

# 深埋长隧洞TBM施工超前预报综合技术应用

李玉光

新疆水发建设集团有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 地下隧洞工程由于初期地质勘探的局限性和地质环境的复杂性, 在施工中地质条件难以准确预测, 因此在开挖阶段, 超前的地质预报就成为关键环节。以深埋长隧洞敞开式 TBM 施工为背景, 提出集 TRT 长距离预报、超前钻探和孔内成像为一体的一体化预测系统。通过多源数据协同分析, 对前方不良地质体分布特征进行定位, 对涌水、突泥、坍塌等风险进行预测, 可避免因使用单一预报方法出现探测不准确性, 保障施工安全。研究成果在深埋长隧洞条件下敞开式 TBM 施工、支护、方案的优化等提供参考依据, 可为类似施工提供参考。

**关键词:** 大埋深; 长距离; 超前钻探; TRT 探测

## Application of Comprehensive Advanced Prediction Technology in TBM Construction for Deeply Buried Long-Tunnel Projects

Li Yuguang

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

**Abstract:** Due to the limitations of the initial geological exploration and the complexity of the geological environment, it is difficult to accurately predict the geological conditions in the construction of underground tunnel engineering, so in the excavation stage, the advanced geological prediction has become the key link. Based on the open TBM Construction of deep buried long tunnels, an integrated prediction system integrating TRT long-distance prediction, advanced drilling and borehole imaging is proposed. Through the collaborative analysis of multi-source data, the distribution characteristics of adverse geological bodies in front are positioned, and the risks of water gushing, mud bursting, collapse and so on are predicted, which can avoid the inaccuracy of detection due to the use of a single prediction method, and ensure the construction safety. The research results provide reference for the construction, support and scheme optimization of open type TBM under the condition of deep buried long tunnel, and can provide reference for similar construction.

**Keywords:** Large burial depth; Long distance; Advanced drilling; TRT detection

## 0 引言

随着我国地下工程建设向深部发展, 深埋长隧洞由于具有高效、环保的特点, 在水利、交通等领域得到了越来越广泛的应用, 敞开式 TBM 作为核心施工设备, 掘进效率和施工安全很大程度上取决于前方地质条件的准确把握。但是深埋环境地质构造复杂、断层破碎带发育、地下水分布不均, 单一超前预报方法容易出现探测盲区、精度不够等问题, 难以满足 TBM 安全高效掘进的要求。因此研发并应用多方法融合的综合超前地质预报技术, 实现不良地质的精准预判和风险预警, 成为解决深埋长隧洞 TBM 施工地质难题、保证工程顺利推进的关键, 对提高地下工程施工智能化水平有重大现实意义。

## 1 深埋长隧洞敞开式 TBM 施工特性

深埋长隧洞敞开式 TBM 施工具有掘进效率高、适应性强的特点, 可以大幅缩短深埋长隧洞施工工期, 但是施工特性受埋深、地质条件影响较大, 施工难度和风险较高。

该类施工大多处在千米级深埋环境中, 地应力集中现象十分明显, 极易引发岩爆、围岩大变形等突发性地质灾害, 严重影响施工进度, 危及人员和设备安全; 敞开式结构没有护盾全封闭防护, 掌子面暴露面积大, 受力稳定性差, 遇到断层破碎带、富水段等复杂地质区域时, 突泥、涌水、塌方的风险大大增加, 容易造成 TBM 卡机、设备损坏等严重施工事故。施工沿线地质条件复杂多变, 强蚀变岩段、裂隙密集带分布广, 对 TBM 刀盘磨损、掘进参数调整要求高, 单一施工模式难以适应复杂的地质情况, 必须依靠准确的超前地质预报技术, 动态调整施工方案和支护措施, 才能避免施工风险, 保证 TBM 高效、安全掘进, 最大限度地减少不良地质对施工的不利影响<sup>[1]</sup>。

## 2 地质特性

隧洞位于复杂东西向构造带中, 断层发育。F7 断层为区域性大断裂, 断层破碎带及影响带宽度约 400m。另有 F41、F30 等多条断层。断层以压、压扭性为主, 走向多

为近 E-W 向、NNW 向和 NW 向，其次为 NE 向，倾角一般较陡。隧洞富水部位主要分布在断层破碎带和影响带、裂隙密集带、灰岩段、向斜核部以及不同地层不整合接触带等，特别是 F7 大断裂附近水头高且岩体破碎或泥化，具备产生高压水、大流量突水和突泥的地质条件；志留系 (S3b) 中分布的变质泥岩段具备发生中等~严重的挤压大变形的地质条件。断层破碎带、强蚀变岩带、地层不整合接触带等 IV - V 类围岩洞段变形问题较为突出，特别是 F7 等大断层带容易发生围岩大变形；沿线分布多种硬脆性岩石，大部分相对完整围岩洞段具有轻微岩爆条件，部分洞段岩体完整洞段具备中等岩爆地质条件，局部洞段具备强烈岩爆的地质条件；断层破碎带、影响带、不整合接触带、侵入接触带、岩体蚀变破碎带、节理裂隙密集带和 IV、V 类围岩洞段，以及存在不利结构面组合的洞段，存在发生塌方的可能性<sup>[2]</sup>。

