

供排水企业运行及管理成果专栏

胡光顺, 练凯威, 田山川, 等. 城镇市政排水管网综合整治措施在城市密集区域的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 204-213.

HU G S, LIAN K W, TIAN S C, et al. Application of comprehensive remediation solutions for municipal drainage pipelines network in densely urban areas[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 204-213.

城镇市政排水管网综合整治措施在城市密集区域的应用

胡光顺^{1,2}, 练凯威^{1,2}, 田山川¹, 易 晋^{1,3}, 来张汇^{1,2,*}

(1. 深圳市龙华排水有限公司, 广东深圳 518110; 2. 深圳市华章检测技术有限公司, 广东深圳 518110; 3. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410000)

摘 要 【目的】随着城市化进程的加快, 市政排水管网面临老化、破损及功能退化等问题, 威胁城市水环境质量和居民生活。特别是在城市密集区域, 排水管网的高负荷运行和复杂环境使得这些问题更加突出。为应对这些挑战, 文章探讨并实施了市政管网综合整治技术, 利用创新检测技术和非开挖修复方法, 提升管网的健康状态, 推动城市可持续发展。【方法】文章采用雷达探测技术对管网进行初步检测, 结合管道闭路电视(CCTV)和潜望镜检测(QV)技术对疑似区域复核, 确保检测的准确性。在管网状况评估中, 采用模糊数学法量化分析管网的密闭性、功能性及稳定性, 为维护管理提供科学依据。针对管网缺陷, 重点探讨了非开挖修复技术, 特别是紫外光固化内衬法(UV-CIPP), 并对其修复质量进行了深入分析, 以深圳市龙华区大浪街道的排水设施为案例。通过上述检测技术, 识别该区域管网如破裂、堵塞和渗漏等5处管网结构性隐患。【结果】模糊数学评估结果显示, 该区域隐患管网综合评价指数为2.00, 属于紧急缺陷, 需要立即修复。UV-CIPP修复法在施工过程中表现出高效、快速固化的优势, 修复后的管网力学性能优异, 抗拉强度达到147 MPa, 抗弯强度为245 MPa, 短期弯曲弹性模量为13 455 MPa, 密实性测试未发现渗水问题。修复后的管网过流能力提升了152%, 显著提高了排水系统的运行效率。【结论】市政管网综合整治技术在改善管网健康、提升城市韧性及生态可持续性方面效果显著, 为类似密集城市区域的排水管网整治提供了实践参考和技术支持。

关键词 城市密集区域排水管网 管网综合整治 雷达探测技术 模糊数学评估 非开挖修复 紫外光固化内衬 可持续发展

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)10-0204-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.022

Application of Comprehensive Remediation Solutions for Municipal Drainage Pipelines Network in Densely Urban Areas

HU Guangshun^{1,2}, LIAN Kaiwei^{1,2}, TIAN Shanchuan¹, YI Jin^{1,3}, LAI Zhanghui^{1,2,*}

(1. Shenzhen Longhua Drainage Co., Ltd., Shenzhen 518110, China;

2. Shenzhen Huazhang Testing Technology Co., Ltd., Shenzhen 518110, China;

3. College of Water Resources and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract [Objective] With the acceleration of urbanization, municipal drainage networks are facing problems such as ageing, damage and functional decline, which threaten the quality of the urban water environment and the lives of residents. Especially in dense urban areas, the high load operation of the drainage network and the complex environment make these problems more prominent.

[收稿日期] 2024-08-06

[基金项目] 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4609)

[作者简介] 胡光顺(1996—), 男, 主要从事市政管网整治修复等工作, E-mail: jintengyuan2023@163.com。

[通信作者] 来张汇, 男, 工程师, 主要从事市政管网整治修复等工作, E-mail: 870810038@qq.com。

To address these challenges, this paper explores and implements comprehensive remediation techniques for municipal pipeline networks, utilizing innovative inspection techniques and non-excavation repair methods to enhance the health status of the networks and promote sustainable urban development. [Methods] In this paper, radar detection technology was used for the initial inspection of the pipeline network, and the suspected areas were reviewed in conjunction with pipeline closed-circuit television (CCTV) and quick view (QV) inspection technology to ensure the accuracy of the inspection. In the condition assessment of the pipeline network, the fuzzy mathematical method was used to quantitatively analyze the confinement, functionality and stability of the pipeline network, which provided a scientific basis for maintenance management. For the pipeline network defects, the focus was on the non-excavation repair technology, especially the ultraviolet (UV) cured-in-place pipe (UV-CIPP), and the quality of its repair was analyzed in depth. The paper took the drainage facilities in Dalang Street, Longhua District, Shenzhen City as a case study, and identified five structural hidden defects of the pipeline network such as rupture, blockage and leakage in this area through the aforementioned inspection techniques. [Results] The result of fuzzy mathematical assessment showed that the comprehensive evaluation index of the hidden pipeline network in this area was 2.00, which was an urgent defect and required immediate repair. The UV-CIPP repair method showed the advantages of high efficiency and fast curing during the construction process, and the repaired pipeline network had excellent mechanical properties, with a tensile strength of 147 MPa, a flexural strength of 245 MPa, and a short-term bending modulus of elasticity of 13 455 MPa, and no seepage was detected in the compactness test. No water seepage problem was found in the compactness test. The overflow capacity of the repaired pipe network was increased by 152%, which significantly improved the operational efficiency of the drainage system. [Conclusion] The study shows that the comprehensive rehabilitation of municipal pipeline network is effective in improving the health of pipeline network, urban resilience and ecological sustainability, and provides practical reference and technical support for the rehabilitation of drainage network in similar dense urban areas.

