



城镇排水管道 CIPP 紫外光固化修复技术工程应用

石东优^{1,2} 张军¹ 李静² 张杰¹ 曾张成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, 天津 300457)

摘要: CIPP 紫外光固化非开挖管道修复技术采用树脂体系和玻璃纤维织物组合的内衬管材料, 耐腐蚀性强、强度高、抗冲刷能力强、自动化程度高、全程可视化控制、施工流程简单、效率高、施工风险低, 是目前最具发展前景的非开挖修复技术。本文结合重庆市渝北城区环境综合治理 PPP 项目排水管道修复工程案例, 详细介绍了 CIPP 紫外光固化技术原理、材料质量控制、施工工艺流程、原管道缺陷预处理、褶皱缺陷分析、施工质量控制及工程造价分析, 以为类似 CIPP 紫外光固化非开挖修复工程应用提供参考。

关键词: CIPP 紫外光固化; 非开挖修复技术; 排水管道; 工程应用

中图分类号: TU990 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-8471(2024)02-0000-00

DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2024.02.000

引用本文: 石东优, 张军, 李静, 等. 城镇排水管道 CIPP 紫外光固化修复技术工程应用[J]. 给水排水, 2024, 50(2): 0-0. SHI D Y, ZHANG J, LI J, et al. Engineering Application of UV-CIPP for urban drainage pipeline[J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(2): 0-0.

Engineering application of UV-CIPP for urban drainage pipeline

SHI Dongyou^{1,2}, ZHANG Jun¹, LI Jing², ZHANG Jie¹,

CENG Zhangcheng¹, CAO Jingguo²

(1. Chongqing kenavi Environmental Protection Technology Co., Ltd, Chongqing 401120, China; 2. Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: As the most promising trenchless repair technology, UV-CIPP uses a combination of resin and glass fiber fabric as the inner liner material, which has strong corrosion resistance, high strength, strong erosion resistance, high degree of automation, visual control throughout the process, simple construction process, high efficiency, and low construction risk. Combined with a case study of the PPP drainage pipeline repair project in Yubei District of Chongqing, the Technical principle, the material quality control, the construction process flow, the pretreatment of original pipeline defects, the wrinkle defect analysis, the construction quality control, and the project cost analysis of UV-CIPP repair technology are introduced, so as to provide reference for similar projects.

Keywords: UV-CIPP; Trenchless technology; Drainage pipeline; Engineering application

0 引言

据城乡建设统计年鉴^[1], 截止 2021 年我国排水管道达 132 万公里。随着我国城镇化进程加快, 地

下管网建设规模逐年增加, 管线累计长度持续增加。使用年限久远的地下管道相继出现严重的结构性和功能性缺陷, 进而导致路面塌陷、城市内涝、地下水



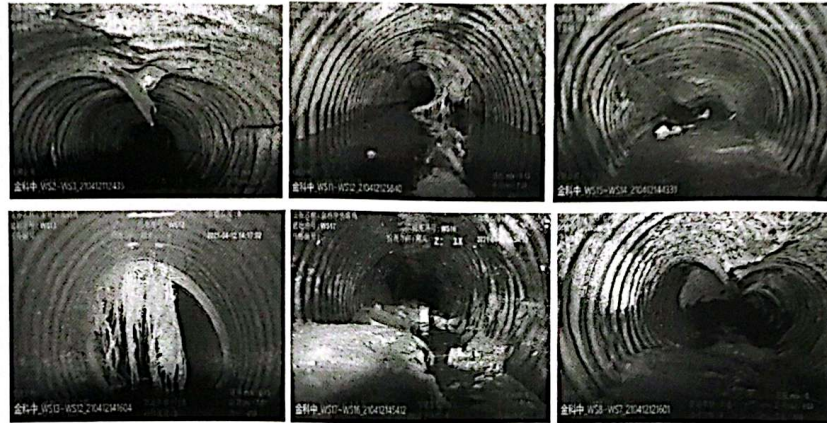


图 1 部分管道病害情况

Fig. 1 Partial disease of pipelines

污染等灾害;据统计 2022 年 11 月,国内发生地下管线事故 99 起。其中,地下管线破坏 63 起,占比 63.64%;路面塌陷 36 起,占比 36.36%;事故造成 6 人受伤,2 人死亡;严重威胁人们的生活及生命财产安全。管道结构缺失、外部荷载、维护不及时等因素而引发地下管线事故,因此,定期排查和及时维护是管网正常运行的有力保障。较传统的开挖修复方式,非开挖技术施工流程简单、工期短、作业面小、成本低、环境影响小、为地下管道维护提供了一种更有效的修复工法^[2-3]。

