

文章编号: 1001-1986(2020)04-0029-05

基于分段波形互相关的井下随采地震数据成像

张唤兰¹, 王保利²

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054;
2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 随采地震勘探是以采煤机为震源的被动地震探测技术, 由于采煤机是不断移动的、且其激发的是一种连续信号, 因此常规数据处理方法无法直接应用。提出分段波形互相关方法, 通过将采煤机产生的数据分段, 采用互相关方法提取有效信号的走时, 然后利用速度层析成像方法对工作面内部和切眼前方进行速度成像。利用波动方程对含异常体的工作面模型进行随采地震数值模拟, 反演得到的成像结果和速度模型基本吻合; 实际随采地震数据测试中, 利用该方法对采煤机震源数据反演得到采动过程中地震波传播速度的成像结果, 实现了对工作面内应力异常变化区域的实时动态监测。研究表明: 基于分段互相关成像方法能解决采煤机震源信号处理问题, 满足随采地震勘探技术实时性和稳定性的要求。

关键词: 波形互相关; 走时拾取; 速度层析成像; 随采地震

中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.004



移动阅读

Waveform cross correlation-based imaging of underground seismic data while mining

ZHANG Huanlan¹, WANG Baoli²

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: Seismics while mining is a passive seismic detection technique using a shearer as seismic source. Because the shearer moves unceasingly and excites the continuous signals, the conventional data processing method cannot be applied directly. In the paper a cross-correlation method of segmented waveform was put forward, the effective signal travel time was extracted through the segmentation of the data generated the shear, and then the velocity imaging method was used to image the interior of the working face and the front of the cutting hole. The wave equation was used to carry out the seismics while mining numerical simulation of the working face containing a abnormal body. The imaging results from the inversion were basically consistent with the velocity model. In the actual seismics while mining data test, this method is used to get the imaging results of the seismic wave propagation velocity obtained from the inversion of the data of the shear source during mining, so as to realize the real-time dynamic monitoring of an area of the abnormal variation in the working face. The results indicate that the cross-correlation imaging method based on the segmentation can solve the problems in the data processing of the signals of the shear source, meet the requirements of real-time and stability of seismics while mining technology.

Keywords: cross-correlation of waveform; picking of travel-time; velocity tomography; seismic while mining

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-06-17

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-741, 2020JM-714); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51808444)

Foundation item: Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province, China(2020JQ-741, 2020JM-714); Youth Program of National Natural Science Foundation of China(51808444)

第一作者简介: 张唤兰, 1981 年生, 女, 山西兴县人, 博士, 讲师, 从事地震数据处理方法研究及微地震监测方法研究。

E-mail: zhanghl_amy5257@163.com

引用格式: 张唤兰, 王保利. 基于分段波形互相关的井下随采地震数据成像[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 29-33.

ZHANG Huanlan, WANG Baoli. Waveform cross correlation-based imaging of underground seismic data while mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 29-33.

