

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.06.023

翻转式原位固化(CIPP)技术用于城市排水管道修复

曹井国^{1,2}, 石东优¹, 董泽樟¹, 张大群², 张 军³

(1. 天津科技大学 化工与材料学院, 天津 300457; 2. 天津水工业工程设备有限公司, 天津 300070; 3. 重庆克那维环保科技有限公司, 重庆 404100)

摘 要: 介绍了重庆永川区某排水管道非开挖翻转内衬修复的设计、质量检测和工程应用情况。实践表明,对于 DN600 病害管道,当设计水压为 60 kPa、软管的厚度为 9 mm 时,采用双层结构,内、外层幅宽分别为 1 770、1 700 mm,加工后的软管接缝处抗拉强度为 7.45 MPa,能够满足施工要求。对长度约为 140 m 的病害管道进行原位修复后,固化管内壁无鼓胀、裂纹、褶皱等现象,初始结构性能满足《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 210—2014)要求。

关键词: 排水管道; 非开挖管道修复; 原位固化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)06-0128-06

Application of Rotary Cured-in-Place Pipe (CIPP) in Urban Drainage Pipe Rehabilitation

CAO Jing-guo^{1,2}, SHI Dong-you¹, DONG Ze-zhang¹, ZHANG Da-qun², ZHANG Jun³

(1. College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science Technology, Tianjin 300457, China; 2. Tianjin Water Industry Engineering Equipment Co. Ltd., Tianjin 300070, China; 3. Chongqing Kenawei Environmental Protection Technology Co. Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: The design, quality inspection and engineering application of trenchless rotary cured-in-place pipe (PICC) for a drainage pipeline in Yongchuan District, Chongqing were introduced. The results show that as for a DN600 harmed pipeline, with designed water pressure of 6 kPa, designed hose thickness of about 9 mm, and the inner and outer layer widths of about 1 770 mm and 1 700 mm respectively, the tensile strength of the hose joint is about 7.45 MPa, which could meet the construction requirements. After rehabilitation of a 140 m harmed pipeline, there were no bulging, cracks and wrinkles for inner wall of the cured pipe. The initial structural performance meets the requirements of *Technical Specification for Trenchless Rehabilitation and Renewal of Urban Sewer Pipeline* (CJJ/T 210 - 2014).

Key words: drainage pipeline; trenchless pipeline rehabilitation; cured-in-place pipe

近年来,我国在城市排水管道原位固化(CIPP)修复材料方面取得了较大进展,特别是树脂和软管等基础材料基本取代进口材料,但是国产软管缺乏

生产制造的基础数据^[1],质量控制和检验不易统一,缺少软管设计制造及工程应用方法的研究。

本课题组在国家“十二五”水专项课题“城镇排

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07309001)

水管渠原位固化内衬管产业化研究”资助下,研究了双侧热复合软管的制备工艺,并实现了连续化生产、质量控制稳定。针对重庆某管道修复工程进行材料设计、施工和质量检测,就管道修复施工缺陷,如褶皱问题进行优化设计,为原位固化内衬管的产业化和标准化提供基础和依据。

1 工程概况

重庆市永川区萱花河路段某管道闭路电视(CCTV)检测结果表明,管道总长度约140 m,管径为DN600,部分管道出现功能性缺陷(障碍物、沉积)和结构性缺陷(错口、腐蚀、破裂、渗漏、接口材料脱落)。管道缺陷处位置如表1所示,该管道已经丧失了排水能力。如不及时进行修复,将对周围的环境带来二次污染。

表1 工程位点及管道病害状况信息

Tab. 1 Engineering sites and pipeline harmed status

位置/m	病害状况	病害等级
10、33、46、98、103	破裂	4
25、74、91、118、130	破裂	3
16	腐蚀	3
58	障碍物	3
85	渗漏	4
112	错口	2
125	沉积	3
134	接口材料脱落	3