Keywords drainage network in densely urban area integrated pipelines network remediation radar detection technique fuzzy mathematical assessment trenchless repair UV curing liner sustainable development

城市化进程的加速带来了人口和建筑的密集增长,对市政排水管网这一城市基础设施的关键部分提出了更高的要求。市政排水管网不仅承载着城市日常运行的重要功能,其健康状态更是直接关联到城市环境的质量和居民的日常生活^[1]。然而,由于长期承受重负荷运行以及自然条件的侵蚀,市政排水管网普遍遭遇老化、破损和功能退化等问题,若不及时解决,将引发污水溢流、频繁内涝等城市问题,甚至可能触发环境污染和公共卫生危机,严重威胁城市的可持续发展^[2-3]。

在城市密集区域,市政排水管网的维护与管理面临诸多挑战。基础信息的不完善和更新滞后,导致管网健康状况和风险等级难以准确评估。缺乏科学依据的修复养护计划,以及修复方法选择上的模糊性,不仅造成资源浪费,也影响维护效果。这些问题反映了建立科学、系统的管网综合整治体系的紧迫性^[4-5],同时表明在城市密集区域,传统方法已难以满足现代城市发展的需求。

对于管网运维单位而言,为应对上述挑战,构建一套科学、系统的城镇市政管网综合整治体系至关重要。这不仅能够提高管网的运维效率,降低维护成本,提升城市应对极端天气和环境变化的能力,确

保城市排水系统的稳定运行,进而提高城市的生态韧性和居民生活质量。本文提出一套创新的城镇市政管网综合整治体系,并在深圳市大浪街道建泰轮胎二厂的市政排水设施中进行实践应用,旨在为城市密集区域的管网整治提供科学指导和实践参考,推动城市基础设施的可持续发展。

1 排水管网现状

随着城市化进程的加速,城市排水管网系统正遭遇日益严峻的运维挑战,主要表现在以下几个方面。

1.1 结构性和功能性缺陷

排水管网在长期运行过程中,由于材质老化、外力损坏,易出现裂缝、渗漏、塌陷等结构性问题。这些缺陷不仅直接影响排水效率,还可能导致污水渗入地下,污染地下水资源。此外,排水功能性缺陷,如管网排水能力不足、雨污混接等问题,也加剧了城市内涝和水环境恶化^[6]。

1.2 管网老化问题

许多城市的排水管网建设年代久远,部分管网已接近或超过设计使用寿命。老化管网不仅更易发生堵塞和坍塌,还增加了日常运维和维修的成本,严

重影响管网整体运行效能。

1.3 排水系统不完善

在城市快速扩张过程中,排水系统的规划和建设往往滞后于城市发展需求。部分新建区域缺乏足够的排水管网覆盖,而旧城区的管网设施升级改造相对滞后。这种排水系统不完善的现象,直接导致了城市排水功能的不足。

1.4 雨污混接现象

雨污混接是排水管网系统中普遍存在的问题,成因复杂,包括历史设计缺陷、施工质量问题以及后期管理不善。这种现象不仅增加了污水处理厂的负荷,还可能导致未经处理的污水直接排入水体,对城市水环境造成破坏^[4]。

1.5 检测技术与运维资源限制

尽管目前管网检测技术如闭路电视(CCTV)检测和潜望镜(QV)检测具有高效性和准确性,但在复杂管网环境中仍存在局限性^[7]。例如,CCTV检测受管道水位、照明条件等环境因素影响较大,QV检测则在识别细微缺陷方面存在不足^[8-9]。此外,部分城市在管网检测和维护方面缺乏专业技术团队和资金支持,进一步限制了管网的运维能力。

在高密度管网区域如深圳,排水管网的挑战尤为显著。该区域因人口密集和频繁的暴雨天气,排水管网经常处于超负荷状态,频繁发生局部内涝。此外,其不同历史时期建设的管网错综复杂,增加了维护和升级的难度。尽管深圳在雨污分流改造方面取得了积极进展,但旧城区的布局 and 施工条件限制了改造速度^[3]。同时,地铁和地下商场等基础设施的快速发展进一步压缩了管网的布设和改造空间,加剧了运维的复杂性。

为了有效应对这些挑战,城市排水管网迫切需要采用综合整治技术。通过结合CCTV、QV、雷达检测等多种检测手段,可以全面评估管网状况并进行精准修复。雷达检测技术因其在复杂管网环境中的优势而日益受到重视,尽管其高昂的成本和对技术操作的高要求对广泛应用构成了挑战^[9-10]。通过整合CCTV和雷达检测等技术,可以克服单一检测手段的局限,提高管网检测和修复的效率与质量,实现管网管理的科学化和系统化。因此,建立一个包含检测、评估、修复、验收和运营等环节的全生命周期管理体系至关重要,以确保排水管网在规划、建设、运行和改造的每个阶段都能协调一致。这些措施不

仅能够延长管网的使用寿命和提升排水效率,还能城市水环境的保护、居民的生活质量以及城市的可持续发展提供坚实保障。

2 管网综合整治技术

2.1 管网综合检测

管网综合整治的核心步骤之一是对管网现状进行精准识别与全面评估。在此过程中,雷达探测技术凭借其高效性和无损检测特性,成为管网检测的重要手段。探地雷达主要基于不同介质具有不同相对介电常数的物理特性,通过发射高频电磁波并接收其反射信号,利用信号的强度、反射时间和波形变化等特征参数,分析检测区域内介质类型、分布状态及界面特性^[11]。在地下管线检测中,如图1所示,探地雷达能够有效识别管体材料、管内容物及管道直径等因素的差异。若管线存在缺陷(例如破裂、渗漏或结构损伤),其可能引发周边回填料含水量增加、密实度下降及水土流失等问题,导致回填料的相对介电常数与周边同类材料产生显著差异。探地雷达通过数据采集、信号处理和图谱解译,可清晰呈现异常区域,帮助技术人员迅速定位潜在问题区域。这一技术适用于满管运行管道、无检查井管道及位置未知管道的间接缺陷检测,在复杂工况下展现出优越性与广泛适用性^[12]。

