

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. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1712
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. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1712

反射槽波探测采空巷道的实验与方法

王季

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 对利用反射槽波探测工作面内异常构造展开实验研究, 针对实际井下地震数据中反射槽波受直达槽波与其他波场干扰严重的问题, 提出了基于最小平方反褶积的反射槽波增强算法和基于径向道变换的方法压制直达槽波与巷道声波, 并用绕射偏移的方法获得工作面内巷道的成像结果。实验结果表明: 槽波传播过程中遇采空巷道能够产生较强的反射槽波, 通过处理可获得采空巷道的成像结果; 反射槽波的传播距离可达 360 m 以上, 探测距离可达 200 m 以上。

关键词: 反射槽波; 超前探测; 采空巷道; 井下地震勘探

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2015)08-1879-07

Experiment and method of void roadway detection using reflected in-seam wave

WANG Ji

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Xi'an 710077, China)

Abstract: An experiment on using reflected in-seam wave to detect abnormal geological structure in a working face was conducted. To overcome the interference of direct in-seam wave and other types of waves to the reflected in-seam wave, an enhancement method was proposed based on the least squares deconvolution algorithm to focus the reflected in-seam wave. The radial trace transformation and filtering were used to suppress the direct wave and the sound wave. An image of a roadway in the tested working face was generated by diffract migration. The results show that the reflected in-seam wave can be generated when the propagating in-seam waves encounter with a void roadway and the roadway can be imaged after the data are processed. The propagation distance of the reflected in-seam wave is over 360 m, and the detection range is over 200 m.

Key words: reflected in-seam wave; fore detecting; void roadway; underground seismic exploration

利用井下地震反射波探测巷道掘进工作面前方的异常地质构造一直是煤矿井下超前探测方法中的重点和难点之一。与目前常用的直流电法和瞬变电磁超前探测法相比, 井下地震反射波法具有探测距离远、目标类型多、分辨率高、不受铁磁干扰等优点。然而, 煤矿井下弹性波的波场成分十分复杂, 地震反射波通常会淹没在后至的其他波场以及相干噪声中。因此井下地震反射波法的技术难度较大, 阻碍了该方法的应用与推广。

矿井地震波超前预测^[1] (mine seismic prediction, MSP) 是刘盛东等借鉴在隧道工程领域中使用的隧道地震超前预报 (tunnel seismic prediction, TSP)、真反射层析成像 (true reflection tomography, TRT) 等技术^[2] 提出的可用于煤矿巷道超前探测的方法。该方法从井下地震波场中分离出传播速度最快的反射 P 波, 并采用偏移成像技术探测异常构造。

与 MSP 不同, 反射槽波法主要利用在煤层中传播的槽波遭遇构造后产生的反射槽波来探测巷道前

收稿日期: 2014-12-09 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (2011ZX05040-002); 科技部科研院所技术开发研究专项资金资助项目 (2013EG122200)

作者简介: 王季 (1977—), 男, 陕西西安人, 副研究员。Tel: 029-81778064, E-mail: wangji@cctegxian.com

方异常构造的发育情况。由于槽波仅在煤层中传播,且能量强、速度低、并具有频散性。因此反射槽波探测的处理方法与 MSP 有很大差别。首先直达槽波对反射槽波的影响很大,频散性使槽波具有较长的波列,从而使反射槽波淹没在直达槽波的续至波列中。因此需要压缩槽波波列以增强反射槽波。其次,槽波没有明显的同相轴,无法直接叠加成像,而是在煤层所在的平面内采用绕射偏移的方法对反射点成像。

煤矿反射槽波探测断层的试验最早由 Mason 和 Buchanan 等于 20 世纪 70 年代末在英国 Pye Hill 煤矿开展,并提出了延迟求和方法对断层成像^[3]。Buchanan 随后又提出了动态道集叠加^[4]和自适应延迟求和^[5]对成像方法进行改进。Elsen 和 Schott 等于 20 世纪 80 年代末和 90 年代初在德国的 Rheinland Pattberg 和 Minister Stein 等多个煤矿内开展了反射槽波试验,并采用极化滤波与包络叠加的方法成像^[6]。2007 年, Hu 和 McMechan 等将逆时偏移技术引入了反射槽波,用模型数据对反射槽波成像进行了新的尝试^[7]。中国的槽波勘探以透射法为主,利用透射槽波速度与能量的差异对已形成的工作面进行层析成像,从而探测工作面内部的异常构造^[8-9]。对于反射槽波探测,目前国内尚未见公开的案例发表。

