

石油化工设备安全评估与管道维护策略研究

尚永旺 赵瑞敏 (江苏新海石化有限公司, 江苏 连云港 222113)

摘要: 石油化工设备, 特别是在管道系统中, 长期受到高温、高压以及腐蚀性物质的影响, 极易出现腐蚀、磨损、裂纹以及泄漏等问题, 不仅威胁生产安全, 还可能引发环境污染和重大经济损失。本文围绕石油化工设备的安全评估与管道维护策略展开, 提出了 RBI 为核心的安全评估方法, 结合失效可能性与后果严重性构建风险矩阵, 对设备进行分级管理与风险控制。同时, 通过对腐蚀、疲劳、外力损伤等损伤机理与失效模式的分析, 明确设备关键风险点并优化检修计划。在管道维护策略中, 提出了定期修复防腐层、监测内壁腐蚀速率以及实施 B 型套筒修复或换管处理等措施, 进而为石化行业的安全生产与可持续发展提供实践指导。

关键词: 石油化工设备; 安全评估; 管道维护策略

1 前言

石油化工业作为能源产业的重要支柱, 其设备运行的安全性和稳定性直接关系到企业生产效率、经济效益以及生态环境保护。然而, 由于石油化工设备多运行于高温、高压、腐蚀性介质等复杂工况下, 设备的损伤失效风险较高, 尤其是承压设备和管道系统更容易受到腐蚀、疲劳以及外力损伤等因素的影响。一旦发生设备事故, 不仅会导致严重的经济损失, 还可能对环境和人员安全带来重大威胁。因此, 构建科学的安全评估体系与高效的维护策略已成保障石油化工设备安全运行的关键。

2 石油化工设备安全评估

2.1 设备风险辨识

石油化工设备安全风险辨识是基于设备运行环境、工况条件及失效机理等因素, 对风险源、风险事件、成因及后果进行全面分析的过程。设备风险源主要包括压力容器和压力管道等承压类设备, 风险事件涉及泄漏、爆炸、腐蚀穿孔等设备故障, 而产生风险的原因往往与设备材质、工艺条件、介质特性及外部环境密切相关。腐蚀、疲劳、外力破坏等是主要的失效机理, 其中介质的腐蚀性 & 操作过程中的超温超压往往会导致设备失效的可能性大幅增加。同时, 地震、台风等外部因素及人为操作失误同样不可忽视, 针对设备运行环境和工况特点, 辨识标准主要依据设备类型、材质、运行压力、温度以及输送介质进行分类^[1]。

2.2 风险评估方法与流程

2.2.1 评估方法

石油化工设备安全评估中, 基于风险的检验技术 (Risk Based Inspection, RBI) 和半定量、定性评估法是两种核心方法。RBI 技术强调基于设备运行风险的

检验策略, 通过对设备的失效可能性和失效后果进行综合评估, 将设备风险等级作为确定检验周期、范围和方法的依据。RBI 技术注重数据驱动, 结合腐蚀、疲劳、材料劣化等损伤机理分析, 通过科学建模与量化计算, 为设备风险管控提供决策支持。同时, 半定量和定性评估方法更适用于数据较少或评估周期较短的场景, 半定量评估通过风险矩阵将失效概率和后果等级转化为直观的风险等级, 适合复杂度较高但可量化的情况; 而定性评估主要依赖专家经验和标准指南进行判断, 结合设备工况、历史数据和故障特征进行评估, 为管理者提供可靠的风险等级划分依据。

2.2.2 损伤机理与失效模式分析

石油化工设备安全评估中的损伤机理与失效模式分析主要围绕腐蚀类型和设备材质展开。腐蚀类型包括大气腐蚀、保温层下腐蚀 (Corrosion Under Insulation, CUI) 和冲刷腐蚀等, 其中大气腐蚀常发生在外防护涂层破损或长时间停用的设备上, 湿度较高或环境条件较差时易导致外壁腐蚀减薄, 影响设备承压能力; 保温层下腐蚀多出现在壁温处于 -5°C 到 60°C 范围的设备, 尤其是保温材料潮湿或破损时, 设备外壁容易发生局部腐蚀, 严重情况下可能导致失效; 冲刷腐蚀主要出现在流体速度较高的设备与管道中, 受流体冲击的部位如进出口管段、弯头和接头处更易发生材料减薄现象。

设备材质分析通过对选材的合理性与材料性能的退化程度进行评估, 进一步识别潜在的损伤风险。Q345R 低合金钢和 300 系不锈钢是石油化工设备常用材质, Q345R 具有较高的强度和良好的焊接性能, 适用于承受高压和中温工况的压力容器, 但在高温环境下容易发生氢脆或高温腐蚀; 300 系不锈钢具备良好