目前,常见的非开挖修复技术工法:机械制螺旋缠绕法、原位热塑成型法(FIPP)、点状原位固化法、CIPP 热水原位固化法、裂管法、PVC 管片内衬法、穿插法、喷涂法、CIPP 紫外光固化法等^[4-6]。CIPP 紫外光固化非开挖管道修复技术采用树脂体系和玻璃纤维织物组合的内衬管材料、储存周期长、储存费用低、耐腐蚀性强、强度高、抗冲刷能力强、施工作业面小、施工流程简单、效率高、环境影响小、自动化程度最高、全程可视化控制、施工风险低,可用于多截面、错口、变径等多材质病害管道的修复,是当前最具发展前景的非开挖修复技术。

本文结合重庆市渝北城区环境综合治理 PPP 项目排水管道修复工程案例,通过对 CIPP 紫外光固化技术原理、材料质量控制、施工流程、原管道缺陷预处理、褶皱缺陷分析、施工质量控制及工程造价分析,以期为 CIPP 紫外光固化修复工程应用提供参考。

1 工程概况

本项目修复工程位于重庆市渝北区,管道总长度 2.6 km,管径 DN 400~600 mm,管道材质为双壁波纹管 and 混凝土管;由于原管道运行年代久远、加之排查及维护不及时导致严重的结构性缺陷和功能性缺陷,其中,以腐蚀、树根、渗漏、破裂为主,部分病害管道情况如图 1 所示。

该项目位于商业区、交通拥挤、人流量巨大、可作业面小完全不具备开挖条件;加之管道自身结构出现严重的结构性缺陷,以腐蚀、树根、渗漏、破裂为主。结合非开挖修复技术工艺和技术特点,其中 CIPP 紫外光固化非开挖管道修复技术具有材料储存周期长、施工作业面小、操作简单、工期短、环境影响小、施工安全、自动化程度最高、全程可视化控制、施工风险低,可用于多截面、错口、变径等多材质病害管道的修复;此外,CIPP 紫外光固化修复技术不但满足现代管道修复的技术和环境要求,且应用效果和成本适宜,能够达到很好的修复效果,再结合工程实际情况,据此,本项目采用 CIPP 紫外光固化技术修复管道。

2 紫外光原位固化非开挖管道修复技术

2.1 技术原理

CIPP 紫外光固化修复技术利用牵引装置将树脂体系和玻璃纤维织物组合的内衬管材料匀速拉入待修复管道,充气加压,拉入紫外灯架,经 UV 固化,自然冷却形成与原管道紧密贴合的“管中管”内衬结构。施工设备及材料如图 2(A)和图 2(B)所示。



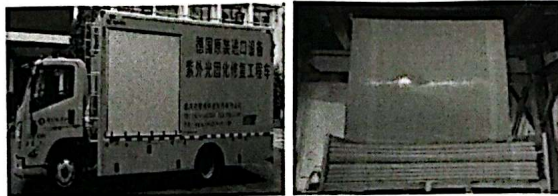


图 2 施工设备(A)及材料(B)

Fig. 2 Construction equipment (A) and materials (B)

2.2 紫外光固化机理

紫外光固化属于光引发剂引发聚合反应。光引发阶段产生活性中心,随之引发链增长反应,随着反应链的不断增长出现交联,进一步固化成膜,经链自由基偶合或歧化反应完成链终止,最后树脂体系固化反应结束[7]。

紫外光固化技术目前广泛用于地下排水管道修复领域,修复用树脂体系包括树脂和助剂,其中,树脂材料包括环氧树脂(PE)、不饱和聚酯树脂(UP)、乙烯基脂树脂(VE)三类;助剂含稳定剂、光稀释剂、引发剂等助剂。目前常用紫外光光源包括金属卤素灯、无极灯、氙灯、高压汞灯等[8]。经各方面研究发现,管道修复的固化效果、厚度和性能与紫外灯光强度、光引发剂种类、稀释剂、光敏剂等有关。

2.3 施工工艺流程

施工工艺流程如图 3 所示。

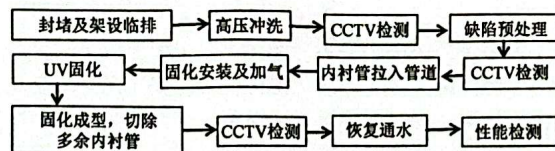


图 3 施工工艺流程

Fig. 3 Construction process flow

修复前,对修复管段上、下游和施工段及支管进行封堵,架设临排导流,选择适宜的高压枪头冲洗原管道,经 CCTV 检测原管道内部情况,针对原管道存在的缺陷进行预处理。当预处理管道内壁满足修复标准时,安装牵引设备,拉入底膜并固定,经牵引设备将内衬管拉入原管道,安装安全扎头,充气加压,将紫外光灯架送入内衬管,打开紫外光灯,在 UV 固化过程中,进行保压控制,确保内衬管与原管道内壁紧密贴合,待内衬管完全固化后,拉出紫外光灯架,并持续压,待常压后切除修复管道两端多余的

