



机械制螺旋缠绕修复技术 修复沿河截污干管实践

彭少卿¹ 张司颖² 赵志宾³ 王刚³ 曹井国¹

(1 天津科技大学 化工与材料学院, 天津 300457; 2 天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457;

3 天津倚通特种工程有限公司, 天津 300458)

摘要:重庆市綦江区某河畔湿地公园截污干管长度 481 m, 材质为双壁波纹管, 污水外渗情况严重, 采用机械制螺旋缠绕技术修复。结果表明: 该技术能克服工程车辆难以靠近、施工条件恶劣的困难, 通过计算和选型, 选用 126-20(S5) 带状型材, 加衬 0.7 mm 厚度不锈钢钢带, 实测短期刚度系数为 2.07×10^6 MPa·mm³, 满足设计要求; 环隙注浆水泥用量 108 t, 成功修复了该段管道。

关键词:机械制螺旋缠绕修复技术; 修复设计; 工程应用; 充填注浆; 非开挖修复

中图分类号: TU990

文献标识码: A

文章编号: 1002-8471(2024)11-0143-07

DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.LS2024.06.19.0002

引用本文: 彭少卿, 张司颖, 赵志宾, 等. 机械制螺旋缠绕修复技术修复沿河截污干管实践[J]. 给水排水, 2024, 50(11): 143-148, 159. PENG S Q, ZHANG S Y, ZHAO Z B, et al. Practical application of mechanical spiral winding rehabilitation technology in repairing riverside intercepting sewage main pipes[J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(11): 143-148, 159.

Practical application of mechanical spiral winding rehabilitation technology in repairing riverside intercepting sewage main pipes

PENG Shaoqing¹, ZHANG Siying², ZHAO Zhibin³, WANG Gang³, CAO Jingguo¹

(1. College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 3. Tianjin Yitong Special Engineering Co., Ltd., Tianjin 300458, China)

Abstract: In a riverside wetland park in Qijiang district, Chongqing, a 481 meter long main sewage interceptor experienced severe leakage that made of double-wall corrugated pipe. The mechanical spiral winding rehabilitation technology was employed for rehabilitation. Results showed that this technology could overcome difficulties such as limited access for construction vehicles and harsh working conditions. Through calculations and products selection, the 126-20 (S5) strip material, reinforced with a 0.7 mm thickness stainless steel strip, was utilized. The measured short-term stiffness coefficient was 2.07×10^6 MPa·mm³, meeting the design requirements. A total of 108 tons of grouting cement was successfully used to fill the gap between the liner and raw pipeline.

Keywords: Mechanical spiral winding rehabilitation technology; Rehabilitation design; Engineering application; Grouting injection; Trenchless rehabilitation



0 引言

近年来,地下管网的敷设长度逐年增加,截止到 2022 年,我国城镇排水管道敷设总长度达 116.5 万 km^[1]。部分管道因年久失修,地下管网相继出现功能性和结构性缺陷,如不及时检测维护,就会引发“城市病”,甚至对居民的财产、人身安全造成威胁。相较于传统开挖换管的修复方式,非开挖修复技术环境影响小、施工周期短、效率高,为地下管道维护提供了一种更有效的方法^[2]。

目前常见的非开挖修复技术包括:注浆法、翻转式原位固化法、紫外光原位固化法、机械制螺旋缠绕法、垫衬法、碎(裂)管法、热塑成型法、管片法等^[3]。其中,机械制螺旋缠绕修复技术采用预制 PVC-U 带状型材和不锈钢钢带缠绕形成内衬管,对环隙注浆完成管道的内衬修复,该技术可带水作业、施工简便、机动性强、修复后结构强度高^[4]。

重庆市綦江区某截污干管修复项目位于河边湿地公园内,园区人行步道狭窄,施工车辆难以进入;检查井临近河道,施工条件恶劣。考虑到施工条件、费用和效益^[5],采用机械制螺旋缠绕修技术完成截污干管的修复任务。本文结合该工程,对机械制螺旋缠绕的技术原理、修复设计、修复材料和施工流程进行介绍,分析了关键施工工艺对整体工期的影响,总结施工的经验,以为螺旋缠绕修复的工程提供参考。

1 工程概况

重庆市綦江区某河道旁截污干管由 DN800 的双壁波纹管敷设而成,因年久失修出现不同程度的破裂、渗漏等缺陷;管内存在大量淤泥、石砖,阻碍污水流通,无法满足高峰期污水的排放要求;管道污水外泄导致河面水葫芦生长泛滥,严重影响河水水质。为保护周边生态环境,需及时进行修复。

