

文章编号: 1001-1986(2018)04-0174-07

# 基于钻探约束的瞬变电磁解释方法及应用

海四洋<sup>1,2</sup>, 云美厚<sup>1,3</sup>, 赵秋芳<sup>1,3</sup>

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南省煤炭地质勘察研究总院, 河南 郑州 450052; 3. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 随着我国城镇建设的飞速发展, 城镇建筑用地范围不断扩大, 所面临的近地表地质构造越来越复杂, 常规钻探法难以满足地基勘查的需要。为此, 基于优势互补理念, 将瞬变电磁法空间采样率高、地质信息丰富、地质体横向边界刻画准确等优势与钻探垂向测深精度高、分层定位准确等优势相结合, 提出基于钻探约束的瞬变电磁法解释新方法, 较好地克服了常规瞬变电磁法计算深度精度不足的局限, 提高了视电阻率剖面的纵向解释能力。通过浩金元住宅建设区采空区探测的应用试验, 圈定了测区中东部存在一个面积约 0.01 km<sup>2</sup> 的采空积水区, 中部存在一个面积约 0.009 75 km<sup>2</sup> 的非采空区, 其他部分均为采空区, 取得了良好的应用效果。

**关键词:** 瞬变电磁法; 钻探; 视电阻率; 采空区; 建筑用地

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2018.04.028

## Application and interpretation method of TEM data based on drilling constraint

HAI Siyang<sup>1,2</sup>, YUN Meihou<sup>1,3</sup>, ZHAO Qiufang<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;  
2. Henan Coal Geological Prospecting Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** With the rapid expansion of the scope of urban construction, the near-surface geological structure is more and more complex. The conventional drilling method is difficult to meet the needs of the foundation exploration. For this reason, based on theory of complementary advantages, a new idea inversing apparent resistivity by the transient electromagnetic data under the constraint of drilling data is put forward, which combines the advantages of the transient electromagnetic method(TEM), such as high space sampling rate, rich geological information, accurate determining of lateral boundary of geological body and so on, and the advantages of drilling, such as high precision vertical sounding, accurate layering and so on. A new interpretation method of TEM data based on drilling constraint is given, which can better overcome the limits of traditional TEM method to get high accuracy depth results difficultly and improve the depth explain ability of calculating apparent resistivity section. The goaf detection results in Haojinyuan house construction area show the new interpretation method can obtain good effect, which determine a coal goaf water area about 0.01 km<sup>2</sup> in the central section, and a non-goaf area about 0.009 75 km<sup>2</sup> in the mid-east region, and infer other region are coal goaf area.

**Keywords:** TEM; drilling; apparent resistivity; coal goaf; building land

随着国民经济的飞速发展以及城市建设步伐的不断加快, 城镇建筑用地范围不断扩大。这使得众多老工业采矿基地的民用以及工业建筑用地不可避免地面临采空区等复杂近地表的调查。由于钻探法具有

原理简单、探测结果直观、深度定位准确以及受场地限制小等诸多优点<sup>[1]</sup>, 在建筑用地采空区调查中被广泛应用。但是, 钻探法在确定采空区平面展布范围和刻画采空区边界等方面存在先天不足。要想准确确定

收稿日期: 2017-04-27

基金项目: 河南理工大学博士基金项目(B2009-85)

**Foundation item:** Fundamental Research Funds for the Doctors at Henan Polytechnic University(B2009-85)

第一作者简介: 海四洋, 1981 年生, 男, 河南周口人, 硕士研究生, 从事电磁勘探方法研究。E-mail: haisiy@126.com

通信作者: 云美厚, 1965 年生, 男, 内蒙古土左旗人, 博士, 教授, 从事应用地球物理教学及相关研究工作。E-mail: yunmeihou@163.com

引用格式: 海四洋, 云美厚, 赵秋芳. 基于钻探约束的瞬变电磁解释方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 174-180.

HAI Siyang, YUN Meihou, ZHAO Qiufang. Application and interpretation method of TEM data based on drilling constraint[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 174-180.

采空区平面展布范围和边界位置只能依靠大量钻探, 这无疑会增加勘探成本。因此, 寻求低成本、高效率且可以精细确定采空区展布区域和边界的探测方法, 已成为建筑工程地基勘察的迫切需要。

作为近地表探测的重要方法技术之一, 瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method, 简称 TEM)具有地形影响小、适应性强、探测效率高、地质体平面展布范围和边界识别能力强等优点, 被广泛用于金属矿<sup>[2]</sup>、地下水<sup>[3-4]</sup>、地热<sup>[5]</sup>以及地质构造勘察<sup>[6-7]</sup>等多个方面。特别是在煤矿水文地质勘探<sup>[7-8]</sup>和防治水<sup>[9]</sup>方面, 不论是在地面还是在煤矿井下均可以灵活应用, 呈现出良好的发展前景。其唯一不足是确定地质体埋深的准确性较差。

迄今为止, 瞬变电磁法在建筑地基勘察中的应用相对较少。为此, 从降低勘探成本和提高地下采空区空间分布预测精度为目的, 开展以地面瞬变电磁法勘探结果为主, 以钻探资料深度标定为辅的采空区联合勘查技术研究, 在河南省新密市白寨镇浩金元住宅建设区煤层采空区探测的实际应用取得了较为满意的效果。