雷达探测技术的诊断结果通常与其他检测技术相结合,以提高检测的全面性和精确性。例如,CCTV检测技术可以通过高清摄像头系统对管道内部进行实时可视化检查。检测过程中,配备摄像头的检测车可被推入管道,实时捕捉内部图像并传输至监控中心,技术人员能够直观评估管道内部的结构状况和缺陷特征。对于无法使用检测车的工况,还可借助内窥镜设备,通过检查井以可调节长度的控制杆操作高清探头,完成管网内部的动态视频采集。因此,CCTV与雷达探测技术在功能上形成互补——雷达技术提供宏观异常分布的定位与定性分析,而CCTV能够实现微观直观的缺陷验证和量化评估。二者结合不仅能大幅提升检测效率,还能后续的整治规划提供多维度的科学依据。通过探地雷达、CCTV及其他检测技术的综合应用,能形成一套高效、无损且科学性强的管网检测体系,为管网的缺陷识别、运行评估及后续整治措施提供坚实的决策基础。这种多技术整合方式可显著提升市政管网

的运行可靠性,减少隐患发生概率,并优化维护管理成本。

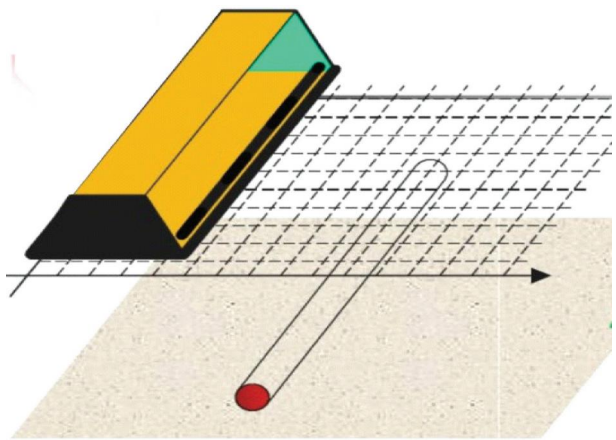


图 1 三维探地雷达原理

Fig. 1 Principle of 3D Ground-Penetrating Radar

2.2 管网状况评估

根据《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012),管网缺陷隐患可分为结构性和

功能性两大类。结构性缺陷主要指管网材料的物理损伤,而功能性缺陷涉及管网的运行效能。评估管网状态时,采用模糊数学法,基于模糊逻辑的决策方法,允许信息的不确定性和模糊性在决策过程中得到合理的处理^[13]。通过构建相应模型,可更好反映管网的实际运行状态和潜在问题。按照王峻岭等^[14]及李若晗^[15]基于模糊数学法对管网设施评价方法,首先对管网缺陷进行定量分级,然后根据管网结构、运输能力及稳定程度的因素,引入管网密闭性、功能性、稳定性这3类指标对缺陷进行分类。建立模糊互补判断矩阵,通过层次分析法确定这些指标的权重,进而计算管网的综合评价指数(H)。如表1所示,这一指数越大,代表所评价管段缺陷状况越严重,从而为管网的维护管理提供科学依据。通过对管网状况定量评估,准确识别并分类管网中存在的各种结构性和功能性缺陷,为后续的修复、优化和管理提供必要的

表 1 H 范围与建议采取的措施
Tab. 1 H Ranges and Recommended Measures

项目	$0 < H \leq 0.25$	$0.25 < H \leq 0.50$	$0.50 < H \leq 0.75$	$H > 0.75$
缺陷等级	轻微缺陷管道	中等缺陷管道	严重缺陷管道	紧急缺陷管道
相应措施	短时间内可不采取措施	应在半年内安排管网养护措施	应在3个月内采取养护措施	应立即采取养护/抢救局部养护措施

2.3 管网施工工艺比选

施工工艺的选取对于工程效率、成本控制以及对周边环境的影响具有决定性作用。基于管网的综合评分和现场勘察结果,可确定管网是否需要修复以及采用何种修复技术。当 H 表明存在严重缺陷时,必须进一步勘察现场条件,包括管道的材质、管径、埋深以及周边建筑和交通状况,这些因素共同决定非开挖修复技术的适用性。

非开挖修复技术以其显著的环境友好性、施工效率、高安全性和出色的适应性,在城市密集区域的管网修复中提供了一种高效、灵活且对周边环境影响最小的解决方案。依据管网的具体状况和现场条件,依据表2中选取适合的结构性缺陷类型对应的非开挖处理技术。这些技术包括但不限于点状原位固化、不锈钢快速锁、翻转内衬、紫外光原位固化等,每一种技术都有其特定的应用场景和优势。在确定上述修复技术方法之前,需进行经济性与技术性的综合评估。这涉及对修复材料的成本、施工设备的

投入、施工周期以及对交通和环境的影响等因素的量化分析。通过对比分析,选择出既经济合理又技术可行的修复方案。

表 2 常见的结构性缺陷类型及相应的非开挖技术
Tab. 2 Common Types of Structural Defects and Corresponding Trenchless Technology

