

化工机械密封失效的常见原因及非拆解状态下的管理应对

杨 博

内蒙古伊泰化工有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017400

摘要: 机械密封作为化工流程设备(如泵、压缩机、搅拌釜等)中防止工艺介质泄漏的关键部件,其可靠性直接关系到生产安全、环境保护和经济效益。一旦发生失效,轻则导致计划外停机、物料损失,重则可能引发火灾、爆炸或有毒物质泄漏等灾难性事故。传统的故障处理方式多依赖于事后拆解检修,但这种方式成本高昂且影响生产连续性。本文旨在系统梳理化工机械密封失效的常见原因,并重点探讨在不拆解设备的前提下,如何通过先进的监测技术、科学的维护策略和智能化的管理手段,对密封状态进行有效监控与干预,从而实现从“被动维修”向“主动预防”的转变,提升装置的本质安全水平和运行效率。

关键词: 机械密封;失效分析;状态监测;预测性维护;非拆解管理;化工安全

引言

在现代化工生产里,旋转设备是工艺流程核心,机械密封则是其关键“守护者”。它靠垂直于旋转轴线的端面,在流体压力与补偿机构弹力作用下贴合滑动,实现对高压、高温、腐蚀性或有毒有害介质的有效密封。与传统的填料密封相比,机械密封泄漏量小、功耗低、寿命长,已是化工行业标配。不过,其工作环境严苛,要承受离心力、摩擦热,还得在复杂化学介质、宽泛温压范围及不利条件下长期稳定运行,任一环节疏忽都可能致密封提前失效。长期以来,业界对密封失效多采用“事后维修”模式,虽直观但弊端明显,会造成生产中断、经济损失,频繁拆装还可能损伤设备、引入新隐患,且无法杜绝同类问题。所以,探索设备正常运行时无需拆解就能评估、预警及干预密封健康状况的管理方法,意义重大且前景广阔。

1 化工机械 sealing 失效的常见原因分析

机械密封的失效并非单一因素所致,而是多种因素交织作用的结果。根据失效的根源,可将其大致归为以下几类:

1.1 设计与选型不当

密封型式选择错误:面对高危介质(如易燃、易爆、剧毒),应优先选用双端面或串联式密封,并配备隔离液系统。若错误地选用了单端面密封,则一旦主密封面磨损,危险介质将直接泄漏至大气。同样,在含有大量固体颗粒的浆料工况下,选用平衡型密封而非专为含固工况设计的非平衡型或特殊冲洗方案的密封,极易导致密封面被磨损。

材料相容性不足:密封的摩擦副(如碳化硅/石墨、硬质合金/碳化钨)、辅助密封圈(O型圈、V型圈)以及金属

构件(弹簧、波纹管)必须与工艺介质、冲洗液、隔离液等完全兼容。例如,在强氧化性介质(如浓硝酸、双氧水)中使用石墨环,会因氧化反应导致密封面快速失效;在高温工况下选用氟橡胶(FKM)而非全氟醚橡胶(FFKM),则会因材料老化硬化而丧失弹性。

参数计算偏差:密封设计需精确计算端面比压、PV值(压力-速度乘积)、平衡系数等关键参数。过高的端面比压会加剧磨损和发热;过低的比压则无法形成有效的液膜,导致干摩擦。PV值超过材料极限会导致密封面热裂或过度磨损。

1.2 安装与装配缺陷

尺寸公差符:轴的径向跳动、轴向窜动过大,或密封腔体的垂直度、同心度超差,都会导致密封端面受力不均,局部区域产生过大的应力,加速磨损甚至导致密封环碎裂。

压缩量错误:弹簧或波纹管的预压缩量是保证密封端面贴合的关键。压缩量过小,密封力不足,易泄漏;压缩量过大,则会增加摩擦扭矩和发热量,缩短密封寿命。

清洁度不足:安装过程中,微小的灰尘、焊渣、纤维等杂质若进入密封腔或附着在密封面上,会在运行初期就划伤精密的摩擦副,形成泄漏通道^[1]。

辅助系统连接错误:对于带有PLAN冲洗方案的密封,若冲洗管路接反、过滤器堵塞或限流孔板规格错误,将无法为密封提供有效的冷却、润滑和清洁,使其在恶劣环境中“裸奔”。

1.3 运行与操作因素

干运转:这是密封的“头号杀手”。当泵在无液体状态下启动(气缚)或在运行中发生抽空时,密封端面间失去液膜润滑,瞬间产生极高的摩擦热(可达数百摄氏

度),导致密封环热裂、辅助密封圈烧毁。即使是短暂的干运转,也可能造成不可逆的损伤。

工况波动剧烈:压力、温度的急剧变化会使密封元件产生热应力和机械应力,导致疲劳失效。例如,频繁的开停车、负荷大幅调整,会使密封面反复经历“贴合-分离”的过程,破坏液膜稳定性。

