

顶管施工技术在雨污分流工程中的应用

柳涛

230304*****4619

摘要: 随着我国城市化加速和环保要求趋严,雨污分流改造成为城市水环境治理和基建重要任务。传统大开挖管道施工在城市建成区面临交通中断、管线迁改复杂、环境影响大、成本高的挑战。顶管施工技术作为非开挖敷设地下管线工艺,凭借技术优势,在雨污分流工程中适用性和推广价值高。本文阐述顶管施工技术核心优势与适用性,剖析工艺流程和关键技术环节。结合案例,分析高精度导向系统、注浆减阻技术、局部开挖纠偏技术等应用作用与效果,评估综合成效。结果显示,科学应用顶管技术可解决复杂城区雨污分流施工难题,保障工程安全、质量和进度,实现社会、经济和环境效益协同提升,为类似工程提供参考。

关键词: 顶管施工;雨污分流;非开挖技术;施工工艺;偏差控制;环境保护

DOI: 10.69979/3060-8767.26.03.054

引言

雨污分流是指将雨水和污水分开,各用一套独立的管网系统进行排放与处理的现代化排水模式。实施雨污分流是解决城市内涝、控制水体污染、提高污水处理效率、改善人居环境的关键举措。当前,我国许多老旧城区仍普遍采用雨污合流制排水系统,升级改造需求巨大且紧迫。然而,雨污分流管网多需敷设于建筑密集、道路狭窄、地下管线错综复杂、交通流量大的城市建成区,采用传统开槽埋管法施工,往往需要对道路进行大面积开挖,导致长时间交通封闭、居民出行受阻、周边商业活动受影响、大量建筑垃圾产生以及既有管线频繁迁改保护等问题,施工协调难度大、综合成本高、社会负面影响突出。近年来,随着装备自动化、测量精准化、工艺精细化水平的不断提高,顶管技术在市政排水管网建设与改造中,特别是在雨污分流这一特定领域的应用日益广泛和深入。

1 顶管施工技术优势及其在雨污分流工程中的适用性

1.1 顶管施工技术的优势

从技术本身而言,顶管施工的首要优势在于其对地表环境的低干扰性。施工主要在地下进行,工作井和接收井占地面积相对较小,无需大面积连续开挖路面,从而最大限度地降低了对城市交通的阻断,保障了商业活动和居民生活的正常秩序,减少了施工引起的扬尘、噪音等环境污染,符合现代城市绿色、文明施工的要求^[1]。

其次,该技术具有较强的地层适应性和穿越能力。通过选择不同类型的顶管机头(如土压平衡式、泥水平衡式、敞开式等),可以应对从软土、砂土到硬塑黏土等多种地质条件,并能安全穿越道路、铁路、河流、重要建筑物基础等障碍区域,这对管网线路需规避复杂地面障碍的雨污分流工程至关重要。再次,顶管施工的管道主体为工厂预制的混凝土管或玻璃钢管等,管节质量可控,接口密封性能好,有利于形成高精度、高完整性的长距离线性地下构筑物,管道整体沉降均匀,后期运行渗漏风险低,确保了排水系统的长期稳定性和可靠性。此外,在特定条件下,相对于大开挖及大量的支护、降水、回填、恢复工程,顶管施工可能展现出更佳的经济性,尤其是在穿越重要设施或深层敷设时,其综合成本优势更为明显。

1.2 顶管施工技术在雨污分流工程中的适用性

具体到雨污分流工程,其适用性尤为突出。雨污水管道通常沿城市道路敷设,埋深一般在数米,且需保持一定的坡度以利重力流排放,这与顶管施工适宜的中等埋深、线性推进的特点高度匹配^[2]。在老旧城区改造中,新建分流管道常常需要在现有合流管道、其他市政管线(如给水、燃气、电力、通信)的夹缝中穿行,顶管技术能够精确控制管道轨迹,实现对既有管网的最小间距穿越,避免大规模迁改。对于需要穿越主干道、交通枢纽、历史街区保护范围、绿化公园或水体等敏感区域,顶管几乎是唯一可行或最优的施工方案。同时,雨污分流工程工期要求紧,社会关注度高,顶管施工的作业面

集中,机械化程度高,可全天候作业,有利于缩短工期,快速完成关键节点的建设任务,尽快恢复区域正常排水功能,减少对公众的影响。因此,顶管施工技术已成为城市雨污分流工程,特别是在环境复杂、社会影响敏感区域的首选工法之一。