内衬管,对固化内衬管进行 CCTV 检测,取样送检及验收,恢复管道通水。

2.4 技术特点

适用范围广,可用于各类材质管道,多截面,弧度低于 15°及各类结构性缺陷管道的修复;工艺流程简单、作业面小、工期短,对城市交通、环境及周边居民影响小,提高社会效益和经济效益;自动化程度高,施工过程实时监控,施工安全性高,保证修复质量;内衬管严密性好,防渗性能优良,强度高,抗水冲刷强,耐腐蚀性强,使用寿命长;厚度低,机械强度高,载流面损失小。

3 材料性能

CIPP 紫外光固化技术所用材料为树脂体系和玻璃纤维内衬管,树脂体系、玻璃纤维类型及内衬管制作工艺决定了 CIPP 紫外光固化修复后管道结构及力学性能[9]。

3.1 修复用树脂要求

不同修复管道类型与对应树脂种类的选用标准,见表 1 所示;树脂浇筑体性能指标满足对应表 2 中的指标;树脂耐腐蚀性指标满足表 3 中的指标。

表 1 管道修复用树脂材料的选用[10]

Tab. 1 Selection of resin materials for pipe repair

Table with 3 columns: 序号, 排水种类, 选用树脂类型. Rows 1-3 detailing pipe types and resin selections.

注:树脂供应商应出具可用于排水管道的适用报告

由表 1 可知,UP、EP、VE 三类树脂均适用于给水管道的修复;EP、UP 两类树脂适用于排水管道(雨水、生活污水)的修复;EP、VE 两类树脂适用于化工废水及高温(≥40℃)废水管道的修复。

表 2 CIPP 专用树脂浇筑体性能要求[10]

Tab. 2 Performance requirements for CIPP resin cast materials

Table with 6 columns: 序号, 纯树脂性能, EP, VE, UP, 检测方法. Rows 1-6 detailing performance metrics for resin materials.

注:EP,环氧树脂;VE,乙烯基树脂;UP,不饱和聚酯树脂

由表 2 可知,EP(环氧树脂)树脂浇筑体检测性能要求:弯曲强度≥100 MPa;拉伸强度≥80 MPa;





拉伸模量 $\geq 3\ 000$ MPa; 弯曲模量 $\geq 3\ 000$ MPa; 断裂伸长率 $\geq 4\%$; 热变形温度 $\geq 85\ ^\circ\text{C}$ 。VE 树脂浇铸体检测性能要求: 弯曲强度 ≥ 100 MPa; 拉伸强度 ≥ 80 MPa; 拉伸模量 $\geq 3\ 000$ MPa; 弯曲模量 $\geq 3\ 000$ MPa; 断裂伸长率 $\geq 4\%$; 热变形温度 $\geq 93\ ^\circ\text{C}$ 。UP 树脂浇铸体检测性能要求: 弯曲强度 ≥ 90 MPa; 拉伸强度 ≥ 60 MPa; 拉伸模量 $\geq 3\ 000$ MPa; 弯曲模量 $\geq 3\ 000$ MPa; 断裂伸长率 $\geq 2\%$; 热变形温度 $\geq 88\ ^\circ\text{C}$ 。

表 3 树脂耐腐蚀性能要求^[11]

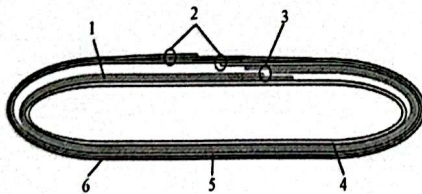
序号	化合物溶液	等级 1	等级 2	等级 3	检测方法
1	硫酸, 浓度 5.0%	✓	✓	✓	GB/T 3857
2	硝酸, 浓度 1.0%	✓	✓	✓	
3	氢氧化钠, 浓度 0.5%	—	✓	✓	
4	洗涤剂, 浓度 0.1%	✓	✓	✓	
5	肥皂水, 浓度 0.1%	✓	✓	✓	
6	燃料油, 浓度 100%	✓	✓	✓	
7	食用油, 浓度 100%	✓	✓	✓	

注: 等级 1 为热固性不饱和聚酯树脂; 等级 2 为热固性不饱和聚酯树脂以及乙烯基树脂; 等级 3 为热固性环氧树脂。

由表 3 可知, 树脂耐腐蚀性能除等级 1 不满足氢氧化钠(浓度 0.5%)腐蚀指标外, 均满足其他相关腐蚀溶液的腐蚀指标。

3.2 CIPP 紫外光固化干软管结构要求

CIPP 紫外光固化干软管材料为玻纤软管, 其结构示意图如图 4 所示, 从 1~6 依次为承载层(单或多层玻璃纤维织物)、外膜重叠区域、承载层重叠区域、内膜层(透紫外光膜)、防渗层(防渗外膜)、外膜层(防紫外光膜)^[10]。玻纤软管按接缝加工方式, 可分为螺旋缠绕、缝合和错位搭接三种制作工艺。



1—承载层; 2—外膜重叠区域; 3—承载层重叠区域;
4—内膜层; 5—防渗层; 6—外膜层

图 4 CIPP 紫外光固化干软管结构示意图^[11]

