

采煤工作面随采地震探测技术研究进展

——以贵州岩脚矿 12701 工作面为例

王保利,程建远,崔伟雄,王云宏,金丹,张唤兰

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

摘要:随着煤矿从自动化开采向智能化开采发展,煤炭地质保障系统正在迈入精准智能探测新阶段。近十多年来,矿井槽波地震勘探技术在煤矿采掘阶段探测煤层内断层、薄煤带、陷落柱等隐蔽致灾体方面效果显著,但槽波地震探测技术在应用过程中依然存在一些问题:炸药震源应用受限,施工时对煤矿生产活动有一定影响,一致性静态探测无法实现对煤岩动力灾害的监测。随采地震以采煤机作为震源,实现对采煤工作面内静态地质构造高精度探测和开采动力灾害的监测预警,为采煤工作面的地质透明化、开采智能化提供数据支撑。该技术也逐渐成为煤矿井下地震勘探的研究热点。以贵州岩脚煤矿 12701 智能工作面随采地震的试验为例,介绍随采地震在采集系统设备、采集方案、采集软件和处理软件架构设计、数据处理方法和流程等方面的最新研究进展,并讨论分析探测成果。这些成果表明:①从获得的随采地震干涉记录来看,采煤机截割震动作为随采地震的震源是适合的,可以获得高信噪比的虚拟炮集记录;②设计的随采地震采集系统、观测系统、采集处理软件架构和随采地震数据处理流程是合理可行的,能够满足随采地震实时、自动、大数据量等要求,整体运行稳定性良好;③随采地震能够探测采煤工作面的静态构造和应力动态变化,可为未来工作面透明化动态地质建模、回采过程中煤岩动力灾害监测预警提供数据和技术支持。

关键词:随采地震;地震干涉;透明工作面;智能开采;应力监测

中图分类号:P631.4 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2021)S1-0406-08

Research progress of seismic-while-mining detection technology in coal face: An case study in 12701 working face in Guizhou Yanjiao Coal Mine

WANG Baoli, CHENG Jianyuan, CUI Weixiong, WANG Yunhong, JIN Dan, ZHANG Huanlan

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

Abstract: With the development of coal mine from automatic mining to intelligent mining, coal geological support system is entering a new stage of accurate intelligent detection. In recent ten years, the technology of mine trough wave seismic exploration has achieved remarkable results in the detection of hidden disaster causing bodies such as faults, thin coal belts and collapse columns in the coal seam during the coal mining stage. However, there are still some problems in the application process of trough wave seismic detection technology: the application of explosive source is limit-

收稿日期:2020-06-03 修回日期:2021-01-07 责任编辑:韩晋平 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0956
基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(42074175);陕西省自然科学基金研究计划项目(2020JM-714,2020JQ-741)

作者简介:王保利(1981—),男,山西兴县人,副研究员,博士。E-mail:wangbaoli@cctegxian.com

引用格式:王保利,程建远,崔伟雄,等.采煤工作面随采地震探测技术研究进展——以贵州岩脚矿 12701 工作面为例[J].煤炭学报,2021,46(S1):406-413.

WANG Baoli, CHENG Jianyuan, CUI Weixiong, et al. Research progress of seismic-while-mining detection technology in coal face: An case study in 12701 working face in Guizhou Yanjiao Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 406-413.



移动阅读

ed, the construction has a certain impact on coal mine production activities, consistent static detection can not realize the monitoring of coal and rock dynamic disasters. With the shearer as the seismic source, the mining seismic detection technology can realize the high-precision detection of static geological structure and the monitoring and early warning of mining dynamic disasters in the coal mining face, and provide data support for the geological transparency and mining intelligence of the coal mining face. This technology has gradually become the research hotspot of coal mine seismic exploration. Taking the test of mining while seismic detection technology in 12701 intelligent working face of Yanjiao coal mine in Guizhou Province as an example, the latest research progress of mining while seismic technology in acquisition system equipment, acquisition scheme, acquisition software and processing software architecture design, data processing method and processing flowchart are introduced, and the detection results are discussed and analyzed. These results show that: ① According to the interference records obtained, the shearer cutting vibration is suitable as the source of the mining earthquake, which can obtain the virtual shot collection records with high signal-to-noise ratio; ② the designed seismic acquisition system, observation system, acquisition and processing software architecture and seismic data processing flow are reasonable and feasible, which can meet the requirements of real-time, automatic and large amount of data ③ along with the mining earthquake, it can detect the static structure and dynamic stress changes in the working face, and provide data and technical support for the dynamic geological modeling of the future working face and the monitoring and early warning of coal and rock dynamic disasters in the mining process.

