

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.04.018

音频大地电磁与声波测井在隧道工程勘察中的应用—— 以闽东某隧道为例

代一龙¹, 马欢^{1,2*}, 李泽扬¹, 李阳¹, 吕则潮¹, 傅庆凯³

DAI Yi-Long¹, MA Huan^{1,2*}, LI Ze-Yang¹, LI Yang¹, LÜ Ze-Chao¹, FU Qing-Kai³

1. 防灾科技学院, 河北三河 065201; 2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北三河 065201;

3. 福建省交通规划设计院有限公司, 福建福州 350004

1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China; 3. Fujian Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd, Fuzhou 350004, Fujian, China

摘要: 随着隧道工程规模的不断扩大和复杂性的增加, 尤其是在复杂的地质条件下, 传统的勘察方法已经难以满足现代工程的需求。音频大地电磁法探测范围广、深度大, 但地层分辨率相对较低; 声波测井虽探测深度和范围有限, 却能提供高分辨率的井周围声学数据, 弥补了音频大地电磁法在分辨率上的不足; 两者结合不仅提高了地层信息的探测精度, 还能有效圈定重点区域, 指导声波测井的精细测量, 为隧道工程勘察提供了高效、全面的解决方案。本文将音频大地电磁测深法和声波测井应用于福建省某隧道工程勘察中, 较为准确地探测了地下岩层的电阻率和波速分布。结果显示: P4至P14段电阻率较低, 围岩局部较破碎, 且埋深较浅, 岩石风化比较强, 需注意风化层出露后松散塌落; P26至P34、P41至P47段存在两个低阻异常, 可能存在含水层, 应注意排水重填, 以防涌水; P34至P41段埋深最大, 电阻率最高, 围岩挤压紧密, 建议打应力释放孔以释放能量, 便于施工。本研究表明将音频大地电磁与声波测井方法结合应用, 可为隧道工程勘察提供新的思路。

关键词: 音频大地电磁测深; 声波测井; 隧道工程勘察; 地质灾害防治

中图分类号: P3

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)-04-0804-08

Dai Y L, Ma H, Li Z Y, Li Y, Lü Z C and Fu Q K. 2024. Application of Audio Magnetotelluric Sounding and Acoustic Logging in Tunnel Engineering Surveys: A Case Study of a Tunnel in Eastern Fujian. *South China Geology*, 40(4): 804-811.

Abstract: As the scale and complexity of tunnel engineering continue to expand, particularly under complex geological conditions, traditional survey methods have become hard to meet modern engineering needs. The audio magnetotelluric method offers extensive coverage and significant depth but has relatively low stratigraphic resolution. In contrast, acoustic logging, while limited in depth and range, provides high-resolution acoustic data around the borehole, compensating for the shortcomings of the audio magnetotelluric method in resolution. The combination of these two methods not only enhances the accuracy of stratigraphic information but also effectively delineates key areas, guiding precise measurements in acoustic logging, thus

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2024-09-29

基金项目: 中央高校科研项目业务费专项(ZY20240305); 廊坊市青年拔尖人才项目(XY202304)

第一作者: 代一龙(2000—), 男, 硕士研究生, 从事地球物理电法数值模拟计算方面的研究, E-mail: 1187953304@qq.com

通讯作者: 马欢(1988—), 男, 博士, 副教授, 从事地球物理电法和磁法勘探及其数值模拟高性能并行计算方面的研究, E-mail: xiongha@hotmail.com

offering an efficient and comprehensive solution for tunnel engineering surveys. This study applies audio magnetotelluric sounding and acoustic logging to a tunnel project survey in Fujian Province, accurately detecting the resistivity and velocity distribution of underground rock layers. The results indicate that sections P4 to P14 exhibit relatively low resistivity, with locally fractured surrounding rock and shallow burial depth, where relatively strong rock weathering necessitates caution is needed to prevent loose collapse upon exposure of the weathered layer. Sections P26 to P34 and P41 to P47 show two low-resistivity anomalies, possibly indicating the presence of aquifers, requiring attention to drainage and refilling to prevent water inflow. Section P34 to P41 has the greatest burial depth and highest resistivity, with tightly compressed surrounding rock, and it is suggested that the drilling of stress relief holes can release energy and facilitate construction. This research demonstrates that the combined application of audio magnetotelluric and acoustic logging methods can provide new insights for tunnel engineering surveys.

