

文章编号: 1007-2993(2026)05-0672-10

五指山隧道综合地质预报技术应用研究

汪舟¹ 郑玉辉² 崔亮² 毛川³ 刘磊¹

(1. 四川路航建设工程有限公司, 四川成都 610045; 2. 中节能建设工程设计院有限公司, 四川成都 610052;
3. 中国华西工程设计建设有限公司, 四川成都 610031)

【摘要】 在复杂地质隧道施工过程中, 为了探明掌子面前段地质情况, 预防隧道软岩断裂、涌水突泥等不良地质作用, 应以地质分析为主线, 长短距离超前地质预报相结合为依据, 建立隧道动态综合预报及设计的管理体系。在 G4216 线仁寿至屏山新市段高速公路五指山特长隧道施工中, 针对多种不良地质体, 采用了地质分析法、超前水平钻探法、地质雷达法、瞬变电磁法、地震波法等超前地质预报方法, 建立隧道动态综合预报及设计的管理体系, 指导动态设计, 并根据施工进度进行开挖后的对比验证。该管理体系降低了隧道施工的地质安全风险, 具有科学性、经济性和安全性, 可为类似复杂地质条件的隧道超前地质预报和动态设计提供参考和借鉴。

【关键词】 隧道工程; 隧道超前地质预报; 地质雷达; 瞬变电磁; 地震波法

【中图分类号】 P631

【文献标识码】 A

doi: [10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0211](https://doi.org/10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0211)

Application of comprehensive geological prediction technology in Wuzhishan Tunnel

WANG Zhou¹ ZHENG Yuhui² CUI Liang² MAO Chuan³ LIU Lei¹

(1. Sichuan Road and Waterway Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu 610045, Sichuan, China;
2. CECEP Construction Engineering Design Institute Limited Company, Chengdu 610052, Sichuan, China;
3. China HuaXi Engineering Design & Construction Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

【Abstract】 During the construction of tunnels under complex geological conditions, to investigate the geological conditions ahead of the tunnel face and prevent adverse geological hazards such as soft rock fracture, water inrush and mud outburst, a management system for dynamic comprehensive geological prediction and design of tunnels should be established with geological analysis as the main line and the combination of long and short distance advanced geological prediction as the basis. In the construction of the Wuzhishan Extra long Tunnel on the Renshou to Pingshan Xinshi section of the G4216 Expressway, aiming at various adverse geological bodies, multiple advanced geological prediction methods including geological analysis, advanced horizontal drilling, ground penetrating radar, transient electromagnetic method and seismic wave method were adopted. A management system for dynamic comprehensive prediction and design was constructed to guide dynamic design, and post excavation comparative verification was carried out according to construction progress. This management system reduces geological safety risks in tunnel construction, featuring scientificity, economy and safety. It can provide references for advanced geological prediction and dynamic design of tunnels under similar complex geological conditions.

【Key words】 tunnel engineering; tunnel advanced geological prediction; ground penetrating radar; transient electromagnetic method; seismic wave method

0 引言

随着我国西部交通建设发展和交通强国路线图的持续推进, 四川省高速公路的重点建设逐渐向复杂

山区发展, 特别是在四川盆地西南缘向云贵高原过渡带上, 岩性、地质构造复杂, 地形陡缓相间, 给项目建设造成了极大的制约和困难, 深埋、长大隧道已成公

作者简介: 汪舟, 男, 1981 年生, 大学本科, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察与治理、工程地质工作。E-mail: wztgxcl@163.com

通信作者: 郑玉辉, 男, 1971 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计、施工及科研开发和应用。E-mail: zyhtky2@163.com

路建设的常态,隧道施工中涌水、突泥、塌方等事故层出不穷^[1]。为保证顺利安全地穿越软岩、断裂带、溶洞、富水地段等不良地质体,采用超前地质预报探测成为必不可少的施工环节^[2]。

超前地质预报技术在国外起步较早,如起源于美国的 20 世纪 30 年代的地震层析成像技术^[3]和瑞士的地震波三维层析成像法(TSP)^[4]等。我国地质预报技术起步较晚,由于我国交通建设体量大,应用场景多样,近年来应用于隧道超前地质预报的各种探测手段得到飞速发展^[5]。李术才等^[6]于 2008 年提出了综合超前地质预报方法的概念,由地质分析进行风险等级划分,提出隧道地质灾害预警机制;李天斌等^[7]于 2009 年用不同的超前预报方法针对隧道不良地质情况的响应特征和适应性进行识别评价,提出了一种较为完善的综合预报模式;邵珠山等^[8]于 2022 年系统分析了各种超前地质预报方法的技术原理和优缺点,提出建立综合预报体系的建议。

本文在前人研究成果基础上,对现有超前地质预报的技术原理、各种预报方法的优缺点进行阐述,并结合工程实践案例,建立动态综合预报及设计管理体系,降低施工安全风险,以期为类似的项目应用场景提供参考。

1 超前地质预报技术现状

常见隧道超前地质预报方法有:地质分析法、超前钻探法、地质雷达法、瞬变电磁法、地震波法等。

地质分析法是隧道超前地质预报的基础,即通过已有地质资料,在调查隧道线路周边地层、岩性、构造出露和规模、性质及产状的情况下,通过地层对比、地质类比、趋势分析等方法推断隧址区的工程地质和水文地质情况^[9],特别是对岩溶、断层破碎带、岩性接触带、不良地质等情况要有相应的预测。

超前水平钻孔法是最直接的探查方式,根据钻进时钻杆工作状态和取样形式,直接揭露岩性、构造、岩溶、地下水、岩体完整性等指标,是最可靠的方法之一,应用广泛且效果较好。但该方法也有以点带面的缺陷,易导致漏报、漏探^[4]。

地质雷达法(GPR)是基于电磁波反射原理的探测技术,其工作模式是通过单一天线双功能化运作,先向地下发射高宽频电磁脉冲,后同步接收经不同介质层界面(如岩土分界、空洞结构等)反射折返的电磁信号。这种自发射到接收的全流程闭环设计,使系统能够通过分析时延与波形特征反演地下介质的空间分布特性,预报工作面前方的地质情况(见图 1)。本法对前方含水体较敏感,但易受干扰,有效预报距

