

市政给排水大口径长距离钢管顶管施工设计与应用研究

苏伟明

(厦门市政工程有限公司,福建 厦门 361000)

摘要:大口径长距离顶管施工常面临既有建构筑物、在用管线的保护难题,验证非开挖泥水平衡顶管工艺的安全性与可靠性,对减少施工干扰、保障工程效益具有重要意义。文章以福建厦门某市政工程为对象,阐述其将“铺设 207 m 的 DN2420 大口径钢管”的传统方案改为泥水平衡顶管非开挖工艺的应用过程,明确施工起点为已建成加药间东南角(上方有大量在用给水管、电线电缆)、终点在给水泵房附近的关键环境条件;质量管理上,对钢管对接焊缝执行全熔透环焊缝无损检测,重点对 51 处关键对接焊缝开展 X 射线探伤,同时检测钢管外表面涂料及涂层厚度,确保焊接质量与防腐层性能达标;施工监测上,按预设方案在加药间及地下管线设监测点,施工前后数据显示结构位移、沉降均在规范允许范围。研究表明:1)该工艺应用效果显著,避免对既有建筑物及在用管线的威胁干扰,节约工期并提升经济效益,且施工质量与结构稳定性得到有效保障;2)此泥水平衡顶管施工技术具备良好推广价值,可为同类大口径长距离顶管项目提供参考借鉴。

关键词:顶管;大口径;给水管;非开挖;长距离

中图分类号:TU991.05;TU992.05

文献标志码:A **文章编号:**1673-8993(2025)11-0081-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.11.142

Research on the design and application of large-diameter long-distance steel pipe jacking construction for municipal water supply and drainage

SU Weiming

(Xiamen Municipal Engineering Co.,Ltd.,Xiamen 361000,Fujian,China)

Abstract: The construction of large-diameter, long-distance pipe jacking often faces challenges in protecting existing structures and in-service pipelines. Verifying the safety and reliability of the non-excavation slurry-balanced pipe jacking process is of great significance for reducing construction interference and ensuring project benefits. This article focuses on a municipal project in Xiamen, Fujian, and describes the application process of changing the traditional plan of “laying a 207-meter DN2420 large-diameter steel pipe” to the non-excavation slurry-balanced pipe jacking process. The construction starting point is located at the southeast corner of an existing chemical dosing room (with many active water supply pipes, electrical wires, and cables above), and the endpoint is near the water supply pump station, outlining the key environmental conditions. In terms of quality management, full penetration butt welds on the steel pipes are subjected to non-destructive testing, with a focus on 51 key butt welds using X-ray inspection. The coating thickness of the steel pipes' exterior surface is also tested to ensure that both welding quality and corrosion protection layer performance meet the standards. For construction monitoring, monitoring points are set according to the pre-established plan at the dosing room and underground pipeline locations. Data collected before and after construction show that structural displacement and settlement are within the allowable limits specified by the standards. The study shows: 1) The application of this process is effective in avoiding threats and interference to existing buildings and in-service pipelines, saving construction time and improving economic benefits, while ensuring construction quality and structural stability; 2) This slurry-balanced pipe jacking technology has

收稿日期: 2025-03-10

基金项目: 苏伟明(1983—),男,高级工程师,从事土木工程,环境科学与工程和计算机视觉及图像处理方向的研究。

excellent potential for promotion and can provide a reference for similar large-diameter, long-distance pipe jacking projects.

Key words: pipe jacking; large-diameter; water supply pipe; trenchless; long-distance.

