

doi: 10.11720/wtyht.2021.1233

蔡盛.张吉怀铁路隧道超前预报技术应用研究[J].物探与化探,2021,45(5):1275-1280.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1233

Cai S.The research on the application of geological prediction technology to Zhangjihuai railway tunnel[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2021,45(5):1275-1280.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1233

张吉怀铁路隧道超前预报技术应用研究

蔡 盛

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063)

摘要:张吉怀铁路地质条件复杂,构造、岩溶发育,施工风险大。依托张吉怀铁路建设阐述了铁路隧道超前地质预报现场工作难点、预报原则、物探关键技术,总结了铁路隧道超前地质预报应用的成套技术与经验。具体实例表明:采用五步法进行超前预报的施工指导,利用地表勘察资料划分重点段落进行宏观控制;采用综合物探技术,长距离预报与短距离预报相结合,排除物探多解性;以超前钻探对物探异常进行验证,使预报工作形成闭环,有利于规避风险,减少误报错报。张吉怀铁路超前预报成套技术具有实用性与可行性,具有一定的推广价值。

关键词:地质预报;综合物探;构造;岩溶;铁路隧道

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)05-1275-06

0 引言

张吉怀铁路是湖南省西部快速铁路通道和环省快速铁路网的骨干线路,是一条精品黄金旅游路线,也是精准扶贫武陵山片区的重要基础设施,对湖南省西部扶贫开发具有重要意义。该铁路从在建黔张常铁路张家界西站引出,经永顺、古丈、吉首、凤凰、麻阳,接入怀化南站,正线长 247.5 km,隧道 123 座,其中一级风险隧道 8 座,穿越雪峰山脉、武陵山脉和沅麻盆地,地形地貌多变,是典型的山区铁路,特别是隧道工程地质及水文条件十分复杂,断层、溶洞、落水洞等广泛分布,易发生突水涌泥、表水枯竭、岩溶塌陷等地质灾害,一直冠有“宜万第二”的称呼。

由于张吉怀铁路复杂的地质条件和隧道施工风险,超前地质预报工作就显得至关重要。开工以来,建设单位多次组织各参建单位进行超前预报工作现场观摩,研讨研究,要求严格实施超前地质预报。铁四院作为设计单位和一级风险隧道的预报实施单位,积极响应建设单位号召,统筹规划、合理组织,整个施工过程中,多次准确预报重大风险异常,规避施工风险,积累了一套完整的技术应用经验。

1 铁路隧道超前预报的难点

物探方法在隧道中应用,与常规地面物探在均匀半空间的应用环境不一样,隧道施工中其巷道式空间使得超前预报的主要物探技术受到了很大的局限,这就形成了隧道内特殊的工程地球物理条件^[1]。主要体现在:隧道封闭结构使得任何物探方法的实施结果都是接收全空间的物理场信息;隧道内的钢筋混凝土、仰拱、台架、高压电等工程结构,对电磁类方法造成极大的干扰;隧道内施工震动造成地震类方法有效信号识别提取难;铁路隧道施工中超前预报的组织形式和时效要求极其苛刻。这些方面都会对隧道超前预报的成果准确性造成极大的影响。

2 铁路隧道超前预报实施原则

超前地质预报实施的原则是采用地质调查与勘探相结合、物探与钻探相结合、长距离与短距离相结合、地面与地下相结合的方法,并对各种方法预报结果综合分析,相互验证,提高预报准确性。

收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2021-05-12

基金项目: 住房和城乡建设部深地资源勘查开发项目“城市地下空间开发地下全要素信息精准探测技术与装备”(2019YFC0605101)

第一作者: 蔡盛(1986-),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事工程地球物理勘察的应用研究工作。

超前地质预报开始实施之前,需有充分的准备时间。超前预报的负责人宜为勘察阶段技术人员,更加了解现场地质情况。预报项目部成立后,应收集整理勘察资料,重新分析并划分重点段落。重点段落后期实施时应重点关注,动态调整预报方案,预报资料慎重解释。具体实施时,宜先采用长距离预报方法了解隧道的宏观地质情况;然后在异常地

