

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.12.006

球墨铸铁管内衬修复大型预应力钢筋混凝土供水管道中试

徐明¹, 崔红军¹, 曹锋锋¹, 吴静¹, 李亚兵², 郑建建³,
冀嘉浩²

(1. 西安水务<集团>规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000; 2. 新兴铸管股份有限公司, 河北 邯郸 056300; 3. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 在城市更新改造推动城市可持续发展的时代背景下,本文针对直径为2 000 mm预应力钢筋混凝土供水管道老化问题,提出了一种新型球墨铸铁管内衬修复技术,并进行了中试研究。通过试验,评估了不同内衬材料下管道的过流能力、不同借转角度下的顶推效果,以及注浆材料的性能。此外,通过相同工况下不同施工方案对比,证实球墨铸铁管内穿插修复技术不仅技术可行,而且经济合理,可为城市供水系统的升级改造提供科学依据和技术支撑。

关键词: 供水管道; 球墨铸铁管; 内衬修复技术

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0039-05

Pilot Test on Ductile Iron Pipe Lining Rehabilitation Technology for Aging Large Prestressed Reinforced Concrete Water Supply Pipelines

XU Ming¹, CUI Hongjun¹, CAO Fengfeng¹, WU Jing¹, LI Yabing²,
ZHENG Jianjian³, JI Jiahao²

(1. Xi'an Water <Group> Planning and Design Institute Co. Ltd., Xi'an 710000, China;
2. Xinxing Ductile Iron Pipes Co. Ltd., Handan 056300, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In the context of promoting urban sustainable development through urban renewal and transformation, this article introduces an innovative ductile iron pipe lining rehabilitation technology to address the aging issues of prestressed reinforced concrete water supply pipelines with a diameter of 2 000 mm and presents pilot studies conducted to evaluate its effectiveness. Through experimental analysis, the study assessed the hydraulic performance of pipelines with different lining materials, the pushing efficiency under various deflection angles, and the properties of grouting materials. Furthermore, by comparing different construction methods under identical working conditions, the results demonstrate that ductile iron lining rehabilitation technology is not only technically feasible but also economically viable. This technology provides a robust scientific basis and practical technical support for the upgrading and modernization of urban water supply system.

Keywords: water supply pipeline; ductile iron pipe; lining rehabilitation technology

随着城市化进程的加速推进,城市更新已成为推动城市可持续发展的关键一环。在这一过程中,城市基础设施的升级与改造显得尤为重要,尤其是

供水系统,作为城市生活的命脉之一,其安全与稳定直接关系到居民的生活质量和社会经济的平稳运行。然而,随着时间的推移,许多城市早期建设

的预应力钢筋混凝土供水管道逐渐步入老化阶段,面临泄漏、爆裂等风险,不仅影响供水效率,更对居民生活用水安全构成严重威胁^[1]。

传统管道修复方法如原位开挖翻建存在诸多局限:一是围挡占用现状道路、开挖路面,影响市容交通、破坏环境;二是老城区地下管线错综复杂,开挖施工空间受限,极易破坏或损伤其他现状地下管线;三是部分区域地下空间有限,无法铺设新管道。相比之下,非开挖管道修复技术具有显著优势,如施工周期短、对地面及地下设施影响小、不额外占用地下空间等。实践表明,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^[2-4]。

目前,国内供水管道修复工艺主要有:紫外光固化内衬修复技术(UV-CIPP)、喷涂法修复技术、穿插法管道修复技术、薄壁不锈钢内衬修复技术等。而球墨铸铁管内衬修复技术作为一种创新性解决

方案,以其良好的机械性能、耐腐蚀性和施工便捷性,在解决大型预应力钢筋混凝土供水管道的老化问题上展现出巨大潜力。

选取直径为2 000 mm老化预应力钢筋混凝土供水管道作为研究对象,通过中试来验证球墨铸铁管内衬修复技术的可行性以及有效性,并探讨其在实际大型供水管道修复应用中的优化方向,以期为城市供水系统的升级改造提供科学依据和技术支撑。

