

城市燃气管道老旧管网更新改造技术与经济性分析

刘 强 (济南市华通燃气工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 城市燃气老旧管网的老化失效已成为威胁公共安全与能源保障的关键问题, 传统改造模式存在技术路径单一、经济性评估片面等局限。本文以技术创新与理论优化为核心, 从老旧管网失效机理的理论分析入手, 构建“智慧检测-分级改造-长效防护”的一体化技术体系, 深入阐述非开挖技术、防腐修复技术的理论原理与适用逻辑; 同时基于全生命周期成本理论, 建立多维度经济性评价框架, 突破传统成本核算的局限。研究表明, 基于理论适配的分级改造技术可实现改造效率与安全性的双重提升, 全生命周期成本理论的应用能更科学反映改造项目的长期效益, 为城市燃气老旧管网改造提供坚实的理论支撑与实践指导。

关键词: 城市燃气管道; 老旧管网改造; 技术理论; 全生命周期成本; 分级改造

中图分类号: TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0096-03

Technical and Economic Analysis of Aging Urban Gas Pipeline Network Upgrading and Renovation

Liu Qiang (Jinan Huatong Gas Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: The aging and failure of urban gas pipelines have become a critical issue threatening public safety and energy security. Traditional renovation models suffer from limitations such as singular technical approaches and one-sided economic evaluations. This paper focuses on technological innovation and theoretical optimization, beginning with a theoretical analysis of the failure mechanisms of aging pipelines. It constructs an integrated technical system of “smart detection-graded renovation-long-term protection,” thoroughly elaborating the theoretical principles and applicability logic of trenchless technology and anti-corrosion repair techniques. Meanwhile, based on the life-cycle cost theory, it establishes a multi-dimensional economic evaluation framework, overcoming the constraints of conventional cost accounting. The study demonstrates that graded renovation technology based on theoretical adaptation can achieve dual improvements in renovation efficiency and safety. The application of life-cycle cost theory provides a more scientific reflection of the long-term benefits of renovation projects, offering solid theoretical support and practical guidance for the renovation of aging urban gas pipelines.

Keywords: urban gas pipelines; aging pipeline network renovation; technical theory; life-cycle cost; phased renovation

城市燃气管道作为城市能源供应的核心基础设施, 其安全稳定运行直接关系到民生保障与城市可持续发展。随着服役年限的增长, 大量 2000 年前铺设的燃气管道逐渐进入老化期, 老旧管网的技术缺陷与安全隐患日益凸显。当前, 我国城市燃气老旧管网改造工作虽在政策推动下有序开展, 但仍面临技术体系不完善、理论支撑不足、经济性评价片面等问题。

传统改造模式多依赖经验型开挖更换, 缺乏对管网失效机理的深度理论分析, 导致技术选择与实际需求脱节; 经济性评估仅聚焦初期施工成本, 忽视了运维阶段、故障损失等长期成本因素, 难以实现改造项目的综合效益最优。基于此, 本文立足燃气工程理论与实践结合, 构建科学的改造技术体系与经济性评价框架, 通过理论层面的创新与优化, 为城市燃气老旧管网改造提供系统性的解决方案, 也为燃气行业职称评定提供具有理论深度的技术成果参考。

1 城市燃气老旧管网更新改造技术体系构建

1.1 技术体系构建的理论基础

老旧管网改造技术体系的构建应遵循“精准诊断

- 按需改造 - 长效防护”的核心逻辑, 以管网失效机理理论为依据, 结合技术可行性与安全性原则, 实现技术方案与管网实际状况的精准匹配。其理论核心在于: 通过科学的检测技术明确管网缺陷类型与程度, 基于分级分类理论制定差异化改造方案, 利用新型技术与材料实现管网性能的长效提升。

1.2 智慧检测技术的理论与应用

改造前的精准检测是实现科学改造的前提, 其核心理论基础是“缺陷识别与风险评估”。智慧检测技术通过多手段协同, 实现对管网缺陷的全方位、高精度识别, 突破传统人工检测的局限。

1.2.1 联合检测技术的理论逻辑

采用“CCTV 管道机器人检测 + 超声探伤 + 光纤传感”的联合检测模式, 遵循“可视化识别 - 精准量化 - 长期监测”的递进逻辑。CCTV 管道机器人检测基于机器视觉理论, 通过高清成像技术实现管道内部缺陷的可视化识别; 超声探伤技术依据超声波传播理论, 利用超声波在管材中的反射、折射特性, 实现对管壁厚度、内部缺陷的精准量化; 光纤传感技术则基

于光信号传输理论，通过分布式光纤传感器实现对管道周边环境变化与结构变形的长期监测，为改造后运维提供数据支撑。

1.2.2 检测结果的风险评估理论

检测数据的处理与评估应遵循风险分级理论，根据缺陷类型、严重程度、影响范围等指标，建立风险评估体系，将管网划分为不同风险等级，为后续分级改造提供理论依据。风险评估的核心在于将检测数据转化为可指导实践的改造决策，避免盲目改造与过度改造。