Key words: seismic-while-mining; seismic interference; transparent working face; intelligent mining; stress monitoring

近十几年来, 矿井槽波地震勘探技术在煤矿采掘阶段探测煤层内断层^[1-2]、薄煤带^[3-6]、陷落柱^[7]等隐蔽致灾体探测方面效果显著, 且逐渐发展出了透射槽波^[8-9]、反射槽波^[10-12]和超前探测^[13-14]等技术, 并已推广应用到全国大部分矿区。但槽波地震探测技术在应用过程中依然存在一些问题, 如炸药震源应用受限、施工时对煤矿生产活动有一定影响、一致性静态探测无法实现对煤岩动力灾害的监测^[15]。随着煤矿开采逐渐走向智能化、无人化/少人化的生产模式, 煤矿智能化开采对探测精度、动力灾害监测等方面提出了更高的要求, 常规矿井探测技术已无法满足。连续、被动源类地震勘探技术已成为新的研究热点。

以 CLAERBOUT^[16]、SCHUSTER^[17-18]和 WAPENAAR^[19-20]等发展起来的地震干涉技术已被广泛应用于地震勘探^[21-24]。借助于地震干涉技术, 连续、被动类震源函数可转换为常规的脉冲类震源函数, 使得传统的地震数据处理技术可以适用; 多次波^[25-26]、噪音^[27-30]等常规被认为是无用的干扰波也得以被当成有效波进行处理成像。

自 20 世纪 80 年代, BUCHANNAN 等^[30]提出利用采煤机截割煤壁时的震动作为震源的被动源探测思路以来, 国外许多学者对此进行了试验研究: 如 WESTMAN 等^[31]和 LUO 等^[32]对工作面前方顶板应力的探测; ERNEST 等^[33]通过地-孔联合观测的方式对掘进工作面前方老空区的探测; ANDREW^[34]对矿山压力的探测等。尽管由于国外矿山的陆续关闭,

使得以采煤机为震源的探测试验研究逐渐减少, 但这一思路在国内引起许多学者关注, 特别是笔者所在的中煤科工集团西安研究院有限公司物探技术研发团队的重视, 并在近几年取得了一些重要成果, 程建远将以采煤机为震源的采煤工作面探测技术称为随采地震; 之后陆斌等^[35-36]对随采地震的震源特征、波场特征等进行了分析, 并开展了随采地震探测技术的先导性研究, 研究认为采煤机在能量、频谱等方面满足作为勘探地震所需的震源条件; 覃思等^[37]在采煤机附近布设参考道、利用井地联合观测的方式进行了随采地震试验, 与炸药激发的数据对比表明: 随采地震干涉记录与炸药震源激发的记录波场特征相似; 陆斌^[38]通过对 3 种干涉方法的对比研究, 利用贝叶斯反演提出了工作面随采地震层析成像方法, 该方法可有效压缩震源子波, 并获得高精度的波至时间和层析成像结果; 金丹^[39]从采煤机震源模拟的角度, 将采煤机截割时煤壁受力转换为震源函数, 并加载到弹性波动方程中, 利用高阶有限差分进行数值仿真, 模拟的波场显示横波能量明显强于纵波, 且 Y 分量槽波波场发育, 与实际数据中的波场特征一致; 陆斌^[40]提出一种基于孔间地震细分动态探测的透明工作面方法, 能够实现对采煤工作面的渐进式精细探测, 相比于已有方法, 该方法具有射线覆盖均匀且无盲区、地震干涉记录质量好和探测精度高等优点; 覃思等^[41]提出了一种随采地震数据质量的自动量化评估方法, 该方法可以从海量随采地震数据中快速评价数据质量并进行优选, 可大幅缩减数据量, 并改善处理结

果;刘强^[42]针对随采数据中存在的大量的单频噪声和随机噪声,提出了同时衰减这2种噪声的方法,该方法首先利用互相关技术在构建常规炮集记录的同时衰减单频噪声,然后通过小波变换衰减随机和残余单频噪声,模拟和实际数据证实,该方法可在很大程度上提高信号的信噪比;段建华等^[43]以微软基础类库(Microsoft Foundation Classes, MFC)作为开发框架,研发了一套随采地震数据采集软件,实现了随采地震数据安全、高效和实时采集存储的功能,具有运行稳定、操作便捷、便于维护和无人值守等优点;王保利^[44]提出了分层、多任务的随采地震数据处理软件的框架,并利用该框架研发出随采地震实时处理软件(SWM),该软件集数据管理、数据展示、数据处理和成果展示于一体,满足随采地震数据实时、连续及大数据量的需求。

