

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.24.019

超大口径污水管道不锈钢内衬修复技术的应用

陆 健

(上海城建水务工程有限公司, 上海 200080)

摘 要: 上海市合流一期污水管网运行时间超过30年,其结构病害较为严重。合流污水一期干线修复工程XF1.1标,采用奥氏体不锈钢板在原DN3 500混凝土管道内分段焊接成环的超大口径污水管道非开挖修复方法。介绍了该工程的原管道定位、中导管推送、不锈钢内衬拼接、壁后注浆等难点工序,对施工质量控制和修复后的功能性评价进行了分析。

关键词: 管道非开挖修复; 中导管推送; 不锈钢内衬; 壁后注浆

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)24-0130-07

Application of Stainless Steel Liner Rehabilitation Technology for Ultra-large-diameter Sewage Pipelines

LU Jian

(Shanghai Urban Construction Water Engineering Co. Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: The Shanghai combined sewer phase I pipeline network has been operated for more than 30 years, with severe structural deterioration. For the rehabilitation of the XF1.1 section of the phase I combined sewer mainline, a trenchless repair method was employed for the ultra-large-diameter sewage pipeline. This involved assembling and welding austenitic stainless steel plates into segmented rings inside the original DN3 500 concrete pipe. The project addressed critical challenges such as locating the original pipeline, advancing central guide conduits, splicing stainless steel liners, and post-lining grouting. The paper also analyzes construction quality control measures during construction and evaluates the functional performance of the rehabilitated pipeline.

Key words: trenchless pipeline rehabilitation; central guide conduit propulsion; stainless steel liner; post-lining grouting

上海市合流污水一期管网的服务范围包括浦西地区44个系统,服务面积为70.57 km²,服务人口约为255.3万人,总管设计规模为170×10⁴ m³/d。作为竹园片区内最大的污水干线,合流污水一期干线自1993年通水后,运行至今已超过30年,普遍存在钢筋裸露及腐蚀、粗细骨料流失以及嵌缝材料剥落等情况,安全隐患较大,开挖修复非常困难,甚至可能实施^[1]。以合流污水一期干线(16#~11a#)修复工

程XF1.1标项目(2022年初开工)为背景,对城市超大口径污水管道不锈钢内衬修复技术进行探讨。

1 工程概况

合流污水一期干线修复工程XF1.1标涉及的管段全线沿中山北路敷设,管材为钢筋混凝土,管径DN3 500,长度1 414 m,埋深7.2~8.5 m,其中,16#~14#井修复段旱天流量5.8 m³/s,14#~武1#井修复段旱天流量9.0 m³/s。沿线通过新建4座检查井

(X1#~X4#),同时利用现有的16#、14#和武1#井满足修复期间临排、人员、材料、通风需求,总平面示意图见图1。管道修复采用S316L奥氏体不锈钢内衬,厚度为8 mm,在原管道内分段分块焊接成环,不锈钢内衬拼接完成后对5 cm的壁后空间进行注浆。管道修复效果见图2。