的耐腐蚀性,适合处理含腐蚀性介质的设备,但在含氯环境中易发生点蚀和应力腐蚀开裂。

2.2.3 风险矩阵确定风险等级

石油化工设备安全评估中,风险矩阵作为确定风险等级的重要工具,通过综合考虑失效可能性和后果严重性进行科学评估。失效可能性基于设备的当前运行状态、历史检验数据及材料退化程度等因素,通过腐蚀速率、疲劳寿命、外力干扰等影响因素进行定量或半定量评估,并结合设备实际运行周期以及维护管理情况判断未来失效发生的概率。对于长期运行的设备,失效可能性往往随着使用时间的增长而逐步增加,需要定期进行风险评估调整。后果严重性则依据设备失效后对人员安全、环境影响和经济损失等方面的潜在危害进行综合分析,具体包括失效造成的泄漏量、介质性质、爆炸可能性以及影响范围等多种因素,进一步分级为低、中、高等级别的后果类型。通过将失效可能性与后果严重性映射到风险矩阵中,可以直观地将设备风险等级划分为重大、较大、一般和低风险四个层次^[2]。

2.3 石油化工设备安全控制策略

2.3.1 设置安全联锁和增加监测装置

石化设备安全控制策略中,设置安全联锁和增加监测装置是提升设备运行安全性的关键。安全联锁系统通过自动控制和应急处置机制,在设备运行过程中一旦检测到异常参数或故障信号,立即执行停机、泄压等安全动作,防止事故扩大。高温、高压设备以及处理易燃、易爆介质的系统应设定多层次联锁保护,通过监测温度、压力、流量等关键工艺参数,触发预警或启动安全联锁程序,减少异常工况对设备的影响。例如,在高压加氢装置中,控制回路的关键设备参数均设有联锁装置,当压力或温度超过设定范围时,系统立即执行泄压程序,有效防止设备爆炸或泄漏事故的发生。监测装置的增加同样是保障设备稳定运行的重要手段,通过配置实时在线监测系统,全面掌控设备运行状态。振动监测、腐蚀监测、温度和压力传感器的安装可以及时获取设备运行数据,分析潜在风险点,并通过数据传输和预警系统向管理中心反馈设备异常信号。高风险设备区域应配备可燃气体报警仪和自动灭火系统,在出现泄漏或火灾等情况时,监测装置第一时间发现并触发应急响应措施。

2.3.2 加强日常检维修管理与健全应急处置方案

日常检维修管理的核心在于建立科学的检修计划

和设备维护标准,通过定期巡检、状态监测和计划性维修,及时发现设备潜在缺陷并进行有效处理。针对承压设备、压力管道等关键设施,应结合设备的运行周期、工作参数与历史数据,合理制定检修周期与内容,利用无损检测技术、腐蚀监测仪器以及温度、压力传感器对设备进行全面诊断,识别薄弱环节与潜在风险,防止因设备老化、腐蚀减薄或疲劳裂纹引发失效事故。

同时,健全应急处置方案是快速应对设备事故的保障,企业应依据设备的风险等级和工艺特点,编制包括泄漏、爆炸、火灾等事故情景的专项应急预案,完善应急处置卡,并组织各类事故模拟演练,提升一线操作人员的应急响应能力。针对高风险装置区域,需配备自动报警和联锁切断系统,确保事故发生时能够迅速启动应急措施^[3]。

3 石油化工设备管道维护策略

3.1 管道缺陷成因

管道在运行过程中,缺陷成因主要可以分为施工期和运营期两个阶段,同时通过缺陷数据的统计与分布规律分析可以深入理解管道劣化的特点与发展趋势。在施工期,由于管沟未彻底清理导致管道底部石块顶压,长期运行后,土壤沉降引发管道局部变形,管壁出现应力集中区域,造成凹陷缺陷。未设置冷弯管,特别是在管道转弯处,直接强制焊接导致管道变形,形成几何不连续性,进一步影响管道承压能力。同时,旧管道干扰也会产生隐患,废旧管道与新管道之间的间隙不均匀易引起支撑不稳定,增加新管道损伤风险。

运营期的缺陷成因则集中在电化学腐蚀和第三方施工破坏。电化学腐蚀主要源于管道外防腐层破损,阴极保护失效导致管道与周围土壤介质形成电位差,加速局部腐蚀过程,长时间运行使管道壁厚逐渐减薄,严重时出现穿孔风险,而第三方施工破坏则多发生在管道上部区域,机械挖掘与施工活动导致防腐层损伤,甚至直接作用于管道,形成凹陷或金属损失。

3.2 管道维护策略

3.2.1 定期修复防腐层损伤,强化管道外壁保护

防腐层作为管道外壁与外界环境的直接屏障,其完整性对管道的安全运行至关重要。通过对管道外壁进行全面检测,可以识别防腐层的破损区域和潜在缺陷。检测手段包括目视检查、高频电位梯度法和直流电位降检测法,以精确定位损伤点。针对检测发现的

