

天然气输气管道隐蔽工程质量控制技术的应用与发展趋势

邱志宇

中石油昆仑燃气有限公司贵州分公司, 贵州 贵阳 550000

[摘要]我国天然气需求持续增长, 天然气输气管道是能源战略安全的重要基础设施, 隐蔽工程质量控制对保障天然气输气管道运行安全、延长服役寿命起到至关重要的作用。文中分析当前主流控制技术应用情况, 涉及非开挖施工、智能检测、腐蚀防护、数字化管理等, 提出多技术融合、优化标准体系、智能决策等策略, 还展望了智能化、绿色化、高韧性材料、全球协同等发展趋势。

[关键词]天然气输气管道; 隐蔽工程; 质量控制; 智能检测; 腐蚀防护; 数字化管理

DOI: 10.33142/ect.v3i5.16450

中图分类号: X322

文献标识码: A

Application and Development Trend of Quality Control Technology for Hidden Engineering of Natural Gas Pipeline

QIU Zhiyu

Guizhou Branch of PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550000, China

Abstract: The demand for natural gas in China continues to grow, and natural gas pipelines are important infrastructure for energy strategic security. Quality control of concealed engineering plays a crucial role in ensuring the safe operation and extending the service life of natural gas pipelines. The article analyzes the current application of mainstream control technologies, including non excavation construction, intelligent detection, corrosion protection, digital management, etc. It proposes strategies such as multi technology integration, optimized standard system, intelligent decision-making, and also looks forward to the development trends of intelligence, greenness, high toughness materials, and global collaboration.

Keywords: natural gas transmission pipelines; concealed engineering; quality control; intelligent detection; corrosion protection; digital management

天然气输气管道的隐蔽工程部分一般都会埋设在地下, 其施工质量跟天然气输气管道运行的安全性和稳定性有着直接关联。要是出现质量问题, 通常很难及时察觉到, 而且修复起来花费也相当高。传统用于质量控制的手段已经很难满足当下长距离、高压、高钢级管道的管理方面的需求。伴随着新材料、新技术以及信息技术持续发展, 依据全生命周期构建起来的隐蔽工程质量控制体系慢慢形成, 正在朝着智能化、系统化、标准化的方向发展。

1 隐蔽工程质量控制理论体系

1.1 全生命周期管理模型

天然气输气管道隐蔽工程质量控制需贯穿设计、施工、运行维护等各个阶段。设计阶段建立风险预控机制, 借助地质雷达探测、路径优化算法预判施工难点隐患。施工过程构建动态监控体系, 实时监测焊接参数、回填密实度、防腐层完好性。运维阶段依靠智能诊断系统, 依据历史数据预测故障、评估健康状况, 增强隐患处置的主动性、预见性。

1.2 关键指标体系构建

科学且能够量化的指标体系, 构成了质量控制的根本基石, 在材料这个层面上, 得留心像 X80 钢的氢脆指数以及低温冲击韧性这类性能指标, 就焊接质量来讲, 要依照国家或者行业标准当中的缺陷等级标准, 来全面且综合地

去考量焊缝的可靠性, 在防腐层完整性这块, 应当借助电火花检测技术来设定恰当合理的阈值, 以此来切实保障绝缘性能。在整个指标体系构建的进程里, 务必要把工程的实际状况和地质条件相互结合起来加以考虑, 从而保证该指标体系具备适用性及可靠性。

1.3 风险量化分析模型

风险管理的科学性依靠合理的量化模型来支持。故障树分析法能够对质量问题可能出现的原因以及其逻辑路径予以系统识别, 进而构建起隐患传播的链条。蝴蝶结模型把事前防控和事后缓解相结合, 这种方法已经在天然气输气管道腐蚀风险控制方面得到了广泛的应用^[1]。蒙特卡洛模拟技术借助大量的随机样本进行迭代操作, 可以预测天然气输气管道出现失效的概率, 从而给工程管理提供具有一定量化的决策依据。