结构性缺陷类型	局部修复	整体修复
变形	点状原位固化/不锈钢快速锁	翻转内衬法/紫外光固化/短管内衬/热塑成型
错口	点状原位固化/不锈钢快速锁	翻转内衬法/紫外光固化/短管内衬/热塑成型
腐蚀	点状原位固化/不锈钢快速锁	翻转内衬法/紫外光固化/螺旋缠绕法
破裂	点状原位固化/不锈钢快速锁	翻转内衬法/紫外光固化
渗漏	点状原位固化	紫外光固化/短管内衬
脱节	点状原位固化/不锈钢快速锁	紫外光固化/短管内衬
接口材料脱落	点状原位固化/不锈钢快速锁	紫外光固化/短管内衬

2.4 施工过程质量控制及评价

在确定整治方案后,首要任务是进行方案设计与规划。此阶段需综合考虑城市密集区域的特点,包括交通流量、地下设施分布和环境保护要求,以确保设计方案的合理性和可行性。设计参数的确定应严格依据相关技术规范 and 标准,同时兼顾经济性、安全性和可持续性。在施工过程中,无论是开挖还是非开挖技术,都需注意交通组织、环境保护、地下设施保护和施工安全。合理规划施工期间的交通导流,采取措施控制施工过程中的噪声、扬尘和废弃物,进行详细地地下设施调查,确保施工人员安全,遵守安全操作规程,设置必要的安全警示。施工过程中的质量控制是确保工程质量的关键。应实施材料控制、施工监控和工序验收等措施。对所有进场材料进行检验,确保符合设计和规范要求。采用现代信息技术,实时监控施工进度和质量。每个施工工序完成后,进行质量检验和验收工作。同时,开展经济性评估也是施工过程中不可忽视的环节,实时跟踪工程成本,确保不超预算,合理调配人力和物资资源,提高施工效率,并识别施工过程中的潜在风险,制定相应的应急应对措施。工程完成后,根据国家和地方的相关规范和标准,开展竣工验收工作,验收内容包括工程质量检查、功能测试和文档审核,确保工程达到设计和规范要求,管网能够正常运行。通过上述措施,确保整个工程的顺利实施。

3 管网综合整治技术在龙华区的应用

3.1 工程概况

深圳市龙华区大浪街道作为该区重要组成部分之一,其排水系统的功能与稳定性对于保障居民生活标准和推动城市可持续发展具有至关重要的作用。在对该街道排水管网进行的地质雷达探测中,于建泰轮胎二厂附近的市政井 W1 区域检测到异常信号(图 2),具体表现为在 5~8 m 和 13~18 m 的深度内,雷达波反射显示出类似方形空洞的正向连续平板状形态,伴随明显的绕射波和强烈的整体振幅,以及多次波现象(图 3)。表明该区域存在潜在的地下空洞或脱空现象。进一步的详细检测采用 CCTV 检测和 QV 检测技术,对疑似区域进行复核。检测结果表明,W1-W2、W4-W5、W5-W6 等管段存在多处三、四级的破裂和腐蚀问题(图 4),这对排水管网的结构完整性和功能发挥构成了显著的威胁。

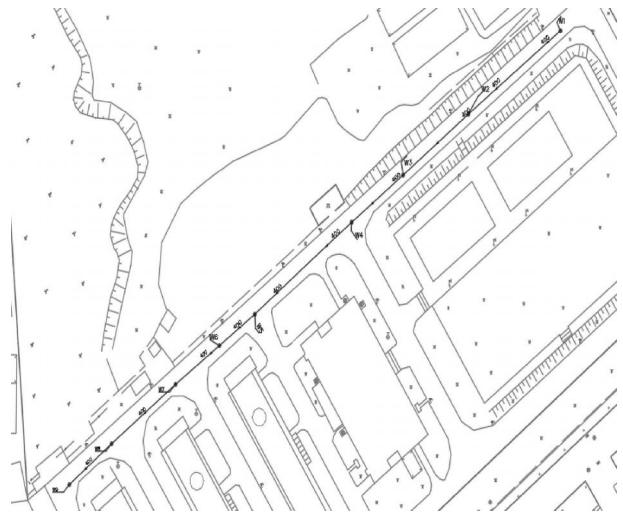


图 2 建泰轮胎二厂地理位置

Fig. 2 Geographic Location of Jiantai No. 2 Tyre Factory

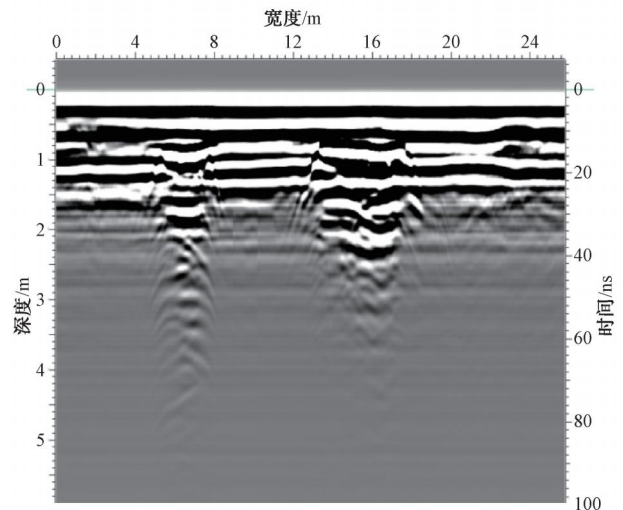


图 3 修复前雷达谱

Fig. 3 Radar Spectrum before Repairing

3.2 问题管网评估

由表 3 和表 4 可知,基于模糊数学法,对此区域管网进行评价,将管网破裂、腐蚀、错口进行管网密闭性、功能性、稳定性这 3 类指标分类。

本文以稳定性为例,因本文在表 4 稳定性缺陷中存在破裂、腐蚀、错口等结构性隐患,故构建评估矩阵 R_w ,如式(1),随后针对管网存在结构性隐患,通过两两比较方法得出判定矩阵即表 5。

$$R_w = \begin{bmatrix} R_{\text{破裂}} \\ R_{\text{腐蚀}} \\ R_{\text{错口}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, 0, 1, 1 \\ 0, 0, 2, 0 \\ 0, 0, 1, 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

