

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.14.024

超长距离复合地层顶管技术用于排水管道建设

郑平¹, 潘传宗², 崔旭辉², 卢海军²

(1. 武汉三镇实业控股股份有限公司, 湖北 武汉 430070; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 超长距离复合地层顶管技术用于排水管道建设时,面临着顶管机及配套设备可靠性与耐久性、轴线高效测控、隧内供电压降、通信干扰大、软弱地层上浮以及安全换刀可行性等技术难点。以武汉汤逊湖污水处理厂尾水排江工程超长距离复合地层顶管施工为背景,系统研究了顶管机针对性设计、出洞始发及进洞接收、顶进过程控制、中继间设置、注浆减阻、监控量测等成套技术。实践证明,该技术实施效果达到预期目标,应用效果良好。

关键词: 超长距离; 复合地层; 顶管技术; 排水管道

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)14-0141-07

Application of Ultra-long Distance Composite Strata Pipe Jacking Technology in Drainage Pipeline Construction

ZHENG Ping¹, PAN Chuan-zong², CUI Xu-hui², LU Hai-jun²

(1. Wuhan Sanzhen Industry Holding Co. Ltd., Wuhan 430070, China; 2. CCCC Second Harbor Engineering Co. Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: During the construction process of ultra-long distance composite strata pipe jacking, there are technical difficulties such as the reliability and durability of the pipe jacking machine and supporting equipment, efficient measurement and control of the axis, voltage reduction, large communication interference, floating of weak strata, and the feasibility of hobbing cutter replacement. Based on ultra-long distance composite strata pipe jacking construction of the recycled water discharge project of Tangxun Lake sewage treatment plant, the specific design of pipe jacking machine, starting and receiving technologies, axis control, intermediate jacking stations setting, lubrication, monitoring and measurement, etc., are studied. It shows that the measures adopted have achieved the expected goals and are well applied.

Key words: ultra-long distance; composite strata; pipe jacking; drainage pipeline

目前国内给排水管道建设中,采用超长距离顶管技术的大部分在淤泥质粉质黏土、黏土、砂层等软土地层^[1-4],对能够适应复合地层的顶管技术研究较少,且主要集中在中、长距离^[5-9]顶管,已有成果对超长距离复合地层顶管施工指导性不强。

在已有中、长距离复合地层顶管技术研究的基础上,以武汉汤逊湖污水处理厂尾水排江工程超长

距离复合地层顶管施工为背景,系统研究了顶管机针对性设计、出洞始发及进洞接收、顶进过程控制、中继间设置、注浆减阻、监控量测等成套技术。

1 项目简介

1.1 工程概况

汤逊湖污水处理厂尾水排江工程施工线路主要分为陆地段和穿湖段,穿湖段线路总长约3.77 km,

分为1#~2#、3#~2#、4#~3#竖井段,采用顶管法施工,顶管机掘进过程中均需下穿汤逊湖;其中3#~2#竖井顶管段隧道全长约1 556.79 m,平面线形为直线。管节预制整环结构,C50混凝土,管节外径4.8 m,壁厚0.4 m,长2.5 m,接头密封采用F型承插连接,顶管施工完成后内设双排1.4 m管径PE管,具体如图1所示。



图1 施工平面、断面布置

Fig.1 Construction plane and section layout

1.2 地质条件

在3#~2#竖井顶管段,顶管机主要穿越淤泥质粉质黏土,黏土,中、强风化泥质粉砂岩层,具体如图2所示。各岩土层主要参数见表1。

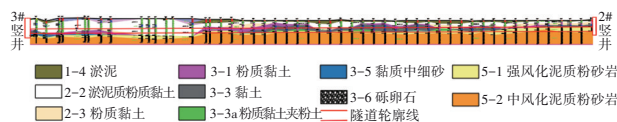


图2 3#~2#地质断面

Fig.2 Geological profile of 3#~2#

表1 各岩土层主要参数建议值

Tab.1 Recommended values of main parameters of each rock and soil layer

地层类别	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	黏聚力 标准值 /kPa	内摩擦 角标准 值/(°)	压缩 模量/ MPa	承载力 基本容 许值/kPa
2-2 淤泥质粉质黏土	17.8	10	5	3.2	60
2-3 粉质黏土	19	22	12	5.5	120
3-1 粉质黏土	19.1	26	13	7.5	180
3-3 黏土	19.5	40	15	13	350
3-3a 粉质黏土夹粉土	19.7	24	12	7.5	180
3-5 黏质中细砂	19.2	2	23		140
3-6 砾卵石	20	0	27		300
5-1 强风化泥质粉砂岩	20.5	48	17		450
5-2 中风化泥质粉砂岩	21.6	70	22		1 500