Fig. 4 Structure diagram of CIPP UV curing dry hose

本项目根据内衬管设计厚度将两层及以上的玻璃纤维织物端部以错位搭接工艺的形式闭合, 并采

取有效方式进行固定, 一层搭接区域宽度 ≥ 100 mm, 层与层之间搭接区域间距 ≥ 150 mm。该工艺 CIPP 紫外光固化干软管具有 2~6% 的膨胀率, 修复时内衬管与原管道内壁更易紧密贴合, 固化强度高, 寿命长。

树脂体系与玻璃纤维织物相黏合且共同承担外部荷载, 同时, 干软管的拉伸率、弯曲性能、抗拉强度等指标满足设计要求, 以确保能承受安装压力、树脂固化释放高温及满足不规则管道的修复。管径设计应满足固化后内衬管与原管道内壁紧密贴合, 避免管径设计不合理出现内衬管隆起、褶皱、固化软弱带等质量问题。

3.3 CIPP 紫外光固化内衬管要求

CIPP 紫外光固化内衬管由玻璃纤维组成的软管和紫外光固化树脂体系等黏合组成。CIPP 紫外光固化干软管在浸润树脂前期, 确保紫外光固化干软管处于真空度不低于 30 kPa 状态下充分浸润树脂, 光固化树脂与玻璃纤维层的质量比不低于 1, 树脂黏度控制在 600~800 cps, 树脂和固化剂混合均匀后需及时进行浸渍; 浸渍过程应确保承载层被树脂充分浸润, 环境温度控制在 $5\ ^\circ\text{C}$ ~ $25\ ^\circ\text{C}$ 。CIPP 紫外光固化内衬管采取碾胶滚筒作为牵引力, 通过调节两滚筒间间距控制浸渍内衬管的厚度, 浸渍内衬管厚度约大于设计厚度, 浸渍完成后内衬管表面应无干斑、气泡等现象。

修复完成后的 CIPP 紫外光固化内衬管的抗拉强度、弯曲强度、弯曲模量、厚度测试及密实性试验^[12]等试验测值应满足相关标准要求, 荷载蠕变系数为 1.2~1.35^[13]。

3.4 材料存储和运输要求

紫外光固化内衬管过程中, 必须严格存储在避光、低温($5\ ^\circ\text{C}$ ~ $25\ ^\circ\text{C}$)的环境下, 位于木箱顶部的黑色紫外光隔离膜, 必须在整个存储过程中覆盖内衬管; 运输过程中, 记录材料暴露温度和时间, 避免恶劣天气, 黄色外膜起到对紫外线隔离的作用, 施工阶段, 拉入内衬管过程中要防止黄色外膜被划破而引发提前固化。淋雨或进水可能导致材料失效。

4 技术设计

4.1 内衬管壁厚设计

修复管道由内衬管和原管道共同承担外界压力





时,内衬管壁设计厚度按下式进行计算:

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

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

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

式中: q ——原管道椭圆度, %;

D_{\min} ——原管道最小内径, mm;

D_E ——原管道平均内径, mm;

C ——椭圆度折减系数;

N ——管道截面环向稳定性抗力系数, ≥ 2.0 ;

t ——内衬管壁厚, mm;

D_o ——内衬管外径, mm;

P ——管顶位置地下水压力, MPa;

E_L ——内衬管长期弹性模量, MPa, 取值为 15 600 MPa;

μ ——泊松比, 内衬管取 0.3;

K ——原管道对内衬管的支撑系数, 取值为 7.0。

根据理论参数及实际检测数据, 代入(1)、(2)、(3)式计算得到在不同地下水位对应管径的内衬管管壁设计厚度, 如下表 4 所示。

表 4 不同地下水位对应管径的内衬管壁设计厚度

Tab. 4 Design thickness of inner liner corresponding to pipe diameter under different groundwater levels

管径/mm	地下水位/m					
	1.5	2	2.5	3	3.5	4
	内衬管设计厚度/mm					
DN400	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
DN450	3.0	3.0	3.0	3.0	3.1	3.2
DN500	3.0	3.0	3.0	3.2	3.4	3.6
DN600	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.3

本项目内衬管外径为 571 mm, 原管道平均内径为 597 mm, 最小内径为 590 mm; 管道地上部的地下水位 2 m, 对应的内衬管设计厚度为 3.4 mm。

4.2 管道过流能力计算

修复前后管道过流能力比值按下式计算:

$$B = \frac{n_e}{n_1} \times \left(\frac{D_1}{D_E} \right)^{\frac{5}{2}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: B ——管道修复前后过流能力比, $> 100\%$ 满足设计要求;

D_1 ——内衬管的内径(mm);

n_e ——原管道的粗糙系数;

n_1 ——内衬管的粗糙系数, 取 0.010。

5 施工预处理

非开挖修复施工前, 对未达修复要求的原管道缺陷进行预处理, 预处理质量直接影响修复工程质量。主要针对原有管道可能出现的相关缺陷, 并提出解决方案, 如表 5 所示。