2 顶管施工工艺流程及关键技术

2.1 顶管施工工艺流程

顶管施工的工艺流程通常始于详尽的工程勘察与方案设计,包括地质水文条件探查、地下管线探测、施工影响评估等。随后进行工作井与接收井的施工,这两类井是顶管作业的起点和终点,多采用沉井、逆作法或围护结构支护等方式建造,其位置、尺寸、深度需精确计算,并做好井内布置(如后背墙、导轨安装、顶进设备基础等)^[1]。在设备安装阶段,将顶管掘进机头吊装至始发井就位于导轨上,与后续管节连接,同时安装主顶油缸、中继间(长距离顶进时)、泥水或土渣输送系统、测量导向系统、注浆系统等。准备工作就绪后,进行试顶,检查各系统运行状态。正式顶进过程中,机头在前端切削或挤压土体,出土系统将渣土排出,主顶油缸或辅以中继间提供顶进力,将管道逐节顶入。每顶进一节管节,需进行管道连接(通常采用“F”型钢承插口加弹性密封圈),并即时通过管壁预埋的注浆孔向管道外壁与土体之间的环形空隙注入特定的减阻泥浆,以形成泥浆套,降低摩阻力^[4]。整个顶进过程需通过测量系统对机头姿态进行实时、动态监控,一旦发现偏离设计轴线,需及时通过机头内的纠偏油缸进行纠偏调整。当机头抵达接收井时,进行贯通和接收作业,最后进行管道内清理、接口检查、注浆孔封闭以及工作井、接收井内的管道固定与连接等后续处理。

2.2 顶管施工关键技术

在这一流程中,多项关键技术决定施工成败、效率与安全。首先是测量与导向控制技术,高精度导向系统是顶管施工“眼睛”,普遍采用激光经纬仪与光靶或更先进的陀螺仪+倾斜仪组合的自动测量系统,能实时显示机头三维坐标和姿态,精度达毫米级。操作人员可据此精确操控纠偏油缸伸缩量,调整机头方向,确保管道精准顶进,保证雨污管道排水坡度。其次是注浆减阻与地层稳定技术,长距离顶进时,管道外壁与土体间摩擦阻力是主要顶进阻力,同步注浆形成泥浆套,能有效降

低摩阻力,保护管节外防腐层并减少土体扰动。泥浆配比需根据土层性质优化,在特殊区域有时需采用特殊浆液或二次补浆工艺。再者是顶进力控制与中继间技术,顶进力要克服迎面阻力和管壁摩擦阻力,但过大顶力可能损坏管节,需根据计算和监测数据动态调整顶进速度与顶力。超长距离顶管需设置中继间,通过分段顶进来分担主顶油缸压力^[5]。此外,开挖面稳定控制技术也很重要,尤其是土压平衡或泥水平衡式顶管机,通过调节舱内压力与前方水土压力保持平衡,防止地表隆起或沉降。最后是纠偏技术,除依靠机头自身纠偏能力外,偏差大或遇障碍时可能需人工纠偏,但应通过预防性测量和及时微调避免。

3 工程案例应用分析

3.1 工程概况

该段工程旨在新建一条长约380米、内径DN1200的钢筋混凝土污水干管,设计坡度为0.1%。管道需穿越一条交通繁忙的城市主干道(宽约40米)及其两侧密集的商铺和居民区下方,沿线地下存在年代久远的合流管、给水管、通信电缆等多种管线,地质条件为流塑性粉质粘土夹薄层粉砂,地下水位较高。若采用明挖施工,需全幅或半幅封闭道路至少两个月,对交通和周边居民生活影响巨大,且管线迁改保护工程极其复杂。经综合比选,决定采用泥水平衡式顶管施工工艺。

3.2 顶管施工方案设计

在方案设计阶段,首先对沿线进行了详尽的物探和补勘,精确绘制了地下管线分布图和地质剖面图。据此,确定了顶管路径,尽可能从既有管线间隙中穿过,并严格控制最小净距。工作井和接收井位置选择在道路两侧的绿化带和空地,采用钢筋混凝土沉井法施工,深度分别为6.5米和6.8米。选用适用于软土、能有效平衡地下水压力的泥水平衡顶管机,其刀盘可根据土质调整转速和开口率。设计了完整的泥浆循环系统、激光导向系统和中继间布置方案(因长度超过350米,计划在顶进至约200米处设置第一个中继间)。

3.3 顶管施工关键技术的实际应用

在关键技术的实际应用中,首先得益于高精度导向系统的实时监控与动态纠偏。施工中采用全站仪自动跟踪测量系统,每顶进一节管节(2.5米)即进行一次精密测量,并在控制室实时显示偏差数据。操作人员根据

