

冯磊,周明奂,董郑等. 矿井槽波地震数据极化特征分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1886–1893. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1534
Feng Lei, Zhou Minghuan, Dong Zheng, et al. Polarization characteristic analysis of in-seam seismic data[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1886–1893. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1534

矿井槽波地震数据极化特征分析

冯磊,周明奂,董郑,余为维

(河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 矿井槽波地震采集数据中, 包含有多种类型地震波, 这些波常常叠合在一起, 使得槽波信号提取困难。根据槽波质点振动极化特征差异, 提出基于 S 变换的自适应协方差矩阵槽波极化分析方法, 构建时频域自适应协方差矩阵, 依据矩阵特征值和特征向量计算椭圆率和方位角极化参数, 通过极化参数分析信号振动轨迹特征, 设置极化滤波器, 对槽波水平双分量信号进行波场分离。通过理论合成信号测试, 利用信号在时频域振动极化特征可以分离在时间域和频率域叠合的信号; 实际槽波数据极化分析发现, 线性极化的勒夫型槽波和椭圆极化的瑞利型槽波基本复合在一起, 通过时频域极化滤波可以有效分离。

关键词: 槽波; 勒夫型; 瑞利型; 极化; 分离

中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)08-1886-08

Polarization characteristic analysis of in-seam seismic data

FENG Lei, ZHOU Ming-huan, DONG Zheng, YU Wei-wei

(School of Resources and Environments, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: There are several types of seismic waves in in-seam seismic exploration. These waves always compose together. It's difficult to extract channel wave signal and causes interference to seismic data processing. According to the characteristic difference of channel wave particle vibration, this paper proposed a polarization analysis method based on adaptive covariance matrix in time-frequency domain for channel waves. Using the eigenvalues and eigenvectors of this matrix to compute ellipticity and azimuth polarization parameters, authors analyzed signal vibration trajectory characteristic. Horizontal dual component signal of channel wave field could be separated by setting up polarization filter with polarization parameters. Through theoretical synthetic signal test, polarization vibration characteristic was accurately described in time-frequency domain and the composition signal in time domain and frequency domain was separated completely. In practical in-seam seismic data polarization analysis, the results show that linear polarization love wave and elliptical polarization Rayleigh wave are nearly composited together. Using this method, channel wave can be clearly separated in time-frequency domain.

Key words: channel wave; love wave; rayleigh wave; polarization; separation

自从 2010 年德国 DMT 公司防爆槽波地震仪引入国内市场以来, 槽波地震勘探技术重新引起各煤矿的广泛关注。由于槽波在煤层传播过程中, 携带了大量煤层地质信息, 因此槽波在煤层厚度、瓦斯富集区、

收稿日期: 2014-11-13 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-005); 国家自然科学基金资助项目(41202084); 河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(14IRTSTHN002)

作者简介: 冯磊(1978—), 男, 河南焦作人, 讲师, 博士。E-mail: feng.lei@126.com

断层构造探测等方面取得较好的效果^[1-2]。

槽波地震勘探方式包括透射波法和反射波法 2 种。在透射波法槽波勘探中,主要利用勒夫型槽波;在反射波法槽波勘探中,主要利用瑞利型槽波。实际采集的槽波数据中,由于频散现象严重,勒夫型槽波和瑞利型槽波常常叠合在一起,区分困难。如不能准确分离这 2 类槽波,将为后期频散分析及速度成像等处理带来极大误差。因此,在槽波地震勘探资料处理过程中,有效分离槽波是研究的重点。

1 煤层中地震波传播类型

目前国内外学者对槽波产生机理的认识基本相同,均认为震源在煤层中激发后,产生纵波和横波。横波包括 SH 波和 SV 波。地震波传播过程中,由于煤层中传播速度明显小于顶板和底板的速度,煤层顶、底板表现为强波阻抗反射界面,使得地震波传播到煤层顶、底板后,又反射回煤层,导致地震波在煤层中相互干涉、叠加形成槽波。根据波振动形式,槽波分为 2 种类型:由 SH 波叠加干涉后形成的勒夫型槽波和 P-SV 波叠加干涉形成的瑞利型槽波。勒夫型槽波为线性极化波,质点振动方向与煤层面平行,与波传播方向垂直,运动轨迹为线状;瑞利型槽波属于椭圆极化波,质点振动方向与煤层面垂直,与波传播方向平行,运动轨迹为椭圆状^[3-5]。

此外,还有沿着煤层顶、底板界面传播的折射波,以及直接从震源传播到检波器的直达纵波和直达横波^[6]。

由于槽波形成受煤层和围岩速度的直接影响,采集的地震波信号中,槽波类型有所区别。图 1 反射波中垂直极化的 SV 波入射到煤层顶、底板反射界面时,部分能量形成转换纵波;如果转换纵波不满足全反射条件,即煤层纵波速度小于围岩横波速度时,能量将主要以透射波形式传播到围岩,煤层内部将不能形成瑞利型槽波。勒夫型槽波由反射波中 SH 波干涉形成,只要煤层横波小于围岩横波就能满足全反射条件,该条件一般都能满足^[2]。因此实际采集数据中,受煤矿地质条件影响,在地震记录上槽波表现特征并不相同,对槽波的判别多依赖信号波形特征。

