

石油化工工程中机械设备密封技术的风险评估与管理策略

关楚廉

身份证号: 440724197212144077

DOI:10.61369/ME.2025040013

摘 要 : 介绍机械密封技术分类及原理, 阐述其在石化设备中的应用及行业规范执行问题。基于 FMEA 构建失效风险模型, 用蒙特卡罗模拟等方法评估风险。分析典型案例及多种工况对密封的影响, 强调设计改进、监控方案、风险管理及维护体系构建的重要性

关 键 词 : 机械密封; 石油化工; 风险管理

Risk Assessment and Management Strategies for Mechanical Equipment Sealing Technology in Petrochemical Engineering Project

Guan Chulian

ID: 440724197212144077

Abstract : This paper introduces the classification and principles of mechanical seal technology, discusses its application in petrochemical equipment, and addresses issues related to industry standards. A failure mode and effects analysis (FMEA) is used to construct a failure risk model, and Monte Carlo simulation and other methods are employed to assess the risks. The paper analyzes typical cases and the impact of various operating conditions on seals, emphasizing the importance of design improvements, monitoring plans, risk management, and the establishment of maintenance systems.

Keywords : mechanical seal; petrochemical industry; risk management

引言

在石油化工行业的发展中, 机械设备密封技术至关重要。2023年相关行业政策强调了化工设备安全运行及环保要求, 这对密封技术提出了更高标准。石化设备如反应釜、压缩机、泵体等核心设备的密封技术需满足不同场景需求, 防止介质泄漏。机械密封技术分为静密封和动密封等多种类型, 其原理和应用各有特点。从失效风险模型构建到蒙特卡罗模拟等方法的应用, 都是为了准确评估密封失效风险。同时, 在密封材料选型、结构设计改进、多参数实时监控以及全生命周期风险管理等方面都需不断优化, 以适应行业发展和政策要求, 确保石化工程的安全稳定运行。

一、石油化工设备密封技术概述

(一) 机械密封技术的分类与原理

机械密封技术可分为静密封和动密封。静密封是指相对静止结合面间的密封, 而动密封则是相对运动结合面间的密封, 二者在技术要求和应用场景上存在差异^[1]。接触式密封装置通过密封元件与密封面直接接触来实现密封, 其工作原理基于密封元件的弹性变形和密封面间的摩擦力。非接触式密封装置则是利用流体动压或静压原理, 使密封面间形成一层稳定的流体膜, 从而达到密封效果。双端面机械密封在石化设备中应用广泛, 它具有良好的密封性能和可靠性。其采用两个密封端面, 中间通以密封液, 可有效防止介质泄漏, 同时还能对密封面进行冷却和润滑, 延长

密封装置的使用寿命^[1]。

(二) 石化行业密封技术应用现状

在石油化工行业中, 反应釜、压缩机、泵体等均为核心设备, 其密封技术的应用至关重要。对于反应釜, 密封技术需确保在复杂的化学反应环境下防止介质泄漏, 保障生产安全和产品质量^[2]。压缩机的密封则要满足高压、高速运转的要求, 不同类型的压缩机如离心式、往复式等, 所采用的密封方式也存在差异。泵体的密封同样关键, 要适应不同介质的输送, 如腐蚀性液体、高温流体等。在行业技术规范方面, API 682标准具有重要指导意义, 但在实际执行中仍存在一些問題。部分企业可能由于成本、技术水平等因素, 未能完全按照标准执行, 导致密封效果不佳, 存在泄漏风险, 影响设备运行稳定性和生产效率。

二、石化密封失效风险识别与评估

（一）基于 FMEA 的失效风险模型构建

基于 FMEA 的失效风险模型构建，需建立机械密封系统的失效模式与影响分析框架。针对密封面磨损、辅助系统故障、材料老化等关键失效模式，构建定量评估矩阵。首先明确失效模式，如密封面磨损可能因介质中的颗粒、摩擦等因素导致^[3]。辅助系统故障可能涉及冷却、润滑等环节出现问题。材料老化则受温度、化学物质等影响。对于每种失效模式，确定其可能产生的影响，包括对密封性能、设备运行等方面。然后根据影响的严重程度、发生频率以及可检测性等因素，构建定量评估矩阵，以便更准确地评估失效风险，为后续的风险管理提供依据。

