

市政给排水管道非开挖修复技术研究

张辉¹, 刘俊^{1,2}

1. 青岛安博劳务工程有限公司, 山东 青岛 266000

2. 山东华德市政工程集团有限公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ETQM.2025070029

摘要： 本文聚焦市政给排水管道非开挖修复技术，系统阐述其分类及原理，包括管道检测与评估、局部修复、整段修复及其他创新技术，分析各类技术的适用场景与优势。在设计及施工方面，强调以数据驱动修复方案设计，遵循标准化施工流程并构建严格质量控制体系。通过经济性分析，对比非开挖修复技术与传统开挖技术在造价、全生命周期经济效益及社会效益上的差异，揭示非开挖修复技术的显著优势，为市政给排水管道修复工程提供科学的技术参考与决策依据。

关键词： 市政给排水管道；非开挖修复技术；设计施工；经济性分析

Research on Non-excavation Repair Technology for Municipal Water Supply and Drainage Pipelines

Zhang Hui¹, Liu Jun^{1,2}

1. Qingdao Anbo Labor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

2. Shandong Huade Municipal Engineering Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

Abstract： This article focuses on the non-excavation repair technology for municipal water supply and drainage pipelines, systematically explaining its classification and principles, including pipeline inspection and evaluation, local repair, full-section repair, and other innovative technologies. It analyzes the applicable scenarios and advantages of various technologies. In terms of design and construction, it emphasizes a data-driven approach to designing repair solutions, follows standardized construction processes, and establishes a rigorous quality control system. Through economic analysis, it compares the differences in cost, full life cycle economic benefits, and social benefits between non-excavation repair technology and traditional excavation technology, revealing the significant advantages of non-excavation repair technology. This provides a scientific technical reference and decision-making basis for municipal water supply and drainage pipeline repair projects.

Keywords： municipal water supply and drainage pipelines; non-excavation repair technology; design and construction; economic analysis

引言

据统计我国城市地下管网总长度已超 200 万公里，且每年以 5% ~ 8% 的速度持续增长。然而受服役年限、地质沉降、介质腐蚀及周边施工扰动等因素影响，管道老化、渗漏、破损等问题日益突出，传统开挖修复技术因存在施工周期长、交通阻断严重、环境破坏大等弊端，已难以满足现代城市精细化管理的需求。非开挖修复技术凭借其“微创、高效、环保”的显著优势，成为管道修复领域的研究热点与发展方向。本文从技术分类、设计施工及经济性等维度展开深入研究，旨在为提升市政给排水管道修复的科学性、经济性与可持续性提供理论支撑与实践参考。

一、市政给排水管道非开挖修复技术分类及原理

（一）管道检测与评估技术

管道检测与评估技术通过物理探测与数据分析明确管道病害特征，为修复方案提供基础依据。在完成管道清洗作业之后，为了确保后续修复工作的精准实施。使用录像检测技术通过高清摄

像头对管道内部进行全程录像，观察管道的结构、材料以及存在的缺陷。采用声呐检测技术利用声波原理，探测管道内部的异物、堵塞以及破损等问题，并通过声波信号的分析，对管道的状态进行准确地评估^[1]。

（二）局部修复技术

针对管道接口渗漏、局部裂缝、小范围腐蚀等集中性病害，

局部修复技术以“精准定位、靶向治理”为原则实施点状修复。点状修复技术采用气囊扩张法将浸有环氧树脂的玻璃纤毡压贴于破损处,通过常温或蒸汽加热固化形成局部内衬层,修复直径范围 DN150-DN2000,具有无需开挖、修复时间短的特点,适用于裂缝、孔洞、接口渗漏等局部缺陷,且修复后管道过流能力损失小于 5%^[2]。嵌补修复技术使用高强度复合材料或金属补丁,通过胶粘剂固定于破损部位形成机械补强结构,对于腐蚀穿孔缺陷可配合带压堵漏技术快速止水,适用于局部腐蚀、机械损伤或小范围破裂,尤其适合紧急抢修场景。不锈钢快速锁修复技术通过液压设备将分瓣式不锈钢卡箍径向收缩紧固于破损处,利用橡胶密封圈密封止水,适用管径 DN100-DN1200,操作便捷且无需动火,适用于给排水管道等压力管道的带水修复^[3]。