段布置中短距离预报方法,进一步确定异常位置和规模;最后在物探异常段落进行超前钻探的验证,如物探异常得到验证,需进行施工预警。对于重大风险段落,需严格执行超前地质预报流程的五个阶段(五步法),如下表 1 所示,使整个预报过程形成闭环,才能最大程度降低风险。

表 1 超前地质预报流程的五个阶段
Table 1 Five stages of geological prediction process

| 步骤 | 方法 | 工作内容 | 作用 |
|------|--------|---------------------------------------|------------------------------|
| 第一阶段 | 资料收集整理 | 施工前期资料收集,地勘资料再分析 | 理解隧道宏观地质情况 |
| 第二阶段 | 划分重点段落 | 结合第一阶段综合资料,划分风险等级,确定预报方案 | 明确预报工作重点,重点段落加强预报 |
| 第三阶段 | 长距离预报 | 通过 TSP 对 100~150 m 以内的大型构造、大型溶洞的识别与定位 | 对前方围岩进行宏观评价,为进一步探测提供靶区 |
| 第四阶段 | 中短距离预报 | 在 TSP 预报的异常段,布置中短距离探测方法 | 裂隙水探测采用瞬变电磁,其他异常体采用探地雷达进一步定位 |
| 第五阶段 | 超前钻探 | 超前水平钻孔对物探异常进行验证 | 钻探验证的异常进行施工预警 |

物探作为地质预报重要的组成部分,要求采用综合物探技术,有利于提高物探结果的可靠性^[2-7],减少物探多解性对预报结果的影响。综合物探技术包括地表物探和洞内物探,地表物探主要为勘察阶段所做工作,为洞内物探提供靶区,主要包括大地电磁、高密度电法、可控源电磁法、地震勘探等物探技术。而洞内物探主要是弹性波反射法、瞬变电磁法、探地雷达法等物探方法,洞内物探技术应合理搭配,长短结合,相互验证。

隙水,宜在富水段落布置^[13-14]。其技术要点有:①在数据采集时,应把车辆、架梁尽量远移,车辆应熄火,现场不允许有电焊等带电作业。②宜进行扇形扫面,进行三维数据采集,并注意探测剖面角度的准确性。③详细记录隧道钢拱架铺设情况、位置等信息,来辅助成果解释。

3 铁路隧道超前预报物探技术

3.3 探地雷达法关键技术

3.1 弹性波反射法关键技术

探地雷达法作为有效的短距离超前预报方法,能够对地质异常进行较为精确的定位^[15-16]。然而,在隧道中探地雷达的数据采集信号包含了许多干扰波,主要为水平层状强振幅反射波,即包括隧道侧壁、拱顶、铁轨、排水管等沿隧道纵向延伸的金属、非金属线状结构物等,需要采用结构扫描处理,提高图像信噪比。在数据采集过程中,可对具有相同环境性质的里程段,首先进行一次背景采集,而后在正式数据采集过程中,采用“背景去除”予以消除。在数据采集完成后需详细记录现场情况,如台车离掌子面的准确距离,在异常识别时通过电磁波在空气中的速度换算距离,来估算哪些波组属于台车产生的干扰异常。

弹性波反射法为隧道长距离预报的主要方法手段,能够对掌子面前方构造性异常进行有效探测^[8-12]。其最关键技术在于数据采集时采用有效的方法压制施工现场震动干扰,提高数据的信噪比。主要措施在于:①炮孔应垂直隧道壁向下倾斜,放炮前需往炮孔灌水,如现场灌水困难,应采用锚固剂将炮孔封堵严实,有利于能量向围岩中传播;②接收检波器优先采用加速度检波器,有利于接收更丰富的信号,孔口需用黄泥或其他物质封堵,以减少声波的进入;③现场环境复杂,应加强沟通创造条件,在炮孔激发时现场需停止施工,为信号接收创造有效窗口。

4 工程实例

3.2 瞬变电磁法关键技术

4.1 张吉怀铁路新华山隧道超前预报

隧道瞬变电磁法是一种非接触式探测技术,施工效率高,现场操作性良好,主要用于探测岩溶和裂

4.1.1 工程概况

拟建新华山隧道位于湖南省张家界市和湘西州永顺县境内,线路近 WS 走向(约 226°)。场区以构造侵蚀低山为主,地形陡峭,沟谷狭长,多呈“V”字

型。该区属于大庸断陷盆地构造变形区,区内断层和褶皱均较发育,其中 NEE 向展布的加里东期和燕山期构造行迹组成了本区的主要构造格架。燕山期形变主要继承了前期构造变形,使构造行迹具有多期次活动、多种性质的特点。线位穿越张家界—古丈区域平移断层及其次生断层之间。

