

文章编号: 1001-1986(2019)03-0010-05

# 基于孔间地震细分动态探测的透明工作面方法

陆 斌

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 透明工作面是煤矿智能开采的重要组成部分, 为智能开采提供工作面的详细地质构造信息, 提出一种基于孔间地震密集动态探测的透明工作面方法, 能够实现工作面的渐进式精细探测。该方法是以采煤机为震源的随采地震方法的进一步发展, 主要利用平行于切眼的一系列水平孔对工作面进行细分探测, 随着采煤工作的逐渐推进, 利用孔间地震方法对细分区域进行精细成像。与已有的随采地震方法比较, 本方法具有明显的优点。首先, 射线覆盖更加均匀且无盲区。第二, 探测区域被细分所以探测精度更高。第三, 因为利用地震干涉的“虚”震源方法能得到高信噪比的单炮, 可进一步提高探测精度。该方法能够适应智能开采透明工作面的目标要求, 有望成为智能开采的重要组成部分。

**关键词:** 透明工作面; 孔间地震; 智能开采; 噪声成像; 随采地震

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.03.002



## Method of transparent working face based on dynamic detection of cross hole seismic subdivision

LU Bin

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

**Abstract:** Transparent working surface is an important part of intelligent coal mining. It provides detailed geological structure information of working face for intelligent coal mining. This paper proposes a working surface exploration method based on segmented and dynamic cross-hole seismic, which can realize progressive fine detection of coal working face. The method is a new development with seismic while mining, which is using the coal cutter as seismic source. The main idea is to image the working face segmented by deploying some detectors in a series of horizontal holes parallel to the long wall. The method performs fine imaging on the subdivided area. Compared with the existing seismic while mining, this method has obvious advantages. Firstly, the ray coverage is more uniform without blind zone. Secondly, the detection area is subdivided, so the detection accuracy is higher. The “virtual” source method, seismic interferometry, can be used to obtain shot gathers with high SNR, which can further improve the detection accuracy. The study believes that this method can adapt to the target requirements of transparent working face, and it is expected to become an important part of intelligent mining.

**Keywords:** transparent working face; cross-hole seismic; intelligent mining; noise imaging; seismic while mining

随着人类社会进入智能化、自动化时代, 矿山的智能化、自动化、无人化开采近年也逐渐成为行业的研究热点<sup>[1-3]</sup>。要实现煤矿的智能自动化开采, 首先要实现工作面地质构造的精细探测与描述, 该目标被形象地称为“透明工作面”。“透明工作面”包

括巷道内的煤岩层测量与描述、工作面钻探<sup>[4]</sup>和工作面物探等方法。工作面巷道煤岩层描述和工作面钻探的优点是它们的结果具有很强的直接性和确定性, 缺点是揭示的工作面范围比较有限。工作面物探和前两种方法相比是一种全工作面探测方法, 它

收稿日期: 2018-12-30

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC0807804); 贵州省科技重大专项项目([2018]3003-1); 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2018XAYZD02)

**Foundation item:** National Key R&D Program of China(2018YFC0807804); Guizhou Science and Technology Major Projects([2018]3003-1); Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2018XAYZD02)

作者简介: 陆斌, 1973 年生, 男, 甘肃榆中人, 博士, 副研究员, 从事煤矿井下地震勘探方面的研究工作。E-mail: lubin2000@163.com

引用格式: 陆斌. 基于孔间地震细分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.

