



移动阅读

王鹏,程建远,姚伟华,等. 积水采空区地面-钻孔瞬变电磁探测技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2502-2508. doi:10.13225/j.cnki.jccs.KJ19.0620

WANG Peng, CHENG Jianyuan, YAO Weihua, et al. Technology of detecting water-filled goaf beside borehole using downhole transient electromagnetic method[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2502-2508. doi:10.13225/j.cnki.jccs.KJ19.0620

## 积水采空区地面-钻孔瞬变电磁探测技术

王 鹏<sup>1,2,3</sup>, 程建远<sup>1,2</sup>, 姚伟华<sup>1</sup>, 李明星<sup>1,2</sup>, 王 益<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 煤炭科学研究总院 西安分院, 陕西 西安 710077; 3. 长安大学 地质资源与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 小煤窑积水采空区威胁煤矿安全生产, 为有效识别钻孔旁侧遗漏的积水采空区并确定其空间位置, 采用地面发射阶跃磁场、钻孔中接收三分量感应场的观测方式进行地面-钻孔瞬变电磁探测。通过构建积水采空区地电模型, 正演分析了异常的响应特征及异常场随异常体电阻率、规模和相对钻孔距离变化的规律。计算结果表明: 异常场的3个分量均响应明显,  $X, Y$ 分量过零点与 $Z$ 分量极值点对应异常体深度;  $X, Y$ 分量幅值相对较小, 但为纯异常场, 便于识别和提取;  $Z$ 分量幅值相对较强, 但异常场为背景场的千分之一, 不易识别和提取; 由于更接近异常体, 地面-钻孔观测方式相比地面瞬变电磁采集到的 $Z$ 分量异常信号更强; 异常响应强度随异常体电阻率降低、规模增大、距离减小而增强。基于等效电流环理论, 设计了最小二乘约束反演算法, 通过反演拟合异常场能获得异常体的中心坐标、倾角、尺寸等参数, 实现异常体的空间定位。在陕西省榆林市某煤矿使用地面-钻孔瞬变电磁法开展积水采空区探测实验, 采集的 $X, Y$ 分量数据在目标层附近表现明显的异常响应特征, 通过对1.0 ms和1.3 ms的异常场数据进行反演拟合, 发现并推断钻孔北侧存在小煤窑积水采空区, 反演结果得到后期钻孔验证, 与实际揭露情况吻合。理论分析与现场实验证明: 地面钻孔瞬变电磁法能有效探测到钻孔旁侧的积水采空区, 实现“一孔多用”并突破“一孔之见”, 为小煤窑积水采空区的精细探查提供了一种新的地球物理勘探手段。

**关键词:** 积水采空区; 地面-钻孔瞬变电磁法; 观测方式; 正演模拟; 三分量感应场

**中图分类号:** P631.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-9993(2019)08-2502-07

## Technology of detecting water-filled goaf beside borehole using downhole transient electromagnetic method

WANG Peng<sup>1,2,3</sup>, CHENG Jianyuan<sup>1,2</sup>, YAO Weihua<sup>1</sup>, LI Mingxing<sup>1,2</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>

(1. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 2. Xi'an Research Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710077, China; 3. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Water-filled goaf of abandoned small coal mine has always threatened the safety of coal mine in normal production. In order to effectively identify the hidden water-filled goaf beside a borehole and obtain its spatial location, the downhole transient electromagnetic method (TME) that transmitting step magnetic field on the ground and receiving three-component induction field in the borehole was studied. Goelectricity models of water-filled goaf were constructed and 3D forward modeling were carried out. The anomalous responses of water-filled goaf with different parameters were

收稿日期: 2019-05-10      修回日期: 2019-06-11      责任编辑: 郭晓伟

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804105); 中国博士后科学基金资助项目(2019M653523); 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2018MS006)

作者简介: 王 鹏(1982—), 男, 湖北监利人, 副研究员, 博士。Tel: 029-81778157, E-mail: wp717wangpeng@163.com