1 非开挖内衬修复方式论证

目前,在供水管道修复领域,国内外应用较多的非开挖内衬修复工艺主要有原位热塑成型法(FIPP)、高密度聚乙烯(HDPE)缩径拉入内衬法、UV-CIPP、薄壁不锈钢内衬法、球墨铸铁管原位扩径法及内衬钢管法。综合实际应用情况和非开挖修复技术特点,对不同内衬修复工艺进行对比分析,结果如表1所示。

表1 不同内衬修复技术对比分析

Tab.1 Comparative analysis of different lining rehabilitation technologies

修复工艺	是否满足过水量要求	修复后承压能力	适应管径	施工速度	工程费用(估算)
FIPP	满足	略有提升	DN200 ~ DN800	100 m/24 h	DN800, 4 500 元/m
HDPE缩径拉入内衬法	满足	略有提升	DN100 ~ DN1 500	100 m/24 h	DN1 200, 3 900 元/m
UV-CIPP	满足	略有提升	DN300 ~ DN1 500	10 m/24 h	DN1 500, 15 000 元/m
薄壁不锈钢内衬法	满足	略有提升	DN1 000 ~ DN1 800	10 m/24 h	DN1 000, 15 000 元/m
球墨铸铁管原位扩径法	满足	大幅提升	DN1 000 ~ DN2 600	50 m/24 h	DN2 000, 15 500 元/m
内衬钢管法	满足	大幅提升	≥DN1 000	6 m/24 h	DN2 000, 16 500 元/m

综上,球墨铸铁管道适用于大口径新管进行穿插施工,施工周期及工程费用相比于传统的修复工艺具备一定的优势。因此,本文模拟实际情况,在直径为2 000 mm老化预应力钢筋混凝土供水管道内部穿插球墨铸铁管进行中试。

2 球墨铸铁管内衬修复技术原理与特点

该技术是在直径为2 000 mm老化预应力钢筋混凝土供水管道内部穿插球墨铸铁管道,通过专用设备和工艺实现两者间的紧密连接。此创新方法在保证供水效率的情况下,不仅能解决大型老旧供水管道由老化、破损带来的供水安全隐患,还会显著提升管道的耐久性。该技术具有以下特点:

① 适应范围广。球墨铸铁管承插口处设计有一定的借转角度,这一特性使其对沉降、平移等由地质变化或时间因素导致老化的管道具有极强的适应性,能够保障修复后管道系统的安全、稳定。

② 施工周期短。该技术无需大面积挖掘地面,可简化传统修复方法的烦琐工序,从而缩短施工周期,并降低对城市交通和居民生活的影响。

③ 成本低。该技术能够减少传统修复所需的材料、机械设备及人工投入,整体修复成本显著降低,为用户提供更具经济性的解决方案。

④ 对居民生活影响小。该技术在施工期间无需长时间停水,可以最大限度地减小对城市供水以及居民日常生活的干扰,体现以人为本的设计理念。

⑤ 对环境影响小。该技术减少了因挖掘施工而产生的扬尘、噪声污染,以及对周边绿化和生态环境的破坏。同时,球墨铸铁管道具有较长的使用寿命和良好的耐腐蚀性能,从长远来看,有助于减少频繁更换管道产生的废弃物,进一步降低对环境的负面影响。

3 中试研究

3.1 中试地点与条件

中试场地占地面积约2 500 m²,包括混凝土工作井、钢结构装配井及配套设施。试验对象实际工程环境:由25节直径 $d2\ 000\text{ mm}$ 预应力钢筋混凝土管道组成,总长为75 m,模拟管顶覆土2.5 m,每节管道长度为3 m。通过闭路电视(CCTV)检测获取管道内的基础数据信息,并生成三维模型指导顶进施工。

本次中试相邻预应力钢筋混凝土管道的偏转角度按照施工设备的极限纠偏角度进行设置,其难度远大于实际工程环境下的管道偏转角度,设置的偏转角度如表2所示。

表2 预应力钢筋混凝土管道不同管节偏转角度设置

Tab.2 Deflection angle settings for different prestressed reinforced concrete pipeline sections