（三）整段修复技术

当管道出现大面积腐蚀、结构性坍塌或功能退化时,整段修复技术通过内衬置换、螺旋再造或爆管更新等方式实现管道整体性能重塑。HDPE 内衬法将外径略小于原管道内径的 HDPE 管通过牵引或顶推插入旧管道形成“管中管”结构,通过注浆或管材柔性实现密封,修复长度可达数百米,适用于整体腐蚀、错位或过流能力不足的重力排水管道;CIPP 原位固化法将浸有热固性树脂的纤维增强软管置入旧管道,通过热水、蒸汽或紫外线照射固化形成高强度内衬层,可适应弯头、变径等复杂结构,修复管径 DN150-DN3000,内衬厚度 3-15mm,环刚度 $\geq 12.5\text{kN/m}^2$,使用寿命达 50 年;螺旋缠绕法采用 PVC-U 或 HDPE 型材在管道内螺旋缠绕形成新管道,型材边缘通过机械锁扣或热熔焊接连接,施工速度快、可带水作业,修复后管道表面光滑且过流能力提升 10%~20%,适应管径 DN300-DN4000^[4]。喷涂法修复技术利用高压无气喷涂设备将环氧树脂、聚氨酯等涂料均匀喷涂于管道内壁形成 1—3mm 防腐密封涂层,异形管道或复杂接口可手工涂抹补充,适用于混凝土管道内壁腐蚀、麻面修复,尤其适合蛋形截面等异形断面排水管道。

（四）其他非开挖修复技术

针对特殊工况或复合型病害,创新性技术提供多元解决方案。胀管法通过液压或气动设备破碎旧管道,同时将新管道拉入或顶入破碎空间,利用旧管道碎片压实周围土体完成敷设,可同步实现管径扩大 30%~50%,适用于埋深较浅(<6 米)、环境敏感区域的旧管道报废更换。裂管法修复技术采用专用工具纵向割裂旧管道,通过扩张头将碎片压入土体并牵引新管道跟进,可实现同径或扩径修复,适用于 DN100-DN800 的混凝土、铸铁等刚性管道,施工关键在于精确控制扩张头行进速度与牵引力以避免影响周边管线^[5]。微生物修复技术通过向管道内投加特定微生物菌群,利用其代谢活动分解内壁油脂、有机物沉积,并分泌生物聚合物修复微小裂缝,具有环境友好、无需化学药剂的特点,适用于排水管道预防性修复与养护,可定期投加以维持管道自净能力、降低淤积频率。

二、非开挖修复技术的设计与施工

（一）修复方案设计

修复方案设计以数据驱动为核心导向,运用 CCTV 检测系统搭载 1080P 高清摄像头对管道内部进行毫米级影像采集,结合声呐检测或激光扫描生成包含缺陷坐标、损伤形态、结构变形量的三维模型,同步整合管道管径、埋设深度、周边环境等基础数据。技术选型阶段遵循“缺陷等级-技术适配”原则,针对轻度缺陷采用高压喷涂速凝水泥砂浆修复,中度缺陷选用螺旋缠绕 HDPE 带材工艺,重度缺陷则采用 CIPP 内衬或爆管法换管;同时引入层次分析法(AHP)对修复成本、施工周期、环境影响等指标进行量化比选,形成技术经济论证报告^[6]。结构设计环节依托力学计算模型,例如 CIPP 内衬厚度计算采用 ASCE 标准公式 false (其中 D 为管径、p 为内水压力、S 为树脂许用应力),并通过 ANSYS 软件模拟内衬与原管道的应力分布,确保复合结构安全系数 ≥ 1.8 。

