

文章编号: 1001-1986(2017)01-0137-06

矿井无线电波透视法在唐家会矿井 61101 工作面隐伏断层探测中的应用

贾 茜^{1,2}, 张仲礼², 田小超², 王冰纯², 赵 兆², 刘 磊²

(1. 煤炭科学研究院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 选择 310 kHz 作为 YDT175 型无线电波透视仪的工作频率, 采取恰当的抗干扰方法, 对准格尔煤田唐家会矿井 61101 首采工作面隐伏断层进行了探测试验, 使用无线电波透视 CT 软件对采集数据进行反演处理与显示。结果在工作面回风巷 770~1 370 m 段发现 3 处电磁波衰减带, 解释为断层。经已有地质资料以及巷道实际揭露验证, 这 3 处衰减带内的确存在 3 条正断层, 说明选择适当的无线电波透视频率能够较可靠地探测工作面隐蔽地质异常体, 无线电波透视法是保障矿井工作面安全高效生产的有效技术。

关 键 词: CT 成像技术; 无线电波透视法; 隐蔽地质异常体; 工作面回风巷; 唐家会煤矿

中图分类号: P631.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.01.027

Application of radio wave perspective method in exploration of concealed fault in 61101 working face of Tangjiahui mine

JIA Qian^{1,2}, ZHANG Zhongli², TIAN Xiaochao², WANG Bingchun², ZHAO Zhao², LIU Lei²

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: The concealed faults in 61101 first coalface of Tangjiahui coal mine in Zhungeer coalfield were probed by using YDT175 type radio wave perspective instrument with 310 kHz as the working frequency, and by taking appropriate anti-jamming methods. The experimental data was processed and displayed by using composite curve method and the CT imaging method. The result shows that there are three high absorption and attenuation bands at 770~1 370 m of 61101 coal face gateway, and these high absorption and attenuation bands were interpreted as faults. They have been verified by the existing geological data and the actual exposure to the roadway that three normal faults exist in three high attenuation bands. These facts illustrate that selecting the appropriate radio waves perspective frequency can reliably detect the hidden geological abnormal body, radio wave perspective method is the effective technology to ensure the face mining in safety and high efficiency.

Keywords: CT imaging technology; radio wave penetration method; hidden geologic abnormal body; working face return airway; working surface transport lane; coal face gateway; Tangjiahui coal mine

以综采工艺为代表的安全高效矿井是我国煤炭工业现代化的标志。综采要以先进的矿井设计与可靠的地质条件作保障, 而作为矿井设计依据的地质勘查资料对隐蔽致灾地质因素的查明程度有限, 因此世界主要产煤国家在普及机械化采煤过程中普遍

存在着综采设备不适应煤矿地质条件的问题, 由此也带来了一系列安全隐患。在影响矿井生产的诸多地质因素中, 地质构造具有普遍性和控制性。构造, 尤其是中、小型断层, 不仅对煤层厚度与几何形态、煤层顶板完整性、岩浆侵入、陷落柱发育与分布、

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCL01-18); 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2015XAYMS03)

Foundation item : Planned Project of Overall Scientific and Technological Innovation Engineering of Shaanxi Province(2015KTCL01-18); Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2015XAYMS03)

第一作者简介: 贾茜(1990—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 从事煤矿井下电磁波勘探技术研究与设备研发工作. E-mail: 291979473@qq.com

引用格式: 贾茜, 张仲礼, 田小超, 等. 矿井无线电波透视法在唐家会矿井 61101 工作面隐伏断层探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 137-142.

JIA Qian, ZHANG Zhongli, TIAN Xiaochao, et al. Application of radio wave perspective method in exploration of concealed fault in 61101 working face of Tangjiahui mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 137-142.

