

基于共接收点道集波形相似度的槽波到时估计方法

王季,牛欢,吴海,李刚

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

摘要:为解决井下透射槽波数据中接收点子波差异影响槽波到时估计准确度的问题,分析了接收点子波差异的成因,提出了基于共接收点道集波形相似度的槽波到时估计方法,利用接收点子波放大同一接收点上槽波相似性的特点,在共接收点道集上计算各道与其他道的互相关系数,依据波形相似度估计各道的槽波到时。实际探测结果表明:共接收点道集的相邻道之间槽波相似度高,估计出的槽波到时能够准确反映断层引起的槽波速度异常,由此获得的速度层析成像结果中,速度异常区与实际断层位置基本一致。

关键词:槽波探测;透射槽波;共接收点道集;到时估计

中图分类号:P631 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)01-0162-05

Estimation method on arrival time of in-seam wave based on similarity of wave-forms in common receiver gather

WANG Ji, NIU Huan, WU Hai, LI Gang

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: To accurately detect arrival times of transmitted in-seam waves which are damaged by wavelets of receivers, we analyzed the causes of differences of receiver wavelets, and propose a method to detect arrival time based on similarity of wave-forms in common receiver point gather. The method take advantage of the ability of receiver wavelet which can promote the similarity of wave-forms of same receivers, and compute the cross-correlation coefficient between every trace with other traces, and estimate arrival time of in-seam wave according to the similarity of wave-forms. Results of actual applications showed that in-seam waves in common receiver gather have great similarity to adjacent traces, and the estimated arrival times can show the irregularity of in-seam wave caused by faults. On the tomography computed using estimated arrival times, anomalous velocity regions are in accordance with actual faults.

Key words:detection by in-seam wave; transmitted in-seam wave; common receiver gather; arrival time estimation

0 引言

采煤工作面的槽波探测是近年来井下物探的研究热点之一^[1],在工作面内断层、陷落柱、薄煤带等异常构造的探测中均取得了较好的应用效果^[2-3]。槽波探测分为透射法和反射法^[4-5]。其中,透射槽波法已成为采煤工作面探测的主要方法^[6-7]。透射槽波探测利用了槽波在煤层中传播时,遇到异常构造会发生传播速度、振幅衰减系数等物性参数改变的原理,利用布设在工作面上下巷的各个激发点和

接收点上槽波的到时差和振幅比,反演出槽波速度和振幅衰减系数在工作面内的分布图,从而探测出断层等异常构造的位置及发育情况^[8-9]。

从采集得到的井下地震数据中估计槽波到时,是下一步开展槽波数据处理的基础。尤其对于槽波速度 CT 成像法,准确的拾取槽波到时,是能否获得准确的成像结果的关键^[10-11]。然而,由于槽波并非是初至波,在槽波达到之前先后有围岩折射纵波与折射横波到达,围岩折射横波的速度略高于槽波 Ariy 相速度,因此受到折射横波波列的影响,很难从

收稿日期:2017-12-12;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.01.023

基金项目:科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2014EG122201)

作者简介:王季(1977—),男,陕西西安人,研究员,博士。E-mail: wangji@cctegxian.com

引用格式:王季,牛欢,吴海,等. 基于共接收点道集波形相似度的槽波到时估计方法[J]. 煤炭科学技术,2018,46(1):162-166,230.

WANG Ji, NIU Huan, WU Hai, et al. Estimation method on arrival time of in-seam wave based on similarity of wave-forms in common receiver gather[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 162-166, 230.

数据中直接提取出槽波的到时^[12]。

另一方面,槽波具有很强的频散性,不同速度的槽波具有不同的频率,导致不同偏移距的接收点上槽波波列的差异很大^[13~14]。因此,共炮点道集上槽波的道间相似性不高。但是在共接收点道集上,由于不同点激发的地震波均是通过同一个检波器接收的,而受到此检波器安装方式及锚杆固有频率的影响,共接收点道集上的所有道相当于与同一个子波相卷积。因此,共接收点道集的各道之间具有很强的相似性。

