

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2024.01.008

# 综合物探方法在章丘多层煤矿 采空区探测中的应用

苏媛媛, 赵诚亮\*, 许博文

(山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250109)

**摘要:** 为充分发挥综合物探技术在地下采空区的探测优势, 探测地下煤矿采空区的分布特征, 更好地服务于城市建设及生态环境保护, 选择合适的物探方法至关重要。山东章丘煤矿采空区分布复杂, 断裂构造发育, 且存在多层煤开采的情况, 从分析已有煤矿资料入手, 总结煤层分布特征及采空区分布形态, 选取高密度电阻率法和 EH-4 电导率成像法这 2 种方法对该矿采空区进行勘探, 发挥浅层探测优势, 选取适当参数, 提高探测精度, 明确精细化解释原则, 推断出勘查区 3 煤、4 煤、7 煤、9 煤和 10 煤采空区的分布范围及埋藏深度, 并推测主要断裂构造的分布位置。针对物探推断解释的成果, 后期进行钻探及井下电视, 验证这 2 种方法组合勘探的效果良好, 基本实现对深度 30~400 m 采空区异常的探测。将高密度电阻率法与 EH-4 电导率成像法同时运用于煤矿采空区勘查, 可为同类场地条件下探测地下煤层采空区提供借鉴。

**关键词:** 多层煤矿采空区; 煤层分布规律; EH-4 电导率成像法; 高密度电阻率法

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)01-0050-07

## An Applied Study of Comprehensive Geophysical Methods in Exploration of Multilayer Goaf in Coal Mines in Zhangqiu

SU Yuanyuan, ZHAO Chengliang, XU Bowen

(No.1 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan 250109, China)

**Abstract:** In order to take full advantage of geophysical prospecting in the detection of goaf in coal mines, accurately detect the distribution of goaf in coal mines, and better serve the urban construction and ecological environment protection, it is very important to choose appropriate geophysical exploration method. Zhangqiu Coal Mine in Shandong Province has complex goaf distribution, developed fault structure and multi-layer coal mining. This paper starts with the analysis of geological data, summarizes the distribution characteristics of coal seam and form of goaf. High-density electrical method and EH-4 conductivity imaging method are selected. It gives full play to the advantages in shallow detection, selects appropriate parameters, improves the detection accuracy, and clarifies the principle of interpretation, deduces the distribution range and burial depth of 3 coal, 4 coal, 7 coal, 9 coal and 10 coal goafs, and speculates the distribution locations of the main fault structures. The validity of the method combination are proved by the date of late drilling and downhole TV, and the detection of 30~400 m's goaf abnormal has been basically realized. The high-density electrical method and EH-4 have complementary advantages, which provides a guidance for detecting other goafs in similar conditions.

**Keywords:** multilayer goaf in coal mines; distribution law of coal seam; EH-4 conductivity imaging method; high-density electrical method

随着我国城市化进程的加快, 早期的矿区已成为城市重要的土地资源, 虽然大多煤矿早已关闭, 但是

收稿日期: 2022-06-30

\* 通信作者, E-mail: 276320517@qq.com

采空区的存在破坏了矿区的生态环境,并对矿井安全生产和人民生命财产安全造成极大威胁.采取有效探测手段,准确探测采空区的埋藏深度、大小、形态等特征,已成为城市采空区治理亟待解决的问题<sup>[1-3]</sup>.

采空区勘查常采用现场调查、物探、钻探、取样及监测等手段,在众多地球物理方法中,针对埋深较浅的采空区(100 m以内)可选的物探方法较多,但每种方法各有利弊<sup>[4-7]</sup>.本文以山东章丘地区煤矿采空区勘查为例,通过物探方法探测浅中深层(50~400 m)采空区的分布范围及埋藏深度.

## 1 地质构造背景及地球物理特征

### 1.1 地质构造背景

勘查区位于华北板块泰山断块凸起的西北缘,总体上是一个以古生代地层为主体的北倾单斜构造,地层大致走向为 $275^{\circ}\sim 305^{\circ}$ ,倾向北东.区内断裂构造较发育,伴有宽缓的褶曲构造,主要断裂包括刘台断裂、文祖断裂、钓鱼台断裂、砚池山断裂以及杨胡断裂.属华北地层大区鲁西地层分区,地层由奥陶纪马家沟组、石炭纪本溪组、石炭-二叠纪太原组、二叠纪山西组、石盒子组和第四系组成.