离约 20 ~ 30 m^[10]。

瞬变电磁法或称时间域电磁法(TEM)^[11],是基于电磁感应原理的物理探测技术。原理为:通过地面的发射线圈向地下发送瞬态电磁脉冲(一次场),随后在断电间歇测量由地下介质感应产生的二次涡流场(见图 2)。因不同电性介质对电磁场的响应差异,二次场会呈现分阶段衰减特征:早期对应高频信号(衰减快、探测浅层),晚期反映低频成分(衰减慢、穿透更深)。通过解析二次场随时间变化的衰减规律,可反演出地下介质的电阻率分布,进而实现地质结构或异常体的空间定位^[12]。本法使用方便,占用场地小,但技术方法和软件处理方面需进一步改进^[8]。

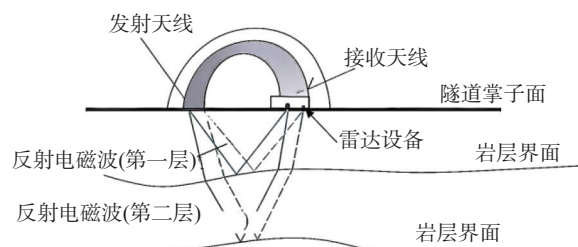


图 1 地质雷达法超前预报工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle for advance prediction using Ground Penetrating Radar (GPR) method

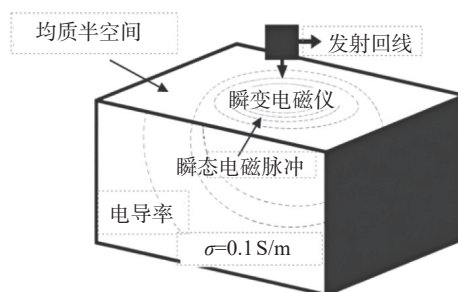


图 2 瞬变电磁法工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of Transient Electromagnetic (TEM) method

地震波法根据任务要求、地质条件和施工特点可选择地震波反射法(TGP)或地震波三维层析成像法(TSP)^[13]。地震波反射法(TGP)是基于弹性波反射原理的隧道超前探测技术,其原理为:在隧道侧壁按直线阵列钻设多个激发孔(含微量炸药)及接收孔,炸药激发产生的地震波以球面波形式向岩体内部传播,当遇到断层、破碎带或岩性变界面等波阻抗突变区域时,部分能量反射形成回波,其余继续向前传播;布置于接收孔中的高精度检波器同步捕获直达波与反射波信号,通过分析两者的传播时差、波形畸变及能量衰减特征,结合波速反演模型,可解译掌子面前方岩体的结构异常(如溶洞、裂隙带等)^[14];结合地质

数据,还能进一步推演围岩的动态弹性模量、泊松比等力学参数(见图3)。

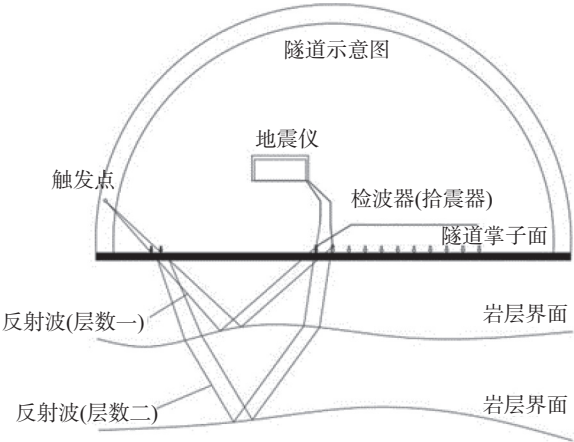


图3 地震反射法工作原理示意图
Fig. 3 Schematic diagram of working principle of Seismic Reflection (SR) method

地震波反射法(TSP)三维超前地质预报系统通过分析极化反射波的特性实现隧道前方地质探测。

表1 各超前地质预报方法的特点

Tab. 1 Characteristics of various advance geological prediction methods

预报方法	理论原理	针对地质构造	预报距离/m	优点	缺点	预报精度
地质分析法	地质理论+经验	均适用	<10	成本低,可正常施工	受人员水平和经验影响,人为因素大	高
超前水平钻探法	直接钻孔揭露地层	均适用	<80	直观,直接有效,说服力强	成本高,耗时长,易发生漏探漏报	高
地质雷达法(GPR)	电磁波+介电常数	围岩破碎带、断层、岩溶、空洞、裂隙水	<30	分辨率高,围岩周边无扰动	距离短,受金属等介质干扰因素大	高
瞬变电磁法(TEM)	电阻率+二次场衰减	溶隙、含水破碎带、含水裂隙、低阻断层带	<120	对富水地段敏感,电阻衰减明显	受金属等介质干扰因素大	低
地震波法(TGP、TSP)	地震波+波阻抗	断层、破碎岩体	100~200	直观,对规模较大的不良地质体(断层、破碎岩体等)界面探测效果较好	能量不集中,定位不准确,反射面接受干扰因素大	低

2 工程概况及工程地质问题

G4216 线仁寿经沐川至屏山新市段高速公路主线长 158.029 km,马边支线长 43.799 km,路线全长 201.828 km。五指山特长隧道为控制性工程^[17]。隧道左线全长 9362 m,右线全长 9397 m,为双向四车道高速公路隧道,单洞分离式设计。隧道埋深约 1000 m,V 级围岩段长度 820 m,Ⅳ级围岩段长度 6582 m,Ⅲ级围岩段长度 1630 m,各级围岩所占的比例分别为 9.1%,72.6%,18.3%^[18]。

隧址区位于马边—沐川弧形构造带内的五指山背斜处,穿越整个五指山背斜,其东段西翼有北西向展布的中都断层,受多次构造运动影响岩层变形强烈,次级小断裂与破碎带发育(见图 4、图 5)。地层主要有:古生界二叠系峨眉山玄武岩,二叠系沉积岩,中生界三叠系、侏罗系、白垩系地层等。隧道主要穿

该方法支持大锤、液压锤及炸药等多种震源,其中锤击震源探测深度可达约 150 m。其核心技术借鉴航空三轴检波器原理,采用 45°锥角的定向雷达覆盖模式,通过极化处理与多检波器数据融合,将各向反射波统一映射至中心点。多震源连续激发时,系统同步记录全矢量波场分量,经实时处理生成高分辨率三维参数化图像,可较准确识别掌子面前方涌水带、破碎区、富水构造及顶板失稳风险^[15]。

