

煤矿井下全空间地震波时频域极化分析及其试验研究

王 勃^{1,2,3,4}, 曾林峰^{1,2,3}, 张 衍^{1,2,3}, 刘盛东^{1,2,3}, 章 俊^{1,2,3}, 陈泓云^{1,2,3}

(1.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;3.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;4.深地科学与工程云龙湖实验室,江苏 徐州 221116)

摘 要:煤矿井下全空间条件下地震波传播规律是矿井地震勘探的关键基础科学问题,矿井地震近场勘探多类型波场混叠,常规方法难以实现地震波方向的准确计算。提出了一种矿井全空间三分量地震波时频域极化分析方法,采用基本小波函数形态不固定的广义 S 变换将时间域信号转换成时频域信号,利用 Hilbert 变换构建解析信号并在每个时频点建立复协方差矩阵,求取复协方差矩阵的特征值及特征向量,进而获取三分量信号的极化方位角、极化倾角。时间域混叠合成信号的时频域极化分析实验结果表明:计算得到合成信号的时频位置与理论时频位置相对应,计算的正/负方位角、倾角与理论值无误差。在时间和频率 2 个维度上,时频域极化分析可以精准确定混叠情况下多类型信号的极化方向。全空间条件下中心激发-全方位接收的三维时空域高阶三分量模拟实验证实,直达纵波、横波的倾角无偏差、方位角偏差小。根据检波点位置及极化信息对中心震源进行反定位,在 200 m 直径范围内,根据检波点位置及地震波方位角、倾角聚焦定位的震源点与已知震源点的距离误差仅为 0.548 6 m。煤矿井下实测数据计算反射槽波的时频域方位角、倾角参数与理论值一致,验证了矿井全空间三分量地震波时频域极化分析方法的有效性,该方法可为地下全空间地震勘探提供参考。

关键词:矿井地震勘探;全空间;三分量地震波;地震波方向

中图分类号:P631 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)08-2978-07

Time-frequency domain polarization analysis of seismic waves in the whole space of mine and its experimental study

WANG Bo^{1,2,3,4}, ZENG Linfeng^{1,2,3}, ZHANG Yan^{1,2,3}, LIU Shengdong^{1,2,3}, ZHANG Jun^{1,2,3}, CHEN Hongyun^{1,2,3}

(1.State Key Laboratory of Deep Geomechanics & Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4.Yunlong Lake Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The propagation law of seismic waves under the condition of full space in coal mines is the key basic scientific problem of mine seismic exploration. The conventional methods are difficult to realize an accurate calculation of seismic waves direction because of the multi-type waves field aliasing in the near field detection of the mine seismic method. The paper proposed a time-frequency domain polarization analysis method of the three-component seismic waves in coal mines. The time-domain signals were converted into a time-frequency domain signals by using the gener-

收稿日期:2022-05-31 修回日期:2022-07-11 责任编辑:韩晋平 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.WX22.0816

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(42174165);国家自然科学基金重点资助项目(51734009)

作者简介:王 勃(1984—),男,安徽安庆人,深地科学与工程云龙湖实验室研究员,博士生导师。E-mail:wbsyes@126.com

通讯作者:刘盛东(1962—),男,安徽安庆人,教授,博士生导师。E-mail:liushengdong@126.com

引用格式:王勃,曾林峰,张衍,等.煤矿井下全空间地震波时频域极化分析及其试验研究[J].煤炭学报,2022,47(8):2978-2984.

WANG Bo, ZENG Linfeng, ZHANG Yan, et al. Time-frequency domain polarization analysis of seismic waves in the whole space of mine and its experimental study [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2978-2984.



