

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 10. 026

城镇排水管道原位热塑成型修复技术的工程应用

石东优^{1,2}, 叶建州³, 李静², 张杰¹, 曾张成¹, 张军¹,
曹井国²

(1. 重庆克那维环保科技有限公司, 重庆 401120; 2. 天津科技大学 化工与材料学院, 天津 300457; 3. 中交一航局生态工程有限公司, 广东 深圳 518107)

摘要: 原位热塑成型修复技术(FIPP)采用热塑性材质内衬管,可反复加热、韧性好、耐腐蚀性强,紧密贴合,造价低,施工风险低,是目前竞争力较强的一种管道整体非开挖修复技术。结合重庆市永川区某雨污排水管道清淤检测修复工程案例,详细介绍了FIPP技术原理、施工工艺流程、适用范围、技术特点、内衬管壁厚设计、管道缺陷预处理、施工过程质量控制及修复费用分析,以期类似非开挖修复工程应用和造价分析提供参考。

关键词: 非开挖修复; 排水管道; 原位热塑成型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)10-0153-07

Engineering Application of Formed-in-Place Pipe Rehabilitation Technology for Urban Drainage Pipeline

SHI Dong-you^{1,2}, YE Jian-zhou³, LI Jing², ZHANG Jie¹, ZENG Zhang-cheng¹,
ZHANG Jun¹, CAO Jing-guo²

(1. Chongqing Kenavi Environmental Protection Technology Co. Ltd., Chongqing 401120, China;
2. College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 3. CCCC-FHEC Ecological Engineering Co. Ltd., Shenzhen 518107, China)

Abstract: The formed-in-place pipe (FIPP) rehabilitation technology utilizes thermoplastic polymer as liner. It can be softened repeatedly with hot vapor, and has good toughness, strong corrosion resistance, tight fitting, low cost and construction risk, thus it is a competitive trenchless repair technology nowadays. FIPP technology was implemented in a stormwater and sewer pipeline dredging, inspection and rehabilitation project in Yongchuan District of Chongqing. The technical principles, construction process, applicable scope, technical characteristics, liner thickness design, pipeline defect pretreatment, quality control and cost analysis were systematically introduced, so as to provide reference for application and cost analysis of similar trenchless rehabilitation work.

Key words: trenchless rehabilitation; drainage pipeline; formed-in-place pipe (FIPP)

随着我国城市建设的不断加快,城市地下管线日益增多,管网规模不断扩大。根据《城乡建设统计年鉴》(2019)最新统计结果^[1],我国排水管道总长已达 125×10^4 km。接近或达到使用年限的管道陆续出

现腐蚀、裂纹、渗漏、破损、错口等病害,从而导致城市内涝、管道爆裂、地下水土污染、道路塌陷等灾害,严重威胁人们的生命财产安全。因此,定期对地下排水管道进行检测、疏通、清淤和维修是城市安全的

有效保障。由于非开挖技术施工作业面小、不妨碍交通、环境影响较小、工期短、成本低,为管道修复提供了有效途径^[2-4]。

常见的非开挖修复方法包括 CIPP 原位固化法、PVC 管片内衬法、机械制螺旋缠绕法、穿插法、不锈钢套筒法、喷涂法^[5-9]。原位热塑成型(简称 FIPP)非开挖修复技术采用热塑性高分子材质内衬管,韧性好,耐腐蚀性强,施工便捷,内衬管与原管道紧密贴合,造价低,可用于圆形、矩形、蛋形、三角形等多种类型病害管道的修复,是目前竞争力较强的一种管道整体非开挖修复技术。结合重庆市永川区某雨污排水管网修复工程案例,介绍 FIPP 内衬修复材料的设计、施工工艺流程、预处理、施工质量控制、各项指标检验验收标准及经济指标分析,可为类似非开挖修复工程应用和造价分析提供参考。

1 工程概况

该修复工程中运行时间长、维护不及时,管道易出现严重的结构性缺陷和功能性缺陷,管道总长 1.2 km,管径 DN600,管道材质为双壁波纹管 and 混凝土管,经 CCTV 检测,管道缺陷统计见表 1。

