

瞬变电磁法在采空塌陷灾害中的应用

——以神东煤矿采空区调查为例

龚培俐¹, 李 维²

(1. 中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国煤炭地质总局水文物测队, 河北 邯郸 056500)

摘 要: 由人工采矿及天然作用形成的地下空洞是引起地面塌陷、地裂缝等多种环境地质灾害的根源之一。在煤矿开采区, 地下空洞主要是煤矿采空区, 采空区受水文地质条件和开采时间的影响, 呈现积水和不积水状态。利用瞬变电磁法对神东矿区采空区进行了调查勘探, 用最原始的归一化二次电位解释采空不积水区及采空积水区, 并根据地下空洞发育的时间长短及积水程度的不同, 会呈现高阻异常或低阻异常, 在视电阻率断面图上呈现出十分显著的特征。给瞬变电磁法勘探应用于采空区及采空积水区的探测提供了实例, 对预测和防治采空区引起的塌陷环境地质灾害具有重要意义。

关键词: 神东矿区; 瞬变电磁法; 采空区; 采空积水区; 塌陷地质灾害

中图分类号: P631.325; P642.26

文献标识码: A

APPLICATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD IN COLLAPSE HAZARD OF GOAF: TAKE THE INVESTIGATION OF THE GOAF IN SHENDONG COAL MINE AS AN EXAMPLE

GONG Peili¹, LI Wei²

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Hydrographic Survey Team of China Coal Geology Administration, Handan 056500, Hebei, China)

Abstract: A large number of unknown goaf areas formed in the random mining area of coal mine area, which are the causes of geological disasters such as ground collapse and ground fissure. In coal mining areas, underground caves are mainly coal mine goaf areas, showing the condition of being filled and not filled with accumulated water under the influence of hydrogeological conditions and exploration time. Due to the influence of hydrogeological conditions and mining time, the goafs present two statuses: filled and not filled with water. By using transient electromagnetic method, the goafs in Shendong mining area were investigated and explored, and the most primitive normalized secondary potential was used to explain the goafs filled and not filled with water. According to the time length of underground cavity development and the level of accumulated water, it will present high or low resistivity anomaly, showing striking features. It provides an example for the application of transient electromagnetic method in the exploration of goaf and goaf filled with water, and it is of great significance to predict and prevent the collapse geological disaster caused by the goaf.

Key words: the Shendong coal mine; transient electromagnetic method; goaf; goaf filled with water; collapse geological disaster

0 引言

由人工采矿及天然作用所形成的地下空洞^[1-2]是引起多种环境地质灾害的原因之一。煤矿透水、地面塌陷、土层超限沉降和地裂缝^[3]等环境地质灾害极大地威胁着矿工生命、地表地下工程设施及耕地安全^[4]。2010年,山西王家岭煤矿因小窑老孔水造成透水事故,导致38名矿工遇难;2011年9月16日元宝湾煤矿因小窑老孔水造成透水事故,导致11名矿工遇难;据统计,小窑老孔水引发的透水事故数量与死亡人数占比均在60%以上。另据分析,1980—1999年期间,山西煤炭采空塌陷引发的耕地破坏、地面和地下工程设施损毁、耕地以外的塌陷土地损失合计达33.99亿元,平均每开采1万吨煤,引发采空地质灾害直接损失600元^[5]。

上述统计说明,我国在煤矿开采过程中,对采空及采空积水区的重视程度不够,在探测程度上也同样存在误差较大的问题。在以前的煤矿采空区探测中,一般选用体积效应较大、探测精度较低的直流电法^[6]或浅层二维地震^[7],直流电法适宜于层状地层和较大地质构造探测,更由于体积效应,对采空区边界分析解释误差极大;浅层二维地震,在采空区激发的震动波不连续,对采空区边界解释模糊。近年来,随着瞬变电磁技术的发展,因该方法体积效应小、对低阻探测灵敏,将其应用于煤矿采空区探测在精度上更具独特优势,是目前探测煤矿采空及采空积水区方面的首选方法,已列入煤矿防治水手册^[8]。

伴随着社会发展,人的理念逐步发生改变,“以人为本”、“人与自然和谐共处”的绿色理念成为发展的根本前提,地质灾害愈来愈受到社会各界的高度重视,煤矿开采区的采空及采空积水区也倍受关注,查明地下空洞的埋深、形态规模及空间分布特征的探测是评价和防治此类塌陷地质灾害的关键。由于瞬变电磁法的独特优势,有针对性地地施工方法及数据处理进行改进,能有效识别地下空洞的特征^[9],是复杂地形区地下工程物探的重要探测手段^[10]。现利用瞬变电磁法对陕

