

老旧城区排水管道地箭式微顶管技术应用研究

——以武汉市老城区改造为例

朱先均, 罗利

(中国五冶集团有限公司, 成都 610063)

摘要: 以武汉市历史风貌区老旧城区排水改造工程为背景,对复杂地质下地箭式微型顶管施工进行分析研究,介绍了微型顶管技术的工艺原理,重点阐述了微型顶管技术在城市排水改造工程中的施工工艺及控制措施,提出了高压旋喷桩止水帷幕+洞口橡胶止水装置以及触变泥浆智能注浆系统对流沙、涌泥的防治方法,切实解决了传统开槽法排水管道施工的不足,为类似工程施工提供借鉴。

关键词: 地箭式微型顶管; 排水改造; 钢沉井; 激光经纬仪; 注浆系统

中图分类号: TU990.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)08-0263-07

地下管网作为城市基础建设中的关键部分,在城市建设以及规划过程中起着重要作用,随着城镇化进程的加快,老旧城区改造过程中建设庞大的地下管网、地下管道系统显得尤为重要^[1]。由于老旧城区排水管道管径偏小,过水能力较差,管道老化严重,城市更新管网改造势在必行,为此,城区顶管等非开挖技术应运而生,众多工程人员也对顶管施工技术进行了大量研究^[2-4]。目前,常见的小口径市政排水管道施工主要为开槽埋管和水平定向钻施工^[5],这两种工艺对周边环境扰动大,易堵塞交通,影响城市面貌,给人民生活、工作带来诸多不便。而微型顶管技术是一种占地面积较小,对环境影响较小的地下管道非开挖铺设施工技术^[6],该技术有管道敷设精度高、施工周期短、道路交通阻碍小等诸多优点^[7]。微型顶管技术根据出土方式不同可分为地箭式、螺旋式^[8],而地箭式则更为常用。张欢^[9]介绍了地箭式微型顶管技术在宝山区二级管网工程中的应用;林永江和屈新龙^[10]以北京市朝阳区郭家庄路污水管道工程实例,介绍了该技术在小口径管道施工中的工艺流程及操作要点。周军等^[11]通过研究得出地箭式微型顶管施工技术适用于DN600及以下的管道工程施工。

本文结合武汉市历史风貌区老旧小区供水、排水改造工程案例,以老城区复杂地质条件下地箭式微型顶管施工为背景,研究微型顶管技术在城市排

水改造工程中的施工工艺及控制措施,并针对顶管施工中的流沙、涌泥等难题提出有效防治措施,为今后类似工程起到一定的参考。

1 工程概况

1.1 项目情况

历史风貌区老旧小区供水、排水改造项目位于武汉市江岸区历史风貌保护老区,拟施工干管总长1.95 km,采用微型顶管施工。顶管管径分别为600 mm、800 mm、1 000 mm,管材为立式振动成型玻璃纤维增强塑料管,壁厚为60~120 mm,公称压力为1.0 MPa,环刚度为20 kN/m²,顶管管节长1 m。顶管管道位于车行道下方,周边为现状道路,历史保护建筑物众多,杆、线及各种地下管线复杂。顶管位置、埋深及穿越土层情况如表1所示。

1.2 水文地质情况

工程地形地貌复杂,有上层滞水、承压水等多层

表1 顶管路线概况统计

道路名称	井段	埋深/m	管径/mm	具体位置	穿越土层情况
蔡锷路	CE2~CE10	3.56~4.14	1 000	车行道	杂填土、粉质黏土
合作路	HZ1~HZ7	3.75~4.08	600	车行道	杂填土、粉质黏土
	HZ7~HZ14	4.11~4.51	800	车行道	杂填土、粉质黏土

收稿日期: 2024-01-25

基金项目: 中国中冶重大研发项目(中冶科技[2023]5号-5);四川省住房城乡建设领域科技创新研究课题(SCJSKJ2021-43)

作者简介: 朱先均(1990—),男,四川达州人,硕士,工程师,研究方向为市政与公路工程施工技术与管理;通信作者罗利(1978—),男,四川宜宾人,正高级工程师,研究方向为市政工程施工技术。

