

化工压力管道绝热层下腐蚀检测技术比较 与新型监测方法探索

李映心 白 亮 李帅驰 (西安特种设备检验检测院, 陕西 西安 710065)

摘 要: 针对化工管道绝热层长期服役中面临的隐蔽性腐蚀难题, 本文系统剖析现行检测技术的适用场景与局限之处。重点探究超声波导波、脉冲涡流、远场涡流等技术在化工管道检测中的工程适配性, 进而提出基于分布式光纤传感与电磁声发射的复合监测新方法。通过化工管道典型工况下的对比实验, 验证新型监测系统在灵敏度上的提升效果, 为化工企业压力管道完整性管理提供技术支撑。

关键词: 化工压力管道; 绝热层下腐蚀; 检测技术

中图分类号: TQ050.7; TE988

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0127-03

A Comparative Study of Inspection Technologies for Corrosion Under Insulation in Chemical Pressure Pipelines and Exploration of Novel Monitoring Methods

Li Yixin, Bai Liang, Li Shuaichi (Xi'an Special Equipment Inspection Institute, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: In response to the challenge of concealed corrosion during the long-term service of insulated chemical pipelines, this paper systematically analyzes the applicability and limitations of current inspection technologies. It focuses on evaluating the engineering suitability of ultrasonic guided waves, pulsed eddy current, and remote-field eddy current techniques for chemical pipeline inspection. Furthermore, a novel hybrid monitoring approach based on distributed optical fiber sensing and electromagnetic acoustic emission is proposed. Through comparative experiments under typical chemical pipeline operating conditions, the enhanced sensitivity of the new monitoring system is validated, providing technical support for the integrity management of pressure pipelines in chemical enterprises.

Keywords: Chemical pressure pipelines; Corrosion under insulation; Inspection technologies

依据《化学工业发展规划(2020-2025年)》与《管道安全管理条例》, 国家在推动化工行业技术革新的同时, 进一步强化对管道安全、尤其是腐蚀管理的要求。近年来, 化工企业因管道腐蚀引发的安全事故频发, 据国家应急管理部统计数据显示, 2023年全国化工企业中, 由管道腐蚀导致的安全生产事故占比达23.6%, 其中绝热层下的隐蔽性腐蚀问题尤为突出。此类事故不仅造成直接经济损失, 更对生态环境与公共安全构成严重威胁。在此背景下, 开展绝热层下腐蚀检测技术研究, 具有迫切的现实意义与重大的社会价值。

1 化工压力管道绝热腐蚀特征分析

1.1 化工管道介质-绝热层耦合腐蚀机理

化工压力管道的绝热层下腐蚀问题, 与输送介质的化学特性密切相关。在高温、高压环境中, 岩棉、玻璃纤维、聚氨酯泡沫等绝热材料易吸附水分或工艺介质泄漏物, 进而形成局部电化学腐蚀环境。典型腐蚀类型包括氯离子诱发的点蚀、硫化氢导致的应力腐蚀开裂, 以及酸性冷凝液引发的均匀腐蚀。以输送含硫油品的化工管道为例, 绝热层破损后, 湿硫化氢与钢材发生反应生成氢致裂纹, 而绝热层的覆盖使得腐

蚀初期难以被察觉。此外, 绝热材料的毛细作用会加剧腐蚀介质的扩散, 尤其在管道法兰、焊缝等结构不连续区域, 腐蚀速率明显高于裸露管段。这种隐蔽性导致常规目视检测失效, 大幅增加突发泄漏风险。

1.2 典型化工管道腐蚀案例分析



图1 常见管道腐蚀

以氯碱工业的氯气输送管道为例, 其绝热层下腐蚀多表现为局部穿孔与焊缝开裂。氯气在微量水分存在时会生成盐酸, 渗入绝热层后与钢管反应形成深坑腐蚀。某化工厂检修过程中发现, 拆除绝热层后, 管道外壁存在蜂窝状蚀坑, 部分蚀坑深度已超过壁厚的

一半,而表面检查未发现任何异常。无独有偶,乙烯裂解装置的高温蒸汽管道因绝热层老化进水,引发碱应力腐蚀开裂,裂纹沿轴向扩展并最终导致蒸汽泄漏。这些案例表明,化工管道的腐蚀形态与介质特性直接相关,且绝热层的存在大幅缩短腐蚀检测窗口(如图1所示),必须在特定检修周期内采用针对性检测技术。

1.3 绝热层拆除检测的经济性与安全性矛盾

化工企业普遍面临绝热层拆除检测的高成本与高风险困境。传统检测需剥离绝热层并进行表面清理,不仅耗费大量人工与停机时间,还可能破坏原本完好的防腐层。例如,某炼油厂对常减压管道开展全面检测时,需拆除百米长的绝热层,单次检测费用超过百万元,且作业过程中存在高温烫伤与有毒介质暴露的风险。此外,部分化工管道位于密集管廊或受限空间内,拆除绝热层可能对相邻管线的正常运行造成影响。这种矛盾推动行业向非破坏性检测技术方向发展,如基于涡流或超声导波的在线监测方法,以期在检测效率与安全性需求之间实现平衡。

