

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.01.022

综合超前地质预报技术在TBM法 超特长隧洞的应用

——以北疆供水二期工程为例

白亮

(中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 文章依托北疆供水二期工程某标段工程,采用地质分析法、地震波物探法和激发极化探水法相结合的超前地质预报技术,对超特长隧洞地质多变地段进行了综合性、连续性超前预报,得到了较好的预报结果,其中对围岩性状的探测准确率可达80%以上,对地下水的探测准确率可达70%以上,形成了较为完善的超前预报及支护作业的掘进施工体系。另外,还将超前预报技术与施工工序紧密结合,纳入常规施工工序进行管理,有效避免了不良地质引发的坍塌、卡机等灾害损失,大大提升了TBM掘进施工效率,对TBM在类似工程中安全快速掘进提供一定的借鉴。

关键词: 引水隧洞;TBM;超前地质预报;地质分析;激发极化;地震波探测

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)01-0128-07

Application of Comprehensive Advanced Geological Prediction in TBM Super Extra Long Tunnel

—— The Case of the Second Phase of Beijiang Water Supply Project

BAI Liang

(China Railway Tunnel Stock Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450001, China)

Abstract: Based on a project of the second phase of Beijiang Water Supply Project, this paper adopts advanced geological prediction technology which combines geological analysis, seismic wave geophysical exploration and induced polarization water exploration to carry out comprehensive and continuous prediction of the super-extra-long tunnel geological variable section. In which the detection accuracy of the surrounding rock traits can reach more than 80%, and the detection accuracy of groundwater could be more than 70%, which could be a relatively complete advanced construction system for advance prediction and support operations. In addition, the advanced forecasting technology and the construction process are closely combined, and the order is incorporated into the conventional construction process for management, which could effectively avoid the collapse when the geological conditions are unfavourable, reduce the loss of the mechanical breakdown and other problems, and greatly improve the construction efficiency of the TBM tunneling. This paper could provide some reference for the safe and rapid tunneling of TBM in similar projects.

Keywords: diversion tunnel; TBM; advanced geological prediction; geological analysis; induced polarization; seismic wave detection

目前,世界各国已经在交通运输、水利水电及城市排污等领域建成多条长度超过10 km的长大隧

道。而随着隧道施工技术的不断发展,超长、特长隧道等超级隧道工程也不断涌现。由于TBM的安全、

收稿日期:2019-10-11

修稿日期:2019-11-09

基金项目:中铁隧道局集团科技创新计划(隧研合2019-20);中铁隧道局集团科技创新计划(隧研合2018-06);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(2019-重大-10)

作者简介:白亮(1982-),男,吉林白城人,工程师,主要从事隧道工程施工技术管理工作。E-mail:yghxsgz3@163.com

高效、环保等特点^[1],其已被广泛用于超长、特长隧道工程的施工^[2-3]。如已建成的吉林省中部城市引松供水工程^[4]、新疆土库铁路二线中天山隧洞^[5],以及正在建设中的山西中部引黄工程^[6],陕西省引汉济渭工程^[7]等。

与此同时,随着各超级隧道工程的陆续开工建设,为了缩短工期,加大建设力度,TBM 施工也已由 1 台 TBM 独头施工或者两台 TBM 相向施工向多台 TBM 交接施工转变^[8]。同时,单台 TBM 的独头掘进距离也不断增长,甚至出现了独头掘进 20 km 以上的超特长隧道。在 TBM 长距离掘进施工过程中,其掘进路线上的地层岩性、地质构造以及水文地质条件常呈现出多变的特点,极易遇到断层破碎带、蚀变带、岩溶等不良地质。而 TBM 对不良地质的适应性较差,当在此条件下掘进时,施工效率将直线下降,影响 TBM 掘进的安全与进度,甚至会出现突涌水、塌方、卡机等灾害,严重时更会造成机械损毁、设备报废、威胁人员生命安全,并造成巨额经济损失。