笔者将重点展示随采地震探测技术在贵州众一金彩黔矿业有限公司岩脚煤矿12701智能化综采工作面的实际应用效果。

1 工区概况

岩脚煤矿位于贵州省毕节市织金县少普乡,隶属于贵州众一金彩黔矿业有限公司,该矿区属于高瓦斯矿井,核定生产能力45万t/a,矿井可采煤层共8层,煤层平均厚度1.3m,倾角 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$,采用综合机械化采煤工艺。

试验工作面为该矿井一采区的12701工作面,布置于开采保护层范围区域,层间距15m,巷道断面采用矩形断面,锚网支护,运输巷断面尺寸(宽 \times 高)4.5m \times 2.6m,回风巷断面尺寸(宽 \times 高)4.2m \times 2.6m,工作面走向长度650m,倾斜长度200m,可采煤量24.3万t。该工作面实现了智能化作业、减人增效、地面可视化远程干预型无人综采采煤的目标,已在2018-12-19顺利通过智能化综采工作面验收。

试验之前,利用槽波地震勘探技术对该工作面进行静态构造探测。槽波振幅衰减系数成像结果如图1所示,根据该结果推断:槽波能量低穿透区(红黄色区域)表明煤层受到地质构造等异常因素影响;高穿透区(蓝色区域),说明槽波可以正常穿过,该区域工作面内部构造相对简单,但不排除小断层、裂隙发育。采用槽波速度对工作面内煤层厚度进行反演,得到的煤层厚度如图2所示,工作面内煤层平均厚度为1.4m,薄煤带位于工作面中部及开切眼附近,其中中部变薄区煤层最薄约为0.6m,巷道揭露煤厚最薄约为0.8m,位于开切眼附近。探测结果与工作面两侧巷道揭露吻合。

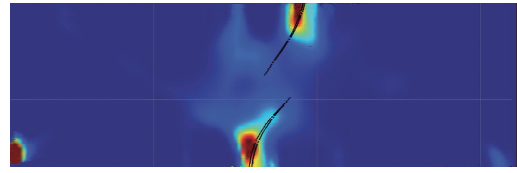


图1 12701工作面槽波振幅衰减系数成像

Fig. 1 In-seam wave attenuation coefficient imaging in working face 12701

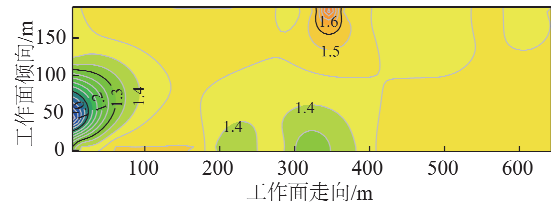


图2 12701工作面槽波探测煤层厚度等值线

Fig. 2 Contour map of coal seam thickness detected by channel wave in working face 12701

2 采集系统和观测系统设计

2.1 采集系统组成

随采地震属于在线式地震监测类技术,这类技术有天然地震监测、微地震、随钻地震以及工程地质灾害监测等。除随采地震外,其他监测类技术均有比较成熟的数据采集处理系统。这些现有系统中,微地震监测系统已经从地面监测发展到矿井中监测,如加拿大ESG系统、南非ISS系统、波兰SOS系统、澳大利亚的IMS系统、英国的ASC系统,国内有北京科技大学的BMS系统、中煤科工集团西安研究院的KJ959系统、徐州福安公司的KJ522等系统。

数据采集采用中煤科工集团研发的KJ959微地震监测系统,该系统包括井上和井下2个分系统,系统结构如图3所示。地面系统主要由地面交互机、数据采集服务器、数据处理服务器、磁盘阵列和监视器组成,主要负责井下采集系统控制、数据采集存储、处理和显示等;井下系统包括交换机、检波器阵列、矿用本安型数据监测分站、隔爆电源、电缆和光缆等,各监测分站通过光缆与地面主机使用IEEE1588协议进行时间同步,并将采集的数据经光纤以太网发送到地面。

2.2 观测系统设计

随采地震监测系统井下网络设备观测系统布置如图4所示,该观测系统采用孔巷联合的方式完成对采煤工作面的细分包围(考虑了槽波探测的2个构造),确保射线覆盖均匀且无盲区,并有助于提高地震干涉记录质量和探测精度^[40]。该观测系统在两侧巷道内道间距为15m,各布设24个接收点。在巷道

