封应由设计、制造、试验和运维共同保证。基于此,本文从密封结构与泄漏路径的对应关系出发,讨论结构优化要点,并形成可在现场执行的分层排查方法。因此,密封设计既要满足额定载荷下的瞬时可靠性,也要兼顾长期停机后的再启动性能和现场维护可达性。

1 液压启闭机油缸密封系统及泄漏机理

油缸泄漏有外泄漏和内泄漏两种类型。外泄漏主要表现在活塞杆伸出处、缸盖结合面、油口接头、焊缝缺陷之处,表现为活塞杆形成连续油环,缸盖下方出现油滴或者油膜,接头在升压时渗油。活塞杆密封外漏一般是因为唇口磨损、密封反装、预压量不够、沟槽倒角尖锐、活塞杆划伤、锈蚀麻点、偏载造成。若是防尘圈失效,外部砂粒和水分随着活塞杆回缩进入密封腔,形成磨粒磨损进而破坏油膜稳定性。内泄漏表现为压力油越过活塞密封从高压腔流入低压腔,现场通常看不到油迹,但是会出现保压压降增大,闸门缓慢下滑,启闭速度不够或者双缸行程差逐渐变大。导致内漏出现的主要缘由有活塞密封磨损或者挤出、缸筒拉伤、活塞与缸筒同轴度存在偏差、导向环磨损后金属出现偏磨,还有阀组内泄漏被错误判断为油缸内漏。在高压工况的情况下,要是缓冲密封和主密封之间不存在合理的泄压通道,密封级间就有可能形成困油压力,回油管阻力过大、平衡阀开启滞后或者有杆腔面积差引发的压力放大,同样会让杆密封承受高于系统表计值的局部压力,最终致使唇口挤出、保持环损伤。在低压缓慢运行的时候,部分密封又可能因为起封压力不够而形成湿杆现象,所以在排查的时候必须同时考虑高压挤出与低压不起封这两类相反的机理,不能仅仅用“密封圈老化”来概括所有原因。保压试验里的压力下降会受到油液温度变化、残余空气压缩、管路弹性变形影响,不能只依据单一压力表读数来直接判定活塞内漏。要在油温趋向稳定、空气排净且测压元件校验合格之后进行对比,并且结合低压腔收集量或者位移变化形成证据链。

2 油缸密封结构优化设计

2.1 组合密封与导向支承协同优化

水工启闭机具有低速重载、长时间保压、外部污染强的特性,活塞杆端适宜采用分级组合密封,而不应当仅依靠单道普通 Y 形圈。外侧设置耐磨型重载防尘圈,其刃口能够刮除泥沙和水膜,内侧副唇能够截留少量油膜,之

后配置缓冲密封,可削减压力脉动并吸收瞬态峰值,主密封能够选用具有不错低速跟随性和抗挤出能力的聚氨酯 U 形圈,或者采用由聚四氟乙烯滑环与弹性预紧元件组成的同轴密封。对于压力高、行程长且启停频繁的油缸,要在主密封背压侧设置抗挤出挡圈,并且在缓冲密封与主密封之间设置可控回油或泄压通道,避免级间困油。活塞侧可以采用双向组合密封加两侧支承环,支承环应先承担侧向载荷,防止活塞密封被迫兼作导向件。导向套的有效长度、支承环的宽度、材料的压缩模量,需要依据活塞杆的直径、伸出的长度、最大偏载进行校核,对于长行程油缸而言,能够借助球铰、关节轴承或者浮动连接来释放安装误差。沟槽的尺寸、公差、圆角应当分别契合 GB/T 2879—2024、GB/T 6578—2024 等现行的标准,装配倒角要实现圆滑过渡,从而避免密封唇口被螺纹、键槽、油口的锐边切伤。结构优化的关键之处在于,将防污染、承载、减压、密封的职能分配给不同的元件,以此让各道密封在正常的压力区间内进行工作。静密封部位适合依照法兰刚度和螺栓预紧方式来选取 O 形圈、矩形圈或者带挡圈结构,防止使用密封胶去替代规范沟槽。针对可能承受双向压力的缸盖连接,应当校核 O 形圈的挤出间隙并且采用分级对称紧固,避免法兰翘曲导致局部失压。密封组件需要把现场拆装空间纳入考量范围,借助可更换导向套亦或是模块化密封盒,来减少大修期间对缸筒、活塞杆造成的二次损伤。

