

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.012

# 地质雷达数据介电常数递推反演研究

姚显春<sup>1</sup>, 郭炳焯<sup>1</sup>, 吕 高<sup>1</sup>, 李 宁<sup>1</sup>, 王小佳<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

2. 中石化胜利石油工程有限公司测井公司, 山东 东营 257096)

**摘要:** 地质雷达进行地质超前预报时, 准确读取复杂地质环境下不均匀介质的介电常数是最为关键的环节。本文应用地质雷达天线在不同参数设置下进行采样, 对采集到的数据进行分层研究, 剖析对比各地层中电磁波传播速度, 并对各地层的介电常数分布散点进行归纳。根据对地层开挖过程中的地质素描验证和岩性比对, 确定了适合该区域的不均匀混合介质的等效介电常数。研究结果表明: 应用现场试验归纳的区域等效介电常数值不同于试验室得到的绝对介电常数值, 前者分布在一定的范围内。与现场岩性的介电常数值对比结果表明, 本文方法可准确预测掌子面前方的岩性。

**关键词:** 地质雷达; 超前预报; 混合介质; 介电常数

**中图分类号:** U459.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2016)02-0199-08

## Recursive inversion research on dielectric permittivity with data by ground penetrating rader

YAO Xianchun<sup>1</sup>, GUO Bingxuan<sup>1</sup>, LÜ Gao<sup>1</sup>, LI Ning<sup>1</sup>, WANG Xiaojia<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Well Logging Company Sinopec Victory Petroleum Engineering Co., LTD, Dongying 257096, China)

**Abstract:** When the ground penetrating radar is used to carry out the advance geological forecast, to accurately take the permittivity of non-homogeneous dielectric under the complex geological environment is the most important key link. In this paper the GPR antenna is employed to take samples under the different parameter setups, and the sampled data are studied and analyzed in strata to contrast the electromagnetic wave transmission velocity in each stratum, and the scattered distribution points of the dielectric permittivity in each stratum are summarized. And the equivalent dielectric permittivity of non-homogeneous mixed mediums suitable for this region in terms of geological sketch validation and lithological comparison in the process of stratum excavation. The research results indicate that the regional equivalent dielectric permittivity values finalized in the applied in-situ tests are different from those of absolute dielectric permittivity obtained from lab tests, whose values are distributed within a certain range. As contrasted with the in-situ lithological dielectric permittivity value, the results reveal that the method in this paper can accurately predict the lithology in front of tunnel face.

**Key words:** ground penetrating radar; advance geological forecast; mixed medium; permittivity

地质雷达(Ground Penetrating Rader, 简称GPR)探测技术具有快速、无损、探测精度高等优点, 近年来在地质勘察和工程质量检测两大领域的应用逐渐广泛<sup>[1-2]</sup>。应用地质雷达进行隧道工程的超前预报能够提前发现掌子面前方的地质变化以及不良地质现象, 可为及时调整施工方法提供技术基础, 为减少工程事故提供快速准确的预警报告<sup>[3]</sup>。

然而地质雷达在检测过程中, 由于地质结构复杂, 容易引起误判而存在多解性<sup>[4]</sup>。

隧道中岩土体材料介电常数的差异是地质雷达进行超前预报的先决条件, 雷达接收到的反射波又是介电常数的函数, 雷达图像的解释、判读和反演都依赖于介质的介电性能<sup>[5-6]</sup>。因此, 岩土体介电特性分析是雷达发展应用的基础, 也是从雷达图像数据

收稿日期: 2015-03-23

基金项目: 陕西省教育厅基金资助项目(15JK1540); 博士创新基金资助项目(207-002J1407)

作者简介: 姚显春, 男, 讲师, 博士, 研究方向为岩体力学与工程。E-mail: yxc2049@163.com

中获得有用信息的关键。各种单相物质的介电常数可由试验方便地确定。然而,对于多相混合物来说,介电常数的确定比较复杂。因为多种物质混合在一起后,除了有物理方面的变化外,有时还会有化学方面的变化<sup>[7-8]</sup>,还存在多种因素必须要考虑。不能简单地认为多相混合物的介电常数就是各组成物质介电常数的比例组合。岩土体现场的介电常数会因地层的含水量及孔隙率不同而发生变化<sup>[9-12]</sup>。为了有效判断预测地层分布情况,需要确定出等效介电常数。

