

TBM引水隧洞超前地质预报方法研究与应用

李天恩 王琦 党云虎

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710000

摘要: TBM引水隧洞施工中,超前地质预报至关重要。本文阐述基础理论,包括施工与地质耦合关系、预报原理分类及技术难点。构建核心方法体系,涵盖地质分析、物探、超前钻探及施工参数辅助预报等方法。介绍应用关键技术,如预报流程标准化、数据处理精准化等。探讨智能化预报、新型探测技术研发及预报理论深化等发展方向。

关键词: TBM引水隧洞;超前地质预报;方法体系;应用技术;发展方向

引言: TBM引水隧洞施工面临复杂地质条件,地质不确定性给施工带来诸多风险,如塌方、突水等,严重影响施工安全与进度。超前地质预报能提前探明前方地质状况,为施工方案调整提供依据,降低施工风险。然而, TBM施工环境特殊,对预报技术提出更高要求。研究有效的超前地质预报方法与应用技术,对保障TBM引水隧洞施工顺利推进意义重大。

1 TBM引水隧洞超前地质预报基础理论

1.1 TBM施工与地质条件的耦合关系

TBM施工工法依托机械切削实现连续掘进,技术特性体现在高效性与自动化程度上,地质适应性则直接决定施工稳定性。硬岩地层中设备掘进速率稳定,一般可达到3-5米/小时,刀具损耗可控;软岩地层易出现掌子面变形,需针对性调整掘进参数^[1]。软弱夹层会降低围岩承载能力,导致TBM掘进振动加剧;破碎带易引发塌方,需提前加固支护;富水段可能造成掌子面突水,影响施工安全。这些不良地质体的工程地质响应,是预报工作的重点关注方向。超前地质预报核心目标是提前探明前方地质状况,为施工方案调整提供依据。地质参数需求涵盖围岩强度、完整性、含水性等,精准获取这些参数能有效降低施工风险。

1.2 超前地质预报的基本原理与分类

超前地质预报基本原理建立在地质信息的探测、传递与解析之上。通过各类技术手段捕捉地下地质体物理力学差异,将获取的信号转化为可解读信息,最终形成地质判断。按探测距离分类,长距离预报以千米级为范围,通常为1-3千米,为施工规划提供宏观依据;中距离预报覆盖数百米,一般在300-800米,衔接长距离结果与现场施工;短距离预报聚焦数十米范围,大约在10-50米,直接指导掌子面作业,三类预报需形成完整衔接体系。按技术属性分类,物探法借助物理场差异实现无损探测,效率较高;地质分析法通过地表地质调查与已有

资料推演,成本较低;超前钻探法能获得实体岩芯,结果最为可靠,三种方法各有核心特征,需结合使用。

1.3 TBM引水隧洞预报的技术难点

复杂地质条件下,不同地质体的信号相互叠加,形成强烈干扰,增加有效信号识别难度,需优化数据处理算法提升分辨能力。TBM施工现场空间狭窄、振动剧烈,对预报设备的体积、抗干扰能力提出严格限制,设备需进行专项适配改造才能稳定工作。预报精度提升往往需要延长探测时间,可能影响施工进度;过度追求效率又会导致预报精度下降。如何在两者之间找到平衡点,成为现场施工的关键问题。

2 TBM引水隧洞超前地质预报核心方法体系

2.1 地质分析法

区域地质资料整合与分析需系统梳理地层岩性分布规律,明确地质构造发育特征,掌握水文地质背景情况。这些基础资料是预报工作的重要依据,能为后续探测提供宏观方向。掌子面地质编录强调实时性,通过直观观察完成岩性识别,记录结构面产状和密集程度,留意岩体表面湿润情况判断含水性。实时研判结果可快速反馈至施工环节,指导临时调整。

地质编录与超前预报形成联动,编录数据验证预报结论,预报结果又指引编录重点,通过双向印证提升地质判断准确性。

2.2 物探预报方法

长距离物探中,隧道地震波法通过激发地震波获取地质体反射信号,探测参数需匹配隧洞尺寸设计,数据处理重点聚焦波速变化与反射界面识别。面波法适合浅表地质勘察,技术优势体现在对软岩分层敏感,数据解译围绕波速差异展开。长距离方法分辨率随距离降低,适用边界多限定在千米级范围。中短距离物探里,地质雷达法利用高频电磁波探测,天线选型需结合探测深度,探测深度一般在10-50米,数据采集时需避开金属设