calculated. The characteristics of anomalous response and the influence of parameters, such as resistivity, scale and relative borehole distance, were analyzed. The results show that all three components of anomalous field respond obviously, and the zero-crossing points of  $X$ - and  $Y$ -components and the extreme points of  $Z$ -components correspond to the depth of the water-filled goaf. The amplitudes of  $X$ - and  $Y$ -components are relatively small, but they are pure anomalous fields, which are easy to be identified and extracted. The amplitude of  $Z$ -component is relatively strong, but the anomalous field is one thousandth of the background field, which is difficult to be identified and extracted. Due to the closer proximity to the anomalous body, the  $Z$ -component acquired by the downhole TEM is stronger than that collected by ground TEM. The amplitudes of three components anomalous response increase as the water-filled goaf resistivity decreases, the scale increases, and the distance decreases. Based on the equivalent current filament theory, a least square constraint inversion algorithm was developed, which can obtain the key parameters such as central coordinates, azimuth, inclination and size of the anomaly by fitting the anomalous field. An experiment of detecting water-filled goaf was carried out in a coal mine in Yulin city, Shaanxi province, China, using downhole TEM. The  $X$ - and  $Y$ -components of collected data show obvious anomalous response characteristics near the target layer. By inversion fitting the abnormal field data of 1.0 ms and 1.3 ms, it is found and inferred that there is an abandoned small coal mine water-filled goaf on the north side of the borehole. The detection results are verified by the later drilling, which is consistent with the actual disclosure. Through theoretical analysis and field test, it is proved that the downhole TEM can effectively detect the water-filled goaf beside the hole, realize "one hole for multi-purpose", overcome the "one hole view", and provide a new geophysical exploration method for the fine exploration of the water-filled goaf of abandoned small coal mine.

**Key words:** water-filled goaf; downhole TEM; observation mode; forward modeling; three component induction field

煤炭一直是我国最主要的能源,小煤窑采空区是导致煤矿水害事故的主要诱因。小煤窑主要采用以掘代采的开采方式,无设计、无图纸、无记录的情况普遍存在,给地下留下大量位置不明的巷道式采空区,引起了一系列安全问题,如采空区塌陷、瓦斯聚集或积水等<sup>[1]</sup>。地面瞬变电磁是小煤窑充水采空区的有效探测手段,但是其对小煤窑巷道探测的准确率偏低;钻探是最直接的采空区勘探方法,但存在“一孔之见”的局限。巷道式开采方式下,煤炭回采率只有约 30%,即使钻孔布置在采掘范围内,仍可能遗漏采空区。地面-钻孔瞬变电磁法采用地面发射、钻孔中接收的观测方式,对钻孔周围低阻异常体进行全方位空间探测,在实现“一孔多用”的同时,突破了“一孔之见”,能有效扩展钻孔功能,具有良好的应用前景。

20 世纪 70 年代,国外开始对地面-钻孔瞬变电磁法进行研究;到 80 年代中期,加拿大、澳大利亚和前苏联等国家开始广泛使用地面-钻孔瞬变电磁法,并取得较好效果。硫化物、磁黄铁矿、金矿等金属矿是主要的探测对象。MUTTON 在澳大利亚 Agnew 镍带调查块状硫化物目标,认为地面-钻孔瞬变可以很好的解决钻探中的特定地质勘探问题<sup>[2]</sup>。BISHOP 等在 Tasmania 矿区附近使用该方法探查深度接近 1 km 的含锡石的磁黄铁矿<sup>[3]</sup>。IRVINE 列举在昆士

兰北部 Thalanga 矿进行地面钻孔瞬变电磁探测包括锌、铅和铜火山成因块状硫化物的层状体的几个典型例子,实例说明在有利的情况下可以检测到离钻孔至少 150 m 处导电的块状硫化物<sup>[4]</sup>。ELDERS 和 WEL-LINGTON 利用多个发射线框的组合对 40 m 强覆盖层下的倾斜镍矿矿床目标体进行了最佳耦合激发,实现了强覆盖层下镍矿矿床的探测<sup>[5]</sup>。STOLZ 在圣艾夫斯地区浸满高盐度地下水的较厚风化层下部探测金矿,经过数据处理后发现了一个强烈的明显异常<sup>[6]</sup>。JOHNSON 等采用地面-钻孔瞬变电磁发现了规模较大的镍硫化物矿床,与打钻验证结果一致<sup>[7]</sup>。

1987 年,国内的胡平和吴凤翔最早开展地面-钻孔瞬变电磁的研究工作<sup>[8]</sup>。早期研究主要以跟踪为主,探测对象同样为黄铁矿、铜矿、铜镍矿等金属矿<sup>[9]</sup>。由于设备匮乏,地面-钻孔瞬变电磁在较长时间内没有受到主要关注。中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所引入加拿大 CRONE 公司的 PEM 系统后,成功应用到危机矿山深部找矿中<sup>[10]</sup>。近年来,刘树才等提出将地面发射、地下接收观测方式的瞬变电磁应用于煤矿地下水的探测,引起重要关注,相关研究逐渐展开<sup>[11-19]</sup>。

