

大口径顶管内穿输水钢管施工关键技术研究

张松艳 刘 涛

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 大口径顶管内穿输水钢管施工涉及多环节复杂技术。本文详细阐述顶管施工关键技术,包括轴线精准控制、顶力控制与平衡、接口密封与结构防护等;输水钢管内穿施工关键技术,涵盖钢管预处理、牵引定位、接口连接密封等;还涉及施工过程协同控制、后期关键技术处理等内容。通过研究这些技术要点,形成一套完整施工体系,有效解决大口径顶管内穿输水钢管施工难题,保障工程质量和施工安全,为类似工程提供参考。

关键词: 大口径顶管;输水钢管;施工关键技术;协同控制;后期处理

引言:大口径顶管内穿输水钢管技术广泛应用于城市供水、水利输送等领域。该技术能减少对地面交通和环境的影响,具有显著优势。然而,其施工过程复杂,涉及顶管轴线控制、顶力平衡、钢管内穿牵引与定位、接口连接密封等多个关键环节。任何一个环节出现问题,都可能影响整个工程的质量和施工安全。因此,深入研究大口径顶管内穿输水钢管施工关键技术,对于提高施工效率、保障工程质量具有重要意义。

1 顶管施工关键技术

1.1 顶管轴线精准控制技术

顶管轴线精准控制是保障管道按预定轨迹顺利顶进的核心要素。在实施过程中,轴线导向系统的合理布设与稳定运行至关重要。导向系统布设前,需全面勘察施工现场地质条件、顶进距离等关键因素,以此为依据确定系统布设方案。运行阶段,借助高精度激光经纬仪与全站仪联合监测,实时获取顶进方向数据,为后续调整提供准确依据^[1]。顶进过程中,轴线偏差实时调整是关键环节。需综合考量顶管机姿态参数以及土体变形数据。通过纠偏油缸分组控制,依据数据分析反馈信息实现毫米级的精准调整,确保顶进方向始终符合设计要求。顶管端部姿态控制直接影响后续顶进管道质量。要重点关注机头切口环与后舱的协同运动,避免局部应力集中引发轴线偏移。顶管顶进采用机械顶进钢筋混凝土套管,内穿钢管形式;套管采用DN2800mm(外径3310mm)钢筋混凝土管,壁厚255mm,内穿管道采用Q345R材质DN2200mm钢管。

1.2 顶管顶力控制与平衡技术

顶力计算模型的准确性是顶力控制的基础。该模型需全面涵盖正面阻力、侧壁摩擦力以及后座反力三部分。正面阻力计算要结合土体强度参数与刀盘切削面积,采用经验公式与数值模拟相结合的方式,确保计算结果可靠。侧壁摩擦力计算则要考虑泥浆套形成质量,通过优化触

变泥浆配比,降低摩擦系数,提高顶进效率。顶进过程中,顶力动态调节需建立压力-速度反馈控制系统。依据实时监测数据,灵活调整顶进速度与注浆压力,实现顶力的精准控制。减阻技术应用中,采用分级注浆工艺,保证泥浆均匀分布。在砂层等透水地层,添加高分子聚合物提高泥浆粘度,防止泥浆流失,确保减阻效果。顶力平衡控制还需考虑季节性水位变化对正面阻力的影响。通过预留顶力储备,增强施工过程应对外界因素变化的能力,保障施工安全有序进行。长距离顶管施工中还需设置中继间。通过实时监测孔隙水压力,合理调整排泥量与顶进速度,降低施工对周边环境的影响。

1.3 顶管接口密封与结构防护技术

顶管节间接口密封采用F型钢承口橡胶圈密封工艺。橡胶圈需具备耐磨损、抗老化等特性,以满足长期使用需求。密封操作时,严格把控橡胶圈压缩率,借助专用卡具确保接口间隙均匀,保障密封效果。顶进过程中为防止水压力过大造成泥浆涌入井内,在顶进前采用在洞口处设置环形橡胶止水圈、止水封板进行封堵,橡胶止水圈厚度20mm,宽度300mm,达到了无渗水的效果。在顶进施工过程中又可以防止减阻泥浆从此处流失,保证泥浆循环系统的完整,以达到减小顶进阻力的效果。同时为了达到更好的止水效果,并确保洞口的稳定性,在洞口设置混凝土前墙,一方面更好进行洞口防护,另一方面便于止水胶圈安装,确保密封性。顶管施工采用泥水平衡法施工工艺,主管与套管间进行吹沙,预留孔口采用防水砂浆进行封口。

2 输水钢管内穿施工关键技术

2.1 钢管场内预处理关键技术

钢管材质为Q345R,法兰、止推环及其附件材质为Q355。钢管段外防腐采用加强型环氧煤沥青,厚度800 μ m;涂装在制造厂内制备,现场焊缝及安装损伤部位

需补涂。钢管的内部采用水泥砂浆内衬， $\phi 2200$ 钢管水泥砂浆内衬厚度为16mm，内防腐施工应满足相关规范要求。管件内壁采用环氧类涂料，干膜厚度800 μm 。钢管预组装在专用胎架上进行，严格控制接口错边量，保证在壁厚允许范围内。钢管提前在厂家焊接吊耳，吊装采用两点平衡吊具，通过调节吊索长度消除弯曲应力，防止钢管在吊装过程中变形。运输过程中，在钢管内部设置临时支撑，减少因振动导致的防腐层剥落^[2]。

