

抽水蓄能电站引水隧洞掘进施工关键技术研究

罗宗佑

(湖南中南水电水利工程建设有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要 引水隧洞作为抽水蓄能电站的核心输水通道, 其掘进施工技术直接关系到工程进度与结构稳定性, 是确保项目高效推进的关键环节。本文以某抽水蓄能电站引水隧洞工程为案例, 针对复杂地质条件下断层破碎带、高外水压及岩爆等施工难题, 提出动态工法切换、精细化参数调控及多技术集成的综合解决方案, 以期为显著提升围岩稳定性、降低施工风险提供技术参考。

关键词 抽水蓄能电站; 引水隧洞; 钻爆法; TBM; 光面爆破

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.018

0 引言

抽水蓄能电站是建设的新型电力系统, 其是提高电网调峰能力的重要基础设施, 它对于现代电力事业发展有积极作用。水利工程抽水蓄能电站引水隧洞具备线路长、埋深大、断面变化复杂、坡度陡等缺点, 它是连接上下水库的核心通道, 所以, 施工难度普遍高于常规水利隧洞^[1]。而引水隧洞若建设在节理密集带、岩体破碎带、高外水压问题突出等区域容易存在风险问题, 需要落实工艺控制和风险管理以保证引水隧洞施工顺利开展。

1 工程概况

某抽水蓄能站总装机容量1 400 MW, 设计年发电量14亿kW·h。该水电站中引水系统采用单洞全长3.8 km的两条平行高压引水隧洞组合形成, 其最大埋深620 m, 断面开挖为净宽7.2 m、净高8.5 m的马蹄形。该隧洞开挖需要穿越流纹岩、凝灰岩等岩层条件, 并且存在多条F3、F5等区域性断层围岩, 包含Ⅱ~Ⅴ类围岩, 地质条件存在复杂多变性。由于该抽水蓄能在引水隧洞施工质量要求高、工期紧、风险大, 工程单位选择使用“TBM主洞段+钻爆法特殊洞段”联合掘进方案, 通过动态调控以及技术集成的方式保证引水隧洞高效施工完成。

2 工程地质特征与施工难点

本抽水蓄能站引水隧洞需要穿越华南褶皱系, 其岩体受多期构造运动影响存在节理裂隙发育明显的现象, 有些位置存在蚀变带、软弱夹层等特殊地质条件。通过对前期勘测结果和施工现场情况进行分析, 本引水隧洞施工中主要存在如下地质问题: 一是F3断层带宽度达18 m, 岩体呈现出碎裂、散体状形式, 结构稳

定性不足; 二是隧洞中段埋深达500 m以上, 测量后确定外水压力为3.2 MPa容易发生涌水风险; 三是有些洞段岩爆倾向较为明显, 地质微震事件发生率增高。上述地质条件作用下导致引水隧道掘进施工存在如下问题: 一是TBM断层带开挖作业存在刀具磨损加剧、卡机问题发生率升高的问题; 二是钻爆法在高地应力区段内施工容易造成掌子面失稳; 三是地应力过高区域爆破则引发燃爆现象而导致人员与设备事故。因此, 本次引水隧道施工时需落实地质勘察工作, 并且采取灵活工法切换、精细化爆破控制措施保证引水隧洞掘进作业顺利开展。

3 掘进施工总体方案

针对本次引水隧洞沿线地质条件较为恶劣的现象, 在现场施工中采取因地制宜、工法适配的基本原则, 将全长3.8 km隧洞分为如下三个施工段: 进口段0~1.2 km、出口段2.6~3.8 km的围岩状况相对较好, 所以, 在施工中选择敞开式TBM掘进方式; 中间1.4 km的隧洞结构需要穿越F3断层破碎带以及高外水压力区域, 由于其地质条件复杂性较高需要调整为钻爆法施工, 以保证特殊围岩条件施工效果合格。TBM应用直径8.03 m的硬岩敞开式钻机类型, 其能够满足快掘进、强支护、高通过性特性以满足现场施工需求。同时, 钻进作业环节设备中配置地质雷达、超前钻探微震监测系统, 能够及时发现地质异常情况并发出预警。而在钻爆发施工环节现场配置智能湿喷机械手、多功能凿岩台车、高效除尘设备、压抽混合的通风系统, 能够建设标准化、机械化、环保化作业体系保证围岩结构稳定性。

本项目施工作业阶段制定适宜组织计划方案, 按照“TBM先行、钻爆衔接、分段贯通”的动态化策略进

行现场施工。TBM 从进口和出口双向掘进施工，在临近 F3 断层影响带前部 100 m 左右位置主动停机，防止强行穿越高风险区导致安全事故的发生。而后，钻爆法作业人员从 TBM 停机位置和原设计断层段两端同步向中间掘进，能有效解决高水压、断层破碎带、岩爆等特殊地质条件的影响。在特殊路段施工结束且支护具备稳定性后，再次进行 TBM 掘进施工，将剩余短距离的隧洞掘进作业完成达到隧洞贯通效果。该方案能够充分发挥 TBM 在良好岩体中连续、高效的作业优势，保证工程质量、安全、工期都能达到要求。