### 1.2 采空区分布特征

勘查范围内有多家煤矿,根据收集的煤矿资料,部分煤矿边界范围不清楚,缺少部分矿山资料,区内主要开采了3,4,7,9及10煤,开采方式为地下开采,一般为走向长壁或短壁式采煤法,爆破落煤,全部垮落法管理顶板,村下压煤一般留设保护煤柱或者采用条带法开采.截至2001年,区内矿山全部关停,区内采空区主要是1976年至1999年开采3,4,7,9及10煤时形成的.

采空区分布主要受地层倾向影响.一号煤矿在勘查区中部及西北部,开采了3,4,7和9煤,采空区埋深约50~380 m;三号煤矿开采了4,7和9煤,采空区埋深约80~250 m;四号煤矿开采了7煤和9煤,采空区埋深推测为60~150 m;二号煤矿在勘查区的东北部,受构造影响,地层上升,开采了7,9和10煤,采空区埋深约50~230 m;南部六号煤矿、七号煤矿主要开采了9煤和10煤,采空区埋深约35~250 m;受断裂影响,东南部地层上升,八号煤矿、九号煤矿开采了7煤和9煤,采空区埋深约60~200 m.由此可见本次采空区勘查范围内开采煤矿较多,部分煤矿开采边界模糊,区内具有多层可开采煤层,普遍存在上下煤层重叠开采的现象,采空区分布特征较复杂.煤矿分布见图1.

### 1.3 采空区电性特征

根据实测资料及以往同岩性电性特征可知,该区奥陶系地层视电阻率最高,一般为 $100\sim 1\,000\ \Omega\cdot m$ ;石炭系地层和二叠系地层视电阻率为 $10\sim 100\ \Omega\cdot m$ ;第四系地层视电阻率较低,一般小于 $20\ \Omega\cdot m$ .在煤系地层中,如果存在采空区,其上部岩层结构容易受到破坏,易产生松动、裂隙、坍塌等现象,破坏原来地层的层状分布<sup>[3]</sup>,冒落带、裂隙带和弯曲带为第四系孔隙水和煤系地层裂隙水的存贮提供空间,易形成富水性相对较强的局部地段.采空区若无积水且存在较大空洞,电阻率剖面图上表现为局部的高阻异常;采空区内若积水或发生坍塌、存在裂隙,电阻率剖面图上表现为局部的低阻异常<sup>[8-11]</sup>.根据煤矿开采资料,本次采空区深度多在50 m以深,结合部分钻孔资料显示,采空区多富水,故本次采空区异常以局部低阻异常解释为主.

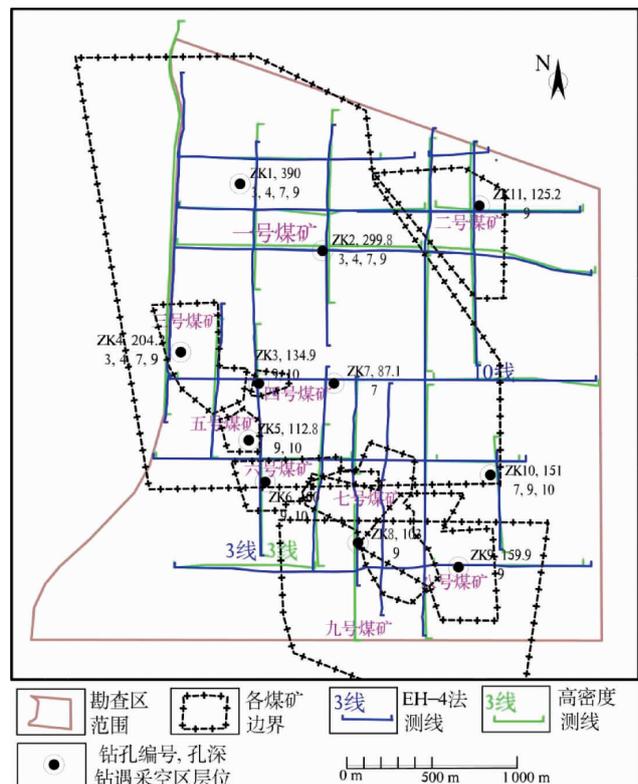


图1 工作区煤矿分布及物探测线位

## 2 物探方法的选择

区内开采煤层较多,煤层埋深 35~380 m,且存在上下煤层重叠开采,在物探方法的选择上要兼顾浅部和深部,避免存在解释盲区.本次综合物探选择直流高密度电阻率法和频率域电磁法中的 EH-4 电导率成像法 2 种方法.