市政工程给排水大口径施工中,长距离顶管技术因低环境影响、高适应性成为非开挖施工优选,但其施工参数优化与周边设施保护的深化研究,对保障工程质量意义重大。姜伟等^[1]研究了大断面矩形顶管施工对地表及邻近管线的影响,得出施工扰动需重点防控的结论;黄贵等^[2]开展大口径顶管技术在城市水利工程中的设计与实践,证实该技术高效性;韩仲慧等^[3]探究浅埋矩形顶管对临近管线与地表的影响,明确了管线保护关键要素;苏伟明^[4]研究大体积混凝土跳仓法施工技术,为工程质量控制提供参考。

前人多聚焦顶管施工宏观影响与基础应用,然而在狭窄场地(如水厂中心区域)大口径施工中,顶管机选型适配、土压力与泥浆压力协同控制的针对性研究不足。本文针对空间受限且临近在用市政管道的场景,采用泥水平衡工艺与 Q355B 双重防腐管道,结合实时监测优化施工参数,创新解决了狭窄场地施工干扰防控与管道长期稳定性不足的问题,提升了技术场景适配性与工程可靠性。

1 工程概况

此项目是位于厦门市某自来水厂三期项目,工程规模为 40 万 m^3/d ,设备安装规模 20 万 m^3/d ,用地面积为 96 901 m^2 ,建筑面积 11 909 m^2 。工程类别为市政工程,主要建设内容包括水处理设施(配水井、絮凝沉淀池、清水池、V 型滤池及反冲洗泵房等)、污水处理及附属设施(加药间、吸水井、送水泵房、配电间、回收水池、污泥调节池、污泥浓缩池及污泥脱水车间、粉末投加间等)、管道等。拟建管道主要为原水管和清水池出水管,其中拟建原水管起点位于东北侧取水泵房,终点位于拟建配水井。



图 1 场地位置

2 工程地质条件

2.1 地质情况

工作井、接收井地质情况为:素填土、粉质黏土、中砂层、残积砂质黏性土。

2.2 水文地质条件

勘察期间(大致平水期)测得坡残积台地各钻孔地下水初见水位埋深为 1.40 ~ 8.50 m,混合稳定水位埋深为 1.10 ~ 8.00 m(标高 13.95 ~ 18.20 m);冲洪积阶地各钻孔地下水初见水位埋深为 2.00 ~ 4.80 m,混合稳定水位埋深为 1.80 ~ 4.60 m(标高 13.93 ~ 15.00 m)。

根据场地地形、地貌特征和区域水文地质资料,拟建场地坡残积台地历史最高地下水位埋深为 2.00 m,近 3 ~ 5 a 最高地下水位埋深为 3.00 m;冲洪积阶地历史最高地下水位埋深为 0.50 m,近 3 ~ 5 a 最高地下水位埋深为 1.00 m。

3 施工工艺技术

3.1 技术参数

3.1.1 管道技术参数

顶管管道施工具体技术参数:管道的计算顶进长度 207 m,地面至管中的深度 h_1 为 5 599 mm,管道外缘底部至导轨底面的高度 h_2 为 200 mm,基础及其垫层的厚度 h_3 为 500 mm,顶管机进入接收坑后支撑垫板厚度 h_4 为 200 mm,顶进井地面至坑底的深度 H_1 为 8 909 mm,接收井地面至坑底的深度 H_2 为 8 208 mm,后座墙的尺寸(宽×高):为 3 000 mm × 3 000 mm,后座墙顶至地面高度 h_5 为 4 009 mm,基坑支护基础底至后座墙底高度 h_6 为 742 mm。

3.1.2 管材技术参数

顶管采用直缝管,钢管材料为 Q355B(DN2420),壁厚为 24 mm,钢管材料为 Q355B(GB/T 31937—2015),直缝埋弧焊钢管,内防腐 400 μm 厚浆型环氧漆,外防腐 800 μm 厚浆型环氧漆。

