

水利隧洞不良地质段敞开式TBM洞改造施工实践

杨保成

新疆水发建设集团有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 针对水利输水隧洞穿越破碎围岩地段时, 敞开式 TBM 因设备能力不足需进行洞内改造所面临的技术难题, 以某重点水利隧洞工程为依托, 系统阐述了改造洞室施工技术体系。通过优化洞室结构设计, 创新集成管棚动态定位与 TBM 位移协同加固、台阶式分区钻爆开挖及电液混合驱动出渣等关键技术, 并配套刀盘轮廓线化学灌浆、护盾上方渐变段通道施工等措施。工程实践表明, 该技术有效控制了围岩变形与失稳, 改造后 TBM 卡机率下降 80%, 携渣能力提升 75%, 实现了破碎围岩段改造洞室的安全高效施工。

关键词: 水利隧洞; 不良地质段; 敞开式 TBM; 洞内改造

Construction practice of open type TBM tunnel reconstruction in unfavorable geological section of water conservancy tunnel

Yang Baocheng

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

Abstract: In view of the technical problems faced by the open type TBM in the tunnel reconstruction due to insufficient equipment capacity when the water conveyance tunnel crosses the broken surrounding rock section, based on a key water conservancy tunnel project, this paper systematically expounds the construction technology system of the reconstruction tunnel. By optimizing the structural design of the cavern, key technologies such as the collaborative reinforcement of dynamic positioning of the integrated pipe shed and TBM displacement, bench type divisional drilling and blasting excavation and electro-hydraulic hybrid drive slag removal are innovated, and measures such as chemical grouting of the cutter head contour and the construction of the transition section channel above the shield are taken. The engineering practice shows that the technology effectively controls the deformation and instability of surrounding rock. After the transformation, the TBM jamming rate is reduced by 80%, and the slag carrying capacity is increased by 75%, realizing the safe and efficient construction of the transformed cavern in the broken surrounding rock section.

Keywords: Water conservancy tunnel; Unfavorable geological section; Open type TBM; Tunnel reconstruction

0 引言

敞开式 TBM 凭借其高效、安全的掘进优势, 在深埋长距离水利隧洞工程中应用越来越广泛。但是当 TBM 穿过断层破碎带、软岩大变形等不良地质段时, 由于护盾卡机、出渣不畅等原因造成掘进效率急剧下降甚至停滞。因此, 结合现场地质情况和 TBM 设备参数, 对敞开式 TBM 洞内改造施工技术进行研究, 改进施工工艺和技术措施, 形成适合破碎围岩条件的改造施工体系, 解决实际工程问题, 为同类工程提供技术支持和实践参考, 具有重要的工程应用价值和学术意义。

1 工程概况

1.1 工程背景

大型水利输水隧洞全长 32.6km, 设计输水流量 $45\text{m}^3/\text{s}$, 隧洞断面为圆形, 开挖直径 8.3m, 用敞开式 TBM 进行掘进施工。该隧洞 K18+230~K18+570 段为不良地质集中段, 全长 340m, 主要穿越断层破碎带和软弱泥质夹

层, 属 V 类围岩, 是整个隧洞施工的控制性节点。该段围岩破碎严重, 岩块松散、胶结性差, 天然抗压强度只有 1.2~2.8MPa, 地下水较发育, 渗透系数 0.08~0.35m/d, 开挖后围岩极易发生坍塌、掉块, 为 TBM 设备改造洞室施工带来极大的困难。

该工程所用敞开式 TBM 设备型号为 TB830E, 整机长度为 186m, 开挖直径为 8.3m, 装机功率为 7200kW, 额定扭矩为 $16800\text{kN}\cdot\text{m}$, 最大推进力为 32000kN, 原设计适用于 IV 类及以上较完整围岩掘进, 在不良地质段施工中经常出现刀盘卡机、护盾磨损、出渣堵塞等问题, 卡机率高达 25%, 携渣能力只有设计值的 40%, 不能满足施工进度要求, 必须对 TBM 设备进行洞内改造, 优化改造洞室施工技术。