为有效掌握隧道掌子面前方的工程地质与水文地质状况,减少不良地质对 TBM 施工造成的影响和损失,国内外学者在超前地质预报技术方面展开了大量的科学研究及工程实践工作^[9-10]。目前国内的超前地质预报方法主要分为地质分析法和地球物理方法。地质分析法主要包括超前导洞、超前钻探、地质调查等。超前导洞和超前钻探方法可以对判断掌子面围岩状况进行较为准确的判断,但其施工效率低、成本高,除在极端特殊地层外,应用较少;地质调查法主要包括地表补充地质调查、隧洞内地质素描和地质编录^[11]等,通过地质分析、地质作图、地质类比和趋势分析等可对掌子面前方的地质情况进行推断和预测,但其精度及预测范围相对较低。地球物理方法主要包括地震波法、电磁类法、电法和红外线法等^[12],可以对掌子面前方的工程和水文地质条件进行较为准确的预报,且操作便捷、探测精度较高,已广泛应用于各类下地工程施工中^[13]。随着 TBM 的广泛使用,超前地质预报技术也同时应用到 TBM 掘进施工中,但因受到 TBM 施工的空间及环境限制,对超前预报技术与设备的定量化、简单化、快速化、自动化、集成化、可视化等方面均提出了更高的要求^[14]。总的来说,由于 TBM 施工隧洞的复杂探测环境,目前 TBM 施工隧洞可用的超前地质预报方法以地质分析法、地震波法和电阻率法为主。李术才等^[15]在此基础上,提出了适用于 TBM 隧洞施工期的综合超前地质预报技术体系,并以吉林省中部城市引松供水工程为例,对 TBM 施工隧洞掌子

面前方的溶洞、断层破碎带等不良地质进行了准确的预报。杨继华等^[16]以厄瓜多尔 CCS 水电站引水隧洞双护盾 TBM 施工为例,提出以地质分析为基础,物探与钻探相结合的适合双护盾 TBM 的综合超前地质预报方法,并对预报效果进行了评价。尽管如此,综合地质预报技术在 TBM 上的应用仍处于初级阶段^[14],且在以往类似工程的综合地质预报技术上也多应用于已出现或已预判出的不良地质情况,并且连续预报的长度均较短,同时也没有将地质预报技术纳入至常规的施工工序。对于超特长隧道来说,隧道地质条件大部分较为复杂,且变化频繁,软岩、硬岩、破碎围岩、突涌水等交替变化,这就对地质预报技术提出了新的要求。

本文所依托的北疆供水二期工程某标段工程,为应对复杂多变的地质条件,采用地质分析法、激发极化法和地震法相结合的超前地质预报体系,并将地质预报工作纳入常规施工工序,对地质条件复杂段进行超前预报。根据预报结果配合 TBM 掘进施工,为各工序的灵活转换提供了有力支持,为 TBM 在地质条件复杂多变的超特长隧道中安全、高效掘进奠定了基础。

1 工程概况

本工程为北疆供水二期工程某标段,主隧洞全长 43 847 m,设计纵坡 1/2583。其中采用钻爆法施工的洞段长 2 732 m,采用 TBM 法施工的洞段长 41 115 m。TBM 掘进段采用两台不同品牌(一台由中铁装备生产制造,一台由铁建重工生产制造)的国产 TBM 施工,最长独头掘进距离为 17.5 km。隧洞开挖断面为圆形,开挖直径为 7.0 m。根据地质勘探资料,TBM 掘进段围岩主要为泥盆系中统蕴都卡拉组(D₂ya)凝灰质砂岩、凝灰岩;泥盆系中统江孜尔库都克组凝灰岩夹凝灰角砾岩;华力西期紫红-肉红色碱性、钾质花岗岩,围岩类别以 II 类为主。区域内地表水贫乏,主要受冰雪融水和大气降水补给,蒸发量远大于降水量,地下不发育,矿化度较高。本工程范围内 50 年超越概率 10% 中硬场地地震动峰值加速度位于 0.15 g 区域,对应的地震基本烈度为 VII 级。

本工程两台 TBM 均通过一条支洞运输到组装洞,进行组装、步进并始发;两台 TBM 通过同一个组装洞反向掘进,过程中的材料、人员、机械设备的运输也全部通过同一个组装洞完成,这就对组装洞的结构布置形式提出了新的要求。

2 综合超前地质预报技术

2.1 TBM 施工隧洞超前地质预报方法的适用性

本文所依托的北疆供水工程隧洞单洞长度超过 17 km,且隧洞穿越地层变化频繁,围岩在软岩、硬岩、破碎带交替变化,严重影响了 TBM 安全高效掘进,因此必须要进行超前地质预报工作,且需对掌子面前方地质条件进行连续预报。另外,为了保障 TBM 高效快掘进,还要保证各工序之间衔接紧密,即需将超前地质预报纳入到 TBM 常规施工工序中。基于上述两方面原因,需选用预测精度高、操作便捷的超前地质预报方法,结合各类地质预报法的特点,选用了地质分析法、激发极化法和地震法相结合的综合地质预报法^[15],如图 1 所示。