注: 5-2 中风化泥质粉砂岩的岩石饱和单轴抗压强度标准值为3.3 MPa。

2 工程重难点分析

本项目主要面临超长距离、复杂地质条件、穿湖施工与多功能施工需求等难题,分析如下:

① 顶管机穿越区间后段近1.1 km强、中风化

泥质粉砂岩层,石英含量高,地层磨蚀性强,严重考验顶管机、配套设备的可靠性和耐久性;靠近工作井约500 m浅覆土软弱地层管节易上浮。

② 黏土、强风化泥质粉砂岩,地层黏性颗粒含量高,刀盘容易结“泥饼”,泥块进仓后牛腿与破仓板剪切挤压易糊破碎仓口;中风化层岩块二次破碎后在泥水仓排渣口沉淀堵管,向顶管机壳体后部流动,管底易沉渣出现抱死现象;顶管机供水系统设计要求综合应对、可靠高效。

③ 施工过程中岩石顶管机负荷高,隧内供电电压降大;顶管轴线常规人工测控耗时耗力;超大直径环向减阻泥浆套下厚上薄,浆套稳定性差,摩阻力大;隧内用电设备多,信号干扰大,通信传输困难。

④ 超长距离顶进,存在刀具异常失效风险,而湖下软弱地层无法采用常规退管、开天窗、地下对接等补救措施,如何实现掘进过程中快速、安全换刀是一个重要的技术难题。

3 超长距离顶管施工技术

顶管施工工艺流程见图3。

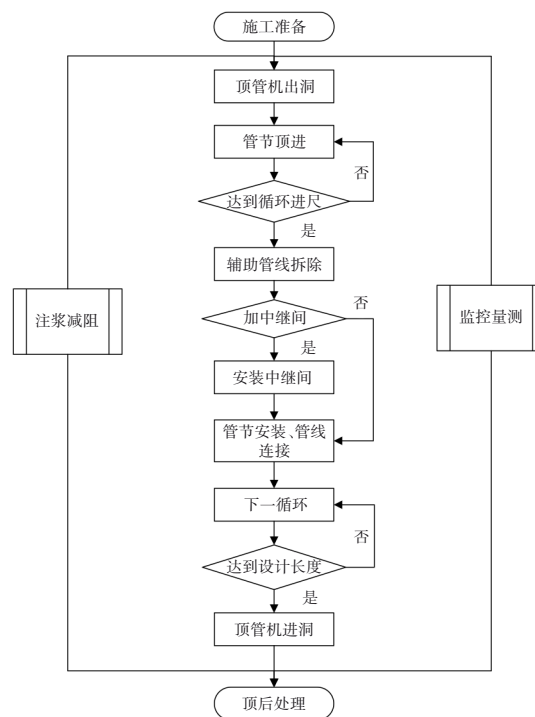


图3 顶管施工工艺流程

Fig.3 Flow chart of pipe jacking construction process

3.1 顶管机针对性设计

对超长距离复合地层掘进刀盘刀具耐磨可靠

性、刀盘结泥饼、泥水环流系统可靠高效、软弱地层安全换刀可行性等方面进行针对性设计,使顶管机的地层适应性能达到最佳。

① 刀盘超挖直径4.92 m,辐板式结构,整体开口率为33%,最大开口尺寸350 mm;刀盘外环采用导流槽耐磨结构设计,整个面板密集耐磨网格尺寸缩小为30 mm×30 mm,保证了整体的耐磨性能。

② 刀具设计采用滚刀、撕裂刀、刮刀组合布置,正面和边缘滚刀选择高耐磨重型楔齿、平头齿滚刀;保证既在中风化岩中有充分的破岩能力,又能实现软土的高效切削,背后刀箱安装控件满足背后换刀功能,有效解决了超长距离刀具配置富余量和耐磨性难题。

③ 当刀盘牛腿旋转时,主动破碎板与锥板及被动破碎板之间会形成容积可变化的破碎空间,为提高排渣效率,锥板漏渣孔尺寸扩大至80 mm,以改善破碎岩块的通过性。

④ 前、后、外供水系统设计,兼顾刀盘、锥形破碎板、泥水仓排渣口、顶管机管底冲刷,灵活多变、可靠高效,如图4所示。刀盘中心部位布置2路、沿切削轨迹设置4路高压冲水孔,提高渣土流塑性,防止刀盘结泥饼。