煤矿开采前,需对回采工作面和工作面前方的岩体进行超前探测,以便提前识别潜在的危险和问题,采取积极的防治措施。煤矿开采过程中,采煤机或掘进机在切割煤壁时会引起震动,产生地震波。通过在工作面四周布置检波器,接收采煤机切割煤壁时产生的地震波并进行成像,可得到回采工作面及工作面前方的构造以及速度分布,这种方法叫做随采地震勘探。随采地震勘探不需要中断采煤作业,并且在勘探时不需要放炮,避免了在易燃气体存在的环境下使用炸药,提高了煤矿生产的安全性。同时,随采地震勘探具有成本低、可持续监测等优点。1980年,D. J. Buchanan等^[1]把采煤机切割煤壁引起的震动作为震源进行煤岩体成像的尝试;1990年开始,E. C. Westman等^[2-3],Lu Bin等^[4]尝试利用采煤机引起的震动作为震源进行地震层析成像,但由于无法确定采煤机的准确位置,使得成像质量不佳;L. Petronio等^[5]研究利用隧道掘进机噪声产生的随钻地震;Luo X.等^[6-7]研究了采煤机作为震源成像的可行性;A. King等^[8]通过对采煤机产生的连续震动噪声中每两道数据进行广义互相关,得到有效信号的相对走时,结合实际采煤机位置,进行层析成像;陆斌等^[9]研究采煤机震源有效信号的提取和初步应用,并利用地震干涉方法对随采地震进行成像^[10];覃思等^[11-12]开展随采地震反射波及随采地震井—地联合超前探的试验研究。2019年,中煤科工集团西安研究院有限公司对随采地震技术的发展^[13]、震源模拟^[14]、数据采集软件^[15]、数据处理软件^[16]、数据质量评价^[17]、噪声衰减^[18]、精细探测方法^[19]、地质模型构建^[20]等方面做了大量研究。随采地震研究较早,实际应用较晚,近几年才开始发展。由于采煤机震源是连续移动的,且时域信号也表现为连续信号,与传统震源差异较大,因而常规成像方法无法直接应用。因此,笔者通过研究分段互相关来解决采煤机震源问题,并通过互相关方法提取地震波走时,实现对工作面内速度的动态成像,进而得到工作面内应力的动态分布。

1 随采地震数据成像方法

与常规地震勘探不同,随采地震的震源在时间上连续、而在空间位置上则是不断变化的,因此,随采地震数据无法直接利用常规成像方法进行反演成像。通常的方法是通过地震干涉将随采地震数据转换为虚拟共炮集记录,然后再利用常规地震成像方法进行反演成像。

存在的问题是常规地震干涉中震源通常是静止

的,对于移动的采煤机震源,地震干涉记录中会包含大量震源混叠噪声。因此,直接进行地震干涉同样也是不可取的。考虑到采煤机通常的移动速度约为0.1 m/s,在可允许的定位误差范围内(比如1 m),认为在对应的一小段时间内(约10 s)采煤机是相对固定的,那么该时间段内的数据即可通过地震干涉获得相应的虚拟记录。

基于以上分析,随采地震数据的分段互相关成像流程如下:

① 读入一刀随采地震数据;② 按一定时间间隔将数据分成若干段;③ 利用互相关干涉分别求取每个时间段内任意两道间的走时差;④ 利用走时差反演获得各检波器记录的绝对走时;⑤ 利用所有时间段获得的绝对走时进行CT反演,获得工作面内的速度。

2 互相关时间拾取

随采地震数据的震源没有确定的激发时间,并且震源是连续且随机的,按照一定时间间隔将数据分成若干段后,在每一段数据中通过任意两道的互相关来提取有效信号的走时差。

同一震源激发并由不同检波器接收到的有效信号的波形之间具有相似性,通过任意两道记录做互相关就可以提取出有效信号。第*i*道和第*j*道信号的互相关函数为:

$$c_{i,j}(k) = \frac{\sum_{n=1}^N x_i(n)x_j(n+k)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x_i^2(n) \sum_{n=1}^N x_j^2(n)}} \quad (1)$$

式中: $x_i(n)$ 和 $x_j(n)$ 分别表示第*i*道和第*j*道随采地震数据; N 为道数,也是检波器个数。

互相关时间拾取时只考虑互相关函数最大值对应的位置和大小,假设互相关函数 $c_{i,j}(k)$ 的最大值为 $C_{i,j}^{\max}$,则最大值对应的两道信号的时差为 $\Delta t_{i,j}$ 。

3 绝对走时计算

在每一段数据中通过任意两道记录的互相关得到有效信号的走时差后,利用走时差就可以反演绝对走时。两道记录的互相关走时是采煤机震源到这两个检波器的走时差,即:

$$t_i - t_j = \Delta t_{i,j} \quad (2)$$

式中: t_i 和 t_j 分别是第*i*个和第*j*个检波器记录的走时; $\Delta t_{i,j}$ 是由互相关得到的时差。写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_i \\ \vdots \\ \vdots \\ t_j \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3)$$

