

城市排水管道非开挖修复工艺

崔增光

(中交一航局第三工程有限公司)

摘 要: 为有效解决城市排水管道常规修复工艺对环境影响大、修复成本高、施工周期长等问题,以监利市长江大保护生态环境综合治理一期 PPP 项目为例,以点状原位固化法、热塑成型法、紫外光原位固化法、不锈钢快速锁法等非开挖修复技术为研究主题,研讨不同非开挖修复技术的工艺原理及适用范围,并对修复材料的壁厚、修复后水力性能、施工时的拖拉力等参数指标进行设计计算,同时明确了关键工序步骤,验证了非开挖修复技术在城市排水管道修复施工中的可行性与适用性。非开挖修复技术在城市排水管道修复中具有明显优势,施工前需根据管道具体状况选择合适的修复技术及修复参数,并加强技术创新和质量监管,以推动其更广泛和高效的应用。

关键词: 排水管道;非开挖修复;点状原位固化法;热塑成型法;紫外光原位固化法;不锈钢快速锁法

0 引言

随着城市排水管道使用年限的增加,排水管道面临着腐蚀、破裂、变形等问题。传统的开挖修复方法往往会带来一系列负面效应,包括交通堵塞、破坏周边环境、工期较长以及成本高昂等。近年来,非开挖修复工艺技术在城市排水管道修复领域逐渐崭露头角。国内外相关研究不断涌现,涵盖了原位固化法、热塑成型法等多种非开挖修复技术,在减少对城市环境和交通影响的同时,为排水管道的修复提供了更高效的途径。然而,目前的研究仍存在对不同工况适应性分析不足、修复效果评估欠缺等问题。

在此背景下,本文借助于既有的研究成果,针对特定病害类型设计修复方案,为提高城市排水系统的可靠性和稳定性提供参考。

1 工程概况

监利市长江大保护生态环境综合治理一期 PPP 项目位于监利市主城区,共计有 10 条市政道路下的排水管道因为年代久远、管道病害严重而需要进行修复。管道修复总里程约为 14 km,管径范围为 DN300~DN600,管道埋深范围为 2.0~5.0 m,管道材质均为 HDPE 双壁缠绕管。涉及到的管道病害类型包括裂缝、变形、渗漏、堵塞、脱节、破裂以及树根侵入等,具体为二级缺陷 257 处(其中破裂 105 处,脱节 79 处,渗漏 57 处,异物穿入 16 处),三级缺陷 146 处(其中破裂 57 处,脱节 48 处,渗漏 32 处,异物穿入 9 处),

四级缺陷 38 处(其中障碍物堵塞 16 处,破裂 5 处,脱节 11 处,变形 6 处),范围内现状污水管道淤塞较为严重,普遍达管径的 1/3,导致其不能发挥正常排水能力。主要修复工艺及工程量为点状原位固化法修复 174 处,不锈钢快速锁法修复 208 环,热塑成型法修复 1595 m,紫外光原位固化法修复 880 m。

2 工艺原理及适用范围

2.1 点状原位固化法

点状原位固化法的应用范围为 DN200~DN1500 的混凝土管道、钢筋混凝土管道、钢管及各种塑料排水管道,主要应对管道局部破裂、裂缝、渗漏、腐蚀、接口错位等结构功能缺陷。其工艺原理是采用气囊扩张法将浸渍固化性树脂的玻璃纤维织物紧贴在管道修复位置,通过常温固化后,形成局部短管内衬^[1],从而达到修复管道的目的。

2.2 热塑成型法

热塑成型法的应用范围为 DN100~DN1200 的管道,适用于破裂面积广、接头错口复杂、脱节数量多、变形程度小但范围大的整体管道修复。其工艺技术原理是利用热塑性衬管的记忆应力恢复特性,通过在截面方向将管材压成 U 形缩减外径,然后拉入待修复管道中,再借助蒸汽和压力使其复原膨胀,达到紧密贴合的修复效果。具体来说,衬管在常温下是硬质的,在高温环境(80~100℃)中会发生软化,恢复常温后再度硬化。针

对这一特性,将热塑管在软化的时候拖入待修复管道中,充入高温气体使其软化,高温气体升到一定压力使其紧密贴合待修复管道,再充入常温气体使其硬化,硬化后的热塑管紧密贴合在待修复管道中,形成一条新的整管,达到修复缺陷的目的。

