

紫外光固化技术在大管径排水管道修复中的应用

王凯，唐彪，李放，伍波，张科委
(中交一航局生态工程有限公司)

摘 要：为解决市政排水管网由于年久失修或外力作用导致管道结构性缺陷又不适宜开挖修复管道的施工难题，引进紫外光原位固化技术进行排水管道原位固化修复。文章以深圳光明区公常路南居民区 D₁1 600 雨水干管隐患点修复为例，介绍了紫外光固化技术的原理、特点和软管厚度设计，总结了该技术在 大管径排水管道修复中的施工工艺流程、操作要点和注意事项。经检测，修复后的管道各项性能指标均达到验收标准，该技术在 大管径排水管道半结构性修复中的成功应用可为类似工程提供参考。

关键词：非开挖管道修复；大管径；紫外光固化法；排水管道

0 引言

对于市政排水管网缺陷的修复，目前主要分为开挖修复和非开挖修复。开挖修复方法工期长、造价高、环境影响大、恢复费用高，城市建设的部分区域已禁止使用。而非开挖修复是在不开挖或微开挖的情况下，利用原有检查井，对管道缺陷进行修复和更新，具有综合成本低、施工周期短、不影响交通、环境影响小等优势，已成为国内管道修复领域发展的主要方向^[1]。紫外光固化修复作为一种典型的非开挖修复技术，具有适用范围广、施工速度快、修复效果好等特点，已成为我国中小管径排水管道原位修复的主流技术之一^[2]，但在 DN1500 以上的大管径排水管道修复中还较少应用。文章通过深圳光明区公常路南居民区雨水干管隐患点修复工程，对紫外光原位固化技术在 大管径排水管道修复中的应用进行了详细介绍，可为类似工程提供参考。

1 项目概况

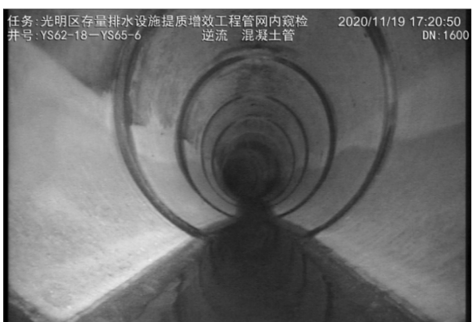
公常路南居民区雨水干管隐患点修复工程位于深圳市光明区新湖街道公常路南侧，待修复管道为雨水重力流钢筋混凝土管（RCP II 1 600 mm × 180 mm × 2 500 mm），总长度 221.82 m，管道埋深 2.85~3.10 m。勘察期间，地下水位埋深 0.5 m。管道基础信息和缺陷情况统计见表 1。CCTV 管道检测结果表明，待修复管段每个接口都存在渗漏，水持续从缺陷点滴出，沿管壁流动，属于一级结构性缺陷。部分管道缺陷情况见图 1。为防止地下水沿管道接口持续渗漏导致管道周边形成空洞致使地面塌陷，需及时对该管段采取修复措施。该路段靠近居民区，有临街商铺，支路汇入多，车流量及人流量很大，且实行道路绿化提升工程不久，结合管道缺陷等级和类型，尽可能减少对交通及环境的影响，采用紫外光原位固化修复技术对全部待修复管道进行半结构性修复。

表 1 管道基础信息和缺陷情况统计表

序号	管段编号	管内径/mm	管段长度/m	埋深/m	距离/m	缺陷长度/m	缺陷名称	缺陷等级	修复长度/m
1	YS60—YS57	1 600	23.52	2.95~3.05	0.60~23.52	22.92	渗漏	1	23.52
2	YS62—YS60	1 600	43.78	2.95~2.95	24.43~43.78	19.35	渗漏	1	43.78
3	YS62—YS65	1 600	41.79	2.95~3.00	0.60~41.79	41.19	渗漏	1	41.79
4	YS65—YS66	1 600	37.42	3.00~2.90	0.60~37.42	36.82	渗漏	1	37.42
5	YS68—YS66	1 600	16.37	2.85~2.90	0.60~16.37	15.77	渗漏	1	16.37
6	YS70—YS68	1 600	22.30	3.10~2.90	0.60~22.30	21.70	渗漏	1	22.30
7	YS70—YS72	1 600	36.64	3.10~2.90	0.60~36.64	36.04	渗漏	1	36.64



