

热塑成型法非开挖管道修复技术应用

崔增光

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要: 为有效修复市政排水管道存在的结构性缺陷,如变形程度深、破裂面积广、接头错口繁、脱节数量众等问题,以监利市长江大保护生态环境综合治理一期 PPP 项目为例,采用热塑成型法修复工艺,选用改性塑料,环刚度高,光滑度高,过流能力好,成型方式能够适应不同形状和尺寸的管道。通过理论验算,确定了内衬材料的性能参数;通过现场实践,明确了修复施工要点;通过效益分析,验证了其在长距离管道修复施工中的经济性与适用性。热塑成型法在城市排水管道非开挖修复方面优势显著,解决了常规修复施工周期长、成本高以及对城市交通和居民生活影响大的难题,且施工过程环保,能源利用高效,在市政排水施工领域具备较大的推广价值。

关键词: 排水管道;结构性缺陷;热塑成型法;非开挖修复

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年代久远、管道病害严重而需要修复。其中约有 1 595 m 管道采用热塑成型法修复工艺,待修管道管径分别为 DN400、DN500、DN600,管材为 HDPE 双壁缠绕管,管道埋深约 2~5 m,主要管道病害为变形、破裂、错口、脱节等结构性缺陷,具体为三级缺陷 67 处(其中破裂 26 处,脱节 37 处、渗漏 1 处,异物穿入 3 处),四级缺陷 15 处(其中障碍物堵塞 9 处、破裂 1 处、脱节 4 处、变形 1 处)。范围内现状污水管道淤塞普遍达管径的 1/3,管道淤塞较为严重,导致其不能发挥正常排水能力。

2 工艺技术原理

热塑成型法适用于 DN100—DN1200 的管道修复,尤其是适用于市政道路下、建筑物边、河道旁等开挖影响较大的老旧管道,利用由高分子热塑聚合物树脂制作的内衬衬管覆贴于原有管道内壁上进行整管修复。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。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(0.8 MPa 左右)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。

3 工艺技术性能参数

3.1 结构性能参数

热塑成型法修复工艺可进行圆形管道半结构性修复或结构性修复。当对管道进行半结构性修复时,采用 Timoshenko 屈曲理论进行计算,内衬管最小壁厚应符合下列公式规定:

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

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,取 1 600; 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; N 为安全系数,取 2.0; μ 为泊松比,取 0.3。

当对管道采用结构性修复时,采用修正的 AWWA C950 设计方程进行计算,内衬管最小壁厚应符合下列公式规定:

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

式中: t 为内衬管壁厚, mm; q_L 为管道总的外部压力, MPa,取 0.105; 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。

按照不同管径规格，将计算参数代入相关公式，计算出不同工况下内衬管最小壁厚指标，如表 1 所示。

表 1 热塑成型法内衬管最小壁厚和设计厚度

管径	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
DN400	5.0	6.0	8.7	9
DN500	6.2	7.0	10.9	12
DN600	7.5	8.0	13.1	14

3.2 水力性能参数

管道内衬修复后，过流断面会有不同程度的减小，但内衬管的粗糙系数比原有管道小，因此管道内径经内衬修复后的过流量一般可以满足原有管道的设计流量要求，或者大于原有管道的设计流量。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：

$$B=\frac{n_e}{n_i}\times(\frac{D_i}{D_E})^{\frac{8}{3}}\times100\%$$

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，取 0.010； D_E 为原有管道内径，m； D_i 为内衬管管道内径，m。

将计算参数代入相关公式，计算出修复过流能力比值，见表 2、表 3。

表 2 热塑成型法半结构性修复过流能力比值

修复前粗糙系数	修复后粗糙系数	修复前管径/m	修复后管径/m	过流能力比值/%
0.013	0.010	0.40	0.388	120
0.013	0.010	0.50	0.486	120
0.013	0.010	0.60	0.584	120

表 3 热塑成型法结构性修复过流能力比值

修复前粗糙系数	修复后粗糙系数	修复前管径/m	修复后管径/m	过流能力比值/%
0.013	0.010	0.40	0.382	115
0.013	0.010	0.50	0.476	114
0.013	0.010	0.60	0.572	114

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：

$$F=\sigma\times\frac{\pi(D_o^2-D_i^2)}{6N_1}$$

式中：F 为允许拉力，kN； σ 为管材的屈服强度，MPa，取 30； N_1 为安全系数，取 3.0。将计算参数代入相关公式，计算出允许拖拉力值，见表 4。

表 4 允许拖拉力

管径	半结构性修复拖拉力	结构性修复拖拉力
DN400	49.5	73.7
DN500	72.3	122.6
DN600	99.2	171.8

4 材料与设备

4.1 内衬材料

内衬材料为高分子聚合物树脂，内衬管表面应光洁、平整，无局部划伤、裂纹、磨损、孔洞、干斑、褶皱、拉伸变形和软弱带等影响管道结构、使用功能的损伤和缺陷^[4]。其最低性能要求为：断裂伸长率应大于 25%，拉伸强度应大于 30 MPa，弯曲模量应大于 1 600 MPa，弯曲强度应大于 40 MPa。实际施工时，需根据工艺性能参数进一步核算优化。

