水工隧洞小角度主支交叉口施工技术研究

高耀文　张宏达　龚桂义　周智鹏　习永超
中国水利水电第三工程局有限公司　陕西　西安　710000

摘　要：水工隧洞小角度主支交叉口施工是长距离引水工程中的关键难点，存在测量控制精度低、围岩扰动大、交叉部位岩体稳定差等问题。本文依托环北部湾广东水资源配置工程施工 A6 标段，针对小半径短距离交叉口测量精准控制、大断面交叉口低扰动施工与围岩协同控制、主支交叉部位保留岩体加固保护三项关键技术展开研究，提出“全站仪自由设站 + 分段偏角法”测量技术、“变形-支护”动态响应机制及“先注浆后插锚杆”加固工艺，形成测量精准控制与高效施工协同的成套技术，为类似水工隧洞交叉口施工提供参考。

关键词：水工隧洞；小角度主支交叉口；测量控制；低扰动施工；围岩稳定

引言：随着我国水利基础设施建设的持续推进，长距离引水隧洞工程日益增多，施工支洞与主洞的交叉衔接段成为制约工程安全与进度的关键部位。小角度主支交叉口因转弯半径小、测量控制距离短、开挖断面大，施工中易出现轴线定位偏差大、围岩扰动剧烈、交叉部位岩体失稳等问题。环北部湾广东水资源配置工程作为国家重大水利工程，其施工 A6 标段云开山隧洞交叉口施工面临诸多技术挑战。本文结合该工程实践，系统研究小角度主支交叉口施工中的测量控制、低扰动开挖与围岩协同控制、保留岩体加固等关键技术，以期为同类工程提供技术借鉴。

1 工程概况

环北部湾广东水资源配置工程施工 A6 标段为西高干线云开山隧洞的一部分，引水流量 110m³/s，采用重力自流的无压输水方式。本标段起止里程 X683+100 ~ X6109+545，隧洞长 26.445 公里，隧洞采用 2 台敞开式 TBM 和钻爆法施工；设置茶山支洞（XG6#）、白石支洞（XG7#）、大成支洞（XG8#）3 条施工支洞兼检修支洞。项目茶山支洞与云开山隧洞衔接段拐弯长度为 150m，埋深 300m ~ 450m，围岩岩性为 Pt2-3Y.3 的变质砂岩、石英云母片岩、云母石英片岩，微风化，属中硬岩 ~ 坚硬岩，岩体完整性差 ~ 较完整，围岩以厚层结构块状结构为主，次为薄层结构。局部发育裂隙密集带，围岩稳定性差，易引起塌方等变形破坏。针对隧洞交叉口衔接段围岩稳定性欠佳、隧洞转弯半径较小，测量控制点布设距离较短（≤ 60m），岔洞距主洞控制点布设距离极短（≤ 20m）的特点，项目部根据先洞后墙的施工工法，考虑到轴线定位误差较大、交叉口一次性开挖断面较大，在开挖施工时会对围岩造成较大扰动，严重影响施工进度、安全与质量等难题开展研究[1]。

2 小半径短距离交叉口施工测量精准控制技术

2.1 测量控制难点分析

水工隧洞小角度主支交叉口测量控制面临三方面突出难题。其一，转弯半径小导致曲线段放样累积误差大，本工程茶山支洞与主洞衔接段拐弯长度仅 150m，传统放样方法难以保证节点轮廓线精准性，误差沿曲线逐段累积，至交叉节点处可能超出允许偏差。其二，测量控制点布设距离短，交叉口区域控制点间距不超过 60m，岔洞距主洞控制点距离不超过 20m，短边导线测量横向误差显著增大，传统导线测量精度急剧下降。其三，交叉口一次性开挖断面大，围岩变形和机械振动对测量精度产生动态干扰，TBM 掘进与钻爆法交叉作业区域振动干扰尤为突出。上述因素叠加，使得传统控制网在通视受限区域精度不足，难以满足交叉口结构尺寸精准控制的要求。

2.2 “分级布网 + 动态校验”高精度控制网构建

针对通视受限区域控制网精度不足的问题，研究提出“分级布网 + 动态校验”的高精度测量控制网构建技术。首先，将控制网分为首级控制网和加密控制网两级：首级控制网布设于通视条件较好的稳定区域，采用高精度全站仪进行边角联测，确保整体控制基准可靠；加密控制网在首级控制网基础上加密布设，重点覆盖交叉口转弯段和岔洞衔接部位[2]。其次，建立动态校验机制，每段放样前通过全站仪实时比对设站位置与首级控制点偏差，自动修正偏角参数，采用高精度 TS60 全站仪构建“测量—数据反馈—放样调整”闭环流程，确保轴线定位可控。同时分析围岩变形、机械振动对测量精度

的影响：围岩变形方面，布设收敛监测点，当变形速率超过 2mm/d 时对控制点进行复测校正；机械振动方面，对比振动与非振动时段测量数据，确定振动影响阈值，振动较大时段增加校验频次，必要时暂停放样作业，待稳定后重新校验。