(a) 公常路 YS66-1—YS57-5 管道修复前



(b) 公常路 YS62-18—YS65-6 管道修复前

图 1 部分管段缺陷情况

2 紫外光固化技术和修复设计

2.1 技术原理

紫外光固化技术(CIPP of UV curing)是将一种浸透光固化树脂的多层玻璃纤维布软管拉入待修复的管段中,通过向软管内充气使其紧贴原管道内壁后,将紫外光固化小车放入充气软管内并控制小车以一定速度行走,利用软管内树脂遇紫外线照射固化的特性,形成一层坚硬的“管中管”结构,从而恢复管道功能的修复技术^[1,3-4]。

2.2 技术特点

1) 适用范围广。可用于钢筋混凝土、HDPE、铸铁等多种材质的给排水管道修复,可修复的管道结构性缺陷包括渗漏、腐蚀、破裂、错口、脱节等。

2) 工期短。树脂固化速度快,施工时间短,管道修复后即可投入使用。

3) 对周边环境影响小。整套设备为一体化施工车辆,对场地大小要求不高,不产生工艺废水,施工时噪音低,对交通和环境影响小。

4) 内衬管经久耐用。软管硬化后形成的内衬与原管道内壁紧密贴合,具有强度高、韧性好、耐腐蚀性强等特点,内衬内表面光滑,降低摩擦系数,过流面积损失小,过流能力损失小或有

提高^[3,5]。

2.3 内衬管壁厚设计和过流能力计算

由于现状管道结构完整,能够承受外部土压力和动荷载,紫外光原位固化内衬管仅承受外部静水压力,因此按照半结构性修复来进行壁厚计算^[1]。根据 CJJ/T 210—2014《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》,半结构性内衬管壁厚计算见式(1)~式(3)。

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

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

$$q = 100 \times \frac{(D_E - D_{\min})}{D_E} \text{ 或 } q = 100 \times \frac{(D_{\max} - D_E)}{D_E} \quad (3)$$

式中: t 为内衬管壁厚, mm; D_0 为内衬管管道外径, mm; K 为圆周支持率, 宜取 7.0; E_L 为内衬管的长期弹性模量, MPa, 宜取短期模量的 50%; C 为椭圆度折减系数; P 为内衬管管顶地下水压力, MPa; N 为安全系数, 取 2.0; μ 为 CIPP 内衬管的泊松比, 取 0.3; q 为原有管道的椭圆度, %; D_E 为原有管道的平均内径, mm; D_{\min} 为原有管道的最小内径, mm; D_{\max} 为原有管道的最大内径, mm。

本工程中各参数取值, $D_0 = 1\,600$ mm, E_L 取值 9 086.16 MPa, $q = 2\%$, $C = 0.998$, P 根据地下水位距离管顶的高度计算, 取值 0.01 MPa, 计算 $t = 8.33$ mm。结合现场环境和以往施工经验, 本工程选取管壁厚为 12 mm 的内衬修复材料。

修复后管道的过流能力与修复前管道的过流能力的比值按式(4)计算:

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

式中: B 为管道修复前后过流能力比; n_e 为原有管道的粗糙系数; n_i 为内衬管的粗糙系数; D_i 为内衬管管道内径, m。

本工程中各参数取值, $n_e = 0.013$, $n_i = 0.010$, $D_i = 1.576$ m, $D_E = 1.600$ m, 计算 $B = 124.86\%$ 。由于修复后内衬管臂较为光滑, 降低粗糙系数, 使过流能力提高 24.86%。

3 施工工艺技术

3.1 工艺流程

紫外光固化技术修复工艺流程为:施工准备→现场踏勘→临时封堵和调水→管道高压清洗→CCTV检测→紫外光固化法内衬修复→CCTV复合检测验收→拆除封堵→场地清理。

3.2 现场踏勘

根据现场踏勘,待修复管道检查井分布于路侧缘石两侧,路面或机非绿化隔离带,检查井筒直径为1 000 mm。受 $D_0=1\ 600$ 光固化材料尺寸的限制,需破除个别井口,加宽井室宽度以便下料。根据现场情况,拟破除井分别为YS62、YS68,破除尺寸2 000 mm×2 000 mm。紫外光固化施工分为4段:YS62—YS65管段、YS68—YS65管段、YS62—YS57管段、YS68—YS72管段,施工前在上游安装安全保护气囊1只。