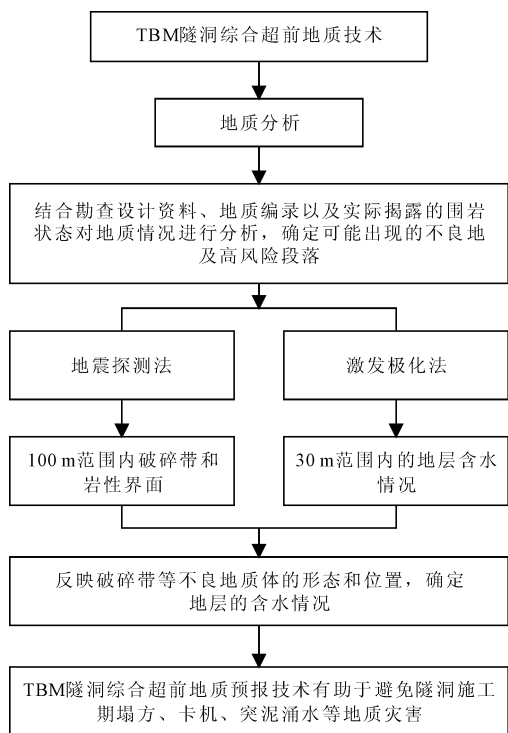


图 1 综合超前地质预报技术

2.2 地质分析法

地质分析法是隧道超前地质预报最基本的方法,包括工程地质调查法、超前导洞法和超前水平钻探法等。工程地质调查法是通过地表和隧道内的地质调查与分析,推断前方的地质情况。在隧道埋深较浅、构造不太复杂的情况下具有很高的准确性,但在复杂地质条件下的预报结果精度难以保证。超前导洞法在隧道施工预报中也经常用到,可较全面的揭露正洞前方的地质情况,但耗时较长,经济代价较高。超前水平钻孔法与超前导洞坑法的原理基本相

同,是用钻探设备向掌子面前方钻探,直接露隧道掌子面前方的地质情况,是最直接有效的超前地质预报方法之一,但仅为一孔之见,常存在不良地质体的漏报漏探情况。

2.3 激发极化法

激发极化探测方法是电法勘探的一个重要分支,以围岩和含水地质构造的电性参数差异为物理基础。通过在掌子面布置一定数量的电极,如图 2 所示,在掌子面上布置测量电极,同时在边墙上布置多圈供电电极。探测时,供电电极供入直流电(A、B 电极),测量电极(M、N 电极)测量两个电极间的电势差,从而计算出视电阻率剖面。通过反演计算,得到探测区域围岩电阻率剖面,对含水构造表现为低阻,对完整围岩表现为高阻,同时结合激发极化半衰时之差与反演低阻体体积估算水量,从而达到对探测区域地质情况探测的目的。激发极化法可以提供掌子面前方 30 m 范围内含水构造、涌水区等突水突泥灾害源的空间位置。

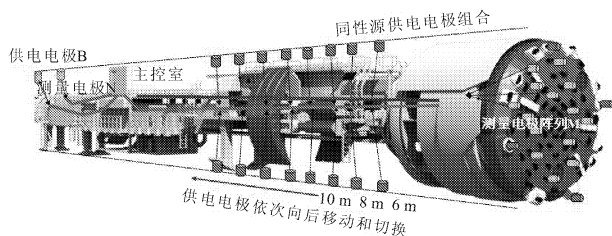
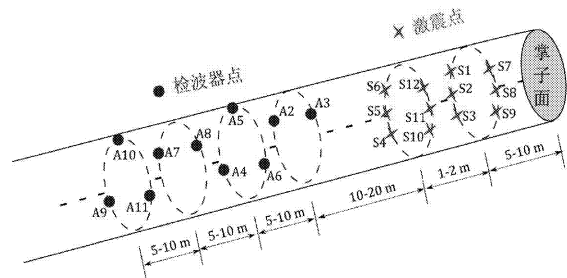


