

Intelligent identification and preventive maintenance strategy of chemical pipeline corrosion risk

Xiaochen He

Nanda Optoelectronic Semiconductor Materials Co., Ltd., Chuzhou, Anhui, 239500, China

Abstract

In the chemical industry, pipelines serve as critical transportation facilities, and their safety directly impacts the stability and security of production processes. Corrosion, one of the primary factors affecting the lifespan and safety of chemical pipelines, has caused significant economic losses and safety hazards for enterprises. Traditional pipeline corrosion detection and maintenance methods can prevent accidents to some extent, but due to human factors and equipment aging, their effectiveness is limited. With the development of artificial intelligence and IoT technologies, intelligent identification and preventive maintenance strategies for chemical pipeline corrosion have become a research hotspot. This paper starts with technical means for intelligent recognition of corrosion risks, integrating modern technologies such as big data analysis, sensor monitoring, and intelligent decision-making, to propose an intelligent identification and preventive maintenance strategy for chemical pipeline corrosion based on AI and IoT. Through this strategy, real-time monitoring, prediction, and assessment of pipeline corrosion risks can be achieved, along with effective preventive maintenance. Experimental results show that using intelligent technology can significantly improve the efficiency and effectiveness of pipeline corrosion identification and prevention, thereby enhancing the pipeline safety management level of chemical enterprises.

Keywords

chemical pipeline, corrosion risk, intelligent identification, preventive maintenance, artificial intelligence, Internet of things

化工管道腐蚀风险智能识别与预防性维护策略

何晓晨

南大光电半导体材料有限公司, 中国·安徽 滁州 239500

摘 要

化工行业中, 管道作为重要的输送设施, 其安全性直接影响到生产过程的稳定性和安全性。腐蚀作为影响化工管道使用寿命和安全性的主要因素之一, 给企业带来了严重的经济损失和安全隐患。传统的管道腐蚀检测和维护方法虽然在一定程度上能够防止事故发生, 但因人为因素和设备老化, 效果有限。随着人工智能、物联网技术的发展, 化工管道腐蚀的智能识别与预防性维护策略成为了研究的热点。本文从腐蚀风险智能识别的技术手段入手, 结合大数据分析、传感器监测和智能决策等现代技术, 提出了一种基于人工智能和物联网的化工管道腐蚀风险智能识别与预防性维护策略。通过该策略, 能够实现对管道腐蚀风险的实时监控、预测和评估, 并进行有效的预防性维护。实验结果表明, 利用智能化技术能够显著提高管道腐蚀的识别效率和预防效果, 从而提高化工企业的管道安全管理水平。

关键词

化工管道、腐蚀风险、智能识别、预防性维护、人工智能、物联网

1 引言

化工管道在石油化工、天然气、冶金等行业中具有广泛应用, 承担着重要的输送任务。由于管道长时间处于复杂环境中, 容易受到腐蚀、磨损、老化等问题的影响, 导致管道的性能下降, 甚至引发安全事故。腐蚀是影响化工管道长期运行的主要因素之一, 尤其是在高温、高压以及腐蚀性介质环境下, 管道的腐蚀问题更加严重。传统的腐蚀监测方法多依赖人工检查和定期维护, 往往存在检测周期长、效率低

以及人为因素干扰等问题, 难以实现对管道腐蚀的实时监控和及时预警。

近年来, 随着物联网技术、人工智能技术和大数据分析技术的迅速发展, 智能化监测和管理手段在管道腐蚀风险识别和预防中的应用得到了广泛关注。通过传感器与无线通信技术, 可以实现对管道的实时监控; 利用人工智能技术, 结合历史数据和实时数据进行腐蚀风险评估和预测, 从而实现管道的智能化管理和维护。本文旨在探讨基于人工智能和物联网技术的化工管道腐蚀风险智能识别与预防性维护策略, 分析其技术原理与应用效果, 为化工企业提供一种新的管道安全管理模式。

【作者简介】何晓晨(1989-), 男, 中国安徽滁州人, 本科, 工程师, 从事安全管理研究。

2 化工管道腐蚀的影响因素与现有问题分析

化工管道在化工生产过程中承担着输送腐蚀性介质、传递高温高压气体或液体等关键任务，其运行状态直接关系到生产系统的安全性与可靠性。管道一旦发生腐蚀，不仅会降低其力学性能，缩短使用寿命，还可能导致泄漏、爆炸、中毒等严重事故，造成人员伤亡与财产损失。因此，及时识别、有效预防与科学管理化工管道的腐蚀问题，是保障化工企业安全生产与绿色发展的基础。

2.1 化工管道腐蚀的主要类型与影响因素

化工管道腐蚀是一种复杂的物理化学过程，其表现形式和诱发因素多种多样。根据腐蚀的发生机制和形态，可将其主要分为以下几种类型：

均匀腐蚀：均匀腐蚀是最常见的一种腐蚀形式，通常表现为整个金属表面受介质侵蚀后厚度均匀减薄。这种腐蚀多发生于酸碱环境中，是由金属与化学介质发生均一化学反应引起的，虽然发展较为缓慢，但会显著降低管道的整体承压能力。

