

城市燃气管道老旧管网更新改造技术与经济性分析

刘东美 李晓琳 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 针对我国城市老旧燃气管道安全隐患突出、传统改造模式粗放等问题, 基于风险分级理论与全生命周期理念, 构建“风险分级-技术适配-经济量化”三维更新改造体系。通过划分高、中、低三类风险管网, 匹配原位换管、内衬修复、局部补强等差异化技术, 结合全生命周期视角分析改造经济性, 并以某省会城市老旧管网改造项目验证可行性。结果表明, 该体系可显著降低改造成本与事故率, 实现安全效益与经济效益协同提升, 为城市老旧燃气管网改造提供科学决策依据, 具有重要工程应用价值。

关键词: 城市燃气管道; 老旧管网更新改造; 分级适配技术; 全生命周期; 经济性分析; 安全运维
中图分类号: TU996.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 004-0106-03

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

Liu Dongmei, Li Xiaolin (Shandong Portgas Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000)

Abstract: In response to the prominent safety hazards of aging urban gas pipelines in China and the issues of extensive traditional renovation models, a three-dimensional renewal and renovation system—“Risk Grading-Technology Adaptation-Economic Quantification”—was established based on risk classification theory and the whole life cycle concept. By categorizing pipelines into high, medium, and low-risk groups, differentiated technologies such as in-situ pipe replacement, lining repair, and localized reinforcement were matched. The economic feasibility of renovations was analyzed from a whole life cycle perspective, and the system’s viability was validated through a case study of an aging pipeline renovation project in a provincial capital city. The results demonstrate that this system can significantly reduce renovation costs and accident rates, achieving synergistic improvements in safety and economic benefits. It provides a scientific decision-making basis for the renovation of aging urban gas pipelines and holds important practical engineering value.

Keywords: Urban gas pipelines; Aging pipeline network renovation and upgrading; Tiered adaptation technology; Full life cycle; Economic analysis; Safe operation and maintenance

我国城市燃气管道已进入老龄化阶段, 大量运行年限较长的管网面临材质老化、腐蚀泄漏等安全隐患, 成为影响城市安全运行的重要因素。为破解这一问题, 国家出台专项政策推动老旧管网更新改造, 明确要求科学选择改造技术、合理控制成本。

1 城市老旧燃气管网现状与改造痛点

1.1 老旧管网核心特征

①材质与结构缺陷: 早期铺设的管网多采用灰口铸铁管、镀锌钢管等材质, 抗腐蚀能力弱、韧性差, 易出现断裂或泄漏; 接口密封方式落后, 长期使用后密封性能衰减, 进一步增加安全风险。②运行环境复杂: 多数老旧管网位于城市核心区或老旧城区, 周边建筑物密集、地下管线交错, 施工空间受限; 部分管网埋深不符合安全规范, 易受地面荷载、地质沉降影响, 加剧管网损伤。③基础数据缺失: 早期工程档案管理不完善, 部分管网的走向、埋深、材质等关键信息模糊, 给改造方案设计、施工组织带来困难, 增加了改造过程中的不确定性。

1.2 传统改造模式痛点

①技术选型盲目: 未结合管网实际风险水平选择

技术, 对低风险管网过度采用开挖换管, 造成投资浪费; 对高风险管网若仅采用局部修复, 又难以彻底消除安全隐患。②成本考量片面: 仅关注施工阶段的直接成本, 忽视设计、运维、退役等后续环节的投入, 也未考虑改造后减少的事故损失、能耗节约等收益, 导致经济性评价不全面。③施工影响突出: 传统开挖施工方式需大面积破坏路面, 不仅延长施工周期, 还会影响交通通行与居民日常生活, 增加社会成本, 引发群众不满。

2 分级适配更新改造技术体系构建

2.1 风险分级标准设计

基于管网自身状况(材质、运行年限、泄漏风险)与周边环境(人口密度、重要场所分布、施工条件), 将老旧管网划分为三类风险等级, 并制定量化评估指标体系。

高风险管网: 采用灰口铸铁、镀锌钢管等低强度材质, 运行年限超过 25 年且存在明显腐蚀、裂纹等结构性缺陷, 结合激光甲烷遥测、内检测等技术确认泄漏风险 > 50%。同时, 管网覆盖区域符合以下任一条件: ①每平方公里人口密度 > 1.5 万人的商业中心、学

校聚集区；②距离加油站、化工厂等易燃易爆场所半径 500m 以内；③穿越地下轨道交通、高压电缆等重要设施的交叉区域。此类管网安全隐患极大，需纳入年度重点改造计划，优先采用非开挖修复或整体更换工艺。

中风险管网：主要为早期 PE 或钢质管道，运行年限 15–25 年，局部存在轻微腐蚀或接口渗漏问题，泄漏风险评估在 20%–50% 之间。周边环境包含普通居民区、交通主干道下方等管线密集区域，施工时需协调多部门进行交通疏导和管线迁移。建议采用 3–5 年滚动改造计划，综合运用管道内衬修复、局部换管等技术降低改造成本。

