

长输天然气管道内腐蚀检测技术研究

袁睿

国家管网广东省运维中心韶关作业区

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7309

[摘要] 长输天然气管道是现代能源运输的重要基础设施，其安全性和可靠性对能源供应和经济发展至关重要。然而，管道内部腐蚀问题严重威胁其安全运行，导致管道泄漏、环境污染和安全事故。本文系统研究了长输天然气管道内腐蚀检测技术的现状，包括磁通泄漏检测(MFL)、超声波检测(UT)、电磁超声检测(EMAT)等技术，分析了这些技术在检测精度、复杂环境适应性、数据处理与分析、成本和效率等方面的主要挑战。针对这些问题，提出了多技术集成应用、智能化数据处理与分析、新材料和新工艺应用、自动化检测设备、监测与维护并重等优化对策。本研究希望通过通过这些优化措施，全面提高检测技术的精度和灵敏度，增强其在复杂环境中的适应性，提高数据处理效率，降低检测成本，最终保障长输天然气管道的安全运行。

[关键词] 长输天然气管道；腐蚀检测；检测精度

Research on corrosion detection technology in long-distance natural gas pipeline

Yuan Rui

National Pipeline Network Guangdong Provincial Operation and Maintenance Center Shaoguan Operation Area

[Abstract] Long-term natural gas pipeline is an important infrastructure of modern energy transportation, and its safety and reliability are crucial to energy supply and economic development. However, the internal corrosion problem of the pipeline seriously threatens its safe operation, leading to pipeline leakage, environmental pollution and safety accidents. This paper systematically studies the current situation of corrosion detection technology in long natural gas pipeline, including magnetic flux leakage detection (MFL), ultrasonic detection (UT) and electromagnetic ultrasonic detection (EMAT), and analyzes the main challenges in terms of detection accuracy, adaptability to complex environment, data processing and analysis, cost and efficiency. In view of these problems, the optimization countermeasures of multi-technology integrated application, intelligent data processing and analysis, application of new materials and new processes, automatic testing equipment, monitoring and maintenance are put forward. This study hopes that through these optimization measures, the accuracy and sensitivity of detection technology can be comprehensively improved, its adaptability in complex environment can be enhanced, data processing efficiency, detection cost can be reduced, and the safe operation of long-distance natural gas pipeline can be guaranteed.

[Key words] long distance natural gas pipeline; corrosion detection; detection accuracy

引言

长输天然气管道是现代能源运输的重要基础设施，其安全性和可靠性对于能源供应和经济发展至关重要^[1]。然而，由于长期暴露在各种复杂环境中，管道内部腐蚀问题成为威胁其安全运行的主要隐患之一。管道内腐蚀不仅会导致管道泄漏，影响正常供气，还可能引发严重的环境污染和安全事故。因此，研究长输天然气管道内腐蚀检测技术显得尤为重要。

1 长输天然气管道内腐蚀检测技术研究现状

(1) 磁通泄漏检测(MFL)技术：磁通泄漏检测技术是目前应用最广泛的管道内腐蚀检测方法之一。其原理是利用磁场在管道中产生的磁通变化来检测管道壁厚的变化和缺陷。MFL技术具有检测速度快、灵敏度高优点，但对复杂腐蚀形态和小缺陷的检测效果有限^[2]。

(2) 超声波检测(UT)技术：超声波检测技术通过超声波在管道中的传播和反射来检测管道的腐蚀情况。该技术能够提供高分辨率的检测结果，对局部腐蚀和点蚀具有较好的检测能力。然而，超声波检测技术对操作人员的专业水平要求较高，且在复杂管道结构中应用受到一定限制。

(3) 电磁超声检测(EMAT)技术：电磁超声检测技术是一种新型的无损检测方法，其通过电磁感应产生超声波，用于检测管道内的腐蚀情况。EMAT技术无需耦合剂，适用于高温、高压等恶劣环境，具有较高的检测精度和可靠性。然而，EMAT技术的设备成本较高，且在检测速度方面存在一定的局限性^[3]。

(4) 漏磁检测(TML)技术：漏磁检测技术利用管道中的漏磁场来检测腐蚀缺陷。该技术能够在不停车的情况下进行检测，适用于长输管道的在线监测。然而，TML技术对检测设备

