

# 石油管道无损检测技术的现状与发展趋势

谢 振 (中海石油技术检测有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 随着世界对能源需求的日益增加, 石油作为一种重要能源, 其在开采、运输、贮存等环节的安全可靠性问题日益突出。作为石油运输的主要途径, 油气管道的完好性直接影响着能源供给的稳定与环境的安全。无损检测技术(NDT)是实现管道运行状态评估、预防和减少事故的重要手段, 其开发与应用对石油工业可持续发展意义重大。近几年来, 随着科学技术的进步, 以及新材料和新方法的出现, 石油管道无损检测技术得到了长足的进步, 为石油管道的安全运行提供了强有力的保证。

**关键词:** 石油管道; 无损检测; 技术现状; 发展趋势

中图分类号: TE973.6 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 024-0013-03

## Current Status and Development Trends of Non - Destructive Testing Technology for Oil Pipelines

Xie Zhen (CNOOC Technology Inspection Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518000, China)

**Abstract:** With the increasing global demand for energy, as a crucial energy source, the safety and reliability issues of oil in the links of exploitation, transportation, and storage have become increasingly prominent. As the main way for oil transportation, the integrity of oil and gas pipelines directly affects the stability of energy supply and environmental safety. Non - Destructive Testing (NDT) technology is an important means to evaluate the operation status of pipelines and prevent and reduce accidents. Its development and application are of great significance for the sustainable development of the petroleum industry. In recent years, with the progress of science and technology, as well as the emergence of new materials and new methods, the non - destructive testing technology for oil pipelines has made great progress, providing a strong guarantee for the safe operation of oil pipelines.

**Keywords:** oil pipeline; non - destructive testing; technical status; development trend

石油管道无损检测技术的现状及发展方向已成为业界和学术界共同关注的热点课题。无损检测技术主要有超声、射线、磁粉、渗透等, 在石油管道的生产、施工、运行及维修等各个环节起着举足轻重的作用。为满足油气管道安全要求和复杂多变的服役环境, NDT技术正朝着自动化、智能化、高精度、多功能方向发展。

可结合大数据、云计算、人工智能等新兴技术, 实现对油气管道的数据处理、分析与决策支持, 为油气管道安全评价与管理提供更科学、更高效的手段。

### 1 石油管道无损检测技术应用现状

#### 1.1 无损检测技术的多样化发展现状

目前, 石油管道无损检测技术已呈现多元化的发展趋势。随着科技的进步, NDT已由单一方法向多种技术的综合运用转变。这些方法主要有超声法、射线法、磁粉法、涡流法、红外法等。超声检测技术具有分辨率高、穿透性好等优点, 在管道内壁缺陷检测中得到了广泛的应用。射线探伤是一种较好的探伤方法。磁粉探伤、涡流探伤是常用的探伤方法。红外探测技术是利用红外热成像原理, 对管道内壁的热损及外部损伤进行探测。这些技术的广泛应用, 使油气管道检

测更全面、更准确, 更能适应各种工况的需要。

#### 1.2 无损检测技术的集成化趋势

在石油管道无损检测中, 技术集成是必然趋势。所谓集成, 就是把各种无损检测技术集成在一起, 提高检测效率, 提高检测结果的准确性。该系统可综合利用多种检测手段, 对管线进行综合评价<sup>[1]</sup>。如一些先进的探测设备已经可以将超声波与射线探测相结合, 从而实现一次探测过程中多项数据的采集。该系统不但提高了检测的效率, 而且降低了多次检测所需的时间与费用。另外, 该集成系统还配备了数据处理与分析软件, 可以快速地对测试数据进行处理与分析, 以辅助决策。

#### 1.3 无损检测技术的集成化应用现状

随着自动化程度的提高, 很多NDT测试过程已经实现自动化, 降低了人为干扰, 提高了测试的精度和可靠性。该装置能按预先设定的程序自动完成测试任务、数据采集和初步分析。所谓智能化, 就是利用机器学习等人工智能技术, 深入分析检测数据, 实现故障类型的自动识别, 并对故障的严重性进行评估。这种智能化的无损检测技术, 可以为管道的维修提供更快、更准确的检测结果, 从而使管道的维修工作能够

及时进行，避免事故的发生。同时，智能技术的应用，也使 NDT 更能适应复杂多变的工作环境。

#### 1.4 无损检测技术的标准化与规范化现状

随着 NDT 技术在石油管道工业中的应用越来越广泛，相应的标准、规范也越来越完善。这些标准规范对 NDT 的方法、设备、流程、数据记录与分析进行了规定，对 NDT 提出统一的要求<sup>[2]</sup>。实施标准化、标准化有助于提高 NDT 的一致性与可比性，保证不同地区、不同机构检测结果的可比性。同时，标准化还可以提高 NDT 的可信度，增加用户对 NDT 的信任度。随着 NDT 技术的不断进步，相应的标准、规范也在不断地更新，以满足新技术、新方法的需要。