的缺点是探测结果的不确定性比较差。3 种方法中, 工作面物探的研究改进空间最大, 目前逐渐成为一个研究热点。

透明工作面的物探方法, 除了地面三维地震、工作面电磁波透视、工作面槽波层析成像等传统地震勘探方法外, 利用采煤机等被动震源的随采地震方法近年来取得了快速进展。不过虽然随采地震近几年逐渐成为研究热点, 但利用煤矿井下机械噪声作为震源的思想早在 1980 年就被槽波专家 Buchanan 提出, 主要是利用采煤机的切割片作为震源<sup>[5]</sup>。前美国矿山局在 20 世纪 90 年代开展了此类研究, 目的是预测前方煤层的应力条件<sup>[6-7]</sup>。2009 年, 澳大利亚的 Luo Xun 等给出了一个利用采煤机信号对煤层顶板速度层析成像的实例, 但由于皮带巷的噪声太强, 他们只对切眼和回风巷围成的三角形区域做出了图像<sup>[8-9]</sup>。国内从 2010 年开始, 中国煤炭科工集团有限公司开展了随采地震研究, 目前已取得了一些进展, 同时也发现了一些问题: 在煤层比较松软条件下, 采煤机的地震能量可能不够; 有明显的射线覆盖盲区, 只能探测到从切眼到巷道的直线连接区域; 地震射线的交角比较小, 反演问题的奇异性比较高, 探测结果的精度不够<sup>[10-14]</sup>。

本文提出一种新的随采地震探测方法, 主要利用一系列孔间地震对工作面进行逐次细分探测, 很好地克服了传统随采地震的上述缺点, 有望得到高精度的工作面地质构造图像。

## 1 传统随采地震透明工作面方法

传统随采地震数据采集方法如图 1 所示, 地震检波器主要安置在两边巷道内(考虑到皮带运输机的噪声, 实际上多只用回风巷)。采煤机在采煤作业时, 截割滚筒能连续击发出地震波能量, 这些地震波穿过工作面被巷道内的地震检波器接收, 根据地震波的到时或能量的差异就能够对射线穿过区域做地震层析成像。图 1 中, p1 和 p2 是参考道, 用来记录震源信号, 并与其他道做互相关得到类似脉冲震源的炮集<sup>[11]</sup>。

研究发现, 采煤机是一个持续移动的震源, 因为目前的地震层析成像方法都是基于离散震源的, 所以要先对其进行离散化。比如, 对于一个 300 m 宽的工作面, 可以将采煤机切割一趟的能量离散化为 300 个震源, 也就是说采煤机在每个 1 m 的移动范围内被近似为 1 炮。这样就产生一个问题, 如果采煤机行走速度很快, 比如 30 s/m, 那么每炮最多只能积累 30 s 的截割能量, 在煤质疏松的条件下, 能量可能不够。实验研究发现, 在中原地区的构造

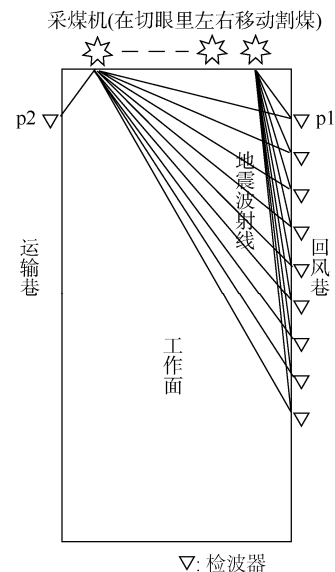


图 1 传统随采地震的数据采集方法

Fig.1 Data acquisition method for traditional seismic while mining

煤工作面上, 随采地震的能量不足以得到高信噪比的槽波, 只有横波的信噪比能达到成像要求。这是传统随采地震方法的第 1 个缺点。

考虑到运输巷的强噪声, 地震检波器只安装在回风巷内, 通常地震射线只能覆盖切眼到回风巷的三角形区域, 探测盲区比较明显。另外, 距离切眼比较远的检波器的数据信噪比快速下降, 高信噪比地震射线覆盖的区域进一步缩小。这是传统随采地震方法的第 2 个缺点。

从图 1 看出, 采煤机处于不同位置时会得到不同的炮集, 不过各个炮集的地震射线彼此之间的交角不会很大。最大射线夹角是采煤机分别在机头和机尾时的射线夹角, 检波器距离切眼越远, 夹角越小。夹角越小, 反问题的奇异性越高, 反演结果的精度越低。

