

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.16.018

给水管道不锈钢内衬非开挖修复技术研究与应用

罗智程^{1,2}

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 福州市水务工程有限责任公司, 福建 福州 350002)

摘 要: 以福州市西二环中路 DN800 给水管道修复工程为例, 首先开展了一系列室内原型试验研究, 然后从理论方面分析了薄壁不锈钢内衬修复技术设计方法, 验证了不锈钢内衬修复给水管道后的抗负压能力、耐腐蚀能力等优势, 最后基于设计需求, 介绍了不锈钢内衬非开挖修复技术的施工工艺原理及施工工序。

关键词: 不锈钢内衬; 给水管道; 设计方法; 原型试验

中图分类号: TU991.36 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)16-0102-06

Research and Application of Trenchless Repair Technology for Stainless Steel Lining of Water Supply Pipeline

LUO Zhi-cheng^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fuzhou Water Engineering Co. Ltd., Fuzhou 350002, China)

Abstract: Taking the DN800 water supply pipeline rehabilitation project in the Xi'erhuanzhong Road in Fuzhou as an example, a series of laboratory prototype tests are carried out, and then the design method of repair technology for thin-wall stainless steel lining is analyzed theoretically. The advantages such as anti-negative pressure and anti-corrosion ability of the stainless steel lining after repairing are verified. Finally, based on the design requirements, the construction principle and working procedure of trenchless repair technology for stainless-steel lining are analyzed.

Key words: stainless steel lining; water supply pipeline; design method; prototype test

给水管网设施与人民生活息息相关, 其建设位置通常选择在人口聚集区或者主干道下。随着我国城市供水规模的不断扩大及供水安全需求的提高, 供水管网改造及维护任务迫在眉睫。然而, 传统的开挖地表进行管网改造的方法存在较多局限性, 主要表现在: ①施工周期长、综合成本高; ②改造工程需大面积开挖破路, 影响交通和周边环境; ③城区地下管线复杂、纵横交错, 开挖作业易破坏周边公用设施及第三方权属管线, 且相当部分地段已无空间位置重新敷设管网。为解决这些问题, 地下管线非开挖修复技术应运而生。与传统的开挖施工工艺相比, 非开挖管道修复技术具有施工周期短、成本低、

工艺环保、过程隐蔽等显著优点, 通过科学合理地选择非开挖管道修复设计参数和施工工艺, 可以取得良好的经济及社会效益。目前, 国内用于给水管道修复的施工工艺主要有: 紫外光固化内衬修复技术 (UV-CIPP)、喷涂法内衬修复技术、穿插法内衬修复技术、薄壁不锈钢内衬修复技术等。因不锈钢内衬非开挖修复技术可以极大降低施工对城市交通、居民生活等造成的影响, 且该技术修复效果好, 修复后的给水管道过流断面损失小, 故其成为修复严重腐蚀的给水管道的上佳选择^[1-2]。

薄壁不锈钢内衬修复技术是在原管道内铺设薄薄一层不锈钢板作为管道内衬层的一种非开挖修复

技术。其工艺原理为:在待修复管道两端开挖作业井,用制管设备将薄壁不锈钢制成符合尺寸要求的管坯,输送到待修复管道内,通过胀管装置使内衬管与原管道贴实并用氩弧焊焊接,在管道端口采用堆焊不锈钢过渡层将不锈钢内衬与原管道连接为一体。该技术最早起源于河北保定金迪双维公司,主要用于给水管道非开挖修复工程。近年来,经过不断的工程实践发展优化,该项技术可修复的给水管道管径范围扩大至 DN600 ~ DN2 400,修复时采用的不锈钢内衬壁厚为 0.6 ~ 2.0 mm^[1]。关于不锈钢内衬壁厚的设计,目前国内还没有相应的标准规范,因此设计时主要参考原位固化法非开挖修复技术设计方法中半结构性修复内衬壁厚的计算原理。而给水管道在正常运行过程中,突然开启阀门而产生的“水锤”效应会使管道内产生瞬时较高的负压,可能造成不锈钢内衬层发生屈曲失稳破坏,导致修复失败,故不锈钢内衬层的抗负压能力是评价其修复效果的重要参数之一。郑小明等^[3]通过设置对照试验,研究了不同壁厚、不同管径(DN300、DN500、DN800)以及管内加支撑对不锈钢内衬耐负压的影响,试验结果表明,加内支撑与增加壁厚可以提高内衬的环刚度,进而提升其耐负压能力。以此为基础,通过室内原型试验、理论分析等方法对大口径(DN800)给水管道的耐负压试验、壁厚设计、施工工艺及工序进行深入探讨。