目前,基于波形相似性的初至拾取方法已成果应用于微地震信号处理中^[15~16],而槽波探测中仍以人工拾取为主。为了准确估计槽波到时,笔者提出了基于共接收点道集波形相似度的槽波到时估计方法,在每个共检点道集上,根据槽波 Airy 相到达的基准时间,计算每一道与其他道数据之间的最大互相关所对应的最大时延,并将平均值作为该道在基准时间上的扰动,从而估计出每一道的槽波到时。

1 方法原理

基于速度的透射槽波探测法主要利用了当槽波遇到煤层中的地质异常体时,槽波速度将发生改变的原理,从接收到的数据中拾取槽波到时,再利用到时反演出工作面内槽波的速度分布,从而对煤层中地质异常体成像^[17]。因此,准确拾取槽波到时是槽波速度反演的基础和关键。在槽波探测施工中,检波器一般通过充气或充填炮泥的方式埋置在检波器孔中,或者通过转接头固定在锚杆头上。这 2 种安装方式均会带来检波器的谐波干扰。

图 1 为某工作面实际采集的井下透射槽波数据,其中图 1a、图 1b 分别为第 219 号、第 221 号检波器对应的共接收点道集。可以看出,在共检波点道集上,虽然槽波由不同炮点激发,但是由于槽波由同一个检波器接收,因此各道数据上的槽波波形具有很高的相似性;而对比图 1a 和图 1b,由于这 2 个道集是由不同检波器接收的,虽然这 2 个检波器距离仅有 10 m,但是由于检波器固定装置等因素的影响,不同接收点的槽波波形差异较大。

造成这一现象的原因是由于检波器通过转接头安装在锚杆头上,槽波等煤层中的弹性波在被检波器接收前,需要经过锚杆、托盘、锚网、转接头、螺丝等多个部件。在这个过程中,每个部件都相当于一个滤波器,根据自身的特性对弹性波进行滤波处理。

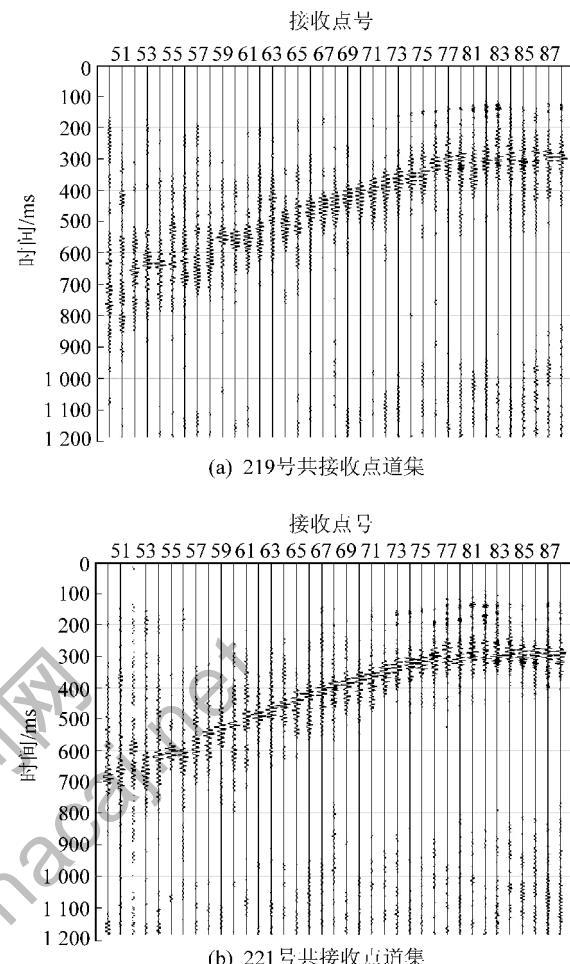


图 1 相邻 2 个接收点的透射槽波记录

Fig. 1 Schematic diagrams of transmitted in-seam waves from two adjacent receivers

每个接收点可以整体上看做具有同一个子波,采集到的信号是这个子波与实际地震信号相卷积的结果。在共接收点道集上,由于所有道的数据均与同一个接收点子波相卷积,因此道间具有较高的相似性。在共炮点道集上,各道数据与不同的接收点子波相卷积,因此道间的相似性较低。

