



移动扫码阅读

董江鑫,王 飞.地质雷达和高密度电法联合探测底板含水性的应用[J].煤炭科学技术,2022,50(5):222-231.

DONG Jiangxin, WANG Fei. Application of GPR and high density electrical method to detect water content of floor [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 222-231.

## 地质雷达和高密度电法联合探测底板含水性的应用

董江鑫<sup>1,2</sup>,王 飞<sup>3</sup>

(1.太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024;2.阳泉新宇岩土工程有限责任公司,山西 阳泉 045000;  
3.太原理工大学 应急管理学院,山西 太原 030024)

**摘要:**矿井底板富水是影响煤矿安全生产的重大隐患,为准确探查底板的含水性,指导煤矿防治水工作。采用对地质体识别精准的地质雷达和对水反应灵敏的高密度电法进行探测具有探测精度高、解释准确高效的特点。首先分析了地质雷达和高密度电法的基本原理,然后基于地质雷达正演理论,建立了完整地层、溶孔溶洞、裂缝裂隙正演模型,分析各自模型的雷达图像特征;基于高密度电法正演理论,建立了完整地层、高阻、低阻正演模型,在分析各自模型正演响应特征的基础上进一步给出反演结果。数值模拟结果表明地质雷达可根据图像特征来识别地质体,高密度电法可根据高阻、低阻响应特征来判定含水性。最后,在贺西矿四采区东翼底抽巷2号钻场处底板进行实际探测,准确探测了底板下方30 m范围内存在两处含水异常,一处为含水裂隙裂隙发育带,另一处为一富水带。经钻探实际验证,探测所显示的含水异常体与实际对应较好,结果表明了矿井地质雷达和高密度电法联合探测可以准确有效地探测底板含水性。

**关键词:**地质雷达;高密度电法;正演模拟;底板含水性;突水

**中图分类号:**P631.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2022)05-0222-10

### Application of GPR and high density electrical method to detect water content of floor

DONG Jiangxin<sup>1,2</sup>, WANG Fei<sup>3</sup>

(1. School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Yangquan Xinyu Geotechnical Engineering Co., Ltd., Yangquan 045000, China; 3. School of Emergency Management, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The rich water in the mine floor is a major hidden danger that affects the safety production of coal mines. The use of geological radar for accurate identification of geological bodies and high-density electrical methods sensitive to water has the characteristics of high detection accuracy, accurate interpretation and high efficiency. Firstly, the basic principles of geological radar and high-density electrical method were analyzed, and then based on the forward modeling theory of GPR, the forward modeling of complete strata, dissolved pores and caves, karst caves and fractures were established, and the radar image characteristics of each model were analyzed. Based on the forward modeling theory of HDE, a complete formation, high-resistance, and low-resistance forward modeling models were established, and the inversion results were further given based on the analysis of the forward modeling response characteristics of the respective models. The results of numerical simulation show that GPR can identify the geological body according to image characteristics, and high-density electrical method can determine the water content according to the high-resistance and low-resistance response characteristics. Finally, the actual detection was carried out at the floor of the east wing of the fourth mining area of Hexi mine, and two water bearing anomalies were detected within 30 m below the bottom of the floor. One was the water bearing fracture development zone, and the other was a water rich zone. The results show that the combined detection of mine GPR and high-density electrical method can accurately and effectively detect the water content of the floor.

**Key words:** geological radar; high-density electrical method; forward modeling; water content of floor; water inrush

收稿日期:2021-10-26      责任编辑:周子博      DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-0418

作者简介:董江鑫(1993—),男,山西晋中人,硕士。E-mail:957582316@qq.com

通讯作者:王 飞(1972—),男,山西太原人,副教授。E-mail:999wangfei@163.com

## 0 引言

矿井水害是煤矿五大灾害之一,其中因底板富水而造成的透水事故时有发生。当巷道底板存在裂隙、溶孔溶洞等隐伏构造时,极易发育成隐伏的导水通道,严重威胁着煤矿的安全生产工作。因此,对底板含水性的预测预报是防治水的关键。用地球物理手段来对底板含水性进行探查是一种快速、经济且有效的水害预报方法。目前,用于煤矿巷道底板探测的主要有地震法<sup>[1]</sup>、瞬变电磁法<sup>[2-4]</sup>、地质雷达<sup>[5-7]</sup>和直流电法<sup>[8-9]</sup>等。其中,地震法施工复杂、效率低下;瞬变电磁法对水反应灵敏但受巷道铁器、动力电等环境因素干扰较大;地质雷达法具有高分辨率、施工效率高、抗干扰能力强、无损探测的特点;高密度电法属于直流电法,具有对水反应灵敏且不易受铁器干扰。因此,相比其他方法,地质雷达和高密度电法对于煤矿井下更实用。近年来,一些学者对矿井地质雷达和高密度电法的应用做了相关研究。杨立彪<sup>[10]</sup>、李冬等<sup>[11]</sup>开展了地质雷达在煤矿掘进巷中超前探测的研究;梁庆华等<sup>[12]</sup>将地质雷达应用到瓦斯探测中;王雪涛<sup>[13]</sup>做了地质雷达探测采空区及其充填情况的应用。黄晓容<sup>[14]</sup>将矿井高密度电法用于对充水岩溶裂隙探测;杨德鹏等<sup>[15]</sup>研究了井下三维高密度电法在超前探测的应用;李松峰等<sup>[16]</sup>做了矿井高密度电法在探测煤层富水性中的应用。李文<sup>[17]</sup>将地质雷达法和高密度电法用于埋深小于50 m的极浅采空区的探测;邵雁<sup>[18]</sup>通过地质雷达法和高密度电法在岩溶突水通道中的探测,确定了岩溶突水通道发育范围;许锡昌等<sup>[19]</sup>在废弃矿井中采用地质雷达和高密度电法探测到了巷道及采空区范围。但是,有关地质雷达和高密度电法在煤矿底板含水性的联合探测的应用及相关的正演模拟还比较少,本文针对此开展研究。

## 1 基本原理

### 1.1 地质雷达基本原理

地质雷达是通过发射天线T向探测目标体发射高频电磁波,在电磁波向介质传播过程中,遇到电性差异较大的界面时,就会发生折射、透射等现象,然后被接收天线Z所接收并传回雷达主机,其原理与地震反射法类似,如图1所示。通过对接收到的电磁波信号进行处理,分析其波形、强度、旅行时等特征,从而可以判断出地质体的位置、结构、形态<sup>[20]</sup>。

