

城镇燃气管道非开挖施工工艺优化及质量控制研究

申 健 (济南能源工程集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 针对城镇燃气管道非开挖施工中工艺参数经验化、质量管控碎片化、环保措施表层化等理论与实践脱节问题, 结合行业技术规程演进趋势, 构建基于3D模拟的工艺优化理论模型与全流程质量控制体系框架。从地质-设备-管道特性耦合理论出发, 推导水平定向钻、顶管法的参数优化逻辑; 基于绿色施工理论研发生物可降解泥浆循环利用体系; 依托数字孪生技术建立BIM+物联网的质量管控理论机制。研究揭示了燃气管道非开挖施工的技术适配规律, 为行业技术标准化与理论体系完善提供支撑, 填补了燃气专项非开挖施工理论研究的空白。

关键词: 城镇燃气管道; 非开挖施工; 工艺优化理论; 质量控制体系; 绿色施工

中图分类号: TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0130-03

Research on the Optimization of Non-Digging Construction Techniques and Quality Control for Urban Gas Pipelines

Shen Jian (Jinan Energy Engineering Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: Addressing the disconnect between theory and practice in urban gas pipeline trenchless construction—such as the empirical nature of process parameters, fragmented quality control, and superficial environmental protection measures—this study integrates industry technical regulations’ evolving trends to develop a 3D simulation-based process optimization theoretical model and a comprehensive quality control system framework. Starting from the coupled theory of geology, equipment, and pipeline characteristics, it derives the parameter optimization logic for horizontal directional drilling and pipe jacking methods. Based on green construction theory, a biodegradable slurry recycling system is developed. Leveraging digital twin technology, a BIM+IoT quality control theoretical mechanism is established. The research reveals the technical adaptation principles of trenchless gas pipeline construction, providing support for industry technical standardization and theoretical system refinement while filling the gap in specialized trenchless gas pipeline construction research.

Keywords: urban gas pipelines; trenchless construction; process optimization theory; quality control system; green construction

新型城镇化进程中, 城镇燃气管道管网扩张与既有管网更新对施工技术提出更高要求。传统开挖施工因对城市交通、生态环境的干扰性, 逐渐被非开挖施工替代。然而, 燃气管道具有高压、易燃易爆的本质特性, 其施工精度与密封性要求远高于给水、排水等通用管道, 导致非开挖施工技术在燃气领域的应用面临“技术适配性”理论矛盾——通用非开挖工艺的理论体系无法完全覆盖燃气管道的专项需求。当前行业规程的更新虽为技术应用提供了方向, 但缺乏针对性的工艺优化理论与质量控制理论框架, 成为制约燃气管道非开挖施工技术升级的核心瓶颈。

本文核心研究内容包括: ①燃气管道非开挖施工工艺的耦合优化理论, 重点构建3D模拟驱动的参数设计逻辑; ②环保泥浆循环利用的理论体系, 结合燃气安全要求完善配方与循环机制; ③基于数字孪生的质量控制理论框架, 实现全流程管控的理论闭环。技术路线遵循“理论解构-问题分析-模型构建-体系设计-实践验证-理论升华”的逻辑, 确保研究的理论深度与实践指导性。

1 城镇燃气管道非开挖施工的理论现状与核心矛盾

1.1 主流施工工艺的理论适配性分析

城镇燃气管道非开挖施工以水平定向钻(HDD)、顶管法为核心, 二者的理论适用边界存在显著差异: 水平定向钻基于“钻孔轨迹可控性”理论, 适用于中短距离、中小管径管道铺设, 但该理论在复杂地质条件下的“孔壁稳定性”假设存在缺陷——砂层、富水地层中, 通用理论中的孔壁支护逻辑无法完全匹配燃气管道对“无扰动施工”的要求。顶管法依托“管节推进-土体支护”的平衡理论, 适用于大管径、长距离穿越, 但传统理论中的“人工导向”逻辑与燃气管道“高精度轨迹控制”的理论需求存在差距, 导致技术应用中的理论与实践脱节。此外, 原位固化内衬法作为修复类核心工艺, 其“材料固化-管道承压”的匹配理论尚未针对燃气管道压力等级形成专项体系, 制约了技术应用范围。

1.2 核心理论矛盾识别

1.2.1 工艺参数设计的理论缺失

现有非开挖施工参数设计基于通用管道的经验理

论,未建立“燃气管道特性-地质条件-设备参数”的耦合理论模型。一方面,参数设计忽略燃气管道高压特性对工艺的特殊要求,如泥浆配方仅考虑护壁功能,未融入防爆、防泄漏的理论逻辑;另一方面,参数与地质条件的动态匹配缺乏理论支撑,如推进速度、注浆压力的调整仅依赖工程经验,未形成基于地层应力变化的理论推导公式,导致工艺参数的理论合理性不足。