相较于 TSP,目前 TGP 技术进行了改进,采用二维和三维观测系统和偏移成像处理技术,利用不同偏移距的共散射点道集,同时利用走时和振幅等运动和动力学信息,确定掌子面前方围岩速度分布、反射地质构造的准确位置和界面两侧围岩力学性状的差异,具有坚实的物理基础,提高了预报的准确性和可靠性。缺点为抗干扰较差,仪器昂贵,反演情形多解,前方岩溶发育区的探水有其局限性^[16]。

各超前地质预报方法特点见表 1。

越泥质粉砂岩、细砂岩、粉砂质泥岩、灰岩、泥灰岩、白云岩,部分段落穿越岩溶角砾岩、石膏地层、煤线、薄煤层及炭质页岩^[18]。不良地质有岩溶、瓦斯、石膏及软岩等,在岩体完整地段存在轻微岩爆。隧道穿越三叠系须家河组和二叠系宣威组,均为含煤系地层^[18]高瓦斯隧道,瓦斯工区长度左右洞各约 392 m、231 m。根据地勘设计资料,预计隧道开挖期间,枯水期涌水量为 9.4×10⁴ m³/d,平水期涌水量 1.1×10⁵ m³/d,丰水期涌水量达 1.53×10⁶ m³/d^[18]。

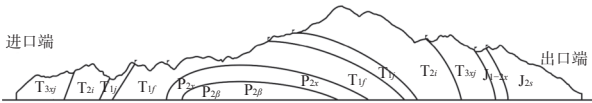


图4 五指山隧道背斜构造示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the anticlinal structure of Wuzhishan tunnel

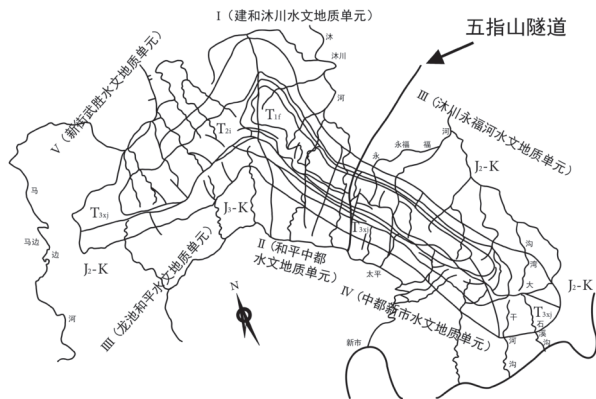


图5 区域水文地质构造示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the regional hydrogeological structure

综合以上情况,本隧道施工可能存在的主要工程地质问题有:岩溶涌水、突泥、坍方冒顶,断层及断层破碎带,软弱围岩变形及瓦斯等。

3 隧道综合地质预报工程应用

3.1 地质预报设计

对于地质构造复杂、岩溶发育区域,应采用地质分析、物探、超前钻探等手段相结合的综合超前地质预报方法,以地质分析为主线,其他预报方法和资料

分析应在地质分析的指导下进行^[19]。根据本工程面临的工程地质问题,制定了隧道综合超前地质预报设计方案,方案采用了地质分析法、超前水平钻探法、地质雷达法、瞬变电磁法、地震波法。以隧道左洞 ZK139+103—ZK139+073 段不良地质体为例(见图6),本段位于隧道线路的中部,五指山背斜的褶皱区域,根据勘察设计资料,该段对应地层为白云质灰岩、角砾岩、含石膏、泥灰岩和泥岩,隧道及周边约 30 m 范围围岩溶蚀强烈,部分胶结,岩质软,层间黏土充填,存在溶隙。预计拱顶和侧壁稳定性低,易发生大型坍塌,有集中涌突水可能。

根据隧道综合超前地质预报设计方案,施工伊始建立了隧道动态综合预报及设计的管理体系(见图7)。通过分析勘察设计资料,结合各项超前地质预报方法和手段,对破碎带、断层、低阻异常区、富水区域、软岩地段等不良地质体提前制定措施,并对开挖后掌子面进行地质异常对比分析,调整支护参数,优化设计,确保工程能安全顺利地通过不良地质体,并达到科学性、合理性、经济性、安全性的平衡。

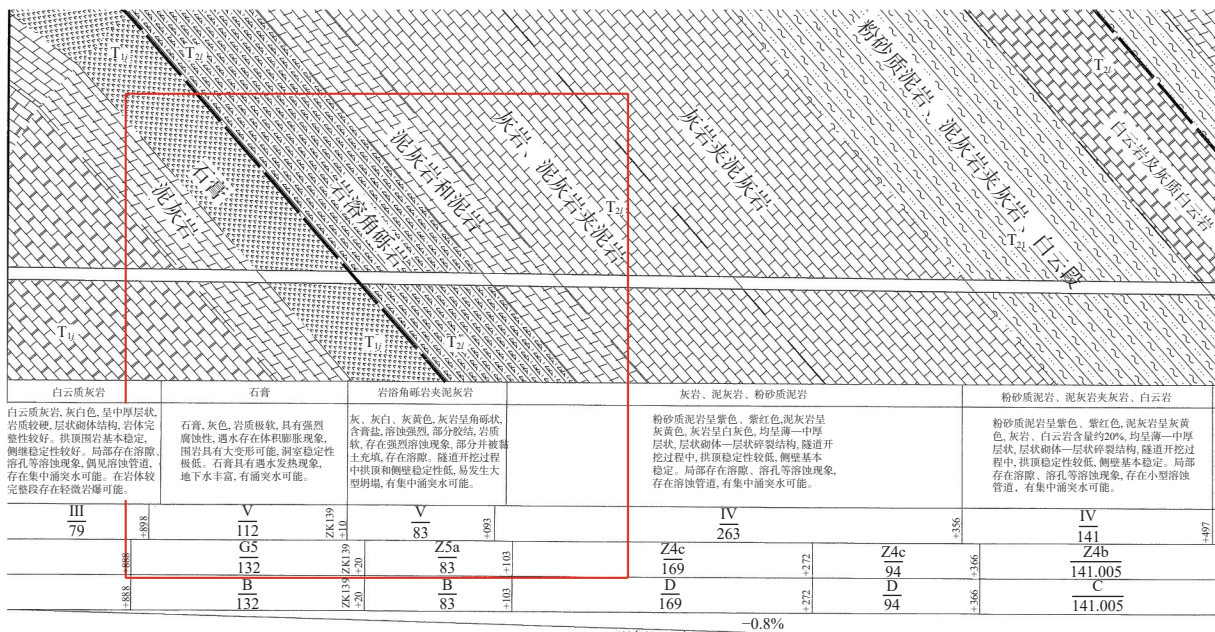


图6 隧道左洞 ZK139+103—ZK139+073 段地质图

Fig. 6 Geological map of the left tunnel section ZK139+103—ZK139+073

3.2 超前水平钻探

隧道超前水平钻探采用 ZDY-1250SB 全液压钻机,该钻机为煤矿隧道超前探测专用设备,兼具瓦斯与地质勘探功能。通过钻探过程的多参数动态分析实现前方地质预判;利用钻屑采样解析地层分布,结合钻机工作状态(转速、扭矩异常)识别断层、溶洞或