电磁波反射系数公式如下:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

式中,R为反射系数;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 为界面上、下介质的相对介电常数。

地质雷达探测目标体的距离L可以通过式(2)计算得出:

$$L = \frac{vt}{2} \quad (2)$$

式中,v为电磁波在介质中的传播速度;t为电磁波的双程走时。

反射界面的深度h可通过式(3)计算:

$$h = \frac{\sqrt{v^2 t^2 - x^2}}{2} \quad (3)$$

式中,x为发射天线和接收天线之间的距离。

电磁波在介质中的速度可以根据式(4)求出:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad (4)$$

式中,c为电磁波在真空中的传播速度( $c = 3 \times 10^8$  m/s); $\varepsilon'$ 为电磁波在介质中传播的相对介电常数。

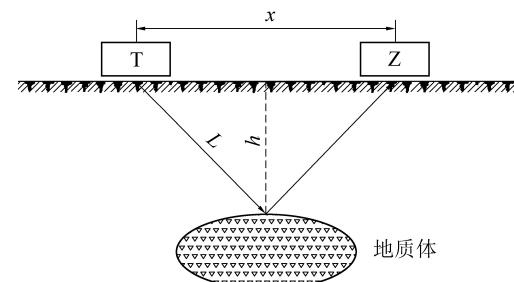


图1 地质雷达原理示意

Fig.1 Schematic of GPR

### 1.2 高密度电法基本原理

高密度电法是一种集电测深和电剖面法于一体的阵列式勘探方法,其原理与直流电法基本一致,仍然以不同岩、矿石之间的电性差异为基础,通过向供电电极通电建立地下稳定直流电场,来观测地下电流场的分布及变化规律,从而推断地质构造的规模、含水性等信息<sup>[21]</sup>。在解决矿井构造导水、老空积水、充水岩溶裂隙等地质问题上效果显著。

选用温纳装置跑极时, $AM=MN=NB=ma$ ,a为单位电极距,m为隔离系数,如图2所示。此时温纳装置的视电阻率的计算公式为:

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (5)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} = 2\pi ma \quad (6)$$

式中,  $\rho_s$  为岩、矿石的视电阻率;  $K$  为采集时选用方法的装置系数;  $\Delta U_{MN}$  为电极间的电位差;  $I$  为采集时的供电电流。

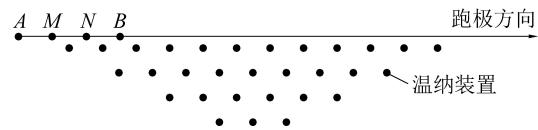


图 2 高密度电法温纳装置示意

Fig.2 Schematic of high density electrical method

## 2 正演理论

### 2.1 地质雷达正演理论

地质雷达的正演是基于 FDTD 算法对电磁波进行数值模拟计算。在时间域上,依据二阶精度有限差分原理,求解麦克斯韦旋度方程,从而实现微分形式麦克斯韦旋度方程向差分形式的转化,实现对时空维度的采样<sup>[22]</sup>。

Maxwell 方程组如下:

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left( \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$\mathbf{D}_z(\omega) = \epsilon^*(\omega) \mathbf{E}_z(\omega) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial y} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial x} \quad (10)$$

其中,  $\epsilon_0$  为介电常数;  $\mathbf{E}$  为电场强度;  $\mathbf{H}$  为磁场强度;  $\omega$  为色散函数;  $\mathbf{D}$  为电位移矢量;  $\mu_0$  为磁导率。

上述 Maxwell 方程组变为差分形式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{D}_{z^2}}{\partial t}(i, j) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left[ \frac{\mathbf{H}_y\left(\frac{i+1}{z}, j\right) - \mathbf{H}_y\left(\frac{i-1}{z}, j\right)}{\partial x} \right] - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left[ \frac{\mathbf{H}_x\left(\frac{i+1}{z}, j\right) - \mathbf{H}_x\left(\frac{i-1}{z}, j\right)}{\partial y} \right] \quad (11)$$

$$\frac{\mathbf{H}_x^{n+1}\left(i, \frac{j+1}{2}\right) - \mathbf{H}_x^n\left(i, \frac{j+1}{2}\right)}{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\mathbf{E}_z^{n+1}(i, j+1) - \mathbf{E}_z^n(i, j)}{\Delta x} \quad (12)$$

$$\frac{\mathbf{H}_y^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) - \mathbf{H}_y^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right)}{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\mathbf{E}_z^{n+1}(i+1, j) - \mathbf{E}_z^n(i, j)}{\Delta x} \quad (13)$$

式(11)—式(13)就是针对二维电磁波问题进行离散所得的有限差分表达式,利用该表达式可在时域对电磁作用过程进行数值模拟;  $j$  为电流密度;  $n$  为自然数。

### 2.2 高密度电法正演理论

文中对高密度电法模型的正演模拟是基于有限差分法实现的。有限差分法实际上就是将所求解区域进行网格划分来实现离散化。用有限个网格节点代替连续区域,每个网格电位呈线性均匀变化,这样微分方程的边值条件就转化为了线性的变分形式,通过求解变分方程即可得到变换电位,再经过傅里叶变换就可得到真正的电位差,从而得到各装置下的视电阻率值<sup>[23]</sup>。

二维微分方程的边值条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) - \lambda^2 \sigma V = f_1 \\ \left. \frac{\partial V}{\partial z} \right|_{\Gamma_1} = 0 \\ \left[ gV + \frac{\partial V}{\partial n} \right]_{\Gamma_2} = 0 \\ f_1 = - \sum_{k=1}^n I_k d(x - x_k, z - z_k) \end{array} \right. \quad (14)$$

其中,  $\sigma$  为电导率;  $\lambda$  为余弦傅里叶变换波数;  $V$  为电位;  $f_1$  为第二类零阶修正贝塞尔函数;  $g$  为常数因子;  $\Gamma$  为边值条件;  $n$  为边界外法线方向;  $I_k$  为第  $k$  个供电电极的电流。

