

综合物探技术在山西某隧道超前预报中的应用

马瑞涛

廊坊市中铁物探勘察有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2021年12月6日; 录用日期: 2021年12月31日; 发布日期: 2022年1月7日

摘要

由于单一超前地质预报技术对隧道开挖前方地质异常体探测的局限性, 所以为了提高超前预报精度, 利用隧道地震反射地质预报法与瞬变电磁法相结合的综合超前地质预报技术, 对山西某隧道开挖前方的围岩情况以及富水性进行了超前地质预报。经过开挖验证表明, 综合超前地质预报技术可以准确预报开挖前方的地质构造及其富水性, 有效提高超前预报结果的准确性, 为隧道的安全施工提供了有力保障。

关键词

隧道施工, 综合超前地质预报, 隧道地震反射地质预报, 瞬变电磁法

Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Technology in a Tunnel Advanced Prediction in Shanxi Province

Ruitao Ma

China Railway Langfang Geophysical Prospecting Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: Dec. 6th, 2021; accepted: Dec. 31st, 2021; published: Jan. 7th, 2022

Abstract

Due to the limitations of the single advanced geological prediction technology on the detection of geological anomalies in front of the tunnel excavation, in order to improve the accuracy of the advanced prediction, the comprehensive advanced geological prediction technology combining the tunnel seismic prediction and the transient electromagnetic method is used. The surrounding rock conditions and water richness of the tunnel in front of the excavation in Shanxi Province have been geologically predicted in advance. Excavation verification shows that the comprehensive advanced geological prediction technology can accurately predict the geological structure and its water rich-

ness in front of the excavation, effectively improve the accuracy of the advanced prediction results, and provide a strong guarantee for the safe construction of the tunnel.

Keywords

Tunnel Construction, Comprehensive Advanced Geological Prediction, Tunnel Seismic Prediction, Transient Electromagnetic Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在隧道施工过程中, 由于其较高的隐蔽性以及复杂的地质条件, 经常会发生突水、突泥以及塌方等现象, 严重威胁着隧道的安全施工以及人身安全[1] [2]。因此, 利用有效的超前地质预报手段查明隧道开挖前方的地质条件, 预测可能的危险源, 有助于达到隧道安全施工、防灾减灾的目的[3]。

目前, 隧道超前地质预报方法种类较多, 包括瞬变电磁法, 隧道地震反射地质预报法、地质雷达法等, 相关技术方法也较为成熟。晏军以九景衢铁路何家隧道为例, 针对隧道超前预报中几种常见的物探方法, 开展了应用效果分析, 总结了不同物探方法的适用条件和准确度[4]; 张军梳理了隧道超前预报中瞬变电磁的现场施工方法和精细化处理方法, 总结出一套适合隧道超前探测的瞬变电磁探测技术[5]; 刘黎东等在分析了隧道前方含水异常体的三维瞬变电磁响应特征的基础上, 对等值反磁通瞬变电磁在隧道超前预报中的可行性和有效性开展了研究, 研究表明相对于常规瞬变电磁法, 等值反磁通瞬变电磁对异常的识别能力更强[6]; 李斌利用地质雷达对贵州毕节阳山隧道开展超前预报应用研究, 探测出掌子面前方的岩溶发育情况, 探测结果经过了钻孔和揭露验证, 表明该方法在岩溶地区具有较好的实用性[7]; 王汪汪等利用地震反射波法对隧道宽大断裂的内部情况进行探测, 准确地预报出隧道开挖前方的围岩情况, 对相应隧道的安全施工提供了指导[8]。但是由于单一方法存在局限性, 加上隧道的复杂地质条件, 往往预报结果与实际开挖情况存在一定的偏差, 所以想要提高超前地质预报的准确性和精度, 需要采用多种方法的综合进行相互验证和补充[9] [10] [11]。何山等综合利用 TSP 超前预报系统、地质雷达和红外探水方法对育王岭隧道掘进前方的地质异常体进行探测, 取得了较好的探测效果[12]; 张建国等采用地震探测为主, 地质雷法为辅的综合超前预报技术对西南某隧道进行超前探测预报, 用于指导该隧道后期的安全施工[13]; 何宇等以广东金花隧道为例, 探讨了瞬变电磁与地质雷法相结合的综合超前预报技术的施工、处理以及解释[14]; 贾艳领等采用高密度电阻率法、陆地声纳以及瞬变电磁相结合的综合超前预报技术对隧道内断层破碎情况进行了精细探测, 有效指导了隧道掘进的安全施工[15]; 钟明文等综合利用跨孔地震波 CT 和快速钻探法对九顶山隧道进行超前预报探测, 研究结果表明两种方法的结合可以有效提高超前预报的精度[16]; 韩自强等在研究下穿水库隧道的水文地质和地球物理特征的基础上, 采用瞬变电磁和地震波法的综合预报方法, 对广东省某隧道的断层破碎发育情况进行探测[17]; 王玉琴等采用地震波反射、瞬变电磁、地质雷法和超前钻探相结合的方法, 准确探测出九万大山一号隧道的溶洞分布情况[18]。以上研究成果都表明综合物探技术可以有限弥补单一方法的缺点, 实现优势互补, 提高超前预报的精度, 降低风险。