## 1 方法原理

瞬变电磁法<sup>[10-11]</sup>是一种时间域电磁感应测量方法, 主要是通过给布设在地面或空中的接地回线(即发射框)或不接地闭合回线供电使其产生一次感生磁场。一次感生磁场在地层介质中会诱发产生涡流电流, 其强度大小与地层电导率成正比。进一步, 涡流电流在地层中流动时又会产生新的二次感生磁场, 在地面布设的接收线圈中产生的感应电动势与涡流电流的大小成正比, 进而也与地层电导率成正比, 或者说与地层电阻率成反比。已有研究表明<sup>[12]</sup>, 感生涡流场在地表引起的二次磁场效应为地下各假想的地层“环带”中所形成涡流电流的总效应。这种效应与从发射回线简单向下传播的电流环等效, 因其形态类似于从发射回线中“吹”出来的“烟圈”而被形象地称为“烟圈效应”<sup>[13]</sup>。

在实际测量中, 为了避免一次磁场的干扰, 发射框供电电流为阶梯脉冲电流, 即测量是在关断供电电流之后进行。当电流瞬间断开时, 地层介质中的瞬变电磁场(包括涡流电流场及其感生二次磁场)并不会马上消失, 而是随时间不断衰减。依据衰减时间的早晚, 通常将瞬变电磁场分为早期场和晚期场两个阶段。这两个阶段的场效应分别代表不同探测深度的地质信息。依据“烟圈效应”理论, 早期场以高频信息为主, 是由浅部近地表的涡流电流产生的, 主要反映地层浅部地质体的电性特征; 而晚

期场因涡流电流的不断损失以低频信息为主, 主要反映深层地质体的电性特征。因此, 瞬变电磁法主要是通过测量涡流二次磁场在接收线圈中产生的感生电动势(或感生电压)随时间的变化, 来揭示大地导电性的垂向变化规律<sup>[10-14]</sup>。

### 1.1 视电阻率正、反演与时深转换

由于瞬变电磁法野外实测值并非电阻率本身, 而是涡流电流引起的二次磁场在接收线圈中产生的感生电动势随时间的变化值。该变化值无法直观反映地电断面结构, 不利于地下地质体的推断解释。因此, 必须要实施电阻率换算和时深转换处理<sup>[15-20]</sup>, 将实测感生电动势换算为随深度变化的地层视电阻率值才能用于地质推断解释。

在均匀半空间一维地电断面假设条件下, 经理论推导可得晚期电阻率和深度计算公式如下<sup>[21]</sup>:

$$\rho_t = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left( \frac{2\mu_0 S_t S_r}{5t(V(t)/I)} \right)^{2/3} \quad (1)$$

$$h_t = \left( \frac{3S_t S_r}{16\pi(V(t)/I)\sigma_\tau} \right)^{1/4} - \frac{t}{\mu_0 \sigma_\tau} \quad (2)$$

$$\sigma_\tau = \frac{16}{\mu_0} \left( \frac{\pi}{3\mu_0 S_t S_r} \right)^{1/3} \frac{(V(t)/I)^{5/3}}{(d(V(t)/I)/dt)^{4/3}} \quad (3)$$

式中  $\rho_t$  为视电阻率;  $\mu_0$  为地层介质磁导率;  $t$  为记录时间;  $S_t$  为发射线圈面积;  $S_r$  为接收线圈面积;  $V(t)$  为某一时间窗口的感应电动势;  $I$  为发射线圈供电电流;  $h_t$  为深度;  $\sigma_\tau$  为纵向电导;  $V(t)/I$  表示归一化感应电动势。

式(1)—式(3)不仅可用于大定源回线、中心回线、重叠回线, 同时也可以用在偶极发射、接收装置, 这时视电阻率和场源与接收线圈之间的距离无关。

采集数据处理与视电阻率和深度计算主要是利用白登海等<sup>[21]</sup>、丁艳飞等<sup>[22]</sup>开发的 BETEM 软件来实现的, 具体算法本文不再赘述。

尽管计算视电阻率不是地层真电阻率, 但视电阻率纵横向空间变化特性与真实地电断面具有良好的一致性, 可以较好地反映地下地质体的空间展布特征。

### 1.2 深度标定方法

一般来说, 瞬变电磁法横向探测精度主要由野外测网精度控制, 通常可以达到最大测网间距的一半左右。根据地质任务要求, 合理设计测线和测点间距完全可以满足横向探测精度的需要。然而, 瞬变电磁法的测深精度主要是由记录时间来控制的, 具有很大的不确定性。正是由于瞬变电磁法计算视深度精度不足, 为了获得高精度视深度计算结果, 实现地质体纵横向空间展布特征的精确定位。本文