2.2 钢管内穿牵引与定位技术

钢管需要穿钢筋混凝土套管，钢筋混凝土管与钢管间隙较小，施工难度大，不容易操作，为了避免在穿拉施工时对钢管的破损，同时为保障钢管在套管中的位置满足不小于套管底部10cm的设计要求，在钢管下部提前焊接10cm高的托架，托架整体吊放于自制滑轮板上，在管道末端采用顶进千斤顶顶进，在管道另一端采用电葫芦牵引。内穿钢管自制轨道小车系统：首先根据测量数据计算，在钢筋混凝土管道底部浇筑20cm厚的C30混凝土找平层，以便后续轨道安装。在混凝土找平层上布置轨道，采用边宽50mm，厚度3mm的5#角钢做轨道。自制滑轮小车，采用内径60mm，外径130mm，厚度31mm的6312轴承做滑轮（双道）；采用300mm \times 500mm，厚度1cm的钢板做托架。先放置托架，然后将钢管吊装至自制滑轮小车上，在管道末端采用顶进千斤顶顶进，管道另一端采用电葫芦牵引。牵引力控制采用变频调速技术，通过张力传感器实时监测牵引力变化，实现牵引力的稳定控制。

2.3 钢管接口连接与密封技术

顶管内钢管采用穿一节焊接一节，逐根推进，对接钢管采用内、外坡口设置（顶部2/3为外坡口，底部1/3为内坡口）。管道顶部外坡口，焊接人员在管道外部进行焊接；管道下部内坡口，焊接人员在管道内部进行焊接，避免管道下部焊接空间不足和仰面焊接难以控制焊接质量的问题。焊接完成后及时做防腐处理和探伤检测，然后依次推进。现场焊接工艺，焊接接头进行无损探伤检测（包括UT和TOFD），探伤要求按照相关规范执行，确保焊接质量。

3 施工过程协同控制关键技术

3.1 顶管与钢管施工衔接协同技术

3.1.1 顶进进度与钢管敷设节奏的匹配控制

顶进进度控制建立数学模型，综合考虑地质条件与设备性能，确定合理顶进速度。根据顶进进度，安排钢管敷设计划，确保钢管敷设节奏与顶进进度相匹配。在顶进过程中，实时监测顶进进度与钢管敷设情况，根据

实际情况调整施工参数。通过预留调整段，实现动态衔接，确保施工过程连续有序。

3.1.2 顶管端部与钢管前端的衔接精度控制

顶管端部与管道前端衔接采用可调式连接器，通过调节装置实现轴向与径向位置精确调整。连接器设计合理，具备足够强度与刚度，保证衔接牢固可靠^[3]。在衔接前，对顶管端部与钢管前端进行清理，去除杂质与锈蚀，保证连接面清洁。安装过程中，严格按照操作规程进行，确保衔接精度符合设计要求。

3.1.3 施工工序衔接中的安全与质量控制要点

施工工序衔接重点关注顶管机与钢管吊装交叉作业区域，设置警戒区并安排专人指挥，保障施工人员安全。质量控制建立三级检查制度，对关键工序实行举牌验收。每道工序完成后，先由施工班组自检，合格后上报技术员复检，合格后再上报项目部质检员终检，最后邀请监理工程师验收。举牌验收时，明确验收内容、标准与责任人，确保施工质量符合要求。

3.2 施工过程变形控制技术

3.2.1 顶管变形对钢管敷设影响的控制方法

顶管变形控制建立三维有限元模型，分析不同工况下结构变形规律。通过优化顶进参数与注浆工艺控制顶管沉降，在软土地层中采用分阶段注浆技术，提高注浆效果。分阶段注浆根据顶进进度与土体变形情况，合理确定注浆时间与注浆量，形成完整泥浆套，减少顶管沉降。同时，对顶管变形进行实时监测，根据监测结果及时调整施工参数，保障敷设质量。

3.2.2 钢管自身变形的预防与矫正技术

钢管自身变形预防通过合理设置临时支撑实现，在弯曲段增设抗弯加强筋，增强钢管抗变形能力。临时支撑根据钢管直径与跨度确定间距，安装牢固可靠。钢管变形矫正采用机械矫正与热矫正联合工艺，矫正后进行直线度检测，确保钢管变形在允许范围内。机械矫正采用专用矫正设备，热矫正控制加热温度与加热时间，避免因矫正不当导致钢管性能下降。