因此, 本文综合运用隧道地震反射地质预报技术和瞬变电磁法, 对山西某隧道开挖前方的地质异常

体进行探测和预报。由于地震反射技术可以准确圈定出构造等异常体的边界和位置，但对其富水性探测效果较差；瞬变电磁对低阻异常比较敏感，可以有效查明异常体的富水情况，所以本文研究成果将为今后隧道综合超前地质预报工作提供了重要的指导意义。

2. 隧道超前预报方法及原理

2.1. 隧道地震反射地质预报法

隧道地震反射地质预报法(Tunnel Seismic Prediction, 简称 TSP)采用的是地震反射波勘探原理, 对隧道开挖前方的地质条件进行探测和预报[9], 如图 1 所示。从隧道开挖面附近向后方一定范围内依次布设激发孔, 在激发孔内人工激发地震波, 当地震波以球面波的形式在围岩中传播过程中遇到地质异常体(断层、破碎带和岩溶通道等)时, 一部分地震波就会被反射回来, 通过在距离开挖面约 55 m 处布设的两个接收孔接收这部分反射波, 其频谱、振幅与接收时间都受到隧道开挖前方的地质情况有关。利用专门软件对采集到的地震反射波进行处理, 分析纵横波波速、泊松比以及杨氏模量等参数特征, 来达到隧道开挖前方的地质异常体的预报[19] [20]。

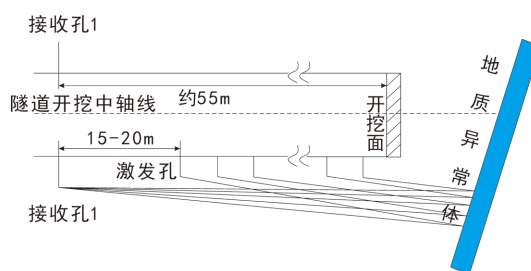


Figure 1. Schematic diagram of TSP method

图 1. TSP 法工作原理示意图

2.2. 瞬变电磁法

瞬变电磁法(Transient-electromagnetic method, 简称 TEM)属于时间域电磁法[21], 它利用接地线源或不接地回线作为激发源向地下供电, 发射脉冲电磁波, 在供电间歇, 利用不接地回线或者接地电极接收由地下异常体感应产生涡流电磁场。通过观测涡流电磁场在时间上的变化特征, 达到探测地下介质的分布情况, 其基本原理如图 2 所示。