目前,国外对多相混合物的介电常数研究方面的成果也很突出。例如,Darold Wobschall 通过半离散模型提出如何确定含水土壤中介电常数的理论,并成功描述如何在高频范围(1MHz~1GHz)确定含水土壤中的介电常数<sup>[13]</sup>。James R. Wang 利用实验模型研究含水率与介电常数之间的关系,并提出含水率对介电常数影响的合理范围<sup>[14]</sup>。Alain Tabbagh 等人通过数值模型反演介电常数与土壤含水率之间的物理意义<sup>[15]</sup>。Yongping Chen 等人研究了在温度和导电率变化的情况下,Maxwell-Wager(麦克斯-瓦格纳)极化效应对土壤中介电常数的影响<sup>[16]</sup>。

以上成果中,体现了不同混合介质对介电常数的重要影响,但不能定量确定多相混合物中的介电常数。本文应用地质雷达天线在不同参数设置下进行采样,递推算得出电磁波速双程走时的设置下电磁波在不同的深度中传播的修正速度,并对各地层的介电常数分布散点进行归纳,根据对地层开挖过程中的地质素描验证和岩性比对,确定适合该区域的不均匀混合介质的等效介电常数。

## 1 检测基本原理

### 1.1 反射波幅法

检测原理是利用反射波幅法,推算介电常数。反射波幅法基本依据是 GPR 天线的发射波在遇到多种(本文设定为 2 种)不同介质的界面时,不仅波的传播路径会被改变,而且天线接收的反射能量也会变小,因为其中有一部分能量折射到下层介质继续传播。经过这样不断的循环反射,接收天线收到的电磁波就是在两种介质交界面上电磁波的叠加,因此振幅不同的波峰、波谷就是由不断循环反射的信号叠加而成的,具体过程如图 1 所示<sup>[17-19]</sup>。

图 1 中,  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$  可通过时间窗信号得知,  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  表示各个反射波最大振幅。

一般把反射波能量与入射波能量的比称为反射

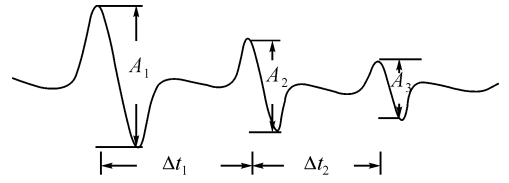


图 1 波的反射示意图

Fig. 1 The view of reflecting waves

系数  $R$ , 把透射波能量与入射波能量的比叫做透射系数  $T$ , 具体计算公式见式(1)、(2)<sup>[20]</sup>。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (1)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2)$$

可以将式(1)改写成如下形式:

$$\sqrt{\epsilon_{r2}} = \frac{1+R}{1-R} \sqrt{\epsilon_{r1}} \quad (3)$$

$$R = \frac{A}{A_m} \quad (4)$$

以上各式中,  $\epsilon_{r1}$  表示上层介质的介电常数;  $\epsilon_{r2}$  是下一层介质的介电常数;  $A$  表示反射波的波幅;  $A_m$  表示全反射波的波幅。

当电磁波第一次发生反射时,即:上层介质是空气,其介电常数  $\epsilon_1 = 1$ ,  $R_0 = \frac{A_1}{A_m}$ , 代入(3)式:

$$\sqrt{\epsilon_2} = \frac{1+R_0}{1-R_0} \sqrt{\epsilon_1} = \frac{1 + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \frac{A_1}{A_m}} \quad (5)$$

第二次反射时,因知上一层介电常数  $\epsilon_2$ , 同理求出下一层的介电常数,但要乘以损失系数  $(1-R_0^2)$ , 得:

$$\frac{A_2}{A_m} = R_1(1-R_0^2) \quad (6)$$

式中  $R_1$  是由上层介质进入下层介质的反射系数, 可得:

$$\sqrt{\epsilon_3} = \frac{1+R_1}{1-R_1} \sqrt{\epsilon_2} \quad (7)$$

等式右边分式的分子分母同乘以  $(1-R_0^2)$  并化简得:

$$\sqrt{\epsilon_3} = \sqrt{\epsilon_2} \frac{1-R_0^2 + R_1(1-R_0^2)}{1-R_0^2 - R_1(1-R_0^2)} = \sqrt{\epsilon_2} \frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_m}\right)}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 - \left(\frac{A_2}{A_m}\right)} \quad (8)$$

综上所述,就可推出各层介质的介电常数<sup>[21]</sup>。

### 1.2 土的相对介电常数与含水率关系

土是由三相组成的:水、土颗粒和空气。在施工

现场,岩土体中存在很多种介质,岩性往往并不单一,在含水率和孔隙率不均匀分布的情况下,岩土体的介电常数值会产生明显的变化。这给精确测量和分析带来了困难<sup>[22]</sup>。