等价的变分边值条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} F(V) = \iint_s \left\{ \sigma \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 + \lambda^2 V^2 \right] + 2fV \right\} d_s + \int_{\Gamma_2} \sigma \eta V^2 dL \\ \delta F(V) = 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

式中:  $\eta$  为狄利克雷函数。

傅里叶变换后真正的电位差  $U(x, y, z)$  为

$$U(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty V(x, \lambda, z) \cos(\lambda y) d\lambda \quad (16)$$

### 3 正演模拟

#### 3.1 地质雷达正演模拟

地质雷达正演模拟是通过使用 GPRSIM 商业软件来实现的,模型的介电常数取值来源于介电温谱仪取样测试结果。

1)完整地层正演模拟。地层模型长度 100 m,宽度 27.8 m(图 3),模型参数见表 1。完整地层地质雷达正演图像如图 4 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameter

序号	岩性	厚度/m	介电常数
1	中粒砂岩	4.0	5
2	炭质泥岩	2.8	6
3	L5 石灰岩	6.2	7
4	6 号煤层	1.0	4
5	泥岩	1.8	7
6	粉砂岩	2.4	6
7	L4 石灰岩	9.6	7

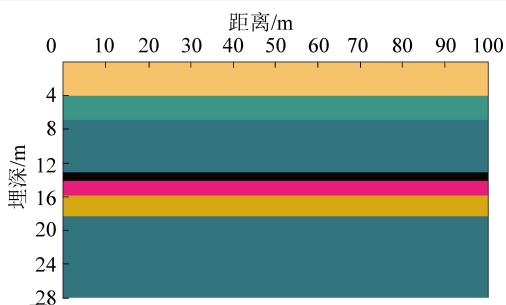


图 3 完整地层模型

Fig.3 Complete stratigraphic model



图 4 完整地层地质雷达正演图像

Fig.4 Complete formation geodetic radar forward image

由图 5 可看出,完整地层正演图像有完整且连续的同相轴,与模型的地层界面一一对应,电磁波信号随着深度的增加发生衰减。

2)溶孔(溶洞)正演模拟。以完整地层模型为基础,在 L5 灰岩中添加溶孔(溶洞)模型,直径设为 5 m,内部分别充气、充水、半充气半充水,水的介电常数设为 81,空气介电常数设为 1。

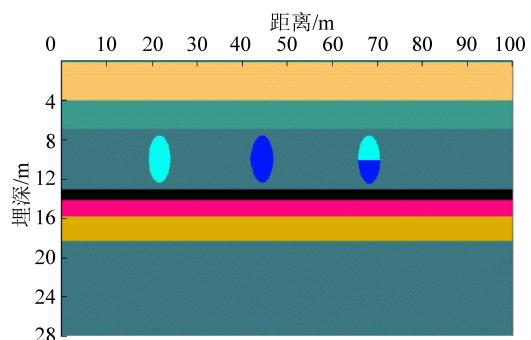


图 5 溶孔(溶洞)模型

Fig.5 Dissolved pore(karst cave) model



图 6 溶孔(溶洞)地质雷达正演图像

Fig.6 Dissolved pore(karst cave) GPR forward image

由图 6 可以看出,溶孔溶洞的雷达波呈双曲线,3 种模型顶界面的反射波均出现在同一时间,模型下部同相轴变现为局部缺失。对于充气模型,顶底界面反射波相位相反,这是由于在溶洞顶界面,电磁波是从高介电常数介质向低介电常数介质传播,而在底界面恰恰相反。由于电磁波在空气中衰减慢,底界面的反射波出现时间早(150 ns),下部伴随有较强能量的多次波出现(230 ns);对于充水模型,由于水介电常数很大,岩层的介电常数相对较低,电磁波在溶洞顶底界面的反射相位与充气模型恰好相反。同时,水中电磁波衰减很快,底界面的反射波出现的晚(420 ns),频率变低,下部有连续均匀的多次反射波出现,但能量比充气模型弱;对于半充气半充水模型,电磁波的反射经历了由岩层到空气、空气到水,水到岩层 3 个阶段的传播,水的介电常数>空气>岩层,因此顶底界面反射波相位相同,与气水界面反射波相位相反。在图 6 中可以看出气水界面反射波(140 ns)和底界面反射波(350 ns),但多次反射波基本看不出来。

3)裂缝裂隙模型。在完整地层模型的基础上,在 L5 灰岩中,添加一处裂缝裂隙模型,长度 10 m,宽度 5 m(图 7),裂隙裂隙分为充填空气、水。从图 8、图 9 中可以看出,裂缝裂隙处的雷达反射波呈条带状且杂乱,同相轴局部错断、缺失。对于充气模型,空气介电常数小,电磁波衰减慢,缝隙上下界面反射波混杂在一起,难以区分。而对于充水模型,水

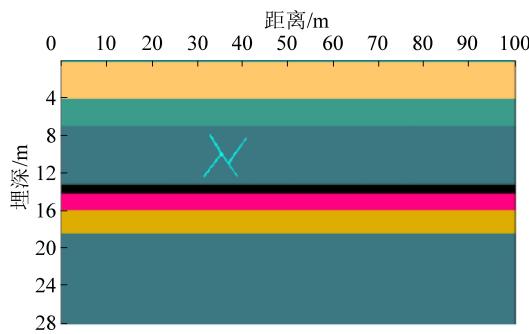


图 7 裂缝裂隙模型

Fig.7 Crack model

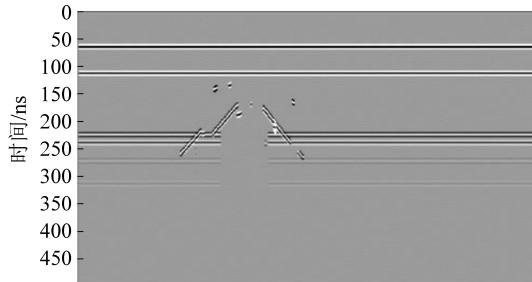


图 8 充气裂缝裂隙地质雷达正演图像

Fig.8 Forward imaging of GPR for gas cracks

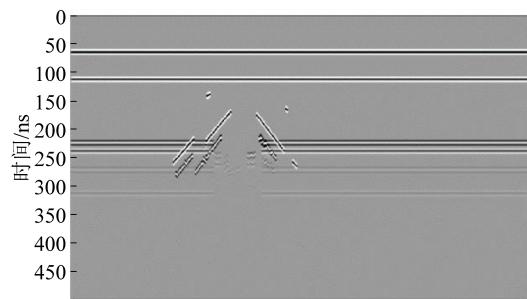


图 9 充水裂缝裂隙地质雷达正演图像

Fig.9 Forward imaging of GPR for water cracks

的介电常数大,电磁波衰减快,缝隙上下界面反射波可以分辨,且伴随有低频、均匀连续多次反射信号。真实地层中裂缝裂隙发育情况更加复杂,雷达反射波信号会比在模型信号的基础上更加杂乱。通过对典型地质体模型的雷达波规律特征进行研究分析加以总结,可用于实际探测中地质体的识别、判定,见表2。