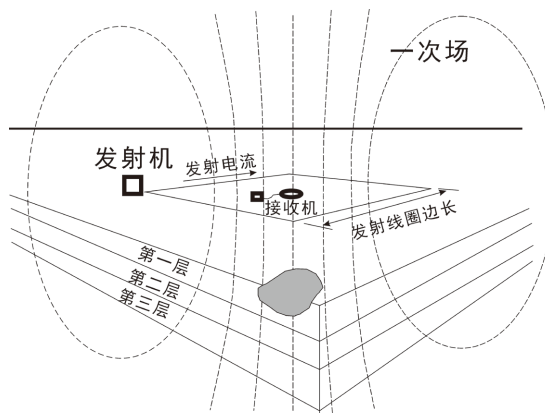


Figure 2. Schematic diagram of TEM

图 2. 瞬变电磁探测原理示意图

对于瞬变电磁来说，岩层赋水性的不均匀程度在其探测成果中反映为电阻率的高低变化：当岩层完整时其电阻率较高；当岩层破碎或裂隙发育含水时，在其探测成果中就会显示出局部低电阻率异常区。根据以上电阻率特征，就可以判断地质异常体的赋存位置及其富水性[5]。

3. 工程概况

该隧道位于山西省朔州市，隧道进口里程为 DK110 + 440；隧道出口位于代县雁门关乡野庄村，出口里程为 DK125 + 200；隧道全长 14760 m，最大埋深 766 米，位于 DK120 + 190 处，地面高程 2001.07 米，该隧道采用人字坡设计，变坡点位于 DK116 + 800 为单洞双线隧道，隧道设斜井 5 个，斜井总长度为 7847 m。

该隧道 1 斜 12 + 25.0~1 斜 11 + 25.0 段浅埋及断层破碎带，受断裂构造影响岩体破碎，呈碎石状松散结构，设计围岩级别为 V 级。1 斜 11 + 25.0~1 斜 10 + 79.0 段为斜长角闪岩，黑云变粒岩，局部被花岗岩岩脉侵入，弱风化，节理裂隙很发育，岩体破碎，呈碎石状压碎结构，设计围岩级别为 IV 级。

4. 超前预报结果分析及解释

4.1. TSP 法预报成果

图 3 所示为 TSP 预报结果，从图中可以看到：1) 1 斜 11 + 80~1 斜 11 + 33 该段纵波速度呈上升趋势，横波速度呈下降 - 上升 - 下降趋势，泊松比呈上升 - 下降 - 上升趋势，动态杨氏模量呈先下降后上升趋势。推测该段围岩岩体破碎，岩质较软，节理裂隙发育，围岩整体稳定性差。2) 1 斜 11 + 33~1 斜 11 + 25、1 斜 11 + 25~1 斜 11 + 23 该段纵波速度和泊松比呈上升趋势，横波速度和动态杨氏模量呈下降趋势。推测该段围岩岩体较破碎，岩质较软，节理裂隙较发育，围岩稳定性较差。3) 1 斜 11 + 23~1 斜 11 + 07 该段反射层较多，纵横波速度和动态杨氏模量均呈下降 - 上升 - 下降趋势，泊松比呈先下降后上升趋势。推测该段围岩岩体较破碎，局部破碎，岩质较软，节理裂隙较发育，局部发育；局部存在软弱夹层，围岩稳定性较差，局部稳定性差。4) 1 斜 11 + 07~1 斜 10 + 90 该段纵波速度呈先上升后下降趋势，横波速度和动态杨氏模量总体呈上升趋势，泊松比呈先上升后下降趋势。推测该段围岩岩体较破碎，岩质较软，节理裂隙较发育，围岩稳定性较差。5) 1 斜 10 + 90~1 斜 10 + 48 该段纵横波速度和泊松比及动态杨氏模量均呈下降趋势。推测该段围岩岩体破碎，岩质较软，节理裂隙发育，围岩稳定性差。

4.2. 瞬变电磁预报成果

图 4 所示为顺层方向瞬变电磁预报成果。从图中可以看到，随预报深度的增加，开挖面前方视电阻率整体上呈“高 - 低 - 高”电性特征分布；开挖面前方右侧视电阻率值明显低于左侧，且在隧道开挖面右前方 30~75 m 范围内(1 斜 11 + 78~1 斜 11 + 33 段)存在明显低阻异常区，推断该位置围岩破碎，节理裂隙发育，富水性较强。