1.2.2 质量控制体系的理论碎片化

当前质量控制理论聚焦于“事后验收”,如气密性试验的理论标准较为完善,但“事前预判-事中管控”的理论体系存在断层。从理论层面看,一是轨迹偏差监测缺乏“实时数据-动态调整”的理论算法,人工复测的滞后性与燃气施工的“实时性安全要求”相矛盾;二是管节接口密封质量的检测未形成“过程性评价”理论,无法在施工中实时验证密封性能;三是周边土体扰动监测的理论模型未考虑燃气管道泄漏的连锁风险,监测指标与安全预警的理论关联性不足。

1.2.3 绿色施工与安全施工的理论协同不足

非开挖施工的环保理论多围绕“污染控制”展开,如泥浆处理的理论聚焦于降低污染物排放,但未与燃气施工的“安全理论”深度融合。传统泥浆处理的理论方案忽略了燃气施工现场的防爆要求,如处理设备的电气安全、泥浆成分的易燃易爆性控制等,导致绿色施工与安全施工在理论层面存在“目标冲突”;同时,泥浆循环利用的理论体系未考虑燃气施工的连续性要求,循环效率与施工进度的理论平衡机制缺失。

2 燃气管道非开挖施工工艺的优化理论模型

2.1 基于3D模拟的耦合优化理论

2.1.1 理论模型的构建逻辑

3D模拟优化理论的核心是建立“地质-设备-管道”三维耦合模型,其理论基础源于有限元法(FEM)的土体变形计算与管道力学分析。模型构建遵循“多因素映射”逻辑:将地质条件(土层分布、岩土力学特性)转化为“地层约束参数”,将设备参数(顶管机性能、钻进设备功率)转化为“动力输出参数”,将燃气管道特性(管径、压力等级、材质强度)转化为“安全约束参数”,通过数值模拟实现三者的理论匹配,最终输出符合燃气专项要求的工艺参数。

2.1.2 核心工艺的理论优化路径

水平定向钻:基于“孔壁稳定-防爆安全”双目标理论,优化参数设计逻辑。泥浆配方需同时满足护壁功能与燃气安全要求,理论上应选择具有低摩擦、高稳定性且无易燃易爆成分的材料,通过“黏度-含固量-防爆性”的三维理论平衡,确定配方的核心成

分与比例;钻进速度的优化则基于“地层应力-钻进效率”的理论平衡,根据不同地层的抗剪强度、孔隙水压力等参数,推导速度调整的理论公式,避免因钻进过快导致孔壁坍塌,或过慢影响施工安全。

顶管法:围绕“轨迹精度-土体平衡”的理论目标,完善参数协同逻辑。推进速度与注浆压力的理论关系需基于“土仓压力平衡”理论,通过推导土仓压力与地层静止压力的比值范围,确定推进速度的调整区间;同时,引入激光导向的“实时纠偏”理论,将轨迹偏差控制在燃气管道允许的精度范围内,形成“压力-速度-偏差”三者联动的理论控制模型。

2.2 环保泥浆循环利用的理论体系

2.2.1 配方优化的理论依据

燃气管道专用环保泥浆的配方优化基于“绿色性-安全性-功能性”三重理论目标。绿色性理论要求泥浆成分具有生物可降解性,避免对环境造成长期污染;安全性理论要求成分无易燃易爆性,符合燃气施工的防爆要求;功能性理论要求泥浆具有良好的护壁、润滑性能,满足施工工艺需求。基于此,理论上应选择植物纤维等天然材料替代传统膨润土,添加纳米级改性材料提升护壁性能,形成“天然基材-改性助剂-安全调节剂”的配方理论结构。

2.2.2 循环系统的理论框架

泥浆循环利用的理论体系遵循“分级处理-闭环回用”逻辑,核心是建立“处理效率-施工需求-安全环保”的理论平衡。从理论层面,循环系统分为四级处理单元。

一级沉淀单元基于“重力分离”理论,去除大粒径钻屑。

二级机械分离单元基于“离心力分离”理论,实现泥饼与清液的分离。

三级生物处理单元基于“微生物降解”理论,去除有机添加剂。

四级回用单元基于“性能恢复”理论,通过调整成分比例使清液满足泥浆配制要求。

整个系统的理论关键在于各单元的处理效率与施工进度的协同,确保循环速率匹配施工需求,同时满足环保与安全标准。

2.3 原位固化修复的理论适配性优化

原位固化修复工艺的理论优化聚焦于“材料性能-管道承压”的匹配性。基于燃气管道的压力等级差异,理论上需建立内衬层厚度的计算模型——根据管道工作压力、介质特性推导内衬层所需的强度与厚度,确保内衬层与原管道形成“协同承压”体系;固化温度与时间的优化则基于“材料固化动力学”理论,通过