和操作环境要求较高，且对复杂腐蚀形态的检测效果有待提升。

2 长输天然气管道内腐蚀检测技术当前主要挑战

(1) 检测精度和灵敏度

当前长输天然气管道内腐蚀检测技术在精度和灵敏度方面仍然面临重大挑战。比如，磁通泄漏检测 (MFL) 技术虽然在大范围内检测缺陷方面表现优异，但其在检测直径小于 3 毫米的微小缺陷时，信噪比 (SNR) 显著降低。这主要是因为微小缺陷产生的磁通变化通常极其微弱，容易被背景噪声所掩盖，从而导致误检率和漏检率增加。此外，MFL 对复杂腐蚀形态，如非均匀腐蚀、裂纹等的检测能力也有限，这些复杂形态的磁通变化不明显，从而增加了检测难度。再比如，超声波检测 (UT) 在检测点蚀和局部腐蚀方面具有较高分辨率，但其在多层腐蚀和复杂几何形态下，反射信号会显著衰减，这就容易导致缺陷识别率下降约 30%。因为超声波在不同介质中的传播速度和反射特性不同，复杂形态会导致反射信号的叠加和干扰，难以准确解析腐蚀情况。而电磁超声检测 (EMAT) 虽然无需耦合剂，相对更加适用于高温和高压环境，但其生成和接收超声波的效率较低，在高噪声背景下的检测灵敏度会直线下降。此外，EMAT 设备的电子元件在恶劣环境中容易受损，进一步影响检测效果。这些技术在检测过程中如果无法准确识别早期腐蚀缺陷，也将大大增加管道泄漏和事故的风险，威胁能源供应和环境安全。

(2) 复杂环境适应性

长输天然气管道常常处于高温 (超过 150°C)、高压 (高达 10MPa)、潮湿及含有腐蚀性介质的复杂环境中，这对检测设备的性能和稳定性就提出了更为严峻的技术挑战。高温环境对检测设备的材料和电子元件要求极高，例如，传统超声波检测在高温环境下，耦合剂会迅速蒸发，导致超声波传输效率降低超过 40%。这种情况下，超声波的衰减和散射效应加剧，信号接收难度就会大幅增加，从而影响检测结果的准确性。高压环境对设备的抗压性能和密封性也提出了严峻的考验，现有检测设备在高压条件下容易发生泄漏或损坏。例如，EMAT 设备在高压环境中，其电子元件的封装和保护措施若不完善，就极易受到高压影响，导致设备失灵或精度降低。此外，潮湿环境中的水分和腐蚀产物也会干扰电磁和超声波信号的传播。例如，在潮湿环境下，管道表面的水膜和腐蚀产物就会吸收和散射超声波信号，造成检测精度大幅降低的严重后果。电磁信号也会受到水分的影响，导致磁通泄漏检测的准确性下降。这些恶劣环境中的干扰因素就会使得现有检测技术在实际应用中效果大打折扣，亟需提升技术的适应性和稳定性。

(3) 数据处理与分析困难

腐蚀检测过程中产生的大量数据一般都需要进行高效处理与分析，才能更加准确的识别腐蚀位置和程度。然而，传统的数据处理技术在应对每次检测生成的数十 TB 数据时，处理效率和准确度就容易受到各种不同的限制。以磁通泄漏检测 (MFL) 为例，大量的噪声数据和复杂信号交织在一起，传统的信号处理算法难以在短时间内完成高效处理，导致数据处理时间延长至数小时甚至数天。这种低效的数据处理方法就会严

重影响检测工作的实时性和有效性。此外，复杂腐蚀形态和微小缺陷的识别精度不足也是一大难题。现有的数据分析方法在复杂形态识别时，误报率和漏报率高达往往 15% 以上。而且，微小缺陷和复杂腐蚀形态的信号特征较为相似，传统的信号处理方法根本难以区分，这就容易导致检测结果变得不可靠不可信。例如，在面对多层腐蚀和裂纹时，MFL 和 UT 的信号特征相互叠加，就会很难准确分离和识别。因此，数据处理与分析的困难性不仅会影响检测结果的准确性，也会大幅增加后续维护工作的复杂性和成本。这一问题亟需通过引入人工智能和机器学习技术，提高数据处理和分析的效率和精度，从而确保检测结果的可靠性和及时性。

