

石油化工机械密封泄漏问题与解决对策研究

董高科

镇海石化建安工程股份有限公司 浙江 宁波 315000

摘要: 石油化工设备长期处于高温高压、强腐蚀的极端工况,机械密封泄漏是制约装置安全稳定运行的常见故障,易引发安全事故、环境污染与经济损失。本文阐述机械密封结构原理与工况特性,系统剖析材料设计、装配工艺、运行管控、运维体系四大维度的泄漏核心问题,针对性提出选材结构优化、装配工艺规范、运行动态管控、长效机制完善的解决对策,为石化设备密封故障防控与提质增效提供技术参考。

关键词: 石油化工机械;密封泄漏问题;解决对策

引言: 机械密封是石油化工流体输送设备的核心密封部件,其运行稳定性直接关乎整套生产装置的安全、环保与经济效益。石化生产工况复杂恶劣,介质腐蚀、颗粒磨损、参数波动等因素极易引发密封泄漏故障,不仅会造成物料损耗、设备损坏,还存在火灾爆炸、人员中毒及生态污染风险。为有效解决密封泄漏难题,本文结合石化行业工况特点,全面分析泄漏成因,探究科学可行的解决对策,助力提升设备运维水平与生产安全保障能力。

1 石油化工机械密封基础理论与泄漏危害分析

1.1 机械密封核心结构与工作原理

(1) 核心组成部件: 动环随轴旋转,静环固定于腔体,二者端面相互贴合形成密封面;弹性补偿元件(弹簧或波纹管)提供端面贴合所需的预紧力,并在磨损后自动补偿;辅助密封件(O型圈、V型圈等)保障动环与轴、静环与腔体间的二次密封;传动部件将轴的动力传递至动环,确保同步旋转^[1]。(2) 基本工作原理: 机械密封依靠动、静环端面的紧密贴合形成微小间隙,在弹性元件预紧力和介质压力的共同作用下,密封端面保持稳定的接触比压,从而阻断介质沿轴向泄漏的通道,实现流体的动密封。(3) 石油化工常用密封类型: 波纹管式密封适用于高温、高粘度介质工况;弹簧式密封应用最广,适配一般油品及化工介质;旋转式密封适用于高速旋转设备,具有良好的追踪性和稳定性。

1.2 石油化工机械密封工况特性

(1) 环境特性: 石油化工生产多呈现高温(可达300℃以上)、高压(数兆帕至数十兆帕)、易燃易爆及强腐蚀性环境,密封装置长期处于极端条件下运行。(2) 介质特性: 油品及化工溶剂普遍具有腐蚀性,

易侵蚀密封元件;粘稠性介质增加密封端面摩擦负荷;介质中夹带的颗粒杂质易附着于端面,加剧磨损并破坏密封副的贴合精度。(3) 运行特性: 设备需长时间连续运转,同时伴随频繁启停和负荷波动,导致密封端面热力状态和受力条件不断变化,对密封稳定性和适应性提出更高要求。

1.3 机械密封泄漏类型与分级标准

(1) 按泄漏状态划分: 突发性泄漏由密封件断裂或严重磨损引起,泄漏量大且急剧;间歇性泄漏与工况波动或介质相变相关,呈周期性出现;持续性轻微泄漏表现为长期微量渗漏,虽不明显但积累危害不可忽视。(2) 按泄漏位置划分: 端面泄漏由密封副贴合不良或磨损引起,最为常见;辅助密封圈泄漏源于O型圈老化、变形或装配不当;紧固件与腔体泄漏多为连接松动或密封垫失效所致。(3) 行业泄漏分级标准: 石油化工领域通常依据泄漏速率、压力降及介质毒性等指标,将泄漏划分为若干等级(如A、B、C三级),并对应不同的处置时限和管理要求,为设备维护提供明确判定依据。

1.4 密封泄漏的危害分析

(1) 安全危害: 泄漏介质多为易燃易爆或有毒物质,遇火源或高温表面易引发火灾、爆炸事故,且有毒气体扩散直接威胁现场作业人员的生命健康。(2) 环保危害: 烃类及化工溶剂泄漏后渗入土壤、污染地下水,挥发性有机物排放造成大气污染,严重破坏周边生态环境。(3) 经济危害: 介质损耗增加原材料成本,密封失效导致设备部件损坏,装置非计划停机造成生产中断,叠加维修与更换费用,显著推高运维总成本。(4) 设备危害: 泄漏过程往往伴随密封端面磨损加剧和腐蚀介质侵入,加速轴承、轴套等关联零部件的损伤,形成

