

水下复杂地层大直径圆形泥水平衡顶管施工技术

吕远

武汉市市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]随着城市建设日趋成熟,城市空间之间的联系发展越来越密集,受空间及地形的限制,穿越河流、湖泊等新建管道也越来越多。大直径泥水平衡顶管机穿越:岩溶发育区、全断面岩层、上软下硬地层、高黏粒老黏土地层等复杂地层,顶管机选型、刀盘及刀具选型、顶进姿态控制、防刀盘结泥饼、长距离顶进施工等问题是复杂地层泥水平衡顶进的关键问题。结合某工程实例详细阐述了复杂地层水下大直径圆形泥水平衡顶管的施工工艺、施工流程、操作要点及相应技术要求。

[关键词]复杂地层;大直径;水下顶管

DOI: 10.33142/aem.v3i12.5151

中图分类号: TU823

文献标识码: A

Construction Technology of Large Diameter Circular Mud Water Balance Pipe Jacking in Underwater Complex Stratum

LYU Yuan

Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: With the maturity of urban construction, the connection between urban space is becoming more and more intensive. Due to the limitations of space and terrain, there are more and more new pipelines crossing rivers and lakes. Large diameter slurry balanced pipe jacking machine crossing: karst development area, full section rock stratum, upper soft and lower hard stratum, high clay and old clay stratum and other complex strata. The selection of pipe jacking machine, cutter head and cutter, jacking attitude control, prevention of cutter head mud cake, long-distance jacking construction and other problems are the key problems of slurry balanced jacking in complex strata. Combined with an engineering example, the construction technology, construction process, operation points and corresponding technical requirements of underwater large-diameter circular mud water balance pipe jacking in complex formation are described in detail.

Keywords: complex strata; large diameter; underwater pipe jacking

引言

随着城市建设日趋成熟,城市空间之间的联系发展越来越密集,受空间及地形的限制,穿越河流、湖泊等新建管道也越来越多^[1]。泥水平衡顶管施工属于机械化、长距离顶进的非开挖施工技术,施工具有安全性高、施工效率高、适用土质范围广以及对环境干扰小等特点,切实解决了施工中受地形限制、长距离顶管限制、施工安全、环境污染等传统施工工艺存在的各项问题,在我国近年来逐步得到推广和应用^[2-3]。但在岩溶发育区、全断面岩层、上软下硬地层、高黏粒老黏土地层等复杂地层情况下单一采用顶管法施工较为困难。

本工程为新建内径 DN1800~DN3200 初期雨水收集管道,将现有南湖沿岸部分排水箱涵雨水截流收集至初雨处理设施进行集中处理达标后,避免排水箱涵雨水直接流入城市湖泊,造成施工湖水污染。东线初雨管道直径内径为 2400mm、3200mm,外径为 2920mm,总长约 2.5km,其中 2km 沿南湖湖岸线穿越南湖湖底,经查阅地勘和施工补勘,顶管区间穿越岩溶发育区、全断面岩层、上软下硬地层、高黏粒老黏土地层等多种复杂地层。顶管区间穿越多种复杂地层时,顶管机选型、洞口防水处理、顶进效率控制、防刀盘结泥饼、长距离顶进施工等问题是技术突破的关键问题。论文结合工程实例探讨复杂地层水下大直径圆形泥水平衡顶管施工技术。

1 工程概况及工艺原理

1.1 项目概况

某工程主要在南湖东北岸 DN1800~DN3200 初期雨水收集管道,在沿线现有雨水箱涵上新建截流设施,通过截流设施将雨水箱涵来水经截流井、沉砂井后进入初雨收集管道,汇总至初雨处理设施进行集中处理达标后排入现状尾水箱涵,避免排水箱涵雨水直接流入城市湖泊,造成施工湖水污染。初雨管道西起幸福路与文荟街交叉口,东止南湖大道,全长约 7.2km,管线主要采用重力流方式。工程涉及顶管法、沉井法、明挖法等多种工法。工程实施后有利于完善区域