常规拾取到时的方法是在共炮点道集上进行。受接收点差异的影响,地震波形的差异会为拾取过程带来较大的困难。地面地震解决这一问题的方法是进行地表一致性反褶积,通过迭代消除接收点子波的影响,再从反褶积后的数据中提取到时。事实上,共接收点道集由于接收点子波的存在,槽波在到达时都与同一接收点子波相卷积而变得在各道之间具有较高的相似性,可以很容易地从道集中识别出来,因此也较容易提取槽波到时。在常规地震勘探中作为干扰因素的接收点子波,在井下槽波探测中能起到放大槽波的作用,使得槽波更易识别,从中提

取出的槽波到时也更加准确。

透射槽波具有较强的频散性,不同频率的槽波具有不同的传播速度,这就造成不同频率的槽波也具有不同的到时。因此提取到时并进行速度反演都是针对某一频段内的槽波进行的。由于槽波在 Airy 相附近能量最强且频散性最弱,一般选取 Airy 相所在的频段进行带通滤波。

带通滤波后,逐个处理共接收点道集。首先根据 Airy 相速度以及炮检距计算每一道的基准时间。如果工作面内无异常,槽波应该在各道对应的基准时间到达。由于工作面内异常构造的影响,槽波到时会在基准时间的基础上发生扰动,早于或晚于基准时间。以基准时间为基准选取一个时窗内的数据作为槽波波形,求出各道两两之间槽波波形的互相关系数。则最大互相关系数对应的时延就是这两道之间在基准时间基础上的时间差。对某一道而言,它与道集内所有道之间时间差的平均值可以看作是该道由于自身传播路径上的异常而带来的时间扰动,与其他道的扰动无关。因此,将此平均值加上此道对应的基准时间,就能计算出槽波在这一道上的准确到时。具体步骤如下:

1) 提取共接收点道集 $d(i, t)$, $i \in [1, N]$, N 为炮点数, t 为采样时间。

2) 用槽波 Airy 相频率对 $d(i, t)$ 带通滤波。

3) 根据槽波 Airy 相速度及每一道的炮检距,计算每一道上槽波达到的基准时间。

4) 对第 i 道,以基准时间 t_i 为中心,截取长度为 $L+1$ 的时窗内的数据 $[d(i, t_i-L/2), \dots, d(i, t_i+L/2)]$ 作为第 i 道的槽波波形 s_i 。

5) 求出任意 2 道波形 s_i 与 s_j 的互相关系数。

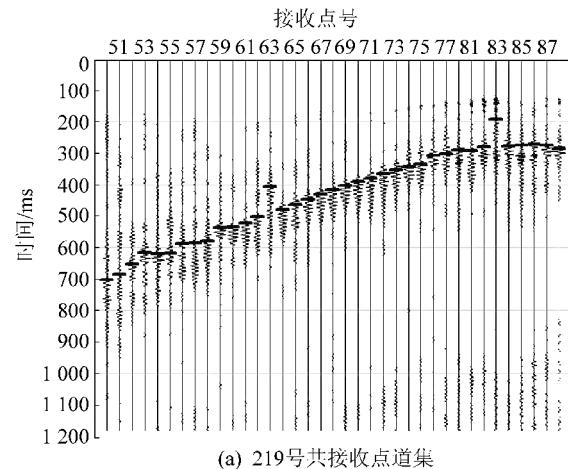
$$R_{ij}(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^L s_i(\tau+t)s_j(t)}{\sqrt{\sum_{t=0}^L s_i(\tau+t)s_i(t)} \sqrt{\sum_{t=0}^L s_j(\tau+t)s_j(t)}} \quad (1)$$

6) 将使得 R_{ij} 为最大时的 τ 记为 τ_{ij} , 则第 i 道槽波到时为

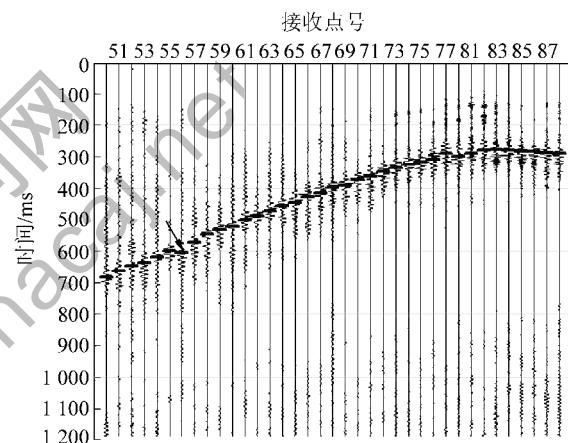
$$T_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_{ij} + t_i \quad (2)$$