## 2 孔间地震细分动态探测透明工作面方法

本文提出的工作面孔间地震细分动态探测, 是一系列孔间地震的组合, 如图 2 所示<sup>[15]</sup>。

图 2 中, 每一对深孔(比如孔 1-孔 2, 孔 2-孔 3, 孔 3-孔 4, 以此类推)组成一组孔间地震探测排列。实际施工时可以随着开采的推进, 先做孔 1-孔 2 间的探测, 再做孔 2-孔 3、孔 3-孔 4 间的, 随采逐渐推进, 既照顾到了细分区域精细探测的要求, 也节省了仪器。另外作为补充, 两边巷道里也安装了检波器, 目的是形成更好的射线覆盖。这些巷道检波器安装在深约 2 m 的孔中, 孔口用吸波材料封堵以隔绝巷道内的机械噪声。

本方法有如下明显优点:

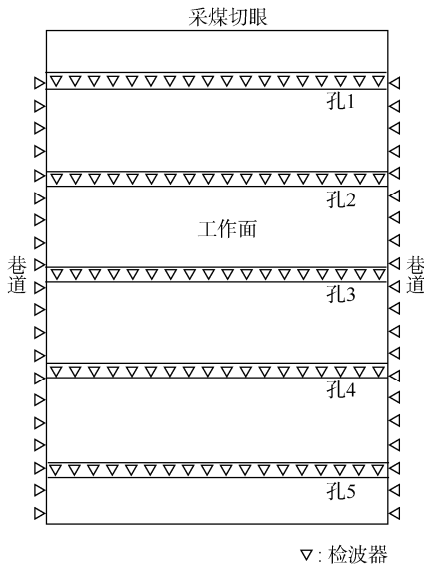


图 2 孔间地震细分动态探测检波器分布

Fig.2 Detector distribution for segmented and dynamic cross-hole seismic

a. 提供了一种将工作面整体探测转化为一系列细分区域进行精细探测的方法，探测精度远高于传统方法，非常适合解决智能开采的精细智能探测问题。

b. 利用平行于切眼的钻孔布设检波器串，和通常在巷道内接收地震信号的随采地震方法比起来，得到的是检波器之间的“虚”炮集(见图 3)，“虚”震源距离探测目标更近，探测精度更高；另外，“虚”炮点和接收点都固定不变，非常适合探测介质的细微变化。以黑色填充三角形表示虚炮点，实际上每一组靠近切眼的检波器都是虚炮点，以孔 1—孔 2 组为例，孔 1 中的每一个检波器都是“虚”震源点，孔 2 中的检波器为接收点。

c. 地震射线的交叉覆盖更加合理，从图 3 的虚炮射线能明显发现，地震射线的覆盖密度和射线夹角都能满足层析成像的要求。

前面的介绍中提到的“虚”震源、“虚”炮点等概念涉及到一项新技术——多维反褶积干涉(Multidimensional Deconvolution, MDD), MDD 是近年兴起的地震干涉方法的一项新成果，适合处理被动震源分布不均匀,用一般地震干涉方法不能处理的情况,是本方法的关键技术。

### 3 多维反褶积干涉(MDD)

地震干涉方法是将机械噪声转化为有用地震信号的关键步骤,也直接制约着噪声成像技术的发展。近几年,地震干涉获得了快速发展,除了勘探地震学方面的应用之外,该技术还被广泛用于超声波、太阳地震学、全球地震学、海洋声学等方面,成为

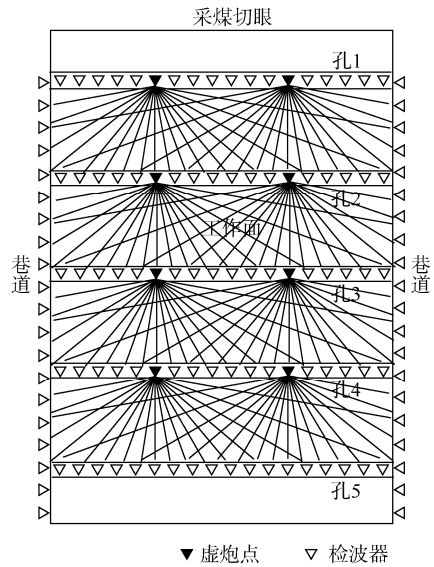


图 3 孔间地震细分动态探测的波场分布

Fig.3 Wave field distribution for segmented and dynamic cross-hole seismic

一个研究热点<sup>[16]</sup>。干涉算法由互相关干涉、反褶积干涉等发展到多维反褶积干涉方法。目前,MDD 干涉方法<sup>[17]</sup>是一个研究前沿,其最大优点是对震源的分布具有较好的适应性,不需要震源的位置和谱信息,因而大大扩展了地震干涉的应用范围<sup>[18-19]</sup>。MDD 干涉已成功应用于环境噪声成像<sup>[20]</sup>。