6 修复管道缺陷分析

6.1 内衬管材料褶皱分析

总结了施工过程中固化内衬管可能出现的缺陷类型, 针对固化内衬管材料出现侧面褶皱、底部褶皱、复合层分(未)离褶皱、复合层表层褶皱、复合层内部褶皱、横向褶皱及形状褶皱等缺陷进行了分析, 并作出相应评估, 采取预防措施, 降低相关缺陷的发生, 有利于提高后期修复工程质量。如表 6 所示。

6.2 水对紫外光固化材料及固化效果的影响

通过对内衬管浸水前、后的表观形貌, 固化后表观形貌及力学性能进行研究, 研究表明: 浸水前内衬管外观颜色均匀通透, 浸水后, 随着复合层浸水量增加, 表面白斑越明显, 处理前、后如图 5 所示。浸水前内衬管固化, 外观色泽均匀无白斑, 完全固化; 浸水后内衬管固化后外观出现白斑, 随着复合层浸水量的递增, 表面白斑越明显, 出现未完全固化现象, 处理前、后如图 6 所示。

在内衬管固化过程中需无水环境, 未浸水固化内衬管短期弹性模量满足标准要求; 若水浸入内衬管复合层, 水与固化树脂体系接触后产生乳化反应, 同时随着浸水量的递增, 导致树脂体系在内衬管复合层分布不均, 导致内衬管固化效果不佳, 引起固化管理力学性能递减。

6.3 施工问题及预防措施

针对施工过程中常出现的相关质量问题, 对内衬管提前固化、与原管道不紧密贴合、强度不达标、存在软弱带、鼓包、起泡及表面褶皱等缺陷进行了分析, 并提出了相应的预防措施, 有利于提高修复工程质量。如表 7 所示。





表 5 不同缺陷及预处理

Tab. 5 Different Defects and Pretreatment

缺陷类型	缺陷名称	预处理措施
结构性缺陷	破裂	人工处理、局部开挖、注浆及相关机械设备配合处理； 1、管径小于 400 mm 时：a、采用局部开挖和机械设备协同进行预处理；b、在缺陷位置注浆，采用约小于原管径扩大头与卷扬机进行清理，最后用多功能机器人进行打磨 2、管径大于 400 mm 时，在缺陷位置注浆，待注浆材料固化后施工人员进入管道内进行清掏和打磨
	变形	1、采用局部开挖，清除变形部分管道，待原管道修复完成后，再对开挖处按施工要求进行填埋 2、采用特定的液压千斤顶将变形部分撑开，然后进行注浆，待注浆材料固化后，取出液压千斤顶
	腐蚀	利用高压水枪将管道冲洗干净，对腐蚀严重部分采用喷涂或点状原位固化法进行修复
	错口	1、管径小于 400 mm 时，采用多功能机器人进入管道内进行打磨或局部开挖 2、管径大于 400 mm 时，采用施工人员进入管道内进行打磨相关障碍物
	脱节	采用点状原位固化法
	支管暗接	1、管径小于 400 mm 时，采用多功能切割机器人切割 2、管径大于 400 mm 时，施工人员利用切割机或马刀锯切割
	异物穿入	直接进行局部开挖，改变异物的路线
	渗漏	1、渗水量小或水压力低时，利用喷涂或堵漏王堵漏； 2、渗水严重或水压大时，用专用注浆材料或点状原位固化法
功能性缺陷	沉积/结垢	利用高压水枪进行管道冲洗
	障碍物	1、管径小于 400 mm 时，利用特殊高压水喷头进行处理 2、管径大于 400 mm 时，利用人工清除
	残墙	进行人工拆除
	树根	1、管径小于 400 mm 时，利用多功能树根切割机机器人切除 2、管径大于 400 mm 时，利用人工配合马刀锯(切割机)切除
管道变径		针对同一条管道内存在两种管径时，为了满足修复前后过流能力的设计要求，将小管径管道置换成大管径，确保修复管道的连贯性，降低施工风险

表 6 内衬管褶皱及评估

Tab. 6 Lining pipe fold and evaluation

序号	褶皱类型	原因分析	评估
1	侧面褶皱	1、原管道偏移和横截面偏差；2、内衬管直径大于原管道；3、气压不足导致材料无法舒展	弹性模量减弱、局部固化缺陷(厚度不均)
2	底部褶皱	1、原管道偏移和横截面偏差；2、内衬管直径大于原管道；3、气压不足导致内衬管无法完全撑开；4、原管道内部出现二次渗漏	
3	复合层分(未)离褶皱	1、原管道偏移和横截面偏差；2、内衬管直径大于原管道	
4	复合层表层褶皱	1、内衬管材料存在褶皱；2、拉入内衬管过程受限；3、拉入内衬管过程中，整体受力不均，导致内层延伸	弹性模量减弱、局部固化缺陷
5	复合层内部褶皱	1、拉入内衬管过程，整体受力不均；2、原管道偏移(弯曲)；3、内衬管整体未完全拉直，存在折叠	弹性模量减弱、固化缺陷(厚度不均)
6	横向褶皱	1、拉入内衬管过程中，整体受力不均；2、原管道偏移和横截面存在偏差；3、内衬管整体未完全拉直，存在折叠部分	
7	形状褶皱	1、原管道内壁预处理不合格(凹凸不平)；2、固化过程中压力降低导致上部内衬管下塌	弹性模量减弱、局部固化缺陷及管道静态值参数有偏差