### 3 综合超前地质预报的原理

TRT 隧道超前预测本质是一种地震反射探测，可用于断层发育与分布、破碎带发育与分布、基岩风化程度评价、岩体软弱层位探测、岩体裂隙发育程度评价、岩溶、富水带、煤层等多种危害性地质的探测（如图 1）。

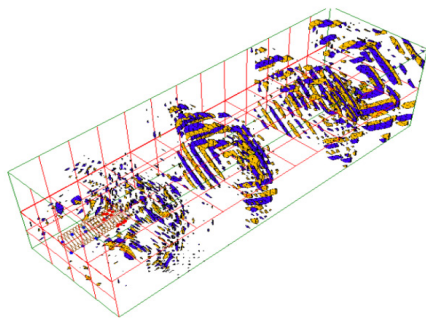


图1 TRT成果三维成果图

超前钻探是通过在护盾尾部主梁右侧搭设临时作业平台，安装一台 MG-30 管棚钻机，如图 2 所示。探孔孔径为  $\phi 108\text{mm}$ ，单根钻杆长度为 1.5m。探孔位置位于顶护盾护盾接缝处（约 2 点半方向），外倾角约  $6^\circ$ ，如图 3 所示。根据钻进速度、返水颜色、岩渣、出水等情况，结合孔内成像结果，如图 4 所示，判断掌面前方地质特征。



图2 钻机布置图

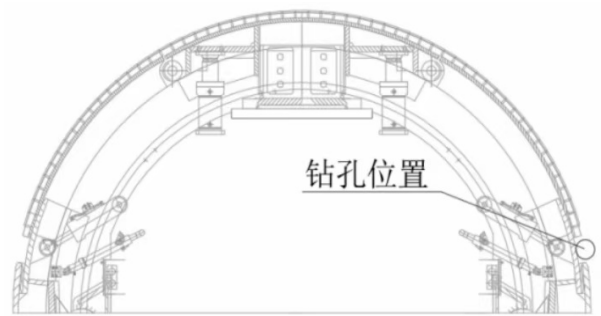


图3 超前钻探孔位置布置图

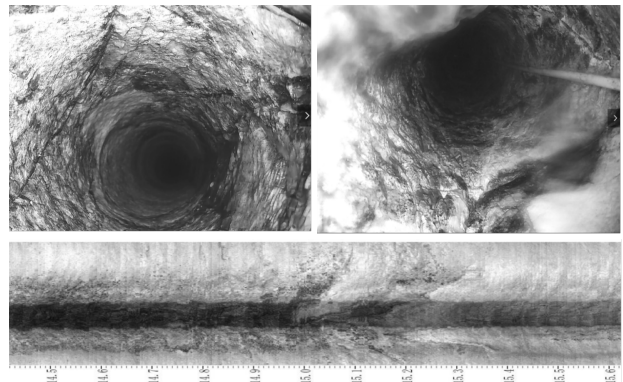


图4 孔内成像图

## 4 综合超前地质预报的应用

### 4.1 正常掘进的应用

TRT 探测成果综合分析预测桩号 30+576~30+424 段，总长度 152m，探测显示该段岩体相对纵波波速范围在 5614m/s~6982m/s 之间，波速分布较均匀，表明岩体整体完整性较好。结合波速特征及探测数据判断，该段岩性整体较完整，无大规模破碎区域，但局部存在岩体破碎的可能性；节理裂隙呈现局部较发育的特点，部分区域因岩体完整性不足，出现局部掉块现象。地下水状态以干燥为主，仅局部区域存在少量渗漏，无明显涌水迹象；围岩地质条件与护盾后方已揭露地质情况基本相似，局部区域因裂隙发育、岩体破碎导致地质条件较差，综合判断该段围岩类别主要推测为 II、III 类，需针对局部较差区域做好基础防护<sup>[3]</sup>。

桩号 30+517.5~30+435.5 段，用超前钻探和孔内成像技术相结合的方式，准确揭露了该段地质情况，岩性主要为泥盆系大理岩，岩体整体完整性好，结构致密，局部有岩体破碎现象，无大规模破碎带，岩体稳定性整体可控。综合研判该段水文地质条件相对稳定，发生突涌水的可能性很小，但是由于局部节理裂隙发育，岩体渗透性略有增加，不排除局部股状涌水的可能，根据岩体完整性、岩性特征等综合判断该段围岩类别以 II、III 类为主。30+451.0~30+400.3 段开挖后，岩性仍以泥盆系大理岩为