恶性循环,最终缩短机械设备整体使用寿命。

2 石油化工机械密封泄漏核心问题分析

2.1 密封材料与结构设计缺陷

(1) 材料选型不当:密封副材料未充分考虑工况温度、压力及介质化学特性,在高温下发生热软化、低温下脆裂,或与腐蚀性介质发生化学反应导致材料劣化;辅助密封圈材料与介质不兼容,出现溶胀、硬化或降解,加速密封失效进程。(2) 结构设计不合理:密封端面比压设计过大或过小,端面宽度与压力等级不匹配;弹性补偿元件的行程余量不足,磨损后补偿能力下降;冲洗、冷却等辅助系统设计缺失或能力不足,导致密封腔热量积聚、杂质沉积,严重缩短使用寿命。(3) 部件加工误差:密封环平面度、粗糙度未达到设计要求,端面微观不平致导致初始贴合不严密;动环与轴、静环与腔体之间的配合间隙不合理,过紧导致装配困难、过松引起辅助密封圈失稳,均直接降低密封可靠性。

2.2 安装与装配工艺不规范

(1) 装配精度偏差:轴与密封腔同轴度超差,致使动、静环端面无法平行贴合,运行过程中端面受力不均而产生偏磨;密封安装垂直度不足,端面倾斜造成局部接触应力过大,加速局部磨损和泄漏通道形成。(2) 预紧力调试不当:弹簧预紧力过小,端面比压不足以抵抗介质压力,密封面无法有效贴合;预紧力过大则加剧端面摩擦磨损,产生过多摩擦热导致密封面热裂、变形,甚至烧毁密封副。(3) 装配操作违规:装配前未对密封部件及腔体进行规范清洁,杂质颗粒残留嵌入密封面造成划伤;未按规程使用专用润滑剂,导致安装过程中密封圈干磨损伤;紧固螺栓力矩不均,造成压盖偏斜或密封件变形,直接影响密封效果。

2.3 设备运行与工况异常

(1) 工艺参数波动:生产过程中温度骤升骤降引发密封环热胀冷缩不均,端面间隙发生突变;压力剧烈波动导致端面比压不稳定,密封追随性不足时出现瞬时开启,介质趁隙泄漏。(2) 设备运行故障:泵体空转使密封端面处于干摩擦状态,数分钟内即可造成密封面烧毁;设备振动超标导致动环振动失稳,端面贴合状态被破坏;轴系偏心使动环径向跳动增大,密封副无法维持稳定闭合^[2]。(3) 介质工况恶劣:介质中含有硬质颗粒杂质,进入端面间形成磨粒磨损,在密封面上划出沟槽;高腐蚀性介质在高温下腐蚀速率急剧加快,点蚀、晶间腐蚀等局部破坏形式显著削弱密封结构强度。

2.4 运维管理与检修体系不完善

(1) 日常巡检不到位:未对密封运行温度、泄漏量、振动等状态参数进行定期监测,微小泄漏隐患未能及时发现;缺乏系统性的巡检记录和分析,无法建立泄漏发展趋势判断依据。(2) 检修维护不规范:超过使用寿命的密封件未按计划更换,存在超期服役风险;故障处理仅更换密封件而未排查根本原因,造成同类型故障反复出现;维修装配未严格执行工艺标准,二次安装质量难以保证。(3) 管理制度缺失:缺乏涵盖密封全生命周期的标准化运维流程和操作规范;作业人员专业技术培训不足,对密封原理和安装工艺理解不深;备件质量管控、检修验收等环节缺乏有效监督,管控体系存在明显漏洞。

3 石油化工机械密封泄漏问题解决对策与保障措施

3.1 优化密封材料选型与结构设计

(1) 精准适配工况选材:依据介质腐蚀性等级、工作温度范围及压力等级,建立密封材料选型数据库,针对性选用碳化硅、硬质合金等耐磨材料应对含颗粒介质,选用哈氏合金、钛合金等耐蚀材料应对强腐蚀环境,辅助密封圈优先选用全氟醚橡胶、聚四氟乙烯等宽温域耐蚀材料,从源头消除材料不兼容所致的失效隐患。(2) 优化密封结构设计:改进波纹管补偿结构,增大波纹管有效伸缩量,提升对轴向窜动和端面磨损的补偿能力;优化弹簧布置方式,减少介质中杂质在弹簧腔内的沉积堵塞;针对含颗粒工况,升级旋转式密封组件,增设刮屑或离心分离结构,阻止固体颗粒进入密封端面,降低磨粒磨损风险^[3]。(3) 完善辅助系统配置:依据 API682 密封辅助系统标准,配套标准化冲洗方案,针对轻烃类介质选用自冲洗方案带走端面摩擦热,针对含颗粒污油选用外冲洗或急冷方案实现对端面的清洁保护;配置高效冷却器与磁性过滤器,将密封腔介质温度控制在密封副允许范围内并滤除循环液中磁性杂质;同步增设保温伴热和压力平衡装置,稳定密封腔热力场与压力场,确保辅助系统与主机运行状态协同匹配,为密封创造稳定可靠的边界运行条件。

