

城市燃气管道老化更新改造技术路径与效益分析

卢宝苑 (济南能源工程集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 我国城市燃气管道中运行年限较长的管道占比已达到需重点关注的水平, 由老化引发的泄漏事故频发, 成为威胁城市安全运行的关键隐患。本文基于全生命周期管理理念, 构建“精准检测-风险分级-差异化改造-智慧运维”一体化技术路径, 系统整合超声导波检测、CIPP原位固化修复、新型环保管材应用等前沿技术, 结合典型城市改造实践案例, 从安全、经济、环境、社会四大维度开展理论层面的效益分析。研究表明, 新型改造技术可显著降低管道事故风险, 优化全生命周期成本结构, 减少环境影响, 为城市燃气管道老化更新改造提供工程理论与实操结合的方案, 助力城市安全低碳转型。

关键词: 城市燃气管道; 老化更新改造; 非开挖修复; 全生命周期效益; 智慧运维; 风险分级

中图分类号: TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0099-03

Technical Pathways and Benefit Analysis for the Aging and Renovation of Urban Gas Pipelines

Lu Baoyuan (Jinan Energy Engineering Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: In China, the proportion of aging pipelines in urban gas networks has reached a level requiring focused attention, with frequent leakage incidents caused by aging posing a critical threat to urban safety operations. Based on the life-cycle management concept, this study constructs an integrated technical pathway of “precise inspection-risk grading-differential renovation-smart operation and maintenance,” systematically integrating advanced technologies such as ultrasonic guided wave inspection, CIPP in-situ cured-in-place pipe rehabilitation, and the application of new environmentally friendly pipe materials. Through typical urban renovation case studies, the research conducts theoretical benefit analysis from four dimensions: safety, economy, environment, and society. The findings indicate that new renovation technologies can significantly reduce pipeline accident risks, optimize lifecycle cost structures, and minimize environmental impacts, providing a solution combining engineering theory and practical implementation for the aging renewal of urban gas pipelines, thereby supporting urban safety and low-carbon transformation.

Keywords: urban gas pipelines; aging renewal and renovation; trenchless repair; life cycle benefits; smart operation and maintenance; risk classification

1 城市燃气管道老化现状与改造痛点

1.1 老化现状与安全风险

管道老化特征: 我国城市燃气管道老化呈现出材质类型多样、运行年限跨度大、空间分布分散的典型特征。早期建设阶段采用的铸铁管、镀锌钢管等材质, 因自身抗腐蚀性能较弱, 长期处于地下复杂环境中, 易出现管壁腐蚀、穿孔等损伤; 部分老化管道敷设于城市核心区域与老旧居民区, 周边建筑密集、地下管线网络复杂, 进一步增加了维护与改造的技术难度。从行业检测数据来看, 老化管道的泄漏隐患检出率明显高于新建管道, 且隐患集中分布于运行时间较长的管道段落。

核心安全风险: 老化管道的安全风险具有多维度扩散性——从直接风险来看, 燃气泄漏遇火源易引发爆炸、火灾等恶性事故; 从环境风险来看, 泄漏燃气中的甲烷作为强温室气体, 其无序排放会加剧区域环境压力; 从间接风险来看, 管道破裂可能破坏周边地下管线系统 (如给排水、电力、通信管线), 引发连

锁性次生灾害, 对城市基础设施系统完整性造成冲击。

1.2 传统改造模式痛点

开挖改造弊端: 传统“破路开挖-整体更换”模式的核心问题在于对城市运行系统的干扰性。该模式需占用大量路面空间, 延长施工周期, 对城市交通通行效率与居民日常生活造成显著影响; 同时, 开挖过程中对地下管线分布的探测局限性, 易导致其他管线受损, 增加施工安全风险; 此外, 开挖后路面恢复、绿化重建等环节需额外投入资源, 整体改造成本与资源消耗偏高。

检测评估粗放: 传统检测手段以人工巡检与压力试验为主, 对管道内部隐蔽缺陷 (如局部腐蚀、微小裂纹) 的识别能力有限, 易出现漏检情况, 导致风险评估结果与实际隐患存在偏差; 同时, 行业内缺乏统一的风险分级标准, 改造资源分配易出现“重形式轻实效”问题, 高风险管道未能优先得到改造, 低风险管道存在过度改造的资源浪费现象。

运维衔接不足: 传统改造模式多聚焦于“改造完

成”这一阶段性目标，未能建立改造后全生命周期运维体系。改造后的管道运行状态缺乏实时监测手段，无法动态跟踪管道性能变化，导致改造效益难以持续发挥，管道运行风险可能在短期内再次累积。

2 城市燃气管道老化更新改造一体化技术路径

2.1 第一步：精准检测技术体系——实现“隐患可视化”