Key words: audio magnetotelluric sounding; acoustic logging; tunnel engineering survey; geological disaster prevention

近年来,随着交通建设的迅速发展,铁路和公路隧道工程已成为交通建设中不可或缺的一部分。隧道的修建面临各种地质、地形条件,岩爆、涌水和塌方是隧道工程中常见的地质灾害,可能进一步诱发泥石流甚至地震,对工程进度和安全产生重大影响(张顶立, 2017; 范剑, 2020; 王铁领等, 2020)。因此,施工前必须依据工程勘察结果,全面分析地质灾害风险并制定防治措施。随着隧道工程规模的不断扩大和复杂性的增加,尤其在复杂的地质条件下,传统的勘察方法已经难以满足现代工程的需求。

在勘察设计阶段,为满足隧道工程的需求,选择适合探测隧道埋深且勘察速度较快的物探方法至关重要。音频大地电磁法因其探测深度大、范围广,广泛应用于地热(王平等, 2024)、岩溶(赵诚亮, 2018)、隧道(张刚等, 2018)、地质灾害(刘雪, 2019)、矿产资源勘查(王家俊等, 2024)等领域,能够在短时间内完成大面积的地质探测,降低成本并提高效率。这一方法已在多个工程勘察中得到验证,如彭仲义等(2023)曾将音频大地电磁应用于复杂隧址勘察中,有效探测了隧道洞身段不良地质体;陈松等(2020)将音频大地电磁用于反演南沙新区地下空间岩性构造特征。声波测井技术自 20 世纪初问世以来,已成为地球物理测井的重要领域,发展迅速,应用广泛。作为油气勘探和开发的重要手段,声波测井不断扩展出偶极、多极声

波测井、声波成像测井等新方法,并在油田、煤田和工程地质中得到广泛应用(王建华, 2006)。随着理论的完善和仪器的升级,声波测井技术逐渐应用于工程勘察中。

由于地球物理方法的多解性,导致采用单一方法勘察时解译的可靠性差,有必要采用多种地球物理方法,对地层剖面进行综合探测、综合分析、综合验证。虽然音频大地电磁法探测范围广、深度大,但地层分辨率相对较低;而声波测井虽探测深度和范围有限,却能提供高分辨率的井周围声学数据,详细刻画地层细节,弥补了音频大地电磁法在分辨率上的不足。声波测井可以验证和细化音频大地电磁法的结果,提高地层信息精度;音频大地电磁法则可圈定重点区域,指导声波测井的精细测量,两者结合可为工程勘察提供更为全面的地质信息。本文以闽东某隧道工程为例,将两种方法结合应用,验证了其可行性,为地质灾害防治提供了地球物理依据,为隧道工程勘察提供了新的思路。

1 地质背景

隧道施工区域位于福建省福州市,区内地形北高南低、西高东低,北部为中山地,南部为盆地,东部为丘陵和平原,西部为中低山地。中生代期间华南板块内发生了大规模火山活动,在现今的

东南沿海地区形成了一系列的火山盆地,仅晚中生代就存在晚三叠世—早侏罗世、晚侏罗世以及白垩纪等多次沉积—喷发旋回(朱律运等, 2024)。福州地区主要出露中生代陆相火山岩,沿海地区发育有第四纪地层。福州盆地上覆 20~30 m 厚的黏性土、淤泥、泥质细砂及杂填土等。由于福州属亚热带湿润季风气候,台风频繁伴随暴雨,土质细腻、含水量高、强度低、渗透性差,易引发地面沉降,导致地基失稳,地质灾害风险较高(叶龙珍, 2018)。