### 2.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法的原理与传统电阻率法相同,同样以地质体的导电差异为地球物理前提,在人工电流场下,观测和分析视电阻率的变化规律.所不同的是高密度电阻率法一次完成电极布设,具有观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、工作效率高的特点,主要用于前面上勘查工作,对浅部采空区探测效果较好.本次工作使用重庆奔腾数码研究所生产的 WGMD-9 超级高密度电法系统.野外采集时采用温纳装置及施伦贝谢尔装置,10 m 点距,重点区域 5 m 点距.资料整理采用瑞典 RES2DIN 和 Surfer 软件,获得高密度电法反演断面图.对电性分布异常段采取其他深部勘查技术进行探测.测线布置见图 1.

### 2.2 EH-4 电导率成像

EH-4 电导率成像属于引入人工场源的频率域电磁法,具有抗干扰能力强、信噪比高的特点,由于该法在高频段采用人工场源,其浅部分辨率优于其他电磁测深法<sup>[4]</sup>.本次采用 EH-4 电导率成像仪,该仪器是由美国 EMI 电磁仪器公司与 Geometrics 公司联合开发的 Stratagem TM 电导率成像系统.

EH-4 电导率成像利用大地电磁测量原理,同时观测地表交变电场( $E_x, E_y$ )和磁场( $H_x, H_y$ )水平分量的时间序列,经过变换计算获得大地电磁场频率响应.该方法基于麦克斯韦方程,获得卡尼亚电阻率,根据卡尼亚视电阻率和趋肤深度公式得到视电阻率随深度变化的情况,从而可以探测地下不同深度介质的电性信息.理论公式为

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu} \frac{|E|^2}{|H|^2}; \quad (1)$$

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}. \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为卡尼亚视电阻率; $\omega$ 为角频率; $\mu$ 为磁导率; $E, H$ 分别为两个垂直方向的电场强度和磁场强度; $\delta$ 为趋肤深度; $f$ 为工作频率.

野外施工点距 20 m,测线布置与高密度电阻率法基本一致.野外采集的时间序列数据预处理后,进行快速傅立叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),获得电场和磁场虚实分量及相位数据,进行一维 Bostick 反演,在一维反演的基础上,利用 EH-4 系统自带的二维成像软件进行快速自动二维电磁成像.测线布置见图 1.

### 2.3 资料解释原则

本区的解释原则:在反演视电阻率断面图上,视电阻率等值线水平方向存在横向间断现象或等值线纵横向密集区出现低阻异常条带,如台阶状异常或“V”字形异常等,推断为断层破碎带的电性反应;采空区富水在电阻率剖面图上表现为局部低阻异常.根据收集到的地质钻探及煤矿开采资料,对各煤层埋深进行初步推断,沿煤层埋深对低阻异常进行解释推断,可增加采空区异常解释的准确性,进一步提高物探解释的精度.

## 3 应用效果分析

### 3.1 物探资料解释

本次勘探工作中,EH-4 电导率成像法反演到 500 m 深,高密度电阻率法反演剖面最深到 250 m.采空区解释时,200 m 以浅的煤层采空区以高密度电法为主,结合 EH-4 电导率成像法进行解释.深部的采空区以 EH-4 电导率成像法为主,结合高密度电法进行解释.以 EH-4 电导率成像法南北向的 3 线为例进行解释说明,与其对应的是高密度电法 3 线,剖面见图 2 和图 3.

