

石油管道内检测技术优化与缺陷修复维护策略研究

杨欣 薛惠 (陕西延长石油(集团)有限责任公司管道运输第三分公司, 陕西 延安 716000)

摘要: 随着全球能源需求的持续增长, 管道内检测技术的缺陷修复与维护策略则直接关系到管道的使用寿命与运行可靠性, 基于此, 本文对石油管道的腐蚀机理及内检测技术的优化措施进行分析, 并对管道缺陷修复与维护策略进行深入研究, 旨在为管道安全运行与全生命周期管理提供技术支撑与理论依据。

关键词: 石油管道; 内检测技术; 缺陷修复

中图分类号: TE973.6

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167(2026)006-0163-03

Research on the Optimization of In-Pipeline Inspection Technology and Defect Repair and Maintenance Strategies

Yang Xin, Xue Hui (Pipeline Transportation Third Branch of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an Shaanxi 716000, China)

Abstract: With the continuous and sustained growth of global energy demand, the defect repair and maintenance strategies of pipeline internal inspection technology are directly related to the service life and operational reliability of pipelines. In view of this, this article analyzes the corrosion mechanism of oil pipelines and the optimization measures of internal inspection technology, and conducts in-depth research on pipeline defect repair and maintenance strategies, providing technical support and theoretical basis for the safe operation and full life cycle management of pipelines.

Keywords: Oil pipeline; In-pipeline inspection technology; Defect repair

由于长期处于复杂的服役环境, 石油管道容易受到腐蚀、机械损伤、材料老化等因素影响, 逐渐形成各类缺陷, 这也成为管道泄漏甚至爆炸事故的潜在诱因。因此, 及时、准确地检测管道缺陷并采取科学、有效的修复维护措施, 是保障管道系统完整性与可靠性的关键环节。

1 石油管道的腐蚀机理

1.1 化学腐蚀

所谓的“化学侵蚀”, 实际上是在化学过程中出现的一种特殊腐蚀现象, 其最关键的是物质之间因为化学反应致使的结构损坏, 当金属暴露在自然环境当中时, 很容易和空气中的各种成分产生交互作用, 虽然空气本身不是电解质溶液, 不过其中悬浮的微粒、水蒸气及氧化性气体依然可构成腐蚀性介质。以铁这种常见金属为例, 在高温环境下与氧气接触时, 会经由氧化反应生成疏松多孔的铁氧化物, 这种产物不能保护基体, 反而会加快腐蚀进程; 而当环境中存在氯离子时, 它们会穿透金属表面的氧化膜, 和铁原子结合形成可溶性氯化物, 致使点蚀等局部腐蚀现象加重, 化学侵蚀的发生必定伴随金属与氧化剂之间的电子转移, 若是没有这种氧化还原反应的推动, 单纯的物理接触或者机械作用就无法引发有破坏性的化学变化^[1]。

1.2 电化学腐蚀

电化学腐蚀属于常见的金属破坏形式, 其多在电

解质溶液环境中出现, 与金属自身化学反应关联紧密, 日常生活中, 金属难免会和空气中水分接触并反应, 水其实是弱电解质, 电化学反应开始后, 水会电离产生氢离子, 此过程易受空气中 CO₂ 干扰, CO₂ 混入其中与碳、铁等元素结合, 形成全新电池体系。在该特殊电池体系中, 金属元素是反应关键, 金属材料会逐渐氧化并失去电子, 而金属所处溶液会获得电子, 随着反应持续进行, 最终会在碳表面生成氢气, 此现象被形象称作氢分解。

1.3 物理损伤

物理损伤作为金属破坏的常见形式之一, 主要是指金属遭受外物冲击, 或者单纯经历物理熔解过程而引发的损害, 其中低熔点金属对金属材料的影响较为特别, 当低熔点金属溶入金属材料时, 会对其分子结构产生类似“镶嵌”的独特作用, 不过低熔点金属一般强度较低, 在金属材料受力时, 它无法承受较大应力, 会优先发生断裂。这种断裂成为金属材料产生裂纹的源头, 削弱金属的结构完整性, 在金属管道的实际使用场景中, 物理损伤带来的腐蚀破坏不容小觑, 因为管道要运输各类介质, 在运输过程中, 介质对管道内壁持续冲刷, 再加上可能存在的物理溶解作用, 都会使管道逐渐受损。特别是在高温环境下, 当金属管道处于熔盐、熔碱或者液态金属中时, 极易发生物理溶解, 造成严重的腐蚀现象, 影响管道的正常使用和安全运行^[2]。

2 石油管道内检测技术的类型及优化措施

2.1 漏磁无损检测技术

在高磁性材料检测范畴内,漏磁监测技术属于关键且常用的检测手段,运用此技术检测管道时,管道内壁会因该技术作用产生磁化现象,一旦管道内部有破损、腐蚀等缺陷,管内磁通量会出现变化,借助高精度传感器探测这种变化,可完成管道缺陷检测工作。需要明确的是,管内磁通量并非孤立,它与磁场饱和度相关,还受管道尺寸、厚度等因素影响。检测刚性材料管道时,若管内无缺陷,磁通量会呈现分布均匀的磁力线状态;而当管道内部存在缺陷时,磁力线分布会改变,通过仔细检测与分析钢管表层磁力线变化情况,能准确获取管道内部是否存在缺陷及缺陷具体状况等检测结果^[3]。