2.3 紫外光原位固化法

紫外光原位固化法的应用范围为 DN150~DN1800 的排水管道整管修复,主要应对管道破裂、错口、脱节、渗漏等结构功能缺陷。紫外光原位固化法工艺原理是利用紫外光照射,将拉入原有管道内的浸润树脂软管固化,形成管道内衬管,从而实现对管道的非开挖修复。具体来说,该方法是将玻璃纤维编制成软管,浸渍光固化树脂,然后将其拉入原有管道内,充气扩张紧贴原有管道,以原有管道为外模,软管内膜为内模,在紫外光的作用下使树脂固化,形成具有一定强度的复合内衬管^[2]。

2.4 不锈钢快速锁法

不锈钢快速锁法的应用范围为 DN300~DN1800 的排水管道的局部修复,主要应对轻型塌陷、渗漏等,不适用于管道变形和接头错位严重情况的修复。其工艺原理是通过紧固工具将外包橡胶套的刚套筒紧固在管道内壁上,从而达到修复效果。

3 修复方案设计

3.1 内衬管壁厚

点状原位固化法、热塑成型法、紫外光原位固化法可应用于管道半结构性修复和结构性修复。在进行管道半结构性修复时,内衬管最小壁厚可按下列公式计算:

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

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, 取 7.0; E_L 为内衬管的长期弹性模量, MPa, 点状原位固化法取 1 750 MPa, 热塑成型法取 1 600 MPa, 紫外光原位固化法取 4 000 MPa; C 为椭圆度折减系数, 取 0.84; P 为内衬管管顶地下水压力, MPa, 取 0.02 MPa; N 为安全系数, 取 2.0; μ 为泊松比, 取 0.3。

当对管道进行结构性修复时,内衬管最小壁厚应符合下列公式规定:

$$t = 0.721 D_0 \left[\frac{(N \times q_L)^2}{E_L R_w B' E_s'} \right]^{\frac{1}{3}}$$

式中: q_L 为管道总的外部压力, MPa, 取 0.105 MPa; R_w 为水浮力系数, 取 0.67; B' 为弹性支撑系数, 取 0.42; E_s' 为管侧土综合变形模量, MPa, 取 3 MPa。

按照不同管径的规格,将计算参数代入到相关公式,从而可以计算出不同工况下内衬管的最小壁厚指标,内衬管最小壁厚和设计厚度如表 1 所示。

表 1 内衬管最小壁厚和设计厚度

工艺	管径	mm			
		半结构性修复		结构性修复	
		最小厚度	设计厚度	最小厚度	设计厚度
点状原位固化法	DN400	4.8	6.0	8.5	9
	DN500	6.1	7.0	10.6	11
	DN600	7.2	8.0	12.7	13
热塑成型法	DN400	5.0	6.0	8.7	9
	DN500	6.2	7.0	10.9	12
	DN600	7.5	8.0	13.1	14
紫外光原位固化法	DN400	3.6	4.0	6.4	7
	DN500	4.6	5.0	8.0	9
	DN600	5.5	6.0	9.6	10

不锈钢快速锁采用 C304 号或 C316 号不锈钢套筒紧固三元乙丙橡胶套,壁厚设计参数见表 2。

表 2 不锈钢快速锁壁厚设计参数

管径	mm			橡胶套	
	不锈钢套筒			厚度	密封台高度
	钢板桩厚度	卷曲直径	扩张直径		
DN400	1.5	325	406	2	8
DN500	2.0	425	505	2	9
DN600	2.0	510	605	2.5	9

3.2 水力性能参数

整体修复后管道的过流能力与修复前的过流能力的比值按照以下公式验算:

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

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, 取 0.013; n_i 为内衬管的粗糙系数, 宜取 0.010; D_E 为原有管道内径, m; D_L 为内衬管道内径, m。

将计算参数代入相关公式,可计算出结构性及半结构性修复过流能力比值,如表 3 所示。

表 3 结构性及半结构性修复过流能力比值

工艺	修复前粗糙系数	修复后粗糙系数	修复前管径/m	半结构性修复		结构性修复	
				修复后管径/m	过流能力比值/%	修复后管径/m	过流能力比值/%
热塑成型法	0.013	0.010	0.40	0.388	120	0.382	115
	0.013	0.010	0.50	0.486	120	0.476	114
	0.013	0.010	0.60	0.584	120	0.572	114
紫外光原位固化法	0.013	0.010	0.40	0.392	123	0.386	118
	0.013	0.010	0.50	0.490	123	0.482	118
	0.013	0.010	0.60	0.588	123	0.580	118