简写为:

$$\mathbf{A}\mathbf{t} = \Delta\mathbf{t} \quad (4)$$

式中: 系数矩阵 \mathbf{A} 为稀疏矩阵; $\Delta\mathbf{t}$ 为观测数据中任意两道之间互相关得到的时差; \mathbf{t} 为待求量。

在该方程中加入零均值约束使其非奇异, 得到的最小二乘解为:

$$\mathbf{t}^{\text{est}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta\mathbf{t} \quad (5)$$

其中, \mathbf{A}^T 是 \mathbf{A} 的转置矩阵。由于每道检波器记录的信号的能量及信噪比不同, 因而, 需要对方程进行加权来反映每道记录的质量, 这里利用式(1)中计算得到的两道信号的互相关系数进行加权, 得到的解为:

$$\mathbf{t}_w^{\text{est}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \Delta\mathbf{t} \quad (6)$$

式中: \mathbf{W} 为对角加权矩阵, 由互相关系数计算得到。通过求解该方程可得到各检波器记录的绝对走时。

4 速度层析成像

根据上述绝对走时计算方法依次得到所有时间段的绝对走时后, 对每刀随采地震数据进行速度层析成像, 从而获得工作面内的速度。先将一刀数据按照时间分成 k 段, 假设第 i 个检波器记录的第 k 时间段随采地震数据地震波走时为 $t_{i,k}^{\text{obs}}$, 由初始模型计算得到的地震波走时为 $t_{i,k}^{\text{cal}}$ 则:

$$t_{i,k}^{\text{obs}} = t_{0,k} + T_{i,k}(\mathbf{v}, x, y, z) + o.t. \quad (7)$$

式中: $t_{0,k}$ 为第 k 时间段随采地震震源的激发时间; $T_{i,k}$ 为地震波从第 k 时间段震源传播到第 i 个检波器的时间; $o.t.$ 项表示第 k 时间段观测数据引入的时间误差; \mathbf{v} 为待成像的速度模型, (x_k, y_k, z_k) 为第 k 时间段对应震源的坐标。

令残差 $\Delta t_{i,k} = t_{i,k}^{\text{obs}} - t_{i,k}^{\text{cal}}$, 通过改变模型参数, 使计算出的时间变化量 $\delta t_{i,k}^{\text{cal}}$ 等于残差 $\Delta t_{i,k}$, 将 $\delta t_{i,k}^{\text{cal}}$ 展开, 并仅保留一阶项, 则得:

$$\delta t_{i,k}^{\text{cal}} = \delta t_{0,k} + \frac{\partial T_{i,k}}{\partial x_k} \delta x_k + \frac{\partial T_{i,k}}{\partial y_k} \delta y_k + \frac{\partial T_{i,k}}{\partial z_k} \delta z_k + \frac{\partial T_{i,k}}{\partial \mathbf{v}} \delta \mathbf{v} = \Delta t_{i,k} \quad (8)$$

写成矩阵形式为:

$$\mathbf{B}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x} = (\delta t_{0,k}, \delta x_k, \delta y_k, \delta z_k, \delta \mathbf{v})^T$, 为待求变量; 向

量 $\mathbf{b} = (\Delta t_{1,k}, \Delta t_{2,k}, \dots, \Delta t_{N,k})^T$; N 为检波器个数; 矩阵 \mathbf{B} 为:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\partial T_{1,k}}{\partial x_k} & \frac{\partial T_{1,k}}{\partial y_k} & \frac{\partial T_{1,k}}{\partial z_k} & \frac{\partial T_{1,k}}{\partial \mathbf{v}} \\ 1 & \frac{\partial T_{2,k}}{\partial x_k} & \frac{\partial T_{2,k}}{\partial y_k} & \frac{\partial T_{2,k}}{\partial z_k} & \frac{\partial T_{2,k}}{\partial \mathbf{v}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{\partial T_{M,k}}{\partial x_k} & \frac{\partial T_{M,k}}{\partial y_k} & \frac{\partial T_{M,k}}{\partial z_k} & \frac{\partial T_{M,k}}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