### 2 石油管道无损检测技术的应用策略

#### 2.1 基于超声波检测技术的应用方法与步骤

超声检测技术利用超声波在不同介质中传播时产生的声学特性差异来探测油气管道的内部缺陷。它的实施过程需要严格按照规范的程序进行，在测试前的准备阶段，需要对测试仪器进行全面的校准和调试；选择合适的频率及探头尺寸的超声波探伤仪（频率一般为 0.5~10 MHz），根据管材的材质、壁厚来确定探头的频率，保证探头与仪器的匹配，并校准仪器的增益、扫描范围等参数，确保仪器工作在最佳状态<sup>[3]</sup>。采用标准块对探头的灵敏度、分辨力等性能指标进行检测，以保证测试结果的准确可靠。

此外，管线的表面预处理是非常重要的，钢管表面的油垢、锈垢、漆皮等杂质必须清除干净，才能暴露出钢管表面的金属光泽，使其不影响超声波的传播与反射。清扫范围应超过探测面积一定的宽度，通常是探头直径的 2~3 倍。将合适的耦合剂涂到管道表面，通常用甘油、浆糊、机油等耦合剂，耦合剂的作用是将探头和管壁间的空气排出，让超声波更好地进入管内，耦合剂应均匀涂敷，厚度适中，以确保耦合效果。

在检测过程中，探头沿管面匀速运动，运动速度通常为 20~150mm/s，并确保探头与管壁紧密接触，避免漏检。采用“不同的“扫”方式，实现“全覆盖”。采用“之”字形扫查技术检测管道内横向缺陷，采用侧扫查、前后扫查等方法检测纵向缺陷，并确定缺陷具体位置。在检测过程中，通过对超声波探伤仪显示屏的实时观测，根据超声波探伤仪的回波形态、高度、位置等信息，判断出钢管内有无缺陷，初步判断缺陷的大小、形状及位置。测试结束后，将测试数据记录下来，包括测试时间，测试位置，测试波形等，以供后续分析处理。

#### 2.2 基于射线检测技术的应用方法与步骤

射线探测技术利用射线穿透油气管线，利用管

材料对射线的吸收程度，在成像介质中形成缺陷图像，实现管线缺陷检测。在应用该技术之前，必须设计好检测方案。根据管道材料、管壁厚度、管径等因素，选用适当的放射源及放射源。常用的放射源有 X 射线源、伽玛射线源，前者适用于壁厚较薄的管道，后者适用于厚壁管。为使射线能有效地穿透管线，得到清晰的图像，确定射线源的位置及方位<sup>[4]</sup>。同时，依据检测标准及要求，确定检测范围内的透光数、透光角等参数。

测试仪器的准备和调试也很重要，检查并校准光源，以保证其输出的剂量及能量的稳定性。检查 X 射线探测成像设备，如胶卷、成像板、平面探测器等，确保它们的性能良好，无损伤，无瑕疵。对胶片成像而言，应选用适当的胶片类型及感光屏，胶片的感光度及对比度应符合测试要求；对于数字化成像装置，需要对其灵敏度、分辨力等参数进行标定与调试。在检测部位设置中心线、重叠线、定位线等标志，用来确定检测点与图像之间的位置关系，便于后续图像分析与评价。在检测执行阶段，将射线源置于预先确定的位置，并根据设计好的透光参数对其进行曝光。

在确定曝光时间时，应综合考虑光源能量、管壁厚度、胶片或探测器灵敏度等因素，以保证获得清晰的图像。曝光时，应严格遵守辐射安全规定，设置安全警戒区，禁止无关人员进入，同时，操作人员应佩戴铅防护服、铅手套等防护用品，防止辐射损伤。曝光结束后，将底片置于暗房中，经过显影、定影、水洗、烘干等工序，以保证底片清晰。对于数字图像采集装置，它是将探测器采集到的信号送入计算机，然后用专用的图像处理软件对图像进行预处理、增强、分析。最后由专业的评片员按照检验标准和规范，对图像进行评定，并判定钢管内有无缺陷及缺陷的性质、大小及位置。

#### 2.3 基于涡流检测技术的应用方法与步骤

涡流检测是一种基于电磁感应原理的检测方法，可将载有交变电流的线圈置于管道内壁，使管道表面产生涡流，涡流的大小、相位及分布随管道表面缺陷的变化而变化，从而实现对管道缺陷的检测。应用涡流检测技术时，必须选择合适的检测装置及检测线圈。涡流检测装置，检测线圈可分为绝对型、差动式和自比型三种，其中绝对型线圈适合检测管道表面整体缺陷，差动线圈对局部缺陷具有较高的敏感性，而自比较线圈则适用于管道表面裂纹等缺陷的检测<sup>[5]</sup>。

同时，要根据管子的大小、形状，选用适当的线圈，以保证线圈与管子表面有较好的耦合性。管道检测前的预处理方法和其他检测方法一样，需要将钢管表面

的油污、铁锈、氧化皮等杂质清除干净，保证钢管表面的平整和平整，降低表面因素对检测结果的影响。对于有防腐涂层的管线，如果防腐层厚度不大，对检测结果影响不大，可以直接在防腐层表面进行检测；对于较厚的防腐涂层，或者对测试结果影响较大的情况，应先将涂层除去，然后再进行测试。