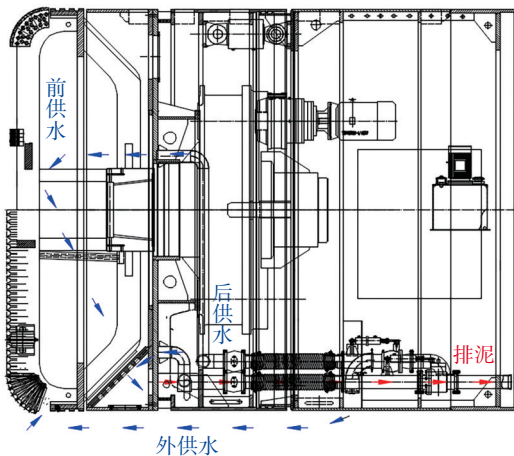


图4 泥水环流系统

Fig.4 Muddy water circulation system

⑤ 为解决超长距离复合地层顶进,刀具异常损坏安全换刀的技术难题,研制了顶管机可分体式加压舱装置,见图5。将加压舱模块化设计成单独的工作管节,与顶管机后壳体承插连接;加压舱中间设置2道舱门,满足日常人员检查及测量导向功能;同型号顶管机无需改造即可实现加压舱快速安

装使用。



图5 加压舱

Fig.5 Pressurized cabin

3.2 顶管机出洞始发

3#竖井内径13 m,壁厚1.2 m,采用沉井施工工艺,始发洞门沉井施工时预留,下沉到位对洞门端头采用搅拌桩加固,加固区域沿轴线9 m,洞门两侧2 m。

① 洞门止水环

止水法兰通过预留螺栓孔与止水钢板连接组成洞门止水环,利用止水钢板在洞门处施作找平环梁,并在顶部预埋DN65打泥孔;顶管机始发刀盘切入洞门墙后,注浓泥填充壳体与洞门间隙,防止洞门土体过量流失造成地面坍塌。止水法兰设工作、修理双层橡胶止水密封装置,两道密封之间预留注浆孔,可根据现场需要注锂基脂、减摩泥浆,提高止水环密封性。

② 后靠背

在井壁与主顶油缸架之间设置后靠背,由钢垫箱、钢筋墙组合而成,墙与井壁之间用素混凝土填充。参考葛春辉著《顶管工程设计与施工》计算,后靠背承受的最小顶力为35 190 kN,大于设计允许顶力(20 000 kN),满足要求。

③ 主顶系统

选用14根2级等推力油缸,行程3.5 m,单根顶力2 000 kN,沿管节壁中心环形对称布置固定在油缸支架上,合力的作用点在管节中心。

④ 顶管机顶进

a. 防扭转:顶管机和前5个管节通过连接螺杆组为一体;利用顶管机和管节自重提供扭转反力,顶进过程中根据水平角显示及时切换刀盘转向,达到防扭转效果。

b. 止退装置:出洞始发管节安装期间,顶管机

受主动土压力作用易后退,通过在顶管机、后续管节两侧焊制三角反力架,利用管节吊装孔处插入圆钢起止退作用。

4 顶管机顶进

① 管节安装:沉井两侧布设轨道,配置1台50 t门式起重机用于现场垂直运输,管节质量约35 t,满足施工要求;井下对接是隧道防水质量控制的重点,安装前检查管节橡胶密封润滑、承口钢环四周间隙,无异常慢速顶入,出现翻转及时停止,调整后重新对接,避免密封圈翻转失效导致接头渗漏水。

② 泥水环流系统:顶管施工排泥浆液密度高,在顶管机尾部20 m、井区各安放1台55 kW、清水扬程37 m的渣浆泵,隧道内间隔500 m布置1台45 kW、清水扬程30 m的渣浆泵,共4台;进浆密度较小,故在调浆池布置1台、隧道内布置2台,共3台37 kW、清水扬程25 m的渣浆泵。进、排浆选用DN150的HDPE管,质量轻,安拆便捷;过中继间设置耐磨钢丝软管,预留量满足中继间伸缩行程需求。顶进过程中渣浆泵主要出现壳体磨损、端部密封失效等问题,施工期间通过在隧道内放置2~3台同类型备用泵,泵体选择时重点考虑品牌耐磨高性能泵;故障时立即更换恢复顶进,故障泵体就地维修,缩短设备停机时间,减少因长时间停机顶力增大风险。