低风险管网：采用新型耐腐蚀材质（如增强型 PE100），运行年限 < 15 年，经智能监测系统确认整体运行状态良好，泄漏风险 < 20%。管网分布于工业园区外围、城郊结合部等空旷区域，具备充足施工空间。对此类管网建立动态监测 + 预防性维护机制，通过定期清管、防腐涂层修补等措施延长使用寿命，暂缓大规模改造，待经济技术条件成熟后实施升级。

风险等级判定需构建三维评估模型：纵向整合管道建设档案、历史维修记录等时间序列数据；横向叠加 GIS 地理信息系统标注的人口热力图、危险源分布；深度融合智能传感器实时采集的压力波动、燃气浓度等运行参数。同时，引入专家评审机制，对复杂场景管网进行多轮复核，确保分级结果的科学性与实操性。

2.2 差异化技术适配方案

2.2.1 高风险管网：原位换管 + 智能监测

针对安全隐患突出的高风险管网，采用原位换管技术彻底消除隐患。考虑到城区施工条件限制，优先选用非开挖定向钻技术，减少路面开挖；更换后的管道选用耐腐蚀、韧性好的优质管材，确保长期安全运行。同时配套安装泄漏监测、压力监测等智能设备，实时掌握管网运行状态，提前预警潜在风险。

2.2.2 中风险管网：内衬修复 + 防腐强化

对于结构基本完好、仅存在局部腐蚀或密封问题的中风险管网，采用内衬修复技术，通过现有管道检查井植入内衬管，形成“旧管 + 内衬”的复合结构，提升管网抗压与防腐能力。无需大面积开挖，施工周期短，对周边环境影响小；同时对管道接口、弯头等薄弱部位进行防腐强化处理，进一步降低泄漏风险。

2.2.3 低风险管网：局部补强 + 预防性维护

对运行状态良好的低风险管网，无需大规模改造，仅针对局部腐蚀点、接口渗漏处采用卡箍补强、密封胶封堵等局部修复技术；同时建立常态化预防性维护机制，定期开展管道检测、清管作业，及时发现并处

理微小隐患，延长管网使用寿命，避免过度投资。

2.3 技术创新方向

数字孪生辅助设计：依托 BIM（建筑信息模型）与 GIS（地理信息系统）技术，构建管网全生命周期数字孪生模型。通过接入管道材质、埋深、服役年限等基础信息，融合内检测（ILI）获取的腐蚀缺陷数据与三维激光扫描的周边环境数据，搭建高保真虚拟管网系统。利用该系统模拟非开挖修复、原位换管等不同改造技术的施工流程，分析开挖深度、支护方案对周边建筑沉降的影响，量化不同管材选型的成本效益曲线。

在建模过程中，运用高精度传感器网络实时采集管道运行数据，通过物联网技术将压力、温度、流量等参数同步至数字孪生模型，实现虚拟与现实的动态交互。例如在某老旧城区改造项目中，借助数字孪生技术提前发现设计方案中 3 处潜在冲突点，通过优化施工时序与工艺参数，使施工效率提升 25%，返工率降低 40%。同时，利用数字孪生模型对改造后的管网进行长期性能预测，为后续运维管理提供数据支撑。

绿色施工理念融入：创新采用“模块化分段施工 + 智慧调度管理”模式，基于城市交通大数据平台实时监测车流量，动态规划每日 6:00–9:00、17:00–20:00 禁止施工时段，同步运用声屏障、低噪音设备将施工噪声控制在 55 分贝以下。引入智能围挡系统，集成喷淋降尘、视频监控等功能，通过 AI 算法自动识别扬尘超标区域并启动喷淋装置，将施工现场 PM2.5 浓度控制在 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内。

建立废旧管材回收处理体系，对拆除的铸铁管进行切割熔炼，回收金属材料利用率达 95%；开发渣土再生利用技术，将挖掘产生的渣土加工为透水砖、路基填料等再生建材。在试点工程中，联合专业环保企业搭建移动式再生建材生产线，实现废弃物资源化利用率 100%，单位工程碳排放量较传统工艺下降 38%。同时，通过区块链技术对再生建材的生产、运输、使用全过程进行溯源管理，确保产品质量可追溯，有效减少施工对城市生态的负面影响。

3 全生命周期经济性分析框架

3.1 成本构成核心维度

全生命周期经济性分析需覆盖管网改造的设计、施工、运维、退役全阶段，而非仅关注施工成本。每个阶段的成本构成既相互关联又各具特点，需系统性统筹规划。

设计阶段：该阶段是管网改造的基石，投入直接影响项目整体效益。现场勘查需借助激光雷达、探地雷达等先进设备，对地下管线分布、地质条件进行三维建模，成本约占设计总费用的 40%；方案设计需结合城市燃气

负荷预测数据，通过水力计算软件优化管径、路由，引入 BIM 技术进行管线碰撞模拟，规避设计缺陷；数据补测针对历史资料缺失区域，需人工开挖探坑或采用非开挖探测技术，确保基础数据完整度。合理的设计投入可减少施工阶段 15%–20% 的返工成本。