西神木县神东矿区地下空洞进行调查勘探,较为系统地总结了瞬变电磁法在地下空洞发育区的工作方法,给瞬变电磁法勘探应用于地下空洞发育区的探测提供了具有明显效果的应用实例,对预测和防治此类地下空洞引起的塌陷等环境地质灾害具有很强的借鉴意义。

1 区域地质概况

神东矿区位于陕西省神木县、府谷县和内蒙古鄂尔多斯市交界处^[11]。区域地处鄂尔多斯盆地次级构造单元陕北斜坡的北部,分别受到北部伊盟隆起、西部天环坳陷和东部晋西挠褶带等构造的约束(见图1)。区域地层区划属华北地层区鄂尔多斯盆地分区东胜—环县区域,大部分的区域覆盖了新生界的松散—半固结沉积物,基岩则主要是陆相碎屑沉积,顺着河谷的两岸出露,出露的地层由新至老依次是第四系、新生界第三系、白垩系、侏罗系和中生界三叠系地层。区域含煤地层有侏罗系、三叠系和石炭—二叠系三套含煤岩系,神东矿区产煤层段为侏罗系延安组煤层。

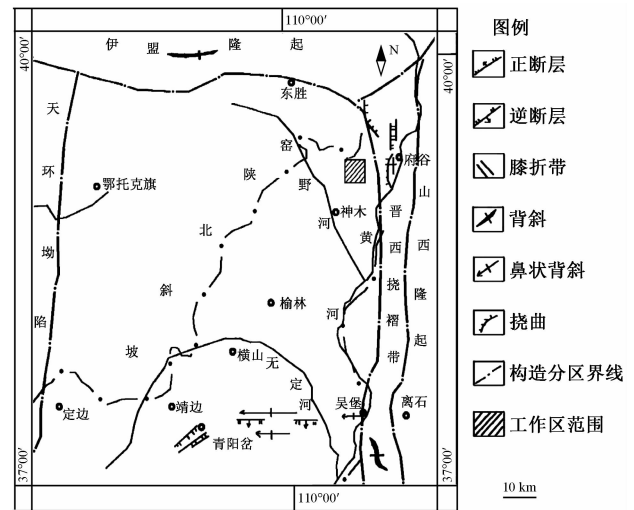


图1 神东矿区位置及构造示意图

Fig. 1 Location and structure of the Shendong mining area

神东矿区属神东煤田,总面积达到3.12万 km^2 ,位于晋陕蒙三省交界地带^[12],是中国目前已探明储量最大的整装煤田,其已探明储备量高达2236亿吨,在中国所有已探明储备量中占比达到

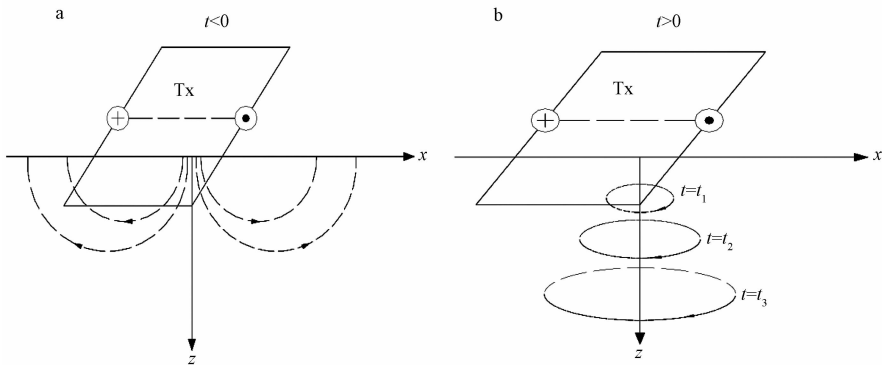
1/4。整合前小窑开采情况极为严重，越界开采形成大量不明采空区。

2 采空区瞬变电磁法观测

瞬变电磁法^[13-14] (Transient Electromagnetic Methods, 简称 TEM) 是一种利用电磁感应原理的物探方法, 通过一个不接地回线或接地线源电偶极子向地下发射脉冲电磁波作为激发场源 (称“一次场”), 观测并研究地层或地质目标体 (地下

采空区) 在激发场 (即“一次场”) 的作用下所产生的电磁场 (称“二次场^[15]”) 的空间分布特性和时间特性, 以此推测解释地层或采空区的空间结构和物性特征。