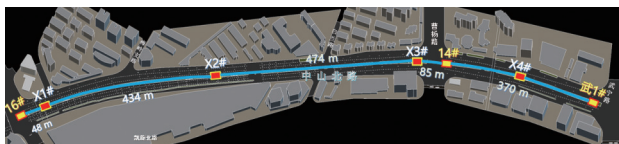


图1 项目总平面示意

Fig.1 Schematic diagram of general layout of the project

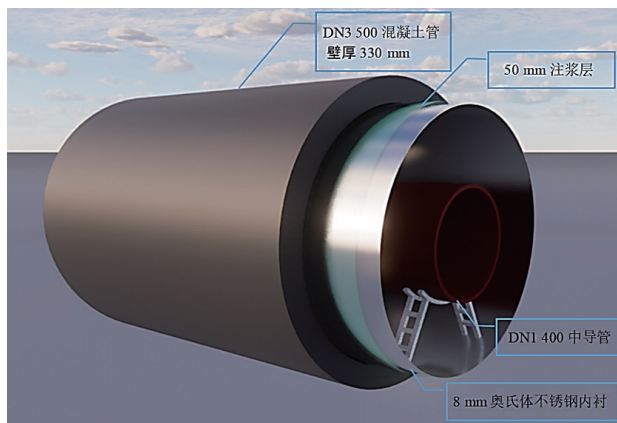


图2 管道修复效果

Fig.2 Pipeline rehabilitation effect

2 修复工艺流程

修复工艺流程如图3所示。

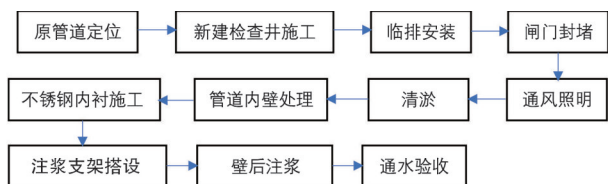


图3 修复工艺流程

Fig.3 Rehabilitation flow

首先需要对埋深7.2~8.5 m的DN3 500管道进行定位,后续完成新建检查井的施工。该工程采用的不锈钢内衬修复需在干仓环境进行,采用临排措施将上游污水转输至下游井。根据本标段内流量的不同,分为2种临排方案。16#~14#井选用DN1 600地面临排,敷设于路面中央绿化带内。14#~武1#井选用DN1 600地面临排+DN1 400中导管组合的方式,即合流污水采取分流量运行,一部分通过新建DN1 400中导管进行转输,另一部分经过临泵提升

后排入新建DN1 600地面临排管道,转输至下游检查井。上下游检查井位置设置闸门并封堵,检查井内临排系统布置如图4所示。临泵设置完成并运行后,通过中导管和地面临排将上游的污水调入下游,清理修复管段内的淤泥和污水,形成干仓。将内衬钢板和设备通过检查井运入管道进行钢板的拼装焊接,完成后对壁后空间注入微膨胀水泥浆液。

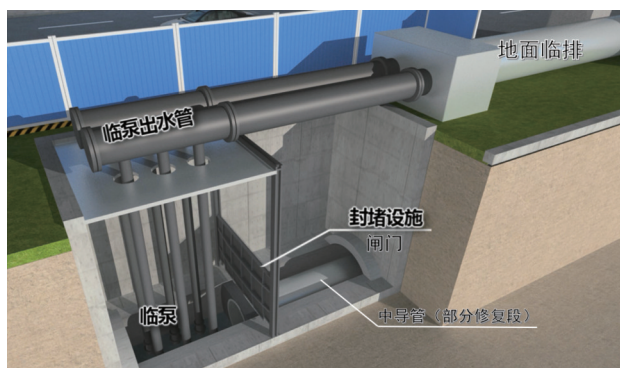


图4 临排系统布置

Fig.4 Layout plan of temporary drainage system

3 技术应用要点

3.1 新建检查井位置确定

为了满足修复期间的临排设置、投料、通风、人员进出和修复完成后的检修等功能,新建X1#~X4#共4座检查井。

该工程受现场环境限制,为了确保新建检查井能准确地落到管道上,采用钢探井工艺探摸原有管道位置。钢探井施工类似沉井,施工前需对四周土体进行双液注浆加固,为保证防渗效果,双液注浆孔钻至DN3 500管道的顶部,再通过挖土下沉使钢探井沉至管顶。钢探井尺寸为2.5 m×1.5 m×6.0 m,壁厚3 cm。该工程位于上海内环高架下方,受限高影响,6 m钢探井分为3节下沉,每节高2 m。第一节探井顶部下沉至地面上方30 cm,将第二节钢探井焊接至第一节顶部,第三节同理操作。

钢探井采用挖土下沉,挖土时遵循分层、均匀、对称的原则,先中心后侧边。下沉发生倾斜时,通过调整挖土和压重的方式,随时纠偏。DN3 500管顶并非平面,在钢探井与管顶的角落处两侧各设置一台小型抽水泵,将渗入的地下水及时抽出,结合周围的双液注浆层,可较好地控制探井底部的渗水。钢探井下沉至管顶后,清理管顶覆土,定位管

