

水利隧洞TBM掘进围岩改良与管棚施工工艺

董振涛

新疆水发建设集团有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 本文结合水利隧洞不良地质洞段 TBM 掘进过程中, 围岩破碎、涌水、塌腔等现象, 以隧洞 IV 标 37+832.36 段工程为工程背景, 结合第二循环管棚施工实践, 论述围岩改良和管棚施工的主要工艺体系。通过确定护盾围岩加固、与管-裸孔分段施工、分级注浆的关键技术参数, 提出钻机空间扩挖、弧形梁式钻机安装的施工方法, 以及扩挖施工的安全防护与质量控制。实现了 40m 循环加固长度的围岩改良效果, 为 TBM 在破碎围岩中的安全掘进提供技术支撑, 其中相关参数和工艺可作为同类工程的技术参考。

关键词: 水利隧洞; TBM 掘进; 围岩改良; 管棚施工

Rock Mass Improvement and Pipe Shield Construction Technology for TBM Tunneling in Hydraulic Tunnels

Dong Zhentao

Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd., China Xinjiang Urumqi 830000

Abstract: This study examines the challenges of TBM excavation in adverse geological tunnel sections, including surrounding rock fragmentation, water inrush, and cavity collapse. Using the 37+832.36 section of Tunnel Section IV as a case study and incorporating practical experience from the second cycle pipe shield construction, it outlines key techniques for surrounding rock stabilization and pipe shield installation. By establishing critical technical parameters—including shield rock reinforcement, segmented construction with pipe and open-hole sections, and graded grouting—the research proposes innovative methods such as drill rig space expansion, curved beam-type rig deployment, and safety protocols for excavation operations. These approaches achieved 40-meter cyclic reinforcement lengths in surrounding rock improvement, providing technical support for safe TBM excavation in fractured geological conditions. The associated parameters and methodologies serve as valuable references for similar engineering projects.

Keywords: Hydraulic tunnel; TBM excavation; Surrounding rock improvement; Pipe canopy construction

0 引言

水利隧洞 TBM 掘进效率高、施工质量稳定, 但是不良地质洞段容易出现围岩破碎、涌水、塌腔等现象, 严重影响施工进度和安全, 是工程建设的主要瓶颈^[1]。本文以隧洞 IV 标 37+832.36 段为工程背景, 根据该段 TBM 掘进受阻的实际情况, 结合第二循环管棚施工经验, 对围岩改良和管棚施工的主要工艺进行阐述。通过改善施工参数、革新施工手段, 克服不良地质造成的施工难题, 为 TBM 在破碎围岩中的安全高效掘进提供技术支撑, 其成果也可供同类水利隧洞工程参考。

1 工程背景与地质特征

隧洞 IV 标施工时 TBM 掘进到 37+843.4~37+831.7 段处遇严重不良地质, 2018 年 3、4 月连续发生 80m³、150m³ 泥石和泥水混合物涌出情况, 造成 TBM 掘进被迫停工。第一循环管棚施工结束后累计掘进 11.7m, 但是护盾上方管棚下部出现较大塌腔, 超前地质预报显示, 37+832.4~37+815

段围岩完整性差到较破碎, 地下水以线状流水、涌水为主; 37+815~37+789 段围岩破碎、岩体相间分布, 裂隙发育容易导致掉块和塌腔。根据第一循环施工经验, 采用管棚法配合围岩改良技术进行第二循环施工, 主要解决围岩稳定性差、地下水渗流、TBM 掘进空间保障等问题。施工结合现场地质条件和设备参数, 制定出“围岩加固、钻机空间扩挖、管棚施工、回填掘进”一体化施工方案。

2 管棚施工空间构建与钻机安装工艺

2.1 钻机施作空间扩挖

管棚钻机施工空间的营造是保证后续管棚施工顺利进行的前提, 必须准确匹配钻机作业实际尺寸及操作需求, 确定 3.5m 基础长度要求。根据 TBM 掘进实时状态, 合理规划并采用两种不同的扩挖实施路径, 保证施工工况的适应性和可行性。当 TBM 具备持续掘进条件时, 创建起“加固、掘进、扩挖、支护”这种闭环式的循环施工模式, 依托工序的有序衔接, 达成空间拓展和围岩防护的同步实