围岩软硬变化;同时通过返浆流量监测推断前方地下水发育程度。可初步标定不良地质体的里程位置,进而提供岩性、岩体强度和完整度、地下水发育情况等各项参数数据^[20]。

本工程隧道掌子面超前钻孔布置如图8所示,围岩及现场钻孔照片如图9所示。据左线里程

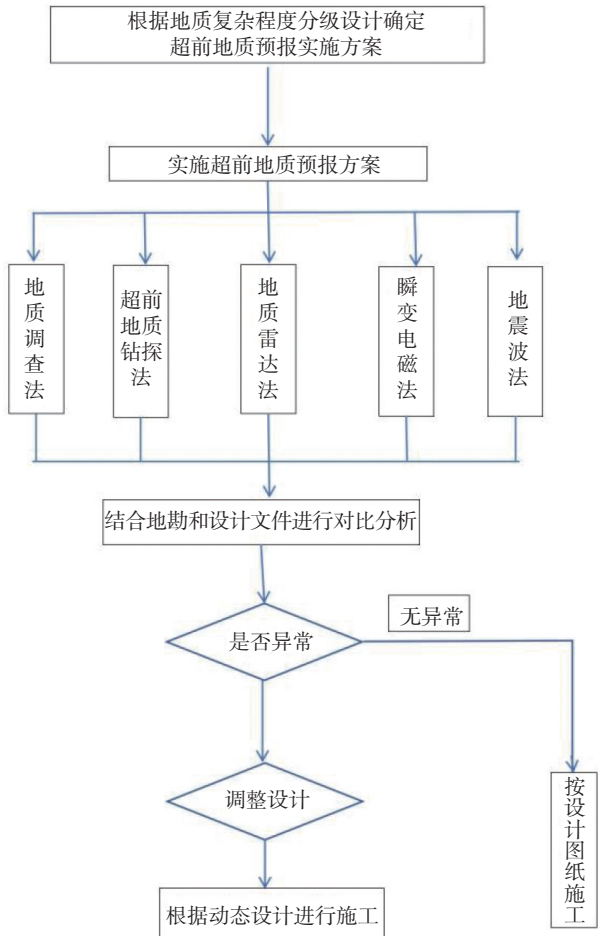


图7 隧道动态综合预报及设计的管理体系流程图
Fig. 7 Flowchart of the management system for tunnel dynamic comprehensive prediction and design

ZK139+115—ZK138+981 超前钻探报告揭露, 掌子面(ZK139+115)前方约 0~25 m 主要由泥灰岩组成, 25~80 m 主要由灰岩、角砾岩组成。掌子面出露泥灰岩为灰黄色、泥灰色, 呈薄—中厚层状, 层状砌体—碎裂结构, 整体岩质软; 节理裂隙发育, 岩体呈碎裂结构, 拱顶及侧壁易产生掉块及垮塌, 局部存在较严重溶蚀现象, 渗水较大, 呈雨淋状涌出, 局部呈股状; 岩层产状 $215^{\circ} \angle 55^{\circ}$ 。

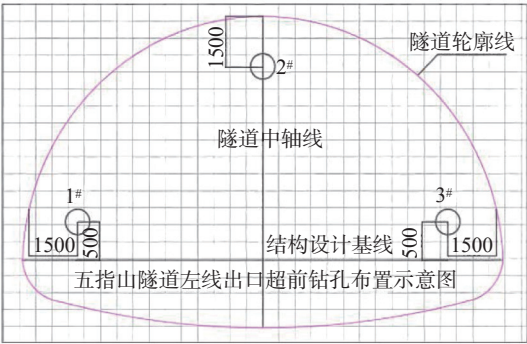


图8 掌子面超前钻孔布置示意图(单位:mm)
Fig. 8 Schematic diagram of the layout of advance drilling at the tunnel face (Unit: mm)



图9 掌子面围岩及现场钻孔照片
Fig. 9 Photos of surrounding rock at the tunnel face and in-situ drilling

钻孔成孔后均有较大地下水涌出。1#孔 25 m 处卡钻, 2#孔 22 m 处卡钻, 3#孔 18 m 卡钻。揭示出掌子面前方为软、硬岩组合, 即泥灰岩或者角砾岩, 软硬岩交接处易卡钻, 反水也印证了前方的岩性组合情况, 存在溶蚀带或溶孔等。设计为 V 级围岩, 现场判定为 V 级围岩。

3.3 地质雷达法 (GPR)

地质雷达探测采用美国劳雷公司生产的 SIR-3000 型地质雷达, 运用 100 MHz 天线探测。记录时长 600 ns, 采样率 1024 Hz, 探测距离 30 m, 前后两次雷达重叠不小于 5 m。结合现场条件, 掌子面上布置两条测线, 测线一距地面高约 2 m, 从左到右采集数据, 测线二距地面高约 1.5 m, 从右向左采集数据。采用 RADAN7.0 专用处理软件, 处理图像见图 10。

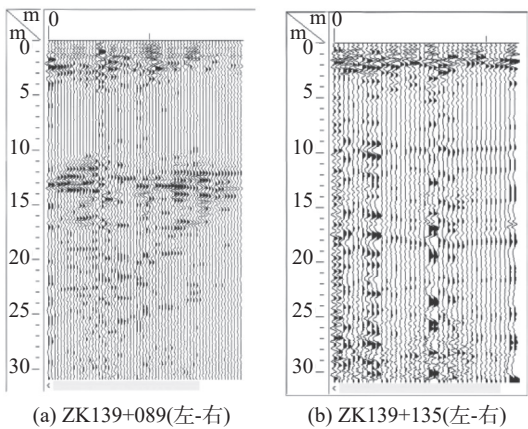


图10 地质雷达测试图像
Fig. 10 Radar test images of ZK139+089 (left-right) and ZK139+135 (left-right)