隧道工程位于福州市福清市虎头山以南,下甲以东。沿线地形受区域地质构造控制较为明显,分水岭走向多呈北东-南西方向,主要地貌单元有低山、剥蚀丘陵、冲洪积河流及阶地,以及山间沟谷(图 1)。区内主要出露地层为上侏罗统至下白垩统,次为第四系(图 2),其中,小洋、樟林、牛坑顶区域出露晚侏罗世至早白垩世阳下组上段;下甲、上东山、清界寺区域出露晚侏罗世至早白垩世阳下组下段;五指岭、隧道东部所在区域出露晚侏罗世南园群长林组;芦院村、高厝、洋中区域出露第四系全新统;中南部出露第四系更新统。隧道穿越晚侏罗世南园群长林组、晚侏罗世-早白垩世阳下组中段。晚侏罗世地层的岩性主要包括凝灰质砂砾岩、粉砂岩、纸状页岩、中-酸性

熔岩和火山碎屑岩;晚侏罗世-早白垩世地层的岩性主要包括凝灰质砂砾岩、粉砂岩、纸状页岩、中-酸性熔岩、火山碎屑岩夹凝灰岩、砂岩、英安岩和流纹岩夹粗面岩。地表出露的第四纪全新统主要由冲洪积层、坡洪积层、坡残积层及崩坡积层组成,包括素填土、坡积碎石、残积黏性土以及风化程度不同的石英砂岩、闪长岩和凝灰熔岩等。

2 方法原理

2.1 音频大地电磁法

2.1.1 原理

在雷电现象和太阳风的作用下,地球上空分布着一个区域性乃至全球性的天然交变电磁场,其频率范围广泛,不同频率的电磁波相互叠加,形成复杂的电磁振动。当这些来自空中的交变电磁波入射到地下时,一部分被介质吸收衰减,另一部分在地表反射,形成含有地下介质电性特征信息的电磁场。

2.1.2 电磁场的基本方程

麦克斯韦方程组是电磁场必须遵从的微分方程组,含有以下四个方程:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2-1)$$