瞬变电磁测量利用大定源回线, 阶跃脉冲电流激发的二次涡流场进行, 在导磁率为 μ_0 、导电率为 σ 的均匀各向同性大地表面放置一个矩形的发射回线, 其面积为 S , 回线的内部提供阶跃脉冲电流。断开电流之前, 发射电流在回线周围的空间和大地中产生了稳定的磁场, 如图 2a 所示。



Tx—发射线框; t —衰减时间
a—稳定磁场的建立; b—磁场的衰减

图 2 矩形回线的磁力线及等效涡流环

Fig. 2 Rectangular loop lines and equivalent eddy current ring (Tx: Transmission line frame, t: decay time)

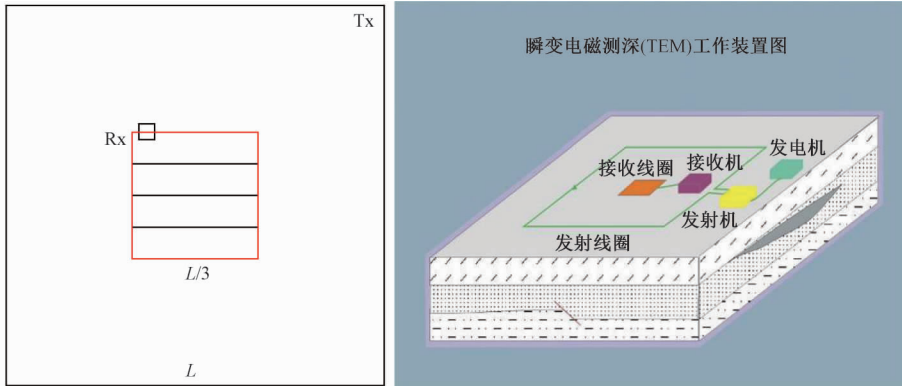
当电流关闭时, 由发射电流所产生的磁场也会立刻消失。这种变化在一次场中迅速传递到回线周围的地面, 借助了空气以及地下的传导介质, 且在发射电流断开之前诱发大地中的感应电流以维持磁场, 使空间的磁场不至于立刻消失。但是, 因为介质存在欧姆损耗, 所以其产生的磁场也会随着感应电流的衰减而迅速衰减, 磁场的迅速衰减又会在其周围的地下介质中感应出强度更弱的新的涡流^[16]。这一过程一直持续到地下的欧姆损耗将磁场能量消耗殆尽为止 (见图 2b), 形成了作为探测目标的大地瞬变电磁场^[17]。

采用加拿大凤凰公司的 V8 多功能电法仪对神东煤矿采空区瞬变电磁法进行调查, 通过网络系统, 实现主机 (V8) 对辅助接收机 (RXU-30) 和发射专用机 (T4A2-8KW) 的直接操作, 保证数据同步采集。经反复试验, 选用地面瞬变电磁法的大定源内回线装置 (见图 3), 发送线框边长 240 m, 以保证探测深度, 发射频率 25 Hz, 道数 20 个门, 关断延时 0.079 ms, 采样时窗 7.9 ms, 按 20 m 点距进行布线, 线距 40 m。

3 资料处理与解释流程

瞬变电磁数据处理软件采用 System 2000 配套软件包中的 TEM-Pro 预处理软件^[18], 和 IX1D3.43 反演软件。瞬变电磁法所观测到的数据是每个测量点的每个时窗 (测道) 的瞬变感应电压。将数据换算成视深度、视电阻率等参数后, 对资料进行统一处理和解释^[19-20], 主要步骤如图 4。

野外原始数据经室内组验收, 不合格的通知野外组重新采集数据, 验收合格的原始数据经过转换, 对数据进行滤波去噪, 剔除严重干扰数据, 并将原始曲线做平滑处理。根据收集的已知资料 (钻孔、采空及采空积水区) 在已知孔旁, 利用 V8 自带的处理软件, 对孔旁曲线结合钻孔资料修改层厚、视电阻率等参数, 建立初始模型 (每接近一个已知钻孔, 修改一次初始模型), 利用初始模型的层厚、视电阻率值对每个测点进行反演, 不断修正参数, 达到与已知地质资料最吻合的地层参数, 利用反演的深度和视电阻率值, 结合测



TX—供电线框; RX—为接收探头; L—线框边长

图3 瞬变电磁法测深工作装置示意图

Fig. 3 A schematic diagram of a transient electromagnetic sounding device

(TX is the power supply wire frame, RX is the receiving probe, and L is the length of the wire frame)