地下水,且施工场地临近长江,其地下水受长江水位影响较大,工程区地下水与长江水为互补关系。上层滞水赋存于填土中,上层滞水水位高程在 22.65~23.82 m(水位埋深 1.0~2.8 m)。水位随季节、降雨量及地形变化影响明显。承压水赋存于场地下部的粉质黏土、粉土、粉砂互层和粉砂层中,承压水位高程在 18.16~18.25 m,其水位变化幅度受长江水位涨落影响,年变幅为 3.0~4.0 m。

顶管段主要土层自上而下依次为人工填土、粉质细土、粉土、粉质黏土、粉砂。

2 微型顶管工艺原理

工程采用地箭式微型顶管工艺,原理是利用液压装置,以先导管作为导体,在其末端连接黑管(螺旋出土管)和扩孔切削机头,再将拟铺设的管材接在机头的后面,然后按照设计轨迹顶进,最终完成新管道的铺设。

微型顶管分为三次施工:第一次将先导管推进贯通;第二次以先导管为中心推进黑管;第三次利用液压顶进机头将管道推进。工艺原理如图 1 所示。

3 施工工艺流程

地箭式微型顶管的施工工艺流程如图 2 所示。

4 微型顶管施工关键工艺分析

4.1 顶管区域现场勘探

根据沿线管线及建筑物分布情况,结合现场实际勘测的结果,对施工范围内原有地下管线做全面

探查(表 2),以便了解原有市政管网给排水及通信、电力、路灯与交通信号灯等管线的位置,并在地面上标注原有管线的位置、高程,现场用标钉与红线标志清楚,并绘制出综合管线分布图,为后续施工制定保护或迁移方案提供依据。

4.2 钢沉井(工作/接收井)施工

微型顶管用工作/接收井采用钢沉井形式,沉井施工。钢沉井使用直径尺寸为 2 090 mm、2 590 mm 和 3 290 mm,采用 Q235B 钢板制成,壁厚 20 mm。每节标准钢沉井的高度为 2 m。为减少钢沉井在下沉过程中摩擦阻力以及不同土质的干扰,刃脚节钢沉井(最下节接土钢沉井)接土一侧需加工成锯齿状(图 3),锯齿深度为 10~20 cm。每节钢沉井之间的连接在入土之前焊接牢固,钢沉井下沉至设计标高后用 C30 混凝土封底。