地质雷达主要利用的是电磁波在介质中传播的特性,由于电磁波在不同介质中传播的速度不同,因此可以对各种介质加以区分。目前较为常用的经验公式是:Topp公式,它是根据介电常数确定含水量,因此这也是对介电常数与含水率关系进行对比的理论基础。

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.6\theta_v^3 \quad (9)$$

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (10)$$

式中 $\epsilon_r$ 是相对介电常数, $\theta_v$ 是土体的体积含水率。

## 2 现场岩土介电参数标定

对于同一掌子面、相同检测深度的雷达数据,考虑到现场施工的扰动很大,后期处理中存在一定的系统误差,因此进行了多次检测,并对数据进行归纳处理,保证了现场地质介电常数的准确性和真实性。双程走时是指雷达发射时电磁波从发射到接收所用的时间。为分析各个图像之间的差异,特意调试地质雷达发射双程时长为:300 ns、340 ns、380 ns、420 ns、450 ns、480 ns、510 ns、540 ns、570 ns、590 ns、610 ns、630 ns、650 ns、670 ns、680 ns。检测之后,分析各组雷达扫描图以及波列图,对比研究各个图像之间的差异,并对雷达数据进行交互式解释,分层研究各个地层内电磁波传播速度以及相对介电常数,并对这些介电常数归纳分析得出一个趋势范围<sup>[23]</sup>。

### 2.1 地质雷达扫描图对比

当对岩性主要为粘土的隧道进行超前预报试验时,其他仪器参数相同,双程走时不同的条件下,检测隧道掌子面,现场采集方法照片如图2所示。



图2 采集数据现场图

Fig. 2 The image of data acquisition field

在后期的图像处理中,因为现场检测时环境恶劣,干扰很大,为了得到有效的电磁波,必须合理处理步骤,去除多余的干扰波。因此可利用RADAN5.0软件,对检测的图片进行同样的自动增益、去除背景、水平叠加处理,最终得出地质雷达扫描图,由于篇幅限制只给出300 ns、450 ns、680 ns的扫描图,分别如图3中的(a)、(b)及(c)所示。

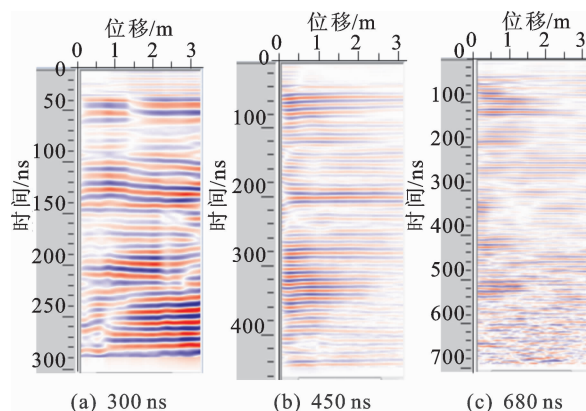


图3 不同双程走时设置下雷达扫描图

Fig. 3 Radar scan figures of different parameters in round-trip time

通过RADAN5.0软件对图3中的不同双程走时扫描图图像进行wiggle对比分析(见图4(a)、(b)、(c)),可以看出随着双程走时的增加,多波列图出现以下明显区别。①随着探测深度的增加,探测精度大幅度降低。如图4(a)100~150 ns的波形图,可以明显预知前方围岩结构层松动,但(b)(c)误差范围太大,不能较为准确预测。②随着双程走时的增加,虽多列波信号数明显增加,但准确度提高幅度却不明显,增加了后期处理的工作量,得不偿失。因此为了在保证准确度条件下不失高效性,在设定双程走时必须反复调整找到合适值,最终得出最好的多波列图。

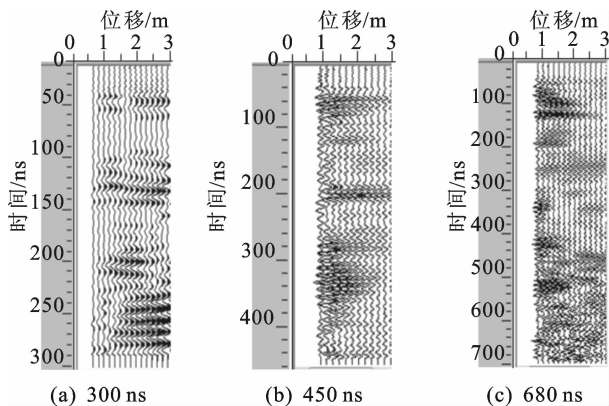


图4 不同双程走时设置下雷达波列图

Fig. 4 Radar wave columns of different parameters in round-trip time

## 2.2 分层等效介电常数的递推反算

通过 RADAN5.0 后处理软件中的交互式解释进行等效介电常数的推算及结构的分层,其中交互式解释(interactive interpretation)是利用检测数据进行研究,然后根据研究结果分析出即将开挖掌子面的围岩岩性、含水量的一种推算方法。研究基于以下假设:①地层结构是由不同介质体所组成的,各层结构都有明显的电性差异;②电磁波在传播过程中,理想地认为传播深度随时间增加而增加。因此通过记录双程走时,就可以推算出地层结构的深度。

