

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003021

鸿图嶂隧道突涌水预测及防治措施

罗依珍¹, 成国文², 尹利君¹, 邓皇适³, 谭 宁¹, 刘真真¹

(1. 广东省有色矿山地质灾害防治中心, 广东 广州 510080; 2. 广东省南粤交通大丰华高速公路管理中心, 广东 梅州 514300; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 预测复杂地质条件下深埋隧道施工掌子面前方水文特征对保障施工安全有着极为关键的作用。以广东省鸿图嶂隧道预测及防治隧道涌突水为例, 将可控源音频大地电磁测深法应用于隧道开挖区域水文特征调查, 确定可能发生的涌突水区域, 并采用全断面超前帷幕注浆的方式进行防治。研究表明: 可控源音频大地电磁法探测深度较大、抗干扰能力强、横向分辨率高。应用此方法预测到未来待施工的区段有 5 处存在较大涌突水可能, 开挖结果显示可控源音频大地电磁探测很好地还原了埋深超过 700 m 的场地实际情况, 解决了前期工作中其他技术方法不能很好地对断层的深部空间形态及其富水情况等特征进行准确判断的问题。针对探测结果和开挖情况, 采用全断面超前帷幕注浆堵水方案对断层裂隙进行了有效封闭, 达到了安全掘进和限量排放水的目的, 从而降低了因隧道涌突水造成的不必要损失。这一方法的实践应用为隧道突涌水的预测做了很好的验证, 并为相应的灾害防治提供了技术支撑。

关键词: 涌突水预测; 可控源音频大地电磁法; 涌突水防治; 超前帷幕注浆

中图分类号: U457.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0064-09

Prediction and prevention of sudden water gushing in the Hongtuzhang tunnel

LUO Yizhen¹, CHENG Guowen², YIN Lijun¹, DENG Huangshi³, TAN Ning¹, LIU Zhenzhen¹

(1. Guangdong Nonferrous Mining Geological Disaster and Control Center, Guangzhou, Guangdong 510080, China; 2. Dafenghua Expressway Management Center of South Guangdong Communications, Meizhou, Guangdong 514300, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: Prediction of hydrogeological conditions in front of the palm face in the construction of deep-buried tunnels under complex geological conditions is extremely critical to ensuring the construction safety. Previous works in the study site revealed that the traditional investigation methods cannot describe the geological and hydrogeological characteristics very well and have big deviation from the realities, causing unpredicted tunnel water inrush during the construction. To better predict the geological and hydrogeologic situation in the deep-buried tunnel and determine the possible flood water inrush area, we applied the controllable source audio magnetotelluric method in the Hongtuzhang tunnel construction in Guangdong province. The results show that this new method can better determine the true geological and hydrogeologic condition in the deep-buried tunnel, and match the actual excavation results. Especially this method predicted a potential gushing water inrush point, which was proved to have a maximum gushing water amount of 2 300 m³/h. Based on this detailed founding, we used the advance curtain grouting method to effectively seal the corresponding fault, which limits the water outflow and makes the excavation process in safe. Application of this method is a good

收稿日期: 2020-03-15; 修订日期: 2020-05-14

基金项目: 鸿图嶂特长隧道绿色建造关键技术研究

第一作者: 罗依珍(1965-), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查及地质灾害治理研究。E-mail:154885409@qq.com

通讯作者: 尹利君(1965-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查及水文地质研究。E-mail:455078211@qq.com

test example for the prediction of tunnel water gushing, and can provide a better technology backup for the prevention of related geologic hazard.

Keywords: water inrush prediction; magnetotelluric sounding; water inrush prevention; advanced curtain grouting

隧道涌突水问题是目前超深埋、超长隧道建设施工中最具危害性的地质灾害之一^[1-2],不仅严重威胁隧道施工安全,还可能对周边水资源环境造成极大影响。大多数山岭隧道由于岩体地质及地形条件的复杂性,导致常规勘查手段的前期勘察结果与后期施工情况存在较大的误差。因此,在施工过程中,需要同步开展超前或补充勘探,提前预测掌子面前方的水文特征,保障后续施工安全进行,减少隧道突涌水灾害的发生。

目前常用的隧道涌突水勘察方法有浅层地震折射波法、高密度电阻率法、直流电测深法等,这些方法在浅埋隧道勘察中取得了很好的效果^[3-9]。国内学者在涌突水预测研究方面有很多的研究成果,例如王应吉等^[10]采用核磁共振法对坑道中核磁激发场进行研究,预测掌子面前方的水文特征;李勇桥等^[11]采用高密度电法对矿井断层富水性进行探测;薛国强等^[12]介绍了一种瞬变电磁隧道超前预报技术,很好的预测了隧道前方水文地质特征。近年来,随着算法的发展,很多学者采用数学统计方法对隧道前方涌突水风险进行分析,杨卓等^[13]基于BP神经网络方法构建了岩溶隧道突涌水风险评估模型,结合超前预测提出了合理的支护方案,避免了隧道突涌水事故;袁青等^[14]基于优化FAHP-TOPSIS法对隧道断层涌水进行预测,结果表明预测误差较小,能满足工程准确预测精度要求;张凯等^[15]基于可拓理论,建立了岩溶区隧道涌水风险的可拓评估模型,其在工程中的评价结果与实际预测吻合较好。冯宝俊等^[16]为提高预测准确性,提出一种基于粒子群算法优化的支持向量机(PSO—SVM)建立隧道水砂突涌量预测模型,对该隧道水砂突涌量进行预测,结果与实际突涌量一致,证实综合粒子群算法和支持向量机优势的PSO—SVM方法预测精度较高。