图 2 隧洞激发极化法超前探测示意图

2.4 地震法

地震探测技术的基本原理在于当地震波遇到波阻抗差异(密度和波速的乘积)界面时,一部分信号被反射回来,一部分信号透射进入前方介质。波阻抗的变化通常发生在地质岩层界面或岩体内不连续界面。反射的地震信号被高灵敏地震信号传感器接收,地震波从一种低波阻抗物质传播到一个高波阻抗物质时,反射系数是正的;反之,反射系数是负的。因此,当地震波从软岩传播到硬岩时,反射波的偏转极性和波源是一致的。当岩体内部有破裂带时,反射波的极性会反转。反射体的尺寸越大,波阻抗差别越大,反射波就越明显,越容易探测到。通过分析,被用来了解隧洞工作面前方地质体的性质(软弱带、破碎带、断层等)、位置及规模。地震成像结果采用相对解释原理,即确定一个背景场,所有解释相对背景值进行,异常区域会偏离背景区域值,根据偏离与分布多少解释隧洞前方的地质情况。地震的震源和检波器采用分布式的立体布置方式,具体方

法见图 3。地震法可以提供掌子面前方 80 m ~ 100 m 处及开挖洞径周边 20 m 处断层、破碎带的空间位置。



备注: 1、激震点、检波器点的位置和距离根据洞内实际情况调整
2、必须准确测量每个点位的三维坐标

图 3 隧洞地震波法超前探测点位空间布置图

3 综合超前地质预报技术的建立与实施

3.1 超前地质预报工序的建立

为了更好地指导 TBM 掘进,提高施工效率,工程引入了地震法和激发极化法等超前地质预报方法,结合地质编录及地质素描等资料,对 TBM 掘进段前方的地质情况进行综合超前预报,为掘进施工提供有利的参考依据。根据预报结果提前进行施工组织计划,加快破碎围岩段的施工进度。因在施工过程中,工程遭遇长距离、变化频繁连续破碎围岩段,工程将上述三种超前地质预报方法纳入 TBM 掘进的正常施工工序,展开综合性超前地质预报,从而在 TBM 掘进开始,即可为现场施工作业人员及技术人员提供有利的判断依据。由于地震法的有效预报范围为 100 m,激发极化法的有效预报范围为 30 m,且两种探测方法的现场施作时间均需要 2 h 左右,为不影响 TBM 掘进施工,利用 TBM 固定保养时间、连续皮带硫化时间或长时间停机时间,展开超前地质预报。另外,为确保超前探测的连续性,要求每次地震法预报的范围起始点应在上次探测范围结束点之前,以有效覆盖全部掘进区段,而根据现场地下水发育情况开展激发极化法的地质预报工作。综合超前地质预报的工作流程如图 4 所示。

3.2 综合超前地质预报技术实施

北疆供水二期工程某标段上游 TBM 掘进段根据地质勘测资料,此段围岩以 II 类围岩为主,局部夹有 III 类、IV 类、V 类。但在实际掘进过程中,当 TBM 掘进至桩号 KS111 + 877 时,地质条件较地勘资料发生了较大变化,围岩岩性变为青灰色凝灰岩夹黑灰色凝灰岩,裂隙发育程度明显增高,围岩条件明显变差。在桩号 KS111 + 642.0—KS111 + 619.4 段裂

隙较发育,主要发育一组产状 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}NW \angle 45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 裂隙,裂隙面平直粗糙,局部可见白色钙质填充物,该组裂隙延伸长度 5 m ~ 21 m,表现为裂隙密集带的形式,局部发生掉块现象。在桩号 KS111 + 619.4—KS111 + 614.4 段发育产状 $270^{\circ} \sim 280^{\circ}SW \angle 30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 及产状 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}SE \angle 50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的两组裂隙,裂隙面平直、闭合并充填薄层钙质薄膜,且裂隙面相互切割,形成裂隙密集带,岩体较破碎、稳定性差,出现最大深度 0.5 m 的塌腔。在桩号 KS111 + 576.0—KS111 + 568.5 段发育一组产状 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}NW \angle 40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 裂隙,裂隙面起伏粗糙、闭合,局部有白色钙质填充物,局部发生破碎掉块现象。自此之后,现场出露围岩条件持续变差,裂隙发育程度明显提高,且裂隙多分布于顶拱,在裂隙组合切割下隧洞上半圆黑灰色凝灰岩中常有塌腔、掉块现象,经地质工程师综合判断,对围岩类别进行降级处理。同时,围岩条件变化频繁,在不同围岩类别之间反复变化,给 TBM 施工造成了极大困扰,在围岩变化初期,严重制约了施工进度。因此,自桩号 KS111 + 552.0 开始对前方地质条件开展超前预报,以指导 TBM 施工。现场围岩情况如图 5 及表 1 所示。