4.2 施工设备

热塑成型法施工设备采用修复检修车，包含蒸汽系统、动力系统、牵引系统、压力及制冷系统等。

5 热塑成型法施工

5.1 管道预处理

施工前，对上、下游及支管进行堵水，管道堵水截水可采用专用堵水气囊或砌体围堰方式， $D\leq1\ 200\text{ mm}$ 的管道可以采用堵水气囊， $D>1\ 200\text{ mm}$ 的管道可以采用砌体截水。砌体截水可根据管道中水的流速、压力等级砌筑厚度为 24 cm、36 cm、72 cm 的墙体，并采用钢管、木料等对其进行支撑和加固。如果需要人工入管，则用砌筑截流，或采取气囊加砖石砌体的双重封堵，以保证施工段的安全。当管道不能中止运行时，利用水泵将上游水抽出，排至下游检查井内，如图 1 所示。在 2 号井及 3 号井内进行截水，并安装水电泵将水从 1 号井抽出导流至 4 号井内，以方便 2 号井—3 号井段进行施工，完成后将水泵等设备移置下一施工段，依此类推，完成整体管线施工。

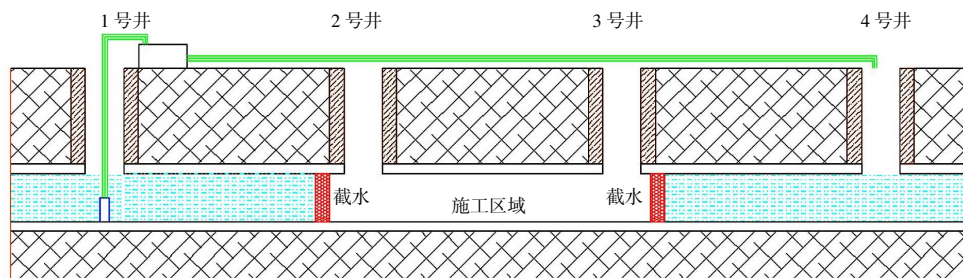


图 1 管道施工临时排水导流示意图

管道清淤时,配置高压水车,利用高压水枪向井段内注水,并采用疏通器搅拌淤泥至稀释状态。清洗过程中,用泥浆泵将疏通段内淤泥抽吸出,可采用多功能吸淤车吸出运走。利用CCTV机器人查看管道清洗情况,清淤效果应为无影响衬入的沉积、结垢、障碍物、尖锐突出物且不得有积水。当管径 $\leq 200\text{ mm}$ 时,直向摄影的行进速度不宜超过 0.1 m/s ;管径 $>200\text{ mm}$ 时,直向摄影的行进速度不宜超过 0.15 m/s 。检测时摄像镜头移动轨迹应在管道中轴线上,偏离度不应大于管径的 $10\%^{[2]}$ 。检测过程中根据管内工况实时调整摄像头,以获得最佳图像。

5.2 衬管预热

衬管运到现场后,清洗待修管道的同时利用蒸汽机车蒸箱对衬管轮盘进行预加热,衬管预加热时间宜为 $1\sim 3\text{ h}$,以使衬管软化。预热过程中,蒸汽的温度保持在适当范围内,一般为 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。过高可能导致衬管局部过热,影响其性能;过低则无法达到预期的软化效果。压力控制也同样重要,一般控制在 $0.1\sim 0.5\text{ MPa}$ 。压力过大可能对衬管造成不必要损伤;过小则无法使蒸汽充分渗透到衬管内部,导致加热周期过长。密切监测衬管受热情况,通过温度传感器和肉眼观察相结合的方式及时发现可能存在的受热不均问题,并采取相应调整措施,如调整蒸汽喷射角度或位置。

5.3 衬管拖入

衬管软化后方可用卷扬机拖入管道,分别在始发井和接收井各安装1个卷扬机。拖入前检测卷扬机的绳索处于完好状态,是保障施工安全和顺利进行的重要前提。卷扬机绳索与卷盘上的衬管连接牢固,确保在拖入过程中不会出现绳索脱落或衬管松动的情况。否则衬管可能在拖入中途掉落,不仅会影响施工进度,还可能对管道造成二次损坏。若衬管在拖入中途已冷却变硬,则应

