

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.24.012

上软下硬地层长距离钢顶管平行顶进施工技术

刘 锴¹, 肖 力², 陈雪华³, 王志晖⁴, 梁东海⁴, 高 伟⁴,
周丽红³

(1. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510600; 2. 广州市水务投资集团有限公司, 广东 广州 510655; 3. 广州金土岩土工程技术有限公司, 广东 广州 510610; 4. 广州北江原水供应有限公司, 广东 广州 510800)

摘 要: 针对上软下硬地层长距离钢顶管平行顶进施工案例匮乏、施工技术研究薄弱的问题,以双线钢顶管下穿大燕河工程为依托,系统阐述顶管始发与接收涌水涌沙防控、燃气管线变形控制、长距离减阻、轴线控制、双线顶进协同、钢管节质量控制等工程重难点,并提出针对性施工措施。通过分析地表沉降与燃气管线变形的监测数据,验证了该技术体系对复杂地层变形控制的有效性。实践表明,采用多功能泥水平衡顶管设备能较好地适应复合地层;合理选用触变泥浆,减阻效果显著,3道中继间均未启用;地层变形控制合理,最大隆起值2.84 mm、沉降值2.9 mm,低于设计值;合理控制顶进参数,实现了顶进过程“零渗漏”。该依托工程顶管施工顺利,效果良好。

关键词: 上软下硬地层; 长距离钢顶管; 双线顶进; 沉降控制

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)24-0085-10

Long-distance Steel Jacking Pipe Parallel Jacking Construction Technology in Soft Upper and Hard Lower Strata

LIU Kai¹, XIAO Li², CHEN Xue-hua³, WANG Zhi-hui⁴, LIANG Dong-hai⁴,
GAO Wei⁴, ZHOU Li-hong³

(1. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Guangzhou Water Investment Group Co. Ltd., Guangzhou 510655, China; 3. Guangzhou Jintu Geotechnical Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510610, China; 4. Guangzhou Beijiang Raw Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510800, China)

Abstract: Addressing the issues of a lack of construction cases and weak research on construction techniques for long-distance steel pipe jacking parallel advancement in strata with soft upper and hard lower layers, based on the project of double-line steel pipe jacking undercrossing the Dayan River, this paper proposes targeted construction solutions by systematically expounding the key and difficult points of the project such as the prevention and control of water and sand leaking during the launching and receiving processes of pipe jacking, deformation control of gas pipelines, long-distance drag reduction, jacking axis control, coordination of double-line jacking, and quality control of steel pipe sections. By analyzing the monitoring data of surface settlement and gas pipeline deformation, the effective control of complex stratum deformation by the technical system was verified. Practical application has shown that

通信作者: 周丽红 E-mail: 690946835@qq.com

the use of multifunctional mud water balance pipe jacking equipment can better adapt to composite formations; reasonably selecting thixotropic mud has a significant drag reduction effect, and none of the three relay stations have been put into use; reasonable control of geological deformation, with a maximum uplift value of 2.84 mm and a settlement value of 2.9 mm lower than the design value; reasonably control the jacking parameters to achieve “zero leakage” in the jacking process. The construction of the top pipe relying on the project was smooth and the effect was good.

Key words: strata with soft upper layers and hard lower layers; long-distance steel pipe jacking; parallel jacking; settlement control

钢顶管凭借强度高、管节光滑、密封性好等优势,已成为地下工程的核心施工工艺,其应用范围从早期“小管径、浅覆土、短距离”逐步扩展至大断面、深埋、长距离场景^[1-3]。然而,复杂地层(如上软下硬)施工时,钢顶管受水土压力、管土摩阻、顶推力等多向荷载耦合作用,易引发掌子面失稳、顶力激增、轴线偏移等风险^[4],严重制约其规模化应用。如何实现全断面穿越上软下硬地层的长距离安全顶进,成为亟待突破的技术瓶颈。

当前研究多聚焦钢顶管施工的单一技术环节:张龙^[5]开发微扰动技术体系降低环境扰动,但未涉及软硬交互地层的适应性问题;荆哲等^[6]、艾慧等^[7]分别从结构稳定性与变形值展开研究,但缺乏双线顶进、长距离等复杂工况验证。由此可见,现有成果难以支撑“上软下硬+长距离+双线顶进+复杂管线”多因素耦合场景的工程需求。

广东省重点水利工程项目——广州北江引水工程是构建广州市多水源安全保障体系、优化水资源结构、解决北部用水需要的重大民生工程,对于珠三角地区跨区域长距离调水具有标杆示范意义。其中,下穿国家管网广南、广肇干线及大燕河段采

用非开挖顶管法施工。针对顶管施工中全断面穿越上软下硬地层、双线顶进叠加扰动、长距离减阻和轴线控制、下穿高压燃气管线等难题,提出了地层适配性顶进参数优化、双线协同调控等施工技术,成功解决了多项施工难题。该工程于2024年6月8日全线顺利贯通,验收合格,效果良好。通过本工程实践验证,形成了覆盖设计-施工-监测的全流程解决方案,积极推动了钢顶管工艺在复杂条件地下工程中的标准化应用。

1 项目概况

1.1 顶管工程概况

广州北江引水工程项目以北江水为取水水源,在花都区新建配套水厂,原水经泵站加压输送至新建水厂,出厂水供给花都区居民生活用水和工业用水。二标工程为取水泵站至京广铁路西侧管线标段,其中下穿国家管网广南、广肇干线及大燕河段采用非开挖双钢管施工。顶管直径2 068 mm,钢管节壁厚34 mm,钢管板材采用Q345B,双线顶管净距为2.5 m,单线顶进长度约592.3 m,管顶埋深7~21 m,顶管顶距河底约6 m。顶管工程平面示意图1。