对式(9)进行求解, 可得到震源激发时间、位置和速度的扰动值, 通过不断迭代, 直到计算的时间残差变化量可以忽略, 最终得到采煤机震源位置和速度模型。

5 数据测试

5.1 模型数据测试

为验证本文所述方法的可靠性, 构建如图1所示模型, 工作面长度为500 m, 宽度为100 m, 工作面内地震波传播速度为2 000 m/s, 工作面内部存在2个异常体, 左边异常体为边长是30 m的正方体, 异常体内地震波的传播速度为2 500 m/s, 右边异常体为宽度是20 m的条带, 异常体内地震波的传播速度都为3 000 m/s。采用孔-巷联合观测系统, 2条巷道分别从距离切眼(模型左侧为切眼)10 m开始布置检波器, 各布置49个, 工作面内布设4个孔中接收排列, 分别距切眼100、250、400、495 m, 4个钻孔各布置10个检波器, 检波器间距均为10 m。

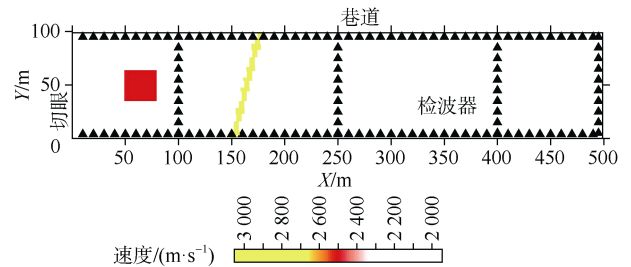


图1 速度模型

Fig.1 Velocity model

采用二维声波方程, 用时间2阶、空间8阶的交错网格有限差分技术进行波场正演模拟, 模拟采用的震源信号为10~80 Hz的带限伪随机噪声序列; 震源移动速度0.2 m/min, 每刀进尺1 m。

利用本文方法成像结果(图2), 对比成像结果与速度模型可以看出, 异常体的位置吻合较好, 正方体异常的一条边范围略有增加, 条带状异常范围与模型基本也是吻合的, 表明成像方法是正确的。

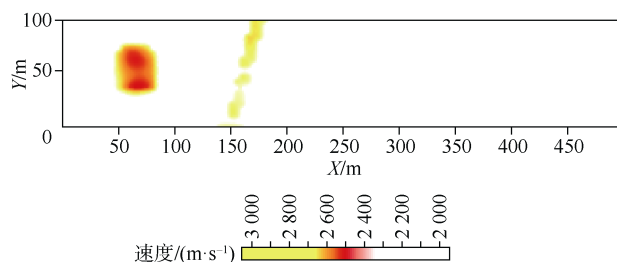


图 2 速度成像结果

Fig.2 The result of velocity imaging

5.2 实际数据测试

以某矿工作面随采数据为例,工作面宽度为

200 m, 长度为 700 m。采用孔-巷联合观测系统, 在工作面两侧巷道内各布设 24 个检波器, 检波器间距为 15 m。分别在巷道距切眼 110 m 和 266 m 处打钻, 并在每个孔中安置 12 个检波器, 检波器间距也为 15 m, 共计安装 72 个检波器进行监测。

在一个半月的监测时间段内, 共计进尺 110 m, 每刀进尺约为 0.65 m。由于网络等故障问题, 使得有些数据未被采集, 有效监测到 110 刀, 每刀成像一次, 即相邻两刀采煤机向前推进约 0.65 m, 成像结果如图 3 所示(隔 10 刀显示), 图中白色区域右边界为切眼推进的位置。

