

化工泵的密封失效原因分析及检修改进方案

温 波

国家能源集团宁夏煤业有限公司煤制油化工安装检修分公司 宁夏 银川 750000

摘 要：化工泵密封系统是保障设备平稳运行、防范生产泄漏风险的关键结构，密封失效会直接影响化工生产连续性与安全性。本文结合行业现行技术标准，梳理机械密封、填料密封的结构原理与典型失效形式，从材料选型、安装检修、运行工况、日常运维四个维度深入剖析密封失效核心成因，制定标准化检修流程、结构优化、工况管控及运维升级方案，有效提升密封运行可靠性，为化工泵密封故障治理与设备提质增效提供实用技术支撑。

关键词：化工泵；密封失效原因；检修改进方案

引言：化工泵广泛应用于化工生产介质输送环节，密封性能优劣直接决定设备运行状态与生产安全水平。化工介质普遍具有高温高压、强腐蚀、含固体颗粒等特点，极易造成密封端面磨损、材料老化及介质泄漏等故障，不仅增加设备检修成本、造成物料损耗与环境污染，严重时还会引发爆炸、中毒等安全事故。为此，本文系统分析密封失效机理，梳理各类故障诱因，提出针对性检修与优化改进措施，助力设备安全稳定长效运行。

1 化工泵密封结构及失效类型概述

1.1 化工泵常用密封结构及工作原理

(1) 机械密封结构组成：机械密封由动环、静环、弹簧、辅助密封圈等核心部件构成。动环随轴旋转，静环固定于腔体，弹簧提供端面贴合预紧力，辅助密封圈保证动环与轴、静环与腔体间的辅助密封。其原理为弹簧力和介质压力使动、静环端面紧密贴合，形成极薄液膜实现动态密封。(2) 填料密封结构形式及适用工况、工作原理：填料密封由填料箱、填料（如聚四氟乙烯、石墨盘根）、压盖组成。通过压盖压紧填料，使其产生径向变形堵塞轴与腔体间隙实现密封。适用于压力较低、转速不高、介质含固体颗粒的工况，结构简单成本低廉，但泄漏量较大，需定期调节压紧力^[1]。(3) 组合式密封的结构特点与应用场景差异：组合式密封将机械密封与填料密封串联或并联使用，集两者优势提升可靠性。适用于高温、高压、强腐蚀或高危介质工况，如输送液化石油气、液氨等易挥发介质，主密封失效时副密封仍可维持短期密封，提供安全冗余。

1.2 化工泵密封典型失效类型

(1) 泄漏失效：泄漏失效分为端面泄漏、辅助密封泄漏和静密封点泄漏。端面泄漏主要由端面变形、磨损或液膜失稳引起，表现为介质外漏或内漏；辅助密封泄漏源于O形圈老化、损伤或安装缺陷，介质沿轴或配合

面渗漏；静密封泄漏发生在压盖与腔体结合面等部位，多为垫片压紧力松弛所致。(2) 磨损失效：密封端面划伤、沟槽、偏磨、均匀磨损均为典型形式。划伤和沟槽由介质中硬质颗粒嵌入端面造成；偏磨由安装对中不良、轴向窜动过大或轴弯曲引起；均匀磨损为正常使用寿命消耗，当磨损量超限时密封性能急剧下降。(3) 变形老化失效：高温变形、橡胶溶胀、材料脆化、老化开裂是主要模式。高温使密封环热变形端面平面度丧失；橡胶圈在油类或有机溶剂中溶胀体积变化失去弹性；长期高温或化学侵蚀导致非金属材料脆化产生裂纹；老化开裂整体缩短密封寿命。

1.3 密封失效判定标准及危害等级划分

(1) 行业密封失效判定技术标准与检测依据：主要依据API682、GB/T33509-2017《机械密封通用规范》等标准。检测手段包括泄漏量测定、密封腔压力及温度监测、轴向窜动量测量、端面磨损量检测，以及红外热成像、超声波泄漏检测等在线监测方法，综合判定密封状态。(2) 轻微、中度、重度失效的工况表现与判定依据：轻微失效表现为泄漏量略增，压力温度轻微波动，可短期维持运行；中度失效为泄漏量持续增大，密封腔温度明显上升，端面出现局部磨损；重度失效为泄漏量急剧增加，伴随异常振动噪音或介质喷溅，需立即停机。(3) 不同等级失效对设备、生产、安全的危害差异：轻微失效增加维护频次，不影响连续生产；中度失效迫使减负荷运行，造成产量损失并可能污染环境；重度失效可导致机泵抱轴、叶轮损坏等重大设备事故，甚至引发火灾、爆炸、中毒等安全事件，须建立分级预警机制并制定针对性应急预案。