根据区域地质资料及沿线实际调查,新华山隧道洞身穿越大小断层共 8 条,断层走向以 SW 向较多,近 NW 向较少,性质既有脆性挤压特征,又有拉伸断裂特征。构造发育地段,可能出现涌水涌泥,施工安全风险极大。前期勘察阶段,已经用大地电磁法确定了构造的具体位置,并通过钻探进行了验证。地勘资料为洞内物探提供重大风险段靶区,通过分析研究确定划分后坪斜井里程 150~50 为重大风险段落,其受构造 F_1 影响,可能出现涌水涌泥,进而确定洞内采用弹性波反射法和瞬变电磁法进行综合物探法预报。

4.1.2 预报成果分析

根据现场安排,在掌子面掘进至里程 146 时进行弹性波反射法预报,采用 TSP303 系统现场作业。隧道设计资料显示,在预报里程范围内隧洞埋深 120~175 m,围岩级别为 IV 级—III 级,岩性为白云岩,灰白色、灰褐色,隐晶质结构,薄—中厚层状构造,弱风化,岩质硬,节理裂隙较发育,岩体较破碎。现场掌子面滴水,拱顶轻微掉块。

根据图 1 TSP303 系统预报成果 2D 视图、图 2 TSP303 系统岩体物性参数 2D 曲线综合分析,在 102~67 里程段纵、横波速度降低,反射界面较密集,推测该段围岩较前段趋差,节理裂隙发育,岩体破

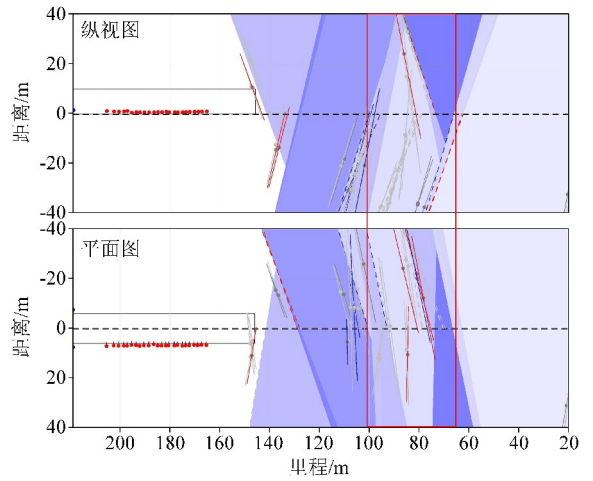


图 1 TSP303 系统预报成果 2D 视图

Fig.1 2D view of prediction result of TSP303 system

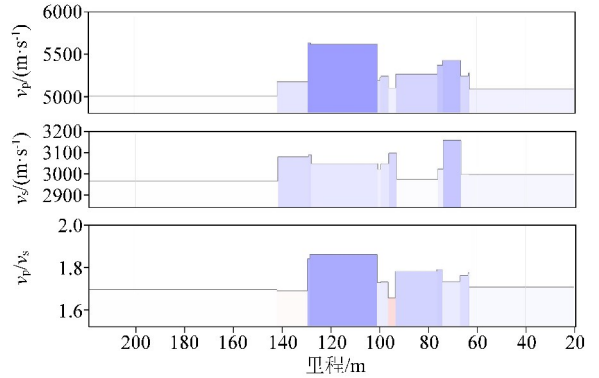


图 2 TSP303 系统岩体物性参数 2D 曲线

Fig.2 2D curves of rock property of TSP303 system

碎,推测为断层 F_1 影响带。为了探明富水情况,进而在掌子面 110 进行瞬变电磁探测,其探测成果如图 3 所示,结果表明,顺隧道掘进方向 25~40 m (里程 85~70) 区段存在相对较明显的低阻异常