笔者以实际采集的井下地震波数据为研究对象,提出基于反褶积的反射槽波增强方法,以及基于径向道变换的直达槽波压制方法,并对巷道进行成像,从而达到利用反射槽波法探测采空巷道的目的。

1 反射槽波探测原理

当震源在煤层中激发时,由于煤层相对于顶底板围岩是一个低速层,大部分弹性波将由于顶底板界面间的多次反射而被禁锢在煤层中,相互叠加干涉,从而形成槽波^[10],如图 1 所示。

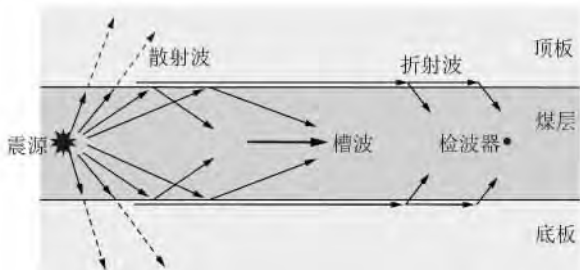


图 1 槽波的形成与传播过程示意

Fig. 1 Formation and propagation of the in-seam wave

槽波在巷道内被激发时将沿煤层传播,当遭遇到断层等具有波阻差异的构造时,小部分的槽波会发生反射,而被与震源在用一条巷道内的检波器接收到,如图 2 所示。

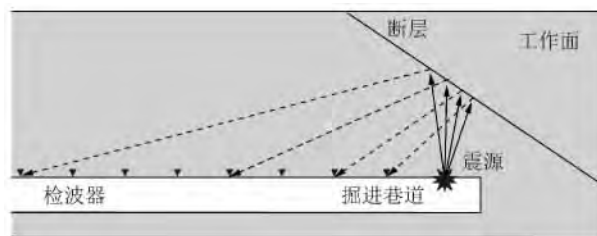


图 2 反射槽波的传播过程示意

Fig. 2 Propagation of the reflected in-seam wave

由检波器接收的井下地震数据中包含多种波场成分。首先到达的是速度最快的折射纵波,随后到达的是折射横波,在此之后是直达槽波,最后是声波。一般情况下,反射槽波的传播路径比直达槽波长,因此反射槽波的到时要晚于直达槽波。由于直达槽波能量很强且具有较长的波列,使得反射槽波被直达槽波掩盖,为了利用反射槽波探测异常构造,首先需要将反射槽波增强。

2 基于反褶积的反射槽波增强

槽波由于频散而使波列变长,因此增强槽波的方法大多是围绕着消除频散现象而提出的,其主要思想是先求出槽波的相速度频散曲线,再设计一个纯相位滤波器,通过滤波消除或削弱槽波的频散效应,“使频散变频长波列再压缩到一个较短促的脉冲”^[11-12]。然而,实际数据中的槽波由于在被采集之前已经历了多个带限系统的滤波,且受到了随机噪声的干扰,其频散曲线与理论值已有很大差异,通常情况下很难从中提取出有效的相速度频散曲线。另一方面,纯相位滤波器对频散曲线的准确性以及数据质量要求都很高。依据频散曲线构建纯相位滤波器的方法对采集条件恶劣的实际井下数据效果并不理想。

为了使算法具有极高的鲁棒性并能适应工程探测的需要,笔者采用最小平方反褶积的方法压缩直达槽波,增强反射槽波。假设采集得到的槽波数据为 $d(t)$,可以看作是震源信号 $s(t)$ 经过传播时延后,与具有频散性的滤波器 $f(\tau)$ 褶积再与噪声 $e(t)$ 混合的结果。

$$s'(t) = s(t + x/v_g) \quad (1)$$

$$d(t) = s'(t)f(\tau) + e(t) \quad (2)$$

式中, x 为槽波的传播距离; v_g 为槽波的群速度。

反褶积的目的就是寻找一个反滤波器 $g(\tau)$,使 $d(t)$ 经过 $g(\tau)$ 的滤波后,尽量削弱频散并接近于 $s'(t)$ 。在 L_2 范数下,就是使 $d(t)$ 与 $g(\tau)$ 的褶积结果与 $s'(t)$ 的误差平方和最小,即