随着经济快速发展以及隧道施工技术、施工工艺不断提高,超深、超长、超大隧道的工程也越来越多,特别是高山区深大断裂带、地下富水体、火山杂岩体等一系列构造、岩性复杂地区,地质勘察难度也随之变大。通过传统技术方法、手段获取的勘察资料已不能满足实际设计和施工的需要,勘察结果存在一定的模糊性和不确定性^[17-20]。其突出表现在不能有效查明超深

超长隧道后续建设中可能遇见的各种突发的系列地质问题(如涌水量、断层发育情况等),前期地质勘察成果如果与实际情况存在较大的差异,后续的隧道施工就会存在不可掌控的安全隐患。因此,准确分析隧址区水文地质条件,加强涌水补给来源的研究,对预防超深隧道涌突水灾害及隧道的安全运营具有重要的意义^[21-22]。

在建鸿图嶂隧道位于大(埔)丰(顺)(五)华高速公路丰顺至五华段,横穿八乡山,进口端位于广东省丰顺县汤西镇,出口端位于五华县郭田镇,隧道轴线方向约285°,呈NW—SE向展布。采用分离式双向四车道设计,其中左线全长6 336 m,右线全长6 350 m,最大埋深约740 m,为典型的超深埋特长隧道^[23]。隧道施工前期开展了遥感解译、大比例尺工程地质调绘、大量浅钻及少量深钻等工程地质勘察,并进行了专项水文地质研究。前期工作对隧址区水文地质、工程地质采用常规技术手段进行了较详细的论证,基本查明了隧址区浅部地质岩性、断层构造及岩浆岩的分布特征,概略了解了深部地质岩性。然而对本区莲花山深大断裂构造、侵入岩接触带构造的空间形态及其富水性研究较少,工作过多地侧重了浅部地质。导致勘察结果与隧道实际情况(构造、水文)差异较大,施工中多次遭遇了远超预期的涌突水灾害,给施工人员的安全及施工进度造成了极大影响。在此背景下,纠正前期工作存在的问题,查明鸿图嶂隧道涌突水的补给来源及途径,有效指导施工设计,成为保证隧道施工安全,控制隧道建设成本的关键^[24-25]。

为了查明引起鸿图嶂隧道涌突水灾害形成的地质背景,本文在全面、系统分析研究前期信息的基础上,采用可控源音频大地电磁法,辅以隧道地质编录、水文地质监测等手段,对前期勘查存疑结论开展二次补充勘查工作以指导后续施工。通过施工前后信息比对,进一步明晰与涌突水有关的断层及岩性条件,更加准确地预测断层构造型涌突水灾害,为安全施工准备提供预警,提前做好防治方案,并在相应的区域开展注浆堵水工作,以保障后期施工安全顺利进行。

1 工程地质概况及涌突水情况

1.1 工程地质概况

结合补充地质测绘和前期勘察结果可知,隧址区总体处于东、西莲花山断裂带之间构造隆起部位,穿越花岗岩与次火山岩接触带。该接触带呈 NNE-NE 走向,东侧岩性为侏罗系中上统高基坪群($J_{2,3}gJ$)流纹质次火山熔岩及(次)流纹斑岩,西侧为晚白垩系二长花岗岩($\eta\gamma K_2$),两期花岗岩约在 K94+500 处呈迭加侵入接触关系,靠近出口一端为晚侏罗系二长花岗岩($\eta\gamma J_3$),见图 1。

受北东向莲花山断裂影响,隧址区内断层构造发育,走向以 NE 向为主,其次为 NW 向及近 EW 向。NE 向断层在遥感影像上呈线状、束状分布,地貌特征为沟壑、陡崖,沿 $220^\circ \sim 250^\circ$ 走向延伸 1 000 ~ 3 000 m,斜切隧道轴线,多属于莲花山断裂带相平行的束状断裂,为本区域主要的控水导水构造。隧道 K91+186 ~ 340 区段已揭露 5 条张性(宽 15 ~ 30 cm)、产状相近($230^\circ \sim 250^\circ \angle 75^\circ \sim 80^\circ$)的小型平行断层(F1、F2、F3、F4、F5)。其中 F1 断层两侧岩脉(石英脉、二长斑岩脉)发育、节理裂隙密集(图 2b)。NW 向及 EW 向断层主要发育于接触带西侧,规模相对较小,为与莲花山断裂有关的次级构造,推测发育深度浅,富水性较差。