用上述方法对图 1 中的槽波数据进行处理,提取出的槽波到时如图 2 中黑色线段所示。可以看出,图 2b 中 221 号检波器对应的共接收点道集上槽波波形的相似性较高,计算出的槽波到时一致性较

好。箭头所指的第 56 炮槽波,计算出的到时晚于相邻炮,与从波形上直接观察的结果一致。



(a) 219号共接收点道集



(b) 221号共接收点道集

图 2 相邻两个接收点的槽波到时

Fig. 2 Arrival time of transmitted in-seam waves from two adjacent receivers

图 2a 中 219 号检波器对应的共接收点道集中 59 炮至 75 炮之间的槽波一致性较好而其他炮上稍差,计算出的槽波到时在这段区域与槽波时距曲线基本一致,而在其他部分则稍乱。第 84 炮计算出的到时过早,从图中可以看出,这是因为这一炮上与其他炮相似的波形确实出现的比较早。造成这一现象的原因可能是这一炮数据受到了其他相干噪声的影响,造成了波形的扰动,使得算法将干扰波识别为槽波,从而造成了计算结果的误差。可通过将时窗的宽度调小或对识别出的到时结果进行中值滤波减少噪声对算法的影响。

2 地质异常体的探测实例

为了验证所提方法的有效性,将算法应用于淮北矿业集团青东煤矿 1034 工作面的断层探测中。

此次探测工作面长 550 m, 宽 150 m, 工作面主采 10 号煤层, 平均煤厚 3.6 m, 顶板为砂岩。巷道揭露多条落差大于 5 m 的断层。其中 BF44 断层为主要断层, 在工作面以外最大落差为 20 m, 延伸长度大于 700 m。

为了查明工作面内断层分布情况, 采用透射槽波法进行探测。在工作面的上下巷以及开切眼共布置检波点 219 道, 道间距 10 m; 炮孔 84 个, 孔深 3 m, 孔间距 20 m。仪器采用 YTZ3 型矿井无缆自记式地震仪^[18-19], 采样率为 0.25 ms。检波器由 60 Hz 纵波速度检波器加工而成。

采集所得的数据中第 60 号共接收点道集如图 3a 所示。

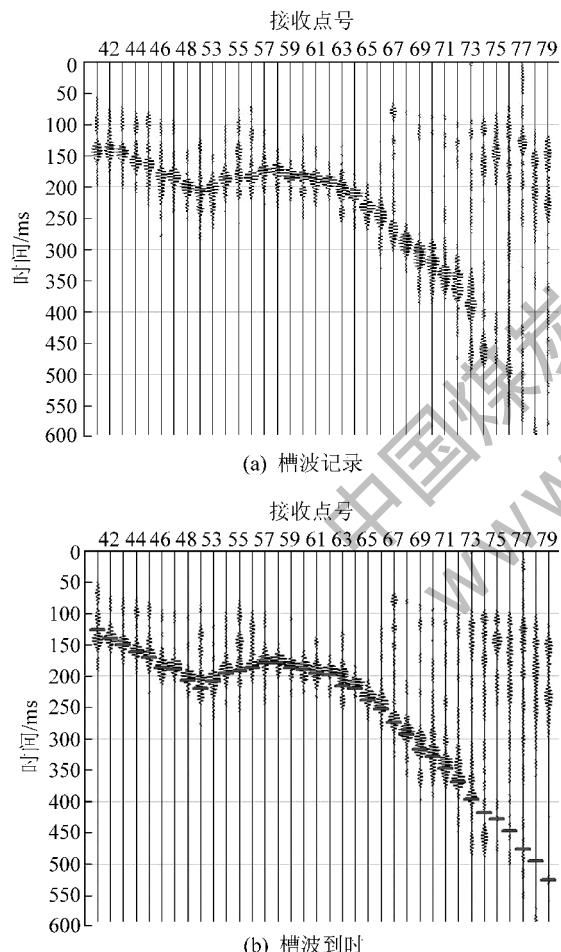


图 3 60 号接收点的槽波记录与到时

Fig. 3 Schematic diagram and arrival time of No. 60 receiver

可以看出槽波波形的一致性较好, 采用基于波形相似度的槽波到时估计算法获得的槽波到时如图 3b 中的红色线段所示。其中第 74—79 炮由于断层的遮挡导致槽波能量较弱, 但算法仍能识别出槽波到时。此区域内槽波到时略晚于正常区域。