$$\min \sum_t (d(t)g(\tau) - s'(t - x/v_g))^2 \quad (3)$$

由式(3)可得到

$$\sum_{k=0}^N r_{dd}(k-n)g(n) = r_{ds}(n), n=0,1,\dots,N \quad (4)$$

式中, N 为反滤波器 $g(\tau)$ 的长度; r_{dd} 为 $d(t)$ 的自相关; r_{ds} 为 $d(t)$ 与 $s(t)$ 的互相关。

将式(4)写成矩阵形式,有

$$Ag = b \quad (5)$$

式中, 矩阵 A 为由观测信号 $d(t)$ 的自相关函数 $r_{dd}(n)$ 得到的自相关矩阵, 具有 Toeplitz 矩阵的形式, 即

$$A = \begin{bmatrix} r_{dd}(0) & r_{dd}(1) & \cdots & r_{dd}(N) \\ r_{dd}(1) & r_{dd}(0) & \cdots & r_{dd}(N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{dd}(N) & r_{dd}(N-1) & \cdots & r_{dd}(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

向量 g 为反滤波器 $g(\tau)$ 的向量形式; 向量 b 为观测信号 $d(t)$ 与 $s(t)$ 的互相关, 即

$$b = [r_{ds}(0) \quad r_{ds}(1) \quad \cdots \quad r_{ds}(N)]^T \quad (7)$$

直接求解方程(5), 可得到反滤波器 g , 并用它对观测信号 d 滤波, 就可以得到反褶积后的信号 $\tilde{d}$ 。

$$\tilde{d} = (A^{-1}b)^T d \quad (8)$$

在处理实际数据时, 逐道选取观测信号 $d(t)$, 并求出自相关矩阵 A 。震源信号 $s(t)$ 用最小偏移距的数据代替, 加上相位时延后得到与 $d(t)$ 的互相关函数 b , 然后由式(8)求得反褶积后的信号。

3 直达槽波的压制

经过反褶积后的井下地震信号, 其中的直达槽波成分变得更加集中。为了降低直达槽波对成像的影响, 需要对其能量进行压制。地面地震和 TSP 中实现波场分离的常用方法是通过 FK 变换或 $\tau-p$ 变换, 将地震信号转换到 FK 域或 $\tau-p$ 域, 再利用直达波与反射波在视速度上的差异, 将直达波从中切除, 然后再变换回 $t-x$ 域。由于 P 波没有频散且频率较低, 因此有明显的同相轴。采用 FK 或 $\tau-p$ 滤波法能够有效消除直达 P 波^[3]。然而在井下地震数据中, 槽波频带范围宽且具有频散性, 使得直达槽波表现为能量团的形式。能量团中的同相轴杂乱, 采用 FK 滤波或 $\tau-p$ 滤波等基于速度的滤波方法无法有效消除槽波能量团。另一方面, 由于震源是在巷道内激发的, 震源产生的声波在密封的巷道内能量很强, 频率成分复杂。因此需要采取一种有效的方法同时压制直达槽波与声波的能量, 突出反射槽波成分。

笔者采用径向道变换的方法压制直达槽波和声

波。径向道变换将地震道集振幅值从旅行时-偏移距坐标系($t-x$ 域)变换到视速度-偏移距坐标系($v-x$ 域)^[14-15]。在 $v-x$ 域内, 速度低的声波频率提高, 速度高的直达槽波频率降低, 视速度在二者之间反射槽波频率变化不大。因此在 $v-x$ 域进行带通滤波, 再变换回 $t-x$ 域就可以有效压制直达槽波和声波。

4 反射槽波的偏移成像

槽波的波动方程比较复杂, 目前仅有 Hu 和 Mc-Mechan 等开展了将逆时偏移技术应用于槽波的尝试。除此以外, 尚没有基于波动方程的偏移方法被提出或使用。目前的反射槽波偏移成像方法仍是基于射线理论的, 以绕射偏移法为主。

由于槽波仅在煤层中传播, 因此槽波的绕射偏移成像一般在煤层所近似的平面内完成。设 $P(x, y)$ 为平面内一点, 则该点上的叠加振幅为

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A(t_{ij}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A\left(\frac{r_{ij}}{v_g}\right) \quad (9)$$

$$r_{ij} = \left[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中, N 为总炮数; M 为检波器数; $A(t_{ij})$ 为第 i 个炮集中第 j 道信号在 t_{ij} 时刻的瞬时振幅; r_{ij} 为 $P(x, y)$ 点到第 i 个震源点和第 j 个接收点的距离的和。

