

地质与勘测

掘进面瞬变电磁探测采空区及三维成像技术研究

陈健强^{1,2,3}, 张俊英^{2,3}, 李宏杰^{2,3}, 李文^{2,3}, 牟义^{2,3,4}, 廉玉广^{2,3}, 窦文武⁴

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院), 北京 100013; 4. 山西晋煤集团技术研究院有限责任公司, 山西 晋城 048006)

[摘要] 为优化掘进工作面前方采空区的全空间瞬变电磁法探测技术, 针对晋城矿区不含水、含水采空区条件分别展开二维视电阻率断面图成像分析研究, 并对推断结果进行了钻探验证; 在此基础上, 将采空区进行三维立体精细化成像, 根据视电阻率层位切片图及三维等值面图推演采空区的赋存状况; 同时, 结合实际条件利用裂缝带高度经验公式对三维成像推论加以计算验证。结果表明: 全空间瞬变电磁能较为及时准确地对前方有效探测深度内存在的采空区做出响应; 三维成像技术能有效结合常规二维成像分析, 更直观立体地反映采空区及覆岩破坏情况, 指导钻探验证工作的进行; 同时, 三维成像技术也为裂缝带高度的研究提供了新的直观方式。

[关键词] 掘进工作面; 全空间瞬变电磁法; 采空区; 三维成像技术

[中图分类号] TD175.6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225(2017)01-0018-04

3-D Imaging Technology and Goaf Transient Electromagnetic Exploration of Driving Face

CHEN Jian-qiang^{1,2,3}, ZHANG Jun-ying^{2,3}, LI Hong-jie^{2,3}, LI Wen^{2,3}, MU Yi^{2,3,4}, LIAN Yu-guang^{2,3}, DOU Wen-wu⁴

(1. Mining Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

3. State Key Laboratory of Coal Resource High Effective Mining & Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China;

4. Shanxi Jin Coal Corporation Technology Research Institute, Jincheng 048006, China)

Abstract: In order to optimize space transient electromagnetic exploration technology of ahead goaf of driving face, 2-D visual electrical resistance tomography was studied under different water, aquifer goaf in Jincheng coal mine area, then the results verified by drilling hole. 3-D precision imaging of goaf was done, goaf was evaluated according visual electrical resistance tomography pictures and 3-D contour surface, at the same time 3-D imaging was verified by fracture zone height in practical. The results showed that space transient electromagnetic exploration could response for exiting goaf in exploration depth ahead in time and accurately, 3-D imaging technology could analyze with normal 2-D imaging technology, goaf and overburden broken could reflected directly, it could guided for drilling verification, at the same time, 3-D imaging technology provide directly method for fracture zone height studying.

Key words: driving working face; space transient electromagnetic exploration; goaf; 3-D imaging technology

不同的开采方法、覆岩岩性及顶板管理方法等影响下会形成具有不同隐蔽致灾形式的采空区^[1-2]。据统计, 由采空区诱发的水害事故占水害事故的80%以上^[3]。作为矿井地质资料的重要补充途径, 巷道掘进过程中如何有效探测预报采空区及其含水性意义重大。目前, 全空间瞬变电磁法以其小线框非接触无损探测、探测方向易调节、数据采集快捷、解决问题具体、易组织施工等优点, 弥补了探地雷达及地震法有效探测距离相对较小、直流电法接地条件要求较高等不足, 近年来得到广泛应用, 并取得大量研究、应用性成果^[4-5]。

山西晋煤集团现有多座国有大型矿井和资源整

合矿井, 矿区内煤系地层为二叠系下统山西组和石炭系上统太原组, 其中主要可采煤层为3号、9号、15号煤层。从各井田精查勘探结果看, 各类采空区造成的安全生产隐患日趋严重。目前, 矿区内已开展了大量的全空间瞬变电磁法超前探测工作, 对采煤工作面区域的探测数据也已实现了三维立体化成像解译, 但对于掘进工作面超前探测结果的解释仍较局限于单一的二维数据成像分析, 如何实现三维精细化解译仍需补充研究。