道中心后,向外放线确定基坑桩基的位置。定位完成后,应及时回填。

3.2 中导管推送技术

合流一期污水干线服务面积广、服务人口多、设计规模大,且需保持运行工况,为保证干仓修复,需要采用临排措施将上游污水转输至下游井。根据本标段内流量的不同,分为两种临排方案。16#~14#井旱天流量 $5.8\text{ m}^3/\text{s}$,选用DN1 600地面临排,敷设于路面中央绿化带内。14#~武1#井旱天流量 $9.0\text{ m}^3/\text{s}$,选用DN1 600地面临排+DN1 400中导管组合的方式,即合流污水采取分流量运行,一部分通过新建DN1 400中导管进行转输,另一部分通过临泵提升后排入新建DN1 600地面临排管道,转输至下游检查井。中导管为钢管,内径 1.4 m ,壁厚 14 mm ,长度 $3\text{ m}/\text{节}$,通过法兰连接。

14#~武1#井段选用DN1 600地面临排+DN1 400中导管组合的方式。DN3 500合流一期污水干线需在上游泵站停泵的前提下,管道内的水位降低后,进行中导管的推送。每天停泵的时间为23:00至第二天凌晨04:00,此段时间为用水低谷期,泵站压力相对较小。

对中导管的推送方式进行多次改进,最终形成较为高效的施工装置和方法。支撑桁架纵向间隔布置在原管道底部,桁架顶部横梁的两端固定在原管道两侧的内壁上。布设两根轨道和走道板于桁架的顶部横梁上。走道板位于外侧,用于施工期间管道内人员交通。轨道运输车行驶在两根轨道上,用于运输中导管。起吊架支设在轨道外侧的横梁,用于吊装运输到位的中导管。该装置示意图见图5。

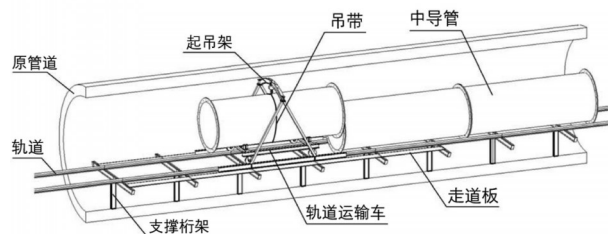


图5 中导管推送轨道装置示意

Fig.5 Schematic diagram of central guide conduit propulsion rail system

通过轨道将中导管推送到位后,前后中导管通过法兰互相连接。一个修复段内的中导管推送安装完成后进行闭水试验,验证通过后可以投入使用。采用该装置和方法后,推送中导管长度从 $12\text{ m}/\text{d}$

增至 $30\text{ m}/\text{d}$,施工进度和效率均大幅提升。

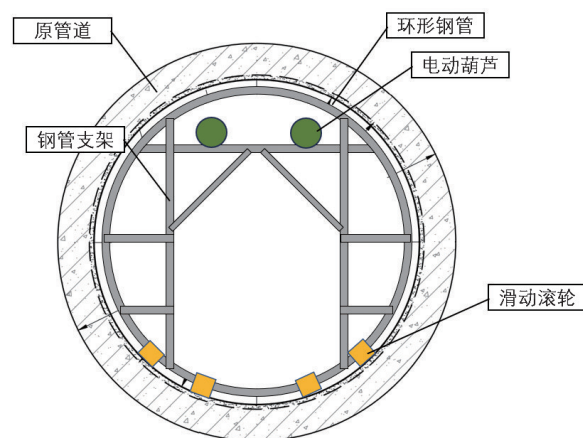
3.3 不锈钢内衬拼装技术

本工程内衬采用S316L奥氏体不锈钢材料,厚度为 8 mm ,每个管环由4片不锈钢弧形板组成,直径 3.4 m ,宽 1.5 m 。

16#~14#井段采用地面临排,管道内无中导管,14#~武1#井段采用地面临排+中导管临排,针对两种不同工况,研制出两种用于管道内衬修复拼接的装置。

3.3.1 无中导管时不锈钢内衬拼接装置

该装置如图6所示。



a. 不锈钢内衬拼接装置(无中导管)



