

供热一次网老旧管道改造技术路径与经济性分析

刘丽梅

包头市热力(集团)有限责任公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17534

[摘要] 本文以供热一次网老旧管道改造为研究对象,系统梳理当前主流的改造技术路径,包括整体更换、局部修复、非开挖更新及智能监测辅助决策等方法,并结合工程案例对其适用条件、技术特点进行对比分析。在此基础上,构建全生命周期成本(LCC)模型,从初始投资、运行维护、节能效益、环境外部性等多个维度对不同改造方案进行经济性评估。研究结果表明:对于高风险、高漏损率区域,整体更换虽初期投入大但长期效益显著;而对于中低风险区域,采用非开挖修复结合智能监测可实现成本与效益的最优平衡。本文旨在为供热企业制定科学合理的老旧管网改造策略提供理论支撑与实践指导。

[关键词] 供热一次网; 老旧管道; 改造技术; 非开挖修复; 全生命周期成本; 经济性分析

中图分类号: TU995.3 文献标识码: A

Technical Pathways and Economic Analysis of Renovation for Aging Pipelines in Primary Heating Networks

Limei Liu

Baotou Heating (Group) Co., Ltd.

[Abstract] This paper takes the renovation of aging pipelines in primary heating networks as the research subject, systematically reviewing current mainstream renovation technical pathways, including complete replacement, localized repair, trenchless renewal, and intelligent monitoring-assisted decision-making methods. Combining engineering cases, it provides a comparative analysis of their applicable conditions and technical characteristics. Building on this, a full lifecycle cost (LCC) model is constructed to evaluate the economic performance of different renovation schemes across multiple dimensions, such as initial investment, operation and maintenance, energy-saving benefits, and environmental externalities. The research results indicate that for high-risk areas with high leakage rates, complete replacement, though requiring substantial initial investment, offers significant long-term benefits. For medium- to low-risk areas, trenchless repair combined with intelligent monitoring achieves an optimal balance between cost and benefit. This study aims to provide theoretical support and practical guidance for heating enterprises in formulating scientific and rational strategies for aging pipeline renovation.

[Key words] Primary Heating Network; Aging Pipelines; Renovation Technology; Trenchless Repair; Full Lifecycle Cost; Economic Analysis

引言

集中供热是我国北方冬季主要供暖方式,供热一次网负责从热源厂向换热站输送高温介质。自20世纪80年代大规模建设城市集中供热系统以来,大量一次网管道采用预制直埋保温管敷设地下。但受当时材料工艺、施工标准及运维水平限制,管道设计寿命多为15-25年,现已普遍超期服役。截至2023年底,全国供热管道超45万公里,服役超20年的老旧管道占比近30%。这些管道问题频发,热损失率高,部分超20%,还常泄漏,影响居民用热稳定与城市公共安全,且造成大量能源浪费,改造迫在眉睫。不

过,老旧管网改造面临投资大、施工协调难等挑战,在有限资金下,科学选技术路径,统筹安全、能效与经济目标,是供热行业高质量发展的关键。

1 供热一次网老旧管道主要病害与风险特征

1.1 主要病害类型

一是钢管腐蚀:土壤电化学腐蚀、杂散电流腐蚀及内壁氧腐蚀是主因。尤其在地下水位高、土壤电阻率低区域,腐蚀速率加快,易形成点蚀穿孔^[1]。二是保温层失效:聚氨酯泡沫老化、吸水后导热系数上升,HDPE外护管开裂导致水分侵入,使保温性

能大幅下降。三是结构变形: 地基沉降、车辆荷载或冻胀作用导致管道弯曲、支架失效, 进而引发焊缝开裂或补偿器损坏。四是接口渗漏: 早期焊接或法兰连接工艺不规范, 长期热循环作用下密封失效。

1.2 风险等级划分

根据《城镇供热管网设计标准》(CJJ/T34-2022)及实际运行数据, 可将老旧管道按风险等级划分为三类:

高风险区: 漏损率>5%, 年故障次数≥2次, 保温热损>20%, 位于主干道或人口密集区;

中风险区: 漏损率2%-5%, 偶发故障, 热损10%-20%;

低风险区: 漏损率<2%, 运行稳定, 热损<10%。

风险等级直接影响改造技术的选择与优先级排序。

2 老旧管道改造主要技术路径

2.1 整体更换(开挖重建)