图 2 为 EH-4 电导率成像法 3 线视电阻率反演断面及解释推断成果图,该测线近南北向布设,测线长 2 510 m,自南向北穿过六号煤矿、五号煤矿、四号煤矿和一号煤矿,从视电阻率反演断面图可以看出,电阻率值在纵向上呈现浅部低阻、深部高阻的特点,为沉积地层的电性反映,由浅至深依次为新生界第四系、二叠系山西组、石炭系太原组、石炭系本溪组和奥陶系地层,地层整体向大号倾斜,煤系地层由南向北埋藏渐深。

结合已有煤矿地质资料对煤层埋深进行初步推断,分析断面图上低阻异常,在水平 110~520,640~850,950~1 100,1 190~1 610,1 790~2 360 号点,由南到北约 50~300 m 深处电阻率呈低阻反映,推测为 9 煤和 10 煤煤层采空叠加异常区;780~980 号点 40~80 m 深、1 790~2 360 号点 220~250 m 深处低阻异常,推测为 7 煤煤层采空异常区;1 190~1 610 号点 60~150 m 深、1 790~2 470 号点 110~175 m 深处低阻异常,推测为 3 煤和 4 煤煤层采空叠加异常区。钻探结束后,将测线附近的 D6,D5,D3 和 D1 孔钻探揭露采空情况与物探断面图解释成果进行对比,物探解释与钻探揭露采空深度基本吻合。610 号点、1 090 号点、1 680 号点附近存在阶梯状低阻异常,推测为断点。