管节编号	测量里程/m	承插角/(°)	承插角方向/(°)	前方管径/mm	后方管径/mm
1	3	1.61	55.26	2 001.21	1 998.69
2	3	1.56	229.25	2 001.68	1 997.58
3	3	0.16	268.40	2 003.93	1 998.77
4	3	1.00	227.49	2 004.02	2 001.99
5	3	1.36	158.33	2 002.33	2 000.73
6	3	0.79	70.73	2 003.92	2 003.43
7	3	1.30	187.58	2 003.52	2 000.33
8	3	0.95	337.72	2 005.33	2 000.48
9	3	1.70	14.19	2 003.64	2 003.52
10	3	0.56	77.98	2 002.95	2 001.95
11	3	0.84	267.81	2 005.11	2 003.00
12	3	1.36	342.94	2 003.90	2 003.94
13	3	0.58	183.90	2 004.37	2 003.47
14	3	0.83	107.66	2 005.12	2 003.97
15	3	1.68	216.14	2 003.06	2 003.68
16	3	1.84	144.96	2 003.56	2 001.90
17	3	2.62	204.90	2 004.12	2 001.83
18	3	2.16	1.35	2 003.59	2 003.43
19	3	3.69	40.30	2 003.66	2 001.08
20	3	1.52	303.69	2 002.19	2 002.54
21	3	1.53	299.53	2 001.90	1 999.74
22	3	2.59	168.48	2 003.89	2 000.20
23	3	2.63	320.95	2 003.63	2 004.80
24	3	2.31	154.04	2 004.59	2 002.07
25	3	3.74	339.51	2 012.39	2 005.68

3.2 技术参数与施工步骤

① 技术参数

根据老化管道的现场实际情况以及修复和功能要求,确定内穿插球墨铸铁管道的直径、壁厚、长度等参数。同时,制定施工专项方案。

② 施工步骤

大型老化预应力钢筋混凝土供水管道内穿插球墨铸铁管修复技术路线如图1所示。



图1 管道修复技术路线

Fig.1 Technology roadmap for pipeline rehabilitation

a. 清洗与检查:对老化管道进行全面清洗、检查,确保无残留物影响穿插新管道。

b. 铣削扩径:根据CCTV检测确定的路由或线位,铣削机器人对原预应力钢筋混凝土管道进行铣削扩径,以减少穿管摩擦阻力和对新管道防护层的磨损。

c. 内衬新管道:使用专用设备和工艺将新球墨铸铁管道穿入老化管道。

d. 连接与固定:通过专用连接件将新管道与老化管道紧密连接,并注浆密实固定。

e. 检测与测试:对修复后的管道进行打压测试和耐腐蚀性能测试,确保其符合相关标准和要求。

3.3 试验研究及结果分析

① 不同内衬材料下管道过流能力试验

现状管径 $d2\ 000\text{ mm}$ 预应力钢筋混凝土供水管道采用内衬球墨铸铁管修复方式。根据《城镇给水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 244—2016),对非开挖修复后给水管段的沿程损失与修复前管段的沿程损失比值进行计算,算式如下:

$$\frac{h_y'}{h_y} = \left(\frac{C_h'}{C_h} \right)^{1.852} \left(\frac{d_j'}{d_j} \right)^{4.87} \quad (1)$$

式中: h_y 为修复前管段沿程水头损失; h_y' 为修复后管段沿程水头损失; C_h 为修复前管段海曾-威廉系数,取110~130; C_h' 为修复后管段海曾-威廉系数,取140~150; d_j 为修复前管段内径; d_j' 为修复后管段内径。

若修复前、后管段海曾-威廉系数分别取下限值110和140,修复后管径取 $d1\ 800\text{ mm}$,经计算,内衬 $d1\ 800\text{ mm}$ 球墨铸铁管修复后的沿程损失与修复管道前的沿程损失的比值为0.93。结合海曾-威廉

公式进行计算,修复后管道流量为原管道的95%(重力流供水工况),满足要求。

② 不同偏转角度下的顶推试验研究

根据三维模型和检测数据,可以模拟实际工况,设置不同的偏转角度。本次模拟两处偏转角度工况进行顶推试验,即:第18节与第19节预应力钢筋混凝土管道在 40.30° 方向偏转角度为 3.69° ;第19节与第20节预应力钢筋混凝土管道在 303.69° 方向偏转角度为 1.52° 。