地温地压、矿震岩爆、瓦斯突出等具有重要的控制作用，同时也是地下水储存空间与导水通道，是诱导矿井水害的主要因素。因此，断层的预测预报历来是矿井地质工作的核心。

现有多种地球物理方法来探测矿井煤层中的断层，如地面地震勘探^[1]、地面瞬变电磁勘探、井下地震勘探、井下无线电波透视探测、井下瞬变电磁勘探、井下瑞利波探测、井下微震监测、井下音频电透视法、地质雷达等^[1-9]。相比而言，井下无线电波透视技术具有普适性强、仪器轻便灵活、智能高效、多方位可调、多频率可选、透视距离大、抗干扰能力强、续航时间久等特点，提高了现场施工效率和探查精度，成为综采工作面内及钻孔间探测异常体的有效手段^[4-6]。

1 矿井地质概况

唐家会井田位于准格尔煤田东北部，含煤地层有上石炭统太原组和下二叠统山西组。其中，太原组含煤1~5层，煤层总厚度9.05~25.50 m，平均厚度17.85 m；可采煤层自上而下编号为6、9_上、9_下，可采总厚度8.40~25.50 m，平均17.59 m。山西组含煤1~4层，煤层总厚0.10~7.28 m，平均1.91 m；可采煤层编号为4、5，可采总厚度0.92~6.73 m，平均2.13 m^[10]。煤类为长焰煤。

井田位于窑沟背斜西翼，煤系走向NNE，倾向NNW，倾角5°~10°，呈单斜产出。

井田采用斜井-立井混合开拓，综采放顶煤采煤工艺，单水平分10个盘区开采，首采6号煤层的平均厚度18.93 m。61101首采工作面走向东西，倾斜长度220 m，推进长度2 200 m，煤层厚度19.00 m，自东向西回采。6号煤层顶板为富水性较强的砂岩，底板为厚度4.62~48.59 m的砂质泥岩、泥岩等隔水层，再向下为富水性中等-强的中奥陶统马家沟组灰岩含水层。煤炭地质勘查阶段在井田未发现断层，大巷掘进中揭露近10条断层。为了给工作面安全回采设计和防治水方案提供地质依据，应用井下无线电波透视法，查明61101工作面内落差大于1/2煤厚的隐伏断层、陷落柱和其他地质异常体的位置、规模和产状。

2 无线电波透视法工作原理

不同岩石或矿石的电性(电阻率、介电常数、吸收系数等)有别，对电磁波能量的吸收能力有一定差异。低阻岩石或矿石对电磁波能量有较强的吸收能力，高阻物质对电磁波能量的吸收作用较弱，断裂面(带)对电磁波的折射、反射作用也会造成电磁波

能量衰减，穿透距离变小。无线电波透视法就是利用煤层内部地质异常体对透视电磁波折射、反射、散射等作用造成的电磁波能量衰减，研究煤层中断层或其他地质异常体对电磁波的影响所造成的无线电波透视异常，从而进行地质推断和解释。

含煤地层是由具有成因联系的煤和非煤物质组成的非均质三维地质体，在垂直于煤系层面方向上，煤系是非均质体；在煤层展布一定范围内，煤层被视为均匀介质。电磁波在煤层中的传播可分解为垂直煤层层面和平行煤层层面的两个方向，如发射点的电磁波在各向同性煤层介质中传播时出现场强减弱，接收点收到的场强也会减弱，则形成透视异常(阴影区)。在垂直煤层层面方向上出现电磁波被吸收或屏蔽，接收信号显著减弱或收不到有效信号，也会形成透视异常。根据发射机与接收机的位置，可得到同一异常的“阴影区”。多个“阴影区”交汇的地方就是异常的位置。一般情况下，煤层与地质异常体的电性差异越大，“阴影区”就越明显，坑透效果就越好。

目前，矿井无线电波透视法可以有效探测工作面倾斜长度为200 m、钻孔间距50 m内的落差大于1/2煤厚的断层、直径10 m以上的陷落柱、富水区、侵入体等^[3]。