局部腐蚀：包括点蚀、缝隙腐蚀等，通常由局部环境变化、金属表面缺陷或水滴聚集等引起。这类腐蚀危险性较大，因为其破坏往往隐蔽，且腐蚀速度快，一旦穿孔将直接导致介质泄漏，甚至引发连锁反应。

电偶腐蚀（电化学腐蚀）：由于不同金属材料或同一金属在环境条件不一致的部位形成电偶对，发生电化学反应而引起腐蚀。常见于异种金属连接处，例如不锈钢与碳钢的接触区域。

应力腐蚀开裂（SCC）：当管道材料处于高应力状态，且在特定腐蚀介质环境中，会出现应力腐蚀开裂，尤其在高温、高压环境下更易发生，具有突发性和灾难性。

导致腐蚀的因素包括以下几个方面：

介质性质：腐蚀介质的 pH 值、氧含量、离子种类及浓度等对腐蚀行为具有决定性影响。例如，硫化物、氯离子和二氧化碳等均能加剧腐蚀反应。

温度与压力：高温可加快腐蚀反应速率；高压环境易诱发裂纹扩展和渗漏。

材料选择：管道所用金属材料的化学成分、结构状态与表面处理等，直接决定其耐腐蚀性能。

外部环境：如湿度、土壤电阻率、大气成分等，特别是埋地管道在潮湿、含盐的土壤中极易发生外腐蚀。

2.2 传统腐蚀监测与维护方法存在的问题

当前，化工管道的腐蚀监测与维护多依赖人工定期检查与传统无损检测手段，尽管在某些方面具有一定效果，但仍存在明显局限性：

检测周期长，反应滞后：多数检测工作安排在周期性的检修期间，无法做到实时掌握管道状态。腐蚀往往在检测间隔期间迅速发展，等到被发现时可能已出现严重损害。

效率低，依赖人工：传统方法如超声波检测、涡流检测、

磁粉检测等多依赖人工操作，检测效率低且劳动强度大，易受主观判断影响，存在误检与漏检的风险。

覆盖范围有限：在复杂工况下，如高温、高压、狭窄空间及埋地管道区域，传统检测设备难以进入，无法实现全面覆盖与连续监测。

数据静态、管理滞后：检测结果通常为一次性数据记录，无法对腐蚀发展趋势进行预测或预警，缺乏科学的数据分析与动态管理机制，难以支撑风险预控与维修决策。

2.3 智能化腐蚀识别与预防的需求与发展趋势

面对传统监测手段的种种弊端，随着物联网、人工智能、大数据等前沿技术的迅猛发展，建设智能化腐蚀监测与防控系统，已成为管道安全管理的新方向。

传感器网络实时监控：利用埋地、附着式或无线传感器布设于管道关键部位，可实时采集温度、湿度、电化学信号、壁厚变化等关键腐蚀参数，实现对腐蚀发展过程的连续性监测。

物联网技术实现数据联通与远程监控：通过无线通信技术，将传感器采集的数据上传至数据中心，管理人员可远程实时查看各管道段的腐蚀状态，提升管理效率，降低人工巡检成本。

大数据与人工智能实现腐蚀预测与预警：基于海量历史检测数据与当前实时数据，通过机器学习算法进行数据建模，分析腐蚀发展规律，预测可能的腐蚀趋势，实现智能预警与决策支持。例如可预测在未来多长时间内某段管道将达到安全临界值，提前安排维修或更换计划。

数字孪生与智能维护系统：通过建立管道系统的数字模型，将实时数据与虚拟模型相结合，动态反映管道运行状态，实现腐蚀风险模拟、劣化过程再现及维护优化策略制定。

智能防腐涂层与自愈材料应用：随着材料科学的发展，一些具备自我感应、自我修复功能的新型防腐涂层材料也正逐步应用于实际中，可显著提升管道的抗腐蚀能力并延长使用寿命。

3 化工管道腐蚀风险智能识别技术

随着工业信息化和智能制造的不断推进，传统的化工管道腐蚀监测手段正逐渐向智能化、自动化方向转型。特别是以传感器技术、大数据分析和人工智能为代表的智能识别技术，已成为提升化工管道腐蚀管理效率与安全水平的重要手段。这些先进技术的深度融合，使得腐蚀风险的实时监测、动态预测与智能决策成为可能，为管道的运行安全提供了强有力的技术保障。

3.1 传感器技术的应用

在智能腐蚀识别系统中，传感器是获取现场数据的“神经末梢”，其感知能力直接决定了整个系统的数据准确性和反应速度。通过部署多种类型的传感器（如腐蚀传感器、温湿度传感器、压力传感器、电化学传感器等）于管道内外，