1 采空区全空间瞬变电磁法超前探测原理

1.1 全空间瞬变电磁法探测原理

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2017.01.005

[收稿日期] 2016-10-17

[基金项目] 中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2014QN013); 煤科院科技发展基金资助项目(2014JC07)

[作者简介] 陈健强(1993-), 男, 安徽合肥人, 在读硕士研究生, 研究方向为采动损害与水害防治。

[引用格式] 陈健强, 张俊英, 李宏杰, 等. 掘进面瞬变电磁探测采空区及三维成像技术研究[J]. 煤矿开采, 2017, 22(1): 18-21.

全空间瞬变电磁法是一种建立在电磁感应原理基础上的时间域人工源电磁探测方法, 探测基本原理是向发射线圈施加一定大小的电流, 在巷道周围空间建立稳定的一次磁场; 控制电流的快速关断, 通过一次场消失伴随的剧烈磁场变化在巷道周围地质体中激励起二次感应电流, 并由其感应出二次磁场。随着断电后时间 t 的推移, 顶底板中不断激起感应电流并大致沿 47° 倾斜锥面逐渐向外扩散, 环状线电流逐步变形为圆电流环, 电流强度逐渐减弱至地层的欧姆损耗将磁场能量消耗完毕为止, 从而在线圈两侧形成“烟圈”效应^[6-7], 如图 1 所示 ($0 < t_1 < t_2 < t_3$)。

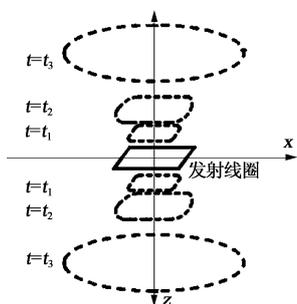


图 1 全空间条件下 TEM 信号扩散示意

该二次场的扩散速度与周围地质体的导电性有关, 当发射线圈半径相对于电流环半径很小时, 其传播速度 v 的计算公式为^[8]

$$v = \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} \quad (1)$$

式中, σ 为电导率; μ_0 为真空磁导率; t 为二次场衰减时间。

分析得出, 在导电性好的区域二次场扩散慢、衰减慢, 反之则扩散、衰减较快。

将接收线圈接收的二次场信息进行反演处理、解释, 便可得到巷道周围地质体的视电阻率分布、变化情况, 其理论值 ρ_τ 计算公式为^[9]

$$\rho_\tau = B \times C \times \frac{\mu_0}{4\pi t} \left[\frac{2\mu_0 S N s n}{5t(V/I)} \right]^{2/3} \quad (2)$$

式中, B 为井下瞬变电磁装置与地面瞬变电磁装置之间比例系数; C 为全空间响应系数; S 为发射回线面积; N 为发射回线匝数; s 为接收回线面积; n 为接收回线匝数; V 为感应电位; I 为供电电流强度。

通过综合分析二次场信号及视电阻率随时间的衰减变化等特征, 即可对探测前方存在的地质异常体做出预测预报。

1.2 采空区电性特征

正常情况下, 煤系地层的沉积序列较为清晰,

其电性特征也存在一定的纵向规律性与横向均一性。而当煤层开采后, 所形成的采空区其顶底板岩层的原始应力平衡状态遭破坏, 从而会发生移动、变形及破坏, 产生导水裂缝带及底板破坏带等。根据岩石的物理性质, 当岩体内存在空洞且不含水时, 充斥其内的空气会使得其电阻率值相比正常值偏大; 而若有水入渗或发育有大量裂隙, 则会导致电阻率减小至正常值以下。采空区的存在改变了原生地层电性在纵向和横向上的变化规律, 显现出的电性差异特征为全空间瞬变电磁法探测采空区提供了良好的地球物理前提条件^[10]。

2 全空间瞬变电磁法超前探测试验方案设计

为探测掘进工作面前方一定范围内的老窑、采空区分布及积水情况, 采用矿用本安型瞬变电磁仪, 边长 2m, 方形多匝重叠回线装置, 发射线圈 26 匝、接收线圈 60 匝。