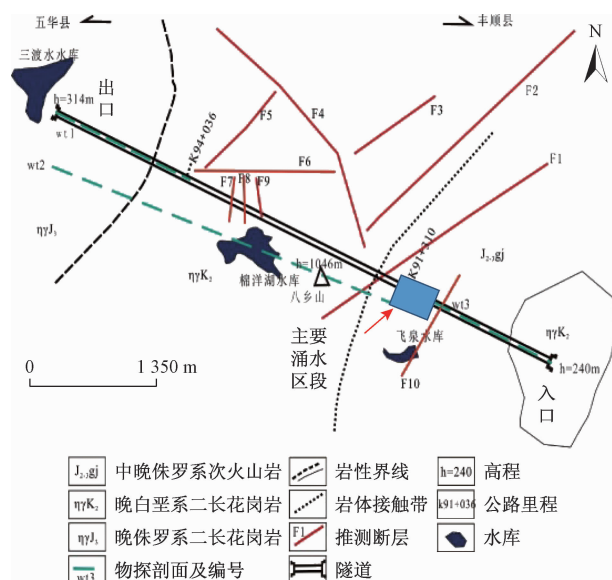


图 1 鸿图嶂隧道地质略图

Fig. 1 Simplified geological map of the Hongtuzhang Tunnel

1.2 涌突水特征

根据井下水文地质编录,涌水特征大致如下:

(1)接触带东侧,入口至 K90+160 段,为斑状花岗岩,岩石较完整,局部发育小断层。洞口测得最大涌水量为 $86 \text{ m}^3/\text{h}$,涌水主要呈小规模淋雨状、滴雨状,局部呈线状由裂隙涌出。K90+160 ~ K91+186 段,岩性为次流纹斑岩,岩石较完整,涌水仅见于部分裂隙,呈线状淋雨状,测得最大涌水量 $153 \text{ m}^3/\text{h}$ 。K91+186 ~ K91+340 段是主要的涌突水区段,岩性以流纹质次火山熔岩为主,其次为后期侵入的二长斑岩脉、石英岩脉(图 2a)。掌子面揭穿的 5 条北东向断层及两侧裂隙是主要的涌水部位。涌水特点呈股状,个别张性断层呈管状涌出。超前探水钻孔显示水压极大,水流最大喷射距离 12 m,入口左、右洞最大总流量 $3\,997 \text{ m}^3/\text{h}$,且衰减最长超过 30 d,为目前国内隧道之罕见。涌水量与距离断层带、裂隙发育程度、后期岩脉侵入有密切关系(图 2)。尤其是当火山熔岩中石英岩脉、二长斑岩脉逐渐增多时,是接近断层的地质标志,涌突水发生的可能性增大。涌水量曲线在水平方向上具有锯齿状变化的特征(图 3)。

(2)接触带西侧,出口至 K94+036 段,岩性为二长花岗岩,岩石总体上完整,节理裂隙不发育。

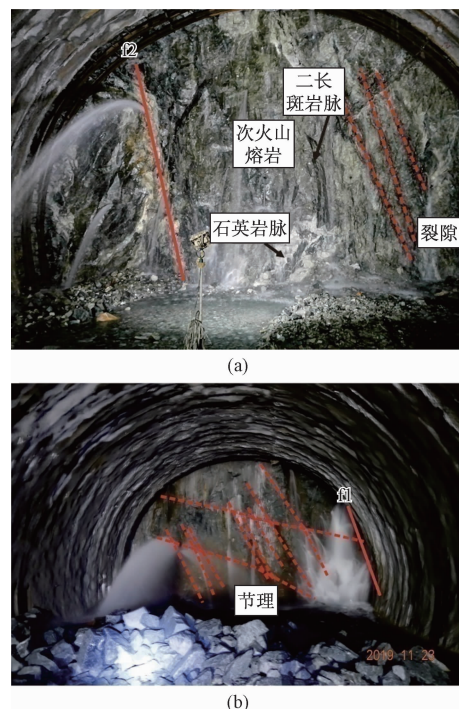


图 2 施工掌子面裂隙发育特征

Fig. 2 Water gushing characteristics of the construction surface

1.3 涌水条件

隧址区接触带东侧主要分布流纹质次火山熔岩及(次)流纹斑岩,多期次的构造作用、不同期次的岩脉

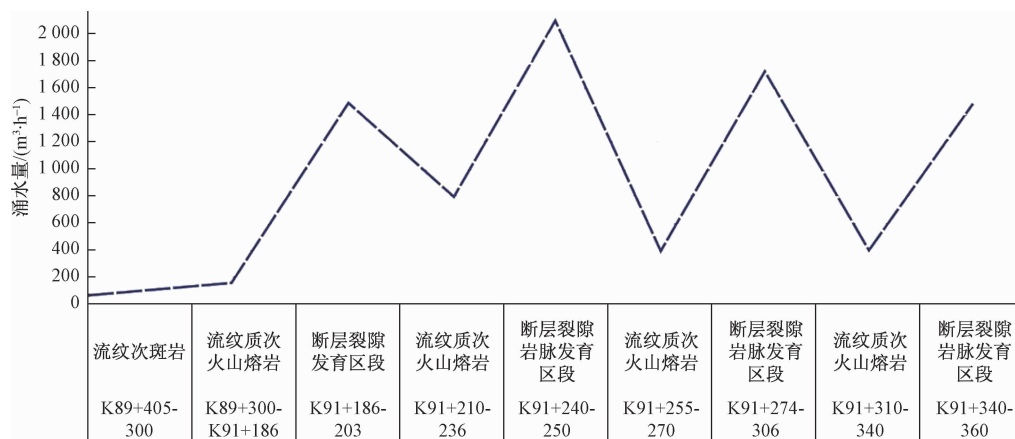


图3 K91+186~360段地质条件-涌水量变化曲线

Fig.3 Water intrush distribution with geological condition along the K91+186~364 section