4.3 高压旋喷桩止水帷幕+洞口穿墙橡胶止水

4.3.1 高压旋喷桩止水帷幕

粉(砂)土地层在沉井下沉过程中遇到流沙、涌

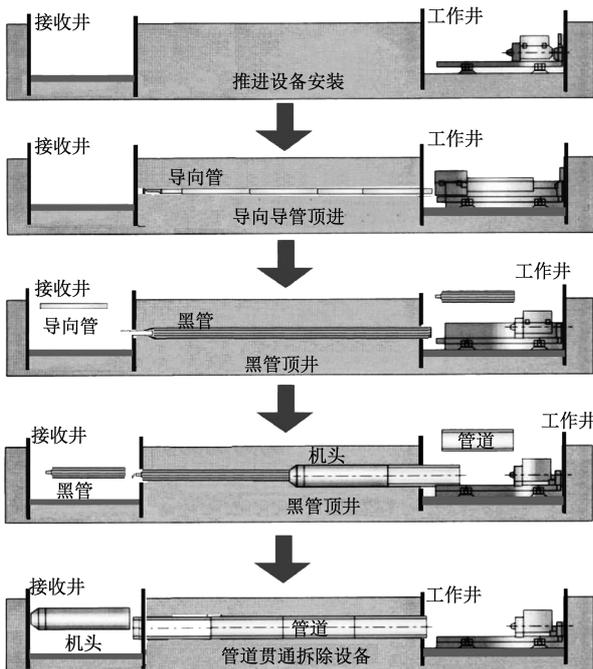


图 1 微型顶管工艺原理

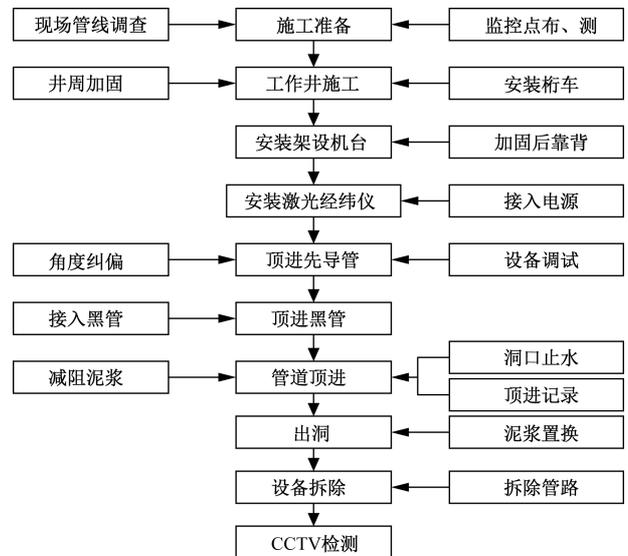


图 2 地箭式微型顶管施工工艺流程

表 2 周边地下管线统计

路名	管线类型	位置	埋深/m	处理计划
蔡锷路	供水	车行道上	0.5~1.4	不影响施工
	排水	车行道上	2.4~3.1	需废弃
	燃气	车行道上	1.2	不影响施工
	供电	人行道上	1.4~1.6	不影响施工
	路灯	人行道上	0.2~0.5	不影响施工
合作路	通信	车行道上	0.3~1.2	不影响施工
	供水	车行道上	0.6~1.4	须迁改
	排水	车行道上	1.1~3.3	需废弃
	燃气	车行道上	1.2	鄱阳路横穿,须迁改
	供电	人行道上	0.3~0.9	不影响施工
	路灯	人行道上	0.2~0.5	不影响施工
	通信	车行道上	0.4~1.7	须迁改

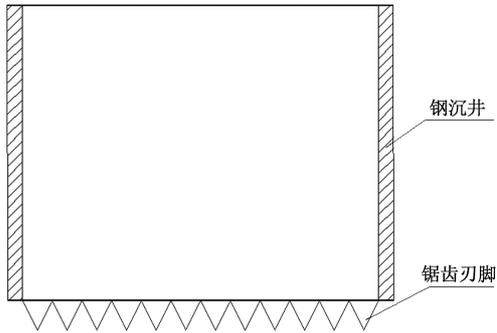


图3 钢沉井刃脚示意图

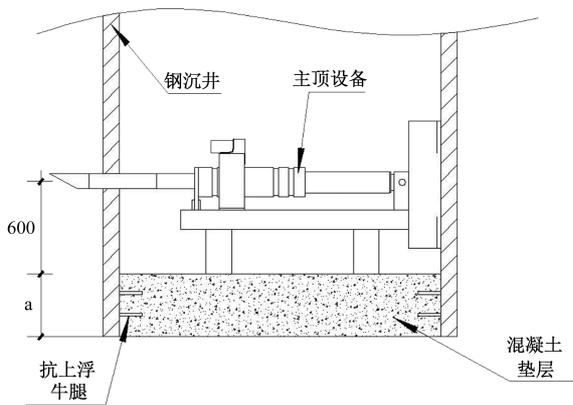


图4 工作(始发)井布置

泥易导致周边塌陷,为此,采用如下措施:先向井底抛填大石块,以此增加土的压重,减小或阻止流沙继续涌入井底,再采用高压旋喷桩止水帷幕对井周进行防护,同时也可以起到加固洞门的作用,防止地面及周边建筑物塌陷。高压旋喷桩桩长应进入底板底标高以下 500 mm,桩径为 500 mm,桩中心距井壁 250 mm。加固方式如图 5 和图 6 所示。

4.3.2 洞口穿墙橡胶止水

为保证顶管进、出洞及后续顶进的顺利进行,

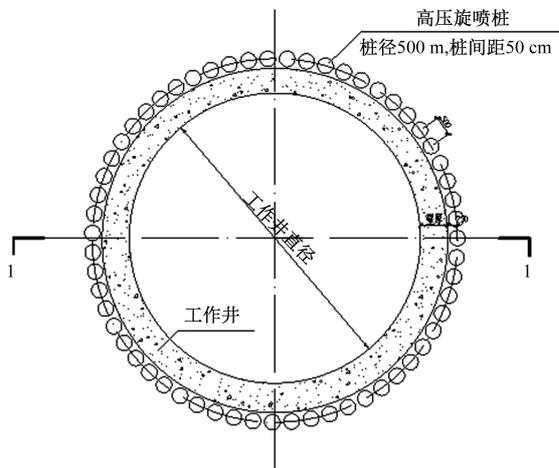


图5 井周旋喷桩加固平面

控制管道外部水土和减阻泥浆流入顶管工作井,保证施工安全及良好有效的泥浆套形成,在止水墙上设置穿墙止水装置。止水板安装在工作井预留洞口,具有防止地下水、泥沙从管节与止水板之间的间隙流到工作井的作用。穿墙橡胶止水装置构造如图 7 所示。

