

长距离输水隧洞 TBM 施工关键技术及风险应对策略——以某工程为例

陈浩

中国电建集团城市规划设计研究院有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17537

[摘要] 随着国家水资源调配工程规模持续扩大,长距离输水隧洞施工面临地质复杂性与工期紧迫性双重挑战。本文以某28.32km输水隧洞工程为例,系统阐述敞开式TBM施工关键技术,包括基于岩性差异的动态参数调控、“三位一体”设备协同作业及多手段地质预报体系,同时针对断层破碎带卡机、高地应力岩爆、突涌水等风险提出分级预警与工程处置措施,实现日均掘进15m以上高效推进。

[关键词] 长距离输水隧洞; TBM施工; 关键技术; 风险应对策略

中图分类号: TV554 文献标识码: A

Key Construction Technologies and Risk Management Strategies for Long-Distance Water Conveyance Tunnels Using TBM: A Case Study of a Specific Project

Hao Chen

Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., PowerChina

[Abstract] With the continuous expansion of national water resource allocation projects, long-distance water conveyance tunnel construction faces dual challenges of geological complexity and tight schedules. Taking a 28.32 km water conveyance tunnel project as an example, this paper systematically elaborates on the key technologies for open-type TBM construction, including dynamic parameter adjustment based on lithological differences, "trinity" equipment coordination, and a multi-method geological forecasting system. Simultaneously, risk management strategies, including hierarchical early warning and engineering countermeasures, are proposed to address risks such as TBM jamming in fault fracture zones, high in-situ stress-induced rockbursts, and sudden water inflow, achieving efficient progress with an average daily advancement exceeding 15 meters.

[Key words] Long-Distance Water Conveyance Tunnel; TBM Construction; Key Technologies; Risk Management Strategies

引言

在国家水资源空间均衡战略背景下,长距离输水隧洞作为跨区域调水工程的核心载体,其建设效率与安全性直接影响工程效益。传统钻爆法在长距离、复杂地质条件下存在工期长、风险高等局限,而硬岩掘进机(TBM)技术凭借高效、安全优势逐渐成为主流。本文以某28.32km输水隧洞工程为依托,针对长距离独头掘进、断层破碎带、高地应力岩爆及突涌水等典型难题,系统研究TBM施工关键技术体系与风险动态管控策略,为同类工程提供技术借鉴。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程简介

(1)本输水隧洞工程是区域水资源调配核心工程,全长

28.32km,其中TBM掘进段长24.30km,占比85.8%。工程设计流量为32m³/s,多年平均输水量11.5亿m³,供水目标覆盖沿线2座地级市的城镇生活用水、3个工业园区工业用水,以及120万亩农田灌溉用水,可显著改善区域水资源短缺问题。(2)工程面临四大核心难点:一是长距离独头掘进,最大独头掘进长度达11.8km,通风、出渣及设备检修难度极大;二是需穿越5条断层破碎带,岩体稳定性差,易引发施工事故;三是隧洞中段穿越高地应力区,最大地应力值26MPa,存在岩爆风险;四是沿线3处突涌水风险段,单段最大预估涌水量750m³/h,防水压力突出。

1.2 地质条件分析

(1)地质剖面显示,隧洞沿线岩性分段明显:进口段(0-4.1 km)为大理岩,岩体完整,饱和抗压强度32-48MPa;中段(4.1-19.6

km)以砂岩、板岩互层为主,层理发育,局部夹泥岩夹层;出口段(19.6-28.32km)为石英砂岩,质地坚硬但节理裂隙较发育。断层构造主要为F1、F2断层带,F1断层带宽60-130m,以糜棱岩为主;F2断层带宽40-110m,伴生次级裂隙。水文地质上,以基岩裂隙水为主,富水段受断层导通影响,地下水位埋深18-115m。(2)不良地质段统计如下:全线断层破碎带累计长3.52km,占总长12.4%;岩爆倾向性岩体(Q1类围岩)集中于中段高地应力区,长4.2km,占比14.8%;突涌水高风险区主要为四间房河段(9.8-12.1km),长2.3km,该区域岩体富水性强,与地表水体存在水力联系,风险等级为I级^[1]。

2 长距离输水隧洞TBM施工关键技术

2.1 TBM设备选型与配置

(1)本工程选用直径4.0m敞开式TBM,选型依据主要基于沿线地质条件与施工需求:隧洞以完整性较好的大理岩、砂岩为主(占比超70%),敞开式TBM对围岩适应性强,可通过及时支护控制围岩变形,且设备成本较双护盾TBM低15%-20%;对比双护盾TBM,其虽适用于破碎围岩段,但本工程断层破碎带仅占12.4%,双护盾TBM的管片拼装系统在多数完整围岩段易造成功能闲置,且设备转弯灵活性较差,难以适应隧洞局部1500m的曲线半径。综合经济性与适用性,敞开式TBM更符合工程需求。(2)配套系统采用“三位一体”协同设计:超前钻机选用CMS1-30型,安装于TBM刀盘上方,可实现360°全方位钻探,钻探深度达30m,与TBM掘进同步作业,提前探明前方5-8m地质情况;湿喷机采用TK961型,与TBM后配套系统刚性连接,喷浆效率达15m³/h,可在掘进后1小时内完成初喷支护;连续皮带出渣系统选用ST1600型,带宽1.6m,输送能力400m³/h,皮带机沿线设置3处张紧装置,避免长距离输送导致的皮带跑偏,且与超前钻机、湿喷机的作业区间通过防护隔板分隔,实现“钻探-掘进-支护-出渣”同步高效推进。