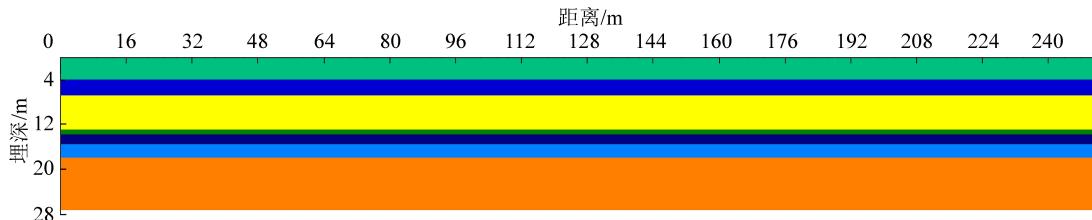


图 10 完整地层模型

Fig.10 Complete stratigraphic model

表 2 雷达正演图像特征

Table 2 Radar forward image features

模型	雷达特征
完整地层	各层界面同相轴连续完整
溶孔溶洞	反射波为双曲线
裂缝裂隙	反射波呈现条带状,比较杂乱,同相轴有缺失、错断
含水地层	反射波能量衰减快,伴随有低频均匀连续的多次信号

### 3.2 高密度电法正演模拟

高密度电法正演模拟是通过使用 RES2DMOD 商业软件来实现的,在得到正演结果的基础上,进一步使用 RES2DINV 商业软件给出了反演结果。模型电阻率的取值来源于矿方地质资料,并作了近似取整。

1) 完整地层模型。地层模型宽 27.8 m(图 10),完整地层模型参数见表 3。观测系统电极距 4 m,电极数 64,隔离层数为 15,跑极方式采用温纳装置,总计排列长度 252 m。从图 11、图 12 来看,完整地层模型的正、反演图像整体上均呈稳定层状分布。

表 3 完整地层模型参数

Table 3 Complete formation model parameters

序号	岩性	厚度/m	电阻率值/(Ω·m)
1	中粒砂岩	4.0	250
2	炭质泥岩	2.8	70
3	L5 石灰岩	6.2	2 500
4	6 号煤层	1.0	640
5	泥岩	1.8	80
6	粉砂岩	2.4	103
7	L4 石灰岩	9.6	2 500

2) 高、低阻模型。在完整地层模型的基础上,添加一个 4 m×4 m 的正方形地质体(图 13),地质体的电阻率分别设为 5 000 Ω·m 的高阻模型和 10 Ω·m 的低阻模型。

由图 14、图 15 可知,2 种模型的正演视电阻率断面图都具有完整地层模型成层状分布的特征,都有各自模型的高低阻响应特征。高阻模型的响应特

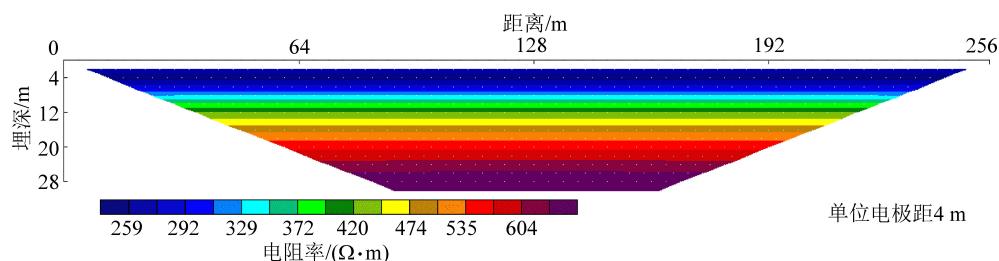


图 11 完整地层模型正演视电阻率断面图

Fig.11 Complete stratigraphic model forward modeling of apparent resistivity profile

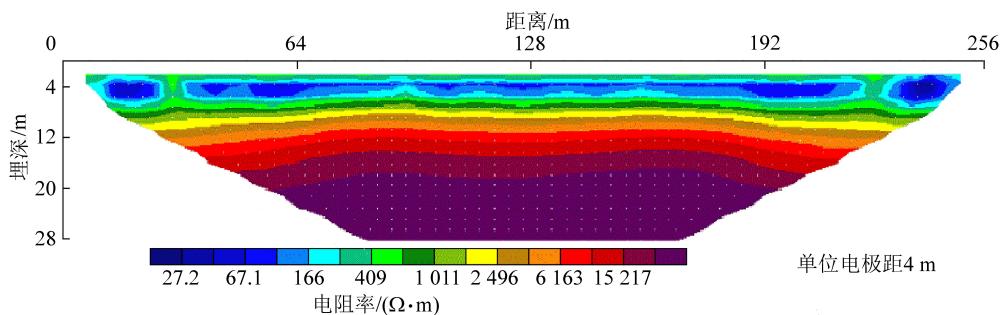


图 12 完整地层模型反演结果

Fig.12 Inversion results of complete stratigraphic model

征比较微弱,表现为视电阻率等值线的微微隆起;低阻模型的响应特征比较强烈,表现为视电阻率等值线向下凸出,并在模型位置处形成一个低阻区域。由图 16、图 17 可知,2 种模型的反演图像同样都具有完整地层模型成层状分布的特征。高阻模型的反演图像在模型位置处视电阻率等值线轻微向上隆起,地层整体视电阻率升高;低阻模型的反演图像在

