

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.20.008

# 武汉大东湖排水深隧长距离双孔曲线顶管施工

周学锋<sup>1</sup>, 李永峰<sup>1</sup>, 刘凡<sup>1</sup>, 陈雪华<sup>2</sup>, 周丽红<sup>2</sup>

(1. 中建三局安装工程有限公司, 湖北 武汉 430064; 2. 广州金土岩土工程技术有限公司, 广东 广州 510610)

**摘要:** 结合武汉市大东湖核心区污水传输系统支线顶管工程的实际施工经验,对超深及复合地层条件下长距离双孔曲线顶管顶进施工技术进行研究。针对小直径双F型钢筒混凝土管顶进难度大、单次顶进距离长、曲线复杂等难点,研究了顶管机选型及针对性设计、深覆土高水压下顶管始发接收、长距离复合地层曲线顶进减阻、导向及姿态调整、长距离顶管施工供电、管内通风与进排浆及小直径钢筒钢筋混凝土管节设计等技术。实际应用表明,该工程顶进施工顺利,效果良好。

**关键词:** 大东湖排水深隧; 长距离顶管; 双孔曲线

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)20-0051-07

## Construction of Long Distance Double-hole Curved Pipe Jacking in Wuhan Dadong Lake Deep Drainage Tunnel

ZHOU Xue-feng<sup>1</sup>, LI Yong-feng<sup>1</sup>, LIU Fan<sup>1</sup>, CHEN Xue-hua<sup>2</sup>, ZHOU Li-hong<sup>2</sup>

(1. China Construction Third Engineering Bureau Installation Engineering Co. Ltd., Wuhan 430064, China; 2. GZ Jintu Geotechnical Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** Combined with the practical construction experience of the branch line jacking project of the sewage transmission system in Wuhan Dadong Lake core area, the construction technology of long distance double-hole curve pipe jacking in deep tunnel is studied under the conditions of ultra-deep and composite formation. Aiming at the difficulties of jacking the double F type concrete cylinder pipe with small diameter, long distance for single jacking and the complicated curve, the technologies including pipe jacking machine selection and specific design, pipe jacking initiation receiving under deep soil and high water pressure, curved jacking drag reduction for long distance composite formation, guidance and attitude control, long distance pipe jacking power supply, ventilation and slurry discharge, as well as the design of small diameter steel cylinder reinforced concrete pipe joint were studied. The application results show that the jacking construction is smooth and the effect is good.

**Key words:** Dadong Lake deep drainage tunnel; long distance pipe jacking; double-hole curve

随着城市建设不断加快,地下空间开发需求的大量增加,对地下空间施工的要求也越来越高,传统的开挖施工技术已经很难满足建设生态文明城市的需求,而非开挖顶管法施工技术可降低管线施工对周围环境、周边建筑及居民生活的影响,已得到了广泛的应用。在实际施工过程中,如何解决超长距离

一次性顶进、小间距曲线顶管、复合地层顶进等实际工程中所遇到的新难点<sup>[1-5]</sup>,将是今后需要开展研究的领域。

以武汉市大东湖核心区污水传输系统支线顶管工程为例,介绍了超深及复合地层条件下长距离双孔曲线顶管顶进的施工关键技术。

## 1 项目简介

### 1.1 工程概况

大东湖核心区污水传输支隧工程是将经过落步咀预处理站处理后的污水输送至主隧的一段管道系统。始于落步咀预处理站,止于主隧4#汇流井。支隧采用顶管法施工,总长约1.7 km,由两根并行的管道组成,管径为 $D1\ 650\text{ mm}$ ,净间距2.5 m,采用F

型钢筒混凝土管,壁厚200 mm,每段管节长2.5 m。

顶管隧道全长3 380.56 m,分2段顶进:第一段顶管起点位于落步咀预处理站的10#井,终点位于10#井与主隧4#井之间的11#井,长度为763 m;第二段为11#井至主隧4#井,长度为927 m。共计4段,平面为双曲线,曲率半径分别为600、10 800 m,纵断面坡度为0.05%。