左线 ZK139+089—ZK139+059 段内电磁波反射信号为较均匀的中低频信号, 变化较快, 有规律, 同相轴较为连续, 波形较为均一, 信号振幅较强, 有二次或多次震荡。推断该段围岩为泥灰岩夹灰岩, 岩质软,

岩体破碎,完整性差,地下水较发育,层间结合差,稳定性差,前方 11~15 m 含软弱层或泥夹层。

左线 ZK139+135—ZK139+105 段内电磁波浅部反射密集信号频率低,中部波形较为均一,右侧强反射带同相轴错断、扭曲,振幅显著增强;深部反射复杂化,反映深部介质不均匀性增加。推断该段围岩为泥灰岩夹岩溶角砾岩,岩质软,完整性差,地下水极发育,溶蚀裂隙发育,岩体破碎,层间结合差,稳定性差。

3.4 地震波法

地震波法测试采用 TSP-RF 系统,硬件由地震信号采集器、地震信号记录器、检波器及震源等主机系统组成^[21],并辅以地质罗盘、地质锤、数码相机。采样段为 ZK139+104—ZK139+093 和 ZK139+093—ZK139+057。通过对纵波波速分布图(见图 11)、岩体破碎状况分布图(见图 12)和含水推断图(见图 13)

进行综合分析,推断该区段围岩完整性差,节理裂隙较发育,岩体较破碎,稳定性差,地下水弱发育。其中 ZK139+092—ZK139+088 段右侧、ZK139+077—ZK139+067 段中左侧反射信号强,推测该段岩质软弱,溶蚀裂隙较发育,层间结合差,稳定性差,开挖面拱部易失稳坍塌。

3.5 瞬变电磁法 (TEM)

瞬变电磁法探测采用 CUGTEM-GKPLUS 高精度瞬变电磁仪。沿掌子面布置 3 条测线,每条测线 9 个物理点,总计 27 个物理点。在掌子面方向设置移动发射接收线圈,形成探测面。其中 3 条测线剖面角度分别为顶板向上 30°、水平方向、底板向下 30°,测线探测范围为:横向-30°~+30°。

