



移动扫码阅读

王季,覃思,陆斌,等.基于掘进机随掘震源的巷道侧前方断层成像技术[J].煤炭科学技术,2021,49(2):232-237. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.027

WANG Ji, QIN Si, LU Bin, et al. Tomographic imaging technology of front side of roadway based on excavation source of roadheader[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 232-237. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.027

基于掘进机随掘震源的巷道侧前方断层成像技术

王季,覃思,陆斌,吴海,赵朋朋

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

摘要:基于掘进机随掘震源的地震超前探测,以掘进机切割煤壁和岩石时产生的地震波作为震源,通过在巷道内长时间连续采集地震波并从中寻找反射波实现巷道超前探测。为了使用连续的随掘地震数据实现巷道前方的地质异常体成像,分析了随掘反射波成像的原理,将数据处理和成像的过程分成了 5 个主要步骤,首先将随掘数据划分为多个一定长度的时间片段并对每个时间片段进行分析,从中挑选出掘进机正常工作时间较长的片段,通过与参考巷道互相关获得脉冲化记录,再依据每个脉冲化记录中直达槽波的信噪比筛选出合格的脉冲化记录,最后,采用基于射线的绕射偏移法对巷道前方和侧帮区域进行成像。并在阳煤榆树坡矿 1215 工作面回风巷内开展了随掘探测试验,由布置在煤壁内的检波器采集多日的随掘地震数据,对数据进行了处理和成像。结果表明:将掘进机随掘震源地震数据脉冲化后采用绕射偏移法可以实现掘进面侧前方断层的成像;随掘地震数据中包含大量无效数据,评价数据质量并筛选数据是提高成像质量的重要步骤;直接对掘进工作面前方成像缺乏理论依据,由成像结果推断侧前方断层与巷道延伸线的交点可实现巷道正前方断层位置的预测。

关键词:随掘地震;超前探测;掘进机震源;被动源地震

中图分类号:P631;TD163

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)02-0232-06

Tomographic imaging technology of front side of roadway based on excavation source of roadheader

WANG Ji, QIN Si, LU Bin, WU Hai, ZHAO Pengpeng

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

Abstract: The advanced seismic detection based on the seismic source of the roadheader use seismic wave generated by the cutting of coal wall and the falling of rock as the source of seismic and the advanced detection of the roadway is realized by continuously collecting seismic waves in the roadway for a long time and searching for reflected waves from it. In order to use continuous excavation seismic data to realize the imaging of the geological anomaly in front of the roadway, the principle of the excavation reflection wave imaging was analyzed, and the process of data processing and imaging was divided into five steps. Firstly, the excavation data was divided into many segments of a certain time length. Each segment was analyzed and selected according to the ratio of time in which roadheader was working well. The pulsed record was obtained through cross-correlation with the reference roadway, and then based on the direct groove wave in each pulsed record, the signal-to-noise ratio screens out qualified pulsed records. Finally, the ray-based diffraction migration method was used to image the front of the roadway and the side siding area. The excavation detection test was carried out in the return airway of No.1215 working face of Yushupo Mine of Yangmei Coal Group. The geophone arranged in the coal wall collected multi-day excavation seismic data, and the data was processed and imaged. The results show that pulsing the seismic data of the roadway machine source and using the diffraction migration method can realize the imaging of the front fault on the side of the roadway head. Moreover, the tunneling seismic data contains a large amount of invalid data and it is an important step to evaluate data quality and screen the data to improve imaging quality. There is no theoretical basis for directly imaging the front of the tunneling work. Inferring the intersection of the front fault and the extension line of the roadway from the imaging results can realize the prediction of the fault location in front of the roadway.

Key words: seismic while excavating; advanced detection; roadheader source; passive seismic

收稿日期:2020-12-12;责任编辑:曾康生

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807804);国家自然科学基金面上基金资助项目(41974209)