图 1 隧道施工区域影像图

Fig. 1 Image of the tunnel construction area

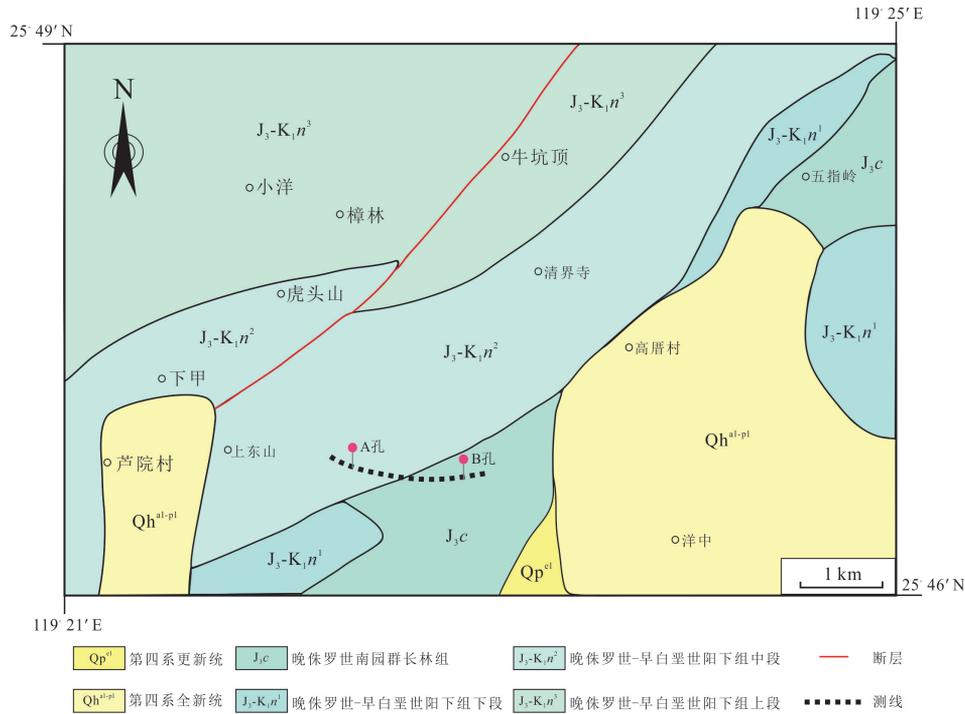


图 2 隧道施工区地质图

Fig. 2 Geological map of the tunnel construction area

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2-3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2-4)$$

式(2-1、2-2、2-3、2-4)(柳建新等, 2012)中 E 为电场强度, B 为磁感应强度, D 为电磁感应强度, H 为磁场强度, j 为电流密度, ρ 为自由电荷密度。

1950 年, 前苏联学者 Tikhonov 提出大地电磁场可以近似看作平面波垂直入射到地球表面, 并提出了波阻抗的概念。波阻抗反映了地球电性分布对大地电磁场的影响, 即在地球某一点上, 彼此正交的大地电场分量和磁场分量的比值。这一设想使得通过单个点的观测来研究地球的电性分布成为可能。1953 年法国学者 Cagniard 基于天然电磁场以平面波形式垂直入射到均匀各向同性的层状地表这一理论, 给出了大地电磁场的解, 并将阻抗的频率特性转化为视电阻率形式: 当 E 和 H 偏振的波阻抗的振幅相等时, 得出式(2-5、2-6)(柳建新等, 2012)视电阻率 ρ :

$$|z| = \frac{|E_x|}{|H_y|} = \frac{|E_y|}{|H_x|} \quad (2-5)$$

$$\rho = \frac{|Z|^2}{\mu\omega} \quad (2-6)$$

2.2 声波测井

2.2.1 原理

声波测井利用声波在地层中的传播特性, 通过测量声波在井眼周围地层中的传播时间和衰减情况, 获得地层的声学属性数据。声波通过发射器发射, 穿过地层后被接收器接收, 记录了声波的传播速度和振幅变化, 根据声波速度的变化, 提取地层的物理参数, 如波速、孔隙度、岩性等。

2.2.2 计算公式

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (2-7)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (2-8)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-9)$$

式(2-7、2-8、2-9)(刘宇, 2010)中 V 为波速, V_s 为横波速度, V_p 为纵波速度, L 为声波发射器与接收器之间的距离, Δt 为声波从发射器传播到接收器的时间, K 为地层的体积模量, G 为地层的剪切模量, ρ 为地层介质的密度。

3 资料采集及处理

3.1 仪器设备

本研究中,音频大地电磁法使用的是美国 EMI 与 Geometrics 公司联合生产的 EH4 型 Strata-Gem 电磁成像系统,具备探测深度大、设备轻便、精度高等优点,频率范围为 10 Hz ~ 100 kHz。声波测井采用重庆奔腾数控技术研究所研发的 WSD-2D 数字声波仪,具备高精度和高分辨率,能够提供详细的地层声学数据。多条测线和不同钻孔位置的重复测量表明,测井数据稳定且重复性良好,与钻孔实测资料误差较小,用于验证和细化音频大地电磁探测结果具有较高的可信度。

3.2 野外工作方法

3.2.1 初步勘探阶段: 音频大地电磁法

沿隧道自西向东布设观测系统,测线总长 1 340 m,共 68 个测点,编号为 P1 至 P68。为更详细探测复杂地形中的地质构造,如断层、含水层等,点距选择为 20 m (P67 至 P68 点距除外),以便识别浅层和中等深度的地质特征,并在有限空间内布设完整测线,削弱地形影响,保证数据完整性。因地形原因,P67 至 P68 点距为 10 m。在隧道工区布设电磁接收器(图 3),采集电磁场数据,识别电阻率异常区域,圈定潜在不良地质体和构造带位置。

