

非开挖技术在老旧城区管道修复中适用性研究

刘础豪

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要:为解决老旧城区市政管道修复中传统开挖技术带来的交通拥堵、环境破坏和成本高昂等问题,采用对比法,分析传统开挖与非开挖修复的技术工艺、优势对比和应用要点等内容。研究表明,在非开挖修复技术中,顶管技术和内衬修复技术能够有效减少交通管制和商业损失;在环境影响方面,噪声、扬尘污染小,对生态破坏低;社会影响上,对交通、居民生活和商业活动干扰小。通过上述研究能够有效为老旧城区管道修复工程方案比选提供依据,为后续城市基础设施建设和可持续发展提供有力支持。

关键词:非开挖技术;技术适用性;对比分析法;市政管道修复

0 引言

随着城市化进程加快,老旧城区市政管网老化问题日益严重,管道腐蚀、裂缝、堵塞等问题频发,导致水资源浪费、环境污染加剧,甚至威胁公共安全。传统开挖修复技术虽能解决问题,但存在诸多弊端:施工期间造成交通拥堵(年均经济损失达数亿元),环境破坏严重,成本高昂(土方开挖和路面恢复费用占比大),且易损坏地下其他管线。

因此非开挖技术对城市可持续发展意义重大:延长管道寿命,提升运行效率,保障基础设施安全;符合绿色环保理念,减少资源浪费;同时推动相关产业发展,为经济增长注入新动力。通过技术创新和标准化建设,非开挖技术将在老旧城区管网修复中发挥更大作用。本文通过对比分析传统开挖技术与非开挖技术,结合实际数据分析,提出优化方案,提升非开挖技术在老旧城区管道修复中的应用效果和经济效益。

1 修复技术概述

1.1 传统开挖修复技术

1.1.1 施工流程

传统开挖修复技术是一种较为直接的市政管道修复方法,施工流程包括:

- 1) 定位放线:利用探测仪明确管线参数,制定施工方案;
- 2) 沟槽开挖:按管径、埋深确定槽宽(预留操作空间),根据土质选择支护(钢板桩或放坡);
- 3) 旧管拆除:分类处理承插式和焊接式管

材,保护周边土体;

- 4) 新管安装:夯实基底后吊装定位,采用承插、热熔或焊接工艺连接;

- 5) 质量检验:外观检查结合超声波探伤,水压试验验证密封性;

- 6) 回填恢复:分层回填、分层压实,恢复地面原貌。

1.1.2 应用场景

- 1) 新建管道:适用于新区等未开发区域,地面障碍少且空间开阔,便于高效施工且成本低。

- 2) 浅埋简单环境:人行道、绿化带等浅埋管道,周边无复杂设施时,施工便捷。

- 3) 高质修复需求:化工、饮用水管道等关键领域,便于全面检测与修复,保障质量安全。

1.1.3 应用局限性

- 1) 交通影响突出:老旧城区道路狭窄,开挖占用车道易引发拥堵,甚至瘫痪主干道,增加居民出行难度与社会治理压力。

- 2) 地下管线风险高:老旧区域地下管网复杂(水、电、气、通信等),资料不全易导致误挖,引发泄漏、断电等安全事故。

- 3) 环境破坏显著:土方堆放占用空间,噪声、扬尘污染影响居民生活;开挖可能破坏建筑基础、绿化设施及城市景观。

- 4) 成本与周期问题:大型机械租赁、交通疏导、环保措施及后期路面修复费用叠加,多工序施工易受地下障碍物、天气等因素延误,影响城市运行与居民生活。

1.2 非开挖修复技术

1.2.1 顶管技术

顶管技术是一种非开挖管道铺设和修复技术，通过顶进设备产生的顶力，克服管道与土壤间的摩擦力，将管道按设计路线顶入土中^[1]，避免大面积地面开挖。施工时，先在工作坑内安装顶进设备，如主顶油缸和中继间，然后将工具管或掘进机置于管道前端，推动其前进并逐节顶入管道，直至接收坑。