该工程位于河边湿地公园中,公园人行步道崎岖狭窄,大型车辆和设备进出困难;管道沿河敷设,管周土质以壤土为主,管顶覆土厚 7.2 m,地下水位高 6.7 m,部分检查井周围的土体被河水淹没,施工环境恶劣。普通开挖换管的修复方式费时费力,还会对公园环境造成破坏。经研究决定,选择钢塑加强型螺旋缠绕修复法对管道进行非开挖修复。

钢塑加强型螺旋缠绕法是通过井室内的缠绕机

组,将 PVC-U 带状型材和不锈钢钢带在原管道内螺旋旋转缠绕成内衬管,通过对环形间隙充填注浆,完成管道的整体修复。修复材料可远距离转运:带状型材料质量轻,可由人工从型材托架输送至工作井处;钢带可分段搬运和缠绕;注浆浆液由管道泵送。与其他非开挖修复技术相比,螺旋缠绕技术对地形条件要求低、工况适应性强,在作业环境受限的公园、居民区等区域有独特的优势。

2 修复设计

2.1 刚度系数

该工程采用结构性修复,内衬管不贴合原有管道,通过对环状空隙注浆形成复合管道,内衬管最小刚度系数按式(1)~式(4)计算^[6]:

$$E_L I = \frac{(q_t N / C)^2 D^3}{32 R_w B' E'_s} \quad (1)$$

$$q_t = 0.00981 H_w + \frac{\gamma H_s R_w}{10^3} + W_s \quad (2)$$

$$R_w = 1 - 0.33 \times \frac{H_w}{H_s} \quad (3)$$

$$B' = \frac{1}{1 + 4e^{-0.213 H_s}} \quad (4)$$

式中 $E_L I$ ——螺旋缠绕内衬管的长期刚度系数, MPa·mm³;

q_t ——管道外部总压力, MPa;

N ——安全系数;

C ——椭圆度折减系数;

D ——螺旋缠绕内衬管平均直径, mm;

R_w ——水浮力系数;

B' ——弹性支撑系数;

E'_s ——土壤反应模量, MPa;

H_w ——管顶以上地下水位高度, m;

γ ——土的重度, kN/m³;

H_s ——管顶以上覆土厚度, m;

W_s ——活荷载, MPa。

该项目工程参数如表 1 所示。

经计算,该工程的水浮力系数 $R_w = 1 - 0.33 \times$

$$\frac{6.7}{7.2} = 0.693; \text{管道外部总压力 } q_t = 0.00981 \times 6.7 +$$

$$\frac{18 \times 7.2 \times 0.693}{10^3} + 0.01 = 0.166 (\text{MPa}); \text{弹性支撑}$$



表 1 工程参数

Tab. 1 Engineering parameters

序号	符号	参数名称	数值
1	E'_s /MPa	管侧土综合变形模量	5.0
2	H_w /m	管顶以上地下水的高度	6.7
3	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	土的重度	18
4	H_s /m	管顶覆土厚度	7.2
5	W_s /MPa	活荷载	0.01
6	N	安全系数	2.0
7	C	椭圆度折减系数	0.998
8	D /mm	螺旋缠绕内衬管平均直径	631.97

系数 $B' = \frac{1}{1 + 4e^{-0.213 \times 7.2}} = 0.537$; 修复所需最小刚

度系数 $E_L I_{\min} = \frac{0.166 \times 2.0^2}{0.998} \times 631.97^3 = 4.67 \times 10^5 (\text{MPa} \cdot \text{mm}^3)$ 。

结合该工程实际情况,根据《城镇排水管道螺旋缠绕内衬法修复用硬聚氯乙烯(PVC-U)带状型材》(T/CUWA 60055-2023)产品标准,选择 S5 型材,同时为满足刚度系数要求,搭配 0.7 mm 不锈钢钢带。实测复合型材的短期刚度系数 $EI = 2.07 \times 10^6 (\text{MPa} \cdot \text{mm}^3)$,按短期刚度系数的 50% 折算后 $E_L I = 1.03 \times 10^6 (\text{MPa} \cdot \text{mm}^3)$,可满足使用要求。

