

化工管道智能防腐实时监测技术应用

王震堂 韩延东 常凤超（聊城鲁西聚酰胺新材料科技有限公司，山东 聊城 252211）

摘要：本文聚焦化工管道智能防腐实时监测技术，深入剖析其在化工领域的应用。详细阐述化工管道腐蚀原理、危害，全面介绍智能防腐实时监测技术原理、系统组成与架构。通过对比分析，明确该技术的优势与面临的挑战，并对其发展趋势与应用前景进行展望，旨在为化工管道防腐技术的发展提供理论支持与实践参考。

关键词：化工管道；智能防腐；实时监测；传感器技术

中图分类号：TE988.2 文献标识码：B 文章编号：1674-5167(2025)022-0136-03

Application of Intelligent Anti corrosion Real time Monitoring Technology for Chemical Pipeline

Wang Zhentang, Han Yandong, Chang Fengchao (Liaocheng Luxi Polyamide New Material Technology Co., Ltd., Liaocheng Shandong 252211, China)

Abstract: This article focuses on the intelligent anti-corrosion real-time monitoring technology for chemical pipelines, and deeply analyzes its application in the field of chemical engineering. Elaborate on the principles and hazards of chemical pipeline corrosion, and comprehensively introduce the principles, system composition, and architecture of intelligent anti-corrosion real-time monitoring technology. Through comparative analysis, the advantages and challenges faced by this technology are clarified, and its development trend and application prospects are forecasted, aiming to provide theoretical support and practical reference for the development of chemical pipeline anti-corrosion technology.

Keywords: chemical pipeline; Intelligent anti-corrosion; Real time monitoring; Sensor Technology

1 化工管道腐蚀原理与危害

1.1 腐蚀原理

①化学腐蚀。化学腐蚀是指管道金属与周围介质直接发生化学反应而引起的腐蚀。在化工生产中，管道常接触强氧化性酸（如硫酸、硝酸）、强碱等化学物质。以金属铁在浓硫酸中的腐蚀为例，其化学反应方程式为： $2\text{Fe}+6\text{H}_2\text{SO}_4(\text{浓})=\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3+3\text{SO}_2\uparrow+6\text{H}_2\text{O}$ 。浓硫酸具有强氧化性，能将铁氧化成高价态的铁离子，自身被还原为二氧化硫。这种腐蚀过程不涉及电流产生，主要取决于金属的化学活性和介质的腐蚀性。在高温、高浓度化学介质环境下，化学腐蚀速度会显著加快。据相关研究，在温度为80℃、质量分数为98%的浓硫酸环境中，碳钢管道的腐蚀速率可达每年5–8mm。

②电化学腐蚀。电化学腐蚀是化工管道腐蚀的主要形式。其原理是金属在电解质溶液中形成原电池，发生氧化还原反应。当管道金属表面存在电位差时，电位较低的部位成为阳极，发生氧化反应，金属失

去电子被腐蚀；电位较高的部位为阴极，发生还原反应。以铁在潮湿空气中的腐蚀为例，其电极反应式如下：阳极反应： $\text{Fe}-2\text{e}^-=\text{Fe}^{2+}$ ；阴极反应：在酸性较强条件下， $2\text{H}^++2\text{e}^-=\text{H}_2\uparrow$ ；在弱酸性或中性条件下， $\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^-=4\text{OH}^-$ 最终生成铁锈。在化工生产中，管道内输送的各种电解质溶液（如盐水、酸碱废水等）为电化学腐蚀提供了良好的环境。研究表明，在含有质量分数为3%氯化钠的水溶液中，碳钢管道的电化学腐蚀速率比在纯水中快3–5倍。为更直观地对比化学腐蚀与电化学腐蚀，现制作如下表格：见表1。