在现场条件允许情况下, 为与“烟圈”扩散规律相适应, 一般设计 4 个全空间瞬变电磁法超前探测方向, 如图 2 所示, 分别为 3 个横向探测方向与 1 个纵向探测方向。为提高探测精度, 一般布置扇形观测系统^[11-12]。各横向探测方向设计布置横向探测角度 14 个, 分别是巷道左右侧帮 15° 等角度间隔布置 6 个测点、正前方垂直迎头布置 2 个测点, 如此 3 个横向探测方向共计布置 42 个测点; 纵向探测方向于顶底板之间向迎头 15° 等角度间隔共计布置 13 个测点; 共计 55 个测点^[13]。

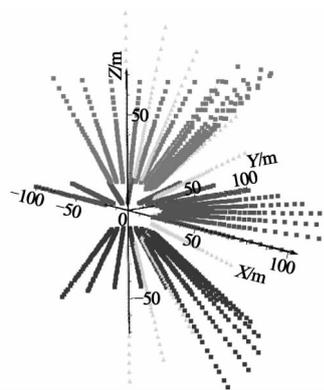


图 2 瞬变电磁法探测方向及角度示意

3 三维成像技术原理

现场所采集的数据包含了各个探测方向、角度下的采集窗口、电位及视电阻率等信息, 经数据提取、时深转换、深度校正及超前探测转换处理后, 可得到包括点号、深度及视电阻率在内的二维平面数据; 经网格化白化成像, 可得到相应探测方向各

探测角度叠加的二维视电阻率断面图。

进一步通过方程组 (3) 所示的坐标转换公式, 利用测点的深度数据 H , 可将平面数据转换为图 3 所示的 (P_x, P_y, P_z) 三维笛卡尔坐标数据体。

$$\begin{cases} P_x = H \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \\ P_y = H \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta \\ P_z = H \cdot \sin\alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中, H 为任意测点的探测深度; α 为探测方向与水平面的夹角; β 为横向探测角度。

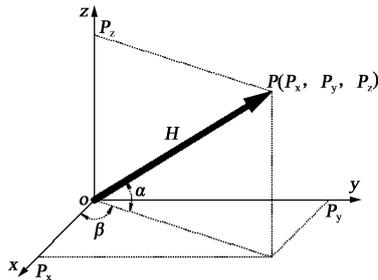


图 3 坐标转换示意

图 3 中, O 点为探测线圈位置, P 点为任意测点位置, X, Y 轴表示探测深度平面投影坐标, Z 轴表示顶底板深度。设定相关参数并将数据进行白化处理, 即可在有效探测深度范围之间进行三维可视化成像, 从而在二维成像基础上获取更为直观立体的空间地质异常体的分布情况^[14]。

4 试验案例及成像技术研究

4.1 不含水采空区

山西晋煤集团某矿在 9 号煤层掘进轨道平巷时, 为核实原有资料显示的前方小窑采空区的分布情况, 进行了迎头前方 100m 范围内全空间瞬变电磁法物探工作, 所得顺层方向探测成果叠加图如图 4 所示。图中显示, 沿探测方向盲区以外存在视电阻率等值线明显闭合的相对高阻异常区域, 位于探测前方 60~90° 之间, 视电阻率值多在 $80\Omega \cdot m$ 以上, 与扇形剖面两翼的 $10\sim 40\Omega \cdot m$ 相比, 反映出岩层电性横向差异较大。结合地质资料和以往案例分析, 图中虚线圈定部分高阻异常推测为不含水采空区影响所致。

对全空间瞬变电磁实测数据进行三维可视化成像, 得到如图 5 所示的水平切片图及高阻异常三维等值面图, 曲面包围区域即为经三维精细化成像处理所得到的采空区采动破坏分布范围示意。