超声导波检测技术基于弹性波传播原理，可对埋地管道进行全长范围的缺陷扫描，能够有效识别管壁厚减薄、局部腐蚀坑、纵向裂纹等典型缺陷，相较于传统检测技术，其检测覆盖范围更广、效率更高，可大幅减少检测过程中对地面环境的干扰；分布式光纤传感技术利用光纤的光传输特性，通过在管道周边布设传感光纤，实现对管道温度变化、应力变形、燃气泄漏等参数的实时监测，具有响应速度快、定位精度高、抗干扰能力强的特点，可构建全天候监测网络；无人机巡检与GIS地理信息系统结合，可对架空管道、管廊内管道进行全方位可视化扫描，通过三维建模技术生成管道数字化档案，为后续风险评估与改造方案制定提供精准的空间数据支撑，实现“一管一档”的精细化管理。

检测流程优化：精准检测需遵循“全域覆盖-重点聚焦-缺陷确认”的递进式流程。首先通过无人机巡检与GIS系统完成区域内管道分布的全域普查，明确管道敷设环境与周边设施关联关系；其次针对运行年限较长、材质抗腐蚀性能较弱的管道段落，采用超声导波技术开展重点详查，锁定潜在隐患区域；最后通过内窥镜检测等手段对疑似缺陷点进行现场复核，确保隐患识别无遗漏，为后续风险分级提供可靠依据。

2.2 第二步：风险分级评估模型——实现“改造精准化”

风险分级评估需构建“多层次指标+风险矩阵”的理论模型，通过科学赋权明确改造优先级，核心在于实现“资源精准匹配风险”。

评估指标体系：一级指标（核心权重）：管道技术状态，涵盖材质特性、运行年限、腐蚀损伤程度、缺陷等级等关键参数，直接反映管道自身结构完整性；二级指标（重要权重）：环境风险，包括管道周边人口密度、建筑物功能类型、地下管线密集程度等，体现风险扩散后的影响范围与严重程度；三级指标（辅助权重）：运行负荷，涉及管道日常输气量、运行压力等级等，反映管道运行强度对缺陷发展的加速效应；四级指标（补充权重）：维护难度，包含管道敷设地形条件、周边交通流量等，影响改造实施的可行性与成本投入。

风险分级标准：基于指标评估得分，将管道划分

为高、中、低三个风险等级。高风险管道需纳入优先改造范畴，在最短周期内完成改造；中风险管道可结合城市发展规划分阶段推进改造；低风险管道暂不进行大规模改造，通过强化定期检测与运维管理控制风险，实现改造资源的最优配置。

2.3 第三步：差异化改造技术路径——实现“效益最大化”

差异化改造的核心逻辑是“技术适配场景”，根据管道风险等级、敷设环境、运行需求选择适宜的改造技术，避免“技术一刀切”导致的效益浪费。

高风险管道：原位更换+新型管材。对于敷设于城市核心区、人口密集区的高风险管道，需采用彻底的原位更换方案，同时优先选用新型环保管材（如高密度聚乙烯管）。此类管材具有抗腐蚀性能强、柔韧性好、使用寿命长的优势，接口采用热熔焊接技术，可大幅提升管道系统的密封性能与结构稳定性；施工过程中采用非开挖定向钻穿越技术，通过地下导向钻进、扩孔、管道回拖等工序完成管道更换，避免大规模地面开挖，减少对城市交通与居民生活的干扰，缩短改造周期，实现“微创化”施工。

中风险管道：非开挖修复技术。对于腐蚀损伤程度较轻、管径较小的中风险管道，可采用CIPP（原位固化法）修复技术。该技术通过将浸有树脂的软管送入管道内部，利用紫外光或热固化使树脂成型，在管道内壁形成完整的内衬层，从而恢复管道结构强度与密封性能，延长管道使用寿命，且成本低于传统更换方案；针对接口松动、局部腐蚀等局部缺陷，可采用机械内衬修复技术，将适配的内衬管拉入原管道并通过扩张使其贴合管壁，实现局部缺陷的快速修复，进一步缩短施工周期，降低改造对管道正常供气的影响。

低风险管道：局部加固+智能监测。对于缺陷数量少、损伤程度轻的低风险管道，可采用局部加固技术（如碳纤维布加固），针对腐蚀薄弱段进行结构强化，提升管道承载能力与抗损伤能力；同时嵌入物联网智能监测设备（如压力传感器、甲烷泄漏传感器），将监测数据实时上传至智慧燃气管理平台，实现对管道运行状态的动态跟踪，通过提前预警潜在风险，避免缺陷进一步发展，延长管道安全运行周期。

2.4 第四步：全生命周期智慧运维——实现“效益长效化”