1 不锈钢内衬耐负压试验研究

给水管道正常运行过程中普遍存在“水锤”现象,该现象的出现会造成修复段不锈钢内衬瞬间承受较高负压,因此不锈钢内衬层存在发生屈曲失稳破坏的可能。在福建省福州市西二环中路 DN800 给水管道不锈钢内衬修复工程中,为了验证不锈钢内衬壁厚设计能够保障其安全运行,设计了大口径(DN800)给水管道室内原型修复试验,对不锈钢内衬的耐负压能力进行验证。

试验装置如图 1 所示。

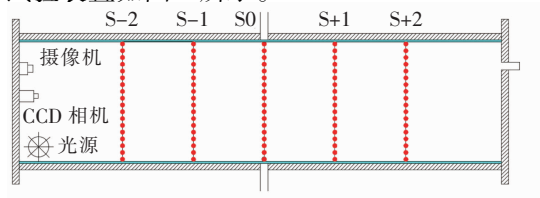


图 1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experiment set-up

试验基本要点包括:将薄壁不锈钢内衬层安装在钢管内壁,使其与钢管内壁紧密贴合,利用真空泵抽吸空气来降低不锈钢内衬层内部压力,以模拟管道运行过程中出现的内衬层内部压力低于其外部压力的负压情况,同时利用 CCD 相机及摄像机来观测薄壁不锈钢内衬层的变形情况^[4]。

通过设置多组对照试验(见表 1),测试管径为 DN800 的给水管道不同壁厚不锈钢内衬层承受负压的能力,观察薄壁不锈钢内衬层在负压逐渐增大条件下的变形情况。

表 1 试验方案

Tab. 1 Experimental schemes

钢管内径	不锈钢内衬外径	不锈钢内衬壁厚/mm	椭圆度修正系数
DN800	DN800	1.79	0.91
DN800	DN800	1.61	0.75
DN800	DN800	1.20	0.64

试验步骤:

① 按照上述试验装置图将标志块、应变片、CCD 相机、摄像机及光源等布置好,盖上法兰盖板进行密封并连接真空泵。

② 采用抽真空试验对内衬的密封性能及承压性能进行验证,抽真空使压力值达到 -0.01 MPa,并保持 10 min。若压力值无明显减小,则证明内衬层的焊缝强度及密封性能均满足要求,可进行负压试验。

③ 试验开始(10:08:42)并将真空泵变频器频率调到 15 Hz,即抽气速度为 3.75 L/s,观察压力传感器及监测视频中内衬的变化并注意倾听声响,试验进行到 10:10:06 时开始听到声响,从视频中看到不锈钢内衬在 09:00 方向出现了明显的局部变形,紧接着又听到声响且 12:00 方向出现了明显的局部变形。至此关系结束本次试验。更换不同厚度的内衬进行相同的试验。

按照相同的试验方法,依次完成了管径 DN800,壁厚分别为 1.79、1.61、1.20 mm 的 3 组试验,试验结果显示:DN800、壁厚 1.79 mm 的不锈钢内衬可承受的负压约为 -0.053 77 MPa, DN800、壁厚 1.61 mm 的不锈钢内衬可承受的负压约为 -0.041 02 MPa, DN800、壁厚 1.20 mm 的不锈钢内衬可承受的负压约 -0.030 48 MPa。根据自由圆环稳定性计算公式,计算理论上不锈钢内衬产生屈曲的临界压力

值(P_{cr})。

$$P_{cr} = \frac{3EI}{(1-\nu^2)R^3} \quad (1)$$

式中: P_{cr} 为临界屈曲压力,MPa; E 为弹性模量,

MPa; I 为惯性矩, $I = t^3/12$,mm⁴/mm; t 为壁厚,mm;
 R 为内衬内壁半径,mm; ν 为泊松比。

再用试验测试值除以自由环理论值,得到增强系数(K),计算结果见表 2。

表 2 增强系数(K)计算结果

Tab. 2 Calculation results of the enhancement coefficient K

弹性模量 (E)/GPa	内衬内壁半径 (R)/mm	壁厚(t)/ mm	泊松比 (ν)	自由环临界 压力(P_{cr})/kPa	试验临界屈曲 压力(P)/MPa	增强系数 (K)
195	398	1.79	0.247	-4.723	-0.053 77	11.38
195	398	1.61	0.247	-3.437	-0.041 02	11.93
195	398	1.20	0.247	-1.423	-0.030 48	21.42