其具体过程是:利用 RADAN5.0 后处理软件中数据分析模块子模块一“交互式解释”,将软件数据导出为 \*.lay 文件,然后进一步计算分析以得出相关的电磁波波速和地层深度。

利用交互式解释模块分析掌子面前方结构层时,通过电磁波信号在地下结构层传播反射的原理,导出电磁波在每个地层传播的速度和双程走时数据文件;通过对地层埋深的钻孔深度确定,计算电磁波在各层的速度<sup>[24]</sup>,对应于 300 ns、450 ns 及 680 ns 数据的相关参数分别如表 1~3 所示。

表 1 双程走时设置为 300 ns 时交互式解释数据表  
Tab. 1 Interactive interpretation date (time:300 ns)

层	深度/m	$V_{修正}/(m/ns)$	$V_{初始}/(m/ns)$	相对介电常数
Layer1	2.85	0.144	0.13	4.34
Layer2	6.82	0.125	0.13	5.76
Layer3	9.28	0.125	0.13	5.76
Layer4	12.90	0.133	0.13	5.08
Layer5	16.04	0.122	0.13	6.04
Layer6	18.84	0.059	0.13	25.85

表 2 双程走时设置为 450 ns 时交互式解释数据表  
Tab. 2 Interactive interpretation date (time:450 ns)

层	深度/m	$V_{修正}/(m/ns)$	$V_{初始}/(m/ns)$	相对介电常数
Layer1	3.76	0.124	0.13	5.85
Layer2	7.59	0.133	0.13	5.08
Layer3	10.81	0.137	0.13	4.79
Layer4	13.21	0.110	0.13	7.43
Layer5	17.04	0.162	0.13	3.42
Layer6	19.94	0.110	0.13	7.43
Layer7	22.76	0.129	0.13	5.40

表 3 双程走时设置为 680 ns 时交互式解释数据表  
Tab. 3 Interactive interpretation date (time:680 ns)

层	深度/m	$V_{修正}/(m/ns)$	$V_{初始}/(m/ns)$	相对介电常数
Layer1	4.75	0.126	0.13	5.66
Layer2	12.66	0.121	0.13	6.14
Layer3	19.97	0.131	0.13	5.24
Layer4	26.29	0.129	0.13	5.40
Layer5	32.44	0.135	0.13	4.93
Layer6	37.38	0.141	0.13	4.52
Layer7	44.05	0.121	0.13	6.14

由表 1~3 可知,设置不同双程走时,介电常数的推导值没有发生明显变化,说明检测数据受外界干扰接近,这就保证数据归纳时能集中,从而可根据介电常数的主要分布来等效该区域内介电常数。基于这一思路,本文将各个参数设置的介电常数值进行合并整理,如图 5 所示。

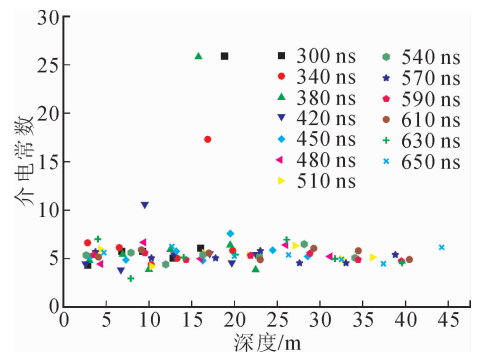


图 5 推导介电常数散点归纳图

Fig. 5 Conclude of diffused electrical permittivity

由图 5 可知,通过设置不同双程走时,检测以粘性土为主的掌子面时,介质中等效介电常数并没有发生很明显的改变,主要分布范围为 4~7。另外图 5 中出现了几个较大介电常数值,说明出现了较大偏差,这是由于采集数据时受到了严重干扰。但从整体来看,依然可以根据其余数据的集中程度判断,该地质区域内的岩性等效介电常数主要为 4~7;从而可以进一步判断出掌子面前方 25 m 处围岩的岩性基本稳定,没有发生明显变化,进而保证了施工人员的安全。