3.3 拖拉力参数

内衬管道拖拉进入原有管道时，允许拖拉力应按下式计算：

$$F=\sigma\frac{\pi(D_0^2-D_1^2)}{6N_1}$$

式中：F 为允许拉力，kN；σ 为管材的屈服强度，MPa，热塑成型法取值为 30 MPa，紫外光原位固化法取值 80 MPa；N₁ 为安全系数，宜取 3.0。将计算参数代入相关公式，可计算出允许拖拉力限值如表 4 所示。

表 4 允许拖拉力限值表

工艺	管径	半结构性修复拖拉力/kN	结构性修复拖拉力/kN
热塑成型法	DN400	49.5	73.7
	DN500	72.3	122.6
	DN600	99.2	171.8
紫外光原位固化法	DN400	88	153
	DN500	138	246
	DN600	199	329

4 非开挖修复施工

4.1 管道预处理

施工前为确保后续施工的顺利进行，需利用堵水气囊对上、下游及支管进行有效的堵水操作，以防止水流对施工区域造成干扰，为施工创造相对稳定的环境。若在施工过程中需要人工入管作业，则可以利用砌筑的方式进行截流。当管道不能中止运行时，为了不影响正常的管道功能，可利用水泵将上游水抽出，并排放至下游检查井内。

在管道清淤环节，需配置高压水车。通过高压水枪向井段内注水，冲击管道内的淤泥，使其松动。同时，采用疏通器搅拌淤泥至稀释状态，便于后续的清理工作。清洗过程中，用泥浆泵将疏通段内的淤泥抽吸出。可以采用多功能吸淤车，将抽出的淤泥吸出并运走，确保施工现场的整洁。然后，利用 CCTV 机器人查看管道清洗情况。清淤效果应达到无影响衬入的沉积、结垢、障碍物、

尖锐突出物，且不得有积水。

4.2 点状原位固化法施工

采用高性能纤维三维预成型体的复合玻璃纤维布作为内衬毡筒，采用硅酸盐树脂和固化剂作为固化材料，将树脂和固化剂按 2:1 的比例配置好，用刮刀在玻璃纤维布上均匀刮抹。待树脂将玻璃纤维布浸透后，将浸渍树脂后的织物缠绕在修复气囊后作临时绑扎，临时绑扎采用细铁丝，绑扎在玻璃纤维布的两头，玻璃纤维布的缠绕松紧程度以自然、松弛为标准，铁丝固定以玻璃纤维布不散开为标准，见图 1。

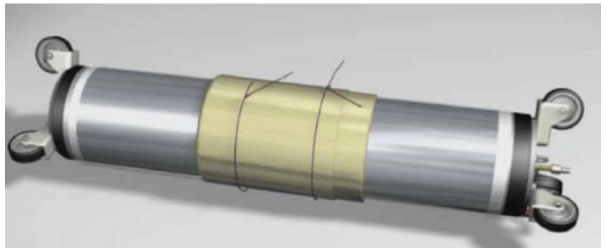


图 1 修补气囊

采用 CCTV 实施监测、辅助定位以及机器人引导的方式将修复气囊运送到待修复位置。到达指定修复位置后，向气囊充入气体，气囊膨胀后将毡筒压覆在待修复的管道上，并保持压力直至树脂完全固化。修复过程中每隔 15 min 对气囊内气压进行记录，压力应为 0.08~0.20 MPa。固化完成后缓慢释放气囊内压力，并将气囊拉出管道。

4.3 热塑成型法整修施工

利用蒸汽机车的蒸箱对衬管轮盘预加热，时间宜为 1~3 h。在预热过程中，蒸汽的温度和压力应保持在适当的范围内，温度一般为 95 ℃左右，压力一般控制在 0.1~0.5 MPa。分别在始发井和接收井各安装 1 个卷扬机，利用卷扬机将预热软化的衬管拖入待修管道，待衬管完全拖入后，继续用水蒸气对衬管进行二次加热。在衬管再次软化后，用专用塞堵将衬管的两头塞住，同时利用塞

堵的气体通道继续向衬管内输送水蒸气并加压, 压力控制在 0.15 MPa 以内, 温度控制在 95 ℃ 以内。在衬管被吹起并紧贴于管道内壁之后, 保持恒压, 通过塞堵的气体通道向衬管内部输入冷空气冷却衬管。当下游的温度表显示出通流气体温度降到 30 ℃ 以下时可以释放压力, 并将两端多余的衬管切掉, 衬管伸出待修管道的长度应大于 10 cm, 伸出部分宜呈喇叭状。