表 1 管道缺陷统计

Tab.1 Pipeline defect statistics 处

结构性缺陷	变形	错口	腐蚀	破裂	渗漏	脱节	进口材料脱落	合计
	3	6	10	28	7	5	1	
功能性缺陷	沉积	障碍物	结垢	浮渣	树根	残墙、坝根		合计
	30	4	6	6	21	1		

管道以破裂、腐蚀、渗漏、脱节、错口缺陷为主,占结构性缺陷的 93%。部分管道病害情况如图 1 所示。

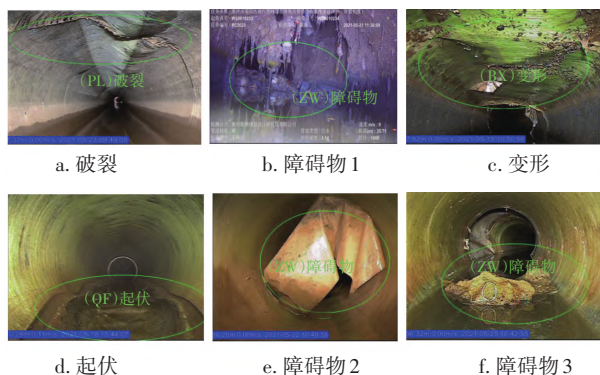


图 1 部分管道病害情况

Fig.1 Partial disease of pipelines

该施工区域位于商业中心,人流量大,可作业面小,交通拥挤地段不具备开挖条件;同时,该修复工程以结构性缺陷为主,其中破裂、腐蚀、变径、脱节、错口等比较严重。结合非开挖修复技术特点和适用范围,基于 FIPP 非开挖管道修复技术储存成本低、施工面小、操作简单、施工风险低,对极端负荷(循环荷载、地震多发区)条件下多种类型截面(圆形、矩形、蛋形和三角形)、严重错口(变径)各类复杂病害管道修复的独特优势,再结合工程实际情况,本项目最终采用 FIPP 技术进行修复。

2 FIPP 非开挖管道修复技术

2.1 技术原理

FIPP 非开挖修复技术采用可二次加工的 PVC-U 材料,在施工现场经加热使内衬管软化,经牵引装置拉入原有管道内部,通过加热加压使其内衬管与原管道紧密贴合,经冷却最终形成“管中管”内衬结构。施工设备及材料如图 2 所示。



图 2 施工设备及材料

Fig.2 Construction equipment and materials

2.2 施工工艺流程

施工工艺流程如图 3 所示。

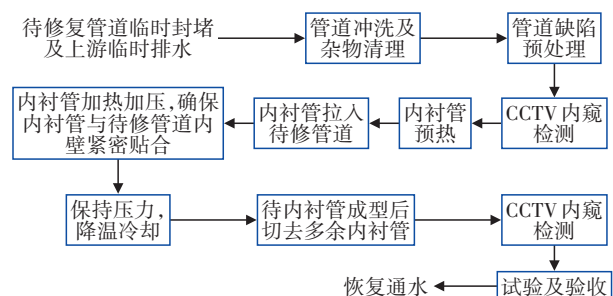


图 3 施工工艺流程

Fig.3 Construction process flow

修复前,首先要对上、下游排水管线和施工段涉及的支线进行封堵、导流,并架设临排;采用高压水枪冲洗原有管道内壁附着物及管道内淤泥、石子等杂物,清淤完成后,针对原有管道出现的相关缺

陷进行预处理。满足修复要求后,搭建施工平台,对内衬管预热、软化后,通过卷扬机拉入原有管道内,向内衬管加热加压,确保内衬管与待修复管道内壁紧密贴合,保持内衬管压力不变,充入冷空气冷却内衬管,待温度降至常温时缓慢释放压力;当内衬管压力释放完毕后,将两端多余的内衬管切除,翻边以形成密封,修复后对内衬管道进行CCTV内窥检测,取样进行试验及验收,最后恢复通水。

2.3 适用范围

FIPP技术适合低于90°弯转及管径≤1 200 mm管道的修复^[2,8];多种断面如圆形、矩形、蛋形和三角形^[9]及各类材质管道的修复;变径、严重错口的管道修复;商业街区、交通拥堵、人流量大等地段的管道修复;车流量大、地质活跃区域的管道修复^[2]。