图1 顶管施工平面

Fig.1 Pipe jacking construction plan

1.2 地质条件

1.2.1 工程地质条件

根据地质勘探资料,顶管沿线场地地层主要有

第四系覆盖层和基岩。其中,第四系覆盖层主要为冲积层形成的粉质黏土、黏土、黏土质砂和冲积砂,按成因及物质组成不同分为两大层:①层人工填土

层(QS)和②层冲积层;基岩主要为石炭系~晚泥盆系长场组、帽子峰组泥质粉砂岩、灰岩(DCcl、DCm),分为(V)层全风化层和(Ⅲ)层弱风化层。顶管施工穿越地层主要为②-6层含泥粗砂及砂砾、V层全风化泥质粉砂岩及Ⅲ层弱风化灰岩,地质纵

剖面见图2,其中顶管在②-6含泥粗砂及砂砾层中穿越长度约450 m,在弱风化灰岩层中穿越长度为10~15 m,该层溶洞发育,大部分溶洞洞腔充填流塑状粉质黏土。

各地层物理力学参数见表1。

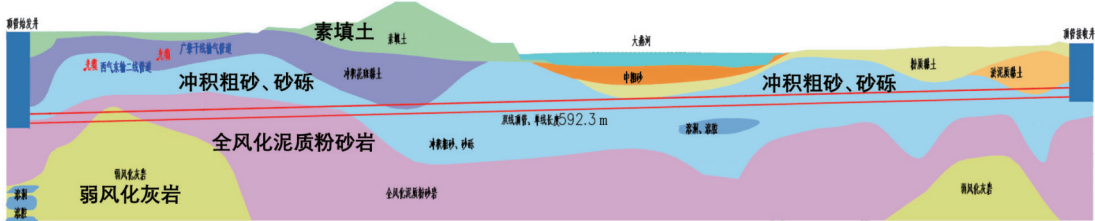


图2 地质纵剖面

Fig.2 Geological longitudinal profile

表 1 各地层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of each layer

土层	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数 $K/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	地基承载力/ kPa
①-2素填土	19.3	19.80	11.7	1.83×10^{-7}	120~150
②-5冲积花斑黏土	18.6	28.35	14.8	2.74×10^{-7}	150~200
②-6冲积粗砂、砂砾	19.0	0	32.9	6.00×10^{-2}	160~220
V层全风化泥质粉砂岩	18.1	12.60	15.1	1.03×10^{-6}	硬可塑:180~200;硬塑-坚硬:200~250
Ⅲ层弱风化灰岩	25.0	12.50	37.5	1.20×10^{-7}	2 500 ~ 3 000

1.2.2 水文地质条件

施工场地的地下水类型主要为第四系松散沉积物孔隙性潜水,埋藏较浅,潜水水位一般为1~3 m,场地中②-1中粗砂,②-6中粗砂、砾砂为主要的储水层,含水量丰富,透水性强,其他土层则透水性微弱。

场地地下水主要接受大燕河河水、大气降水补给,水位随季节变化而变化,春季、夏季河水位高、降雨多,地下水位一般较浅,水量丰富,冬季降雨少,水位略深。

1.3 地下管线

顶管段穿越现状地下管线较多,主要有给水、污水、路灯、电力、燃气、通信、国防等,其中2条高压天然气地下管线,一条为西气东输二线广南支干线,管道直径1 016 mm,为直缝埋弧焊管形式,设计压力10 MPa;另一条为广肇干线,管道直径914 mm,为定向钻施工形式,设计压力9.2 MPa。两条高压燃气管线与顶管顶部的距离分别为7.1、11.0 m(见图1)。

两条燃气管线与顶管竖向相对位置的纵剖面如图3所示。

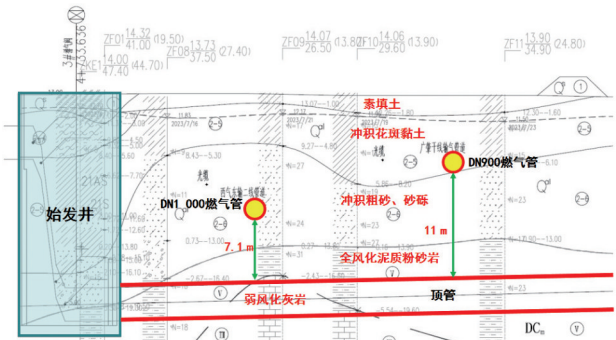


图3 燃气管线与顶管相对位置纵剖面示意

Fig.3 Longitudinal section diagram of the relative position of the gas pipeline and the pipe jacking

2 顶管机选型及针对性设计

2.1 顶管设备选型

本工程顶管主要穿越含粗砂、砂砾层及全风化泥质粉砂岩层(硬塑黏土、中高压压缩性),局部为全断面弱风化灰岩层(较完整~完整、高强度),穿越段既有土层也有岩层,地层变化较大。由于土压平衡顶管机不具备岩石破碎功能,而泥水平衡式顶管机具有破碎和添加高压水防“结泥饼”功能,其适用地层范围广,施工对周围土体扰动小,采用的泥水

循环出渣系统可连续作业,顶进速度快,操作简便,更适合长距离顶管施工。因此,为保障切削能力及施工安全,选用泥水平衡式岩石顶管机。

泥水平衡岩石顶管机全断面切削技术通过泥水仓压力平衡掌子面水土压力,同时以泥浆作为岩土碎屑输送介质,形成闭环机械自动化施工体系。设备核心优势:①循环泥水冷却刀具降低高温损耗;②泥浆循环实时排渣,避免掌子面堵塞。

2.2 顶管设备设计

该设备主要设计参数:刀盘开挖直径2 120 mm,壳体直径2 080 mm,机头总长度5 700 mm,开口率28%,设计中心滚刀4把、中间滚刀8把、刮刀20把、边刮刀8把,驱动总功率4×30 kW,转速1~3 r/min,额定扭矩560 kN·m,纠偏角度±2.5°,主顶油缸为8台200 t千斤顶,可提供最大顶力15 690.64 kN(1 600 t),总机质量48 t。