施工阶段：作为资金密集环节，不同技术路径成本差异达 30%–50%。管材采购方面，新型耐腐蚀聚乙烯（PE）管较传统铸铁管单价高 20%–30%，但使用寿命延长 1 倍；施工设备租赁中，非开挖定向钻设备日均租赁成本约 8000–12000 元，而明挖施工的机械组合成本约 4000–6000 元；人工费用占比约 35%，交通疏导费用受施工区域交通流量影响显著，繁华路段单日疏导成本可达 2000–5000 元。

运维阶段：改造后的管网运维成本呈现明显的技术路径依赖。采用智能传感器 + 物联网监测系统的管网，初期设备安装成本增加 15%，但通过实时压力、泄漏监测，可降低人工巡检频次 40%，减少突发事故维修成本 30%；定期的内检测费用根据检测技术不同（如漏磁检测、超声波检测），单公里成本在 3000–8000 元之间；预防性维护策略可将管网故障率降低 50%，显著提升经济性。

退役阶段：管网退役成本常被忽视，但合理规划可节省后期支出。拆除工程中，非破坏性拆除技术虽单价较传统切割高 10%–15%，但可保留部分管材残值；场地修复需根据土壤污染程度选择原位修复或异位处理，重度污染区域修复成本可达每立方米 2000–5000 元；在前期设计阶段预留退役接口、标注材质信息，可使拆除效率提升 30%，降低退役阶段综合成本 25%。

3.2 收益分析关键视角

改造收益不仅包括直接经济收益，还涵盖安全与社会效益。①直接收益：改造后减少天然气泄漏损耗，降低运维成本；避免因泄漏引发的事故损失，如财产赔偿、停产影响等。②间接收益：享受政府老旧管网改造专项补贴；减少施工对交通、居民生活的影响，降低社会成本；提升城市燃气供应可靠性，保障民生与经济发展。

3.3 经济性评价核心思路

①评价改造方案经济性时，需综合考量成本与收益的长期平衡；②净现值：衡量改造项目全生命周期内收益与成本的差值，反映项目整体盈利性；③投资回收期：评估收回改造投资所需时间，为资金安排提供参考；④效益成本比：对比总收益与总成本，判断项目经济合理性。

无需过度依赖复杂计算，重点在于树立“全周期

算账”理念，避免因短期成本考量选择不合理技术，导致后期投入增加。

4 工程案例实践验证

4.1 案例背景

某省会城市存在大量老旧燃气管道，涵盖高、中、低不同风险等级，传统改造模式下投资大、扰民问题突出。为提升改造效果，该项目采用本文构建的分级适配体系，针对不同风险管网选择差异化技术，兼顾安全与经济性。

4.2 改造实施过程

①风险分级：通过现场勘查与管道检测，明确高、中、低风险管网范围，优先推进高风险区域改造；②技术选型：高风险管网采用非开挖换管技术，中风险管网实施内衬修复，低风险管网开展局部补强与维护；③过程管控：运用数字孪生技术优化施工方案，采用绿色施工方式减少环境影响，确保改造顺利推进。

4.3 改造实施效果

①安全效益：改造后管网泄漏隐患大幅减少，事故发生率显著下降，居民用气安全得到有效保障；②经济效益：相比传统“一刀切”换管模式，分级适配改造降低了总体投资成本，同时减少后期运维投入，投资回收周期缩短；③社会效益：非开挖、分段施工方式减少了路面开挖与交通影响，施工扰民问题得到缓解，获得居民与政府的认可。

案例表明，分级适配的改造体系可实现安全、经济、社会三重效益的协同提升，具有较强的实践价值。

5 结论

本文构建的“风险分级 – 技术适配 – 经济量化”三维体系，打破了传统改造模式的粗放性，通过差异化技术选型与全生命周期经济性考量，实现了老旧燃气管网改造的科学决策。工程案例验证了该体系的可行性，可有效降低改造成本、提升安全水平，为城市燃气管道老旧管网更新改造提供了系统性解决方案。

参考文献：

- [1] 张军, 刘刚. 燃气管道内衬修复技术在老旧管网改造中的应用 [J]. 中国市政工程, 2022,(4):65-68.
- [2] 李长俊, 杨露, 贾文龙. 城市燃气老旧管网改造技术现状与发展 [J]. 煤气与热力, 2021,41(8):1-5.
- [3] 王冰, 张宏, 刘勇. 燃气管道非开挖修复技术的应用与经济性分析 [J]. 城市燃气, 2022,(7):28-33.
- [4] 董绍华, 李明, 陈利琼. 城镇燃气管道完整性管理与老旧管网改造 [J]. 石油机械, 2020,48(9):101-107.
- [5] 陈利琼, 张伟, 李明. 城市燃气老旧管网改造的全生命周期成本分析 [J]. 安全与环境学报, 2021,21(3): 1023-1029.