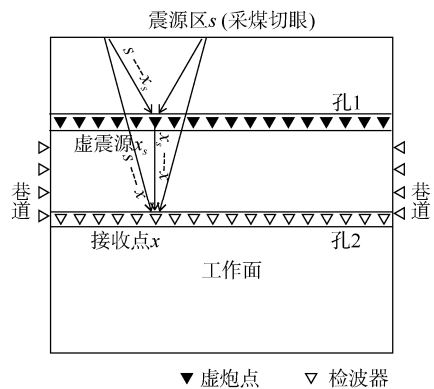


图 4 孔间地震的 MDD 波场关系

Fig.4 Wave field relationship for MDD of segmented and dynamic cross-hole seismic

图 4 给出了 MDD 的波场关系,切眼是震源区  $s$ , 孔 1 中的检波器是虚炮点  $x_s$ , 孔 2 中的检波器是接收点。Green 函数表达的是地震波从空间某一点传播到另外一点的传播效应。比如  $G(x, s, t)$  就表达了 1 个震动脉冲从震源  $s$  到接收点  $x$  的传播效应, 其中的  $t$  表示时间。Green 函数与震源子波的褶积表示该子波被传播的结果。惠更斯原理认为, 波阵面上的每一点都可以视为发射子波的波源, 在其后的任一时刻, 这些子波的包迹就是新的波阵面。惠更斯原理体现在这里就可以表述为, 震源区某一点  $s$  到某

一接收点  $x$  的 Green 函数  $G(x, s, t)$ , 等于震源  $s$  发出的入射波在孔 1 内各个点  $x_s$  上激起的波源传播到接收点  $x$  处的综合效应, 用方程表示为

$$G(x, s, t) = \int \bar{G}_d(x, x_s, t) * G^{in}(x_s, s, t) dx_s \quad (1)$$

式(1)中的积分表达的就是综合效应, 被积函数是  $x_s$  某一点的次级波源  $G^{in}(x_s, s, t)$  与 Green 函数  $\bar{G}_d(x, x_s, t)$  的褶积, 褶积意味着次级波源依 Green 函数传播到  $x$  处的震动。  $G^{in}(x_s, s, t)$  的上标 in 表示该次级波源是震源  $s$  到点  $x_s$  上 Green 函数中的入射波部分。

Green 函数与子波  $w^{(i)}(t)$  褶积, 就能得到相应的波的位移,

$$u^{in}(x_s, s^{(i)}, t) = G^{in}(x_s, s^{(i)}, t) * w^{(i)}(t) \quad (2)$$

$$u(x, s^{(i)}, t) = G(x, s^{(i)}, t) * w^{(i)}(t) \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1), 得

$$u(x, s, t) = \oint_{S_{孔1}} \bar{G}_d(x, x_s, t) * u^{in}(x_s, s, t) dx_s \quad (4)$$

$u^{in}(x_s, s^{(i)}, t)$  表示某个震源点  $s^{(i)}$  到某个特定  $x_s$  (被标记为  $x_{s_0}$ ) 的入射波, 用该式在式(4)两边做互相关, 得到

$$C(x, x_{s_0}, t) = \oint_{S_{孔1}} \bar{G}_d(x, x_s, t) * \Gamma(x_s, x_{s_0}, t) dx_s \quad (5)$$

式(5)中,

$$\Gamma(x_s, x_{s_0}, t) = \sum_i u^{in}(x_s, s^{(i)}, t) * u^{in}(x_{s_0}, s^{(i)}, -t) \quad (6)$$

$$C(x, x_{s_0}, t) = \sum_i u(x, s^{(i)}, t) * u^{in}(x_{s_0}, s^{(i)}, -t) \quad (7)$$