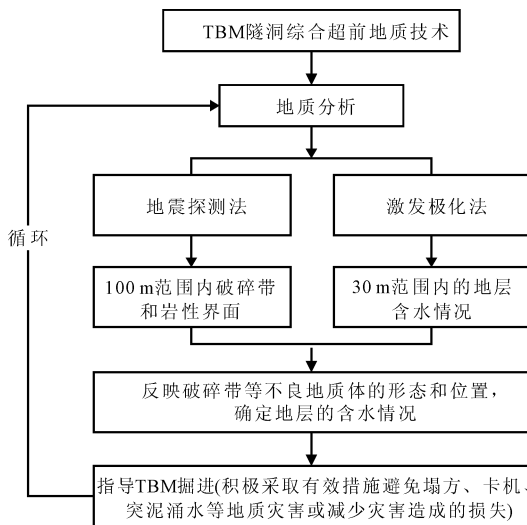


图 4 综合超前地质预报工作流程



(a) 拱架及钢筋排支护 (b) 混凝土回填

图 5 KS110 + 915.0 附近出露围岩及支护情况

现场探测情况如图 6 所示。



(a) 激发地震波 (b) 采集数据

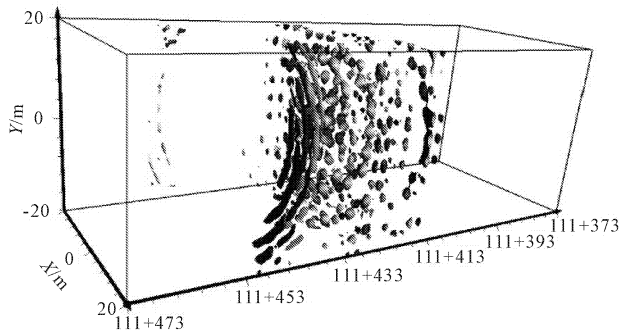
图 6 超前地质预报及结果图

3.3 应用效果分析

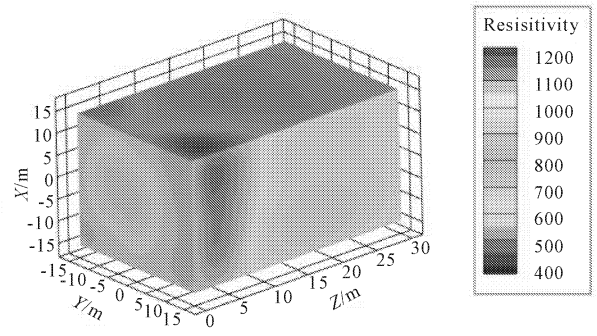
自 2019 年 4 月 6 日开始进行超前地质预报,共

计进行地震法预报 18 次,激发极化法预报 19 次,部分探测结果如图 7 所示,具体探测结果统计见表 1。

由表 1 可以看出,地震法超前预报对围岩破碎带、围岩变化情况均有较好的预测,预测结果与实际出露围岩准确率能达到 80% 以上。激发极化法对地下水的超前预报结果与实际出露围岩的渗涌水情况基本一致,准确率也能达到 70% 以上。同时,结合地质调查资料对前方围岩的初步预测,三种方法相结合的综合超前地质预报对 TBM 施工过程中不良地质预报的准确率约在 80% 左右,对 TBM 掘进提供了良好的施工依据。