以义安煤矿 11061 工作面透射法槽波数据为例,其中第 16 炮记录如图 2 所示,每炮共有 44 道地震数据,其中 1~22 道数据为 X 分量,23~44 道数据为对应位置的 Y 分量。通常认为地震记录中,直达纵波最先接收到,跟随其后的是直达横波,最后振幅最强、频率最高的是瑞利型槽波,而在直达横波和瑞利型槽波之间振幅较弱的波为勒夫型槽波。这种认识只是

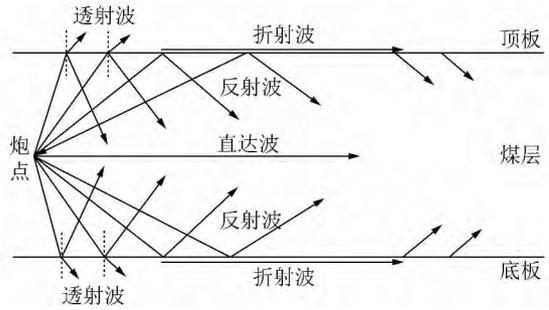


图 1 槽波形成示意

Fig. 1 Channel wave schematic diagram

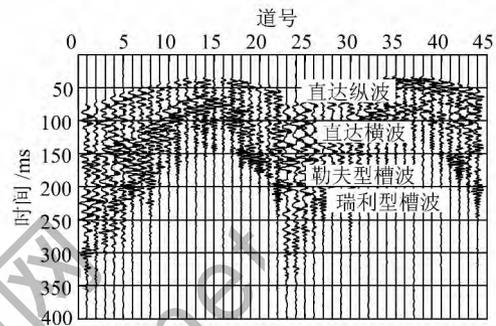


图 2 第 16 炮原始槽波数据

Fig. 2 Channel wave data of 16 shot

从地震波传播理论上进行推断,并没有直接的判定证据。本研究从地震波的极化运动特征入手,分析不同类型槽波极化特征。

2 槽波地震极化分析技术

2.1 多分量地震波分离方法

目前,国内外学者对天然地震三分量数据等进行波场分离研究较多。其中,基于极化滤波的波场分离方法效果明显^[7]。极化滤波波场分离方法是根据波在空间运动轨迹的极化特征进行分离的一种信号处理技术,依据各类波的极化属性差异,构建合理的滤波器,进而提取各类波信息。1965 年,Flinn 最早提出了极化分析方法^[8],许多学者在其基础之上不断进行改进,逐渐形成 2 类极化滤波方法:① 特征值法。该方法在时间域内构建标准协方差矩阵,或者在频率域中构建谱密度矩阵,利用求解得到的特征值和特征矩阵进行极化分析,该类极化方法计算结果相对稳定,受噪音影响小,但在计算过程中,需要在一定时间窗口内进行,不同的时窗长度,计算结果相差较大^[9-10];② 直接计算法。通过 Hilbert 变换、小波变换或 S 变换等,直接计算瞬时属性参数进行极化分析,这类方法计算简便,但由于使用瞬时属性,使得噪音影响较大^[11-15]。

Diallo 等给出了一种新颖的极化滤波算法,该方法基于时间域的自适应协方差矩阵,其优点在于能够

依据瞬时频率自适应地调整时间窗口的长度到时窗内信号的最小周期,避免了常规协方差极化方法受时窗长度影响大的难题^[16]。同年,Diallo 等又将该方法引入时频域,利用小波变换,在时频域内进行自适应协方差极化分析^[17]。矿井槽波地震数据中包含有多种类型波,既有线性极化的纵波、横波和勒夫型槽波,也有椭圆极化的瑞利型槽波。这些波有的在时间上重叠,有的在频率上重叠。如果单纯从时间域或频率域进行极化滤波,难以完全分离。因此,在时频域进行极化滤波,适用于含有多种类型波的槽波地震数据。

本研究基于 Diallo 的自适应协方差矩阵极化方法,在时频域内进行计算。对于时频变换算法,没有采用 Diallo 提出的小波变换,因为小波变换是在时间域和尺度域进行计算,尺度和频率并没有直接对应关系。因此,选择同样具有分辨率可随频率变化,且具有明确频率意义的 S 变换^[18]。

2.2 时频域自适应协方差矩阵

槽波地震勘探多使用双分量水平检波器采集信号,获取水平方向的双分量数据。设定槽波地震信号为 $s(t)$,对其 S 正变换公式为

$$ST(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (1)$$

对应 S 逆变换公式为

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} ST(\tau, f) d\tau \right) e^{i2\pi f t} df \quad (2)$$