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

0 引言

巷道掘进是最易发生煤矿安全事故的工序之一,其中隐伏在煤层及其围岩内的地质异常体,如小断层、采空区、陷落柱活化、煤与瓦斯局部应力集中等,是诱发灾害事故的主要因素^[1]。目前,针对掘进巷道侧帮与前方地质异常体的物探方法主要有:瞬变电磁法^[2]、直流电法^[3]、反射震波法^[4-6]、反射槽波法^[7-8]等。但是目前巷道的物探方法均需要在停止掘进机作业的条件下开展探测施工,有的甚至要求掘进机回退一定距离以减少对探测结果的影响。这就造成了探测作业和采掘作业的不协调,即“探采失调”问题,严重影响掘进效率。当前,我国矿井正向着智能化、无人化开采阶段迈进,需要在不间断掘进作业的条件下,实时完成巷道前方和侧帮地质异常体的探测^[9]。对地震类探测方法而言,这就要求不能再使用炸药作为震源,而是将掘进机在掘进过程中切割岩石产生的震动作为震源,利用连续的震动波遭遇地质异常体时产生的回波实现巷道前方和侧帮探测,在正常掘进的同时随掘随探,保障煤矿巷道的安全快速掘进^[10]。

利用掘进机随掘震源的地震勘探在国外开展的较早,2001年,TAYLOR等^[11]就曾经以掘进机随掘震源开展了掘进工作面前方地质条件的超前探测;2002年,PETRONIO等^[12]以隧道掘进机震动为随掘震源,进行了隧道随掘地震探测试验并取得了初步效果。在国内,2015年,覃思等^[13-14]开展了井下掘进机随掘震源的反射试验,成功提取了来自巷道的反射波。程久龙等^[15]对掘进机震源的震源特征、数据处理方法等方面开展了深入的理论研究,与传统炸药震源相比,以掘进机震动为随掘震源的地震探测需要在巷道掘进的过程中长时间连续采集,采集到的随掘地震信号具有数据量巨大、震源能量低、干扰强、信噪比低的特点,因此采用随掘地震信号对巷道掘进面前方断层等地质异常体成像具有较高的技术难度。

笔者结合实际开展的井下随掘探测试验,采用选定片段长度和参考道、数据评价与筛选、脉冲化、滤波与去噪、偏移成像等5个阶段逐步完成了基于掘进机震源的随掘巷道侧前方断层的成像和探测。

1 随掘震源波反射波成像原理

掘进过程中掘进机的截割头切割岩石,产生以S波为主的地震波^[15],此地震波具有一定周期性,其周期与截割头转速有关。另一方面,由于截割头

的作用使岩石产生破裂和垮落,产生以P波为主的地震波,此地震波的随机性强,震源表现为随机出现的多个脉冲信号。每1个脉冲信号可以看作是1次少量炸药激发的弹性波震源。弹性波在离开震源向外传播的过程中,由于煤层的传导作用形成槽波,具有频散等槽波的基本性质。

互相关干涉是将连续震源信号转换为脉冲信号的有效方法。虽然槽波为频散波,但互相关干涉同样适应于频散波。这是由于不同频率正弦波的正交性,不同频率波组的互相关为零,只有相同频率的波组互相关不为零^[16]。因此某一道槽波在频率 ω 上谐波分量表示为

$$f(x, t, \omega) = w(k) e^{i(kx - \omega t)} \quad (1)$$

其中: x 为传播距离; t 为传播时长; k 是波数; $w(k)$ 为震源子波的频谱。而与参考道的地震信号 $r(x_0, t_0, \omega)$ 求互相关函数 $\gamma(x, t, \omega)$ 为

$$r(x, t, \omega) = f(x, t, \omega) f^*(x_0, t_0, \omega) = w(k) w^*(k) e^{i[k(x-x_0) - \omega(t-t_0)]} \quad (2)$$

其中: f 与 f^* 、 w 与 w^* 为共轭复数。可以看出,互相关函数是1个特殊的地震信号,它的子波是震源子波的自相关函数,而传播距离为参考道与地震道之间的距离 $x-x_0$,传播时长为从参考道到地震道的传播时间 $t-t_0$ 。由于随掘震源的子波为弱周期信号与随机脉冲信号的叠加,其自相关函数近似于脉冲信号。因此通过互相关可以将连续的随掘地震数据脉冲化为虚拟的单炮记录,其虚拟炮点位于参考道所在的点上。

随掘地震波在煤层内传播的过程中,在遭遇断层等地质异常体后产生反射波,反射波沿煤层向回传播,被安装在煤层中的检波器接收,因此检波器接收到的既有随掘地震波的直达波又有反射波,如图1所示。