部分管道病害情况见图1。

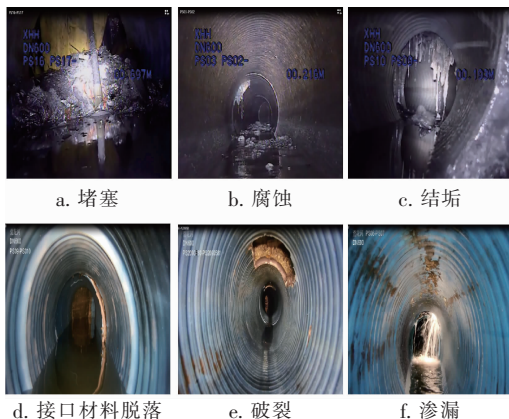


图1 部分管道病害情况

Fig. 1 Status of the harmed pipeline

待修复污水管道位于两座拱桥之间,正上方是街道和公路。如果采用开挖修复,施工工期长、费用高,施工阶段整条街道的商业活动将完全中断。因原排水管道系统整体上比较完整,只是出现破裂和

管壁腐蚀,没有出现管道塌陷,说明原有管道仍能承受外部土压力和动荷载,所用内衬管在设计寿命之内仅需要承受外部的静水压力,因此,决定采用非开挖CIPP翻转内衬法对整段排污管道进行半结构性修复。

2 CIPP内衬管的设计和制造

2.1 内衬软管厚度设计

为了满足管道修复后的力学与过水能力要求,采用圆形管压曲公式,进行内衬管结构的设计^[2];同时结合待修复管道病害评估等级、地下水压和动荷载的测量等影响因素对内衬软管厚度进行设计:

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

式中: t 为内衬管的壁厚,mm; P 为地下水压力,MPa; C 为椭圆度折减因子; D 为原有旧管道的平均内径,mm; N 为安全系数; E_L 为内衬管的长期弹性模量,MPa; K 为圆周支持率; μ 为泊松比。

计算参数及结果见表2。经计算,软管厚度为9 mm,涤纶无纺布材质,设计采用双层结构,内层厚4 mm,外层厚5 mm,防渗膜采用PU膜,厚0.5 mm。

表2 计算参数和结果

Tab. 2 Calculation parameters and results

参数	$D_{\max}/$ mm	$D_{\min}/$ mm	μ	K	$P/$ MPa	$E_L/$ MPa	N	$t/$ mm
结果	600	590	0.3	7.0	0.06	1 968	2.0	9.0

注: D_{\max} 为原有旧管道的最大内径; D_{\min} 为原有旧管道的最小内径; E_L 宜取短期模量(实验室结果为3 936 MPa)的50%。

2.2 内衬软管幅宽设计

《给水排水管道原位固化法修复技术规程》(T/CECS 559—2018)规定,原位固化法所用软管外径应与原有管道内径相一致,翻转或拉入管道后,应与病害管道紧密贴合,同时避免内衬管直径过大而在管道内部产生影响质量的隆起或褶皱。因软管材料存在一定的弹性,不同水压下产生不同的膨胀率,导致固化后出现褶皱,故应对软管进行幅宽设计。采用ABAQUS有限元分析软件及试验方法确定软管翻衬时的环向应力及应变,以确定软管内外层幅宽尺寸。设计采用60 kPa水压,通过ABAQUS有限元模拟了内衬软管翻衬时的应力及应变,并进行试验段固化试验验证。外层材料厚5 mm,弹性模量为18.18 MPa,泊松比为0.3。内层材料厚4 mm,弹性

模量为 5.56 MPa,泊松比为 0.46。模拟值和试验值对比如表 3 所示。

表 3 软管模拟值与试验值对比

Tab. 3 Comparison of simulated value and experimental value for hose

项 目	基材幅宽/mm	环向应力/MPa	环向膨胀率/%	径向扩张位移/mm
软管内层	模拟值 1	4.46	9.9	56.5
	试验值 1	4.56	7.9	52.5
	模拟值 2	4.33	8.2	46.4
	试验值 2	4.56	7.8	44.0
软管外层(含防渗膜层)	模拟值 1	3.64	19.4	54.5
	试验值 1	3.60	18.3	50.5
	模拟值 2	3.54	18.8	51.4
	试验值 2	3.60	16.6	49.0