b. 现场施工

图6 无中导管时不锈钢内衬拼接

Fig.6 Stainless steel liner assembly without central guide conduit

装置主体由前后两个环形钢管组成,两个环形钢管之间通过纵向钢管连接固定。纵向钢管外层

套有直径稍大的钢管,便于钢丝绳和弧形钢板内衬滑动。两个环形钢管由钢管支架加固。下方开设门洞,便于人员和材料通过。上方设置设备平台,放置2个电动葫芦,用于拉动弧形钢板内衬。装置

下方装有滚动滑轮,可以随着工作面在管道内部前后移动。

3.3.2 无中导管时内衬拼接流程

无中导管时的内衬拼接流程如图7所示。

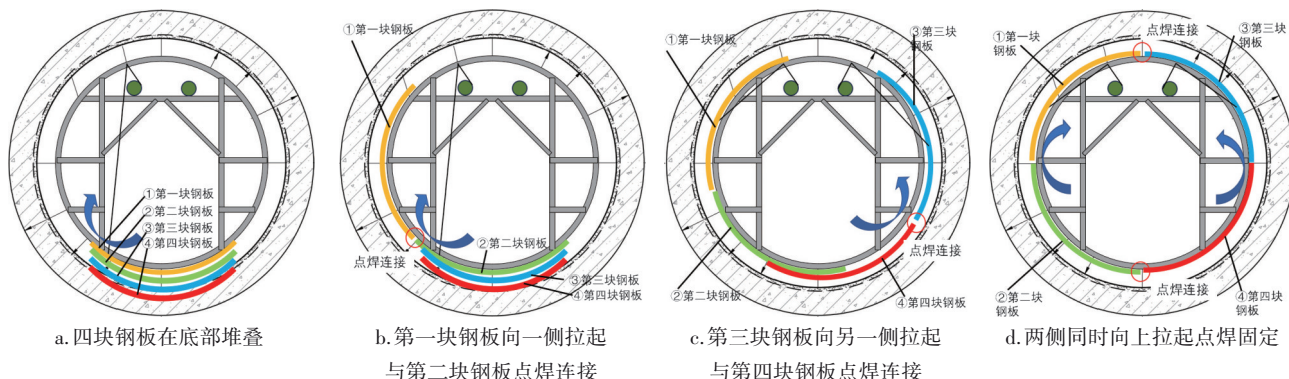


图7 无中导管时不锈钢内衬拼接流程

Fig.7 Stainless steel liner splicing process without central guide conduit

① 4块钢板内衬叠放于管道内,将装置移至钢板内衬位置;

② 将最上方的第一块钢板向一侧拉起,第一块钢板随着纵向钢管向上滑动至对应位置后,将第一块钢板和第二块钢板点焊固定;

③ 第一、二块钢板整体向一侧拉起,另一个电动葫芦将第三块钢板反方向拉起,第三块钢板拉至指定位置后,与第四块钢板点焊固定;

④ 第三、四块钢板固定后,整体向另一侧拉起,调整角度,与左侧钢板搭接,形成完整一环;一环完成后,通过底部滑轮移动至下一个工作面进行下一环的钢板焊接。

利用该装置可以解决在管道内部狭小空间完成钢板的吊运、拼接、焊接成环的问题,通过双电动

葫芦加快了施工的进度,在一环完成拼接以后,通过底部滑轮可以快速移动至下一个工作面,提高了施工效率,同时在底部开设了门洞,方便人员和材料通过。通过该装置,内衬钢板拼接速度由8环/d提升至15环/d。

3.3.3 有中导管时不锈钢内衬拼接装置

在中导管上部设置通长的滑轨,“Y”字型支架通过行走壁搭设于滑轨上,可以通过滑轨前后移动;在支架的两个悬臂端对称分布两个电动葫芦,用于吊起不锈钢钢板;悬臂自由端设置有顶托架,用于支撑吊起的不锈钢钢板,这样便于稳定后进行焊接。