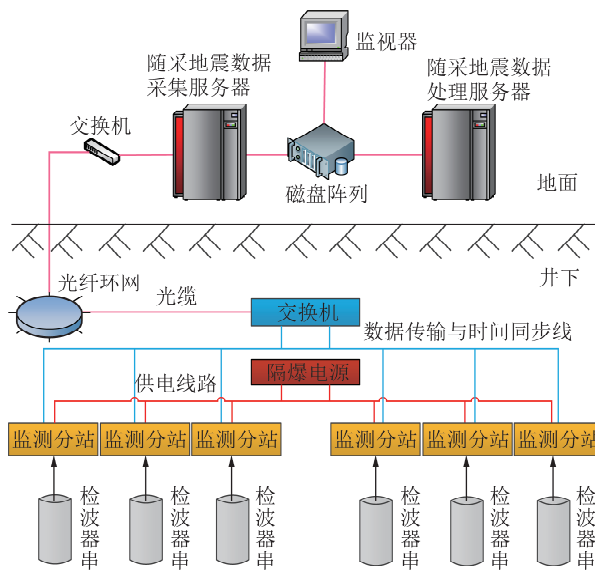


图3 随采地震监测系统体系结构

Fig. 3 System structure of seismic-while-mining detection technology

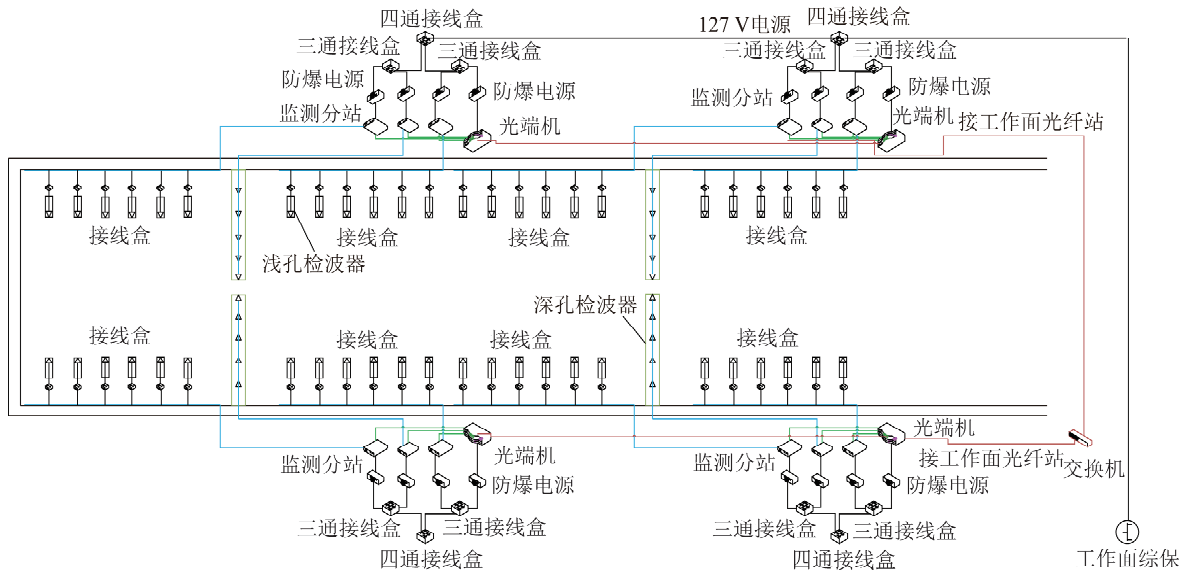


图4 随采地震观测系统

Fig. 4 Geometry of seismic-while-mining detection technology

为提高数据采集效率,软件界面操作、采集、数据预编辑、数据存储、设备状态监听和控制等功能分别采用单独的工作线程,通过数据库实现对数据的共享^[43]。

由于数据种类多,数据量大,为兼顾数据存储量及访问效率,采集软件根据数据生存周期、访问频率、数据量等特点,将数据分为2类:数据量小、访问频次高的采用数据库表方式存储;而对数据量大的监测数据则采用数据库和文件系统结合方式存储。

考虑到在线类系统经常会存在断电、断网等故障,采集软件增加了故障检测和自恢复功能。并对各采集分站增加了独立运行功能,发生故障的采集站会停止采集,而不会影响到其他采集分站。