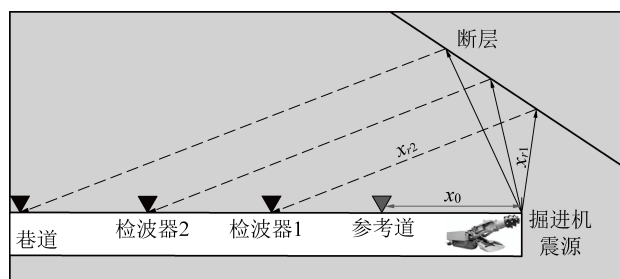


图1 随掘反射波示意

Fig.1 Diagram of reflection waves while drilling

反射波的传播距离 x_r 为震源点到反射点的距离 x_{r1} 与反射点到接收点的距离 x_{r2} 的和。如果忽略反射过程造成的子波变化,则根据式(2)可知,接收点处的反射波与参考道直达波的互相关函数为

$$r(x_r, t_r, \omega) = w(k) w^*(k) e^{i[k(x_r - x_0) - \omega(t_r - t_0)]} \quad (3)$$

式中: t_r 为反射波的传播时间。

由此可知, 反射波互相关函数的子波与直达波的相同, 都是震源子波的自相关函数。互相关形成的虚拟单炮记录, 炮点仍位于参考点上, 而传播距离为 $x_r - x_0$, 传播时间为 $t_r - t_0$ 。

对于直达波和反射波, 如果在互相关后得到的虚拟单炮记录前面补零, 将 t_0 补回单炮记录中, 则补零后单炮记录的震源点为实际的掘进机位置, 且直达波与反射波的传播距离和时延都是相对于实际震源点的。也就是说, 补零后的虚拟单炮记录可以看作是在掘进工作面爆破所得到的单炮记录, 与参考道位置无关。在巷道掘进的多个阶段, 分别采集并互相关后, 就能得到多个虚拟单炮记录, 每个记录的炮点位置都在当时的掘进面处。对于多炮记录就可以采用反射槽波探测的方法实现偏移成像。

2 随掘地震处理的主要步骤

随掘地震一般采用布置在巷道侧帮的多道深孔或浅孔内的检波器接收地震信号, 利用能够长时记录或实时网络传输的地震仪记录地震数据。记录到的井下地震信号中除了掘进机切割煤壁的震动外还包含多种噪声成分, 包括带式输送机、风筒、水泵等机械设备产生的震动噪声以及电路和其他电气设备产生的电噪声。在强噪声背景中的长时连续信号无法直接用于成像, 需要经过多个步骤将其处理为虚拟单炮记录后, 再用绕射偏移的方法进行成像。因此, 对掘进机震源的地震数据成像的过程大致可分为: 选定片段长度和参考道、数据评价与筛选、脉冲化、滤波与去噪、偏移成像共 5 个步骤。

2.1 选定时间片段

目前我国多数煤矿巷道掘进作业的平均日进尺在 10 m 以内。对成像而言, 掘进机在数小时内移动的距离小于剖分网格的间距, 因此可认为这几个小时内震源位置不变, 这就可以将这几个小时内采集到的连续数据转化为单炮数据。如何确定这个时间段的长度, 需要根据巷道掘进的实际情况和成像剖分网格的大小综合决定。另外, 参考道的选取对有效随掘信号的提取具有决定性作用。一般选取距离掘进机最近的地震道作参考道, 但当掘进机附近有强干扰源时, 也可用其他道替代。

2.2 数据评价与初选

采集数据的过程中, 掘进机并非一直处于切割煤壁的状态, 还包括扫煤、空转和停机等多种状态。当采煤机不切割煤壁时, 不能产生强的震源信号, 采

集到数据为无效数据, 需要从数据集中剔除以提高处理效率。选择无效数据的标准一般为地震信号的平均振幅, 这是由于掘进机切割煤壁时产生的震动能量较强, 可达其他状态下平均振幅的数倍。通过设定阈值, 选取平均振幅大于阈值的时间片段, 就可以初选出有效数据。具体阈值与煤层厚度、煤质硬度、围岩岩性、掘进机类型和功率的多种因素有关, 需要在工程中根据实际采集的数据调整。

2.3 数据的脉冲化

脉冲化是随掘地震信号处理的核心步骤, 其目的是将连续地震数据转化为虚拟单炮数据, 从而可以用常规方法进行后续的处理和成像。脉冲化方法也被称为地震干涉算法, 常用的地震干涉算法有互相关算法、反褶积算法、互相干算法等。其中互相关算法简单且适用性高, 是随掘地震中最常使用的方法^[17-18]。