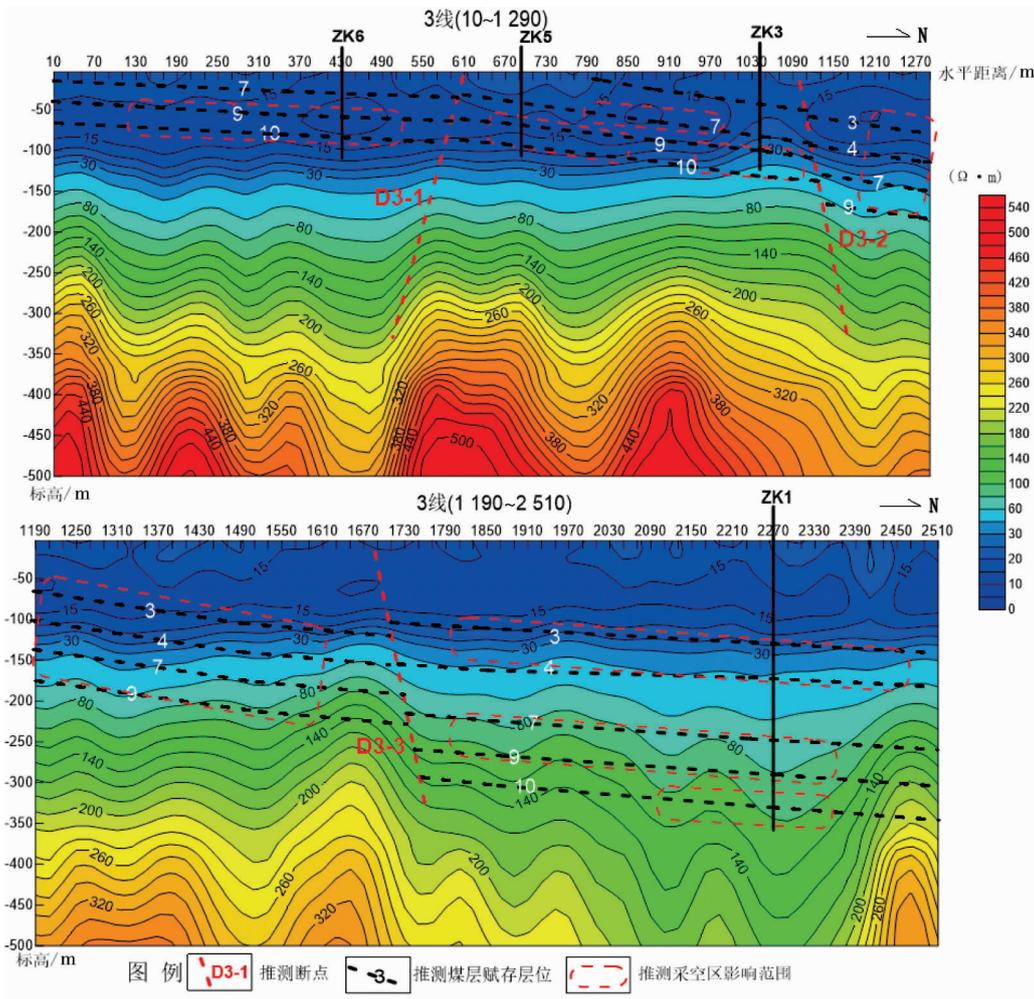


图 2 EH-4 电导率成像法 3 线综合解释剖面

图 3 为高密度电阻率法 3 线视电阻率断面及解释推断成果图,该测线近南北向布设,测线长 1 180 m,与 EH-4 电导率成像法 3 线 0~1 180 m 重合,测线位于六号煤矿、五号煤矿、四号煤矿和一号煤矿内,受煤矿采空区影响,视电阻率等值线整体变化较紊乱.通过对视电阻率断面图分析,认为在 115~520,660~870 和 955~1055 号点,深度 50~120 m 处视电阻率呈明显低阻反映,结合地质资料推断为 9 煤和 10 煤煤层采空区的电性反映;在 775~955 号点深度约 40~70 m 处呈低阻异常,推测为 7 煤层采空区的电性反映,615 号点附近存在一处近“V”字形低阻异常,推测为断点。

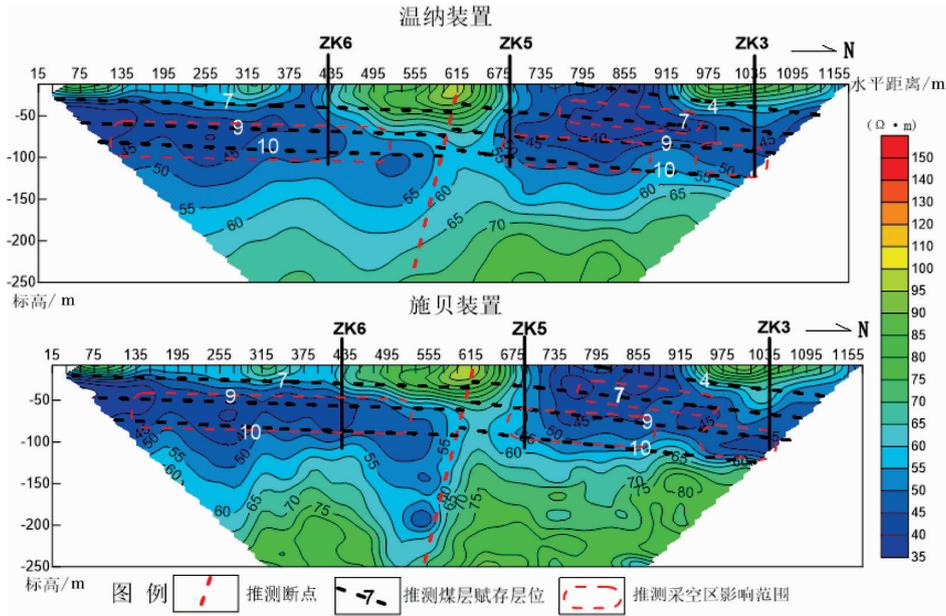


图3 高密度电阻率法3线综合解释剖面

### 3.2 物探综合解释和推断

本次勘探工作圈定了7个低阻异常区,如图4所示.其中,A1推断为3煤和4煤煤层采空叠加异常区,低阻异常呈越往西北越深的趋势,发育深度为100~170 m;B1和B2推断为7煤层采空异常区,B1发育深度为150~250 m,B2发育深度为40~100 m;C1,C2,C3和C4推测为9煤和10煤煤层采空异常区,C1发育深度为170~350 m,C2发育深度为90~150 m,C3发育深度为50~120 m,C4发育深度为40~120 m.

