

高温高压工况下机械密封失效分析与检修优化

崔军营 张守增

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 机械密封作为旋转设备(如离心泵、压缩机、反应釜等)轴封的核心部件,其可靠性直接关系到装置的长周期、安全、稳定运行。在石油化工、煤化工、核电及超临界流体处理等工业领域,设备常处于高温、高压、强腐蚀、含固体颗粒等极端苛刻工况下,这对机械密封的性能和寿命提出了严峻挑战。本文系统地分析了高温高压环境下机械密封的主要失效模式及其内在机理。在此基础上,从材料选型、结构设计、辅助系统配置及状态监测等多个维度,提出了一套针对性的检修优化策略。研究旨在为工程技术人员提供理论指导和实践参考,有效提升高温高压工况下机械密封的可靠性,降低非计划停车率,保障工业生产的安全与效益。

关键词: 高温高压;机械密封;失效分析;热变形;端面液膜;检修优化

引言

随着现代工业向大型化、连续化、高参数化方向发展,流程工业中的关键旋转设备越来越多地运行在高温($>200^{\circ}\text{C}$)、高压($>5\text{MPa}$)甚至超高温、超高压的极端环境中。例如,在加氢裂化、渣油加氢、乙烯裂解、煤液化等工艺中,操作温度可高达 400°C 以上,压力可达 20MPa 以上。在这些苛刻条件下,作为防止工艺介质泄漏的最后一道屏障——机械密封,其工作环境极为恶劣,失效风险显著增加。机械密封的失效不仅会导致昂贵的工艺介质(如易燃、易爆、有毒、有害或高价值化学品)泄漏,造成环境污染、资源浪费和经济损失,更严重的是可能引发火灾、爆炸等重大安全事故,威胁人员生命和装置安全。据统计,在石化行业中,因机械密封失效导致的非计划停车占有所有动设备故障的相当大比例,是影响装置“安稳长满优”运行的关键瓶颈之一。传统的机械密封设计与检修方法多基于常规工况经验,难以有效应对高温高压带来的复杂挑战。因此,深入理解高温高压工况下机械密封的失效机理,并据此制定科学、前瞻性的检修优化方案,具有极其重要的工程价值和现实意义。

1 高温高压工况下机械密封的主要失效模式分析

1.1 密封端面异常磨损与损伤

密封端面的异常磨损与损伤是最直观、最常见的失效表现形式。当工艺介质中含有固体颗粒,如催化剂粉末、结晶盐或管道锈蚀产物时,在高压的驱动下,这些坚硬的颗粒会嵌入相对较软的密封环表面(通常是碳石墨环),如同砂纸一般对磨的硬质环(如碳化硅或硬质合金)进行刮擦,形成明显的犁沟状划痕,即磨粒磨损。在另一种极端情况下,当端面因润滑不良、载荷过高或温度失控而进入干摩擦状态时,接触点的微观凸峰会因

高温高压而发生局部焊合,随后在相对运动中断裂,导致材料从一个表面转移到另一个表面,并伴随严重的表面撕裂,这种现象被称为粘着磨损或胶合^[1]。此外,端面局部的瞬时过热,例如在启动瞬间缺乏润滑或液膜发生剧烈闪蒸时,会在密封环上产生巨大的温度梯度,由此引发的热应力一旦超过材料的强度极限,就会在端面上形成放射状或同心圆状的裂纹,即热裂。这些裂纹为工艺介质提供了直接的泄漏路径。对于采用树脂浸渍的碳石墨环,高温还可能使内部的浸渍剂分解产生气体,气体在材料内部积聚形成压力,最终导致密封环表面鼓起并剥落,形成泡疤缺陷。

1.2 辅助密封失效

辅助密封件在高温高压的双重夹击下,往往是整个密封系统中最薄弱的环节。在高压差和密封配合间隙较大的共同作用下,橡胶O型圈很容易被挤压进入间隙,并在轴的往复运动中被剪切破坏,即发生挤出或咬伤失效。长期暴露在高温环境中,即使是特种橡胶也会不可避免地发生老化,表现为材料硬化、失去弹性并产生龟裂,使其无法有效追随密封端面因热变形或轴向窜动而产生的微小位移,最终导致泄漏。虽然聚四氟乙烯(PTFE)因其优异的耐化学性和较高的耐温性而被广泛应用,但它在持续的高压作用下会发生一种缓慢的塑性流动现象,称为冷流。这种冷流会导致V型圈或楔形圈的预紧力逐渐丧失,同样无法维持可靠的密封。

1.3 弹性元件失效

作为提供端面闭合力的关键部件,弹性元件在高温高压下的失效同样不容忽视。无论是多弹簧还是单弹簧结构,其金属材料在长期高温作用下会发生退火,导致弹性模量下降,无法再提供设计所需的端面比压。对于