本工程为双线顶管,投入2台顶管机并前后错开40 m顶进施工。

2.3 顶进力估算与中继间设计

2.3.1 顶进力估算

根据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS 246:2008,简称《规程》)第12.4.1~12.4.2条规定,泥水平衡顶管机顶进施工总顶力可按式(1)计算:

$$F_0 = \pi D_1 L f_k + N_F \quad (1)$$

$$N_F = \frac{\pi}{4} D_g^2 \gamma_s H_s \quad (2)$$

式中: F_0 为顶力,kN; D_1 为管道外径,m; L 为顶进长度,m; f_k 为管外壁与地层平均摩阻力,根据地层取值,kN/m²; N_F 为顶管机的迎面阻力,kN; D_g 为顶管机外径,m; γ_s 为土的重度,kN/m³; H_s 为平均覆盖层厚度,m。

本段顶管工程中,平均覆盖层厚度取14 m,将 $D_g=2.12$ m、 $\gamma_s=19$ kN/m³代入式(2)可得迎面阻力 N_F 约871 kN。

根据《规程》的表12.6.14,触变泥浆减阻后钢管管壁与粉性土、粉细土、中粗砂的平均摩阻力 f_k 分别为4~7、7~10、10~12 kN/m²,由于本工程顶管穿越地层复杂,按最不利情况平均值(8 kN/m²)进行计算。将 $L=592$ m、 $D_1=2.068$ m代入式(1)可得总顶力 F_0 为31 624 kN。

2.3.2 中继间设计

顶管段最大总顶力为31 624 kN,主顶油缸允许

顶推力为16 000 kN,根据《广州北江引水工程(水源工程)二标顶管穿越国家管网广南、广肇干线及大燕河专项施工方案》,钢管管材允许承受顶力为17 424 kN,后靠墙允许反作用力为57 400 kN。根据《规程》,应选取上述参数中的较小值(16 000 kN和17 424 kN)与总顶力进行比较。经对比,总顶力31 624 kN明显大于主顶油缸允许顶推力和钢管允许顶力,因此需布置中继间进行分段接力顶进。中继间可降低单段顶进阻力,确保主顶系统压力不超过顶管设备及管材的承载极限,同时保障钢顶管的结构稳定。

根据《规程》第12.4.4条,中继间设置数量可按式计算:

$$n = \frac{\pi D_1 f_k (L + 50)}{0.7 \times f_0} - 1 \quad (3)$$

式中: n 为中继间数量,个; f_0 为中继间的设计允许顶力,取12 000 kN。

代入相关参数可得 $n=3$ 。第1个中继间布置条件:当主顶油缸总推力达到单台中继间设计推力的60%(即9 600 kN)时,需布置首个中继间。通过顶力与管段摩擦阻力的比值折算首个中继间的理论安装距离;第2~ n 个中继间布置条件:在顶进过程中,启动前一个中继间后,若主顶油缸推力达到中继间设计推力的80%(即12 800 kN),则需布置后续中继间。此原则确保荷载逐级传递,避免局部超载。具体布置见图4。经计算,第一道中继间距离顶管机80 m,第二道与第一道、第三道与第二道中继间均按间隔170 m设置。

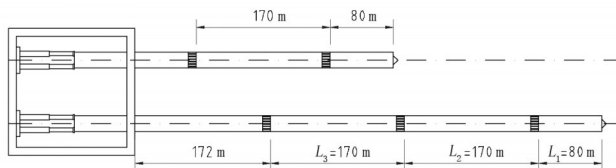


图4 中继间布置平面示意

Fig.4 Layout plan of the intermediate jacking station

本顶管工程单线顶进全程共设3个中继间,并遵循“60%~80%”分级启动原则,通过顶进接力降低单段顶进压力,同时匹配管材强度与设备性能,以保障顶管施工的连续性及钢顶管结构的稳定性。

3 施工重难点及解决措施

本工程施工重难点主要有:富水地层大埋深顶管始发与接收施工风险高、上软下硬地层长距离顶

进阻力大、上软下硬地层顶进姿态及轴线控制难度高、下穿高压燃气管线变形控制难度大、顶管穿越大燕河施工风险大、双线顶进叠加扰动影响控制、钢管节质量控制要求高等7个方面。

3.1 顶管始发与接收施工风险高

本顶管工程覆土深度最深约18.9 m,穿越地层主要为冲积相的粗砂、砂砾层,该层土为稍密~中密状态,地层稳定性较差,渗透系数达 6.0×10^{-2} cm/s,特别在始发与接收洞口附近分布比较集中,且场地地下水丰富,洞门土体加固效果不当极易引发涌水涌沙,还存在机身扭转、顶管机栽头、掌子面失稳、地面沉降超标等高风险问题,因此,顶管始发与接收施工难度和风险较大。针对上述问题,应对措施如下。

① 洞门密封与加固体系

a. 洞门探孔验证:始发前沿洞门轮廓线布设间距 <0.5 m、深2 m的探孔,结合地质雷达验证无涌水涌沙后验收;b. 设双道密封结构:采用盾尾刷+油脂和帘布橡胶圈+可调节的压板形成双道动态柔性密封,防止地下水渗入;③缝隙填充加固:洞门钢环外侧浇筑C30混凝土并注水泥浆,注入压力为0.2~0.4 MPa,以填充围护结构与止水钢环间的缝隙;④端头加固验收:采用 $\phi 1\ 000@600$ 三管高压旋喷桩加固端头,桩底穿透砂层进入不透水层不小于2 m,然后钻芯取样检测确保28 d无侧限抗压强度不小于1.5 MPa。

② 顶进过程控制

a. 参数控制:穿越加固区时顶进速度控制在5~10 mm/min,刀盘扭矩小于额定值的80%,避免扰动加固体;b. 动态调控:机头出加固区后30 min内泥水压力需比地下水压力高0.02~0.04 MPa,并根据监测数据实时调整;c. 管节重力平衡:顶管机尾与前3个管节的刚性连接以平衡重力,避免顶管机栽头;④机头防扭转:洞门钢环内侧设6道20 mm厚Q345B钢板定位块,以防顶管机发生扭转。