式中 t, f 分别为时间和频率; τ 为位移。

设频率 f 时的 S 变换频谱为 $ST(t, f)$,通过 Hilbert 变换计算对应虚部,获得解析信号,计算瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位 3 个参数。则该频率 f 下的 S 变换时频谱 $ST(t, f)$ 在时间 t 附近的局部信号 $s(t + \tau, f)$ 可用解析信号的瞬时参数来近似表达^[16]。

令 $ST_x(t, f)$ 和 $ST_y(t, f)$ 分别为槽波信号 $s(t)$ 两个水平分量 $s_x(t)$ 和 $s_y(t)$ 对应的 S 变换时频谱,则

$$\begin{cases} s_x(t + \tau, f) \approx |ST_x(t, f)| \cos \left[\Omega_x(t, f) \tau + \arg ST_x(t, f) \right] \\ s_y(t + \tau, f) \approx |ST_y(t, f)| \cos \left[\Omega_y(t, f) \tau + \arg ST_y(t, f) \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中, $|ST_x(t, f)|$ 和 $|ST_y(t, f)|$ 为 2 个水平分量对应解析信号的瞬时振幅; \arg 代表瞬时相位; $\Omega_x(t, f)$ 和 $\Omega_y(t, f)$ 为瞬时频率,定义为

$$\begin{cases} \Omega_x(t, f) = \frac{\partial}{\partial t} \arg ST_x(t, f) \\ \Omega_y(t, f) = \frac{\partial}{\partial t} \arg ST_y(t, f) \end{cases} \quad (4)$$

在瞬时频率计算过程中,不能通过式(4)直接对瞬时相位进行求导,因为瞬时相位是由反正切函数计算得出,其分布范围在 $[-\pi, \pi]$,当信号振动变化时,有可能造成正负相位角跳转。因此,需要对瞬时相位进行相位展开,避免相位角正负跳转导致瞬时频率计算错误。

依据式(3)即可构造时频域自适应协方差矩阵 $MST(t, f)$ 为

$$MST(t, f) = \begin{bmatrix} I_{xx}(t, f) & I_{xy}(t, f) \\ I_{xy}(t, f) & I_{yy}(t, f) \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵中各元素定义为

$$\begin{aligned} I_{km}(t, f) &= |ST_k(t, f)| |ST_m(t, f)| \times \\ &\left\{ \sin c \left[\frac{\Omega_k(t, f) - \Omega_m(t, f)}{2} T_{km}(t, f) \right] \times \right. \\ &\cos [\arg ST_k(t, f) - \arg ST_m(t, f)] + \\ &\left. \sin c \left[\frac{\Omega_k(t, f) + \Omega_m(t, f)}{2} T_{km}(t, f) \right] \times \right. \\ &\left. \cos [\arg ST_k(t, f) + \arg ST_m(t, f)] \right\} - \\ &\mu_{km}(t, f) \mu_{mk}(t, f) \quad (k, m = x, y) \quad (6) \end{aligned}$$

$$\mu_{km}(t, f) = \text{Real} [ST_k(t, f)] \sin c \left[\frac{W_{km}(t, f) \Omega_k(t, f)}{2} \right] \quad (k, m = x, y) \quad (7)$$

其中, $\sin c(x)$ 代表正弦基本函数,定义见式(8); Real 为复数的实部; $W_{km}(t, f)$ 为对应方程的自适应窗大小,定义见式(9); $\Omega(t, f)$ 为信号在时频域的瞬时频率。

$$\sin c(t) = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ \frac{\sin t}{t} & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$W_{km}(t, f) = \frac{4\pi N}{\Omega_k(t, f) + \Omega_j(t, f)} \quad (k, m = x, y) \quad (9)$$

式中, N 取正整数,为经验参数,一般为 1 或 2。

通过时频域自适应协方差矩阵 $MST(t, f)$ 即可计算槽波信号时频域中每个时频采样点的极化参数,避免了在时窗内进行计算,导致窗口长度影响大的问题。通过对该矩阵进行特征值分析,就能得到槽波地震信号的瞬时极化参数分布。

2.3 槽波极化特征分析参数

由于槽波数据接收水平方向双分量信号,即使地

震波是在三维空间运动,也只能分析其投影在水平面内的运动轨迹。槽波地震信号振动轨迹的大小和方向可通过极化特征参数来描述,这些参数可利用时频域自适应协方差矩阵 $MST(t, f)$ 的特征值和特征向量计算获得。当槽波信号中地震波线性极化时,矩阵只有一个特征值,对应特征向量的矢量方向即为地震波的线性极化方向;当地震波在平面内近似椭圆轨迹振动时,矩阵有 2 个特征值 (λ_1, λ_2) , 对应特征向量 (V_1, V_2) , 地震波信号能量主要集中在最大特征值 λ_1 上。利用矩阵的特征值定义椭圆半轴,令椭圆极化长轴为 $\sqrt{\lambda_1(t, f)}$, 极化短轴为 $\sqrt{\lambda_2(t, f)}$ 。进行槽波极化分析时,有 2 个极化特征参数最重要,分别是椭圆率 $\rho(t, f)$ 和方位角 $\alpha(t, f)$ 。椭圆率定义为椭圆极化长轴与极化短轴之商,公式为

$$\rho(t, f) = \frac{\sqrt{\lambda_2(t, f)}}{\sqrt{\lambda_1(t, f)}} \quad (10)$$