模型位置处引起了视电阻率等值线的剧烈变化,形成一个明显的低阻区域,地层整体视电阻率降低。正演和反演图像对高阻和低阻模型的反映基本一致。高密度电法对低阻的响应灵敏,若底板含水,则会在视电阻率断面图上引起视电阻率等值线的剧烈变化,呈现出低阻响应特征,因此高密度电法可用于对含水性的判定。

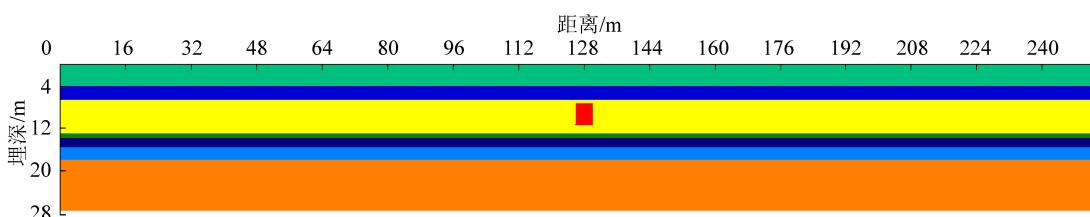


图 13 高、低阻地质体模型

Fig.13 High and low resistance geological body models

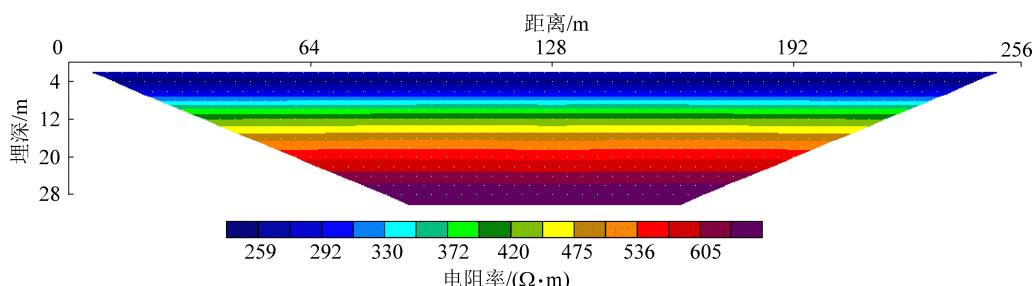


图 14 高阻模型正演视电阻率断面图

Fig.14 High resistivity model forward apparent resistivity profile

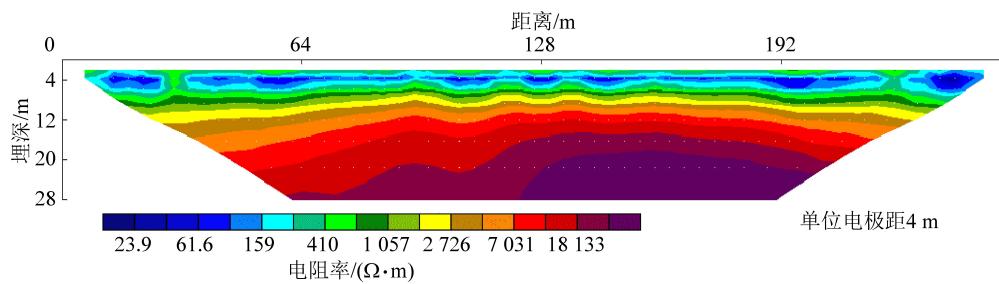


图 15 高阻模型反演结果

Fig.15 Inversion results of high resistance model

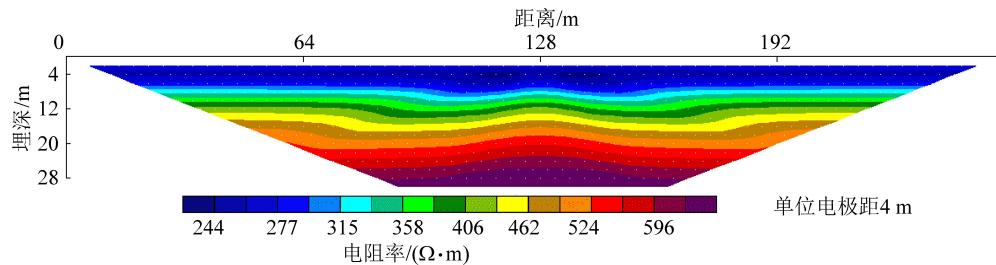


图 16 低阻模型正演视电阻率断面图

Fig.16 Low resistivity model forward apparent resistivity profile

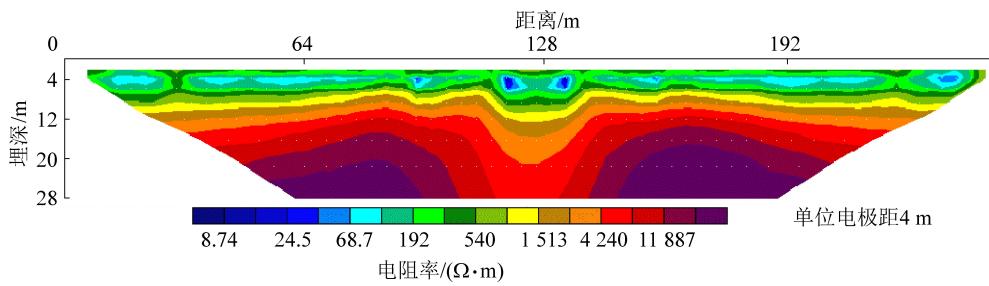


图 17 低阻模型反演结果

Fig.17 Inversion results of low resistance model

## 4 应用实例

### 4.1 工程概况

山西焦煤汾西矿业集团贺西矿四采区东翼底抽巷设计长度 2 155 m,巷高 2.7 m,巷宽 4 m,为矩形断面。按 3°上山掘进,设计在 4 号煤层底板下 10 m 处砂岩中,距离下部 L5 灰岩 9 m,再下部是 6 号煤层。本区域为带压开采区域,带压水源为太原组灰岩水和奥陶系灰岩水。根据相关水文资料,东翼底抽巷底板标高 +437~+492 m,太灰水水位标高约为 +720 m,所承受的水压为 2.28~2.83 MPa,突水系数  $T(0.251~0.309 \text{ MPa}/\text{m}) > 0.1 \text{ MPa}/\text{m}$ ,如果考虑到底板破坏问题,隔水层有效厚度更小,遇隐伏构造极易成为地下水的导水通道,对严重威胁着矿井安全。