初期雨水收集及处理系统，消除黑臭水体，提升南湖水质，改善区域生态环境，助力南湖滨水生态绿城的打造。

1.2 水位地质概况

东线穿湖段顶管主要穿越④粉质黏土层、⑤粉质黏土混砾石、⑦碎石土、⑧-1 强风化泥岩、⑧-2 中风化泥岩、⑨ 中风化石灰岩和溶洞发育区，其中岩层长度约 700m，顶管机直径 2920mm，主要为半岩半土、全断面岩层等，地质特征如表 1 所示：

表 1 顶管区间穿越地层地质特征

序号	地层	地质特征
1	粉质黏土	粘粒含量高，呈可塑~硬塑状。
2	粉质黏土混砾石	粘性土及砾砂混合组成，呈硬塑/中密。
3	碎石土	砾石含量约 60%，大小 3~80mm，主要成分为砂岩、灰岩，局部夹大块漂石。
4	强风化泥岩	泥质结构，岩芯呈半岩半土状，局部夹中风化碎块。天然状态单轴抗压强度为 0.24Mpa。
5	中风化泥岩	泥质结构，中厚层状构造，为极软岩，岩体基本质量等级为 V 类。天然状态单轴抗压强度为 3.5Mpa。
6	中风化石灰岩	灰白、青灰色、局部呈暗红色、中厚层状构造，隐晶质结构，裂隙发育，岩芯较完整，多呈柱状，局部碎块状；部分钻孔揭露有溶洞，为较软岩，岩体基本质量等级为 IV 类。饱和状态单轴抗压强度为 31~55Mpa。

勘察场地内地下水类型主要为上层滞水及岩溶裂隙水。上层滞水赋存于表层填土层中，无统一自由水位，有一定水量，水量及水位随季节变化而变化，且很不稳定，其水量主要受大气降水垂直渗入补给和局部地表水侧向渗入补给。岩溶裂隙水主要赋存于灰岩的溶洞及裂隙中，主要补给来源为地层垂直渗透及侧向裂隙补给，该层水位埋深较深，勘察期间未测到该层地下水位。南湖常水位为 18.65m，最高水位为 19.65m，历史最高水位为 2016 年水位约为 20.5m。

2 施工工艺流程及操作要点

2.1 施工工艺流程

工艺流程图见图 1 所示。

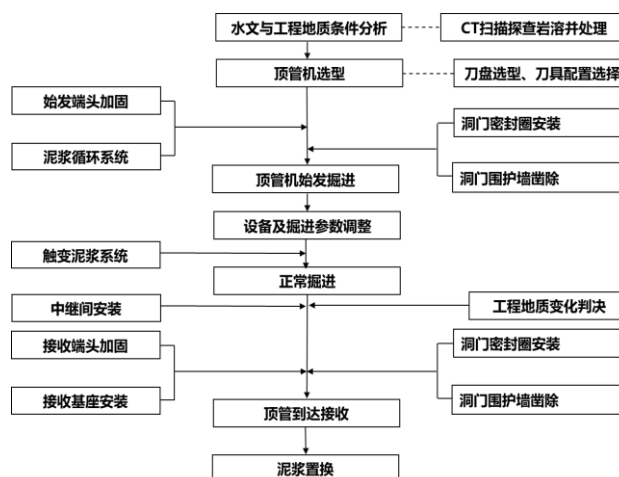


图 2 水下复杂地层大直径圆形泥水平衡顶管施工技术

施工工艺流程

2.2 工艺操作要点

该工艺操作要点主要包括：水文与工程地质条件分析、端头加固、洞门密封圈安装、顶管机始发掘进、设备及掘进参数调整、正常掘进、顶管到达接收和泥浆置换等。

2.2.1 水文与工程地质条件分析

(1) 水文分析

武汉地区夏季雨水量较多，关注湖中水位变化，掌握并了解地下水类型，地下水补偿源和水力联系，判定水下顶进穿越范围内是否存在承压水以及水头压力大小，判定岩层水性质和通道等。

(2) 岩溶 CT 扫描勘察

采用 CT 扫描技术对岩溶发育区进行专项勘察分析, 了解溶洞大小、发育状态、是否填充及填充物状态。在管道顶进范围外 2m、纵向间隔 15m 布置 CT 扫描探测孔, 根据反射波成像是否异常推断地下岩面分布及岩性是否均匀和是否存在溶洞及溶洞发育形态。

