

应用光纤光栅传感技术的管道腐蚀监测研究

刘鹏飞 郭红超 张博 (国家管网集团北方管道有限责任公司郑州输油气分公司, 河南 郑州 450002)

摘要: 在我国石油和天然气资源需求总量不断增多的情况下, 管道工程建设的规模也不断的扩大, 管道作为重要的资源传输方式, 工程建设质量以及运输安全成为关注的重要问题。管道安全事故的发生与管道腐蚀具有直接关系, 传统的管道腐蚀检测技术方法存在一定的缺陷, 无法实现管道腐蚀状态的精准监测。因此, 应光纤光栅传感技术进行管道腐蚀状态的监测研究对于保障管道运输安全具有重要意义。

关键词: 光纤光栅传感器技术; 管道腐蚀; 监测; 应用

中图分类号: TE988.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 028-0136-03

Research on Pipeline Corrosion Monitoring Using Fiber Bragg Grating Sensing Technology

Liu Pengfei, Guo Hongchao, Zhang Bo (Zhengzhou Oil & Gas Transmission Sub-company, PipeChina North Pipeline Company, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: With the increasing demand for oil and natural gas resources in China, the scale of pipeline construction continues to expand. As a critical means of resource transportation, the quality of pipeline engineering and transportation safety have become major concerns. Pipeline safety incidents are directly related to corrosion, while traditional corrosion detection technologies have certain limitations and cannot achieve precise monitoring of corrosion conditions. Therefore, the application of fiber Bragg grating (FBG) sensing technology for pipeline corrosion monitoring is of great significance in ensuring the safety of pipeline transportation.

Keywords: fiber Bragg grating (FBG) sensing technology; pipeline corrosion; monitoring; application

管道运输是石油天然气资源的主要方式, 在我国管道工程建设规模不断扩大的情况下, 为了延长管道的使用寿命, 降低管道腐蚀程度的持续加深, 就需要采用专业的管道监测技术, 对管道整体的状态信息进行采集和分析。传统的管道监测技术在数据采集和结果评估方面缺乏精准性, 因此, 积极研发基于光纤光栅传感器技术的管道腐蚀监测系统对于保障管道运输安全非常重要。

1 当前管道腐蚀检测监测技术方法及应用问题

当前管道腐蚀检测监测技术主要分为非光纤类与光纤类两大体系。

非光纤类检测监测技术包括多种技术方法。泄漏介质检测法, 主要是通过添加相应的介质或借助额外的设备等辅助方式, 利用人工进行管道检测的技术方法, 在管道腐蚀性检测过程中, 需要严格按照泄漏介质性质变化的特点, 精准的识别管道存在的缺陷以及具体位置信息。该方法原理直观, 但检测效率较低, 需投入较多的人力物力资源。管壁参数检测技术方法, 主要是运用超声波和电磁超声等技术, 通过照相录像设备拍摄管道内壁的状态情况, 是一种无损检测管壁缺陷的技术方法^[1]。但是, 此检测技术, 对其检测结果的可靠性影响因素较多, 导致管道腐蚀性检测的结

果存在较大的误差。

在这种情况下, 还可以采用声学传感监测技术法, 此方法的应用原理是通过管道腐蚀裂纹缺陷发生后, 其在管壁或流体介质添加后, 在管道内部会出现特殊的声波, 检测技术人员可以根据声波传递的特点以及时间差等信息, 掌握管道裂纹缺陷的位置, 显著提升了裂纹判断的可靠性。声学传感检测在实践应用中, 需要专业的设备作为辅助, 整体来看, 操作难度不大, 且能够对管道运行状态开展实时性监测, 但应考虑到声波衰减幅度和产生的噪声信号会干扰检测, 存在漏检风险。而采用光纤传感检测技术, 在检测实践中体现了安全性的优势, 并且能够在远距离传输的状态下获得可靠的检测结果, 在管道腐蚀监测中获得了良好的应用, 对此技术的研究也不断的深入。

从整体上来看, 当前采用的管道腐蚀监测技术有各自的技术优势, 但是也存在监测灵敏度不高的情况, 且应考虑到不同技术应用期间对检测结果产生的干扰因素, 因此, 为了提高管道腐蚀缺陷问题判断和定位的精准性, 还需要根据管道腐蚀检测的精准性要求, 对检测技术进行持续的创新, 更加详细且真实的体现出管道的腐蚀情况, 达到降低管道泄漏和爆炸等安全事故发生的几率。

2 光纤光栅复合材料应变传感器技术要点

2.1 光纤光栅复合材料应变传感器的封装材料选取

在管道腐蚀检测实践中,光线光栅传感技术体现出了有效的应用优势,专业技术人员结合管道腐蚀检测的要求以及技术难点,构建了光栅应变模型,通过模型分析,可以将裸光栅作为基础传感元件,实现对管道内部温度的测量,同时还能够详细的获得管道的应变等参数情况,但在应用过程中也发现了其存在的弊端与不足,具体体现在其质地纤细脆弱,不具备较强的抗剪切力,针对复杂环境下的工程建设实用性不强,无法达到预期的应用效果。因此,为达到管道工程建设的各项要求,对裸光栅进行合理有效的封装十分必要。裸光栅的封装设计与增敏开发,是推动光栅技术广泛应用的关键环节。