2.4 技术特点

内衬管可常温储存,储存成本低;施工占地面积小,操作简单,施工速度快,工期短;适用范围广,可用于各类结构性缺陷的管道修复;内衬管强度高,具有很强的耐腐蚀性,使用寿命长^[2];内衬管表面光滑,阻力系数小,修复后较修复前管道过流能力损失小;内衬管与原有管道紧密贴合,无需灌浆处理^[8-9];内衬管材料属于热塑性高分子材料,可重复加热使用^[8];施工难度低,很大程度上降低了工程风险;在整个修复过程,不产生“三废”;内衬管管材属于环保性材料,不污染水质。

3 技术设计

3.1 内衬管壁厚设计

管道修复后由内衬管和原有管道联合承受外部压力时,内衬管壁厚设计按以下公式计算:

$$q = 100 \times (D_E - D_{\min}) / D_E \quad (1)$$

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

$$t = \frac{D_0}{\left[\frac{2KE_L C}{PN(1 - \mu^2)} \right]^{\frac{1}{3}} + 1} \quad (3)$$

式中: q 为原有管道的椭圆度,%; D_{\min} 为原有管道的最小内径,mm; D_E 为原有管道的平均内径,mm; C 为椭圆度折减系数; D_0 为内衬管管道外径,mm; E_L 为内衬管的长期弹性模量,MPa,热塑成型内衬材料该值为2 300 MPa; K 为原有管道对内衬管的支撑系

数,取值为7.0; N 为管道截面环向稳定性抗力系数,取值≥2.0; P 为管顶位置地下水压力,MPa; μ 为泊松比,原位固化内衬管取0.3; t 为内衬管的壁厚,mm。

本工程内衬管道外径为600 mm,原有旧管道的平均内径为601 mm,最小内径为590 mm。管道顶部埋深约1 m,不考虑地下水压力,真空压力取0.05 MPa。经式(1)计算椭圆度 q 为1.8%,再经式(2)计算椭圆度折减系数 C 为0.851,通过式(3)计算得内衬管管壁设计厚度为8.82 mm,取9 mm。

3.2 管道过流能力计算

修复后管道的过流能力与修复前的比值按下式计算:

$$B = \frac{n_e}{n_1} \times \left(\frac{D_1}{D_E} \right)^{\frac{8}{3}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: B 为管道修复前后过流能力比,>100%满足设计要求; D_1 为内衬管的内径,mm; n_e 为原有管道的粗糙系数; n_1 为内衬管的粗糙系数,取0.010。

4 施工预处理

4.1 现场踏勘

施工前,根据设计方和甲方提供的资料,再结合现场踏勘,确定管道位置、管径、长度、管道材质以及检查井位置并做好标记。同时,了解施工现场具体环境,如交通状况、周围建筑物分布、可作业面等,为施工方案的制定做准备。

4.2 封堵与导流

目前常用气囊和墙体进行管道的封堵。大管径的封堵通常采用墙体封堵,本工程原有管道管径较小,产生的水压小,故采用气囊封堵法。

管道清淤、预处理及修复需在无水或少水的环境下施工,因此管道封堵完成后,可采用临近检查井内设置导流(见图4)。当水量增加时,需同步增加调水设备,以保证管道施工的安全性^[10-12]。