椭圆率 $\rho(t, f)$ 的数值范围在 $[0 \sim 1]$ 。当 $\rho = 0$ 时,代表地震波为线性极化,如纵波、横波和勒夫型槽波;当 $\rho = 1$ 时,表示地震波为圆极化;当 $\rho \in (0 \sim 1)$ 时,意味着地震波为椭圆极化,如瑞利型槽波。

方位角 $\alpha(t, f)$ 定义为波振动轨迹的极化方向,通过椭圆极化长轴方位角度来表示。用矩阵 $MST(t, f)$ 的最大特征值 λ_1 对应的特征向量 V_1 的方向来计算,具体公式如下:

$$\alpha(t, f) = \arctan \frac{V_{1y}(t, f)}{V_{1x}(t, f)} \quad (11)$$

方位角的数值范围在 $[-\pi/2, \pi/2]$, 为便于分析,可将其转换为 $[0, \pi]$ 。理论上,纵波振动方向与传播方向一致,横波振动方向与传播方向垂直。煤层中安置检波器难以完全和波传播方向一致,且只有水平方向的 2 个检波器,因此,记录下来的地震波信号只是三维空间传播的信号在水平方向上的投影,计算得到的方位角和地震波传播的真实方位角有一定偏差,但不同类型地震波对应极化方位角不同,仍然可以作为重要的极化参数进行波场分离。

2.4 槽波极化分离滤波器设计

槽波地震数据中包含有多种类型地震波,这些波极化振动轨迹不同,依靠椭圆率和方位角 2 个极化参数即可构建时频域极化滤波器,分离槽波数据中不同类型地震波。构建滤波器为

$$F(t, f) = \begin{cases} ST(t, f) & \rho(t, f) \in p_\rho, \text{ 且 } \alpha(t, f) \in p_\alpha \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

对于线性极化的纵波、横波和勒夫型槽波,其椭圆率 $\rho(t, f)$ 理论上应该为 0。实际数据中,由于噪音

等干扰,一般认为小于某一特定值(如 0.2)即为线性极化;大于该数值时,认为信号为椭圆极化。不同类型波的极化方位角不同,实际资料处理时,可以根据信号振动轨迹图判断各类型地震波对应的方位角范围。经过滤波器筛选后,保留椭圆率和方位角极化参数设定范围内的时频域数据点,然后依据式(2)进行 S 逆变换,获得分离后的槽波信号。

3 理论合成信号极化特征分析

3.1 理论测试信号合成

为验证该方法的合理性和有效性,采用 Diallo 提出的阻尼衰减正弦波合成理论信号进行模拟测试^[16]。

为模拟实际采集槽波地震数据,合成水平双分量信号(图 3),同时包括线性极化和椭圆极化信号,具有不同的主频和极化特征,合成信号分为 A、B、C 三部分,共有 4 个信号组成。其中, A 部分从 0 ~ 0.4 s,为单一椭圆极化波(信号 1); B 部分从 0.4 ~ 0.8 s,是单一线性极化波(信号 2); C 部分从 0.8 ~ 1.2 s,由线性极化波和椭圆极化波合成(信号 3、4),各信号具体参数见表 1。对该合成信号进行分离来验证方法的准确性。

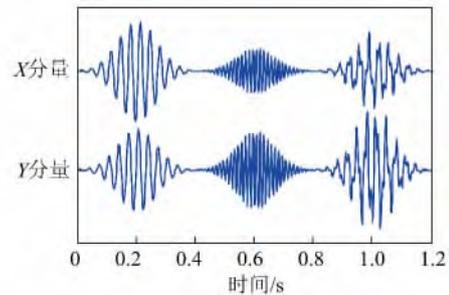


图 3 测试信号的合成

Fig. 3 Synthetic test signal

表 1 合成测试信号基本参数

Table 1 Parameters of synthetic test signal

序号	信号组成	主频/Hz	长轴	短轴	方位角/(°)
1	A 部分(椭圆极化)	30	0.6	0.4	30
2	B 部分(线性极化)	80	0.5	0	60
3	C(椭圆极化部分)	30	0.5	0.3	90
4	C(线性极化部分)	80	0.3	0	120

3.2 极化参数分布特征

如果对该合成信号从时间域进行极化分离,那么由不同频率合成同一时间段的信号 3、4 难以分离。如果从频率域进行极化分离,合成信号的 1、3 和 2、4 频率相同,效果不明显。因此,在时频域进行极化分离,