表1 支隧设计参数

Tab.1 Branch tunnel design parameters

管段	内径/m	长度/m	坡度/%	埋深/m	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	管材	工法
10#~11#井	$2 \times 1.65$	763	0.05	20.62~30.66	1.15~2.86	F型钢筒 混凝土管	顶管
11#~4#井	$2 \times 1.65$	927	0.05	24.6~33.28	1.15~2.86		

### 1.2 地质条件

根据勘察结果,拟建支隧场址区无崩塌、滑坡、泥石流等不良地质地段,特殊性岩土主要为人工填土、软土、混合土、膨胀土、风化岩及挤压破碎带,管线全断面穿越中风化含砾砂岩、泥岩,夹强风化和破碎岩层组成的复合地层。支隧沿线范围内的地表水主要分布于落步咀污水处理厂内及附近水塘、水沟内,三环线沿线低洼部位有少量积水,地下水主要为上层滞水、孔隙承压水及基岩裂隙水。

支隧透视及断面图分别见图1、2。

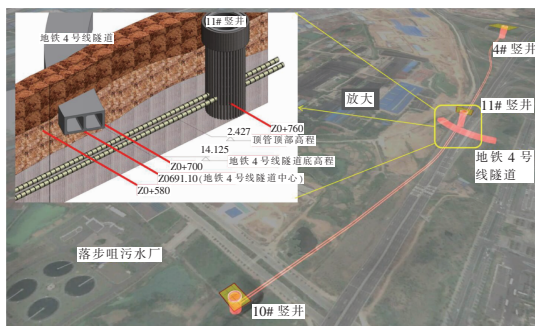


图1 支隧透视图

Fig.1 Perspective of branch tunnel

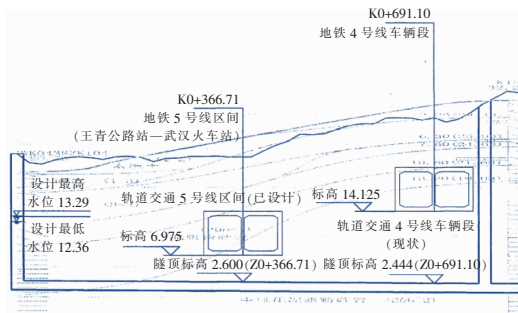


图2 支隧纵断面

Fig.2 Vertical section of branch tunnel

## 2 工程关键技术分析

本工程为小直径、小净距、长距离曲线顶管工程,单次顶进长度分别为763、927 m,共计4段,单段曲线顶管最多达到2个拐点,最小曲率半径600 m,为目前国内顶进难度最大、单次顶进长度最长、曲线最复杂的双线顶管项目之一。

工程实施涉及的主要关键技术包括:①顶管机选型及针对性设计;②深覆土、高水压下顶管始发与接收;③复合地层下长距离曲线顶管施工注浆减阻;④长距离曲线顶管顶进测控;⑤长距离顶管管道内通风、电力输送、进排浆系统;⑥小直径钢筒钢筋混凝土曲线顶管管节设计。

## 3 顶管机选型及针对性设计

本工程采用了自主研发的泥水平衡复合地层顶管机,针对全断面岩石、岩石夹土及土夹岩石等复合地层条件,做了以下设计:

① 采用适应复杂地层的复合型刀盘(刀盘开挖直径 $2\ 110\text{ mm}$ ),刀盘上安装双刃中心滚刀(7把)、双刃边缘滚刀(4把)、主切削刀(10把)和边刮刀(8把),正面刮刀和圆弧刮刀的切削轨迹线为满布,增大刀盘中心开口率(接近30%)。在刀盘外圈和前壳体下半部分别设置导砂板和铲砂板,同时搭建大功率变频调速控制器,长距离顶进时,可有效提

高刀盘的启动性能,实现刀盘恒转矩高转速输出。

刀盘设计见图3。

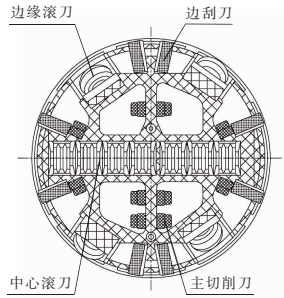


图3 刀盘设计

Fig.3 Schematic diagram of cutter head design

② 设计二次破碎功能,以利于渣土及时排出;配置高压喷水系统,及时对刀盘切割下来的黏土进行分离和破碎,有效提高顶管机在黏土地质条件下的适应性能;设计变频控制的排渣中继泵,能根据地层变化调整排渣速度,有利于渣土排出,适宜长距离顶进。