2017 年 9 月 6 日,四采区东翼底抽巷 2 号钻场在进行钻孔施工时,发生水喷现象。钻孔实际进尺

14.5 m,换算成垂直高度 11.1 m,如图 18 所示,实际终孔位置处于 L5 灰岩中。为查明东翼底抽巷 2 号钻场底板含水性,保障矿井安全,在该处区域底板进行地质雷达和高密度电法联合探测。

### 4.2 数据采集

地质雷达测线以东翼底抽 2 号钻孔为中心,两边各 50 m,计剖面长度 100 m,点距 4 m,如图 19 所示。雷达选用 ZTR12 本安型地质雷达,选用 100 MHz 天线。探测过程中采用人为托举,沿测线贴底板滑动测量,在每个测点进行打标定位。采集的数据由专门的地质雷达数据处理软件分步处理,主要包括零线设定、一维滤波、背景去噪、小波变换、增益控制、滑动平均等,反复调试,直至得到较好效果。

高密度仪器选择 FDG-A 防爆多功能高密度电法仪,探测采用温纳装置,由于高密度电法为倒梯形断面,如果测线过短,两侧的探测深度会不够,因此

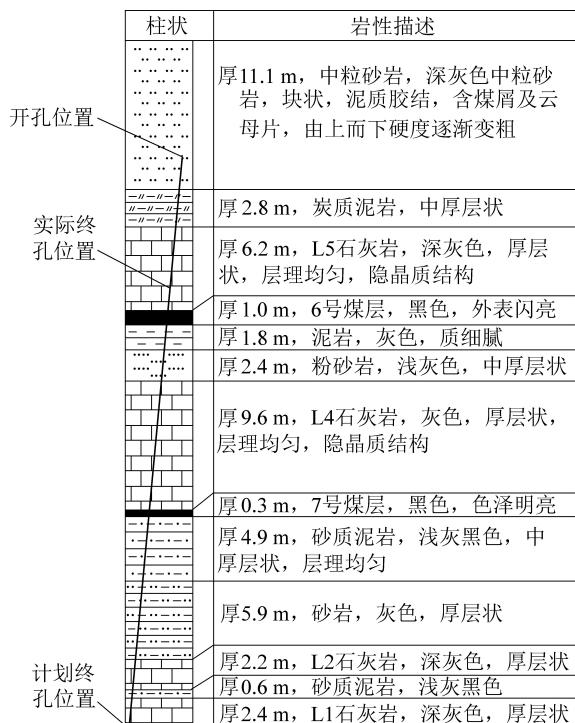


图 18 钻孔柱状

Fig.18 Borehole histogram

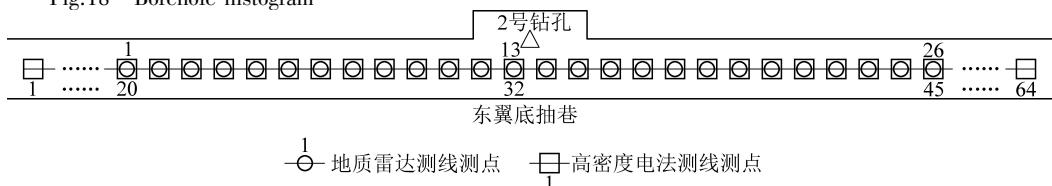


图 19 地质雷达和高密度电法测线布置

Fig.19 layout of GPR and high density electrical survey line

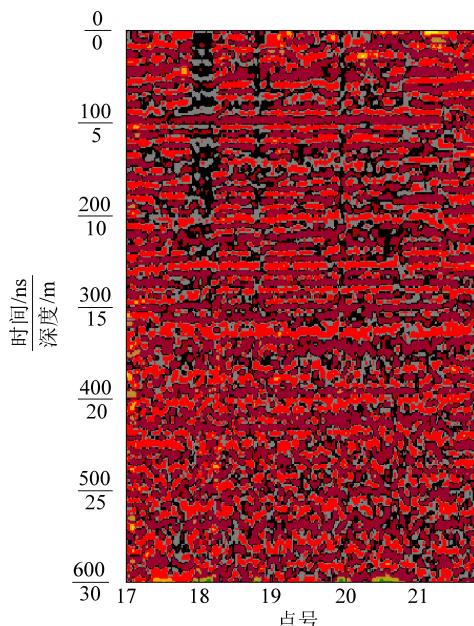


图 20 地质雷达 18~21 号点雷达剖面图

Fig.20 radar profile of GPR point 18~21

孔柱状图 4 和相关地质资料可知, L5 灰岩顶界面深度约 5 m, L4 灰岩底界面深度约 28 m, 该异常区位

为保证探测深度、剖面长度和地质雷达能够对应, 布置电极总数 64, 间隔层数为 20 层, 电极距 4 m, 测线以 2 号钻孔为中心布置, 重复利用地质雷达测点, 提高工作效率。采集过程电极不间断的用盐水浇灌, 确保与底板的耦合性良好。采集的数据在 RES2DINV 软件中处理, 包括突跳点剔除、地形校正、圆滑约束、最小二乘法反演迭代等过程最终绘制成图。

### 4.3 探测结果分析

地质雷达电磁波在不同的介质中传播, 会呈现不同的反射波特征, 例如波形、振幅、频率等; 高密度电法对所观测到的地下电流变化经过处理得到视电阻率值特征。通过对这些特征进行分析并且结合有关地质资料, 即可对探测到的异常体做出判定。地质雷达 18~21 号点的雷达剖面图如图 20 所示, 无异常时, 雷达波呈现弱反射(雷达波颜色越明亮表示反射越强), 同相轴连续性较好。地质雷达 4~8 号点的雷达剖面图如图 21 所示, 从雷达图像上看, 在深度 5~25 m, 这一区域内存在强反射, 雷达反射波呈现条带状, 同相轴错段、波形杂乱, 中低频信号都有, 根据钻