7 施工过程质量控制

7.1 施工方案制定

根据设计单位或甲方提供项目资料，结合现场踏勘，确定管径大小、长度、管道材质、检查井井深及宽度，同时，掌握施工现场具体环境。技术负责人根据相关资料编制可实施专项施工方案；进场前，需对

项目进场相关人员进行技术交底和施工作业安全培训。

7.2 固化内衬管材料

严格管控施工材料的进场检验与验收工作，内衬管外包装无缺损，防紫外光外膜和透紫外光的内膜无破损，复合层(玻璃纤维织物)浸渍均匀、无白





表 7 相关缺陷分析及预防措施

Tab. 7 Relevant defect analysis and preventive measures

序号	缺陷类型	缺陷分析	预防措施
1	内衬管提前固化	储存或运输过程中的温度不满足要求,受强光照射,防紫外光膜破损	严格按照材料说明书进行储存、运输及使用
2	内衬管与原管道不紧密贴合	1、尺寸设计不合理;2、固化过程中气压偏低;3、原管道预处理不满足要求	1、内衬管尺寸设计合理;2、固化过程中确保气压使内衬管充分撑开,且与原管道内壁紧密贴合;3、缺陷预处理满足相关标准要求
3	固化内衬管强度不达标	1、树脂浸润不密实;2、局部渗漏冲刷导致树脂流失;3、固化反应不彻底	1、严控树脂浸润工艺;2、提高原管道预处理质量;3、确保光照度、温度和速度,并保持足够长的固化反应时间
4	固化内衬管存在软弱带	1、树脂量太少;2、固化时温度低	严控树脂浸润工艺和现场施工工艺
5	鼓包	1、预处理存在凸起、渗漏;2、固化过程气压偏低	1、满足固化气压要求;2、保证缺陷预处理质量
6	起泡	施工过程中固化温度过高	严控固化温度和紫外灯架的移动速率
7	固化内衬管表面褶皱	1、内衬管尺寸设计不合理;气压太低;3、缺陷预处理不满足要求	1、内衬管尺寸设计合理;2、保证气压充足;3、缺陷预处理满足相关标准要求

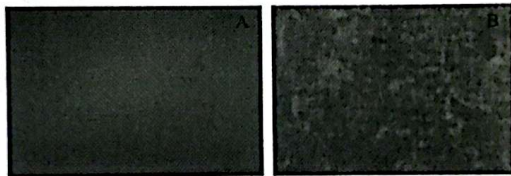


图 5 浸水前内衬管表现形貌(A)及浸水后内衬管表现形貌(B)
Fig. 5 the surface morphology of the inner liner before and after soaking (A) and (B)

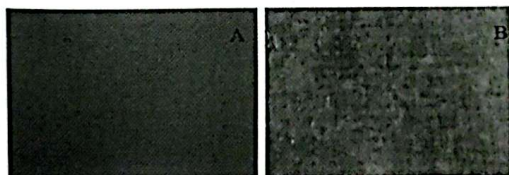


图 6 浸水前内衬管固化后表现形貌(A)及浸水后内衬管固化后表现形貌(B)
Fig. 6 Appearance of inner liner after curing before immersion (A) and appearance of inner liner after curing after immersion (B)

斑、无固化等现象;产品质量合格证、使用说明书及产品质量检测报告齐全,相关技术数据满足相关标准规定要求。

7.3 缺陷预处理

采用高压冲清淤车对原管道进行清淤冲洗,针对管道内产生的淤泥采用配备污水净化装置进行固液分离,液体排回原管道,固态淤泥运至污泥站进行处理。通过 CCTV 设备对清淤后原管道进行检测,针对原管道出现树根、变径、塌陷、错口等缺陷影响正

常施工时,按第 5 节对应的缺陷预处理措施进行预处理;预处理效果满足 CJJ/T 210-2014 第 6.2 节原管道预处理的有关标准要求。

7.4 内衬管拉入原管道

拉入内衬软管前,为了防止内衬管外膜被磨破,必须在原管道底部铺设保护膜,覆盖面积大于原管道周长的 1/3,且固定于原管道两端。在送料井口安装好传输设备,接收井口安装好卷扬机,将提前拉入原管道的牵引绳分别与卷扬机钢丝和传输设备上捆扎好的内衬管进行连接。在内衬管拉入原管道过程中,工作人员利用对讲机进行配合,控制好牵引力及牵引速度,确保内衬管在保护膜覆盖面内匀速运行,防止内衬管外膜被磨损和戳破,牵引速度低于 5 m/min,不同管径内衬管可承受最大牵引力 \geq DN400、DN500、DN600 分别为 57 kN、106 kN、125 kN。