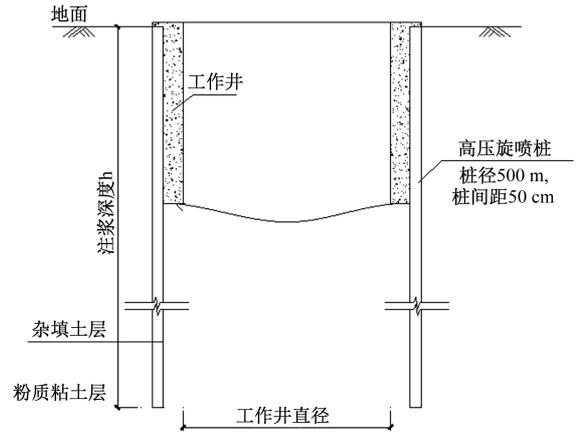


图6 井周旋喷桩加固剖面

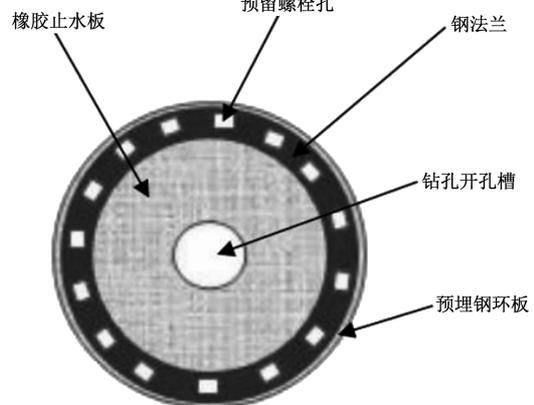
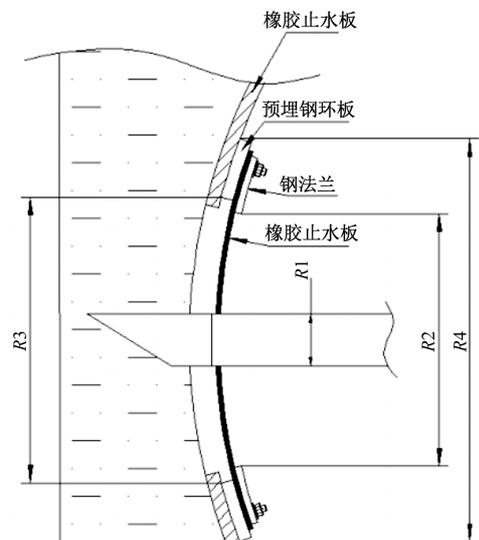


图7 橡胶止水装置构造示意图

4.4 顶管设备选型及安装

工作井施工完成后,在井内安装顶管设备。根据顶进管道中心轴线,安装好工作井内底座槽钢,槽钢底与地板预留 500 mm 空间,作为存储地下水及少量泥沙的空间。底座槽钢完成后,根据管道轴线安装好底板及推进台,通过底板上的紧固螺栓固定好顶管推进台。推进台后背与弧形钢沉井壁之间的空隙采用三角铁焊接加固,以保证推进工作台顶进过程中的稳定性。

根据管道轴线安装好经纬仪架,底座用快速水泥固定。把激光经纬仪安装在经纬仪架上,通过调整经纬仪架的高度控制管道高程,调整经纬仪左右方向控制管道轴线。激光经纬仪安装完毕后,设置管道坡度。管道顶进方向为上坡时,坡度值为正数,反之为负数。