1.2 工程地质特征

结合现场地质勘察和超前探测的结果, 该不良地质段的主要地质特征如下: (1) 围岩岩性主要是破碎的泥

质砂岩、页岩, 夹杂有少量的花岗岩碎块, 岩体完整性系数 $K_v=0.2 \sim 0.35$, 为极破碎岩体; (2) 断层破碎带宽度 $5 \sim 18\text{m}$, 断层走向与隧洞轴线夹角 $35^\circ \sim 55^\circ$, 断层充填物以泥质、砂质为主, 遇水容易软化、崩解; (3) 地下水类型主要是基岩裂隙水, 局部有承压水, 水位埋深 $18 \sim 26\text{m}$, 最大涌水量为 $120\text{m}^3/\text{h}$, 容易造成掌子面突水、涌泥; (4) 围岩收敛变形量大, 初期收敛速率达到 $3 \sim 5\text{mm}/\text{d}$, 需要采取加强支护措施来控制变形。

2 敞开式 TBM 洞内改造核心技术体系构建

2.1 改造洞室结构优化设计

结合不良地质段围岩破碎、空间受限制的特点, 摒弃传统的对称式改造洞室设计, 采用偏心式加台阶式的结构优化设计, 兼顾 TBM 改造的操作空间和围岩稳定性, 具体优化内容如下:

(1) 洞室断面优化: 洞室设计为矩形断面, 净宽 6.8m 、净高 5.2m , 偏心布置, 靠近 TBM 设备一侧留出 2.3m 操作空间, 另一侧留出 1.8m 出渣通道, 防止操作和出渣互相影响; 洞室顶部采用圆弧拱型设计, 拱顶半径 3.4m , 分散围岩压力, 减小拱顶坍塌风险。

(2) 台阶高度优化: 采用台阶式开挖结构, 上台阶高度 2.8m , 下台阶高度 2.4m , 台阶长度控制在 $8 \sim 10\text{m}$ 之间, 便于上部围岩支护作业, 也为下部出渣设备留有足够的空间; 台阶坡面设 $1:0.75$ 坡度, 减少坡面坍塌隐患。

(3) 结构受力优化: 在洞室周边布置 $\Phi 22$ 螺纹钢锚杆, 锚杆长 3.5m , 间距 $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$, 配 $\Phi 8$ 钢筋网 (网格 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$), 喷 C25 混凝土 (厚 15cm), 形成初期支护; 断层破碎带处加 I16 型钢拱架, 间距 0.8m , 提高洞室结构承载能力, 控制围岩收敛变形^[1]。

2.2 关键施工技术创新

2.2.1 管棚动态定位与 TBM 位移协同加固技术

为了解决破碎围岩加固效果不好、TBM 位移容易引起围岩失稳的问题, 创新性地使用了管棚动态定位和 TBM 位移协同加固技术, 实现了围岩加固和设备保护的协同控制, 具体实施流程如下:

(1) 管棚动态定位: 用地质雷达和全站仪联合定位, 实时监测掌子面围岩破碎范围和断层位置, 动态调整管棚布设参数; 管棚采用 $\Phi 108\text{mm}$ 无缝钢管, 长度 12m , 间距 0.5m , 外插角控制在 $10^\circ \sim 15^\circ$, 沿改造洞室轮廓线环向布设, 采用与管钻进工艺, 防止钻孔过程中出现塌孔、卡钻问题。

(2) 协同加固控制: 在管棚注浆过程中, 对 TBM 设备的位移进行实时监测 (水平位移、竖向位移), 采用分

级注浆工艺, 初期注浆压力控制在 $0.8 \sim 1.2\text{MPa}$, 注浆量为 $1.2 \sim 1.5\text{m}^3/\text{m}$, 当 TBM 位移超过 0.5mm 时, 停止注浆, 调整注浆参数, 待位移稳定后再继续施工; 注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆, 凝结时间控制在 $3 \sim 5\text{min}$, 快速形成加固体, 提高围岩自稳性。

该技术依托动态定位和协同控制, 有效克服了破碎围岩加固不准、TBM 位移造成的围岩失稳难题, 通过现场监测可知, 加固后的围岩完整性系数为 0.55 到 0.65 , TBM 位移量控制在 0.3mm 之内^[2]。