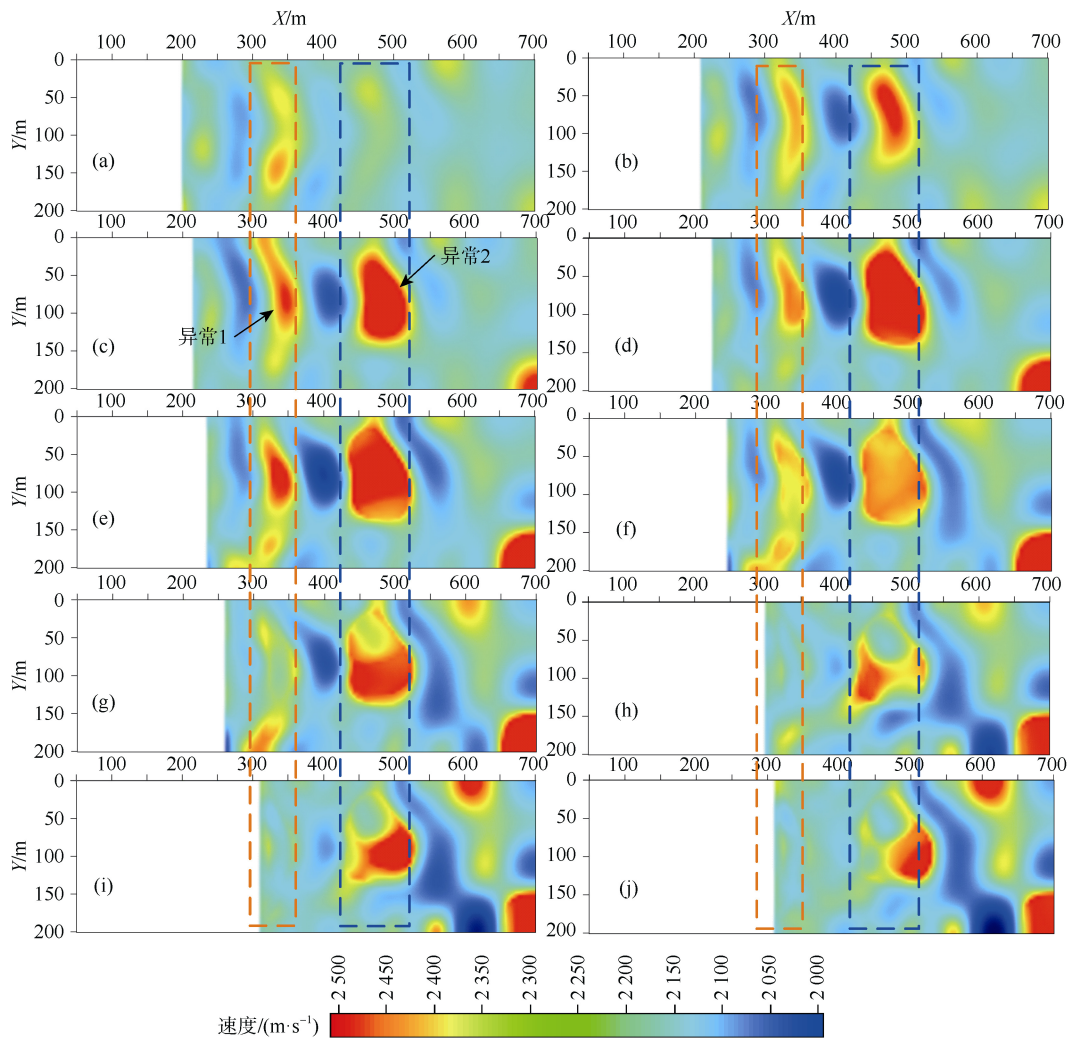


图 3 随采地震成像结果(a-j 为每隔 10 刀的反演结果)

Fig.3 The imaging results of seismic with mining(a-j are the inversion results every 10 cuts)

图 3a—图 3j 为每间隔 10 刀的成像剖面, 每刀进尺约 0.65 m, 采煤机从左向右推进。成像结果中明显的速度异常有 2 处, 图 3c 中标注的异常 1 与矿井物探解释成果(图 4)中的异常位置一致, 为断层引起的速度异常, 且随着采煤机的推进, 速度异常区的位置保持不变。图 3c 中标出的异常 2 推测为应力集中区, 随着采煤机逐渐推进到集中区附近, 从图 3f