4.5 顶管顶力计算

本次顶力计算以 d1000 玻璃纤维增强塑料管^[12]为例,根据《给水排水工程顶管技术规程》^[13](CECS 246-2008)的要求,顶管施工总顶力公式如下

$$F_p = \pi D_0 L f_k + N_F \quad (1)$$

式中: F_p 为顶进阻力或总顶力,KN; D_0 为管道外径,m; L 为管道设计顶进长度,m; f_k 为管道外壁与土的单位面积平均摩阻力,KN/m²; N_F 为顶管机迎面阻力,KN,如表 3 所示。

不同类型顶管机迎面阻力宜按下列计算式:

$$N_F = 1/4 \pi D_R^2 P \quad (2)$$

式中: D_R 为顶管机外径,mm; P 为顶管机下部 1/3 处的被动土压力,kN/m²。

综上,计算 d1000 顶管施工所需总顶力为: $F = \pi \times 1.12 \times 50 \times 6 + 26.5 = 1\ 082$ (kN),即为本次顶管工程所需最大顶力。

参考最大顶力的估算值,该工程选用油压动力组及推进台工艺参数如表 4 所示。

顶管推进台最大推力为 2 000 kN,按照 0.8 效率系数计算得出设备顶推能力: $2\ 000 \times 0.8 = 1\ 600$ kN > 1 082 kN;计算结果表明,总顶力远小于推进力,主顶设备选用满足使用顶进要求。

4.6 顶管设备安装

4.6.1 导轨支架的制作

导轨支架采用钢板制作,以防止固定在工作井底板上的导轨在管道顶进时产生位移(图 8)。导轨的高度应保证管中心对准穿墙洞中心,导轨的坡度应与设计轴线一致。

图 8 中导轨间距 B 的计算公式如下:

$$B = \sqrt{D_0^2 - D^2} \quad (3)$$

式中: D_0 为顶管外径,mm; D 为顶管内径,mm。

4.6.2 顶管导向系统

在微型顶管施工中,激光经纬仪通过红外线光源传输至显示屏,更便捷地监控和调整导向方向(图 9),目标位置由光学靶标提供,靶标置于钻具头内室的轴线上。观察靶标动态方向采用“视频测量系统”观测,系统上安装 CCD 摄像机,在捕捉到目标靶的激光束后,以其中心点为参考显示激光点的位置,将激光源图片传送到显示器上,再通过液压动力转动鸭嘴形导向钻头进行校正。

导向系统的激光指向仪配备显示器和激光靶标;导向钻头采用鸭嘴形状,靶标仓密封防水,且具有注水或注浆功能;钻杆内孔激光通道直径为 40 mm~50 mm。

表 3 管道外壁单位面积平均阻力 f (kN/m²)

	平均阻力 f (kN·m ⁻²)					
	黏性土	粉土	杂填土	粉质黏土	粉、细砂土	中、粗砂土
玻璃纤维增强塑料管	2.1~4.2	4.2~6.3	3.0~5.0	3.0~8.0	6.3~9.1	9.1~13.3

表 4 顶管设备参数

油压动力组主要设备参数		推进台主要设备参数	
尺寸	2 000 mm×1 300 mm×1400 mm	尺寸	1 950 mm×1 200 mm×850 mm
重量	2 800 kg	重量	1 950 kg
推进油压马达压力	max 450 kg/cm ²	推进推反行程	1 240 mm
推进油压马达流量	5~36 L/min	推进速度	1 000~3 800 mm/min
旋转油压马达压力	max 450 kg/cm ²	油压缸推力	max 200 t
旋转油压马达流量	35 L/min		Set 160 t
加速压力	154 kg/cm ²	油压缸行程	620 mm
加速流量	70 L/min	旋转马达扭力	850 kg·f·m
马力×电源	30HB(vs)×130HP×1 100 kW	旋转马达回转数	20~50 r/min