瞬时振幅可由 Hilbert 变换求出。对于某道数据 $d(t)$, 其瞬时振幅 $A(t)$ 为

$$A(t) = [d^2(t) + c^2(t)]^{\frac{1}{2}}$$

$$c(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

在成像的过程中, 可以根据探测目标的先验知识对式(9)中的瞬时振幅加权。比如如果预先知道断层的大致走向, 则可通过成像点、震源点、检波点的三角关系求出反射面的方位角, 由反射面方位角与预计断层方位角的差构成权重系数, 在式(9)中对瞬时振幅加权求和。通过这种方法能够减少其他波场与噪声的影响, 提高特定走向异常构造的成像质量。

5 探测实验

为了验证本文方法的有效性, 笔者在山西朔州大恒煤业 41108 工作面的回风巷道内开展了反射槽波实验, 目的是检验能否获得在回风巷煤壁内激发, 沿煤层传播至相距 200 m 的运输巷后, 重新反射回回风巷道的反射槽波, 以及能否用反射槽波对运输巷进行成像。

41108 工作面宽 200 m, 推进长度 790 m, 煤层起伏平缓, 平均煤厚 10.6 m。运输巷与回风巷均沿煤

层底板掘进。探测施工时,将横波检波器安装在回风巷侧帮上,道间距 10 m,共 60 道。震源由 200 g 硝铵炸药激发,炮孔深度 2 m,安装炸药后孔口用炮泥封堵,炮间距 30 m,共 19 炮。炮点和检波点尽量靠近巷道顶部。由于巷道沿底板掘进,巷道顶基本位于煤层 1/4 煤厚位置处。地震仪选用 YTZ3 型矿井防爆地震仪,采样率 2 kHz。

采集到的原始单炮数据如图 3 所示,分别为第 1、第 16、第 19 炮数据。可以看出直达槽波与声波能量较强,反射槽波不明显。

图 4 为采用本文所提反褶积方法处理后的结果,可以看出直达槽波得到了一定程度的压缩。同时被

压缩的还有一组波,如图中红色箭头所示。图 5 为根据炮点与接收点坐标绘制的直达波与反射波时距曲线,其中蓝色线条是速度为 1 250 m/s 的波从炮点出发直接传播至接收点所用的时间;红色线条是假定工作面内部在距离回风巷 200 m 处有一个与回风巷平行的反射面存在,则速度同为 1 250 m/s 的波由炮点出发,在反射面发生反射,再被接收点接收到所用的时间。蓝色线条与直达槽波吻合,说明槽波速度为 1 250 m/s 左右;红色线条与图 4 中箭头所指波列也基本吻合,由此可以推断出该组波很有可能是槽波在距离回风巷 200 m 处的运输巷发生反射而产生的反射槽波。