距开切眼 110 和 266 m 处打对穿孔,并在孔中安置多级推靠式检波器串,每个对穿孔各安置 12 个检波器,间距也为 15 m。总计安装 72 个检波器。随着切眼的推进,切眼附近的检波器将逐个被拆除。考虑到 Y 分量的随采地震波场横波能量明显占优,波场较为单一^[39],同时无论孔中检波器还是巷道检波器,其安置方向均垂直巷道走向,因此不存在二次数据旋转定位问题。

3 数据采集处理软件

3.1 数据采集软件

微地震技术通常采用的观测系统中道间距比较大,而道数较少,所以设备需求量也较少。而随采地震的观测系统以多测线方式布设,道数较多,所需采集站数量相应增多,数据量巨大(约 83 Gb/d^[15])。因此数据采集软件需要考虑数据的采集、存储效率问题。

该采集系统在 12701 工作面经过 1 个多月的联调联试后,稳定监测运行 3 个月,共计采集原始数据达到 5 T,各项指标均满足随采地震探测技术的要求。

3.2 数据处理流程及软件

随采地震硬件设备及采集软件可借用现有的微地震在线监测系统搭建和数据采集,而随采地震的数据处理软件在国内外尚无相关报道。由于随采地震具有实时、连续不间断、大数据量等特点,与传统地震数据处理方式也有一定差别,同时随采数据处理软件需要与采集软件进行配套以实现对数据的共享访问和通信,现有的传统地震数据处理平台无法使

用。这就迫切要求开发一套专用的随采地震数据处理软件。

根据上述特点,笔者所在的研发团队研发了SWM系统^[44],该系统采用了分层体系结构,并针对随采地震数据处理流程(图5)设计了多任务并发执行机制:采集数据监听线程、干涉线程、动态CT成像线程、静态反射波成像线程和主线程等互相独立、并行执行、互不干扰,通过消息机制进行通信,并利用数据库表实现数据共享。

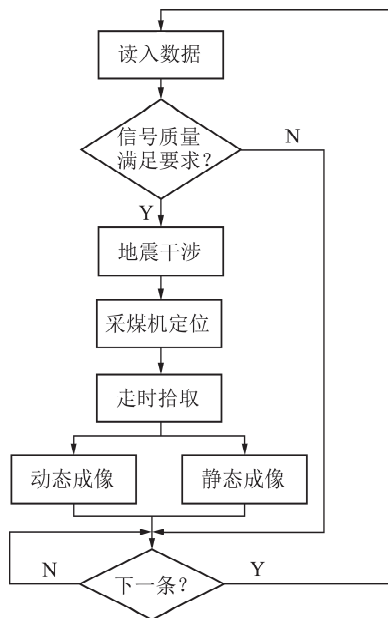


图5 随采地震数据处理流程

Fig. 5 Seismic-while-mining data processing flow chart

在12701工作面运行期间,采集软件每隔2.5 min存储一个数据文件,SWM则在0.5 min内完成对该数据的预处理、干涉、走时拾取、定位和成像等。同时软件会自动根据采煤机的位置判定一刀采煤周期结束(约为2 h),并利用该刀时间内的数据实现对工作面内波传播速度的CT反演(反演时间约为10 s)。静态成像则实时对每时刻数据进行反射波成像,并加权叠加到最终成像剖面中,实现对工作面内静态构造的长时间曝光成像。在运行期间,SWM较好地完成了随采地震数据处理任务,实现了随采地震数据的实时处理要求。

4 探测成果

在3个月的试运行期间,选取了前1个半月的数据进行处理分析和解释(后续数据由于切眼的推进,使得观测系统中接收点数量大量减少,因此结果的可靠性难以保证,因此只选择了48道以上的数据)。

4.1 等效炮集记录

利用随采地震干涉成像方法^[37,39],可将一小段

时间内(根据采煤机移动速度6 m/min,可接收的位置误差1 m,试验中采用10 s为一个时间段)的原始随采连续信号,进行脉冲化处理,得到以采煤机为虚拟震源的等效炮集记录(图6),其中第1道为参考道,前18道接收点位于上巷,中间18道接收点位于下巷,后12道接收点位于深孔中。该记录显示,信噪比较高(估算信噪比约为30 dB,且波形一致性好;由于工作面内煤厚平均1.3 m,其槽波传播距离很短,无法应用,选用信噪比相对较好的体波,将记录频带采用上限为60 Hz的低通滤波,可有效降低其它如槽波等波场的干扰。速度分析得出该波场视速度为2 000 m/s。孔巷检波器联合振幅分析发现,在采煤机左右两侧信号极性相反,因此判断该波场是围岩折射横波,符合采煤机剪切震源特征^[39]。