由表 3 可知,第一次试验中内衬软管内、外层幅宽设计分别为 1 800、1 750 mm 时,内、外层模拟的径向扩张位移分别为 56.5、54.5 mm,环向膨胀率分别为 9.9% 和 19.4%,可修复管径范围分别为 573 ~ 630 mm 和 557 ~ 622 mm;内、外层试验值的径向扩张位移分别为 52.5、50.5 mm,环向膨胀率分别为 7.9%、18.3%,膨胀后的管径范围分别为 573 ~ 626 mm 和 557 ~ 618 mm,固化后固化管内壁出现较大褶皱;第二次试验,内衬软管内、外层幅宽设计分别为 1 770、1 700 mm 时,内、外层模拟的径向扩张位移分别为 46.4、51.4 mm,环向膨胀率分别为 8.2% 和 18.8%,可修复管径范围分别为 564 ~ 610 mm 和 541 ~ 602 mm;内、外层试验值的径向扩张位移分别为 44.0、49.0 mm,环向膨胀率分别为 7.8% 和 16.6%,膨胀后的管径分别为 564 ~ 608 mm 和 541 ~ 600 mm,固化后固化管内壁光滑,满足施工使用要求。因此,软管内、外层幅宽按 1 770、1 700 mm 进行制备。

2.3 内衬软管制备及接缝处力学性能检测

内衬软管属于管状非织造布复合材料,通常为多层结构,内层为无纺布层,外层防渗层。多层软管制备流程如图 2 所示,成品及结构如图 3 所示。

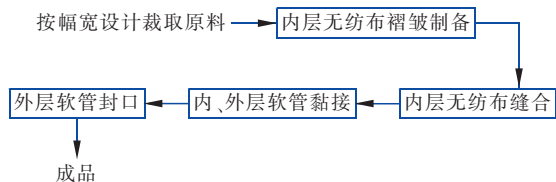


图 2 软管制备流程

Fig. 2 Manufacture of hose

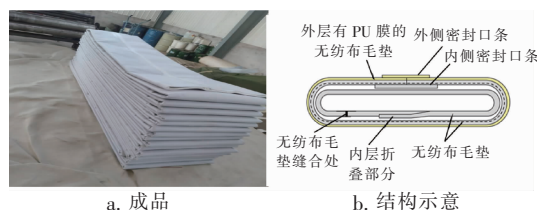


图 3 软管成品及结构示意图

Fig. 3 Hose product and its structure

在软管的制作工艺中,接缝作为软管制备的关键环节,决定了软管的整体质量。相关研究表明:软管在施工过程中应力最高可达 6.87 MPa^[3], ASTM F1216^[4]、ASTM F1743^[5]、ASTM D5813 - 04^[6]、CJJ/T 210—2014^[7] 等标准指出:软管主材横、纵向抗拉强度不低于 5 MPa,接缝抗拉强度应与主材一致,确保软管质量,对软管主材及接缝处分别按照《纺织品 织物拉伸性能 第 1 部分:断裂强力 and 断裂伸长率的测定(条样法)》(GB/T 3923.1—2013)进行力学性能的检测,结果如表 4 所示。

表 4 软管主材及接缝处力学性能检测

Tab. 4 Testing of mechanical properties of hose main material and joints

项 目	最大抗拉强度/MPa	最小抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
主材	横向	7.06	6.39
	纵向	7.93	7.66
接缝处	内封口条	8.34	7.45
	外封口条	35.36	25.54

由表 4 可知,主材横纵向最小抗拉强度为 6.39 MPa,接缝处外封口条及内封口条最小抗拉强度为 7.45 MPa,接缝处的抗拉强度高于主材,均满足高于 5 MPa 的要求。