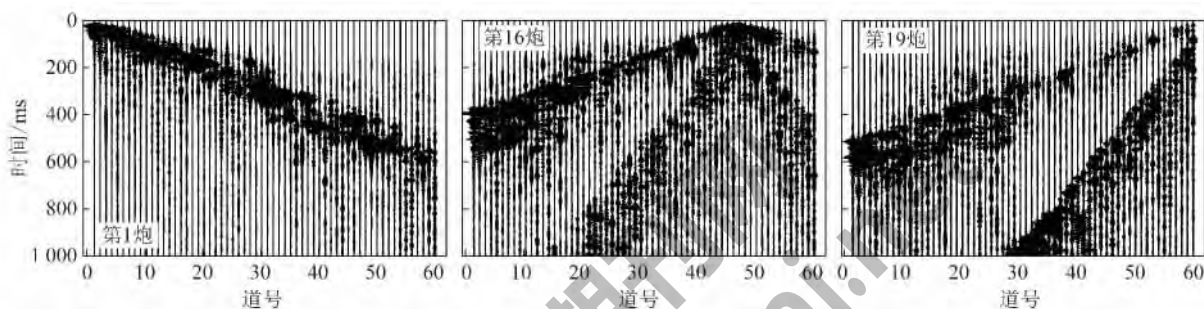


图 3 原始数据

Fig. 3 Original data

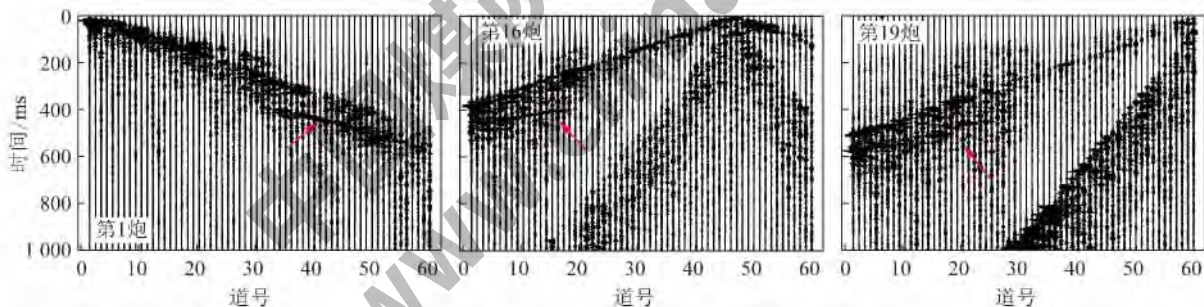


图 4 反褶积后结果

Fig. 4 Results of deconvolutions

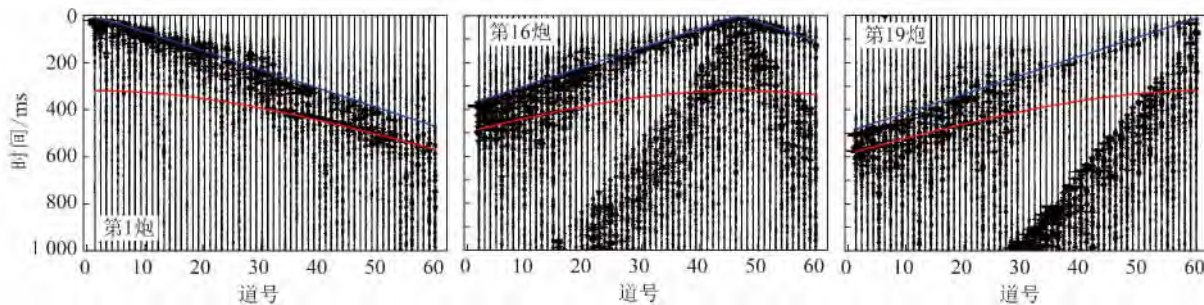


图 5 时距曲线与实际数据对比

Fig. 5 Contrasting of time-distance curves and real data

为了进一步推断该组波是否为反射槽波,笔者对其进行了频散分析。首先选取在运输巷放炮并在回风巷接收所得到的透射槽波数据,如图 6(a) 所示。

图 6(b) 是由多次滤波法^[1]求出的透射槽波速度频率谱。41108 工作面煤厚 10.6 m,煤层横波速度 1 300 m/s、密度 1.6 g/cm³,围岩横波速度 2 300 m/s、

密度 2.2 g/cm^3 。根据这些岩性参数,正演得到 Love 型槽波的群速度频散曲线如图 6(b) 中黑色线条所示。从图 6(b) 可以看出: 群速度频散曲线的正演结果与由实际数据求得的速度频率谱较为吻合; 受检波器接收频段以及检波器安装位置的限制,所采集到的透射槽波主要为 Love 型的 1 阶振型,其主频为 150 Hz, Airy 相速度约为 $1\,250 \text{ m/s}$, 基阶振型较弱, 2 阶振型稍强。从图 3 所示的第 1 炮数据中将直达槽波和声波切除,仅保留需要研究的那组波,所得结果如

图 6(c) 所示。现假定工作面内部在距离回风巷 200 m 处有一个与回风巷平行的反射面存在,由此确定每一道数据所对应的传播路径长度,再由多次滤波法获得这组波的速度频率谱。所得到的速度频率谱及其与 Love 型槽波频散曲线的对应关系如图 6(d) 所示。通过比较图 6(b) 与图 6(d) 可以看出: 这组波具有与透射槽波相似的主频和 Airy 相速度。因此,可以认为这组波就是距离回风巷 200 m 处的运输巷的反射槽波。