在上述极端偏转角度下,当铣削内径达到2 050 mm时,对模拟整段管道赋予一定的纠偏能力后,可实现顺利顶进。

③ 顶进完成后球墨铸铁管偏转角度

内衬球墨铸铁管由23节直径为1 800 mm管道组成,每节管道长度为3.5 m,检测长度约80 m。不同球墨铸铁管节偏转角度设置见表3。导向顶进水平轨迹和高程轨迹分别见图2、3。

表3 不同球墨铸铁管节偏转角度设置

Tab.3 Deflection angle settings for different ductile iron pipe sections

管节 编号	测量里 程/m	承插角/ ($^\circ$)	承插角 方向/($^\circ$)	前方管 径/mm	后方管 径/mm
1	2.08	0.31	72.50	1 828.49	1 821.57
2	5.43	0.15	255.84	1 820.32	1 830.78
3	8.93	0.48	259.51	1 826.54	1 830.78
4	12.30	0.93	219.60	1 829.30	1 827.21
5	15.86	0.64	191.22	1 824.43	1 827.21
6	19.33	0.27	104.77	1 830.28	1 825.67
7	22.89	0.62	271.85	1 828.61	1 834.56
8	26.38	0.51	295.86	1 830.00	1 827.51
9	29.76	0.53	351.71	1 834.12	1 831.55
10	33.37	1.19	315.86	1 824.05	1 832.24
11	36.65	0.62	302.34	1 833.35	1 832.24
12	40.19	0.57	214.46	1 828.82	1 832.03
13	43.59	0.38	189.55	1 826.14	1 826.66
14	47.24	1.71	184.07	1 827.04	1 823.49
15	50.56	0.35	211.32	1 823.42	1 827.08
16	53.88	0.23	304.42	1 827.28	1 822.98
17	57.58	0.89	346.22	1 825.09	1 830.07
18	60.95	1.87	342.76	1 826.74	1 824.18
19	64.30	1.30	307.78	1 824.40	1 826.33
20	67.72	0.24	269.48	1 819.45	1 823.69
21	72.74	0.38	298.16	1 833.49	1 820.75
22	74.77	0.83	297.43	1 825.76	1 832.92
23	77.58	1.17	286.00	1 825.11	1 825.03

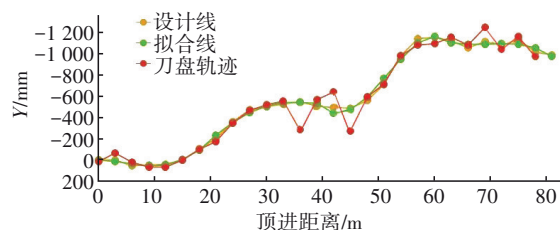


图2 导向顶进水平轨迹

Fig.2 Horizontal trajectory of guided jacking

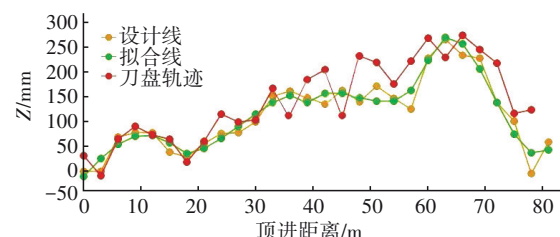


图3 导向顶进高程轨迹

Fig.3 Elevation trajectory of guided jacking

④ 注浆材料

本次中试通过材料调配、密闭空间试验及标准石块压力试验,最终选择采用粉状原料搅拌形成自凝流塑浆,然后泵送至新旧管道间缝隙,实现填缝密实状态。经过试验可知,该材料在密闭空间凝固后强度可忽略不计,考虑到防止管道振动,注浆材料的使用强度为0.154 MPa。

填实新旧管道间的缝隙后,内衬球墨铸铁管道会随原有水泥管道同频振动。结合其特性,即使水泥管道受地震影响出现损坏,球墨铸铁管在一定振幅下也具备一定的防护能力。

3.4 重难点试验研究及解决措施

由于施工工艺采用轴线校正及内穿插球墨铸铁管,相邻管道的偏转角度越大,顶进轴线的校正难度也越大。因此,在施工初期对管道进行CCTV检测,结合原有管道的偏转角度和空间坐标,拟合顶进路由或线位。根据顶进路由(或线位),确定老化预应力钢筋混凝土管道阻碍顶进的位置并进行铣削校正,避免铣削过度。