3.2.2 精细勘探阶段: 声波测井

在图 2 中 A、B 处钻井并进行声波测井。在声波测井中,使用 WSD-2A 数字声波仪进行数据采集。通常,声波测井的野外采集参数需要根据地层条件、井深等因素进行调整。由于 A、B 两孔处距离隧道埋深很近,孔深较浅,采样间隔设置为 0.5 ~ 1 m 之间且使用较低增益;发射频率通常在 10 ~ 30 kHz 范围内,而高频率有利于探测浅部井壁的声学信息,因此发射频率设置在较高范围。测井过程严格控制钻孔位置和环境条件,以最大限度减少外界干扰,确保数据的高质量。为了确保数据的可靠性,我们在每个测点进行了多次重复测量,并在采集后立即进行初步处理,包括噪声滤除和信号增强等步骤,确保数据质量。

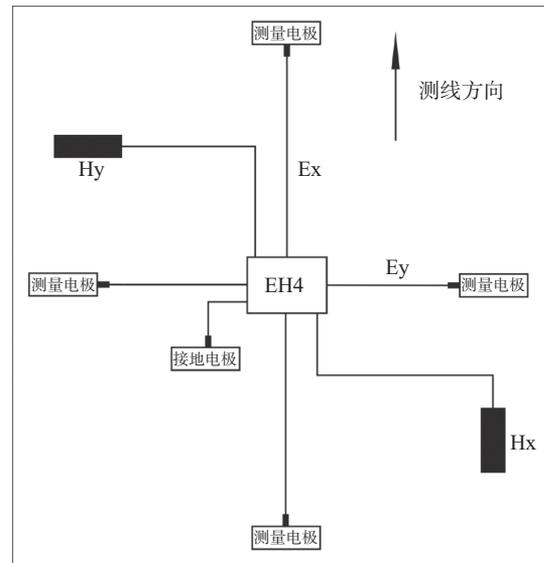


图 3 音频大地电磁采集装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the audio magnetotelluric data acquisition device

H_x 是沿测线方向的磁场分量, H_y 是与测线方向垂直的磁场分量; E_x 是沿测线方向的电场分量, E_y 是与测线方向垂直的电场分量

3.3 资料处理

3.3.1 音频大地电磁法

音频大地电磁法的资料处理中主要用到了 IMAGEN 二维成像软件、中南大学 AMT(EH4) 数据处理系统、SURFER 等软件。在野外数据采集的现场对时间序列进行 FFT 变换,从而获得电磁场的分量以及相位数据,然后进行一维 BOSTICK 反演,基于一维反演,利用 EH4 系统自带的二维成像软件进行二维电磁成像。成像后观察视电阻率曲线并剔除个别跳跃点,这些跳跃的频点是干扰信号所造成的,删除跳跃的频点后重新进行一维 BOSTICK 反演。为了使数据更加平滑和稳定的同时保留必要的细节信息,在噪声控制和数据保真度之间取得平衡,将平滑系数设置为 0.3 进行二维电阻率成像并利用 SURFER 软件得到电阻率反演断面图。

3.3.2 声波测井

在野外测量过程中,声波信号可能会受到各种噪声的干扰,如地面震动、设备噪声等。因此,数据预处理的首要任务是对采集到的声波信号进行噪声滤除。常用的方法包括低通滤波、高通滤波和带通滤波,具体选择取决于噪声的频率特