③ 设计两级纠偏系统,形成三段两铰的结构形式,可以增加顶管机的纠偏角度和纠偏控制的灵敏性,有利于形成较小的曲率半径,更好地满足曲线施工的要求。

④ 开发遥控操作系统。增加了操作触摸屏,提升了人机交互便利性,提高了机器的操作性能和可靠性;开发施工数据监测平台及手机App,使其具有数据动态采集、显示和存储功能,助推项目与设备的信息化建设。

#### 4 深覆土高水压下顶管始发接收关键技术

##### 4.1 高水压下顶管始发关键技术

###### ① 洞门凿除

在洞门凿除前,通过钻孔对洞门渗水及土体加固状况进行检验。在确认加固良好的情况下,分两阶段进行洞门凿除。在顶管机调试期间,首先凿除钻孔桩外侧混凝土保护层,再割除外侧钢筋,然后分层破除剩余的混凝土结构,内侧钢筋暂予以保留,以做到在始发之前对端头地层的保护。

待顶管机调试完成,具备进洞条件后,再对剩余的内侧钢筋进行割除。在洞门破除后,及时始发掘进,防止洞门壁后土体暴露时间过长,引起土体不稳定坍塌。

在顶管始发准备阶段,根据开挖后洞门所暴露的围岩条件和时间长短,必要时可对洞门端头采用

喷射混凝土的方式加固。特别注意要确保处理后的洞门开挖面平整、无较大的坑洞,并与顶管刀盘平面平行。若开挖面有超过  $1.0 \text{ m}^3$  的坑洞,应用低标号的砂浆回填,并确保施工后无钢筋等侵入隧道开挖轮廓。

###### ② 洞门防水及密封

洞门采用止水环,其结构采用钢法兰加压板,中间夹装  $20 \text{ mm}$  厚的橡胶止水圈。借助管道顶进带动安装好的橡胶板形成逆向止水装置。安装固定好后,预埋钢环板与混凝土墙接触面处采用水泥砂浆堵缝止水。止水钢环详细构造见图4。

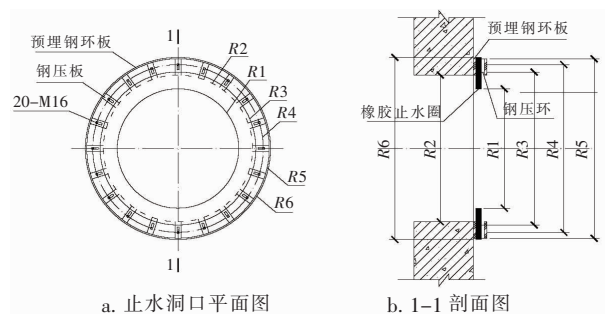


图4 止水钢环结构

Fig.4 Schematic diagram of steel sealing ring structure

###### ③ 始发顶进

在顶管机进入始发洞口和钢套筒后,在打泥预留孔注浆对洞口进行封堵。顶管机进入原状土后,为防止机头“磕头”,顶管机应收紧上部纠偏油缸,使顶管机保持向上的姿态,适当提高顶进速度,使正面土压力稍大于理论计算值,以减少对正面土体的扰动和地面沉降,并不断根据地面沉降数据的反馈进行参数调整,及时摸索出正面土压力、出土量、顶进速度、注浆量和压力等各种施工参数最佳值,为正常段施工做好准备。