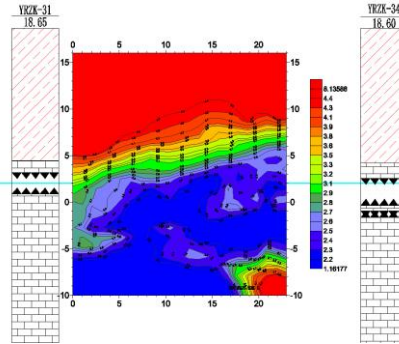


图 1 CT 扫描成像分析

(3) 岩溶处理

根据 CT 勘察结果, 以 CT 勘察孔为中心, 间距 2m 梅花布置探边孔来确定溶洞大小和范围, 每处使用 2~3 个勘察孔作为注浆孔, 采用袖阀管工艺进行水上注浆作业处理。待溶洞处理完成水泥浆液龄期达到后进行抽芯检测, 并进行压水试验, 确保溶洞处理质量, 避免施工风险。

2.2.2 顶管机选型

工程顶管主要穿越粉质黏土层、粉质黏土混砾石、碎石土、强风化泥岩、中风化泥岩、中风化石灰岩和溶洞发育区, 岩层单轴抗压强度最大在 60MPa 以内, 且单一区间穿越黏土、半土半岩、全断面岩层、岩溶发育区等多种地层, 区间顶管位于南湖湖底, 湖底管道覆土 6~8m, 平均湖水深 2.7m。

根据管道穿越地层、周边环境、地表沉降控制要求、顶管机类型适应性等方面综合考虑东线全线采用泥水平衡复合式岩石顶管机。刀盘开口率为 32%, 刀盘配置采用楔形齿双刃滚刀 12 把、单刃滚刀 4 把, 16 把切刀, 14 把撕裂刀, 4 把边缘刮刀, 中心刀采用 2 把撕裂刀。刀具配置时滚刀是 175mm, 撕裂刀是 150mm。刀具前端全部采用合金钨钢, 楔形齿线性贯入破岩, 破岩连续性好, 齿刀贯入度高, 破岩效率高, 较以往单纯的光圆重型滚刀适合岩层掘进施工。



图 3 顶管机刀盘配置图

顶管机主要参数: ①顶进速度: 进出洞 20mm/min~40mm/min, 正常掘进 40mm/min~80mm/min; ②刀盘额定转速: 3.5rpm; 额定扭矩: 404kNm; ③纠偏油缸推力: 9600kN, 纠偏油缸数量: 8, 纠偏角度: $\pm 2.5^\circ$, 纠偏油缸行程 80mm, 纠偏油缸最高工作压力 31.5MPa; ④进排浆管道直径: $\Phi 150$ mm; ⑤外形尺寸: $\Phi 2920$ mm \times 5200mm; ⑥重量: 约 50t; ⑦刀盘电机功率 37 \times 4kW。

2.2.3 端头加固

为确保顶管始发或接收时洞门土体稳定, 不发生透水或涌水涌砂。采用双轴高压旋喷桩对顶管井周边进行加固,

水下顶管井一般在围堰内施工，如采用沉井法施工顶管井，沉井下沉时带动周边的土体，避免在井壁四周形成水力通道，在井壁周边及端头采用高压旋喷桩进行加固处理。分 A、B 区加固，A 区加固深度根据地质情况而定，B 区为沉井下沉完成后加固，深度位于最低洞口下方。

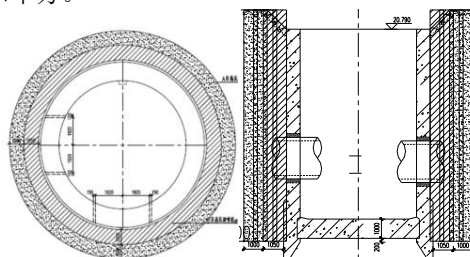


图 4 端头及井边加固示意图

2.2.4 设备安装

(1) 基座安装。根据不同井位功能，有下坡区间顶进和上坡区间顶进，当下坡顶进时为防止顶管机裁头，基座导轨坡度需缓于设计隧道坡度约为 80%；当上坡顶进时基座导轨坡度需高于设计隧道坡度约为 120%。导轨采用型钢与工作井结构顶紧，防止受力偏位。