主要设备包括：

1) 顶管机：核心设备，用于切削土体、平衡地层压力、控制方向和排出渣土。根据地质条件，分为手掘式、挤压式、泥水平衡式和土压平衡式等。手掘式适用于土质好、地下水位低的地层；挤压式用于软土地层；泥水平衡式和土压平衡式适用于复杂地质，能有效防止地面沉降。

2) 千斤顶：提供顶力的关键设备，安装在工作坑后部，顶力从几十吨到数千吨不等。千斤顶通过顶铁将顶力均匀传递到管道，推动其前进，需具备稳定可靠的顶力和足够的行程。

3) 导轨：引导管道方向的装置，安装在工作坑底部，确保管道按正确轴线和坡度顶进。导轨由轨钢或槽钢制成，需严格控制水平度和垂直度，并具备足够的强度和刚度。

4) 顶铁：传递顶力的辅助工具，将千斤顶的顶力均匀分布到管道端面，防止局部应力损坏管道。常见类型有环形、U形和矩形顶铁，需具备足够的强度和光滑表面。

5) 注浆系统：向管道与土体间注入泥浆，形成泥浆套，减小摩擦力，降低顶进阻力，并支撑土体防止地面沉降。系统包括泥浆搅拌设备、注浆泵、管道和注浆嘴。泥浆需具备良好的流动性、稳定性和润滑性。

1.2.2 内衬修复技术

内衬修复技术是一种非开挖修复技术，通过在管道内部铺设新内衬材料，恢复或提升管道功能，具有施工快、环境影响小、成本低等优点，适用于排水、供水、燃气等市政管道修复。常见技术包括：

1) 原位固化法(CIPP)：将浸渍树脂的软管或纤维织物拉入管道，通过热水、蒸汽或紫外线固化，形成紧密贴合的新内衬。适用于管径 60~2 500 mm 的圆形、椭圆形管道，可修复裂缝、腐

蚀等缺陷，修复后密封性和耐腐蚀性良好，施工速度快，修复质量高。

2) 插管修复法：将外径略小于旧管道的新管道插入旧管内，并在间隙填充密封材料，形成复合管道。新管道材质为塑料、金属或玻璃纤维，耐腐蚀性强，适用于管径 100~1 200 mm 的管道。施工简单、成本低，但可能降低过水能力，需确保插入精度和密封质量。

3) 螺旋缠绕法：用螺旋缠绕机将带状型材(如 PVC、GRP)在旧管内螺旋缠绕，形成连续密封的内衬管。适用于各种材质和管径，尤其适合大口径排水管道，施工快、环境影响小。修复后内壁光滑，过水能力提升，密封性和耐久性良好。非开挖管道铺设工作井围护方式包含固定口径法、扩张法。设备移动方式分为固定式和自行式。

4) 内衬 HDPE 管法：将外径略大于主管道的 HDPE 衬管缩径或压“U”变形后插入主管道，依靠记忆特性或压力、温度回弹膨胀，形成管中管结构。适用于管径 108~2 000 mm 的管道，温度范围 -60~60 ℃，使用寿命达 50 a 以上。内壁光滑，水流阻力小，流量和流速可能增加，施工快、耐腐蚀性好，但对设备和工艺要求较高。

2 修复技术的优势对比

2.1 经济成本对比

传统开挖修复技术和非开挖修复技术从直接成本和间接成本进行计算对比，以 $\phi 800$ mm 同种类管道、施工长度 1 km 的工程为例，经济成本对比见表 1。

表 1 经济成本对比表

指标	传统开挖修复技术	非开挖修复技术	
		顶管	CIPP
直接成本/万元	380	320	280
间接成本/万元	150	30	15
工期/d	45	25	10

2.2 环境影响对比

1) 噪声污染：传统开挖技术噪声严重，挖掘机(80~90 dB)和破碎机(90~100 dB)对居民生活和健康造成干扰；非开挖技术噪声显著降低，顶管技术(60~70 dB)因地下施工减少噪声传播，内衬修复(50~60 dB)设备小型化，噪声影响更小，适用于学校、医院等敏感区域。