3.1.3 主要顶进技术参数

顶管机头设计参数如下:机头外径为 2 460 mm,确保了足够的空间以适应不同的管道直径要求。机头

的长度为 4 200 mm,这一尺寸有利于在长距离顶进过程中保持稳定性和控制性。刀盘的性能参数至关重要,其最大扭矩达到 240 kN·m,转速为 1.5 r/min,这为刀盘提供了强大的切削能力和精确的转速控制。刀盘由两台功率各为 37 kW 的驱动电机提供动力,确保了刀盘在各种地质条件下的高效运转。活节设计允许最大移动伸缩 40 mm,这一灵活度有助于适应不同的地质变化,保证顶进过程的连续性和稳定性。中心轴的设计考虑了操作的灵活性,最大移动伸缩能力为 110 mm,这为顶管机头提供了必要的调整范围。油缸的最大顶力为 31.5 MPa,而最大平衡力达到 2 050 kN,这些参数保证了顶管机头在顶进过程中的强劲推力和稳定性。此外,顶管机头设计了最大平衡土压力范围 0~368.9 kPa,这一设计使其能够适应多变的地下压力环境,确保施工安全和效率。

纠偏装置:纠偏装置由四台千斤顶组成,每台千斤顶的最大工作顶力可达到 31.5 MPa,确保在顶管施工过程中能够有效进行纠偏调整。单台千斤顶的最大推力为 900 kN。该纠偏系统能够实现最大 60 mm 的偏移量,且纠偏角度控制在 1.8° 以内,确保施工过程的精准性与稳定性。

顶进装置:它由主顶进装置和中继顶进装置两部分组成。主顶进装置的主要功能是完成管节的顶进,其主要组成部分包括底座、油缸、顶圆、顶铁后靠以及液压动力泵站等。而中继顶进装置则专门用于提供中继顶力,负责整个顶进过程中的持续推进。

3.2 施工工艺流程

顶管施工主要工艺(图 2):施工准备及测量放样,工作井施工,井下导轨机架、液压系统、止水圈等设备安装,地面辅助设施安装,顶管掘进机吊装就位,激光经纬仪安装,正常顶进,安放中继间,顶管机进接收坑,管道安装。

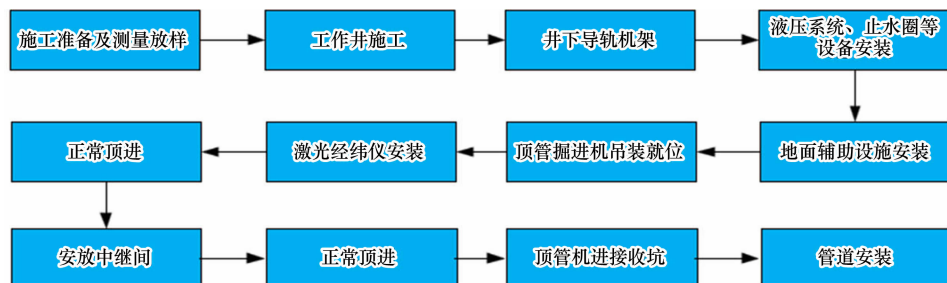


图 2 施工工艺流程图

3.3 施工方案

3.3.1 顶管工作井施工

项目设置一个顶管工作井和一个顶管接收井,为方形井,工作井基坑深度均为 8.909 m,尺寸为 9.6 m×6.6 m(长×宽)。接收井基坑深度均为 8.208 m,尺寸为 6.6 m×6.6 m(长×宽)。

3.3.2 沉井施工

(1) 沉井基坑开挖。精准测量放样沉井中心桩和沉井外壁 4 个角点的控制桩点位。根据沉井的平面尺寸,确定基坑底部的位置。沉井基坑的开挖深度设定为 2.5 m,基坑底部周边按照 1:1 的比例放坡至地面标高,形成敞口式基坑。

为预防顶管作业过程中管道内的水回流至作业坑,从而避免对作业安全和施工进度造成影响,应在作业坑内设置一个尺寸为 400 mm×400 mm×1 200 mm 的集水坑。集水坑内应安装一个 DN50 的清水泵出水口,配备一台清水泵,以便及时排除顶管内部可能回流的水,确保作业坑内的干燥和施工安全。