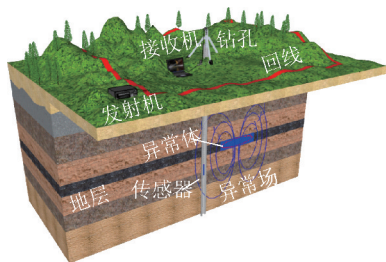
由上可知,地面-钻孔瞬变电磁法在金属矿探测方面得到广泛应用,但与钻孔结合探测孔旁积水采空区的研究较少。不同于高阻变质岩与低阻金属矿脉

之间巨大的电阻率差异,积水采空区与砂岩、泥岩等煤系岩层之间的电阻率差异相对较小,能否有效拾取积水采空区引起的电磁信号仍需进一步探讨。笔者采用正演模拟对地面-钻孔瞬变电磁法探测积水采空区的可行性展开研究,结合工程实例证实该方法的可行性。

## 1 地面-钻孔瞬变电磁方法原理

### 1.1 基本原理

地面-钻孔瞬变电磁法的物理基础与常规瞬变电磁一致,均为法拉第电磁感应现象。通过给地面回线供入稳定的电流,使目标体和围岩处于静磁场中。关断回线电流后,目标体和围岩为维持原先的磁通量,各自产生感应涡流。由于目标体与围岩的导电性差异,其内部感应涡流衰减速率不一致。采集感应场在空间和时间上的分布,解译其不一致性,可获得目标体的空间分布。与常规瞬变电磁通过成像判断异

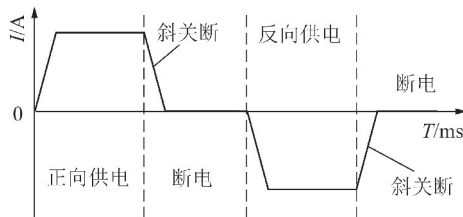


(a) 地面发射、钻孔中接收的观测装置

常不同,地面-钻孔瞬变电磁法以等效电流环理论为基础,针对目标体进行单独解译,可获得其尺寸、中心坐标、空间姿态等丰富参数。

### 1.2 施工方法

不同于地面或矿井瞬变电磁法,地面-钻孔瞬变电磁法是在地面进行发射,钻孔中进行接收的瞬变电磁场三分量信号的勘探方法。如图1(a)所示,发射系统由位于地面的供电源、发射机、回线组成,接收系统由接收机与进入钻孔的磁感应探头组成。发射机通过地面回线形成间歇性的静磁场。回线尺寸依据目标体深度而定,一般为目标深度的2.5倍。发射波形为如图1(b)所示的斜关断梯形波。测线沿钻孔深度布置,应穿过目标深度10 m以上,且在目标深度附近加密测点。接收机通过进入钻孔的三分量探头采集各测点的感应二次场。斜关断期间数据与测斜数据共同用于探头角度校正;完全关断期间数据包含目标体信息,为数据处理的主要对象。



(b) 占空比50%的斜关断发射波形

图1 地面钻孔瞬变电磁观测装置与发射波形

Fig. 1 Downhole transient electromagnetic method observation mode and transmission waveform

## 2 地面-钻孔瞬变电磁数值模拟

### 2.1 地电模型的建立

煤层被采空后,顶、底板裂隙发育易沟通含水层,使裂隙含水、采空区积水。积水采空区及其影响范围形成整体低阻,打破了原生地层固有的电阻率分布特征。如侏罗纪煤田地层常见K型地电断面,其中含煤段为相对高阻,上、下覆岩为相对低阻;积水采空区电性特征表现为横向连续的正常高阻层中,出现一定厚度的低阻块,导致高阻层的弱化甚至断开。为此,可将其抽象为无限延伸K型地电断面中,存在方形积水采空区异常体<sup>[20]</sup>,如图2所示。

K型地电断面第1层 $h_1=50$  m, $\rho_1=50$   $\Omega \cdot$  m;第2层 $h_2=100$  m, $\rho_2=100$   $\Omega \cdot$  m;第3层 $\rho_3=50$   $\Omega \cdot$  m。积水采空区长 $\times$ 宽 $\times$ 高为20 m $\times$ 20 m $\times$ 10 m,电阻率为10  $\Omega \cdot$  m。垂直钻孔位于坐标原点,长度150 m。设置积水采空区距离 $X$ 、 $Y$ 坐标轴均为10 m,埋深90 m。发射回线尺寸为240 m $\times$ 240 m,钻孔位于其中