预警阈值（通常设定为 $\pm 20\text{mm}$ ）及时进行纠偏操作。通过“勤测、微纠”的原则，将管道轴线偏差始终控制在设计要求（ $\pm 50\text{mm}$ ）的优异水平内，最终贯通时水平偏差为 $+18\text{mm}$ ，高程偏差为 -12mm ，完全满足排水坡度要求，为管道功能实现奠定了坚实基础。

其次，注浆减阻技术发挥了核心作用。针对该地层的特性，配置了以优质钠基膨润土为主、添加少量 CMC（羧甲基纤维素钠）的减阻泥浆，使其具有良好的润滑性和保水性。采用同步注浆与跟踪补浆相结合的方式。顶进时，通过管道上的注浆孔立即注入足量泥浆，形成初始泥浆套；顶进完成后，根据压力监测和出浆情况，对可能因土体压缩或浆液流失造成的空隙进行二次或多次补浆。该技术的有效应用，使得实测平均顶进摩阻力远低于理论计算值，最终顶进力峰值仅为设计顶力的 75%，不仅保护了管节，也大幅降低了设备负荷和能耗。同时，均匀的泥浆套也起到了支撑土体、减少地层损失的作用，有效控制了地面沉降。

在施工过程中，当顶进至约 180 米时，导向系统显示机头出现缓慢但持续的向左水平偏差增大的趋势，常规机头纠偏操作效果不明显。经分析判断，可能遇到了局部不均匀硬土或小型不明障碍物。施工方果断启用了应急预案，实施了局部开挖纠偏技术。在偏差方向前方、地表条件允许的位置，开挖一个尺寸约 $2\text{m}\times 1.5\text{m}$ 的施工探查孔。人工下井探查后，发现是一处小范围的建筑垃圾填埋区。在人工清除障碍物并对该区域土体进行局部处理后，从外部对机头施加辅助纠偏力，配合机头内部纠偏系统，成功将管道轴线调整回正。这一技术的应用，避免了偏差进一步扩大可能导致无法顶进甚至管道报废的严重后果，体现了复杂环境下灵活应对的能力。

3.4 应用效果评估

通过对本工程案例的应用效果评估，顶管施工的优势得到了充分验证。社会效益方面，施工期间，主干道交通未受任何中断，商铺正常营业，居民生活未受明显干扰，实现了“静悄悄”的施工，社会投诉为零。经济效益方面，虽然顶管设备投入较高，但节省了大量的交通导改、路面修复、管线保护与迁改、社会赔偿等间接费用，综合成本与明挖方案基本持平，且缩短了约 30% 的绝对工期。环境效益方面，土方开挖量减少约 80%，

建筑垃圾大幅减少，噪音、扬尘污染得到有效控制。工程质量方面，管道安装精度高，接口无渗漏，全线闭水试验一次合格，后期运行稳定。该案例成功表明，在复杂城区环境下进行雨污分流管道建设，科学合理地应用顶管施工技术，能够实现工程目标与社会、环境需求的有机统一。

4 结束语

雨污分流工程是提升城市水环境质量、增强城市防灾能力的重要基础设施工程，但其建设环境往往错综复杂、制约因素多。顶管施工技术以其非开挖、精度高、适应性强、对环境影响小的突出优势，为解决雨污分流工程在建成区的实施难题提供了高效、可靠的技术路径。本文通过系统分析顶管技术的优势与适用性，详细梳理其工艺流程，并聚焦于高精度导向、注浆减阻、顶进力与中继间控制、开挖面稳定等关键技术，结合具体工程案例的应用实践与效果评估，充分证明了该技术的先进性与实用性。实践证明，成功应用顶管技术的关键在于：前期细致的地质勘察与管线探测是基础；因地制宜地选择顶管机型和施工参数是前提；过程中对测量导向、注浆减阻、顶力与轴线控制的精细化、动态化管理是核心；具备应对突发地质障碍或偏差的应急预案和处置能力是保障。随着顶管设备不断向智能化、微型化、大直径化方向发展，以及施工管理水平的持续提升，顶管施工技术在雨污分流乃至更广泛的市政地下空间开发领域，将拥有更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 沈奕, 杨靖. 顶管施工技术在雨污分流工程中的应用[J]. 四川水泥, 2025, (12): 108-110.
- [2] 宋新亭. 雨污分流顶管施工技术在市政给排水工程中的关键技术研究探讨[J]. 建筑工人, 2025, 46(06): 30-33.
- [3] 尹莎莎. 市政雨污分流工程项目中的顶管施工工艺[J]. 四川建材, 2023, 49(04): 247-249.
- [4] 苏玲. 市政雨污分流工程中的顶管施工技术分析[J]. 居业, 2021, (08): 73-74.
- [5] 孙虹波. 市政雨污分流工程中顶管施工技术应用[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(16): 91-92.