逐个处理共接收点道集之后, 在估算出每一道的槽波到时后, 采用速度 CT 成像法^[20-22]对 1034 工作面进行成像, 结果如图 4 所示。

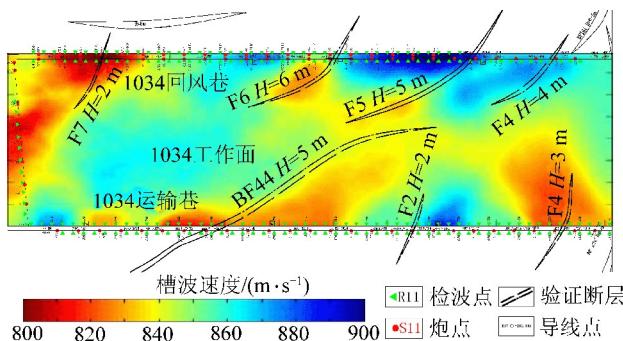


图 4 1034 工作面速度 CT 结果与实际断层对比

Fig. 4 Contrasting of actual faults with velocity

CT of No.1034 mining face

1034 工作面回采揭露的断层在图 4 中以黑色线条表示。成像结果中红色区域速度低, 蓝色区域速度高。可以看出, 揭露的主要断层附近都存在低速异常条带, 说明断层附近的煤层存在槽波速度降低的现象, 这与图 3b 中反映出的现象一致。造成这一现象的原因是由于断层区域常常伴随着煤层破碎。这些区域内煤层弹性常数的改变降低了槽波传播的速度。因此, 成像结果中低速区所形成的条带一般与断层对应。图 4 中, BF44 断层附近有明显的低速条带, 且低速条带的延伸方向与总体形态与实际揭露 BF44 断层基本一致, 另外, 1034 工作面内的其它断层也与成像结果能够较好地对应。断层 F1 与 F7 由于分别位于成像区的一角, 射线密度的不足影响了其成像精度。尽管如此, 仍能大致判断出断层的延伸情况。总体而言, 从回采揭露的情况看, 断层的成像结果能够较好得与实际揭露吻合。

3 结 论

1) 透射槽波探测中由于检波器安装方式及锚杆固有频率的影响, 各接收点之间波形差异较大, 传统拾取到时的方法受其影响, 不能直接应用于井下透射槽波探测中。然而在共接收点道集上, 所有道的地震波相当于与同一个子波相卷积, 起到了放大槽波子波的作用, 槽波波列在相邻道之间具有很高的相似性, 使得槽波到时更容易拾取。基于共接收点道集波形相似度的槽波到时估计算法正是利用这一现象, 在共接收点道集上依据槽波 Airy 相频率和速度截取子波, 并求出各道与其他道子波的最大互相关系数所对应的时延, 则平均时延可以作为该道

槽波的到时。

2)采煤工作面内的异常构造能够影响透射槽波速度。断层对槽波速度的影响较为复杂,就青东煤矿1034工作面而言,槽波速度在断层区域内表现为低于正常值。从接收到的透射槽波中拾取出槽波的初至时间,并由此利用速度CT算法对工作面内槽波速度进行成像,成像结果中低速条带对应断层所在位置。

3)从实际工程应用的例子可以看出,基于共接收点道集波形相似度的到时估计方法能够较准确地提取出槽波到时,对断层引起的槽波速度异常现象有较好的反映。根据提取出的到时进行速度CT成像,成像结果中的低速条带经回采验证与实际揭露断层一致。

参考文献(References):