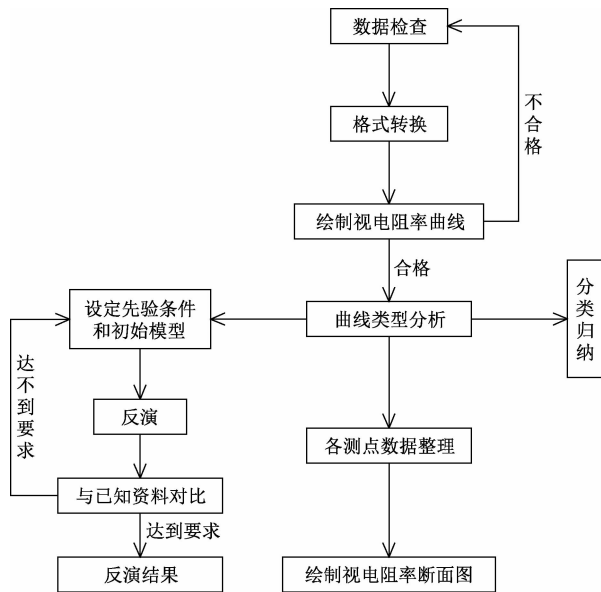


图4 瞬变电磁法资料处理与解释流程图

Fig. 4 Flow chart of TEM data processing and interpretation

量资料进行地形校正和高程校正, 绘制视电阻率断面图、绘制综合剖面图。最后, 结合煤层底板等高线以顺层平面图的形式反映出来。

4 数据成果分析

从采空区的积水状态上看, 神东矿区调查的地下采空区主要有积水采空区和非积水采空区两类, 从电性测量成果中准确区分并圈定这两类地下采空区是神东矿区物探调查工作的关键。为此, 在综合成果解释过程中, 需要充分了解地下煤层的开采条件, 包括开采方法、现有已知井下开采

与开拓布局、已知采空区及异常区积水情况等。由已知的地下情况总结采空区电性特征和规律, 以断面图的异常解释划分确定异常区的大致轮廓/边界/范围, 对平面图的解释划分进行限定修正, 逐步细化异常区的范围和分布形态, 以此得到准确的地质解释^[21-22]。

4.1 采空区剖面特征

选取活鸡兔矿研究区中部较典型测线 S30 线 (见图 5 中部) 归一化二次电位剖面 and 视电阻率断面图为例对剖面所反映的地下采空区特征进行解释。该研究区, 煤层埋深在 80 ~ 120 m 之间, 主要以长壁式方顶采煤方式为主, 但在局部存在房柱式开采或巷采区域。根据已知资料, 研究区长壁式开采区域多数塌陷至地表, 巷采区域, 塌陷较轻, 或者基本未塌陷, 全区基本全部采空。

根据地震资料及矿区资料, 测线下方作为目标层的 2-2 号煤层的区域埋深在 80 ~ 110 m 左右, 倾角近似水平。根据初始模型和反演结果, 抽取 2-2 号煤层对应的相应时间段测道数据, 绘制归一化二次电位剖面图 (见图 6), 在归一化二次电位剖面图中, 从 20 号点到 40 号点, 归一化二次电位剖面曲线出现不规则变化, 有别于均匀层状大地的电性反映, 首先判断为采空区, 35 ~ 40 号点附近 (图 6 中蓝色椭圆圈定区域) 二次电位相对较高、衰减较缓慢, 推测该部位在 2-2 号煤层附近存在相对低阻异常, 具有采空积水区电性变化特征 (图 6 中红色圈定区域为采空不积水区)。

由对应测线的视电阻率断面图 (见图 7), 可以看出测线反映整体地层在纵向上呈均匀变化,

浅部呈相对高阻，深部呈相对低阻，上部横向上变化较大，下部成层性较好，实际地层中 2-2 煤层相对下伏煤系地层呈相对高阻，探测资料与钻孔资料吻合性较好。在 35 ~ 40 号点之间视电阻率值

明显较低， $\rho \leq 90 \Omega \cdot m$ ，矿方钻孔揭露，此处为采空积水区，在 20 ~ 35 号点视电阻率值较高， $\rho \geq 120 \Omega \cdot m$ ，矿方钻孔揭露，此处为采空不积水区。