作者提出采用钻探资料来实现深度标定,以期提高视电阻率计算剖面的深度分辨率和定位精度。这是将地面瞬变电磁法与钻探相结合的关键所在。具体校正方法如下。

首先,选取具有详细地质分层和电性测定结果的钻孔,按照相同深度比例绘制单孔深度柱状图。然后,将单孔深度柱状图与过钻孔的视电阻率剖面进行对比分析,确定深度误差,并予以校正。通常可以采用两种方法实现深度校正。一是校正盲区深度,即通过调整深度计算的扩散速度系数来实现深度校正。所谓盲区是指不同频段下第一门数据对应时间之前的无数据信号区。通常盲区深度可以利用式(1)和式(2)由第一个数据采集时间  $t_0$  和浅部地层电阻率通过理论计算获得。将已知钻孔位置计算得到的视电阻率剖面按照视电阻从浅到深的变化规律与单孔深度柱状图进行对比,当盲区位置所处地层视电阻率特性与单孔深度柱状图相一致时,则盲区深度与单孔深度柱状图所显示的实际深度之差即可作为深度校正值。进一步将视电阻率剖面沿深度方向进行整体搬家(即整体加上或减去深度误差绝对值)。这种校正方法对深部数据深度校正效果欠佳,校正精度较低,通常会出现视电阻率极值位置对应准确而上覆地层和下部地层界面深度无法准确对应等问题。第二种方法主要是以钻孔深度为约束,通过调整深度计算的扩散速度系数,使新计算的视电阻率剖面深度与钻孔揭露深度相吻合。

事实上,最优校正方案是将上述两种方法相结合的深度校正,具体做法可简单概括为式(4)。

$$h = a + d \times C \quad (4)$$

式中  $h$  为校正后深度; $a$  为盲区校正参数; $C$  表示深度计算的复合式,主要依据式(2)及煤系给定的常用的深度计算参数(即扩散速度)而定; $d$  为深度调整系数。当  $d$  小于 1 时深度  $h$  缩小,当  $d$  大于 1 时深度  $h$  扩大。

具体实施过程中,将钻孔所在测点视电阻率深度曲线与钻孔取心分层数据进行对比解释,标定关键目的层(煤层)位置,读取视电阻率深度曲线视深度  $h_i$ ,并与钻孔深度  $h$  对比确定深度调整系数  $d$ (初值可定义为  $h/h_i$ ),在初值附近以一定步长不断修正校正系数  $d$ ,利用式(4)反复计算直到计算视深度与钻孔深度满足误差要求。然后将最终的深度调整系数  $d$  用于全区深度校正。简单地讲深度校正过程相当于对视电阻率深度曲线沿深度方向的拉伸或压缩。当测区面积较小且地层横向均匀变化时,通过单孔标定一般可以获得较好的深度校正效果。当测

区面积较大且地层横向变化较大时,要想获得较为理想的深度校正效果,需要对多个钻孔分别求取深度调整系数,最后利用平均深度调整系数来实施深度校正;当测区面积较大且因断裂等原因造成地层横向剧烈变化时,可分区分块计算深度调节系数实施深度校正。

## 2 应用实例分析

为了说明本文方法的有效性,在浩金元住宅建设区采空区探测中进行了相关试验。

### 2.1 工区地质概况

浩金元住宅建设区位于河南省新密市白寨镇境内,为一具有 17 个角点 16 条边的非规则区域,面积约  $0.0756 \text{ km}^2$ 。区内地势较平坦,北部略高,有工业区和村庄;南部边界有陡坎。全区地面标高介于  $263.13 \sim 283.38 \text{ m}$ ,最大高差  $20.25 \text{ m}$ 。此外,工区北部上空有高压线穿过,对瞬变电磁数据采集质量可能会有一定影响。

工区内地层由老至新分别为奥陶系、石炭系、二叠系及第四系。其中位于石炭—二叠系的含煤地层为采空区探测的主要目的层。含煤地层总厚度为  $280 \text{ m}$ ,共含煤 7 层,煤层最大累计厚度为  $6.35 \text{ m}$ 。其中,赋存于石炭—二叠系太原组底部的一<sub>1</sub>煤层和赋存于山西组下部的二<sub>1</sub>煤层为本区可采煤层,厚度一般为  $3 \text{ m}$  左右。研究区内主体构造以近东西向的高角度断裂为主,并伴以宽缓的褶曲。区内主要发育南升北降的高角度高庄正断层。断层走向近东西向,断面倾角近  $80^\circ$ ,落差约  $20 \text{ m}$ 。断层两侧地层倾角近  $20^\circ$ 。此外,工区内主要包括奥陶系灰岩、石炭系  $L_{7-8}$  灰岩、二<sub>1</sub>煤层顶板砂岩和老空水 4 个含水层以及二<sub>1</sub>煤层以上煤系、二<sub>1</sub>煤层底板砂岩或砂质泥岩、太原组中段碎屑岩和本溪组泥岩铝土岩 4 个隔水层。全区地层电阻率分布情况见表 1。

表 1 地层电阻率  
Table 1 Formation resistivity

时代地层	地层	电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	反演电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )
第四系 Q	黄土、砂质黏土等	10~40	26~30
	泥岩	15~20	22~28
二叠系 P	砂岩	60~98	
	煤层	>100	
石炭系 C	泥岩、铝土岩、粉砂岩、灰岩及煤层	40~150	25~200
奥陶系 O	灰色层状石灰岩、白云质灰岩	>150	>200