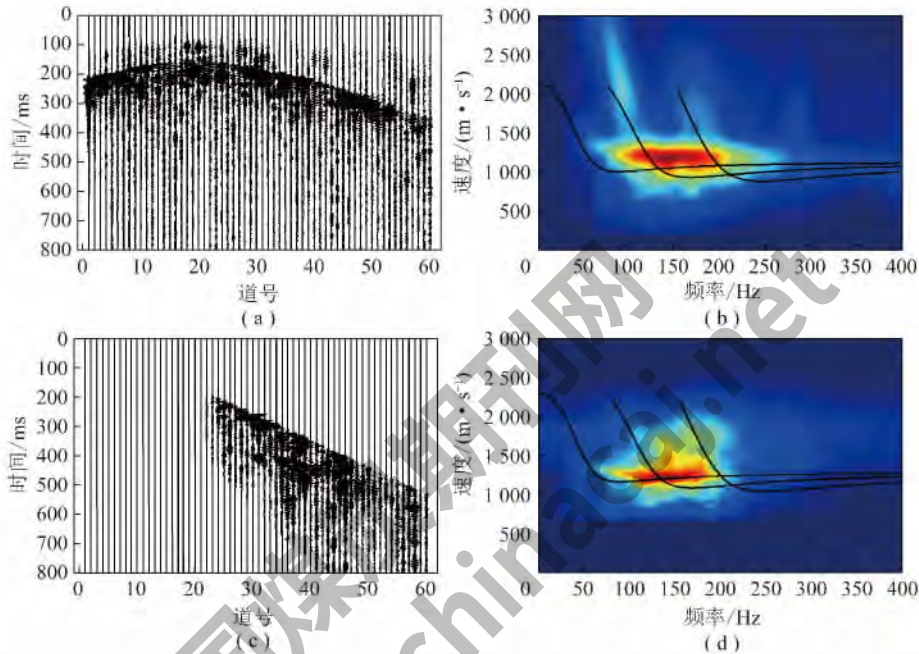


图6 透射槽波与反射槽波群速度频散曲线对比

Fig. 6 Contrasting of dispersion curves of transmitted and reflected in-seam waves

仿照大恒煤业 41108 工作面的地质情况与物性参数,笔者建立了三维数值模型。模型大小为 X 方向 800 m, Y 方向 400 m, Z 方向 30 m。模型分为 3 层,顶板围岩、煤层、底板围岩的物性参数,以及煤厚等均与 41108 工作面的参数相同。模型中存在 2 条相距 200 m 的巷道,并在一条巷道内布置炮点和检波点,检波点间距同样为 10 m。选择实际数据中第 16 炮的炮点位置为震源的激发位置,震源采用雷克子波,主频为 120 Hz。图 7(a) 是得到的弹性波数值模拟的 Y 分量记录,其速度频散谱如图 7(b) 所示。经过反褶积后的数据以及反射槽波的速度频散谱如图 7(c), (d) 所示。从图 7 中红色圆圈可以看出,反褶积使直达槽波和反射槽波的波列变短,相位一致性增强。从速度频率谱的变化也可以看出,反褶积后反射槽波在速度频散谱上的能量向各阶振型的 Airy 相位处收敛,与图 6(b) 中理论频散曲线的 Airy 相更接近了。这说明反褶积后反射槽波的频散性减弱了,槽

波的 Airy 相更加突出。

经过反褶积处理后,直达波的能量和一致性也得到了增强,这会对成像带来严重干扰。图 8 是利用径向道变换法压制直达槽波和声波的结果图。其中图 8(a) 是第 1 炮反褶积后结果,图 8(b) 是将图 8(a) 中数据用径向道变换法由 $t-x$ 域变换到 $v-x$ 域的结果,可以看出在 $v-x$ 域内速度低的声波频率提高,速度高的直达槽波频率降低。选择合适的参数进行带通滤波后,再变换回 $t-x$ 域,得到图 8(c) 数据,其中直达槽波与声波得到了有效的压制。

在压制直达槽波的能量后,可利用本文方法对探测区域成像。首先建立一个 X 方向 700 m, Y 方向 300 m 的成像区,然后对成像区内每一个点采用式 (9) 计算叠加振幅,偏移速度均取 $1\,250 \text{ m/s}$,同时按照入射角对叠加结果加权,就可以得到巷道的成像结果。图 9 是成像结果与 41108 工作面矿图的套叠图,可以看出距离回风巷 200 m 处的较强能量条带与