3 CIPP 翻衬法排水管道修复施工过程

3.1 施工工艺流程

施工工艺流程如图 4 所示。

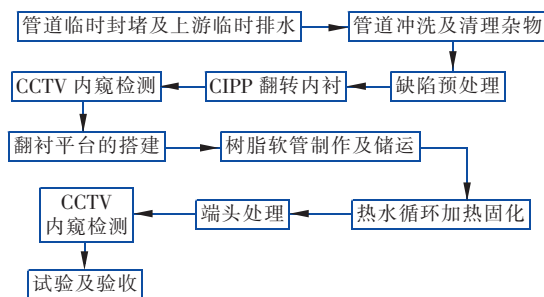


图 4 施工工艺流程

Fig. 4 Flow chart of CIPP construction process

首先,对病害管道的上下游进行封堵和临时排水,冲洗管道、清理管道内的杂物,对管道缺陷(如破裂、渗漏、错口等)进行预处理、CCTV检测,确定满足施工要求;搭建翻衬平台,将树脂填充进软管,通过储运车将树脂软管运到翻转施工现场,将树脂软管另一端固定在翻转头上,进行水压翻转,翻转完成后进行热水循环加热固化;固化完成后切除头端和检查井底部的固化管,在检查井底部处取样检测初始结构性能,同时对修复后的管道内表面进行CCTV内窥检测,主要观察固化管内壁表观形貌;通过闭水试验,检验固化管密封效果。质量检验全部合格后,恢复通水。

3.2 管道临时封堵及临排管道的安装

通过CCTV对排污管道进行检测,将有问题的管段位置信息都收集起来,并做好相应的预处理工作,以免影响翻衬施工。图5为管道临时封堵及临排管道的安装示意图。在封堵前对管道进行降水、通风、有毒有害气体检测,确认达到安全标准后,操作人员下井进行管道的封堵。采用专用管道封堵气囊对上下游管道进行封堵,操作气囊气压保持在0.15 MPa以上。在井口放置工字钢,将气囊牵引绳、进气阀门及进气管都固定在工字钢上完成封堵。为了及时将上游的污水排到下游的管道内,防止污水从井口溢出,造成二次污染,采用消防软管作为临时排水管道,同时准备一定量的备用管道,以应对特殊情况。

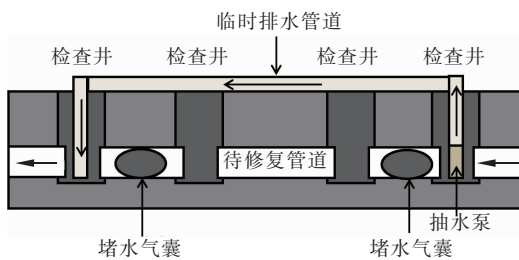


图5 管道封堵及临时排水安装示意

Fig.5 Schematic diagram of pipeline sealing and temporary drainage installation

3.3 管道内表面清洗及障碍物清理

高压清洗是利用高压水射流,将管壁上的结垢、泥沙冲洗干净。清洗过程中,根据原管道的病害情况调节水压,防止因水压过高损害原管壁;高压喷头在管壁内同一位置停留时间不宜过长,以免破坏管壁。冲洗完成后,及时清理掉污水及污物。

3.4 原管道缺陷预处理

针对管道内存在破损、管道材料脱落、缺口孔洞、接口错位、腐蚀瘤局部缺陷,采用灌浆、点位加固、机械打磨、人工修复等进行预处理;针对错位小于管径10%以内的缺陷,采用聚合物水泥砂浆填补磨平^[8];对于外露尖锐物体(如钢筋、尖锐突出物、树根等)采用人工或机械打磨方式去除,需要表面磨平的部位用聚合物水泥砂浆进行预处理;对于管道缺口问题,主要采用点位加固、灌浆进行处理;对于渗漏点位,采用堵漏王进行封堵,确保在施工阶段不出现漏水。

3.5 翻转内衬作业

3.5.1 翻衬平台的搭建

将待修复管道上游检查井作为工作井,在上部采用钢管支架作为翻转作业平台,翻转作业平台搭建高度为6 m。同时在修复管道的末端安装一个可调节挡板,防止因翻转水压过大,软管拉伸过长,给固化管末端处理带来困难。工作平台如图6所示。



图6 翻转平台的搭建及挡板的安装

Fig.6 Construction of the flip platform and installation of baffle

3.5.2 树脂填充及储运

按待修复管段两检查井中心距离、检查井井深、两端部所需长度、施工时静水压力所需高度以及固定在翻转头上的长度,确定软管长度并进行裁切;浸渍树脂前,对软管进行抽真空,抽真空时间根据软管的长度确定,在整个填充过程也要保持抽真空状态。根据制造商提供的热固性树脂、固化剂等试剂混合比例,结合软管的长度、厚度及孔隙率相关参数,计算出树脂用量;考虑到树脂的聚合作用及渗入待修复管道缝隙和连接部位,增加5%~15%树脂填充。树脂和固化剂混合后应及时进行浸渍,停留时间不超过20 min,如不能及时浸渍则应冷藏,冷藏时间不超过3 h^[9]。