③ 通风与通信:a. 隧道通风采用1台罗茨鼓风机,风压58.8 kPa,风量19.23 m³/min,通风管道选用DN150×4 mm的硬质PVC管送至距顶管机尾部10 m处,隧道内空气良好;若动火或电焊作业时排烟效果较差则需增加轴流风机,后期选用时可更换大功率轴流风机、扩大风管直径,增加送风量,达到快速排烟效果;每个中继间处放补氧袋;顶管机尾部安装含氧量及有毒有害气体四合一探测器,地面操作室实时显示。b. 考虑隧道内人员的流动性、及时性,采用对讲机通信;前期购置自带中继功能对讲机,顶进距离超过500 m后隧道内用电设备增加,信号干扰大,操作室和顶管机尾部注浆人员通信失真;后期改用自组网对讲机,改造中继台供电电压,提高信号放大功率,每300 m设置1台设备,通信效果良好。

④ 供电和照明:地面安装1台AC380 V转

AC660 V升压变压器,机尾安装1台AC660 V转AC380 V降压变压器,隧道内间隔400 m布置1台降压变压器,满足区域内进排泥泵、中继间等设备供电要求(见图6)。隧道内照明采用24 V电压等级的LED灯带,每100 m设置1台照明变压器、1盏应急灯。

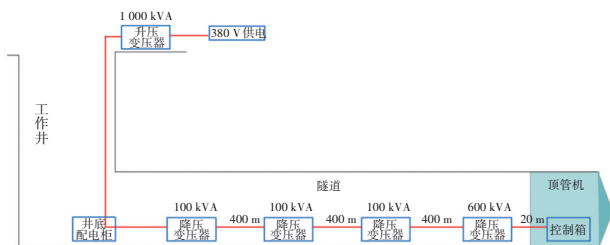


图6 超长距离隧道内供电

Fig.6 Power supply in ultra-long distance tunnels

5 超长距离中继间设置

① 顶管施工中继间主要起增加总推力、降低主顶顶力、调整顶力方向等作用,根据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS 246:2008)计算,需设置8道中继间。

② 超长距离顶管呈现施工周期长、地层变化大、不确定因素多等特点,应对突发状况停机复顶时第1道中继间启用最为频繁,而运行过程中造成其失效因素众多。本项目经综合考虑,第1道中继间设置在顶管机后方20 m,第2道和第1道间距30 m;当1道失效时,启用第2道,再对第1道进行维修,减小因中继间失效造成顶进失败的风险。后续间隔80~130 m设置一道中继间,共设置13道中继间。

③ 每道中继间安装25根液压油缸,每根油缸最大推力800 kN,有效行程500 mm,中继间最大推力20 000 kN。

6 超长距离注浆减阻

① 注浆环设置

注浆孔沿管节内圆周均匀8等分,除底孔外,其他均安装注浆分球阀,通过注浆支管连接,形成一道注浆环,见图7;顶管机后20节均设置注浆环,后部500 m间隔1节设置1道注浆环;500~1 000 m间隔2节设置1道注浆环;尾部500 m间隔2~3节设置1道注浆环;每环注浆支管与总管连接处设置1个支管总球阀,注浆总管采用DN65镀锌钢管,支管采用DN25的高压钢丝软管。

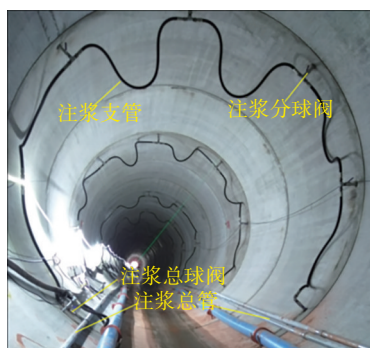


图7 隧内注浆环

Fig.7 Tunnel grouting ring

② 供浆系统设置

地面设置3台三缸注浆泵,1号泵负责顶管机后部200 m注浆环,顶管机尾部2~3道注浆环常开,其他顶进手动补浆;2号泵负责顶管机后续650 m;3号泵负责尾部710 m;形成前、中、后3处注浆点,达到分区、分段降压功效;注浆总管交叉区域经连通球阀重合,平时球阀关闭,任意一台注浆泵故障可打开总管连通球阀,达到临时注浆功效,见图8。