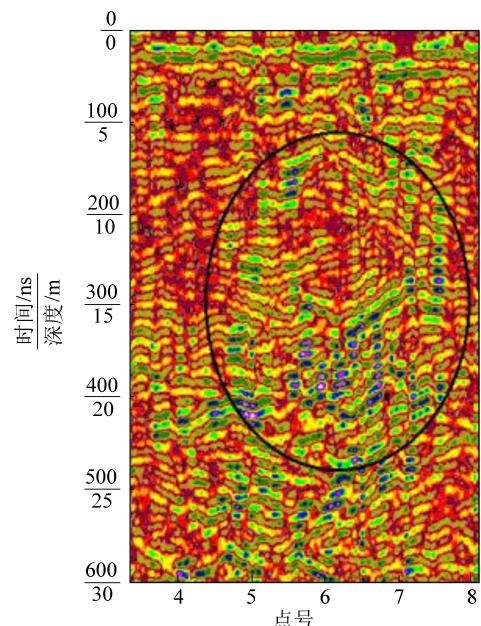


图 21 地质雷达 4~8 号点的雷达剖面图

Fig.21 radar profile of GPR point 4~8

于其间, 经过分析判定该区域为裂缝裂隙发育带。

地质雷达 11~14 号点的雷达剖面图如图 22 所

示,从雷达图像上看,在深度5~25 m这一区域内存在有一定规律强反射,雷达反射波同相轴连续性较

好、波形比较均一,低频成分丰富,存在多次反射,该处13号点与14号点之间为发生过水喷现象的2号钻孔,经过分析判定该区域为一富水带。

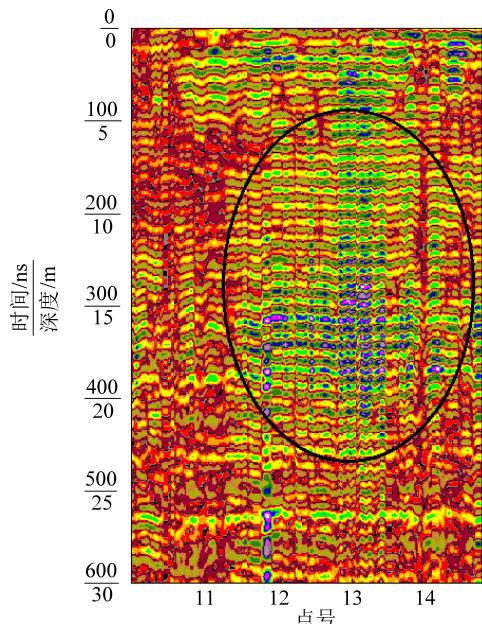


图22 地质雷达11~14号点的雷达剖面图

Fig.22 radar profile of GPR points 11-14

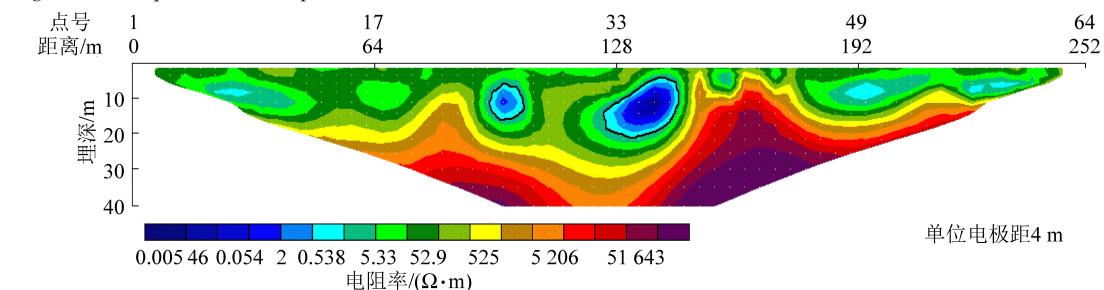


图23 高密度电法反演结果

Fig.23 Inversion results of high density electrical method

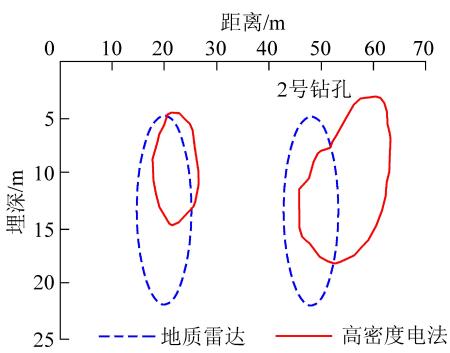


图24 地质雷达和高密度电法异常区叠合

Fig.24 Composite of abnormal area of GPR

and high density electrical method

## 5 结 论

1)通过结合地质资料建立地质雷达和高密度电法正演模型,研究了其响应特征,对于实际工程探测有很好的指导意义。

高密度电法视电阻率断面图如图23所示,由上述地质雷达和高密度电法测线布置图19可知,地质雷达1~26号点与高密度电法20~45号点相对应。图中高密度电法20~45点之间反演深度大于30 m,与地质雷达探测深度对应,因此只对此区域做出解释。该断面图总体呈现高阻,符合该巷道底板地层总体为灰岩的特征。图中可看到两个明显的低阻异常区,一处在点号24~27,深度为5~15 m的范围内;另一处在点号31~36,深度为3~20 m的范围内。

图24为地质雷达和高密度电法异常区叠合图,2种方法所探测到的异常区范围吻合较好,结合地质雷达探测结果,经过综合分析判定本次探测区域存在两处异常,一处为裂缝裂隙发育带且含水,另一处为一富水带。后经矿方打钻,2处异常均被验证,并及时采取了措施治理。

2)地质雷达具备高分辨率,通过对雷达图像的分析能有效地识别地质体;对于地质体的含水性,高密度电法可根据高阻、低阻响应特征来准确判定。

3)地质雷达和高密度电法的联合使用,准确探测出了底板的含水性,有效地指导了煤矿安全生产。

## 参考文献(References):

- [1] 刘盛东,章俊,李纯阳,等.矿井多波多分量地震方法与试验[J].煤炭学报,2019,44(1):271~277.  
LIU Shengdong, ZHANG Jun, LI Chunyang, et al. Multiwave and multicomponent seismic methods and tests in coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 271~277.
- [2] 于景邨.矿井瞬变电磁法勘探[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
- [3] 于景邨,胡兵,刘振庆,等.矿井瞬变电磁探测技术的应用[J].物探与化探,2011,35(4):532~535.  
YU Jingcun, HU Bing, LIU Zhenqing, et al. Application of TEM detection technology in coal mines [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(4): 532~535.
- [4] 卞义,李江华,徐慧,等.矿井瞬变电磁法参数优化试验及

