

城市污水管网缺陷修复技术实践分析

邹小华, 吕文杰

(广东桂海建筑工程有限公司, 广东 佛山 528226)

摘 要 随着我国城市化进程的不断推进, 早期埋设的排水管网因材质老化、荷载变化、地质沉降等原因, 普遍出现结构性及功能性缺陷, 导致地下水入渗、污水外溢等问题, 严重影响污水处理系统效能, 并对周边环境及水体构成威胁。非开挖修复技术作为一种对交通、环境和市民生活影响较小的现代化施工工艺, 已成为城镇地下管线修复的主流方向。本文结合污水管网缺陷修复项目的工程实践, 系统阐述了管网病害的评估方法, 深入分析了紫外光固化(UV-CIPP)、点状原位固化、管道碎裂更新等主流非开挖修复技术的原理、工艺流程及适用条件, 并对传统开挖换管技术进行了对比, 旨在总结一套科学、经济、高效的管网修复综合技术方案, 为类似城市的管网修复工程提供实践参考。

关键词 污水管网; 管网病害; 管网修复技术; 非开挖修复; 开挖修复

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.014

0 引言

城镇排水管网是现代化城市不可或缺的“静脉”系统, 承担着收集、输送生活污水和工业废水的重要任务。然而, 许多建于 20 世纪末、21 世纪初的管道, 由于当时材料技术、施工标准及规划预见性的局限, 在长期服役过程中不可避免地出现各种病害。病害管道的存在导致了一系列严峻问题: 首先, 管道结构性破损导致大量地下水、泥沙入渗, 不仅增加了污水处理厂的无效处理负荷, 更严重稀释了进水浓度, 导致生化处理单元效率低下, 能耗增加, 难以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 的一级 A 标。其次, 污水外渗会污染土壤和地下水体, 破坏生态环境。此外, 管道堵塞、破裂可能导致路面塌陷, 对城市交通安全和人民生命财产安全构成直接威胁。

1 管网病害诊断与评估体系

科学修复的前提是精准诊断。在该项目中, 前期采用了 QV 管道潜望镜等检测手段对管道内部状况进行了全面摸排, 并依据《城镇排水管道检测与评估技术规范》(CJJ 181-2012) 对缺陷进行了定级。

1.1 缺陷分类与分级

管道缺陷分为结构性缺陷和功能性缺陷两大类。结构性缺陷是管道结构本身遭受破坏, 影响其强度和完整性, 主要包括破裂(PL)、变形(BX)、错口(CK)、脱节(TJ)、渗漏(SL)、腐蚀(FS)等。功能性缺

陷是影响管道排水功能的问题, 如沉积(CJ)、结垢(JG)、树根(SR)、障碍物(ZW)等^[1]。

1.2 管段状况评估与修复决策

对单个缺陷评估后, 需对整个管段进行综合性评价, 为修复决策提供依据。主要通过两个指标:

1. 管道状况指数(Pipe Condition Index, PCI): 用于评价管道的结构状况。

2. 修复指数(Repair Index, RI): 用于决策是否需要修复以及修复的紧迫性。修复指数(RI)的计算公式为:

$$RI=0.7 \times F+0.1 \times K+0.05 \times E+0.15 \times T \quad (1)$$

式(1)中: F 是结构性缺陷参数, K 是地区重要性参数(如中心商业区取值高), E 是管道重要性参数(如管径越大取值越高), T 是土质影响参数(如淤泥层、粉砂层取值高)。根据 RI 的计算结果, 可将修复等级划分为四级(见表 1), 从而科学地指导工程实践。

表 1 管段修复等级划分

修复等级	修复指数(RI)	修复建议与说明
I	$RI \leq 1$	结构条件基本完好, 不修复
II	$1 < RI \leq 4$	结构在短期内不会发生破坏, 但应做修复计划
III	$4 < RI \leq 7$	结构在短期内可能会发生破坏, 应尽快修复
IV	$RI > 7$	结构已经发生或即将发生破坏, 应立即修复

在该项目中,筛选出的 500 个修复点主要为Ⅲ、Ⅳ级结构性缺陷和部分严重功能性缺陷点,修复必要性极大。

2 管网修复主流施工技术

管网修复技术可分为两大体系:非开挖修复和开挖修复。

2.1 非开挖修复技术

2.1.1 局部修复技术

针对管道局部缺陷(如接口渗漏、局部破裂),无需对整个管段进行处理,经济高效。

1. 点状原位固化法。(1)原理:将浸渍有常温固化树脂的玻璃纤维毡布包裹在专用气囊上,送入管道内部定位缺陷点。充气使毡布紧贴管壁,在压力下保持一段时间,待树脂固化后形成高强度内衬“补丁”^[2]。