设选取的时间片段长度为 T , 参考道的地震信号为 $s_0(t)$, 则求出每一道地震信号 $s_i(t)$ 与 $s_0(t)$ 的归一化互相关函数 $r_i(\tau)$ 为

$$r_i(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^T s_0(t) s_i(t - t_0 + \tau)}{\sum_{t=0}^T |s_0(t)| \sum_{t=-t_0}^{T-t_0} |s_i(t)|} \quad (4)$$

其中: $\tau \in [0, N]$; N 为设定的脉冲化数据的采样点数; t_0 为槽波由当前掘进机位置传播至参考点所需的时间。设掘进机的平面位置为 (x_s, y_s) , 参考点平面位置为 (x_0, y_0) , 基阶槽波 Airy 相的速度为 v_c , 则

$$t_0 = \frac{\sqrt{(x_s - x_0)^2 + (y_s - y_0)^2}}{v_c} \quad (5)$$

将 $s_i(-t_0)$ 至 $s_i(0)$ 这段数据补零, 对 M 道地震数据分别用式(4)求与参考道的互相关, 将结果排列成 $N \times M$ 的矩阵, 就得到脉冲化后的虚拟单炮记录, 其中虚拟炮点的位置为掘进机所在位置。

2.4 筛选与去噪

在地质条件良好的矿井中, 正常掘进时采集的数据质量高, 脉冲化后能形成能量较强的直达波与槽波波列。然而大多数矿井受地质条件影响, 巷道内钻孔、喷锚、抽水等作业较多, 一方面使有效掘进的时间减少, 另一方面为采集系统带来了较强的震动噪声干扰。因此, 脉冲化后的掘进机震源数据质量一般会低于炸药震源数据。在将脉冲化数据用于成像之前需要对其进行筛选和去噪。筛选的目的是为了能够找出时间片段内正常掘进的比例较高的脉冲化记录。1 个简单而有效的筛选方法是计算直达

波的信噪比。对1个 M 道 N 个采样点的脉冲化记录,直达波信噪比为

$$c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{t=t_i-T_w}^{t_i+T_w} |s_i(t)|}{\sum_{i=1}^M \sum_{t=0}^N |s_i(t)|} \quad (6)$$

其中: t_i 为每一道直达波的到时; T_w 为预先设定的1个时窗长度。对每1个脉冲化记录进行处理,通过式(6)计算每个脉冲化记录的直达波信噪比,判断此脉冲化记录是否大于预先设定的阈值,最终筛选出直达波清晰的脉冲化记录做成道集。经过挑选的脉冲化记录仍然包含较多的噪声,可采用常规的滤波与反褶积方法进行处理,如用梳状滤波器滤除工频干扰,用反褶积方法增强直达波和反射波信号^[19],用滤波或约束反演去噪^[20]等进一步增强有效信号。

2.5 偏移成像

对脉冲化后随掘数据的成像方法与对槽波数据的方法相同,可采用基于射线理论的绕射偏移法实现对断层的成像^[19-21]。将探测区域内的煤层视为1个平面,设 $P(x,y)$ 为平面内一点,则该点上的叠加振幅为

$$P(x,y) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M A(t_{ij}), t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_g} \quad (7)$$

且 $d_{ij} = \sqrt{(x_i-x)^2 + (y_i-y)^2} + \sqrt{(x_j-x)^2 + (y_j-y)^2}$
式中: K 为经过筛选的脉冲化记录的数量; M 为地震道数; $A(t_{ij})$ 为第 i 个脉冲化记录中第 j 道信号在 t_{ij} 时刻的瞬时振幅; v_g 为基阶槽波 Airy 相的速度; d_{ij} 为 $P(x,y)$ 点到第 i 个脉冲化记录对应的掘进机位置和第 j 个检波器的距离的和。

如果脉冲化记录较少或掘进机总进尺较少,采用式(7)所得的成像结果有画弧现象,但是随着掘进进尺的增加,画弧现象将逐渐减弱,真实存在的反射点上将出现明显异常,指示该区域可能存在断层或其他地质异常体。