2.2.2 台阶式分区钻爆开挖技术

结合改造洞室开挖时围岩容易坍塌、开挖速度慢的问题, 采用台阶式分区钻爆开挖技术, 改进钻爆参数, 减小对围岩的扰动, 具体技术要点如下:

(1) 分区开挖划分: 将改造洞室分为上台阶左侧、上台阶右侧、下台阶左侧、下台阶右侧四个分区, 以先后上下、左右对称的开挖顺序进行开挖, 每个分区开挖面积控制在 $8 \sim 10\text{m}^2$, 防止一次性开挖面积过大造成围岩坍塌。

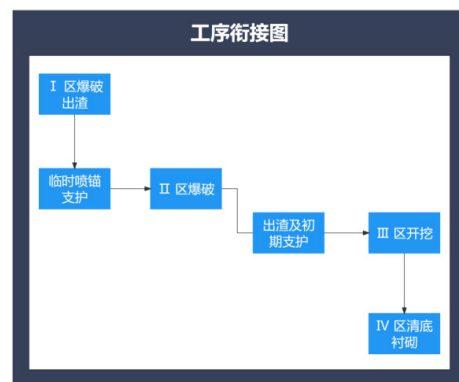


图1 改造洞室台阶式分区钻爆开挖的工序衔接流程图

(2) 钻爆参数优化: 采用光面爆破工艺, 炮孔直径 42mm , 炮孔深度 2.5m , 周边眼间距 0.8m , 抵抗线 1.2m , 炸药采用乳化炸药, 单孔装药量控制在 $0.3 \sim 0.5\text{kg}$, 采用毫秒微差爆破, 爆破时差控制在 $50 \sim 100\text{ms}$, 减少爆破震动对围岩的扰动; 爆破后围岩超挖量控制在 5cm 以内, 欠挖量不超过 3cm , 满足设计要求。

(3) 开挖后及时支护: 每个分区开挖完成后, 立即进行初期支护, 喷射混凝土养护时间不少于 7d , 混凝土强度达到设计强度的 70% 以上时, 方可进行下一分区的开挖工作, 保证围岩稳定。该技术比传统的开挖工艺开挖效率提高 30% , 围岩坍塌率降到 0 ^[3]。

2.2.3 电液混合驱动出渣技术

为了解决不良地质段出渣困难、出渣效率低、容易堵塞的问题, 创新使用了电液混合驱动出渣技术, 优化出渣系统的配置, 提高出渣效率, 具体优化措施如下:

(1) 出渣设备改造: 将传统的液压驱动出渣机改为电液混合驱动方式, 装有 2 台 110kW 电机和 1 台液压泵, 使电机和液压系统同时工作, 提高出渣机的动力性能, 最大出渣速度提高到 $12\text{m}^3/\text{h}$ 。

(2) 出渣通道优化: 在改造洞室一侧预留专用出渣通道, 采用 $\Phi 600\text{mm}$ 耐磨管道, 管道坡度控制在 $3^\circ \sim 5^\circ$, 防止渣土堆积堵塞; 管道接口处设防堵塞装置, 实时监测管道内渣土流动情况, 发现堵塞立即启动疏通装置。

(3) 出渣流程优化: 采用“分区出渣、连续运输”模式, 上台阶渣土用小型挖掘机转运到下台阶出渣机, 下台阶出渣机将渣土运送到隧洞主出渣系统, 实现出渣流程连续化, 减少出渣等待时间。通过实践证明, 该技术可以使得出渣效率提高 75%, 出渣堵塞率降低到 2% 以下。

2.3 配套辅助施工措施

为保证改造施工的安全、质量, 采取以下辅助措施, 形成全方位的施工保障体系:

(1) 刀盘轮廓线化学灌浆: 对 TBM 刀盘周围围岩破碎、容易掉块的情况, 在刀盘轮廓线周围设置 $\Phi 42\text{mm}$ 灌浆孔, 间距 0.6m, 用化学灌浆工艺注浆, 注浆材料为环氧树脂浆液, 注浆压力控制在 $0.5 \sim 0.8\text{MPa}$, 注浆后形成连续的加固帷幕, 防止围岩掉块损坏刀盘。