2.2 过流能力

修复后管道的过流能力与原管道铺设时的过流能力比值按式(5)计算^[6]:

$$B = \frac{n_e}{n_1} \times \left(\frac{D_1}{D_E}\right)^{\frac{8}{3}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 B ——管道修复前后过流能力比, %;

n_e ——原有管道的粗糙系数, HDPE 管取 0.009;

n_1 ——螺旋缠绕内衬管的粗糙系数,螺旋缠绕管取 0.010;

D_1 ——螺旋缠绕内衬管平均内径, mm;

D_E ——原有管道平均内径, mm。

该项目中,原管道(D800)受土体环境影响,发生不同程度弯曲,修复时根据实际情况进行缩径处理,每段管道的实际缠绕内径如表 2 所示。

经计算,缠绕修复的内衬管平均内径 $D_1 =$

$$\frac{\sum L_i D_i}{\sum L_i} = 618.57 (\text{mm})。 \text{过流能力 } B = \frac{0.009}{0.010} \times$$

$\left(\frac{618.57}{800}\right)^{\frac{8}{3}} \times 100\% = 45.33\%$,即修复后管道的过流能力是原有管道的 45.33%。

表 2 修复前后的管道参数

Tab. 2 Pipeline parameters before and after repair

编号	管道长度 L_i /m	内衬管内径 D_i /mm
1	59	612
2	59	612
3	47	580
4	47	580
5	47	681
6	41	647
7	48	647
8	44	647
9	25	681
10	64	558

2.3 注浆用量

螺旋缠绕的环隙注浆属于充填注浆。可采用无压充填的方式注入水泥砂浆或纯水泥浆,根据式(6)计算施工注浆用量^[7]:

$$Q = \sum \frac{\alpha \times \beta \times \pi \times [D_E^2 - (D_i + d)^2] \times L_i}{4m \times 10^6} \quad (6)$$

式中 Q ——注入浆液体积, m^3 ;

α ——充填系数,取 0.80~0.95;

β ——损耗系数,取 1.2~1.5;

D_E ——原有管道平均内径, mm;

D_i ——内衬管内径, mm;

d ——带状型材的厚度, mm,取 20 mm;

L_i ——管道长度, m;

m ——浆液的结石率,取 0.50~0.95。

经计算,理论上所需浆液总体积 $Q = \sum_{i=1}^{10}$

$$\frac{0.95 \times 1.50 \times \pi \times (800^2 - (D_i + 20)^2) \times L_i}{4 \times 0.874 \times 10^6} =$$

142.07(m^3),此处充填系数取 0.95,损耗系数取 1.5。施工时,水泥与水等比调配,浆液比重 $\rho = 1.50 \text{ g/cm}^3$ (或 t/m^3),根据密度公式计算得出理论

$$\text{需用水泥 } M_{\text{理论}} = \frac{\rho Q}{2} = \frac{1.50 \times 142.07}{2} = 106.55 (\text{t})。$$

实际施工使用水泥 $M_{\text{实际}} = 108 \text{ t}$ 。

3 修复材料

3.1 PVC-U 带状型材

带状型材选用表面色泽均匀一致,无裂纹、孔



洞、外来夹杂物或其他损伤性缺陷。126—20(S5) 型材截面如图 1 所示。PVC-U 带状型材材料性能要求^[8]与实测值如表 3 所示。

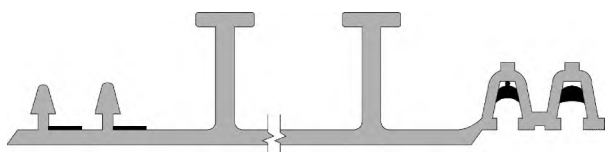


图 1 126—20(S5)型材截面

Fig. 1 Schematic diagram of the 126—20 (S5) profile cross-section

表 3 PVC-U 带状型材材料性能

Tab. 3 Material properties of PVC-U strip profiles

检验项目	性能要求	实测指标	测试方法
拉伸强度/MPa	≥35	39.56	《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)
拉伸模量/MPa	≥2 000	2 494.49	
断裂伸长率/%	≥80	136.15	《热塑性塑料管材 拉伸性能测定》(GB/T 8804.2)
弯曲强度/MPa	≥50	73.71	《塑料 弯曲性能的测定》(GB/T 9341)
弯曲模量/MPa	≥2 000	2 449.89	