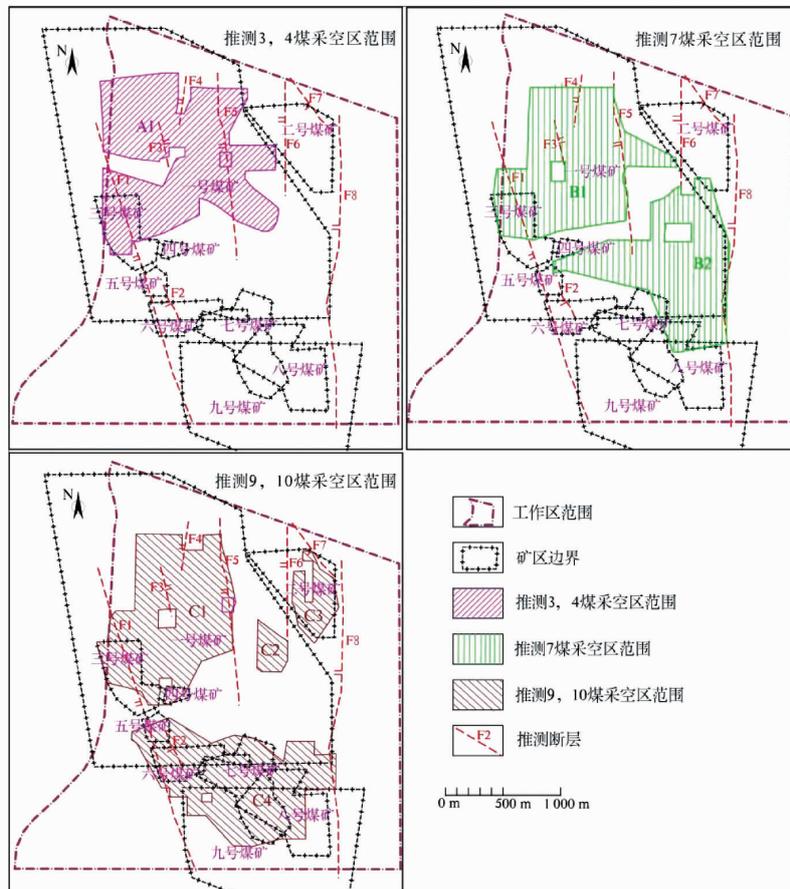


图4 物探解释推断成果

### 3.3 探测成果可靠性的影响因素分析

物探工作存在一定的多解性,根据探测深度及现场条件的不同,采空区勘查应尽可能选择2种以上不同类别的物探方法进行探测.本次勘查研究影响探测成果可靠性的因素主要是电磁法勘探技术本身的局限性及区内人文环境.目前电磁法勘探技术普遍存在较明显的体积效应和低阻屏蔽效应,会降低资料的整体解释精度,最终结果应结合煤矿闭坑资料以及其他地质资料给予适当校正和补充;勘探研究区内人文环境相当复杂,周边分布有高压线、道路、村庄、拆迁废墟等,这些外界因素对采空区解释造成一定的干扰,在野外测量时应详细记录施工条件,及时排除干扰异常,提高采空区异常解释的准确性.

### 3.4 物探成果的验证

物探工作结束后,在异常区域布置钻孔,钻孔位置见图1.钻进过程中进行地质编录,详细记载水位、掉钻、卡钻、进尺快慢、漏水等情况,物探解释的采空区异常区与本次钻探结果及矿山资料基本吻合.

ZK1孔位于EH-4电导率成像法3线2270m附近,该钻孔于128.1~128.8m,172.4~172.8m,257.6~258.5m,302.3~303.2m,342.5~343.5m处发生掉钻(见图5),岩芯采取率较低,对应3,4,7,9和10煤层位置.

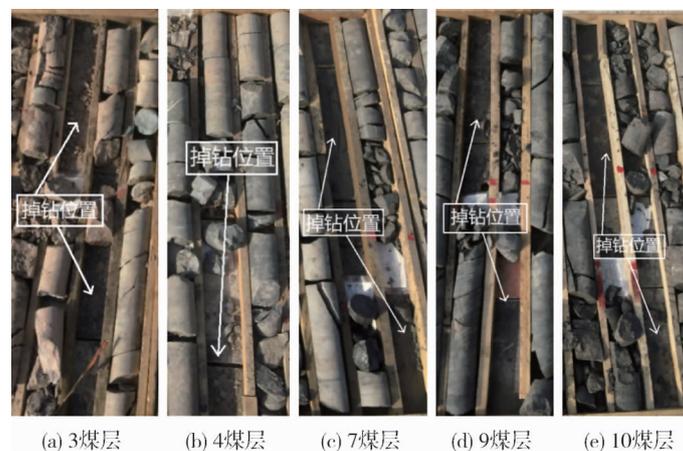


图5 ZK1孔3,4,7,9和10煤层对应采空区位置

ZK3孔位于EH-4电导率成像法3线1040m附近,该钻孔于96.2~96.9m发生掉钻,对应9煤层位置;128~134.9m进尺较快,推测为10煤未开采段;58.6~96.2m岩层裂隙较发育.

ZK5孔位于EH-4电导率成像法3线690m附近,该钻孔于60.2~62.5m,78.5~80.5m进尺较快,推测为马鞍煤矿采空区垮落带;10.7~59.2m岩层发育裂隙.