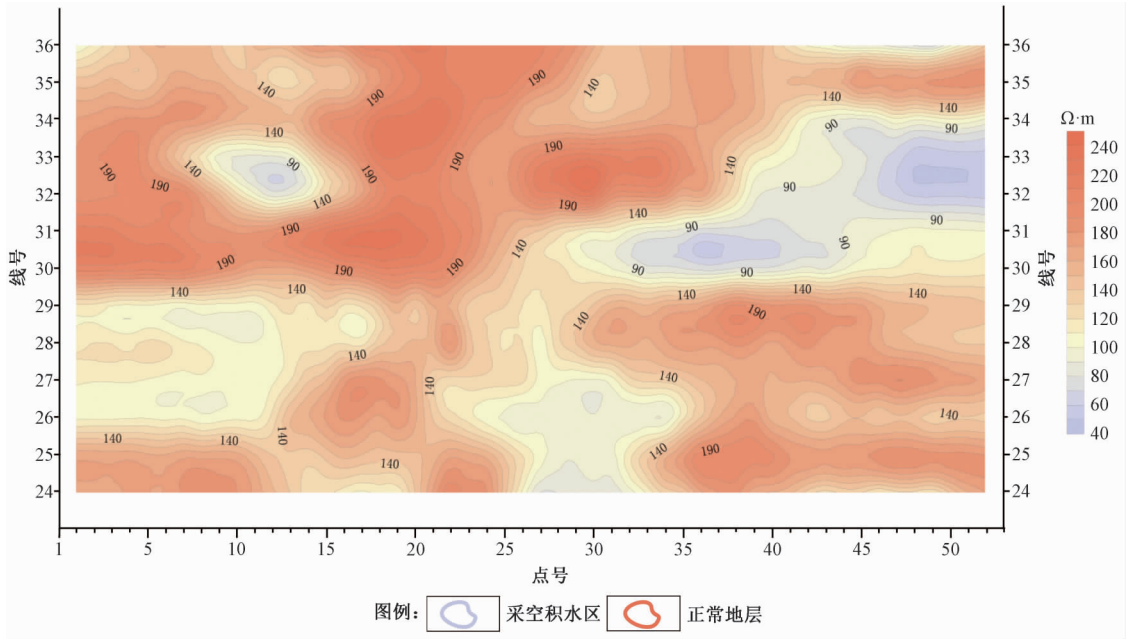


图 5 顺层视电阻率切片趋势分析成果图

Fig. 5 Results map of trend analysis of bedding apparent resistivity section

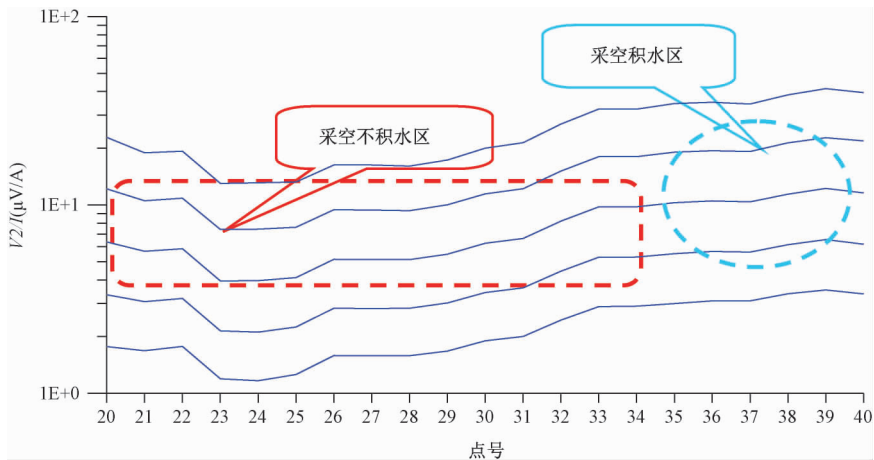


图 6 S30 线对应 2-2 号煤层深度部分测道归一化二次电位 ($V2/I$) 剖面图

Fig. 6 Profile map of normalized secondary potential ($V2/I$) of some survey channels in 2-2 coal seam corresponding to Line S30

4.2 采空区平面分布特征

在对采空区剖面异常特征分析的基础上，通过对目标煤层进行顺层切片，确定地下煤层采空区的平面分布。顺层切片的抽取主要利用地震资料提取的煤层底板数据及矿区已有的底板数据资料。根据 2-2 号煤层底板数据抽取 2-2 号煤层顺层

视电阻率切片图，以分析采空区及积水异常在平面上的分布情况。

由勘探区 2-2 号煤层顺层视电阻率等值线切片图 (见图 5)，可知整个层位视电阻率在 $50 \sim 250 \Omega \cdot m$ 之间波动，根据已知钻孔资料揭示的采空及采空积水区地段，将视电阻率相对较高 ($\geq 120 \Omega \cdot m$)

