

市政排水工程中管道非开挖修复技术的应用研究

周俊 杨辉 徐伟

中机国际工程设计研究院有限责任公司华东分院 江苏 南京 210000

【摘要】随着城市建设的飞速发展，排水管道的建设逐年增加，城市地下管网的规模也不断扩大。针对市中心城区，开发建设年份较早，同时受到地质条件、施工作业质量等原因，地下市政管线均出现结构性和功能性损坏现象；同时，在建工程对周边已建排水管道造成影响甚至损坏的情况也时有发生，这些情况严重影响了城市排水的安全运行。因此，掌握排水管道的运行状况，确保城市排水安全运行，对存在缺陷的管道进行及时修复是十分必要的。传统开挖修复技术因需大规模破坏路面、中断交通，且易引发地下管线二次损伤，已难以适应现代城市对高效、环保施工的需求。在此背景下，管道非开挖修复技术凭借其“微创性”“高效性”与“环境友好性”脱颖而出，成为市政排水管道维护的关键手段。本文主要探讨市政给排水工程中管道非开挖修复技术的应用实践，以给市政给排水工程建设提供参考与建议。

【关键词】市政排水工程；管道非开挖修复技术；原位修复；城市可持续发展

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.052

引言

在当前的城市化背景下，市政工程也迎来了双重挑战，排水管道面临老化、破损与容量不足等问题，传统的开挖修复施工需将道路封锁，挖掘土方及外运，这样不仅会堵塞交通，还会带来环境污染，尤其在道路狭窄、地下管线密集的老城区，管道开挖施工通常面临诸多困难和风险。而非开挖修复技术可通过地表或者检查井实施作业，以最小化环境干扰方式对地下管道完成修复，这种技术方式可很好的解决城市“拉链马路”难题，其技术体系涵盖了多种工艺，如软管内衬、穿插内衬、碎裂管置换、螺旋缠绕等，该技术可针对不同情况提供定制化解决方案，为市政排水工程的高质量发展注入了新的动能。

1 非开挖修复技术的理论溯源与技术优势

1.1 技术起源与理论演进

非开挖修复技术源于 20 世纪 70 年代石油天然气行业的管道更新需求，后逐步拓展至市政给排水领域。其核心理论基于“管道原位再生”与“结构功能复合”理念。这一技术主要是通过在旧管内部或外部形成新结构层，以同步提升管道强度、耐腐蚀性与过流能力等。技术演进过程中，材料科学、液压控制与智能监测技术的融合，推动了修复工艺从单一结构修复向全生命周期管理的跨越。例如，紫外光固化技术通过光敏树脂的快速聚合，实现了修复层与原管壁的化学键合，显著提升了接口密封性；而 HDPE 内衬管的热塑性变形特性，则使其能够适应复杂管型的贴合需求。

1.2 技术优势的多维解析

非开挖修复技术最重要的优势体现三重维度，即环境、经济、经济等。基于环境层面，该技术的施工噪声低于 65 分贝，扬尘排放量比传统方法大量减少，并且不会带来大量建筑垃圾，这也与低碳城市建设要求是相符合的。基于经济层面，非开挖技术比开挖法更经济，可让综合成本大幅降低，还可让工

期缩短。基于社会层面，施工期间，道路占用面积也会减少，对于周边居民出行、商业活动影响会显著降低。该技术还可让管道使用寿命延长，后期维护频次降低，在全生命周期成本方面具有明显优势。

2 非开挖修复技术的核心工艺体系

2.1 软管内衬法：结构更新的“柔性手术”

软管内衬法主要是以热固性树脂软管粘结旧管内壁，形成连贯防腐层，这样可更新管道结构。该技术适用多种管道材质修复，如铸铁管、混凝土管、钢管等，尤其对于内壁腐蚀、裂缝及渗漏等问题，修复后有明显效果。该工艺主要分为两类：翻转浸渍、拉入式。翻转浸渍法利用水压或气压将浸渍树脂的软管从一端翻转至另一端，翻转过程中树脂均匀涂覆于旧管内壁，固化后形成与原管形状一致的新内衬；拉入式法则通过牵引设备将预浸软管置入管道，再经充气膨胀使软管紧贴旧管内壁，实现粘结修复。两种工艺皆要求彻底清洁管道内壁油污及杂质等，若清洗不彻底，会对树脂粘结强度带来不利影响，会让修复层脱落。该技术优势主要是其可修复管径的范围很广，且修复后不会对流断面造成很大损失，能提升流动性，还可降低对周边环境的干扰，适用于交通繁忙区域或地下管线密集区的管道修复。例如南京市某污水收集系统基本位于老城区，市政污水管网密度高，道路狭窄，交通压力大，地下管线复杂，片区污水管网整治工程共涉及缺陷管道约 51.7km，其中使用软管内衬法修复缺陷管道占比达 45.1%。

2.2 穿插内衬法：管径适配的“精准置换”

穿插内衬法主要是在旧管内部拉进 HDPE 管或玻璃钢管，形成“管中管”结构，以更新管道功能。该技术适用于结构性破坏不严重的直圆形管道，尤其对于内壁磨损、接口存在渗漏等问题的管道，修复效果十分明显。该核心技术是通过 HDPE 管的 U 型变形与记忆恢复：以压模设备对管道进行压缩，成原