3.2.3 周边环境变形与施工过程的协同控制

周边环境变形监测布置深层土体位移计与地表沉降点，深层土体位移计埋深不低于10m，地表沉降点间距为5m，实时掌握周边环境变形情况。通过数据反馈调整施工参数，确保施工对周边环境影响最小。变形控制标准根据构筑物重要性分级确定，对敏感区域实施重点监控，监测频率提高至每30min一次。在施工过程中，加强与周边居民与单位的沟通协调，及时处理施工过程中出现的问题，保障施工顺利进行。

3.3 施工过程质量管控核心技术

3.3.1 钢管敷设精度实时检测与调整技术

钢管敷设精度检测采用全站仪与激光准直仪联合测量,全面检测钢管敷设位置与姿态。全站仪测量钢管三维坐标,激光准直仪提供激光束作为基准,检验钢管轴线偏差。通过数据分析,及时发现钢管敷设精度问题,并采取相应调整措施。调整时,根据偏差情况确定调整方向与调整量,利用纠偏装置进行精确调整,确保钢管敷设精度符合设计要求。

3.3.2 顶管施工质量与钢管安装质量的联动管控

顶管施工质量与钢管安装质量联动管控建立质量追溯系统,通过二维码标识实现全流程质量跟踪。每个施工环节设置唯一二维码标识,记录施工时间、施工人员、施工参数等信息。在质量检查过程中,通过扫描二维码获取相关信息,便于质量问题的追溯与处理。同时,建立质量信息共享平台,实现顶管施工与钢管安装质量信息的实时共享,加强质量管控协同性。

3.3.3 隐蔽工程施工质量控制要点

隐蔽工程验收留存影像资料,准确记录隐蔽工程实际情况。影像资料清晰完整,能够反映隐蔽工程施工质量状况。质量控制要点涵盖防腐层完整性、接口密封性、结构尺寸偏差等方面,制定专项检查表逐项确认,确保施工质量无遗漏^[4]。对不合格项建立整改闭环机制,在下一工序前完成整改,保证施工质量符合标准要求。

4 施工后期关键技术处理

4.1 钢管固定与间隙处理技术

钢管与顶管内壁间隙填充采用吹砂填充工艺,确保充分填充间隙。填充施工分段、分层进行,采用混凝土喷浆机对管道内进行吹砂,吹填时由两端分段多次吹填直至填满。输送管选用PVC管材(吹砂管道在完成钢筋混凝土套管顶进后,输水钢管安装前,提前悬挂至钢筋混凝土套管顶部),吹砂时管口深入到中部,根据吹砂速度逐步向外移动管道,直至最后吹填完成,封闭预留口,预留孔口采用防水砂浆进行封口。套管和钢管间采用砌筑37砖墙和水泥砂浆进行封堵,并在封堵端面顶部、底部和两侧腰部各布置1处DN110排水孔,作为溢水通道。

4.2 施工后防护与修复技术

钢管防腐层修复采用与原防腐层相同的材料与工艺,修

复区域扩大至损伤边缘外一定范围,确保修复效果。顶管结构防护涂层厚度满足设计要求,增强顶管结构防护能力。防护处理考虑两种结构的变形协调性,在接口部位增设柔性过渡层,减少结构间应力集中。施工痕迹修复包括注浆孔封堵、表面平整度处理等,采用与原结构相同的材料进行修复,保持结构外观一致性。结构完整性保障进行超声波检测,确认无内部缺陷后进行验收,确保结构安全可靠。

4.3 施工后技术验收核心要点

钢管安装精度验收采用激光跟踪仪进行三维测量,全面检查钢管安装位置与姿态。密封性验收通过水压试验进行,检验钢管密封性能。顶管与钢管协同工作性能验收进行荷载试验,验证结构在运营荷载作用下的变形与应力分布情况。稳定性复核建立长期监测系统,对关键部位进行持续观测,掌握结构长期稳定性。验收文件包括施工记录、检测报告、质量评估报告等,所有资料经各方签字确认。对验收中发现的问题制定整改方案,在规定期限内完成整改并重新验收,确保工程质量符合要求。

结束语

大口径顶管内穿输水钢管施工关键技术研究涵盖施工全过程。从顶管施工的轴线、顶力控制,到钢管内穿的预处理、牵引定位,再到施工过程的协同控制与后期处理,各环节紧密相连。通过综合运用多种先进技术和有效管理措施,可实现施工的精准、安全与高效。严格把控各阶段技术要点,能确保工程达到设计要求,为输水工程长期稳定运行奠定坚实基础,推动相关施工技术不断进步。

参考文献:

- [1]王国栋,肖光.大直径输水钢管安装技术分析[J].中国金属通报,2025(6):225-227.
- [2]王登平.输水用大口径厚壁螺旋钢管焊接过程在线监测关键技术[J].设备监理,2025(4):64-67,71.
- [3]韦尚伯,王颖,王圃.山地城市长距离大口径输水管道适应性评价及工程应用[J].给水排水,2024,50(11):124-129.
- [4]刘怒涛.高压力大口径球墨铸铁管在DX输水工程中的应用[J].云南水力发电,2022,38(1):175-177.