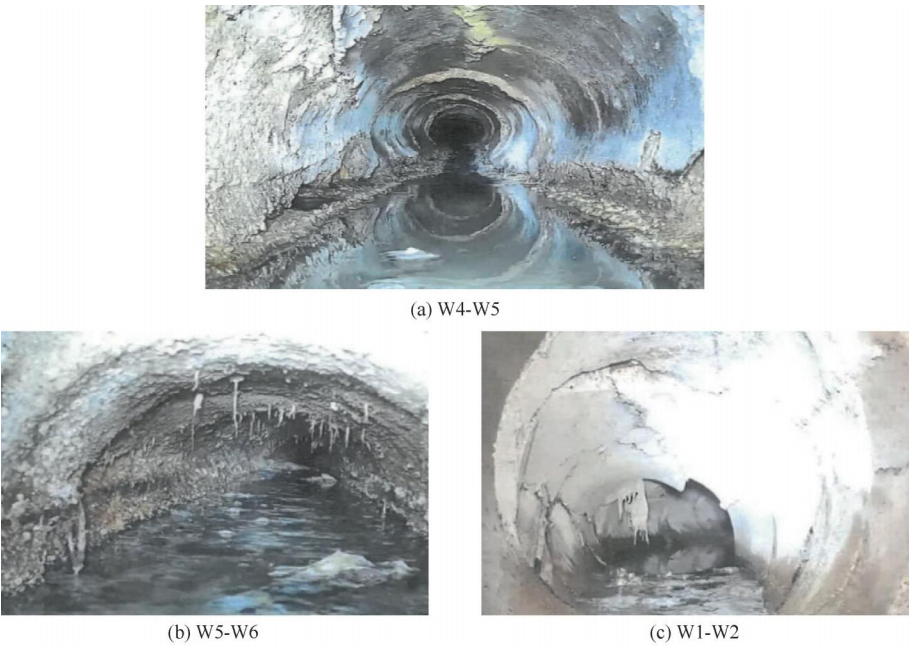


图 4 问题管网缺陷图

Fig. 4 Defects Map of Damaged Pipelines

表 3 建泰轮胎二厂管段缺陷记录

Tab. 3 Defects Recorded in the Pipe Sections of Jiantai No. 2 Tyre Factory

管段编号	管径/mm	材质	检测长度/m	缺陷距离/m	缺陷名称及位置
W1-W2	400	钢筋混凝土	34	16.35~25.05 25.15	破裂 4 级 错口 3 级,位置:1012
W4-W5	400	钢筋混凝土	38	18.35~28.85 18.35~28.85	破裂 3 级 腐蚀 3 级
W5-W6	400	钢筋混凝土	35	14.35~23.25	腐蚀 3 级

注:1012 表示钟表指示法顺时针 10:00—12:00 这一位置出现隐患。

表 4 管网缺陷类型对管道性能的影响

Tab. 4 Impact of Network Defect Types on Pipe Performance

缺陷类型	密封性	稳定性	功能性
破裂	是	是	否
腐蚀	否	是	是
错口	是	是	是

表 5 缺陷两两比较判定矩阵

Tab. 5 Matrix of Pair Wise Comparisons among Defects

稳定性缺陷	破裂	腐蚀	错口
破裂	0.5	0.7	0.8
腐蚀	0.3	0.5	0.4
错口	0.2	0.6	0.5

一致性检验结果为 $0.08 < 0.1$, 这表明两两比较判定矩阵通过一致性检验。由此求出上述矩阵的权重向量 $A_w = [0.42, 0.32, 0.26]$;

可得在稳定性缺陷严重程度为 $B_w = A_w R_w = [0,$

$0, 1.32, 0.42]$;

为后续得到管网稳定性评判结果, 对其进行归一化处理, 得 $B_w = [0, 0, 0.84, 0.16]$;

同理可得密封性和功能性缺陷管网严重程度为 $B_m = [0, 0, 0.61, 0.39]$ 和 $B_g = [0, 0, 1, 0]$ 。

由上述结果可知, 此段管道的稳定性缺陷状况 84% 属于严重情况, 16% 属于紧急情况; 此管道的密闭性缺陷状况 61% 属于严重情况; 39% 属于紧急情况; 此管道的功能性缺陷状况 100% 属于严重情况。这是因为属于功能性问题的腐蚀和错口都为三级, 属于严重情况, 故有此结果。

由王俊岭等^[14]和李若哈^[15]所推公式可得式(2)。

$$H_i = \frac{nv}{591} = \frac{n \times (47 \times b_1 + 105 \times b_2 + 257 \times b_3 + 591 \times b_4)}{591} \quad (2)$$

其中: n ——评价的管段内与管网某种特性相

关(功能性为 H_g 、稳定性为 H_w 、密闭性为 H_m) 的缺陷总数;

v ——某管段发生所有缺陷问题的平均缺陷状况;