(2) 沉井基坑铺筑。在人工整平之后,基坑在刃脚部位的垫层采取砂垫层和素砼垫层的方法。根据以往施工经验,混凝土垫层厚度 h 取 0.2 m,宽 l 取 1.5 m。

$$h = (G/f - l)/2 \quad (1)$$

式中: G 为沉井踏面单位长度重量,取 35 t。

f 为砂垫层承载力,计算得 $f = 18.42$,取 $f = 18.5 \text{ t/m}^2$ 。

砂垫层分布在刃脚中心线两侧各一定距离范围内,砂垫层的宽度和厚度由下式计算:

$$f = ab(f_0 - f_c) / [(a + 2H \tan \alpha)(b + 2H \tan \alpha)] \quad (2)$$

式中: f_0 为砂垫层承载力, $f = 18.5 \text{ t/m}^2$; f 为地基土承载力, $f_{ax} = 11 \text{ t/m}^2$; f_c 为附加压力,取 $f_c = 0$; α 为扩散角,取 $\tan \alpha = \tan 22.5^\circ = 0.4$; G 为沉井踏面单位长度重量, $G = 35 \text{ t}$; b 为混凝土垫层宽度, $l =$

1.5 m; a 为混凝土垫层单位长度, $l = 1$ m; H 为砂垫层厚度, m。

$$11 = (1 \times 1.5 \times 18.5) / [(1 + 2H \times 0.4)(1.5 + 2H \times 0.4)]$$

计算得: $H = 0.43$ m, 取 $H = 0.6$ 。

砂垫层宽 $B > b + 2H \tan \alpha = 1.9$, 取 $B = 2.5$ m。

为确保沉井在制作过程中结构稳定, 防止不均匀沉陷, 应在井壁中心线两侧各 1.5 m 的范围内进行砂性土的回填工作。回填土应均匀分布, 并采用平板振捣器进行振实处理, 以确保土体密实度符合设计要求。基坑的开挖作业应按照设计深度分层、有序进行, 每层开挖后, 必须彻底清除底面的浮泥, 并确保基坑底面平整、无积水。基坑及沉井内的土方应采用外运方式进行处理, 以保持施工现场的整洁和施工效率。

(3) 沉井制作。工作井、接收井均采用三次制作方法。施工工艺流程: 对开挖的沉井基坑测量定位和抄平→沉井刃脚的砂垫层和支垫架工作→第一节沉井的钢筋绑扎和支模→第一节沉井的混凝土浇捣、拆模与养护并达到设计强度→上下节沉井之间的施工缝处理→第二节沉井的钢筋绑扎和支模→第二节沉井的混凝土浇捣、拆模→下节沉井之间的施工缝处理→第三节沉井的钢筋绑扎和支模→第三节沉井的混凝土浇捣、拆模与养护并达到设计强度。

(4) 沉井下沉。本工程沉井采用三次制作三次下沉的施工工艺, 井外布置降水井、排水下沉。

挖土下沉, 在沉井施工的初始下沉阶段及接近设计标高时, 确保每层的开挖深度严格控制在 300 mm 以内, 以防止沉井发生倾斜。特别是在沉井开始下沉的前 5 m 范围内, 必须特别注意保持沉井的平面位置和垂直度精确无误, 因为一旦超出此范围, 沉井的位置和姿态将难以调整。当沉井距离设计深度约 1 m 时, 应减缓取土速度, 并严格控制下沉速度, 以避免沉井突然下沉或超过设计深度。

在终沉阶段, 对下沉速度、出土量等关键下沉参数进行严格监控, 并加强下沉过程中的测量工作。具体来说, 终沉阶段应保证每小时至少进行一次沉井位置和深度的测量。当沉井在 8 h 内的自沉累计量不超过 10 mm 时, 进行封底作业。