性能更优的金属波纹管密封而言,其波纹管不仅要承受系统压力,还要在设备启停和运行过程中承受由温度波动引起的交变热应力。这种复杂的应力状态极易在波纹管的波谷过渡区或焊接接头等应力集中部位诱发疲劳裂纹,随着时间的推移,裂纹不断扩展,最终导致波纹管断裂,使密封完全失效。

1.4 结构性失效

除了上述功能性部件的失效外,密封的整体结构也可能出现问题。例如,在高温环境下,用于传递扭矩的传动销、键或传动槽所用的材料可能会软化,当设备传递较大扭矩时,这些部件可能发生剪切破坏或与配合件之间发生打滑,导致动环无法随轴同步旋转,从而使密封功能完全丧失。另外,由热冲击(如紧急冷却水喷淋)或过大的热-力耦合应力引起的密封环整体碎裂,也是一种突发性的、危害极大的结构性失效模式。

2 检修优化策略

针对高温高压工况下复杂的失效机理和多样化的失效模式,必须摒弃“坏了再修”的被动维护理念,转向以预防为主、预测为辅的主动式检修优化策略。

2.1 失效根源追溯与精准诊断

每一次密封失效后的检修都是一次宝贵的学习和改进机会。因此,必须建立一套标准化的失效分析流程。首先,在拆卸前应尽可能详细地采集现场信息,包括设备的历史运行参数(如温度、压力、介质成分、振动数据、泄漏量变化趋势)、启停次数以及上次检修的具体情况。其次,在拆卸过程中,必须采取保护性措施,小心操作以避免对失效件造成二次损伤,并对所有组件进行多角度的高清拍照存档。随后,应将关键的失效件送至专业实验室进行深入分析,利用光学显微镜、扫描电镜(SEM)观察磨损、裂纹等宏观与微观形貌特征,结合能谱分析(EDS)确定磨损区域或沉积物的元素组成,以判断是否存在磨粒磨损或化学腐蚀^[1]。必要时,还可进行金相分析,检查材料内部组织是否因过热而发生变化。最后,综合所有现场数据和实验室分析结果,进行系统性的研判,准确锁定失效的根本原因,明确问题是源于初始的设计选型不当、安装过程中的失误、操作规程的违规,还是日常维护的疏忽,从而为后续优化提供精准的方向。

2.2 材料与结构的针对性升级

基于精准的失效诊断结果,应对密封进行“量体裁衣”式的材料与结构升级。在密封环的材料配对选择上,应优先考虑高导热性、高强度、低热膨胀系数且兼具优异耐磨耐蚀性能的组合。例如,碳化硅(SiC)与碳化硅

(SiC)的自配对方案,因其卓越的综合性能,已成为高温高压苛刻工况下的首选;而对于经济性要求较高的场合,硬质合金与碳石墨的配对依然适用,但必须确保所用碳石墨环的浸渍剂能够耐受实际工况的最高温度。当介质中含有固体颗粒时,应坚决采用双硬质材料配对,并确保颗粒硬度低于密封环材料硬度。在辅助密封方面,必须彻底摒弃普通橡胶,转而选用全氟醚橡胶(FFKM)或经过特殊填充改性的PTFE,它们的耐温性能可轻松超过300°C,并具备极佳的化学惰性。对于极高压力的应用,还应考虑在O型圈两侧增加挡圈以防止挤出。在弹性元件的选择上,金属波纹管密封因其无辅助密封圈、能更好补偿轴向位移的优点,在高温工况下具有明显优势,其材质应选用Inconel 718或Hastelloy C-276等高性能耐蚀合金。在结构设计层面,应普遍采用平衡型设计以降低端面比压,并积极探索在硬质密封环端面上加工流体动压槽(如螺旋槽或T型槽),利用流体动压效应主动形成稳定的承载液膜,实现非接触或微接触运行^[3]。此外,借助有限元分析(FEA)技术对密封环的热变形进行精确模拟,并据此反向设计端面的初始几何形状(如预设一个微小的收敛锥度),可以使密封在达到工作温度时自动形成最有利于液膜稳定的间隙形态,这是提升可靠性的高级手段。