浸渍过程中由于树脂量较大,采用隔膜泵向软管中灌注树脂。通过压料平台对软管进行定厚压

料,填充后软管采用塔吊进行牵引,折叠进入软管存放车。当室内温度 $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,将树脂软管叠放到水槽中或冷柜中贮藏,防止树脂发生提前反应。

采用冷藏车运输树脂软管,避免日光或者强光照,在树脂软管固化前运到施工地并完成翻转。

3.5.3 翻衬作业

树脂软管运至施工地点,将树脂软管一端固定在翻转头上,根据设计的翻转静水压力确定绑扎匝数及箍紧程度;另一端将控制绳和热水管紧箍在封闭端,随树脂软管翻转进入待修复管道内。翻转过程中,注水流量和树脂软管翻转保持匀速,通过控制绳和注水量来控制翻转速度和翻转水压,采用CCTV在另一端实时观测翻转进度。当翻转树脂软管露出管道末端口时,立即固定控制绳,应避免树脂软管伸出待修复管道末端口。

3.5.4 固化成型

树脂软管翻转送入目标管道后,将管内热水输送管与水泵、锅炉设备连接,开始加热固化。此次固化采用一台锅炉加热(锅炉功率为 1.2 MW),通过潜水泵与锅炉回水处相连接的方式进行热水循环。翻转时在井中预埋温度传感器,分别布置在翻转头处、管道中部和管道末端,监测软管固化过程中软管3个部位的温度。经过 6 h 的热水循环加热,入水温度及回水温度达到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 2 h ,确保树脂固化完成。

确认固化完成后,缓慢降温。采用常温水替换固化管内部热水,当冷却至 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始排水,排水后进行CCTV检测。修复前、后管道如图7所示。

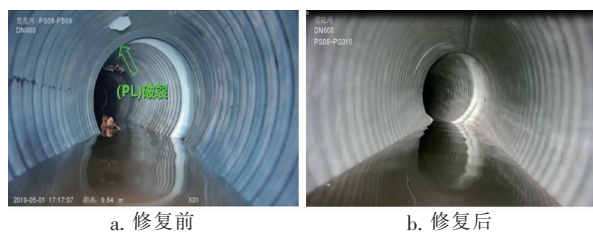


图7 修复前、后管道内壁形貌

Fig.7 Comparison of the pipe inner before and after repairment

采用专用的切割工具对内衬管端部切割,切割一定量固化管送检。整个工作完成以后,将工地现场恢复到原貌。

3.5.5 闭水试验

修复完成后进行闭水试验,验证固化管的密封

性。控制试验水头为 50 kPa 、时间为 40 min 。经检测实际渗水量为 $0.0023\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m})$,折合平均实测渗水量为 $3.28\text{ m}^3/(24\text{ h}\cdot\text{km})$,符合国家标准《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)无压管道闭水试验的有关规定。试验完成后,撤去气囊恢复通水,完成管道修复。

3.5.6 固化管初始结构性能

专业机构对送检试样的检测结果如表5所示。

表5 CIPP内衬软管的强度检测结果

Tab.5 Strength test of lining hose of CIPP MPa

检测项目	技术指标	检测结果	单项判定	检测方法
弯曲强度	≥ 31	47	合格	GB/T 9341—2008
弯曲模量	$\geq 1\,724$	3 172	合格	
抗拉强度	≥ 21	24	合格	GB/T 1040.2—2006

由表5可知,初始固化管的弯曲强度为 47 MPa ,弯曲模量为 $3\,172\text{ MPa}$,抗拉强度为 24 MPa ,均满足各项技术指标,检测结果合格。

4 经验总结

① 内衬层软管幅宽设计,主要结合ABAQUS有限元模拟和实际的翻转试验进行验证,确定内衬软管在一定翻转水压下膨胀率,进而确定内衬软管可修复旧管道尺寸范围,避免固化成型后固化管内表面出现褶皱、管壁变薄等问题,保证施工质量。

② 待修复管道预处理阶段,应保证管道内壁光滑,无尖锐突出物,同时确保堵渗漏处的质量,在内衬软管固化成型前,若出现再次渗漏,会导致内衬软管出现严重的变形,影响管道的过流能力。

