

化工压力管道材料在高温高压环境下的失效机制与寿命预测研究

王一篷 刘桓溥 李帅驰 (西安特种设备检验检测院, 陕西 西安 710065)

摘要: 高温高压工况下化工压力管道的失效机理与剩余寿命评估, 是保障石化行业安全生产的核心课题。当前研究虽聚焦于腐蚀-应力-蠕变多场耦合作用机制, 但在复杂化工介质环境中, 管道材料损伤累积规律的认知仍需进一步深化。研究证实, 环烷酸腐蚀、硫化物开裂及氢脆是化工管道的典型失效模式, 而精准的寿命预测必须整合介质成分、操作参数等多元影响因素。构建基于多尺度分析的寿命预测模型, 对于保障化工装置安全运行、制定科学维检方案具有重要的工程实践意义。

关键词: 化工压力管道; 高温高压失效; 寿命预测

中图分类号: TQ050.7; TH49

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0163-03

Failure Mechanisms and Life Prediction of Chemical Pressure Pipeline Materials in High-Temperature and High-Pressure Environments

Wang Yipeng, Liu Huanpu, Li Shuaichi (Xi'an Special Equipment Inspection Institute, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: The failure mechanisms and remaining life assessment of chemical pressure pipelines under high-temperature and high-pressure conditions represent a core issue for ensuring safety in the petrochemical industry. Although current research focuses on the multi-field coupling mechanisms of corrosion, stress, and creep, the understanding of material damage accumulation rules in complex chemical media still requires further refinement. Studies have confirmed that naphthenic acid corrosion, sulfide cracking, and hydrogen embrittlement are typical failure modes of chemical pipelines. Accurate life prediction must integrate multiple influencing factors, such as medium composition and operational parameters. Establishing a life prediction model based on multi-scale analysis holds significant engineering practical importance for ensuring the safe operation of chemical plants and formulating scientific maintenance strategies.

Keywords: Chemical pressure pipelines; High-temperature and high-pressure failure; Life prediction

随着石油化工装置朝着大型化、高参数化方向持续发展, 压力管道的服役环境愈发苛刻。深入解析化工压力管道在复杂工况下的失效机理, 研发基于多源信息融合的寿命预测技术, 成为当前工程界与学术界共同关注的焦点问题。

1 化工压力管道高温高压服役环境特征

1.1 典型化工介质对管道材料的协同腐蚀作用

化工压力管道在高温高压工况下, 需长期接触酸性介质、有机溶剂及高盐溶液等复杂化学物质, 这些介质与管道金属材料发生电化学反应, 直接加剧腐蚀进程。以石油化工管道为例, 其常面临环烷酸与硫化氢的协同腐蚀: 环烷酸会破坏管道表面形成的保护膜, 而硫化氢则渗透至材料晶界, 诱发氢致开裂。煤化工气化装置的管道, 需承受高温合成气中氯离子与一氧化碳的复合腐蚀——氯离子促进点蚀形核, 一氧化碳则通过渗碳作用改变材料相结构。此外, 化工管道在交变温度工况下, 介质浓缩效应会进一步加剧局部腐蚀速率, 如 PTA 装置氧化反应器的醋酸蒸汽, 在管道弯头处冷凝形成高浓度腐蚀环境, 最终导致该区域优

先发生腐蚀失效 (如图 1)。



图 1 化工压力管道腐蚀

1.2 温度-压力耦合作用下化工管道应力重分布特性

高温高压工况会促使化工管道材料产生显著蠕变行为, 导致初始设计的应力状态发生动态演变。以乙烯裂解炉出口管道为例, 在 800℃、8MPa 的持续作用下, 管道轴向应力因蠕变松弛下降 40%, 而环向应力则因径缩效应上升 25%。这种应力重分布易引发管道

变形超标或局部应变集中,尤其在法兰连接处、三通等结构不连续区域形成高应力区。同时,压力波动与温度循环会产生叠加效应,如合成氨装置的高压蒸汽管道在启停过程中,压力冲击与热疲劳的共同作用导致管道支吊架应力超限,最终引发焊缝开裂。有限元分析结果表明,温度梯度造成的热应力可占化工管道总应力的 30% 以上。

1.3 化工流程工业中管道动态载荷的特殊性

化工生产过程中的压力脉动、流体冲击及设备振动,给管道带来复杂的动态载荷。例如聚烯烃装置反应器出口管道,因气相单体的周期性聚合反应产生压力波动,其频率范围在 5–20Hz 之间,这种交变载荷会加速管道疲劳裂纹的扩展。在煤浆输送管道中,固体颗粒对管壁的持续冲蚀作用,不仅会减薄壁厚,还会改变材料表面应力状态,实测数据显示冲蚀区域的显微硬度提升约 15%。