3.2 不锈钢钢带

根据《城镇排水管道螺旋缠绕内衬法修复用硬聚氯乙烯(PVC-U)带状型材》(T/CUWA 60055—2023)产品标准中复合型材短期刚度系数表的规定,选择厚度为 0.7 mm 的不锈钢钢带。钢带表面应无裂纹、麻面、凸泡、脱皮,厚度均匀,钢带截面如图 2 所示。0.7 mm 不锈钢钢带材料性能要求与实测值如表 4 所示。

3.3 注浆材料

注浆材料使用 32.5 级以上的水泥调配。该工

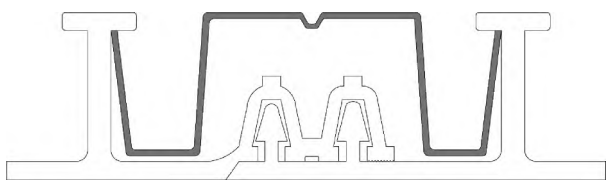


图 2 不锈钢钢带截面

Fig. 2 Schematic diagram of stainless steel strip cross-section

表 4 不锈钢钢带材料性能

Tab. 4 Material properties of stainless steel strip

检验项目	性能要求	实测指标	测试方法
抗拉强度/MPa	≥515	1 104	《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1)
规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa	≥205	438	
断裂伸长率/%	≥40	47.5	
弹性模量/GPa	≥193	196	《金属材料 弹性模量和泊松比试验方法》(GB/T 22315)

程采用 42.5 普通硅酸盐水泥,控制水灰比为 1.0, 调配浆液^[9]。注浆材料具体的性能如表 5 所示。

表 5 注浆材料性能

Tab. 5 Performance of grouting materials

检验项目	实测指标	测试方法
比重/($g \cdot cm^{-3}$)	1.50	将泥浆倒入 NB-1 型泥浆比重计中,调整砝码,平衡时示数即为泥浆比重
30 min 截锥流动度/mm	464	《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448)
泌水率/%	12.61	《水泥泌水性试验方法》(JC/T 2153)
初凝/终凝时间/min	1 110/1 580	《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346)
7 d/28 d 抗折强度/MPa	1.8/3.4	《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671)
7 d/28 d 抗压强度/MPa	8.8/14.2	

4 施工

施工工艺流程如图 3 所示。施工前期,对周边环境进行勘测和改造,方便后续施工的顺利进行;对需要施工的管段进行封堵调水;通过 CCTV 检测机器人对清淤前、预处理后和修复后的管道进行检测;通过管道预处理清除淤泥杂物、封堵渗漏点位,方便后续缠绕修复的顺利进行;根据设计方案并结合现场情况,调整缠绕笼大小,组装缠绕机组,缠绕制管;对新老管道的环形缝隙进行封堵,预埋注浆管并灌浆,通过分步注浆填充环形间隙;对作业的检查井进行整体修复,确保管井连接处完好;最后,通过闭水试验,检验螺旋缠绕内衬管的修复效果,质量检验合格后,恢复通水。



图 3 施工工艺流程

Fig. 3 Construction process flow

4.1 环境勘测与场地布置

复查和了解现场,拆除障碍物,对地下设施提供保护。工作井位于河边人行步道旁,且被树木杂草掩埋,部分工作井操作空间不足,根据现场情况搭建施工栈道。

4.2 管道封堵及抽排水

管道内存在水流和负压,为方便施工和井下操作的人身安全,设置 3 处气囊对管道进行封堵(如图 4),设置污水泵进行抽排导流。该工程中,气囊压力

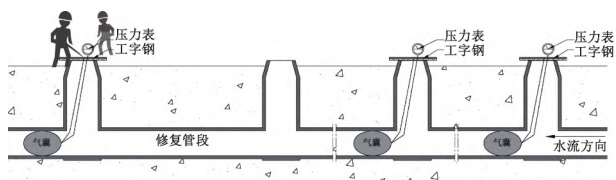


图 4 气囊封堵

Fig. 4 Schematic diagram of airbag sealing

控制在 0.15 MPa, 根据水流情况架设 4~6 台 100 mm 管径污水泵进行导排。

4.3 管道预处理

在修复前通过管道清淤、局部堵漏等处理方式, 达到管底无淤泥沉积、管壁无附着物和渗漏等施工作业要求, 确保螺旋缠绕修复过程的顺利进行。

4.3.1 管道清淤清洗

污水管道内沉积着大量淤泥和杂物, 需对现况管道和检查井进行清淤作业。采用人工为主、机械为辅的方式进行清淤。

井下施工人员需经有限空间作业培训, 佩戴氧气面罩、安全帽、对讲机、气体检测仪、防坠绳索等装备, 使用轴流风机对井室通风, 并实时监测有毒有害气体含量, 确保井下有限空间作业人员的安全。