4.3. 综合超前地质预报成果

由于 TSP 与瞬变电磁超前预报里程不同，所以仅分析两种方法共同预报区域，得到以下综合超前地质预报成果。

1) 1 斜 11 + 80.0~1 斜 11 + 50.0 段地层风化程度较强，节理裂隙发育，岩体破碎，围岩整体稳定性差，易掉块、坍塌；本段岩层富水性较为发育，综合判定该段围岩等级为 V 级。

2) 1 斜 11 + 50.6~1 斜 11 + 25.0 段围岩主要地层为：黑云变粒岩，强风化，节理裂隙发育，岩体破碎，围岩整体稳定性差，易掉块、坍塌。本段岩层富水性较为发育，综合判定该段围岩等级为 V 级。

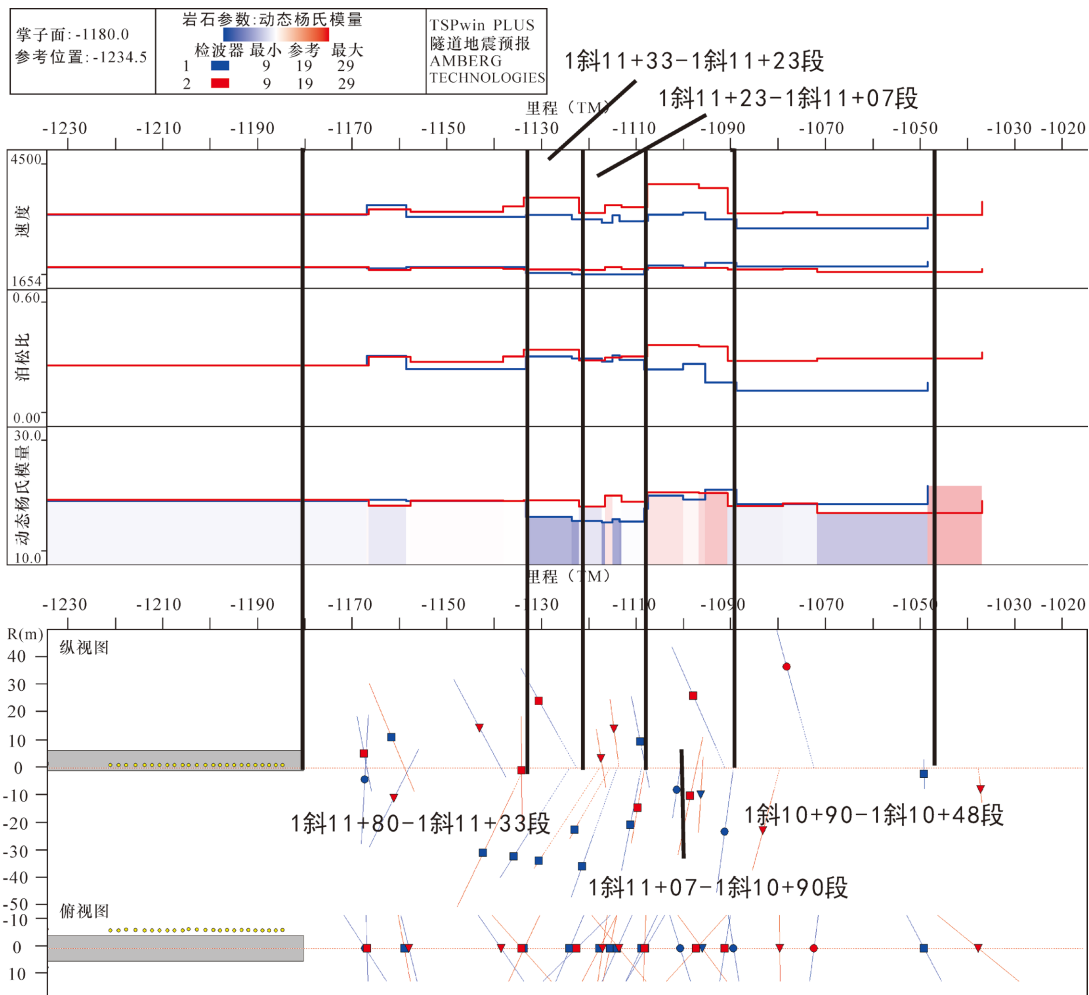


Figure 3. The advance forecast result of TSP
图 3. TSP 预报成果

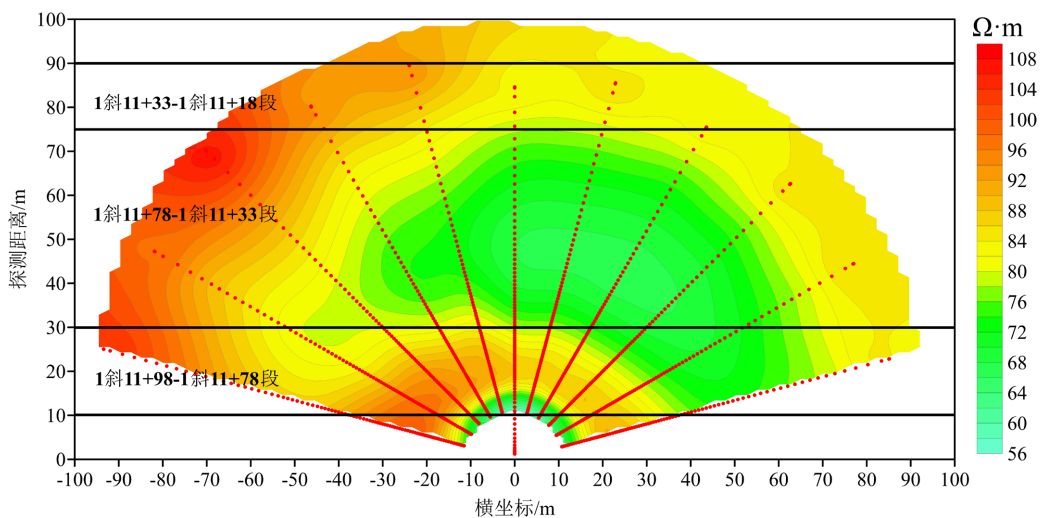


Figure 4. Apparent resistivity profile in bedding direction of TEM
图 4. 瞬变电磁顺层方向视电阻率剖面图

3) 1斜 11 + 25.0~1斜 10 + 95.0 段围岩主要地层为：黑云变粒岩，强风化~弱风化，节理裂隙较发育，岩体较破碎，围岩整体稳定性较差，易掉块、局部易坍塌。本段岩层富水性较为发育，局部可能涌水，综合判定该段围岩等级为 IV 级。

4.4. 开挖及验证情况

图 5~图 8 分别为该隧道 1 斜不同开挖段的现场情况，具体为：