3 无线电波透视仪和数据处理软件

唐家会煤矿井下无线电波透视使用中煤科工集团西安研究院有限公司自主研发的YDT175型矿用无线电波透视仪。该仪器由天线、发射机、接收机、发射线圈、接收线圈组成(图1)。发射机和接收机的防爆标志为Exib-I Mb本质安全型，单体质量2.5 kg，工作频率有175 kHz、310 kHz、510 kHz、925 kHz，可调±20 Hz，接收灵敏度不低于40 nV。与仪器配套的MKF2014数据处理与解释软件兼容性强、操作简便、数据管理功能强大，文档编辑、数据分析、成像与图像处理灵便。



图1 YDT175型矿用本安型无线电波透视仪

Fig.1 YDT175 type radio waves scenograph of intrinsically safe for coal mine

4 工程布置与数据采集

4.1 测点布置

根据地质分析, 本次在61101工作面顺槽770~1370 m段共布置2条测线。其中, 运输顺槽为1号测线, 回风顺槽为2号测线。根据大巷已揭露构造复杂程度和顺槽的施工环境, 各发射点均匀布置,

点距50 m, 发射点自西向东编号依次为1, 6, 11, 16, …, 61。对应每个发射点, 在另一顺槽内每隔10 m布置一个接收点, 编号由西向东依次为1, 2, 3, …, 61。这样, 除1、61作为两端发射点对应的6个接收点外, 其余每个发射点呈扇形对应着11个接收点(图2)。

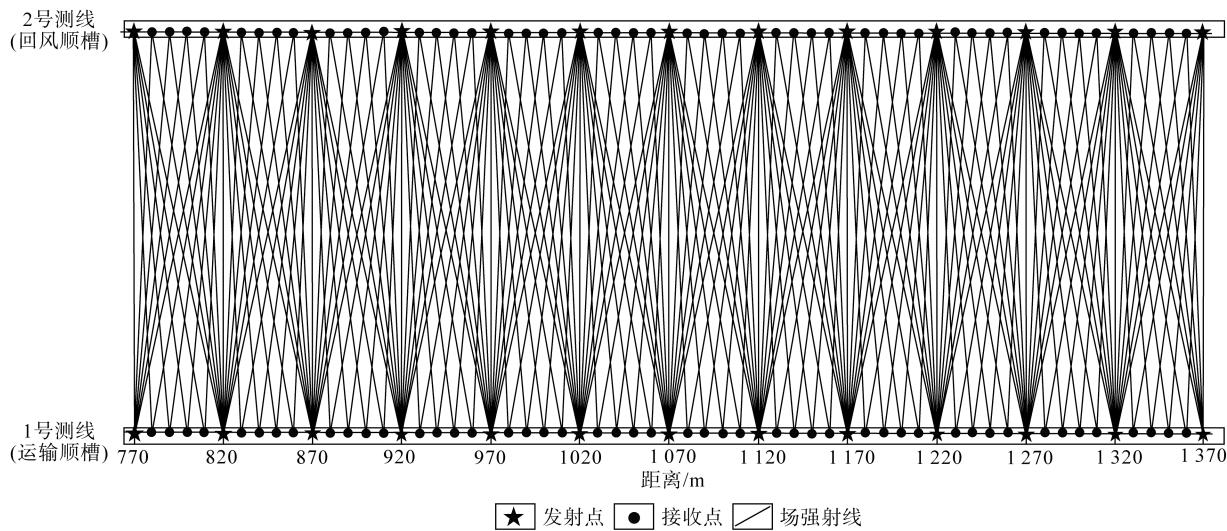


图2 61101工作面定点法发射点与接收点关系图

Fig.2 Map of relationship between launch point and acceptance in fixed points method of 61101 coal face