心位置。电流为逆时针方向,强度1 A。线性斜关断时间为0.5 ms,接收时间5 ms。

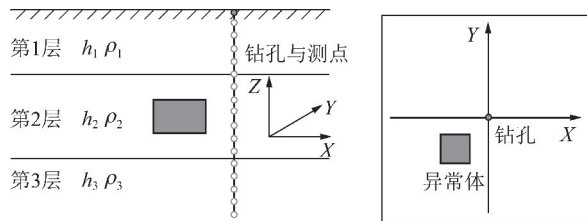


图2 积水采空区地电模型

Fig. 2 Geoelectricity model of water-filled goaf

### 2.2 响应特征分析

采用三维时域有限差分算法进行正演模拟,分别获得异常体响应和背景地层响应。对 $X$ 、 $Y$ 分量,当钻孔位于回线中心时,背景场理论值为0,接收信号为纯异常场。图3为异常场与背景场三分量测道图,选取的时间道分别为0.06,0.10,0.18,0.32 ms。由图3可知:异常场3个分量均响应明显,其中 $X$ 、 $Y$ 分量表现为“反S”型,异常场 $Z$ 分量在异常体深度处凸



起;X、Y分量过零点与异常深度对应,Z分量极大值对应异常深度;X、Y分量幅值相对较小,但为纯异常场,便于识别和提取;Z分量幅值相对较强,但仅为背景场的1/1 000,不易识别和提取。

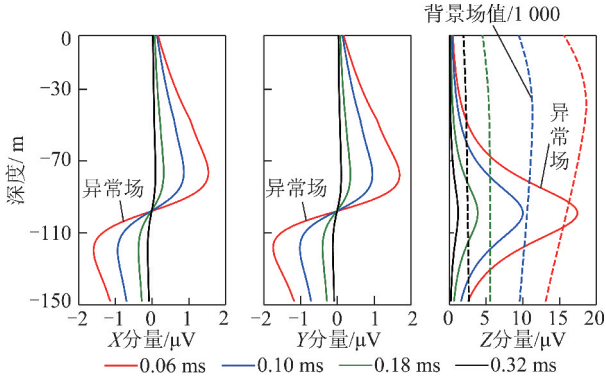
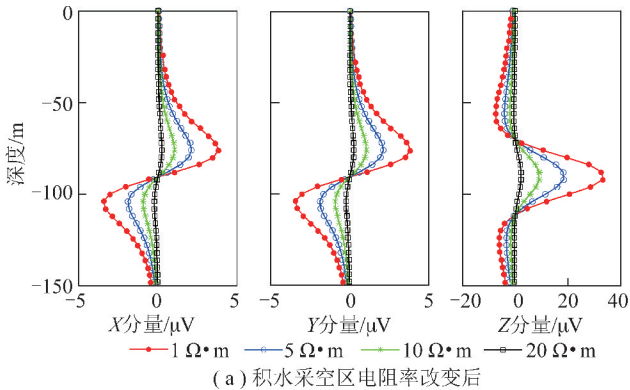