2.3 小半径曲线段与交叉节点动态放样方法

针对小半径曲线段累积误差大的问题，研究采用“全站仪自由设站 + 分段偏角法”进行曲线段放样。具体做法是：将曲线按最大距离间距分解为若干短直线段，每段放样时通过全站仪实时比对设站位置与首级控制点偏差，自动修正偏角参数，确保轴线定位可控。分段偏角法的核心在于将连续曲线离散为短直线段，每段独立放样并实时校验，避免误差沿曲线累积。对于交叉节点部位，由于岔洞距主洞控制点布设距离极短（≤ 20m），常规放样方法难以保证精度，研究采用自由设站方式，在交叉口附近选择通视条件较好的位置设站，通过后方交会确定设站坐标，然后分别放样主洞轴线和岔洞轴线，在交叉节点处进行闭合校验。通过“测量—数据反馈—放样调整”闭环流程，确保交叉口结构尺寸精准。实践表明，采用上述方法后，交叉口轴线定位偏差控制在允许范围内，节点轮廓线精度显著提高，有效解决了传统放样在曲线段累积误差大、节点轮廓线不精准的问题。

3 大断面水利隧洞交叉口低扰动施工与围岩协同控制技术

3.1 “效率与围岩保护”矛盾分析

大断面水利隧洞交叉口施工面临“效率与围岩保护”的突出矛盾。一方面，交叉口一次性开挖断面大，施工空间受限，需要合理安排开挖顺序和机械配置以提高施工效率；另一方面，交叉口部位围岩稳定性差，本工程围岩为变质砂岩、石英云母片岩，岩体完整性差 ~ 较完整，局部发育裂隙密集带，在应力集中作用下易引起塌方等变形破坏，开挖扰动过大将严重影响围岩稳定和施工安全。如何在保证施工效率的同时，最大限度降低对围岩的扰动，成为交叉口施工的关键技术难题[3]。

3.2 低扰动开挖方式与钻爆参数优化

针对“效率与围岩保护”矛盾，研究从开挖方式和钻爆参数两方面进行优化。在开挖方式上，根据“先洞后墙”施工工法，先进行主洞开挖，再进行岔洞开挖，最后进行交叉口扩挖。所谓“先洞后墙”，是指先开挖主洞和岔洞的洞身段，保留交叉口部位岩体作为临时支撑墙体，待洞身段开挖完成后再进行交叉口扩挖，利用保留岩体维持交叉口区域围岩稳定，减少开挖扰动。交叉口扩挖采用分层分块开挖方式，将大断面分解为若干小断面，逐层逐块开挖，减小单次开挖对围岩的扰动。同时，精细化设置钻爆参数，根据围岩岩性和裂隙发育情况，合理确定炮孔间距、装药量和起爆顺序，采用短进尺、弱爆破、多循环的钻爆策略，控制爆破振动影响。对于裂隙密集带部位，适当减小装药量、增大炮孔间距，采用光面爆破技术控制开挖轮廓。在机械配置方面，针对小半径限制施工空间的问题，对施工机械进行适配性改造，选用体型紧凑、机动灵活的钻爆设备和出渣设备，如采用小型凿岩台车替代大型台车，采用小型挖掘机配合侧卸式装载机出渣，提高交叉口狭窄空间内的作业效率。通过优化机械配置和作业流程，在保证低扰动的前提下提升施工效率。

3.3 “变形—支护”动态响应机制

为研究围岩变形规律并实现与支护的协同控制，研究建立“变形—支护”动态响应机制。首先，在交叉口关键部位布设围岩变形监测点，实时监测围岩位移、收敛变形等参数。其次，根据监测数据分析围岩变形规律，明确小半径段围岩变形特征和支护受力状态。本工程监测数据显示，交叉口开挖后围岩变形呈现明显的时空效应：空间上，交叉口中心部位变形最大，向两侧逐渐减小；时间上，开挖后 3~7 天变形速率最大，之后逐渐趋于稳定。再次，利用监测数据优化支护方案，建立差异化动态调整机制：对于围岩完整性较好部位，采用常规锚喷支护，锚杆间距 1.5m×1.5m，喷射混凝土厚度 10cm；对于裂隙密集带部位，加密锚杆至 1.0m×1.0m，增设钢筋网和钢拱架，喷射混凝土厚度增至 20cm；当围岩变形速率增大时，及时加强支护；当围岩变形趋于稳定时，适当优化支护参数，避免过度支护。同时，实行监测预警与分级处置制度，根据监测数据设定预警阈值，当监测值超过预警值时及时启动处置程序，保障快速施工下的安全与质量。通过上述措施，形成相适配的低扰动施工成套技术，有效解决了大断面交叉口施工中效率与围岩保护的矛盾，实现了围岩与支护的协同控制。