## 3 介电常数的递推算法应用

利用某高速公路的浅埋隧洞作为研究对象,该隧道开挖形式为双洞分离式,其中左线长 1 243 m,最大埋深 129 m;右线长 1 215 m,最大埋深 120 m。左右两线地质情况较为相似,以灰岩为主,勘察结果

为Ⅳ级、Ⅴ级围岩,并利用 ZX 20+734 和 ZX 20+759 这 2 个里程之间距离进行实际应用和验证。

### 3.1 地层结构推算分析

经过现场检测、后期数据处理,选取算例是双程走时 450 ns 时的扫描图,地质雷达设置具体参数如表 4 所示。

表 4 地质雷达试验参数

Tab. 4 The parameters of radar experiment

Config Type	测量对象	Geo
Config Name	天线	100 MHz
Transmit Rate	发射率	50 kHz
Samp/scan	采样/测点	512/1 024
Scans/sec	测点/s	15~30
Scans/m	扫描/m	10
Ranges	双程走时	450 ns
Depth	深度	25 m

预报范围是 ZX20+734~ZX20+759 之间 25 m,扫描图及波列图如图 6 所示。图 6 中(a)是相应里程掌子面自左向右探测的雷达扫描图,(b)为自动增益处理、叠加处理后的单点波列图,(c)为波列图。

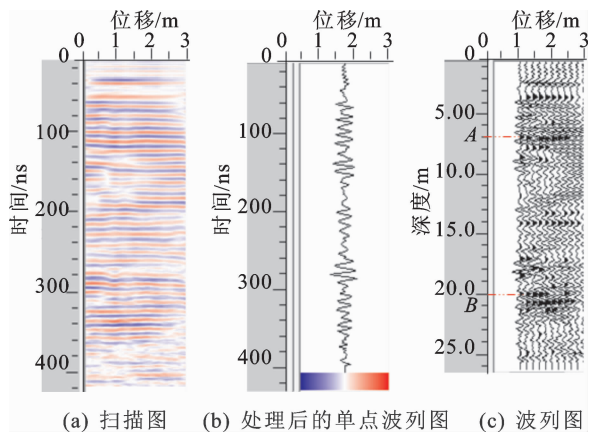


图 6 ZX 20+734~ZX 20+759 扫描图、单点波列图及波列图

Fig. 6 Images of radar scanning and oscillogram from ZX 20+734 to ZX 20+759

通过观察图 6(c)中的 A、B 两点,表示在掌子面前方 7 m 及 20 m 处出现了连续的反射波界面,反射界面明显,反射面附近波幅显著增强。由于反射波的同相轴连续性较好,可以判断该反射波同相轴连线为破碎带的位置。

表 5 雷达波传播走时与速度

Tab. 5 Distance and velocity of radar wave

层	深度/m	$V_{修正}$ / (m/ns)	$V_{初始}$ / (m/ns)	相对介电常数
Layer1	2.70	0.142	0.13	4.46
Layer2	6.69	0.151	0.13	3.94
Layer3	9.44	0.092	0.13	10.63
Layer4	13.08	0.129	0.13	5.40
Layer5	17.08	0.128	0.13	5.49
Layer6	19.72	0.140	0.13	4.59
Layer7	22.71	0.129	0.13	5.40

基于地质勘探方给出施工掌子面的地质资料,即:主体为红粘土及碎石土,掌子面顶部有滴水现象,结合检测及后处理得到的图 6 及表 5 数据可提前预测出以下几点。

1) 距掌子面前方 0~4 m 之间的围岩的岩性与掌子面的岩性基本相同,围岩级别变化不大,介电常数基本为 4.46。

2) 距掌子面前方 4~8 m 之间的围岩介电常数为 3.94,根据地质勘探资料可知岩性基本为红粘土,因同相轴连续性较好,预测其较之前 0~4 m 的围岩结构更为松散。

3) 距掌子面前方 8~12 m 之间的围岩介电常数为 10.63,较之前的介电常数有明显的变化。由地质资料可知,介质不会有较大变化,因此预测是由于含水量增高引起的,在开挖该范围掌子面会有明显的滴水现象。

4) 距掌子面前方 12~20 m 之间的围岩介电常数基本保持不变。根据多次检测与数据分析可知,可能是由于水对电磁波的吸收削弱所致,因此预测该范围内仍有滴水现象。