3.2 规范密封安装与装配施工工艺

(1) 严控装配精度:安装作业前使用激光对中仪或百分表精确校准轴系同轴度与垂直度,严格控制偏差在设计允许公差范围内;采用专用导向工装保证动环与静环端面的平行贴合,避免人工敲击安装导致的端面损伤;对各配合间隙实施量化检测与记录,确保尺寸链闭合精度满足密封稳定运行要求。(2) 标准化预紧力调试:依据设备型号、密封结构及运行工况参数,采用弹簧压缩量实测法结合扭矩控制法精准设定预紧力数值;

针对高温工况需按热态膨胀量预留补偿余量,确保冷态预紧力既能维持静压密封性,又不致在热态下过度增大端面比压而加剧磨损;调试完成后对压缩量数据进行标记存档,形成单台设备预紧力基准档案。(3)落实装配操作规程:编制密封装配标准化作业指导书并配发至各维修班组,装配前严格执行各部件清洗脱脂工序,使用专用清洗剂和无尘擦拭材料清除加工及运输过程残留的防锈油和微粒污染物;按设计规范涂抹专用润滑介质,对紧固螺栓实行分步对称加力方式确保压盖受力均匀;作业全过程实行工序检查签字确认制度,保证每步操作均有据可查、质量可控^[4]。

3.3 强化设备运行过程动态管控

(1) 稳定生产工艺参数:依托 DCS 控制系统优化温度、压力、流量的调控策略,设定多级报警阈值,当工艺参数接近密封允许边界时提前触发调节干预;严格控制升降温及升降压速率,避免热冲击和压力骤变对密封端面造成损伤;对频繁波动的关键参数实施 PID 参数整定优化,增强系统抗扰动能力,从工艺侧消除密封承受异常负荷的根源。(2) 杜绝违规运行操作:制定设备启停及切换操作标准规程,将严禁空转、严禁超负荷运行、严禁快速启停等刚性条款纳入操作红线管理;建立设备振动定期检测制度,对振动值异常上升的设备及时安排轴系对中复检和轴承状态评估,防止振动及轴系故障传导至密封端面引发突发性失效。(3) 搭建智能监测体系:在密封腔集液盘、冷却水进出口及密封腔壁面部署泄漏检测探头、温度传感器和压力变送器,构建多参数融合的实时监测网络;运用边缘计算与大数据分析技术建立密封健康状态评估模型,对端面异常温升、微量泄漏速率渐变等早期征兆自动识别并推送预警信息,实现从事后被动维修向事前预测性维护的转型升级。

3.4 完善运维检修与长效管理机制

(1) 建立常态化巡检制度:制定密封巡检标准作业程序,明确巡检路线、点位、内容及判定标准,重点检查密封有无异常泄漏、温升、异响及辅助系统运行状况;采用巡检管理系统实现任务派发、数据录入、问题上报的闭环管理,确保微小泄漏隐患早发现、早处置。(2) 规范检修更换流程:依据密封件使用寿命统计

和运行工况制定差异化更换周期,对达到更换年限的密封部件强制报废更新;故障检修时严格遵循解体检查、失效分析、原因定位、针对性修复的精细化流程,杜绝简单更换而不究根本原因的粗放式维修,防止同类故障反复发生^[5]。(3) 强化人员专业培训:围绕机械密封基本原理、安装操作要点、状态监测方法、常见故障诊断与应急处理等内容,分层级开展专项理论和实操培训;建立岗位技能认证制度,对从事密封安装、检修及运维管理的关键岗位人员实施持证上岗,定期组织技能考核与复训,切实提升全员专业素养和实操能力。(4) 构建闭环管控体系:建立密封全生命周期管理台账,详细记录设备基础信息、密封更换历史、检修情况、泄漏事件及处置措施等完整档案;定期开展泄漏问题复盘分析,从设计、安装、运行、维护多维度追溯根本原因,提炼经验教训,动态修订防控标准和作业规程,形成“问题发现—原因分析—对策制定—效果验证—标准固化”的持续改进闭环,系统性提升密封泄漏防控能力。

结束语

本文全面梳理石油化工机械密封的泄漏类型与危害,深度剖析密封失效的各类核心诱因,从设计、装配、运行、运维四个维度构建了系统化的泄漏防控体系。通过优化密封结构材料、规范施工工艺、强化智能管控、完善运维机制,可有效降低密封泄漏故障率,延长设备使用寿命。研究成果可有效解决石化设备密封运行痛点,对提升石化装置运行稳定性、安全性与经济性具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] 李华民. 化工设备机械密封泄漏及其维修要点探究 [J]. 山西化工, 2025, 45(2): 181-183.
- [2] 崔成功. 化工机械密封泄露问题分析与维修技术研究 [J]. 石油化工设备技术, 2025, 46(4): 56-60.
- [3] 王健, 张磊. 炼厂离心泵机械密封热态泄漏失效机理及优化措施 [J]. 石油化工设备, 2024, 53(3): 78-83.
- [4] 陈琳. 化工机械密封泄漏的维修策略研究 [J]. 建筑监督检测与造价, 2024, 17(2): 33-36.
- [5] 李果. 化工反应釜密封失效分析及优化改造 [J]. 设备管理与维修, 2023, 36(21): 105-106.