2 绝热层下腐蚀的影响因素

2.1 环境湿度与绝热材料吸湿性

环境湿度与绝热材料的吸湿特性,是诱发化工压力管道绝热层下腐蚀的核心因素。绝热层所用的岩棉、玻璃纤维等多孔材料,在潮湿环境中具备极强的吸湿能力。当管道运行温度出现波动时,绝热层内部易形成冷凝水——这种现象在昼夜温差显著的区域或沿海化工企业中表现得尤为突出。滞留的水分不仅为电化学腐蚀创造了必要条件,更会加速管道金属的氧化进程。以炼油厂蒸汽伴热管道为例,绝热层吸湿后长期处于湿润状态,直接导致碳钢管道外壁发生均匀腐蚀,严重时可引发局部壁厚减薄。此外,若化工介质发生泄漏并渗透至绝热层,与水分混合后会形成腐蚀性更强的电解质溶液,进一步加剧金属材料的劣化。

2.2 绝热层破损与外部污染物侵入

绝热层的物理完整性是抵御腐蚀的关键屏障,但在实际应用中,机械损伤、材料老化或安装工艺缺陷,常导致绝热层出现裂缝甚至脱落。一旦绝热层存在破损,外部环境中的腐蚀性物质(如工业大气中的二氧化硫、氯离子,或酸雨成分)便会轻易侵入,并在绝热层与管道金属表面之间积聚。例如,化工厂临近海岸的管道易受盐雾侵蚀,盐分通过绝热层破损处渗透后,会诱发管道表面点蚀,最终发展为穿孔泄漏。同时,化工装置区常见的粉尘、油污等污染物,也可能通过绝热层缺陷渗入,与金属表面发生化学反应形成局部腐蚀电池。这类腐蚀具有极强的隐蔽性,常规巡检难以发现,往往直至管道出现明显失效才被察觉。

2.3 管道运行温度与绝热层内部微环境

管道运行温度直接调控着绝热层内部的微环境状态,进而决定腐蚀的速率与形态特征。对于高温管道而言,绝热层包裹形成的封闭热湿环境,会促使水蒸气反复发生冷凝与蒸发,加速金属的氧化过程。以乙烯裂解装置的热力管道为例,其表面温度较高,导致绝热层内部长期处于高温高湿状态,使得钢材表面氧化皮频繁脱落与再生,最终造成管道壁厚减薄。与之相反,液氨输送等低温管道,若绝热层失效则易导致外壁结露,冷凝水与氨气反应生成碱性溶液,引发管道应力腐蚀开裂。此外,温度循环变化还会加剧绝热材料与金属之间的热膨胀系数差异,进而产生微间隙,为腐蚀介质渗入提供通道,形成“腐蚀-间隙扩大”的恶性循环。

3 化工管道常规检测技术对比研究

3.1 超声波测厚技术在化工管道检测中的应用与局限性

超声波测厚技术是当前化工管道腐蚀检测领域应用最广泛的无损检测手段之一,其核心原理是通过捕捉超声波在金属材料中的传播时间,反推计算管道剩余壁厚。该技术对碳钢、不锈钢等化工行业常用管道材料具有良好适配性,且操作流程相对简便,检测数据直观且可靠性较高。在化工企业日常运维中,技术人员常借助便携式超声波测厚仪,针对管道弯头、焊缝、支撑点等易腐蚀部位开展定期监测;尤其在高温高压管道系统中,该技术提供的壁厚数据可为设备完整性评估提供关键依据。然而,将其用于绝热层下腐蚀检测时,局限性也较为显著:必须拆除被测区域的绝热层才能实现有效测量,这不仅增加检测成本,还可能破坏原本完好的绝热结构。对于因严重腐蚀导致管道内壁不规则减薄的情况,单一测厚点的数据难以全面反映真实腐蚀状态。此外,针对复合材料或带涂层的管道,超声波信号易出现严重衰减,直接影响测量精度。

3.2 脉冲涡流检测技术在化工管道中的适用性分析

脉冲涡流检测技术作为近年来兴起的无损检测方法,在化工管道绝热层下腐蚀检测中展现出独特优势。其通过分析感应电磁场的变化规律评估管道金属损失量,最突出的特点是可穿透绝热层完成检测,无需拆除保温材料——这一特性对大型化工装置中密集布置的管道系统而言,能显著提升检测效率。实际应用中,该技术对管道外壁腐蚀的检测效果尤为突出,针对碳钢与低合金钢管道可实现较高检测灵敏度。某大型乙烯装置的管道检测项目中,借助脉冲涡流技术成功定位多处绝热层下的严重腐蚀区域,后续验证结果显示其检测精度达到预期目标。