根据物探结果进行钻探验证, 于探测前方 27m 附近处发现采空区裂隙, 自此开始逐步揭露小窑采

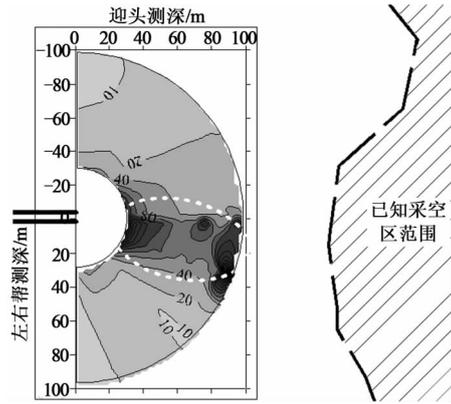
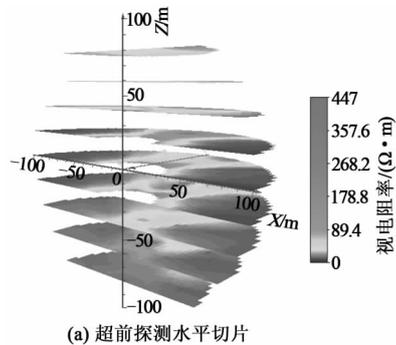
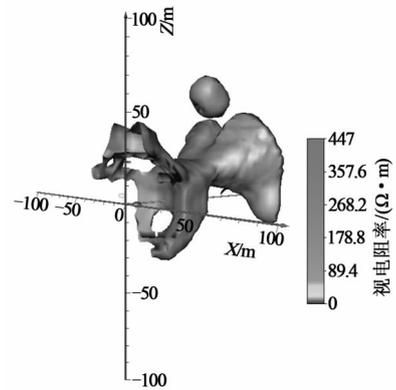


图 4 顺层方向探测成果叠加



(a) 超前探测水平切片



(b) 高阻异常三维等值面

图 5 不含水采空区三维可视化成像示意

空区, 且与三维成像展布形态对应较好; 相比图 4 采空区的原有位置范围资料, 其位置更接近掘进揭露实际。

4.2 含水采空区

集团下属某矿在矿界处 9 号煤层掘进回风平巷时, 为准确掌握相邻矿井采空区积水情况, 将顺层方向全空间瞬变电磁响应信号成像如图 6 所示。图中, 盲区以外存在 3 处视电阻率等值线呈封闭状的相对低阻异常区域, 分布于探测前方 60~180° 之间, 深度在 35m 之外, 视电阻率最大数值在 $30\Omega \cdot m$ 以下。与扇形右翼相比可以看出视电阻率等值线横向变化相对较大, 即掘进前方对应位置处岩层电性横向变化较大、含水裂隙较发育, 且富水性随

视电阻率等值线数值的减小而增强。综合物探成果并参考以往该矿采空区全空间瞬变电磁法探测验证情况, 推测虚线圈定低阻异常为含水采空区。

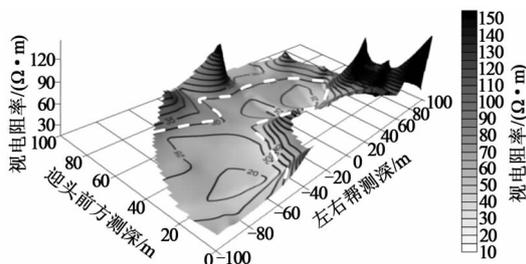


图6 顺层方向视电阻率分布

后经矿方钻探验证, 于顺层方向探测前方30m左右处钻杆探空, 揭露采空区裂隙, 出水量在 $1\text{m}^3/\text{h}$ 以下; 继续钻进至32m处时, 满孔出水, 流量为 $3\text{m}^3/\text{h}$ 左右, 证实本次物探结果可靠有效。