在封装过程中,高性能基体材料不会改变光栅的传感本质,封装传感器的性能源于基体材料的易变形性与温度敏感性,而传感特性则需要从光栅结构的整体性能方面考虑。采用复合材料封装光纤光栅已经开展了大量研究并取得一定的研究成果。主要是由于光纤与复合材料具备良好的相容性,便于将光纤光栅埋入复合材料形成智能结构^[2]。

复合材料由基体材料和增强材料两部分构成,其中增强材料的性能直接决定其关键性能。根据增强材料的几何形态,复合材料可分为不同的类型。为了提升管道腐蚀性检测结果的准确性,在研究过程中采用了具备良好应用效果的纤维增强复合材料,与其他类型的材料相比其在形态和强度方面更具优势。光纤光栅复合材料传感器的结构具有一定的复杂性,包括多个结构,其中聚合物复合材料承担物理量传递与光栅保护的双重功能。

在复合材料实际应用中,针对管道腐蚀监测技术性要求,研发的应变传感器改变了传统材料的局限,创新的采用玻璃纤维增强型复合材料。考虑到管道腐蚀性检测过程中,需要采用特定、形状的传感器设备,并对监测的容量进行精准的设定,同时还应满足传感器与管道协同运行过程中所具备的物理特定,这样才能通过严格的操作,在不影响管道结构性能的情况下,获得预期的检测数据。

2.2 光纤光栅复合材料应变传感器的设计原则

裸光纤光栅技术在应用实践中,相比其他的技术体现出了独有的优势,但是对管道工程所处的环境条件要求较为严格,无法在复杂的管道环境中进行操作。鉴于此,基于工程实际需求,需要针对管道工程所处复杂环境变化的要求,研发专用光纤光栅复合材料应变传感器,这样才能提高管道腐蚀性检测工作效率,

并降低对管道产生的损坏。光纤光栅传感器的设计应达到以下要求:

2.2.1 兼容性

传感器封装材料要想实现良好的传递效果,就需要根据检测对象的形变进行设计,同时考虑封装材料与光纤材料间是否能够达到兼容性的应用效果,这样才能显著降低传感对所监测对象应变所产生的干扰,在设计过程中兼容性的需从强度匹配、界面适配、尺寸契合等多个维度进行综合考量。

2.2.2 工艺可行性

技术团队研发的创新传感器能够在管道工程监测施工中达到良好的应用效果,且能够实现规模化批量生产。这意味着传感器需具备结构简洁、加工便捷的特点,且在生产过程中,各项指标能够易于把控,以确保生产的高重复性^[3]。

2.2.3 使用便捷性

对于不同的管道监测目标,传感器应具备安装简便、测试快捷的特性,从而为后续构建监测网络、开展管道工程施工现场监测创造良好的条件。此外,封装材料需对裸光栅形成良好保护,并具备可靠的稳定性。

2.3 光纤光栅复合材料应变传感器的设计

为实现对管道内外部出现腐蚀和裂纹缺陷进行检测,光纤光栅复合材料应变传感器设备被研发并应用。在其设计研制过程中,严格遵循以下关键要求:

首先,为精准评估管道壁厚减薄状况,该传感器需具备测量管道外壁特定点位周向应变的能力,通过优化结构设计,确保能够紧密贴合管道外壁表面,实现高精度数据采集。

其次,考虑到管道裂纹监测与扩展预测的动态化需求,传感器创新采用可拆卸设计方式,并使其具备重复利用功能,这一特性有助于及时捕捉裂纹扩展对管道整体性能产生的影响,为管道的日常维护提供动态数据支撑。

最后,利用光纤光栅分布传感的独特优势,采用一纤多点技术对传感器进行优化布局,通过在单个传感器上设置多个测点,实现对管道局部腐蚀和裂纹区域表面周向应变变化规律的精准监测,有效提升管道隐患预警能力。

此外,基于管道腐蚀监测的严格要求,在传感器研发过程中,充分考虑工艺的简易性和实用性,通过简化制造流程、优化材料选型,确保传感器不仅性能可靠,而且便于大规模工程应用与推广。