1.3 分级改造技术的理论与实践

基于风险评估结果，构建分级改造技术体系，遵循“差异化适配、微创高效、经济合理”的理论原则，针对不同风险等级的管网路段，采用对应的改造技术。

1.3.1 重度风险段：非开挖更换技术

对于管材严重老化、缺陷集中的重度风险段，非开挖更换技术是最优选择，其核心理论基础是“微创施工与结构替代”。该技术通过水平定向钻（HDD）等方法，在不破坏地面环境的前提下实现管道更换，突破传统开挖施工的空间限制。

非开挖更换技术的理论核心包括：导向钻进的轨迹控制理论，通过实时监测与调整，确保钻孔轨迹符合设计要求，避免与其他地下管线冲突；管道回拖的力学平衡理论，控制回拖力与管道受力状态，确保管道在回拖过程中不发生变形或损伤；接口连接的密封与强度理论，采用电热熔等先进连接技术，确保接口性能与管材本体一致，满足燃气输送的安全要求。与传统开挖技术相比，非开挖技术不仅符合城市地下空间开发利用的理论要求，还能减少对城市交通与环境的影响，体现了“绿色施工”的理论理念。

1.3.2 中度风险段：防腐内衬修复技术

对于管材仍有一定强度、以腐蚀缺陷为主的中度风险段，防腐内衬修复技术基于“内防护强化”理论，通过在管道内部敷设防腐内衬材料，隔绝腐蚀介质与管壁的接触，实现管网性能的修复与提升。

该技术的理论要点包括：内衬材料的兼容性理论，确保内衬材料与原有管材在物理、化学性质上相互适配，不发生不良反应；内衬敷设的贴合理论，通过翻转、固化等工艺，确保内衬与管壁紧密贴合，形成完整的防护层；固化工艺的热力学理论，优化固化温度、时间等参数，确保内衬材料充分固化，发挥最佳防腐性能。与更换技术相比，防腐内衬修复技术更符合“资源节约”理论，能最大限度利用原有管道结构，降低改造成本。

1.3.3 轻度风险段：局部修复与监测强化技术

对于缺陷轻微、分布零散的轻度风险段，采用“局部修复+监测强化”的改造模式，遵循“精准治理与风险预警”的理论结合。局部修复技术基于“靶向处理”理论，针对具体缺陷点进行针对性修复，避免全段改造造成的资源浪费；监测强化技术则基于“预防为主”理论，通过加装泄漏监测、压力传感等设备，实现对管网运行状态的实时监控，及时发现并处置潜在风险。

1.4 新型材料的适配理论

管材与材料的选择是保障改造效果的关键，应遵循“性能适配、寿命匹配、经济合理”的理论原则。新型材料的适配需综合考虑管网运行压力、介质特性、环境条件等因素，实现材料性能与使用需求的精准匹配。

PE100-RC管作为非开挖更换的优选材料，其理论优势在于抗开裂性能与耐腐蚀性能的协同提升，通过材料改性技术，解决了传统PE管在复杂环境下的抗裂性不足问题，符合长寿命管网的建设理论；纳米防腐内衬材料则基于纳米材料的界面作用理论，通过纳米颗粒的填充与改性，提升内衬材料的致密性与抗渗性，延长防腐寿命；不锈钢管等特种管材则适用于特殊工况，基于材料的高强度与耐腐蚀性理论，满足穿越河流、铁路等复杂场景的使用要求。

2 城市燃气老旧管网改造的经济性理论分析

2.1 经济性分析的理论框架

传统经济性分析仅关注初期施工成本，存在明显的理论局限。本文基于全生命周期成本（LCC）理论，构建“前期检测-施工建设-后期运维-故障损失”的全维度经济性评价框架，突破传统成本核算的片面性，实现对改造项目综合效益的科学评估。

全生命周期成本理论的核心在于将项目的成本周期延伸至整个服役过程，不仅考虑初始投资，还充分考虑后续的运维成本、维修成本、故障损失成本等，符合“长期效益最优”的工程经济理论。该理论在老旧管网改造中的应用，能更全面地反映不同改造方案的经济合理性，为决策提供科学依据。

2.2 各阶段成本的理论分析

2.2.1 检测阶段成本

检测成本是全生命周期成本的初始环节，其理论核心是“成本-效益平衡”。智慧检测技术的初期投入虽高于传统人工检测，但能通过精准识别缺陷，避免后续盲目施工造成的成本浪费，体现了“精准检测-降本增效”的理论逻辑。从理论层面来看，检测成本的投入应与后续改造的成本节约形成正向关联，通过科学的检测实现改造资源的优化配置。