(a) KS111+473—KS111+373 段地震法探测成像图



(b) KS111+552—KS111+522 激发极化法探测成像图

图 7 激发极化法探测结果图

表 1 综合地质预报结果与实际揭露情况对比表

起讫里程	勘察 设计 围岩 类别	施工 揭露 围岩 类别	施工揭露岩性 及构造描述	渗涌水 出水 形状	渗涌水 出水量 /($m^3 \cdot h^{-1}$)	地质预报结果
KS111 + 568.5 — KS111 + 438.2	II	III b	围岩岩性为泥盆系青灰色凝灰岩夹黑灰色凝灰岩。围岩完整性差,节理发育,多分布于顶拱,在节理组合切割下隧洞上半圆黑灰色凝灰岩中常有塌腔、掉块现象	滴水	0.03	地震法探测结果: KS111 + 552.0—KS111 + 452.0 段:围岩局部较破碎,易发生掉块或塌腔。 激发极化法探测结果: KS111 + 552.0—KS111 + 522.0 段:地下水不发育,局部可能出现滴渗水。
KS111 + 438.2 — KS111 + 391.0	II	III a	围岩岩性整体为凝灰岩,青灰色,局部呈灰黑色,岩体总体较完整局部较破碎,裂隙较发育	滴水	0.02	地震法探测结果: (1) KS111 + 453.0—KS111 + 403.0 段:围岩局部较破碎,易发生掉块或塌腔。 (2) KS111 + 403.0—KS111 + 373.0 段:围岩局部完整性差,局部节理裂隙发育。
KS111 + 391.0 — KS111 + 360.8	II	III b	围岩岩性整体为凝灰岩,青灰色,局部呈灰黑色,岩体总体较完整局部较破碎,裂隙较发育	—	—	
KS111 + 360.8 — KS111 + 341.0	II	III a	围岩岩性为青灰色凝灰岩,夹灰黑、黑色碳质凝灰岩,岩体总体较完整,局部裂隙较发育	—	—	地震法探测结果 (1) KS111 + 364.0—KS111 + 299.0 段:围岩完整性差,节理裂隙较发育,易发生掉块或塌腔。 (2) KS111 + 213.0—KS111 + 173.0 段:围岩完整性差,节理裂隙发育,局部较破碎易发生掉块。 (3) KS111 + 173.0—KS111 + 113.0 段:围岩较完整。
KS111 + 341.0 — KS111 + 095.0	II	II	围岩岩性为青灰色凝灰岩,夹灰黑、黑色碳质凝灰岩,岩体总体较完整,局部裂隙较发育	滴水	0.02	
KS111 + 095.0 — KS111 + 021.0	II	III a	围岩岩性为青灰色凝灰岩,夹灰黑、黑色碳质凝灰岩,岩体局部裂隙延伸较长,裂隙张开、岩体稳定性较差	—	—	地震法探测结果: KS111 + 112.0—KS111 + 012.0 段:围岩较破碎,易发生掉块,局部可能出现掉块或塌腔。 激发极化法探测结果: (1) KS111 + 112.0—KS111 + 082.0 段:地下水不发育。 (2) KS111 + 089.0—KS111 + 059.0 段:易出现滴渗水。