侵入作用使次火山岩裂隙发育,NE、NW向断层连通规模不一的裂隙、裂缝,尤其NE向断层在纵深方向上进一步连通各级裂隙,裂隙、断层相互交织在一起形成一个规模较大、由上至下的地下水储集空间^[20]。各种构造破碎带相互联系组成地下水径流的最佳通道,且在局部控制了地下水径流的方向。当人为施工一旦开挖或扰动,负压条件下,掌子面附近或周围一定范围内的地下水流动场发生较大变化,以涌水点为中心形成降落漏斗^[25],进而很快形成一个巨大的排水场,直接威胁施工人员的安全和井下的施工设施。

2 可控音频大地电磁法

2.1 方法原理

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是在以往大地电磁法基础上发展成的一种人工源电磁测深方法^[26]。与常规电法相比,具有勘测深度大、抗干扰性强、野外效率高、地形条件影响较小、横向分辨率较高等特点。在勘测中,根据电阻率值的大小和其在地下的展布形态区分富水异常体的空间分布^[27]。

忽略位移电流,考虑绝大多数岩石和矿物的磁导率很小,令 $\mu = \mu_0$ (空气中的磁导率),均匀半空间表面水平电偶源的远区电磁场近似为:

$$E_x = \frac{I \overline{AB} \rho_1}{2\pi r^3} (3\cos^2 \theta - 2) \quad (1)$$

$$H_y = (j+1) \frac{I \overline{AB}}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0 w}} (3\cos^2 \theta - 2) \quad (2)$$

式中: I ——供电电流强度/A;

$\overline{AB}$ ——供电偶极长度/m;

r ——收发距/m;

ρ_1 ——介质的电阻率/($\Omega \cdot m$);

θ —— r 方向与AB间夹角/($^\circ$)。

由 E_x 和 H_y 分量定义的卡尼亚视电阻率为:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (3)$$

式中: f ——频率/Hz。

可控源音频大地电磁法采用标量测量方式,采集相互正交的 E_x 和 H_y 分量,计算得到卡尼亚视电阻率。通过资料处理和二维反演,获得电阻率—深度断面。分析反演结果,圈定异常,与前期勘查结果及钻孔资料比对;解释地层结构、构造发育特征,明晰涌突水潜在区域,达到超前探测的目的。

2.2 圈定异常的判据

本区域典型的地质特点为:鸿图嶂隧址区东侧广泛分布孔隙率较高的次火山熔岩;与北东向莲花山断裂带有关的束状平行断层发育;晚期石英岩脉、二长斑岩脉侵入,因高温冷缩形成较大范围的脆性岩石节理裂隙带。这些基本特征,是本区深部形成较大地下水储集空间的主要因素,可引起岩石电阻率的明显变化。一般表现为明显的低阻异常,物探断面上以高阻、低阻交替带,电阻率等值线突变带为特征。构造、岩石的富水性越好,电阻率值越低。

2.3 测线布置

在隧址区地表布设3条可控源音频大地电磁测量剖面(图1),Wt1和Wt2测线位于隧道中轴线正上方,为隧道已开挖地段,用于验证测量结果;受地形影响,偏移隧道中轴线200~400m,布设Wt3测线。结合已有资料和Wt3测线的勘查结果,推测解释隧址区未开挖地段深部构造与涌水问题^[28]。

3 勘探结果分析及涌突水段预测

3.1 反演结果分析

利用可控源音频大地电磁法沿 Wt2、Wt3 测线进行测量,对结果进行反演计算分析,结果显示(图 4):

(1) K89+400 ~ K90+815 段位于隧道入口端,二长花岗岩和(次)流纹斑岩两者从电阻率值上难以区分;在图 4 中可以看到,隧道施工中揭示的裂隙,裂隙发育带与围岩电阻率差异小,其富水性差,与施工揭示的情况吻合。

(2) 在 K91+500 处,电阻率断面图上存在近垂直的等值线突变带,与地面调绘确定的次火山岩和花岗岩的岩性界线保持一致。接触带以东区域,因构造作用及岩浆侵入作用影响,次火山岩电阻率值明显低于 K90+815 段相应岩性的电阻率值,应是孔隙、裂隙发

育且富水的表征。

(3) 在 K91+000 ~ 300 段,电阻率明显低于其他位置,通过后续开挖揭露,此处发生了与断层有关的多处涌突水灾害,发现物探低阻异常与隧道现有涌水位置有一定的吻合性,证明可控源音频大地电磁法勘探中,低阻区域很可能为断层水储位置,开挖低阻异常区域时,应提前做好防治准备。

(4) 在 K92+250 ~ K94+000 段,隧道相应位置存在大片低阻异常,应是多条倾向相同和相反的断层共同作用的结果,该处多段花岗岩破碎、富水性强,隧道开挖时极易发生涌突水事件,应提前采取相应的控制措施加以预防。