ZK6孔位于EH-4电导率成像法3线430m附近,该钻孔于51.4~52.5m发生掉钻,对应9煤层位置;89.3~90.2m进尺较快,推测为10煤未开采段;1.4~30.9m岩层裂隙较发育.ZK6孔井下电视可直观地观测到采空区垮落带和上部裂隙带的现状特征(见图6).

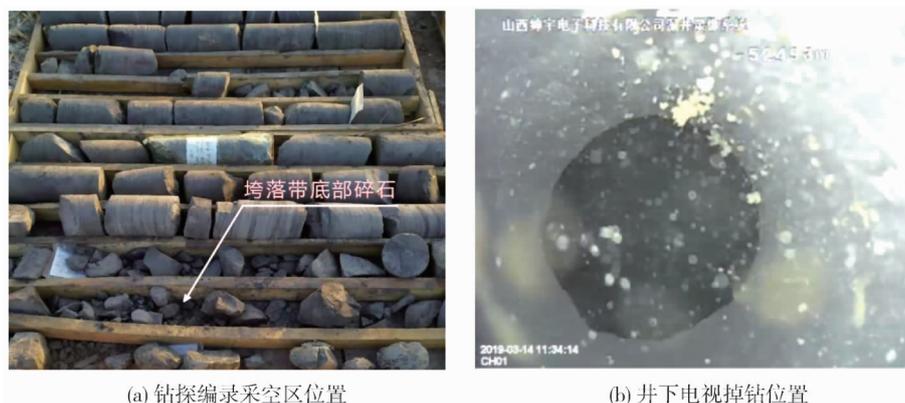


图6 ZK6孔9煤采空区位置及井下电视掉钻位置

## 4 结论

1) 针对多层煤矿复杂采空区的勘探,应搜集勘查区内各煤矿的地质资料,重点分析区内煤系地层分布规律,以此作为采空区地球物理勘查的约束资料,这样可以降低物探解释的多解性,提高物探解释的精度.

2) EH-4 电导率成像法相对其他电磁法勘探,其浅部分辨率高,同时探测深度较大,高密度电阻率法在 150 m 以浅探测效果较好,将高密度电阻率法与 EH-4 电导率成像法组合,优势互补,能够合理解释推断出采空区异常.

3) 不管是常规电法还是电磁法,针对采空区勘查时,由于采空区冒落、裂隙带的存在及方法自身的体积分效应,往往出现纵向分辨率低的情况,因此当出现上下煤层重叠开采时,可以将层距不大的两层采空区合并进行推断解释.

### 参考文献:

- [1] 姜国庆,贾春梅,谭强,等.频率域电磁法在煤矿采空区调查中的应用[J].物探与化探,2015,39(3):646-650.
- [2] 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.
- [3] 赵明宣,马惠珍,辛永祺.三种物探方法在煤矿采空区勘查中的应用效果对比[J].物探与化探,2012,36(增刊1):51-56.
- [4] 柳建新,罗曦,童孝忠,等.EH4 时频数据联合处理及其在煤矿采空区的应用[J].地球物理学进展,2012,27(5):2160-2167.
- [5] 付天光.综合物探方法探测煤矿采空区及积水区技术研究[J].煤炭科学技术,2014,42(8):90-94.
- [6] 李娟娟,潘冬明,胡明顺,等.煤矿采空区探测的几种工程物探方法的应用[J].工程地球物理学报,2009,6(6):728-732.
- [7] 唐世庚.多层煤矿采空区勘查中的综合物探异常特征与方法效果对比[J].物探与化探,2012,36(增刊1):27-33.
- [8] 闫帅斌,余传涛,李恩国.综合电法勘探在煤矿多层采空积水区的应用[J].煤炭技术,2019,38(4):83-86.
- [9] 李文,牟义,张俊英,等.煤矿采空区地面探测技术与方法优化[J].煤炭科学技术,2011,39(1):102-106.
- [10] 邱浩,郝宇军,陈健强.煤矿采空区瞬变电磁超前探测波场成像研究[J].煤炭工程,2020,52(2):56-58.
- [11] 杨兆林,郭凯.高密度电法在铁矿隐伏采空区探测中的应用[J].中国矿业,2020,29(8):158-164.