（二）施工工艺流程

施工流程遵循“预处理-核心作业-验证闭环”的标准化程序,以 CIPP 修复为例,采用 50MPa 高压水射流清除内壁厚度>20mm 的淤泥沉积,通过机械铣削设备对突出管壁 30mm 以上的错口进行打磨,形成粗糙度达 Ra12.5 的界面。随后实施软管置入与固化,利用卷扬机以 0.5m/s 速度牵引浸胶玻璃纤维软管至指定位置,采用紫外线固化系统照射 2 小时完成树脂交联,过程中通过压力传感器维持管内 0.03MPa 微正压以确保内衬贴合;最后使用电动切割工具去除多余内衬并安装不锈钢卡箍密封,通过 CCTV 检测机器人进行 360° 无死角复查,对发现的直径>8mm 气泡缺陷采用注浆法补修。螺旋缠绕修复工艺则先通过管道机器人搭载激光测距仪完成全管测量(精度 $\pm 2\text{mm}$),确定带材缠绕起始角度与搭接长度,再以 1.2m/min 速度驱动螺旋缠绕机在管内形成连续结构,锁扣连接处注入双组份聚氨酯密封胶(混合后表干时间 ≤ 30 分钟),施工完成后进行闭水试验(试验水头达上游检查井管顶以上 2m,30 分钟渗水量 $\leq 1.2\text{L}/(\text{m}\cdot\text{h})$)。

（三）施工质量控制

质量管控体系以“预防为主、全程追溯”为原则构建三级控制网络,材料进场环节实施“双控制”,环氧树脂需验证 GB/T 2567 标准规定的黏度(25℃时 $\leq 4000\text{mPa}\cdot\text{s}$)、凝胶时间(≤ 80 分钟)及 HJ/T 223 环保认证,HDPE 带材需通过 GB/T 1040.2 拉伸试验(屈服强度 $\geq 22\text{MPa}$)与 GB/T 18488 耐磨测试(磨耗量 $\leq 15\text{mg}$);施工过程中运用 BIM+GIS 融合技术建立实时监控平台,传感器实时采集固化温度(误差 $\pm 2^\circ\text{C}$)、缠绕张力(偏差 $\pm 5\%$)、设备运行参数等数据,当深基坑边坡位移监测值达 2mm/天时触发预警响应机制;竣工验收阶段执行“三检合一”标准,通过目视检测(VT)检查修复表面平整度(误差 $\leq 3\text{mm}$),采用超声检测(UT)测定内衬厚度均匀性(偏差 $\pm 1.5\text{mm}$),最后依据 GB 50268 进行功能性试验^[7]。CIPP 修复管道需通过 1.5 倍设计压力的水压试验(保压 1 小时降压 $\leq 0.05\text{MPa}$),爆管法换管需进行管道变形检测(椭圆度 $\leq 3\%$)

与防腐层电火花检漏（电压 15kV 无漏点）。

三、非开挖修复技术的经济性分析

（一）造价分析

非开挖修复技术的造价构成呈现“材料设备主导、间接成本压缩”的特征，以 DN800 管道修复为例，CIPP 内衬法综合成本约 2200 元 / 米，其中环氧树脂软管与固化设备占比达 65%，人工成本仅占 15%，而传统开挖修复需承担路面破除（500 元 / m²）、土方外运（400 元 / m³）及交通导改（日均 2 万元）等附加费用，综合造价达 3800 元 / 米以上。局部喷射修复单方成本约 1000 元 / 米，螺旋缠绕法约 1800 元 / 米，爆管法因涉及新管牵引与旧管破碎可达 3500 元 / 米，但管径升级无需额外扩槽费用^[8]。成本敏感因素分析显示，修复长度每增加 100 米，非开挖技术单方成本下降约 12%，而传统开挖受基坑支护与安全监测影响，成本下降幅度仅 5%；富水地层中，非开挖降水成本增加约 250 元 / 米，显著低于传统开挖的基坑围护费用。