## 2.2 瞬变电磁野外数据采集与处理

根据勘探地质任务要求, 通过室内精心设计和野外试验研究, 最终确定采用加拿大生产的 PROTEM-57/67 地面瞬变电磁仪实施大定源回线探测。

选用  $400\text{ m} \times 500\text{ m}$  发射矩形线框, 发射频率  $25\text{ Hz}$ , 供电电流  $17.5\text{ A}$ 。数据采集积分时间:  $30\text{ s} \times 2$  次, 采样窗口数: 30 门。设计测线 21 条, 测线间距  $20\text{ m}$ , 测点间距为  $10\text{ m}$ , 见图 1。

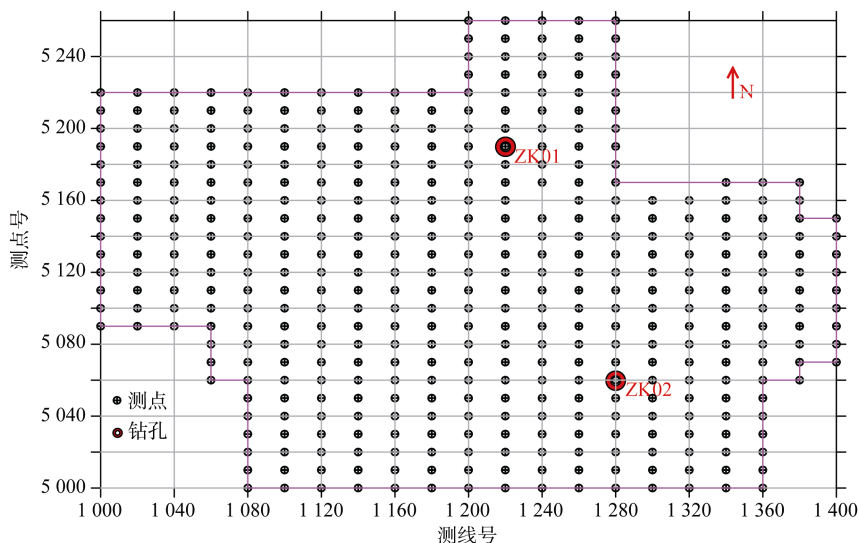


图 1 地面瞬变电磁法野外施工测网示意图

Fig.1 The schematic diagram of surveying network for TEM field acquisition

对于野外采集数据, 首先进行数据整理、格式转换和去噪滤波等预处理过程。然后利用预处理结果绘制初始多测道曲线, 并根据曲线变化特点剔除畸变点数据。剔除过程需反复进行多次直到获得满意的多测道曲线。进一步实施关断时间校正, 消除关断效应引起的瞬变电磁响应曲线畸变, 达到反映地下真实电阻率响应的目的。在此基础上, 结合已有的地质及钻孔资料构建视电阻率反演计算模型并确定反演参数。然后利用实测多测道曲线反演求取各测点视电阻率视深度曲线, 并绘制视电阻率拟断面图。从一次反演结果中抽取并旁单一测点视电阻率视深度曲线或相邻多点视电阻率视深度拟断面图, 将其与钻孔柱状图进行对比分析实施钻探约束视电阻率深度校正, 具体校正过程将在下面详述。最后, 利用深度校正后的视电阻率数据绘制视电阻率拟断面图和沿层切片图, 并据此进行地质解释推断。

## 2.3 钻探约束视电阻率深度校正

根据前述深度校正方法, 抽取过本区钻孔 ZK01 的跨孔视电阻率拟断面图(图 2b)并与钻孔柱状图(图 2a)对比。经分析解释, 推断二<sub>1</sub>煤层埋深标高大约在  $180\text{ m}$ , 相应深度位置视电阻率值大约为  $24\text{--}26\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。而基于 ZK01 钻孔综合柱状图给出的二<sub>1</sub>煤层标高为  $170.58\text{ m}$ 。因此, 视电阻率拟断面图中二<sub>1</sub>煤层深度与钻孔揭示的实际深度相差约  $10\text{ m}$ , 见图 2。为此, 以 ZK01 钻孔进行深度约束,

通过在纵深方向不断调整系数, 进行视深度二次校正计算, 直到计算深度与钻孔所揭示的深度相吻合为止, 从而获得新的视电阻率深度计算结果。图 3 显示了从 ZK01 深度约束视电阻率计算结果中抽取的过钻孔 ZK02 的跨孔视电阻率拟断面图与钻孔 ZK02 综合柱状图的对比。通过对视电阻率拟断面图解释确定二<sub>1</sub>煤层深度标高约为  $180\text{ m}$ , 相应视电阻率值约为  $25\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。而基于钻孔 ZK02 综合柱状图所揭示的二<sub>1</sub>煤层实际标高为  $178.07\text{ m}$ , 二者相差仅仅  $1.9\text{ m}$ 。这充分说明, 通过钻孔实施深度约束进行视深度校正计算, 可以极大地提高视电阻率深度计算精度, 而且这样的深度精度已经足以满足采空区深度探测的需要。利用标定的视电阻率(此处为  $25\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ )推测煤层发育位置电阻率, 以此为标准推测全区煤层深度(位置)信息。