分析复合材料的固化反应速率,确定最佳温度区间与保温时间,避免因固化不充分导致强度不足,或过度固化导致材料脆化,最终形成符合燃气管道修复要求的理论参数体系。

3 基于数字孪生的全流程质量控制理论框架

3.1 事前控制:方案数字化评审的理论逻辑

事前控制的核心是建立“BIM+GIS”的数字化评审理论体系,其理论基础是“空间映射-风险预判”。通过BIM技术将施工方案转化为三维数字模型,结合GIS地理信息系统的周边环境数据,实现“施工路径-周边管线-建筑物”的空间理论分析:一是基于“碰撞检测”理论,预判管线冲突风险,提前优化施工路径;二是基于“参数模拟”理论,通过多方案的数字化对比,验证工艺参数的理论合理性;三是基于“风险分级”理论,对穿越建筑物、地下管线等关键区域标注理论预警阈值,为施工安全奠定理论基础。

3.2 事中控制:多维度监测的理论耦合机制

事中控制理论体系依托“BIM+物联网+AI”的数字孪生技术,构建“实时监测-数据融合-智能决策”的理论闭环。从理论层面,监测体系分为三类核心维度:一是管节状态监测,基于“结构力学”理论,通过位移计、应力计实时采集管节受力与变形数据,判断是否符合安全理论阈值;二是泥浆参数监测,基于“流体力学”理论,监测泥浆的黏度、含固量等参数,确保其满足工艺理论要求;三是周边环境监测,基于“土力学”理论,监测土体沉降、地下水变化,避免因扰动引发燃气泄漏风险。通过AI算法实现多维度数据的理论融合,生成实时调整建议,形成“监测-分析-决策”的理论控制链。

3.3 事后控制:验收标准的理论体系完善

事后验收的理论优化需结合燃气管道的专项要求,构建“质量-安全-环保”三位一体的验收理论体系。质量验收基于“管道完整性”理论,制定轨迹偏差、接口密封等核心指标的理论标准,确保管道满足长期运行要求;安全验收基于“压力试验”理论,通过气密性试验验证管道的抗泄漏能力,符合燃气高压运行的安全理论;环保验收基于“绿色施工”理论,考核泥浆处理、废弃物回收等指标,确保施工过程符合生态环保要求。验收过程采用“智能检测+人工复核”的理论模式,兼顾技术先进性与理论严谨性。

4 理论模型的实践验证与理论价值

4.1 实践验证的理论逻辑

结合城镇燃气管道非开挖施工的典型工程案例,对本文构建的理论模型进行验证。从理论应用角度,重点验证三项核心内容:一是3D模拟优化理论的可行

性,通过对比模拟参数与实际施工的契合度,验证耦合模型的理论合理性;二是环保泥浆循环理论的实用性,分析循环系统对施工安全与环保目标的协同效果,验证理论体系的实践价值;三是质量控制理论的有效性,通过全流程监测数据与验收结果,验证理论框架的管控能力。实践表明,基于本文理论模型的施工方案,能够有效解决传统工艺的理论矛盾,提升施工的安全性及经济性。

4.2 理论研究的核心价值

本文的理论价值体现在三个层面:一是填补了燃气管道非开挖施工的专项理论空白,构建了“工艺优化-质量控制-绿色施工”一体化的理论体系,为行业技术升级提供理论支撑;二是完善了“地质-设备-管道”耦合的理论模型,为工艺参数设计提供了量化理论依据,避免经验化带来的风险;三是建立了数字孪生技术在燃气施工中的应用理论,推动非开挖施工向“智能化、精细化”转型,为后续理论研究奠定基础。

5 结论与展望

本文针对城镇燃气管道非开挖施工的理论矛盾,通过系统研究得出以下结论:

①构建的3D模拟耦合优化理论,解决了“地质-设备-管道”参数匹配的理论问题,为工艺优化提供了量化逻辑;②建立的环保泥浆循环理论体系,实现了绿色施工与安全施工的理论协同,填补了燃气专项环保理论的空白;③设计的基于数字孪生的质量控制理论框架,形成了“事前-事中-事后”全流程的理论闭环,提升了质量管控的理论深度。三者共同构成了燃气管道非开挖施工的理论体系,为技术应用与标准化提供了核心支撑。

参考文献:

- [1] 王代琳.复杂地质条件下地下工程非开挖施工技术创新与应用[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第五届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.河北筑显建筑工程有限公司,2025:518-519.
- [2] 蓝燕云.顶管施工3D模拟软件的算法优化与理论模型构建[J].工程技术,2025,18(9):45-52.
- [3] 王建华,刘芳.燃气管道水平定向钻施工的耦合优化理论研究[J].燃气与热力,2024,44(3):38-43.
- [4] 陈峰,黄丽.燃气管道非开挖施工环保泥浆的配方理论与性能优化[J].施工技术,2024,53(2):78-82.
- [5] 杜维泉.复杂城区环境下燃气管道非开挖施工轨迹精准控制方法[J].石化技术,2025,32(11):272-274.