3 巷道随掘地震探测实例

山西宁武榆树坡煤矿1215工作面主采2号煤,平均煤厚4.1 m。该煤层位于太原组上部, K_2 砂岩下,煤层结构较简单,直接顶为泥岩,基本顶为粉砂岩,底板为泥岩。地面三维地震勘探结果显示:1215工作面回风巷开口以里390 m处存在1条较大断层XDF9,该断层位于巷道回采侧,落差为8 m(图2)。

为开展随掘地震探测试验,在1215回风巷内布置观测系统。随掘地震观测系统分为深孔和浅孔2

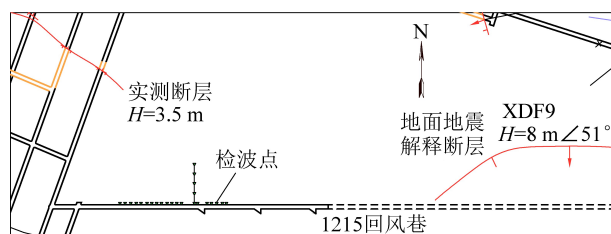


图2 1215工作面回风巷

Fig.2 Air-return roadway of No.1215 working face

类。浅孔的孔深为3 m,共20个,孔间距5 m,每个浅孔内各埋入1个三分量浅孔检波器,埋入浅孔后通过气囊充气使检波器贴壁,再向孔内填入炮泥以减少声波干扰;深孔的孔深为40 m,共1个,深孔内埋入5级Z分量检波器,道间距10 m,同样通过气囊充气使检波器贴壁。采用YTZ3型矿井自记式地震仪连续记录地震数据。本次试验从2019年7月26日开始至同年8月25日结束,共31 d,总进尺68 m,期间共采集了12次有效数据,每次采集时间为10 h,采样率为0.25 ms。

综合1215工作面的地质特点和掘进速度,选取20 min为时间片段的长度。7月26日采集的1个时间片段内的随掘数据,其中第1道至第3道分别为距离巷道掘进面最近的检波器的X、Y、Z分量,第4道至第6道分别为第2个检波器的3个分量,依次排列,第61道至第65道分别为深孔检波器由远及近的5道。从图3中可以看出,在从200—600 s、700—1 100 s这2个时段内地震波具有较大的振幅,表明此2个时段内的掘进机处于正常掘进的状态。由于该数据片段内正常掘进的时间较长,为有效时间片段,可进行下一步处理。

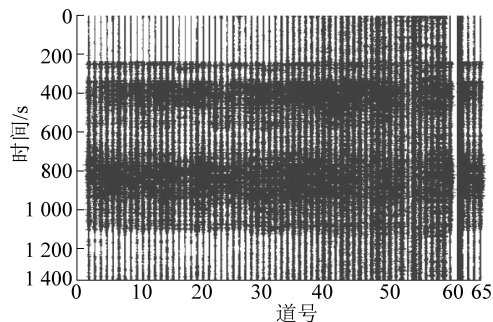


图3 由10:40至11:00随掘地震数据

Fig.3 Data of seismic while drilling from 10:40 to 11:00

采用式(4)将此时间片段的随掘地震数据脉冲化,采样点数设为6 000,根据同煤层其他区域槽波探测的工程经验选取槽波 Airy 相速度1 100 m/s。图4是得到的脉冲化数据。脉冲化后的地震记录中包含较强的直达槽波,其形态与炸药震源激发产生的单炮记录具有很高的相似性,其波速与已知的槽

波 Airy 相速度相同,为 $1\,100\text{ m/s}$ 。

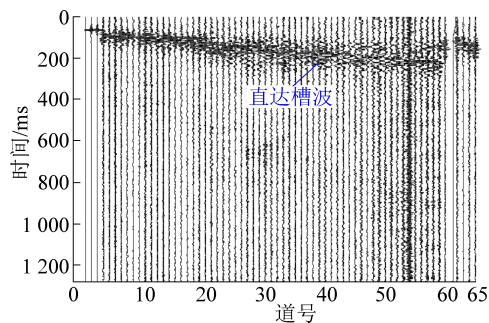


图4 由 10:40 至 11:00 的脉冲化地震记录

Fig.4 Pulsed seismic traces from 10:40 to 11:00

在新获得每个脉冲化记录后,用式(6)对该记录进行评价。图5为另1个时间片段得到的脉冲化记录,此记录中含有较强的噪声,这是由于掘进机虽然正常工作,但切割煤壁的力量较弱,产生的槽波信号信噪比低。通过评价,可将此类脉冲化记录剔除,以免对成像结果造成不良影响。