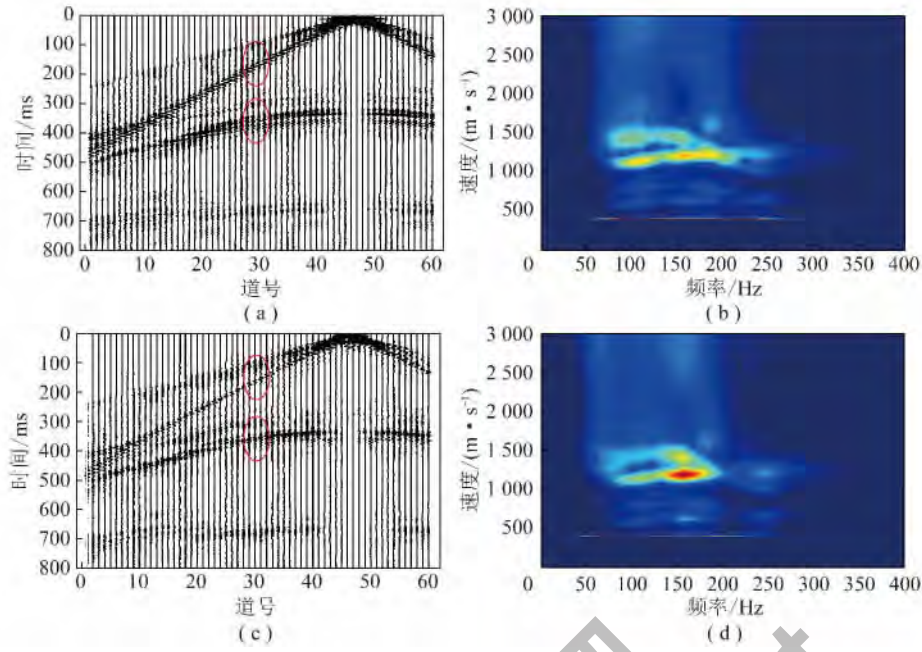


图 7 反褶积前后的模拟数据及反射槽波速度频率谱

Fig. 7 Seismograms and velocity-frequency spectra of deconvolution of simulated reflected in-seam waves

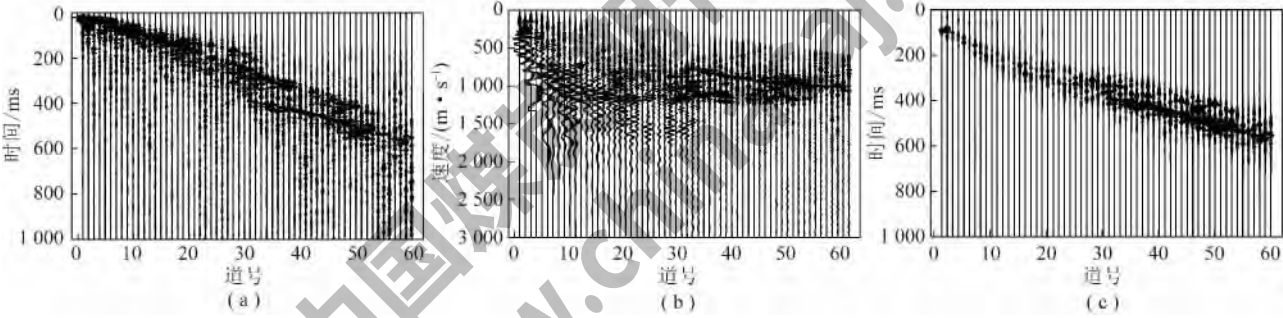


图 8 径向道变换与滤波结果

Fig. 8 Results of radial trace transform and filter

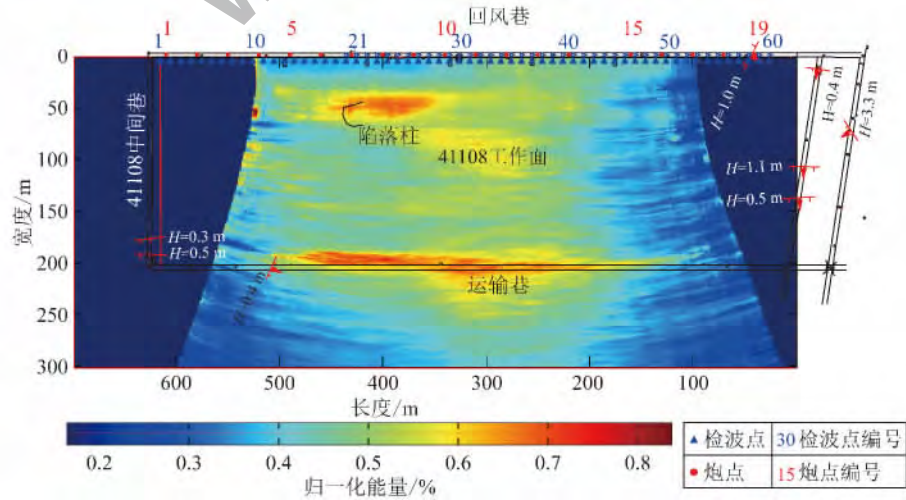


图 9 绕射偏移成像结果

Fig. 9 Results of diffract migration

运输巷位置吻合。另外,实际回采过程中在图中坐标(400,50)附近揭露出一个陷落柱,而在成像结果上该位置处也有一个能量较强的区域与之对应。然而由于直达槽波的波列经过压缩和振幅压制以后仍然较长,能持续100 ms左右。因此认为距离回风巷道60 m以内的异常,包括这个与陷落柱对应的异常,可能只是直达槽波带来的干扰。