(4) 成本和效率问题

从结果上看，高效且经济的检测技术是长输天然气管道内腐蚀检测的关键之一。现有的检测设备，如电磁超声检测 (EMAT)，单台设备的采购成本就高达数十万美元，且操作复杂度高，对专业技术人员的依赖程度大，也大幅增加了人力成本和操作风险。例如，EMAT 设备的操作需要专业培训和高度熟练的技术人员，这不仅增加了操作成本，还限制了检测设备的普及应用。此外，传统检测方法的速度较慢，每公里管道检测需要数小时甚至更长时间，根本就无法满足长输管道的快速检测需求。例如，磁通泄漏检测 (MFL) 在检测过程中需要逐段扫描，每段的检测时间都非常漫长，甚至影响了整体检测效率。这种高成本、低效率的研究现状不仅限制了检测技术的大规模推广应用，而且也在一定程度上影响了整体检测和维护工作的及时性和经济性。为了实现大范围、频繁检测，亟需一种开发成本低、操作简单、检测效率高的检测技术，满足长输天然气管道的检测需求，确保管道的安全运行和经济效益。

3 优化对策

(1) 多技术集成应用

为了解决检测精度和灵敏度问题，本研究建议可以进行多技术集成应用。比如可以结合磁通泄漏检测 (MFL)、超声波检测 (UT)、电磁超声检测 (EMAT) 等多种检测技术，通过综合分析提升检测精度和灵敏度。例如，采用 MFL 和 UT 联合检测，可以同时获取管道的壁厚变化和内部缺陷信息，实现对复杂腐蚀形态和微小缺陷的全面识别。MFL 技术可以快速扫描大面积区域，初步识别潜在缺陷，而 UT 技术则提供高分辨率的局部检测，精确定位和量化缺陷。通过多技术数据融合，能够显著提高检测信号的信噪比，降低误检率和漏检率，从而提高整体检测效果和可靠性。

(2) 智能化数据处理与分析

为了解决数据处理与分析困难问题，本研究建议可以引入人工智能和机器学习技术，开发智能化数据处理与分析系统。利用深度学习算法对检测数据进行高效处理和精确分析，可以显著提高腐蚀缺陷的识别率和定位精度。例如，通过构建卷积神经网络 (CNN)，对大规模 MFL 和 UT 检测数据进行自动特征提取和模式识别，能够有效区分噪声和真实缺陷信号。机器学习算法还能根据历史数据进行预测分析，提供腐蚀趋势和风险评估，为管道维护提供科学依据。这种智能化数据处理与分析

下转第 164 页

CFD (计算流体动力学) 仿真技术, 模拟泥浆在不同井深、压力和温度条件下的流动情况。这种技术可以帮助工程师优化泥浆的流速和流动路径, 从而提高泥浆的携带能力, 确保井筒中的切屑和杂质能够被高效清除。通过优化泥浆动力学模型, 泥浆循环系统的清洁效率可以提高 20% 左右, 有效减少井筒堵塞的风险。在泥浆配方的优化方面, 可以引入纳米颗粒来提升泥浆的粘度和悬浮能力。研究发现, 直径为 20-50 纳米的二氧化硅颗粒能够显著增强泥浆的抗剪切能力, 使得泥浆在高速流动中依然能够保持对杂质的悬浮效果。同时, 高分子聚合物的使用可以进一步提高泥浆的密度和稳定性, 减少泥浆分层现象, 保证井筒的清洁度。此外, 泥浆配方中还可以加入微量的表面活性剂, 降低泥浆的表面张力, 改善泥浆在井筒内的润滑效果, 减少设备磨损。在系统控制方面, 则可以引入智能控制系统, 为泥浆循环过程实现实时优化支持。比如, 可以在井口和泥浆泵之间布设多点传感器, 实时监测泥浆的流速、压力和温度等数据, 系统可以基于传感器数据, 利用算法对泥浆泵的工作参数进行动态调整。例如, 在井筒内压力突变时, 系统可以迅速调节泥浆泵的排量和压力, 避免因泥浆流速不足导致的井筒堵塞。这种智能化控制技术在实际应用中, 可以显著提高泥浆循环系统的响应速度和效率, 减少设备故障和非计划停机时间。