4.2 工作频率选择与数据采集

4.2.1 工作频率选择

无线电波透视仪器的工作频率直接影响到透视距离和对异常的分辨能力, 选择最佳工作频率是恰当显示“透视异常”的关键。电磁波在煤层中的传播速度随频率不同而异。如果工作频率过高, 则波长过小, 分辨率就高, 有利于提高异常体的显示度, 但透视范围小。如果工作频率过低, 则波长大, 衰减速度慢, 趋肤效应小, 透视范围较大, 但因一次绕射作用使得“透视异常”可能被弱化而模糊。为了较好地突出“阴影”区, 考虑工作面规模和产状, 试验采用310 kHz作为信号激励频率。

4.2.2 数据采集

现场数据采集采用“双边发射-双边接收”模式。首先从运输顺槽770 m(第1个测点)开始发射强度稳定的电磁波, 在回风顺槽770~820 m段的11个测点上接收实测场强。其次, 按照由西向东的顺序逐个完成运输巷的发射和回风巷的接收。至切眼位置(1370 m)后交换巷道, 在回风顺槽由西向东按测点顺序逐个完成发射, 在运输巷相应测点接收实测场强。同时, 数据采集过程中, 同一发射测点在发射期间保持天线形状不变、辐射面积最大、发射强度稳定。

现场数据采集所用仪器符合MT/T 693—1997

《矿用无线电波坑道透视仪通用技术条件》, 性能稳定。发射点和接收点布置、作业方法符合MT/T 898—2000《煤炭电法勘探规范》。因工作面长度较长, 同时回风顺槽为密集工字钢+锚网支护, 运输顺槽为锚网支护, 并安装有排水管道、风管、电缆等设备, 对坑透造成二次场干扰。为了最大程度地抑制和消除随机干扰, 提高信噪比, 除采取多次覆盖工作模式外, 探测时对工作面停水停电、应用数据最大值观测, 以及接收天线距电缆和金属导体0.5 m以上, 环垂直巷道等抗干扰措施, 以提高原始数据质量。

4.3 数据处理与地质解释

4.3.1 数据处理

接收数据相对于发射信号, 经过了距离的几何衰减和煤岩介质的吸收衰减, 几何衰减在数据处理过程中已经得到校正, 因此, 无线电波资料解释的实际参数是煤岩层的吸收衰减分布。在数据处理过程中, 首先将待成像区域网格化, 将平面内吸收衰减系数函数分布离散化, 每个网格单元内的吸收衰减系数视为常数, 构建由发射点到接收点连线上的吸收衰减叠加与发射-接收信号之间的等价关系, 形成线性代数方程, 联立所有发射-接收关系的代数方程组成线性代数方程组, 求解该方程组, 得到吸收衰减系数分布。

以接收点坐标为横轴, 接收场值为纵轴, 使用

无线电波透视 CT 软件对实测场强值进行反演，得到无线电波透视场强综合曲线(图 3)。

4.3.2 地质解释

电磁波勘探实践表明，正常煤层对电磁波能量吸收系数比围岩的小；当煤层中发育含水断层、裂隙、陷落柱时，发射波能量被吸收或者完全屏蔽，吸收衰减系数增大，甚至比围岩的还要大，在接收巷道接收到微弱信号或收不到电磁波信号，形成透视异常。隐伏断层引起的电磁波能量衰减范围一般呈条带状、串珠状，且衰减系数与断层落差密切相关。落差大于煤厚的断层形成的

衰减要比落差小于煤厚的断层的大，相应的异常带宽度也大；落差小于煤厚的断层，其引起的衰减强度和异常带宽度随着断层落差的减小而降低，或变窄。

利用 MKF2014 数据处理与绘图软件对接收场强和衰减系数进行反演成像，获得工作面内部电磁场衰减系数图(图 4)。电场强度衰减值的大小用不同色标表示：浅灰色范围代表低吸收衰减区域，为正常区；灰色范围代表较低吸收衰减区域，一般为正常区；深灰色范围代表高吸收衰减区域，无线电波穿透能力较差，为异常区。