3.3.4 有中导管时内衬拼接流程

有中导管时的不锈钢内衬拼接流程如图8所示。

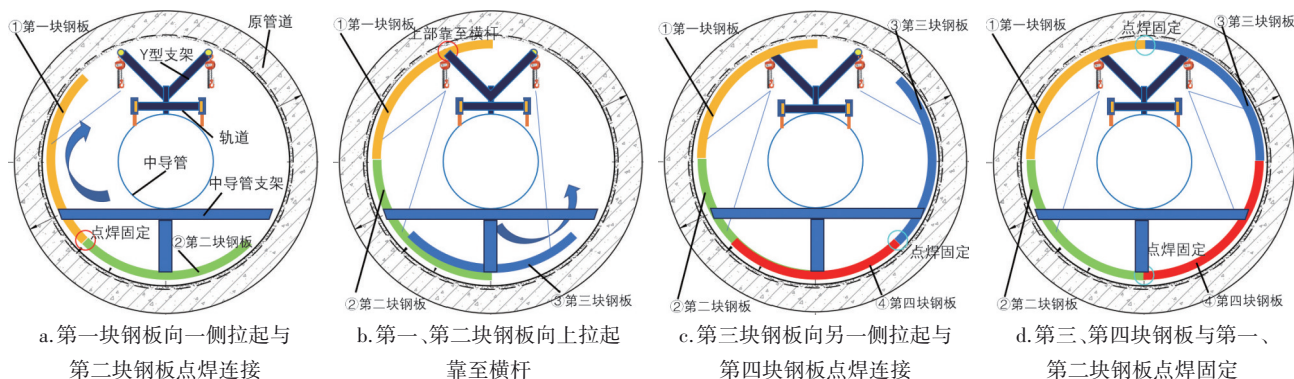


图8 有中导管时不锈钢内衬拼接流程

Fig.8 Stainless steel liner splicing process with central guide conduit

① 第一块钢板运至工作面,向一侧拉起;第二块钢板运至工作面,与第一块钢板点焊固定;

② 两块钢板点焊固定后整体向上拉起,靠至上部横杆,第三块钢板运至底部,向另一侧拉起;

③ 第四块钢板运至底部,并与第三块钢板点焊固定;

④ 右侧钢板整体上吊,靠至横杆,调整角度,与左侧钢板搭接,形成完整一环。

大口径管道内部布设中导管时,施工空间受到较大限制,该装置解决了对钢板的吊运、拼接、焊接等问题。上方的顶托架能分担钢板内衬的重力,并能对钢板内衬的位置纠偏,保证成环时角度不偏斜,左右两块板拼接时能辅助对齐。

3.4 壁后注浆技术

为了加固结构、防止渗漏、改善受力分布和延长使用寿命,需要对不锈钢内衬和原管道的间隙注浆。注浆材料使用自密实微膨胀水泥基灌浆料。由于不锈钢内衬壁厚较薄,不锈钢内衬结构的环刚度很低,可能不足以承受外部压力及内部压力而发生屈曲变形破坏^[2],因此需要对注浆过程中的压力和单次注浆量进行严格控制。

3.4.1 注浆压力控制

通过薄壁圆筒屈曲的临界压力公式^[3]计算钢板的极限压力:

$$P = \frac{0.807E}{(1-\nu^2)^{0.75}} \left(\frac{t}{r}\right)^{2.5} \left(\frac{t}{l}\right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: P 为极限压力,Pa; E 为S316L不锈钢钢板弹性模量,210 GPa; ν 为泊松比,0.3; r 为半径,1.7 m; t 为壁厚,8 mm; l 为注浆段每组注浆孔间距,2 m。

计算可得 $P=17\,476.0$ Pa。

沿程压力损失和局部压力损失之和计算公式如下:

$$\Delta P_{\text{沿程}} + \Delta P_{\text{局部}} = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} + (K_1 + K_2) \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