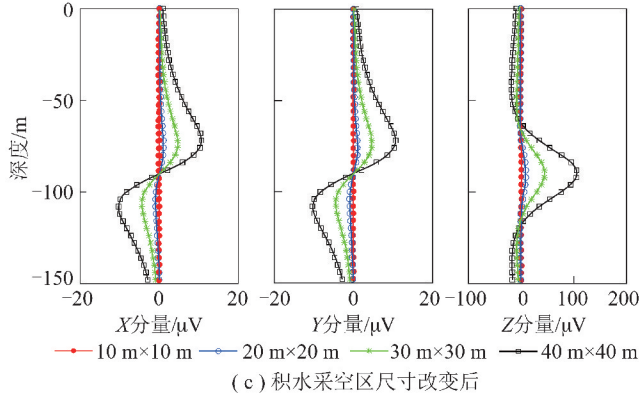
图 3 异常场与背景场测道图

Fig. 3 Three-component multi-time curves of anomalous field and background field

分析图 3 中 Z 分量背景场和异常场可知:背景场强度随深度变化较小,地表和异常深度处信号强



(a) 积水采空区电阻率改变后



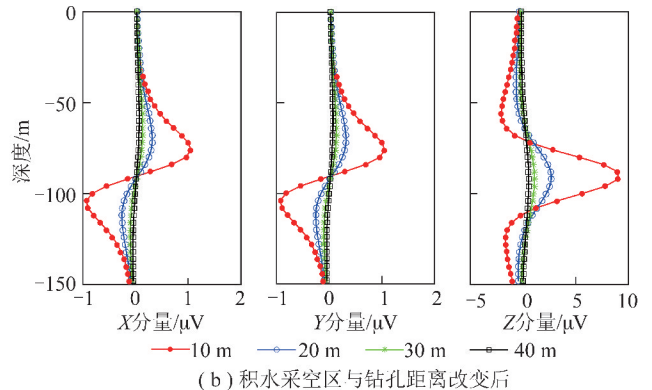
(c) 积水采空区尺寸改变后

度相差较小;异常场强度随距离异常体远近变化较大,在异常深度处达到极大,而在地表处急剧衰减。因此,若需计算地层电阻率,可选取不同深度 Z 分量,但对异常体探测而言,近距离采集信号将包含更多异常响应成分,应尽量接近异常体布置测点。

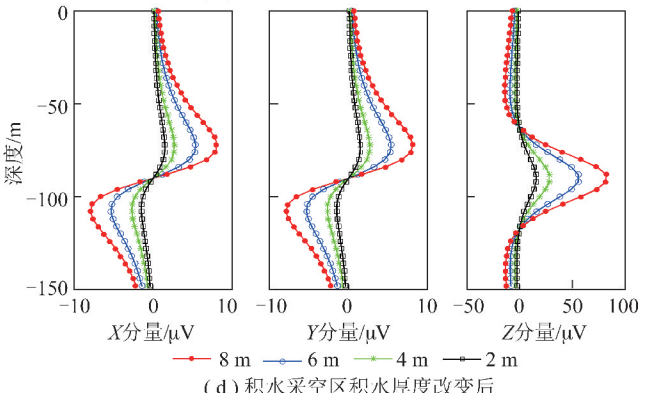
积水采空区参数的改变影响三分量异常信号。图 4 给出了随着积水采空区电阻率、距离钻孔远近、规模和积水厚度的改变,三分量异常信号强度的变化(以 0.1 ms 数据为例)。不难看出:异常场三分量随着积水采空区电阻率增加、规模缩小、距离增加、积水高度增加而逐渐减弱。

### 2.3 数据处理方法

根据等效电流环理论,异常体内部的感应涡流与一定尺寸和形状的电流环等效,两者辐射的场一致。故可将低阻异常体简化为单独的电流环<sup>[21-22]</sup>。采用矩形电流环替代积水采空区某一时刻的内部涡流,通过计算矩形电流环参数间接获得积水采空区的位置、产状、埋深、规模等重要信息,实现空间定位。



(b) 积水采空区与钻孔距离改变后



(d) 积水采空区积水厚度改变后

图 4 积水采空区参数改变后,异常场三分量信号的变化

Fig. 4 Changes in three-component signal of the anomalous field with change of water-filled goaf parameters

采用经典的最小二乘约束反演算法对电流环参数进行反演。定义三分量归一化后观测数据相对误差目标函数为

$$\Phi(P_1, P_2, \dots, P_m) = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^{3n} \left[ \frac{B_i - \hat{B}_i}{\hat{B}_i} \right]^2 \quad (1)$$

其中,  $\hat{B}_i$  为实测的异常场三分量数据;  $B_i$  为模型参数  $P$  的理论值;  $n$  为测点数;  $m$  为模型参数个数。对目标函数经过泰勒展开,略去高次项,取  $\partial\Phi/\partial\Delta P_i = 0$ ,  $\Delta P_i$  为模型参数  $P_i$  的修正量;形成目标函数的法方程:

$$(A^T A + \varphi I) \Delta P = A^T D \quad (2)$$

约束条件为

$$\underline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

其中,  $A$  为雅克比矩阵;  $\varphi$  为正则化因子;  $I$  为单位向量;  $D$  为实测数据与理论数据的残差向量;  $\Delta P$  为模型修正量。模型参数  $P$  为包括异常体的空间坐标、倾角、方位角、矩形电流环长度和宽度的向量,  $\underline{P}_i$  为第  $i$  个模型参数的下限,  $\overline{P}_i$  为第  $i$  个模型参数的上限。