## 2.4 采空区地质解释推断

图 4 给出了位于研究区中西部 1140 测线的视电阻率拟断面图。图中二<sub>1</sub>煤层及高庄断层是基于前人构造解释结果绘制的。由图可见, 在测点 5020 至 5080 之间位于煤系附近的白色实线区域, 纵向上从浅到深依次呈现出中阻—低阻—低阻—中阻—中阻—高阻的电性特征, 横向上视电阻率等值线变化平缓无明显畸变, 从纵向上和横向上分析, 该区域视电阻率形态均符合正常地层的电性规律, 故推测为非采空区。在测点 5090—5220 黑色虚线区域, 视电阻

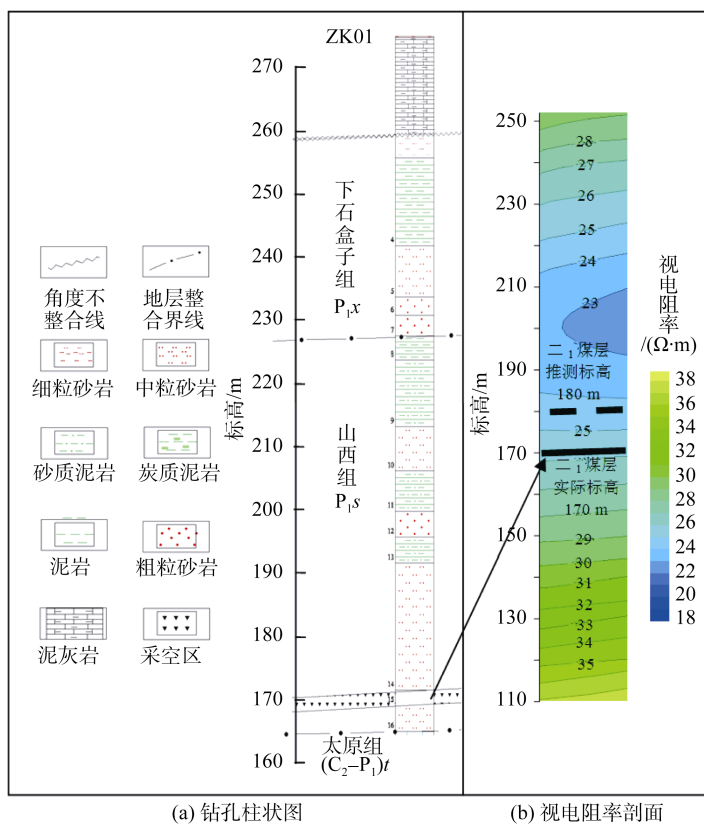


图 2 过钻孔 ZK01 二<sub>1</sub>煤层视电阻率拟断面图解释深度与钻孔柱状图深度对比

Fig.2 Contrast between the drilling depth in well ZK01 and the interpretation depth from apparent resistivity-depth pseudosection for the No. II<sub>1</sub> coal seam

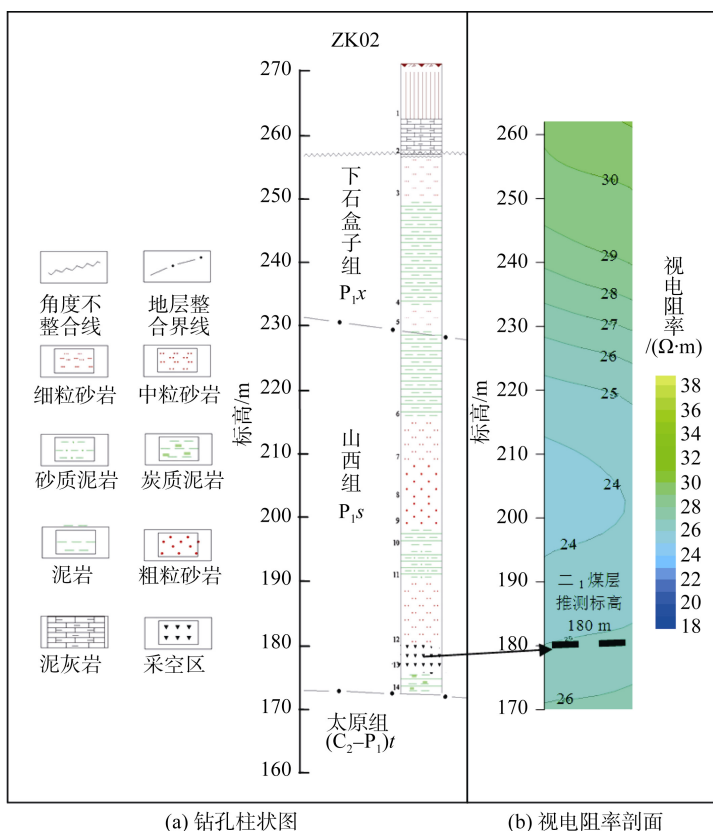


图 3 过钻孔 ZK02 二<sub>1</sub>煤层视电阻率拟断面图解释深度与钻孔柱状图深度对比

Fig.3 Contrast between the drilling depth in well ZK02 and the interpretation depth from apparent resistivity-depth pseudosection for the No. II<sub>1</sub> coal seam