拉入内衬管两端伸出原管道端口长度应满足 \geq 原管径小于 500 mm 时,内衬管两端伸出原管道端口大于 0.6 m;原管径大于 500 mm 时,内衬管两端伸出原管道端口大于 1 m。软管使用说明书要求。

7.5 内衬管安装

检修井处的内衬管两端必须套上安全扎头,用 3 条绑带固定,防止充气加压过程中安全扎头滑出;裸露于原管道外的、中间检查井、暗井等位置内衬管用扎头布包裹保护;若两端检查井有流水,仅在外膜处切一小口;中间检查井位置,在外膜处切 5~10 cm 小口。





7.6 气压控制

拉入紫外光灯架前,必须检查紫外光灯架,确保紫外灯正常工作、灯脚干净,没有~~其他杂质等~~。将安装好安全扎头布内衬管一端竖起,用绑带把空气锁固定于安全扎头,在空气锁接近安全扎头位置开 10 cm 小口,空气锁另一端扎紧。充气前应检查内衬管各连接处的密封性,以及金属扎头所有螺母和橡胶密封,内衬管末端安装调压阀;缓慢加压待内衬管和空气锁完全撑起,打开~~送大端~~缓慢将灯架送入空气锁,待灯架完全送入空气锁,及时将空气锁送入端扎紧;继续充气,通过~~CCTV 观察内衬管内部情况~~待内衬管材料完全撑开,通过空气锁小口将灯架送入内衬管;待灯架完全送入内衬管后,将盖板封住。撤离~~井~~井下施工人员,继续充气加压,不同管径内衬管操作压力、充气次数、每次增压量、保压时间及充气时间,见表 8 所示,通过摄像头观察内衬管内部情况,保证内衬管充分展开与原管道内壁紧密贴合。

表 8 不同管径气压参数

Tab. 8 Air pressure parameters of different pipe diameters

管径/mm	操作压力 /bar	充气次数	每次增压 /mbar	保压时间 /min	充气时间 /min
150~200	0.55~0.65	8~10	40~60	5	25~40
250~300	0.45~0.55				
400~500	0.40~0.50				
600~700	0.30~0.40	10~12	30	6	40~60
800~900	0.25~0.35				
1 000~1 600	0.20~0.30	6~8	30	9	45~90

充气及保压时间,根据内衬管材料温度、厚度以及原管道形状来确定。环境温度偏低、材料壁厚较厚及异形管道时,要适当延长保压时间。气压不足会导致内衬管未完全展开,弹性模量及管道过流能力降低;~~同时影响紫外光灯架的正常运行,可能造成内衬管破裂,针对原管道出现错位、脱节、破洞等严重缺陷,气压过高,可能导致内衬管爆裂,扎头布崩开,安全扎头盖板飞出;此外,加压过程中必须匀速加压,防止内衬管材料无法均匀伸展开而出现褶皱。~~

7.7 UV 固化过程控制

紫外光固化前,内衬管内部气压达操作压力后保压 10 min,经施工人员将紫外线灯架缓慢拉到原管道另一端,该过程须进行~~闭路电视 CCTV 检测,确保紫外光灯架顺利拉到起始固化位置~~。通过紫外

灯架前、后摄像头,在线观察内衬管内部充气情况,若出现缺陷问题(如褶皱、固化质量缺陷)及时采取补救措施。

在整个固化阶段,开启紫外灯且达到规定禁止时间,灯链起始固化巡航速度设置为 0.15 m/min,每间隔 1 min 提速 0.10 m 直至规定固化巡航速度;~~相/不同管径下,不同厚度对应不同的固化巡航速度~~针对特殊内衬管(如变径),必须使用原厚度增加 1 mm 所对应的固化巡航速度。紫外光固化过程中,气压保持相对恒定,且满足内衬管与原管道紧密贴合,温度传感器 $T_2 \geq 80\text{ }^\circ\text{C}$, $100\text{ }^\circ\text{C} \leq T_3 \leq 140\text{ }^\circ\text{C}$; 压力参数值与厂家提供参数表(管径/壁厚/压力)为准。