汽蚀:当泵入口压力低于介质饱和蒸汽压时,会产生大量气泡,这些气泡在高压区溃灭时产生的冲击波会猛烈冲击叶轮和密封腔,引起振动和压力脉动,破坏密封的稳定性。

反转或超速:电机接线错误导致泵反转,会使某些依靠旋向设计的密封(如带泵效螺旋槽的密封)失效。超速运行则会大幅提高PV值,超出密封设计极限。

1.4 维护与管理疏漏

冲洗/冷却系统失效:PLAN 32(外部注入冲洗)、PLAN 21/23(自冲洗+冷却)等方案中的过滤器未定期清洗、冷却器结垢堵塞、冲洗液品质下降等问题,会使密封失去保护屏障。

隔离液系统管理不善:对于双端面密封,隔离液的压力、液位、品质需要严格监控。隔离液压力低于工艺介质压力会导致危险介质内漏;液位过低则无法形成有效屏障;隔离液污染或变质会损害密封面。

忽视早期预警信号:轻微的泄漏、异常的噪音、轴承温度升高等往往是密封即将失效的前兆。若未能及时捕捉并处理,小问题会迅速演变成大故障。

1.5 环境与介质特性

结晶与结焦:输送高熔点介质(如熔融硫磺、沥青)或易结晶介质(如盐溶液)时,一旦温度控制不当,介质在密封腔内结晶或结焦,会阻碍密封环的浮动性,导致端面无法追随补偿,最终泄漏。

聚合与固化:某些单体或树脂类介质在高温或接触空气后容易发生聚合反应,在密封面形成坚硬的聚合物层,破坏密封界面^[2]。

腐蚀与侵蚀:强酸、强碱等腐蚀性介质会侵蚀密封的金属部件和辅助密封圈。高速流动的含固介质则会对密封面和腔体产生冲刷侵蚀。

2 非拆解状态下的密封管理应对策略

2.1 构建多层次的状态监测体系

2.1.1 泄漏与温度的直接感知

最基础的层面是依赖人工的目视与嗅觉检查,操作人员在日常巡检中观察密封压盖处是否有可见的泄漏、结晶或油污痕迹,并凭借经验嗅闻是否有异常气味,这是一种简单但不可或缺的初步筛查。在此基础上,可以

采用更为定量的方法,例如在密封压盖下方安装专用的泄漏收集杯,并通过液位计或微型流量计来精确计量泄漏速率,任何微小的、持续增长的泄漏量都是密封性能正在退化的明确信号。对于挥发性强或无色无味的危险介质,则必须借助专业的气体检测技术,在密封区域周围部署固定式或便携式的VOC(挥发性有机物)检测仪、可燃气体探测器或有毒气体报警器,以实现无形泄漏的精准捕捉。温度是另一个极其敏感的指标,利用红外热像仪可以对运行中的设备进行非接触式扫描,直观地呈现密封区域的温度分布,异常的热点通常意味着干摩擦、冲洗不足或内部泄漏导致的热量积聚;同时,在密封压盖或冲洗管线进出口安装接触式温度传感器(如PT100),则能提供连续、精确的温度数据流。

2.1.2 辅助系统与间接状态的监控

虽然振动与噪声主要反映轴承和转子的状态,但严重的密封失效(如密封环破碎、卡涩)也会引起设备整体振动水平的上升,结合频谱分析有时能识别出与密封相关的特定频率成分。声发射(AE)技术则代表了更高阶的监测手段,它能够灵敏地捕捉到密封失效初期因微小泄漏或异常摩擦所产生的高频声波,并通过分析信号的强度、频率等特征来判断故障的性质和发展趋势^[3]。最后,对于采用API 682标准PLAN方案的密封,对其辅助系统的状态监测至关重要,必须对隔离液的压力、液位、温度、品质以及冲洗液的压力、流量、过滤器压差等关键参数进行实时监控,因为这些辅助系统是密封正常工作的生命线,其状态往往能提前反映出密封本体的潜在危机。

2.2 基于数据的诊断与预测

2.2.1 趋势分析与基准建立

首要任务是为每台关键设备的密封建立“健康”基准。这个基准应在设备新投用或大修后,于稳定工况下记录各项参数(如泄漏量、温度、振动等)的正常值域。在后续的运行中,持续跟踪这些参数的变化趋势比关注其绝对值更为重要。即使某个参数仍在所谓的“正常”范围内,但若呈现出持续恶化的趋势,也应被视为一个需要警惕的早期预警信号。