对式(5)的积分进行离散化, 得

$$C(x, x_{s_0}, t) = \sum_k \bar{G}_d(x, x_s^{(k)}, t) * \Gamma(x_s^{(k)}, x_{s_0}, t) \quad (8)$$

$x_s^{(k)}$  取所有孔 1 中的虚震源。

在频率域, 褶积关系变为相乘:

$$\hat{C}(x, x_{s_0}, w) = \sum_k \hat{\bar{G}}_d(x, x_s^{(k)}, w) \hat{\Gamma}(x_s^{(k)}, x_{s_0}, w) \quad (9)$$

利用加权最小平方解此方程组<sup>[17]</sup>, 就能得到需要的 Green 函数了, 这样得到的 Green 函数和简单的互相关干涉相比, 不会产生假同相轴或相位混叠现象。

#### 4 有效信号提取的数值模拟研究

假设切眼宽带为 300 m, 切眼到第 1 个孔的距离为 300 m, 第 1 和第 2 个孔间的距离为 300 m, 波速 2 000 m/s, 采煤机的机械噪声长度为 100 000 个采样

点, 震源函数用随机噪声代替。切眼的采煤机震源被离散为 31 个, 每个孔内的检波器也设为 31 个。

以孔 1 中各个检波器的模拟记录为参考信号, 与孔 2 中检波器的模拟地震记录做互相关干涉处理, 得到以各个参考信号为“虚”震源的“虚”炮集。图 5 是以孔 1 中最中心的检波器(第 16 道)为“虚”震源的“虚”炮集波形图。式(8)中的  $C(x, x_{s_0}^{(l)}, t)$  就是这个互相关“虚”炮集。从直达波的波形上看, 有明显的混叠现象, 尤其在弧顶部位最严重。互相关干涉要求震源区均匀环绕数据采集系统, 在煤矿工作面, 震源区是切眼, 只处在数据采集系统的一边, 因而出现了子波的混叠。

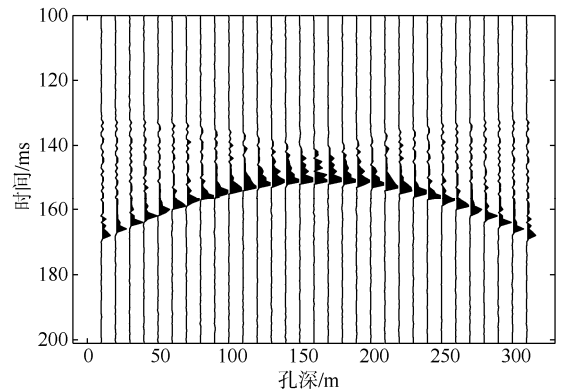


图 5 互相关干涉的“虚”炮集

Fig.5 “Virtual” shot gather of cross-correlation interference

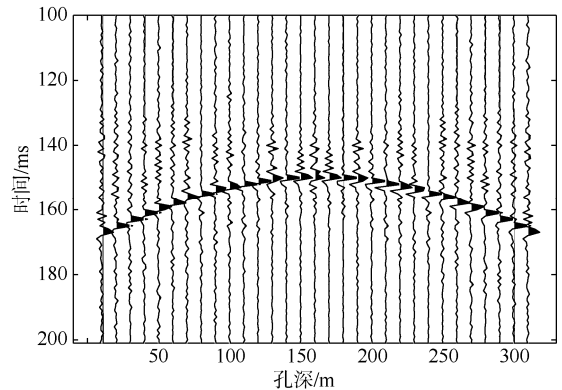


图 6 MDD 干涉的“虚”炮集

Fig.6 “Virtual” shot gather of MDD interference

利用 MDD 对互相关干涉炮集进行进一步处理, 就得到式(8)中的  $\bar{G}_d(x, x_s^{(k)}, t)$ , 也就是孔间检波器对之间的 Green 函数。以孔 1 中最中心的检波器(第 16 道)为“虚”震源的一组 Green 函数如图 6 所示, 子波的点扩散函数已被消除, 同相轴变得很清楚, 不过噪声有所增强。