4 水利工程抽水蓄能电站引水隧洞掘进施工技术应用

4.1 超前地质预报与围岩动态分类

本引水隧洞施工时构建“长一中一短”三级预警体系，具体如下：TBM 设备中安装有红外探水仪、地质雷达等设备，实现全部 30~50 m 扫描；钻爆法配置 TSP 203Plus 进行中距离 100 m 的地震波探测；掌子面前部 10 m 范围内利用超前水平钻进测量围岩完整性、含水性等。在勘测过程中每日进行数据分析并展开地质研判，以确定围岩类型^[2]。通过对围岩类型的分析确定适宜的支护技术参数以及掘进方式，如 F3 断层影响带，原设计方案为 IV 类围岩，通过超前钻孔发现岩芯采取率不足 30%，则将其调整为 V 类围岩，并进行加强支护。在该系统支护中将原锚杆间距从 1.5 m 减小到 1.0 m、喷射混凝土厚度从 15 cm 增加到 25 cm，并增加间距 0.8 m 的 I18 型钢支架（如表 1 所示）。

4.2 光面爆破参数优化

本隧道围岩钻爆法施工为保证开挖轮廓线精度、围岩稳定性合格，并且降低对周边 TBM 设备造成扰动影响。施工阶段采用光面爆破为核心的全断面一次爆破技术，并进行现场试验和分析确定适宜技术参数。通过多轮爆破试验最终确定本工程 III~IV 类围岩精细化爆破参数，如下：周边孔间距 45~50 cm、最小抵抗线设定 60 cm、不耦合系数 1.8，能够有效减轻孔壁冲击压力，以防围岩过度破碎。而在装药结构设计中使用导爆索串联、竹片固定、间隔不连续装药方式，能够保证爆轰能量有效传递，也防止局部装药量过大引发超挖问题^[3]。起爆时序按“掏槽孔→辅助孔→周

边孔→底板孔”顺序实施，孔间微差延时 25 ms，保证应力波有序传递以提高爆破效果。

本次引水隧洞施工中有些位置地应力较高容易发生燃爆风险，在常规爆破设计方案基础下采取应力释放措施。掌子面开挖前需要沿着设计轮廓线外侧布置应力释放孔，按照孔径 50 mm、孔深 3 m、间距 1.2 m 进行设置以防发生燃爆危险。爆破完成后测量确保开挖断面平均线性超挖量不超过 8.5 cm，隧道拱部和边墙轮廓平顺，未存在欠挖现象；周边孔半孔保存率达到 92%，远超过设计标准中 85%，能够保证光面爆破效果达到要求。同时，相邻 TPM 设备布置爆破震动监测点，测量质点峰值振动速度均在 2.5 cm/s 以下，能够保证设备振动处于安全阈值以内^[4]。

4.3 支护体系协同施工

引水隧洞支护施工按照紧跟开挖、及时封闭、动态调整的基本原则进行，本项目施工中按照“初喷—锚杆—钢架—复喷”四步协同法进行施工作业^[5]。引水隧洞开挖完成后立即初喷厚度 4~5 cm 的混凝土进行岩面封闭，能够防止出现围岩表面风化、松弛等现象。初喷混凝土完成后立即开展锚杆支护，并挂设双层钢筋网以提高围岩结构稳定性。针对 IV、V 类软弱围岩段需要间隔 0.8~1.0 m 安装 I20b 型钢钢架，钢架拱脚安装在稳定基岩或混凝土垫块上以保证承载力传输稳定。最后需要进行混凝土复喷作业，使其整体厚度达到 25~28 cm，进而形成密实、完整的围岩支护结构体系。该项目施工中采用智能湿喷机械手作业效率达 10 m³/h 以上，混凝土回弹率不超过 12% 以提高施工效率和支护结构强度。

由于本引水隧道需要穿越高水压富水地层极易存在渗流风险，在施工中采取“引排结合、注浆先行”的控制策略。在混凝土喷射层内安装直径 50 mm 的 PVC 环向排水管，按照纵向间隔 2 m 的圆周环向进行布置，能使围岩内部渗水汇集，并导入洞底中央排水沟内以防积聚引发喷层剥离。同时，掌子面前方 15 m 范围内使用水泥—水玻璃双液浆建设全断面帷幕，水灰比 1:1、体积比水泥墙：水玻璃 1:0.8 进行搅拌配制，且注浆压力 2.0 MPa 以保证浆液扩散半径超过 1.5 m 形成连续止水帷幕。注浆结束后掌子面上均涌水量从 120 m³

表 1 电站引水隧洞典型洞段围岩分类与支护参数调整

洞段桩号 (km)	原设计围岩类别	施工揭示围岩类别	支护调整内容
1.35~1.45	IV	V	增设型钢钢架，喷砼厚增至 25 cm，锚杆加密
1.80~1.90	III	III (高外水)	增设环向排水管，注浆止水帷幕
2.10~2.20	II	II (岩爆倾向)	优化爆破参数，增加应力释放孔