2.2.2 多源信息融合与智能算法应用

为了提高诊断的准确性,必须摒弃单一参数判断的局限性,转而采用多参数融合的诊断思路。单一参数可能存在误报,例如密封腔温度升高,既可能是密封自身问题,也可能是冷却水系统故障所致。因此,需要将泄漏、温度、压力、流量等多个参数进行交叉验证和关联分析。例如,“泄漏量增大+密封腔温度升高+冲洗流量

降低”这一参数组合，几乎可以确诊为冲洗系统发生了堵塞。随着工业物联网（IIoT）和大数据技术的发展，更为先进的方法是应用机器学习算法。通过将海量的历史运行数据、成功的维护案例以及最终的故障拆解报告输入到训练模型中，机器学习系统能够自动学习并识别出密封失效背后复杂的、非线性的模式。在此基础上，系统不仅能对当前状态进行精准诊断，更能对未来可能发生故障的概率和剩余使用寿命（Remaining Useful Life, RUL）进行科学预测，从而真正实现从“状态维修”到“预测性维护”的跨越。

2.3 制定差异化的维护与干预策略

2.3.1 工艺与运行参数的优化调整

最直接的方式是调整设备的运行参数。例如，如果数据分析表明密封的间歇性干摩擦是由上游储罐液位过低导致的轻微抽空引起，那么就可以通过优化DCS控制逻辑，提高最低液位连锁值，或调整泵的运行曲线，使其避开不稳定的工况区，从而从根本上消除诱因。

2.3.2 辅助系统的在线维护与应急堵漏

对于辅助系统的问题，干预措施可以更加灵活。若在线监测发现PLAN 32冲洗液流量不足，维护团队可以在不停机的情况下，远程或就地对过滤器进行反冲洗，或者根据压差数据判断是否需要更换滤芯；若双端面密封的隔离液压力出现偏低趋势，操作员也可以通过远程调节氮气瓶的减压阀进行在线补压，迅速恢复安全裕度^[4]。在某些允许微量泄漏的非关键工况下，若监测到泄漏速率缓慢但持续地增加，还可以采用专用的在线注胶堵漏技术，在密封压盖的泄漏点处注入特殊的密封胶，形成临时的封堵，为安排计划内的检修争取宝贵的缓冲时间。

2.3.3 高级别风险的应急预案启动

当然，对于监测系统发出的高级别报警，如VOC浓度严重超标、隔离液压力骤降等可能预示着即将发生的重大泄漏，必须立即启动最高级别的应急预案，包括迅速切换至备用泵、隔离故障设备、疏散周边人员等，以将安全风险降至最低。

2.4 建立全生命周期的密封管理档案

2.4.1 数据资产的系统化沉淀

这份档案应当系统性地记录每一次的状态监测数据、专家诊断报告、所采取的干预措施及其效果，以及在必要时进行拆解检修后的最终检查结果和根本原因分析。这份档案的价值在于，它不仅是追溯某一次具体故障的“病历”，更是企业宝贵的知识资产。

2.4.2 知识驱动的持续改进闭环

通过对这些历史数据的挖掘和分析，可以清晰地识别出特定工况下密封失效的共性规律，从而为同类型设备未来的密封选型提供数据支持，为安装作业制定更严格的规范，为维护策略的持续优化指明方向。最终，这将形成一个完整的PDCA（计划-执行-检查-改进）闭环管理，推动企业的设备可靠性管理水平不断提升。

3 结语

化工机械密封失效是系统性难题，根源涉及设计、选型、安装、操作和维护等多环节。“坏了再修”的传统模式，难以契合现代化工对安全、环保和效益的高要求。本文提出的“非拆解状态下的管理应对”策略，核心是前移管理关口，构建集实时监测、智能诊断、精准干预和知识沉淀于一体的现代化管理体系，全面掌控密封健康状态。此方法可预防突发性泄漏，保障人员与环境安全，延长密封寿命，减少非计划停工，降低全生命周期维护成本。未来，随着多技术深度融合，化工机械密封管理将更智能、自主，密封会成为“智能部件”。这是技术进步，更是化工行业迈向本质安全和卓越运营的必经之路，企业应积极融入先进理念，为可持续发展筑牢安全根基。

参考文献

- [1]李松.化工机械密封装置的失效分析与改进措施[J].塑料工业,2025,53(02):169.
- [2]李涛.化工机械密封失效分析和装配质量控制[J].当代化工研究,2020,(11):15-16.
- [3]赵延平.石油化工机械密封技术的发展趋势与应用研究[J].石化技术,2025,32(07):160-162.
- [4]张文岩.化工机械密封泄漏问题与维修策略研究[J].中国设备工程,2024,(14):186-188.