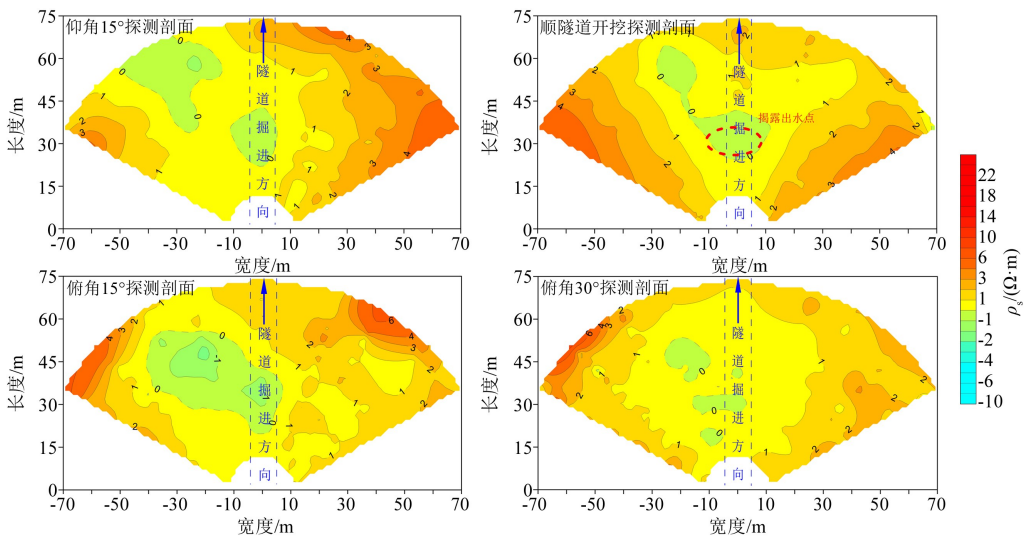


图 3 瞬变电磁法视异常拟断面成果

Fig.3 The inversion apparent resistivity profiles of TEM

区,异常主要集中在待掘隧道前方该区段的左侧 20~右侧 5 m、顶部 10 m~底部 15 m 范围的局部区域。依据各个断面异常图位置关系,异常范围在空间位置上部分重叠,该掌子面前方 25~40 m 范围的低阻异常区,推测为该区段节理裂隙发育,围岩破碎,有一定程度富含水性,中等程度富水。而后实施超前水平钻,钻孔冒水,随着钻孔深度增加越来越大,钻至里程 80 时,钻孔水量如见图 4。

4.2 张吉怀铁路永顺隧道超前预报

4.2.1 工程概况

拟建永顺隧道位于湖南省湘西州永顺县芙蓉镇、小溪镇境内,线路为 SW 走向。场区属构造溶蚀

低山地貌,地势陡峭。隧道洞身主体构造为松柏场向斜,走向为 NE—SW 向,其核部岩层为奥陶系灰岩,往两翼依次为寒武系至震旦系的灰岩、碎屑岩地层,隧道穿行于向斜南东翼,主要位于寒武系地层中,易遭遇岩溶及岩溶水的危害,尤其是寒武系上统岩性较纯,岩溶强烈发育,施工风险高。

通过地质调查,发现线路附近有大量地表岩溶洼地、落水洞,有的已经形成暗河通道,如图 5。而地表物探高频大地电磁勘探对区域岩溶进行了宏观的评价,并确定风险靶区。据此把永顺隧道出口 68050~67825 段定为高风险岩溶发育区,采用弹性波反射法和地质雷达法进行综合物探预报。

4.2.2 预报成果分析

根据现场安排,在掌子面掘进至 67964 时进行弹性波反射法预报,采用 TETSP 系统进行现场作业。掌子面揭示为灰岩,青灰色,弱风化,节理裂隙发育,方解石充填,岩体较为破碎,掌子面较干燥。TETSP 系统反射层位及参数分布如图 6 所示,据此推断,在 67925~67885 段纵横波速度值有较大的起伏变化,局部呈明显相对低速,同时此段反射层位图上强反射界面极为密集,推测此段岩溶发育。为了更进一步确定异常具体位置,在掌子面 67922 进行探地雷达法预报,波形成果如图 7 所示。据此推断,在掌子面前方 8~19 m 内(67914~67903 段)雷达电磁波反射信号极为强烈,局部位置呈弧形反射,推测该段为溶洞发育区,溶洞最大处覆盖整个掌子面;在掌子面前方 19~30 m 内(67903~67892 段)雷达电磁波呈大面积强反射状,根据现场记录台车离掌子面 46 m,电磁波在隧道空腔中传播速度 3×10^8 m/s,