整体更换是指将原有老旧管道全线或分段开挖拆除, 并重新敷设符合现行标准的新型预制直埋保温管, 同步更新阀门、补偿器、支架等附属设施。该方法能够从根本上消除历史遗留缺陷, 新建管道通常采用钢套钢复合保温结构或高性能玻璃钢外护管, 设计寿命可达30年以上, 且保温性能优异, 热损失率可控制在5%以内。此外, 重建过程为优化管线路由、提升系统布局合理性提供了契机, 例如避开地质不稳定区或整合冗余支线。更重要的是, 新敷设管道可同步集成温度、压力、流量及泄漏监测传感器, 为后续智慧供热平台建设奠定硬件基础^[2]。然而, 整体更换的缺点同样显著: 单位造价高, 一般在1500至3000元/米之间; 施工周期长, 需封闭道路、迁移管线, 对城市交通与居民生活造成较大干扰; 在历史街区、地铁保护区或地下管线密集区域, 开挖作业甚至面临无法实施的困境。因此, 该技术路径更适合用于高风险主干线或纳入城市更新计划的重点区域。

2.2 局部修复(开挖修补)

局部修复是一种针对已发生泄漏或检测出严重缺陷管段的应急性或补救性措施, 通常通过小范围开挖, 切除损坏部分并焊接新管段予以替换。该方法操作灵活、响应迅速, 单次修复成本相对较低, 一般在5万至10万元之间, 适用于突发事件的快速处置。然而, 局部修复本质上属于“头痛医头、脚痛医脚”的被动应对策略, 无法改善整条管线的整体性能, 反而可能因多次修补形成“补丁式”管网, 降低系统整体可靠性。此外, 现场焊接质量受天气、空间及工人技能等因素制约, 难以保证与工厂预制焊缝同等的强度与密封性。长期来看, 频繁的局部修复不仅累积成本高昂, 还可能掩盖更广泛的潜在风险。因此, 该技术仅宜作为低风险区域偶发缺陷的临时处理手段, 或在资金极度紧张时的过渡性选择, 不宜作为系统性改造的主流路径。

2.3 非开挖修复技术

为克服传统开挖法的社会扰动大、成本高等弊端, 非开挖修复技术近年来在供热领域逐步推广应用。其中, 穿插法(Sliplining)是目前较为成熟的技术之一, 其原理是将小直径的新型耐热塑料管(如PE-RTIII型)通过牵引或推送方式穿入旧

钢管内部, 形成“管中管”复合结构。该方法无需大面积开挖, 施工周期短, 对地面交通和地下设施干扰极小, 且新管具有优异的耐腐蚀性和良好的保温性能。尽管流通截面积略有减小(通常减少10%-15%), 但通过水力复核与泵组调整, 多数系统仍可满足输配要求^[3]。原位固化法(CIPP)和螺旋缠绕法则多用于大口径污水管道, 在高温热水环境中树脂耐热性与长期稳定性尚待验证, 目前在供热一次网中应用较少。总体而言, 非开挖技术的初期投资约为整体更换的60%-80%, 但可节省70%以上的社会协调与恢复成本, 特别适用于中风险区域、交通主干道下方或历史文化保护区等开挖受限地段, 是实现“少扰民、快见效、可持续”改造目标的重要技术选项。

2.4 智能监测与预测性维护

除了物理层面的管道更新, 现代信息技术的发展为老旧管网管理提供了新的思路。通过部署分布式光纤测温系统(DTS)、声波泄漏检测装置、无线压力/温度传感器等物联网设备, 可构建覆盖全网的实时监测网络。分布式光纤沿管道敷设, 能够以±1米的精度连续感知温度异常, 有效识别早期泄漏点; 压力瞬变分析技术则通过捕捉水锤波的反射特征, 反演微小泄漏位置; 结合地理信息系统(GIS)与建筑信息模型(BIM), 还可建立数字孪生平台, 模拟不同工况下的管网响应, 辅助改造方案比选与应急调度。虽然智能监测本身不直接改变管道物理状态, 但其提供的精准数据可显著提升运维效率, 延长管道安全服役年限, 并为“按需改造”提供决策依据^[4]。因此, 该路径常作为其他改造技术的有力补充, 推动供热系统从“事后抢修”向“事前预防”转型。

3 改造方案经济性分析模型

3.1 全生命周期成本(LCC)框架

传统经济评价多关注初始投资, 忽视长期运行成本。本文采用LCC模型, 涵盖以下要素:

$$LCC = C_{\text{initial}} + C_{\text{operation}} + C_{\text{maintenance}} - B_{\text{energy}} - B_{\text{environment}}$$

其中:

C_{initial} : 改造工程直接投资(材料、施工、设计等);

$C_{\text{operation}}$: 运行能耗成本(主要为循环泵电耗);

$C_{\text{maintenance}}$: 未来10-20年维修、抢修费用;

B_{energy} : 因保温改善带来的节能量折算收益;

$B_{\text{environment}}$: 碳减排、减少水资源浪费等环境外部性价值(可选)。

3.2 参数设定与案例分析

表1 参数设定

方案	技术路径	初始投资(万元)	年运行维护成本(万元)	年节能收益(万元)	设计寿命(年)
A	整体更换(钢套钢)	280	8	35	30
B	非开挖穿插(PE-RTIII)	190	12	28	20
C	局部修复+智能监测	60	25	10	10(保守估计)