式中: $\Delta P_{\text{沿程}}$ 为沿程压力损失,kPa; $\Delta P_{\text{局部}}$ 为局部压力损失,kPa; f 为摩擦系数,橡胶软管取0.02; L 为注浆位置与注浆机之间的距离,m; D 为注浆管内径,50 mm; ρ 为浆液密度,1 702 kg/m³; v 为流速,1.02 m/s; K_1 、 K_2 均为管件局部阻力系数,1个直角弯头 $K_1=1.5$,1个阀门 $K_2=0.1$ 。

计算得:

$$\Delta P_{\text{沿程}} + \Delta P_{\text{局部}} = 354.2L + 2\,213.5 \quad (3)$$

则总压力值($P_{\text{总}}$)为:

$$P_{\text{总}} = \Delta P_{\text{沿程}} + \Delta P_{\text{局部}} + P = 19\,689.5 + 345.2L \quad (4)$$

该工程最远的注浆距离为400 m,根据式(4)计算得出不同距离需要施加的注浆压力值如表1所示。

表1 不同长度所需注浆压力值

Tab.1 Grouting pressure requirements for different lengths

注浆距离/m	0	50	100	150	200	250	300	350	400
压力值/kPa	19.7	37.0	54.2	71.5	88.7	106.0	123.2	140.5	157.8

3.4.2 分次注浆量控制

浆液注入后,液位上升会产生浮力,若浆液未及时固化,浮力会导致内衬上浮或横向偏移,破坏内衬管与原管道间的相对位置,造成注浆不匀,严重时可能会产生变形、管道整体上抬。因此必须通

过多次注浆,减少浮力对钢板内衬的影响。同时考虑到浆液特性,初凝后的浆液将不会产生浮力,需要对每次的注浆量进行单独计算。

不同阶段注浆后所产生的浮力情况示意如图9所示。

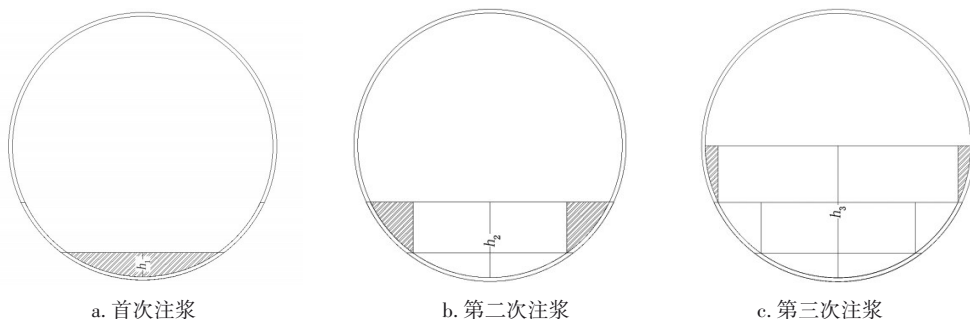


图9 不同阶段注浆产生的浮力

Fig.9 Buoyancy forces schematic across different stages

首次注浆后在每米内衬钢板上产生的浮力计算公式如下:

$$F_1 = \{ \cos^{-1}[(1.7-h_1)/1.7] \times 1.7^2 - (1.7-h_1) \times [1.7^2 - (1.7-h_1)^2]^{1/2} \} \times 1\,702 \times 9.81 \quad (5)$$

式中: F_1 为首次注浆后每米钢板上产生的浮力, N/m; h_1 为首次注浆高度, m。

钢环直径为 3.4 m, 浆液密度为 $1\,702\text{ kg/m}^3$, 每环钢板重力为 $6\,545.72\text{ N/m}$ 。

考虑注浆过程中搭建的内部支撑平均至每米钢板上的质量约为 50 kg, 可计算当注浆产生的浮力与钢板和内支撑的重力相等时的首次注浆高度 $h_1 = 315\text{ mm}$ 。

当首次注浆后的浆液初凝后, 此部分浆液不再产生浮力, 第二次注浆后在每米内衬钢板上产生的浮力计算公式如下:

$$F_2 = \{ \cos^{-1}[(1.7-h_2)/1.7] \times 1.7^2 - (1.7-h_2) \times [1.7^2 - (1.7-h_2)^2]^{1/2} \} \times 1\,702 \times 9.81 - (h_2-h_1) \times 2 \times [1.7^2 - (1.7-h_2)^2]^{1/2} \times 9.81 \times 1\,702 - F_1 \quad (6)$$