(5) 沉井验算。

1) 下沉验算

为确保沉井在各个下沉阶段均能实现平稳沉降, 并便于精确控制沉井的最终标高, 同时保障封底作业的顺利进行。综合考虑土壤特性、施工技术以及沉井的下沉深度等多个关键因素, 合理选取适宜的下沉系数。这一过程对于确保沉井施工的安全性和效率至关重要。在施工过程中, 各阶段的下沉系数应依据以下公式进行精确计算:

$$K = (G - B) / T + R$$

总摩阻力 T 由下式计算:

$$T = L \times (H - 2.5) f$$

经计算, 下沉系数 $K = (G - B) / T + R = 1.29 > 1.10$, 沉井满足下沉要求。

2) 下沉稳定验算

$$K = (G - B) / R_f + R_1 + R_2$$

$$R_1 = L (C + n/2) f_u$$

$$R_2 = A_l f_u$$

经计算, $K = (G - B) / R_f + R_1 + R_2 = 0.82$, 介于 0.8 ~ 0.9 之间, 沉井在自重下能够稳定。

(6) 沉井封底及底板浇注。在沉井达到设计标高之后, 每小时对沉井的稳定性进行严密监测。根据规范, 只有当沉井在连续 8 h 内的自沉累计量不超过 10 mm, 且经评估确认沉井下沉已达到稳定状态时进行封底作业。这一措施是确保沉井结构安全和功能完整性的关键步骤。对于本项目中的工作井和接收井, 封底作业均采用干封底技术, 这是一种在无水环境下进行的封底方法, 旨在提供更加坚实的基础支撑, 并减少后续施工中的潜在风险。沉井就位后, 视现场实际情况对沉井四周土体, 特别是井壁后进行压密注浆补强。

(7) 纠偏。沉井在达到规范允许值的 4/1 (即 2.5 cm) 偏斜量时即刻进行纠偏。在沉井施工中, 应依据实时数据及时纠偏, 遵循“勤测、勤纠、缓纠”原则, 特别是在初沉阶段, 要逐步扩大取土范围, 严格控制倾斜度, 终沉阶段加强监控, 确保沉井安全、精确下沉至设计标高, 整个纠偏过程需动态、连续地进行, 以维护沉井的稳定性和精确度。

(8) 沉井施工的质量标准。沉井施工必须严格遵守以下质量标准: 刃脚平均标高与设计标高的偏差需控制在 100 mm 以内, 以确保沉井的垂直精度; 沉井的水平位移需限制在下沉总深度的 1% 以

内,以维持沉井的水平稳定性;对于矩形沉井,刃脚底面四角中的任意两角的高差不得超过它们之间水平距离的 1%,并且最大高差不得超过 300 mm,以保证沉井底部的平整度;下沉总深度定义为沉井下沉前刃脚底面标高与下沉结束后刃脚底面标高之差,这一参数对于监控沉井下沉进度至关重要。

3.3.3 顶管施工

顶管为 DN2420 mm × 24 mm,顶管工作井尺寸为 9.6 m × 6.6 m,计划进场一套泥水平衡顶管设备进行顶进施工,每根钢管长度为 4 m。

(1) 测量放线。精确的测量放线对于确保顶管轴线的准确性至关重要,任何放线偏差都可能导致顶管轴线偏离预定路径,这不仅会对工程进度和质量产生不利影响,还可能造成设备损坏,甚至导致工程停工。因此,顶管管线放线的核心目标是确保工作井出洞口与接收井进洞口的位置准确无误,以此为基础,为顶管顶进提供精确的方向和距离指导,从而确保施工过程的顺利进行。虽然理论上工作井和接收井的坐标及标高在设计时已确定,但由于下沉过程中可能产生的误差,实际放线需基于井的实际位置和设计的要求,通过实地测量来精确确定管线位置。

(2) 管节制备。在顶管管节的制备过程中,选择合格的成品管生产厂家至关重要,必须对厂家的生产资质和能力进行严格考察。在生产过程中,派遣专业人员对管节进行质量检验,确保外观质量、尺寸及允许偏差均符合标准后。到达工地后,还需根据招标文件要求进行抽检,只有合格产品才能被送至工作面使用。