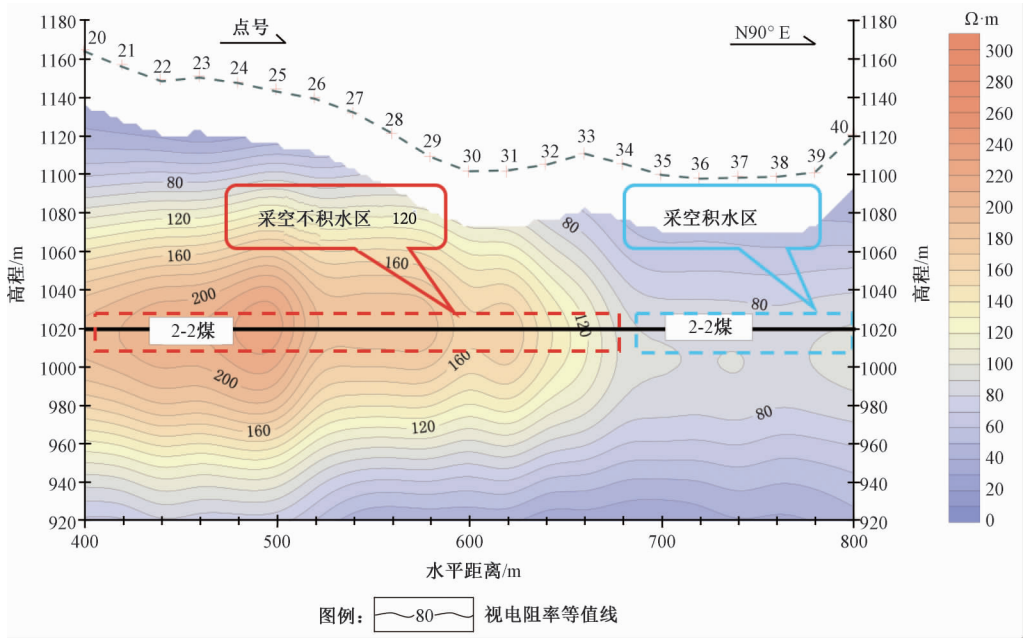


图7 S30线视电阻率断面图

Fig. 7 Line S30 apparent resistivity section

的地段划分为采空不积水异常区, 将视电阻率相对较高 ($\leq 90 \Omega \cdot m$) 的地段划分为采空积水异常区, 确定其为视电阻率顺层切片图各异常划分的“门槛值”, 进而划定异常范围。如图5所示。

通过对全区所有测线的结果分析, 揭示了全区的正常地层、采空区和采空积水区。由采空异

常区及采空积水异常区综合成果图(见图8)可以看出, 全区基本上全部为采空区, 其中有两处正常地层(图8红色圈定的区域), 有三处为采空积水异常区(图8蓝色圈定区域), 所揭示的结果也得到了矿方的充分肯定。