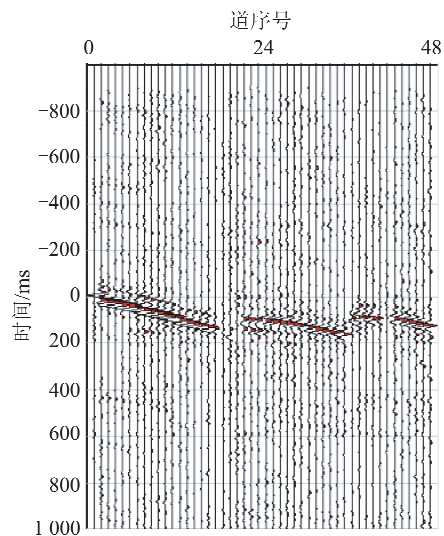


图6 随采地震干涉后的等效炮集记录

Fig. 6 Equivalent shot set record of Seismic-while-mining

4.2 采煤机定位

根据图5随采地震数据处理流程,动态成像和静态成像中都需要给定采煤机震源位置。尽管工作面内速度是动态变化的,导致采煤机位置与速度是耦合关系,但考虑到观测系统实现了对采煤机的半包围,且一小段时间内速度变化量很小,对定位造成的影响可忽略,因此采用互相关走时定位技术可较好地实现对采煤机位置的定位。图7为采煤5刀时间段内采煤机定位结果,纵轴0 m表示位于机巷,200 m表示位于风巷。从图7可分析出采煤机在两侧大约20 m处开始斜切进刀,这与实际进刀位置吻合,同时也说明定位精度在地震法定位精度范围之内。但考虑到采煤机位置对后续成像结果有较大影响,因此定位精度仍需进一步提高。如通过与采煤机控制端进行数据实时通信,从而获得采煤机的真实位置,可很好地解决采煤机定位问题和后续成像精度。

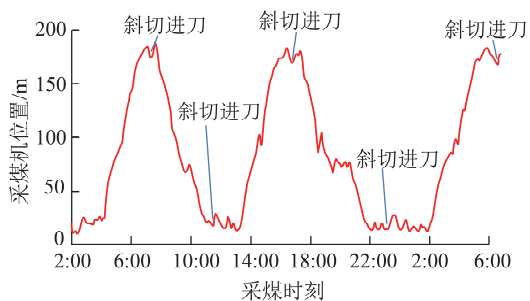


图7 采煤机定位结果

Fig. 7 Localization result of shearer

4.3 动态成像

开切眼处采煤机对煤壁的截割会破坏采煤工作面内煤层原有的应力平衡状态,使得应力产生变化并形成新的平衡状态。采煤的过程就是应力平衡状态不断被打破-重建的过程,在这一过程中应力是随着采煤过程不断变化的。但应力的变化往往是缓慢的,因此短时间内的应力变化量小,对地震波传播速度影响也较小;同时短时间内采煤机移动距离小,射线覆

盖范围也小。综上,可假设采煤机在截割一刀煤的时间范围内煤层内的应力是稳定的,地震波传播速度也是恒定的,每刀煤截割完成后,进行反演,以这种连续多段平稳过程实现对非平稳动态过程的近似。

在 1.5 个月的监测时间段内,共计进尺 110 m(割深为 0.65 m)。有效监测到的 110 刀(网络等故障问题,使得有些刀数据未被采集)数据反演结果如图 8 所示(每隔 10 刀显示一幅图,图中白色区域右边界为开切眼推进的位置)。从反演结果看,共有 3 个应力异常变化区(图中黑线框内)。如图 8(a)所示,最左端异常区内的高应力峰值距离开切眼约 20 m,且随着开切眼推进而向右移动,可能为采煤工作面超前支撑压力;中间的黑线框为此处断层构造引起的构造应力集中(构造位置如图 1);右端方框异常区表现为局部应力集中。从动态变化看,构造引起的应力集中在切眼推进到附近时地震波传播速度逐渐减小,应力逐渐得到释放;超前支撑应力则在切眼推进到构造应力集中区时消失。