5) 距掌子面前方 20~25 m 内介电常数为 5,但是由于距离较远,传播的电磁波信号较弱,保守预测该范围内依然含水,但含水率不高。

### 3.2 地质素描验证

工程隧道挖掘方式主要为挖掘机钻进,速度较慢且扰动较小,有利于采集到现场图片。随着隧道的开挖,从 2011 年 12 月 22 日 ZX20+734 到 2012 年 1 月 7 日 ZX20+756,施工掘进 22 m,属于检测的有效预测桩号范围之内,通过现场照片(见图 7~10),可以了解及判断不同介电常数雷达预报的准确性。

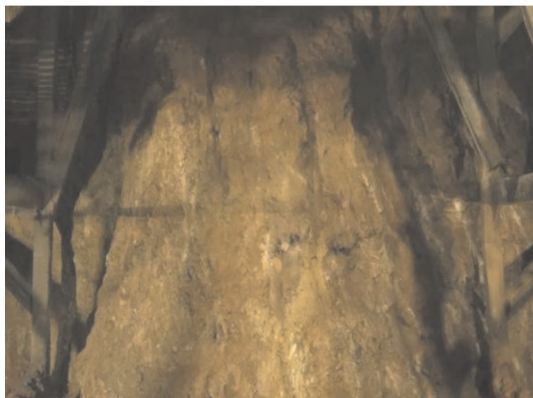


图7 开挖3 m处掌子面  
Fig. 7 Excavation 3 m of the tunnel

图7是开挖3 m处掌子面的地质现状图,从现场观测可知:该掌子面的围岩主要以红粘土为主,土体紧实、坚硬,但在表层并没有明显看到碎石土,也无滴水现象。

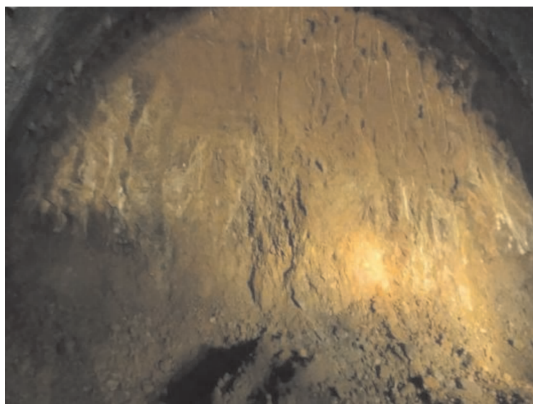


图8 开挖7 m处掌子面  
Fig. 8 Excavation 7 m of the tunnel

图8是开挖到7 m处的掌子面的地质现状图,从现场观测可知:该掌子面的围岩主要以红粘土、碎石土为主,质地较为松散,开挖时较为容易,且红粘土中夹杂着不少碎石土。

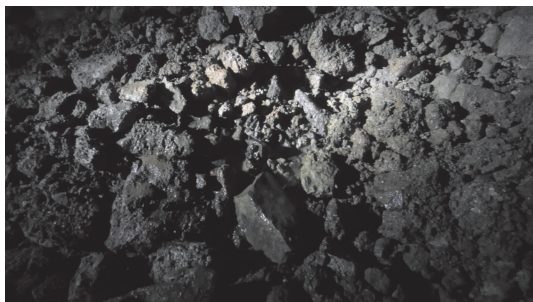


图9 开挖10 m处掌子面  
Fig. 9 Excavation 10 m of the tunnel

图9是开挖到10 m处的掌子面的地质现状图,从现场观测可知:该掌子面的围岩主要以红粘土、碎

石土为主,质地松散,虽然施工条件差,但开挖较易,开挖过程中围岩有明显出水现象,如图中所示是开挖出含水量较大碎石土。



图10 开挖20 m处掌子面  
Fig. 10 Excavation 20 m of the tunnel

图10是开挖到20 m处的掌子面的地质现状图,从现场观测可知:该掌子面的围岩主要以红粘土为主,质地较硬,红粘土中夹杂着不少碎石土,现场检测时发现围岩中明显含水,且拱顶、拱腰处有明显的出水痕迹。

综上所述,根据逐步记录的开挖现场照片,可以看出在ZK20+741,即在距开始掌子面后隧道开挖为7 m处,围岩地质变化比较明显,岩性变差,开挖较易,参考图6(c)中的A点处,验证了根据介电常数判断较为准确;另外在距离掌子面20 m处,详见图6(c)中的B点处,波列图有明显衰减,符合实际的围岩含水这一变化情况,综合对比,可见在该区域内选取岩性的等效介电常数为4~7是比较准确的。