开始, 速度值和异常区域的大小在缓慢减小, 表明应力在慢慢释放。

6 结论

a. 基于分段波形互相关速度层析成像方法在随采地震数据的成像上是可行的, 模型和实际数据的测试结果都表明其正确性和稳定性。

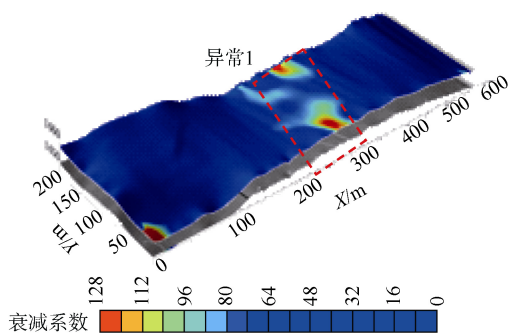


图4 矿井物探解释成果

Fig.4 Interpretation of mine geophysical exploration

b. 利用随采地震数据成像可以探测工作面内的速度异常区, 为地质灾害的预警提供科学指导。

c. 下一步工作考虑通过互相关走时和绝对走时相结合来提高采煤机定位精度, 从而进一步提高成像精度, 更好地为煤矿安全生产服务。

请听作者语音介绍创新技术成果
等信息, 欢迎与作者进行交流



OSID 码

参考文献(References)

- [1] BUCHANAN D J, MASON I M, DAVIS R. The coal cutter as a seismic source in channel wave exploration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1980, GE-18(4): 318–320.
- [2] WESTMAN E C, HARAMY K Y, ROCK A D. Seismic tomography for longwall stress analysis[C]//International Conference on ground control in mining. Golden, CO(United States), 1996: 397–403.
- [3] WESTMAN E, HEASLEY K, SWANSON P, et al. A correlation between seismic tomography, seismic events and support pressure[C]//Symposium on rock mechanics. Washington DC, 2001: 319–326.
- [4] LU Bin, CHENG Jianyuan, HU Jiwei, et al. Seismic features of vibration induced by mining machines and feasibility to be seismic source[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2011, 3: 76–85.
- [5] PETRONIO L, POLETTO F. Seismic-while-drilling by using tunnel boring machine noise[J]. Geophysics, 2002, 67(6): 1798–1809.
- [6] LUO X, KING A, WERKEN van de M. Sensing roof conditions ahead of a longwall mining using the shearer as a seismic source[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 17–20.
- [7] LUO X, KING A, WERKEN van de M. Tomographic imaging of rock conditions ahead of mining using the shearer as a seismic

source: A feasibility study[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(11): 3671–3678.

- [8] KING A, LUO X. Methodology for tomographic imaging ahead of mining using the shearer as a seismic source[J]. Geophysics, 2009, 74(2): m1–m8.
- [9] 陆斌, 程建远, 胡继武, 等. 采煤机震源有效信号提取及初步应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2202–2207.
LU Bin, CHENG Jianyuan, HU Jiwei, et al. Shearer source signal extraction and preliminary application[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2202–2207.
- [10] 陆斌. 基于地震干涉的煤矿回采工作面随采地震成像方法[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6): 142–147.
LU Bin. A seismic while mining method of coal working-face based on seismic interferometry[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 142–147.
- [11] 覃思, 程建远. 煤矿井下随采地震反射波勘探试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 116–119.
QIN Si, CHENG Jianyuan. Experimental study on seismic while mining for underground coal mine reflection survey[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 116–119.
- [12] 覃思. 随采地震井-地联合超前探测的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6): 148–151.
QIN Si. Underground-surface combined seismic while mining advance detection[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 148–151.
- [13] 程建远, 覃思, 陆斌, 等. 煤矿井下随采地震探测技术发展综述[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 1–9.
CHENG Jianyuan, QIN Si, LU Bin, et al. The development of seismic-while-mining detection technology in underground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 1–9.
- [14] 金丹. 综采工作面随采地震的采煤机震源模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 15–19.
JIN Dan. Simulation of seismic-while-mining with shearer as source of fully mechanized mining face[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 15–19.
- [15] 段建华, 王云宏, 王保利. 随采地震监测数据采集控制软件开发[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 35–40.
DUAN Jianhua, WANG Yunhong, WANG Baoli. Development of data acquisition and control software for seismic monitoring with mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 35–40.
- [16] 王保利. 随采地震数据处理软件开发与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 29–34.
WANG Baoli. Development and application of software in seismic while mining data processing[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 29–34.