图 4 掌子面涌水现场照片

Fig.4 Photos of water gushing in the face of the tunnel

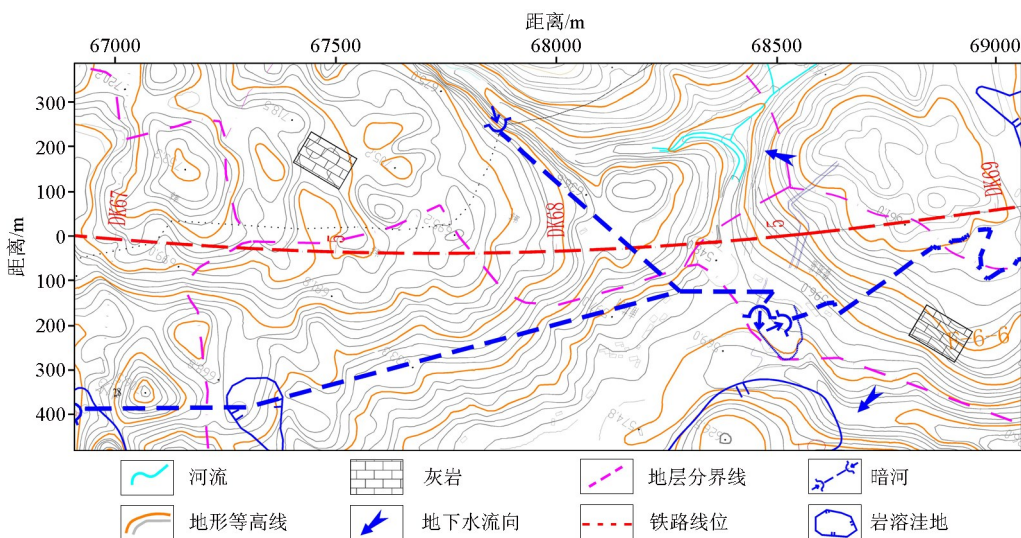


图 5 永顺隧道地调资料显示岩溶通道发育

Fig.5 The development of karst of Yongshun tunnel

确认该异常系施工台车干扰所致。由于台车干扰,在雷达剖面上无法辨识岩溶异常的底界面。之后进行超前水平钻,钻探资料显示在 67913 时钻杆突进,循环水量减少,异常为溶洞,无填充。至此物探异常得到验证,预报项目部向建设单位和施工单位进行施工预警。隧道施工至里程 67914 时,开始揭示溶洞,最终溶洞形态如图 8 所示。