2) 扬尘污染：传统开挖技术产生大量扬尘，

PM₁₀和PM_{2.5}浓度可达正常值的数倍,影响空气质量和居民健康;非开挖技术大幅减少扬尘,顶管技术仅需开挖工作坑,土方量减少80%以上。内衬修复基本无土方作业,扬尘污染几乎为0,适用于公园、景区等环境敏感区域。

3) 生态影响:传统开挖技术破坏植被和土壤结构,导致水土流失,影响生态平衡;非开挖技术最大限度保护生态环境,顶管技术避免地面破坏,内衬修复不影响地表植被和土壤,适用于自然保护区、湿地等生态敏感区域。

2.3 社会影响对比

1) 交通影响:传统开挖技术导致道路封闭,交通拥堵严重,居民通勤时间增加数倍,公交线路混乱;非开挖技术对交通影响极小,顶管技术仅占用少量地面空间,内衬修复完全不占用路面,保障交通畅通。

2) 居民生活影响:传统开挖技术噪声、扬尘严重,施工周期长(数月),导致居民生活不便,甚至引发健康问题;非开挖技术施工周期短,噪声和扬尘低,对居民生活干扰小,保障正常生活秩序。

3) 商业活动影响:传统开挖技术导致客流量下降60%以上,营业额锐减,部分店铺被迫停业;非开挖技术对商业影响小,周边店铺可正常营业,营业额保持稳定,减少经济损失。

3 非开挖修复技术适应性

3.1 顶管技术的应用要点

3.1.1 地质条件适用性

不同地质条件对顶管施工有着显著影响,在老城区进行顶管施工时,需要充分考虑地质因素,选择合适的顶管工艺和设备。

1) 砂土:砂土颗粒间黏聚力小、透水性强,易发生土体坍塌和涌水。某城市顶管工程中因砂土地层评估不足,导致顶管机被掩埋。对此,可采用“泥水平衡顶管工艺”,通过注入泥水平衡土体和地下水压力,形成稳定泥膜,防止坍塌和涌水,并选用密封性好、排渣能力强的顶管机。

2) 黏土:黏土黏聚力强、透水性差,易黏附刀盘和管道外壁,增加顶进阻力,遇水可能膨胀产生侧压力。可采用土压平衡顶管工艺,控制土仓压力与周围土体平衡,避免坍塌和变形。同时,在管道外壁涂抹减阻剂,并合理调整顶进速度和顶力,减少土体扰动。

3) 岩石:岩石硬度高、强度大,施工难度大,需使用岩石顶管机,配备高强度滚刀式刀盘破碎岩石。某污水管道工程中,采用岩石顶管机并结合预裂爆破辅助措施,提高施工效率。施工中需密切关注设备状态和刀具磨损,及时更换,确保安全顺利施工。

3.1.2 管道设计与施工精度控制

在顶管施工中,管道的设计与施工精度控制至关重要,直接影响管道的使用寿命和运行安全。

1) 管材选择:根据工程要求、地质条件和管道用途选择管材。常用管材包括钢筋混凝土管^[1]、钢管和玻璃纤维增强塑料夹砂管(FRP)。钢筋混凝土管强度高、耐久性好,适用于大多数市政工程^[2];钢管强度高、密封性强,适用于燃气和石油管道,但需防腐处理;FRP管重量轻、耐腐蚀,适用于腐蚀性介质和快速施工。某供水管道工程因穿越腐蚀性土壤,选用FRP管,确保了使用寿命和供水安全。

2) 管径确定:管径需根据流量、介质性质和地形条件确定。老城区地形复杂,可能需调整管径。某排水管道工程因地形起伏大,适当加大管径并设置合理坡度,确保了排水畅通。

3) 接口形式:接口形式影响密封性和整体性。常见接口有企口、F型接口和钢承口。企口施工简单但易开裂;F型接口密封性好,适用于高密封要求工程;钢承口强度高、密封性好,适用于大口径管道。某燃气管道工程采用钢承口接口,有效防止了燃气泄漏。