H_i ——评价的管段内与管网某种特性相关(功能性为 H_g 、稳定性为 H_w 、密闭性为 H_m) 的缺陷结果;

b_1 ——评价的管段内与管网某种特性相关 1 级隐患缺陷程度;

b_2 ——评价的管段内与管网某种特性相关 2 级隐患缺陷程度;

b_3 ——评价的管段内与管网某种特性相关 3 级隐患缺陷程度;

b_4 ——评价的管段内与管网某种特性相关 4 级隐患缺陷程度。

H_g 、 H_w 、 H_m 的计算如式(3)~式(5)。

$$H_w = \frac{5 \times (257 \times 0.84 + 591 \times 0.16)}{591} = 2.63 \quad (3)$$

$$H_m = \frac{3 \times (257 \times 0.61 + 591 \times 0.39)}{591} = 1.97 \quad (4)$$

$$H_g = \frac{3 \times (257 \times 1)}{591} = 1.30 \quad (5)$$

其中: H_g ——功能性缺陷结果评分;

H_w ——稳定性缺陷结果评分;

H_m ——密闭性缺陷结果评分。

根据此段污水管道发生的缺陷,可得到稳定性、密封性、功能性在管网的综合评价指数 H 的权重为 $A_w=0.3667$ 、 $A_m=0.3167$ 、 $A_g=0.3167$,则该区域管网综合评价指数 H 为 2.00;由表 1 可知,该处区域管网为紧急缺陷管道,应立即修复。

3.3 施工方案比选

经对现场进行勘察,发现管网的埋设深度显著超过 4 m。鉴于此,选择非开挖修复技术,本研究采用灌浆技术对于管网中的空洞区域进行填充和结构加固。根据管网缺陷的具体类型和分布,本研究参考表 2,选择翻转内衬法、紫外光固化内衬(UV-CIPP)法和螺旋缠绕法。根据《广东省排水管道非开挖修复更新工程预算定额(2019 年版)》,螺旋缠绕法成本最高,其次为 UV-CIPP 法,翻转内衬法最

低。但翻转内衬法施工时间长(超 20 h)且需额外设备,不满足市区施工需求。综上所述,本研究结合预算定额、施工条件及修复需求进行比选,选用 UV-CIPP 法。

3.4 方案设计

紫外光固化技术的核心在于内衬管的设计。根据《排水管网紫外光固化修复技术规范》(DB42/T 2042—2023),内衬管壁厚的设计遵循式(6)。

$$t = \frac{D_0}{\left[\frac{2KE_L C}{(P_w + P_v) \times N \times (1 - \mu^2)} \right]^{1/3} + 1} \quad (6)$$

其中: P_w ——管底位置地下水压力,MPa;

P_v ——真空压力,MPa,取 0.05;

t ——内衬管壁厚,mm;

D_0 ——内衬管外径,mm;

N ——管网截面环向稳定性抗力系数,设定为 2.0;

E_L ——内衬管的长期弯曲弹性模量,设定为 15 600 MPa;

K ——圆周支持率,取 7.0;

μ ——泊松比,取 0.3;

C ——椭圆度折减因子,其计算如式(7)。

$$C = \left[\frac{1 - q/100}{(1 + q/100)^2} \right]^3 \quad (7)$$

其中: q ——原有管网的椭圆度。

在本项目中,最大内径为 392 mm,最小内径为 382 mm,因此平均内径为 387 mm。据此,计算得出原有管网的椭圆度为 1.29%,相应的椭圆度折减因子为 0.999。考虑到项目周边无地下水影响,地下水压力可设为 0。根据上述参数,内衬管壁厚厚度为 2.88 mm。

3.5 施工过程质量控制

3.5.1 制订施工方案

施工方案的制定是确保工程质量的基础。该方案综合设计单位提供的资料、现场踏勘结果以及管网的如管径、长度、材质等关键技术参数,以制定施工方案。此外,对现场环境也进行评估,并由技术团队负责人编制了专项施工方案。在施工团队进场前,进行技术交底和安全培训,以确保施工过程的顺

利进行。

3.5.2 施工材料控制

施工材料的质量控制是本研究的重点,实施了严格的进场检验与验收措施。内衬管的外包装和复合层(玻璃纤维织物)的质量要求严格,所有材料均需具备产品质量合格证、使用说明书及产品质量检测报告,并符合《市政排水管道紫外光原位固化修复施工技术规程》(T/CMEA 34—2023)的相关参数规定。

3.5.3 施工过程注意事项

施工预处理阶段,采用清疏设备对管网进行清淤,通过固液分离技术将固态淤泥运送至污泥站处理,液体部分重新排入原管网。CCTV 设备对清淤后的管网进行检测,确保满足规范预处理要求。在内衬管拉入过程中,应铺设保护膜以防止损伤,并利用传输设备和卷扬机实现内衬管的平稳拉入,同时控制牵引力和速度以满足技术要求。内衬管的安装过程中,两端套上安全扎头并固定,以防止充气加压过程中的安全问题。在充气前,检查了内衬管各连接处的密封性,并通过调压阀进行缓慢加压。在紫外光固化阶段,当内衬管内部气压达到操作压力后

进行保压,紫外线灯架缓慢拉至原管网另一端,并通过 CCTV 检测确保灯架到达起始固化位置。固化过程中,紫外灯的开启和固化速度的控制根据管径和内衬管厚度进行了调整,以保持气压恒定。固化完成后,内衬管内部气压降至大气压,并进行修复端头的切割和密封处理。

3.5.4 造价分析

根据《广东省排水管道非开挖修复更新工程预算定额(2019 年版)》,对 DN400 管道采用 CIPP-UV 法的造价进行分析。单价为 2 395.85 元/m,该成本涵盖了从施工准备到后期处理的全过程,确保了工程的全面性和系统性。