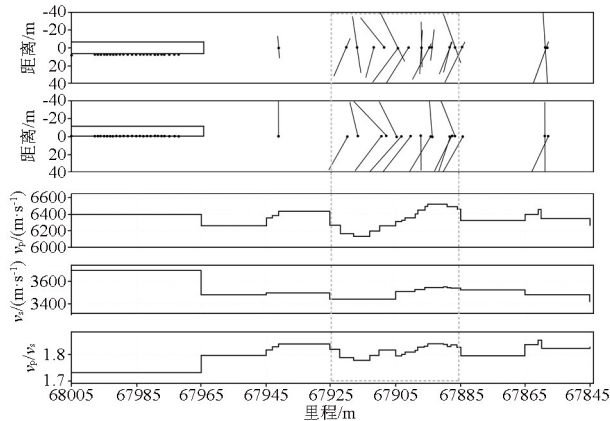


图 6 TETSP 系统反射层位及参数分布

Fig.6 The prediction result and rock property of TETSP system

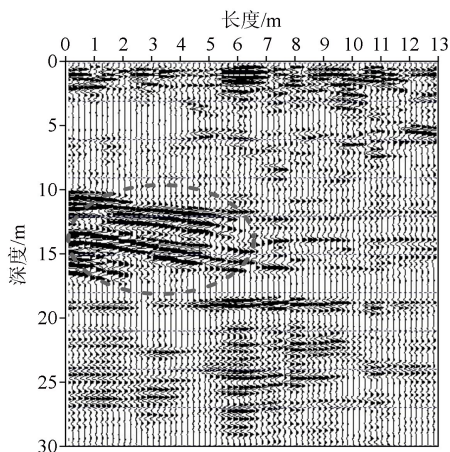


图 7 地质雷达波形成果

Fig.7 The waveform result of GPR

5 结论

1) 隧道超前预报以物探方法为主,对于重大风险段,严格执行五步法预报显得尤为重要。

2) 隧道超前预报物探方法需采用长距离与短距离相结合、地面与地下相结合的综合勘探,多种方法相互补充,可提高超前地质预报的可靠性与准确性。

3) 需重视对地表资料的收集与利用,地表勘察资料能够对地下地质异常进行预测圈定,提供洞内

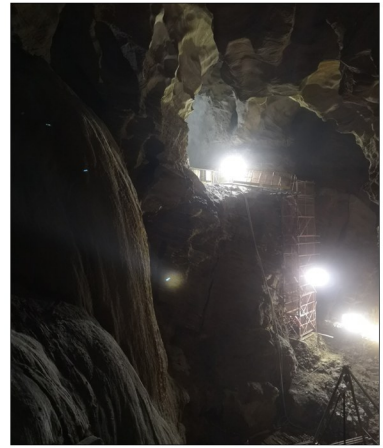


图 8 永顺隧道揭示的溶洞

Fig.8 The exposed karst cave of Yongshun tunnel

物探的重大风险靶区。

4) 弹性波反射法作为主要的长距离预报方法,现场作业时需控制施工干扰源,提高数据信噪比,方可有效对掌子面前方构造型异常进行宏观评价。

5) 瞬变电磁法可设计三维瞬变电磁超前数据采集方法,可从更广阔的空间获得电性参数空间分布情况,而且对含水岩溶的探测优于其他预报方法。

6) 地质雷达作为有效的短距离探测方法,探测精度高,适合在长距离预报方法的异常地段进行布置,但需注意排除干扰异常。

7) 超前水平钻作为超前预报中的重要环节,在重大物探异常处需严格实施,验证物探异常,减少误报、错报,提高预报的准确性。

参考文献 (References):

- [1] 崔德海,杨庆波.宜万铁路隧底岩溶探查物探技术应用研究[J].铁路工程学报,2019,125(2):80-84.
Cui D H, Yang Q P. Applicable study of geophysical exploration technology for Karst under tunnel on Yichang-Wanzhou Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 125(2): 80-84.
- [2] 戴前伟,王鹏飞,冯德山,等.综合物探方法在隧道掌子面超前地质预报中的应用[J].工程勘察,2012,40(8):84-88.
Dai Q W, Wang P F, Feng D S. Application of integrated geophysical prospecting method in the leading geological forecast of tunnel faces [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(8): 84-88.
- [3] 叶英.新型隧道超前地质预报方法与技术研究[J].铁道工程学报,2009,132(132):59-63.
Ye Y. Research on the method and technology for geological forecast in advance for new type tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 132(132): 59-63.
- [4] 赵永贵.国内外隧道超前预报技术评析与推介[J].地球物理学进展,2007,22(4):1344-1352.
Zhao Y G. Analysis and recommendation of tunnel prediction tech-

