

化工工艺管道腐蚀机理及在线检测技术应用研究

史青姣 孙 涛 (山东杰瑞凯泰科技股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 化工管道在复杂介质与工况条件下会面临严重腐蚀威胁, 对生产安全和设备寿命造成影响。通过对电化学腐蚀、应力腐蚀、冲刷腐蚀等典型机理进行分析, 揭示介质特性、工艺参数、材料性能对腐蚀行为的影响规律。系统梳理超声波、射线、电化学及智能传感等在线检测技术的原理与特点, 探讨不同工况下技术选择策略、系统集成方法以及应用效果。实践显示在线检测系统能让故障检出率达到95%以上, 使事故率降低65%, 还能让检修成本降低40%, 为化工管道腐蚀监测与完整性管理提供理论依据和实践指导。

关键词: 化工管道; 腐蚀机理; 在线检测; 无损检测; 电化学监测; 智能传感

中图分类号: TQ055.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0166-03

Research on Corrosion Mechanism and Online Detection Technology Application of Chemical Process Pipelines

Shi Qingjiao Sun Tao (Shandong Jerry Kaitai Technology Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: Chemical pipelines will face serious corrosion threats under complex media and operating conditions, which will affect production safety and equipment life. By analyzing typical mechanisms such as electrochemical corrosion, stress corrosion and erosion corrosion, the effects of dielectric characteristics, process parameters and material properties on corrosion behavior are revealed. The principles and characteristics of on-line detection technologies such as ultrasonic, X-ray, electrochemistry and intelligent sensing are systematically combed, and the technology selection strategy, system integration method and application effect under different working conditions are discussed. Practice has proved that the online detection system can achieve more than 95% fault detection rate, reduce accident rate by 65% and reduce maintenance cost by 40%, which provides theoretical basis and practical guidance for corrosion monitoring and integrity management of chemical pipelines.

Keywords: chemical pipeline; corrosion mechanism; online detection; non-destructive testing; electrochemical monitoring; intelligent sensing

化工工艺管道长时间承受高温高压以及强腐蚀性介质侵蚀, 因腐蚀失效引发的泄漏和爆炸事故频繁发生, 造成重大经济损失并导致环境污染。传统离线检测需要停产进行拆卸操作, 成本高昂且不能实时监控腐蚀演变过程。随着传感技术和智能化水平不断提升, 在线检测技术为管道安全运行提供全新途径, 深入理解腐蚀机理并且选择适宜的在线检测手段, 建立科学监测体系对保障化工生产安全和延长设备服役周期意义重大。

1 化工工艺管道腐蚀机理分析

1.1 化工管道腐蚀类型与特征

化工管道在服役的时候会遭受多种形式的腐蚀破坏, 依据腐蚀形态和机制能分成不同类型。

①均匀腐蚀呈现出金属表面整体减薄的状况, 腐蚀速率相对稳定且比较容易预测, 虽说单位时间内材料损失量较小, 不过长期作用会让管壁承压能力显著下降, 这种腐蚀主要发生在酸性或碱性介质均匀接触的环境。

②局部腐蚀包含点蚀、缝隙腐蚀和晶间腐蚀, 其特点是腐蚀集中在特定微小区域, 点蚀在氯离子作用

下穿透钝化膜形成针孔状凹坑, 穿孔速度快并且隐蔽性强, 缝隙腐蚀发生在法兰、垫片等缝隙结构的位置, 晶间腐蚀沿晶界优先溶解会使材料丧失机械强度。

③应力腐蚀开裂是在拉应力与特定腐蚀介质协同作用下产生的脆性断裂, 裂纹扩展速度快而且没有明显塑性变形征兆, 冲刷腐蚀是流体机械剥蚀与电化学腐蚀的复合破坏模式, 大多发生在弯头、三通等流速突变的部位^[1]。