(3) 地面辅助设施安装。在顶管工程中,地面辅助设施的安装是确保施工顺利进行的关键环节。顶管工作主要设备安装有主控棚和主顶装置安装、泥浆棚和泥浆系统设备安装、还有通风棚及通风设备安装。主控棚作为顶管设备的核心区域,采用 25 mm 钢管焊接支架并铺以铁皮,内部安装主顶油缸、主顶油泵(含控制部分)及油管,通过集中控制柜进行操作管理,确保顶管装置的精确控制。泥浆棚同样采用 25 mm 钢管焊接支架结构,配备电箱、泥浆泵和泥浆箱,以维持泥浆系统的稳定运行。通风棚则安装鼓风机,以提供必要的通风并保护设备免受恶劣天气影响。所有这些设施的安装均采用标

准化的施工方法,以确保施工的安全性和效率。

(4) 导轨铺设。基坑导轨是确保管子出洞精确对准的关键设备,必须具备足够的坚固性和稳定性,以承受顶管的重量而不发生变形。针对顶管的重量特点,本工程选用了复合型基坑导轨。在导轨的铺设过程中,严格控制管线轴线、导轨标高和支撑稳定性。首先,根据测量结果,确保轨道中线与管线轴线精确重合;其次,考虑到复合型轨道的结构特点,精确铺设轨道以符合设计标高;最后,导轨安装需确保两道平行钢轨的稳定性,以提供推进管稳定的导向和顶铁可靠的托架。在安装过程中,精确调整导轨的中线和高度,并将导轨与底板钢筋牢固焊接,空隙处采用混凝土填充,确保导轨的定位安装尺寸误差严格控制在 2 mm 以内,以保证其精确性和稳定性。

(5) 顶管后靠背设置。在顶管工程中,靠背由一块 50 mm 厚的钢板和尺寸为 3 m × 3 m × 0.5 m 的 C30 混凝土块构成,与作业坑墙壁共同作为后背墙,为顶管机提供稳固的支撑。在顶管机与后座墙之间,使用一块 50 mm 厚的钢板作为缓冲,以确保在顶进过程中的稳定性。混凝土强度必须达到 75% 以上才能开始顶进工作,以避免意外事故的发生。后背墙附加层的施工要求严格,必须确保与顶管管线垂直。其宽度需满足主顶油缸的发射长度,厚度则根据工作井的直径以及后靠背顶铁的宽度进行确定。场外预制钢筋混凝土材料的附加层,防止木材因伸缩性导致的疲劳破坏,影响顶进质量和设备安全,后背墙附加层的前端需加装 20 mm 厚的钢板,以增强靠背的稳定性。

(6) 顶管动力、照明准备。电力供应和安全方面,本工程的动力电缆配置应遵循以下规范:管内应布置一条专用电缆,以满足配套动力设备的负载需求,并根据实际功率选择合适的电缆规格。现场供电将通过发电机组来实现,电缆的铺设和连接需采用移动式方案,并配备相应的移动电箱以便于操作。对于井下施工中使用的所有移动电机和设备,必须实施严格的接地措施,以确保施工人员和设备的安全。此外,考虑到井下和管道内的工作环境,所有照明灯具应使用 36 V 的安全电压,以降低触电风险,保障作业人员的安全。

(7) 顶进开始调试阶段。顶管施工下井前,执

行了一项全面的安装和调试程序,以确保设备的最佳性能和施工安全。首先,对于油管系统的安装,我们进行了彻底的清洗,以防止灰尘和其他污物侵入油管,保证油路的清洁和畅通。其次,电路系统经过严格检查,确保其完全干燥,防止因潮湿引起的短路或电气故障。接着,我们对机头进行了运转调试,验证了各个部件的动作是否正常,确保机械运转的可靠性。最后,对液压系统进行了细致的检查,确认无泄漏现象,以保证液压系统的稳定性和安全性。

(8) 掘进方式选型。项目采用泥水平衡法进行顶管掘进。在顶管掘进过程中,刀盘切削岩土并将其与泥水混合,通过排泥泵输送至地面泥浆池进行处理和循环利用,残渣则外运处理。整个掘进过程,通过调节循环水系统的压力来平衡地下水压力,同时通过控制刀盘转速和顶进速度,平衡正面土压力,从而确保掘进过程的稳定性与安全性。该方法具有施工速度快、无需进行土质改良或降水处理的优点,有效避免了施工过程中地表沉降问题,且对周围环境的影响较小。