(2)工艺流程:管道清洗→CCTV 复检定位→树脂毡布制备→气囊安装定位→充气加压固化→气囊泄压取出→CCTV 验收。(3)特点:施工速度快(通常 1~2 小时/点),无需开挖工作坑,对交通影响极小。在该项目中,广泛应用于 DN400-DN1200 管道的局部破裂、渗漏修复。

2. 不锈钢双胀环法。(1)原理:在管道接口或局部损坏部位安装由优质不锈钢和橡胶止水带制成的胀环,通过专用工具使胀环膨胀,从而压紧管内壁实现止水目的。(2)适用:适用于解决接口错位、脱节导致的渗漏问题。

2.1.2 整体修复技术

当管段存在多处缺陷或整体结构强度不足时,需进行整体修复,形成“管中管”结构。

1. 紫外光固化原位固化法。(1)原理:将浸渍有光敏树脂的玻璃纤维软管拉入旧管道中,充气使其膨胀紧贴原管内壁,然后利用紫外光灯架在管内匀速行走,激发树脂发生聚合反应,在短时间内固化形成高强度、光滑的新管^[3]。(2)工艺流程:管道预处理(清淤、冲洗)→CCTV 检测→拉入浸树脂软管→充气扩张→UV 紫外光固化→端头处理→CCTV 验收。(3)优势:一是固化速度快 全程机械化控制,固化速度通常为 0.5~1.5 m/min,效率远高于热水固化法。二是节能环保:能耗低,几乎无有机挥发物排放。三是质量可控:固化过程由电脑精确控制,温度、速度恒定,质量稳定可靠。四是内壁光滑:过流能力恢复甚至优于原管。(4)适用:适用于 DN200-DN2700 的各类管材。在该项目中,是整体修复的首选工艺,尤其适用于交通繁忙、环保要求高的城区主干道。

2. 热水固化翻转内衬法。最早的原位固化法是利用热水或蒸汽对树脂毡筒进行加热固化。其优点是技术成熟,适用管径范围广;缺点是能耗高、固化时间长、施工过程中存在锅炉安全隐患,且质量可控性相对较差。

3. 螺旋缠绕法。(1)原理:通过安装在井内的制管机,将带状 PVC 或 PE 型材在旧管道内螺旋缠绕成一条新管。新管与旧管之间的空隙可进行注浆填充。(2)特点:可带水作业,但过流断面损失较大,结构独立性较差,依赖注浆。(3)适用:适用于结构性损坏不严重、但需防渗的较大管径管道。

4. 碎管法。(1)原理:采用液压碎管机从内部将旧管道破碎,并同步拉入新管(HDPE 管等),从而实现管道的原位更新。新管管径可大于原管。(2)优势:真正实现了管道的结构性更新,且能扩大管径。(3)局限:对周边土体扰动较大,需开挖引入坑和接收坑,且不适合于周边管线密集的区域。

2.2 开挖修复技术

尽管非开挖技术优势明显,但在某些情况下,开挖换管仍是必要或更经济的选择。

1. 原管位开挖换管:直接开挖至问题管段,将旧管取出,更换新管后回填。这是最传统、最直接的方法。

2. 旁侧新建管道:在旧管旁新敷设一条管道,接通上下游后,将旧管废弃封堵。

3. 适用场景:(1)管道已完全坍塌,无法进行非开挖修复。(2)需要大幅度提高管道标高或增大管径。

(3)非开挖修复成本远高于开挖成本(如管道埋深浅、地质条件好、交通可完全中断)。(4)周边无重要管线或建筑物,开挖条件许可。

4. 优缺点:(1)优点:技术简单直观,质量可见,可解决大部分问题。(2)缺点:对交通、环境、市民生活影响巨大,社会成本高;需要破碎路面和恢复,综合造价可能因支护、降水等措施而增加;受天气影响大。

在该项目中,对于埋深较浅(<3 m)、位于郊区或非主要道路且缺陷严重管段,采用了开挖换管法,管材主要选用 PE100 级实壁管(电热熔连接)或Ⅱ级钢筋混凝土管。

3 技术比选与方案确定

选择合适的修复技术是一个多目标决策过程,需综合考虑技术、经济、环境和社会因素。

3.1 比选原则与影响因素

项目在方案比选时主要考虑以下因素:(1)缺陷类型与程度:局部缺陷优先考虑点修;整体缺陷考虑

UV-CIPP 或开挖;管道完全失效考虑碎管法或开挖。(2)管径与埋深:大埋深管道开挖成本指数级增长,非开挖优势明显。(3)地质与水文条件:流沙、高水位地层开挖需支护降水,成本高风险大,宜用非开挖。(4)地面环境与交通:市中心、交通主干道必须优先非开挖,最大限度减少社会影响。这是该项目最重要的考量因素之一。(5)工期要求:UV-CIPP 等机械化程度高的工艺工期短。(6)投资成本:综合比较直接工程费、间接费(交通疏导、路面修复)、社会成本^[4]。