4 主支交叉部位保留岩体加固和保护措施

4.1 交叉部位岩体应力分布与破坏机制

水工隧洞主支交叉部位保留岩体的稳定性，是交叉口施工及长期结构安全的核心保障。受主洞、岔洞开挖叠加影响，交叉部位应力集中现象显著，小角度交叉工况下岩体体量小，应力叠加效应更为突出。场区围岩多为变质砂岩、石英云母片岩，岩体完整性不均、裂隙发育，易出现剪切滑移与塌方病害。开挖后岩体形成压拉

交替应力场，极易产生张拉裂缝与剪切破坏，数值模拟显示区域最大主应力可达原岩应力的 2.5 ~ 3.0 倍，主要破坏形式为块体滑移、顶部冒落及边墙片帮，需针对性制定加固保护措施。

4.2 “先注浆后插锚杆”加固技术

针对交叉部位保留岩体稳定性不足的问题，本文采用“先注浆后插锚杆”新型加固工艺。该工艺先通过高压注浆充填岩体裂隙，胶结松散岩体，提升整体完整性与力学性能；再于浆液初凝前插入锚杆，使锚杆与注浆体紧密结合，形成复合加固体系[4]。相较于传统工艺，该方式浆液充填更饱满、锚固粘结效果更佳，可显著提升岩体抗剪强度与整体承载力。施工需精准控制注浆压力、注浆量及锚杆插入时机，选用适配注浆材料与锚杆类型，根据裂隙发育情况布设参数，有效保障保留岩体加固质量。

4.3 监测预警与分级处置

为验证加固效果并确保施工安全，在保留岩体加固部位布设监测点，监测岩体位移、锚杆受力等参数。监测内容包括：岩体表面位移监测，采用全站仪或收敛计定期观测交叉口关键部位位移变化；深部位移监测，采用多点位移计监测岩体内部不同深度位移情况；锚杆受力监测，采用锚杆测力计监测锚杆轴力变化，评估锚固效果；注浆效果检测，采用钻孔取芯或声波测试检验注浆体充填密实程度。根据监测数据实行分级处置制度：监测值在正常范围内时按常规施工；接近预警值时加强监测频次并准备加固材料；超过预警值时立即暂停施工，采取补充加固措施。预警阈值根据数值分析和工程经验综合确定，以位移速率和累计位移量作为主要控制指标。分级处置制度核心在于动态响应：通过实时监测获取岩体状态信息，根据监测结果动态调整施工节奏和支护参数，实现信息化施工，确保交叉口施工全过程处于受控状态。

5 结论

本文依托环北部湾广东水资源配置工程施工 A6 标段，针对水工隧洞小角度主支交叉口施工中的关键技术难题展开研究，得出以下结论：（1）针对小半径短距离交叉口测量控制难题，提出“分级布网 + 动态校验”高精度控制网构建技术和“全站仪自由设站 + 分段偏角法”动态放样方法，通过“测量—数据反馈—放样调整”闭环流程，有效解决了传统放样在曲线段累积误差大、节点轮廓线不精准的问题，确保交叉口结构尺寸精准。（2）针对大断面交叉口“效率与围岩保护”矛盾，通过优化低扰动开挖方式、精细化设置钻爆参数、适配性改造施工机械，建立“变形—支护”动态响应机制和监测预警分级处置制度，形成低扰动施工成套技术，实现了围岩与支护的协同控制。（3）针对主支交叉部位保留岩体稳定问题，采用“先注浆后插锚杆”加固技术，通过注浆体与锚杆的协同作用增强岩体整体性与抗剪强度，结合监测预警与分级处置制度，确保施工安全与岩体完整。上述技术成果形成了测量精准控制与高效施工协同的成套技术，为类似水工隧洞小角度主支交叉口施工提供了技术参考和实践借鉴。

结束语

水工隧洞小角度主支交叉口施工是长距离引水工程中的技术难点，涉及测量控制、围岩稳定、快速施工等多方面问题。本文结合环北部湾广东水资源配置工程实践，系统研究了小半径短距离交叉口测量精准控制、大断面低扰动施工与围岩协同控制、主支交叉部位保留岩体加固保护等关键技术，形成了成套施工技术。未来可进一步结合信息化监测手段和智能建造技术，提升交叉口施工的智能化水平，为水工隧洞建设提供更有力的技术支撑。

参考文献

[1] 李琪. 水工隧洞施工安全管理 [J]. 智能建筑与工程机械,2025,7(9):55-57.

[2] 何文娟, 徐莉涵. 水工隧洞衬砌渗透压力控制研究 [J]. 科学技术创新，2026(11)：166-169.

[3] 李治华, 于谦, 胡红平. 窄高型水工隧洞混凝土施工技术 [J]. 云南水力发电，2026,42(1):83-86.

[4] 刘猛. 不良地质条件下特大断面水工隧洞口开挖支护施工措施探索 [J]. 四川水力发电,2024,43(z2):71-73,99.