(9) 管节顶进。在顶进作业开始之前,为防止洞口处的水土通过工具管外壁与洞门之间的间隙渗入工作井,在工作井洞口处安装了密闭性较好的止水圈。该措施不仅有效防止了减摩浆的流失,还确保了泥浆套的完整性,显著降低了顶进阻力,进而提高了施工效率。随后顶进作业正式每推进 2 米,便对其角度和高程进行一次复测,以确保施工精度严格符合设计规范及对接要求。

3.3.4 顶力计算

本工程共有外径为 D2420 × 24 mm 钢管 1 段,长度为 207 m。

(1) 管道顶进阻力计算

$$F_p = N_F + F$$

式中: F_p 为顶进阻力, kN; N_F 为顶管机头正面挤压力, kN; F 为管壁摩擦阻力, kN。

顶管机头正面挤压力:

$$N_F = \frac{\pi}{4} \times D_g^2 \times \gamma_s \times H_s$$

式中: D_g 为顶管机外径(m), 取 2.25 m; γ_s 为土的重度(kN/m³), 取 19 kN/m³; H_s 为盖层厚度(m), 取最大值 4.7 m。

$N_F = 3.14/4 \times 2.42 \times 2.42 \times 19 \times 4.7 = 410.5$ kN
管壁摩擦阻力:

$$F = \pi \times D_0 \times L \times f_k$$

式中: D_0 为顶管机外径(m), 取 2.45 m; L 为设计顶进长度(m), 按照最长的计算, 取 207 m; f_k 为管道外壁与土的单位面积平均摩擦阻力(kN/m²), 通过试验确定。

对于采用触变泥浆减阻技术, 根据给水排水管道工程施工及验收规范 GB 50268—2008 和施工经验, f 取 $f = 4$ kN/m。

$$F = 3.14 \times 2.42 \times 207 \times 4.0 = 6291.8$$
 kN

$$F_p = N_F + F = 410.5 + 6291.8 = 6702.3$$
 kN

(2) 管道允许顶进力计算: 据施工图结构设计, 钢管顶管径向允许顶推力: D2420 钢管顶管顶推力 10 000 kN 满足要求。在顶管作业中, 应限制顶进力为管材允许值的 80%, 即对于 D2420 管材, 顶力应控制在 8 000 kN(约 800 t), 并在达到此力值时启用设计推力为 600 t 的中继间以继续推进。

(3) 中继间个数计算

$$L_m = \frac{P_{\pm} \times k_3}{f_1 \times \pi \times D_1}$$

式中: L_m 为主千斤顶最大顶进长度, m; $P_{\pm}$ 为主按估算的允许最大顶力, 8 000 kN; K_3 为工作系数, 0.8; f_1 为单位面积管道摩阻力, t/m²; D_1 为管道外径, 取 2.42 m。

以粉质黏土为主, f_1 取 6.5 kN/m², $L_{m1} = 10\,000 \times 0.8 / (6.5 \times 3.14 \times 2.42) = 161.9$ m, 此顶管工程长度为 207 m 的项目设中继间一个。中继间与前后管的连接缝不大于 1 cm, 且中继间设备拆装方便。

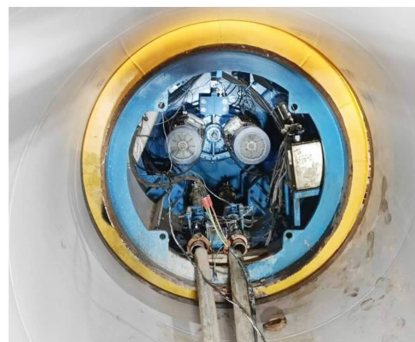


图 3 顶管施工内部

4 工程质量效果

项目严格遵循确立的施工工艺技术体系与质

量控制标准,结合工程地质水文条件及狭窄场地、临近在用管线的复杂工况,通过科学管控施工全流程,最终实现了施工质量、安全与效率的协同达标。工程于2023年3月1日开工,2023年5月30日顺利竣工,施工周期符合计划预期,全程未发生质量隐患与安全事故,充分验证了既定施工方案的可行性与可靠性。