瞬变电磁法探测成果如图 14 所示。瞬变电磁测线底板和顶板方向在掌子面处均无低阻异常反映,

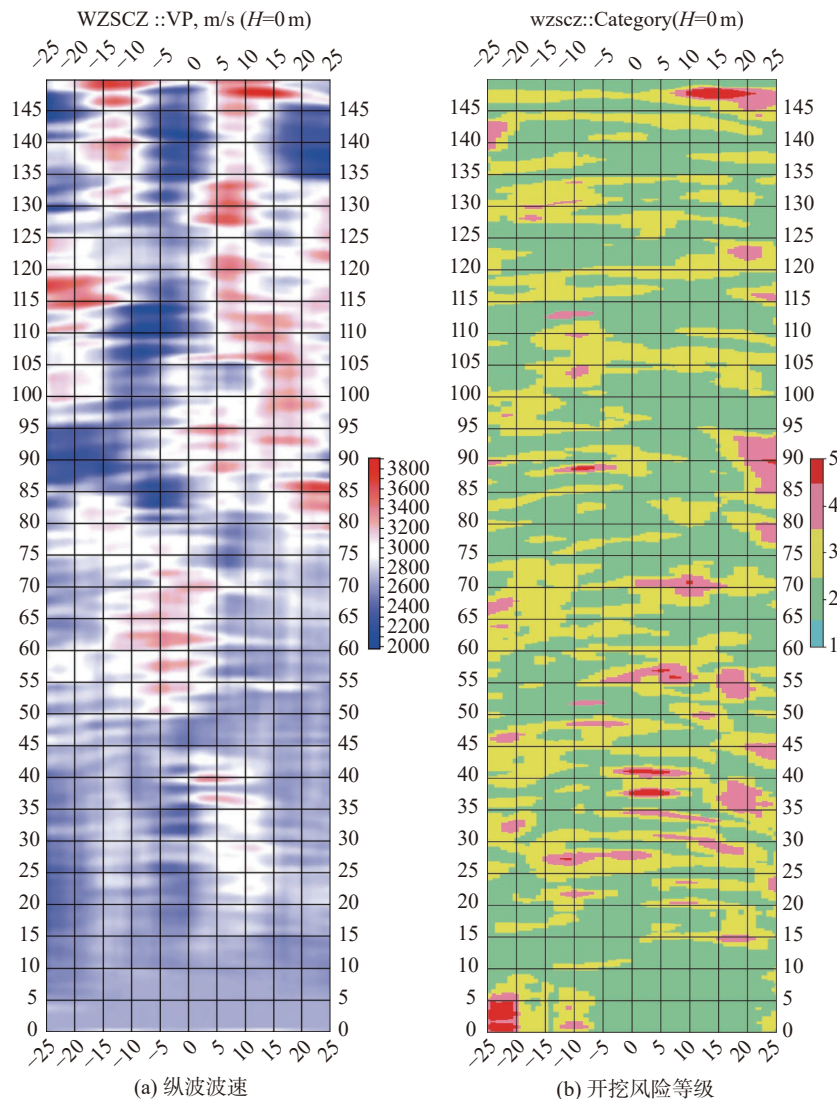


图 11 纵波波速及开挖风险等级分布图

Fig. 11 Distribution map of P-wave velocity and excavation risk level

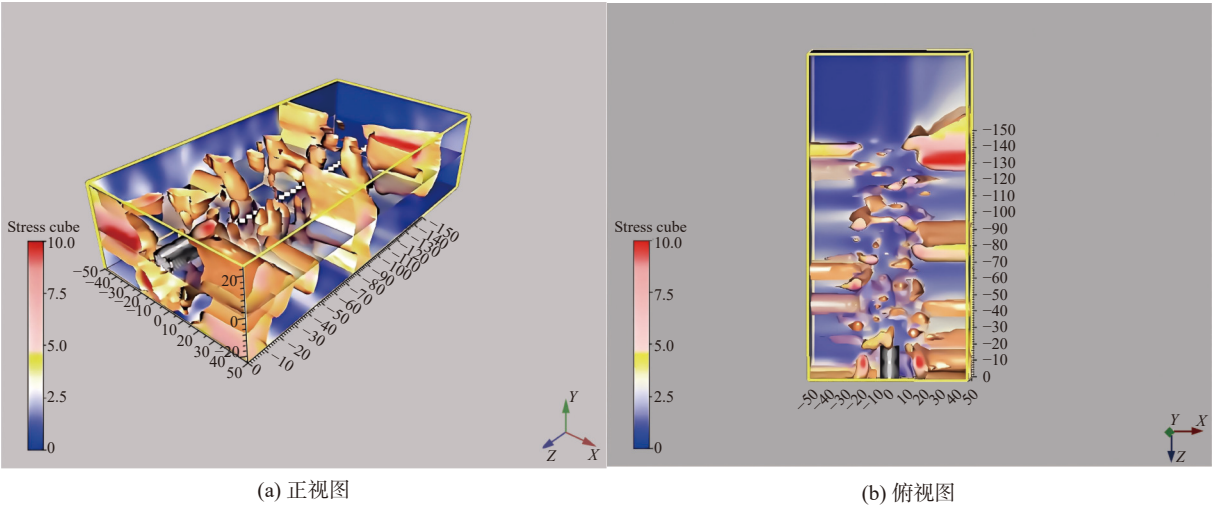


图 12 破碎三维图
Fig. 12 3D diagram of fractured structure

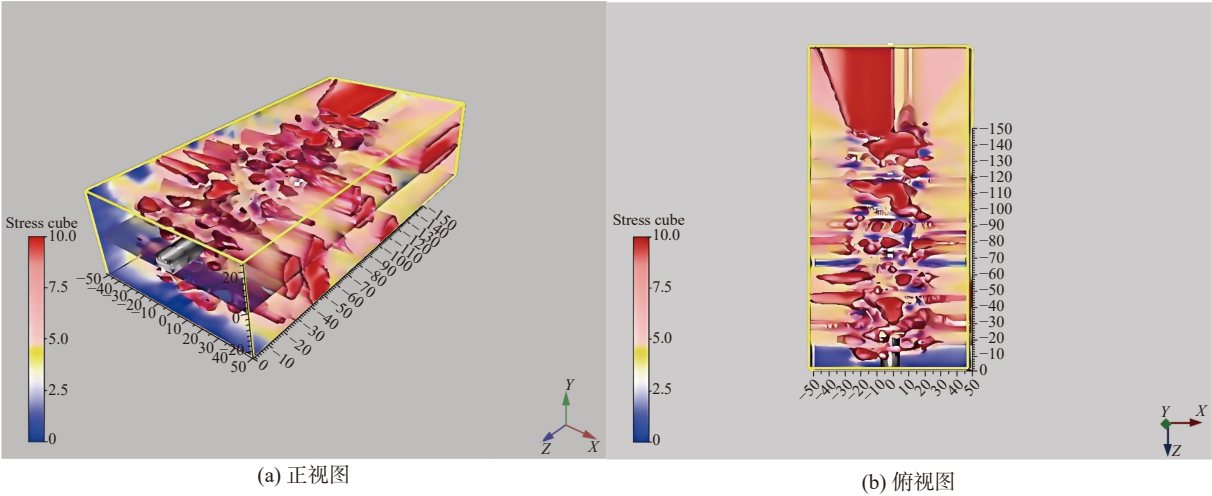


图 13 含水三维图
Fig. 13 3D diagram of water-bearing structure

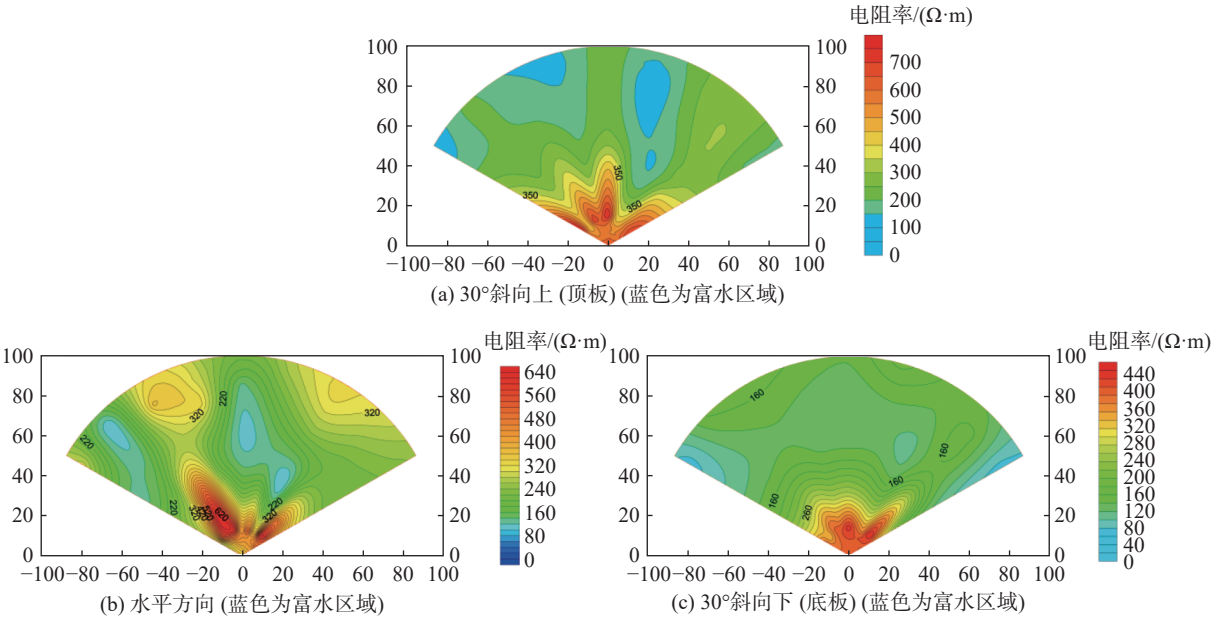


图 14 掌子面视电阻率断面扇形图
Fig. 14 Sector diagram of the apparent resistivity cross-section at the tunnel face