防腐层破损区域,应根据损伤程度采取修复或更换措施。对于轻微破损,可通过涂刷防腐涂料或粘贴补片进行快速修复;对于严重破损,需清除损伤区域后重新涂覆防腐层或更换整段防腐结构。在强化外壁保护方面,需定期评估阴极保护系统的性能,确保其电位水平能够有效抑制外壁腐蚀。根据管道的埋深和周围土壤的电化学特性,优化阴极保护电流分布,必要时更换耗尽的阳极材料或升级保护设备。

3.2.2 监测管道内壁腐蚀速率,调整维护周期与措施

通过腐蚀监测,能够获取内壁材料的实时状态以及及与介质之间的相互作用信息,能够为精准制定维护计划提供科学依据。腐蚀监测通常采用电化学监测法、超声波测厚法和腐蚀挂片法。电化学监测法利用腐蚀电流密度的变化评估腐蚀速率,可以提供连续、实时的数据支持。超声波测厚法通过定期测量管道壁厚变化评估材料损失程度,适用于壁厚较大的关键管段。腐蚀挂片法通过在管道内放置试片测量质量损失,提供长期运行环境下的腐蚀速率趋势。

获取腐蚀速率后,需要根据数据变化及时调整管道维护周期。对于腐蚀速率高于预期的区域,缩短检修周期并增加内检测频次,同时采用缓蚀剂注入、清管等措施降低腐蚀环境的影响。针对特定腐蚀区域,优化输送介质的成分或控制介质温度与流速,也能有效减缓内壁腐蚀的进程。

3.2.3 针对严重腐蚀与失效风险,实施B型套筒修复或换管处理

面对严重腐蚀与失效风险,采用B型套筒修复或换管处理是控制管道安全隐患的重要措施。B型套筒修复适用于局部损伤或腐蚀程度较深但未完全穿透的管道缺陷。修复过程中,首先通过现场检测准确定位腐蚀区域并清除表面腐蚀产物,然后在受损位置外部加装加强套筒。套筒与管道通过焊接或机械连接方式固定,并填充环氧树脂或密封材料以恢复管道的强度和密封性能。对于腐蚀范围较广或管道壁厚减薄严重的情况,换管处理更为适宜,换管处理需要精准确定损伤管段并完成停输操作,拆除损坏管段后使用预制新管进行更换,再通过焊接工艺确保新旧管道连接的完整性。

3.2.4 建立缺陷台账,合理安排维修计划与资源配置

缺陷台账的建立需要对检测过程中发现的所有问题进行系统记录,包括缺陷位置、类型、严重程度以及发展趋势等关键信息。通过将缺陷数据归类和数字

化管理,可以形成全面的管道风险地图,有助于清晰呈现各区域的健康状态和潜在隐患。台账的动态更新确保管道的维护决策能够实时响应风险变化,为合理分配资源提供数据支持。在维修计划制定过程中,需要依据缺陷的风险等级和影响范围优先处理高风险管段,同时结合运行周期和维护窗口优化计划安排,避免过度维修或遗漏隐患。

3.2.5 强化第三方施工风险防控

强化第三方施工风险防控需要从信息管理、现场监控和协同机制等多个方面入手,构建全方位的管控体系。信息管理方面,应建立沿线土地使用、工程施工和相关单位的信息数据库,掌握施工区域内潜在的工程活动动态。对涉及的施工企业、地方政府和相关监管部门的联系信息进行归档,并制定相应的沟通计划,及时获取第三方施工的详细信息与施工进度。现场监控是风险防控的关键,通过配备专业人员对施工现场进行全天候监督,实时跟踪机械操作情况和管道保护措施落实情况。一旦发现不当操作或可能对管道造成损害的行为,应立即采取制止措施并启动应急响应流程。

4 结语

综上所述,石油化工设备的安全评估与管道维护是保障行业高效、安全运行的关键,通过持续优化评估技术和维护方法,提升设备运行的可靠性和稳定性,不仅能够降低事故风险和经济损失,还将为石油化工行业的可持续发展提供重要支撑。未来随着智能化和信息化技术的进一步推广,石油化工设备安全管理将进入更加高效、精准的新时代,为行业高质量发展注入新动力。

参考文献:

- [1] 石磊.海底油气田管道维护与事故救援技术研究[J].石化技术,2024,31(10):83-85.
- [2] 屈持.考虑不同维修策略的石化安全设备可靠性评估研究[D].中国石油大学(华东),2021.
- [3] 杨健.HAZOP和SIL评估在石化装置成套设备安全设计中的运用[J].石油化工设备技术,2020,41(02):47-51+7.

作者简介:

尚永旺(1986-),汉族,男,山东菏泽人,学历:本科,毕业于江苏科技大学;现有职称:中级工程师;研究方向:石油化工。