充分利用信号在时间频率空间的极化特征进行分离。

采用时频域自适应协方差极化方法求取合成信号极化参数。经式(10)和(11)计算后,获得合成信号椭圆率和方位角极化参数时频分布(图4),椭圆率极化时频图4(a)中数据主要分布在2个红色区域,其位置与信号1和3相吻合,椭圆率数值约为0.7,与表1中信号真实椭圆率基本一致。图4中其余区域椭圆率为0,表示信号为线性极化。方位角极化分布(图4(b))中出现4个区域,分别与合成采用的4个信号相对应,方位角数值大小与真实方位角数值基本一致。

3.3 合成信号波场分离

通过椭圆率和方位角极化参数,建立极化滤波器对合成信号进行波场分离。设置信号对应极化参数,依次分离出由线性极化波和椭圆极化波组成的4个信号(图5)。可以看出:采用该方法在时频域进行极化滤波,不但可以有效分离时间域叠合信号(信号3,4),还可以有效分离频率域复合在一起的信号(信号1,3和2,4);同时,不会对原始信号造成破坏。在实际槽波信号波场分离过程中,还可以通过设定频谱段进行限制,以消除部分高频噪音成分。

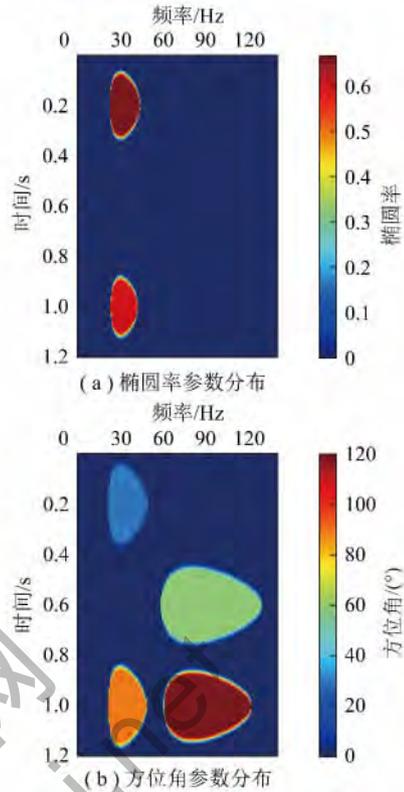


图4 合成信号极化参数分布

Fig. 4 Polarization distribution of synthetic signal

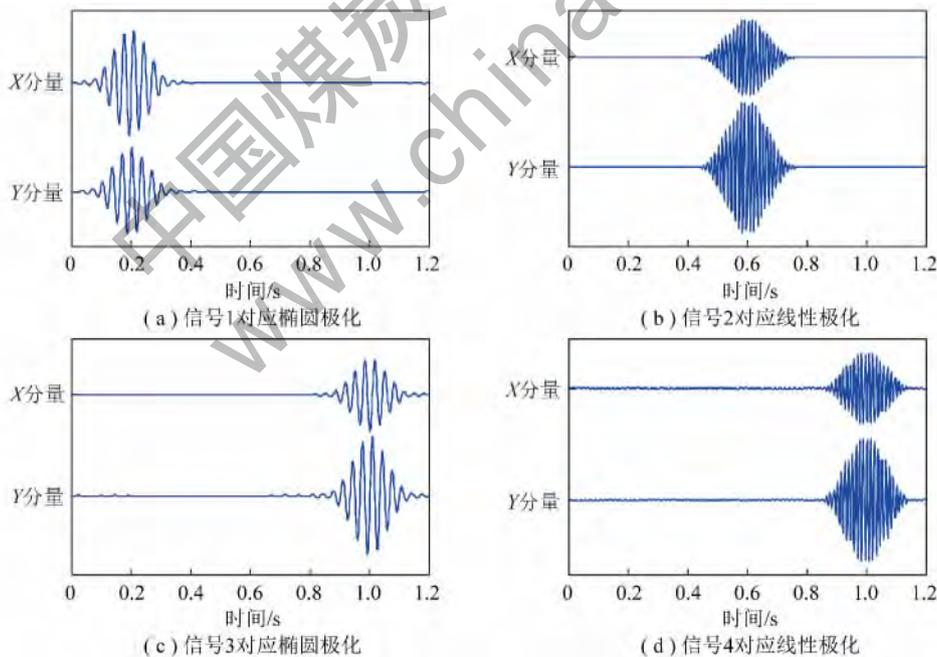


图5 分离出合成信号4个组成部分

Fig. 5 Four components separation of synthetic signal

4 实际槽波数据极化分析

4.1 采集槽波数据信号特征

以义安煤矿11061工作面实际透射法槽波勘探为例。数据采集使用双分量水平检波器,检波器安置

在煤层中心,但2个分量摆放方位不同,X分量检波器轴线平行于煤层且平行于煤壁,Y分量检波器轴线平行于煤层且垂直于煤壁。该工作面共采集36炮,以其中第16炮记录进行分析(图2)。提取第16炮记录中第20道X分量和对应的第42道Y分量数据