(2) 洞口防水装置。洞圈与管节间存在建筑空隙，在顶管出洞及正常顶进过程中极易出现洞口涌水涌砂等质量安全事故。为防止此类事故发生，施工前在洞圈上安装帘布橡胶板密封洞圈洞口防水装置。主要包括：预埋洞门钢环、橡胶帘布、钢压板、折页板及固定螺栓。

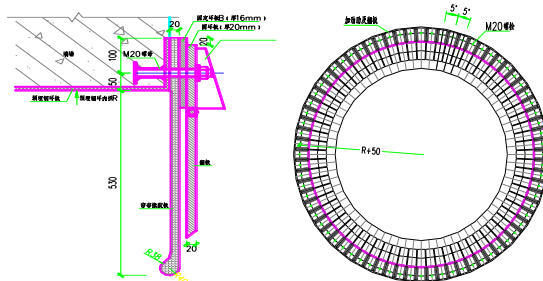


图 5 洞门止水帘布安装图

为降低湖中段洞口发生漏水漏砂等施工风险，借鉴盾构施工盾尾密封的原理，为加强洞口防水效果采用双层帘布：在通用的洞门防水帘布中间增加一~二圈 100 槽钢形成原状，沿槽钢两侧错孔 5° 进行钻孔，形成砼预埋钢环一样的钢结构安装 2~3 道防水帘布。在钢环中间 10° 环形开孔并安装逆止阀，通过逆止阀在两层帘布中间注射密封油脂，形成密封系统，始终保持洞门帘布与顶管机或管材紧贴，并提高洞口阻断地下水压力。

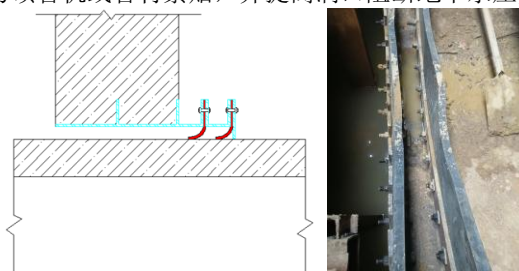


图 6 双层洞门止水帘布安装图

(3) 泥水循环系统。为平衡掌子面水土压力，需采用膨润土配置一定量泥浆，输送至泥仓内，泥仓内泥浆量应掌子面不同水土压力实行动态控制，并实时检测循环泥浆的比重，泥浆过浓在废弃处理（比重大于 1.09）。膨润土为钠基膨润土，比重一般为 1:1，中粗砂层含泥量较少时，调整至 1:1.1~1:1.2，在刀盘停止转动前，泥土仓必须压注触变泥浆。黏土地层时浆液中掺加高分子材料。

(4) 触变泥浆系统。顶管施工最大的阻力尤其是长距离顶管就是管道与周边土体之间的侧摩阻力。解决此问题核

心是通过注减阻泥浆在管节与周边土体之间形成泥浆套,使管节在泥浆套中滑行。大直径顶管需在每节管前端设置 4 个触变泥浆注浆孔,孔径 25mm,呈 90° 布置,注浆孔内必须安装单向阀。

测量系统:一般短距离直线顶管测量一般采用激光指示法+人工复核,大于 300m 的长距离顶管区间,在洞内 200m 位置设置测站,进行导线复测,每天复测两次,以复测结果为主、激光指示结果为辅的方式控制管道轴线偏差^[4]。