3.3 管道封堵和调水

施工正值雨季,需将待修复管道进行封堵,本工程设置1 m厚砖墙封堵,一面位于Y74井上游方向,一面位于Y57下游方向。由于为雨水干管,在Y74井上游砖墙预留2个 $D_0=500$ 导流管,平时采用气囊封堵,大雨或暴雨天打开气囊进行雨水导流。结合公常路管网现状,施工时将封堵墙导流管进行气囊封堵,将封堵墙上游积水倒排至附近污水井。对于水量较大的时刻,就近管道负荷不起水量时,采用液压泵进行调水至下游管道。

3.3 管道高压清洗

用装载着水泵和水箱等特殊设备的高压清洗车冲洗待修复管段。清扫时由水箱和高压水泵向胶管和喷头供水,用高压喷刷洗净管段,确保清洁度满足施工要求,用强力吸泥车将管渠内堆积的泥沙从检查井中取出。

3.4 紫外光原位固化

本工程紫外光固化技术采用道雨耐D919 UV CIPP光固化一体设备,具体操作步骤如下。

1) 垫膜铺设

用CCTV小车引入编织绳,绳头与垫膜接扣打牢,拉软管材料绳子置于垫膜上部,随垫膜一同拉入管道,并确保不缠绕在一起。垫膜应覆盖大于1/3的管道周长,在原管道两端进行固定,亦可在对面管口用气囊固定。

2) 材料拉入

将材料头打包,在卷扬机牵引下,将折叠整

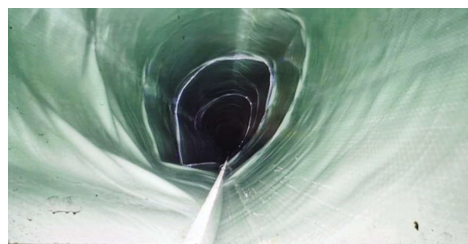
齐的软管平稳、缓慢地拉入原管道,拉入速度不得大于5 m/min,拉力不得大于500 kN。软管两端端口伸出原管道的长度不应小于1 000 mm,以保证固化后切口完整。

3) 一次充气

裁剪出料口软管材料头,将拉灯绳穿过扎头,与软管内预留绳系紧,安装扎头。在扎头与原管端之间的中间检查井处,用扎头布绑扎牢固,防止软管破裂。出料口扎头、扎头布安装完毕后,在进料口将充气管插入软管内膜内,用材料包裹好气管防止漏气,进行第1次充气,待软管充分扩张后,将拉灯绳拉出地面,停止充气。充气压力应缓慢升高,使软管充分膨胀紧贴原有管道内壁,压力值根据压力表标准结合现场情况设定。

4) 拉入紫外灯及二次充气

紫外光灯和摄像头测试正常后,向软管内充气,待软管充分膨胀紧贴原有管道内壁,将组装好的2节1 500 W灯架送入软管腔内,停止充气。扎头安装完毕后,进行第2次充气,待软管紧贴原有管道内壁后(见图2),复核两端扎头有无漏气情况,如有则应停气重新扎头。检查确认后,根据压力表标准结合现场情况缓慢加压,软管与原有管道内壁紧贴,直到基本无褶皱,压力稳定后,将控制台的电缆计数器清零,即可放线拉灯,直至紫外光灯到达另一端为止。



(a) 开始阶段



(b) 保压阶段

图2 第2次充气

5) 紫外光固化

依次开启两节灯架,灯架的固化速度在起始

端的 2.0 m 内控制在预设速度的一半, 然后升至预设速度, 到终点端前 2.0 m 时再降低到预设速度的一半至终点。在固化起始端和终点端必须根据管径和扎头大小停留 10~15 min。固化过程中软管内应保持气压稳定, 使软管与原有管道紧密接触。固化过程参数见表 2。