4.3.2 管道局部堵漏

管道局部渗漏会导致注入的浆液泄露, 对环境造成污染。施工现场通过 CCTV 检测发现多处渗漏点, 使用不锈钢快速锁对缺陷进行封堵。不锈钢快速锁是由数控加工的高品质不锈钢环片、橡胶套和螺栓三部分组成, 通过专用扩张工具在管道内扩张并贴合原管道内壁。渗漏部位以及预处理后的情况如图 5 所示。

4.3.3 井室溜槽改造

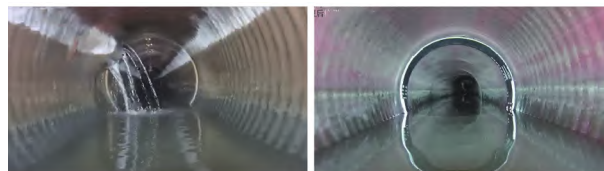
在检查井井底安装缠绕机组, 为保证螺旋缠绕管的中心轴与原有管道一致, 对检查井底部进行破除改造。采取人工下井破除的方式, 使用气动角磨机和卷扬机将检查井底部破除改造, 待管道修复完毕后使用防腐砂浆修补, 并整体修复检查井。

4.4 设备组装与缠绕

4.4.1 缠绕设备组装与固定

螺旋缠绕机组由缠绕机头和缠绕笼组装而成。缠绕笼是由一系列螺旋方向的导向辊和平辊组成, 可将连续缠绕的型材锁在一起, 形成内衬管道, 根据待修复管道的内径调整尺寸大小。缠绕机头由传

压辊组成, 通过液压泵站驱动型材和钢带进入缠绕笼, 可由速度控制旋钮改变缠绕速度。通过改变缠绕机头的零部件来适配不同的型材和钢带。螺旋缠绕机组在井口安装完毕后, 通过卷扬机吊入井室内并固定, 对于井口过小的情况, 可拆分后在井室内完成安装。



a 处理前

b 处理后

图 5 预处理效果对比

Fig. 5 Pre-treatment effect comparison

4.4.2 缠绕制管

螺旋缠绕管的材料由特制的 PVC-U 带状型材和钢带螺旋缠绕而成。带状型材由工厂生产并包装成卷, 施工时可从型材托架处顺延至工作井处。钢带通过多道压辊压制成具有特定截面和弧度, 根据现场条件, 将钢带分段切割并人工转运至工作井附近。

带状型材与钢带在缠绕机组的驱动下螺旋旋转, 型材两侧主次锁扣互锁, 形成一条比原有管道小且连续无缝的新管。缠绕工作结束后应做好设备保养工作, 及时拆卸并对关键零部件使用机油浸润养护, 防止生锈, 以便于下次缠绕工作。

4.5 端口封堵与注浆

4.5.1 端口封堵

用砖块、快干水泥或水不漏逐层填补环隙, 封堵厚度不小于 30 cm, 在管道两侧环形间隙 2:00、10:00、12:00 的位置分别埋设注浆管。上游一侧主要用于注浆, 下游一侧用于放气和观察^[9]。

4.5.2 分段注浆

在注浆过程中, 由于注浆材料浆液的比重较大、泌水率较高, 为防止漂管现象及密实度控制, 采用分段注浆法分 2~3 次完成。首次注浆从上游 2:00 和 10:00 注浆孔灌注, 并在下游 2:00 和 10:00 观察孔观察, 注浆用量按照理论计算总量的 40%~43% 进行控制; 第 2 次注浆从上游 12:00 注浆孔灌注, 并在下游 12:00 观察孔观察, 注浆用量按照理论总量的 50% 进行控制; 第 3 次注浆从上游 12:00 注浆孔灌



注,在上游 12:00 观察孔观察,注浆用量按照理论总量的 7%~10% 进行。每次注浆间隔 24 h,注浆完毕后及时封堵冒浆的观察孔,并将端头处理平整。

4.6 井室修复

管道修复完成后,对施工作业检查井进行整体修复,防止管井连接处发生渗漏。先用水不漏对渗漏点位进行封堵;再用 20 mm 防水砂浆抹面,通过定位钉控制砂浆修复的厚度;待砂浆初凝后喷涂 2 mm 聚氨酯防水涂层,完成检查井的修复。