2 化工管道材料典型失效机制分析

化工管道的材料选用,需综合考量相关方法、标准与规范,同时兼顾管道及配件、配套设备的材料特性,还需纳入管道所接触的介质、服役环境及输送流体等因素。在选择适配材料时,系统适用的温度、应力条件及管道尺寸也需重点考量。化工管道材料选用必须严格遵循 ASME B31.3、GB/T 20801 等标准规范,同时结合介质特性、温度压力参数及服役环境等综合因素统筹确定。高温高压工况下,材料选择需重点平衡耐蚀性、高温强度与抗蠕变性能——例如在硫化氢环境中,需采用 NACE MR0175 标准认证的抗硫材料;临氢管道则需满足 API 941 中 Nelson 曲线的要求。对于强腐蚀性介质输送管道,需通过腐蚀裕量计算确定最小壁厚,并考虑采用双相不锈钢、哈氏合金等高性能材料。此外,管道焊接接头的材料匹配性、热处理工艺及无损检测要求,也直接影响失效风险,如奥氏体不锈钢管道焊后消应力处理不当,易引发晶间腐蚀开裂。管道尺寸规格的选择还需兼顾流体流速对冲蚀腐蚀的影响,直径较大的管道需特别关注介质沉积引发的局部腐蚀问题。

3 化工管道寿命预测方法

3.1 基于断裂力学的剩余寿命评估方法

断裂力学为化工管道寿命预测提供了核心技术支撑,尤其在含缺陷管道的剩余寿命量化计算中展现出独特优势。借助 Paris 公式这类经典裂纹扩展模型,能够精准刻画交变载荷作用下裂纹的动态扩展规律。以某石化企业加氢反应器出口管道为研究对象,通过 CTOD 断裂韧性测试与有限元分析技术相结合的方式,成功揭示了焊缝裂纹在氢环境中的扩展演化特征,预

测结果与实际服役情况的偏差控制在 7% 以内,验证了该方法的可靠性。在工程实践中,化工介质对材料断裂韧性的影响不容忽视——例如氯离子的存在会大幅削弱奥氏体不锈钢管道的抗裂纹扩展能力,这一因素必须纳入评估体系。为保障预测精度,需通过超声相控阵等先进检测技术定期更新裂纹尺寸数据,并依据 API 579 标准中的 FAD 评定图开展失效风险判定。

3.2 多参数耦合的损伤累积模型预测

化工管道的服役环境往往呈现多因素复合作用特征,因此构建考虑多机制耦合的损伤累积模型成为提升预测准确性的关键。该类模型核心在于揭示蠕变损伤、疲劳损伤与腐蚀损伤三者之间的交互作用机制,实现对管道失效过程的全面刻画。以某 PTA 装置醋酸输送管道为例,研究人员通过改进 Robinson 寿命分数法则,将介质腐蚀速率作为独立变量融入模型构建过程,显著提升了剩余寿命预测的精准度。模型参数的获取需依托一系列加速试验,包括高温高压腐蚀试验、低周疲劳试验及慢应变速率试验等。针对临氢管道这一特殊场景,还需利用氢通量实时监测数据对模型参数进行动态修正。数字孪生技术的引入为模型的动态更新提供了技术可能,某乙烯装置通过对管道应力-温度场的实时监测,实现了剩余寿命的在线预测与动态调整。

3.3 基于机器学习的智能预测技术

机器学习算法的兴起为化工管道寿命预测开辟了全新路径,其核心逻辑在于通过整合历史检测数据、工艺运行参数及失效案例信息,构建数据驱动的深度神经网络预测模型。某炼厂基于 5 年积累的管道测厚数据、介质成分分析结果及操作运行记录,成功训练出管道腐蚀速率预测模型,经实际验证其预测准确率达到 85% 以上。该技术的关键环节包括特征工程优化与算法模型选择:在特征工程方面,需将温度波动幅值、压力变化频率等关键影响因素进行量化处理并作为模型输入;在算法选择上,LSTM 网络因其在时间序列数据处理中的独特优势得到广泛应用。在实际工程应用中,样本数据不均衡是常见挑战,可通过迁移学习技术有效解决小样本数据场景下的预测精度问题。

4 提升化工管道服役性能的对策

4.1 先进材料开发与工程应用技术

面对化工管道在高温高压环境下的严苛服役需求,材料科学领域正以更快节奏推进新型合金体系的研发与工业应用。在耐蚀材料范畴内,超双相不锈钢凭借出色的抗点蚀当量与力学性能,已逐步成为强腐蚀介质输送管道的优选材料——这类材料通过精准调控铁素体与奥氏体的两相比例,实现了强度与耐蚀性

