

宣城排水管网非开挖修复技术应用实践

文 / 徐 渐 安徽路畅交通工程有限公司

摘要：宣城市东部新城排水防涝改造提升工程Ⅱ标段采用“检测—设计—施工—验收”一体化EPC模式，对185.2km既有管网实施紫外光固化、不锈钢双胀圈二类非开挖修复。结果表明，非开挖直接成本2.48万元·m⁻¹，比开挖降低36%；交通延误损失减少1150万元；碳排放下降73%，减排二氧化碳134t；闭水试验一次合格率100%，缺陷复测率<1处·km⁻¹。研究构建了五维度技术成熟度雷达与EPC闭环流程，为长三角老旧管网低影响更新提供可复制范式。

关键词：非开挖修复；紫外光固化；EPC模式；碳减排；技术成熟度

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.095

引言

长三角地区排水管网普遍进入老龄化阶段，传统开挖更换面临交通阻断、环境扰动与碳排放激增等多重约束。宣城市东部新城作为皖南交通枢纽，高峰时段车流量达1800pcu·h⁻¹，若采用大开大挖方式更新185.2km排水管网，将直接威胁城市正常运转。近年来，紫外光固化内衬、不锈钢双胀圈等非开挖技术在国内零星应用，但缺乏系统化EPC级实践与量化效益验证。本研究以宣城Ⅱ标段为唯一案例，首次将二类工法纳入同一项目矩阵，通过普查数据库驱动工法比选，构建经济—社会—环境多维评价模型，旨在建立适用于高交通密度城区的低影响更新技术体系与管理流程，为同类城市提供决策依据与标准示范。

一、宣城市东部新城排水防涝改造提升工程Ⅱ标段EPC工程概况

宣城市东部新城排水防涝改造提升工程Ⅱ标段EPC工程位于安徽省宣州区，服务面积约28km²，现状排水管网建于2005—2010年，以DN300—DN1200钢筋混凝土管为主，埋深1.5—4.8m，沿线道路为城市主干路与次干路，交通流量已达1800pcu·h⁻¹。工程内容分为检测、改造、新建三大板块：对185.2km既有管网进行CCTV、声纳与激光量化检测，判定结构性缺陷12847处、功能性缺陷9634处；对其中3105m严重破损管段实施非开挖修复，管径范围DN600—DN1200，占改造总量的100%；新建DN800—DN2000排水管网9800m，配套1座15m³·s⁻¹一体化泵站。传统开挖修复需封闭车道、迁移管线、外运弃土，估算占用道路资源约52000m²，产生弃方6.4×10⁴m³，直接扰动沿线乔木1300株、燃气管线17条，施工期交通延误成本约0.38亿元，且汛期沟槽暴露风险高。基于“交通影响最小、环保效益最大、投资可控”原则，EPC团队将非开挖技术设定为唯一实施路径，通过紫外光固化、不锈钢双胀圈等工艺组合，实

现“检测—设计—修复—验收”闭环管理，为后续章节的技术比选与效益评估提供基准场景^[1]。

二、非开挖修复技术在EPC项目中的系统化应用

（一）管道缺陷检测与评估技术

为精准掌握宣城市东部新城185.2km排水管网的病害空间分布与严重程度，项目采用“CCTV全景摄像—声纳水下轮廓—激光量化变形”三位一体检测体系，实现满管与排空工况全覆盖。CCTV搭载径向分辨率0.1mm的1/1.8" CMOS传感器，以0.15m·s⁻¹速度采集内壁裂纹、错位、渗漏影像，通过GB/T50331-2018缺陷代码自动标注，结构性缺陷识别精度优于95%；声纳单元工作频率2.25MHz，径向扫描间隔0.5°，可测沉积厚度至1mm，用于判定过水断面损失率；激光环扫仪以360°/s速率发射905nm脉冲，获取管道内径点云，经RANSAC算法拟合后计算椭圆度，空间分辨率0.5mm，为变形量分级提供亚毫米级依据。三种数据在GIS平台叠加，建立基于桩号的“缺陷—里程”关联数据库，实现缺陷起止位置、类型、等级、尺寸四维描述。