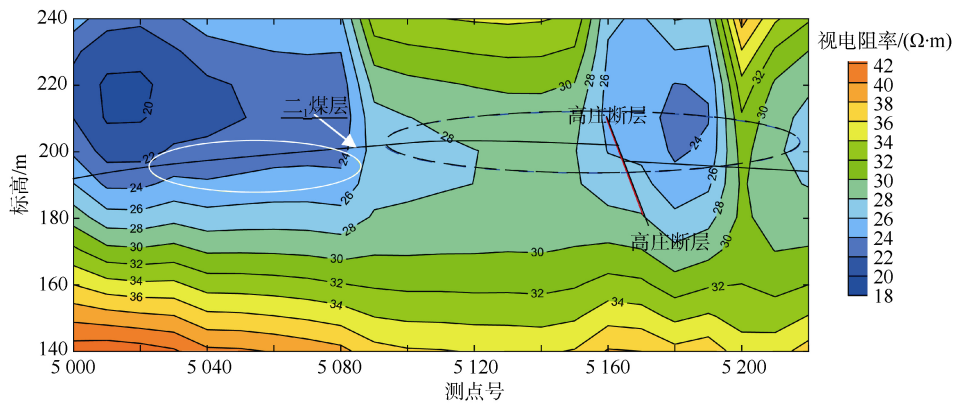


图 4 1140 线视电阻率拟断面图

Fig.4 Apparent resistivity pseudosection for line 1140

率等值线值与白色实线区相比高低起伏较大，但整体上表现为中阻特征，推测是由于采空区而引起的横向高阻异常。其中，位于测点 5 160 至 5 190 之间的低阻异常，推测可能是由于断层破碎带裂隙较发育且富水造成的。

图 5 展示了位于工区东部 1 300 测线的视电阻率剖面图。图中位于测点 5 060 至 5 160 之间煤系附

近的黑色虚线区域，视电阻率等值线呈平缓下降趋势，异常不明显。结合已有地质资料推断为采空区。该区域之所以表现为低阻特征，推测可能是煤层开采后由于地下水聚集造成的。

为了更好地揭示煤层采空区的平面展布特征，图 6 给出了沿二<sub>1</sub>煤层底板等高线提取视电阻率数据绘制的视电阻率顺层切片图。由图可见，工区中

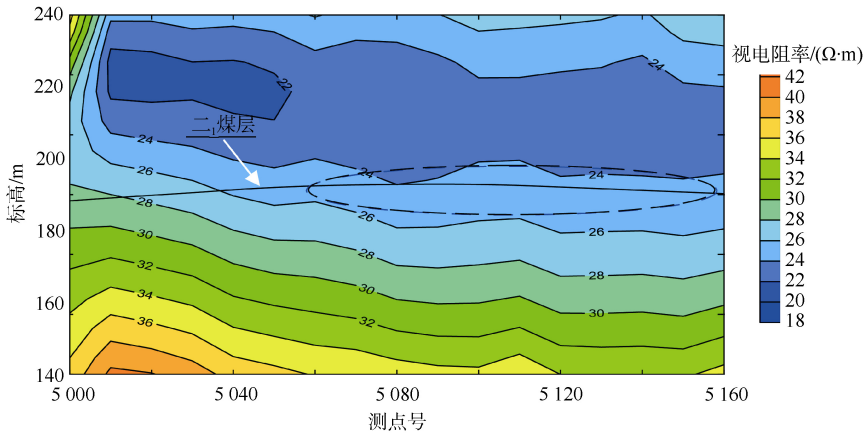


图 5 1300 线视电阻率拟断面图

Fig.5 Apparent resistivity pseudosection for Line 1300

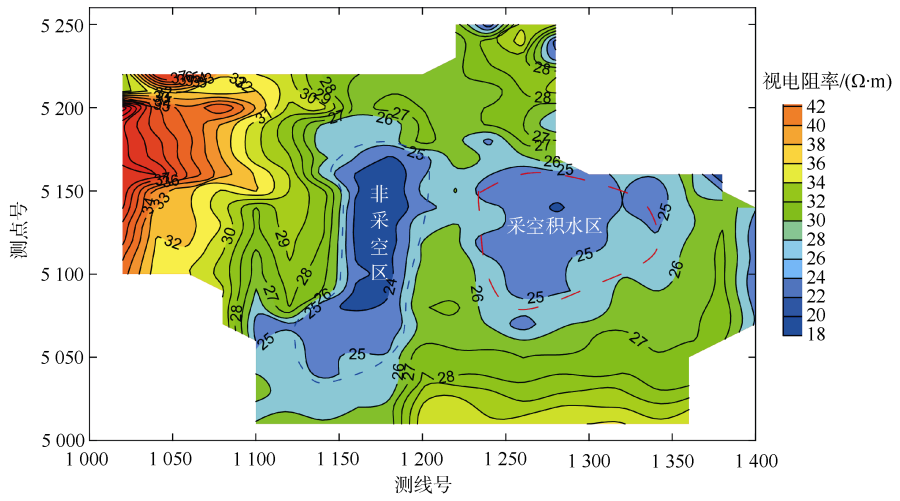


图 6 沿二<sub>1</sub>煤层视电阻率顺层切片图

Fig.6 Apparent resistivity horizontal slice along the No. II<sub>1</sub> coal seam depth