- niques at home and abroad [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22 (4): 1344 - 1352.
- [5] 沈进喜, 雪飞胜, 邹伟. 综合物探技术在岩溶隧道中的应用[J]. *长沙铁道学院学报: 社会科学版*, 2012, 13(1): 212 - 215.
Shen J X, Xue F S, Zou W. Application of comprehensive geophysical exploration technology in Karst Tunnel [J]. *Journal of Changsha Railway University: Social Science Edition*, 2012, 13(1): 212 - 215.
- [6] 谭天元, 叶勇, 张伟. 隧道工程超前地质预报中的综合物探技术[J]. *贵州水力发电*, 2006, 20(6): 13 - 18.
Tan T Y, Ye Y, Zhang W. Comprehensive physical detecting technology in geological over-forecast of tunnel engineering [J]. *Guizhou Water Power*, 2006, 20(6): 13 - 18.
- [7] 陈德君, 王树栋, 王光权. 综合物探方法在隧道超前地质预报中的应用[J]. *铁道勘察*, 2017, 43(5): 18 - 22.
Chen D J, Wang S D, Wang G Q. Application of comprehensive geophysical prospecting method in advanced geological prediction of tunnel [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2017, 43(5): 18 - 22.
- [8] 张杨, 杨君, 周黎明, 等. TSP 在隧道工程施工中的常见干扰和对岩体裂隙水及软弱夹层等的预报研究[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(2): 892 - 899.
Zhang Y, Yang J, Zhou L M, et al. Common interference and the prediction of rock fissure water and weak interlayer in tunnel construction using TSP [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(2): 892 - 899.
- [9] 戴前伟, 何刚, 冯德山. TSP-203 在隧道超前预报中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(2): 460 - 464.
Dai Q W, He G, Feng D S. Application of the TSP-203 system in geological advanced prediction of tunnel [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(2): 460 - 464.
- [10] 付代光, 周黎明, 肖国强, 等. TSP 预报隧道不良地质体应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(1): 417 - 426.
Dai F G, Zhou L M, Xiao G Q, et al. Forecast defective geological bodies in tunnel by TSP [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(1): 417 - 426.
- [11] 舒森. 如何提高 TSP203 系统在实际应用中的准确性[J]. *物探与化探*, 2013, 37(5): 710 - 714.
Shu S. A discussion on the improvement of the application accuracy of the TSP203 system [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(5): 710 - 714.
- [12] 李兆龙. TSP203 影响探测结果的若干问题探讨[J]. *物探与化探*, 2015, 39(5): 1085 - 1088.
Li Z L. TSP203 A tentative discussion on some problems influencing the results of TSP203 detection [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(5): 1085 - 1088.
- [13] 舒森, 王树栋, 李广, 等. 瞬变电磁法指导复杂地质隧道超前水平钻探应用[J]. *物探与化探*, 2018, 42(6): 1311 - 1316.
Shu S, Wang S D, Li G, et al. The application of TEM to guiding advance exploration drilling of complex geological tunnel [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(6): 1311 - 1316.
- [14] 范涛. TEM 虚拟波场三维连续速度分析及其在隧道超前预报中的应用[J]. *物探与化探*, 2011, 35(2): 243 - 245.
Fan T. A 3D continuous velocity analysis of TEM fictitious wavefield and its application to tunnel advanced prediction [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(2): 243 - 245.
- [15] 范占锋, 李天斌, 孟陆波. 探地雷达在公路隧道超前地质预报中的应用[J]. *物探与化探*, 2010, 34(1): 119 - 122.
Fan Z F, Li T B, Meng L B. Advanced geological forecast of application of GPR in road tunnel [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(1): 119 - 122.
- [16] 邓国文, 王齐仁, 廖建平, 等. 隧道不良地质现象的探地雷达正演模拟与超前探测[J]. *物探与化探*, 2015, 39(3): 651 - 656.
Deng G W, Wang Q R, Liao J P, et al. Forward modeling and advanced detection of radar in adverse geological phenomena tunnel [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(3): 651 - 656.

The research on the application of geological prediction technology to Zhangjihuai railway tunnel

CAI Sheng

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The geological conditions of Zhangjihuai railway is complex, the structure and karst are extensively developed, and hence the risk of construction is high. Based on the construction of Zhangjihuai railway, this paper expounds the difficulties, prediction principles and key geophysical techniques of the railway tunnel geological prediction, and summarizes a set of technologies for the railway tunnel geological prediction. The practical examples show that the five-step method is useful in geological prediction, the surface exploration data are important for dividing the key sections for macroscopic control, the long-distance prediction and short-distance prediction of geophysical exploration technology should be used together, and the advance drilling must be used to verify the geophysical exploration anomalies, so that the prediction work can be a closed-loop, which is conducive to avoiding risks and reducing false reports. The whole set of advanced forecast technologies of Zhangjihuai railway is feasible and useful, which is worthy of spreading.

Key words: geological prediction; comprehensive geophysical prospecting; structure; karst; railway tunnel

(本文编辑: 叶佩)