主, 围岩整体较为完整, 局部有破碎, 出水情况存在明显的分段差异, 30+451.0~30+421.0段出水量小, 没有明显的涌水现象, 30+421~30+400.7段由于裂隙导通地下水而出现股状出水, 部分地方存在涌水隐患, 综合判定该段围岩类别为Ⅱ类。

实际开挖桩号 30+581~30+424段围岩以块状结构为主, 岩性主要为二长花岗岩和大理岩, 岩体完整性较好, 节理裂隙发育程度较轻, 无明显大规模破碎现象, 仅局部存在少量细微裂隙, 整体稳定性良好。地下水分布呈现明显分段差异: 桩号 30+581~30+536段以干燥为主, 仅局部有少量滴水, 无明显渗水痕迹; 桩号 30+536~30+451段以潮湿~滴水为主, 局部出现线状滴水, 未出现涌水、突水等异常现象, 水文地质条件稳定。该段围岩类别明确判定为Ⅱ类, 存在轻微至中度岩爆危险, 需针对性采取防护措施。综合超前预报结果与现场实际揭露的岩性、地下水、围岩类别及岩爆风险等情况高度一致, 充分验证了综合超前预报技术的精准性和可靠性。

#### 4.2 脱困时的应用

TBM掘进至桩号 30+849.4, 埋深约 1296m 时刀盘与护盾上部发生强烈岩爆, 后续脱困处理过程 TBM 掘进至桩号 30+806 时再次发生强烈岩爆引起隧洞出现塌方、突泥、涌水等现象发生, 造成 TBM 卡机。通过提前预处理等手段脱困, 最终 TBM 恢复掘进。

TRT 探测成果综合分析预测桩号 K30+849~K30+679 段围岩总体完整性差, 局部较完整; 围岩节理裂隙从不发育过渡到发育阶段, 局部会发生塌腔掉块现象; 地下水状态以渗水为主, 局部出现现状流水; 此段未发现断层破碎带迹象。

超前钻探结合孔内成像揭露的地质情况桩号 30+806~30+800 洞段围岩岩性以二长花岗岩为主, 属软~中硬岩; 岩体破碎~较破碎; 该段围岩岩面以滴水为主, 部分洞段可能出现股状涌水, 围岩类别Ⅳ~Ⅴ类为主。桩号 30+800~30+756 洞段岩性以二长花岗岩为主, 属中硬岩~坚硬岩; 岩体较完整, 该段围岩岩面以滴水为主, 部分洞段可能出现股状涌水, 围岩以Ⅲ类为主。桩

号 30+756~30+731 洞段岩性以二长花岗岩为主, 属坚硬岩, 岩体整体较完整, 局部完整性差, 该段围岩岩面以潮湿~渗滴水为主, 部分洞段可能存在股状涌水, 围岩Ⅲ类为主, 局部Ⅳ类。桩号 30+731~30+690 围岩岩性以二长花岗岩为主, 局部存在大理岩捕虏体, 返渣颜色为红白色, 岩体比较完整。该段围岩岩面以干燥~渗水为主, 桩号 30+716~30+703.5 段岩面以滴水~线状流水为主, 局部可能出现股状涌水; 隧洞围岩Ⅲ类, 局部Ⅳ~Ⅴ类。

实际揭露围岩桩号 30+849~30+679 段地层岩性为华里西中期二长花岗岩浅二长花岗岩, 以浅肉色为主, 部分围岩体现会出现强蚀变迹象, 岩体以次块状结构为主; 岩体局部完整性差。护盾上方及左壁围岩以轻微蚀变为主, 存在中等蚀变, 节理裂隙轻度发育。隧洞出水以潮湿为主, 部分洞段会出现线状流水。隧洞围岩Ⅲ类, 局部Ⅳ~Ⅴ类。预测结果与现场揭露一致。

通过采用综合超前地质预报, 可以很快地指导现场调整脱困方案和施工工艺流程, 较计划提前 60 天实现 TBM 脱困。

#### 5 结语

高埋深、长距离隧洞的地质勘探需突破常规的局限性。以地质分析为核心, 结合 TRT 物探和超前钻探验证的综合预报系统, 对不良地质体特征进行精确识别, 为 TBM 安全掘进提供决策依据。该技术在降低建筑施工风险和优化资源配置方面具有显著的工程价值。

#### 参考文献:

- [1] 邹亮, 邓树密, 周菊兰. TRT 在水工隧道超前地质预报中的应用与分析[J]. 四川水利, 2023, 44(S1):9-11+23.
- [2] 周黎明, 邱东明, 付代光等. TSP 隧道超前地质预报技术及其 3D 成果研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(10): 72-78.
- [3] 张涵. 综合物探法在新疆某引水隧洞超前地质预报中的应用[J]. 红水河, 2023, 42(06):118-122.

作者简介: 李玉光(1997.09-), 男, 汉族, 山东齐河人, 中级工程师, 本科, 研究方向: 水利工程管理工作。