部和中东部存在两个低阻异常区。中部低阻区因其视电阻率值接近本区低阻煤系特征(近似为  $22\sim 24\ \Omega\cdot\text{m}$ ), 故推断为非采空区, 其边界范围见图中短划线所示, 面积约为  $0.009\ 75\ \text{km}^2$ 。中东部低阻异常区视电阻率相对较高, 且等值线存在明显畸变, 推测为采空积水区, 其边界范围见图中长划线所示, 面积约为  $0.01\ \text{km}^2$ 。钻孔 ZK02 的实际钻探结果证实本区确为采空积水区。除上述 2 个低阻异常区域外, 全区范围内目标层段视电阻率均大于  $26\ \Omega\cdot\text{m}$ , 以中阻或中高阻异常为主, 推测其均为二<sub>1</sub>煤层非积水采空区。

### 3 结 论

a. 基于 TEM 数据的常规视电阻率计算结果中视深度与真深度不一致, 借助钻孔深度约束实施视电阻率深度校正, 可较好地克服瞬变电磁法深度计算精度不足的局限, 显著提高视电阻率拟断面图的深度探测精度和纵横向解释能力。

b. 基于钻探约束的 TEM 解释技术用于浩金元住宅建设区采空区探测, 精确圈定了测区中东部存在一个面积约  $0.01\ \text{km}^2$  的采空积水区。推断测区中部存在一个面积约  $0.009\ 75\ \text{km}^2$  的非采空区, 其他部位均为采空区。勘探成果可为后继施工提供明确指导, 有望极大地降低勘探成本。

### 参考文献

- [1] 冉恒谦, 张金昌, 谢文卫, 等. 地质钻探技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1806–1822.
- [2] 智庆全, 武军杰, 王兴春, 等. 三分量定源瞬变电磁解释技术及其在金属矿区的实验[J]. 物探与化探, 2016, 40(4): 798–803.
- [3] 刘文波, 李磊涛. 瞬变电磁法在荒漠地区地下水探测中的应用[J]. 金属矿山, 2012(9): 96–98.
- [4] MASSOUD U, ABBAS A M, MESBAH S A, et al. Mapping of subsoil water level and its impacts on Hawara archeological site by transient and multi-frequency electromagnetic survey[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3): 638–645.
- [5] 刘磊, 罗士新, 陈松. 综合物探方法在乌林镇地热勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(4): 495–450.
- [6] LIU Lei, LUO Shixin, CHEN Song. The application of integrated geophysical method to geothermal exploration in Wulin town[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(4): 495–450.
- [7] 路拓, 刘盛东, 王勃, 等. 综合矿井物探技术在含水断层探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1371–1375.
- [8] LU Tuo, LIU Shengdong, WANG Bo, et al. Application of integrated mining geophysical method in detection of water-bearing faults[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1371–1375.
- [9] 韩德品, 郭林生, 赵利利, 等. 瞬变电磁法快速探查煤矿突水构造关键技术及应用效果[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(6): 7–10.
- [10] HAN Depin, GUO Linsheng, ZHAO Lili, et al. The key technology and application effects of transient electromagnetic method for rapid detecting water inrush structure in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6): 7–10.
- [11] 解海军, 孟小红, 王信文, 等. 煤矿积水采空区瞬变电磁法探测的附加效应[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(2): 71–74.
- [12] XIE Haijun, MENG Xiaohong, WANG Xinwen, et al. The additional effect of TEM detection and its application in coal mined-out area with accumulated water[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(2): 71–74.
- [13] 梁爽. 瞬变电磁法在煤矿水害防治中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(3): 70–73.
- [14] LIANG Shuang. The application of TEM in detecting water hazards in coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(3): 70–73.
- [15] 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.
- [16] 刘晓. 瞬变电磁法三维正演及非线性共轭梯度反演研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [17] NABIGHIAN M N. Quasi-static transient response of a conductive half space: An approximate representation[J]. Geophysics, 1979, 44(10): 1700–1705.
- [18] 赖刘保, 陈昌彦, 张辉, 等. 浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2743–2746.
- [19] LAI Liubao, CHEN Changyan, ZHANG Hui, et al. Application of shallow transient electromagnetic method in the detection of city road disease[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2743–2746.
- [20] 许建荣, 李爱勇, 杨生. TEM 中心回线法瞬变磁场求取和全区视电阻率计算[J]. 地质与勘探, 2008, 44(6): 62–68.
- [21] XU Jianrong, LI Aiyong, YANG Sheng. Calculation of transient magnetic field and all time apparent resistivity based on central TEM loops method[J]. Geology and Exploration, 2008, 44(6): 62–68.
- [22] LEE T. Estimation of depth to conductors by the use of electromagnetic transients[J]. Geophysics, 1977(65): 61–75.