表 2 紫外光固化过程控制参数表

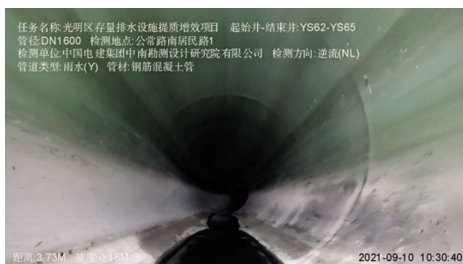
施工过程	控制参数	指标值
软管扩张	扩充压力	0.009 MPa
软管固化	紫外光灯架行驶速度	0.15 m/min
软管固化	管内温度	85~95 ℃
软管固化	内衬管内压力	0.015 MPa

6) 端头处理

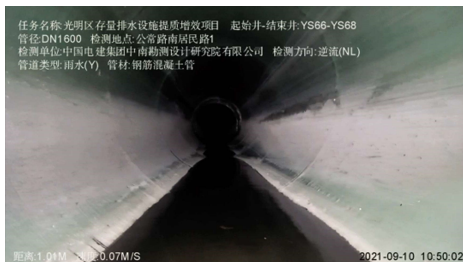
固化完成后, 缓慢降低管内压力至大气压, 拆除扎头, 将灯架取出。两端头均用拉灯绳系紧内膜防止内膜断裂, 拉出内膜。将内衬管端切割平整, 作水密性封堵, 并取样送检。

4 修复效果评估

对修复后的管道进行外观验收和功能性验收, 外观验收通过 CCTV 检测, 功能性验收主要为样品检测。样品检测的主控项目包括: 平均厚度、弯曲强度、弯曲弹性模量和抗拉强度、密实性测试。CCTV 检测表明修复后的管道无明显褶皱、气泡、干斑和渗漏水现象, 内衬管表面光洁, 无局部孔洞、贯穿性裂纹和软弱带, 内衬管与原管道贴附紧密, 满足行业标准要求^[3,6]。管道修复后效果见图 3。



(a) 公常路 YS62—YS65 管道



(b) 公常路 YS66—YS68 管道

图 3 管道修复后 CCTV 检测

检测机构对送检样品的检测结果见表 3, 均满足国家标准^[7-9]和设计要求。通过过流能力比值计算公式(4), 计算 $B = 124.75\%$, 修复后实际过流能力提高 24.75%。

表 3 UV CIPP 内衬管功能性检测结果

检测项目	技术指标	检测结果	检测方法(规范)
总厚度/mm	设计要求	12.26	GB/T 8806—2008
弯曲强度/MPa	>45	377.81	GB/T 1449—2005
弯曲模量/MPa	>6 500	18 183.84	
抗拉强度/MPa	>62	205	GB/T 1040.4—2006

5 施工注意事项

1) 一般应选择在夜间下料施工。大管径紫外光固化施工, 由于湿软管重量和体积均较大, 需投入更多的人力、设备进行施工, 操作笨重缓慢。软管拉入管道之前, 暴露时间较长。为减少对地面交通环境的影响和避免软管暴露时间过长影响质量, 宜在夜间进行紫外光固化前的施工。

2) 选用尺寸合适的扎头。大管径软管由于重量过大, 井内空间狭小, 需要多名工作人员配合才能将扎头绑扎牢固。因此实际施工过程中, 应根据现场情况选择合适尺寸的扎头, 既利于施工, 又确保扎头绑扎牢固不漏气。本项目采用 $D_0 = 1\ 600$ 管道, 通过破除井口, 选用直径 1 000 mm 的扎头, 有效保证了扎头绑扎质量。

3) 定制导向滑轮。大管径施工时拉材料牵引力大, 根据以往经验随车自带的导向轮会因为强度不足而出现弯折, 因此需在井口安装定制的材料导向滑轮, 进料口固定在井口中间位置, 出料口尽量远离管口, 为拉出的材料头留足空间。

4) 施工中确保内膜不被损坏。软管材料的内层是一层塑料薄膜, 具有透光、耐温、防渗等特点。内膜在施工中若操作不当很容易被损坏, 一旦被刮破, 该段材料将面临报废的风险。因此需要从下料、拖拉、绑扎头、下灯、拉灯等各个环节严格把控, 确保内膜不被尖锐毛刺、硬物或强力损坏。

6 结语

深圳市光明区公常路南居民区 $D_0 = 1\ 600$ 雨水干管在采用紫外光固化技术进行非开挖修复过程中, 根据管道的缺陷情况、管径、周边施工条件, 进行管道预处理, 合理设计内衬管壁厚和严

(下转第 70 页)