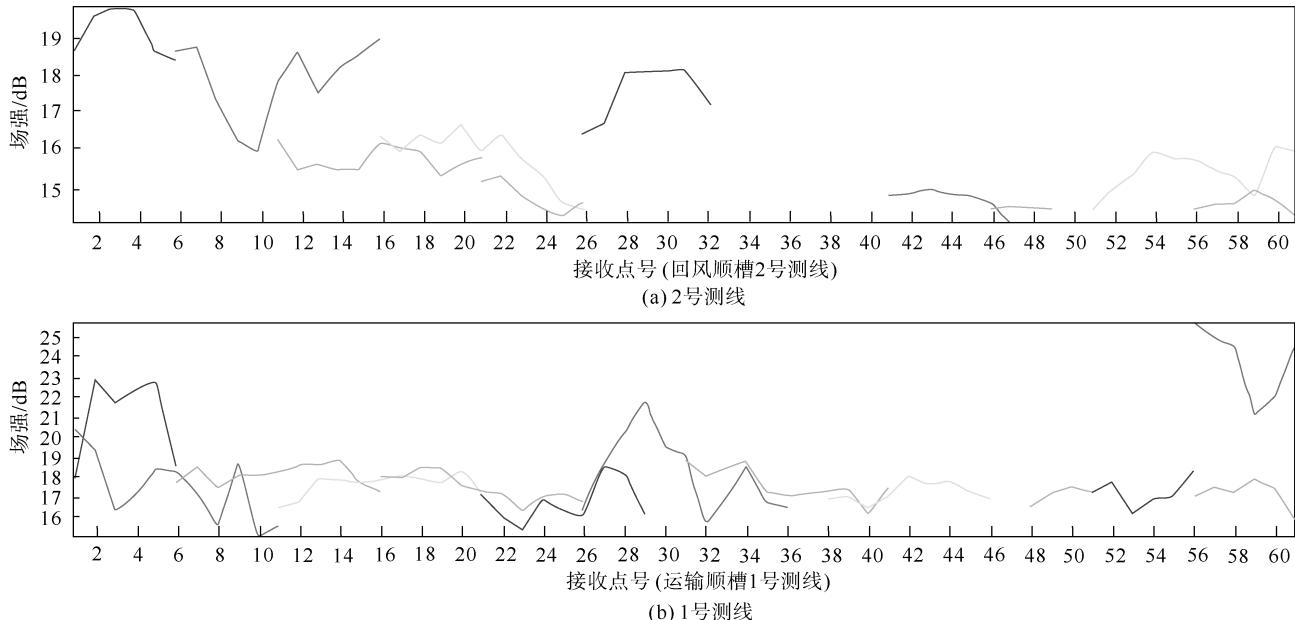


图 3 61101 工作面巷道接收场强综合曲线

Fig.3 Comprehensive curve of the measured field intensity in 61101 coal face tunnel