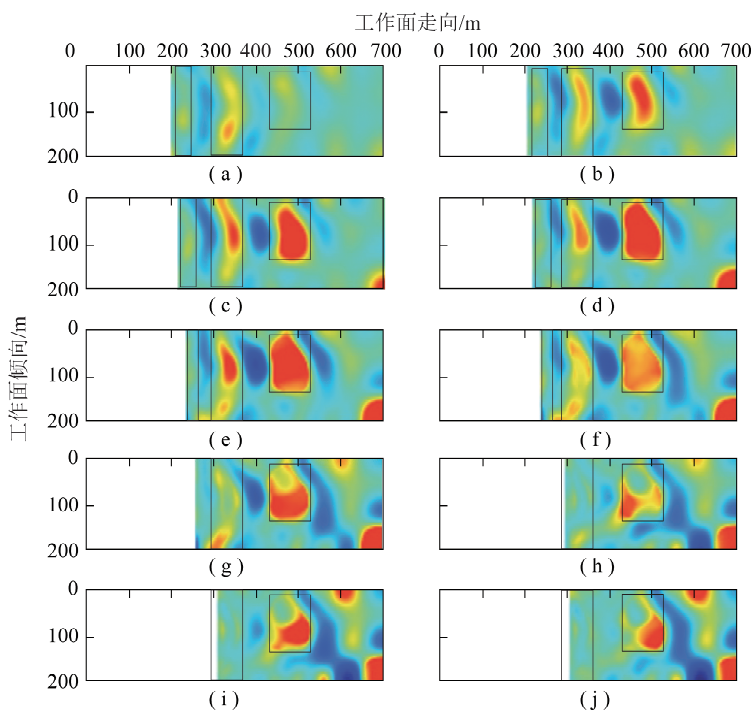


图8 随采地震动态 CT 反演剖面

Fig. 8 Dynamic CT imaging result using seismic-while-mining detection technology

4.4 静态成像

相比于常规炸药震源,采煤机震源的能量很弱,导致反射波能量被噪音湮没难以被有效识别。但由于构造是静态的,因此长时间的“照明”叠加成像,仍能有效探测采煤工作面内的异常体。

选取的一个半月时间段内,共计获得 15 771 个有效等效炮集记录(图 6),利用反射波成像方法^[11]得到如图 9 所示的 12701 工作面内的静态构造。与

图 1 中的槽波探测结果具有较好的一致性,与切眼处揭露的断层位置吻合,但向内延伸细节不清,且分辨率仍然较低。

5 结 论

(1)从获得的随采地震干涉记录来看,采煤机截割震动作为随采地震的震源是适合的,可以获得高信噪比的虚拟炮集记录。

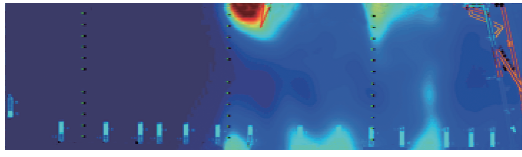


图9 随采地震静态构造成像图

Fig. 9 Static structure imaging result using seismic-while-mining detection technology

(2)设计的随采地震采集系统、观测系统、采集处理软件架构和随采地震数据处理流程是合理可行的,能够满足随采地震实时、自动、大数据量等要求,整体运行稳定性良好。

(3)随采地震能够探测采煤工作面的静态构造和应力动态变化,为未来工作面透明化动态地质建模、回采过程中煤岩动力灾害监测预警提供数据和技术支持。

(4)该试验仅是随采地震的“首秀”,后续将重点针对随采地震数据处理的自动化、反演成像精度、软件的成果可视化以及成果解释应用等方面进行研究。

参考文献(References):