- [1] 王伟,高星,李松营,等.槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用:以河南义马矿区为例[J].地球物理学报,2012,55(3):1054-1062.
WANG Wei, GAO Xing, LI Songying, et al. Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: an example from Henan Yima Mining Area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 1054-1062.
- [2] 王季,李刚,吴国庆,等.采煤工作面地质异常体透射槽波探测技术[J].煤炭科学技术,2016,44(6):159-163,193.
WANG Ji, LI Gang, WU Guoqing, et al. Transmitted channel wave detecting technology of geologic anomalous body in coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (6): 159 - 163, 193.
- [3] 姬广忠,程建远,胡继武,等.槽波衰减系数成像方法及其应用[J].煤炭学报,2014,39(S2):471-475.
JI Guangzhong, Cheng Jianyuan, Hu Jiwu, et al. In-seam wave imaging using attenuation coefficient: method and application [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (S2): 471-475.
- [4] 王季,李建政,吴海,等.透射槽波能量衰减系数成像与陷落柱探测[J].煤炭科学技术,2015,43(1):108-111.
WANG Ji, LI Jianzheng, WU Hai, et al. Tomography of transmission in-seam wave attenuation coefficient and detection of collapse columns[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43 (1): 108-111.
- [5] 任亚平.槽波地震勘探在煤矿大型工作面的应用[J].煤炭地质与勘探,2015,43(3):102-104.
REN Yaping. Application of ISS in supper large coal face [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43 (3): 102-104.
- [6] 申青春,杨参参,王康,等.透射法槽波地震勘探技术在工作面探测中的应用研究[J].中州煤炭,2015(7):105-107,110.
SHEN Qingchun, YANG Cancan, WANG Kang, et al. Application study on in-seam seismic survey using transmission method on exploration of working face [J]. Zhongzhou Coal, 2015 (7): 105 - 107, 110.
- [7] 李刚.煤矿井下工作面内隐伏断层透射槽波探测技术[J].煤田地质与勘探,2016,44(5):142-145.
LI Gang. Detection technique of transmission in-seam wave for concealed fault in working face of underground coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44 (5): 142-145.
- [8] MASON I M, BUCHANAN D J, Booer A K. Channel wave mapping of coal seams in the United Kingdom [J]. Geophysics, 1980, 45 (7): 1131-1143.
- [9] MASON I M. Algebraic reconstruction of a two-dimensional velocity in homogeneity in the high Hazles seam of Thoresby Colliery [J]. Geophysics, 1981, 46 (3): 298-308.
- [10] Parra J O, Zook B J. Transmission and detection of guided seismic waves in attenuating media[J]. Geophysics, 1998, 63 (4): 1190-1199.
- [11] YANCEY D J, IMHOFF M G, FEDDOCK J E, et al. Analysis and application of coal-seam seismic waves for detecting abandoned mines[J]. Geophysics, 2007, 72 (5): M7-M15.
- [12] 杜艳艳,冯磊,余为维,等.透射法地震勘探中槽波几何运动学特征[J].地球物理学进展,2017,32(5):1978-1983.
DU Yanyan, FENG Lei, YU Weiwei, et al. Geometric kinematic characteristics of the channel wave in transmission seismic exploration [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32 (5): 1978-1983.
- [13] 姬广忠,程建远,朱培民,等.煤矿井下槽波三维数值模拟及频散分析[J].地球物理学报,2012,55(2):645-654.
JI Guangzhong, CHEN Jianyuan, ZHU Peimin, et al. 3-D numerical simulation and dispersion analysis of in-seam wave in underground coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (2): 645-654.
- [14] KRAJEWSKI P, DRESEN L, SCHOTT W, et al. Studies of roadway modes in a coal seam by dispersion and polarization analysis: a case history [J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35 (7): 767-786.
- [15] 程建远,姬广忠,朱培民,等.典型含煤模型Love型槽波的频散特征分析[J].煤炭学报,2012,37(1):68-72.
CHEN Jianyuan, JI Guangzhong, ZHU Peimin, et al. Love channel-waves dispersion characteristic analysis of typical coal models [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (1): 68-72.
- [16] 曹俊海,顾汉明,尚新民.基于局部相关谱约束的多道匹配追踪算法识别微地震信号[J].石油地球物理勘探,2017,52(4):704-714.
CAO Junhai, GU Hanming, SHANG Xinmin. Microseismic signal identification with multichannel matching pursuit based on local coherence spectrum constraint [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52 (4): 704-714.
- [17] 林凡生,邹志辉.基于波形相似性的远震初至拾取方法进展与对比研究[J].地球物理学进展,2017,32(4):1597-1606.
LIN Fansheng, ZOU Zhihui. Review and comparative study of waveform-similarity based teleseismic first-arrival picking methods [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32 (4): 1597-1606.