3.3 远场涡流检测技术的优势与工程应用挑战

远场涡流检测技术同样适用于化工管道腐蚀检测, 尤其在小口径管道全面检测中表现突出。相较于常规涡流检测, 其检测深度更大, 可同时评估管道内外壁的腐蚀状况。该技术通过特殊设计的探头, 利用远场区域的电磁场特性获取管道壁厚信息, 对管道内外表面腐蚀均具备较好检测灵敏度。某化工厂工艺管道检测项目中, 便通过远场涡流技术成功识别出多处由介质酸性成分引发的内壁腐蚀减薄部位。不过, 该技术在工程应用中面临多重挑战: 检测速度较慢, 不适用于大规模管道的快速筛查; 对检测人员技术水平要求较高, 需经过专业培训并积累足够经验; 检测结果易受管道几何形状、支撑结构等因素干扰, 在复杂管道系统中可能出现误判此外, 该技术的设备成本较高, 对资源有限的化工企业而言可能构成经济负担。尽管如此, 在特定工况下, 尤其是针对输送高风险介质的压力管道, 远场涡流检测仍是值得优先考虑的技术方案之一。

4 新型监测方法在化工管道的创新应用

4.1 分布式光纤传感技术在化工管道腐蚀监测中的突破

分布式光纤传感技术是当前化工管道腐蚀监测领域的前沿发展方向, 其核心思路是在管道表面或内部敷设特种光纤, 构建覆盖整条管道的连续实时监测网络。该技术的独特优势在于将光纤本身转化为传感器, 依托光纤对温度、应变及声波的高敏感性, 精准捕捉腐蚀过程中产生的微小形变与热力学特性变化。某大型石化企业的应用实践显示, 通过将耐高温光纤传感器嵌入管道绝热层内部, 成功实现对盐酸输送管道法兰连接处早期腐蚀的动态监测——系统借助光纤布里渊频移变化的分析, 提前35天识别出潜在腐蚀风险点, 为运维决策争取了关键时间。

4.2 电磁声发射技术在化工管道腐蚀监测中的创新应用

电磁声发射技术通过捕获金属材料腐蚀过程中释放的弹性波信号, 为化工管道腐蚀监测提供了全新的无损检测路径。其突破性价值在于能够实时监测活性腐蚀过程, 而非仅对已形成的损伤进行评估, 这一特性使其在早期腐蚀预警中具有显著优势。某氯碱工厂的实践案例表明, 在液氯管道关键节点布置电磁声发射传感器阵列后, 成功捕捉到应力腐蚀裂纹扩展时特有的声发射信号特征; 结合先进的模式识别算法, 系统可将腐蚀相关信号从复杂环境噪声中有效分离, 最终实现90%以上的准确预警率。该技术对化工管道中危害较大的局部腐蚀形式(如点蚀、应力腐蚀开裂)监测效果尤为突出, 且最大优势在于可实现真正意义上的在线监测, 全程不影响管道正常运行。但当前技

术应用仍存在瓶颈: 复杂工况下的信号衰减问题尚未完全解决, 不同腐蚀类型与声发射信号特征之间的对应关系也需进一步明确。最新研究通过引入深度学习算法, 大幅提升了腐蚀类型识别的准确性, 为技术的工程化应用奠定了基础。

4.3 多物理场耦合智能监测系统的集成创新

集成多种传感技术的智能监测系统, 是当前化工管道腐蚀监测的重要发展趋势, 通过多物理场数据融合, 可实现对管道腐蚀状态的更全面评估。这类系统通常以电化学噪声监测、无线腐蚀传感器与数字孪生技术为核心, 构建覆盖管道全生命周期的健康监测网络。某大型炼化一体化项目中部署的智能监测系统便颇具代表性: 72个微型传感器节点分布在关键管段, 实时采集电位、阻抗、温度等多维度数据, 经边缘计算设备初步分析后上传至云平台; 系统创新性地引入联邦学习算法, 在保障各分厂数据隐私安全的前提下, 实现全厂区管道腐蚀状态的协同分析。实践结果显示, 这种集成化方案不仅能精准评估管道当前腐蚀状态, 还可预测未来6个月的腐蚀发展趋势, 为预防性维护提供科学依据。

5 结束语

为确保化工压力管道长周期安全运行, 必须系统解决绝热层下腐蚀这一行业痛点。随着新型传感技术、数字孪生和人工智能的发展, 未来将形成更智能、更精准的腐蚀监测体系, 推动化工企业从被动检修转向预测性维护。

参考文献:

- [1] 黄超. 锅炉过热器管道爆管原因分析[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(12): 108-110.
- [2] 陈乐. 埋地管道动态交流腐蚀行为与干扰机制研究[D]. 北京科技大学, 2024.
- [3] 姜伟光, 何战友, 刘小齐, 等. 小口径管道涡流内腐蚀检测技术的优化与应用[J]. 化工安全与环境, 2024, 37(12): 109-113+117.
- [4] 郑晓伟. 管道保护电位测试及腐蚀点检测[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(11): 204-207.
- [5] 武笑充, 郭洪星, 宋华东, 等. 管道内检测器速度控制系统测试装置研制[J]. 管道技术与设备, 2024, (06): 37-41.
- [6] 苏日提, 刘鑫, 陈洞杉. 燃气管道高效泄漏检测及定位方法探讨与实践[J]. 煤气与热力, 2023, 43(01): 33-36+43.

作者简介:

李映心(1991-), 女, 汉族, 四川江油人, 本科, 工程师, 研究方向: 特种设备检验检测。