在洞口的两侧平行地面各安装一条工字钢,当主推千斤顶准备回缩加顶铁时,将两条工字钢分别与第一个顶铁焊牢,然后回收千斤顶,以防止顶管机反弹。

分别在顶管机的两侧各焊上一块挡板,挡板底面与导轨面平齐,防止顶管机发生扭转。

顶管机进洞时为防止机头扭转,应特别注意以下事项:

a. 严格控制扭矩和转速(本项目中刀盘转速控制在  $1.8 \text{ r/min}$ ,扭矩  $180 \text{ kN} \cdot \text{m}$ )。

b. 穿井壁作业应迅速且连续。初始顶进阶段推



进速度控制在 10 ~ 20 mm/min。

c. 加接管段时,主推千斤顶在缩回前应对已顶进的管段与井壁进行临时固定。

d. 初始顶进导向性很强,应加强测量(每推进 30 cm 至少测量一次)和纠偏工作,穿井壁阶段宜利用主顶工作站油缸实施纠偏。

## 4.2 高水压下的顶管接收关键技术

### ① 接收洞门凿除

接收井洞门凿除与始发井相类似,由于地下水压力较大,采取以下凿除方式:在顶管机机头切削面接近洞门端加固区时,先凿除外围一半的围护桩,待顶管机机头切削面距离接收井洞门段 0.5 m 左右时,凿除另外一半围护桩。

### ② 顶管机接收

当顶管机头靠近接收井时,应加强测量的频率和精度,减少轴线偏差,确保顶管机能准确接收。

顶管机到达接收井洞门加固段时需降低顶进速度,使顶管机以 20 ~ 30 mm/min 匀速顶进。在顶管机机头切削面距接收井 6 m 时,停止第一节管节的压浆,在后续顶进中将压浆位置逐渐后移,并在顶管机尾压注入高浓度泥浆,保证顶管在接收前形成完好的 6 m 左右的泥塞,防止顶管机到达接收井时发生涌砂、涌泥等不良现象。

## 5 长距离曲线顶管施工注浆减阻关键技术

### 5.1 顶进减阻难点

① 单次顶进距离长,顶进摩擦阻力大。

② 顶管穿越中风化含砾砂岩、泥岩,夹强风化和破碎岩层组成的复合地层,管土摩擦系数大。

③ 管节周围土层软硬不均,顶管姿态控制难度大,难以形成完整泥浆套,影响减阻效果。

④ 曲线顶进。

### 5.2 长距离顶管泥浆减阻技术方案

#### ① 注浆方案及浆液配制

针对该顶管工程单次顶进距离长,穿越地层复杂,施工中采用了高压浓泥与触变泥浆相配合的减阻措施。即在机尾管和始发洞门段注压浓泥,中间管节外侧注入触变泥浆,确保浆液不从机头流入前方,同时也不从后方洞门流出,有效地保证管道在一个完整的泥浆套中顶进<sup>[6-7]</sup>。

本顶管工程的优质触变泥浆各物质质量配比:膨润土 10%,羧甲基纤维素(CMC) 1.5%,烧碱 1.1%,部分水解聚丙烯酰胺(PHP) 0.3%(膨润土

含量为清水百分比,其余添加剂含量为膨润土的百分比)。现场高浓度泥浆质量配比:膨润土 1,清水 1.25, PAM 0.002。

### ② 中继间设置

顶管施工中继间的设置与允许顶力有关。本顶管工程根据设计要求进行设置。

#### a. 第一道中继间位置

第一道中继间的设置在计算时要留有一定的富余量,通常顶力按允许顶力的 60% 考虑,为了确保正常顶进,在顶管机机头后 30 m 放第一个中继间。

#### b. 两道中继间之间的距离设置

在顶进施工中,除第一中继间承受迎面阻力外,其余各中继间均只承受管外壁的摩阻力。为了保证一定的安全系数,其余中继间最大顶力按允许顶力的 90% 取值。根据计算结果,相邻两个中继间的距离设置均为 180 m。在 11# ~ 4# 井顶管段设置 5 道中继间,在 10# ~ 11# 井顶管段设置 4 道中继间。

## 5.3 顶力及减阻效果

本顶管工程采取高压浓泥 + 触变泥浆的组合减阻措施,有效减小了摩擦阻力,实际顶力仅为理论顶力[根据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS 246:2008)计算]的 60% 左右。以 763 m 长距离顶管段为例,安装的 4 道中继间在顶进的过程中未启用一套就完成了整个顶进过程,大大提高了施工效率。该段顶管于 2019 年 5 月 10 日正式始发,历时 3 个多月,至 9 月 2 日圆满完成该段顶进施工任务,比预计工期早了 1 个多月。