2.3 辅助系统的精细化管理

在高温高压工况下,辅助系统已不再是简单的配套附件,而是决定密封能否可靠运行的生命线,必须进行精细化管理。对于绝大多数此类应用,PLAN 53B/C(带压阻塞液系统)应被视为首选方案。该系统通过一个独立的、经过严格冷却和过滤的清洁阻塞液对密封腔进行加压,使其压力始终高于工艺介质压力,从而构建起双重安全屏障。即便内侧主密封发生失效,泄漏出的也只是无害的阻塞液,而非危险的工艺介质,极大地提升了安全性。系统配备的储液罐、高效冷却器、精密压力控制器和液位开关,共同实现了全自动的监控与调节。PLAN 32(外部冲洗)方案则通过向密封腔注入低温、洁净的冲洗液,有效带走端面摩擦热、冲刷掉固体颗粒、并稀释易结晶介质,其冲洗的位置、流量和压力需要根据具体工况进行精心计算和设计,以避免对密封端面产生不利的冲击。PLAN 62(急冷/蒸汽吹扫)则主要用于密封的大气侧,通过通入蒸汽或氮气,防止重质介质在低温下凝固堵塞,或对微量泄漏物进行稀释和吹扫。值得注意的是,辅助系统本身的可靠性至关重要,必须将其纳入定期维护计划,确保冷却器换热效率、过滤器清洁度以及所有仪表的准确性,因为辅助系统的任何故障都可

能直接导致主密封的连锁失效。

2.4 基于状态监测的预测性维护

未来的检修模式必将从固定的周期性维修,全面转向基于设备实际健康状况的预测性维护(CBM)。这要求在密封及其辅助系统上部署一系列传感器,构建一个完整的状态监测网络。通过安装高灵敏度的泄漏检测探头,可以实时捕捉到微小的泄漏变化,并在泄漏量超标时立即发出警报。在密封压盖上布置热电偶,能够连续监测密封腔的温度,任何异常的温升都是端面润滑恶化或冲洗系统失效的早期预警信号。同时,密封失效往往伴随着特定的振动或噪声特征,通过在线振动监测系统可以有效识别这些故障征兆^[4]。最终,将所有这些多源异构的监测数据接入工厂的设备健康管理系统(PHM),利用大数据分析和机器学习算法,建立密封性能衰退的数字孪生模型,不仅可以实现故障的早期精准预警,还能科学预测其剩余使用寿命,从而在最佳的时间窗口安排检修,最大化设备的运行效率和经济效益。

2.5 规范化安装与操作

再先进、再可靠的密封设计,如果遭遇错误的安装或不当的操作,其性能也会大打折扣甚至迅速失效。因此,规范化是检修优化链条中不可或缺的一环。在安装阶段,必须严格控制相关部件的制造与装配精度,特别是轴的径向跳动量、密封腔的垂直度和同心度,这些几何公差直接影响密封的对中性。安装过程中应使用专用工具,确保密封组件能够平稳、无偏斜地就位,避免因强行敲击造成的内部损伤。整个安装环境必须保持极高的清洁度,任何微小的灰尘或颗粒都可能成为日后端面磨损的源头。在操作层面,必须制定并严格执行科学的操作规程。严禁任何形式的干启动,设备启动前必须确保密封腔已完全充满液体,并完成必要的灌泵和排气程序。设备的启停

过程应尽可能平稳,避免压力和温度的急剧阶跃变化,给予密封组件足够的时间来适应热变形。对于配备了辅助系统的密封,必须明确规定在主机启动之前,辅助系统(如PLAN 53C的压力和液位)必须已确认处于正常工作状态,这是保障密封长寿命运行的基本前提。

3 结语

高温高压工况对机械密封构成了严峻挑战,其失效是热、力、化学及颗粒等多因素复杂耦合作用的结果。有效的检修优化不能仅停留在更换备件的层面,而必须是一个系统工程。本文提出的策略体系,以深度失效分析为起点,以材料与结构的针对性升级为核心,以辅助系统的精细化管理为保障,以基于状态监测的预测性维护为方向,并辅以规范化的安装与操作,形成了一个闭环的、主动的可靠性提升方案。未来,随着新材料(如金刚石薄膜、先进陶瓷复合材料)、新结构(如仿生表面织构)和智能传感技术的发展,高温高压机械密封的性能边界将进一步拓展。然而,无论技术如何进步,对失效机理的深刻理解和全生命周期的精细化管理,始终是确保其可靠运行的基石。工程技术人员应不断积累经验,将理论知识与工程实践紧密结合,方能在极端苛刻的工况下,牢牢守住安全生产的最后一道防线。

参考文献

- [1] 闫俊杰,李弘扬,李立,等.机械密封失效原因分析及改进措施[J].化工安全与环境,2022,35(08):20-24.
- [2] 宋庆伟.机械密封失效分析及改进措施[J].石化技术,2024,31(07):72-74.
- [3] 张朔.冶金机械设备中旋转密封阀失效及修复研究[J].山西冶金,2024,47(05):229-231.
- [4] 闫俊杰,何智峰,李鹏.机械密封失效原因分析与改进措施[J].装备机械,2022,(02):68-70.