2 主要核心质量控制技术

2.1 非开挖施工技术质量控制

非开挖技术在城市高密度区域以及环境敏感区域的应用范围不断拓展, 其在河道、道路还有铁路下穿工程方面尤为适用。对于 HDD 施工出现的轨迹偏差这一问题, 在工程实施过程中逐步运用高频陀螺测斜手段、地磁干扰修正方法以及三维轨迹可视化控制系统, 以此来提升钻头的

定位精准度。与此借助机器学习算法对路径调整策略加以优化,能够有效地将偏斜率降下来,进而确保穿越作业的精度。在顶管施工环节,鉴于软弱地基以及地下水复杂工况的存在,通常会选用泥水平衡或者土压平衡顶管机,与此还会配合着去布置高密度沉降监测点以及裂缝计,进而构建起数据反馈的闭环机制。沉降数据借助无线传输系统能够实时上传到控制平台,再结合有限元模拟来提前对异常变形区域加以识别,达成预警响应和现场应急的联动效果,为保障地下设施以及地表建筑的结构安全给予强有力的技术支持。

2.2 智能检测与监测技术

在隐蔽工程质量管理方面,检测手段已经从周期性的检测方式逐步朝着实时化以及自动化的方向转变。就当下而言,主流的智能内检测器可不简单,它把 MFL 技术以及 UT 技术都集成到了一起,而且还把涡流检测模块以及激光测径模块给融合了起来,进而构建起了一套多物理场协同探测的体系。该检测器还配备了高分辨率的传感器以及高速的数据采集系统,能够针对壁厚出现的损失情况、微裂纹状况以及焊缝存在的缺陷展开高精度的定位操作,并且还能对其进行量化分析,如此一来,隐患识别率便得到了大幅度的提升。DAS 以及 DTS 系统于长距离天然气输气管道之中,有着颇为显著的优势。其借助光纤当作传感介质,可达成对微小变形、突发泄漏或者温差异常等状况的早期察觉^[2]。此项技术能够应用于高落差、冻土、滑坡带这类复杂环境当中,并且能够在无源的情形下完成对天然气输气管道沿线的全覆盖式监测,还具备耐腐蚀、抗电磁干扰等诸多优势,已然成为新建天然气输气管道工程当中的标准配置项目之一。

2.3 先进材料与焊接技术

高钢级管道材料的运用促使天然气输气管道系统朝着高压力以及高强度的方向不断发展。为了能够应对氢致开裂等相关问题,当下采用了控冷控氢一体化的技术手段,在冶炼的具体过程之中对含氢量加以控制,并且还引入像 Nb、Ti 这类微量元素来实现晶粒的细化处理,从而从源头方面去提升材料所具备的抗氢脆的能力。在焊接领域,全自动焊接装备通常会采用多通道熔深实时监控、激光跟踪以及焊缝成形图像识别等功能,以此来达成多道次的同步控制。尤其是在山地和海底天然气输气管道相关场景下,这类设备在稳定性以及适应性方面都得到了较为明显的提升,已然成为了高强度钢焊接的标准工艺。并且,自动焊接记录具有可追溯的特点,能够给焊接质量的数据化管理给予相应的技术支持。

2.4 腐蚀防护与修复技术

为了提高隐蔽工程的防腐寿命,天然气输气管道防腐层往往采用三层 PE 结构或者 FBE 涂层,这两种防腐方式都拥有较高的附着力以及较强的耐化学腐蚀能力。在天然气输气管道开始敷设之前以及整个施工进度当中,常常会配合运用电火花检测、高频绝缘检测等各类手段,以此来

对防腐层的完整性实施实时的质量把控操作。在阴极保护这运用了电位—电流复合反馈机制,进而达成在不同地质电阻率条件下对电位进行自适应调整的目的。新型的参比电极拥有更长的使用寿命,并且具备更强的稳定性,能够胜任多年期运行状态的监控工作。在修复领域当中,复合材料包覆修复技术已然达成了针对腐蚀减薄部位实现快速增强这一目的。碳纤维和环氧树脂组合在一起所形成的整体,拥有着不错的承压性能以及灵活多变的适配能力,通常情况下会被应用于管道出现局部受损状况的区域进行非停输修复操作,如此可使停运时间有所减少,并且还能大幅度降低经济损失以及施工风险。