此方法于实际应用过程中存在一定局限性,在小口径、壁厚过低的管道检测情形中,其性能表现难以实现理想水准,需要给予改进优化,改进后的内防腐传感器,其工作原理以“磁场扰动”这一核心机理为依据,主要着重于对管内小面积磁场展开精确检测,这一特性使其可免除传统检测中对饱和度的严苛要求,内部检测过程不受管道尺寸大小及管壁厚度等因素的限制。相较于传统漏磁检测方式,改进后的内防腐传感器呈现出明显优势,其检测结果的误差大幅降低,可为管道内防腐状况的评估提供更为精准、可靠的数据支撑。

2.2 超声检测技术

2.2.1 传统脉冲超声检测

在传统脉冲超声检测技术中,超声波探头有着极为关键的作用,它承担着发射脉冲信号来开启检测流程的任务,为保证检测的精确程度,所发射的信号一定要和管道保持垂直状态,当脉冲信号碰到管壁时,会在管内、管外各自产生反射波,通过精准测量这些反射波之间的距离,再结合相关物理参数,就可准确核算出管壁的厚度。依据管壁厚度的变化情形,技术人员可对管壁是否出现腐蚀问题做出科学的判断,超声检测技术有显著优势,它可以精准完成管内腐蚀位置的定位,还可以精确测定腐蚀深度,这些详细的检测结果,可以作为后续管道输送压力计算的关键依据,为管道的安全运行提供有力保障,并且该方法在大口径管道及管壁较厚等复杂条件下,都展现出良好的适应性,可快速且高精度地检测出应力腐蚀、材料内部缺陷等问题^[4]。

2.2.2 超声导波检测

超声导波检测技术依靠其独特优势,在工业检测领域有着重要作用,其操作借助纵波、扭曲波等多种

波型,这些波型能远距离传播,传播时信号衰减程度小,因这一特性,超声导波检测可在不开挖管道等设施情况下,进行脉冲回波阵列的检测处理,有效提高了检测效率,降低了检测成本与难度。电磁超声检测技术是一种新型激励模式,是当下较先进的非接触检测技术,它属于高频振动检测技术范围,检测过程能在试件内部完成,且此过程具有可逆性。检测管道时,经管道内部缺陷部位反射,在外界磁场作用下,管道内会形成涡流,涡流形成后,会让线圈两端电压发生改变,检测人员分析这些电压信号就能准确完成对管道腐蚀缺陷的分级与定位处理,为管道安全运行提供有力保障。

2.2.3 脉冲涡流检测技术

脉冲涡流检测技术即 PEC,是一种常用于管道腐蚀缺陷检测的无损检测方法,此项技术朝着激励线圈施加周期性脉冲电流,在线圈周围生成瞬态变化的磁场,当这个磁场作用于金属管道时,会于管壁内部感应出涡流场,该涡流场随着时间慢慢衰减,并且在检测线圈上产生相应的瞬态感应电压信号。因为涡流在导体里的渗透深度及衰减特性和材料厚度紧密相关,当管道有腐蚀或者壁厚变薄时,涡流场的衰减速率会出现变化,使得检测线圈接收到的电压信号波形产生明显不同,通过剖析电压信号的衰减曲线特征,其幅值随时间变化的规律,可建立感应电压与管道剩余壁厚之间的对应关系。在实际检测过程中,通过对比标准试样和待测管道的信号差异,再结合预先标定的数据模型,就可实现对管道腐蚀缺陷的定位及剩余壁厚的精确评估。

2.3 光学原理类检测技术

在管道无损检测这个领域当中,存在着多种具有高效特性及精准特质的检测技术,其中有一类检测技术,需要借助闭路电视管道内窥检测及电子散斑检测来共同处理相关工作,闭路电视管道内窥检测可深入到管道的内部,将管道内部的情况清晰地呈现出来,电子散斑检测依靠其自身独特的原理,对管道表面的信息进行精确地捕捉及分析。这两种检测方式结合在一起,可以快速地对管道内部的腐蚀状况进行分级及定位,精度非常高,并且显示直观,可以让检测人员快速地掌握管道内部的真实状况,在实际的管道无损检测工作中呈现出良好的发展前景。除此之外,激光全息无损检测也是一项具有一定优势的技术,该方法是基于全息干涉现象来开展工作,通过流体加载压力、热加载、机械加载等多种不同的方式对被检测的管道进行处理。它可快速地完成对微小变形的检测,检测人员将加载前后被检测介质的波形图进行对比,再结