可将温度传感器安装在检测区域附近，通过测量周围环境温度及管道表面温度，从而影响涡流检测结果，并对温度效应进行补偿。在检测过程中，可将检测线圈连接到电涡流检测仪上，校准、调试仪器。调节增益，频率，相位等参数，使其工作在最佳状态。

检测线圈以一定速度沿管面匀速运动，运动速度通常控制在 10~50mm/s，运动过程中线圈与管壁之间的距离保持不变，一般是 1~3mm，防止由于距离变化而引起的信号不稳定。对涡流检测器显示屏进行实时观测，并对检测信号变化进行分析，当管壁或近壁有缺陷时，将产生涡流，检测器上就会出现不正常的信号。

利用信号的幅值、相位、频率等特征，对缺陷的种类、大小及位置进行了判别。测试结束后，用涡流测试软件对测试数据进行处理与分析，形成测试报告。测试报告应包括测试位置、测试结果以及缺陷描述等。

### 3 石油管道无损检测技术的发展趋势

#### 3.1 高精度检测技术的广泛应用

随着 NDT 技术的不断发展，高精度检测技术必将在油气管线检测中得到越来越多的应用<sup>[6]</sup>。NDT 技术将更多地关注于分辨率与精度的提升，以满足日益增长的管线完整性需求。高精度检测技术可以更有效的识别微小缺陷，如微小的裂纹、微小的蚀坑等，而传统的检测方法很难检测到这些缺陷。此外，高精度测试技术还能为工程人员提供更为详尽的管道内部结构信息，帮助工程人员了解管道的现状及潜在风险。本项目的研究成果可为油气管道的安全可靠运行提供理论依据。

#### 3.2 智能化检测系统的深入发展

石油管道无损检测系统的智能化是其发展的一个重要方向，未来 NDT 将会越来越多地与人工智能、机器学习等智能技术相结合，实现检测数据的自动化分析与智能识别。智能测试系统可以在大量的测试数据的基础上，不断地提高缺陷识别的精度与效率。同时，该系统还可以根据管道运行数据及环境状况，对管道健康状态及潜在风险进行预测，从而达到由被动监测向主动预警转变的目的。智能检测系统的开发可以极大地提高 NDT 的自动化程度，减少人工干预，降低检测成本，提高检测结果的可靠性。

#### 3.3 多功能集成检测设备的研发

石油管道无损检测技术将向一体化、集成化、集成化方向发展，该装置可将超声波、射线、磁粉、涡流等多种检测技术集成在一起，从而达到对管道进行全方位检测的目的。多功能一体化测试设备的研制，使现场测试更灵活、更高效，降低了多次测试所需的时间与费用。另外，该集成装置还配备先进的数据处理与分析软件，可快速处理并综合分析测试数据，为工程人员提供综合评价报告，将推动 NDT 技术向更高效、更经济的方向发展，以满足石油管线的多元化要求。

#### 3.4 远程检测与监测技术的发展

随着物联网、大数据、云计算等技术的不断发展，石油管道的远程检测和监控将得到越来越多的应用。在今后的无损检测技术中，将会有越来越多的应用于管道的远程监测与数据分析。远程监测技术可以实时监控管道的运行状况，及时发现异常状况，为管道的维修与管理提供信息支撑。该技术的开发将使 NDT 更灵活、更方便地进行现场检测，并提高检测的覆盖面积和频率。远程监控是油气管道安全运行的重要手段，也是推动 NDT 技术向智能化和网络化发展的重要方向。

### 4 结束语

综上所述，油气管道无损检测技术对于保障能源安全和提高输送效率具有重要意义。随着科技的不断发展与创新，NDT 将向智能化、精准化方向发展，使 NDT 能更好地适应复杂多变的工作环境。未来，NDT 的发展将更多地关注大数据、人工智能等先进技术的融合，从而达到更高的效率和可靠性。对于提升油气管道安全运营水平、降低安全风险具有重要意义，也将为我国能源工业的可持续发展提供技术支撑。

#### 参考文献：

- [1] 石美真, 许子豪, 赵建如. 石油化工用压力管道的无损检测技术应用研究 [J]. 锅炉制造, 2024(03):53-54+57.
- [2] 万雪枫. 石油化工用压力管道破坏形式分析及其无损检测研究 [J]. 今日制造与升级, 2023(11):188-190.
- [3] 王彦涛. 石油管道无损检测技术及其发展探究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(14):56-58.
- [4] 冯博. 微波无损检测技术在石油储运管道检测中的应用 [J]. 电视技术, 2023, 47(05):207-211.
- [5] 韦迪. 石油管道内缺陷无损检测技术的研究现状 [J]. 清洗世界, 2023, 39(03):79-81.
- [6] 胡开龙. 石油化工压力管道射线无损检测质量控制 [J]. 山西化工, 2023, 43(01):170-171.