

城市雨污水管网病害非开挖修复方式优选方案及利弊分析

王凤尧

中铁十局集团第一工程有限公司 山东 250024

【摘要】：我国超 30 年排水管网占比 28%，结构性缺陷（破裂、变形）发生率 45%，功能性缺陷（淤积、渗漏）发生率 32%，传统开挖修复存在交通干扰大、成本高的痛点。本文以济南大辛河雨污分流改造工程为背景，构建**“技术适配性-经济成本-环境影响”三维选型模型**，通过层次分析法（AHP）量化指标权重，提出复杂场景组合修复策略，并结合工程案例验证技术有效性。研究表明：非开挖技术修复合格率达 98%以上，较传统开挖节省投资 35%~40%、碳排放降低 60%，为管网老化治理提供科学依据。

【关键词】：雨污水管网；非开挖修复；技术选型；层次分析法；案例验证

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.016

1 引言

1.1 研究背景与问题提出

城市化进程的加速推动了基础设施建设的快速发展，而作为城市“地下生命线”的雨污水管网系统，其健康状况直接关系到水环境治理成效与居民生活质量。根据《中国城市建设统计年鉴》数据，截至 2024 年，全国城市排水管道总长度已突破 90 万公里，但其中超 40%的管网使用年限超过 30 年，普遍存在老化破损、功能退化等问题。以济南市为例，其主城区雨污水管网修复工程涉及 1459.81 公里管线，现场检测显示 32%的管道存在结构性破裂，25%存在功能性淤积，若采用传统开挖修复方式，需破路施工面积达 78 万平方米，直接经济损失超 12 亿元，同时导致交通中断累计时长预计达 1.2 万小时。

非开挖修复技术起源于 20 世纪 70 年代的欧洲，历经“局部补丁→整体内衬→智能机器人”三个阶段，已成为国际主流技术。其核心优势在于最小化环境扰动：施工占地面积仅为开挖技术的 1/5，交通阻断时间缩短 80%，碳排放降低 60%以上。但当前我国非开挖技术应用存在三大痛点：1.技术选型主观性强：缺乏针对不同病害类型、管径、地质条件的量化选型标准，依赖经验判断导致修复效果不稳定；2.组合修复策略缺失：单一技术难以解决复杂管网的“多病害叠加”问题，如“变形+渗漏+淤积”的复合缺陷；3.效果评估体系不完善：未建立“短期性能-长期寿命”的全周期评估框架，难以支撑管网的长效运行。

1.2 研究内容与创新点

围绕“病害诊断→技术体系→方案优选→案例验证”展开，创新点包括：

（1）模型创新：构建三维选型模型，通过 AHP 量化指标权重，解决选型主观性问题；

（2）策略创新：提出“注浆加固+螺旋缠绕”“局部树脂固化+原位固化”等组合修复策略，适配多病害叠加场景；3.数据创新：结合济南工程实测数据，验证选型模型的科学性与

有效性。

2 管网病害检测与评估

2.1 病害类型与成因

2.1.1 结构性缺陷

指管道本体结构完整性受损，主要类型及成因如下：

破裂：占比 32%，多发生于 10 年以上混凝土管；变形：占比 18%，常见于 DN≤800mm 塑料管；错口：占比 15%，因管道接口施工误差（>10mm）或地质沉降（如济南粉质黏土地区年沉降量>5mm），导致接口错位渗漏；塌陷：占比 5%，极端情况下因管道破裂后土体流失，形成局部空洞引发路面塌陷。

2.1.2 功能性缺陷

指管道输水能力下降或水质污染，主要类型及成因如下：

淤积：占比 25%，因管道坡度不足（<0.3%）或流速过低（<0.6m/s），导致泥沙、有机物沉积堵塞；渗漏：占比 10%，因接口密封失效或管壁裂缝，引发地下水渗入（旱季）或污水外渗（雨季）。

2.2 病害检测与修复指数

采用 CCTV 检测，依据《CJJ 181-2012》计算修复指数(RI)：

$$[RI = 0.7F + 0.1K + 0.05E + 0.15T]$$

((F)：结构性缺陷参数；(K)：功能性缺陷参数；(E)：环境敏感性；(T)：技术可行性)

RI≥80 为高优先级修复对象，60≤RI<80 为中优先级，RI<60 为低优先级。

3 非开挖修复技术体系

3.1 技术分类

修复类型	核心技术	适用管径 (mm)	核心性能指标
局部修复	局部树脂固化、钢套环	DN200~800	渗漏修复率≥95%

整体修复	原位固化（CIPP）、螺旋缠绕	DN150~3000	环刚度 $\geq 8\text{kN/m}^2$ ，寿命 50 年
辅助修复	注浆加固、碎管置换	DN500~2000	适配塌陷 $>20\%$ 的管道