(下转第 40 页)

- NING Shunian, ZHANG Shaohong, YANG Feng, et al. Radio wave tomography technique and its application in underground radio wave probing[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 468–472.
- [9] 刘盛东, 刘静, 岳建华. 中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 19–25.
- LIU Shengdong, LIU Jing, YUE Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 19–25.
- [10] HATHERLY P. Overview on the application of geophysics in coal mining[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 114: 74–84.
- [11] 刘广亮, 于师建. 基于质心频移的无线电波透视层析成像[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 583–587.
- LIU Guangliang, YU Shijian. Radio wave penetration tomography based on the centroid frequency downshift[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 583–587.
- [12] 肖玉林, 吴荣新, 严家平, 等. 工作面坑透场强传播规律及有效透视宽度研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 712–718.
- XIAO Yulin, WU Rongxin, YAN Jiaping, et al. Field strength propagation law of radio wave penetration and effective perspective width for coal face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 712–718.
- [13] LAVU S, MCHUGH R, SANGSTER A J, et al. Radio-wave imaging in a coal seam waveguide using a pre-selected enforced resonant mode[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 75: 171–179.
- [14] 邓凤茹, 赵艳. 基于无线电波坑道透视算法数学模型的研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2012, 22(3): 12–13.
- DENG Fengru, ZHAO Yan. Study of mathematical model based on the algorithm of radio waves tunnels perspective[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2012, 22(3): 12–13.
- [15] 吴荣新, 张平松, 刘盛东, 等. 矿井工作面无线电波透视“一发双收”探测与应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(增刊 1): 170–174.
- WU Rongxin, ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, et al. Radio wave penetration by the device of one-transmitter and two-receivers for coal face and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(Sup.1): 170–174.
- [16] 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(Sup.1): 435–440.
- [17] 刘鑫明, 刘树才, 姜志海, 等. 基于改进振幅衰减常数的无线电波透视层析成像研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 980–987.
- LIU Xinming, LIU Shucai, JIANG Zhihai, et al. Study on the tomography of radio-wave penetration based on improved amplitude attenuation constant[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 980–987.
- [18] 肖玉林, 吴荣新, 张平松, 等. 无线电波透视场强增量法在煤层工作面坑透探测中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5): 36–40.
- XIAO Yulin, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. Application of radio wave penetration field strength increment method in detection by coal face roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(5): 36–40.
- [19] 吴荣新, 肖玉林, 张世阔, 等. 工作面煤厚及宽度对坑透综合曲线图的影响[J]. 建井技术, 2015, 36(6): 21–24.
- WU Rongxin, XIAO Yulin, ZHANG Shikuo, et al. The influence of coal seam thickness and coalface width to comprehensive curve charts of radio-wave penetration[J]. Mine Construction Technology, 2015, 36(6): 21–24.
- [20] 董一飞, 张致付. 基于菲涅尔带理论的无线电波层析正则化方法研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 18–25.
- DONG Yifei, ZHANG Zhifu. Regularization method of radio wave tomography based on Fresnel zone theory[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 18–25.

(责任编辑 聂爱兰)

(上接第 33 页)

- [17] 覃思, 崔伟雄, 王伟. 随采地震数据质量定量评价[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 20–24.
- QIN Si, CUI Weixiong, WANG Wei. Quantitative quality evaluation of seismic-while-mining data[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 20–24.
- [18] 刘强. 随采地震噪声衰减研究[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 25–28.
- LIU Qiang. Study on noise attenuation of seismic while mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 25–28.
- [19] 陆斌. 基于孔间地震细动态探测的透明工作面方法[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 10–14.
- LU Bin. Method of transparent working face based on dynamic detection of cross hole seismic subdivision[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 10–14.
- [20] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285–2295.
- CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285–2295.

(责任编辑 聂爱兰)