的最优平衡。针对更高温度工况,镍基合金与氧化物弥散强化钢的研发工作取得关键性突破,其高温蠕变抗力较传统材料有显著提升,为极端环境下管道的稳定运行提供了材料保障。在材料加工技术层面,激光增材制造为复杂结构管件的成型开辟了新路径,能够实现梯度功能材料的高精度制备,有效解决传统加工工艺难以攻克的成型难题。表面工程技术同样获得长足进步,通过热喷涂、激光熔覆等工艺制备的耐蚀耐磨涂层,可针对性解决管道局部易损伤的问题,延长管道服役寿命。材料基因组工程的引入大幅加快了新材料的开发进程,借助高通量计算与实验研究的协同配合,能够快速筛选并优化合金成分,缩短新材料从实验室研发到工业应用的周期。在工程应用环节,建立完善材料性能数据库是保障新材料可靠应用的基础,同时还需开发专用的焊接工艺评定规程,确保新材料在工业现场的焊接质量与使用安全性,为新材料的规模化应用提供技术支撑。

4.2 智能化监测与完整性管理技术

现代传感技术与数据分析方法的深度融合,为化工管道健康管理带来了革命性变革。分布式光纤传感系统能够实现管道全长度范围内温度、应变场的连续监测,其空间分辨率可达米级精度,可实时捕捉管道受力与温度变化的细微特征。基于声发射与导波的无损检测技术正朝着在线化、自动化方向发展,与机器人巡检设备协同构建起立体监测网络,实现对管道运行状态的全方位实时监控。

大数据分析平台通过整合工艺参数、环境数据与检测结果,利用机器学习算法精准识别管道早期损伤特征,为管道故障预警提供数据支持。数字孪生技术通过构建管道虚拟模型,实时映射物理实体的状态变化,不仅能够直观呈现管道运行状况,还能为预测性维护决策提供科学依据。

4.3 设计方法与标准规范的创新发展

化工管道工程设计方法正经历从经验驱动向理论驱动的深刻转变。在应力分析领域,基于应变的设计方法逐渐取代传统的弹性应力分析,能够更准确地反映管道在极端工况下的实际受力行为,为管道结构设计提供更贴合实际的理论依据。多物理场耦合仿真技术可综合考虑流固耦合、热力耦合等复杂相互作用,清晰呈现管道运行过程中的多因素作用机制,为管道布局优化与结构改进提供科学支撑。

在标准规范层面,主流技术标准持续更新迭代,不断纳入最新研究成果与工程实践经验。以ASME B31.3为代表的规范进一步加强对新材料、新工艺的覆盖范围,同时细化特殊工况下的技术要求,确保

标准对工程实践的指导作用。基于性能的设计理念逐步推广,允许在满足安全目标的前提下采用创新设计方案,为工程设计的技术创新提供更大空间。

4.4 创新运维模式与应急响应体系建设

传统化工管道运维模式正加速向预测性、主动性方向转型。基于人工智能的故障预警系统可提前识别潜在风险,通过深度分析历史运行数据与实时监测参数,构建管道健康状态的动态评估模型,实现对管道故障的早期预判。智能诊断算法能够精准区分正常工况波动与异常信号,有效降低误报率,为运维决策提供可靠依据。预防性维护策略不再依赖固定周期,而是结合设备实际运行状态制定维护计划,优化维护资源配置,减少不必要的停机时间与维护成本。在应急响应方面,三维可视化系统整合管道拓扑结构与周边环境信息,直观呈现事故现场情况,为事故处置方案的快速制定提供决策支持。

5 结束语

化工压力管道的失效机制和寿命预测研究仍面临诸多挑战,特别是在多场耦合作用下的材料损伤演化规律尚待阐明。未来研究应着力开发新型耐蚀材料,完善基于大数据的智能监测技术,建立更精确的寿命预测模型。

参考文献:

- [1] 王永亮. 石油化工压力管道设计中相关安全问题分析[J]. 当代化工研究, 2024, (20): 109-111.
- [2] 石美真, 许子豪, 赵建如. 石油化工用压力管道的无损检测技术应用研究[J]. 锅炉制造, 2024, (03): 53-54+57.
- [3] 路明博. 石油化工压力管道安装工艺及质量控制重点的研究[J]. 新疆有色金属, 2024, 47(02): 103-104.
- [4] 万雪枫. 石油化工用压力管道破坏形式分析及其无损检测研究[J]. 今日制造与升级, 2023, (11): 188-190.
- [5] 郑峰刚. 化工行业压力管道安装工艺及质量管理[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(05): 15-17.
- [6] 崔远洋. 管道疲劳裂纹扩展及软件开发[D]. 北京化工大学, 2023.
- [7] 张弛, 刘强, 陈晓彤. 高温高压下临氢管道氢致开裂行为与寿命预测模型研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(16): 156-165.
- [8] 陈浩, 李静, 王磊. 高温高压多场耦合下化工管道蠕变-疲劳-腐蚀交互作用与损伤建模[J]. 化工学报, 2023, 74(5): 2108-2119.

作者简介:

王一逢(1996-), 男, 汉族, 陕西西安人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 特种设备检验检测。