对式(2)进行迭代求解,得到可行域内的极小可行解。对反演获得不同时刻电流环的位置、倾角、方位角和规模进行空间累加与统计,就可得到异常体的空间参数。

### 3 积水采空区地面-钻孔瞬变电磁探测实例

#### 3.1 地质条件与数据采集

以陕西榆林某煤矿积水采空区探测实验为例,阐述地面钻孔瞬变电磁探测技术的实际应用效果。测区位于陕西省神木市北部,属于黄土高原。原生地层基本水平分布,由浅至深主要为:第四系风积沙、黄土、亚沙土;侏罗系砂岩、泥岩、页岩互层,其中上部2煤为本次探测的目标层;三叠系上部砂岩。根据钻孔视电阻率测井结果:第四系为相对低阻,侏罗系上部含煤段为相对高阻,侏罗系下部及三叠系上部为相对低阻,地层纵向上为K型地电断面。地质调查表明:周围已关闭小煤窑曾偷采工作区内煤层,因采掘信息未记录导致采空位置不明,前期勘查孔揭露小煤窑采空区已积水。

采用钻探对采空区分布进行探查。编号YZ-1的钻孔未揭露采空空洞,为避免遗漏,进行地面-钻孔瞬变电磁法数据采集。仪器为加拿大CRONE公司的PEM瞬变电磁仪,包括4.8 kW发射机、三分量磁感应探管和最新的CDR3接收机,Z分量传感器接收面积为7 900 m<sup>2</sup>,X,Y分量传感器接收面积为2 800 m<sup>2</sup>。通过石英钟实现发射与接收的同步。

钻孔深度100 m,煤层埋深约80 m,煤层厚度4 m。因地形原因布置360 m×360 m发射回线,钻孔距离回线中心约20 m。设置线性斜关断时间0.5 ms,发射电流18 A,接收时窗20 ms,叠加64次。自钻孔深度60 m处布置测点,点距2 m,在目标层附近点距加密为1 m,共采集三分量测点28个,测线长度32 m。

#### 3.2 数据处理与分析

对采集的原始数据经过坏点剔除、坐标系旋转等

预处理后进行异常分析。实测数据三分量不在同一个坐标系中,数据处理时需利用测斜数据对原始三分量数据采用三角函数关系进行坐标系归一,将其旋转到正北、正东和正上方向。图5为1.0,1.3,1.7 ms时间道的三分量测道图。对X分量,1.0 ms与1.3 ms时间道曲线在-70~-90 m深度内为明显的“反S”型;对Y分量而言,1.0 ms与1.3 ms时间道曲线在-73~-85 m深度内曲线为明显的“反S”型;对Z分量,3条时间道曲线全段光滑连续。结合理论模型正演结果,当钻孔附近存在异常体时,X分量与Y分量形成“S”型或者“反S”型的曲线形态组合,故推断目标层深度存在异常体。

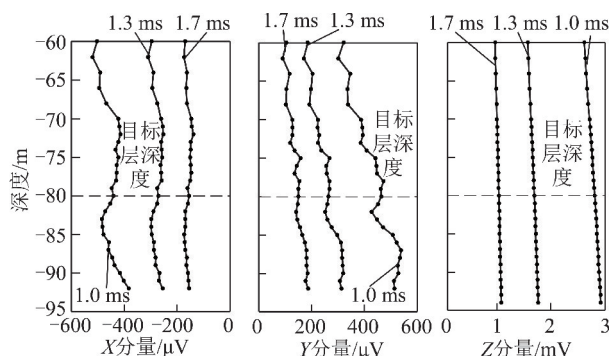


图5 实测三分量测道

Fig. 5 Measured magnetic induction three-component multi-time curves

根据实测数据特征,认为1.0 ms和1.3 ms时间道数据对异常反映最为明显,将其作为反演处理基础数据。依据X,Y分量曲线沿钻孔深度的趋势,勾勒背景场,进而获得异常场。依据X,Y分量的异常场进行反演,拟合模型为矩形电流环,反演参数为中心点坐标、倾角、方位角、尺寸,图6为异常场及其反演拟合曲线,两者具有较好的吻合程度。

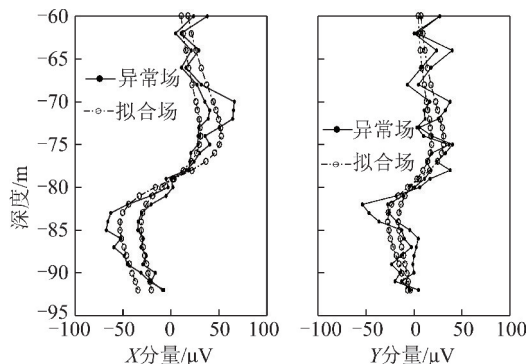


图6 异常场及其反演拟合曲线

Fig. 6 Fitted inversion curves based on anomalous field

反演得到2个矩形电流环,均位于钻孔东北方向。1.0 ms反演的电流环参数分别为:尺寸200 m×18.4 m,埋深79.3 m,倾角为1.9°,方位角29.9°。