(5) K94+000 至隧道出口,隧道位置处花岗岩较完整,仅在 K95+800 处裂隙发育,隧道处电阻率值表征其富水性较差,与隧道开挖获得的认知一致。

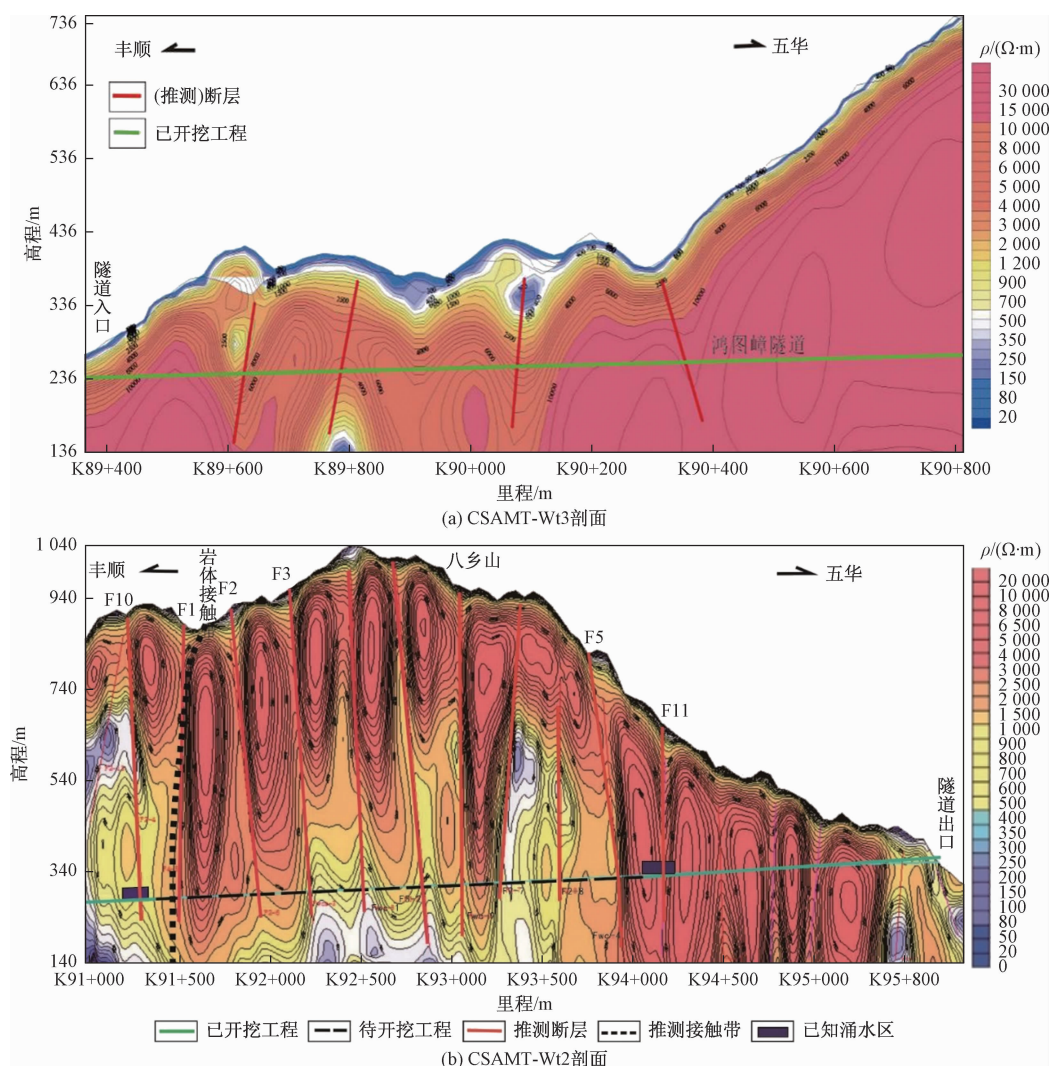


图 4 CSAMT-Wt3 剖面 and CSAMT-Wt2 剖面电阻率-高程断面图

Fig. 4 Frequency-apparent resistivity distribution in the CAMT-wt3 cross section and CAMT-wt2 cross section

3.2 涌突水段预测

根据可控源音频大地电磁低阻体异常与实际涌水区段的类比发现,二者具有一定的可比性。通过开挖,在左洞 ZK91 + 340 ~ 450 出现了与构造有关的较大涌突水,验证了物探及地质预测部位。

断层构造的延伸特点,可以通过左、右洞的施工情况,相互指证。故结合地质调查成果及异常区段的划分,可以预测未来待施工的区段仍有 5 处存在较大涌突水可能:K91 + 360 ~ K91 + 600、K91 + 900 ~ K92 + 000、K92 + 200 ~ 600、K92 + 800 ~ K93 + 000、K93 + 200 ~ K93 + 050。相应的深部施工结果表明,这些构造判别具有可借鉴性。预测区段长度及依据见表 1。

表 1 预测涌突水区段
Table 1 Predicted water inrush section

预测涌突水里程	长度/m	物探及地质依据
K91 + 360 ~ K91 + 600	200	根据物探异常,该区段存在较大范围的高阻、低阻交替带,推测可能为岩体接触带范围。地表 F1 断层延伸,在深部发育束状平行断层。
K91 + 900 ~ K92 + 000	100	存在低阻带,地表 F2 断层可见,深部发育束状平行断层。
K92 + 200 ~ K92 + 600	100	存在较大范围低阻带;与遥感解译 F4、F6 相呼应。
K92 + 800 ~ K93 + 000	200	在较大范围的垂向带状低阻带。
K93 + 200 ~ K93 + 050	300	存在较大范围的低阻带,推测存在斜切隧道轴线、多条平行的富水断层。平面上与遥感解译 F5、F6 相对应表。