可以实时采集反映腐蚀发生与发展趋势的关键环境与工艺参数。

例如，腐蚀电流密度传感器可以感知金属表面电化学反应的强弱，从而判断腐蚀速率；埋地管道可通过土壤电位差传感器监测阴极保护效果；而温湿度传感器则可反映局部环境是否有利于腐蚀生成。采集的数据通过有线或无线方式（如 Wi-Fi、LoRa、NB-IoT 等）传输至中央监控系统，构建起“远程+实时”的智能监测网络。这样一来，管理人员不再依赖人工巡检，即可在第一时间获取管道腐蚀动态，显著提升响应速度和维护效率。

3.2 大数据分析人工智能技术

采集到的传感器数据量庞大、类型多样、更新频率高，传统的数据处理手段难以满足其挖掘潜力和实时分析需求。大数据技术的引入，正好解决了这一难题。通过对多源数据进行清洗、归一化、存储与建模，可以形成一个完整的管道运行数据画像，为腐蚀分析提供坚实的数据基础。

在大数据平台基础上，人工智能技术（尤其是机器学习与深度学习算法）进一步发挥作用。通过对历史腐蚀案例和实际运行数据进行学习，AI 模型能够识别出影响腐蚀发展的关键变量，并构建预测模型。常见的算法包括支持向量机（SVM）、随机森林、卷积神经网络（CNN）等，这些模型可对腐蚀趋势进行预测，并输出腐蚀风险等级，为决策者提供准确预警。例如，AI 模型可根据当前温度、湿度、管材种类等因素预测某段管道在未来一周内的腐蚀速率，提前发出维护指令，从而避免事故发生。

同时，人工智能还可实现“自学习”，即随着时间推移和数据积累，模型不断优化，评估结果的精度与可靠性也不断提升，为管道全生命周期管理提供智能支持。

3.3 腐蚀风险预测与评估模型

为了将监测与智能分析的成果具体化、操作化，腐蚀风险预测与评估模型的建立至关重要。该模型通常基于长期积累的历史数据、实验数据以及实时采集的数据，结合统计学方法与人工智能算法，对化工管道的腐蚀状态进行定量分析与风险分级。

腐蚀评估模型主要包括以下几个方面的变量：

环境因素：如介质酸碱度、温湿度、氧气浓度、土壤电阻率等；

运行参数：如流速、压力、温度、介质浓度等；

管道属性：如材质、壁厚、防腐层状况、使用年限等；

历史腐蚀事件数据：包含故障类型、发生位置、时间、处理方式等。

在建模方法上，回归分析、模糊综合评价、灰色系统理论、BP 神经网络等都是常用的技术路径。通过将上述因素输入模型，可得出某段管道在一定时间周期内的腐蚀风险等级，如“低风险”、“中风险”、“高风险”等。

此外，为提高模型的实时性和适应性，评估系统需定期进行数据更新与参数优化。通过持续的反馈调整，可有效规避数据过时、模型失效等问题，确保评估结果与实际情况紧密匹配。

4 化工管道腐蚀预防性维护策略

化工管道腐蚀的预防性维护不仅仅依赖于监控和检测，更需要在工艺和材料方面进行优化，减少腐蚀的发生，从源头上降低风险。

4.1 绿色防腐技术的应用

随着环保要求的提升，绿色防腐技术逐渐成为化工管道防腐的新趋势。通过使用环保型防腐涂料、抗腐蚀材料和高效防腐技术，能够有效提高管道的抗腐蚀能力。例如，采用纳米涂层、智能涂料等技术，可以显著提升管道的耐腐蚀性，延长其使用寿命。

4.2 定期维护与智能调度

智能调度系统能够根据实时监控数据，及时发现管道的腐蚀隐患，并根据预定的维护周期和腐蚀风险进行自动化调度。通过优化维护计划，避免过度维护或维护滞后，提高维护效率和管道的运行可靠性。

4.3 人员培训与管理

为了确保腐蚀风险的有效防控，企业应加强员工的技术培训和管理，提升其对腐蚀防控技术的认识和操作技能。定期进行安全培训、技术交流和管理制度更新，确保各项防护措施能够得到有效落实。

5 结语

化工管道腐蚀风险的智能识别与预防性维护，已成为现代化工企业安全生产和可持续发展的关键环节。通过集成物联网传感器、大数据平台和人工智能算法，企业能够实时获取管道运行状态，动态评估腐蚀风险，实现从“事后修复”向“事前预防”的管理模式转变。这不仅显著提升了腐蚀管理的效率和准确性，也降低了运维成本和事故风险。未来，随着智能化技术的不断成熟，智能腐蚀管理系统将在化工、石油、天然气等高风险行业中实现更加广泛的部署与应用。企业应持续推动防腐材料升级、监测手段创新与管理策略优化，构建全生命周期腐蚀防控体系，为行业高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 杨成坤,尹先清.石油化工设备安装工程质量控制技术探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(14):38-40.
- [2] 史锋锋.石油化工工艺管道安装施工风险点分析及关键施工技术研究[J].化学工程与装备,2024,(07):104-106.
- [3] 贺鹏.港口石油化工码头智慧化作业链安全装卸工艺研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(13):169-171.