① 修复效果综合评估

中试过程中,系统评估了修复工作的成效。经过严格的打压测试和耐腐蚀性能测试验证,新管道完全符合城市供水系统的性能指标和相关标准,达到预期工程效果。此外,对修复后的供水系统进行实际运行测试,结果显示系统的安全性和稳定性均实现显著提升。

② 经济性深度分析

为考察该试验方法的经济性,在相同工况下,对比分析原管道内衬 DN1 820 钢管、新管位顶管敷

设 DN2 020 钢管和新管位顶管敷设 $d2\ 000\ \text{mm}$ 球墨铸铁管的工程总投资及单位造价,具体分析结果如表4所示。

表 4 不同施工方案投资对比分析

Tab.4 Comparative analysis of investment in different construction schemes

施工方案	工程总投资/万元	直接工程费/万元	单位管长费用/(元/m)
原管道内穿插 $d1\ 800\ \text{mm}$ 球墨铸铁管	1 776.13	1 330.58	23 323
原管道内衬 DN1 820 钢管	1 936.37	1 461.79	25 623
新管位顶管敷设 DN2 020 钢管	2 263.44	1 729.61	30 318
新管位顶管敷设 $d2\ 000\ \text{mm}$ 球墨铸铁管	2 244.05	1 713.73	30 039

由表4可知,非开挖内衬修复技术方案的工程总投资略低于新管位顶管敷设管道修复方案。因此,该试验可佐证内衬球墨铸铁管修复技术不仅在技术上可行,而且在经济效益上也具有一定优势。

4 讨论

① 针对直径为 $2\ 000\ \text{mm}$ 的老化预应力钢筋混凝土供水管道,球墨铸铁管内穿插修复技术被证实为一种既可行又高效的修复方案,修复后管道流量为原管道的95%(重力流供水工况下),基本能够满足原管道流量要求。

② 新增内衬球墨铸铁管道的各项性能指标均达到城市供水系统的相关标准和要求。此外,经过修复后的供水系统在应对地质沉降以及抗震等方面展现出良好的防护能力。

③ 该技术具有施工周期短、成本低、对居民生活影响小等优点,值得相关领域借鉴与推广。

5 结语

对直径为 $2\ 000\ \text{mm}$ 的老化预应力钢筋混凝土供水管道进行球墨铸铁管内衬修复,中试结果证实该技术具有可行性、有效性,并成功实现预期目标。未来,将进一步探索其优化与改进方向,以提升修复效果和拓宽应用范围。同时,也应密切关注该技术在其他类型管道修复中的潜在应用,为城市更新提供技术支持和科学依据。

参考文献:

[1] 罗智程. 给水管道不锈钢内衬非开挖修复技术研究与应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37 (16): 102-107.
LUO Z C. Research and application of trenchless repair

technology for stainless steel lining of water supply pipeline[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(16): 102-107(in Chinese).

[2] 郑小明, 张严甫, 李长俊, 等. 给水管道薄壁不锈钢内衬层耐负压试验研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31 (23): 59-63, 68.
ZHENG X M, ZHANG Y F, LI C J, 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).

[3] 周超哲, 卢炜, 栗栋江, 等. 给水大口径水泥管不锈钢内衬法修复应用案例分析[J]. 城镇供水, 2023 (5): 33-38.
ZHOU C Z, LU W, SU D J, et al. Application of stainless steel lining of large diameter cement pipe for water supply in long-distance trenchless rehabilitation [J]. City and Town Water Supply, 2023(5): 33-38(in Chinese).

[4] 张叮叮. 给水大口径钢管穿插刚性管长距修复应用案例分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 121-125.
ZHANG D D. Application of large-diameter steel pipe slip lining with rigid pipeline in long-distance trenchless rehabilitation[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (16): 121-125(in Chinese).

作者简介:徐明(1983—),男,陕西定边人,硕士,高级工程师,研究方向为给排水工程技术及智慧水务。

E-mail:315045024@qq.com

收稿日期:2024-12-12

修回日期:2025-03-13

(编辑:丁彩娟)