直径的 60%，让穿入阻力降低，其穿入后，再利用水压或气压让其复圆，这样则可与旧管壁形成紧密的摩擦配合形式，让修复层更稳定。该工艺对于管道变形量十分敏感，要求旧管道椭圆度不超过管径的 5%，否则要先对其进行整形处理，防止穿入中出现卡阻现象，或修复后间隙过大。穿插法的主要优势是其施工速度快，单段管道的修复时间很短，且管道修复后耐压强度会明显提升，管道使用寿命会延长，同时材料有着强耐腐蚀性，可让后续维护频次降低，通常用于大口径管道的长距离修复。

2.3 碎裂管法：管体更新的“破立结合”

碎裂管法主要是将锥形破碎送来粉碎旧管，同时将新管顶入，以形成置换，以整体更新管道。该技术主要应用于一些脆性材质管道更新，如陶瓷管、不加筋混凝土管、铸铁管等，尤其对于一些严重问题有明显效果，如管体破裂、错口或腐蚀严重等缺陷。其关键设备为液压驱动的碎管机，可产生顶进力，将旧管碎片挤入周围土体，形成管孔，为新管提供安装空间。该工艺可让管径同步扩大，对于原管过流能力不足的问题有效解决，还可让新管与周围土体紧密结合在一起，让管道抗沉降能力得以增强。施工时，相关人员要对顶进速度与扭矩严格控制，防止干扰周边管线，特别是在地下管线密集区域，则先要通过地质雷达探测技术，将风险提前规避。碎裂管法的局限性主要是要开挖两端工作坑，要求有很好的地质条件，对于砂层、卵石层则要通过注浆进行加固后才再利用该技术，以防止出现土体坍塌现象。

2.4 螺旋缠绕法：异形管修复的“柔性编织”

螺旋缠绕法主要是以螺旋缠绕机将 PVC 或 PE 带状型材送入旧管，利用卡扣连接形成连续内衬，实现异形管道修复。该技术适用于变径管、弯曲管及非圆形断面的修复，尤其针对树根侵入、接口脱节或局部塌陷等问题有很明显效果。其该工艺的主要优势在于型材可现场裁切，适应性强，可根据管道实际形状调整缠绕角度与搭接宽度，让内衬紧密贴合。修复后的管道内壁光滑，可大幅降低摩阻系数，提升过流能力，增强材料耐腐蚀性，延长管道使用寿命。该技术对操作精度要求较高，施工中要让每圈型材的搭接宽度与锁扣紧密度，否则易形成渗漏通道，影响修复质量。螺旋缠绕法常用于污水管道的修复，尤其适用于地形复杂或管道变形严重的区域，可有效解决传统方法难以处理的异形管修复难题。

3 非开挖修复技术的选择策略与优化路径

3.1 基于管道状态的“分级诊疗”模型

管道修复方案的选择可构建完整逻辑链条，即“病害诊断—工艺匹配—效果评估”。病害诊断阶段，可让 CCTV 检测、QV 潜望镜及声呐检测技术实现协同应用，全方位检测管道。CCTV 检测主要是通过高清摄像头拍摄管道内壁图像，精准识

别裂缝、腐蚀、树根侵入等表观病害；QV 潜望镜则以可伸缩杆件实现快速初步检测，适用于大范围筛查；声呐检测则利用超声波反射原理，对管道下方土体空洞或管壁脱节等隐蔽缺陷进行探测。三种技术形成互补，确保病害类型与严重程度的精准判定。工艺匹配环节，需综合考虑管道材质（如混凝土管、铸铁管、HDPE 管）、管径（DN300 以下小口径或 DN800 以上大口径）、埋深（浅埋或深埋）及周边环境（交通繁忙区或居民区）。例如，DN300 以下的小口径管道因空间受限，优先选用点状原位固化法，以局部注射树脂来快速修复管道，或利用不锈钢快速锁法，以机械锁紧装置固定内衬；DN800 以上的大口径管道则考虑碎裂管法，将液压破碎旧管同步顶入新管，或采用 HDPE 穿插法，利用热塑性变形特性实现紧密贴合。效果评估阶段，可引入有限元模拟对修复后管道的应力分布分析，验证新结构层与原管壁的协同承载能力，确保修复方案满足设计寿命要求。

3.2 多目标协同的“技术—经济—环境”评价

优化非开挖修复技术，要让该技术实现三维协同，即技术性能、经济成本及环境影响等。基于技术性能层面，可对修复后的管道过流能力（摩阻系数降低幅度）、耐压强度（承压能力提升比例）及抗腐蚀性（材料耐化学侵蚀性能）进行重点评估。例如，引入软管内衬法来修复管道，可提升管道内壁光滑度，增加过流能力；利用 HDPE 穿插法修复管道，则可提升耐压强度，满足深埋管道实际需求。基于经济成面，可对全生命周期成本精准计算，包括各项费用，如材料费（树脂、HDPE 管等）、设备租赁费（碎管机、缠绕机等）、人工费（技术人员与操作工人）及交通导改费（施工期间道路占用费用）等，这样可缩短施工周期，降低人工费与交通费，其综合成本会显著降低，有明显成本优势。基于环境影响层面，可对施工噪声（分贝值）、扬尘排放量及废弃物产生量等实现量化。软管内衬法施工中，噪音低，扬尘排放量少，并且不会带来大量建筑垃圾，跟传统开挖法相经，对环境的干扰明显更低。相关部门可引入多目标权重分配，建立综合评价模型，为修复方案选择提供科学依据。