水平方向存在一处低阻异常反映,在顶板偏右 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、偏左 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 和水平方向正前方—偏右 30° 存在一定低阻异常反映,揭示掌子面前方围岩状态处于较破碎—一般破碎不等,且围岩富水性强。推断现状掌子面前方35 m范围内新开掌子面可能出现浸渗、滴水现象;65 m范围内新开掌子面岩层可能富水性增强,岩层稍变差,掌子面可能出现股状出水现象,有涌突水可能。

3.6 综合分析预报

据地质资料及掌子面地质素描,结合各预报方

法的推断,进行相应里程段围岩地质条件的综合分析和趋势分析,得出本段岩体破碎严重,自稳性极差,局部岩体剥离,掌子面可能出现涌状水流,拱顶水体呈淋雨状排泄等情况,如TSP法和TEM法在该里程段的部分区域有相应的探测情况反映。

表2为各超前地质预报组合分析与实际开挖情况对比情况,掌子面开挖验证情况见图15。

4 结论及展望

(1)隧道地质预报的各种方法都存在一定的局限性:超前水平钻探占用掌子面,影响工期,因不能全面

表2 各超前地质预报组合分析与实际开挖情况对比

Tab. 2 Comparison of combined analyses of various advanced geological prediction methods with actual excavation conditions

编号	设计方案及预测方法	预测地质情况	预报结论	组合分析判定	实际开挖情况	对比评价
1	设计方案	1. ZK139+115—ZK139+093为灰岩、泥灰岩、粉砂质泥岩;粉砂质泥岩呈紫色、紫红色,泥灰岩呈灰黄色,灰岩呈白灰色,均呈薄—中厚层状,层状砌体—碎裂结构; 2. ZK139+093—ZK139+073为岩溶角砾岩夹泥灰岩,灰、灰白、灰黄色,灰岩呈角砾状,含膏盐,溶蚀强烈,部分胶结,岩质软,部分并被黏土充填,存在溶隙、溶孔、溶蚀管道等溶蚀现象; 3. 局部存在溶蚀管道,隧道开挖过程中拱顶和侧壁稳定性低,易发生大型坍塌,有集中涌突水可能	设计为V级围岩	组合分析: 1. 掌子面ZK139+103围岩情况:岩体破碎严重,自稳性极差,局部剥离,掌子面出现涌状水流,拱顶为淋雨状。掌子面不良气体检测数据显示:瓦斯(浓度 $\leq 0.02\%$),无其它不良气体; 2. 据超前地质预报判断,参考地应力测试分析报告(本段埋深为950~959 m),并结合围岩判定描述的重要指标,隧道开挖过程中拱顶和侧壁稳定性低,易发生大型坍塌,有集中涌突水可能,建议增强支护参数施工	1.(ZK139+103—ZK139+83)围岩为灰岩、泥灰岩、粉砂质泥岩,岩质软,岩体破碎,完整性差,有溶蚀现象,地下水发育,拱顶至两侧拱腰呈淋雨状出水,掌子面有股状水流,层间结合差,稳定性差,左侧拱部掉块严重,有小型塌腔(环向长度约4 m,宽2 m,高2 m); 2.(ZK139+080—ZK139+078)围岩为灰岩、泥灰岩,岩质软,岩体破碎,完整性差,地下水发育,拱顶呈淋雨状出水,层间结合差,局部有黏土填充,稳定性差。有塌腔(环向长度约2.5 m,宽2 m,高2 m); 3.(ZK139+076—ZK139+073)围岩为灰岩、泥灰岩、岩溶角砾岩,岩质软,有一定的溶蚀现象、破碎,拱顶至两侧拱腰呈淋雨状出水,层间结合差,局部有黏土填充,稳定性差	基本吻合
2	钻探法	主要为泥灰岩夹角砾岩夹泥,含膏盐,岩质软—极软,岩体破碎,节理裂隙极发育,存在强烈溶蚀现象,部分被黏土充填,存在溶隙。隧道开挖过程中拱顶和侧壁稳定性低,易发生大型坍塌,地下水发育,有集中涌突水可能	建议按V级围岩适当增强支护参数			基本吻合
3	TSP法	据岩体破碎三维图、纵波波速分布图和含水三维图推断分析:ZK139+092—ZK139+088段右侧附近、ZK139+077—ZK139+067段中左附近应力反射信号强,推测岩质软弱,溶蚀裂隙较发育,层间结合差,岩体较破碎,稳定性差,开挖面拱部易失稳坍塌,地下水弱发育	建议按V级围岩	综合分析判定: 本段围岩为V级围岩,ZK139+103—ZK139+073段衬砌结构按Z5a型、超前支护按B型设计施工		基本吻合
4	GPR法	前方围岩为泥灰岩夹灰岩,岩质软,岩体破碎,完整性差,地下水较发育,层间结合差,稳定性差,部分含软弱层或泥夹层	建议按V级围岩			吻合
5	TEM法	前方围岩较破碎—一般破碎不等且富水性强。推断可能出现浸渗—滴水现象,65 m范围内掌子面岩层富水性增强,岩层逐渐变差,可能出现股状出水现象,有涌突水可能	建议按V级围岩			基本吻合

注:目标预报段左线ZK139+103—ZK139+073;围岩V级、衬砌结构Z5a型、超前支护B型。

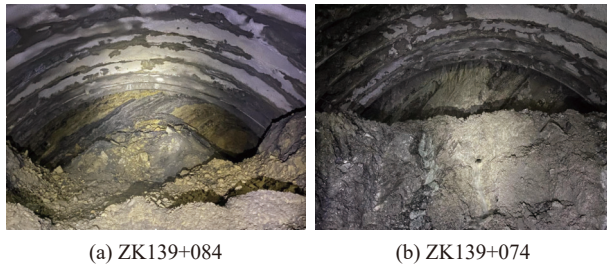


图 15 开挖后掌子面地质情况

Fig. 15 Geological conditions of the tunnel face after excavation

反映地质情况,需要其他物探手段辅助;地质雷达法工作时,易受到外部因素干扰,如作业面不平整、地下水影响等,检测时要做好数据修正,以提高分辨率;瞬变电磁法对前方富水地层有较好效果,但一维反演有局限性,同时分辨率有限,对复杂地质探测结果解释有难度和不确定性,应用方面较受局限;地震波法探测含水量敏感度低,左右检波器分析处理信号的对比差距较大。因此,对于复杂地质条件的隧道超前预报,需将工程地质分析与各种预报探测方法相结合,方能提高预测准确率。