1.2 腐蚀危害

①经济损失。化工管道腐蚀导致的经济损失巨大。一方面，腐蚀使管道壁厚减薄，降低管道承压能力，缩短使用寿命，需要频繁更换管道及相关设备。据统计，全球每年因管道腐蚀造成的直接经济损失高达数千亿美元。在我国，化工行业每年因管道腐蚀更换设备的费用约占设备维修总费用的30%–40%。例如，某大型石油化工企业，一条长10km、管径为500mm

表1 化学腐蚀与电化学腐蚀

腐蚀类型	原理	反应特点	影响因素	实例
化学腐蚀	金属与周围介质直接发生化学反应	无电流产生	金属化学活性、介质腐蚀性、温度、浓度等	铁在浓硫酸中腐蚀： $2\text{Fe}+6\text{H}_2\text{SO}_4(\text{浓})=\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3+3\text{SO}_2\uparrow+6\text{H}_2\text{O}$
电化学腐蚀	金属在电解质溶液中形成原电池，发生氧化还原反应	有电流产生	电位差、电解质溶液性质等	铁在潮湿空气中腐蚀，阳极： $\text{Fe}-2\text{e}^-=\text{Fe}^{2+}$ ，阴极（酸性强）： $2\text{H}^++2\text{e}^-=\text{H}_2\uparrow$ ，阴极（弱酸性或中性）： $\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^-=4\text{OH}^-$

的原油输送管道，由于腐蚀严重，每5年就需要更换一次，每次更换费用（包括管材、施工等）高达5000万元。另一方面，管道腐蚀引发的泄漏会造成介质浪费，增加生产成本。据估算，因管道泄漏导致的化工原料损失，每年可达原料总采购成本的5%~10%。

②安全隐患。管道腐蚀引发的泄漏、破裂等故障严重威胁生产安全。一旦发生泄漏，化工介质可能会引发火灾、爆炸、中毒等事故。例如，2010年某化工企业因管道腐蚀破裂，导致大量可燃气体泄漏，引发爆炸事故，造成10人死亡，30人受伤，直接经济损失达数千万元。据不完全统计，近5年来，我国化工行业因管道腐蚀引发的安全事故每年平均发生100~150起，给人员生命财产安全带来极大危害。同时，泄漏的化工介质还会对周边环境造成污染，破坏生态平衡，治理成本高昂^[1]。

2 智能防腐实时监测技术原理

2.1 传感器技术

①电化学传感器。电化学传感器是基于电化学原理检测管道腐蚀状况的一类传感器。常见的有线性极化电阻传感器（LPR）、电化学阻抗谱传感器（EIS）等。以LPR传感器为例，其原理是通过向管道金属施加一个微弱的交变电流信号（一般为几微安到几十微安），测量相应的电位变化，根据欧姆定律计算出线性极化电阻Rp。

$$\text{公式: } \text{icorr} = \frac{B}{R_p}$$

其中，icorr为腐蚀电流密度，B为常数（对于大多数金属在中性溶液中，B约为26mV）。通过测量Rp，可以实时计算出腐蚀电流密度，进而评估管道的腐蚀速率。LPR传感器响应速度快，能够实时监测腐蚀变化，适用于在线监测。但它易受介质导电性、温度等因素影响，测量精度在一定程度上受限。

②物理传感器。物理传感器主要通过测量与管道腐蚀相关的物理量来监测腐蚀状况。例如，超声波传感器利用超声波在不同介质中的传播特性，当管道发生腐蚀导致壁厚减薄时，超声波在管道内传播的时间和反射信号会发生变化。通过测量超声波的传播时间t，根据公式：d=v×t/2，其中，d为管道壁厚，v为超声波在管道材料中的传播速度（如在碳钢中，v≈3200m/s），可以计算出管道壁厚。这种传感器不受介质化学性质影响，能够直观测量管道壁厚变化，但对腐蚀缺陷的形状、位置判断不够精确，且在管道内部存在结垢、杂物时，测量准确性会下降^[2]。