3.5.5 竣工验收

为了确保修复质量,对修复后的管网进行验收测试。首先,利用雷达探测(图 5)、CCTV、QV 检测技术(图 6)对管网内部进行了检测,上述结果表明,雷达图谱在 73.6~74.6 m 和 77~79 m 的位置显示出正向连续平板状形态,整体振幅强烈,这表明管网结构稳定。且管网内壁光滑无缺陷,无鼓包、褶皱或明显的划伤现象,未发现渗水问题。

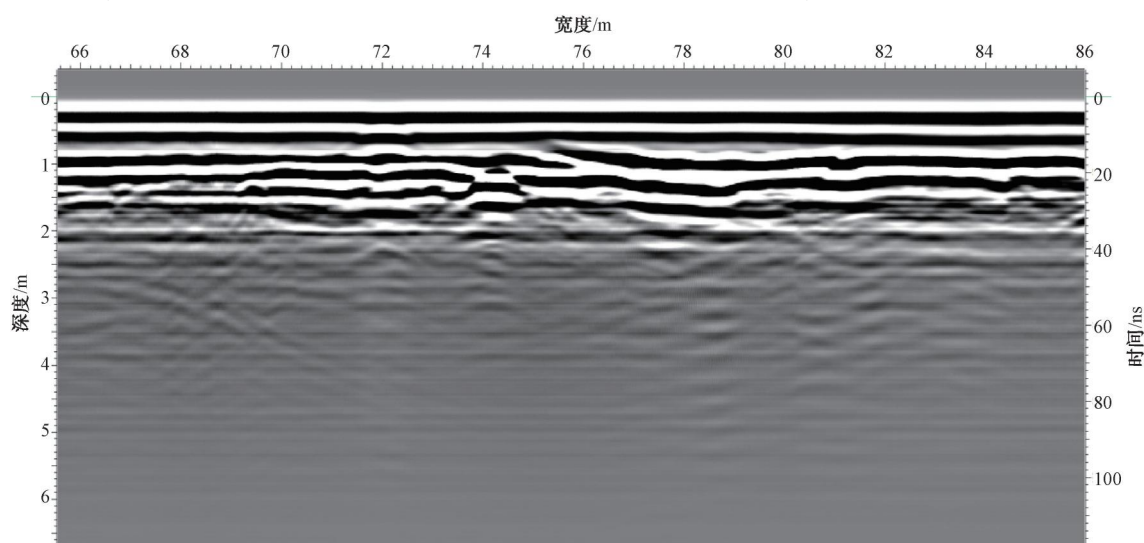


图 5 修复后雷达谱图

Fig. 5 Radar Spectrum after Repairing

进一步的力学性能测试依据国家标准和地方标准,由具有检测资质的第三方机构执行(表 6),确保了测试结果的客观性和准确性。

根据 T/CMEA 34—2023 规程进行的过流能力测试,计算如式(8),修复后管网的过流能力比修复前提高了 152%,满足规范要求。综上所述,这些性能测试的综合结果证明了 UV-CIPP 技术在该项目

中的高效性和可靠性,为后续相关工程的实施提供重要的经验和参考依据。

$$B = \frac{n_e}{n_1} \times \left(\frac{D_1}{D_E} \right)^{8/3} \times 100\% \quad (8)$$

其中: B ——为管网修复前后过流能力比,大于 100%为符合标准要求;

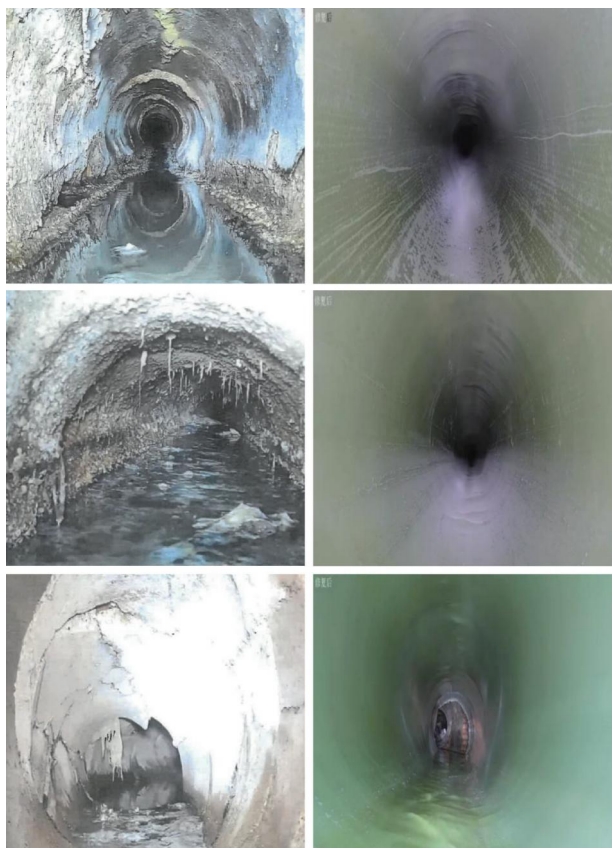


图6 管网修复前后效果对比
Fig. 6 Comparison of Effects before and after Pipe Network Repairing

表6 紫外光固化测试结果
Tab. 6 Results of UV Curing Test

测试项目	测试参数	测试结果	方法标准
抗拉强度	>62 MPa	147 MPa	《塑料拉伸性能的测定 第4部分:各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料的试验条件》(GB/T 1040.4—2006)
抗弯强度	>45 MPa	245 MPa	《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》(GB/T 1449—2005)
短期弯曲弹性模量	>6 500 MPa	13 455 MPa	
管壁密实性	每个样本的3个检测点上,均未出现渗水	3个检测点均未出现渗水	《给水排水管道原位固化法修复技术规程》(T/CECS 559—2018)