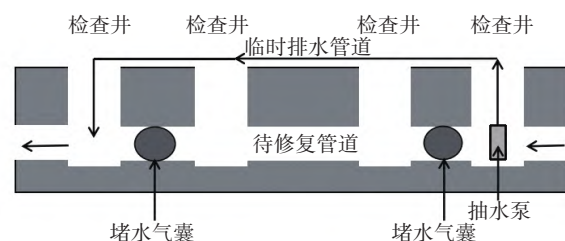


图4 临时排水

Fig.4 Temporary drainage

4.3 渗漏处理

针对原有管道漏水量较小、地下水压力较低的情况,采用喷涂或注浆的方法进行堵漏;当管道漏水严重、地下水压较大时,采用专用注浆材料进行处理。

预处理前、后管道内壁对比如图5所示。

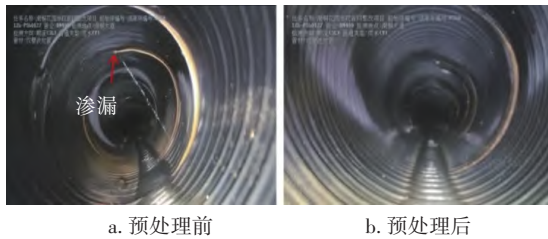


图5 渗漏预处理前、后的管道内壁形貌

Fig.5 Pipe inner wall morphology before and after pretreatment of leakage

4.4 树根处理

经CCTV检测发现,管道内部存在多处树根,影响工程修复施工。

通常情况下,当管径 ≤ 400 mm时,采用机械设备(如多功能树根切割机器人等)进入管道内部进行切除;该项目管径 > 400 mm,可以采用人工+马刀锯(切割机)进入管道内进行切除。预处理前、后管道内壁对比如图6所示。

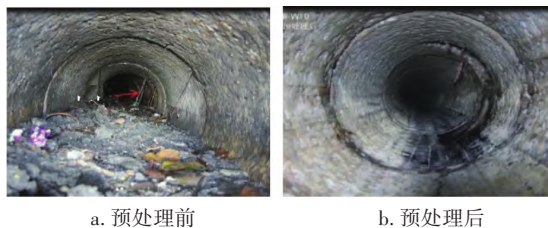


图6 树根预处理前、后的管道内壁形貌

Fig.6 Pipe inner wall morphology before and after pretreatment of roots

4.5 破裂和塌陷处理

该管段有4处4级破裂,其中2处塌陷几乎将管道封闭。

通过CCTV确定塌陷的位置,组织施工人员进入管道内,在塌陷位置注浆,注意防止塌陷处理过程中出现二次塌陷,再用约小于原有管道的扩大头与卷扬机,通过铁链接将塌陷处的碎石和泥土拉到检查井内进行清理,最后采用多功能机器人对塌陷处进行打磨处理。预处理前、后管道内壁对比如图7所示。

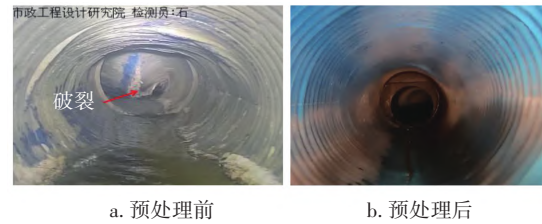


图7 破裂和塌陷预处理前、后管道内壁形貌

Fig.7 Pipe inner wall morphology before and after pretreatment of rupture and collapse

4.6 错口处理

若错口严重,很可能导致修复后不能满足该区域的排水要求,因此,对错口严重的位置进行处理,根据本项目特点,采用不锈钢双胀环和钻孔注浆联合使用^[13]。预处理前、后的情况对比如图8所示。

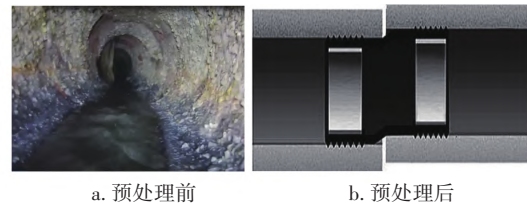


图8 错口预处理前管道内壁形貌及预处理后管横切面

Fig.8 Inner wall morphology of pipe before and after pretreatment of misalignment

4.7 变径管道处理

管道内存在两种管径,前端有5 m管道直径为500 mm,其余管径为600 mm,为了尽量降低修复前后过流面积损失,本项目将500 mm的管道置换为600 mm,确保管网的整体性和连贯性。修复前、后管道内壁对比如图9所示。

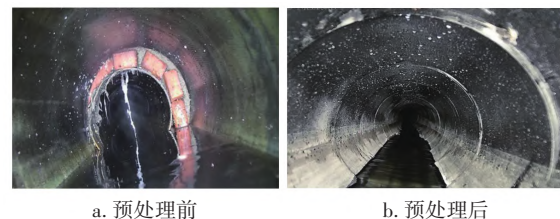


图9 变径管道预处理前、后管道内壁形貌

Fig.9 Pipe inner wall morphology before and after pretreatment of adjustable pipe