为了安全起见,在下面的不锈钢内衬壁厚设计中,增强系数取表 2 计算结果的最小值(11.38)。

2 不锈钢内衬非开挖修复结构设计

2.1 内衬材料

常用的不锈钢内衬材料主要有三种类型,分别

是 06Cr19Ni10(304 型)、06Cr17Ni12Mo2(316 型)及 022Cr17Ni12Mo2(316L 型),如表 3 所示。

不锈钢内衬材料的选择应符合现行国家标准《流体输送用不锈钢焊接钢管》(GB/T 12771—2019)的规定。

表 3 常用不锈钢内衬材料

Tab. 3 Commonly used stainless steel lining material

材料型号	适用条件	用途
06Cr19Ni10(304 型)	氯离子 ≤ 200 mg/L	饮用净水、生活饮用冷水、热水、空气、燃气等管道
06Cr17Ni12Mo2(316 型)	氯离子 $\leq 1\ 000$ mg/L	耐腐蚀要求高于 304 型场合的管道
022Cr17Ni12Mo2(316L 型)		海水或高氯介质

在这三种型号不锈钢内衬材料中,最常用的是 06Cr19Ni10(304 型),其力学性能为管材抗拉强度 ≥ 520 MPa、管材延伸率 $\geq 35\%$ 、管材屈服强度 ≥ 310 MPa、管材面积缩减 $\geq 30\%$,测试依据标准为《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)。

2.2 内衬管直径选择

不锈钢内衬管的直径应该根据原管道内径确定,考虑原管道的腐蚀情况,在不影响施工的情况下,应该尽量使内衬管外径与原管道内径一致,以保证内衬管安装完毕后紧贴原管壁^[5]。

2.3 内衬管壁厚计算

不锈钢内衬非开挖修复技术仅适用于原管道发生腐蚀等轻微破损的管道修复,修复后原管道与内衬管联合承担内外压力^[6]。

因此修复腐蚀等轻微破损的重力原管道时,内衬壁厚(t)通过下式确定:

$$t = \frac{D}{[2KE_L C/PN(1-\nu^2)]^{1/3} + 1} \quad (2)$$

式中: D 为原管道平均内径,mm; E_L 为内衬弹性模量,MPa; C 为椭圆度修正系数; P 为内衬临界负

压,MPa; N 为安全系数。

利用不锈钢内衬修复非埋地原管道时,应该采用下式计算设计内衬厚度(t):

$$t = \frac{D}{2\sigma_{TL}/PN + 2} \quad (3)$$

式中: σ_{TL} 为不锈钢内衬抗拉强度,MPa。

采用不锈钢内衬法修复埋地轻微破损原管道时,最终的设计厚度应该是将式(2)的计算结果与式(3)的计算结果进行比较,取最大厚度值。

《给水排水工程管道结构设计规范》(GB 50332—2002)规定,压力管道运营过程中可能出现的真空负压的标准值取 0.05 MPa。根据以上理论计算公式及试验结果,本项目各参数的取值及壁厚计算结果见表 4。

由表 4 计算结果可知,式(2)计算结果为 $t = 1.92$ mm,式(3)计算结果为 $t = 0.046$ mm,因此,最后设计壁厚取两个公式计算结果的最大值,即 $t = 1.92$ mm。而本次试验中采用的壁厚为 1.79 mm 的不锈钢内衬可承载的负压为 -0.053 77 MPa,故按照原位固化法半结构性修复壁厚设计方法计算得到的结果偏保守。

表 4 各参数取值及壁厚计算结果

Tab.4 The value of each parameter and the calculation result of lining thickness

项目	管径(D)/ mm	增强系数(K)	弹性模量 (E_L)/GPa	椭圆度修 正系数(C)	内压(P)/ MPa	安全系 数(N)	泊松比 (ν)	抗拉强度 (σ_{TL})/MPa	壁厚(t)/ mm
公式(2)	800	11.38	195	0.91	-0.05	1.2	0.247	—	1.92
公式(3)	800	—	—	—	-0.05	1.2	—	520	0.046