下降到 15 m^3 以提高围岩结构稳定性，保证作业面干燥、无明水且后续支护作业具备安全性。

4.4 施工通风与环境控制

本工程引水隧洞最大单向掘进长度为 1.9 km ，由于其和洞口距离较长，造成自然通风无法满足施工需求。为确保现场作业安全和人员健康，本项目在引水隧洞通风方案设计中采用“压入+抽出”的混合式通方案。在该通风方案中，洞口位置布置 2 台 110 kW 主风机并联运行，并且安装直径 1.8 m 的柔性风筒将新鲜空气传输到掌子面形成正压供风；同时，引水隧洞内部前方 950 m 处布置辅助抽出式风机，使隧洞内设备尾气、烟尘、粉尘等污浊空气排出洞以提高换风效率。而在风

筒设计中选择阻燃型、高强柔性以及抗静电材料，并选择双反边密封方式进行管道接头，再间隔 500 m 布置一段长 3 m 的刚性钢制过渡节，以避免通风系统传输时出现漏风现象，测量该系统的漏风率不超过 $8\%^{[6]}$ 。

本引水隧洞施工中，需要在掌子面后方 50 m 处安装固定式空气质量检测站。在隧洞施工阶段对氧气含量、一氧化碳、总粉尘浓度、甲烷等实现连续 24 h 检测，并将检测结果直接传输到指挥中心。根据监测结果显示作业区间内氧气含量 20.5% 以上、粉尘浓度不超过 $2 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，各项指标均符合国家标准规定。而在通风系统和施工方法优化中采取动态联动措施（如表 2 所示），即：TBM 掘进作业阶段设备占据洞内空间且产生集中，将其

表 2 施工阶段与通风模式联动策略

施工阶段	作业特点	通风模式	关键操作
TBM 掘进作业	设备占空间大，产生集中	单向压入式	风筒随刀盘同步迁移
初期支护作业	产生分散，作业范围广	压入+抽出混合式	主风机与辅助风机协同运行
仰拱填充作业	异味明显，通风需求稳定	压入+抽出混合式	保持风筒出风口距作业面 50 m 内
作业间歇期	无主动产生，需维持空气流通	单台主风机低速运行	定期监测洞内空气质量

自动切换为单向压入式通风模式，风筒随刀盘同步迁移以保证隧洞内部空气质量达到要求。

5 抽水蓄能电站引水隧洞掘进施工成效分析

5.1 围岩稳定性显著增强

抽水蓄能电站引水隧洞掘进施工过程中，通过采用前地质预报、动态围岩分类与分级支护等多项策略，使得引水隧洞在穿越断层破碎带、高外水压及高地应力等复杂地质段时，在一定范围内控制了围岩变形与松动范围。同时，在支护体系布设中，通过与开挖面及封闭结合，并且以初喷、锚杆、钢架与复喷协同作业，形成了连续、密实的支护结构，全面提升了围岩自稳能力。

5.2 施工组织高效有序

抽水蓄能电站引水隧洞掘进施工时，由于采用了“TBM 主洞段+钻爆法特殊洞段”的联合掘进施工方案，使得不同工法的技术优势得到体现，使得整体项目达到高效、安全、连续的施工组织目的。其中，在稳定岩体中快速推进中，TBM 钻爆法在复杂地段灵活应对，两者通过科学衔接与动态切换，避免设备强行穿越高风险区带来的卡机、停机风险现象的产生。另外在抽水蓄能电站引水隧洞掘进中，融合了通风、除尘、监测等辅助系统，全面的保障了长距离隧洞内良好的作业环境。

6 结束语

水利工程抽水蓄能电站引水隧洞掘进施工是保证工程稳定建设的关键，根据引水隧洞施工需求采取合

理划分施工区段、精准超前地质预报、动态优化爆破与支护参数、高效组织通风与排水设施，能够有效解决现场施工中水压力低、应力过高以及断层破碎带问题。TBM 与钻爆法协同能够保证引水隧洞施工质量、安全、工期达到要求，项目施工成本和综合效益处于合理范围内。本文选择实际工程案例展开分析，发现引水隧洞施工中采用 TBM 与钻爆法协同作用能够提高施工效果，确保引水隧洞建设效果达到要求以满足水利工程运营需求。

参考文献：

- [1] 吕建林. 水利小断面土质隧洞施工技术探讨 [J]. 珠江水运, 2020(15):49-50.
- [2] 周孝华. 隧道掘进施工突发岩爆施工技术研究 [J]. 低碳世界, 2024, 14(11):144-146.
- [3] 李舒适. 无压输水隧洞 TBM 掘进施工技术研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 07(08):24-26.
- [4] 姬二通, 刘莹. 秦岭山脉小断面长距离引水隧洞独头掘进施工技术 [J]. 地下水, 2024, 46(05):343-345.
- [5] 任小亮, 孙凯宇. 长距离引水隧洞 TBM 掘进及施工布置研究 [J]. 陕西水利, 2024(07):138-141, 145.
- [6] 李鹏伟. 大埋深长距离引水隧洞快速掘进技术研究 [J]. 能源技术与管理, 2022, 47(05):155-158.