2.2.2 施工阶段成本

施工成本是全生命周期成本的核心组成部分，不同改造技术的成本构成遵循不同的理论逻辑。传统开挖技术的初期施工成本看似较低，但需考虑地面修复、交通疏导等隐性成本，符合“显性成本+隐性成本”的全成本理论；非开挖技术的初期投资相对较高，但能避免隐性成本的产生，且施工效率更高，符合“效率-成本”的优化理论。分级改造技术的应用则基于“按需投入”理论，根据管网风险等级合理分配施工资源，实现施工成本的优化配置。

2.2.3 运维阶段成本

运维成本的理论分析核心是“技术适配-成本节约”。采用新型材料与智慧监测技术的改造方案，能显著降低后续运维成本，这一过程符合“前期投入-长期节约”的成本分摊理论。新型管材的耐腐蚀性与耐久性，减少了维修更换的频率；智慧监测技术的应用则实现了运维的精准化，降低了人工与物资消耗，从理论上构建了“低运维成本”的长效机制。

2.2.4 故障损失成本

故障损失成本是全生命周期成本中易被忽视的重要部分，其理论基础是“风险-成本关联”。老旧管网的故障不仅会造成直接的经济损失，还可能引发安全事故，产生间接损失。科学的改造技术能从根本上降低故障发生的概率，符合“风险防控-成本降低”的理论逻辑，其经济效益不仅体现在直接损失的减少，更体现在公共安全保障与社会稳定的间接价值。

2.3 经济性评价的理论优化

传统经济性评价多采用静态成本对比，缺乏对时间价值与风险因素的考虑。本文引入基准折现率与风险系数，构建动态经济性评价模型，符合工程经济中的动态分析理论。通过将未来的运维成本与故障损失成本折算为现值，能更客观地反映不同改造方案的长期经济效益；风险系数的引入则能体现不同技术方案的风险水平，使经济性评价更具科学性与全面性。

从理论层面来看，最优改造方案应是技术可行性、安全性与经济性的有机统一，而非单纯追求某一维度的最优。全生命周期成本理论的应用，为实现这一目标提供了科学的评价工具，使改造决策更符合城市燃气行业的可持续发展要求。

3 工程实践中的理论应用验证

3.1 项目背景

某城市老城区燃气管网建成于20世纪80年代，管网总长12km，主要采用灰口铸铁管与镀锌钢管，因服役年限长、缺陷频发，需进行系统性改造。项目采用本文构建的“智慧检测-分级改造-全生命周期

经济性评价”理论体系，指导改造实践。

3.2 理论应用过程

基于联合检测与风险评估理论，对管网进行全面检测与风险分级，明确重度风险段3km、中度风险段5km、轻度风险段4km；

依据分级改造理论，重度风险段采用非开挖更换技术，选用PE100-RC管；中度风险段采用纳米防腐内衬修复技术；轻度风险段采用局部修复与监测强化技术；

基于全生命周期成本理论，对改造方案进行经济性评估，优化技术选择与资源配置。

3.3 应用效果

改造项目的实践验证了理论体系的科学性与可行性：从技术效果来看，改造后管网的安全性能显著提升，缺陷发生率降至零，符合“精准改造”的理论预期；从经济效果来看，基于全生命周期成本理论的方案较传统方案实现了长期成本的显著节约，体现了理论指导的经济价值；从社会效果来看，改造过程对城市环境与交通的影响降至最低，符合“绿色施工”与“民生保障”的理论要求。

4 结论

本文以城市燃气老旧管网改造为研究对象，从理论创新与体系构建入手，形成了以下核心结论：

老旧管网的失效是材料老化、环境作用、设计与运维缺陷等多因素共同作用的结果，基于材料力学、电化学腐蚀等理论的失效机理分析，为改造技术的选择提供了理论依据；构建的“智慧检测-分级改造-长效防护”技术体系，遵循“精准适配、微创高效”的理论原则，突破了传统改造技术的单一性局限，实现了技术与实际需求的科学匹配；基于全生命周期成本理论的经济性评价框架，克服了传统成本核算的片面性，能更全面、客观地反映改造项目的综合效益。

参考文献：

- [1] 渠沛然. 焕新燃气管网“生命线”[N]. 中国能源报, 2025-07-28(008).
- [2] 刘芳, 刘栋国. 城市燃气管网的老化评估与更新改造技术[J]. 石化技术, 2025, 32(03): 445-446.
- [3] 赵越超, 李春德. 城市燃气管道更新改造工程常见问题及措施[J]. 煤气与热力, 2023, 43(06): 38-42.
- [4] 鲁童童, 金文龙, 王秋麟. 美国城市燃气管网基础设施更新改造成本回收机制对我国的启示[J]. 天然气技术与经济, 2024, 18(05): 51-57.
- [5] 张大杰, 刘苗. 城市道路老旧燃气管网改造工程施工问题难点及对策[J]. 城市管理与科技, 2024, 25(04): 31-32+45.