(2)具体工程实践中,应将隧道超前地质预报与勘察设计文件相结合,进行隧道动态设计,使隧道施工在通过不良地质体时提前推断地质情况并制定针对性措施,有的放矢、因地制宜,以保障施工人员的安全和施工进度及质量。

(3)随着大数据、信息化、网络化的跨越式发展,特别是人工智能的兴起,超前地质预报及后期的地质灾害监控等技术将向大数据人工智能方向发展,并取得长足进步。

参 考 文 献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956. (QIAN Q H. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956. (in Chinese))
- [2] 雷盼盼, 王军伟, 史海智. 综合超前地质预报在天竺山一号岩溶隧道中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(6): 996-1005. (LEI P P, WANG J W, SHI H Z. Application of comprehensive advanced geological prediction method in karst tunnel of Tianzhushan No. 1[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(6): 996-1005. (in Chinese))
- [3] 雷 栋, 胡祥云. 地震层析成像方法综述[J]. 地震研究, 2020, 44(2): 227-234. (LEI D, HU X Y. A review of seismic tomography methods[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2006, 39(4): 227-234. (in Chinese))
- [4] 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. (LI S C, LIU B, SUN H F, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090-1113. (in Chinese))
- [5] 谷 松. 探地雷达技术在隧道施工超前地质预报的应用[J]. 地质装备, 2022, 23(5): 36-39. (GU S. Application of GPR in advanced geological forecast for tunnelling[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2022, 23(5): 36-39. (in Chinese))
- [6] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1297-1307. (LI S C, XUE Y G, ZHANG Q S, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1297-1307. (in Chinese))
- [7] 李天斌, 孟陆波, 朱 劲, 等. 隧道超前地质预报综合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2429-2436. (LI T B, MENG L B, ZHU J, et al. Comprehensive analysis method for advanced forecast of geology in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2429-2436. (in Chinese))
- [8] 邵珠山, 张鹏举, 张 喆, 等. 隧道施工超前地质预报研究进展[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 70-77, 85. (SHAO Z S, ZHANG P J, ZHANG Z, et al. Research progress of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(1): 70-77, 85. (in Chinese))
- [9] 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司. 隧道施工超前地质预报技术规程: T/CECS 616—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Powerchina Guiyang Engineering Corporation Limited. Technical specification for advance geological predication for tunnel construction: T/CECS 616—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese))
- [10] 高树全, 蒋良文, 牟元存, 等. 西南复杂艰险山区铁路隧道超前地质预报技术[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(2): 52-59. (GAO S Q, JIANG L W, MOU Y C, et al. Advanced geological forecasting techniques for railway tunnels in the complex and treacherous mountainous areas of southwest China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(2): 52-59. (in Chinese))

- [11] 贾 明, 庄 威, 孙晋哲. 某矿瞬变电磁探测实施方案研究 [J]. *山东煤炭科技*, 2014(2): 145-146, 149. (JIA M, ZHUANG W, SUN J Z. Research on some mine transient electromagnetic detection scheme[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2014(2): 145-146, 149. (in Chinese))
- [12] 任建伟, 谢雄刚, 左冉振. 基于瞬变电磁法的矿井水害探测技术应用 [J]. *煤矿开采*, 2014, 19(1): 17-20. (REN J W, XIE X G, ZUO R Z. Application of mine water exploration technology based on transient electromagnetic method[J]. *Coal Mining Technology*, 2014, 19(1): 17-20. (in Chinese))
- [13] 崔 涛, 李建雄, 张庆彬, 等. TGP206 地质超前预报在岩溶隧道施工中的应用 [J]. *矿业研究与开发*, 2011, 31(1): 29-32, 76. (CUI T, LI J X, ZHANG Q B, et al. Application of TGP206 Advanced geological forecast system in karst tunnel construction[J]. *Mining Research and Development*, 2011, 31(1): 29-32, 76. (in Chinese))
- [14] 吴星银. TGP206 型隧道地质超前预报仪在灵岩山隧道中的应用 [J]. *铁道建筑技术*, 2010(9): 102-103, 118. (WU X Y. Application of TGP206 type tunnel geological forecast instrument in Lingyan mountain tunnel[J]. *Railway Construction Technology*, 2010(9): 102-103, 118. (in Chinese))
- [15] 陈亚乾, 李 天, 普新凯. 综合地球物理方法在隧道塌方处置中的应用研究 [J]. *物探化探计算技术*, 2020, 42(5): 670-677. (CHEN Y Q, LI T, PU X K. Application of integrated geophysics in tunnel collapse treatment[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 42(5): 670-677. (in Chinese))
- [16] 李术才, 李树忱, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 217-225. (LI S C, LI S C, ZHANG Q S, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 217-225. (in Chinese))
- [17] 蒋小平, 张 军, 韩 正, 等. 长大山岭瓦斯隧道施工通风影响下瓦斯运移扩散规律探究 [J]. *中国公路*, 2022(4): 100-103. (JIANG X P, ZHANG Jun, HAN Z, et al. Investigation of gas transport and dispersion mechanisms in extended mountain tunnels during ventilated construction[J]. *China Highway*, 2022(4): 100-103. (in Chinese))
- [18] 王 涛. 聚能水压光面爆破技术在隧道施工中的应用 [J]. *四川建材*, 2019, 45(4): 94-95, 98. (WANG T. The application of energy-concentrated hydraulic smooth blasting technology in tunnel construction[J]. *Sichuan Building Materials*, 2019, 45(4): 94-95, 98. (in Chinese))
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范: JTG/T 3660—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specifications for construction of highway tunnel: JTG/T 3660—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))
- [20] 李万勇, 刘汉明, 唐 皓, 等. 复杂软弱围岩低瓦斯隧道大变形综合处置技术研究 [J]. *四川建材*, 2022, 48(10): 76-78, 81. (LI W Y, LIU H M, TANG H, et al. Research on comprehensive disposal technology for large deformation of complex weak surrounding rock low gas tunnel[J]. *Sichuan Building Materials*, 2022, 48(10): 76-78, 81. (in Chinese))
- [21] 温 辉. 基于三维超前地质预报的瓦斯隧道穿越破碎段施工技术 [J]. *铁道建筑技术*, 2022(9): 193-197. (WEN H. Construction technology of gas tunnel crossing broken section based on 3D advance geological forecast[J]. *Railway Construction Technology*, 2022(9): 193-197. (in Chinese))

收稿日期: 2025-05-09