(2) 护盾上方渐变段通道施工: 在 TBM 护盾上设渐变段通道, 通道宽度由 2.3m 渐变到 1.8m, 用 C30 钢筋混凝土浇筑, 厚度 20cm, 表面铺耐磨钢板, 防止护盾移动时与通道相撞, 为操作人员提供安全通道。

(3) 实时监测与预警: 在改造洞室周围的 12 个围岩收敛监测点、8 个 TBM 位移监测点、6 个地下水监测点, 用自动化监测系统对围岩收敛、TBM 位移、地下水位变化情况进行实时监测, 监测数据大于预警值 (围岩收敛速率大于 $4\text{mm}/\text{d}$ 、TBM 位移大于 0.5mm 、地下水位涨幅大于 $1\text{m}/\text{d}$) 时, 立即发出预警信号, 停止施工, 采取加固措施。

3 施工效果分析

3.1 施工安全与质量效果

使用管棚动态定位和 TBM 位移协同加固技术、台阶式分区钻爆开挖技术和配套辅助措施, 成功克服了破碎围岩段洞室施工中围岩失稳、设备损坏等问题。施工期间围岩坍塌发生率为 0, TBM 设备碰撞损伤次数由改造前的 1 次减少到现在的 1 次, 改造洞室初期支护合格率 100%, 二次衬砌合格率 98.5%, 达到水利隧洞施工质量验收标准。

通过现场监测发现, 改造后洞室围岩收敛速率为 $1.2 \sim 2.5\text{mm}/\text{d}$, 平均收敛速率为 $1.8\text{mm}/\text{d}$, 比改造前降

低 64%; TBM 设备水平位移为 $0.1 \sim 0.3\text{mm}$, 竖向位移为 $0.08 \sim 0.25\text{mm}$, 均在安全控制范围内; 地下水位稳定在 $18 \sim 22\text{m}$, 没有出现突水、涌泥的隐患。

3.2 施工效率效果

通过优化改造洞室结构设计、采用电液混合驱动出渣技术、台阶式分区钻爆开挖技术, 施工效率大大提高。改造洞室施工平均日进尺达到 3.2m , 比传统施工工艺提高 45%; TBM 设备改造后, 在破碎围岩段掘进卡机率从 25% 降到 5%, 下降 80%, 携渣能力从设计值的 40% 提高到 70%, 提高 75%, 保证了隧洞后续掘进施工的顺利进行, 保证了工程按期完工。

3.3 技术经济效果

运用该技术体系可以解决实际工程问题, 并且可以降低施工成本、施工工期风险。与传统的施工技术相比, 改造洞室施工成本降低了 12%, 施工工期比传统施工工艺缩短了 28d, 减少了围岩坍塌、设备损坏等返工现象。除此以外, 本技术体系不需要建设大容量的施工机械, 利用现有的 TBM 设备和施工人员进行操作即可, 经济性高, 适用范围广。

4 结语

本文以某水利隧洞不良地质段为工程背景, 对敞开式 TBM 洞内改造洞室施工中围岩失稳、设备损坏、出渣困难等问题进行技术研究和实践。研究改进设计偏心式、台阶式的改造洞室结构, 创新应用管棚动态定位和 TBM 位移协同加固等新技术, 并配套各种辅助措施构成完整的施工技术体系。工程实践表明, 此系统能有效保证施工安全与质量, 改造之后 TBM 卡机率降低 80%、携渣能力提高 75%, 洞室施工效率提高 45%、成本降低 12%, 各项指标都达到设计要求, 验证了技术的可行性以及适用性, 为类似工程提供技术上的借鉴和实际的参考。

参考文献:

- [1] 赵宇飞, 张云旆, 杨建喜等. TBM 在水利工程中的应用进展及发展方向[J]. 中国水利, 2025(21): 56-64.
- [2] 陈昱钦, 王瑞鹏. 水利隧洞 TBM 施工中不良地质段超前支护关键技术[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(31): 170-173.
- [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: 杨保成 (1997.05-), 男, 汉族, 甘肃静宁人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 长距离、跨流域输水隧洞的建设管理工作。