

文章编号:1671-251X(2019)08-0105-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019010028

音频电穿透三维反演在含/导水陷落柱探查中的应用

王程, 鲁晶津

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)



扫码移动阅读

摘要:为精确探查含/导水陷落柱,实现含/导水陷落柱的三维立体解释,基于含/导水陷落柱与围岩的电性差异,利用音频电穿透探查工作面底板岩层富水性,对音频电穿透观测数据进行三维反演成像,得到电阻率变化情况。结果表明,应用音频电穿透三维反演可准确识别含/导水陷落柱空间位置、展布范围等,为煤矿防治水工作提供可靠参考。

关键词:煤矿水害;含/导水陷落柱;音频电穿透;三维反演;电阻率

中图分类号:TD745

文献标志码:A

Application of 3D inversion of audio-frequency electric perspective in
detection of water-containing/water-conductive collapse column

WANG Cheng, LU Jingjin

(CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to accurately detect water-containing/water-conductive collapse column and realize 3D interpretation of water-containing/water-conductive collapse column, based on electrical properties difference between water-containing/water-conductive collapse column and surrounding rock, water-rich strata of rock-seam in working face floor are explored by use of audio-frequency electric perspective. 3D inversion imaging of audio-frequency electric perspective observation data is carried out to obtain resistivity variation. The results show that 3D inversion of audio-frequency electric perspective can accurately identify spatial position and distribution range of water-containing/water-conductive collapse column, which provides reliable reference for coal mine water prevention.

Key words: coal mine water disaster; water-containing/water-conductive collapse column; audio-frequency electric perspective; 3D inversion; resistivity

0 引言

随着中国煤炭资源逐渐向深部开采,许多煤矿面临奥灰承压水威胁,特别是在含/导水陷落柱附近,会形成垂向的导水通道直接将奥灰水导入煤层,造成水害事故^[1-3]。

对于发育至煤层的含/导水陷落柱,可采用无线电波透视和槽波地震等方法探查陷落柱发育位置,之后在工作面回采前采取相应措施预防灾害发生。

对于未发育至煤层的隐伏含/导水陷落柱,其附近虽不会直接形成导水通道,但在煤层工作面开采扰动下会形成导水通道^[4-5],无线电波透视和槽波地震等方法无法探明其位置,可利用陷落柱与围岩的电性差异,采用矿井电法探查其发育范围。

矿井电法可分为瞬变电磁法和直流电法两大类^[6-7]。矿井瞬变电磁法受井下巷道狭小空间影响,导致发射磁矩受限,探查距离不大于100 m。当煤矿工作面倾向长度大于200 m,探查范围要覆盖全

收稿日期:2019-01-08;修回日期:2019-07-24;责任编辑:盛男。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804103)。

作者简介:王程(1986—),男,湖北荆州人,助理研究员,硕士,主要从事煤矿防治水、电磁法勘探等方面的工作,E-mail:18629054717@163.com。

引用格式:王程,鲁晶津.音频电穿透三维反演在含/导水陷落柱探查中的应用[J].工矿自动化,2019,45(8):105-108.

WANG Cheng, LU Jingjin. Application of 3D inversion of audio-frequency electric perspective in detection of water-containing/water-conductive collapse column[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(8): 105-108.

工作面及底板下 60 m 时,利用矿井瞬变电磁法探查含/导水陷落柱时会存在盲区。矿井直流电法在应用方面发展较瞬变电磁法早,根据施工装置和探查目的不同,矿井直流电法已经发展出高分辨电测深、音频电穿透、直流电法超前探及网络并行电法等方法^[8-11],其中音频电穿透在探查工作面及底板下岩层电性规律方面应用较多^[12]。但音频电穿透多采用层析成像技术,难以对含/导水陷落柱的空间位置和发育规模等信息给出全方位解释。反演方法是从观测数据中获取异常体综合信息最为有效的手段之一,针对地面直流电法的三维电阻率反演研究已日趋成熟,然而针对矿井直流电法的电阻率反演研究较少。