(图 6)。信号采样率 0.25 ms。其质点振动轨迹(图 6(a)) 杂乱无章,表明该信号中地震波类型复杂,既包含线性极化波,也包含椭圆极化波。在信号 135 ~

190 ms 振幅最强、频率最大的位置即为埃里震相。由于槽波频散现象严重,从图 6 中很难直接区分开勒夫型槽波和瑞利型槽波。

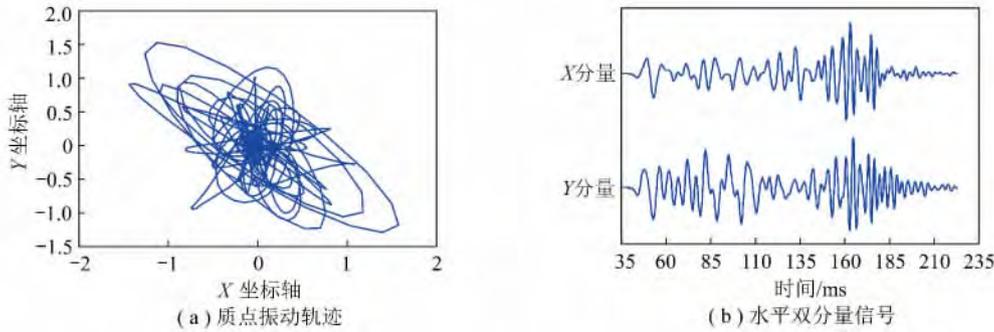


图 6 实际采集槽波地震数据
Fig. 6 Actual in-seam seismic data

通过 S 变换分析 X 分量和 Y 分量在时频域振幅谱分布特征(图 7) 振幅能量最强的区域分布在 160 ~ 180 ms,信号主频在 250 Hz 左右;图 7(b) 中,在 60 ~ 110 ms,由 2 个主频分别为 100 Hz 和 200 Hz 的信号组合在一起。该位置通常认为是直达纵波和横波,从图中现象可以认为,该位置应该包含 2 种频率成分不同的地震波。

方法对数据(图 6(b)) 进行处理,计算椭圆率和方位角极化参数在时频域分布(图 8)。

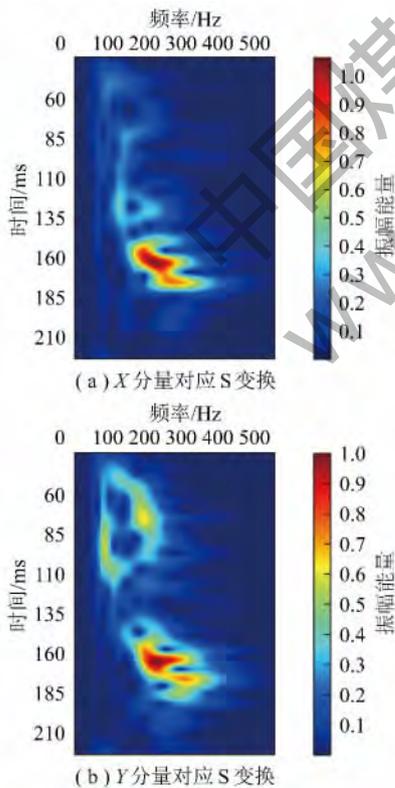


图 7 信号对应 S 变换
Fig. 7 S transform of signal

4.2 槽波极化特征分析

采用本文提出的时频域自适应协方差极化分析

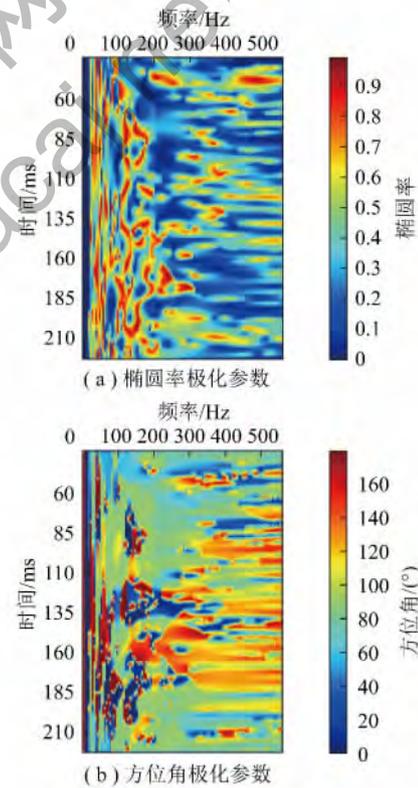


图 8 极化参数分布
Fig. 8 Polarization parameter distribution

由于实际地震波类型复杂,且存在噪音干扰,得到的椭圆率和方位角图中存在较大干扰。为减小噪音导致的瞬时频率计算误差,可舍去 S 变换后的时频能量谱小于背景噪声值的数据点,或者进行带通滤波,去除高频噪音。