2.2.5 洞门破除

洞门破除前先进行水平探孔查看端头加固情况,洞口是否有地下水等情况。检查无异常后,使用炮机及氧割进行洞门破除。洞门破除由上至下,由左侧向右侧进行。

2.2.6 顶管始发顶进

(1)从破洞一直到 50m(每个区间前三节管节为特殊管节,较其他管节强度提高,配筋提高和预埋钢板,称为机头管)全部推进入土中的全过程称之为初始顶进。机头管在制作时左右两侧预埋钢板,采用槽钢将机头后方的三节管与机头管连接,形成一个整体,有效的控制机头的仰俯角和旋转角度。同时,在初始顶进中还应注意,应在初始顶进完成后,方可进行正常的方向校正工作。

(2)为防止初始顶进顶管机“栽头”,采取“抬头”始发向上的初始角(约 5',由主顶油缸控制),另一方面洞门下部设置型钢支托。

(3)初始顶进完成后,采用钢丝穿束洞口防水压板,拉紧固定,注浆填充洞口防止减阻泥浆流失,造成洞口塌陷。

(4)在顶管机左右两侧设置防侧滚装置。

(5)顶进过程中,注意收集相关顶进参数:顶力、扭矩、速率、电机电流变化、泥水仓压力等。

2.2.7 设备及掘进参数调整

(1)刀盘转速,扭矩的调整和控制:在顶进过程中,根据土质情况和顶进效果进行刀盘转速和扭矩的控制和调整。正常顶进情况下刀盘应调至高转速、中低扭矩的状态工作,以获得较好的切削和土仓泥土搅拌效果。在施工中需停止刀盘回转时,应先停止顶进,让刀盘空转一段时间,观察到刀盘工作电流(或工作油压)开始回落后方可停止刀盘回转。

(2)在顶进过程中发现刀盘工作电流(或油压)异常上升时,应降低顶进速度或停止顶进,待刀盘电流(或油压)平稳后再按正常速度顶进,电流浮动保持在 $\pm 15A$ 。

(3)当顶管机头发生自转时,应将刀盘回转方向调至与顶管机头自转相同方向进行顶管机头的旋转偏移纠正。

(4)刀盘的重新启动应采取一切可能的措施降低启动阻力,在确认不会对设备造成破坏或进一步加大顶进困难后,方可加大扭矩启动刀盘。

(5)主顶油缸的伸出及收回速率控制需保持在 0.26m/min。

2.2.8 正常顶进施工

(1)降摩减阻

顶管施工最大阻力之一是管道外侧的侧摩阻力,较盾构而言,顶管是后供动力系统,因此随着顶进距离增加、管径增大与周边土体接触面越大,阻力越大。顶管最好的状态就是:通过注浆,在管节外形成良好的浆套,使管节在浆套中滑行,是顶管施工关键工序之一,也是大直径长距离顶管施工的重要保证。大直径顶管减阻泥浆的使用是工程顺利顶进的关键,泥浆主要作用有两个,一是支承作用,二是润滑作用。①在管材预制时预埋注浆孔,在每次顶进时遵循“现注浆、再顶进,边注浆、边顶进”的原则。②注浆管节的分布根据管节的位置、顶管区间的长度、穿越地质情况等多方面确定,一般越靠近机头,注浆管节分布越密集,注浆管节和非注浆管节一般分布比例为 1:1、1:2 和 1:3 等,尤其是长距离($L \geq 500m$)顶进,在前 50m 一般注浆管节密布。③触变泥浆的配比,由膨润土:水=1:8。④触变泥浆注射以注浆量为主要控制指标,注浆压力为辅助控制指标,压浆量控制:对于粘性土和粉土压浆量为理论量的 1.5 倍。⑤触变泥浆注入压力 0.2MPa~0.4MPa。

(2)顶力及速度控制

①正常顶进过程中当主顶顶力达到其额定顶力的 60%时需要安装中继间辅助推进施工。

②开始顶进前应对整个管道总顶力进行估算,对管材和工作井允许顶力进行核算,保证整个管道的主顶油缸、中继油缸顶力要小于工作井和管材的允许顶力,主顶油缸顶力为 250~330t。

③大直径长距离顶管的顶进速度需根据泥水仓压力、地层、顶管机配置、电流流量等确定,在复杂地层中顶进时,顶进速度一般保持在 1~1.5cm/min,刀盘扭矩控制在 150~200kn.m。