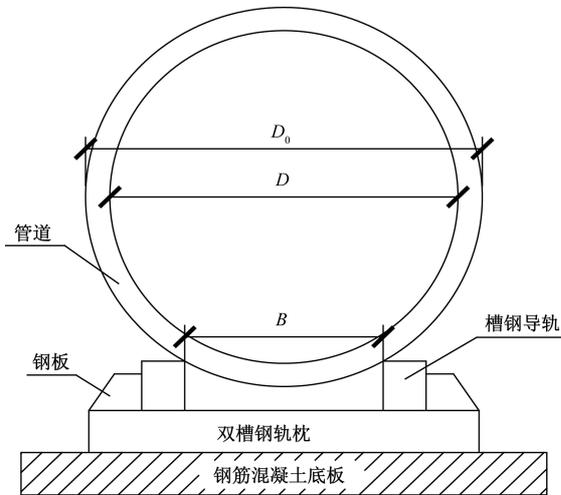


图 8 导轨支架示意图

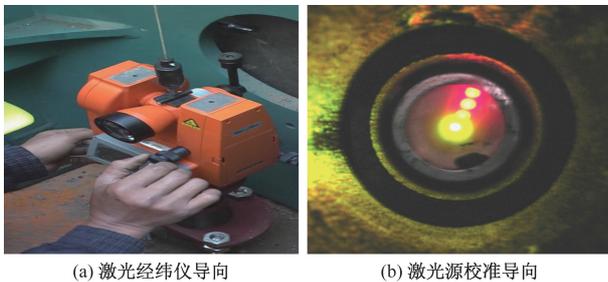


图 9 激光经纬仪控向

4.6.3 主顶设备安装

顶进系统包括底座、导轨、顶环、顶铁、后靠背、主顶油缸、减速箱体等部分；主顶油缸在设备两侧对称布置，规格相同，其合力作用点应在管道中心线上；主顶油缸行程宜为 650 mm~1 250 mm，满足于 1 m~2 m 长的管节顶进工作；主顶设备安装后的中心线满足设计高程、水平坡度与管道轴线的要求，管位轴线的允许偏差 $\leq\pm 2$ mm；主顶设备安装后平整稳固，顶进中承受各种负载时，不出现位移、沉降、变形现象。

4.6.4 螺旋顶管排渣系统

排泥套管选用 Q235B 级以上的钢管，钢管壁厚 ≥ 8 mm；排泥套管管节长度 ≤ 1 m，管节采用螺纹连接。排泥扭矩、排泥转速与顶管管径的适用参数满足表 5 的要求。

4.7 先导管顶进

先导管采用 40 号钢制作，单根长 83.5 cm，直

表 5 排泥扭矩、排泥转速与顶管管径的适用参数

排渣系统	管径	DN300	DN400	DN500	DN600
	排泥扭矩/(N·m)	>4 700	>5 300	>6 700	>8 200
	排泥转速/(r·min ⁻¹)	<50	<47	<37	<29

径为 9 cm，导向钻头采用鸭嘴形状[图 10(a)]。先导管顶进前，激光经纬仪根据管线中心、高程架设完毕后，依据设计坡度调整坡比，仪器设定好后开始先导管顶进施工[图 10(b)]。顶进过程中，应遵循“勤测量、勤纠偏、微纠偏”的原则，控制顶管机前进方向姿态，并根据测量结果分析偏差产生的原因和发展趋势，确定纠偏的措施。

开始顶进阶段，严控顶进的速度和方向；进入接收工作井前提前进行顶管机位置和姿态测量，提前进行调整。

4.8 黑管顶进

黑管采用 40 号钢制作，单根长 88.5 cm，直径为 22 cm。先导管按照激光经纬仪设定坡度顶进入接收坑，卸下导向头，开始连接黑管、出土螺旋杆，顶进黑管(图 11)。黑管顶进前安装镜面框，防止顶进过程中漏水漏泥。如遇地层含砂量大的地层，黑管顶进过程中需在过渡接头处加装注浆孔，起到注浆减阻的作用。

4.9 机头安装、管道顶进

黑管顶进入接收坑后，采用改良地箭式机头(不排土)，将改良机头安装好，缓慢推进洞内[图 12(a)]，待机头全部进洞后，安装机头所用的液压油管及高压注浆管。

管节顶进过程中，每节管材需要进行油缸推进及回缩，安装液压油管及高压水管。每顶进一节，



图 10 先导管顶进示意图



图 11 黑管顶进示意图

接收坑拆除出土黑管,依次循环完成整个顶管施工过程[图 12(b)]。

掘进前,根据顶进管道覆土厚度、土体性质、地下水埋深等因素,确定土舱压力控制值在 30~50 kPa;掘进中,根据土舱压力的变化,调节排土速度为 0.65~0.75 m³/h,顶进速度控制在 8~10 m/d,使土舱压力始终保持在预设范围内;距离地下管线、地下和地上建(构)筑物较近时,适当降低土舱压力;