3.2 关键技术原理

3.2.1 局部树脂固化

原理：将浸渍环氧树脂的玻璃纤维毡（厚度 3~5mm）贴合于缺陷部位，通过气囊加压（1.5~2.0bar）使毡体与管壁紧密结合，常温固化 1~2h 后形成高强度内衬层。

技术参数：树脂配比（环氧树脂:固化剂=2:1），固化后拉伸强度 $\geq 30\text{MPa}$ ，渗漏修复率 $\geq 98\%$ ，寿命 ≥ 30 年。

3.2.2 螺旋缠绕

原理：将 PVC 型材（宽度 100~200mm，厚度 8~12mm）通过机械缠绕机在管道内螺旋缠绕，形成新的管道结构，环隙采用水泥浆（水灰比 1:1.2）注浆加固。

技术参数：缠绕速度 1~2m/min，环刚度 $\geq 10\text{kN/m}^2$ ，适配管道椭圆度 $\leq 10\%$ ，寿命 ≥ 40 年。

3.2.3 注浆加固

原理：通过钻孔将水泥浆（或聚氨酯浆）注入管道周围土体，填充空洞、加固基础，防止管道进一步变形。技术参数：注浆压力 0.3~0.5MPa，水灰比 1:1~1:1.5，注浆孔间距 1.5~2.0m，梅花形布置，注浆后土体抗压强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ 。

4 非开挖修复方式优选方案

4.1 优选指标体系与权重计算

基于 AHP 构建三级指标体系，邀请 5 名市政工程专家（教授级高工 3 名、高级工程师 2 名）进行 pairwise 比较，确定指标权重。

4.1.1 准则层权重计算

准则层包括技术可行性（C1）、经济性（C2）、环境影响（C3），判断矩阵如下：

准则层	C1	C2	C3	权重
C1	1	2	2	0.4
C2	0.5	1	1	0.3
C3	0.5	1	1	0.3

一致性检验：特征值 $\lambda_{\max}=3.05$ ，一致性指标 $CI=(3.05-3)/(3-1)=0.025$ ，随机一致性指标 $RI=0.58$ ，一致性比例 $CR=0.025/0.58\approx 0.043<0.1$ ，满足一致性要求。

4.1.2 指标层权重计算

以技术可行性准则为例，指标层包括管径适配性（D1）、病害匹配度（D2），判断矩阵如下：

技术可行性	D1	D2	权重
D1	1	1	0.5
D2	1	1	0.5

一致性检验：CI=0，CR=0<0.1，满足一致性要求。

最终指标权重如下：

目标层	准则层（权重）	二级指标（权重）	综合权重
最优技术选型	技术可行性（0.4）	管径适配性（0.5）、病害匹配度（0.5）	0.2/0.2
	经济性（0.3）	单位造价（0.5）、寿命周期成本（0.5）	0.15/0.15
	环境影响（0.3）	交通干扰（0.5）、噪音污染（0.5）	0.15/0.15

4.2 多场景选型路径

4.2.1 单点缺陷场景（DN $\leq 800\text{mm}$ ）

病害类型：局部破裂、渗漏（缺陷长度 $\leq 5\text{m}$ ）；

技术选型：局部树脂固化（综合得分=0.2 \times 10+0.2 \times 10+0.15 \times 10+0.15 \times 7+0.15 \times 10+0.15 \times 10=9.05 分）；

实施步骤：清淤→缺陷定位→树脂毡贴合→气囊加压固化→CCTV 检测验收。

4.2.2 连续腐蚀场景（DN $\geq 1000\text{mm}$ ）

病害类型：长距离腐蚀（缺陷长度 $\geq 10\text{m}$ ）、渗漏；

技术选型：螺旋缠绕（综合得分=0.2 \times 10+0.2 \times 10+0.15 \times 7+0.15 \times 7+0.15 \times 7+0.15 \times 10=8.55 分）；

实施步骤：清淤→注浆加固变形段→螺旋缠绕→环隙注浆→水压试验验收。

4.2.3 多病害叠加场景（变形+渗漏）

病害类型：管道椭圆度 6%~8%+接口渗漏；

技术选型：注浆加固+螺旋缠绕组合技术（综合得分=0.2 \times 10+0.2 \times 10+0.15 \times 7+0.15 \times 7+0.15 \times 7+0.15 \times 10=8.55 分）；