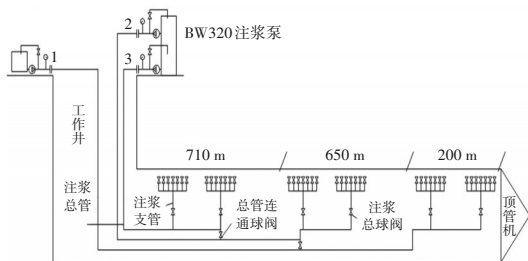


图8 注浆系统

Fig.8 Grouting system

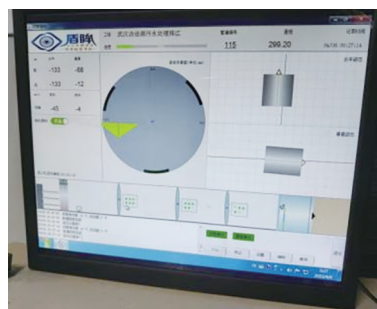
③ 减摩泥浆配比

减摩泥浆采用钠基膨润土、水、高分子聚合物按照一定比例配合而成,根据渣样分析,进行不同地层减摩泥浆指标试验;依据机头成浆套、壁后二次补充损耗的注浆理念,1号泵浆漏斗黏度控制在60~70 s,2号和3号泵浆漏斗黏度为50~60 s。

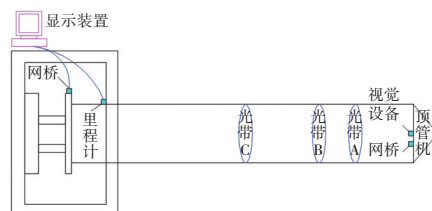
7 超长距离监控量测

① 轴线控制:轴线控制采用智能视觉导向+人工复核综合控制,智能视觉导向通过图像识别技术,同步测量顶管机姿态和前方管节姿态,信息以图形和数字方式显示,如图9所示。机器视觉设备固定安装在顶管机上,始发时测定视觉设备和顶管机的相对关系。沿管节内侧布有3环LED光带,测定的光带中心为管节中心;光带A实现轨迹的延伸,光带B、C提供系统的测量基准;通过洞口里程测量

计,测量顶进距离。系统软件根据顶进距离、顶进轨迹和标志光带的成像数据,实时计算顶管机与设计的轴线偏差。



a. 姿态显示

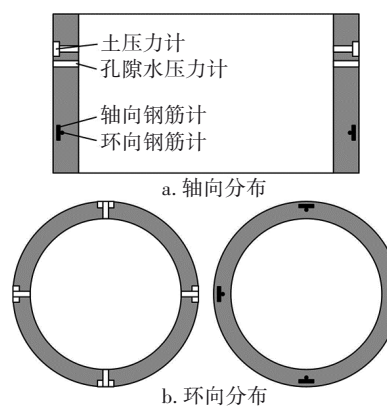


b. 布置示意

图9 智能视觉导向

Fig.9 Intelligent visual guidance

② 管节监测:管节制作预埋土压力计、孔隙水压力计和钢筋应变计,见图10;监测顶进过程中顶进力传递、管周接触压力、注浆压力及管节应力的变化规律,综合分析管节偏转、地层情况、施工参数对管节受力的影响,建立一套综合评价及反馈机制,根据监测参数对顶进力、顶进速度、注浆量等施工参数进行调整并及时纠偏。



a. 轴向分布

b. 环向分布

图10 监测装置预埋示意

Fig.10 Schematic diagram of monitoring device embedding

8 顶管机进洞接收

2#接收井内径8 m,壁厚0.9 m,采用沉井施工工艺,沉井施工时预留洞门,沉井下沉到位,对洞门

端头采用注浆加固,加固区域为沿轴线6 m、洞门两侧2 m。

① 轴线复核:分别在距接收洞口200、100和50 m处对测量控制点、顶管机轴线进行人工复核,贯通前30 m逐渐将顶管机姿态抬高+20~+30 mm,以防机头磕头。

② 接收导轨:接收导轨采用半导轨式,超出洞门1 m,标高低于靠近洞门顶管机标高+20~+30 mm,便于刀盘、前壳体、后壳体、加压舱分体拆除。

③ 水平探孔:洞门圆周及中心范围内打设5个水平探孔,先上后下,钻孔深度2 m,确认端头加固区隔水效果;取芯后探孔无明显线流,每天渗水量小于2 L/h,即满足要求。