3 应用光纤光栅传感技术的管道腐蚀监测系统研究

3.1 管道腐蚀监测系统的组成

通过深入分析管道腐蚀监测的基础理论与方法,

提出了一套管道腐蚀监测系统的设计方案。光纤光栅管道监测系统架构主要由硬件和软件两部分构成。其中，硬件部分作为核心监测单元，以腐蚀管道作为重要监测对象，集成了光纤光栅复合材料应变传感器、光纤光栅解调器、光纤连接器及计算机等设备。光纤光栅解调器采用4通道波长解调模式，具备 $\pm 1\text{pm}$ 的高精度，40nm的宽解调波长范围以及0~500Hz的频率响应。考虑到管道工程建设成本与实际测量需求，采用光纤连接器，主要是由于其具有结构简约、性能稳定可靠、便于携带和信号传输效率高的特点，确保了不同类型光纤间光信号的精准传输。软件部分侧重于数据采集与处理，以管道腐蚀监测云平台为核心实现海量数据的收集和管理。在管道腐蚀监测系统运行过程中，应变信号经复合材料应变传感器采集后，通过光纤连接器传输至光缆，再接入光纤光栅解调器进行波长解析，最终由计算机软件完成实时信号的分析处理，直观呈现出管道腐蚀的状态信息^[4]。硬件与软件的协同运作是管道腐蚀监测系统精准监测的重要保障，通过持续采集管道易腐蚀部位的实时数据，结合大量样本分析，可以构建更加完整的管道检测系统，掌握管道内部各类质量缺陷问题的对应关系，实现对管道运行状态的动态化监控，有效预防管道泄漏爆炸等突发事故，保障生命财产安全。

3.2 管道内传感器的布设方案

传感器的合理布设是模拟实验成功的核心要素，直接关系到测试数据的准确性，更对后续管道均匀腐蚀、局部腐蚀及裂纹扩展的评估起着决定性作用。因此，传感器的布设方案需以理论分析为基础，并通过实际测量数据对设计方案进行不断优化完善。在实验过程中，针对不同管道状况采用差异化的传感器布设策略，针对健康管段进行测试，主要目的在于测试新研发应变传感器在管道检测应用中的灵敏性以及检测结果的可靠性；根据管道内部腐蚀程度，设定多个不同的测点，通过对不同测点的数据特征，掌握腐蚀监测点的变化情况；在局部腐蚀管段，可以适当的采用更多测点的应变传感器，测点位置应结合具体的数据以及模型分析科学的布置，并在对应栅区粘贴裸栅传感器作为参照^[5]。针对可能出现管道裂纹的区域，应从多个角度布置不同的测点，而斜向裂纹管段则采用双传感器布局，分别在裂纹中心及其相距15mm处环向布设光纤光栅复合材料应变传感器，以此全面采集不同类型裂纹对管道应变所产生的影响。

3.3 管道内应变传感器的安装

光纤光栅复合材料应变传感器是属于核心传感元件，其安装可靠性与抗干扰封装性能直接决定监测数

据的精准度。为确保管道防腐监测数据的准确性，传感器设计时着重强化了这两方面特性。管道安装施工期间，应将传感器与管道的紧密贴合作为重要安装内容，具体可以选择专业的预紧装置和高强度的粘贴剂固定于管道外表面，在安装操作前，需对管道外壁进行清洁处理，采用专业的清洁设备和试剂。考虑到不同工况条件，传感器安装方式需要做出调整，根据管道腐蚀程度以及检测要求，对管道所处不同工况下的传感器最佳安装点位，均匀腐蚀、局部腐蚀及轴向、周向裂纹监测点采用常规粘贴固定安装方式，而斜向裂纹监测传感器则采用可拆卸式安装，避免永久性固定影响后续检测工作的顺利开展。具体安装流程为：先使用测量工具标记安装位置，精准对齐传感器光栅区域，再利用预紧装置施加拉伸力，确保传感器与管壁达到充分贴合的状态，最后涂抹353ND粘贴剂进行固定，可以通过加热的方式使其加速固化。该传感器具备体积小巧、安装便捷、便于携带等优势，封装结构既能有效保护内部元件，又能实现管道无损状态下的外部粘贴安装，不影响管道正常运行，达到管道腐蚀状态精准监测的目的。

4 结语

管道工程在建设过程中，为了延长管道的使用寿命，就需要做好管道腐蚀情况的监测工作，由于传统的管道腐蚀监测技术方法存在多种缺陷和问题，无法获得准确可靠的管道腐蚀状态信息，因此，应用光纤光栅传感技术的管道腐蚀监测系统的设计成为关注的重点，并成为管道腐蚀监测的有效技术方式。

参考文献：

- [1] 彭汉修, 何祖清, 梁磊, 等. 基于光纤光栅加速度传感器的管道流量实时监测方法研究 [J]. 数字制造科学, 2024(1):66-71.
- [2] 范峰, 徐伟, 王云峰, 等. 站内埋地管道腐蚀缺陷成因及防护方案分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(11):1-9.
- [3] 吕寿刚. 燃气管道腐蚀监测技术在城市燃气输送系统中的应用 [J]. 石油石化物资采购, 2024(16):91-93.
- [4] 何津, 邵卫林, 邱绪建, 等. 基于首轮内检测数据的成品油管道内腐蚀分析及对策 [J]. 油气储运, 2020, 39(8):7.
- [5] 薛凯琳, 胡志强, 刘乐乐. 埋地保温管道腐蚀监测技术应用效果评价与改进方法研究 [J]. 材料保护, 2023, 56(8):201-209.

作者简介：

刘鹏飞(1989-)，男，汉族，河南洛阳人，大学本科，中级职称，研究方向：石油与天然气管道安全管理。