1.3 ms 反演的电流环参数分别为:尺寸 190 m × 17.2 m,埋深 79.4 m,倾角为 1.8°,方位角 29.5°。根据实验区煤层信息及电流环随时间的传播规律,将两次反演的不同时刻的异常区域推断为小煤窑采空区,推断结果如图 7 所示。

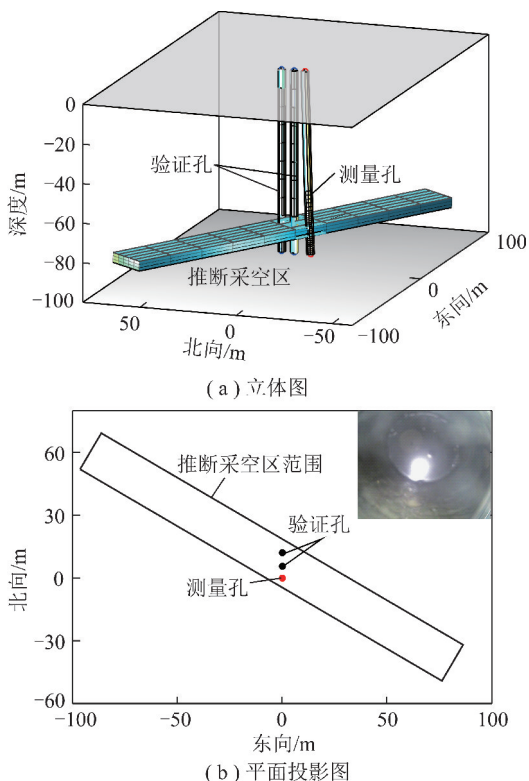


图 7 钻孔与异常体的相对位置

Fig. 7 Comparison of inversion result and borehole locations

### 3.3 结果验证

为验证探测结果,在圈定的异常区内新布置 2 个钻孔,对推断的采空区进行验证。图 7(a) 显示测量钻孔、验证钻孔与推断采空区的相对位置,其中 2 个验证钻孔分别位于测量钻孔北面 5.6 m 和 12 m 处,如图 7(b) 所示。探查结果显示,2 个钻孔均在约 80 m 处揭露采空空洞,钻孔窥视仪确定孔内积水,说明地面钻孔瞬变电磁探测结果与实际情况基本符合。

## 4 结 论

(1) 针对钻探手段遗漏积水采空区的探测问题,提出采用地面发射阶跃磁场、钻孔中接收三分量感应场的地面-钻孔瞬变电磁探测采空区。

(2) 数值模拟与工程实验表明:尽管积水采空区与含煤地层电阻率差异相对较小,但三分量异常响应明显,其中  $X, Y$  分量能有效识别积水采空区,可作为进一步处理的主要数据。

(3) 地面-钻孔瞬变电磁法基于等效电流环理论进行数据处理,利用时间道数据反演积水采空区的中

心坐标、尺寸、空间姿态等重要参数,可实现孔旁积水采空区的空间定位。

(4) 尽管地面-钻孔瞬变电磁法在本文实例中有效探测到孔周积水采空区,但不同于金属矿脉在高阻围岩中易产生强异常信号,地下水在导电围岩背景下产生的异常相对较弱,弱异常的识别与提取关系到该方法是否能成功实施,所提取弱信号的精度关系到反演结果的准确性,这也是地面-钻孔瞬变电磁下一步研究的方向。