③ 安全锁定与监测

a. 防后退装置设计:管节安装前静置10 min,待掌子面稳定,安装防后退装置后再回缩千斤顶;b. 变形监测:始发与接收时监测地面变形,数据正常时监测频率按2~3次/d,异常时加密至1次/h,直至变形值趋于稳定。

3.2 上软下硬地层长距离顶进阻力大

顶管单次顶进长度约592 m,为长距离顶管,穿越上软下硬复合地层,如穿越粗砂及砂砾、全风化泥质粉砂岩及弱风化灰岩等。顶进摩阻力大、减阻要求高,理论总顶进阻力31 624 kN,故采用触变泥浆减阻技术,形成“注浆系统设计-泥浆性能调控-减阻效果验证”控制体系。

3.2.1 注浆系统设计

a. 注浆节点布置:沿钢管节外壁均匀布设环形注浆孔,每环4孔,便于形成连续润滑泥浆套;b. 注浆压力控制:减阻注浆压力高于地下水压力0.02~0.04 MPa,避免压力过低导致浆液流失或过高引起较大地层变形扰动;c. 注浆量优化:按顶管机超挖量的1.5~2.0倍控制注浆量,穿越粗砂层和灰岩段不少于3倍控制,以此填充管土间隙,降低顶进摩阻力。

3.2.2 触变泥浆性能要求

采用钠基膨润土、水、羧甲基纤维素(CMC)增稠剂和分散剂,按一定比例配制后,保证泥浆黏度为25~35 Pa·s、含砂量 $<3\%$,使减阻泥浆套具有一定的强度支撑土体,防止周边土层塌陷。

3.2.3 动态调控与效果验证

① 顶力降幅。分析左线顶管顶力数据,结果见图5。

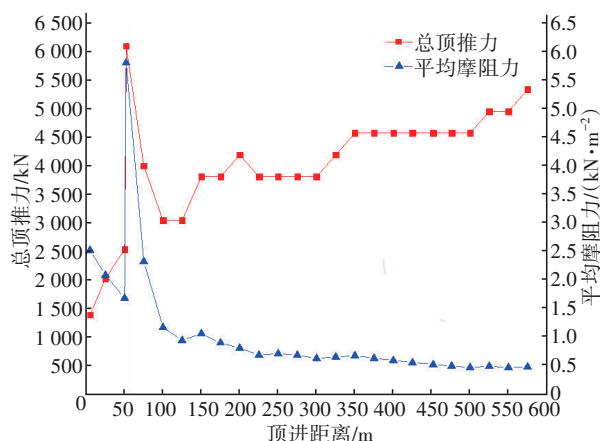


图5 左线顶管顶进阻力分析

Fig.5 Resistance analysis diagram of the left-line pipe jacking

a. 当顶进0~35 m时,穿越地层主要为全风化泥质粉砂岩,顶力呈线性增长趋势,但顶力值相对较低,主要由于泥质粉砂岩黏聚力低、内摩擦角小,使得切削阻力较小。值得注意的是,平均摩阻力随顶

距增加而减小,从初始约 6.2 kN/m^2 降至 4.2 kN/m^2 ,这得益于减阻泥浆形成的稳定泥浆套,有效降低了管壁摩擦系数;b. 当顶进 $35\sim 45\text{ m}$ 时,穿越地层为弱风化灰岩,顶力除随顶距增加而增大外,还因地层由软变硬而出现小幅增加,主要源于弱风化灰岩强度高于泥质粉砂岩,顶进时迎面阻力相对较大,但由于岩石表面光滑使平均摩阻力呈小幅减小趋势;c. 在 $35\sim 45\text{ m}$ 顶进段顶力出现剧增情况,主要因左线顶管机邻近燃气管线且右线顶管准备始发等迫使左线顶管停机多日,泥浆套失效,复顶时顶力值骤增 2.5 倍。当顶管机在 $2\sim 3$ 个顶程后注浆恢复正常,摩阻力也回归正常值,由此说明泥浆套对摩擦阻力具有关键控制作用;d. 当顶进 $45\sim 170\text{ m}$ 时,为全风化泥质粉砂岩,地层由硬变软,顶力随顶距增加而缓慢增大,平均摩阻力逐渐降至 1.5 kN/m^2 左右。该段数据验证了软弱地层中长距离顶进时,泥浆套保持对摩擦阻力累积控制的重要性;e. 当顶进 $170\sim 592\text{ m}$ 时,穿越地层稳定,主要为粗砂及砂砾,顶力随长距离累积效应明显,且由于砂层内摩擦角较大,摩阻力增加,顶力增长但幅度不大,平均摩阻力逐渐降低并趋于稳定,主要由于减阻泥浆工艺的合理控制使得泥浆套连续且稳定,平均摩阻力从 1.5 kN/m^2 缓慢降至 1.3 kN/m^2 。

分析右线顶管顶力数据,结果见图6。

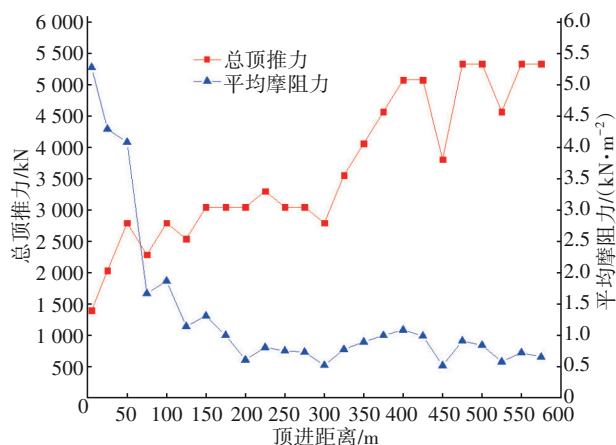


图6 右线顶管顶进阻力分析

Fig.6 Resistance analysis diagram of the right line pipe jacking

当顶管机顶进 $0\sim 300\text{ m}$,顶力和平均摩阻力变化与左线顶管相差不大。当顶进 $300\sim 592\text{ m}$ 时,顶管穿越地层主要为粗砂及砂砾地层,顶力随顶距增加而缓慢增大,但在地层交界处出现突增,可能因