- 超前探测应用[J].煤炭科学技术,2020,48(6):184-190.
- MU Yi, LI Jianghua, XU Hui, et al. Parameters optimization test of mine transient electromagnetic method and application of advanced detection [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 ( 6 ): 184-190.
- [5] 王太元,董远浪,屈旭辉.地质雷达技术在阳泉矿区井下超前探测中的应用[J].中州煤炭,2015(2):99-105.
- WANG Taiyuan, DONG Yuanlang, QU Xuhui. Application of GPR technology in underground advanced detection of Yangquan mining area [J]. Zhongzhou Coal, 2015(2):99-105.
- [6] 刘振宇,邹仁辉.高密度电法与地质雷达联作在岩溶及土洞探测中的应用[J].云南地质,2019,38(2):256-261.
- LIU Zhenyu, ZOU Renhui. The application of the combination of high density electrical method and geological radar in karst and soil cave exploration [J]. Yunnan Geology, 2019, 38(2):256-261.
- [7] 张平松,欧元超,李圣林.我国矿井物探技术及装备的发展现状与思考[J].煤炭科学技术,2021,49(7):1-15.
- ZHANG Pingsong, OU Yuanchao, LI Shenglin. Development quo - status and thinking of mine geophysical prospecting technology and e - quipment in China [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7): 1-15.
- [8] 石学锋,韩德品.直流电阻率法在煤矿巷道超前探测中的应用[J].煤矿安全,2012,43(5):104-107.
- SHI Xuefeng, Han Depin. Application of direct current resistivity method in advance detection of coal mine roadway [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(5):104-107.
- [9] 韩德品,李丹,程久龙,等.超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J].煤炭学报,2010,35(4):635-639.
- HAN Depin, LI Dan, CHENG Jiulong, et al. Direct current method for advanced detection of disastrous water bearing geological structures [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):635-639.
- [10] 杨立彪.运用矿井探地雷达探测汾西矿区的异常地质构造[J].矿业安全与环保,2012,39(5):83-84.
- YANG Libiao. Using ground penetrating radar to detect the abnormal geological structure of fenxi mining area [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2012, 39(5):83-84.
- [11] 李冬,杜文风,许献磊,等.矿井地质雷达超前探测方法及应用研究[J].煤炭科学技术,2018,46(7):223-228.
- LI Dong, DU Wenfeng, XU Xianlei, et al. Advanced detection method and application research of mine geological radar [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7):223-228.
- [12] 梁庆华,宋劲,孙兴平,等.地质雷达井下探测瓦斯富集区特征研究[J].地球物理学进展,2013,28(3):1570-1574.
- LIANG Qinghua, SONG Jin, SUN Xingping, et al. Study on the characteristics of gas rich areas detected by GPR underground [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(3):1570-1574.
- [13] 王雪涛.地质雷达探测技术在乌东煤矿的应用实践[J].煤炭科技,2016,41(4):92-95.
- WANG Xuetao. Application practice of GPR detection technology in wudong coal mine [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2016, 41(4):92-95.
- [14] 黄晓容.矿井高密度电法在充水岩溶裂隙探测中的应用[J].矿业安全与环保,2014,41(5):56-58.
- HUANG Xiaorong. Application of high density electrical method in detection of karst fissure filled with water [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2014, 41(5):56-58.
- [15] 杨德鹏,翟培合,邢子浩,等.井下三维高密度电法超前探测技术在煤矿的应用[J].煤炭技术,2014,33(5):70-73.
- YANG Depeng, ZHAI Peihe, XING Zihao, et al. Application of three-dimensional high-density electrical prospecting technology in coal mines [J]. Coal Technology, 2014, 33(5):70-73.
- [16] 李松峰,李永军,魏军军.高密度电法在矿井富水性探测中的应用[J].华北科技学院学报,2013,10(3):12-14.
- LI Songfeng, LI Yongjun, WEI Junjun. The application of high-density electrical method in the detection of mine water abundance [J]. Journal of North China University of Science and Technology, 2013, 10(3):12-14.
- [17] 李文.煤矿采空区地面综合物探方法优化研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):194-199.
- LI Wen. Research on optimization of ground comprehensive geo-physical prospecting method in coal mine goaf area [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1):194-199.
- [18] 邵雁.矿井综合物探技术在南方煤矿探测岩溶突水通道中的应用[J].中国煤炭地质,2009,21(7):62-65.
- SHAO Yan. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in the detection of karst water inrush channel in southern coal mines [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(7): 62-65.
- [19] 许锡昌,陈卫东,刘伟.地质雷达和高密度电法在废弃矿井探测中的应用[J].岩土力学,2002,23(S1):126-132.
- XU Xichang, CHEN Weidong, LIU Wei. Application of geological radar and high-density electrical method in the detection of abandoned mines [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23 ( S1 ): 126-132.
- [20] 聂俊丽.基于地质雷达技术的采煤对浅部地层含水量影响规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
- NIE Junli. The law of soil water content change caused by coal mining based on the technology of GPR [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2014.
- [21] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等.高密度电法的进展与展望[J].物探与化探,2012,36(4):576-584.
- YAN Jiayong, MENG Guixiang, LYU Qingtian, et al. Progress and prospect of high density electrical method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4):576-584.
- [22] 谢建林,许家林.地质雷达探测顶板离层的数值与物理模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):317-322.
- XIE Jianlin, XU Jialin. Research on numerical and physical simulation of roof separation by GPR [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(2):317-322.
- [23] 周熙襄,钟本善,严忠琼,等.电法勘探正演数值模拟的若干结果[J].地球物理学报,1983,26(5):479-491.
- ZHOU Xixiang, ZHONG Benshan, YAN Zhongqiong, et al. Some results of the numerical simulation of forward exploration in electrical exploration [J]. Journal of Geophysics, 1983, 26 ( 5 ): 479-491.
- [24] 董江鑫.井下综合物探方法在探测贺西煤矿4#煤层底板灰岩含水性的应用[D].太原:太原理工大学,2020.
- DONG Jiangxin. Application of underground comprehensive geo-physical prospecting method in detecting water content of limestone in floor of Hexi coal mine 4# seam [D] Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.