2.2 密封材料、表面质量与油液条件匹配

密封材料的选择应当依据介质相容性、温度范围、压力水平、速度、停机周期来进行考量。聚氨酯材料在耐磨性与抗挤出性方面表现较好,适用于在矿物油介质条件下的高压往复密封工作,不过在含水量较高的环境或者长期处于高温的环境中,要留意水解、硬度下降的情况,丁腈橡胶成本相对较低,并且与矿物油具有较好的相容性,适合用于静密封、中等温度的工况,氟橡胶具备较强的耐温、耐老化性能,不过其低温弹性、成本需要进行综合评估,聚四氟乙烯具有较低的摩擦系数,爬行现象较小,适宜低速稳定运行,不过一般需要弹性元件来提供预紧力,并且要严格控制沟槽间隙。在确定材料之后,还需要同步控制活塞杆基体硬度、防腐层完整性、表面微观形貌。表面过粗会对密封唇口造成切削,而过于光滑则有可能致使油膜难以维持。在工程领域,可将 Ra 不超过 $0.4\mu\text{m}$ 当作杆密封表面的控制标准,还要检查是否存在轴向划痕、镀层起皮、点蚀的状况。在油液方面,对于高压液压系统而言,

最好把清洁度控制在 ISO 4406 18/16/13 或者更优良的水平, 设置回油过滤、离线循环过滤、呼吸器防潮等措施, 新油不能直接被当作清洁油, 应该通过专用滤油装置进行注入。温度控制需要与密封材料相适配, 在含水介质或者潮湿环境下, 特别要防止聚氨酯在高温时发生水解。要限制回油背压、阀件切换冲击, 定期检查蓄能器预充压力、节流孔、缓冲阀的状态, 让密封所承受的实际瞬态压力不超过其材料与沟槽组合的允许范围。密封件的入库、装配管理同样会对最终寿命产生影响。橡胶、聚氨酯制品需要避开光线、热量并且要远离臭氧源, 要是超过了储存期限或者出现永久变形的零件那就不能再继续使用了, 在进行装配之前应该核对批次、材料牌号、方向标识, 为了用和工作介质相兼容的装配润滑剂, 绝对禁止使用尖锐工具强行撬入沟槽。当更换油液牌号的时候, 需要先去验证新介质对于现有的密封材料、涂层、软管的相容性, 防止因为添加剂模式变化而造成溶胀、收缩或者硬化的情况发生。

3 泄漏故障排查与优化效果验收

3.1 分层隔离式故障排查流程

泄漏排查需要遵循这样的原则, 即先检查外部再检查内部, 先针对系统而后针对油缸, 先采用无损方式最后进行拆检。首先要进行现象确认, 先把油缸表面清洗干净, 之后在空载状态、额定载荷状态、保压状态分别进行观察, 记录下泄漏的位置、油滴形成的时间、活塞杆伸缩的方向、油温、系统压力、闸门位移等情况, 以此来区分装配时残留的油、正常的润滑油膜、连续性泄漏。接着要进行边界隔离, 对于油口接头、缸盖结合面和焊缝, 借助吸油纸、显色剂或者紫外示踪方法来定位外部泄漏, 要是遇到疑似内部泄漏故障, 需要把阀组、管路和油缸进行分段封闭, 避免将换向阀、液压锁和平衡阀的内部泄漏错误判断为活塞密封失效。最后要进行压力与位移复核, 在保证闸门机械锁定、安全卸荷的状况下, 依照 GB/T 15622—2023 规定的试验思路, 对两个腔分别施加压力, 并且监测压降、泄漏量、活塞杆位移。针对长行程双缸设备而言, 还需要同步记录左右缸的压力、编码器行程差。要是出现压力下降的情况, 而活塞杆却没有发生位移, 那么就应当进一步对阀组、油液温度变化展开检查, 要是压力下降的同时闸门出现下滑, 那么重点就在于检查活塞密封、缸筒。第四步进行拆检验证, 重点去观察密封唇口是否存在单边磨损、切口、挤出、焦化、硬化或者水解的情况, 还要检查导向环厚度差、活塞杆直线度、缸筒纵向拉痕、沟槽毛刺。第五步进行闭环复验, 更换密封件之后不能马上结束, 要完