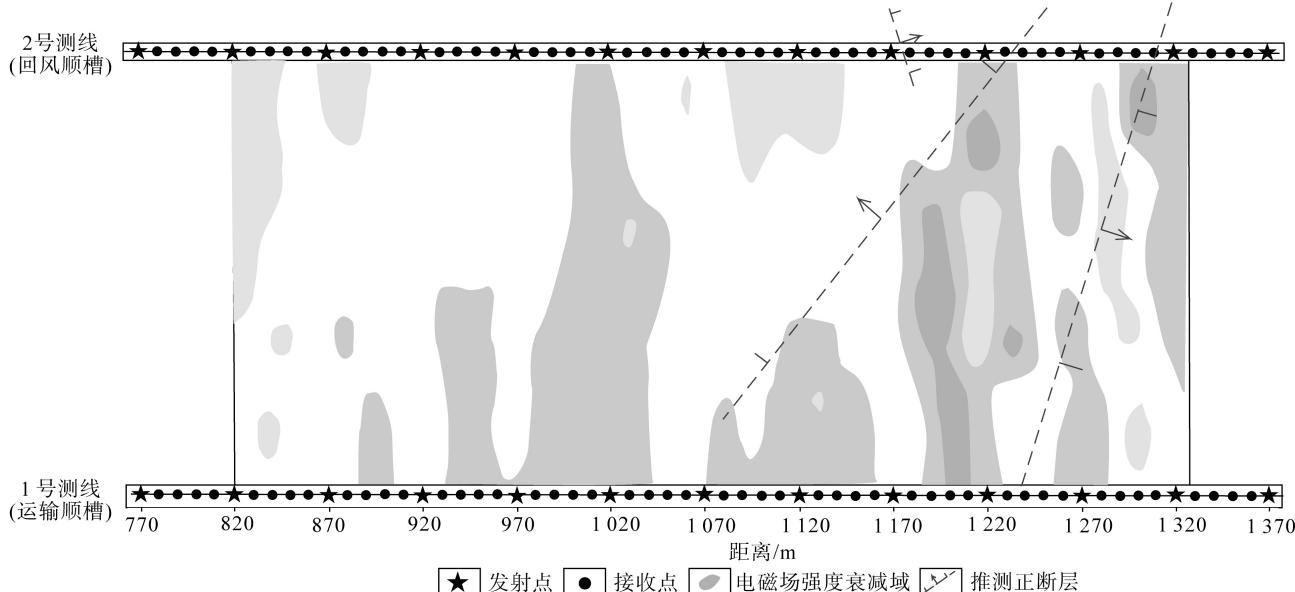


图 4 61101 工作面试验段电磁波衰减反演成像地质解释图

Fig.4 The inversion imaging figure of electromagnetic field attenuation in measured section of 61101 coal face

综合61101工作面顺槽各测点实测场强值，回风巷1170~1187 m、回风1210~1230 m、1293~1316 m段，以及运输巷1075~1085 m、1225~1250 m段，1020 m段分别出现电磁波高吸收衰减条带状。根据61101工作面无线电波透视层析成像图，结合已有地质资料与巷道实际揭露情况，可推断出其中回风顺槽1170~1187 m段为单一断层，回风巷1210~1230 m段和运输巷道1075~1085 m段的为同一条正断层，回风顺槽1293~1316 m段和运输顺槽1225~1250 m段为另一条正断层。1020 m段异常（灰色）实际上是较低吸收衰减区域，由于巷道内影响无线电波透视的因素很多，例如工字钢、锚杆、金属

锚网屏蔽电磁波也会影响信号的强弱，形成物探“假异常”而并非真正的地质异常。

5 探采对比

在61101工作面回采过程中，为了准确控制断层和富水区，矿方采用“物探先行、钻探验证”的探测方略。钻探和采掘工程揭露表明，无线电波透视法解释的断层分别在回风顺槽1168 m(F11-1)、1218 m(F12)、1310 m(F13)处和运输顺槽1071 m(F12)、1225 m(F13)处得到验证。断层类型和产状比较可信，平面位置摆动在可控制范围（表1，图5）。

表1 断层的探采对比结果
Table 1 The comparison results of exploration and exploitation about fault

断层编号	产状	最大落差/m	延伸长度/m	断层类型	备注
F11-1	88° 80°	2.3	30.0	正断层	隐伏断层
F12	343° 71°	9.6	275.9	正断层	向工作面北东延出
F13	140° 63°	7.2	237.1	正断层	两侧延出工作面