4.1 施工过程质量控制效果

针对大口径钢管顶管的核心质量风险点,项目构建了全流程质量管控机制,且管控效果通过专项检测得到充分验证。在管材与焊接质量控制方面,选用Q355B高强度钢管并采用双重防腐涂层设计(内防腐400 μm 厚浆型环氧漆、外防腐800 μm 厚浆型环氧漆),从材料源头保障了管道的结构强度与耐久性;焊接环节执行全熔透环焊缝无损检测标准,重点对51关键对接焊缝开展X射线探伤检测,检测结果均满足《给水排水管道工程施工及验收规范》要求,无未焊透、裂纹等缺陷,确保了管道接头的密封性与承载能力。在防腐层质量控制方面,通过涂层厚度专项检测,确认钢管内外防腐层均达到设计厚度标准,且涂层附着力强、无破损脱落现象,为管道长期服役过程中的防腐防渗提供了有效保障。

上述质量控制效果的达成,与施工前的技术参数优化、施工中的精准操作密切相关。前期通过顶力计算明确了顶进力控制阈值($\leq 8\,000\text{ kN}$)及中继间布设方案,施工中严格按照导轨安装精度要求(轴线与标高误差 $\leq 2\text{ mm}$)、沉井施工质量标准(刃脚标高偏差 $\leq 100\text{ mm}$)执行,从工艺层面为质量控制奠定了基础,最终实现了施工过程质量的闭环管控。

4.2 结构安全与环境影响控制效果

结合工程临近已建成加药间(上方有大量在用给水管、电线电缆)及地下管线的复杂环境,项目按预设方案在加药间及地下管线关键位置布设监测点,对施工全过程的结构位移、地表沉降进行实时监测。监测数据显示,施工前后加药间墙体

最大水平位移为3.2 mm,地下管线最大沉降量为2.8 mm,均控制在《顶管施工技术规程》规定的允许限值内,未对既有建构筑物及在用管线造成威胁与干扰。

监测结果充分体现了泥水平衡顶管工艺的技术优势:施工中通过调节循环水压力平衡地下水压力、控制刀盘转速与顶进速度平衡正面土压力,有效减少了施工对周边土体的扰动;同时,沉井施工采用三次制作三次下沉工艺及干封底技术,确保了工作井与接收井的结构稳定性,避免了基坑变形引发的周边环境的影响。这种“工艺优化+实时监测”的协同管控模式,实现了施工安全与环境影响控制的双重目标,为复杂环境下大口径长距离顶管施工提供了有效的质量安全保障实践经验。

5 结 语

大口径长距离的顶管施工技术作为一种先进的非开挖施工技术,在现代城市建设中扮演着重要的角色。通过科学的规划设计、合理的施工方案、严格的安全质量控制以及有效的成本管理,可以确保这项技术的成功应用,为城市的给排水系统建设提供一个安全、高效、经济的解决方案,从而推动城市发展。

参考文献:

- [1] 姜伟,宗秋雷,王程鹏,等.大断面矩形顶管施工对地表及邻近管线的影响[J].工程建设,2021,53(9):44-49.
- [2] 黄贵,高阳,刘现涛.大口径顶管技术在水利工程中的设计与实践[J].水利水电技术(中英文),2024,55(增刊2):236-240.
- [3] 韩仲慧,王梅.浅埋矩形顶管施工对临近管线与地表的影响研究[J].都市快轨交通,2024,37(1):135-142.
- [4] 苏伟明.大体积混凝土跳仓法施工技术研究与应用实践[J].黑龙江水利科技,2025,53(8):22-26.