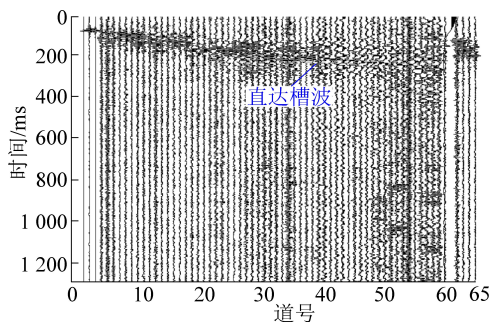


图5 由 11:40 至 12:00 的脉冲化地震记录

Fig.5 Pulsed seismic traces from 11:40 to 12:00

经过筛选之后,需要进一步对脉冲化记录进行滤波和去噪。图6为图4中的地震记录经过 $110\sim 250\text{ Hz}$ 的带通滤波器滤波后的结果。可以看出,直达槽波更加突出,噪声得到了一定程度的压制。需要注意的是,在直达槽波波列的下方存在一组振幅较弱的波列,如图中箭头所示,此波列与直达槽波波列近似平行,可能为断层的反射波。

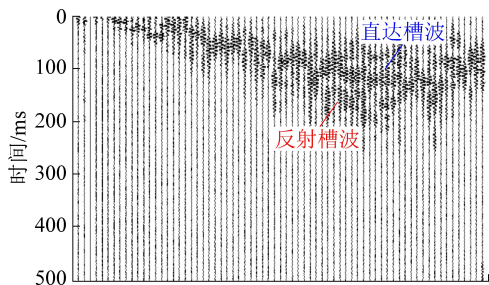


图6 带通滤波后的脉冲化地震记录

Fig.6 Pulsed seismic traces after band-pass filtered

对多个脉冲化记录用式(7)进行偏移成像,最终获得的成像结果如图7所示,图中颜色对应于归

一化叠加振幅。由图可见,在 1215 回风巷煤壁内侧约 60 m 处存在 1 个较强的异常条带,此条带方位角为 NE,若沿此条带的两端延伸,则西端与多条大巷揭露的 1 个 3.5 m 断层相连,而东端则与地面地震解释的断层 XDF9 相连。因此判断 XDF9 断层未与巷道在延伸方向相交,而是沿异常条带所在方向延伸,与大巷揭露的 3.5 m 断层为同一断层,如图7中灰线所示。试验后 1215 回风巷继续掘进,据矿方反映,巷道中未见断层揭露,XDF9 断层位置与预测结果一致。

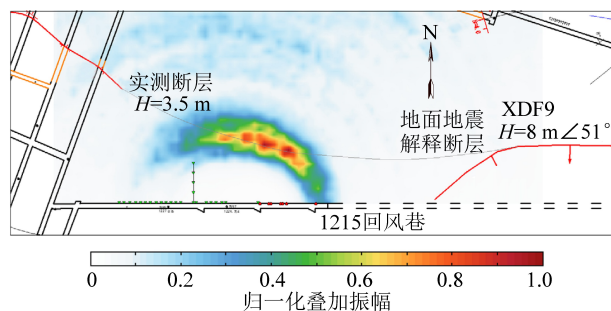


图7 断层成像结果

Fig.7 Results of fault imaging

4 结 论

1)以掘进机掘进过程中产生的震动作为震源替代炸药震源,在巷道掘进的过程中开展随掘地震探测,能够有效探测煤壁内断层的发育情况,结合已有的地质揭露和其他探测成果,可实现巷道掘进前方断层位置的预测。

2)随掘地震探测数据量巨大,但其中存在大量的无效数据,水泵、风机等持续的噪声源会产生假的地震波列影响探测结果的准确性,因此有效的随掘数据评价和筛选方法对探测成果具有重要的意义。

3)使用反射槽波的成像方法可以用随掘地震波实现巷道壁内断层的成像,但是直接对巷道掘进工作面的正前方区域成像尚缺乏理论基础,这是由于沿巷道壁传播的地震波是一种特殊类型的波,即所谓的“巷道振型槽波”,可以看作是一种由槽波激发产生的面波,其频散性和传播规律复杂,因此目前仅能实现掘进面侧前方区域的成像,再推断出巷道延伸线与断层的交点位置。

参考文献 (References):

- [1] 程建远,石显新.中国煤炭物探技术的现状与发展[J].地球物理学进展,2013,28(4):2024-2032.
CHENG Jianyuan, SHI Xianxin. Current status and development of coal geophysical technology in China[J]. Process in Geophys, 2013,28(4):2024-2032.