重新加热后再实施拖入^[3]。重新加热时,控制加热的时间和温度,避免过度加热对衬管造成损坏。同时,确保加热后的衬管能够迅速进行拖入操作,以减少施工时间和提高效率。在拖入过程中,密切关注卷扬机的运行情况,包括转速、拉力等参数,确保在安全范围内运行。如果出现异常情况,如卷扬机过载、绳索断裂等,立即停止拖入操作,并采取相应的应急措施。

5.4 成型前预处理

衬管拖入完成后,对衬管两端露出待修复的管道端头部分重新加热,待软化后用专用气囊管塞将衬管的两端封堵,保证后续成型过程中衬管内部的压力和温度均匀分布,从而实现良好的成型效果。管塞中部设有通气管,管道上游的管塞通过蒸汽管与蒸汽发生器连接,管道下游的管塞连接带有阀门、温度和压力仪表的蒸汽管。通过通气管和连接装置,可以实时监测和控制衬管内部的蒸汽压力和温度,确保成型过程的稳定性和可靠性。加热衬管两端时控制加热的范围和温度,避免对周围的管道结构造成影响。管塞安装牢固可靠,确保在成型过程中不会泄漏或松动。

5.5 衬管成型

衬管在拖入的过程中会冷却硬化,因此待衬管完全拖入后,需继续用水蒸气对衬管进行二次加热。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 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。这一阶段是整个修复过程的核心环节,对压力和温度的精确控制至关重要。压力过高可能导致衬管过度膨胀,甚至破裂;温度过高可能会影响衬管的材料性能和使用寿命。待温度达到材料软化点后,逐渐关闭下游蒸汽管上的阀门,密切观察过程中压力和温度的变化、衬管的贴合情况,及时调整蒸汽的输入和阀门的

控制。衬管紧贴于待修管道后，停止蒸汽输送，此时衬管已经初步成型，但还需要经过后续的冷却和固化过程，确保其性能稳定。

5.6 端口处理

在衬管被吹起并紧贴于管道内壁之后，在保持压力的情况下，通过塞堵的气体通道向衬管内部输入冷空气冷却衬管，使衬管迅速冷却固化，从而获得稳定的形状和性能。当下游的温度表显示出通流气体温度降到 40 ℃ 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大于 10 cm，伸出部分宜呈喇叭状，以增加衬管与管道之间的连接强度和密封性。

5.7 质量检测

安装结束后用 CCTV 机器人进行施工质量检测，通过机器人携带的摄像头和检测设备，可以对衬管的贴合情况、有无裂缝、变形等问题进行全面的检测和评估。修复后的衬管不得有裂缝、孔洞、干斑、脱落、灼伤点、软弱带和可见的渗漏现象^[4]；且应紧贴原有管道，内壁顺滑，无明显的环形褶皱；非原有管道引起的褶皱最大高度不应超过 6 mm。

6 效益分析

热塑成型施工主要在管道内进行修复，无需大规模开挖道路，能够最大程度减少对交通的干扰，保障道路的正常通行。管道修复后能够形成均匀、连续、紧密贴合管道内壁的新衬层，有效修复管道的缺陷和损伤，提高管道的强度和密封

性，保证修复后的管道质量稳定可靠。工人劳动强度小，施工效率是传统施工方法的 2~3 倍。经济效益分析见表 5。

表 5 开挖修复与热塑成型修复效益分析

工艺	工程量/m	利润/(元·m ⁻¹)	收益/元	所需工期/d
开挖修复	40	433	17 320	5
热塑成型修复	40	742	29 680	2

7 结语

本文从热塑成型法的工程实践出发，以参数设计为立足点，以工艺操作要点作为切入点，深入探讨了技术参数、操作流程环节的设置。实践证明，该技术质量达标，安全可靠，具有显著的可推广性，对同类项目而言，具有一定的借鉴价值。在后续工作中，有望进一步扩大研究范围，加大对实际工程修复效果和使用寿命的跟踪与评估力度，构建更为完备的标准化工艺技术，以此有力推动非开挖修复工艺技术在城市排水领域实现广泛应用，并促进其可持续发展。

参考文献：

[1] 宋尚荣. CIPP 翻转内衬工艺用于排水管道功能性修复[J]. 四川建材, 2020, 46(9): 178-179, 206.

[2] 陈浩, 钟文威. 管道内窥联合检测技术在广州黑臭水体治理中的应用[J]. 广东水利水电, 2021(3): 97-102.

[3] 简正阳, 罗茂华, 赵云鹏, 等. 城区老旧管网 FIPP 非开挖全结构性修复施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(5): 110-114.

[4] 李静, 石东优, 曹井国, 等. 排水管道原位热塑成型修复技术国内外标准对比研究[J]. 给水排水, 2022, 58(8): 128-135.