以某北方城市DN400一次网管段(长度1km)为例,服役22年,漏损率4.5%,热损18%,划为中高风险区。对比三种方案:

贴现率取5%,分析期20年。

计算各方案LCC(单位:万元):

$$\text{方案A: } LCC_A = 280 + \sum_{t=1}^{20} \frac{8-35}{(1+0.05)^t} \approx 280 - 336 = -56$$

$$\text{方案B: } LCC_B = 190 + \sum_{t=1}^{20} \frac{12-28}{(1+0.05)^t} \approx 190 - 199 = -9$$

$$\text{方案C: } LCC_C = 60 + \sum_{t=1}^{10} \frac{25-10}{(1+0.05)^t} + \sum_{t=11}^{20} \frac{40-5}{(1+0.05)^t} \approx 60 + 116 + 269 = 445$$

(注:第11年起假设需二次大修,成本上升)

结果分析:

方案A虽初始投资最高,但LCC为负值,表明全周期净收益最大;方案B经济性次之,适合资金有限但希望长期改善的项目;方案C短期成本低,但长期维护负担重,LCC显著高于前两者。若考虑碳交易价格(按60元/吨CO₂),方案A年减碳约1200吨,年增收收益7.2万元,进一步强化其优势。

4 政策建议与实施策略

4.1 分级分类推进改造

鉴于老旧管道风险特征的差异性,改造工作应坚持“突出重点、分类施策”原则。对于高风险区域,尤其是主干管、医院学校周边等关键节点,应优先安排整体更换,纳入城市基础设施更新或韧性城市建设专项计划,确保供热安全底线。中风险区域则可推广“非开挖修复+智能监测”的组合模式,在控制成本的同时显著提升系统可靠性,此类项目应积极争取中央财政对北方清洁取暖试点城市的补贴支持。低风险区域暂不急于大规模改造,可通过加强日常巡检与数据监测,动态评估其健康状态,合理延缓改造时序,从而优化整体资金配置效率。这种分级推进机制既能保障重点区域安全,又能避免“一刀切”造成的资源浪费。

4.2 创新投融资机制

面对改造资金需求大与地方财政压力并存的现实矛盾,亟需探索多元化投融资路径。合同能源管理(EMC)模式值得推广,即由专业节能服务公司垫资实施改造,供热企业以其分享的节能收益分期支付服务费用,实现“零 upfront 投资”。此外,可发行绿色债券或申请气候投融资试点资金,将管网低碳改造项目

纳入绿色金融支持目录。地方政府还可将供热管网更新与老旧小区改造、城市更新行动等政策工具捆绑,统筹使用相关专项资金,形成政策合力。通过机制创新,有效缓解企业短期资金压力,激发市场活力。

4.3 完善标准与技术体系

当前,非开挖修复、新型管材应用等前沿技术在供热领域尚缺乏统一的技术标准与验收规范,制约了其规模化推广。建议主管部门加快制定《供热管道非开挖修复技术规程》,明确材料性能、施工工艺与质量控制要求。同时,建立基于多源数据融合的老旧管网健康度评估指标体系,实现风险量化与动态预警。此外,应推动PE-RTII、玻璃钢等耐高温、耐腐蚀新型管材在一次网中的工程应用认证,打破传统“唯钢管论”的技术惯性,为改造提供更多优质选项。通过标准引领与技术创新双轮驱动,构建适应新时代需求的供热管网更新技术体系。

5 结语

供热一次网老旧管道改造是保障城市能源安全、提升民生服务质量、实现“双碳”战略目标的重要抓手。本文研究表明,不同技术路径各有适用边界:整体更换虽投资较高,但能彻底消除隐患,长期经济与社会效益最为显著,适用于高风险主干线;非开挖修复凭借扰动小、周期短、性价比高的优势,成为中风险区域的理想选择;而局部修复仅宜作为应急补充,不宜作为系统性策略。在经济性评价方面,全生命周期成本(LCC)模型有效揭示了“低初投、高运维”方案的隐性代价,强调应从长期视角统筹决策。未来,应推动智能化监测与物理改造深度融合,构建“评估—规划—融资—实施—后评价”的闭环管理体系,实现从碎片化修补向系统性更新的范式转变,为建设安全、高效、绿色的现代化城市供热系统提供坚实支撑。

【参考文献】

- [1]孙文虎.供热系统的监测控制改造技术及应用[J].中国新技术新产品,2020,(10):28-29.
- [2]张梦,王春青.供热管网节能改造及输热能效分析[J].节能,2019,38(01):113-114.
- [3]曹阳,周春丽,杨源满.大规模直供用户的供热管网设置及调节案例分析[J].节能,2021,40(08):36-38.
- [4]于雷.城市集中供热管网改造优化实践[J].居舍,2018,(22):1.