起讫里程	勘察 设计 围岩 类别	施工 揭露 围岩 类别	施工揭露岩性 及构造描述	渗涌水 出水 形状	渗涌水 出水量 /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	地质预报结果
KS111 + 021.0 — KS110 + 970.0	II	III b	围岩岩性为青灰色凝灰岩,夹灰黑、黑色碳质凝灰岩,岩体局部裂隙延伸较长,裂隙张开,岩体稳定性较差	—	—	地震法探测结果: (1) KS111 + 034.0—KS110 + 994.0 段:围岩较破碎,易发生掉块,局部可能出现塌腔。 (2) KS110 + 994.0—KS110 + 934.0 段:围岩局部节理裂隙发育,局部可能发生掉块。
KS110 + 970.0 — KS110 + 956.6	II	II	围岩岩性为青灰色凝灰岩,夹灰黑、黑色碳质凝灰岩,岩体总体较完整,局部裂隙较发育	—	—	激发极化法探测结果: KS111 + 015.0—KS110 + 985.0 段:围岩地下水不发育。
KS110 + 956.6 — KS110 + 941.0	II	III b	围岩岩性为青灰色凝灰岩,夹灰黑、黑色碳质凝灰岩,岩体局部裂隙延伸较长,裂隙张开,岩体稳定性较差	—	—	
KS110 + 941.0 — KS110 + 784.0	II	II	围岩岩性为灰色灰白色花岗岩,夹少量灰色凝灰岩,岩体总体较完整,裂隙水不发育	散水、 线状水	0.1	地震法探测结果: KS110 + 950.0—KS110 + 776.0 段:围岩较破碎,易发生掉块,局部可能出现掉块或塌腔。 激发极化法探测结果: (1) KS110 + 950.0—KS110 + 886.0 段:围岩局部可能出现滴渗水。 (2) KS110 + 858.0—KS110 + 828.0 段:围岩地下水不发育,局部可能出现滴渗水。 (3) KS110 + 792.0—KS110 + 779.0 段:围岩易出现滴渗水,局部可能出现线状流水。
KS110 + 784.0 — KS110 + 781.0	II	III b	整体岩性为灰色灰白色花岗岩,夹少量灰色凝灰岩,岩体总体较完整,裂隙较发育	—	—	地震法探测结果: (1) KS110 + 773.0—KS110 + 743.0 段:围岩较破碎,易发生掉块,局部可能出现塌腔。 (2) KS110 + 743.0—KS110 + 177.0 段:围岩较完整,局部节理裂隙发育。 激发极化法探测结果: (1) KS110 + 728.0—KS110 + 548.0 段:地下水不发育。 (2) KS110 + 403.0—KS110 + 393.0 段:易出现滴渗水。 (3) KS110 + 393.0—KS110 + 373.0 段:地下水不发育。
KS110 + 781.0 — KS110 + 778.0	II	IV	围岩岩性为凝灰质碎裂岩,碎裂岩块局部有糜棱岩化、碳酸岩化现象,并伴有滴水,岩体完整性较差较破碎。	渗水	—	地震法探测结果: (1) KS110 + 728.0—KS110 + 548.0 段:地下水不发育。 (2) KS110 + 403.0—KS110 + 393.0 段:易出现滴渗水。 (3) KS110 + 393.0—KS110 + 373.0 段:地下水不发育。
KS110 + 778.0 — KS110 + 767.0	II	V	围岩岩性为凝灰质碎裂岩,碎裂岩块局部有糜棱岩化、碳酸岩化现象,并伴有滴水,岩体完整性较差较破碎。	—	—	地震法探测结果: KS110 + 163.0—KS110 + 063.0 段:围岩完整性较差,节理裂隙发育,可能发生掉块。
KS110 + 767.0 — KS110 + 159.0	II	II	围岩岩性为白色花岗岩,主要成分为钠长石、角闪石、石英云母等矿物,班杂结构,块状构造,岩体完整性较好,裂隙节理不发育,地下水不发育。	渗水	—	
KS110 + 159.0 — KS110 + 095.0	II	III a	围岩岩性为肉红色弱风化花岗岩,花岗岩饱和抗压强度稍低。	滴水	0.04	
KS110 + 095.0 — KS110 + 084.7	II	III b	围岩岩性为白色花岗岩局部夹凝灰岩夹层,节理密集发育,节理面平直光滑,局部可见黄铁矿化现象。	—	—	地震法探测结果: (1) KS110 + 088.0—KS110 + 068.0 段:围岩较破碎,节理裂隙发育,易发生掉块和塌腔。 (2) KS110 + 068.0—KS110 + 909.0 段:围岩完整性差,局部节理裂隙发育,可能发生掉块或塌腔。 激发极化法探测结果: (1) KS110 + 069.0—KS110 + 039.0 段:地下水较不发育,局部出现滴渗水。 (2) KS110 + 033.0—KS110 + 028.0 段:易出现滴渗水。 (3) KS110 + 028.0—KS110 + 989.0 段:围岩地下水不发育。 (4) KS109 + 989.0—KS109 + 969.0 段:局部易出现滴渗水。
KS110 + 084.7 — KS110 + 073.7	II	V	围岩岩性为蚀变花岗岩,呈黄色浅肉红色,班杂结构块状构造,单轴饱和抗压的强度小于 5 MPa。	—	—	
KS110 + 073.7 — KS110 + 062.0	II	III b	围岩岩性为花岗岩局部夹凝灰岩,花岗岩呈弱风化轻微蚀变现象,蚀变花岗岩强度低于 60 MPa。	—	—	
KS110 + 062.0 — KS110 + 045.0	II	III a	围岩岩性为凝灰岩与花岗岩交替的凝灰岩夹层,整体较完整,局部较破碎。	线状水	0.15	

与此同时,连续的超前探测效率也在此过程中不断提高,两种探测方法同时施作的时间从开始的 3 h 缩减至 2 h 左右,整个探测过程完全避开 TBM 掘进时间,始终未对施工生产造成影响。另外,每次探测后 2 h 内即可得出探测结果,现场施工可依此及时做好工序调整、材料储备、人员培训等各方面施工准备工作,对现场施工具有较强的指导意义。由此,综合超前预报技术与 TBM 掘进施工各工序相互结合并协调统一,成功纳入 TBM 掘进施工工序中,