③ 针对翻转过程中翻衬软管过重、工作人员很难将翻转过来的软管导入待修复管道内的问题,可以设计与传送带类似的滚动斜面,安装在工作井井底,有利于软管进入待修复管道内。

④ 固化反应是一个剧烈的放热过程,若这部分热量不能及时移走,将在内衬软管的内壁聚集,导致内衬软管内壁防渗膜被烫坏,影响固化管表观形貌,因此,循环加热前对加热锅炉及管道进行排空,防止空气进入循环水管道内,同时加快循环水流速,增大内衬软管内壁与热水接触面积,及时带走这部分热量。此外,在热水循环加热固化过程中,应该缓慢升温,有利于内衬软管材料浸润和黏附,改善界面形成。

⑤ 在循环加热、固化成型及管内水温冷却至常温前,水压高度必须满足设计要求,确保内衬软管

完全胀开且与待修复管道内壁黏结,防止固化管内壁出现褶皱,以及固化管与待修复管道之间存在间隙,保证施工质量。

5 结论

随着非开挖修复技术的不断发展,在城镇排水管道修复中应用越来越广泛。本研究采用自主研发和生产的内衬软管,达到验收标准,施工质量可靠。用多种手段优化软管设计并进行有效的质量监控,保证软管质量。实际工程应用表明,内衬软管内壁无鼓胀、裂纹、褶皱现象,内衬软管与原管道内壁黏结紧密,力学性能满足《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 210—2014)要求。

参考文献:

- [1] 曹井国,张文宁,杨婷婷,等. 城镇排水管道原位修复内衬软管产品标准研究[J]. 中国给水排水,2019,35(2):24-28.
CAO Jingguo, ZHANG Wenning, YANG Tingting, *et al.* Study on product standard for cured-in-place repair of lining hose for municipal drainage pipeline[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2): 24-28 (in Chinese).
- [2] 张淑洁,王瑞,王欢,等. 管道非开挖纺织内衬修复技术中纺织内衬层的设计[J]. 产业用纺织品,2007,25(2):10-13.
ZHANG Shujie, WANG Rui, WANG Huan, *et al.* Textile liner design of pipeline trenchless textile lining renovation[J]. Industrial Textiles, 2007, 25(2): 10-13 (in Chinese).
- [3] 卢彬荣. CIPP 翻转内衬修复技术在排水管道修复中的应用[J]. 市政技术,2015(2):155-157.
LU Binrong. Application of CIPP overturn lining technique in drainage pipeline [J]. Municipal Engineering Technology, 2015 (2): 155-157 (in Chinese).
- [4] Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube; ASTM F1216 - 16[S]. USA: ASTM International, 2016.
- [5] Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Pulled in Place Installation of Cured-in-Place Thermosetting Resin Pipe (CIPP); ASTM F1743 - 2017[S]. USA: ASTM International, 2017.
- [6] Standard Specification for Cured-in-Place Thermosetting Resin Sewer Piping Systems; ASTM D5813 - 04 - 2012[S]. USA: ASTM International, 2012.
- [7] 住房和城乡建设部. 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程:CJJ/T 210—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical Specification for Trenchless Rehabilitation and Renewal of Urban Sewer Pipeline; CJJ/T 210 - 2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014 (in Chinese).
- [8] 褚同伟. 非开挖管道修复技术在市政管道改造中的应用[J]. 城镇供水,2018(5):61-65.
CHU Tongwei. Application of trenchless pipeline repair technology in municipal pipeline reconstruction[J]. City and Town Water Supply, 2018(5): 61-65 (in Chinese).
- [9] 董久樟. 翻转内衬法修复我国燃气旧管道技术的应用研究[D]. 北京:北京建筑工程学院,2001.
DONG Jiuzhang. Study on the Application of Reverse Lining Method in Repairing Old Gas Pipeline in China [D]. Beijing: Beijing Institute of Architectural Engineering, 2001 (in Chinese).

作者简介:曹井国(1980-),男,山东济南人,博士,副教授,研究方向为水污染防治技术。

E-mail: cjjg@tust.edu.cn

收稿日期:2019-10-19

修回日期:2020-04-14

(编辑:衣春敏)