局部泥浆套破坏或者砂砾土结构较密实,且该层土渗透性强,泥浆易流失、渗透,而又没有及时补浆,使得顶力随摩阻力瞬间增大而增加。平均摩阻力出现短暂上升后逐渐降低并趋于稳定在 1.2 kN/m^2 。

左、右线顶管到达接收端时最大顶力在 $5\,200\sim 5\,300\text{ kN}$ 之间,较理论值降低 83% ,平均摩阻力分别由 6.2 kN/m^2 降至 1.3 、 1.2 kN/m^2 ,平均摩阻力降低 80% ,减阻效果显著。全程设置 3 道中继间,而在顶进过程中没有启用。

② 参数联动控制。结合刀盘扭矩和顶进速度,动态调整减阻泥浆注浆量,可避免软硬地层交界处泥浆分布不均,影响减阻效果。

③ 沉降防控。泥浆及时填充超挖间隙并结合地面沉降监测数据,及时修正注浆参数,地面累计变形量控制在 $\pm 5\text{ mm}$ 内。

本工程基于减阻后的实测效果,实际最大顶进总顶力约 $5\,300\text{ kN}$,约为理论计算值的 17% ,结合设备与管材的允许承载力,即主顶油缸、管材实际利用率均未超过约 70% ,且全程并未启用中继间。可见,减阻效果良好,技术经济性良好,建议类似工程参考,优化中继间的布置,避免设计冗余导致浪费。

3.3 复合地层长距离顶进姿态及轴线控制难度大

长距离(592 m)顶管在软硬地层中顶管机掌子面受力不均匀易导致顶管机姿态漂移,且长距离激光测量易受散射干扰,轴线测量难度大。此外,由于长钢管柔性较大,在不均匀荷载作用下易产生弯曲变形,长距离顶管易发生顶进姿态偏移,表现为轴线偏差或局部隆起。因此,整体长距离顶进姿态和轴线控制难度大,需采取有效应对措施。

① 测量系统优化

采用激光电子经纬仪与机头测量激光靶位联动,强化抗散射干扰能力;每顶进 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 复测轴线与标高,结合地层情况调整间隔,及时微调避免累计偏移;测量结果实时上传,形成偏差曲线预判风险;每顶进 $30\sim 50\text{ m}$ 采用全站仪人工复测,比对数据后进行合理纠偏。

② 动态纠偏控制(分级纠偏原则)

一级纠偏,即单次纠偏角度 $<0.5^\circ$,并通过纠偏油缸微调渐进修正;二级纠偏,即当累计偏差超限时,暂停顶进,分析地层后制定多步纠偏方案。

③ 地层适应性调整

依据顶进扭矩、泥水仓压力突变判断地层界

面,提前降速至小于 10 mm/min;软弱地层采用低转速高扭矩,硬质地层采用高转速低扭矩,减少振动对测量精度的影响。

④ 增设测力装置

及时监控顶进压力与土体压力的平衡,出现压差及时调整顶进参数和纠偏,并通过自动纠偏功能调整顶进方向,减少人为误差,防止因地层阻力不均和钢管受力不均引起的顶管扭转或者偏移。

3.4 下穿高压燃气管线变形控制难度大

顶管段穿越现状地下管线较多,其中直径为 1 016 mm 的西气东输二线广南支干线(距顶管顶部 7.1 m)和直径为 914 mm 的广肇干线(距顶管顶部 11 m),管线与顶管之间地层为粗砂、砾砂层,管线允许变形值为 10 mm。燃气管对土体变形极为敏感,施工扰动易引发安全风险,因此,下穿高压燃气管线变形控制是重难点,施工中主要采用主动控制和被动控制措施。

3.4.1 主动控制

① 预加固处理:燃气管线距离始发工作井较近,且西气东输二线广南支干线与顶管竖向距离最小,因此,在始发井基坑内采用全方位高压喷射(MJS)水平桩对该燃气管线下方顶管四周土体进行加固,减少施工扰动。

本次共布置 23 根 MJS 水平桩,桩径 2 m,桩体角度 135°~180°(朝下),桩间搭接不小于 0.3 m,桩长 33.50~44.32 m(钻孔入岩层 1 m 处,喷浆至新地连墙迎土面),西气东输管道 MJS 水平桩布置见图 7。MJS 桩施工完成后进行强度检验,达到设计要求后方可开始顶管施工。

② 顶进参数优化:通过优化顶进参数,主动抑制施工扰动。a. 压力匹配:顶管机头水土压力设定为 1.00~1.05 倍静止土压力,以避免超挖或欠挖;b. 速度控制:穿越段顶进速度严格控制在 10~30 mm/min,匀速推进,以减少速度突变引发的附加荷载;c. 纠偏同步:纠偏角度 $<0.5^{\circ}$,与顶进速度联动,小幅渐进调整,防止机身振动加剧管线变形。

③ 注浆系统精准调控:顶管机穿越燃气管段的地层上部为全风化泥质粉砂岩、下部为弱风化灰岩,地层上软下硬,上部较软地层切削快、排渣快,而下部硬质地层切削速度慢、排渣慢,如此容易形成倒三角导致掌子面坍塌或失稳,因此需通过调节排浆量及压力来维持掌子面土体稳定。具体措