④ 洞门止水环:接收井密封单次使用,现场采用单层橡胶密封圈,并准备聚氨酯泵应急堵漏。

⑤ 洞门封堵:顶管机进洞门后,壳体、管节与洞门之间的空隙是水土流失的主要通道,处理不当易造成洞口坍塌;顶管机拆除完毕,管节伸出长度满足要求后通过隧道内2#管节注浆环注入水泥、水玻璃双液浆,待洞口浆液达到强度后,拆除洞口止水装置,采用C35膨胀混凝土将洞口与管节之间的间隙填实。

9 实施效果

自顶管机出洞始发至进洞接收,受管节上浮处理影响,有效掘进205 d,顶进功效最高15 m/d,平均约7.6 m/d。顶管机进洞接收刀盘面黏土粘结现象较轻微,清理后检查刀盘耐磨焊几乎无磨损、全盘22把滚刀无偏磨等非正常失效,边缘10把单刃平头齿滚刀刀圈母体有3~8 mm磨损,撕裂刀、刮刀均正常磨损。管节无破损、无渗漏,贯通横轴线偏差 ≤ 13 cm。摩阻力为0.5~1 kN/m²,小于规范要求值(3~5 kN/m²)。分体式加压舱装置安装后形成空间局部隔断,对顶管机电机散热有影响,采用风机散热后无异常。顶进过程中顶管机出现泥仓压力异常升高、管节上浮等问题,需进行专项研究。

9.1 管节上浮

顶管机顶进至437 m时,距离洞口30 m处逐渐呈上浮趋势至120 m处达到峰值22 cm,然后逐渐回落196 m处恢复至设计轴线,上浮区域均处于淤泥质粉质黏土层。初步分析原因主要是淤泥质粉质黏土层天然状态分布不均,局部存在流塑状态土

层,施工扰动使淤泥质土发生触变,强度显著降低。综合对比采用顶部软弱土体加固、隧内动态压载、隧内顶部注浆、启用中继间降竖向分力等措施,控制顶进过程管节上浮;加强施工过程管节接缝、线形等监控量测;通过多措施并举,管节上浮量安全可控。

① 顶部软弱土体加固:加固范围为管道中心两侧各4 m,纵向上浮区域,深度至管顶以上0.5 m;采用42.5 MPa普通硅酸盐水泥,水泥掺量50 kg/m,桩径0.5 m,间距1 m,呈梅花形布置。

② 隧内动态压载:隧内铺设轨道,平板车运输混凝土块单块质量3.5 t至上拱区段进行压载,顶进过程中根据高程测量动态移动,使配重块稳定在管节上拱峰值区间。

③ 隧内顶部注浆:通过管节顶部预留注浆孔注入浓泥,管节更易形成向下复位,顶部注浆形成黄泥区,增大抗剪强度;配比采用黄泥:膨润土:高分子=1:0.025:0.000 5(体积比)。

④ 中继间启用:启用3号中继间,迎面阻力与中继间前部根管节的摩阻力由3号中继间克服,上浮区段管节受到顶进力降低,竖向分力减小。

9.2 泥仓压力升高

顶管机顶进至1 512 m时,泥仓压力异常升高,排查泥水环流系统正、反循环均正常,长时间静态循环泥仓压力无明显下降;对比发现出水口和进水口水色一致,无携带渣土;打开顶管机仓板直通球阀,有软流塑状渣土排出,初步判断顶管机泥水环流连通阀失效内泄;更换故障连通阀,多次正反循环,仓内淤积渣土排出,泥仓压力恢复正常;拆解连通阀,球体密封已全部磨损、球面有2~4 mm的小坑,内部磨损较大。

10 结论

针对汤逊湖污水处理厂尾水排江工程超长距离复合地层顶管施工面临的各项技术难点,以施工流程为导向,系统地研究了顶管机针对性设计、出洞始发及进洞接收、顶进过程控制、中继间设置、注浆减阻、监控量测等成套技术,实施后达到预期目标,推动了超长距离复合地层顶管技术在排水管道建设中的应用发展。