#### 4 结 论

通过递推反算得出电磁波速在不同双程走时、不同地层深度中传播的修正速度,并对推算出的围岩介电常数值分布散点进行了归纳,旨在为利用地质雷达数据来递推反演介电常数提出一个支撑。

1) 应用地质雷达进行隧道现场地质等效介电常数归纳,可以较为准确快速得出隧道掌子面岩土体的岩性。

2) 岩土体等效介电常数稳定在一定范围内,与标准的介电常数值并不相等。

3) 为减小雷达探测过程中的干扰因素,如施工台车、钻孔设备及电焊机等的干扰,应进行多次布置测线进行测量,才能较为准确的同以往的等效介电常数值进行比对。

4) 通过雷达检测数据递推得到的介电常数与现场地质特征进行综合对比分析可以提高预报准确度。但由于某些地质差异无法准确在雷达扫描图中呈现,因此对地质雷达波形图解析时存在误差,所以

当施工进度增加时,需把预测结果和现场掌子面地质相对比,做进一步的修正。

#### 参考文献:

- [1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [2] 雷宛,肖宏跃,邓一谦. 工程与环境物探教程[M]. 北京:地质出版社,2006.
- [3] 由广明,刘学增,汪成兵. 地质雷达在公路隧道超前地质预报中的应用[J]. 公路交通科技,2007,24(8):92-95.  
YOU Guangming, LIU Xuezheng, WANG Chengbing. Application of ground penetrating radar to geological forecast for expressway tunnel construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007,24(8):92-95.
- [4] 肖宏跃,雷宛,杨威. 地质雷达特征图像与典型地质现象的对应关系[J]. 煤田地质与勘探,2008,36(4):57-61.  
XIAO Hongyue, LEI Wan, YANG Wei. Correspondence between geological characteristics of radar images and typical geological phenomenon[J]. Coal Geology & Exploration, 2008,36(4):57-61.
- [5] 杨峰,彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [6] 曾昭发,刘四新,冯珏,等. 探地雷达原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [7] 陈云敏,边学成,陈仁朋,等. 电磁波在三相土介质中的传播[J]. 应用数学和力学,2003,24(6):611-618.  
CHEN Yunmin, BIAN Xuecheng, CHEN Renpeng, et al. Propagation of electromagnetic wave in the three phases soil media[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2003,24(6):611-618.
- [8] 陈云敏,梁志刚,陈仁朋. 电磁波在饱和和无粘性土中的传播特性及试验研究[J]. 土壤学报,2005,42(5):860-865.  
CHEN Yunmin, LIANG Zhigang, CHEN Renpeng. Propagation properties of electromagnetic wave in saturated noncohesive soil and laboratory test[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005,42(5):860-865.
- [9] WALKER P D, Bell M R. Subsurface permittivity estimation from ground-penetrating radar measurements [C]// the IEEE 2000 International Radar Conference,2000.
- [10] SPAGNOLINI U. Permittivity measurements of multi-layered media with monostatic pulse radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997,35(2):454-463.
- [11] SCOTT W R, SMITH G S. Measured electrical constitutive parameters of soil as functions of frequency and moisture content[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992,30(3):621-623.
- [12] 吕高,李宁,朱才辉,等. 浅埋红黏土隧洞围岩含水率迁移研究及地层结构反演分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):4041-4048.  
LÜ Gao, LI Ning, ZHU Caihui, et al. Study of moisture content migration of red clay and stratigraphic structure inversion analysis in shallow buried tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(S2):4041-4048.
- [13] WOBSCHELL D. A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water; the semi-disperse model[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1977,15(1):49-58.
- [14] WANG J R, SCHMUGGE T J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1980,GE-18(4):288-295.
- [15] TABBAGH A, CAMERLYNCK C, COSENZA P. Numerical modeling for investigating the physical meaning of the relationship between relative dielectric permittivity and water content of soils[J]. Water Resources Research, 2000,36(9):2771-2776.
- [16] CHEN Yongping, DANI O. Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity [J]. Water Resources Research,2006,42(6):W06424.
- [17] 刘海,谢雄耀. 上海盾构隧道壁后土体介电常数测试实验[J]. 岩土工程学报,2009,31(2):294-297.  
LIU Hai, XIE Xiongyao. Dielectric constant tests on soils behind shield tunnel segment in Shanghai [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(2):294-297.
- [18] 刘敦文,古德生,徐国元,等. 采空区充填物探地雷达识别技术研究及应用[J]. 北京科技大学学报,2005,27(1):13-16.  
LIU Dunwen, GU Desheng, XU Guoyuan, et al. Exploration study of gob filling by ground penetrating radar and its application[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005,27(1):13-16.
- [19] 陈权,曾江源,李震,等. 遥感监测介电常数与土壤含水率的关系模型[J]. 农业工程学报,2012,28(12):171-175.  
CHEN Quan, ZENG Jiangyuan, LI Zhen, et al. Relationship model of soil moisture and dielectric constant monitored with remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12):171-175.