经预处理后采用CCTV进行内窥检测,管道内表面符合预处理相关规定。

5 施工过程质量控制

5.1 现场踏勘及施工方案制定

工程施工前,根据设计单位或甲方提供的相关

资料,再结合现场踏勘,确定管道位置、管径、长度、管道材质以及检查井位置并做好标记。同时,掌握施工现场具体环境,如交通状况、周围建筑物分布、可作业面等。技术负责人根据现场踏勘、设计单位及甲方提供的相关资料编制本工程项目的专项施工方案。进场施工前,需对现场技术人员及其他工作人员进行详细的技术交底和有限空间作业安全培训。

5.2 内衬管材料

严格管控内衬管材料的进场检验与验收工作,内衬管材料外包装、标识及材料外观无缺损,产品质量保证书(合格证)和产品质量检测报告必须齐全;核查产品质量保证书(合格证)、产品质量检验报告中的各项技术数据。同时,现场随机抽取内衬管进行取样,复检结果满足规定要求。

5.3 管道清淤及预处理

采用高压冲洗车对待修复管道进行清洗,采用吸污车进行吸泥,脱水后运输至污泥站进一步处理。通过CCTV设备对清淤后管道进行检测,预处理后待管道内壁满足《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 210—2014)相关规定。

5.4 内衬管预热软化

根据现场实际管道修复长度制作内衬管,将卷成盘的内衬管送入加热箱加热软化,加热温度及时间根据厂家提供的参数和现场实际情况确定;加热温度100℃左右,软化时间3~5h,具体加热时间要根据内衬管管壁厚度、卷成盘上内衬管的叠放厚度及周围环境温度来确定。

5.5 内衬管拉入原有管道

内衬管拉入待修复管道前,在接收井口安装好卷扬机,通过铁链连接卷扬机和送料井口卷盘上的内衬管;之后,将预热好的内衬管拉入待修复管道过程中,接收井口和送料井口施工人员通过对讲机相互联系配合,确保将内衬管顺利拖入待修管道中。

在施工过程中,由于待修复管道较长,内衬管硬化速度较快,内衬管材料还未完全拉入待修复管道内就发生硬化,卷扬机就很难拉动硬化后的内衬管,如果强拉很有可能损坏内衬管材料。针对此情况,继续对内衬管通入加热蒸汽使其软化,达到软化要求后,再通过卷扬机将内衬管完全拉入待修复管道。

5.6 内衬管膨胀及冷却定型

当内衬管完全拉入待修复管道后,再次对内衬管加热软化,采用专用堵头将内衬管两端进行封堵,接收井处堵头通气管与温度表、压力表及阀门进行连接,送料井口堵头通气管与压力表及阀门进行连接。水蒸气通过送料井口处专用堵头上的通气管向内衬管加热加压,使内衬管膨胀直至紧贴原有管道内壁。内衬管膨胀成型过程中,控制好加热温度不高于95℃,内衬管内部的压力不高于0.15MPa。待内衬管完全与原有管道内壁紧密贴合后,在保持压力不变的情况下,向内衬管内部输入空气冷却,当内衬管内部的气体温度降为30℃后,释放压力,再将外露多余内衬管切除。若内衬管道与原有管道之间存在间隙,可采用堵漏王或聚氨酯灌浆材料进行填充封堵。