为详细分析图 8 中极化参数分布特征,提取图中 250 Hz 时的信息,得到椭圆率和方位角在 250 Hz 的

变化曲线(图9)。

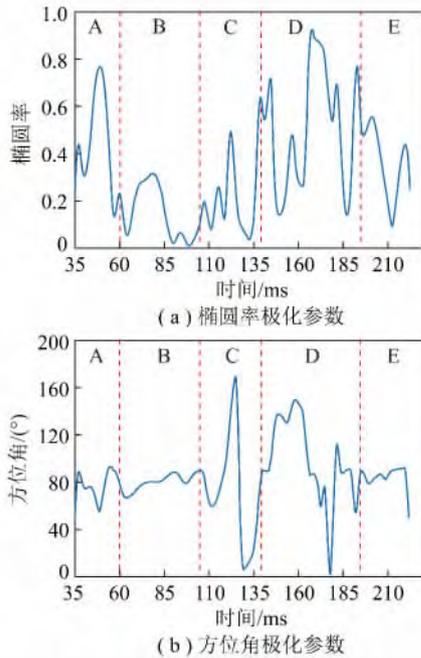


图9 250 Hz 时极化参数曲线

Fig. 9 Polarization parameter curves in 250 Hz

图9中,将曲线近似分成5个区域,区域A中椭圆率有波动,但数值基本大于0.2,可以认为该区域为椭圆极化振动,质点振动方位角变化幅度不大,约为 80° ;区域B中,椭圆率较低,数值变化不大,推断该区域为线性极化振动,方位角几乎没有变化,同样为 80° ;区域C中,椭圆率变化剧烈,但多数数值小于0.2,因此仍近似认为该区域为线性极化震动,但方位角变化较大,在 $0^\circ \sim 160^\circ$;区域D中,椭圆率数值基本大于0.2,近似认为是椭圆极化震动,方位角变换幅度较小,在 $80^\circ \sim 140^\circ$,但在180 ms处,数据有异常;同样,区域E中依据椭圆率变化情况,认为是椭圆极化振动,方位角保持稳定在 80° 左右。

4.3 分离勒夫型和瑞利型槽波

为提取勒夫型和瑞利型槽波信号,依据槽波椭圆率、方位角极化参数分布特征和质点振动轨迹特征,设置极化滤波器参数,提取椭圆率小于0.2,且方位角在 $120^\circ \sim 160^\circ$ 的数据(图10)。分离后的数据即为勒夫型槽波信号,主要分布在140~190 ms,频散现象明显。对应质点振动轨迹(图10(a))表现为线性极化振动规律。

同样,改变极化滤波器参数,提取出椭圆率大于0.2,方位角 $120^\circ \sim 160^\circ$ 的数据(图11),近似认为提取的信号为瑞利型槽波信号。其分布区域与勒夫型槽波信号几乎相同,瑞利型槽波信号只是稍微滞后勒夫型槽波,且其分布区域相对较窄。对应质点振动轨迹(图11(a))表现为椭圆极化振动特征。

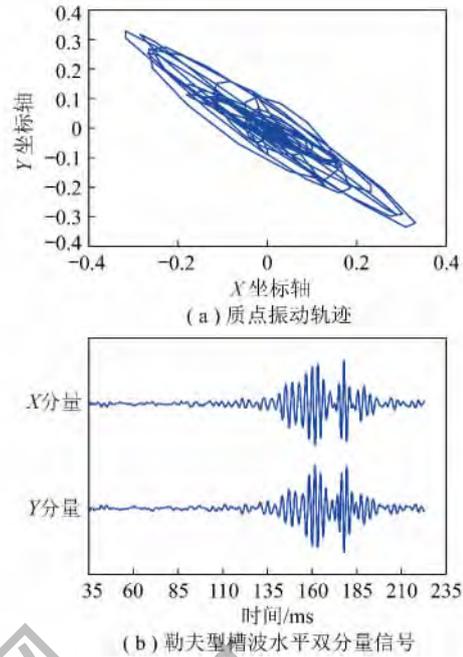


图10 提取出的勒夫型槽波

Fig. 10 Extract Love channel wave

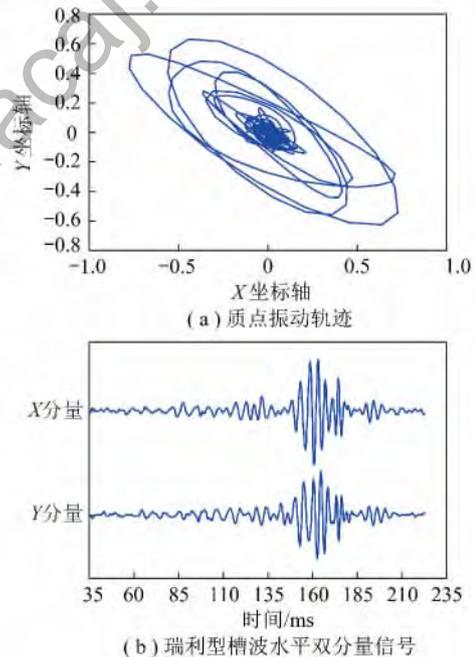


图11 提取出的瑞利型槽波

Fig. 11 Extract Rayleigh channel wave

对比提取出的勒夫型和瑞利型槽波信号,可以看出:这2种类型槽波在时间域和频率域基本叠合在一起,但其质点振动轨迹完全不同,采用时频域极化分析方法,可以有效分离勒夫型和瑞利型槽波。