2.2 数据传输与处理技术

①数据传输。智能防腐实时监测系统中，传感器采集到的数据需要及时传输到监控中心进行处理和分

析。常用的数据传输方式有有线传输和无线传输。有线传输如光纤、电缆等，具有传输稳定、抗干扰能力强的优点，但布线成本高、施工难度大，适用于对数据传输可靠性要求极高的场合。无线传输技术，如Wi-Fi、蓝牙、ZigBee等，具有安装便捷、灵活性高的特点。以ZigBee技术为例，它是一种低功耗、低速率、短距离的无线通信技术，适用于传感器节点众多、数据量较小的监测系统。其传输距离一般在10~100m之间，能够满足化工管道局部区域的监测需求。在实际应用中，可根据管道布局、环境条件等因素选择合适的数据传输方式，或采用多种传输方式相结合的混合传输模式。

②数据处理。数据处理是智能防腐实时监测技术的关键环节。采集到的传感器数据通常包含大量噪声和冗余信息，需要进行滤波、去噪处理。常用的数字滤波算法有均值滤波、中值滤波等。均值滤波是对一组数据进行算术平均，其公式为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

其中， \bar{x} 代表这组数据的平均值，n是数据的数量， x_i 是第i个数据点。通过均值滤波，可以有效去除随机噪声，提高数据的稳定性。经过滤波处理后的数据，再采用数据分析算法，如统计分析、机器学习算法等，对管道腐蚀状况进行评估和预测。例如，利用支持向量机（SVM）算法对大量历史腐蚀数据进行训练，建立腐蚀预测模型，根据实时监测数据预测管道未来的腐蚀趋势，为制定防腐措施提供科学依据^[3]。

3 智能防腐实时监测技术应用

系统组成与架构。智能防腐实时监测系统主要由传感器层、数据传输层、数据处理层和用户管理层组成。传感器层分布在化工管道的关键部位，负责采集管道的腐蚀相关数据，如腐蚀电流密度、壁厚变化等。数据传输层将传感器采集到的数据传输到数据处理层，可采用有线或无线传输方式。数据处理层对接收的数据进行处理、分析，运用各种算法评估管道腐蚀状况，预测腐蚀趋势。用户管理层为操作人员提供人机交互界面，方便用户查看监测数据、接收报警信息、下达控制指令等。

以某大型化工园区的管道监测项目为例，在园区内不同工艺管道上安装了500多个电化学传感器和300多个超声波传感器。传感器采集的数据通过ZigBee无线传输网络汇聚到数据采集网关，再经光纤传输到监控中心的数据处理服务器。数据处理服务器采用分布式计算架构，利用Python语言编写的数据处理程序对数据进行实时处理。系统还开发了基于Web

的用户管理平台，操作人员可通过电脑或手机随时随地访问平台，查看管道实时腐蚀数据、历史曲线、报警信息等。该系统运行后，成功监测到多次管道腐蚀异常情况，提前采取防腐措施，避免了管道泄漏事故的发生，有效保障了化工生产的安全运行。

4 技术优势与挑战

4.1 技术优势

①实时性与准确性。智能防腐实时监测技术能够实时采集管道腐蚀数据，并通过先进的算法进行处理分析，准确评估腐蚀状况。相比传统检测方法，检测周期从数月甚至数年缩短到实时监测，大大提高了检测效率和准确性。例如，在某化工企业的管道监测中，传统人工检测每季度进行一次，难以发现检测周期内的突发腐蚀问题。而智能防腐实时监测系统能够实时监测管道腐蚀电流密度变化，当腐蚀速率超过设定阈值时，立即发出报警信号，报警准确率高达95%以上，为及时采取防腐措施争取了宝贵时间。