3 工程案例及分析

3.1 工程概况

本次需实施修复的福建省福州市西二环中路给水管道的 DN800 灰口铸铁管,长 827.04 m,管道埋深约 1~2 m(管顶)。该段管道位于西二环中路(斗池路—工业路)段,安装年代久远,由于地质沉降、重物碾压、管道老化等造成破损、变形、腐蚀及接口漏水等缺陷,存在很多供水安全隐患,管道运行安全没有保障。综合分析比较之后决定选用壁厚 2.0 mm 的不锈钢内衬对该段管道进行改造。

3.2 不锈钢内衬修复技术施工流程及工序

本次不锈钢内衬修复施工工艺流程见图 2。

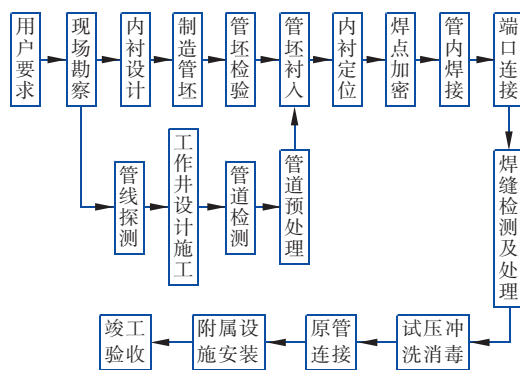


图 2 施工工艺流程

Fig.2 Construction process flow diagram

3.2.1 现场勘察及地下管线的探测

根据用户给水管道的材质、使用年限、爆管频率、漏损水量提出更新改造需求,安排人员实地踏勘待施工管道现场,利用探测仪探测管道的走向、深度,调查管道材质、分布情况及地下构筑物位置。

3.2.2 工作井设计施工

基于现场勘察及地下管线的探测结果确定工作井开挖位置时,需要满足下列要求^[7]:

- ① 工作井的设置需结合周边环境及交通状况确定,应避开地上建筑物、架空线、地下管线或其他构筑物;
- ② 工作井宜设计在管线变径、转角、阀门井等处;

③ 一个修复段的两个工作井的间距应控制在施工能力范围内,间距一般不超过 500 m。

本施工管段设计开挖 3 处工作井,工作井标准尺寸 4 m×4 m,深度为管底下 0.7 m。施工开挖时要结合具体的环境、交通、工艺等具体确定。工作井位置设置见图 3。

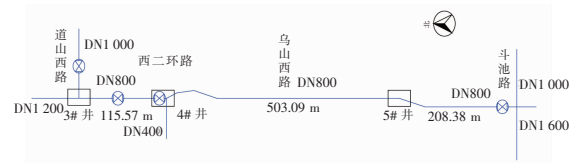


图 3 工作井位置设置

Fig.3 Diagram of working well location

在工作井边角处下挖直径 0.5 m、深 0.4 m 的降水坑,成为工作井内的最低点。在坑内放置排水泵,安排专人值守,随时抽排地下水至附近的排水管道内。

3.2.3 管道断管、通风

管道断管采取摘除一段 2 m 管方式开口。在切断原管道时,注意保护好原管道两端的承插口。管道断管后,管道内余水应及时疏导至排水口。阀门需要拆除内侧法兰,配接钢制法兰短节,加盖盲板。在管道开口的两端放置 2 台轴流风机,1 台吹风,1 台抽风,连续通风 30 min,使用测氧仪对管道内部含氧量进行检测,正常后方可进入管道。

3.2.4 管道 CCTV 视频检测

在施工前需在原管道开口后用管道机器人内窥检测系统对管道进行检测,确定管道内壁情况、水垢及异物的厚度、管道具体走向及起伏状况、管道破损情况、缺陷点的具体位置等。施工前探查清楚管道内部实际情况,确定对缺陷点采取的修复方式,为修复工序提供数据、技术支持。

3.2.5 管道预处理

将管道内残留的泥沙、污垢等杂物使用拉膛清理与人工清理相结合的办法进行清理,管道内部在清理完成后要达到清洁平滑无杂物。清理后管道内部凸起物、尖角要多次凿除,直至将其尖锐棱角磨