4) 施工精度控制:施工前需精确测量工作坑、接收坑位置和高程,确定管道中心线。施工中使用全站仪、陀螺仪等实时监测顶管机姿态和管道轴线,及时纠偏。某电力管道工程通过全站仪实时监测,调整顶进参数,确保轴线偏差在允许范围内。同时,加强施工人员培训和管理,严格按照规范操作,确保施工质量。

3.1.3 施工过程中的风险控制

顶管施工过程中存在多种风险,如地面沉降、管道破裂、涌水涌砂等,需要采取有效的风险控制措施,确保施工安全和工程质量。

1) 地面沉降:顶管施工扰动土体易引发地面沉降。施工前需详细勘察地质条件,合理控制顶进速度和顶力,避免过度扰动土体,并通过注浆加固土体。例如,某通信管道工程通过控制顶力

和注浆加固,有效控制了地面沉降,确保了周边建筑物和地下管线的安全。

2) 管道破裂:管材质量不合格、顶力过大或土体不均匀可能导致管道破裂。需严格把控管材质量,合理计算顶力,并加强土体监测。某热力管道工程因管材质量问题出现破裂,施工团队及时更换管道并加强质量检验,确保了后续施工顺利进行。

3) 涌水涌砂:地下水位高或砂土层厚的地段易发生涌水涌砂。施工前需采取降水措施降低地下水位,采用泥水平衡顶管工艺平衡地下水压力,并加强管道接口密封处理。某污水管道工程通过井点降水和泥水平衡工艺,有效防止了涌水涌砂,保证了施工安全。

3.2 内衬修复技术的应用要点

3.2.1 管道预处理技术

在进行内衬修复之前,对管道进行全面且细致的预处理工作,确保内衬修复效果。预处理工作主要包括管道清洗、检测以及局部修复等环节。

1) 管道清洗:清除管道内沉积物、污垢和杂物,为后续工作创造条件。常用方法包括高压水射流清洗和机械清洗。高压水射流清洗利用高速水流冲刷管道内壁,清洗效果好且损伤小。例如,某排水管道工程采用高压水射流技术,彻底清除了多年积累的淤泥和砂石。机械清洗通过清管器、刮刀等工具刮削管道内壁,适用于管径较大或沉积物较硬的管道,可与高压水射流结合使用以提高效率。

2) 管道检测:通过检测了解管道结构的完整性、腐蚀程度、裂缝和变形情况,为修复方案提供依据。常用技术包括 CCTV 检测、声呐检测和探地雷达检测。CCTV 检测利用摄像头实时拍摄管道内部图像,直观判断缺陷位置和类型;某供水管道工程通过 CCTV 检测发现多处腐蚀坑和裂缝。声呐检测适用于充满水的管道,检测水位、淤泥厚度和变形情况;探地雷达检测用于探测管道位置、埋深及周围土体情况。

3) 局部修复:对检测发现的局部缺陷(如裂缝、孔洞、腐蚀坑)进行修复,确保管道结构强度和密封性。较小的裂缝可采用环氧树脂灌浆法修复,某燃气管道工程通过环氧树脂灌浆修复微小裂缝,防止燃气泄漏。孔洞和腐蚀坑可通过补焊或贴补修复,金属管道采用焊接,非金属管道使

用玻璃纤维布或橡胶板等材料。某排水管道工程采用玻璃纤维布和树脂材料修复孔洞和腐蚀坑,效果良好。

3.2.2 内衬材料的选择与性能要求

内衬材料的选择直接关系到内衬修复的效果和管道的使用寿命,因此需要根据管道的用途、工作环境、管径大小等因素,综合考虑不同内衬材料的特点和适用范围,选择合适的内衬材料,并确保其具备良好的性能。