2.2 掘进参数动态控制

(1)基于岩性差异实施参数优化:在石英含量85%的砂岩段(饱和抗压强度75MPa),将贯入度从完整大理岩段的8-10mm/r降至3-5mm/r,刀盘转速从6r/min调至4r/min,同时将推进油缸推力从1800kN提升至2200kN,避免因岩性过硬导致刀具崩裂;在砂岩-板岩互层段(抗压强度40-50MPa),采用“低推力、中转速”模式,推力控制在1500-1800kN,转速保持5r/min,减少岩体层理面剥离引发的塌方风险^[2]。(2)依托实时监测系统动态调整:在TBM主轴承处安装2组温度传感器(测量范围-40℃-150℃)与3组振动传感器(测量频率0-500Hz),数据通过5G传输至地面控制中心;当主轴承温度超过70℃或振动幅值大于0.8mm时,自动触发预警,控制系统将掘进速度从常规100mm/min降至60mm/min,若参数持续异常则停机检查;通过该机制,将主轴承故障发生率降低60%,确保设备连续掘进稳定性。

2.3 超前地质预报技术

(1)构建“多手段综合预报体系”:采用TSP203地震波法进行长距离预报,每50m布置1个测孔,探测距离达100-150m,可精确定位断层破碎带位置与规模,分辨率达5m;对TSP探测异常段,

采用超前钻探验证,选用XY-2PC型钻机施工直径90mm的探孔,孔深30m,通过岩芯采取率判断岩性(完整段岩芯采取率>90%,破碎段<60%);同步使用红外探水仪(探测距离5-10m),通过监测岩体温度异常变化(富水段温度较干燥段低3-5℃),预警突涌水风险,实现“长-中-短”距离预报全覆盖。(2)典型案例:在隧洞12.3-12.8km段(Fw9-1断层带),TSP203探测发现波速异常降低区(波速从5000m/s降至2800m/s),推测存在富水破碎带;随后超前钻探施工3个探孔,其中2号孔涌水量达120m³/h,证实断层带富水性强;基于预报结果,提前实施帷幕注浆,注入超细水泥-水玻璃双液浆120t,形成厚度5m的止水帷幕,注浆后探孔涌水量降至5m³/h以下,有效规避突涌水风险。

2.4 支护体系设计

(1)初支与二衬协同施工:根据围岩分级采取差异化支护方案,L1区(III类围岩)初支采用伞状钻机(型号ZJ30)安装Φ25mm中空注浆锚杆,锚杆长度3.5m,间距1.2m×1.2m,喷C25混凝土厚度15cm;二衬采用12m长液压衬砌台车,分两步施工:先浇筑洞身衬砌(厚度30cm),待混凝土强度达设计值70%后,再施工底板衬砌(厚度25cm),避免一次浇筑导致的结构变形;通过协同作业,初支与掘进面间距控制在30m内,二衬滞后初支不超过100m。(2)特殊地段强化支护:针对Q1类围岩(强岩爆风险段),采用TH全圆钢拱架(型号I25b)+防爆钢筋网片(Φ8mm,网格间距15cm×15cm)组合支护,钢拱架间距从常规1.0m缩短至0.8m,拱架间采用Φ22mm纵向连接筋焊接,形成整体受力体系;喷混凝土采用C30纤维混凝土,厚度增加至20cm,纤维掺量0.9kg/m³,提升支护结构抗冲击能力;在F1断层破碎带(宽度150m),额外增设Φ42mm小导管注浆(长度5m,间距0.3m),形成超前支护体系,确保破碎岩体稳定^[3]。