1.2 腐蚀影响因素及作用机理

化工管道的腐蚀过程会受到介质性质、工艺参数以及材料特性的耦合作用影响, 介质的 pH 值能够决定电化学反应进行的方向, 氯离子会穿透钝化膜进而诱发点蚀核的形成, 温度升高能够使离子迁移速率和反应活性得以增强, 腐蚀速率是符合阿伦尼乌斯方程的:

$$v_{\text{corr}} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: v_{corr} 为腐蚀速率, mm/a; A 为指数前因子; E_a 为活化能, kJ/mol; R 为气体常数, 8.314 J/(mol·K); T 为绝对温度, K。

流速发生改变会使边界层厚度产生变化进而影响传质过程, 压力出现变化会导致 CO₂、H₂S 等酸性气体溶解量有所增加, 应力状态通过改变钝化膜完整性来影响腐蚀倾向, 拉应力作用下裂纹尖端应变能累积会促进阳极溶解, 电化学腐蚀驱动力由 Butler - Volmer 方程进行描述:

$$i_{corr} = i_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{\alpha_c n F \eta}{RT}\right) \right] \quad (2)$$

式中: i_{corr} 为腐蚀电流密度, A/m²; i_0 为交换电流密度, A/m²; α_a 、 α_c 为阳极、阴极传递系数; η 为过电位, V。

2 化工管道在线检测技术研究

2.1 无损检测技术原理

无损检测技术借助物理场和管道材料相互作用, 在不破坏结构完整性的情况下实现缺陷识别。超声波检测依靠压电晶片激发高频机械波在金属里传播, 当声波碰到裂纹、气孔等缺陷时会在界面处产生反射, 接收探头依据回波时间差和幅值变化来判定缺陷位置与尺寸, 就如图 1 所示。射线检测是基于 X 射线或者 γ 射线穿透管壁时的差异吸收原理, 缺陷区域因密度降低使得透射强度增强, 胶片或数字探测器记录的灰度差异能反映内部不连续性分布^[2]。电磁检测包含涡流和漏磁这两类方法, 涡流探头产生的交变磁场会在导电材料表面感生涡电流, 缺陷改变涡流路径会引起阻抗变化, 漏磁检测对铁磁性材料充磁之后, 缺陷处磁导率突变会导致磁力线逸出表面形成漏磁场, 霍尔传感器阵列采集漏磁信号分布特征从而实现缺陷定量评估。

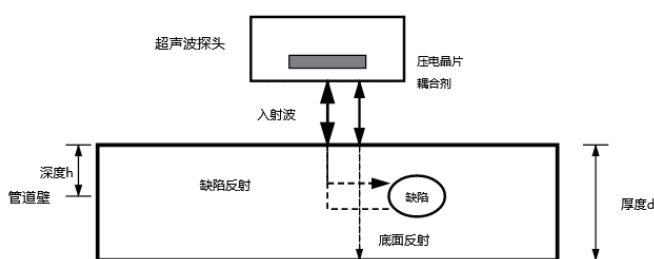


图 1 超声波无损检测原理示意图

2.2 电化学在线监测技术

电化学在线监测技术能通过测量管道金属与腐蚀

表 1 智能化检测技术性能参数对比

技术类型	检测距离	响应频率	检测精度	工作温度范围	数据采集速率
光纤传感技术	1~50 km	0~10 kHz	应变: $\pm 1\mu\epsilon$ 温度: $\pm 0.1^\circ\text{C}$	-40~300 $^\circ\text{C}$	1~10 Hz
声发射检测	5~20 m	100 kHz~1 MHz	定位误差: $\pm 50\text{ mm}$ 幅值: $\pm 2\text{ dB}$	-20~150 $^\circ\text{C}$	100 kHz~10 MHz
多传感器融合系统	视传感器类型	0.1 Hz~1 MHz	综合误差: <5%	-40~200 $^\circ\text{C}$	1 Hz~1 kHz