2.5 数字化质量管理技术

随着工业互联网不断发展起来,数字化管理技术也开始逐步贯穿于天然气输气管道隐蔽工程的整个周期当中。在设计这个阶段,会运用 BIM 平台来开展三维建模以及管线冲突的预判工作,并且结合 GIS 数据,还能够达成施工路径的规划、环境影响的评估以及资源调度方面的优化效果。在施工阶段的时候,移动端的质量采集终端和智能监控系统相互联动起来,进而形成了一个完整的采集—上传—审核—归档的流程闭环,如此一来便能够达成现场质量数据实时留痕的效果。而在质量验收阶段,数字孪生模型能够凭借对施工实况以及设计数据加以对比的方式,给予可视化审查以及虚拟演练相应的支持,尤其是在穿越段、转弯段等这些关键部位,其发挥出来的价值是颇为重要的。借助信息化平台所提供的有力支持,项目管理人员能够依据相关数据展开分析,进而制定出更为科学合理的管理策略,达成从依靠经验驱动到依靠数据驱动的转变,切实实现对隐蔽工程质量进行管理时的可视性、可控性以及可追溯性。

3 质量控制技术优化策略

3.1 多技术融合创新

面对复杂地质状况以及高精度方面的严格要求,质量控制技术正加速朝着融合发展的方向迈进。把 AI 和无损检测技术相互结合起来,能够达成对内检测图像以及声发射信号的自动识别,并且还能完成缺陷分类工作,如此一来,便能让识别的效率以及精度都得以提升。在实际开展的项目当中,借助 AI 所给予的辅助,采用超声导波加上图像识别这样的方式,已经成功地识别出了微裂纹、气孔等这类微缺陷,其准确率更是提升了超过 30%。将地质雷达、三维激光扫描和 BIM 系统相互结合起来的做法,同样已经在针对隐蔽段路径进行精准建模方面得到了应用。区块链技术还被应用于质量数据的分布式存证方面^[3]。在设备验收环节、施工巡检过程以及责任追溯事宜当中,凭借“多节点+智能合约”这样的结构形式,能够切实保证关键质量数据不被篡改,并且实现全流程的透明状态,进而为工程质量信任体系的建设工作奠定了相应的数字方面的基础。

3.2 标准体系动态完善

现行的标准大多属于静态通用的模式,在面对不同地

区存在的地质、水文等各种各样的条件时,往往难以妥善加以应对。构建起数据驱动加上反馈优化这样一种动态的标准体系,能够凭借历史项目的相关数据来对焊接参数、防腐层的厚度以及基础处理规范等方面做出优化,进而形成一个智能化的参数库。区域标准要结合典型地质状况,像冻土、盐渍土这类情况,去提出有差异性的指标,并且在制定标准的过程中引入现场反馈的相关机制。推动我国的标准和 ISO、API 等国际标准相接轨,达成跨国项目在质量控制技术方面的兼容互认,这对于提升我国天然气输气工程在国际上的竞争力以及标准主导能力是有帮助的。

3.3 智能决策系统开发

隐蔽工程所涉及的多源异构数据情况颇为复杂,在此背景下构建智能决策系统显得极为关键。把 SCADA 数据、分布式传感器以及历史缺陷模型加以集成起来,如此一来便能够对深度神经网络、随机森林等多种算法展开相应的训练工作,进而将其应用于风险识别以及失效预测等方面。在某个位于西北地区的长输项目当中,凭借依据多源数据所构建而成的 AI 模型,成功地在事前便识别出了存在高风险的那些段落,同时也达成了预警联动的效果。部署边缘计算节点以及轻量化的 AI 模块,能够提高本地的处理效率,降低响应延迟。结合知识图谱来构建复杂环境下质量推理的逻辑,让系统拥有更强的自适应能力和决策能力,达成故障识别—策略建议—执行反馈的全流程闭环管理。