5 结 论

(1) 在时频域进行极化分析可以克服只在时间域或频率域进行极化分析的缺陷,避免无法分离在时

间或频率上复合在一起的信号。

(2) 采用自适应协方差极化分析技术,可以避免窗口长度的影响,又能获得每个数据点的极化信息。

(3) 通过椭圆率和方位角极化参数,建立极化滤波器,可以有效分离水平双分量槽波数据中各类地震波。

(4) 勒夫型槽波和瑞利型槽波信号在时间上基本复合在一起,瑞利型槽波只是稍微滞后,采用本文提出的极化滤波方法,能够有效分离。

感谢河南义马煤业集团股分有限公司地质研究所提供槽波数据和李松营教授级高工的大力支持。

参考文献:

- [1] 程建远,李浙龙,张广忠,等. 煤矿井下地震勘探技术应用现状与发展展望[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(2): 96-100, Cheng Jianyuan, Li Xilong, Zhang Guangzhong, et al. Current status and outlook of seismic exploration applied underground in coal mine [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2009, 32(2): 96-100.
- [2] 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): 439-451. Hu Guoze, Teng Jiwen, Pi Jiaolong, et al. In-seam seismic exploration techniques: A geophysical method predicting coal-mine disaster [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 439-451.
- [3] 王文德. 煤层的槽波赋存状况及其分类[J]. 煤炭学报, 1997, 22(4): 366-369. Wang Wende. Occurrence of the channel waves in coal seams and its classification [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(4): 366-369.
- [4] 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. Wei Wang, 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.
- [5] 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): 67-72. Cheng 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): 67-72.
- [6] 杨真,冯涛, WANG Shugang. 0.9 m 薄煤层 SH 型槽波频散特征及波形模式[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 442-449. Yang Zhen, Feng Tao, Wang Shugang. Dispersion characteristics and wave shape mode of SH channel wave in a 0.9 m-thin coal seam [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 442-449.
- [7] 马见青,李庆春,王美丁. 多分量地震极化分析评述[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 992-1003. Ma Jianqing, Li Qingchun, Wang Meiding. Review of multi-component seismic polarization analysis [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(3): 992-1003.
- [8] Flinn E A. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion [J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(12): 1874-1876.
- [9] Samson J C, Olson J V. Data-adaptive polarization filter for multi-channel geophysical data [J]. Geophysics, 1981, 46(10): 1423-1431.
- [10] Perelberg A I, Hornbostel S C. Applications of seismic polarization analysis [J]. Geophysics, 1994, 59(1): 199-210.
- [11] René R M, Fitter J L, Forsyth P M, et al. Multicomponent seismic studies using complex trace analysis [J]. Geophysics, 1986, 51(6): 1235-1251.
- [12] Morozov I B, Smithson S B. Instantaneous polarization attributes and direction filtering [J]. Geophysics, 1996, 61(3): 872-881.
- [13] Pinnegar C R. Polarization analysis and polarization filtering of three-component signals with the time-frequency S transform [J]. Geophysical Journal International, 2006, 165(2): 596-606.
- [14] 谭玉阳,何川,王艳冬,等. 基于 S 变换时频域极化滤波的面波压制方法研究[J]. 应用地球物理, 2013, 10(3): 279-294. Tan Yuyang, He Chuan, Wang Yandong, et al. Ground roll attenuation using a time-frequency dependent polarization filter based on the S transform [J]. Applied Geophysics, 2013, 10(3): 279-294.
- [15] 陈赞,张中杰,田小波. 基于加窗 Hilbert 变换的复偏振分析方法及其应用[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 889-895. Chen Yun, Zhang Zhongjie, Tian Xiaobo. Complex polarization analysis based on windowed Hilbert transform and its application [J]. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica), 2005, 48(4): 889-895.
- [16] Diallo M S, Kulesh M, Holschneider M, et al. Instantaneous polarization attributes based on an adaptive approximate covariance method [J]. Geophysics, 2006, 71(5): 99-104.
- [17] Diallo M S, Kulesh M, Holschneider M, et al. Characterization of polarization attributes of seismic waves using continuous wavelet transforms [J]. Geophysical, 2006, 71(3): 67-77.
- [18] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: The S transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.