3.3 智能化施工的“数字孪生”应用

在当前的智能化时代，BIM 技术可与物联网实现融合，非开挖技术施工也逐步引入了先进技术，积极应用数字技术、大数据等。相关部门在施工中，可充分利用数字孪生技术来构建管道三维模型，对修复过程中的应力分析、树指流动及固化反应等进行模拟，让工艺参数得以优化。例如，在进行紫外光固化施工时，软管内树脂固化过程受温度场与光照强度有很明显的影响。相关人员可引入光纤传感器，对软管内渐度分布与固化度变化等情况实时监测，对于紫外灯的移动速度与照射强度进行动态调整，以防止局部过热带来树脂降解现象或出现固化不足现象，对粘结强度造成不利影响。相关人员可利用 BIM 模

型的有限元分析，对修复后的管道在不同荷载条件下的变形量进行预测，对设计合理性进行验证。基于 AR 技术的施工指导系统，可以三维动画形式来生动展示施工中的操作步骤、安全规范及质量标准，并叠加至现场视野，施工人员则可以智能眼镜或移动终端对施工要点直观查看，这样可显著降低人为操作中的误差。智能化施工技术的应用，显著提升了非开挖修复的施工效率与质量可控性，推动行业向“智慧建造”转型。

4 非开挖修复技术应用的挑战与突破方向

4.1 技术标准化与规范化的“体系构建”

当前，非开挖修复技术未构建统一的标准体系，导致设计、施工及验收环节存在质量隐患。后续，需从材料性能、工艺参数、检测方法三个维度建立标准：例如，明确树脂软管的拉伸强度、断裂伸长率及固化时间等指标；规定翻转浸渍法的压力控制范围与固化温度曲线；制定 CCTV 检测的图像分辨率与缺陷分级标准。同时，推动行业认证制度的建立，要求施工人员持证上岗，确保工艺执行的规范性。

4.2 复合材料与装备国产化的“创新驱动”

高端非开挖修复材料与设备长期依赖进口，制约了技术的普及与成本降低。后续要加强产学研合作，不断突破关键技术瓶颈：在材料领域，研发具有更高强度、耐腐蚀性及环保性的复合内衬材料，如纳米改性树脂、生物基 HDPE 管；在装备领

域，开发智能化施工设备，如具备自动纠偏功能的螺旋缠绕机、可实时监测顶进力的碎管机。还可以 3D 打印技术实现异形管件的快速定制，让修复工艺适应性显著提升。

4.3 全生命周期管理的“数据赋能”

非开挖修复技术的效果评估需延伸至管道运行阶段。通过部署物联网传感器，实时监测修复后管道的流量、压力及渗漏情况，建立健康档案。技术部门可结合大数据分析，预测管道剩余使用寿命，制定预防性维护计划。例如，某市排水管理部门通过搭建智慧排水平台，对修复后的管道进行长期跟踪，发现采用 HDPE 穿插法的管道在运行后，过流能力保持率高，而软管内衬法则需定期进行局部补强。这一数据反馈为后续修复方案的选择提供了科学依据。

5 结语

总之，市政排水工程中管道非开挖修复技术的应用，标志着城市基础设施维护从“破坏性重建”向“再生性修复”的范式转变。其技术体系通过软管内衬、穿插置换、碎裂更新与螺旋缠绕等工艺的创新，实现了对复杂管网的高效、精准修复。未来，随着材料科学、数字技术与装备制造的深度融合，非开挖修复技术将向智能化、定制化与全生命周期管理方向发展，为构建韧性城市、推动排水系统绿色转型提供核心支撑。这一技术革命不仅重塑了市政工程的技术逻辑，更彰显了人类在城市化进程中追求和谐共生的智慧。

参考文献：

- [1] 陶善勇.非开挖技术在市政排水工程中的应用研究[J].四川水利,2023,45(S1):86-89+140.
- [2] 巨晓东.非开挖技术在市政给排水工程中的实践应用[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(13):192-194.
- [3] 赵泽鹏.浅谈城镇排水管道非开挖修复技术[J].城市勘测,2022,(S1):76-81.
- [4] 许志强.非开挖技术在市政给水管道施工中的实践[J].建设科技,2022,(20):44-46.
- [5] 范淼,檀新流.非开挖修复技术在排水管道工程中的应用[J].绿色建造与智能建筑,2021,(10):25-29.
- [6] 沈小华,齐国辅,严小明,等.南京市某排水管网检测工程实例分析[J].给水排水,2020,56(04):134-138.