介质界面的电化学参数, 实时评估腐蚀状态。线性极化电阻法是基于电极极化理论, 在腐蚀电位附近施加 ± 10 到 30mV 的微弱极化信号并测量响应电流密度, 极化电阻 R_p 与腐蚀电流密度 i_{corr} 呈反比关系, 可根据 Stern - Geary 方程 $i_{corr} = \frac{B}{R_p}$ 来计算腐蚀速率, 常数 B 取决于阳极和阴极的 Tafel 斜率, 该方法响应快速且对金属表面扰动较小^[3]。电化学阻抗谱技术施加不同频率的正弦波交流信号, 测量电极系统的阻抗响应, 经由 Nyquist 图和 Bode 图分析电荷转移电阻、双电层电容及扩散阻抗等参数, 高频区反映溶液电阻, 中频区表征电荷转移过程, 低频区体现扩散控制特征, 通过等效电路拟合能获得腐蚀动力学信息。腐蚀电位监测采用参比电极和工作电极构成测量回路, 连续记录金属相对于标准电极的电位变化, 电位负移指示阳极溶解加剧, 电位正移反映钝化膜修复, 电位突变可预警点蚀或应力腐蚀开裂发生, 配合电流密度测量可判别腐蚀类型与速率演化趋势。

2.3 智能化检测技术

智能化检测技术借助先进传感器和数据处理算法融合, 以此实现对管道腐蚀的精准监测。纤传感技术依靠光在光纤传播时强度、相位、波长的变化来响应外部物理场, 布拉格光栅传感器通过测量波长漂移量确定应变和温度, 分布式光纤能够对数公里的管道进行连续监测^[4]。声发射检测负责捕获材料内部裂纹扩展和塑性变形产生的瞬态弹性波信号, 通过多通道传感器阵列对声发射源进行定位, 如表 1 所示, 利用能量参数、振铃计数及频谱特征可区分腐蚀类型。多传感器融合系统集成超声波、电化学、温度、压力等异质传感器, 采用数据融合算法消除单一传感器的不确定性, 机器学习模型可实现对腐蚀速率的预测和剩余寿命的评估。

3 在线检测技术工程应用与优化

3.1 不同工况下检测技术选择

化工管道的工况条件差异特别明显, 检测技术的选择要综合考量介质特性、温度压力、管道材质以及腐蚀类型等多方面因素: ①高温高压的管道应该优先采用射线检测或者高温超声波探头, 射线检测不受温度限制能够穿透厚壁管道, 高温超声波探头采用耐热压电晶片和延迟块设计, 工作温度可以达到 300 $^\circ\text{C}$

以上,电磁检测由于提离效应在高温环境下信号衰减比较严重需谨慎使用。②强腐蚀介质的管道适宜选用电化学在线监测与光纤传感的组合方案,电化学探头直接接触介质能够实时测量腐蚀速率,光纤传感器耐腐蚀特性适合长期埋设,超声波检测要考虑耦合剂与介质的相容性避免造成二次污染。③复杂结构管道像弯头、三通、焊缝等部位应该采用相控阵超声波或者漏磁检测,相控阵技术通过电子扫描能实现多角度成像,漏磁检测对几何形状适应性比较强,声发射技术可定位应力集中区域的微裂纹扩展。

3.2 在线检测系统集成与实施

在线检测系统集成需建立从传感器布置到数据处理的完整链条。检测点布置遵循风险导向原则,在腐蚀敏感区域如焊缝、弯头、介质冲刷部位及应力集中点加密布设传感器,间距根据检测技术覆盖范围确定,超声波测厚点间距一般为3~5m,电化学探头优先安装在低流速滞留区^[5]。数据采集系统采用分布式架构,如图2所示,现场采集单元通过工业总线或无线网络将传感器信号传输至数据处理中心,信号调理模块完成滤波、放大及模数转换,实时数据库存储历史曲线供趋势分析。预警阈值根据管道设计参数、材料许用应力及历史腐蚀数据设定,壁厚减薄超过10%或腐蚀速率突增50%触发一级预警,超过20%或检测到裂纹信号启动二级预警联动应急响应,风险评估模块基于剩余强度计算和失效概率分析生成检修建议。