④特别注意的是在溶洞发育区域和软硬岩地段,一定放慢顶进速度,避免因顶进速度过大,刀具贯入度大,地层软硬不均造成刀具损坏。

(3) 中继间设置

根据《给水排水工程顶管技术规程》CECS246:2008 规定,当估算总顶力大于管节允许顶力设计值或工作井允许顶力设计值时,应设置中继间。中继间数量可按下式估算:

$$n = \pi D1fk(L+50) / (0.7 \times f_0) - 1 \quad (\text{公式 1})$$

中继间设置原则:一般单次顶进超过 100m 需考虑设置中继间,中继间设置呈阶梯型布置,第一个中继间位置设置在机头 50m~70m,距离机头越近中继间布置越多,两个中继间的距离越短,否则反之。当主顶油缸顶力达到 70%~80% 时启动中继间,每个中继间富余量为 30%~40%。

中继间的设计允许顶力不应大于管节相应设计转角的允许顶力。中继间的允许转角宜大于 1.2° ,合力中心可调节。油缸行程为 300mm,油缸顶力配置合力为 1.1 倍管材允许顶力。

中继间优化关键技术:降摩减阻、顶进线型控制和连续顶进。①降摩减阻的关键时注浆管节分布、注浆形式、注浆周期等,注浆形式主要看管径大小,大管径一般每节管设置 4 个注浆孔,由下及上分层注浆。一般膨润土触变泥浆失效期为 6 天,区间全管补浆周期设置在 4 天,机头管每次顶进前均需补浆。②顶管线性控制非常关键,顶进施工时要形成良好的测量复核机制,确保顶管机沿直线顶进,顶进施工时轴线偏移控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内,当轴线偏移时及时纠偏,严禁出现“蛇”型顶进,纠偏的原则为“先纠高程,后纠中线,小角度连续纠偏”,偏差 $\pm 20\text{mm}$ 以内不纠偏。③单个区间一次性贯通,尽量避免停机,若顶机一定保证每天需启动一次顶进 2~3cm,同时每间隔 2~3 天通过补浆孔全线补浆,确保管节外侧保持良好的泥浆套。工程案例:某工程管径 3000mm,单次顶进 401m,施工期横跨春节,掘进 100m 后暂停施工 15 天左右,根据设计该区间设置 5 组中继间,通过以上技术措施顶管机顺利正常启动,4 根 200t 主顶油缸顶进,全线顶进压力在 20~25Mpa,区间共设置 3 组中继间。

(4) 顶进测量复核与纠偏

长距离顶进施工测量复核至关重要。

①测量方法主要为后方交汇和支导线。

②长距离顶进时,顶进轴线应进行 5 次复核,分别为始发、顶进 2/5 管道长度、顶进 3/5 管道长度、顶进 4/5 管道长度和最后 30~50m;

③在顶进到最后 30~50m 时,用人工测量的方式,对管道进行全线复核。

④顶管穿越“上软下硬”地层时,采取以下措施确保顶管姿态:①勤测量,提早发现顶管机“抬头”;②降低顶进速度,保持匀速推进;③保持上部铰接油缸推力稍大,调整顶管姿态预向下偏;④少量多次纠偏;⑤持上部推进油缸伸出长度略大于下部油缸伸出长度,范围为 10mm~15mm。

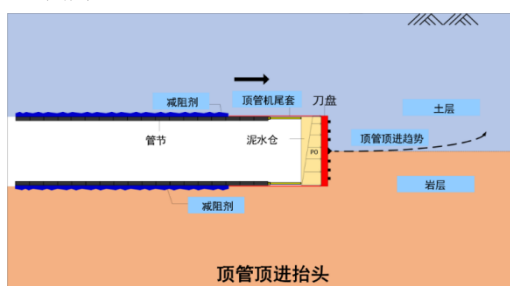


图7 上软下硬地层顶管顶进姿态示意图

⑤管道纠偏:当偏差大于 $\pm 20\text{mm}$ 时,要进行纠偏施工。在顶管机内设置 4 组(8 根油缸)纠偏油缸,纠偏角度为上下及左右 2.5° ,安装在中盾,根据机头重量不同配置油缸型号。顶管推进纠偏遵循“勤测量、勤纠偏、微纠偏”的原则,每次纠偏角度不大于 5%,避免超挖,相邻段形成夹角空隙,造成地层损失。