当周边环境对土体变形要求严格时,进行土体变形监测,并根据监测数据随时调整顶进参数。

4.10 黑管、机头拆除

管材顶进过程中,在接收坑进行黑管拆除,每节黑管吊出接收井外清洗备用。管线按照设计线路施工完成后,机头进入接收井,卸下出土机头,此段管线顶管完成(图 13)。管道顶进结束后,及时用高强水泥(堵漏王)封堵两端管壁,防止漏水、漏泥。

4.11 触变泥浆减阻

顶管施工中,降低顶进阻力最有效的方法就是触变泥浆减阻。为减小管道外壁的摩阻力,在管道顶进过程中外壁压注触变泥浆,包裹住管子,形成一层触变性好、摩擦系数小的泥浆套,能够有效减少管外壁与土壤间的摩阻力。

实施过程中,通过技术攻关,研发了一种顶管触变泥浆注浆系统(图 14),该系统能够通过接收顶进装置顶力大小的反馈动态调整控制触变泥浆的流量和压强,从而起润滑作用,减小顶进阻力。还

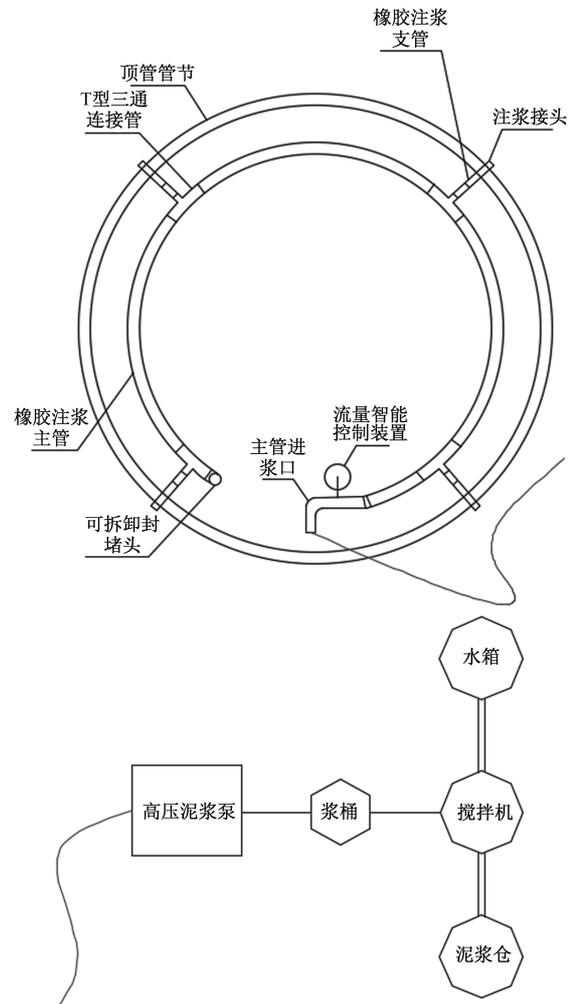


图 14 顶管触变泥浆注浆系统

能通过注浆压力对土体起到一定支撑,减小施工引起的变形。其工作原理如下。

(1)触变泥浆的拌制。膨润土、水和掺合剂按如下比例混合:膨润土:水:碱:CMC(羟甲基纤维素)=130:870:4.5:4(质量比)。

(2)注浆工艺流程。触变泥浆制浆系统制浆→顶进系统顶力反馈→流量智能控制装置调节泥浆流量和压强→泥浆注入→管节顶进。

本工程实践表明,通过顶管触变泥浆注浆系统,玻璃纤维增强塑料管管周的摩擦阻力系数由理论值 3~4 kN/m²降低至 0.4~1 kN/m²,减阻效果明显。

4.12 管道内部 CCTV 检测

利用操作杆将自带探照光源的摄像探头放入管道口,采用数字高清摄像头,配合调焦变倍和俯仰调节功能,清晰显示管道内部缺陷并使用平板电脑或其他存储设备录像保存。

微型顶管完工后,对各井段管道内部进行 CCTV 检测(图 15),检测结果表明,管材完整,无破损;管道

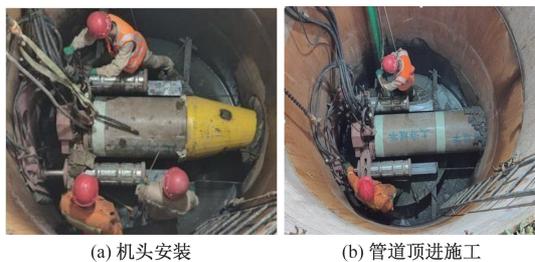


图 12 管道顶进示意图



图 13 黑管、机头拆除示意图



图 15 贯通后的管道内部 CCTV 检测

接口严密,无渗漏;管道线型顺直,坡度满足设计要求;管道结构和功能均满足设计及规范要求。

5 结论

通过对复杂地质下地箭式微型顶管排水改造施工进行分析研究及其工艺介绍,特别是采用高压旋喷桩止水帷幕+洞口橡胶止水装置以及触变泥浆智能注浆系统对流沙、涌泥进行防治,有效解决了老城区复杂环境下排水改造开槽法施工的不足,实现了综合成本低、施工周期短、安全性好、环境影响小、不影响城市交通通行、保证周边道路和建筑物结构安全的目标。此次微型顶管技术的成功实践,对于今后类似老城区排水管道工程施工,提供了一种很好的借鉴。

参考文献

[1] 张习哲. 新型微型螺旋式顶管施工技术研究[D]. 郑州:

郑州大学, 2022.

- [2] 罗利, 胡中华, 王佳林. 长距离大管径泥水平衡机械顶管技术研究——以毛家湾干管工程为例[J]. 科技和产业, 2023, 23(6): 198-202.
- [3] 尹文强, 刘世伟, 屈春来, 等. 南水北调中线磁县段污水管下穿公路顶管施工地表变形规律[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5467-5473.
- [4] 郑志会, 林宇, 黄剑鸿, 等. 覆土深度对腐蚀混凝土排水管道 CIPP 修复前后力学性能的影响分析[J]. 科技和产业, 2022, 22(7): 381-386.
- [5] 孙金昭, 周皓雪, 吉驰, 等. 微型顶管技术在复杂环境条件下排水管道工程中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2023(2): 134-136.
- [6] 牛运君. 微型顶管技术在非开挖污水管线施工中的应用[J]. 建筑技术, 2018, 49(11): 1216-1217.