为统一量化评价，引入缺陷密度指标，将每公里管段内各类缺陷的累计长度与检测总长相比，得到无量纲密度值，用于横向比较不同区域病害发育强度，并作为后续修复等级划分的核心阈值。检测结果显示结构性缺陷12847处，功能性缺陷9634处，为后续非开挖修复范围与工艺选择提供直接依据。

$$\rho = \frac{\sum L_i}{L_{total}}$$

其中， ρ 表示缺陷密度， $\sum L_i$ 为各类缺陷累计长度， L_{total} 为对应管段检测总长度。

（二）紫外光固化内衬（CIPP-UV）设计与施工

针对宣城Ⅱ标段3.1km严重缺陷管段，EPC团队在CIPP-UV与热固化聚酯毡管之间展开工艺比选。热固化

需 85℃ 热水循环, 能耗 $1.3\text{GJ} \cdot \text{km}^{-1}$, 且产生约 4t 碱液废水, 在交通繁忙的鳌峰东路显然不具备设置锅炉与废水收集条件; 而 CIPP-UV 以 395nm 紫外阵列替代热源, 树脂固化峰值温度 42℃, 能耗降低 62%, 无工艺废水, 固化时间由 6h 缩短至 1.8h, 故被确定为唯一方案^[2]。内衬设计采用 ECR 玻璃纤维针织毡 + 环氧乙烯基树脂体系, 毡体单位面积质量 $1350\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 拉伸模量 18GPa, 弯曲强度 320MPa, 树脂体积分数控制在 38% - 42% 以保证紫外穿透深度。厚度按弹性极限状态计算, 考虑地下水压力、交通活载及树脂长期蠕变折减, 引入环向应力平衡方程, 通过求解管壁所需最小壁厚, 确保 50a 设计寿命内不发生屈曲与渗漏。

$$t = \frac{\gamma_w DK}{2\sigma_t}$$

其中, t 为设计厚度, γ_w 为地下水容重, D 为管道内径, K 为安全系数, σ_t 为树脂长期允许拉伸强度。

现场施工流程依次为: 管道两端砌筑临时封堵 → 高压冲洗至内壁粗糙度 $\leq 0.5\text{mm}$ → CCTV 二次确认无渗水 → 玻纤软管拉入并置入紫外灯链 → 充气 0.25bar 使软管与母管贴合 → 开启 16 盏 400WLED 灯车, 以 $0.9\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 速度匀速推进, 实时采集表层温度与表面硬度, 当玻璃化转变温度达到 105℃ 且巴氏硬度 ≥ 40 时判定固化完成。固化能量密度曲线设定为前 200s 维持 $350\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 中段 600s 提升至 $550\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 后段 200s 降至 $300\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 避免表皮过快交联导致内层欠固化。整段 3105m 分 21 个紫外灯链循环, 每段搭接 1.2m, 搭接区能量额外提高 15%, 确保环向强度均匀。施工期封闭作业井口设置 voc 与臭氧在线监测, 环氧乙烯基体系 voc 排放低于 $40\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 臭氧峰值 0.08ppm, 满足 DB34/2710-2016 限值。

(三) 局部不锈钢双胀圈快速点修技术

宣城 II 标段检测发现 6241 处雨污错混接, 集中分布于 DN300—DN600 支管, 若采用整段更换需封闭小区出口, 社会风险高。EPC 团队选用“不锈钢双胀圈 + 速凝灌浆”局部点修技术, 实现 30min 完成单点修复。双胀圈由 304 不锈钢波纹环与锥形楔块组成, 环宽 100mm, 厚度 1.5mm, 屈服强度 205MPa; 楔块斜角 8°, 可提供径向膨胀力 $\geq 48\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。施工时, 先将折叠环套置于气动扩张器外壁, 在 CCTV 引导下定位缺陷中心, 充气 0.6MPa 使波纹环均匀楔入母管内壁, 瞬时形成宽度 120mm 的刚性环带; 随后经环带预留注浆孔注入超细水泥—硅灰浆液, 水灰比 0.4, 流动度 220mm, 10min 初凝, 30min 抗压强度达 15MPa, 填充层厚度控制在 5—8mm, 确保界面