- [2] 薛国强,潘冬明,于景邨.煤矿采空区地球物理探测应用综述[J].地球物理学进展,2018,33(5):2187-2192.
XUE Guoqiang, PAN Dongming, YU Jingcun. Review the applications of geophysical methods for mapping coal mine voids[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2187-2192.
- [3] 韩德品,李 丹,程久龙,等.超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J].煤炭学报,2010,35(4):635-639.
HAN Depin, LI Dan, CHENG Jiulong, *et al.* DC method of advanced detecting disastrous water-conducting or water-bearing geological structures along same layer[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 635-639.
- [4] 王梦倩,岳建华,刘盛东.反射波超前成像预报系统及其应用[J].地球物理学进展,2014,29(3):1439-1444.
WANG Mengqian, YUE Jianhua, LIU Shengdong. Reflection wave imaging advance forecast system and its application[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1439-1444.
- [5] 张平松,刘盛东,吴健生.坑道掘进空间反射波超前探测技术[J].煤炭学报,2010,35(8):1331-1335.
ZHANG Pingsong, LIU shengdong, WU jiansheng. Tunnel reflection wave imaging technology and its system during driving space[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1331-1335.
- [6] 刘盛东,章 俊,李纯阳,等.矿井多波多分量地震方法与试验[J].煤炭学报,2019,44(1):271-277.
LIU Shengdong, ZHANG Jun, LI Chunyang, *et al.* Method and test of mine seismic multi-wave and multi-component[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 271-277.
- [7] 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.
- [8] 蒋锦朋,何 良,朱培民,等.基于槽波的 TVSP 超前探测方法:可行性研究[J].地球物理学报,2018,61(9):3865-3875.
JIANG Jinpeng, HE Liang, ZHU Penmin, *et al.* TVSP method for reconnaissance beyond coal roadway based on in-seam seismic waves: a feasibility study[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(9): 3865-3875.
- [9] 王国法,杜毅博.智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J].煤炭科学技术,2019,47(1):1-10.
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.
- [10] 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.
- [11] TAYLOR N, MERRIAM J, GENDZWILL D. The mining machine as a seismic source for in-seam reflection mapping[C]//Proc. 71st SEG Annu. Meeting, 2001:1365-1368.
- [12] PETRONIO L, POLETO F. Seismic-while-drilling by using tunnel boring machine noise[J]. Geophysics, 2002, 67(6): 1798-1809.
- [13] 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.
- [14] 覃 思,程建远,胡继武,等.煤矿采空区及巷道的井地联合地震超前勘探[J].煤炭学报,2015,40(3):636-639.
QIN Si, CHENG Jianyuan, HU Jiwu, *et al.* Coal-seam-ground-seismic for advance detection of goaf and roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 636-639.
- [15] 程久龙,谢 晨,孙晓云,等.随掘地震超前探测理论与方法初探[C]//2015 中国地球科学联合学术年论文集(二十三)专题,2015.
- [16] 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.
- [17] 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 interferometer[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 142-147.
- [18] LUO X, KING A, WERKEN MV. Tomography 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.
- [19] 王 季.反射槽波探测采空巷道的实验与方法[J].煤炭学报,2015,40(8):1879-1885.
WANG Ji. Experiment and method of void roadway detection using reflected in-seam wave[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1879-1885.
- [20] 刘 强. L1 范数约束的随掘地震噪声衰减[J/OL]. 煤炭学报, 2020-12-07, 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.td.20200918.1124.002.html>.
LIU Qiang. Noise attenuation based on L1-norm constraint inversion in seismic while drilling[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2020-12-07, 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.td.20200918.1124.002.html>.
- [21] 姬广忠.反射槽波绕射偏移成像及应用[J].煤田地质与勘探,2017,45(1):121-124.
JI Guangzhong. Diffraction migration imaging of reflected in-seam waves and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 121-124.