去,使其平滑;管道接口错位处,用水泥砂浆抹平;有地下水向管内渗水的用打麻、嵌封等防渗漏处理后,再用快干水泥填充抹平。

3.2.6 内衬设计

本次不锈钢内衬修复工程使用不锈钢板为06Cr19Ni10(304型)、壁厚2.0 mm,管材抗拉匹配焊丝为H0Cr21Ni10(308L型)。

3.2.7 制造管坯与检测

① 开屏

按照内衬管的设计直径、周长、壁厚并预留30~50 mm搭接量(周长方向)进行不锈钢板开屏。

② 卷圆

将卷板机卷圆尺寸调整到待内衬管道的内径,可采用预制待内衬管道的内径模板,通过模板靠模方式调整卷板机卷圆尺寸直至合格再进行大批量卷圆,使每张不锈钢板自然直径为待内衬管道的内径,从而达到内衬与原管道内壁贴实的效果。

③ 管坯预制及检验

将卷圆后的不锈钢板以二张为一连接单元在焊接台上进行焊接连接;在焊接前使用丙酮对焊缝及两端30~50 mm区域进行清洁,去除表面的氧化膜、湿气、水、污垢、油脂等杂物。焊接采用对接焊,达到单面焊接、双面成形效果;制作的每段不锈钢管坯保留纵向焊缝不焊,经检验合格后包装运到现场。

3.2.8 管坯衬入、内衬定位

将预制好的不锈钢管坯二次运输到施工现场,把每张不锈钢管坯卷到约 $\varnothing 700$ mm的直径,用专用吊带固定后吊装到工作井内的运板车上,逐节输送进原管道内进行布管,通过涨钳将每相邻两张不锈钢管坯的搭接量调整为30~50 mm(搭接顺序为水流方向),并调整不锈钢管坯使纵向焊缝位置处于原管道的08:00—09:00点或15:00—16:00方向,使相邻两张不锈钢管坯的纵向焊缝错开不少于20 mm,通过专用机械及液压涨管器将内衬管撑圆并与原管道内壁贴实,然后采用氩弧焊进行点焊定位,每张不锈钢管坯定位以此类推。不锈钢内衬定位后对不锈钢预焊缝进行焊点加密,纵、环向缝的焊接。

3.2.9 焊点加密、管内焊接、端口连接

① 焊点加密

不锈钢内衬定位后对不锈钢预焊缝进行焊点加密,每处点焊间距不超过30 mm,焊点长度约5 mm。之后进行纵、环向缝焊接。点焊加密好后要达到未

焊接焊口无翘起、无明显缝隙。

② 管内焊接

按照国标《现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》(GB 50683—2011)、《工业金属管道工程施工规范》(GB 50235—2010)进行纵、环向缝的氩弧焊接。氩弧焊接时要按照先送气后起弧,熄弧后再停气的原则,要求氩气纯度不小于99.99%。

③ 端口连接

施工开挖工作井处为灰口铸铁管,先制作钢制承插件,在断开的铸铁管端口用承插方式安装钢制承插件。承插盘钢管上焊接一圈10 cm宽、5 mm厚的不锈钢板,然后将不锈钢内衬管焊接到5 mm厚的不锈钢板上,从而形成一个金属密闭的整体。不锈钢过渡管件与法兰焊接采用氩弧焊。钢制承插管与灰口铸铁管之间用麻绳、石棉水泥进行密封,再按照钢管内衬连接方法进行端口连接。

④ 弯头、分支处理

根据管道弯头形状及尺寸,预制好每个弯头的不锈钢拼接材料,在管道内拼装焊接。

主管道不锈钢内衬完成后,在主管道内分支管的部位开口,焊接不锈钢加强板,并根据管道分支接口相交形状剪裁、翻边焊接。铸铁分支要提前更换成钢制分支,便于与不锈钢内衬焊接。

3.2.10 焊缝检测及处理

对所有焊缝进行外观检验;要求焊缝外观整齐、无气孔、无未融合、无未焊透、无裂纹、无焊瘤、无咬肉。对于工程重点工序,包括缺陷处理、制管、氩弧焊接、端口连接等严格实行质量实时监控。根据焊接工序的质量标准严格进行质量检验及监控,记录检验结果^[8]。以上检验工作完成后对焊缝进行着色渗透检验。

焊接完成及检查完成后,对焊缝进行酸洗钝化处理。不锈钢在焊接过程中会出现黑色、黄色的氧化皮,在焊缝焊接并检验完成后须对不锈钢焊缝进行酸洗钝化处理,去除焊接后产生的氧化皮,并促使处理后的不锈钢焊缝表面及两端影响区快速形成一层致密的三氧化二铬氧化膜,达到钝化防腐的目的。

3.2.11 试压冲洗消毒

内衬安装完成后,进行整体试压,压力试验时管道两端的密封盲板必须加固好并做好后背支撑;试验试压时应实时监测压力表,及时排空管内空气,确保管道试验压力缓慢平稳上升。试压时严格按照