1) 玻璃纤维增强塑料(FRP):具有轻质高强、耐腐蚀、耐磨损和绝缘性能好等优点,适用于化工、排水等腐蚀性介质管道。其强度高、耐腐蚀性强,能有效抵抗酸、碱、盐等化学物质的侵蚀。某化工企业废水管道采用 FRP 内衬,多年使用后仍保持良好状态。FRP 施工工艺简单,可通过缠绕、模压等方式适应不同管径和形状的管道修复。

2) 高密度聚乙烯(HDPE):具有耐腐蚀、耐化学药品、柔韧性和抗冲击性能,内壁光滑,水流阻力小,适用于供水和排水管道。柔韧性好,能承受外力变形而不破裂,抗震性能优异。某老旧城区供水管道采用 HDPE 内衬后,耐腐蚀性提高,水流阻力减小,供水流量显著增加。HDPE 内衬管可通过插管法、缩径法等方式快速安装,对管道运行影响小。

3) 性能要求:内衬材料需具备良好的耐腐蚀性、强度和刚度,以抵抗化学物质侵蚀和承受内外压力,同时需具备柔韧性和抗冲击性能,适应管道变形和振动。此外,应与原有管道紧密粘结,防止脱粘,确保修复效果。

3.2.3 施工工艺与质量控制

内衬修复技术的施工工艺直接影响修复质量,因此需要严格按照施工规范和操作规程进行施工,并加强施工过程中的质量控制,确保修复后的管道满足设计要求和使用寿命。

1) 原位固化法

原位固化法(CIPP)施工首先进行管道预处理,通过清洗、检测和局部修复,确保管道内表面洁净且无缺陷;随后将浸渍树脂的软管或纤维织物拉入管道,过程中防止材料损坏并确保定位准确;接着固定扎头并送入灯架,采用紫外灯照射固化,全程实时监控温度、压力等关键参数;固化完成后切除多余材料,恢复管道通水功能。质量控制

贯穿全过程，严格把控树脂配方、固化时间及固化过程参数，修复后通过CCTV检测和压力测试，验证内衬管的完整性、密封性及粘结性能，确保各项指标符合设计与规范要求。

2) 插管修复法

插管修复法的施工工艺相对简单，首先，对管道进行预处理，清除管道内的杂物和沉积物，对局部缺陷进行修复。然后，将外径略小于原有管道内径的新管道插入到旧管道内，插入过程中可采用牵引设备辅助，确保新管道顺利插入。在新旧管道之间的环形间隙中填充密封材料，使新管道与旧管道紧密结合，形成一个复合管道。密封材料的选择应根据管道的工作环境和要求确定，确保其具有良好的密封性和耐久性。

在质量控制方面，要严格控制新管道的插入精度，确保新管道与旧管道的同心度，避免偏心而影响管道的使用性能。保证密封材料的填充质量，确保环形间隙填充饱满，密封可靠。对修复后的管道进行压力测试和泄漏检测，检查管道的

密封性和整体性能，确保修复后的管道正常运行。

4 结语

非开挖技术在老城区管道修复中展现出显著优势。与传统开挖技术相比，顶管技术和内衬修复技术更具经济性与环保性，能够有效减少交通管制与商业损失，成本明显降低，工期明显缩短，对居民生活、交通及生态影响显著减少，契合绿色城市发展需求。本文研究为老城区管网修复方案比选提供了量化依据，对优化城市基础设施运维模式具有重要实用价值。但研究对非开挖技术在高水位、复杂管网交错场景的适用性分析不足，且长期性能监测数据有限，后续仍需进一步研究优化。

参考文献：

- [1] 卢泓方,吴晓南,TOM I,等. 国外天然气管道非开挖安装、修复及更换技术[J]. 天然气工业,2018,38(3):110-120.
- [2] 朱小宁. 兰州市污水全收集工程管道施工工艺及顶管技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
- [3] 王成. 常规顶管工程设计的探讨[J]. 东北水利水电,2010,28(7):12-13,22.