（二）动态风险概率评估技术应用

蒙特卡罗模拟方法可用于模拟高温高压工况下的密封失效概率。该方法通过对各种不确定因素进行随机抽样，模拟出大量可能的情况，从而得到密封失效概率的分布情况^[4]。同时，结合 HAZOP 分析建立风险等级划分标准。HAZOP 分析是一种系统性的风险分析方法，它通过对工艺过程的各个环节进行分析，识别出可能存在的危险和可操作性问题。通过将蒙特卡罗模拟得到的密封失效概率与 HAZOP 分析得到的风险等级划分标准相结合，可以更加准确地评估石化密封失效的风险，为制定合理的风险管理策略提供依据。

三、典型密封失效案例与机理分析

（一）炼化装置密封失效案例综述

1. 离心泵密封泄漏事故分析

某炼厂加氢进料泵的波纹管密封失效是一个典型案例。该泵在运行过程中，由于工作环境复杂，多种因素相互作用导致密封失效。其中热应力累积是关键因素之一。在长期运行中，泵体内部温度变化产生的热应力不断作用于波纹管密封部件。这种热应力的反复作用使得金属材料逐渐产生疲劳。随着时间推移，疲劳裂纹逐渐扩展，最终导致金属疲劳断裂。密封结构的完整性被破坏，从而引发密封失效，出现泄漏现象。这一案例凸显了在炼化装置中，对于复杂工况下的离心泵密封，需要充分考虑热应力等因素对密封部件的影响，以预防密封失效事故的发生^[5]。

2. 反应釜轴封故障溯源研究

催化剂颗粒侵入是导致反应釜轴封故障的一个重要因素。当催化剂颗粒进入机械密封端面时，会引起异常磨损。这些颗粒在端面间充当研磨剂，加剧了密封面的磨损程度，破坏了密封的完整性。这种磨损会导致密封泄漏，影响反应釜内的压力和物料的密封性，进而对整个装置的稳定运行产生不利影响。例如，可能导致反应条件失控，影响产品质量，甚至引发安全事故^[6]。

（二）密封系统失效机理研究

1. 材料相容性失效机理

在石油化工工程中，介质腐蚀和温度交变等工况对密封材料性能影响显著。介质腐蚀会使密封材料发生化学反应，导致其结

构和性能改变。例如，某些腐蚀性介质可能会侵蚀密封材料的表面，使其出现孔洞、裂缝等缺陷，进而降低密封效果^[7]。温度交变会引起密封材料的热胀冷缩，产生内应力。长期作用下，内应力可能导致材料疲劳、开裂，加速密封材料的性能退化。这种性能退化会严重影响密封系统的可靠性，增加泄漏风险，威胁石油化工工程的安全稳定运行。

2. 操作工艺偏差诱发失效

压力波动、转速异常等非正常工况会对密封界面润滑膜稳定性产生破坏作用，进而诱发密封失效。压力波动可能导致密封界面间的压力分布不均匀，使润滑膜无法保持稳定的厚度和压力，从而影响密封效果^[8]。转速异常则可能改变润滑膜的流体动力学特性，如产生过高的剪切力，破坏润滑膜的结构完整性。这种不稳定的润滑膜无法有效隔离介质，可能导致介质泄漏，加速密封元件的磨损，缩短密封系统的使用寿命，最终引发密封失效。

四、全生命周期密封风险管理策略

（一）密封系统设计优化

1. 基于可靠性的材料选型原则

在石油化工工程的密封系统设计中，基于可靠性的材料选型至关重要。需建立考虑介质特性与工况参数的材料选择标准矩阵^[9]。不同的介质（如腐蚀性液体、高温高压气体等）和工况（如转速、压力波动等）对密封材料的要求差异很大。通过综合考虑这些因素，形成一个系统的选择标准矩阵，能够更准确地筛选出适合的材料。例如，提出增强型碳化钨/石墨配对方案，碳化钨具有高硬度和耐磨性，石墨则具有良好的自润滑性和化学稳定性，二者配对可在多种复杂工况下实现较好的密封效果，满足石油化工工程中机械设备密封的可靠性要求。

2. 结构设计改进方向

在石油化工工程中，对于密封结构设计的改进至关重要。对于带冲洗系统的平衡型密封结构，可从以下方面优化：优化冲洗系统的流量和压力控制，确保能够有效带走热量和杂质，同时避免对密封面造成过大冲击^[10]。改进密封面的材料和加工工艺，提高密封面的硬度和光洁度，增强密封性能。在多级密封组合设计方面，根据不同的工况和介质特性，合理选择各级密封的形式和参数。例如，在高压高温且介质含有固体颗粒的环境下，可采用串联的机械密封和干气密封组合，利用机械密封承受高压，干气密封防止介质泄漏和固体颗粒进入密封面，从而提高整个密封系统的可靠性和稳定性^[10]。