②预防性维护。通过对管道腐蚀数据的实时监测和趋势预测，智能防腐实时监测技术能够实现预防性维护。根据预测结果，提前安排管道维修、更换等维护工作，避免因管道腐蚀导致的突发故障。研究表明，采用智能防腐实时监测技术进行预防性维护，可使管道维修成本降低30%-50%，设备停机时间减少40%-60%。以某炼油厂为例，应用该技术后，根据腐蚀预测结果，提前对部分腐蚀严重的管道进行更换，避免了因管道泄漏导致的装置停产事故，每年节省因停产造成的经济损失达800万元。

4.2 面临挑战

①技术难题。虽然智能防腐实时监测技术取得了一定进展，但仍面临一些技术难题。一方面，在复杂的化工生产环境中，传感器易受到电磁干扰、化学物质侵蚀等影响，导致测量数据不准确甚至传感器损坏。例如，在强电磁干扰环境下，电化学传感器的测量信号可能出现漂移，影响腐蚀速率的准确计算。另一方面，不同类型传感器采集的数据存在多源异构问题，数据融合难度较大。如何将电化学传感器、物理传感器等采集的数据进行有效融合，提高腐蚀监测的准确性和可靠性，是当前研究的热点和难点问题^[4]。

②成本问题。智能防腐实时监测系统的建设和运行成本较高。传感器的购置、安装和维护费用，以及数据传输设备、数据处理服务器等硬件设施的投入，都增加了企业的成本负担。以一套覆盖面积为1平方公里的化工管道监测系统为例，初期建设成本约为300万元，每年的运行维护成本约为50万元。对于一些中小企业来说，难以承受如此高昂的成本，限制了

该技术的广泛应用。此外，系统中的部分关键技术，如高精度传感器、先进的数据处理算法等，依赖进口，进一步提高了成本^[5]。

5 发展趋势与展望

5.1 多技术融合

未来智能防腐实时监测技术将朝着多技术融合的方向发展。将传感器技术与人工智能、大数据、物联网等技术深度融合，实现更精准、高效的腐蚀监测。例如，利用人工智能算法对海量腐蚀数据进行深度学习，提高腐蚀预测的准确性；通过物联网技术实现传感器之间的互联互通，构建更庞大、更智能的监测网络，实现对化工管道全方位、全生命周期的监测。

5.2 新材料应用

新型材料的研发和应用将为智能防腐实时监测技术带来新的突破。开发具有更高灵敏度、稳定性和抗干扰能力的传感器材料，如纳米材料、智能材料等，可提高传感器的性能。例如，纳米材料具有独特的物理化学性质，将其应用于电化学传感器，可显著提高传感器的检测灵敏度和选择性，降低检测限。同时，研究新型的防腐材料，与智能监测技术相结合，实现防腐与监测的一体化，提高管道的防腐效果和监测效率。

6 结论

化工管道智能防腐实时监测技术对化工生产安全意义重大。它基于对管道腐蚀原理和危害的分析，借助传感器、数据传输与处理技术，能实时精准监测腐蚀状况，具备实时性强、准确性高和可预防性维护的优势。但当前存在技术难题和成本高的问题。随着多技术融合和新材料应用，该技术未来突破空间大、前景广阔。化工企业应紧跟其发展，合理应用，以此提升管道运行安全可靠性，降低成本，推动化工行业健康发展。

参考文献：

- [1] 王清春,王洁光.石油化工管道防腐关键技术研究[J].化工管理,2025(02):129-132.
- [2] 刘虎冰,田军军,魏志龙,等.化工设备管道外防腐用涂料水性化发展现状与应用分析[J].中国涂料,2024,39(02):14-19.
- [3] 蒋林林,那骥宇,周冰,等.长输油气管道运维中存在的问题分析及建议[J].石油工程建设,2022,48(04):67-71.
- [4] 王迪,尹小冬.石油化工工程工艺管道安装施工问题分析[J].石油化工建设,2020,42(04):52-53.
- [5] 王垚,熊道英,王丽叶,等.埋地钢质管道阴极保护智能监测数据分析[J].化学工程与装备,2025(01):117-120.