备干扰。瞬变电磁法针对富水区域,通过电磁场变化定位水体,参数优化侧重提升信号穿透力。声波反射法设备需适配TBM施工空间,数据处理核心是识别声波反射异常。物探方法组合需发挥各自优势,比如长距离与中短距离方法衔接覆盖探测盲区。选型需依据地质条件,富水段优先选用瞬变电磁法,破碎带则结合地质雷达与声波反射法。

2.3 超前钻探法

常规超前钻探需科学规划钻孔布置,沿掌子面呈扇形均匀分布,根据隧道断面尺寸与地质复杂程度确定钻孔数量和角度,确保探测范围全面覆盖掌子面前方关键区域。施工中采用双管单动取芯技术,搭配金刚石钻头提升岩芯采取率,通过观察岩芯完整度、矿物成分、胶结状态及层理结构提取精准地质信息,实时记录钻孔内水位动态变化、涌水流量及水压数据,为富水性评价提供直接依据^[2]。定向钻探借助高精度导向设备实现钻孔轨迹可控,有效避开TBM机身及内部构件障碍,大幅扩大探测深度与横向覆盖范围,在地质异常体定位方面精度显著优于常规钻探,能精准锁定破碎带边界、软弱夹层分布及富水点具体位置。实际应用中需将钻探数据与物探结果进行交叉验证,通过岩芯实际地质情况校准物探解译过程中可能出现的偏差,结合区域地质背景资料综合分析,形成多源数据相互支撑、可信度更高的地质预报结论。

2.4 TBM施工参数辅助预报方法

TBM施工参数辅助预报方法依托设备自带的实时监测系统,实现掘进过程中各类关键参数的连续采集与动态跟踪,参数分析聚焦推力、扭矩、转速、掘进速度、刀盘压力及推进油缸行程等核心指标。不同地质条件下参数呈现明显差异化特征,硬岩地层中岩石强度高、完整性好,掘进表现为速度快而推力、扭矩较小且波动平稳;软岩或破碎地层中岩石承载能力弱,易出现掌子面坍塌或围岩变形,对应参数特征为推力骤增、掘进速度显著下降,扭矩波动增大且稳定性变差,这些参数变化直接反映围岩地质条件的实时差异。构建响应模型需结合项目历史施工数据,按岩性类型、围岩分级分类统计各参数正常波动范围,通过数据拟合与回归分析建立参数与围岩特性指标的量化关联。辅助预报需明确各参数预警阈值,通过大数据分析机器学习算法确定不同地质条件下各参数合理区间,监测数值超出正常范围且持续一定时间时自动触发异常预警,为地质判断提供补充依据,与其他预报方法配合可提升地质预报的全面性与准确性。

3 TBM引水隧洞超前地质预报的应用关键技术

3.1 预报流程的标准化构建

施工前地质背景梳理与预报方案设计是基础环节。需系统整合区域地质勘察报告、钻孔资料等基础信息,明确隧洞沿线地层岩性、构造分布等核心特征。结合TBM掘进特性与施工进度计划,划分预报单元,一般每200-500米划分一个预报单元,确定不同区段的探测方法与实施节奏,形成针对性强的预报方案,为后续工作提供清晰指引。施工中多方法协同探测与数据实时采集强调动态联动。根据施工进度同步开展地质雷达、地震波法等多手段探测,确保探测范围全面覆盖掘进前方关键区域。依托专用采集终端实现各类探测信息与TBM运行状态的同步记录,避免信息缺失或滞后,为后续分析提供完整依据。数据整合分析与地质结论输出流程需规范高效。建立固定的分析框架,对各类信息进行分类处理与交叉验证,结合地质背景提炼关键特征。地质结论需明确不良地质体的位置、规模及可能引发的施工风险,以简洁直观的形式传递至施工一线,保障决策及时高效。

3.2 数据处理与解释的精准化技术

多源信息的归一化处理是提升判断精度的前提。不同探测方法输出的信息形式存在差异,需通过标准化处理消除干扰。将各类探测结果转换为统一评价体系,实现信息间的有效对比与融合,为综合分析奠定坚实基础。地质异常的识别标志与判定标准需明确具体。针对断层破碎带、富水段等常见异常情况,总结反射波突变、波速异常等典型识别特征,建立清晰的判定依据。通过明确的预警标准,提升异常识别的客观性与准确性。预报偏差的来源分析与控制措施需靶向发力。偏差可能源于设备精度、探测环境干扰等因素,需定期对探测设备进行校准,一般每1-2周校准一次,优化采集设置。采用多次探测比对、不同方法交叉验证等方式,减少偏差影响,提升预报结果的可信度。