为精确探查含/导水陷落柱,笔者利用三维电阻率反演对音频电穿透观测数据进行处理、分析,以实现陷落柱的三维立体解释。

1 音频电穿透三维反演

三维电阻率正演部分采用有限体积法离散偏微分方程,并用预条件双共轭梯度稳定算法进行求解^[13]。三维电阻率反演部分采用拟高斯-牛顿法进行反演拟合,并用预条件共轭梯度法计算更新反演的初始模型,反演过程中采用吉洪诺夫正则化对模型进行约束。

反演问题的目标函数形式为^[14]

$$\Phi(m) = \frac{1}{2} \|d(m) - d_{obs}\|^2 + \frac{\beta}{2} \|W(m - m_{ref})\|^2$$

(1)

式中: m 为用于反演迭代的模型,模型参数取为 $\ln(\sigma/(s \cdot m^{-1}))$, σ 为电导率; $d(m)$ 为对给定电阻率模型进行正演计算所得的数据; d_{obs} 为实测数据; β 为正则化参数,用于平衡最小化过程中数据误差和模型正则化的影响; W 为模型正则化矩阵; m_{ref} 为参考模型。

三维反演的网格尺寸一般根据极距确定,反演的初始模型选用平均电阻率全空间均匀模型;目标区域先验信息默认为 1;模型权重取为网格点距离煤层底板深度的倒数;正则化参数 $\beta=10$ 。

采用多巷道音频电穿透对煤层底板的含/导水陷落柱进行模拟探查,建立图 1(a)所示正演模型(X 轴表示工作面走向,Y 轴表示工作面倾向,Z 轴表示距工作面底板距离);工作面大小为 200 m×200 m;以正方形块状体模拟含/导水陷落柱模型,尺寸为 40 m×40 m×40 m,埋深为 10 m,中心点位于 (-30 m,40 m,30 m)处;围岩电阻率为 200 Ω·m,含/导水陷落柱电阻率为 20 Ω·m;发射极距和接收极距均为 10 m。对正演模型进行正演计算,获得模

拟的音频电穿透观测数据,并对数据进行三维反演,成像结果如图 1(b)所示。

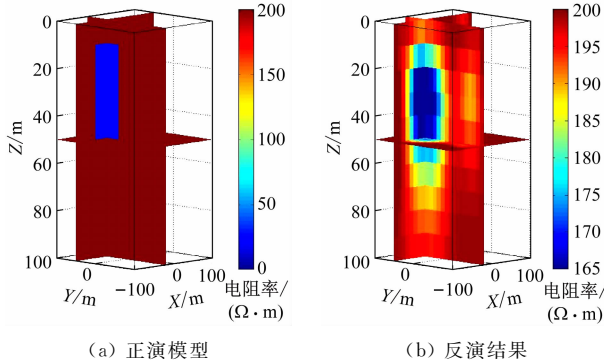


图 1 含/导水陷落柱模型音频电穿透三维反演成像结果
Fig. 1 Imaging result of 3D inversion of audio-frequency electric perspective for water-containing/water-conductive collapse column model

对比图 1(a)和图 1(b)可看出,音频电穿透三维反演能在一定程度上反映含/导水陷落柱模型在各方向的展布范围,所得低阻区域立体形态与含/导水陷落柱模型非常接近,且低阻异常明显。

2 工程应用

2.1 工程概况

华北鄂尔多斯盆地某煤矿回采工作面地表埋深约为 400 m,煤层厚度约为 20 m,距离奥灰顶界面约为 50 m,煤层底板隔水层承受奥灰水压力约为 1.2 MPa,突水系数小于临界突水系数(0.06 MPa/m)。当工作面采动影响范围内发育着含/导水岩溶陷落柱时,下伏奥灰含水层将对煤层开采形成严重威胁。

2.2 含煤地层及电性特征

煤层为石炭系上统太原组第三岩段上部,含 4~7 层夹矸,夹矸岩性多为泥岩、砂质泥岩。煤层顶板多为粗粒砂岩、细粒砂岩,局部为泥岩;底板多为泥岩、砂质黏土岩,局部为粗粒砂岩。