成低压跑合、额定压力动作、保压、全行程往复、外观复查这些操作, 并且比对修前和修后压力稳定性、温升、行程同步性、油液颗粒度。整个排查过程必须要以闸门可靠支承、机械锁定、系统卸压作为前提条件, 禁止在悬载状态下拆卸高压接头或者缸盖。测压点的布置应当处于靠近油缸两腔的地方, 同时要对压力传感器量程、采样频率展开校核工作, 以此来捕捉普通压力表难以展示出来的瞬态峰值。针对间歇性泄漏这种情况, 可以把压力、位移、温度、阀指令时间戳进行对齐处理, 借助事件回放来判断泄漏究竟是发生在起动阶段、匀速阶段、制动阶段还是保压阶段, 进而缩小故障范围。

3.2 关键控制指标与运维闭环

密封改造完成后的验收工作, 需将“无可见外漏、内漏得到有效控制、动作平稳顺畅、温升处于合理范围、污染度达到标准要求”设定为统一目标, 并非仅仅检查更换后的密封是否暂时保持干燥状态。表 1 所罗列的内容是可用于设计复核、检修验收的关键控制指标, 其中活塞杆的几何参数与表面指标能够切断重复出现的磨损源头, 油液清洁度可以抑制磨粒所造成的损伤, 沟槽、试验依据能够确保不同供应商所提供零件的互换性、验收的一致性。设备投入运行之后, 应当建立基于趋势的运维台账, 每次开启和关闭设备时, 都要记录起动压力、稳定压力、油温、全行程时间、双缸同步偏差、停机之后的位移变化情况, 在发现压力逐月上升而速度下降的时候, 应当优先对过滤器堵塞、导向偏载、密封摩擦增大等情况进行检查, 当发现压力基本保持稳定但闸门却缓慢下滑时, 则应当重点排查活塞密封、液压锁、控制阀的内漏问题。汛前检查涵盖多个方面, 有活塞杆防腐层状况、外露段清洁程度、防尘圈弹性如何、油箱含水情况、备用密封件状态怎样。检修的时候要依据密封失效的形貌去反向推断故障根源, 同时 will 将几何测量、油液检测、压力曲线这些内容归入维修报告里。只有建立起“设计选型—制造检验—规范装配—状态监测—失效反馈”这样一个封闭的循环模式, 才能够防止同一泄漏故障反复发作, 进而延长启闭机油缸的大修周期。

4 结论

液压启闭机油缸泄漏具有多因素耦合特征, 表面油迹只是故障结果, 根因可能来自密封材料失配、沟槽精度不足、活塞杆划伤、导向偏载、油液污染、温度升高或局部压力放大。优化时应采用防尘、缓冲、主密封、挡圈与导向支承协同的分级结构, 并通过泄压回油设计消除密封级间困油; 同时将活塞杆直线度、表面粗糙度、油液清洁度

及密封介质相容性纳入统一控制。故障排查应以系统隔离和证据链为基础,依次完成外观定位、阀缸分段、分腔保压、位移监测和拆检验证,避免盲目更换密封件。按照现行标准开展低压跑合、额定工况动作和泄漏验收,并建立压力、温度、行程与油液状态的趋势台账,可由事后维修转向预防性维护,提升闸门启闭可靠性和水工设备运行安全。

[参考文献]

- [1]王海林.某水库泄洪闸液压启闭机选型设计和安装调试[J].黑龙江水利科技,2025,53(6):88-90.
- [2]吴增众,刘美钰,张特.环境温度变化对南水北调液压启

闭机闸门开度影响分析[J].水利建设与管理,2024,44(6):62-65.

[3]刘晓东,卜晓珊,吴增众.基于自控测距的液压启闭机油缸清洁机器人位姿跟踪研究[J].机械制造与自动化,2024,53(1):228-231+265.

[4]何欣航.某闸门液压启闭机油缸应急维修技术分析[J].河南水利与南水北调,2023,52(12):75-76.

[5]方超群,耿红磊,缪春晖,等.水利工程液压式启闭机油液健康管理系统的研发及应用[C]//中国水利学会.2023 中国水利学术大会论文集(第六分册).黄河水利出版社,2023:50-54..