## 6 长距离曲线顶管姿态控制关键技术

### 6.1 顶管姿态控制难点

本顶管工程中,顶管姿态控制难点主要有:

① 顶管穿越复杂、不均匀的地层时极易造成顶管周围压力不均,引起顶管轴线偏差。

② 双线顶管净间距仅为 2.5 m,顶进速度、地层压力变化、双线顶进相互干扰等容易造成顶管线路侧移。

③ 单次顶进距离较长。随着顶进距离的增加,管段的柔性将随之增加,在掘进过程中极易出现摆动。

### 6.2 主要控制措施

针对上述姿态控制难点,施工过程中采取了以下措施:

① 自动导向测量系统。采用了同济大学自主

研发的国产全自动、高精度自动导向测量系统,自动进行数据采集、传输与处理,通过数据处理平台与设计数据进行比对。

② 人工复测。为了保证姿态控制精度,采用自动导向控制系统结合人工复测程序,每50 m进行一次人工复测,采集的数据与导向控制系统数据进行复核,及时纠正系统误差,防止偏差累积。

③ 纠偏系统。将自动导向测量系统及人工复测数据与设计线路进行对比,发现顶进姿态与管道线路推进位置、方向存在偏差,利用顶进纠偏系统及时纠偏。

### 6.3 顶进始发姿态与测控技术

在顶管施工中,顶管机初始姿态控制对整体姿态控制起决定性作用,因此在顶管机进洞前要做好充分准备,包括<sup>[8]</sup>:

① 顶进前准备工作。包括进洞前对导轨进行检查,调整好顶管机进洞前姿态并记录各仪表初始值,记录的范围包括前后倾斜仪和土压力计读数,纠偏油缸初始值和电流表读数等。

② 延伸导轨的制作与安装。

③ 洞口区域土体进行加固处理。

④ 顶管机在进洞过程中,当顶管机距离刀盘部位经过延伸导轨的最末端时,操作人员应将顶管机下面2组纠偏油缸缓慢伸出,伸出以倾斜仪角度不大于1°为宜;在顶管机整体越过延伸导轨时,及时根据测量结果对纠偏油缸进行调整。

⑤ 施工中顶管机与后续的若干特制管节采用一定方法进行刚性连接以形成整体,防止顶管机发生漂移和松脱。

### 6.4 直线变曲线顶进姿态与测控技术

本项目10#~11#竖井设计长度763 m,顶管始发后为一段长度约20 m的直线顶进段,然后逐渐过渡到曲线段,其中包括两段R600 m的小半径曲线。为了确保曲线施工的准确性和管材的安全,施工中采取了一系列针对性的措施:

① 曲线段的管节拼接面采用双层胶合板(厚度12 mm),防止曲线顶进时张角过大而产生漏水漏浆现象。

② 在滚刀超挖范围内(单边35 mm)采用纠偏油缸进行曲线的调整,放慢顶进速度,匀速缓和地通过曲线段。

③ 增加人工测量的频率,及时纠偏。

### 6.5 测控效果

本顶管工程通过采用自动导向测量系统与人工复核相结合的方式对顶管导向进行控制,并通过采用纠偏油缸,调整出泥量、注浆压力、顶进速度等施工参数对顶管姿态进行纠偏,将顶进曲线及姿态偏差控制在设计允许范围内。本工程第一段顶管于2019年9月2日顺利完工,经鉴定验收,顶管导向与姿态满足设计要求。

## 7 长距离顶管通风、输电、进排浆关键技术

### 7.1 长距离顶管通风技术

针对本工程顶进距离长、管节内径小的特点,采取以下通风方式:通过始发井鼓风机用输送软管导至顶管机处,在顶管通道内每隔150 m增设1台轴向风机进行接力送风,其间需不断检查输送管道是否有破损或弯折,以免影响送风效果。在对顶管设备进行维护及检查前需送风一段时间,净化管道中的空气后人员才能进入管道内,以保证安全。有害气体监测系统见图5。