① 刀盘外环采用导流槽耐磨结构设计、面板密集耐磨网格尺寸缩小为30 mm×30 mm、正面和边

缘滚刀采用高耐磨重型楔齿与平头齿滚刀;渣浆泵针对性选择、隧内备用泵设置及维保综合统筹;有效解决了顶管机、配套设备的可靠性和耐久性问题。

② 采用前、后、外供水系统设计,兼顾刀盘、锥形破碎板、泥水仓排渣口、顶管机管底冲刷,灵活多变、可靠高效。

③ 施工过程中通过地面升压入隧、隧内降压供电、智能视觉导向+人工复核,注浆环、供浆系统、减摩泥浆配比专项设计及施工过程系统控制分析,对讲机通信系统的改造优化等措施,有效解决了超长距离复合地层顶管施工面临的技术难题,也为后续施工技术解决方案提供了新思路。

④ 对浅覆土软弱地层,采用顶部土体加固、隧内动态压载、隧内顶部注泥、启用中继间降竖向分力等多项措施,有效控制了管节上浮量。

⑤ 顶进过程刀具无异常磨损,分体式加压舱换刀的使用效果还需进一步验证。

参考文献:

- [1] 李耀良. 长距离曲线大直径混凝土顶管顶力控制的关键技术研究[J]. 建筑施工, 2014, 36(2): 183-185.
LI Yaoliang. Study on key technology of jacking force control for curved long-distance and large diameter concrete pipe-jacking [J]. Building Construction, 2014, 36(2): 183-185 (in Chinese).
- [2] 王祺, 周毅, 顾广宇, 等. 阳澄湖引水工程超长距离钢顶管施工技术[J]. 中国市政工程, 2020(6): 33-37.
WANG Qi, ZHOU Yi, GU Guangyu, et al. Construction technology of super-long distance steel pipe jacking in Yangcheng Lake diversion works [J]. China Municipal Engineering, 2020(6): 33-37 (in Chinese).
- [3] 蔺建国, 王李昌, 胡斌, 等. 大直径超长距离曲线湖底顶管工程关键技术探讨[J]. 非开挖技术, 2019(2): 47-50, 31.
LIN Jianguo, WANG Lichang, HU Bin, et al. Discussion on key technology of large diameter and super long distance curve bottom pipe jacking project [J]. China Trenchless Technology, 2019 (2): 47-50, 31 (in Chinese).
- [4] 严国仙. 高水头压力下超长曲线钢顶管关键施工技术[J]. 建筑施工, 2012, 34(4): 346-349.
YAN Guoxian. Key construction technology for super

long-distance and curved steel pipe-jacking with high water head pressure [J]. Building Construction, 2012, 34(4): 346-349 (in Chinese).

- [5] 孙庆, 冯文强, 王志云, 等. 大东湖核心区污水传输支隧工程顶管施工关键技术研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(7): 1218-1224.
SUN Qing, FENG Wenqiang, WANG Zhiyun, et al. Key construction techniques for pipe jacking in branches of sewage tunnels in Dadong Lake core area [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7): 1218-1224 (in Chinese).
- [6] 周学锋, 李永峰, 刘凡, 等. 武汉大东湖排水深隧长距离双孔曲线顶管施工[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 51-57.
ZHOU Xuefeng, LI Yongfeng, LIU Fan, et al. Construction of long distance double hole curved pipe jacking for Wuhan Dadonghu deep drainage tunnel [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 51-57 (in Chinese).
- [7] 黄智刚. 长距离曲线岩石顶管技术用于供水管道建设[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 39-44.
HUANG Zhigang. Application of long-distance curved pipe jacking for crossing rock formaton in water supply pipeline construction [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 39-44 (in Chinese).
- [8] 陈镇松. 西江引水工程大直径钢管泥水平衡顶管施工技术[J]. 给水排水, 2011, 37(2): 97-100.
CHEN Zhensong. Slurry balanced horizontal large diameter steel water pipe jacking construction engineering technique [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(2): 97-100 (in Chinese).
- [9] 龚廷民, 贾连辉, 谌文涛, 等. 适用于复合地层的硬岩泥水平衡顶管关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(6): 880-889.
GONG Tingmin, JIA Lianhui, CHEN Wentao, et al. Key technologies of hard rock slurry balance pipe jacking machine for composite ground [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(6): 880-889 (in Chinese).

作者简介: 郑平(1980-), 男, 湖北武汉人, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向为污水、自来水管网等设施建设施工管理。

E-mail: 79876095@qq.com

收稿日期: 2023-04-02

修回日期: 2023-06-02

(编辑: 衣春敏)