性。根据拾取的初至波数据,使用反演算法计算地层的纵波速度和横波速度。这些速度数据可以用来推断地层的物理性质。

4 分析与解释

对于电阻率反演断面图(图 4),从整体来看,等值线较平缓,不存在溶洞等危险区域。由于夏季福建山区多雨,地表土壤较湿润,地表电阻率普遍很低,且电阻率随深度的增加呈现大幅度上升。其中红色双线代表的是隧道埋深所在,两个红色括号区域(P26~P34、P41~P47处)存在相对于该段平缓的曲线下凹,可能是含水层导致的低阻异常。

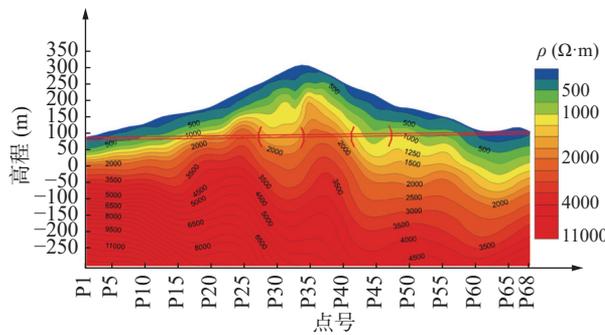


图 4 音频大地电磁测深二维电阻率反演断面图

Fig. 4 2D resistivity inversion cross-section of audio magnetotelluric sounding

对于岩层信息表(表 1、表 2)和速度埋深曲线(图 5、图 6),总体来看浅层岩层波速较低,波速随深度增加而上升,这与电阻率随深度增加的趋势一致。

孔 A: 高程范围在 109.83~37.93 m 之间,埋深 71.9 m。岩层逐渐由素填土、坡积碎石、残积黏土,逐渐过渡到全风化石英闪长岩及中等风化石英闪长岩。随着埋深的增加,岩层的风化程度逐渐减小,岩石强度随之增大,波速也相应增加。

孔 B: 高程范围在 101.62~82.38 m 之间,埋深 19.24 m。相较于孔 A,孔 B 的埋深较浅,主要穿过的是坡积粉质黏土、全风化凝灰熔岩和中等风化凝灰熔岩。随着埋深增加,岩层由软弱土层转变为风化程度较小的岩层,波速逐渐升高。

从声波测井的结果可以看出,不同岩层的声波速度差异较大,反映了岩层的成分和风化程度对声波传播速度的影响。土层中的波速较低,而风化程度高的岩层波速相对中等,未风化或风化程度较小的岩层波速最高。显示出岩层从松散软弱到致密坚硬的演变过程,波速的增大与岩层的硬度和密度成正比。这些数据为联合解释分析提供了重要的地质信息。

虽然音频大地电磁在电性结构信息上对地下结构也能进行划分,但是仅仅依靠电阻率并不能

表 1 A 孔岩层信息表

Table 1 Rock information of borehole A

高程(m)	深度(m)	厚度(m)	岩性	横波速度Vs(m/s)	走时(ms)
109.83~101.83	0~8.0	8	素填土	187	26.7
101.83~84.43	8.0~25.4	17.4	坡积碎石	244	37.3
84.43~71.23	25.4~38.6	13.2	残积黏性土	223	26.4
71.23~65.13	38.6~44.7	6.1	残积黏性土	223	4.5
65.13~52.63	44.7~57.2	12.5	全风化石英闪长岩	325	17.5
52.63~37.93	57.2~71.9	14.7	中等风化石英闪长岩	1855	3.5

表 2 B 孔岩层信息表

Table 2 Rock information of borehole B

高程(m)	深度(m)	厚度(m)	岩性	横波速度Vs(m/s)	走时(ms)
101.62~99.22	0~2.4	2.4	坡积粉质黏土	194	23.6
99.22~95.82	2.4~5.8	3.4	全风化凝灰熔岩	288	11.8
95.82~90.72	5.8~10.9	5.1	砂土状强风化凝灰熔岩	402	12.7
90.72~89.22	10.9~12.4	1.5	碎块状强风化凝灰熔岩	563	1.8
89.22~82.38	12.4~19.24	6.84	中等风化凝灰熔岩	621	7.9