1) 1斜 11 + 88.0~1斜 11 + 56.2 段掌子面揭示围岩主要地层为：黑云变粒岩，强风化，节理裂隙发育，岩体破碎，围岩稳定性差，易掉块、坍塌。本段地下水较发育，掌子面整体湿润，局部呈线股状出水，与预报情况基本一致。

2) 1斜 11 + 56.2~1斜 11 + 25.0 段掌子面揭示围岩主要地层为：黑云变粒岩，强风化，节理裂隙发育，岩体破碎，围岩稳定性差，易掉块、坍塌。本段地下水较发育，掌子面整体湿润，多处呈线股状出水，与预报情况基本一致。

3) 1斜 11 + 25.0~1斜 10 + 79.0 段掌子面揭示围岩主要地层为：黑云变粒岩，弱风化，节理裂隙较发育，岩体较破碎，围岩稳定性较差，易掉块，局部易坍塌。本段地下水发育，掌子面整体渗滴状出水，多处呈线股状出水，与预报情况基本一致。



Figure 5. Palm face photos of 11 + 88
图 5. 1 斜 11 + 88 掌子面照片



Figure 6. Palm face photos of 11 + 78
图 6. 1 斜 11 + 78 掌子面照片



Figure 7. Palm face photos of 11 + 36.2

图 7. 1 斜 11 + 36.2 掌子面照片



Figure 8. Palm face photos of 10 + 79

图 8. 1 斜 10 + 79 掌子面照片

5. 结论

通过采用 TSP 法和瞬变电磁法相结合的综合超前地质预报技术, 对山西某隧道开挖前方地质情况进行了预报, 得到以下结论:

1) 对比分析综合超前地质预报成果与实际开挖情况, 1 斜 11 + 80.0~1 斜 10 + 95.0 段围岩情况基本与超前地质预报探测结论一致, 实现了隧道开挖前方的准备预报。

2) 采用 TSP 法和瞬变电磁法相结合的综合超前地质预报技术, 能够有效探测隧道开挖前方的地质情况, 包括围岩破碎情况、裂隙发育情况及其富水性, 该方法组合为隧道安全施工提供了技术依据, 极大地提高了隧道施工的安全性。

参考文献

- [1] 邵珠山, 张鹏举, 张喆, 等. 隧道施工超前地质预报研究进展[J/OL]. 长江科学院院报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20210317.1736.014.html>
- [2] 李华, 李富, 鲁光银, 等. TSP 法与探地雷达相结合在隧道超前地质预报中的应用研究[J]. 工程勘察, 2009, 37(7): 86-90.
- [3] 吴小川. 综合超前地质预报技术在万寿山隧道施工中的应用[J]. 勘察科学技术, 2019(4): 58-61.
- [4] 晏军. 岩溶隧道超前地质预报几种主要物探方法的选择与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 327-336.
- [5] 张军. 瞬变电磁精细探测方法在隧道地质预报中的应用研究[J]. 能源与环保, 2019, 41(6): 33-38+42.

- [6] 刘黎东, 张富翔, 张继锋, 等. 基于等值反磁通的隧道 TEM 超前探测三维模拟及应用[J/OL]. 地球物理学进展. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210723.0940.026.html>
- [7] 李斌. 地质雷达在阳山隧道岩溶发育段的应用研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(6): 144-148.
- [8] 王汪汪, 牟元存. TSP 隧道超前地质预报技术在宽大断层内部的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(2): 186-193.
- [9] 菅永明. TSP 及 TEM 结合法在隧道超前地质预报中的应用[J]. 国防交通工程与技术, 2021, 19(1): 76-79.
- [10] 曹泉水, 刘立, 沈胜强, 等. 综合超前地质预报技术在巴朗山隧道施工中的应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2014, 33(3): 95-99.
- [11] 王志军. TSP 和地质雷达在隧道超前地质预报中的综合应用[J]. 福建交通科技, 2020(6): 93-95.
- [12] 何山, 张文君, 邱波, 等. 综合超前地质预报技术在育王岭隧道破碎带预报中的应用[J]. 科技通报, 2019, 35(2): 195-200.
- [13] 张建国, 杨文, 杨永斌, 等. 综合超前地质预报技术在西南某隧道的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(4): 496-502.
- [14] 何宇, 李富明, 肖洋. 隧道施工穿越向斜构造超前预报技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1): 486-491.
- [15] 贾艳领, 钟乃龙, 欧阳璐, 等. 断层破碎带隧道地质综合超前预报应用实践[J]. 公路, 2021, 66(3): 353-359.
- [16] 钟明文, 李文菊, 房昱纬, 等. 综合地质预报在公路隧道施工中的应用[J]. 勘察科学技术, 2021(2): 52-55.
- [17] 韩自强, 陈棚, 曹建. 综合超前地质预报技术在断层发育区隧道下穿水库工程建设中的应用[J/OL]. 地球物理学进展. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210601.1454.016.html>
- [18] 王玉琴, 高树全. 综合超前地质预报技术在贵南铁路岩溶隧道中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(4): 538-546.
- [19] 朱保健. TSP 法及地质雷达法相结合在隧道超前地质预报中的应用[J]. 铁道勘察, 2017, 43(5): 60-63.
- [20] 唐亚辉. 地质雷达和 TSP 法在隧道超前地质预报中的应用[J]. 人民长江, 2015, 46(S1): 100-102.
- [21] 伍小刚, 李天斌, 张中, 等. 传统瞬变电磁法的改进及其在隧道超前地质预报中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 163-170.