6 结论与讨论

(1) 由实际井下实验的结果可以看出,采空巷道可以产生反射槽波,可利用反射槽波探测同一煤层内采空区的位置和规模。另外,图4中第19炮的第1道数据仍有较强的反射槽波,此位置处震源点距检波器已超过600 m,两条巷道相距200 m,则根据三角关系知槽波从发生反射到被检波器接收,传播距离超过了360 m。由此可见反射槽波具有很长的探测距离,特别适合大范围内的构造探测。

(2) 采空巷道的反射槽波经过基于反褶积的增强方法处理之后,能量集中且与时距曲线吻合程度较高,具有很好的可叠加性,这为产生高质量的成像结果提供了基础。比如本例中,可在绕射偏移法得到的成像结果中估计采空巷道走向,再根据地面地震方法重新抽道集,再经过NMO、速度分析等操作,可叠加出高质量的成像结果。

(3) 本次试验所采集的反射槽波在远道较强,而在近道很弱。这一现象在其他几次反射槽波试验中均有不同程度的表现。造成此现象的原因十分复杂,可简单的将槽波看作是从震源出发,在反射点发生反射后,再被检波器接收到的一条射线。在反射面上,这条射线从高速的煤层中射向低速的采空巷道内的空气中,其反射过程受到菲涅尔公式的约束,反射系数随入射角的增大而增大,在与巷道垂直时最小,而在与巷道几乎平行时最大。由于这个现象的存在,在设计反射槽波的观测系统时应尽量保持一定的偏移距,这样才能获得较好的反射槽波数据。

参考文献:

- [1] 刘盛东,郭立全,张平松. 巷道前方地质构造 MSP 法超前探测技术与应用研究[J]. 工程地球物理学报,2006,3(6):437-442.
Liu Shengdong,Guo Liqun,Zhang Pingsong. Experiment and application study of fore detecting by MSP method for geological structure in laneway[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2006,3(6):437-442.
- [2] Zhao Yonggui,Jiang Hui,Zhao Xiaopeng. Tunnel seismic tomography method for geological prediction and its application[J]. Applied Geophysics,2006,3(2):69-74.
- [3] Mason I M,Buchanan D J,Boorer A K. Fault location by underground seismic survey[J]. IEEE Proc.,2006,127:322-366.
- [4] Buchanan D J. Fault location by channel wave seismology in United Kingdom coal seams[J]. Geophysics,1981,46:994-1002.
- [5] Buchanan D J. In-seam seismology: A method for detecting faults in coal seams[A]. Underground Geophysics of Coal Seams[C]. London and New York: Applied Science Publishers,1983.
- [6] Dresen L,Ruter H. Seismic coal exploration,part B: in-seam seismics[M]. New York: Pergamon Press,1994:388-394.
- [7] Hu Y,McMechan G. Imaging mining hazards within coal beds using prestack wave equation migration of in-seam seismic survey data: A feasibility study with synthetic data[J]. Journal of Applied Geophysics,2007,63:24-34.
- [8] 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.
- [9] Lu Wenkai,Wang Ji,Cheng Jianyuan. Channel wave tomography for detecting inhomogenities in coal seam: A real dataset example[A]. 75th EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE EUROPEC[C]. UK: ExCel,London,2013.
- [10] 程建远. 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.
Cheng Jianyuan. Love channel-waves dispersion characteristic analysis of typical coal models[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(1):68-72.
- [11] 刘天放,潘冬明,李德春,等. 槽波地震勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社,1994.
- [12] Boorer A K. Underground geophysics of coal seams,developments in geophysical exploration methods[M]. London: Applied Science Publishers,1982.
- [13] 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.
- [14] 刘志鹏,陈小宏,李景叶. 径向道变换压制相干噪声方法研究[J]. 地球物理学进展,2008,23(4):1199-1204.
Liu Zhipeng,Chen Xiaohong,Li Jingye. Study on coherent noise attenuation using radial trace transform filtering[J]. Progress in Geophysics,2008,23(4):1199-1204.
- [15] 余波,黄中玉,谈大龙,等. 径向道滤波法去线性干扰[J]. 石油物探,2005,44(2):109-112.
Yu Bo,Huang Zhongyu,Tan Dalong,et al. RT filter attenuating the linear noise[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2005 44(2):109-112.