施:a. 调整进排浆量和速度,使排浆量和速度均小于进浆;通过泥浆内循环来保持泥水压力平衡,当调小排浆量后,顶管机泥水仓上部压力变大,至与下部压力相同则保压成功;此外,还可通过内循环切削较硬地层达到与上部较软地层的切削量同步后再排渣,进而有效平衡仓内与掌子面的压力。b. 同步注浆管理:新拌触变泥浆密度为 1.1~1.15 g/cm³、黏度为 18~20 Pa·s;静置 24 h 后黏度为 30~50 Pa·s,确保浆液固结强度。正常段注浆量为 120%~150%理论空隙体积,若穿越燃气管段则增加 10%~15%。c. 循环泥浆参数控制:泥浆密度为 1.05~1.15 g/cm³、黏度为 22~30 Pa·s,进浆压力略大于排浆压力,可避免浆液流失导致地层损失。

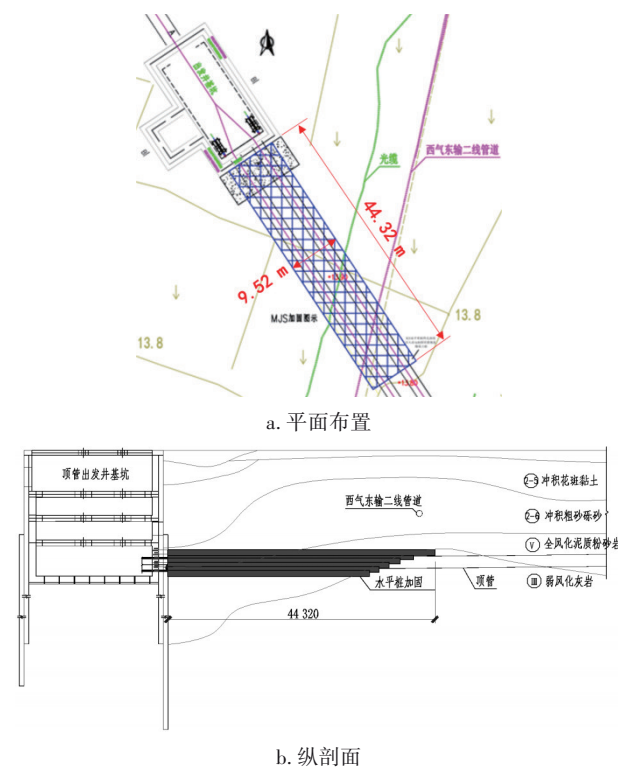


图 7 MJS 水平桩布置

Fig.7 Schematic diagram of horizontal MJS pile layout

3.4.2 被动控制

① 监测频率:正常时沉降监测为 2~3 次/d,当变形速率 >1 mm/d 时,加密至 4~6 次/d。② 当燃气管线累计变形 >6 mm 或连续 2 d 变形速率 >3 mm/d 时,启动应急响应。③ 应急注浆:通过管节顶部预埋注浆孔注入浓泥,注浆压力 <0.3 MPa,分次少量填充以控制抬升。注浆后持续监测 48 h 至变形速率恢复至 1 mm/d 以下,保障燃气管线安全。

3.5 顶管穿越大燕河施工风险大

顶管穿越大燕河河涌,河床覆土厚度仅7.1 m,河床底为中粗砂层,富含承压水,顶管施工易引发渗漏、管节上浮、轴线偏离等。此外,施工扰动可能破坏河床下方土体结构,形成局部空洞或土体松散区,后期受水流冲刷易诱发差异沉降^[8]。针对上述难题,采取以下3项应对措施。

① 顶进参数与轴线控制

a. 智能导向系统:采用激光电子经纬仪与机头内埋设的传感器联动,实时监控顶进轴线偏差,纠偏角度 $<0.5^{\circ}$,路径误差控制在 $\pm 1\%$ 以内;b. 顶力与速度匹配:砂层段顶进速度控制在20~40 mm/min,顶力按设计值的1.2倍预控,避免超挖引发塌陷,同时及时注浓泥进行地层填充。

② 抗浮与渗漏防控

a. 管节配重设计:在管节内放置钢质压重块,平衡地下水浮力;b. 管材优化:管节连接处采用焊接,单节钢管长度取6 m,尽可能减少接头数量并严控焊接质量,防止接口渗漏。

③ 动态监测与应急响应

a. 沉降监测网:沿大燕河段布设间距 <5 m的沉降监测点,河水监测频率为2~3次/d;当沉降监测速率 >3 mm/d时启动预警;b. 应急注浆预案:预备浓泥浆,通过管节顶部注浆孔进行补偿注浆,填充地层损失,单孔注浆压力比地下水压力略大。

3.6 复合地层双线顶进叠加扰动风险与控制措施

本工程2台顶管设备在同一个始发井内先后始发顶进施工。先行顶管施工破坏原始土体应力平衡,引发应力重分布,后行顶管二次扰动导致土体应力二次重分布,叠加水土压力,增大地表沉降风险。而且,在上软下硬地层中顶进施工,软土层受扰动后易塌陷,硬质地层则阻碍应力释放,形成局部应力集中,进一步放大变形累积效应。因此,双线顶进施工地表变形叠加效应显著,上软下硬地层加大地层变形累积效应,需要采取有效控制措施。

① 顶进参数动态调控

a. 泥水压力匹配:在软弱地层顶进时,根据地层渗透系数合理调整泥水仓压力,设定为1.1~1.3倍静止土压力。在硬质地层顶进时,减小泥水仓压力设定值,宜小于1倍静止土压力。b. 顶进速度与注浆联动:控制顶进速度为20~40 mm/min,注浆量按1.2~1.5倍理论空隙体积动态调整,并结合地表

沉降数据实时优化。

② 顶进工序优化与间隔控制

错峰推进管理:双线顶管纵向间距40 m,避免同步顶进时的应力叠加效应。

③ 止退装置与抗扰动加固

a. 止退装置安装:沿顶进轴线方向,在始发洞口两侧焊接H型钢支撑基座,在顶管机壳和管节外壁安装抱箍且两侧预留支端或者焊接止退板。管节拼装期间,用基座撑住支端或止退板,通过止退装置锁定管节位置,防止顶管机和管节回缩后退。b. 地层预加固:后行顶管轴线外侧3 m范围进行注浆加固,形成抗扰动隔离带,降低双线叠加影响。