- [1] 张平松,刘盛东. 断层构造在矿井工作面震波CT反演中的特征显现[J]. 煤炭学报,2006,31(1):35-39.
ZHANG Pingsong, LIU Shengdong. Character appearance of fault structure in seismic wave CT inversion form in work faces detecting[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(1):35-39.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] ZHU Mengbo, CHENG Jianyuan, CUI Weixiong, et al. Comprehensive prediction of coal seam thickness by using in-seam seismic surveys and Bayesian kriging[J]. Acta Geophysica,2019,67(3):825-836.
- [5] 冯磊,杜艳艳,李松营,等. 煤层厚度地震槽波层析成像分辨率分析[J]. 地球物理学进展,2018,33(1):197-203.
FENG Lei, DU Yanyan, LI Songying, et al. Resolution analysis of in-seam seismic tomographic inversion for coal thickness[J]. Progress in Geophysics,2018,33(1):197-203.
- [6] 李松营,廉洁,滕吉文,等. 基于槽波透射法的采煤工作面煤厚解释技术[J]. 煤炭学报,2017,42(3):719-725.
LI Songying, LIAN Jie, TENG Jiwen, et al. Interpretation technology of coal seam thickness in mining face by ISS transmission method[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(3):719-725.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王季,何文欣,李刚,等. 基于反射槽波频散相似度的断层成像方法[P]. CN:106019374A,2016-10-12.
- [11] 金丹. 基于时窗能量比的槽波地震散射成像方法[J]. 煤矿安全,2019,50(7):234-237.
JIN Dan. Scattering seismic imaging of channel wave based on time-window energy ratio[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(7):234-237.
- [12] 王勃. 矿井地震全空间极化偏移成像技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2012.
WANG Bo. Study on whole space polarization migration imaging technology of mine seismic exploration[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2010.
- [13] 程久龙,李飞,彭苏萍,等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1742-1750.
CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1742-1750.
- [14] 杨思通,程久龙. 煤巷小构造 Rayleigh 型槽波超前探测数值模拟[J]. 地球物理学报,2012,55(2):655-662.
YANG Sitong, CHENG Jiulong. The method of small structure prediction ahead with rayleigh channel wave in coal roadway and seismic wave field numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geophysics,2012,55(2):655-662.
- [15] 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.
- [16] CLAERBOUT J F. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response[J]. Geophysics,1968,33:264-269.
- [17] SCHUSTER G, YU J, SHENG J, et al. Interferometric/daylight seismic imaging[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,2004,157:838-852
- [18] SCHUSTER T. Seismic Interferometry[M]. New York: Cambridge

- Press, 2009.
- [19] WAPENAARK, DRAGANOV D, THORBECKE J, et al. Theory of acoustic daylight imaging revisited [J]. SEG Expanded Abstracts, 2002; 2269–2272.
- [20] WAPENAARK. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlations [J]. Physical Review Letters, 2005, 93(25): 254301.
- [21] SNIEDER R A, GRET H D, SCALES J. Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity [J]. Science, 2002, 295: 2253–2255.
- [22] 齐诚, 陈棋福, 陈颀. 利用背景噪声进行地震成像的新方法 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 771–777.
 QI Cheng, CHEN Qifu, CHEN Yong. A new method for seismic imaging from ambient seismic noise [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(3): 771–777.
- [23] 何正勤, 丁志峰, 贾辉, 等. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 492–498.
 HE Zhengqin, DING Zhifeng, JIA Hui, et al. To determine the velocity structure of shallow crust with surface wave information in microtremors [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2): 492–498.
- [24] 徐佩芬, 李传金, 凌甦群, 等. 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1923–1930.
 XU Peifen, LI Chuanjin, LING Suqun, et al. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing mmicrotremor survey methods [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(7): 1923–1930.
- [25] SHENG J. Migrating multiples and primaries in CDP data by cross-correlation migration [J]. SEG Expanded Abstracts, 2001, 20(1): 1297.
- [26] SHAN G A G. Migration of surface-related multiples: tests on Sigsbee2B dataset, 74th Ann [J]. SEG Expanded Abstracts, 2004; 1285–1288.
- [27] WAPENAAR K, RUIGROK E N J, DRAGANOV D. Improved surface-wave retrieval from ambient seismic noise by multidimensional deconvolution [J]. Physical Review Letters, 2011, 38: L01313.
- [28] SNIEDER, ROEL, WAPENAAR. Imaging with ambient noise [J]. Physics Today, 2010, 63(9), 44–49.
- [29] CURTIS A P, GERSTOFTH S, SNIEDER R. Seismic interferometry: Turning noise into signal [J]. The Leading Edge, 2006, 25, 1082–1092.
- [30] 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, 18(4): 318–320.
- [31] Westman E C, Haramy K Y, Rock A D. Seismic tomography for longwall stress analysis [J]. Rock Mechanics Tools and Techniques, 1996; 397–403.
- [32] LUO X, ANDREW K, MATT V W. 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.
- [33] ERNEST C H, MARK H, PAUL W. Locating abandoned mines using the active mining operation as the seismic energy source—demonstration of a new method [R]. Wright State University, Xenon Geosciences, 2006.
- [34] ANDREW K, LUO X. Methodology for tomographic imaging ahead of mining using the shearer as a seismic source [J]. Geophysics, 2009; 74(2): m1–m8
- [35] LU Bin, CHENG Jianyuan, HU Jiwu, 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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, 24.
 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, 24.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.