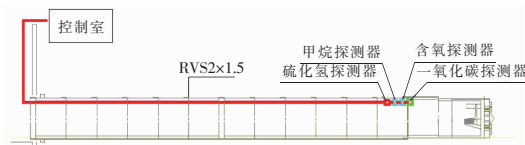


图5 有害气体监测系统

Fig.5 Harmful gas monitoring system

### 7.2 长距离小直径顶管电力输送技术

随着长距离顶管的发展,管内供电问题日益突出。在盾构施工中,高压供电已普遍采用,由于盾构断面较大,高压供电的安全度较高。为实现在断面较小的顶管内进行高压供电,要求高压变压器不仅绝缘性要好,而且体积要小,特别是高宽的尺寸要尽量缩小,但允许沿管轴线延长。

长距离顶管施工采用电缆输电,将造成动力电压严重下降,对顶管机正常运转影响极大。本工程采用盾构机高压输电的方式,即在外面接入高压电,在顶管机内部再降至380 V,有效解决了长距离小直径顶管顶进施工过程中顶管机电压大幅下降的问题,确保顶管机动力电压稳定,避免由于动力不足影响顶管机的施工效率。

### 7.3 长距离顶管进排浆技术

针对泥浆输送距离长、泥浆含砂量高等特点,在顶管通道内每隔150 m设置1台中继泵,泥浆排出后经过泥水分离器分离,渣土堆在附近渣土池,由运

渣车及时运送至指定地点。处理后的泥浆进入泥浆池循环再利用,使进排浆系统形成一个回路,大大提高了泥砂输送效率,确保了顶进与出泥同步。

## 8 钢筒钢筋混凝土管曲线顶进

### 8.1 管节设计

针对本工程的施工特点,管节需要具有较高的强度、良好的防渗性能。另外,顶进曲线最小曲率半径仅为600 m,管节偏转角较大,管节设计时还需考虑管节接头处的不均匀受力以及密封防水性能。

管节设计见图6。

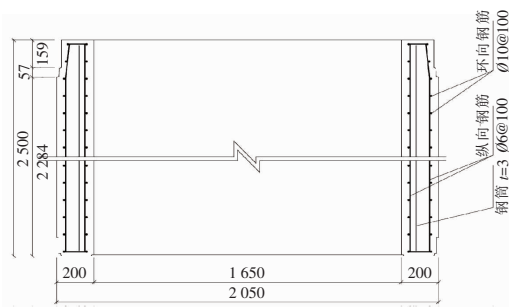


图6 管节设计示意

Fig.6 Schematic diagram of pipe section design

① 理论计算顶力最高达到19 259 kN(不考虑曲线附加系数),对管节断面承载力要求较高。选用预制的C50高强度钢筒钢筋混凝土管作为顶进管节,管节断面可承载最大顶力8 500 kN,外力破坏性试验承压2 300 kN,施工过程中管节的最大承载顶力约为3 000 kN,该设计管节满足施工顶力要求。

② 本顶管工程设计的高强度抗渗预制钢筒混凝土管节抗渗等级为P12,根据相关规范,满足深覆土富含水复合地层顶管施工的抗渗要求。

③ 接缝处防水及补强设计。管节接头防水示意图见图7。

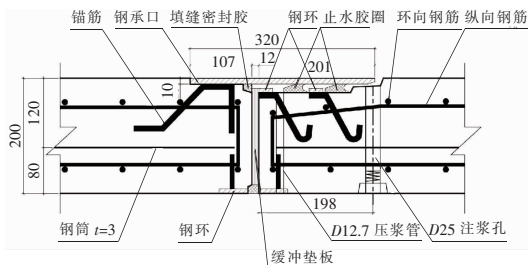


图7 管节接头防水示意

Fig.7 Water resistance diagram of pipe

管节接缝处采用双道止水胶圈,外围10 mm厚钢套环,钢套环加长以增强管节接缝处强度,管节间

灌注聚氨酯密封胶嵌缝,管节拼接面采用胶合板,在小半径曲线段采用双层胶合板(厚度12 mm),防止曲线顶进时张角过大而产生漏水漏浆现象。每节管接头分别按120°布置3个DN25减阻注浆孔和DN12.5接头封堵注环氧树脂孔。