④ 动态监测和参数控制

a. 布设沉降监测点,要求地表累计沉降 <15 mm,单日沉降速率 <5 mm/d,并实时传输数据至操作台,触发超限预警;b. 控制顶进轴线偏差为 ± 20 mm,顶管机单次纠偏角度 $<0.5^{\circ}$;c. 当沉降数值超限时,立即启动补偿注浆,压注浓泥填充地层损失,注浆压力 <0.3 MPa。

3.7 大直径厚壁钢管节制作质量要求高

本工程顶管的直径2 068 mm、壁厚34 mm钢管节,属于大直径厚壁钢管,因此对钢管质量控制要求较高,需要注意板材厚度公差超标、强度离散,加工椭圆度偏差大,运输未加支架易变形,焊缝质量及防腐要求高等问题。为保证成品质量,从源头、过程、终端3个方面制定控制措施。

① 管节制作与加工控制

a. 驻厂监造:驻厂监督板材厚度偏差为 ± 0.5 mm,屈服强度 >345 MPa,椭圆度偏差小于管径的1%,每批次管材随机抽取3%~5%进行力学性能测试。b. 进场复验:进场时对钢管外观质量进行复验,焊缝表面无裂纹、气孔,错边量不大于2 mm,管节直线度偏差 $<0.15\%L$ (L 为管节长度)。通过驻厂监造与进场复验,消除原材料与加工缺陷。

② 焊接工艺与质量管控

a. 采用对称分段退焊法,两管节焊接对口间隙宜为3.0~4.0 mm,错边量 <2 mm,焊前坡口清洁度达Sa2.5级。b. 一次连续焊接完成,减少接头数量,焊缝余高不大于4 mm,宽度应均匀。若出现缺陷深度 >1 mm或长度 $>10\%$ 焊缝总长时进行挖补,同一位置挖补小于2次。c. 无损检测:采用100%超声波检测和10% X射线检测。焊缝类别为一类,射线透照

技术等级为B级。以标准化焊接工艺与高精度检测,确保结构完整性。

③ 内外防腐协同防护

a. 内防腐:采用符合涉水卫生安全的0.6 mm厚环氧引水舱涂料(加强级防腐);b. 外防腐:采用0.3 mm厚改性水泥砂浆临时防腐;c. 焊缝检测:焊缝全部进行2.5 kV电火花检测(无漏点),厚度测量点密度 >5 点/ m^2 且偏差 $\leq \pm 10\%$,通过内外防腐涂层协同设计抵御长期水环境侵蚀。

4 施工监测

4.1 监测目标

通过实时监测地表与地下管线变形,预防顶管施工引发的环境风险,进一步来评估上软下硬地层中长距离钢顶管双线顶进技术的适用性与可靠性。

4.2 横向地表变形监测

为便于分析,在左右线顶管距离始发井47、50 m处分别取一组监测断面,覆盖双线顶管叠加扰动敏感区域。每组断面设置3个监测点,对称分布于双线顶管轴线及两侧3 m处,编号为DB-1~DB-6,管线及地表沉降监测点布置见图8。

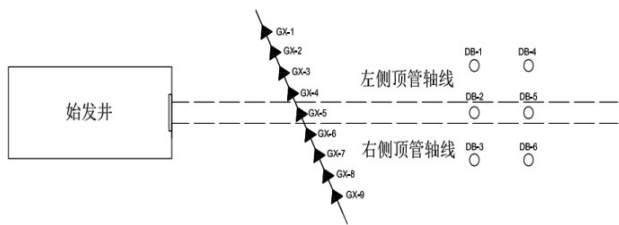


图8 管线及地表沉降监测点布置

Fig.8 Layout of pipelines and surface settlement monitoring points

当左线顶管机刚好顶进至西气东输二线广南支线高压燃气管线正下方时(设为时间起点),右线顶管开始顶进。分析左右线顶管在10 d内的沉降数据(第1~3天左线顶管穿过监测断面,第6~10天右线顶管穿过监测断面),绘制地表变形曲线见图9。

由图9可知,在左右线顶管先后通过监测断面过程中,实际监测数据最大隆起量出现在DB-2处,即双线顶管中心区域,其值为1.58 mm;最大沉降量出现在DB-5处,即双线顶管中心区域,其值为2.84 mm。所有测点数据显示地表变形情况稳定,各测点累计变形量波动均在 ± 3 mm内,远低于规范允许值($-30 \sim +10$ mm)。

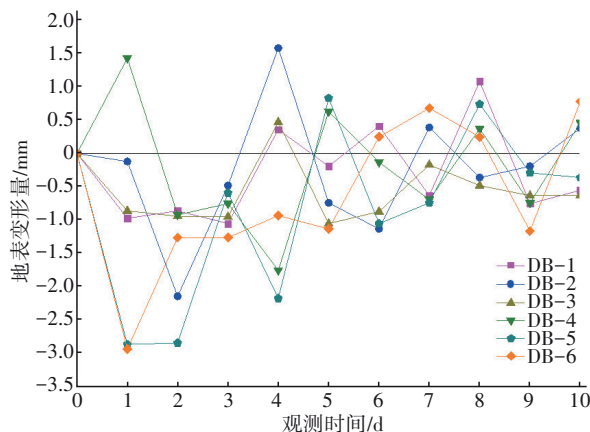


图9 地表变形曲线

Fig.9 Surface deformation curve

综上所述,双线顶管施工对地表变形影响可控,也验证了顶进参数优化、注浆压力匹配等关键技术的安全性与可靠性。

4.3 地下高压燃气管线变形监测

为研究顶管施工对高压燃气管线的影响,选取距顶管顶部7.1 m且最近的DN1 000燃气管线为研究对象,沿燃气管线每隔2.5 m对称布设9个沉降监测点(GX-1~GX-9,覆盖顶管施工影响范围),得到管线沉降曲线如图10所示。