(5) 管节密封技术措施:管节间设置采用 8mm 环形垫木,管节插口处采用双道“O”型橡胶圈,贯通后管缝采用双组份聚硫密封胶嵌缝填充,填充完成后通过注浆孔注入 1:1 水泥浆填充管道外侧。

(6) 复合地层顶进技术措施:本工程存在多种复合地层:上软下硬,下部硬岩上部软岩的岩层复合,下部硬岩上部黏土的土岩复合;左右软硬不均,管道穿越区域地层变化大,同一断面也存在软硬不均现象。主要采取的技术措施:①选用岩石复合泥水顶管机;②刀具配置采用滚刀+刮刀+撕裂刀组合方式,既能有效处理各种粉质黏土、软土层等,又能适应灰岩、强中风化泥岩等岩层破碎掘进的需要;③滚刀采用楔形齿刀,线性贯入破岩,破岩连续性好,齿刀贯入度高,提高破岩效率高;④设置岩石二次破碎装置,通过刀盘上的动锥扭腿与壳体的定锥体相互旋转剪切对泥仓内

岩块进一步剪切破碎；⑤降低刀盘转速和顶进速度^[5]，避免高转速时软硬不均地层对刀具的冲击损坏，同时匀速通过不均匀地层，顶进速度控制在 10mm/min，刀盘转速控制在 0.8~1.0r/min；⑥竖向上软下硬地层顶进时，保持顶管机微“低头”趋势，坡度可调整为设计值的 70%~80%；⑦严控超挖，及时补浆，避免地层损失。

2.2.9 顶管到达接收

顶管机距离接收洞门 30m 时，放慢顶进速度，同时加强测量复核，提高频率，尤其是长距离顶进施工，未完成顶管姿态测量复核前不能顶进施工。

顶管机应保持洞门上缘口进洞姿态，同时接收基座应略高于接收洞门底 2~5cm，避免顶管机栽头。

顶管机进洞后立即拉紧洞口止水帘布避免泥水泄漏。

顶管机进洞后，停止刀盘转动，避免顶管机发生扭转。

2.2.10 泥浆置换

区间贯通后，采用纯水泥浆置换膨润土泥浆，为管道外壁提供稳固填充，水灰比为 1:1。每二节混凝土管材为一组，分为注浆孔与排浆孔。将注浆泵清洗干净，吸浆龙头放入灰浆池内，开启注浆泵，打开第一组注浆孔，当第一组排浆孔冒出灰浆后，关闭阀门，再打开第二组，以此类推，直到全线完成。再关闭所有阀门，保压三十分钟，保压时注浆压力为 0.5~1MPa。

3 结语

随着工程建设不断向地下延伸和顶管施工技术的不断发展，目前国内单个顶管区间现已超过 2000m，直径达到 4500mm 以上，长距离、大直径已成为顶管发展主流趋势，与此同时需要攻克的地质难题也越来越多。本论文结合工程实例，较系统地阐述了长距离大直径复杂地层顶管施工技术及控制要点，可以为类似工程施工提供一定的指导与参考。

[参考文献]

- [1]康清义. 复杂地质下穿鱼塘长距离污水管顶管技术分析[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(21): 97-98.
- [2]杨逸. 市政基础设施地下给排水管道顶管施工技术研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(3): 557-557.
- [3]陈卫华. 污水管网顶管施工中需要注意的问题及处理对策[J]. 房地产导刊, 2014(15): 93-94.
- [4]方超刚, 李亮等. 复合地层大直径顶管施工技术及其地层变形控制研究[J]. 云南水力发电, 2021, 37(10): 45-49.
- [5]何志兰. 复合地层中顶管施工技术与控制措施[J]. 工程与技术, 2021, 23(18): 234-238.

作者简介：吕远（1987.6-）男，武汉大学，建筑经理管理，当前就职单位武汉市政建设集团，职务部门副职，职称级别中级工程师。