式中: F_2 为第二次注浆后每米钢板上产生的浮力, N/m; h_2 为第二次注浆高度, m。

注浆产生的浮力与钢板和内支撑的重力相等时的第二次注浆高度 $h_2 = 970\text{ mm}$ 。

第三次注浆高度超过 1.7 m, 即浆液超过半管时, 高于半管的浆液不会产生浮力。以浮力最大时的高度 1.7 m 计算, 第三次注浆产生的最大浮力 $F_3 = 2\,665.00\text{ N/m} < 6\,545.72\text{ N/m}$, 所以第三次以后注浆产生的浮力小于钢板自身重力。

按照伸缩缝位置将每个区间划分为 9 m 长的注浆段。根据注浆高度可计算出第一次的注浆量 $m_1 = 1\,987.5\text{ kg}$, 第二次的注浆量 $m_2 = 1\,633.4\text{ kg}$ 。

3.4.3 注浆支撑系统

为避免注浆过程中压力集中所产生的局部变形, 开发了注浆内支撑系统(见图 10)。系统通过加大内衬钢板与支撑的接触面积, 降低浮力和注浆压力对钢板的影响。

该工程不锈钢内衬宽度为 1.5 m, 支撑系统间距与内衬宽度一致, 保证每环不锈钢内衬都有一道支撑。每道支撑有 4 片弧形钢衬垫, 衬垫弧度与不锈钢内衬环一致。弧形钢衬垫通过木方与伸缩头相连接。伸缩头可以调节长度, 施加一定的预应力, 以抵消浮力和注浆压力的影响。相邻不锈钢内衬环之间的环形焊缝是易变形的薄弱位置, 每道支撑应施加于环形焊缝上, 以达到更好的抗变形效果。

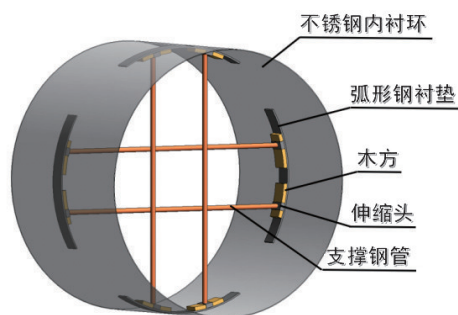


图 10 注浆支撑系统

Fig.10 Grouting support system

4 修复后功能性评价

4.1 不锈钢内衬质量检验

利用闭路电视(CCTV)设备对修复完成的管道进行检测, 不锈钢内衬外观光洁, 无影响使用功能的划痕或凹坑, 符合《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)的规定。

不锈钢内衬焊缝等级为一级, 全部进行外观检测和无损探伤检测。纵向和环向焊缝完整、连接紧密, 无气孔、鼓泡、裂缝、冷缝现象。超声波^[3]探伤比例为 100%, 其合格等级均为《焊缝无损检测 超声检测技术、检测等级和评定》(GB/T 11345—2013)B 级检验的 II 级及以上。

酸洗钝化^[4]是不锈钢表面处理的关键环节, 将钝化膏涂刷在焊缝表面, 可以去除表面污染物与氧化层, 形成致密钝化膜, 增强耐腐蚀性, 延长使用寿命。酸洗钝化完成后, 对管道内距离老井或新井 25 m 范围内的全部焊缝进行“蓝点检验”, 对中间部分的焊缝按照每 10 环不锈钢内衬抽检 1 环进行“蓝点检验”。“蓝点检验”标准参照《工业设备化学清洗中奥氏体不锈钢钝化膜质量的测试方法 蓝点法》(GB/T 25150—2010)。

该工程内衬质量检验均合格。

4.2 密实性试验

该工程对注浆密实度进行钻孔取样, 检查注浆质量。平均 100 m 抽检 1 环, 在顶部(12:00 方向)和侧边(03:00 或 09:00 方向)分别切割开不锈钢板, 观察内部注浆是否密实。若抽检合格, 则对切割下的不锈钢板坡口打磨后重新焊接。