4.7 质量验收

4.7.1 表观形貌

完成修复后,通过 CCTV 检测或人工检查,管道内应线形平顺,不得出现纵向隆起、环向扁平和其他变形情况;管道环形间隙应封堵严密^[10]。管道修复前后的效果如图 6 所示。

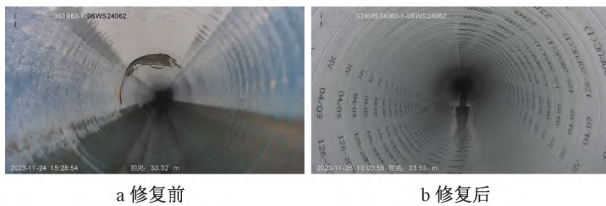


图 6 管道修复效果对比

Fig. 6 Pipeline repair effect comparison

4.7.2 管道严密性

通过 CCTV 检测,管道内不得有漏水现象;通过闭水试验,在上游检查井水位高度下,修复后管道的单位渗水量应不超过允许渗水量的要求^[11]。该工程使用气囊封堵待检管段,在上游检查井灌水,直至水面与检查井井口齐平,观察半小时后液面下降深度。待检管段的单位面积允许漏水量不大于 0.3 L/(m²·h),检查井直径 700 mm,水面下降高度均不超过 5 cm,满足严密性检验。

5 工程经验总结

该工程累计耗时 83 d,实际施工 77 d,施工人员 11 人,修复问题管段 10 段。整个工程按照施工流程可分为:环境处理与恢复(环境勘测、场地布置、质量验收、环境恢复、设备材料退场)、管道井室预处理(管道清淤、局部堵漏、溜槽改造、新建检查井)、螺旋缠绕修复(设备组装调试、螺旋缠绕制管)、封堵与分段注浆(环隙封堵、分段注浆)和二次转运(材料设备转运)5 类。从图 7 中可知,在实际施工中,螺旋缠

绕修复与分段注浆工艺占整体工期的 31.8%,平均每段缠绕修复耗时 2~3 d;管道与井室的预处理工作占用了大量的时间,占比 38.8%。这说明预处理工作遇到的问题更为复杂,如不能及时有效的解决,将阻碍整体的施工的进度。工程总结如下:

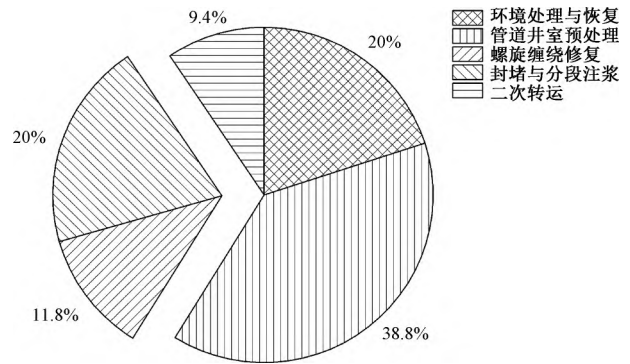


图 7 施工工艺的工期分布

Fig. 7 Schedule distribution of construction processes

(1)螺旋缠绕修复技术可远距离修复,环境影响小,特别是针对公园、居民区、景区等不方便施工车辆靠近的区域。型材远距离拖拽过程中应注意产生的扭转应力,否则在卷绕过程会发生型材或钢带的脱扣;型材截面复杂,远距离拖拽注意防护,避免损伤型材、堵塞锁扣缝隙,避免影响卷绕过程。

(2)钢塑加强型螺旋缠绕所修复管道的允许转角较小。螺旋缠绕内衬管由型材与钢带卷制而成,在管道内部无法控制转弯,为满足管道修复要求,可以适当缩小内衬管管径或在转角较大的地方设置工作井。

(3)注浆材料的配方可进一步优化,降低泌水率,提高固化强度。针对实际注浆效果,目前还缺少有效的检测手段,注浆施工具有隐蔽性,实际注浆情况得不到监测,仅能靠经验判断注浆情况。

6 结语

本项目采用机械制螺旋缠绕修复技术,成功修复了病害管道,根据 PVC-U 带状型材产品标准,可方便快捷选型。工程实施表明,该技术能够克服工程车辆难以靠近、施工情况复杂的工况,并可带水作业;采用合理的注浆策略,能够较好的实现新旧管道环隙的填充,有效提高管道结构强度,提升管道使用寿命。