2 化工泵密封失效核心原因深度分析

2.1 材料因素引发的密封失效

(1) 密封材质与输送介质不匹配，出现腐蚀、溶

胀、老化破损问题。选材时若未充分考虑介质的化学性质,如强酸、强碱、有机溶剂等,可能导致金属部件发生晶间腐蚀或点蚀,橡胶辅助密封圈发生溶胀变形失去弹性,非金属密封环表面老化开裂,最终导致密封结构破坏。(2)密封材料耐温、耐压性能不足,适配工况能力不达标。当介质温度超过密封材料允许使用范围时,如普通丁腈橡胶在120℃以上加速老化,石墨浸渍树脂在高温下树脂析出,密封端面产生热裂纹;压力超出设计值时,静环座变形、密封腔挠曲,端面比压异常升高,加速磨损^[2]。(3)密封配件质量缺陷、材质不均导致的早期失效。部分密封组件存在内部微裂纹、气孔、硬度不均等制造缺陷,或动环与静环配对材料硬度差不符合设计要求,投入运行后短期内即出现异常磨损、碎裂等现象,显著缩短密封使用寿命。

2.2 安装与检修工艺不规范导致失效

(1)密封安装同轴度偏差、端面贴合不均引发偏磨泄漏。安装时泵轴与密封腔轴线对中不良,或压盖紧固螺栓预紧力不平衡,致使动、静环端面贴合不平整,运行中局部磨损加剧,端面比压分布严重不均,泄漏量随运行时间快速上升。(2)弹簧预紧力调节不当,过紧发热磨损、过松密封不严。弹簧压缩量过大使端面比压超出合理范围,摩擦副发热加剧、磨损加快;压缩量不足则端面贴合压力不够,介质压力波动时端面开启形成泄漏通道。正确预紧力需依据设计值结合现场实测精确调整。(3)检修清洁不到位,杂质、异物残留磨损密封端面。组装过程中若未对环境、工具、密封件进行严格清洁,金属碎屑、纤维、灰尘等微小颗粒残留于密封端面或弹簧处,运转时嵌入软质密封环表面,形成环形沟槽,导致密封快速失效。

2.3 运行工况与设备工况异常引发失效

(1)介质含固体颗粒、杂质,持续冲刷磨损密封摩擦副。当输送介质中含有催化剂粉末、结晶盐、焊渣等硬质颗粒时,颗粒进入密封端面间隙产生磨粒磨损,在硬质环表面拉出划痕、在软质环表面刻出沟槽,同时弹簧被颗粒卡滞导致补偿能力下降。(2)设备干磨、空转、启停频繁,造成密封端面干摩擦烧蚀。泵启动前未充分排气或入口过滤器堵塞导致抽空,使密封端面处于无液膜润滑状态,干摩擦产生的高温可使碳化硅环瞬间热裂、石墨环表面氧化烧蚀;频繁启停加剧端面接触磨损,液膜反复建立与破坏。(3)系统超温、超压、负压波动,破坏密封液膜稳定性。系统压力急剧波动使密封端面液膜厚度频繁变化,严重时液膜汽化或破裂;负压工况下密封腔介质气化,端面无法形成有效润滑;超温导致介质黏度变化,液

膜承载能力下降,摩擦系数增大^[3]。

2.4 运维管理不当造成的继发性失效

(1)日常巡检不到位,早期微小泄漏未及时处理加剧故障。操作人员未能通过看、听、摸、测等手段及时发现微量泄漏、温度异常升高或轻微振动等早期征兆,小问题延误处理逐步演变为严重泄漏或设备损坏。

(2)密封冲洗、冷却系统维护缺失,工况恶化加速密封损坏。冲洗管线堵塞、过滤器未定期清理、冷却水断流或流量不足,使密封腔热量无法及时带走,杂质在腔内沉积,端面温度升高、润滑条件恶化,密封寿命大幅缩短。(3)超周期服役、带病运行,导致密封彻底失效。未按密封设计寿命和使用状态科学制定更换计划,而是坚持“用到不能用为止”,或在密封已出现中度失效征兆时仍强行维持生产,最终引发突发性泄漏事故,造成非计划停机和安全风险。

3 化工泵密封检修工艺及优化改进方案

3.1 密封故障标准化检修流程优化

(1)故障溯源排查流程:点位检测、失效类型判定、诱因定位。接到故障报告后,首先通过泄漏量测量、端面温度检测、振动频谱分析等手段锁定泄漏点位;其次依据宏观形貌特征判定失效类型属于磨损、老化还是冲蚀;最后结合运行记录、介质参数等追溯根本诱因,形成故障溯源报告指导后续拆检。(2)拆解检修规范:部件拆卸、清洁检测、缺陷判定标准。拆卸过程应按序标记各部件相对位置,使用专用工具避免磕碰密封端面。拆卸后对各部件采用指定溶剂超声清洗,然后在放大镜下逐一检测动环端面划痕深度、静环变形量、弹簧自由高度变化、辅助密封圈硬度及外观裂纹,对照标准判定可复用、修复或报废^[4]。(3)装配复位工艺:同轴度校准、预紧力精准调节、密封调试。装配前校验泵轴径向跳动及轴向窜动量是否达标,使用激光对中仪精调轴系同轴度至规定范围。安装密封时采用扭矩扳手按交叉顺序均匀紧固压盖螺栓,弹簧压缩量按设计值 $\pm 0.5\text{mm}$ 控制。装配完成后进行静压试验和低速盘车,验证端面贴合及密封性。