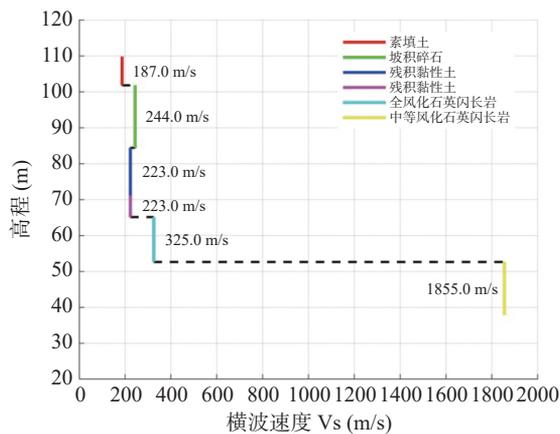


图5 A孔速度-埋深曲线

Fig. 5 Velocity-depth curve of borehole A

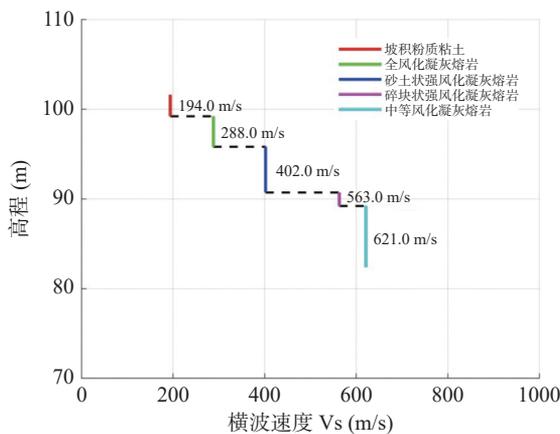


图6 B孔速度-埋深曲线

Fig. 6 Velocity-depth curve of borehole B

得到高分辨率的地质信息,而声波测井的声学属性数据对于地下物质层的划分很明确且分辨率较高。由图4来看,工区地下电性结构比较平滑、稳定,不存在断层,将带有电性结构特征的分层与声波测井的声学属性分层联合起来,声波测井获取的波速数据与音频大地电磁获取的电阻率数据相结合,可以准确全面地推断地下物质层的成分,对施工安全做出评估,提出合理的地质灾害防治建议。具体如下:

P1至P3段:电阻率等值线非常平滑,电阻率低于 $500\ \Omega\cdot\text{m}$,剪切波速度较低,主要由素填土、杂填土和残坡积黏土构成,推测地层较为破碎。

P4至P14段:电阻率等值线平缓,随着隧道埋深逐渐增加,电阻率在 $500\sim 1000\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间。结合A孔埋深推测地层主要由坡积碎石、残积黏土及全-强风化凝灰熔岩组成,岩体局部较为破

碎,但整体较完整。施工时应特别注意因爆破震动或围岩松动引起的岩层坍塌风险,需及时检查和处理危石。

P15至P25段:电阻率曲线平缓,值在 $1000\sim 2000\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间,地层波速较高,岩体主要为残积物、坡积物及晚侏罗世基岩,推测地层成分主要包括残坡积黏土、全至强风化凝灰熔岩等,围岩整体较为完整。

P26至P34、P41至P47段:电阻率等值线出现下凹区域,表明该区域可能存在含水层,导致电阻率较低。隧道掘进过程中需预防含泥沙的涌水现象。常用的防治措施包括井点降水、坑道排水、超前钻孔排水和补注浆堵水等(杨凯,2019)。

P34至P41段:岩石电阻率较高,隧道埋深最大,地下岩石受压较大,可能破坏围岩原有的平衡。施工前应采取打应力释放孔、超前小导坑掘进法等措施,以释放部分能量,减少施工中发生岩爆的风险。