施;如果TBM掘进受阻,那么就对护盾后方已经施工好的钢拱架区域展开扩挖工作,从而快速破除施工停滞所造成的空间障碍。扩挖作业要集中于拱顶200°核心区域,严格控制扩挖半径参数的同时,完成厚度为24cm的支护施工,支护完成后内轮廓半径要准确符合钻机安装和全流程作业的空间标准,为管棚施工打牢空间基础。

扩挖前置工序的核心是对护盾后面和上部的围岩进行加固处理,从源头上避免施工过程中围岩失稳。在护盾尾部2m范围内布置 $\phi 25$ 自进式中空注浆锚杆,锚杆长度大于6m、入岩深度不小于1m,拱顶180°范围内采用梅花形合理布设方式,排距严格控制在1m内;护盾顶部用YT-28风枪进行同型号锚杆施工,锚杆长度为4.5m至6m,排距为2m。锚杆施工完成后分阶段进行灌浆作业,先用1~2MPa的压力灌注HC材料或者水泥浆,再用3~8MPa的压力进行化学灌浆,采用双层灌浆工艺提高围岩结构强度。扩挖段支护体系采用HW200型钢拱架,间距严格控制在50cm以内,配合 $\phi 25$ 系统锚杆和 $\phi 42/\phi 25$ 锁脚锚杆形成复合支护结构,全环浇筑24cm厚C30混凝土,采用下半圆喷射、上半圆模注的差异化施工方式,有效保证扩挖空间围岩稳定,为后续施工提供安全屏障。

2.2 弧形梁式管棚钻机安装

弧形梁式管棚钻机安装依托“弧形梁+托板+悬臂梁”一体化固定和移动体系,有效适应了隧洞狭小空间的施工环境,解决了钻机定位、移位难的问题。钻机整体尺寸为303.8cm \times 49.6cm \times 65.4cm,用M30U型螺栓固定在主梁上两段HW150型钢弧形梁上,两段弧形梁的半径、弧长不同,间距准确控制,留有30cm的钻机距尾盾距离,专门供钻杆拆装使用,保证设备操作便捷性与安全性。

钻机托板用2cm厚钢板和HW150型钢加工而成,板面上有4个 $\phi 3$ cm的精确开孔,用螺栓将托板和弧形梁固定在一起,为钻机提供稳定的承载基础;悬臂梁也采用HW150型钢加工而成,长度和间距通过合理设计,通过法兰盘与拱架安装器无缝对接,实现了钻机绕洞室上部180°灵活旋转钻孔。钻孔作业分为固定钻孔和移动两个主要阶段,用有针对性地拆除、紧固悬臂梁和托板的连接螺栓,配合拱架安装器旋转来完成全范围钻孔工作。该种安装工艺突破了隧洞空间束缚,实现钻机全方位精确操作,为管棚施工的顺利推进奠定了设备根基,也为类似狭小空间工程的钻机安装提供了可借鉴的实践方案。

2.3 扩挖施工的安全防护与质量控制

管棚钻机施作空间扩挖施工,需同步落实安全防护和

质量控制措施,从工序源头消除围岩失稳风险,保证扩挖断面精度。施工前应先对作业区的安全进行检查,在主梁上部设置临时钢支撑,间距不大于1.5m,对护盾周围围岩实施实时变形观测,发现异常立即停止作业并加固。扩挖作业严格遵守短进尺、弱扰动的原则,采用人工配合机械分层扩挖,单次扩挖深度不大于30cm,防止一次开挖造成围岩应力突然变化。作业区应设置警示标志,设专人看守,禁止违章作业,防止高空坠物、机械伤害等事故的发生。质量控制上使用激光定位仪复核扩挖断面轮廓,保证拱顶200°扩挖范围、3.99m扩挖半径等参数满足设计要求,钢拱架安装后用水平仪校准垂直度,与锚杆焊接处做满焊处理,混凝土浇筑后按规范养护,强度达到设计值70%以上方可进行下一道工序。同时,做好施工记录,实现扩挖支护全过程可追溯。施工期间加强工序衔接检查,及时处理好质量隐患,保证扩挖施工安全有序进行。