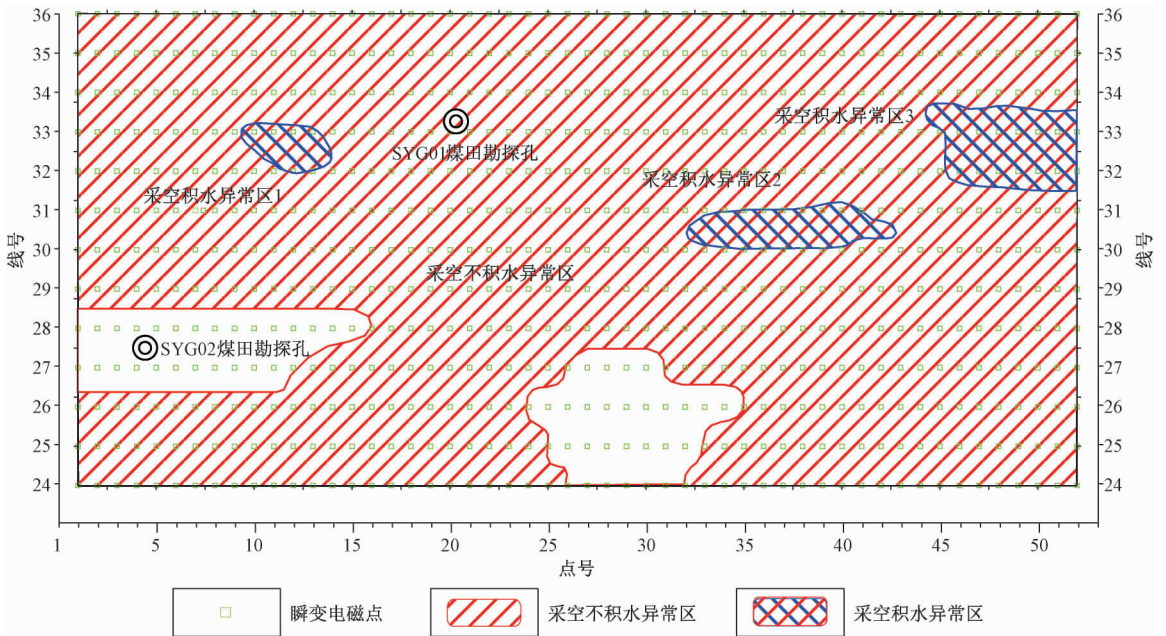


图8 采空异常区及采空积水异常区综合成果图

Fig. 8 Comprehensive map of the abnormal goaf areas and the abnormal goaf areas with accumulated water

5 结论

由于地下空洞与围岩之间存在明显的电性差异,利用瞬变电磁法勘探可以有效探测地下空洞的分布。

(1) 瞬变电磁法的分辨率和灵敏度都较高,它可以满足勘察探测地下采空区必要的技术参数。其勘探效果取决于装置类型及时窗、接收频率和叠加次数等相关技术参数。

(2) 利用最原始的归一化二次电位解释采空不积水区及采空积水区,最大程度上减小了人为因素的干扰,资料解释精度更高。

(3) 地下采空区根据地下空洞发育时间的长短以及积水程度的不同,会呈现高阻异常或低阻异常,在视电阻率断面图上呈现出十分显著的特征。在适合的施工参数保障下,结合已有地质资料,能够较准确探测地下空洞发育特征,勘测效果明显。给瞬变电磁法勘探应用于地下空洞发育区的探测提供了良好实例,对调查和防治由此类地下空洞引起的塌陷地质环境灾害具有非常强的借鉴意义。

(4) 利用顺层切片,可以将地下空洞的积水和不积水情况、地下赋存平面形态比较直观地反映出来,给调查和治理工作带来极大方便。

参考文献/References

- [1] 刘菁华,王祝文,朱士,等. 煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查 [J]. 煤炭学报, 2005, 30 (6): 715 ~ 719.
LIU Jinghua, WANG Zhuwen, ZHU Shi, et al. The geophysical exploration about exhausted area and sinking area in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30 (6): 715 ~ 719. (in Chinese with English abstract)
- [2] 程建远,孙洪星,赵庆彪,等. 老窑采空区的探测技术与实例研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (3): 251 ~ 255.
CHENG Jianyuan, SUN Hongxing, ZHAO Qingbiao, et al. The detection technology of excavated region in coal mine and case study [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (3): 251 ~ 255. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘帆,宋玉,韩军锋. 煤矿采空区地面塌陷与地裂缝的环境治理 [J]. 西部探矿工程, 2011, 23 (12): 125 ~ 126.
LIU Fan, SONG Yu, HAN Junfeng. Environmental treatment of ground collapse and ground fissure in goaf of coal mine [J]. West-China Exploration Engineering, 2011, 23 (12): 125 ~ 126. (in Chinese)
- [4] 郑怀昌,李明. 地下采空区危险性及其分析 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22 (4): 127 ~ 129.
ZHENG Huaichang, LI Ming. Analysis about the risk of underground mining area [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005, 22 (4): 127 ~ 129. (in Chinese with English abstract)
- [5] 高勤荣. 采空区塌陷触目惊心 治理整顿刻不容缓 [N]. 新华社快讯, 2011 ~ 11 ~ 18.
GAO Qinrong. It is urgent to rectify the collapse of the goaf [N]. Xinhua News Agency, 2011 ~ 11 ~ 18. (in Chinese)
- [6] 岳建华,李志聃. 矿井直流电法及在煤层底板突水探测中的应用 [J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26 (1): 94 ~ 98.
YUE Jianhua, LI Zhidan. Mine DC electrical methods and application to coal floor water invasion detecting [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26 (1): 94 ~ 98. (in Chinese with English abstract)
- [7] 付俊清,孙治新,袁燕. 二维地震勘探在洛阳找煤中的应用与效果 [J]. 工程地球物理学报, 2012, 9 (2): 200 ~ 204.
FU Junqing, SUN Zhixin, YUAN Yan. Application of two-dimensional seismic survey to looking for coal in Luoyang [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9 (2): 200 ~ 204. (in Chinese with English abstract)
- [8] 武强. 煤矿防治水手册 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
WU Qiang. Manual on prevention and control of coal mine water [M]. Beijing: China Coal Industry publishing House, 2013. (in Chinese)
- [9] 范涛,王秀臣,李猷,等. 瞬变电磁方法在探测煤矿浅层高阻采空区中的应用 [J]. 西北地质, 2010, 43 (2): 156 ~ 162.
FAN Tao, WANG Xiuchen, LI Xiu, et al. Application of TEM in detecting goaf of coal mine with high-resistivity and shallow-layer [J]. Northwestern Geology, 2010, 43 (2): 156 ~ 161. (in Chinese with English abstract)
- [10] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
JIANG Bangyuan. Transient electromagnetic exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [11] 缪协兴,王长申,白海波. 神东矿区煤矿水害类型及水文地质特征分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27 (3): 285 ~ 291, 298.
MIAO Xiexing, WANG Changshen, BAI Haibo. Hydrogeologic characteristics of mine water hazards in Shendong mining area [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27 (3): 285 ~ 291, 298.
- [12] 孟江红. 神东煤炭开采生态环境问题及综合防治措施 [J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36 (3): 45 ~ 47, 51.
MENG Jianghong. Ecological environment problems caused by coal producing and comprehensive control measures in Shendong mining area [J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36 (3): 45 ~ 47. (in Chinese with English abstract)
- [13] 霍光辉,王海芹,王虹,等. 电磁测深在鲁西地区绿岩带型