上接第 161 页

系统不仅可以大幅提高检测效率, 还可以大大提升检测结果的准确性和可靠性。

(3) 新材料和新工艺应用

为了解决复杂环境适应性问题, 本研究认为可以研发适用于高温、高压等复杂环境的新型检测材料和工艺。比如可以开发高温超声波传感器和高压电磁感应设备, 提升检测设备的耐久性和适应性。例如, 高温超声波传感器可以在超过 150°C 的环境中稳定工作, 而高压电磁感应设备则能够承受高达 10MPa 的压力而不影响检测性能。新材料的应用如耐高温、耐腐蚀的复合材料, 也能提高检测设备的稳定性和寿命。这些技术改进将显著提升检测设备在恶劣环境中的可靠性和稳定性, 确保在各种复杂工况下的检测效果。

(4) 自动化检测设备

为了解决成本和效率问题, 本研究认为可以开发自动化检测设备, 减少对操作人员的依赖, 利用机械化自动化来全面提高检测效率和安全性。通过应用无人机和机器人进行管道内部的自动巡检, 实现全覆盖、高效率的腐蚀检测。例如, 无人机可以快速完成长距离管道的表面巡检, 识别外部腐蚀和泄漏风险, 而机器人则能够进入管道内部, 进行高精度的腐蚀检测和缺陷修复。这些自动化设备能够在复杂环境中灵活作业, 显著降低人力成本和操作风险, 同时提高检测速度和覆盖范围, 满足长输管道的高效检测需求。

4 结论

综上所述, 连续油管作为一种高效的油气井封堵作业工具, 在实际应用中展现了显著的技术优势。然而, 由于作业环境的复杂性, 连续油管在应用过程中仍然面临诸多挑战。通过对材料、工艺、设备以及操作技术的不断创新与优化, 连续油管的应用潜力可以进一步挖掘和提升。在未来的研究与实践中, 随着新材料、新技术不断涌现, 连续油管在油气井封堵作业中的应用将更加广泛和深入, 因此, 针对连续油管技术的进一步深入研究, 对于油气田的高效开发与可持续发展具有重要的技术意义。

[参考文献]

- [1]周隆超, 马春晖, 刘意如. 陇东页岩油水平井提产提效制约因素及技术对策[J]. 化学工程与装备, 2023, (06): 141-143.
- [2]王学成, 乔东宇, 王磊, 迟启福, 徐小喧, 郭旭. 连续油管控压封堵作业在康探 1 井中的应用[J]. 石油和化工设备, 2023, 26 (03): 92-95.
- [3]张怀钰. 水平井压裂技术与工艺现状及发展[J]. 化学工程与装备, 2022, (02): 94-91.

(5) 监测与维护并重

为了解决腐蚀管理和维护问题, 本研究提出建立管道内腐蚀的长期监测系统, 通过实时监测和定期维护相结合的方式, 及时发现和处理腐蚀问题。并可以引入物联网 (IoT) 技术, 在管道关键位置安装传感器, 实时监测管道的腐蚀状态和运行参数, 并通过无线网络传输至监控中心进行分析和预警。定期维护结合实时监测数据, 能够准确制定维护计划, 及时处理腐蚀缺陷, 避免因腐蚀导致的突发事故。这种监测与维护并重的策略, 不仅可以有效延长管道的使用寿命, 还可以全面提高供气安全性和可靠性。

4 结论

长输天然气管道内腐蚀检测技术的研究对于保障能源供应安全、减少环境污染具有重要意义。尽管目前的检测技术在精度、灵敏度、环境适应性等方面存在一定挑战, 但通过多技术集成应用、智能化数据处理与分析、新材料和新工艺应用等优化对策, 可以有效提升检测效果, 保障管道安全运行。

[参考文献]

- [1]张伟. 长输天然气管道完整性管理与管道腐蚀检测技术[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35 (02): 78-80.
- [2]杨骥源, 曹媛. 长输天然气管道内腐蚀检测及防护[J]. 清洗世界, 2018, 34 (12): 34-35.
- [3]梁军营, 张涛, 伍广. 长输干燥天然气管道内腐蚀的直接评价技术[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2013, 30 (06): 41-44.