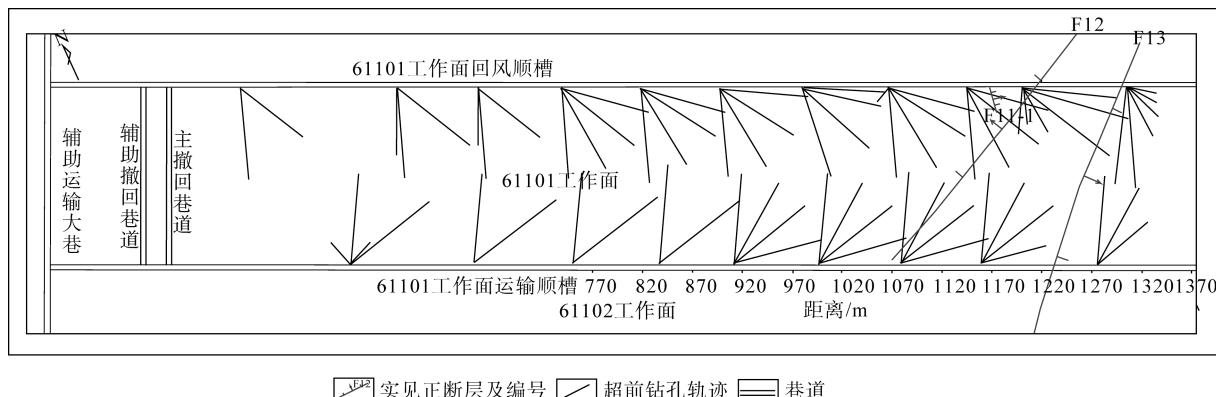


图5 61101工作面实际揭露断层图

Fig.5 The figure of true disclosure fault in 61101 coal face

6 结论

a. 无线电波透视法在唐家矿井61101工作面探测的3条断层，得到井下实际工程验证，说明利用无线电波透视法对井下隐伏地质异常体的控制是有效的。

b. 在进行资料处理解释时，应对不同方法分别进行对比处理解释、综合解释，并结合已知地质资料，降低物探结果的多解性。

c. 唐家会矿井周边分布有一系列受水害威胁的矿井，建议加强无线电波透视技术对导水构造、富水区等隐蔽致灾地质体的超前勘探，为矿井安全高效生产提供可靠地质保障。

参考文献

[1] 彭苏萍, 杜文凤, 赵伟, 等. 煤田三维地震综合解释技术在复

杂地质条件下的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 2760~2765.

PENG Suping, DU Wenfeng, ZHAO Wei, et al. 3D coalfield seismic integrated interpretation technique in complex geological condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2760~2765.

[2] 彭苏萍, 凌标灿, 刘盛东. 综采放顶煤工作面地震CT探测技术应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1786~1790.

PENG Suping, LING Biaocan, LIU Shengdong. Application of seismic CT tomography in longwall top-coal caving face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1786~1790.

[3] 申宝宏, 郑行周, 弯效杰, 等. 煤矿隐蔽致灾因素普查指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2014: 127~130.

[4] 薛丁华.“无线电波透视 CT 探测技术”在井下的实践应用分析[J]. 煤, 2015, 24(4): 60~62.

- XUE Dinghua. Analysis of the practical application of "radio wave perspective CT detection technology" in the well[J]. Coal, 2015, 24(4) : 60–62.
- [5] 高一峰. 无线电波透视在煤矿中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(增刊 1) : 105–108.
- GAO Yifeng. The application of radio-wave transmission in coal mines[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(S1) : 105–108.
- [6] 吴荣新, 刘盛东, 肖玉林, 等. 工作面无线电波透视实测场强成像分析及应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1) : 435–440.
- WU Rongxin, LIU Shengdong, XIAO Yulin, et al. Imaging analysis of measured magnetic field intensity from radio wave penetration for coal face and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1) : 435–440.
- [7] 程久龙, 于师建, 邱伟, 等. 工作面电磁波高精度层析成像及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(4) : 62–64.
- CHENG Jiulong, YU Shijian, QIU Wei, et al. High accuracy computer tomography of electromagnetic wave on working faces and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(4) : 62–64.
- [8] 程久龙, 李文, 王玉和. 工作面内隐伏含水体电法探测的实验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1) : 59–62.
- CHENG Jiulong, LI Wen, WANG Yuhe. Simulation experiment on detecting the hidden water-bearing bodies in working face[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1) : 59–62.
- [9] 程刚, 张平松. 矿井工作面地质异常精细探查方法技术研究进展[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(1) : 99–106.
- CHENG Gang, ZHANG Pingsong. Research progress of fine exploration method of geological abnormal in mine working face[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(1) : 99–106.
- [10] 内蒙古煤矿设计研究院有限责任公司. 鄂尔多斯市兴华能源有限责任公司唐家会矿井及选煤厂可行性研究报告[R]. 2010.
- [11] 田玉健. 基于无线电电磁波透视工作面煤层情况探测[J]. 能源与节能, 2014(6) : 47–48.
- TIAN Wangjian. Detection of coal seam in working face based on wireless electromagnetic wave[J]. Energy and Saving, 2014(6) : 47–48.