- 金矿勘探中的应用 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (1): 50 ~ 55, 76.
- HUO Guanghui, WANG Haiqin, WANG Hong, et al. Application of electromagnetic measurement to gold deposit exploration in greenschist belt of western Shandong [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (1): 50 ~ 55, 76. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈贵生. 瞬变电磁法 (TEM) 勘察研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2002.
- CHEN Guisheng. The prospecting research of transient electromagnetic methods [D]. Changsha: Central South University, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [15] 静恩杰, 李志聃. 瞬变电磁法基本原理 [J]. 中国煤田地质, 1995, 7 (2): 83 ~ 87.
- JING Enjie, LI Zhidan. The basic principle of transient electromagnetic method [J]. Coal Geology of China, 1995, 7 (2): 83 ~ 87. (in Chinese)
- [16] 杨聘卿, 仇念广. 基于烟圈效应的老空水瞬变电磁探测技术研究 [J]. 中州煤炭, 2015, (12): 93 ~ 96.
- YANG Pinqing, QIU Nianguang. Research on transient electromagnetic detection technology of goaf water based on smoke ring effect [J]. Zhongzhou Coal, 2015, (12): 93 ~ 96. (in Chinese with English abstract)
- [17] 贾国臣, 刘康和, 周明. 大地电磁测深法在深埋隧洞勘察中的应用 [J]. 水利水电技术, 2017, 48 (10): 18 ~ 25.
- JIA Guochen, LIU Kanghe, ZHOU Ming. Application of magnetotelluric sounding method to exploration of deeply buried tunnel [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (10): 18 ~ 25. (in Chinese with English abstract)
- [18] 贾磊. GDP32 多功能电法仪 CSAMT 和 TEM 数据预处理软件开发 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2010.
- JIA Lei. GDP32 Multifunction electrical apparatus CSAMT and TEM data pre-processing software development [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002, 85 ~ 92.
- LI Xiu. Theory and application of transient electromagnetic [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 2002, 85 ~ 92. (in Chinese)
- [20] 康文献, 张东阔, 李海晓. 瞬变电磁法在采空区勘察中的应用 [J]. 中州煤炭, 2009, (4): 26 ~ 27, 31.
- KANG Wenxian, ZHANG Dongkuo, LI Haixiao. Application of transient electromagnetic method in exploring coal mine gob [J]. Zhongzhou Coal, 2009, (4): 26 ~ 27, 31. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈松, 陈长敬, 吴俊, 等. 物探方法在强风化区填图中的应用探索 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (2): 206 ~ 213.
- CHEN Song, CHEN Changjing, WU Jun, et al. Application and exploration of geophysical methods in geological mapping in strongly weathered area [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (2): 206 ~ 213. (in Chinese with English abstract)
- [22] 尹金柱, 吴有信. 煤矿边界断层导水性的瞬变电磁法勘查实例 [A]. 煤炭水文地质及综合物探新技术与应用交流会议论文集 [C]. 煤炭工业出版社, 2012, 332 ~ 337.
- YIN Jinzhu, WU Youxin. An example of transient electromagnetic exploration for the water conductivity of boundary faults in coal mines [A]. The Proceedings of the meeting on New Technology and Application of Coal Hydrogeology and Comprehensive Geophysical Exploration [C]. China Coal Industry Publishing House, 2012, 332 ~ 337. (in Chinese)