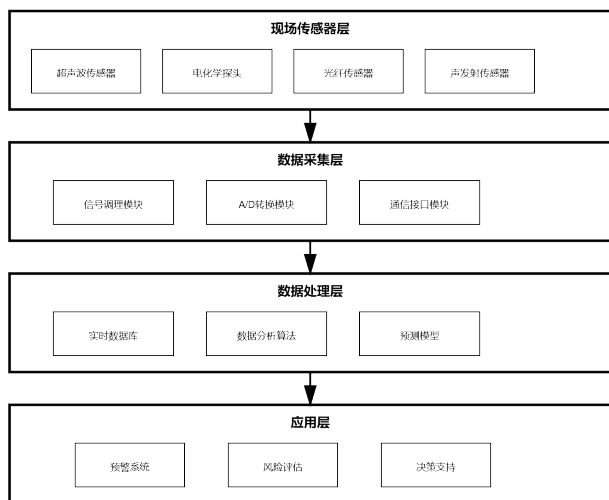


图2 在线检测系统集成架构示意图

3.3 应用效果评价与发展建议

某石化企业催化裂化装置管道工作温度在250到350摄氏度之间,其介质是含硫催化剂浆液,历史上该管道曾多次发生冲刷腐蚀泄漏事故。改造方案在关键部位布设12个高温超声波测厚探头和8个电化学腐蚀探头,监测间隔设定为15min,当壁厚减薄超过

10%时就会触发预警。系统运行两年之后,如表2所示,故障检出率达到了95%,泄漏事故率下降了65%,检修成本降低了40%。当前技术还存在数据融合算法精度不足以及极端工况传感器可靠性欠佳等问题。未来应该聚焦深度学习在腐蚀识别中的应用,开发耐高温高压的传感材料,建立统一的数据接口标准,推进系统智能化,实现从被动检测向主动预防的转变。

表2 在线检测技术应用效果对比

应用案例	检测技术	检出率	误报率	主要效益
炼化装置管道	超声波+电化学	95%	<3%	检修费用降低40%,事故减少65%
长输天然气管道	光纤传感+声发射	92%	<5%	定位精度±2m,响应时间<5min
海洋平台管道	多传感器融合	97%	<2%	可用率98.5%,检修周期延长30%
高温催化管道	高温超声波	88%	<8%	停机次数减少50%,成本降低35%

4 结语

化工管道腐蚀防护是一项系统工程,需把腐蚀机理认知和检测技术应用有机结合起来。在弄清楚不同腐蚀类型作用机制的基础上,有针对性地去选择在线检测手段,构建起包含数据采集、处理分析、预警决策的智能监测体系,这样能有效提升管道安全管理方面的水平。未来要强化多技术融合、人工智能算法应用以及标准规范建设等工作,推动在线检测技术朝着精准化、智能化的方向发展,给化工行业本质安全提供坚实可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 齐晶晶,于越,齐丹丹.石油化管道工程防腐施工安全保障协同控制措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(24):94-96.
- [2] 吴雪松.化工安全储运中管道系统的腐蚀防控与维护策略[J].中国轮胎资源综合利用,2025(11):162-164.
- [3] 于欢.基于多相流化工理论的燃气管道内腐蚀机理与控制[J].石化技术,2025,32(09):404-405.
- [4] 王锋涛,陈伟雄,刘继平,等.火电厂脱硫废水氯离子在线检测装置研究及应用[J].科技和产业,2025,25(16):64-69.
- [5] 张佳,秦林,孙明楠,等.小口径油气管道在线内检测的研究进展[J].材料导报,2025,39(22):214-225.

作者简介:

史青姣(1989-)女,汉,山东日照,本科,助理工程师,研究方向:化工工程。

孙涛(1983-)男,汉,山东济宁,本科,工程师,研究方向:化工工程。