## 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] 朱希安, 苑守成. 探地雷达在公路质量无损检测中的应用研究[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(5): 47-51.  
ZHU Xi'an, YUAN Shoucheng. Application of ground penetrating radar in highway quality nondestructive testing[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(5): 47-51.
- [3] 腾宇, 戚中洋. 路用探地雷达在水泥路面病害检测中的应用[J]. 公路交通技术, 2012(8): 167-168.  
TENG Yu, QI Zhongyang. Application of road ground penetrating radar to concrete pavement distress detection[J]. Highway Traffic Technology, 2012(8): 167-168.
- [4] 李尧, 李术才, 徐磊, 等. 隧道衬砌病害地质雷达探测正演模拟与应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3627-3634.  
LI Yao, LI Shucai, XU Lei, et al. Forward simulation of ground penetrating radar and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3627-3634.
- [5] 黄潘. 隧道衬砌质量地质雷达法检测及应用实例分析[J]. 中国高新技术企业, 2016(14): 47-48.  
HUANG Pan. Quality inspection of tunnel lining by GPR method and application example analysis[J]. China High-Tech Enterprises, 2016(14): 47-48.
- [6] 肖宏跃, 雷宛, 杨威. 地质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[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(4): 57-61.
- [7] 朱德斌, 邓世坤, 覃建波. 探地雷达探测潜在喀斯特地面塌陷区的可行性研究[J]. 工程勘察, 2005(5): 65-68.  
ZHU Debin, DENG Shikun, QIN Jianbo. Feasibility study of ground penetrating radar for detecting potential ground subsidence area in Karst[J]. Engineering Investigation, 2005(5): 65-68.
- [8] 茹瑞典, 张金才, 耿德庸, 等. 地质雷达及其在地质和工程勘察中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(1): 55-57.  
RU Ruidian, ZHANG Jincai, GENG Deyong, et al. Application of ground penetrating radar in highway Geological radar and its application in geological and engineering investigation[J]. Coal Geology & Exploration, 1995, 23(1): 55-57.
- [9] 刘剑, 邓世坤, 彭涛, 等. 探地雷达在石质土渗水病害探测中的应用[J]. 工程勘察, 2017, 30(8): 74-78.  
LIU Jian, DENG Shikun, PENG Tao, et al. Application of GPR in detecting seepage disease of stony soil[J]. Engineering Investigation, 2017, 30(8): 74-78.
- [10] 于阳, 杨磊. 地质雷达和瑞雷波检测公路工程质量技术研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2009, 30(7): 87-90.  
YU Yang, YANG Lei. Quality monitoring of highway engineering by geological radar and Swiss Leibo[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydropower, 2009, 30(7): 87-90.
- [11] 张建, 王齐仁, 张晓阳, 等. 探地雷达地质雷达在水泥路面脱空缺陷检测中的应用研究[J]. 勘察科学技术, 2013(6): 50-52.  
ZHANG Jian, WANG Qiren, ZHANG Xiaoyang, et al. Application of GPR in void defect detection of cement concrete pavement[J]. Site Investigation Science and Technology, 2013(6): 50-52.

(责任编辑 聂爱兰)

## (上接第 180 页)

- [16] RAICHE A P, GALLAGHER R G. Apparent resistivity and diffusion velocity[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000(4): 1628-1633.
- [17] 吴小平, 吴云鹏. 时间域电磁法视电阻率的一种数值计算方法[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2548-2553.  
WU Xiaoping, WU Yunpeng. A numerical calculating method for apparent resistivity of TEM sounding[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2548-2553.
- [18] 翁爱华, 陆冬华, 刘国兴. 利用连分式定义瞬变电磁法全区视电阻率研究[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 56-59.  
WONG Aihua, LU Donghua, LIU Guoxing. Definition of whole zone apparent resistivity for transient electromagnetic method of current dipole source[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 56-59.
- [19] 郝延松, 胡博, 于润桥, 等. 磁性源瞬变电磁法视电阻率计算方法[J]. 物探与化探, 2012, 36(6): 1034-1039.  
HAO Yansong, HU Bo, YU Runqiao, et al. The calculation of the apparent resistivity for magnetic source TEM[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(6): 1034-1039.
- [20] 岳建华, 杨海燕, 邓居智. 层状介质中地下瞬变电磁场全空间效应[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1385-1392.  
YUE Jianhua, YANG Haiyan, DENG Juzhi. Whole-space effect on underground transient electromagnetic field in layered media[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1385-1392.
- [21] 白登海, MEJU M A, 卢健, 等. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 697-704.  
BAI Denghai, MEJU M A, LU Jian, et al. Numerical calculation of all-time apparent resistivity for the central loop transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5): 697-704.
- [22] 丁艳飞, 白登海, 许诚. 均匀半空间表面大定源瞬变电磁响应的快速算法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2087-2096.  
DING Yanfei, BAI Denghai, XU Cheng. A rapid algorithm for calculating time domain transient electromagnetic responses of a large fixed rectangular loop on the half space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2087-2096.

(责任编辑 聂爱兰)