P47至P57段:电阻率在 $500\sim 1000\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间,地层上覆残积物、坡积物,埋深较浅,推测岩体局部较破碎,主要成分包括残积黏性土和强风化凝灰熔岩等。

P57至P68段:受雨季影响,地表较湿润,电阻率等值线平缓,整体呈下降趋势,电阻率低于 $500\ \Omega\cdot\text{m}$,且洞身埋深逐渐变浅。地层波速较低,推测地层主要包含坡积粉质黏土、全风化凝灰熔岩和强风化凝灰熔岩,围岩完整性较差。

综上所述,声波测井得到的地层信息与音频大地电磁法的电阻率分布具有高度一致性,两者的结合为隧道设计和施工提供了全面、详实的地质资料,并为地质灾害防治提供了重要依据。

5 结论与展望

(1)基于工区地质背景、音频大地电磁测深法和声波测井的资料处理,该隧道埋深所在区域可能含有两个含水层和不同位置的风化层出露,为了预防地质灾害的发生,需采取相应的措施。从分析解释的结果来看,声波测井弥补了音频大地电磁法在地层信息分辨率较低的缺点,验证和细

化了音频大地电磁法的探测结果。音频大地电磁则提供了电阻率分布等电性结构信息。两种方法结合,优势互补,为地质灾害防治提供了地球物理依据,为解决工程勘察难题提供了新的思路。

(2)随着计算技术的进步、数据融合方法的发展,未来,声波测井与音频大地电磁技术结合的应用将面临一些挑战,如数据融合、反演算法优化等问题。通过进一步开发联合解释方法,构建多物性参数约束的三维地质模型,两者的结合有望在更广泛的领域实现精准探测与评价。

参考文献:

- 陈松,陈长敬,黄理善,赵信文,曾敏.2020.音频大地电磁测深反演南沙新区地下空间岩性构造特征[J].华南地质,36(3):246-253.
- 范剑.2020.CSAMT法在铁路隧道勘察中的应用[J].西部探矿工程,32(2):184-187+196.
- 刘宇.2010.阵列声波测井理论与应用研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 刘雪.2019.可控源音频大地电磁法在煤矿水文地质灾害勘查的应用[J].内蒙古煤炭经济,(17):225.
- 柳建新,童孝忠,郭荣文.2012.大地电磁测深法勘探[M].北京:科学出版社.
- 彭仲义,武斌,邹俊.2023.音频大地电磁勘探在复杂隧址勘察中的应用[J].四川地质学报,43(S1):94-98.
- 王家俊,杨炳南,朱大伟.2024.音频大地电磁法在黔西南金矿区域地电特征研究中的应用[J].工程地球物理学报,21(4):611-620.
- 王建华.2006.声波测井技术综述[J].工程地球物理学报,3(5):395-400.
- 王平,黄兆辉,赵运新.2024.音频大地电磁法在重庆璧山地热勘查中的应用[J].电声技术,48(6):18-21.
- 王铁领,赵胜岭,张少雷.2020.CSAMT在北京山区隧道勘察中的应用[J].工程技术研究,5(8):9-11.
- 杨凯.2019.隧道工程地质灾害分析及防治对策[J].工程技术研究,4(11):220-221.
- 叶龙珍.2018.福建省地质灾害防治研究现状与展望[J].福建地质,37(2):139-145.
- 张刚,李彦军,李小平.2018.音频大地电磁在铁路隧道勘察中的应用[C].//2018年全国工程勘察学术大会论文集.
- 张顶立.2017.隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J].力学学报,49(1):3-21.
- 赵诚亮.2018.可控源音频大地电磁法在岩溶裂隙型地热勘查中的应用[J].工程地球物理学报,15(4):514-518.
- 朱律运,孟桅,杨仲,许文,李玉娟,詹旭焘,陈润生.2024.福州寿山石矿床的流体包裹体和H-O同位素特征及其矿床成因意义[J/OL].地球科学,1-19.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240516.1627.002.html>.