4.4 紫外光原位固化法施工

在始发井和接收井各安装 1 个卷扬机, 通过 CCTV 机器人将绳索带入需要修复的管道内, 将上下游卷扬机连通。利用卷扬机的拉绳将防护底膜拖入排水管道内, 覆盖不小于 1/3 的管道周长, 并在待修复管道口两端采用膨胀钉对底膜进行固定。然后通过导向滑轮组与卷扬机, 按照 6~8 m/min 的速度, 将玻璃纤维内衬软管拖入管道内部; 内衬管拉入管道后, 利用充气设备缓慢加压至工作压强, 每加压 0.5 MPa 时, 保持压力 3~5 min, 继续加压至额定压力后保持压力 30 min。

将紫外光灯组快速拉入管道内部, 打开紫外光灯源, 需谨慎地将紫外光灯源从始发井开始, 逐步向接收井拖动。确保拖动过程中速度均匀稳定, 行进速度保持在 45~60 cm/min, 以便让紫外光能够充分均匀地照射到需要固化的区域; 同时管内温度保持在 80~130 ℃, 如果复合管的温度小于 80 ℃, 将速度下调至 5 cm/min。施工期间密切关注拖动过程中的各种情况, 如灯源的位置是否准确、光线照射是否均匀等, 以便及时调整操作, 从而完成湿软管固化。湿软管固化完成后, 缓慢降低管内压力至大气压, 降压速度不应大于 0.01 MPa/min, 紫外光灯固化见图 2。

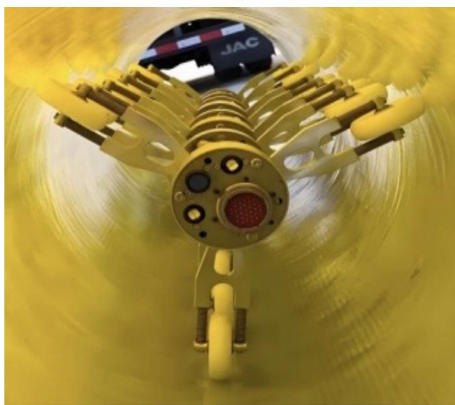


图 2 紫外光灯固化

4.5 不锈钢快速锁法施工

在地表将不锈钢套筒和橡胶套预先套好, 并检查锁紧装置是否可正常工作; 在始发井和接收井各安装 1 个卷扬机, 将快速锁固定在带轮子的专用气囊上, 然后在 CCTV 或潜望镜的辅助下将气囊牵拉至待修复位置; 在 CCTV 或潜望镜设备的监控下, 缓慢向气囊内充气, 使不锈钢快速锁缓慢扩展并紧贴原有管道内壁, 气囊压力宜控制在 0.35~0.40 MPa; 确认不锈钢快速锁完全胀开后将气囊压力卸掉并收回^[3]。

5 实施效果

从修复过程实施来看, 非开挖修复工艺极大地减少了对城市交通的干扰, 以往因开挖道路导致的交通拥堵现象大幅缓解, 保障了居民的日常出行顺畅。同时, 施工区域周边的环境也得到了有效保护, 降低了传统开挖方式带来的扬尘和噪音污染问题。

从管道修复本身来看, 采用非开挖修复工艺技术后, 排水管道的渗漏、破裂等问题得到了有效解决, 管道的过水能力明显增强, 减少了城市内涝发生的可能性, 提升了城市排水系统在雨季的应对能力。此外, 该技术还在一定程度上降低了修复成本, 包括减少道路开挖和修复的费用, 缩短了施工周期, 提高了修复效率。

6 结语

本文聚焦点于原位固化法、热塑成型法、紫外光原位固化法、不锈钢快速锁法 4 种非开挖修复技术, 深入探讨了技术参数的设置, 并总结归纳了非开挖修复技术的工艺步骤以及操作要点, 成功验证了非开挖修复工艺的可行性及其适用范围。

对修复方案的设计进行对比分析可知, 从实施后的水力条件来看, 紫外光原位固化法相较于热塑成型法的材料性能表现更为突出, 水力条件优越; 从管道适应性来看, 热塑成型法相较于紫外光原位固化法对现状病害管道的条件要求较低, 支持弯曲、变径等病害重的管道。所以, 在整体管道修复时, 应依据具体修复需求, 谨慎选择最优工艺方案。在管道局部修复时, 点状原位固化法材料力学性能较低, 更适用于管道半结构修复; 不锈钢快速锁法为钢制材料, 材料力学性能相对较高, 可适用于管道结构修复。

(下转第 62 页)