UV 设备自动记录:压力、固化巡航速度、米数及温度相关参数,且相关操作参数值必须符合厂家操作指南手册中的规定参数,最后保存原始记录数据并提交监理。

内衬管固化完成后,气压缓慢降至大气压,降压速度 $\leq 0.01\text{ MPa/min}$ 。最后进行修复端头切割和密封处理。

8 工程造价分析

本工程造价分析是以 CQPWDE-2021 定额和 CQFYDE-2018 定额为参考标准,对管道修复费用进行核算,如表 9 所示。

表 9 紫外光固化管道修复费用

Tab. 9 Repair cost of UV curing pipeline

序号	项目名称	单位	综合单价
1	管道检测	CCTV	元/m 18.5
2	管道清理疏通	井内抽水	元/台班 336.6
		人工掏挖检查井、淤泥装袋、淤泥输	元/m ³ 341.0
		机械清淤、结垢清除、树根清除	元/m 564.8
3	管道预处理	气囊管堵安装拆除	元/处 1 058.4
		注浆、塌陷处理	元/m ³ 28 924.0
		管道内衬钢套	元/m ² 2 138.4
		裂缝堵漏	元/m 841.1
4	管道修复	材料、机械、作业车等	元/m 3 966.2

经计算得出,该工程造价约为 6 578.5 元/m。

9 工程验收

9.1 外观形貌及性能检测

修复完成后,采用 CCTV 设备对修复后的管道





进行内窥检测,内衬管内壁光滑无鼓包、褶皱、无明显划伤、渗水。修复前后管道内壁形貌如图 7 所示。

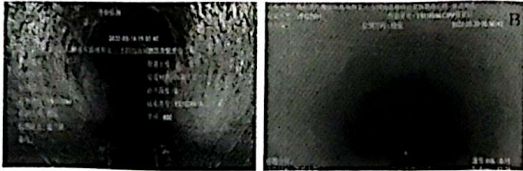


图 7 修复前管道内壁形貌(A)及修复后管道内壁形貌(B)

Fig. 7 Appearance of inner wall of pipeline before repair (A) and after repairment (B)

紫外光固化内衬管力学性能检测,按标准 GB/T 1040.4-2006、GB/T 1449-2005 及 T/CECS 599-2018 标准进行检测,并委托具备检测资质的机构进行试样检测,结果如表 10 所示。

表 10 紫外光固化内衬管检测结果

Tab. 10 Test results of UV-curable inner liner

序号	检测项目	技术指标	检测结果	检测标准
1	抗拉强度 /MPa	>62	137	GB/T 1449-2005
2	弯曲强度 /MPa	>45	255	GB/T 1040.4-2006
3	短期弯曲弹性模量 /MPa	>6 500	12 574	
4	管壁密实性	每个样本的三个检测点上,均未出现渗水	每个样本的三个检测点上,均未出现渗水	T/CECS 599-2018

由表 10 可知,初始固化内衬管弯曲强度为 255 MPa,抗拉强度为 137 MPa,弯曲模量为 12 574 MPa,管壁密实性为每个样本的三个检测点上,均未出现渗水,检测指标满足对应考核指标要求,满足验收标准。

9.2 修复后管道过流能力

管道修复完成后,原管道内壁粗糙系数 n_0 为 0.013;固化内衬管内壁粗糙系数 n_1 为 0.010; D_1 为 564 mm; D_E 为 597 mm。经公式(4)得修复前、后过流能力比为 111.7 % 大于 100%,满足工程验收标准。

10 结语

CIPP 紫外光固化修复工艺施工便捷,自动化程度高、全程可视化控制、施工流程简单、效率高、施工风险低、紧密贴合、耐腐蚀性强、强度高、抗冲刷能力强、可用于多截面,多材质、复杂病害管道的修复,是

目前非开挖行业最具发展前景的一种地下管道非开挖修复技术。本文通过对不同地下水位的内衬管壁厚及过流能力的计算,确保修复后内衬管壁厚和过流能力满足原管道的设计要求;对修复管道缺陷分析及预防措施、施工方案制定、内衬管材料质量控制、缺陷预处理、内衬管安装、气压控制、UV 固化等过程控制,确保工程质量。经测试,各项检测指标均符合验收要求,该修复技术满足本项目要求。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 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.
- [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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李扬, 周春利, 冯春苗, 等. 紫外光固化卷材涂料的研究进展 [J]. 涂层与防护, 2021, 42(12): 43-47.
- [8] 张伟杰, 唐晓旭, 李岩, 等. 紫外光固化非开挖管道修复技术研究进展 [J]. 市政技术, 2022, 40(6): 108-114, 125.
- [9] 赵雅宏, 曾正, 马保松. 《给排水管道原位固化法修复工程技术规程》关键技术 [J]. 特种结构, 2019, 36(1): 108-112.
- [10] LANZO. Engineering design guide for rehabilitation with Cured-In-Place Pipe Second Edition [M]. LANZO, 2010.
- [11] T/CUWA 60052-2021 城镇排水管道原位固化修复用内衬软管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [12] CJJ/T 244-2016 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [13] 张欣. 排水管非开挖原位固化法管道修复系统材料质量控制 [J]. 净水技术, 2020, 39(s1): 246-251.

○ 通信作者: 曹井国, 男, 1980 年出生, 山东济南人, 博士, 副教授。主要研究方向为水污染防治技术、管道修复材料。

通信处: 300457 天津市滨海新区天津科技大学泰达校区

E-mail: cjjg@tust.edu.cn

收稿日期: 2023-04-04