3.3 预报成果的转化应用机制

地质预报成果的表达形式与核心内容需贴合施工需求。采用图表结合的方式,突出不良地质体空间位置、规模等核心信息,附带简明风险评估说明。避免专业术语堆砌,用通俗表述确保施工人员快速抓取关键内容。基于预报成果的TBM施工参数调整逻辑需科学严谨。若探测发现硬岩段,需提前调大TBM刀盘推力与转速;遇软弱地层则降低掘进速度,加大支护力度。建立预报结果与施工参数的对应准则,实现参数调整的快速响应。预报信息与施工组织的协同传递流程需高效畅通。建立定时通报机制,通过施工调度系统将预报信息同步至技

术、掘进等各班组。针对紧急地质风险,启动即时预警流程,确保信息快速传递,为施工组织调整预留充足时间,实现预报与施工的无缝衔接。

4 TBM引水隧洞超前地质预报技术发展方向

4.1 智能化预报技术探索

人工智能在数据解译领域的应用不断深化。模式识别技术能够快速捕捉地质数据中的特征规律,对岩性变化、裂隙发育等关键信息实现精准匹配^[3]。深度学习模型通过大量历史地质数据训练,可自动优化解译参数,有效提升复杂数据的处理效率。面对TBM施工中产生的海量实时数据,这类技术能突破传统人工解译的局限,缩短数据处理周期,为施工决策提供及时支撑。物联网技术与地质探测设备的融合成为重要趋势。通过在探测设备上集成各类传感器,实现设备运行状态、地质探测数据的实时采集与传输。数据通过无线通信网络汇聚至中央处理平台,形成从探测到分析的闭环链路。这种融合方式打破设备间的数据壁垒,让地质探测更具连续性,为远程监控和智能调度创造条件,提升预报工作的整体协同效率。

4.2 新型探测技术研发与应用前景

高精度、抗干扰物探设备的研发聚焦实际施工痛点。针对隧洞内部电磁环境复杂、信号易受干扰的问题,研发方向集中在优化传感器灵敏度和信号处理算法上。采用新型复合材料制作探头,增强设备对微弱地质信号的捕捉能力;通过自适应滤波技术过滤施工干扰信号,确保探测数据的真实性。这类设备能在复杂施工环境中稳定工作,为地质判断提供可靠数据基础。TBM一体化探测系统的构建强调与施工流程的深度融合。将探测模块集成到TBM机身,实现掘进与探测同步进行。系统通过预设程序自动完成探测点位布置、数据采集等操作,无需中断施工流程。探测数据与TBM掘进参数实时联动,当探测到不良地质时,系统可快速反馈至掘进控

制系统,为施工参数调整提供依据,提升施工安全性与效率。

4.3 预报理论与方法的深化研究

复杂地质条件下的预报理论创新注重实际问题导向。针对岩溶发育区、破碎带等复杂地质场景,传统理论难以精准描述地质体特征,新理论研究结合地质力学与工程地质学成果,建立更贴合实际的地质模型。通过分析地质体应力分布与变形规律,提升对不良地质体空间位置和规模的预判精度,为风险防控提供理论支撑。

多方法融合的预报模型优化聚焦提升预报可靠性。单一探测方法存在局限性,模型优化通过整合地震波法、地质雷达法等多种技术优势,建立数据融合算法。不同方法探测数据相互验证、补充,减少单一数据偏差带来的影响。优化后的模型能综合各类信息,输出更全面的地质预报结果,为TBM引水隧洞施工提供更可靠的地质参考。

结束语

TBM引水隧洞超前地质预报对保障施工安全与效率意义重大。通过构建核心方法体系、明确应用关键技术,可提升预报的准确性与可靠性。智能化预报技术探索、新型探测技术研发及预报理论深化研究等发展方向,将进一步推动预报技术进步,为TBM引水隧洞施工提供更有力的地质保障,助力工程顺利推进。

参考文献

- [1]张学军,胡军,张泽甫,等.深埋特长隧洞TBM施工超前地质预报关键技术研究[J].铁道勘察,2023,49(3):48-55.
- [2]李吉艳.某TBM引水隧洞工程不良地质条件分析与应对措施[J].云南水力发电,2023,39(7):186-190.
- [3]赵东波,姚琦发,李鹏宇,等.复杂地质富水条件下TBM施工隧洞综合超前预报体系实践[J].水利水电技术(中英文),2023,54(6):124-136.