根据测井曲线的三侧向电阻率,煤层电阻率为 500~1 000 Ω·m,顶底板岩层电阻率小于 100 Ω·m,具有明显的电阻率差异,全空间的电场分布集中在煤层底板下方,为探查底板下含/导水陷落柱提供了良好的地质条件。

2.3 施工布置

采用音频电穿透对工作面底板下岩层的富水性进行探查。根据模拟结果在实际施工时,采用的施工装置为单极-偶极装置^[15]。发射极距为 50 m,接收极距为 10 m。双巷道共布置 44 个发射点,发射点采用不对称布设方式以减小盲区,并采用双频发射(15,120 Hz)。多巷道布置接收点。每个发射点对应 15~25 个接收点,工作面通过音频电穿透共采

集4 140个数据。为保证原始数据质量,严格按照MT/T 898—2000《煤炭电法勘探规范》进行施工。

2.4 数据处理与分析

受煤矿巷道各种因素影响,井下采集的音频电穿透数据受到干扰不能直接用于三维反演,必须根据理论曲线形态和施工条件进行限制性预处理,否则有可能导致反演结果偏离地质模型。因此对原始数据中极值点进行调整后再进行三维反演。三维反演网格尺寸为10 m×20 m×10 m,以工作面中心点为原点,对工作面进行网格剖分,反演的电阻率初始值为预处理后的视电阻率平均值,反演迭代5次。

音频电穿透三维反演成像结果如图2所示。可看出低阻异常区在底板下0~80 m范围内均发育,为垂向联通的低阻异常区,根据水文地质条件推测为垂向含水层,疑似奥灰岩溶导水陷落柱。

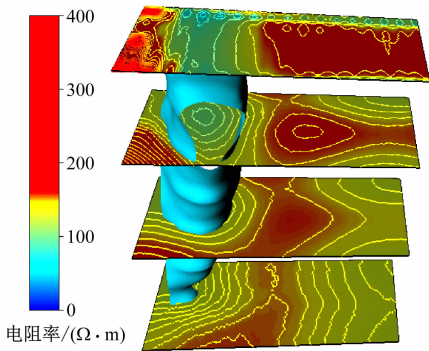


图2 工作面音频电穿透三维反演成像结果

Fig.2 Imaging result of 3D inversion of audio-frequency electric perspective for working face

2.5 钻探验证

根据音频电穿透三维反演成像结果,布设水平和垂向的钻孔对低阻异常区进行打钻,钻孔轨迹如图3所示。布置的水平钻孔和部分垂向钻孔在进入低阻异常区时出水50 m³/h(图3中蓝色圆圈为出水点),且经过长时间疏放,水量无明显衰减,说明该低阻异常区为岩层富水区,且应存在稳定的补给源。结合音频电穿透、钻探及巷道揭露的信息,基本能排除该低阻异常区内存在断层发育。

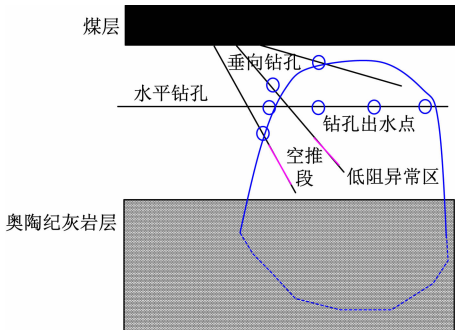


图3 钻孔轨迹剖面

Fig.3 Section of borehole trajectory

为确认低阻异常区内是否存在隐伏含/导水陷落柱,在低阻异常区内首先施工10个穿层探查钻孔,钻探工程量为1 200 m,注水泥180 t,其中8个钻孔取芯。然后施工3个底板顺层定向长钻孔,钻探工程量为1 500 m,注水泥50 t。根据取芯钻孔确定的灰岩界面及钻孔施工过程出现的“空推”现象(图3中红色为钻孔空推段),结合底板顺层定向长钻孔资料分析,确定低阻异常区为奥灰岩溶导水陷落柱,并圈定了陷落柱延展状态,陷落柱主轴为西北-东南向,奥灰顶界面陷落平面大小为95 m×45 m。

3 结语

基于含/导水陷落柱与围岩的电性差异,在工作面采用音频电穿透探查底板岩层富水性情况,通过对音频电穿透观测数据进行三维电阻率反演成像,可准确识别含/导水陷落柱空间位置、展布范围等,为煤矿防治水工作提供可靠参考。

参考文献(References):

[1] 武强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.