得到孔间检波器对之间的 Green 函数后, 利用层析成像算法就能非常容易地得到孔间的地质构造

图像。对于实际采集的数据，信噪比的高低往往决定了最终成像结果的精度。所幸的是，“虚”震源方法天然具有能量叠加、提高信噪比的优势。采煤机每切一刀都能得到一次虚炮集，把切了许多刀的虚炮集进行叠加，就能有效提高信噪比。以此数值模拟的模型为例，在采煤切眼推进到第 1 个孔之前的 300 m 范围内，所有的采煤激发能量都可以被积累起来形成高信噪比炮集。高信噪比炮集为高精度成像结果提供了资料保证。

### 5 结论

a. 利用孔间地震对工作面进行细分动态探测，能够近距离精确探测，非常适应智能开采对透明工作面的要求。

b. 孔间地震细分随采地震探测与传统的全工作面随采地震探测相比，探测范围更全面，反演问题的适定性更强，探测精度更高。

c. 多维反褶积干涉是本方法的关键核心技术，高质量 Green 函数的提取完全依靠此技术。

d. 进一步的研究工作主要在煤岩介质的有限频率层析成像方面，最终形成一套高精度的透明工作面方法。

### 参考文献

[1] 王金华,黄曾华. 中国煤矿智能开采科技创新与发展[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(9): 1-6.  
WANG Jinhua, HUANG Zenghua. Innovation and development of intelligent coal mining science and technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 1-6.

[2] 王国法. 煤矿综采自动化成套技术与装备创新和发展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 1-5.  
WANG Guofa. Innovation and development on automatic completed set technology and equipment of fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 1-5.

[3] 王金华. 我国煤矿开采机械装备及自动化技术新进展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 1-4.  
WANG Jinhua. New progress on China coal mining machinery equipment and automation technology[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 1-4.

[4] DAVID C R, MARK T D, PETER B R, et al. A Practical inertial navigation solution for continuous miner automation[C]. 2012 Coal Operators' Conference, 2012.

[5] 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.

[6] WESTMAN E C, HARAMY K Y, ROCK A D. Seismic tomography for longwall stress analysis[A]. in Proc. 2nd North Am. Rock Mech. Symp., Montreal, QC, Canada, Jun 19-21, 1996.

[7] WESTMAN E C, HEASLEY K A, SWANSON P L, et al. A

correlation between seismic tomography, seismic events and support pressure[A]. in Proc. 38th Rock Mech. Symp., Washington DC, Jul 7-10, 2001.

[8] KING A, LUO X. Methodology for tomographic imaging ahead of mining using the shearer as a seismic source[J]. Geophysics, 2009, 74(2): 1-8.

[9] LUO X, KING A, WERKEN M V. 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

[10] LU B, CHENG J Y, HU J W, et al. Seismic features of vibration induced by mining machines and feasibility to be seismic sources[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2011, 3: 76-85.

[11] 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 Jiwu, et al. Shearer source signal extraction and preliminary application[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2202-2207.

[12] 陆斌. 以随采微震为震源的煤矿工作面透射探测[C]//煤炭安全高效开采地质保障技术及应用. 北京: 煤炭工业出版社, 2014.

[13] 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.

[14] 陆斌. 基于地震干涉的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.

[15] 陆斌,程建远,胡继武,等. 基于检波器细分阵列的煤矿开采地震探测系统及方法: 201810610808 .X.[P]. 2018-10-23.

[16] SCHUSTER G T. Seismic Interferometry[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

[17] WAPENAAR K, VAN DER NEUT J, RUIGROK E. Passive seismic interferometry by multidimensional deconvolution[J]. Geophysics, 2008, 73: 51-56.

[18] MINATO S, MATSUOKA T, TSUJI T, et al. Seismic interferometry using multidimensional deconvolution and cross correlation for crosswell seismic reflection data without borehole sources[J]. Geophysics, 2011, 76(1): SA19-SA34.

[19] WAPENAAR K, RUIGROK E, VAN DER NEUT J, et al. Improved surface-wave retrieval from ambient seismic noise by multi-dimensional deconvolution[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38: L01313.

[20] VAN DALEN K N, MIKESSELL T D, RUIGROK E N, et al. Retrieving surface waves from ambient seismic noise using seismic interferometry by multidimensional deconvolution[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2015, 120: 944-961.