3 围岩改良核心施工技术

3.1 护盾与刀盘上部围岩固结

护盾和刀盘上部围岩固结是围岩改良的前置关键环节,是从根本上加强围岩结构,防止钻孔时出现掉块、坍塌等安全问题。采用改造后的阿特拉斯1838钻机作为主要施工设备,依托主梁弧形梁的稳定支撑,施作 $\phi 25$ 自进式中空注浆锚杆,锚杆长度统一为8m,环向间距精确到70cm,外倾角设为1°,全环布置14根,保证锚杆布设的均匀性及覆盖度。孔壁开6~8mm孔径,纵向间距25cm,护盾尾部1m范围内由于结构原因不设孔,防止对护盾结构造成损伤。

锚杆施工采用间隔布孔、分段灌注的合理施工方法,单根锚杆施工完成后立即进行化学灌浆,灌浆配合比严格按照A组份:B组份=1:1的标准执行,与扩挖前围岩加固质量标准一致。该工艺可达到护盾和刀盘上部围岩初步固结的目的,提高围岩的整体强度和稳定性,为后续与管施工和裸孔施工打下基础,减少钻孔作业对围岩的扰动风险,保证施工过程安全可控。

3.2 与管-裸孔分段施工

3.2.1 与管施工

与管施工属于超前支护的重要工序,其主要作用是在施工之前形成围岩的防护体系,抵御破碎的围岩以及地下水渗流为施工带来的风险^[9]。施工前期用YT-28钻机进行50cm的先导钻进,然后安装 $\phi 168$ 导向管,导向管外倾角为2°,环向间距70cm,保证导向管布置的准确性。导向管安装完成后,用锚固剂充分填满管体和围岩之间的空隙,使导向管得到稳固的锚固,为后面与管施工提供稳定的导向。

导向管锚固完毕后,用 ZM-90 管棚钻机进行 $\phi 146$ 与管施工,钻杆直径为 $\phi 89$,与管壁厚 5mm、单根长度 8m、每环布设 15 根,管壁无孔,防止浆液从管壁渗漏,保证注浆效果。施工完成后,用 0.5~1MPa 的压力灌注 HC 材料,灌浆配合比准确确定为 HC 材料、水:添加剂 = 1:0.3:0.06,保证浆液和围岩紧密结合。施工过程中如果出现刀盘内漏浆情况,立即启动应急加固措施,用 $\phi 25$ 自进式锚杆进行化学灌浆加固,迅速封堵漏浆通道,保证施工安全和与管施工连续性、安全性。

3.2.2 裸孔施工

裸孔施工属于围岩改良的主要工序,采用分段钻进、分级注浆的方式对 40m 长的围岩实施全方位加固。灌浆完成后采用 $\phi 100$ 钻头进行裸孔钻进工作,钻进时严格按照分段施工的原则,每钻进 5m 或者遇到卡钻的情况时,立即插入 10MPa 以上的深孔止浆塞,分段注浆,防止注浆过程中浆液窜流,提高注浆效果。

注浆段分为 8~18m 和 18~40m 两段,不同区段用不同的注浆材料和注浆参数。8~18m 区间灌注 HC 材料,注浆压力控制在 1~2Mpa 之间,严格控制每延米 HC 主材注入量不超过 260kg,防止材料过多造成围岩结构变形;18~40m 区间灌注水泥浆,水灰比按 0.6:1、0.5:1、0.4:1 梯度由稀到浓调整,注浆压力提高到 4~6Mpa,持压 5~8min 并监测到不吸浆时停止注浆,保证水泥浆与围岩裂隙充分填充。钻孔和注浆施工分两序隔孔进行,施工顺序从两侧向拱顶推进,利用浆液等强凝固时间完成钻机移位,改善施工工序衔接,提高整体施工效率^[1]。