- [20] 程久龙,胡克峰,王玉和,等. 探地雷达探测地下采空区的研究[J]. 岩土力学,2004,25(增刊1):79-82.  
CHENG Jiulong, HU Kefeng, WANG Yuhe, et al. Research on detecting of underground mined-out areas by using GPR[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(S1):79-82.
- [21] 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 Shucai, XUE Yiguo, ZHANG Qingsong, 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.
- [22] 苏立海,李宁,吕高,等. 碎石泥土混合体介电常数研究及隧洞软弱带 FDTD 正演[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(6):1172-1178.  
SU Lihai, LI Ning, LÜ Gao, et al. Dielectric constant of gravel-soil mixture and FDTD forward analysis of weak zone in tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(6):1172-1178.
- [23] 谭绍泉,刘秦生,徐锦玺,等. 地质雷达技术在表层结构调查中的应用与研究[J]. 石油物探,2003,42(1):59-62.  
TAN Shaoquan, LIU Taisheng, XU Jinxi, et al. Application of ground-penetrating radar technology in investigation of surface structure[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003,42(1):59-62.
- [24] 袁明德. 探地雷达检测中如何计算速度[J]. 物探与化探,2003,27(3):220-222.  
YUAN Mingde. The speed calculation in ground-penetrating radar detection[J]. Geophysical & Geochemical Exploration,2003,27(3):220-222.

(责任编辑 王卫勋,王绪迪)

(上接第 148 页)

- [2] DERBY J J, BROWN R A. Thermal-capillary analysis of Czochralski and liquid encapsulated Czochralski crystal growth II. processing strategies[J]. Journal of Crystal Growth,1986,75(2):227-240.
- [3] DERBY J J, BROWN R A. Thermal-capillary analysis of Czochralski and liquid encapsulated Czochralski crystal growth; I. Simulation [J]. Journal of Crystal Growth,1986,74(3):605-624.
- [4] DONALD T J H. Crystal pulling from the melt[M]. New York:Springer Verlag,1993.
- [5] BRICE J C, BRUTON T M, HILL O F, et al. The Czochralski growth of  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 1974,24-25:429-431.
- [6] JONES D W. An experimental model of the flow in Czochralski growth[J]. Journal of Crystal Growth,1983,61(2):235-244.
- [7] SEIDL A, MARTEN R, MTILLER G. In situ investigation of oxygen distribution and transport in Czochralski silicon melts by electrochemical solid ionic sensors [J]. Journal of Crystal Growth. 1996, 166 (1-4): 680-684.
- [8] GEVELBER M, George S. Dynamics and control of the Czochralski process I: Modeling and dynamic characterization[J]. Journal of Crystal Growth, 1987, 84(4): 647-668.
- [9] GEVELBER M, George S. Dynamics and control of the Czochralski process II; Objectives and control structure design[J]. Journal of Crystal Growth,1988, 91(1-2): 199-217.
- [10] GEVELBER M, George S. Dynamics and control of the Czochralski process III: Interface dynamics and control requirements[J]. Journal of Crystal Growth, 1994, 139(3-4): 271-285.
- [11] GEVELBER M, George S. Dynamics and control of the Czochralski process IV: Control structure design for interface shape control and performance evaluation [J]. Journal of Crystal Growth, 1994, 139(3-4): 286-301.
- [12] SCHEEL H J. Historical aspects of crystal growth technology[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 211(1):1-12.
- [13] 蒋荣华,肖顺珍. 半导体硅材料的进展与发展趋势[J]. 四川有色金属,2000,(3):1-7.  
JIANG Ronghua, XIAO Shunzhen. Progress and development trend of semiconductor Si materials[J]. Sichuan Nonferrous Metals,2000,(3):1-7.
- [14] 张尚中. 提拉法晶体生长全局数值模拟[D]. 重庆:重庆大学资源与环境科学学院,2009:4.  
ZHANG Shangzhong. Global simulation of Czochralski crystal growth[D]. Chongqing: College of Resource and Environmental Science of Chongqing University, 2009:4.
- [15] MARTINEZ D M. Modeling and control of the Czochralski crystal growth process [D]. Texas: Texas A&M University,2002.

(责任编辑 周 蓓)