3.2 项目修复方案决策

基于以上原则,该项目形成了以非开挖修复为主、开挖修复为辅的综合技术路线。

4 关键施工技术与质量控制

4.1 预处理技术

修复技术成功的前提是有效的预处理。包括:(1)管道封堵与导水:采用气囊在上游检查井进行封堵,必要时安装临时泵进行导水,确保作业段为无水或低水位状态。(2)管道清洗:采用高压水射流设备彻底清除管道内壁的淤积物、结垢和障碍物。清洗效果必须经 CCTV 确认。(3)土体注浆:对于存在渗漏的缺陷点,需先对管道外部的土体空洞进行注浆填充。采用高效聚氨酯等化学浆液,通过管内向外部注浆,形成防水帷幕,固化土壤,防止后续修复过程中浆液流失或地面沉降。该项目注浆量巨大,体现了预处理的重要性。

4.2 UV-CIPP 施工要点与质量控制

以核心的 UV-CIPP 技术为例,其质量控制要点如下:

(1)材料检验:树脂、玻璃纤维软管必须有合格证和性能检测报告,其力学性能、耐腐蚀性必须满足设计要求。(2)软管拉入:必须在软管外壁和旧管内壁之间铺设底膜,减少摩擦力,保护软管。拉入过程应平稳,速度控制在 5 m/min 以内。(3)充气压力:必须严格按照工艺要求分级加压(如先至 100 mbar,再至 150 mbar,最后稳定在 450 mbar 工作压力),确保软管充分扩张并紧贴旧管。(4)紫外固化:这是核心环节。必须精确控制紫外灯架的行走速度(如 0.7~0.8 m/min)和管内温度(80~120℃),确保树脂完全固化。固化过程由电脑全程监控并记录,数据作为验收依据。(5)最终检验:固化完成后,需再次进行 CCTV 检测。内衬管应表面光滑、平整,无划痕、鼓泡、褶皱等缺陷,并与原管道内壁紧密贴合。必要时需进行取样送检^[5]。

4.3 开挖施工的基坑支护与安全

对于开挖段,安全是首要任务。(1)支护方案:该项目根据基坑深度采用了差异化支护。深度小于 2.5 m 采用简易挡土板;2.5~5.5 m 采用不同长度的钢板桩加一道或两道钢支撑。(2)监测要求:对深度超过 3 m 或周边有建(构)筑物的基坑,需进行基坑监测,包括桩顶水平位移、周边地表沉降等,确保施工安全。(3)安全措施:严格遵守《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》,编制专项施工方案,对于超过一定规模的深基坑工程,需组织专家论证。

5 结论

通过对该污水管网修复项目的研究,可以得出以下结论:(1)系统性评估是基础:基于《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181-2012)标准的管道检测与量化评估,是科学制定修复方案、合理分配资金的基石。RI 指数为修复决策提供了客观依据。(2)非开挖技术是主流方向:在城区环境中,非开挖修复技术(尤其是 UV-CIPP 和点状原位固化法)因其对交通、环境、市民生活影响小的巨大优势,已成为管网修复的绝对主流。该项目“非开挖为主,开挖为辅”的技术路线是成功且明智的选择。(3)技术适用性需具体分析:没有“一招鲜”的技术。UV-CIPP 适用于整体修复,点修适用于局部缺陷,碎管法能增径,开挖法最有效但社会成本高。因此,需根据缺陷性质、管径埋深、周边环境等因素进行综合比选,选择最经济合理的“一管一策”方案。(4)预处理和质量控制是关键:无论采用何种先进工艺,管道清洗、土体注浆等预处理工作的质量直接决定了修复的成败。施工过程中必须建立严格的质量控制体系,特别是对 UV-CIPP 的固化过程进行数字化监控,确保修复后的管道长期可靠运行。

参考文献:

- [1] 李孝传.基于质量管理的 M 排水管网非开挖修复工艺优化[D].北京:北京交通大学,2023.
- [2] 张辉煌,宫经成,黄超,等.污水管网健康状况分析与修复技术选型[J].施工技术(中英文),2022,51(05):92-96.
- [3] 李明昊.基于数字孪生的城市地下管道性能评价与智慧运维方法研究[D].大连:大连理工大学,2024.
- [4] 徐焰炉.城市地下管网更新改造和污水管网“厂网一体”建设改造项目前景研究[J].工程施工新技术,2025,04(14):7-9.
- [5] 金文韬,黄游,吴兵党.基于层次分析法的污水管网风险评价模型研究[J].苏州科技大学学报(工程技术版),2024,37(03):65-73.