为不良地质段的高效施工提供了有利的技术支撑。

综合超前地质预报技术的应用也使各工序转换逐步变得灵活、快速,工序衔接也不断紧密。在各工序调整稳定后,每天架立拱架的数量由 7 榀~8 榀,上升到每天 11 榀~12 榀,单日的掘进进尺也由 7 m~8 m 上升至 15 m 左右。由此可见,综合超前地质预报技术对不良地质段 TBM 的掘进施工具有一定的促进作用,达到了预期的应用效果。

4 结论与建议

本文以北疆供水二期工程某标段为背景,采用地质分析、地震法及激发极化法相结合的综合超前地质预报技术,与 TBM 掘进施工各工序相互协调统一,纳入至正常施工工序中,对不良地质段进行连续超前地质预报,并提供了有效的施工地质依据,得出了以下几点结论:

(1) 结合相关研究及现场出现的不良地质状况,工程采用综合超前地质预报技术对反复、频繁变化的地质条件进行连续超前预报,并作为施工工序纳入工序管理,形成了合理高效的超前地质预报与 TBM 掘进施工技术。

(2) 综合超前地质预报技术与北疆供水二期工程 TBM 掘进施工各工序相结合,进行连续性探测,得到了较好的探测结果。与实际出露的地质情况相比,地震法对围岩性状的探测准确率可达 80% 以上,激发极化法对地下水的探测准确率可达 70% 以上,能够为 TBM 掘进提供有效的施工依据,可在不良地质段施工前做好各项施工准备工作,以提高施工效率。

(3) 由连续性的超前地质预报及其预报结果的准确性,可以看出,在不良地质段将超前预报技术与施工工序紧密结合,可以有效提升施工效率。在未来的 TBM 法工程中,将超前预报技术在 TBM 上进行集成搭载,并进行实时探测,将会对 TBM 施工技术的智能化、高效化带来积极的促进作用,这也将成为未来 TBM 施工技术的发展方向之一。

参考文献:

- [1] 荆留杰,张娜,杨晨. TBM 及其施工技术在中国的发展与趋势[J]. 隧道建设,2016,36(3):331-337.
[2] 洪开荣,王杜娟,郭如军. 我国硬岩掘进机的创新与实

践[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(4):1-19.

- [3] 齐梦学. 硬岩掘进机(TBM)在我国隧道施工市场的推广应用[J]. 隧道建设,2014,34(11):1019-1023.
[4] 翟梁皓,吴景华. TBM 在吉林中部城市引松供水施工中的应用[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2016,17(1):71-74.
[5] 余洁. 中天山隧道 TBM 掘进施工适应性研究[J]. 现代隧道技术,2014,51(3):57-60,66.
[6] 杨建明. 山西中部引黄工程中隧洞的设计浅析[J]. 陕西水利,2019(3):175-177.
[7] 李凌志. 引汉济渭秦岭特长输水隧洞[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(1):148-151.
[8] 邓铭江. 深埋超特长输水隧洞 TBM 集群施工关键技术探析[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):577-587.
[9] 张文,武科,刘国强,等. 城市地铁隧道岩溶地质灾害预警与成因分析[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(2):42-46.
[10] 刘学东. 探地雷达技术在中条山隧道施工中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(1):72-76.
[11] 聂利超. 隧道施工含水构造激发极化定量超前地质预报理论及其应用[D]. 济南:山东大学,2014.
[12] 宋杰. 隧道施工不良地质三维地震波超前探测方法及其工程应用[D]. 济南:山东大学,2016.
[13] 聂利超,李术才,刘斌,等. 隧道含水构造频域激发极化法超前探测研究[J]. 岩土力学,2012,33(4):1151-1160.
[14] 李术才,刘斌,孙怀凤,等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
[15] 李术才,聂利超,刘斌. TBM 施工隧洞不良地质超前预报实践——以吉林省中部城市引松供水工程为例[J]. Engineering,2018,4(1):281-294.
[16] 杨继华,闫长斌,苗栋,等. 双护盾 TBM 施工隧洞综合超前地质预报方法研究[J]. 工程地质学报,2019,27(2):250-259.