3 长距离输水隧洞TBM施工风险识别与应对策略

3.1 地质风险与应对

(1)断层破碎带卡机风险是TBM施工核心地质风险之一,该风险多因破碎岩体坍塌挤压刀盘、护盾,导致设备无法正常推进。应对时采用“掘进式步进”法:先停止刀盘旋转,利用TBM推进油缸缓慢顶推护盾,同时通过超前钻机对前方5-8m破碎带进行小导管注浆加固;待岩体稳定性提升后,以已施工完成的二衬混凝土作为可靠支撑面,减少设备在破碎带内的停滞时间,将卡机风险发生率控制在3%以内。此外,提前储备应急脱困设备(如液压千斤顶、破碎锤),确保突发卡机时可在48小时内恢复施工。(2)岩爆灾害主要发生于高地应力区的Q1类围岩段,易引发岩块弹射、护盾变形。应对策略包括:在刀盘前方施工3-5个直径150mm的泄压孔,孔深8-10m,释放部分地应力;强化支护参数,将钢拱架间距从常规0.8m加密至0.6m,喷射C25纤维混凝土厚度从15cm增加至20cm,同时在钢拱架与岩壁间填充缓冲材料,吸收岩爆冲击能量;施工期间安排专人实时监测岩壁位移,当位移速率超过5mm/d时,立即停机采取加固措施。(3)突涌水风险集中在富水断层带与四间房河段,若处理不当易导致洞内积水、设备损坏。应对措施如下:在TBM主机后方设置3级集水坑,容积分别为

50m³、80m³、120m³, 配套3台90kW多级排水泵(2用1备), 总排水能力达600m³/h; 采用“防堵结合、限量引流”注浆方案, 先在突涌水点周边施工环形注浆孔, 注入超细水泥-水玻璃双液浆形成止水帷幕, 再预留1-2个引流孔控制涌水量, 避免一次性封堵导致水压骤升引发次生灾害, 确保洞内水位始终低于轨面0.5m以下^[4]。

3.2 设备风险与应对

(1) 主轴承故障是影响TBM连续掘进的关键设备风险, 故障原因多为润滑失效、磨损超标。应对措施包括: 建立主轴承润滑系统实时监测平台, 安装流量传感器与压力传感器, 当润滑脂流量低于2L/min或压力波动超过±0.2MPa时, 自动报警并停机检查; 制定严格的润滑脂更换周期, 每掘进500m更换一次专用润滑脂, 同时对换下的油液进行磨损颗粒分析, 通过检测铁、铜元素含量预判轴承磨损状态, 提前更换易损部件, 将主轴承故障间隔延长至3000h以上。(2) 刀具异常消耗主要发生在石英含量高的硬岩段(如混合花岗岩段, 饱和抗压强度达80MPa), 易导致刀圈崩裂、刀刃磨损过快。应对时优化刀具设计: 在硬岩段选用刀圈硬度为HRC58-60的耐磨滚刀(常规段为HRC55-58), 将刀刃宽度从20mm加厚至25mm, 增强抗磨损能力; 在刀盘边缘安装可拆卸式滚刀保护块, 减少岩体对刀具的直接冲击; 同时建立刀具磨损监测机制, 每掘进100m停机检查刀具状态, 对磨损量超过5mm的刀具及时更换, 将刀具消耗成本控制在每延米800元以内。

3.3 人为与组织风险

(1) 人员操作失误易引发设备损坏、施工安全事故, 尤其关键岗位人员技能水平至关重要。应对策略为: 实施关键岗位持证上岗制度, 主机操作手、喷混凝土工等岗位人员需通过理论考核与实操培训(累计培训时长不少于120学时), 考核合格后方可上岗; 每季度组织一次技能考核, 考核内容包括TBM参数调整、应

急故障处理等, 对考核不合格者暂停上岗, 重新培训直至合格; 定期开展安全技术交底, 针对不同地质段施工风险, 明确操作要点与应急处置流程。(2) 施工协调不畅易导致“掘进-支护-出渣”工序脱节, 影响施工效率。应对时建立平行作业机制: 在TBM掘进的同时, 同步开展后方二衬施工与渣料运输, 利用BIM模型构建三维施工进度模拟平台, 优化物料运输路径, 避免出渣皮带与衬砌台车相互干扰; 设立专职协调人员, 每日召开工序衔接会议, 实时解决施工中的资源冲突问题, 例如当掘进速度超过支护速度时, 及时调配备用支护设备, 确保支护作业滞后掘进面不超过50m, 将日均掘进效率稳定在15m以上。

4 结束语

本工程实践表明, 通过敞开式TBM选型适配复杂地质条件、构建“钻探-掘进-支护”协同作业体系、实施基于实时监测的动态参数调控, 并建立覆盖地质灾害与设备故障的多级风险预警机制, 可有效破解长距离输水隧洞施工难题。项目累计减少停机检修时间42%, 岩爆与突涌水事故发生率降低65%, 日均掘进效率达15m以上。研究结果为类似工程TBM施工提供了从设备选型到风险管控的全流程技术参考。

[参考文献]

- [1]董卫民.长距离输水隧洞施工中的关键问题及应对措施[J].建筑技术开发,2020,47(03):69-70.
- [2]魏香鸿.新疆长距离输水隧洞施工安全设施布置研究[J].西北水电,2023,(05):102-103.
- [3]苟三江.长距离输水隧洞施工中的关键问题及应对措施[J].四川水利,2023,44(05):75-77.
- [4]金雪红.长距离输水隧洞TBM掘进过程围岩稳定性探讨[J].黑龙江水利科技,2020,48(05):59-61.