《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)中规定的压力试验验收要求进行管道压力试验,试压合格后进行管道冲洗及消毒,消毒时采用消毒液对管网灌洗消毒,消毒液可选用0.03%的高锰酸钾溶液或其他合适消毒液。

3.2.12 原管连接、附属设施安装

试压冲洗消毒完成后进行工作井管道合口恢复,在管道预先安装的钢制承插之间焊接新钢管(壁厚12 mm)。开始铺装钢管前需对钢管表面进行清洁处理,使钢管表面清洁且没有油漆、油、铁锈、铁屑、熔渣或其他焊接有害的物质,并将管口由机械进行成型处理,处理好后即可焊接。DN800 给水管道修复工程完成后,通过4#工作井附近已安装的高频压力监测仪对该管道内的水压进行实时监测,评估是否会发生水锤现象。

4 结论

① 作为一种新兴的管道非开挖修复工艺,薄壁不锈钢内衬修复被广泛应用于各种管径给水管道的修复,但是关于不锈钢内衬管的壁厚设计还没有成熟的设计、计算标准,目前均参考原位固化法中非结构性修复内衬壁厚计算方法。同时在修复后的给水管道运行过程中,水锤效应产生的负压对不锈钢内衬的稳定性存在一定影响。

② 不锈钢内衬修复后内衬与原管道贴合紧密,内衬管内表面光滑连续,可以起到防腐作用,同时也能承受一定的负压。

③ 利用原位固化法半结构性修复壁厚设计方法计算的管径为DN800的不锈钢内衬壁厚,要使其能承受《给水排水工程管道结构设计规范》(GB 50332—2002)规定的 -0.05 MPa ,壁厚应为1.92 mm。而本次试验中管径DN800、厚1.79 mm的内衬可承受负压值为 $-0.053\ 77\text{ MPa}$,说明通过该方法设计不锈钢内衬壁厚偏保守。

参考文献:

- [1] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- MA Baosong. The Science of Trenchless Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2008 (in Chinese).
- [2] NAJAFI M. Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal [M]. New York;

McGraw Hill Professional, 2005.

- [3] 郑小明,张严甫,李长俊,等. 给水管道薄壁不锈钢内衬耐负压试验研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(23): 59–63, 68.
- ZHENG Xiaoming, ZHANG Yanfu, LI Changjun, *et al.* Research on negative pressure resistance test of thin-walled stainless steel liner for water supply pipeline[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23): 59–63, 68 (in Chinese).
- [4] 周维. 管道薄壁不锈钢内衬屈曲失效理论与试验研究[D]. 北京:中国地质大学, 2017.
- ZHOU Wei. Theoretical and Experimental Research on Buckling Failure of Thin-wall Stainless Steel Liner of Pipeline[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017 (in Chinese).
- [5] 马保松. 非开挖管道修复更新技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2014.
- MA Baosong. Trenchless Pipeline Rehabilitation and Renewal Technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2014 (in Chinese).
- [6] 曾聪,马保松. 非开挖管道更换和修复技术[J]. 非开挖技术, 2005, 22(2): 130–134.
- ZENG Cong, MA Baosong. Trenchless pipeline replacement and repair technology [J]. Trenchless Technology, 2005, 22(2): 130–134 (in Chinese).
- [7] 李彦君,詹金松,麦伟成. 薄壁不锈钢板内衬修复给水管技术应用分析总结[J]. 城镇供水, 2014(1): 19–21.
- LI Yanjun, ZHAN Jinsong, MAI Weicheng. Analysis and summary of application of repairing water supply pipe with thin wall stainless steel plate lining[J]. City and Town Water Supply, 2014(1): 19–21 (in Chinese).
- [8] 张锦刚,杨国才,刘刚伟,等. 管端内衬不锈钢焊管环焊缝缺陷分析[J]. 焊管, 2017, 40(8): 45–48.
- ZHANG Jingang, YANG Guocai, LIU Gangwei, *et al.* Analysis on circumferential weld defect of pipe end lined with stainless steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2017, 40(8): 45–48 (in Chinese).

作者简介:罗智程(1987—),男,福建三明人,大学本科,工程师,主要从事工程施工、技术、质量管理等工作。

E-mail: 474743873@qq.com

收稿日期:2020-11-08

修回日期:2020-11-16

(编辑:衣春敏)