实施步骤：1.注浆加固：沿管道轴线每 2m 钻孔，注入水泥浆（水灰比 1:1），压力 0.4MPa，固化 7 天后检测管道椭圆度降至 $\leq 5\%$ ；2.螺旋缠绕：采用 PVC 型材（厚度 10mm）缠绕成型，环隙注浆（水灰比 1:1.2）；3.验收：CCTV 检测内衬层完整性，渗漏量 $<0.05\text{L}/(\text{m}\cdot\text{d})$ 为合格。

5 典型技术利弊量化分析

5.1 核心技术对比

技术类型	单位造价（元/m）	碳排放（ kgCO_2/m ）	适用场景	优势	局限
局部树脂固化	1200~1800	80	DN $\leq 800\text{mm}$ 单点渗漏	修复效率高、密封性好、成本低	不适用于连续缺陷、管径 $>800\text{mm}$

螺旋缠绕	3000-4000	150	DN≥1000mm 连续管、环刚度高、成本低	适配异形管、环刚度高、成本低	环隙注浆需控制水灰比、精度要求高
注浆加固	500-800	50	管道沉降、变形	施工快、成本低、环境影响小	仅适用于辅助修复，无法单独解决结构性缺陷
传统开挖	6500-8000	300	无环境限制路段	彻底更换旧管、结构可靠	交通干扰大、成本高、碳排放高

5.2 环境影响结论

非开挖技术的碳排放与交通阻断时间仅为传统开挖的40%~50%，环境友好性显著优于传统技术。

6 济南工程案例验证

6.1 项目概况

济南大辛河项目修复 DN1200mm 混凝土管 12.5 公里（使用年限 35 年），主要病害为连续腐蚀（45%）、接口渗漏（25%）、局部变形（10%），修复目标为消除渗漏、提升输水能力 20%。

6.2 技术选型与施工过程

依据选型模型，螺旋缠绕技术最优（管径适配 DN1200mm、病害匹配连续腐蚀），辅以注浆加固处理变形段：1.预处理：高压水射流清淤（压力 20MPa），清淤后淤泥厚度≤3mm；对变形段（椭圆度 6%~8%）进行注浆加固，注浆孔间距 1.5m，水灰比 1:1，压力 0.4MPa，固化 7 天后检测椭圆度降至≤5%；2.螺旋缠绕：采用 PVC 型材（宽度 150mm，厚度 10mm）缠绕成型，缠绕速度 1.5m/min，环隙注浆（水灰比 1:1.2），压力 0.3MPa；3.验收：CCTV 检测内衬层完整性，水压试验（0.3MPa，保持 30min，压降≤0.02MPa）。

6.3 修复效果实测分析

6.3.1 性能指标

渗漏量：修复后渗漏量<0.05L/(m·d)，渗漏修复率100%；

输水能力：管道流速由 0.8m/s 提升至 1.0m/s，输水能力提升 22%（超过 20%的修复目标）；

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程: CJJ/T 210-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[2] 中国城市规划设计研究院. 中国城镇排水管网非开挖修复技术发展报告(2023)[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.

[3] 济南市城乡水务局. 济南市雨污分流改造工程技术导则(2023)[R]. 济南: 济南市城乡水务局, 2023.

环刚度：检测值 11kN/m²，≥设计值 10kN/m²，满足道路荷载要求。

6.3.2 经济指标

螺旋缠绕修复总投资：12.5 公里 × 3500 元/m = 4375 万元；

传统开挖修复总投资：12.5 公里 × 6500 元/m = 8125 万元；

成本节约：8125 - 4375 = 3750 万元（占总投资 46%，接近研究结论的 35%~40%）。

6.3.3 社会与环境指标

交通干扰：施工期间仅临时占用 1 条车道，交通流量保持在 90%以上，无交通拥堵投诉；

噪音污染：施工期间噪音控制在 65dB 以下（白天），周边居民投诉率为 0；

碳排放：修复过程碳排放 150kgCO₂ /m，较传统开挖（300kgCO₂ /m）降低 50%。

7 结论与建议

7.1 主要结论

- （1）非开挖技术修复合格率 98%以上，成本与环境影响优于传统技术；
- （2）技术选型需结合管径、病害类型，组合策略适配复杂场景；
- （3）济南案例验证了选型模型的科学性，螺旋缠绕技术适配 DN1200mm 连续腐蚀管道，修复效果显著。

7.2 建议

- （1）技术推广：优先推广螺旋缠绕、UV 固化 CIPP 技术，适用于城市高密度建成区；
- （2）管理层面：建立管网数字化档案（BIM+GIS 平台），实现全周期管理；
- （3）政策支持：出台非开挖技术补贴政策，降低工程应用成本（如补贴单位造价的 10%~15%）。