### 8.2 施工效果

本项目10#~11#竖井设计顶管长763 m,顶管始发后为一段长约20 m的直线顶进段,然后逐渐过渡到曲线段,其中包括2段R600 m的小半径曲线,施工全程采取相关措施,有效保证了顶进曲线的准确和管材的安全。该段于2019年9月2日顺利贯通,经鉴定验收,未出现管节渗水、开裂现象。

## 9 结语

武汉市大东湖核心区污水传输系统工程是全国首条正式开建的城市污水处理深隧工程,是武汉市“四水共治”的重点项目。其支隧工程小直径双F型钢筒混凝土管顶进难度大、单次顶进距离长、曲线复杂。所采用的深覆土高水压下顶管始发接收技术,长距离复合地层曲线顶进减阻技术,导向和姿态调整技术,长距离顶管通风、供电、进排浆技术,以及小直径钢筒钢筋混凝土管节设计技术成功解决了顶进施工中的难题。

然而,在未来顶管法还需要解决以下问题:

- ① 更具有地层适应性的超长距离顶管设备的研制;
- ② 超长距离曲线顶管施工减阻技术还需进一步深入研究,收集更完善的数据以及形成更确切的结论;
- ③ 超长距离曲线双管平行复杂曲线顶管施工导向及姿态控制技术;
- ④ 深覆土小曲率曲线顶管在富含水复合地层施工管节接头防水技术的突破。

## 参考文献:

- [1] 寇磊,朱新华,白云,等. 顶管管节壁后触变泥浆探地雷达探测研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(2):477-483.  
Kou Lei, Zhu Xinhua, Bai Yun, et al. Application of GPR to detect thixotropic clay slurry outside the tube of pipe jacking[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 477-483 (in Chinese).
- [2] 王道伟,王福芝,黎轩,等. 水平平行顶管相互影响试验研究[J]. 地质科技情报,2016,35(2):71-74.



- Wang Daowei, Wang Fuzhi, Li Xuan, *et al.* Experimental study on influence between horizontal parallel pipe jacking [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(2): 71–74 (in Chinese).
- [3] 张鹏, 潘建立, 刘应亮, 等. 拱北隧道曲线顶管管幕施工关键技术[J]. 隧道建设, 2016, 36(8): 968–975.  
Zhang Peng, Pan Jianli, Liu Yingliang, *et al.* Key construction technologies for curved jacking pipe roofing of Gongbei tunnel [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(8): 968–975 (in Chinese).
- [4] Chen X L, Ma B S, Najafi M, *et al.* Long rectangular box jacking project: A case study [J/OL]. Undergr Space. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.08.003>, 2019–11–27.
- [5] 丛茂强. 软土中大直径顶管的施工扰动机理与控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
Cong Maoqiang. Disturbance Mechanism and Control of Large Diameter Pipe Jacking in Soft Soil [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013 (in Chinese).
- [6] 吴全科, 伍田生, 林超. 软弱土质中大口径长距离泥水平衡顶管纠偏及减阻施工技术[J]. 工业建筑, 2012, 42(4): 107–112.  
Wu Quanke, Wu Tiansheng, Lin Chao. Construction technology research on rectifying deviation and down resistance reduction of mud balanced pipe-jacking with large-diameter and long-distance in soft soil [J]. Industrial Construction, 2012, 42(4): 107–112 (in Chinese).
- [7] 王明胜, 刘大刚. 顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 182–189.
- Wang Mingsheng, Liu Dagang. Test of thixotropic slurry properties and study of resistance-reducing technology for pipe jacking tunnel construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 182–189 (in Chinese).
- [8] 金华, 马西峰, 赵立锋, 等. 复杂工程条件下浅埋矩形大断面顶管关键技术与应用研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(11): 90–95.  
Jin Hua, Ma Xifeng, Zhao Lifeng, *et al.* Key construction technical measures and effect analysis of large section rectangular pipe pushing under complex geologic conditions [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(11): 90–95 (in Chinese).



作者简介: 周学锋(1972—), 男, 湖北浠水人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事项目管理及施工技术工作。

E-mail: 28323114@qq.com

收稿日期: 2020–06–26

治理水土流失 建设美丽中国