[2] 张文忠.陷落柱突水三维大型模拟实验系统研制及应用[J].中国矿业大学学报,2016,45(1):56-61.
ZHANG Wenzhong. Development and application of 3D large-scale simulation experiment system of water inrush caused by collapse column[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 56-61.

[3] 张勃阳,白海波,张凯.采动影响下陷落柱的滞后突水机理研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(3):447-454.
ZHANG Boyang, BAI Haibo, ZHANG Kai. Study on the mechanism of delayed water inrush of collapse column under the influence of mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 447-454.

[4] 李楠,马丹.采动影响下隐伏陷落柱突水数值模拟[J].煤矿安全,2016,47(8):186-189.
LI Qiang, MA Dan. Numerical simulation of mining effect on water inrush of hidden karst collapse pillar [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(8): 186-189.

[5] 俞宏庆,邢文平.黄村分矿10111工作面隐伏陷落柱特大突水原因分析及防治措施[J].煤矿安全,2014,

45(3):183-185.

YU Hongqing,XING Wenping. Reasons analysis and prevention measures of water bursting from hidden subsided column in Huangcun branch coal mine 10111 working face[J]. Safety in Coal Mines,2014,45(3): 183-185.

[6] 杨海燕,邓居智,张华,等. 矿井瞬变电磁法全空间视电阻率解释方法研究[J]. 地球物理学报,2010, 53(3):651-656.

YANG Haiyan,DENG Juzhi,ZHANG Hua, et al. Research on full-space apparent resistivity interpretation technique in mine transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics,2010,53(3):651-656.

[7] 鲁晶津,郭恒,王信文. 矿井直流电阻率法三维反演研究[C]//中国地球科学联合学术年会论文集,北京, 2014:1381-1382.

[8] 刘盛东,吴荣新,张平松,等. 三维并行电法勘探技术与矿井水害探查[J]. 煤炭学报,2009,34(7): 927-932.

LIU Shengdong,WU Rongxin,ZHANG Pingsong, et al. Three-dimensional parallel electric surveying and its applications in water disaster exploration in coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2009, 34(7):927-932.

[9] 杨华忠,胡雄武,张平松. 井巷直流电法三维超前探测数值模拟[J]. 工程地球物理学报,2013,10(2): 200-204.

YANG Huazhong,HU Xiongwu,ZHANG Pingsong. Numerical simulation of advanced detection by direct current electrical method in tunnel [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10 (2): 200-204.

[10] 程久龙,李飞,彭苏萍,等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报,2014,39(8): 1742-1750.

CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1742-1750.

[11] 岳建华,薛国强. 中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾[J]. 地球物理学进展,2016,31(4):1716-1724.

YUE Jianhua, XUE Guoqiang. Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years[J]. Progress in Geophysics,2016,31(4):1716-1724.

[12] 郭鹏飞,谢雄刚,白雯,等. 音频电透视法在防治矿井水患中的应用[J]. 工业安全与环保,2018,44(4): 34-36.

GUO Pengfei, XIE Xionggang, BAI Wen, et al. Application of audio frequency electric perspective method in detecting mine flooding zones[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44 (4): 34-36.

[13] 柴新朝. 基于有限体积法的三维电阻率正反演研究[D]. 长沙:中南大学,2012.

[14] 鲁晶津. 煤矿井下含/导水构造三维电阻率反演成像技术[J]. 煤炭学报,2016,41(3):687-695.

LU Jingjin. 3D electrical resistivity inversion and imaging technology for coal mine water-containing/ water-conductive structures[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(3):687-695.

[15] 鲁晶津. 工作面隐伏含水断层电透视异常特征模拟研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(8):168-175.

LU Jingjin. Simulation study on electrical penetration anomalous features of hidden water-bearing fault in working face[J]. Coal Science and Technology,2016, 44(8):168-175.