3.4 全产业链协同管理

隐蔽工程的质量控制有必要达成从材料采购一直到运行运维这样一个全链条的协同状态。借助一体化的数据平台,将设计图纸、施工日志、巡检记录以及运行数据之间的关联打通,进而实现信息的相互连通与共享,强化各个环节之间的联动效果。流程管理方面,需明确各个阶段的质量控制标准以及 KPI 评价指标,引入价值流图来识别风险隐患。在材料、设备以及外包环节,要构建供应链质量协同体系,推动质量责任共担。运用数字孪生技术模拟施工过程、预测潜在隐患,以此辅助现场做出实时决策。构建起协同管理加上数字支持以及预警联动这样一个系统,进而达成在设计阶段、施工阶段及运维阶段整个全周期质量管理的闭环效果,由此来促使隐蔽工程质量的可控性以及安全稳定性得到全方位的提升。

4 技术发展趋势研究

4.1 智能化与无人化技术深化

未来隐蔽工程质量控制会更多地依靠无人化作业以及智能系统来开展相关工作。凭借基于自主导航算法所打造的巡检机器人集群,其能够在长达数公里的天然气输气管道之上达成连续性的检测目标,同时还能精准地完成故障识别方面的任务。结合数字孪生平台去构建起的全生命周期管理体系,能够实现从最初的设计阶段一直到后续的运维整个过程中的自主决策功能,进而对项目质量进行有效地调控。

4.2 绿色低碳技术突破

应对碳达峰、碳中和的目标,绿色低碳技术正逐步在天然气输气管道建设领域渗透开来。生物基防腐材料有着很好的可降解特性以及环境友好属性,这使其成为传统防腐涂层的一种替代趋势所在。在碳捕集与封存管道的设计环节当中,对于材料的兼容性提出了更高的要求,这就需要从选材方面、内涂层方面以及防腐系统等方面去全方位地加以优化。

4.3 高韧性管道技术发展

随着高原冻土、地震活跃区等极端工况下天然气输气管道工程数量不断增多,迫切要去开发那些具备适应性的新材料以及合理的结构设计^[4]。自适应高韧性材料能够在低温、高地应力等这样的环境之下维持稳定的性能状态,而自修复防腐涂层技术会依靠微胶囊释放的机制,在损伤出现之后自动地对缺陷加以填补,以此来提高天然气输气管道的耐久性程度。

4.4 全球化标准体系构建

跨国天然气输气管道项目不断增多,需要建立起统一的质量控制框架。借助签署多边合作协议的方式,去构建起质量控制协议框架体系,并且依靠云平台来开展数据共享以及质量同步监测方面的相关工作,以此达成国际间的数据互信以及协同管理的目标,这无疑为实现全球天然气基础设施的互联互通提供了技术层面的有力保障。

5 结语

天然气输气管道隐蔽工程质量控制对于保障国家能源安全以及基础设施稳定运行而言,属于极为关键的一个环节。本文围绕理论体系、核心技术、优化策略以及未来发展等四个不同方面来开展相关研究,清晰地指出了当下质量控制所遵循的技术路径以及其后续的演化走向。今后,需要进一步强化智能化、绿色化、标准化等方面的建设工作,着手构建起一套以数据作为驱动核心的全生命周期质量管理体系,从而促使隐蔽工程能够达成高质量且可持续的发展状态,进而为天然气输气管道工程提供坚实的质量保障。

[参考文献]

- [1]王帅,何斌,张海明.埋地管道沉降对管道支架的影响及临界沉降量研究[J].化工设备与管道,2025,62(2):105-113.
- [2][2]杨宏伟,朱赟,王佳晨,等.基于离子液体改性的掺氢管道抗氢脆复合涂层[J].化工进展,2025,11(2):11-12.
- [3]延旭博.人工智能技术在长输天然气运行中的应用[J].山西电子技术,2024,11(4):14-17.
- [4]李雪融.基于模型的天然气管道系统鲁棒隐蔽攻击策略研究[D].黑龙江:东北石油大学,2023.

作者简介:邱志宇(1983.7—),毕业院校:黑龙江科技学院(2003年9月~2007年7月),所学专业:土木工程,当前就职单位:中石油昆仑燃气有限公司贵州分公司,职称级别:助理工程师。