施工完成后,通过CCTV检测对修复后的管道进行检查,按CJJ/T 210—2014标准进行竣工验收。

6 工程造价分析

根据《重庆市排水管网设施养护维修定额》(CQPWDE—2021)、《重庆市建设工程费用定额》(CQFYDE—2018)规定,对该项目管道修复费用进行计算。

修复费用包括管道检测、管道清理疏通、管道预处理和管道修复,如表2所示。

表2 FIPP管道修复费用

Tab.2 Cost of FIPP pipe rehabilitation

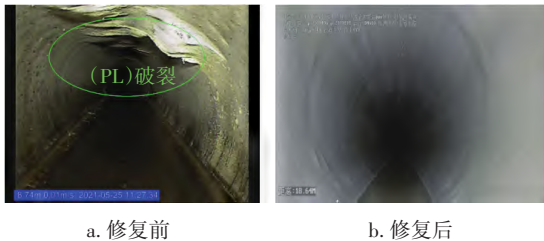
项目		综合单价
管道检测	CCTV	18.49 元/m
管道清理疏通	管内树根清除、机械清淤	244.84 元/m
	人力掏挖检查井、淤泥装袋、淤泥输送	340.97 元/m ³
	井内抽水	336.57 元/台班
	检查井拆修及井盖更换	2 486.8 元/座
管道预处理	气囊管堵安装、拆除	1 058.43 元/处
	注浆、塌陷处理	29 811.44 元/m ³
	管道内衬钢套、砂浆勾缝	2 075.09 元/m ²
	裂缝堵漏	841.06 元/m
管道修复或拆除	管道修复	FIPP材料、作业车等 3 780.11 元/m
	管道拆除	拆除管道等 66.20 元/m
注: 综合单价包括人工费、材料费、机械费、管理费、利润及一般风险费。		

经计算得出,该工程造价约为6 151.57 元/m。

7 修复后排水管道功能性评价

7.1 外观评价

采用CCTV设备对修复后的管道进行检测,内衬管内壁表面光滑无鼓胀,无明显划伤、褶皱、裂纹及渗水。同时,内衬管与原有管道贴附紧密,符合《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)的规定。修复前、后管道对比如图10所示。



a. 修复前 b. 修复后

图10 修复前、后管道内壁形貌

Fig.10 Appearance of inner wall of pipeline before and after rehabilitation

7.2 内衬管结构性能

对修复后的内衬管取样,并委托专业检测机构对送检试样进行检测,检测条件为(23±2)℃,相关指标检测结果如表3所示。

表3 FIPP内衬管检测结果

Tab.3 Test results of FIPP liner MPa

检测项目	技术指标	检测结果	单项判断	检测方法
抗拉强度	≥21	36.2	合格	《塑料拉伸性能的测定 第2部分:模塑和挤塑塑料的试验条件》(GB/T 1040.2—2006)
弯曲强度	≥50	55.6	合格	《塑料弯曲性能的测定》(GB/T 9341—2008)
弯曲模量	≥2 000	2 455	合格	

由表3可知,初始固化管的抗拉强度为36.2 MPa,弯曲强度为55.6 MPa,弯曲模量为2 455 MPa,均满足考核指标要求,检测结果合格。

7.3 内衬管壁密实性试验

密实性试验是检验修复后内衬材料的均匀度和管壁的抗渗性能。测试方法参照《给水排水管道原位固化法修复工程技术规程》(T/CECS 559—2018)中管壁密实性测试试验。经实际测试均未发生渗漏,试验结果合格。