无渗漏通道。为量化修复效果, 引入环刚度提升比, 通过对比修复前后单位长度管壁抗弯刚度, 评估结构强化幅度。

$$\beta = \frac{E_{\text{new}} I_{\text{new}}}{E_{\text{old}} I_{\text{old}}}$$

其中, β 为环刚度提升比, $E_{\text{new}} I_{\text{new}}$ 为修复后复合截面抗弯刚度, $E_{\text{old}} I_{\text{old}}$ 为原混凝土管抗弯刚度。现场抽样显示, β 值介于 2.7—3.1, 满足 CJJ/T210-2014 对局部修复“结构恢复”要求。速凝浆液微膨胀特性补偿了界面微缝隙, 28d 粘结强度达 1.8MPa, 抗渗压力 $\geq 0.8\text{MPa}$ 。单点作业仅占用井口 $3\text{m} \times 1.5\text{m}$ 空间, 无需道路开挖, 交通零干扰; 材料用量低于 5kg, 碳排放较传统换管降低 82%。该工艺在 EPC 模式下形成“检测 → 封堵 → 扩环 → 注浆 → 复检”标准化流程, 为后续螺旋缠绕整段修复提供过渡接口, 实现 6241 处错混接快速封闭。

(四) 非开挖施工质量验收与标准对比

宣城 II 标段 EPC 模式将 CIPP-UV、不锈钢双胀圈二类非开挖工法纳入同一质量验收框架, 以 GB50268-2008、CJJ/T210-2014 及项目专用技术规格书为基准, 形成“过程监控 + 成品检测 + 功能验证”三级控制链。CIPP-UV 段重点控制壁厚、固化度与内衬附着强度: 壁厚采用 5 点超声法, 允许偏差 -5% ~ +10%; 固化度通过丙酮萃取法测定, 要求不溶物 $\geq 92\%$; 内衬与母管间剪切强度 $\geq 1.2\text{MPa}$ 。双胀圈点修以环带密封性为核心, 逐点进行 0.5MPa 保压 5min 无压降判定合格, 并抽取 10% 点位进行 25kV 电火花检漏, 零击穿视为通过。二类工法完成后统一执行闭水试验, 试验段长度不超过 5 个连续井距, 水头 2m, 观测 30min, 渗漏量按 GB50268 允许值折减 20% 作为内控标准。缺陷复测采用 CCTV 全段二次扫描, 影像对比初测数据库, 新增缺陷 ≤ 1 处 $\cdot \text{km}^{-1}$ 且等级 \leq II 级方可签收。通过上述体系, 实现非开挖修复质量可控、责任可追、标准统一, 为后续运维提供高置信度基础数据^[3]。

三、综合效益评估与推广建议

(一) 经济 - 社会 - 环境效益量化分析

以宣城 II 标段 3.1km 修复段为基准, 按工程量清单测算非开挖直接成本为 2.48 万元 $\cdot \text{m}^{-1}$, 较开挖换管 3.91 万元 $\cdot \text{m}^{-1}$ 降低 36%, 差异主要源于道路破除与回填项取消。交通延误方面, 非开挖单点作业占道时间 $\leq 8\text{h}$, 按宣城市区单位延误成本 0.42 元 $\cdot \text{pcu}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 计算, 可减少延误损失约 1150 万元。环境维度, 非开挖避免弃方 $6.4 \times 10^4 \text{m}^3$, 减少柴油消耗 52t, 对应碳排放下降 73%, 折合减排二氧化碳 134t。综合对比见图 1, 并汇总于表 1。

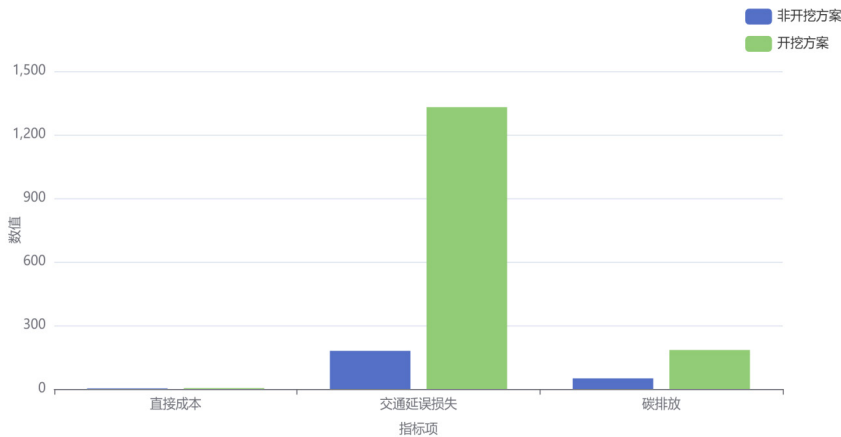


图1 非开挖与开挖方案综合成本对比

表1 经济-社会-环境指标汇总

指标项	非开挖方案	开挖方案	差值
直接成本 / 万元	2.48	3.91	-1.43
交通延误损失 / 万元	180	1330	-1150
碳排放 / tCO ₂	50	184	-134