管理提供了量化的评价指标,从而确保城市排水系统的稳定性和运行效率。

(3)科学决策施工工艺与质量控制。在城市排水管网的整治过程中,施工工艺的选择至关重要。案例强调基于 H 的科学决策,以及对非开挖修复技术如 UV-CIPP 法的准确应用。通过严格的材料控制、施工监控和工序验收,确保施工过程中的每个环节符合相应标准,从而提升管网修复工程的效率和可靠性,保障排水系统长期稳定运行。

该体系通过管网检测技术、基于模糊数学法的

n_e ——为原有管网的粗糙系数,取值为 0.013;
 D_1 ——原有管网平均管径为 387 mm;
 D_E ——内衬管管径为 365 mm;
 n_1 ——CIPP 管的粗糙系数,取值为 0.010。

4 结论

本文通过构建管网综合整治体系,深入分析深圳市龙华区大浪街道建泰轮胎二厂市政排水设施的案例,探讨了城镇市政管网综合整治技术在城市密集区域的应用,验证了建立科学、系统的管网综合整治体系对于提升城市排水系统的稳定性和运行效率的重要性。其主要结论如下。

(1)管网综合检测技术的创新与系统化。当前,城市排水管网面临着老化和功能退化的问题,亟需创新和系统化的检测技术来准确识别和评估潜在的管网缺陷。案例表明结合雷达探测技术与 CCTV、QV 检测技术,可为管网维护管理提供更为精准和全面的决策支持。

(2)管网状况评估的量化与科学化。基于模糊数学法的管网状况评估方法,为管网缺陷的不确定性和模糊性提供了有效的处理手段。这一方法不仅提高了评估的准确性,而且为管网的维护、修复和

管网状况评估方法以及科学决策施工工艺与质量控制,实现对城市密集区域管网的全生命周期管理。这一综合整治体系的建立,不仅为城市基础设施的可持续发展提供了坚实的技术支持,也为类似城市密集区域的管网整治提供宝贵经验和实践参考,确保城市环境的质量和居民日常生活的便利性。

参考文献

[1] YIN D, CHEN Y, JIA H, et al. Sponge city practice in China: A review of construction, assessment, operational and

- maintenance[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124963. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124963.
- [2] 邵银霞, 周洁, 汪玲玲, 等. 基于全生命周期策略的排水养护信息化管理新模式[J]. 中国给水排水, 2024, 40(8): 17-21.
- SHAO Y X, ZHOU J, WANG L L, et al. New mode of informatization management about drainage maintenance based on full life cycle management strategy [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(8): 17-21.
- [3] 王殿常, 赵云鹏, 陈亚松, 等. 我国城市水环境治理的现状与困境分析[J]. 给水排水, 2023, 49(11): 25-31.
- WANG D C, ZHAO Y P, CHEN Y S, et al. Analysis of present situation and dilemma for treatment of urban water environment of China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(11): 25-31.
- [4] 陆露, 高峰, 郭娟, 等. 排水管网运维管理问题分析与对策研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2): 8-13.
- LI L, GAO F, GUO J, et al. Problem analysis and countermeasure research for sewer operation and maintenance management[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 8-13.
- [5] LI H, WANG Y, LUO Y, et al. Constructing an efficient health assessment model for drainage network to evaluate the drainage network in zone a of Zhenjiang City[J]. Processes, 2024, 12(3): 586-586.
- [6] WANG J, LIU G H, WANG J, et al. Current status, existent problems, and coping strategy of urban drainage pipeline network in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(32): 43035-43049.
- [7] 白永强, 鲁梅, 刘绪为, 等. 镇江市“四位一体”排水管网诊断流程及工程实践[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 26-31.
- BAI Y Q, LU M, LIU X W, et al. Diagnosis process of "Four-in-one" for drainage network and engineering practice in Zhenjiang[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 26-31.
- [8] 赵志超, 黄晓敏, 尹海龙, 等. 雨水管网混接入渗诊断技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 278-288.
- ZHAO Z C, HUANG X M, YING H L, et al. Review on diagnostic technologies of illicit discharge and groundwater infiltration in the storm drainage network[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 14(1): 278-288.
- [9] HUANG R M, TAO Z K, LIN Y C, et al. Current situation of drainage pipe network in China and its detection technology: A brief review[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2024, 33(1): 19-29.
- [10] XIAO X T, CHEN S S, XU Y, et al. Ground-penetrating radar (GPR) based mapping of underground pipeline network distribution[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(12): 19562-19576.
- [11] 陈思静, 胡祥云, 彭荣华. 城市地下管线探测研究进展与发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1236-1247.
- CHEN S J, HU X Y, PENG R H. Review of urban underground pipeline detection[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1236-1247.
- [12] WANG M, LUO H, CHENG J C P. Towards an automated condition assessment framework of underground sewer pipes based on closed-circuit television (CCTV) images[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 103840. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103840.
- [13] BA Z N, FU J S, LIANG J W, et al. Risk assessment method of drainage network operation based on fuzzy comprehensive evaluation combined with analytic network process[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2021, 12(2). DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000543.
- [14] 王俊岭, 熊玉华, 张现国, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的城市排水管网状态和运行效能评价——以淮安市淮安区为例[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1162-1169.
- WANG J L, XIONG Y H, ZHANG X G, et al. Evaluation of the state and operational effectiveness of urban drainage pipenetwork based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method: Taking Huai'an District of Huai'an City as an example[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(4): 1162-1169.
- [15] 李若晗. 城市污水管道检测、评价与影响因素研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- LI R H. A study of urban sewer inspection, assessment and related factors[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.