4 涌突水防治方案

4.1 施工措施

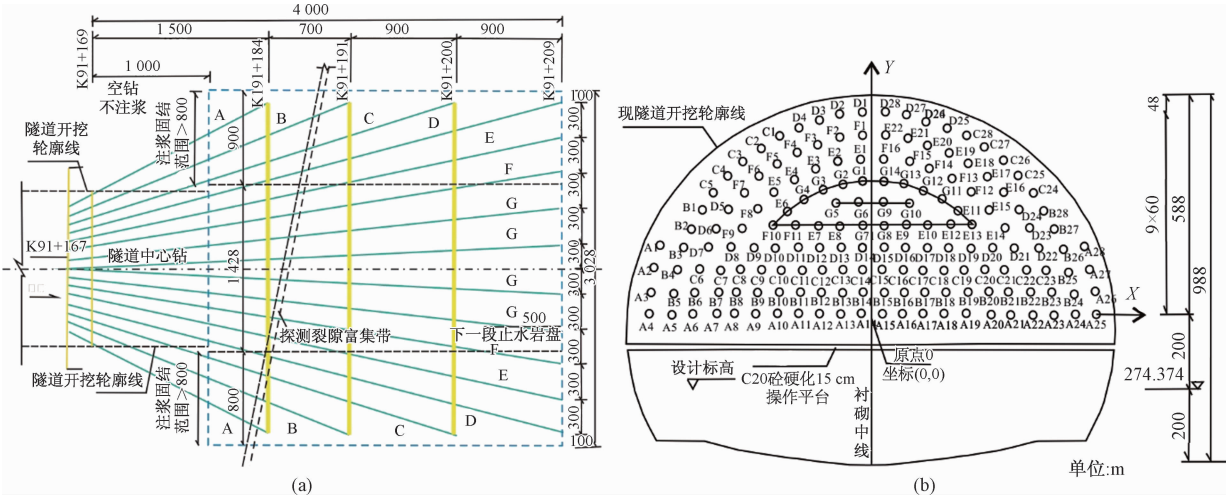
隧道掌子面前方的隔水岩层一般是防止涌突水灾

害发生的一道重要的安全屏障^[29]。准确的预测涌突水灾害源及富水构造,可为设计合理的整治措施,降低施工成本,提高生产效率提供依据^[30]。

结合前期勘察及后期补充勘探成果,总结鸿图漳隧道的涌突水特征及规律。在综合研判掌子面前方水文条件及构造条件的前提下,对探水钻孔已经发现的涌突水部位,采用全断面超前帷幕注浆堵水方案,以达到安全掘进和限量排放水的目的。通过超前预注浆,在掘进工作前方 30 ~ 40 m 范围内形成一个较为完整的注浆帷幕。注浆帷幕加固范围为开挖轮廓线外 8 m,用于封堵前方涌水。利用开挖初支后形成的喷浆层作为止浆层,再利用凿岩机向周边围岩营造 5 m 深的注浆孔,用以实施隧道周边围岩的径向注浆,以充填初次开挖后喷浆层与围岩之间的缝隙、充填周边围岩 5 m 范围内的岩层原生裂隙和次生裂隙。

根据现场实际情况,在未完全封堵的情况下,实测右洞 K91 + 169 掌子面静水水压为 4.3 MPa,因受同一断层影响,左洞涌水与右洞涌水情况类似。按照“封闭止浆墙、关水试压、顶水注浆,注浆作业”的原则对隧道洞身及开挖轮廓线外 8 m 范围进行加固。单循环施工顺序为泄水孔引水→加强止浆墙后方初期支护→施作止浆墙→加固止浆墙→止浆墙闭水压力试验→施做全断面帷幕注浆→掌子面开挖掘进→径向后注浆堵水→超前探水→下一个循环。

单循环帷幕注浆长度 40 m,布设 15,23,31,40 m 四个终孔断面,每循环共计布设注浆孔 164 个,开挖 35 m,预留 5 m 止浆岩盘。注浆加固范围为隧道全断面开挖轮廓线外 8 m,浆液扩散半径 2 m。全断面帷幕注浆孔位布置见图 5。



4.2 施工效果

施工结果表明:①对在建隧道要现场及时总结涌突水规律,查明其地质控制因素,再结合物探异常特征,可有效预测待开挖地段的涌突水位置(如 K91 + 360 ~ K91 + 600 的成功预测),为施工安全及防治措施准备提供了依据。②全断面超前帷幕注浆堵水方案能对断层裂隙进行有效封闭(图 6),从而减小甚至阻断开挖后的涌水,保证施工安全进行。目前的观测数据显示,采用本方案对前序勘测预计的涌水区段进行的提前防治,使得隧道施工过程中涌水量及涌水情况大大减小,极大减小了施工风险,提高了整个工程的经济性。

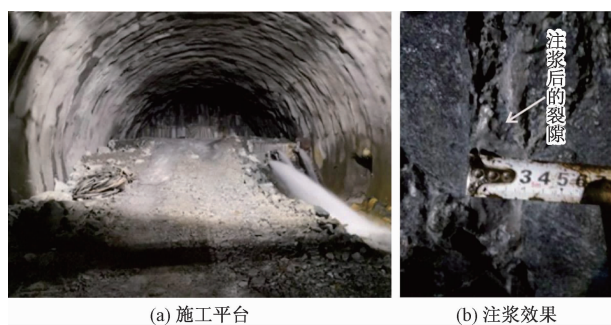


图 6 帷幕注浆

Fig. 6 Curtain grouting on site

5 结论

通过可控源音频大地电磁勘探应用、现场封堵施工的实例及验证情况,得出以下结论:

(1)可控源音频大地电磁测探法能很好地适应山岭隧道勘测要求,对深部含水断层及富水火山岩中的裂隙密集带反应较灵敏。

(2)结合鸿图嶂隧址区可控源音频大地电磁法勘探结果与和地质调查结果,准确预测出可能发生的涌突水灾害区域左洞 ZK91 + 340 ~ 450,并获得验证。在预测成果的基础上,采用全断面超前帷幕注浆堵水技术能较好地控制隧道涌突水,保证了隧道施工顺利进行,降低了因隧道涌突水造成的不必要损失。

参考文献 (References):

[1] 刘高,杨重存,谌文武,等. 深埋长大隧道涌(突)水条件及影响因素分析[J]. 天津城市建设学院学报, 2002, 8(3): 160 - 164. [LIU G, YANG C C, CHEN W W, et al. Conditions and influencing factors of occurrence of groundwater inflow and invasion into deep-buried tunnel[J]. Journal of Tianjin Institute of

Urban Construction, 2002, 8(3): 160 - 164. (in Chinese)]

[2] 王勐,许兆义,王连俊,等. 圆梁山毛坝向斜段隧道涌突水灾害及对地下水的影响[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 6 - 10. [WANG M, XU Z Y, WANG L J, et al. Gushing water from Yuanliangshan tunnel in maoba syncline and its impact on surface water[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(5): 6 - 10. (in Chinese)]

[3] 冯太林,张学工,李衍达,等. 折射波地震记录叠加成像方法研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44(1): 129 - 134. [FENG T L, ZHANG X G, LI Y D, et al. Research on methodology of stack imaging of refractive seismic recording[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(1): 129 - 134. (in Chinese)]

[4] 熊昌盛,顾汉明,陈毅敏,等. 提高浅层地震折射波法在隧道勘察效果的举措[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(5): 452 - 456. [XIONG C S, GU H M, CHEN Y M, et al. The measurement of improving the effect of the shallow refraction seismic exploration in tunnel[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(5): 452 - 456. (in Chinese)]

[5] 曾国,崔德海,刘杰,等. 地震折射波法和高密度电法在隧道勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2009, 33(5): 608 - 612. [ZENG G, CUI D H, LIU J, et al. The application of seismic refraction wave method and high-density resistivity method to tunnel investigation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(5): 608 - 612. (in Chinese)]

[6] 王齐仁,杨天春. 隧道地质灾害超前预报的地震反射法[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 643 - 649. [WANG Q R, YANG T C. The seismic reflection method predicting tunnel geological hazards[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 643 - 649. (in Chinese)]

[7] 李越兴,曹哲明. 地震反射波法在宜万铁路岩溶探查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(2): 105 - 108. [LI Y X, CAO Z M. The application of the exploration of karst yiwan railway using seismic reflection method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(2): 105 - 108. (in Chinese)]

[8] 黄绍逵,欧阳玉飞. 高密度电法在岩溶勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(6): 720 - 723. [HUANG S K, OUYANG Y F. Application of