(下转第 159 页)



模具有较多不同的混合形式,能够解决系统模拟仿真中不同的问题。未来的研究应当进一步探索其他的混合驱动建模方法,获得不同性能特点的模型以满足排水系统模型模拟不同的需求。

参考文献

- [1] 王浩正,冯宇,孙文超,等.城市排水系统模型综述[J].中国给水排水,2021,37(22):1-10.
- [2] NIAZI M, NIETCH C, MAGHREBI M, et al. Storm water management model: Performance review and gap analysis [J]. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 2017, 3(2): 1-32.
- [3] EGGIMANN S, MUTZNER L, WANI O, et al. The potential of knowing more: A review of data-driven urban water management [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(5): 2538-2553.
- [4] ZHANG D, LINDHOLM G, RATNAWEERA H. Use long short-term memory to enhance Internet of Things for combined sewer overflow monitoring [J]. Journal of Hydrology, 2018, 556: 409-418.
- [5] SUFI KARIMI H, NATARAJAN B, RAMSEY C L, et al. Comparison of learning-based wastewater flow prediction methodologies for smart sewer management [J]. Journal of Hydrology, 2019, 577.
- [6] FLETCHER T D, ANDRIEU H, HAMEL P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 261-279.
- [7] PROKHOROV D V. Intelligent control systems using com-

putational intelligence [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2007, 18(2): 611-612.

- [8] BISHOP C M. Pattern Recognition and Machine Learning [M]. Springer, 2006.
- [9] WILLARD J, JIA X, XU S, et al. Integrating Scientific Knowledge with Machine Learning for Engineering and Environmental Systems [J]. ACM Computing Surveys, 2020, 1(1): 35.
- [10] BRADLEY W, KIM J, KILWEIN Z, et al. Perspectives on the integration between first-principles and data-driven modeling [J]. Computers & Chemical Engineering, 2022, 166: 107898.
- [11] 王一茗,马振华,杨萌祺,等.机理和数据混合驱动的排水系统控制模型构建方法[J].环境工程,2022,40(6):204-211,225.
- [12] PALMITESSA R, GRUM M, ENGSIG-KARUP A P, et al. Accelerating hydrodynamic simulations of urban drainage systems with physics-guided machine learning [J]. Water Research, 2022, 223.
- [13] 莫洛可夫.雨水道与合流道[M].北京:建筑工程出版社,1956.

§ 通信作者:董欣,女,1982年出生,陕西咸阳市人,博士,副教授。主要研究方向为城市水系统集成模拟与实时控制。

通信处:100084 北京市海淀区双清路 30 号清华大学中意环境节能楼 1013 室

E-mail:dongxin@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2024-05-15

(上接第 148 页)

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.2022年城市建设统计年鉴[R].2023.
- [2] 卫佳,许怀奥,方帅,等.非开挖修复技术用于大口径截污管道改造工程[J].中国给水排水,2023,39(10):126-32.
- [3] 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):71-6.
- [4] 王刚,王卓.机械式螺旋缠绕管道非开挖带水修复技术应用案例[J].中国给水排水,2018,34(6):120-2.
- [5] 周律,赵巨尧,羊小玉,等.采用层次分析法对排水管道非开挖修复技术优选研究[J].给水排水,2015,41(3):94-7.
- [6] CJJ/T 210-2014 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程[S].
- [7] YS/T 5211-2018 注浆技术规程[S].
- [8] T/CUWA 60055-2023 城镇排水管道螺旋缠绕内衬法修复

用硬聚氯乙烯(PVC-U)带状型材[S].

- [9] 赵志宾,蒋景生,王利强,等.截污管道内衬修复工程中螺旋缠绕法环形间隙填充注浆的质量控制[J].天津科技,2022,49(5):44-46,50.
- [10] T/CECS 717-2020 城镇排水管道非开挖修复工程施工及验收规程[S].
- [11] GB 50268-2008 给水排水管道工程施工及验收规范[S].

○ 通信作者:曹井国,男,1980年出生,山东济南人,博士,教授。主要研究方向为管道非开挖修复技术及材料、水务标准化。

通信处:300457 天津市滨海新区天津科技大学泰达校区

E-mail:cjg@tust.edu.cn

收稿日期:2024-06-19