[17] KREY T C. Channel waves as a tool of applied geophysics in coal

(下转第230页)

- and moisture-absorbing property of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 55-59.
- [7] 王青松, 金龙哲, 孙金华. 煤层注水过程分析和煤体润湿机理研究[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(1): 70-73.
WANG Qingsong, JIN Longzhe, SUN Jinhua. Research on coal seam water infusion course and coalbody wetness mechanism [J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(1): 70-73.
- [8] 郭明涛, 唐跃刚, 苏雪峰, 等. 高压注水对煤孔隙结构影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(3): 133-140.
GUO Mingtao, TANG Yuegang, SU Xuefeng, et al. Experimental study on influence of high pressure water injection on coal pore structure [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (3): 133-140.
- [9] 金龙哲, 欧盛南. 煤层注水中粘尘棒溶液对接触角的影响[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 264-267.
JIN Longzhe, OU Shengnan. Effect of dust-sticking bar's solution on the contact angle of coal seam in infusion [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3): 264-267.
- [10] 聂百胜, 何学秋, 冯志华, 等. 磁化水在煤层注水中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2007, 26(1): 1-3.
NIE Baisheng, HE Xueqiu, FENG Zhihua, et al. Application of magnetized water in coal seam water infusion [J]. Journal of Liaoning Technical University; Natural Science, 2007, 26(1): 1-3.
- [11] 程燕, 蒋仲安, 陈仲秋, 等. 煤层注水中添加表面活性剂的研究[J]. 煤矿安全, 2006, 37(3): 9-12.
CHENG Yan, JIANG Zhong'an, CHEN Zhongqiu, et al. Study of adding surfactant to seam water injection [J]. Safety in Coal Mines, 2006, 37 (3): 9-12.
- [12] 徐厚学. 低渗透煤层顺层孔割缝增透注水抑尘技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 110-114.
XU Houxue. Study on bedding drilling slotting permeability improvement, water injection and dust control technology of low permeability seam [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 110-114.
- [13] 董伟, 张晓明, 陈绍杰, 等. 可拓论与信息熵在煤层注水效果优化中的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(10): 121-126.
DONG Wei, ZHANG Xiaoming, CHEN Shaojie, et al. Application of extenics theory and information entropy to optimization of water infusion in coal seam [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26 (10) : 121-126.
- [14] 刘令生, 林梦露, 蒋仲安, 等. 掘进工作面煤层注水湿润半径的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 28-31.
LIU Lingsheng, LIN Menglu, JIANG Zhong'an, et al. Numerical simulation of coal seam water injection wetting radius in driving face [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(1): 28-31.

(上接第166页)

- mining [J]. Geophysics, 1962, 28(5): 701-714.
- [18] 吴海. 基于ARM技术的矿井自记式地震仪[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 81-84.
WU Hai. Development of self-recording seismograph based on ARM technique [J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41 (4): 81-84.
- [19] 吴海. 防爆无缆遥测地震仪在煤矿槽波勘探中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(8): 86-89.
WU Hai. Application of explosion-proof telemetry seismograph used in channel wave exploration [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(8): 86-89.

- [20] LU W K, YIN F F. Adaptive algebraic reconstruction technique [J]. Medical Physics, 2004, 31(12): 3222-3230.
- [21] TRAMPERT J, LEVEQUE J J. Simultaneous iterative reconstruction technique: physical interpretation based on the generalized least squares solution [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(8): 12553-12559.
- [22] 胡国泽, 滕吉文, 皮娇龙, 等. 井下槽波地震勘探: 预防煤矿灾害的一种地球物理方法[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 0439-0451.
HU Guoze, TENG Jiwen, PI Jiaolong, et al. In-seam seismic exploration techniques—a geophysical method predictting coal-mine disaster [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 0439-0451.