(责任编辑 聂爱兰)

(上接第 136 页)

- [8] SHIN C, HO C. Waveform inversion in the Laplace-Fourier domain[J]. Geophysical Journal International, 2009, 177(3) : 1067–1079.
- [9] SHIN C. Laplace-domain full-waveform inversion of seismic data lacking low-frequency information[J]. Geophysics, 2012, 77(5) : 199–206.
- [10] MORA P. Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multi-offset seismic data[J]. Geophysics, 1987, 52(9) : 1211–1228.
- [11] MORA P. Elastic wave-field inversion of reflection and transmission data[J]. Geophysics, 1988, 53(6) : 750–759.
- [12] RAVAUT C, OPERTO S, IMPORTA L, et al. Multiscale imaging of complex structures from multifold wide-aperture seismic data by frequency-domain full-waveform tomography: Application to a thrust belt[J]. Geophysical Journal International, 2004, 159(3) : 1032–1056.
- [13] SIRGUE L, PRAAT R. Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies[J]. Geophysics, 2004, 69(1) : 231–248.
- [14] METIVIER L, BROSSOER R, VIRIEUX J, et al. Full waveform inversion and the truncated Newton method[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Scientific Computing, 2013, 35(2) : 401–437.
- [15] MÉTIVIER L, BRETAUDEAU F, BROSSIER R, et al. Full waveform inversion and the truncated Newton method: Quantitative imaging of complex subsurface structures[J]. Geophysical Prospecting, 2014, 62(6) : 1353–1375.
- [16] 刘璐, 刘洪, 张衡, 等. 基于修正拟牛顿公式的全波形反演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7) : 2447–2451.
- LIU Lu, LIU Hong, ZHANG Heng, et al. Full waveform inversion based on modified quasi-Newton equation[J]. Chinese Journal Geophysics(in Chinese), 2013, 56(7) : 2447–2451.
- [17] 王义, 董良国. 基于截断牛顿法的 VTI 介质声波多参数全波形反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8) : 2873–2885.
- WANG Yi, DONG Liangguo. Multi-Parameter full waveform inversion for acoustic VTI media using the truncated Newton method[J]. Chinese Journal Geophysics(in Chinese), 2015, 58(8) : 2873–2885.
- [18] 刘玉柱, 王光银, 杨积忠, 等. 基于 Born 敏感核函数的 VTI 介质多参数全波形反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4) : 1305–1316.
- LIU Yuzhu, WANG Guangyin, YANG Jizhong, et al. Multi-parameter full waveform inversion for VTI media based on Born sensitivity kernels[J]. Chinese Journal Geophysics(in Chinese), 2015, 58(4) : 1305–1316.
- [19] 胡光辉, 王立歆, 方伍宝, 等. 全波形反演及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- [20] 陈洪杰. 基于声波方程的数值模拟与逆时偏移方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [21] PLESSIX R E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications[J]. Geophysical Journal International, 2006, 167(2) : 495–503.
- [22] 高凤霞. 频率域波动方程多参数全波形反演方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [23] HESTENES M R E, STIEFEL E. Methods of conjugate gradients for solving linear systems[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1952, 49(6) : 409–436.
- [24] DAI Y, YUAN Y. A nonlinear conjugate gradient method with a strong global convergence property[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Optimization, 1999, 10(1) : 177–182.

(责任编辑 聂爱兰)