（二）经济效益评价

从全生命周期视角，非开挖技术通过工期优化与维护成本递减实现效益倍增。某 DN1000 污水管道修复项目中，CIPP 工艺工期仅 7 天，较传统开挖（18 天）缩短 61%，按周边商业体日均损失 15 万元计算，可减少间接损失 165 万元。维护成本对比更凸显技术优势，内衬修复后管道年渗漏率 < 0.5%，年维护费用约 2.8 元 / 米，而传统混凝土管修复后年渗漏率达 3%，年维护费用 9.2 元 / 米，50 年周期内累计节省维护成本超 300 万元。经济指标量化显示非开挖修复的净现值（NPV）较传统方法高 33% ~ 50%，

投资回收期（PP）缩短 4~6 年，内部收益率（IRR）提升 2~3 个百分点，在政府 PPP 项目中更易通过物有所值（VFM）评价^[9]。

（三）社会效益评价

非开挖技术的隐性价值构成城市治理的重要增量，施工占路面积仅为传统方法的 1/5，避免主干道封闭导致的通勤效率下降。据交通仿真模型测算，城市中心区每封闭 1 条车道日均增加拥堵时长 45 分钟，非开挖技术可减少此类时间成本约 8000 小时 / 公里^[10]。环境效益方面，100 米 DN1200 管道修复可减少渣土排放 420m³，降低扬尘 PM2.5 浓度 68%，噪音控制在 62dB（传统施工达 88dB），符合《城市区域环境噪声标准》0 类区要求。民生影响层面，避免开挖对周边商户造成的“断水断电”停业损失（商业街日均损失约 3 万元 / 百米），同时降低地下管线交叉损伤风险——非开挖施工管线破损率仅为 0.03 次 / 公里，较传统方法（0.25 次 / 公里）下降 88%，契合“城市生命线”安全运行的现代化管理需求。

四、结束语

市政给排水管道非开挖修复技术凭借其多元化的技术体系、标准化的设计施工流程以及显著的经济社会效益，已成为城市管网维护的核心手段。该技术不仅有效解决了传统开挖修复对城市环境与交通的负面影响，更通过精准的病害诊断、高效的修复工艺及全生命周期成本控制，实现了管道修复工程的科学化与智能化。随着材料科学、检测技术与施工装备的持续创新，非开挖修复技术将在复杂工况适应性、修复效果耐久性等方面取得新突破。

参考文献

[1] 章国鹏. 非开挖修复技术在城市给排水管道中的应用 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(05): 72-74. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2024.05.024.

[2] 许世明. 论非开挖技术在市政给排水工程中的实践 [J]. 居业, 2023, (01): 19-21.

[3] 宋彪. 给排水管道的非开挖修复技术探究 [J]. 住宅与房地产, 2019, (33): 171.

[4] 杨墨, 周航, 郝学凯, 等. 给排水管道的非开挖修复技术 [J]. 山西建筑, 2014, 40(11): 124-126. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2014.11.064.

[5] 龙新明. 给排水管道在线非开挖修复技术综述 [J]. 科技资讯, 2006, (18): 31-32. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2006.18.026.

[6] 张菊英, 尹春来. 城市给排水管道非开挖修复技术研究 [J]. 科技与企业, 2012, (13): 293+295. DOI: 10.13751/j.cnki.kjyqy.2012.13.164.

[7] 李祖靖. 关于市政给排水施工中的非开挖修复施工技术分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (27): 190-192. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202427062.

[8] 曹井国, 郁片红, 孙跃平. 城镇给排水管道非开挖修复材料 [M]. 化学工业出版社: 202210.328.

[9] 廖宝勇. 原位热塑成型修复技术在给排水管道非开挖修复中的应用 [J]. 建设科技, 2019, (23): 60-63. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2019.23.012.

[10] 任君彪. 非开挖修复技术在城市给排水管道中的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(21): 88-90. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.21.028.