- [7] 李岩. 微型顶管在城市排水中的应用解析[J]. 城市道桥与防洪, 2023(10): 249-251.
- [8] 田海涛. 导向式微型顶管工艺技术的工程应用[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 906-908.
- [9] 张欢. 新型微型顶管技术在小口径排水管道工程中的应用[J]. 市政技术, 2022, 40(3): 169-172.
- [10] 林永江, 屈新龙. 非开挖微型顶管法在污水管道施工中的应用[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 1528-1530.
- [11] 周军, 王智, 陈喆. 地箭式微型顶管施工技术的应用[J]. 江西建材, 2020(5): 134.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 玻璃纤维增强塑料夹砂管 GB/T 21238—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [13] 中国工程建设标准化协会管道结构专业委员会. 给排水工程顶管技术规程 CECS 246—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [14] 中国工程建设标准化协会. 给排水工程微型顶管技术规程 T/CECS 1113—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

Research on the Application of Ground Arrow Type Micro-pipe Jacking Technology for Drainage Pipelines in Old Urban Areas: Taking the Renovation of Old Urban Areas in Wuhan as an Example

ZHU Xianjun, LUO Li

(China MCC5 Group Co. Ltd., Chengdu 610063, China)

Abstract: Based on the drainage reconstruction of old urban areas with historical features in Wuhan city, the construction of underground arrow micro-pipe jacking under complex geology was analyzed, the technological principle of micro-pipe jacking technology was introduced, and the construction technology and control measures of micro-pipe jacking technology in urban drainage reconstruction project was expounded. The prevention methods of quicksand and mud gushing are put forward, which effectively solves the shortcomings of traditional slotting drainage pipeline construction, provides reference for similar engineering construction.

Keywords: ground arrow type micro-pipe jacking; drainage reconstruction; steel casing; laser theodolite; grouting system