3.2 密封材料与结构优化改进

(1)基于介质、工况的密封材质精准选型,适配腐蚀、高温、颗粒工况。强腐蚀介质选用哈氏合金或高镍合金作为金属构件,辅助密封选用全氟醚橡胶或聚四氟乙烯;高温工况动环采用碳化硅、静环采用浸钎石墨,并确保材料配对硬度差符合设计要求;颗粒介质工况优先选用硬质合金对硬质合金的摩擦副组合。(2)密封摩擦副结构优化,提升耐磨、耐高温、抗冲击性能。将

平面端面改为流体动压槽端面或螺旋槽端面设计,利用流体动压效应增强液膜承载力与刚度,降低端面接触概率;端面宽度适当收窄以减少摩擦热生成;增设减振弹簧或波纹管结构缓解轴向冲击载荷对端面的损伤。(3)增设辅助密封、冲洗防护结构,强化密封运行稳定性。在密封腔入口增设耐磨衬套或节流衬套,阻止颗粒进入端面区域;对易结晶或高温介质增设急冷或双端面密封结构,向密封腔注入隔离液形成二次屏障;优化冲洗方案,根据工况选择API682规定的Plan11、Plan32或Plan53等适宜冲洗方案。

3.3 设备运行与工况管控优化方案

(1)规范设备启停操作,杜绝空转、干磨、超负荷运行。编制标准化启停操作票并上墙明示,明确规定启动前必须完成泵体排气、灌泵、盘车检查确保密封端面预先建立液膜;冷态启动后需在低负荷运行5~10分钟待温度稳定后再升载。停泵时应缓慢关闭出口阀再停机,避免系统水锤冲击密封端面。运行中严禁超出额定流量和扬程范围的110%长期运行。(2)优化介质预处理工艺,过滤固体杂质,减少冲刷磨损。在泵入口管线增设高效过滤器或旋液分离器,根据介质中颗粒粒径分布选定不低于50 μm 的过滤精度。定期清理或更换滤芯,并建立滤芯压差监控报警机制。对易结晶介质增设保温伴热管线,防止析出物进入密封腔形成磨粒,同时定期对管路进行蒸汽吹扫,保持管道内壁清洁^[5]。(3)完善密封冷却、冲洗系统运维,稳定密封运行工况。每周检查冲洗管线压力和流量并记录,发现流量下降超过20%时及时清理冲洗管路中的沉积物或更换滤芯。冷却系统每月清洗换热器,保证冷却水进出口温差在设计范围。同时设置密封腔温度高报警联锁,当温度超过设定上限时自动触发报警,提醒操作人员采取调整措施,始终将密封腔温度控制在设计上限以内。

3.4 常态化运维管理制度改进

(1)建立分级巡检机制,重点监测密封泄漏、温度、振动参数。将巡检分为运行操作层、技术管理层、

专业诊断层三级,日常每班次记录密封泄漏滴数、腔体温度及泵体振动值;出现异常趋势时提高监测频次,由专业技术人员开展精密诊断。(2)制定密封件定期更换、设备定期维保标准。依据密封设计寿命及现场历史数据,制定合理更换周期并纳入年度检修计划,同时建立密封件库存预警机制,关键密封配件储备充足,避免因配件不到位延误检修时机。(3)搭建故障台账,实现密封失效问题闭环管理。建立包含设备编号、密封型号、介质工况、失效模式、处理措施及更换周期的数字化台账,通过统计分析找出高频故障规律,针对性优化选型与检修策略,形成“发现—分析—改进—验证”的闭环管理模式,持续降低密封故障率。

结束语

本文系统归纳化工泵密封常见失效类型与判定标准,全面分析材料适配不足、安装工艺不规范、工况波动、运维缺位等关键失效原因,配套完善标准化检修工艺,优化密封结构与材质选型,规范设备启停与介质管控流程,搭建闭环运维管理体系。整套改进方案可有效降低密封失效频次,减少非计划停机与安全隐患,提升化工泵运行稳定性,可为化工行业泵类密封运维及故障整改提供可靠参考。

参考文献

- [1]孔德军,刘世勇,李凯民,等.低温盐水输送泵机械密封失效原因及改进措施[J].机械研究与应用,2026,39(04):112-114.
- [2]王涛.化工离心泵轴封泄漏问题的检修与改进分析[J].化工设备与管道,2025,62(04):76-80.
- [3]陈峰.化工机械密封件装配偏差失效机理及维修工艺优化[J].设备管理与维修,2025,7(12):45-47.
- [4]李林.化工泵机械密封日常运维失效诱因及预防性检修策略[J].石油和化工设备,2024,27(08):89-91.
- [5]赵文杰.高温工况化工泵机械密封泄漏失效分析及改造[J].机械工程与自动化,2024,16(03):156-158.