采用敲击法检测钢板内衬的注浆密实度。使用橡胶头的检测锤, 避免划伤不锈钢表面。若出现敲击的声音沉闷, 疑似出现空鼓时, 则通过钻直径为 3 mm 的微创孔来检验。

本工程密实度试验结果均合格。

4.3 修复后管道过流能力

不锈钢内衬修复工艺对修复后过流断面都将造成不同程度的缩减,因此为确保修复后的管道过流能力仍满足设计过水需求,需进行修复后规模影响论证。

根据曼宁公式:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: Q 为雨天峰值流量,14.0 m³/s; n 为曼宁粗糙系数,混凝土管取0.013,不锈钢管取0.012; A 为过水断面面积,m²; R 为水力半径,m; S 为管道坡度,0.0007。

$$R = \frac{A}{P_z} = \frac{\frac{D_z^2}{8}(\theta - \sin \theta)}{\frac{D_z}{2}\theta} \quad (8)$$

式中: P_z 为湿周,m; θ 为过水断面对应的圆心角,rad; D_z 为管道直径,修复前为3.5 m,修复后为3.4 m。

为满足雨天峰值流量通过,修复前的过水断面对应圆心角为3.810 rad,充满度为0.665;修复后的过水断面对应圆心角为3.816 rad,充满度为0.664,小于修复前,满足要求。

根据式(7)计算满管时的流量,修复前过水断面面积为9.621 m²,修复后为9.079 m²;修复前 R 为0.875 m,修复后为0.850 m,则修复前满管流量 $Q_1=17.913$ m³/s,修复后满管流量 $Q_2=17.962$ m³/s, $Q_2>Q_1$,满足要求^[5]。

5 结论

该工程所采用的不锈钢内衬修复技术可以有效修复破损管道,增强管道强度,延长管道使用寿命。配合地面临排和中导管临排方式,可以有效解决环境限制、交通限制等难题,满足大城市在管道运行条件下的非开挖修复需求。该大口径污水管道不锈钢内衬修复技术研究成果,可为后续类似工

程提供参考。

参考文献:

- [1] 续青. 不锈钢薄板内衬技术在大口径供水管道修复中的工程实践[J]. 城镇供水, 2012(5):40-42.
XU Qing. Engineering practice of stainless steel thin-plate lining technology in large-diameter water supply pipeline rehabilitation [J]. City and Town Water Supply, 2012(5):40-42(in Chinese).
- [2] 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 Study on Buckling Failure of the Thin-wall Stainless Steel Liner of Pipelines[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017(in Chinese).
- [3] 王存汉. 汉中某水厂给水管施工不锈钢内衬修复法的应用[J]. 工程技术研究, 2022, 7(19):93-95.
WANG Cunhan. Application of stainless steel lining repair method in water supply pipeline construction of a water plant in Hanzhong [J]. Engineering and Technological Research, 2022, 7(19):93-95(in Chinese).
- [4] 徐吉, 曾新, 熊丹丹. 不锈钢内衬修复技术在d1 600给水管改造中的应用[J]. 城镇供水, 2024(1):34-39.
XU Ji, ZENG Xin, XIONG Dandan. Application of stainless steel lining repair technology in d1 600 water supply pipeline transformation [J]. City and Town Water Supply, 2024(1):34-39(in Chinese).
- [5] 张大华. 城市超大直径污水管道非开挖修复施工技术的应用[J]. 建筑施工, 2022, 44(10):2420-2424.
ZHANG Dahua. Application of trenchless repair construction technology for urban super large diameter sewage pipes [J]. Building Construction, 2022, 44(10):2420-2424(in Chinese).

作者简介:陆健(1989-),男,江苏启东人,学士,工程师,主要从事排水管网施工管理工作。

E-mail:counterlogic@foxmail.com

收稿日期:2025-04-09

修回日期:2025-05-06

(编辑:衣春敏)