7.4 修复后管道过流能力

管道修复完成后,内衬管的粗糙系数为0.010;原有管道的材质为混凝土管,粗糙系数为0.013;原管道的内径为601 mm;内衬管的内径为581 mm。

经式(4)计算得管道修复前后过流能力比为118.8%,满足工程验收规定。

8 结语

原位热塑成型(FIPP)修复工艺施工便捷,设备操作简单,材料可反复加热软化,紧密贴合,可用于多截面、多材质、复杂病害管道的修复。该修复工程通过内衬管材料壁厚设计及管道过流能力计算,确保材料壁厚设计和过流能力满足标准设计要求;对整个施工过程,包括现场踏勘、施工方案、进场材料、管道清淤、管道缺陷预处理、内衬管预热软化、内衬管拉入原有管道的质量等采取有力控制措施,确保了工程质量。经测试,各项指标均符合验收标准规定,该技术能够满足本项目要求。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴(2019) [M]. 北京:中国统计出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. China Urban-Rural Construction Statistical Yearbook (2019) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020 (in Chinese).
- [2] 廖宝勇. 原位热塑成型修复技术在给排水管道非开挖修复中的应用[J]. 建设科技, 2019(23): 60-63.
LIAO Baoyong. Application of in-situ thermoplastic molding repair technology in trenchless repair of water supply and drainage pipeline [J]. Construction Science and Technology, 2019(23): 60-63 (in Chinese).
- [3] 余雪兵,褚俊英,张礼兵,等. 我国城市管网修复技术现状及其发展前景[J]. 安徽建筑, 2021, 28(4): 79-81.
YU Xuebing, CHU Junying, ZHAGN Libing, et al. Present situation and development prospect of urban pipe network restoration technology in China [J]. Anhui Architecture, 2021, 28(4): 79-81 (in Chinese).
- [4] 安关峰,张蓉,张欣,等. 《城镇排水管道非开挖修复工程施工及验收规程》解析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 71-76.
AN Guanfeng, ZHAGN Rong, ZHAGN Xin, et al. Analysis on the specification for Construction and Acceptance of Trenchless Rehabilitation Engineering of Urban Drainage Pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 71-76 (in Chinese).
- [5] 忻少华. PVC模块内衬法在排水管道非开挖修复中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2021(7): 308-311, 29.

- XIN Shaohua. Application of PVC segmental lining method in trenchless repair of drainage pipeline [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021(7): 308-311, 29 (in Chinese).
- [6] 石东优,张军,曹井国,等. 城镇排水管道原位固化内衬管树脂浸渍特性研究[J]. 天津建设科技, 2021, 31(3): 1-6.
- SHI Dongyou, ZHANG Jun, CAO Jingguo, *et al.* Study on resin impregnation characteristics of in-situ solidified inner liner of urban drainage pipe [J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2021, 31(3): 1-6 (in Chinese).
- [7] 向维刚,马保松,赵雅宏. 给排水管道非开挖CIPP修复技术研究综述[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 1-9.
- XIANG Weigang, MA Baosong, ZHAO Yahong. Research review on trenchless CIPP repair technology in water supply and drainage pipes [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 1-9 (in Chinese).
- [8] 刘琳,刘勇,黄宁君. 新型原位热塑成型管道非开挖修复技术应用案例[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 134-137, 142.
- LIU Lin, LIU Yong, HUANG Ningjun. Application case of new trenchless pipe rehabilitation technology for formed-in-place pipe (FIPP) [J]. China Water and Wastewater, 2021, 37(6): 134-137, 142 (in Chinese).
- [9] 张文宁. 排水管道原位修复无纺布内衬软管制备与性能研究[D]. 天津:天津科技大学, 2019.
- ZHANG Wenning. Study on Preparation and Performance of Non-woven Lining Hoses for Cured in Place pipe (CIPP) in Drainage Pipeline [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).
- [10] 张国森,钟振利,金敏康,等. 气囊封堵法在排水管道施工及维修工程中的应用[J]. 市政技术, 2011, 29(3): 72-74.
- ZHANG Guosen, ZHONG Zhenli, JIN Minkang, *et al.* Application of air-bag occlusion method in construction and maintenance of drainage pipeline [J]. Municipal Engineering Technology, 2011, 29(3): 72-74 (in Chinese).
- [11] 住房和城乡建设部. 城镇排水管道与泵站运行、维护及安全技术规程:CJJ 68—2016 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical Specification for Operation, Maintenance and Security of Sewers and Channels and Pumping Stations in City and Town: CJJ 68-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016 (in Chinese).
- [12] 李明. 高压条件下排水管道局部树脂固化修复及预处理[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 45-50.
- LI Ming. Local resin curing repair and pretreatment technology of drainage pipes under high water pressure [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 45-50 (in Chinese).
- [13] 李子明. 软土地基排水管道螺旋缠绕修复理论研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020.
- LI Ziming. Study on the Theory of Spiral Wound Repair of Drainage Pipe in Soft Soil Foundation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020 (in Chinese).

作者简介:石东优(1991-),男,重庆人,硕士,工程师,研究方向为管道检测、非开挖修复材料和技术。

E-mail:2653210891@qq.com

收稿日期:2021-11-18

修回日期:2022-01-04

(编辑:衣春敏)

借自然之力,护绿水青山