全生命周期智慧运维是保障改造效益持续发挥的关键，核心在于构建“数字化+常态化”的运维体系。

数字化运维平台：整合管道检测数据、改造施工记录、实时监测数据，构建管道数字孪生模型。通过数字孪生技术实现管道物理状态与数字模型的实时映

射,直观呈现管道运行参数与缺陷变化趋势,为风险预警、维护决策提供数据支撑,实现运维管理的智能化与精准化。

定期维护机制:基于管道风险等级制定差异化的定期维护计划,高风险改造管道需缩短检测周期,强化状态评估;中风险修复管道按常规周期开展检测;低风险管道结合智能监测数据动态调整维护频率,避免过度维护与维护不足,实现运维资源的高效利用。

3 改造工程多维效益分析

3.1 安全效益

从安全风险管控角度来看,新型改造技术通过精准识别隐患、彻底修复缺陷、实时监测状态,可大幅降低管道泄漏事故发生概率,缩短风险响应时间。一方面,通过结构修复与材质升级,从根本上减少燃气泄漏源头;另一方面,通过智能监测实现风险提前预警,为应急处置争取时间,从而有效杜绝重大安全事故,保障居民生命财产安全与城市公共安全,强化城市基础设施系统的抗风险能力。

3.2 经济效益

从全生命周期成本管理视角分析,新型改造技术虽可能在初期投资阶段有所调整,但通过优化运维流程、减少事故损失,可实现长期成本优化。一方面,非开挖技术减少了路面开挖与恢复成本,缩短了施工周期,降低了对城市交通与商业活动的干扰损失;另一方面,智能运维减少了盲目巡检成本,提前预警避免了因事故导致的高额赔偿与停产损失,整体优化了管道全生命周期内的成本结构,提升了改造投资的长期回报率。

3.3 环境效益

从生态环境保护层面来看,新型改造技术的环境友好性主要体现在三个方面:一是非开挖施工减少了地面开挖对城市绿化、土壤结构的破坏,降低了施工扬尘与噪声污染;二是新型环保管材的应用减少了传统金属管材腐蚀导致的重金属污染,且部分管材可回收利用,符合循环经济理念;三是减少燃气泄漏降低了甲烷等温室气体排放,助力城市实现碳减排目标,契合绿色低碳发展要求。

3.4 社会效益

从城市运行与民生保障角度来看,新型改造技术的社会效益主要体现在对城市功能与居民生活的优化。一是缩短施工周期、减少地面开挖,降低了对城市交通通行的干扰,缓解了交通拥堵问题;二是优化施工组织与供气保障方案,减少了改造过程中居民用气中断时间,提升了居民生活满意度;三是保障管道系统稳定运行,避免因管道故障影响商业、工业用气,

维护了城市经济活动的正常开展,强化了城市基础设施对民生与经济的支撑作用。

4 典型工程案例验证

4.1 北京朝阳区老旧小区燃气管道改造项目

该项目针对老旧小区管道老化严重、周边环境复杂的特点,采用差异化改造方案:对高风险管道段采用非开挖定向钻技术更换新型管材,对中风险管道采用 CIPP 原位固化修复,对低风险管道实施局部加固与智能监测。从实施效果来看,改造过程中有效控制了小区居民生活的干扰,改造后管道系统稳定性显著提升,泄漏风险大幅降低,且通过智能运维实现了对管道状态的持续管控,为老旧小区基础设施更新提供了可复制的技术模式。

4.2 上海浦东核心区燃气管道改造项目

该项目聚焦城市核心区交通繁忙、地下管线密集的场景特点,以“微创化、低干扰”为核心原则,全面采用非开挖定向钻穿越技术更换管道,并同步布设分布式光纤传感系统实现全程监测。改造过程中未对核心区主干道交通造成显著影响,也未损坏周边地下管线,改造后管道运行压力稳定性与密封性能大幅提升,通过环境管理体系认证,验证了非开挖技术在复杂城市环境中的适用性,为核心区基础设施更新提供了理论与实践结合的参考。

5 结论

我国城市燃气管道老化更新改造需突破传统“一刀切”模式的局限,通过“精准检测-风险分级-差异化改造-智慧运维”一体化技术路径,实现安全、经济、环境、社会效益的协同提升。从理论与实践结合的角度来看,新型改造技术通过技术适配场景、资源精准匹配风险,不仅能够有效解决管道老化问题,更能优化城市基础设施运行效率,具有显著的行业推广价值。

参考文献:

- [1] 李秀芳.城市燃气管道老化更新改造分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(13):118-120.
- [2] 本刊通讯员.海南2024年计划更新改造燃气老旧管道700km[J].城市燃气,2024,(04):49.
- [3] 本刊通讯员.青海省对燃气等城市管网全面更新改造[J].城市燃气,2023,(09):51.
- [4] 张毓文.地下燃气管道老化更新改造方案探讨[J].上海煤气,2023,(03):18-20+34.
- [5] 张玮玮,宋绍旗.城市燃气管道等老化更新改造对钢材消费的影响分析[J].冶金经济与管理,2023(04):15-18.