- high density electrical method to karst exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(6): 720 - 723. (in Chinese)
- [9] 袁永才,高成路,王旌,等. 岩溶隧道突涌水致灾构造与前兆信息判识技术探讨[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 36 - 44. [YUAN Y C, GAO C L, WANG J, et al. Identification of geological structures and precursory information likely to cause water inflow in karst tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(1): 36 - 44. (in Chinese)]
- [10] 王应吉,赵越,林君,等. 核磁共振坑道水探测中的激发场研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 468 - 473. [WANG Y J, ZHAO Y, LIN J, et al. Coilexcited field in detection of tunnel water by MRS[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 468 - 473. (in Chinese)]
- [11] 李勇桥. 高密度电法在矿井断层构造富水性探测中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2013(3): 226. [LI Y Q. The application of high-density electric method to mine faultage of riching water[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2013(3): 226. (in Chinese)]
- [12] 薛国强,李貅. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 894 - 900. [XUE G Q, LI X. The technology of TEM tunnel prediction imaging [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 894 - 900. (in Chinese)]
- [13] 杨卓,马超. 基于BP神经网络方法的岩溶隧道突涌水风险预测[J]. 隧道建设, 2016, 36(11): 1337 - 1342. [YANG Z, MA C. Risk prediction of Water inrush of karst tunnels based on BP neural network[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11): 1337 - 1342. (in Chinese)]
- [14] 袁青,陈培帅,钟涵,等. 基于优化FAHP-TOPSIS法的高压富水花岗岩断层涌水预测[J]. 隧道建设(中英文), 2019(5): 766 - 774. [YUAN Q, CHEN P S, ZHONG H, et al. Water gushing prediction in high-pressure water-rich granite fault zone based on optimized FAHP-TOPSIS method [J]. Tunnel Construction, 2019(5): 766 - 774. (in Chinese)]
- [15] 张凯,陈寿根,霍晓龙,等. 岩溶地区隧道涌水风险的可拓评价模型及应用[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 89 - 96. [ZHANG K, CHEN S G, HUO X L, et al. Extension assessment model for the risk of water inflow in karst tunnels and its application [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(4): 89 - 96. (in Chinese)]
- [16] 冯宝俊,刘敦文,褚夫蛟. 基于 PSO-SVM 模型的隧道水砂突涌量预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(7): 123 - 129. [FENG B J, LIU D W, CHU F J. Study on prediction of water and sand inrush quantity in tunnel based on PSO-SVM model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(7): 123 - 129. (in Chinese)]
- [17] 李立民. 可控源音频大地电磁法在秦岭输水隧洞断裂勘察中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2014(8): 131 - 133. [LI L M. Application of controllable source audio-frequency magnetotelluric method in fracture survey of Qinling water conveyance tunnel [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(8): 131 - 133. (in Chinese)]
- [18] 张毅,李戟,赵军德. CSAMT 法在深埋隧洞探测中的应用[J], 勘察科学技术 2011(5): 58 - 61. [ZHANG Y, LI J, ZHAN J D. Application on CSAMT method in deep buried tunnel detection [J]. Site Investigation Science and Technology, 2015(5): 58 - 61 (in Chinese)]
- [19] 张举贤. 浅谈长大深埋隧道工程地质勘察中地质对物探的配合[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(3): 17 - 20. [ZHANG J X. Comments on matching geology with physical exploration in engineering geological prospecting for large deep buried tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(3): 17 - 20. (in Chinese)]
- [20] 范剑. CSAMT 法在铁路隧道勘察中的应用[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(2): 184 - 187. [FAN J. Application of CSAMT method in railway tunnel investigation [J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(2): 184 - 187. (in Chinese)]
- [21] 刘高,杨重存,谌文武,等. 深埋长大隧道涌(突)水条件及影响因素分析[J]. 天津城市建设学院学报 2002, 8(3): 160 - 164. [LIU G, YANG Z C, CHEN W W, et al. Conditions and influencing factors of occurrence of groundwater inflow and invasion into deep-buried tunnel[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2002, 8(3): 160 - 164. (in Chinese)]
- [22] 王勐,许兆义,王连俊,等. 圆梁山毛坝向斜段隧道涌突水灾害及对地下水的影响[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 6 - 10. [WANG M, XU Z Y, WANG L J, et al. Gushing water from Yuanliangshan tunnel in maoba syncline and its impact on surface

- water[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(5): 6-10. (in Chinese)]
- [23] 任伟灿,王松,宋伟强. 大(埔)丰(顺)(五)华高速公路鸿图嶂特长隧道隧址区水库影响的水文地质专项研究报告[R]. 广州:广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 2017. [REN W C, WANG S, SONG W Q. The special hydrogeological research report of reservoir influence of tunnel zone of Hongtuzhang extra-long tunnel of Dapu-Fengshun-Wuhua expressway [R]. Guangzhou: Guangdong Communication Planning and Design Institute Co, Ltd, 2017. (in Chinese)]
- [24] 吴祖松,侯秋萍,马君伟,等. 富水隧道幕墙堵水技术研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 65-71. [WU Z S, HOU Q P, MA J W, et al. Research on water blocking technology of curtain walls in water-rich tunnels [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 65-71. (in Chinese)]
- [25] 范威,王川,金晓文,等. 吉莲高速公路钟家山隧道涌突水条件分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 38-43. [FAN W, WANG C, JIN X W, et al. Inrush condition analysis of the Zhongjiashan tunnel in the Jilian Highway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 38-43. (in Chinese)]
- [26] 张兴昶,罗延钟,高勤云. CSAMT 技术在深埋隧道岩溶探测中的应用效果[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(4): 370-375. [ZHANG X C, LUO Y Z, GAO Q Y. Application of CSAMT to exploring karst in the deep part of tunnel [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(4): 370-375. (in Chinese)]
- [27] 李坚,邓宏科,张家德,等. 可控源音频大地电磁勘探在大瑞铁路高黎贡山隧道地质选线中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 72-76. [LI J, DENG H K, ZHANG J D, et al. Application of geological routing about CSAMT Exploration in Gaoligong Mountain tunnel of Dali-Ruili Railway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(2): 72-76. (in Chinese)]
- [28] 郭文杰,祝迎华. 大(埔)丰(顺)(五)华高速公路丰顺至五华段鸿图嶂隧道物探详勘可控源音频大地电磁法技术报告[R]. 北京:中国冶金地质总局地球物理勘察院, 2019. [GUO W J, ZHU Y H. The technical report of CSCMT of physical exploration for Hongtuzhang tunnel in Fengshun to Wuhua section of Dapu-Fengshun-Wuhua expressway [R]. Beijing: Geophysical Exploration Academy of China Metallurgical Geology Bureau, 2019. (in Chinese)]
- [29] 夏沉谱,董鑫,熊自明,等. 基于剪切破坏的深长隧道掌子面隔水岩层安全厚度的研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 57-66. [XIA Y P, DONG X, XIONG Z M, et al. A study of the safety thickness of water-resisting rock strata in a deep-buried and long tunnel based on shear failure [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 57-66. (in Chinese)]
- [30] 鲜国,石少帅,赵勇,等. 强富水隧道下穿河段突涌水灾害综合防控方法研究与应用[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(2): 74-82. [XIAN G, SHI S S, ZHAO Y, et al. Research and application of comprehensive prevention and control method for water inrush in water enriched under-crossing river tunnel [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(2): 74-82. (in Chinese)]

编辑:张若琳