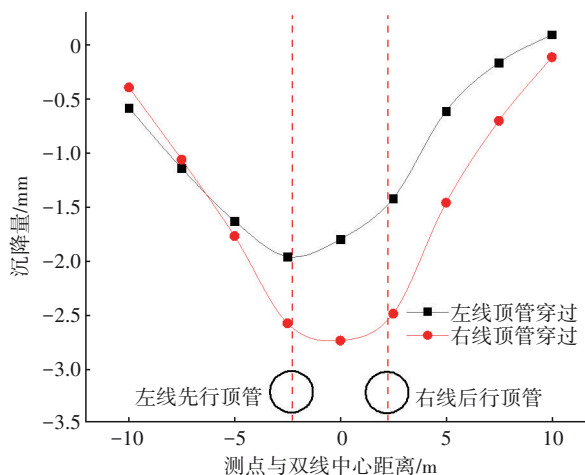


图10 管线沉降曲线

Fig.10 Pipeline settlement curve

当左线顶管穿过管线时,管线最大沉降量出现在双线顶管中心偏左位置,沉降值为-2.0 mm;当右线顶管穿过管线时,管线最大沉降位置在双线顶管轴线中部,沉降中心向右偏移,沉降值为-2.9 mm。从整体来看,当监测点距离顶管施工范围越远,其沉降量越小,说明高压燃气管线沉降量与距离顶管轴线的远近呈负相关,受顶管施工影响范围集中在

± 10 mm,最大沉降值远低于设计限值10 mm。综上,燃气管线变形可控,验证了地层预加固、泥水压力平衡等管线保护措施的有效性,也证明上软下硬地层双线顶管施工技术安全可靠,管线始终处于安全状态。此外,双线顶进叠加效应导致管线沉降中心偏移,后续工程需进一步优化双线间距与推进时序;通过实时监测数据为动态调整顶进参数(如注浆压力、顶进速度)提供科学依据,降低施工风险。

5 结论

广州北江引水工程上软下硬地层的大直径、长距离钢顶管施工经验总结如下:

① 多功能泥水平衡顶管设备施工效率高,技术可靠。

② 采用触变泥浆减阻效果显著,实际顶力为理论值的83%,平均摩阻力降低80%。

③ 通过合理控制双线顶管推进时间,降低叠加扰动效应,双线顶管中心区域最大沉降2.84 mm,燃气管线最大沉降-2.9 mm,均远低于设计值,验证了地层预加固与注浆压力动态调控的有效性。

④ 通过合理控制顶进参数和轴线控制技术,顶管下穿大燕河段实现“零渗漏”。

⑤ 通过驻厂监造、严格检验等措施,确保了钢管节质量,为顶进工程及后期运行提供了保障。

参考文献:

- [1] 邹峰. 软土地质条件下超长距离钢顶管关键技术[J]. 山西建筑, 2022, 48(10):184-187.
ZOU Feng. Key technologies of ultra-long distance steel pipe jacking under soft soil geological conditions [J]. Shanxi Architecture, 2022, 48 (10) : 184-187 (in Chinese).
- [2] 许龙, 汪洪涛, 钟俊彬, 等. 长距离钢顶管关键质量要素设计与控制[J]. 给水排水, 2010, 36(4):49-53.
XU Long, WANG Hongtao, ZHONG Junbin, *et al.* Design and control of key quality elements for long-distance steel pipe jacking [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(4):49-53 (in Chinese).
- [3] 黄智刚, 艾慧, 王勉, 等. 长距离钢顶管管道应力应变监测及应用[J]. 水利科技, 2023(2):25-29.
HUANG Zhigang, AI Hui, WANG Mian, *et al.* Stress and strain monitoring and application of long-distance steel pipe jacking pipeline [J]. Hydraulic Science and

Technology, 2023(2):25-29(in Chinese).

- [4] 郑守铭. 超长距离钢顶管穿越富水砂层的关键技术[J]. 福建工程学院学报, 2022, 20(4):322-326.
ZHENG Shouming. Key techniques of super-long-distance steel pipe jacking through water-rich sand stratum [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2022, 20(4):322-326(in Chinese).
- [5] 张龙. 超大口径钢顶管关键技术研究[J]. 建筑施工, 2020, 42(1):113-115.
ZHANG Long. Research on key technology of super large diameter steel pipe jacking [J]. Building Construction, 2020, 42(1):113-115(in Chinese).
- [6] 荆哲, 房鹏帅, 张耀阳, 等. 高水位软弱地层条件下大直径钢顶管稳定性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27):12131-12138.
JING Zhe, FANG Pengshuai, ZHANG Yaoyang, *et al.* Stability of large diameter steel pipe jacking under the condition of high water level and weak stratum [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (27) : 12131-12138(in Chinese).
- [7] 艾慧, 龚雪原, 申永江, 等. 中砂层长距离过江钢顶管受力特性现场试验研究[C]//黄河水利出版社. 2023中国水利学术大会论文集(第三分册). 郑州:黄河水利出版社, 2023:195-203.
AI Hui, GONG Xueyuan, SHEN Yongjiang, *et al.* Field experimental study on the force characteristics of long-distance steel pipe jacking across rivers in medium sand layers [C]// The Yellow River Water Conservancy Press. Proceedings of the 2023 China Hydraulic Engineering Academic Conference (Volume 3). Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2023:195-203(in Chinese).
- [8] 韩建东. 超大断面矩形顶管浅埋过河施工技术[J]. 工程技术研究, 2019, 4(10):47-48.
HAN Jiandong. Construction technology of shallow buried river with super large section rectangular jacking pipe[J]. Engineering and Technology Research, 2019, 4 (10):47-48(in Chinese).

作者简介:刘锴(1979-),男,广东海丰人,本科,工程师,主要从事城乡市政水基础设施等施工、设计及科研工作。

E-mail:19708687@qq.com

收稿日期:2025-06-19

修回日期:2025-08-11

(编辑:衣春敏)