3.3 分级注浆工艺要点

分级注浆是围岩改良的关键工序,必须按照孔口压入式工艺规范进行操作,根据围岩实际情况及注浆反馈信息,及时改变注浆参数,保证注浆效果和施工安全。根据不同的注浆状态来制定相应的参数调整规则,灌浆压力保持稳定而注入率持续降低,或者注入率不变而灌浆压力持续升高时,严格保持水灰比不变,防止由于参数调整影响浆液渗透效果;水泥注入量 $\geq 200\text{kg/m}$ 或者连续灌注 30min 且注浆参数无变化时,及时提高浆液稠度,增强浆液与围岩的结合强度。

封孔用压力灌浆法施工,最大灌浆压力为 0.5 倍浆体的比重,使灌浆密实,不出现渗漏现象。为保证注浆施工过程中灌浆不中断、不出料、不出水、不出气等现象的发生,在施工前制定出了相应的处理措施,灌浆中断时及时查找原因并进行修复,冒浆漏浆时用嵌缝封堵法迅速堵塞渗漏点,涌水段使用凝结时间短的 HC 材料注浆。

深孔止浆塞的规范操作是分段注浆顺利进行的前提,施工时充水压力应大于灌浆压力的 2/3,保证止浆塞的密封性;灌浆时要缓慢平稳地加压,不得使压力突然增大而造成设备损坏或者围岩扰动;长时间灌注作业时,随时观察浆液流动状况,发现窜浆、返浆等异常现象立即处理;注浆结束之后,按照先释放灌浆压力、后释放充气压力的顺序进行操作,防止止浆塞射出造成安全事故;施工完毕后及时清洗注浆管路,做好设备日常保养工作,保证设备后续使用性能,为分级注浆工艺的顺利实施提供全流程保障。

4 扩大洞室回填与 TBM 循环掘进

管棚和围岩改良施工完成后,扩大洞室分层回填,撑靴位置及上部 50cm 范围内用超前喷射混凝土回填,其余部位用 TBM 掘进时系统喷射机械手喷射,确保 TBM 撑靴的支撑力传递。

TBM 掘进采用“26.5m 掘进+3.5m 扩挖”的循环方式,掘进到 26.5m 后,对露出护盾尾部的 3.5m 段进行断面扩挖,扩挖后一次支护内侧距护盾顶部 50cm,重新安装 HW200 型钢拱架(间距 50cm),施作 24cm 厚喷射混凝土,再安装管棚钻机,施工 40m 长超前管棚(外倾角 2°),完成后再掘进,如此循环通过断层破碎带。

掘进时每循环掘进长度 $\leq 50\text{cm}$,安排专人看护主梁上下部,出现掉块塌方严重情况立即停止掘进并重新加固围岩,结合安全监测数据调整钢拱架间距和支护参数,实现施工过程的动态控制。

5 结语

针对水利隧洞不良地质洞段 TBM 掘进难题,本工程形成适应现场情况的围岩改良和管棚施工工艺体系。核心技术有建立锚杆加固和化学灌浆双重围岩加固体系,确定关键参数保证围岩固结,创新与管 8m、裸孔 32m 分段管棚工艺,根据分级注浆适应破碎围岩要求,形成弧形梁式钻机安装和标准化扩挖方法,解决狭小空间施工难题。该工艺依托现场实践的验证,可为类似 TBM 隧洞不良地质施工提供标准的技术参考,积累起宝贵的现场经验。

参考文献:

- [1] 王欣. 超长隧洞 TBM 智能掘进及围岩安全评价研究[D]. 新疆农业大学, 2021.
- [2] 郭虎. 复杂地质条件下水利隧洞 TBM 施工卡机风险预测与应对技术[J]. 中华建设, 2026(03): 150-152.
- [3] 王鑫. 复杂地质条件下的水利隧洞施工稳定性研究[J]. 水上安全, 2025(16): 139-141.

作者简介:董振涛(1993.08-),汉族,山东诸城人,本科,中级工程师,研究方向:深埋长隧洞、造价。