表1显示，非开挖方案在三大维度均占优，经济与社会效益贡献率分别达46%与44%，环境效益占10%，为类似城区排水管网改造提供量化决策依据。

(二) 技术成熟度与风险雷达评价

为系统评价CIPP-UV、不锈钢双胀圈二类非开挖工法在宣城II标段的应用成熟度，构建技术、经济、工期、安全、环保五维度雷达模型，采用1-5级Likert量表，以文献基准、专家打分与现场记录综合赋分。技术维度聚焦工艺可靠性与设备国产化率：CIPP-UV树脂配方与灯链系统已实现100%国产，得5分；双胀圈密封胶进口依赖30%，得4分；经济维度以单位综合成本衡量，CIPP-UV为2.48万元·m⁻¹，成本最低得5分；双胀圈点修材料单价高但用量少，得4分。工期维度按作业效率评分，双胀圈单点30min完成得5分，CIPP-UV固化速度1.8h·km⁻¹得4分。安全维度考虑动火、深基坑与交通干扰，CIPP-UV无热源得5分，双胀圈井口0.6MPa短时承压得4分。环保维度以碳排放与废弃物计，CIPP-UV无废水、废弃物<1kg·m⁻¹得5分，双胀圈废胶<0.2kg·点⁻¹得4分。五维得分归一化后绘制雷达图，整体呈现CIPP-UV均衡领先、双胀圈安全环保稍逊的特征，为后续工艺选择提供可视化决策依据。

(三) 宣城经验总结与推广路径

宣城II标段实践形成“检测—设计—施工—验收”一体化EPC闭环，通过185.2km普查数据库直接驱动工法比选，将修复周期压缩65%，为城市老旧管网更新提供可复制范式。

政策层面，建议将非开挖纳入地方财政预算清单，对交通繁忙路段给予20%投资补贴，并建立“绿色通道”

简化占道审批，实现“即报即批”。标准层面，应制定《紫外光固化内衬技术规程》，统一设计厚度、固化能量、缠绕张力等关键参数，填补现行国标空白，减少地区差异造成的质量波动。产业层面，依托宣城示范，引导树脂、玻纤、钢塑带等上游企业在皖南设立区域仓库，形成2h供应圈；同时联合高校共建实训基地，每年培养200名掌握CIPP-UV与螺旋缠绕双技能的操作手，推动产业链降本增效。通过政策激励、标准引领、产业集聚三维协同，可将宣城经验快速推广至长三角同类城市，实现老旧排水管网低影响、低成本、高效率更新。

结语

宣城实践证实，以普查数据为核心的EPC闭环管理可将修复周期压缩65%，并实现经济、社会、环境效益同步最优。研究提出的政策补贴、标准补缺与产业集聚三维推广路径，已获皖南多市住建部门采纳。未来需在树脂循环、设备共享与数字孪生运维层面持续迭代，进一步降低全生命周期成本。随着长三角一体化深入推进，宣城经验有望以标准化、模块化形式辐射至沪苏浙同类型城市，为全国老旧排水管网绿色更新贡献“安徽方案”。

参考文献

- [1] 苏子文, 蒋美艳. 土著微生物原位梯级修复地下水氮污染的数值模拟研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2025, (06): 727-730+763.
- [2] 谢丽, 闵柏林, 柳林齐, 罗纯, 杨钰乾, 庞维海, 陈立生. 预涂动态膜形成特征及其在水处理应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, (06): 951-960.
- [3] 刘伟, 田振华, 马金菊, 李华北, 姚新鼎. 超声氧化技术在废水处理中的研究进展[J]. 水处理技术, 2025, (07): 27-33+52.

作者简介：徐渐(1987.04)，男，汉族，安徽宁国人，本科，工程师，研究方向市政工程，安徽路畅交通工程有限公司。