合干涉条纹的变化情况,就可准确地判断管道是否存在缺陷问题^[5]。

3 石油管道缺陷修复与维护的策略分析

3.1 实施预防性维护手段,防患于未然

相关人员应全面详尽考量管道运行环境、输送介质特性、使用年限等关键点,依此制定合理且切实可行的定期巡检计划,需精准敲定巡检周期,当周期过长,问题就不易被及时发掘,要是周期过短,就会造成人力物力的浪费;明确分出巡检内容,涉及管道外观、连接的地方、附属装置等各个层面;严格订立巡检标准,让每一项检查都有明确的参照标杆。

针对处于强腐蚀环境情形下的管道,需格外留心,缩短管道巡检周期,扩大检查频次,同时重点加大对防腐层的检查攻势,查看有无破损、脱落等类似情况,鉴于石油管道一般穿越不同的地理区域,周边环境复杂多样易变化,也许随时会对管道产生影响,可把地质灾害监测设备上,实时掌握地质当下动态;布置醒目的警示标牌,防范无关人员搞破坏;跟周边施工的单位设立有效的沟通机制,及时掌握施工方面信息,及时找出并排除潜在的安全威胁,让管道实现安全运行。

3.2 应用缺陷检测技术,精准定位隐患

就管道检测领域而言,常用检测技术一般分为内部与外部检测这两大类,内检测主要凭借智能清管器开展,它能在管道当中自由移动,采用超声波、磁粉、涡流等原理,精确探测与定位管道内壁的腐蚀、裂纹、变形等破缺,给管道后续维护及修复提供详细凭据。

外检测技术同样有着重要性,涉及超声波测厚、红外热成像、电位测试等相关方法,外检测操作简单、费用不高,适合对管道进行日常查看和快速筛选,可及时发觉明显差错,为提高缺陷检测的精准性与可靠性,不能仅借助单一检测技术,而是需综合采用多种检测技术,实现优势彼此补益,跟着科技的发展步伐,仍要积极引入无人机巡检、光纤传感技术等新的检测技术及设备,增进检测效率,引领管道检测实现智能化升级。

3.3 合理选择修复工艺,提升管道寿命

依照缺陷的类别、严重程度及所在位置,精准选出科学合理的修复工艺,是保障管道安全稳定运行的关键节点,若管道只是有轻微的表面腐蚀和划痕,一般能借助涂层修复来阻挡腐蚀的介质,也能采用补焊办法填补损伤的部位,要是碰到较为严重的腐蚀穿孔及裂纹问题时,常用的修复工艺呈现更多样性,就如焊接补丁可迅速将穿孔封堵,复合材料修复能契合复杂形状的缺陷,套筒修复可给予较强的结构支撑力。

挑选修复工艺期间,要全面考量管道的运行状

况、修复费用以及施工难易程度等多方面要素,保证修复后的管道切实达到安全运行标准,修复过程需严格按照相关的标准规范去执行,切实加强质量把控与安全监督。

3.4 采取全周期管理,保证维护系统性

管道缺陷的修复与维护不是一项孤立的工作,而是要全面融入从设计、建造一直到运行、报废的整个生命周期管理框架之中,从系统的宏观层面来看,维护策略的优化与提升需要从多个关键维度协同推进、共同发挥作用,在技术方面,要采取一系列有效的预防举措,从根源上延缓缺陷的出现。例如采用内涂层技术,为管道内壁构建一层保护屏障,减少介质对管道的侵蚀,优化阴极保护系统,有效避免管道因电化学腐蚀而产生缺陷,改善管道周围的土壤环境,降低土壤对管道的不利影响,同时充分运用数字孪生技术这一前沿方法,构建与物理管道完全同步的虚拟模型,借助该模型精确模拟缺陷的演化趋势,为优化维护决策提供科学依据。

在管理方面,要健全法规标准和管理体系,明确各项维护活动的规范与流程,保证所有维护工作都有章可循、合规开展,并且全程可追溯,在人员方面,要加强相关人员的持续培训,使其及时掌握新技术、新工艺,提升实际应用能力,这一综合性的维护策略关注整体系统的长期可靠性和经济性,依靠技术、管理和人员三个方面的持续改进与协同发展,形成缺陷防控的良性循环,最终实现管道资产完整性、安全性及运营效益的最大化。

4 结语

本文围绕石油管道内检测技术的优化以及缺陷修复维护策略展开系统研究,推动管道内检测技术朝着精细化、智能化方向迈进,为管道完整性管理提供系统性解决办法,对于提升油气管道安全运维水平有关键的理论价值和工程意义。

参考文献:

- [1] 蒋轩. 石油管道检测中微波无损检测技术的应用研究 [J]. 石油和化工设备, 2025, 28(11): 97-100.
- [2] 李志强. 磁致伸缩导波技术在海上石油管道检测中的应用 [J]. 电脑知识与技术, 2025, 21(08): 112-114.
- [3] 李帅. 微波无损检测技术在石油储运管道检测中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(01): 50-52.
- [4] 刘小齐, 刘菊会, 何诚, 等. 电磁涡流检测技术在石油管道检测中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(04): 57-59.
- [5] 张金龙. 石油管道完整性检测与评价技术研究 [J]. 清洗世界, 2023, 39(08): 31-33.