（二）智能化监测技术应用

1. 在线泄漏检测系统构建

石油化工工程中，需设计集成温度、振动、气体检测的多参数实时监控方案。温度监测可反映密封部件的工作环境，过高或过低可能影响密封效果。振动检测能捕捉设备运行时的异常振动，其可能是密封部件松动或损坏的信号。气体检测则直接针对可能泄漏的介质，及时发现泄漏情况。同时，要建立预警值设定规范。通过对大量实验数据和实际运行经验的分析，确定各参数

的合理预警范围。当监测值超出预警值时，系统能及时发出警报，以便工作人员采取相应措施，确保机械设备密封的可靠性，降低风险。

2. 大数据趋势分析方法

随着石油化工工程的发展，机械设备密封技术的风险管理至关重要。智能化监测技术可实时获取设备运行数据，包括温度、压力、振动等参数。通过对这些大量数据的采集与分析，利用大数据趋势分析方法，挖掘数据中的潜在规律。基于设备运行数据开发密封性能退化预测模型，例如采用机器学习算法，对历史数据进行学习和训练，以预测密封性能的变化趋势。进而制定预知性维护决策支持机制，根据预测结果合理安排维护时间和措施，提前预防密封失效带来的风险，提高机械设备的可靠性和运行效率，降低维修成本和生产损失。

（三）全周期维护管理策略

1. 预防性维护体系构建

在石油化工工程机械设备密封技术中，全生命周期密封风险管理策略下的预防性维护体系构建至关重要。需制定涵盖安装调试、运行监控、定期检修的全流程管理规程。安装调试阶段，严格把控密封件安装精度、密封面贴合度等关键质量控制点，确保初始安装符合标准。运行监控时，利用先进监测技术实时掌握密封状态，如监测温度、压力、泄漏量等参数，及时发现异常。定期检修则要依据设备运行时间、工况等制定合理周期，对密封部件进行全面检查、维护和更换，预防密封失效风险，保障机械设备密封的可靠性和稳定性。

2. 应急管理预案设计

建立分级响应的密封失效应急处理机制至关重要。根据密封失效的严重程度、影响范围等因素进行分级。对于轻微失效，可采取在线监测与调整措施，如微调设备运行参数。对于较严重的失效，需及时停机，采用带压封堵等快速维修技术。应制定带压封堵等快速维修技术应用指南，明确其适用范围、操作流程、安全注意事项等。操作人员需严格按照指南进行操作，确保维修过程安全高效。同时，要建立应急物资储备体系，确保在密封失效发生时，所需的维修工具、密封材料等物资能及时供应，最大程度降低因密封失效带来的风险和损失。

五、总结

石油化工工程中机械设备密封技术至关重要。其风险受多种因素影响，包括设备自身状况、密封材料性能、操作环境等。通过对这些关键因素的把控，能有效降低风险。在管控方面，需从设计阶段就考虑密封的合理性与可靠性，优化设计方案。同时，要加强对设备密封状态的监测，及时发现潜在问题。维护管理也不可或缺，建立完善的维护制度，确保密封性能的持续稳定。物联网技术的应用为密封管理带来新机遇，可实现对密封设备的实时远程监测与智能管控。构建从设计优化、状态监测到维护管理的全链条风险管理体系，是提升石化工程机械设备密封技术风险管理水平的关键方向。

参考文献

[1] 韦维. H公司融资租赁风险评估与管理策略研究 [D]. 江苏科技大学, 2022.
[2] 李珍珍. 电厂东路工程造价风险评估与应对策略研究 [D]. 青岛大学, 2021.
[3] 刘旭洋. 密封端面织构技术在机械密封中的应用研究 [D]. 西安石油大学, 2021.
[4] 张建荣. G食品检验公司风险评估与管理策略研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2023.
[5] 左有嘉. 龙卷风作用下列车倾覆风险评估与管理 [D]. 重庆大学, 2021.
[6] 李岫. 石油化工建设项目的风险管理研究 [J]. 化工管理, 2021(7): 173-174.
[7] 蔺健宁. 浅谈石油化工压力管道的安全管理与风险评估 [J]. 石化技术, 2023, 30(10): 251-252, 125.
[8] 吕雪松. 石油化工 EPC 总承包项目施工风险与材料管理的革新方式 [J]. 化工管理, 2023(3): 12-14.
[9] 刘清学, 滕学金, 甄美静. 石油化工安全技术与环境风险的评价要点及策略 [J]. 化工管理, 2021(14): 114-115.
[10] 闫威. 石油化工机械设备的管理研究 [J]. 石油化工建设, 2022, 44(11): 66-67, 147.