### 参考文献 (References):

- [1] CHANG Jiang, HU Tinghao, LIU Xiangxu, et al. Construction of green infrastructure in coal-resource based city: A case study in Xuzhou urban area [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, 5(1): 92-104.
- [2] MUTTON A J. Applications of down-hole SIROTEM surveys in the Agnew Nickel Belt WA [J]. Exploration Geophysics, 1987, 18: 295-303.
- [3] BISHOP J R, LEWIS R J G, MACNAE J C. Down-hole electromagnetic surveys at Renison Bell Tasmania [J]. Exploration Geophysics, 1987, 18(3): 265-277.
- [4] IRVINE R J. Drillhole TEM surveys at Thalanga Queensland [J]. Exploration Geophysics, 1987, 18: 285-293.
- [5] ELDERS J, WELLINGTON A. An application of reverse coupling to increase signal strength beneath conductive sediments-Miitel Mine, Kambalda, WA [J]. Exploration Geophysics, 1998, 29(3/4): 355-360.
- [6] STOLZ E M G. Direct detection of gold bearing structures at St Ives, WA-DHEM vs DHMMR [J]. Exploration Geophysics, 2003, 34(1/2): 131-136.
- [7] JOHNSON D M, SHEPPARD S, PAGGI J, et al. Discovery of the Moran massive nickel sulphide deposit using down-hole transient electromagnetic surveying [A]. ASEC2010 21st Geophysical Conference [C]. Sydney: 2010.
- [8] 吴凤翔. 瞬变场法研究 [R]. “七五”国家重点科技攻关项目第 55 项子专题研究报告, 1990.  
WU Fengxiang. Study on transient electromagnetic method [R]. Subject Study Report on Item 55 of the National Key Science and Technology Research Projects in the Seventh Five-Year Plan, 1990.
- [9] 陈锡杰, 任怀宗. 钻井中等轴状导体的瞬变电磁响应 [J]. 地质与勘探, 1988(11): 39-43.  
CHEN Xijie, REN Huaizong. Responses of a buried equiaxial conductive body in drill hole transient electromagnetic measurements [J]. Geology and Exploration, 1988(11): 39-43.
- [10] 张杰, 邓晓红, 郭鑫, 等. 地-井 TEM 在危机矿山深部找矿中的应用实例 [J]. 物探与化探, 2013, 37(1): 30-34.  
ZHANG Jie, DENG Xiaohong, GUO Xin, et al. Typical cases of applying borehole TEM to deep prospecting in crisis mines [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(1): 30-34.
- [11] 焦险峰. 地面-巷道瞬变电磁探测技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.

- JIAO Xianfeng. Study on the ground-tunnel transient electromagnetic method technology [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2016.
- [12] 刘瑞军. 多层采空区地面-巷道瞬变电磁探测响应特征研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- LIU Ruijun. Research on response characteristic of ground-tunnel transient electromagnetic method used in detecting multilayer goaf [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2016.
- [13] 陈丁. 矿井全空间巷道孔中瞬变电磁波场特征数值模拟研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- CHEN Ding. Study on wave field characteristics of drillhole transient electromagnetic in mine roadway whole space using numerical simulation [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2016.
- [14] 吕阿谈. 磁性源地面-巷道瞬变电磁超前探测响应特征研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- LÜ A'tan. Study on response characteristic of advanced detection of magnetic source ground-tunnel transient electromagnetic method [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2017.
- [15] 李凯. 隧道含水构造地面-地下瞬变电磁探测方法与响应规律研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- LI Kai. Research on transient electromagnetic method and response of tunnel water-bearing structures using surface-tunnel configuration [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [16] 王鹏. 井-地瞬变电磁法浮动系数空间交汇与等效电流环反演方法研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- WANG Peng. Study on floating coefficient space intersection and equivalent current loop inversion of Downhole TEM [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [17] 王鹏. 地巷联合瞬变电磁法可行性研究 [J]. 中国煤炭, 2017, 43(2): 28-32.
- WANG Peng. Feasibility study of ground tunnel combined TEM [J]. China Coal, 2017, 43(2): 28-32.
- [18] 王鹏. 高矿化度顶板水地巷联合瞬变电磁法探测 [J]. 煤矿安全, 2017, 48(5): 187-190.
- WANG Peng. Detection of high salinity roof water by ground tunnel combined TEM [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(5): 187-190.
- [19] 王鹏. 积水采空区地井瞬变电磁法探测 [J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 134-136.
- WANG Peng. Surface-hole TEM for detection of coal mine water collecting area [J]. Coal Technology, 2017, 36(6): 134-136.
- [20] 刘树才, 陈爽爽, 许可. 地面-巷道直流电阻率法探测技术 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 360-366.
- LIU Shucai, CHEN Shuangshuang, XU Ke. Detection technology of ground-roadway DC resistivity method [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 360-366.
- [21] BARNETT C T. Simple inversion of time-domain electromagnetic data [J]. Geophysics, 1984, 49(7): 925-933.
- [22] DUNCAN A C, CULL J P. Three-component downhole TEM surveys [J]. Exploration Geophysics, 1988, 19(2): 51-53.