图7(a)为实际探测方向的视电阻率切片图, 可按需求设定不同角度查看各个层位物探成果。低阻异常三维等值面图如图7(b)所示, 反映出掘进面左帮采空区裂隙带最大发育高度为39m左右。根据资料, 采空区实际采高3m左右, 倾角 $8\sim 10^\circ$, 顶板岩性为砂岩、泥岩, 根据相应条件下的采空区裂隙带高度经验公式^[15], 计算可得出裂隙带最大发育高度为44.6m, 与三维成像结果相近。可以得出, 三维成像技术具有对超前探数据体进行精细化分析解释的前景。

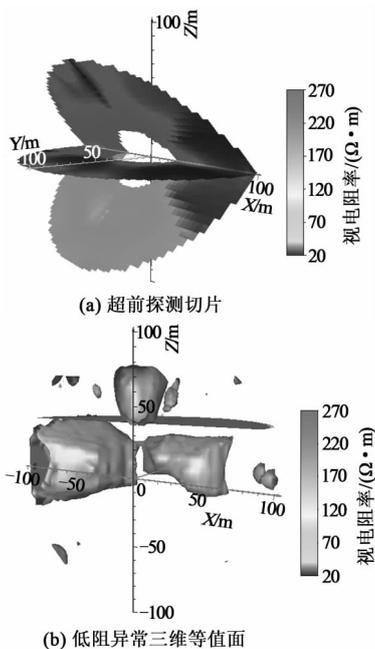


图7 含水采空区三维可视化成像示意

5 结论

(1) 对比分析不含水采空区及含水采空区条

件下的全空间瞬变电磁法超前探测应用及效果, 得出全空间瞬变电磁法能对前方采空区作出及时有效地响应, 可以较为准确地识别采空区的赋存状态, 并能够应用于井下多方位多角度多层位探测。

(2) 三维数据可视化成像技术能与常规二维数据成像有效结合, 更直观立体地反映出采空区的空间位置及分布情况, 进而为矿井钻探验证等工作提供有力指导, 以及为煤矿生产提供安全保障。

(3) 结合裂隙带高度经验公式验算, 初步得出三维成像技术具有直观研究采空区裂隙带发育情况的前景, 但限于现场试验条件未对裂隙带高度进行钻孔验证, 需在后续研究工作中加以补充。

[参考文献]

- [1] 李文, 李健. 资源整合煤矿采空区灾害特点及防治对策[J]. 煤矿安全, 2015, 46(7): 179-181, 185.
- [2] 张俊英, 王翰锋, 张彬, 等. 煤矿采空区勘查与安全隐患综合治理技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(10): 76-80.
- [3] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定释义[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [4] 任建伟, 谢雄刚, 左冉振. 基于瞬变电磁法的矿井水害探测技术应用[J]. 煤矿开采, 2014, 19(1): 17-20.
- [5] 李宏杰, 董文敏, 杨新亮, 等. 井上下立体综合探测技术在煤矿水害防治中的应用[J]. 煤矿开采, 2014, 19(1): 98-101, 90.
- [6] 牟义, 李文, 黎灵, 等. 矿井瞬变电磁法在工作面顶板富水性探测中的应用[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 104-107.
- [7] 李宏杰. 瞬变电磁探测技术在煤矿防治水中的应用[J]. 煤矿安全, 2013, 44(4): 159-161.
- [8] 刘树才, 岳建华, 刘志新. 煤矿水文物探技术与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
- [9] 于景邨. 矿井瞬变电磁法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [10] 胡承林. 综合物探技术在煤矿采空区的应用研究[D]. 四川: 成都理工大学, 2011.
- [11] 刘志新, 岳建华, 刘仰光. 扇形探测技术在超前探测中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 822-825, 868.
- [12] 胡雄武, 张平松, 严家平, 等. 矿井瞬变电磁超前探测视电阻率扩散叠加解释方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 925-931.
- [13] 安晋松, 孙庆先, 邱浩, 等. 井下陷落柱综合探测技术试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 144-147.
- [14] 韦乖强, 孙林, 张广琦, 等. 基于Voxler和Surfer软件在瞬变电磁法三维切片图绘制中的应用与研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(4): 32-35.
- [15] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.

[责任编辑: 李青]