移动阅读

alized S transform with the shape of the basic wavelet function with unfixed shape. The analytic signals were constructed by using the Hilbert transform and the complex covariance matrix were established at each time-frequency point. The eigenvalues and eigenvectors of the complex covariance matrix were obtained, and then the polarization azimuth angle and polarization inclination angle of the three-component signal were obtained. The experimental results of time-frequency domain polarization analysis of the time-domain aliasing synthetic signal show that the time-frequency position of the calculated synthetic signal is corresponding to the theoretical time-frequency position, and the calculated positive/negative azimuth angle and inclination angle have no error with the theoretical value. In the time and frequency dimensions, time-frequency domain polarization analysis can accurately determine the polarization direction of multi-type signals in the case of aliasing. The three-dimensional high-order three-component simulation experiment of central excitation and omnidirectional reception in full space confirms that there is no deviation in the inclination angle and azimuth angle of the direct P-wave and the S-wave, and the azimuth deviation is small. According to the location and polarization information of the detection point, the central source is inversely positioned. In the range of 200 m diameter, the distance error between the focal point focalized according to the location of the detection point and the azimuth and dip angle of the seismic wave and the known focal point is only 0.548 6 m. The calculation of measured data in an underground coal mine verifies the effectiveness of the time-frequency domain polarization analysis method of three-component seismic waves in the whole space of the mine, which can provide a reference for underground seismic exploration in the whole space.

Key words: mine seismic exploration; full space; three-component seismic wave; seismic wave direction

“双碳”目标下我国能源资源禀赋特征及当前复杂国际能源形势,决定了煤炭在能源中的基础和兜底保障作用^[1]。煤炭绿色开采、智能精准开采等对煤矿安全高效开采地质保障系统提出了更高的要求,矿井地质透明化是当前矿井地质保障系统发展的努力方向^[2-3]。矿井地震勘探具有不受复杂地面条件影响、距离目标体近、地震波能量和高频成分衰减少、分辨率高、探采对比易验证等优点^[4-5],进而被广泛用于地质精细探测及透明地质建模。

不同于地面半空间地震勘探,矿井地震属于全空间条件下勘探。震源在井下激发后,地震波向四周传播,检波点会接收到全方位的地震信号。单分量信号难以确定地震波的方向,双分量地震信号仅能算出二维平面上地震波传播方向,三维空间条件下准确判定地震波传播方向则依赖三分量信号的矢量特性,并通过极化分析实现。极化分析在地震信号处理中主要用于波场分离,根据各类地震波的极化属性差异设置滤波器来分离提取有效波。极化滤波方法在天然地震、石油地震勘探领域研究较多^[6],DIALLO 等^[7]对多分量地震数据进行小波变换,将自适应瞬时极化滤波引入时频域,进行面波压制及转换波分离。KULESH 等^[8]提出了基于自适应协方差矩阵的小波域时频极化分析方法,在时频域实现了波场分离。PINNEGAR^[9]采用 S 变换在时频域计算三分量地震信号极化参数,设置极化率滤波器压制极化椭圆性地震波。程冰洁等^[10]在小波域进行能量分类约束从而

实现极化滤波。

在煤炭领域,张平松等^[11]在时间域构建协方差矩阵,采用极化滤波方法实现了巷道超前探测多波有效分离。王勃^[12]利用三分量信号的矢量特征,提出了一种全空间条件下集波场分离、偏移成像于一体的极化偏移方法。胡泽安等^[13]在时间域对矿井槽波地震数据进行了极化分析,实现了波场分离与噪声压制。金丹等^[14]利用槽波信号与干扰波在偏振度上的差异,改进频率域的极化滤波权函数,将频率域极化滤波用于槽波记录的噪声压制。冯磊等^[15]对二分量槽波数据进行 S 变换,采用时频域自适应协方差矩阵极化滤波方法实现了两类槽波分离。刘盛东等^[4]利用三分量地震记录,通过时窗自适应的极化分析方法获取极化率,提取了纵横波及勒夫型槽波等线性极化波。

上述方法主要用于地面半空间或煤矿井下全空间的极化滤波,针对矿井全空间条件下三分量地震波传播方向研究较少,特别在矿井地震近场勘探多类型波场混叠条件下。笔者提出了一种矿井全空间三分量地震波时频域极化分析方法,首先通过时间域混叠合成信号验证地震波优势方位角、倾角准确度,然后开展全空间条件下中心激发-全方位接收的三维三分量数值模拟实验对比纵波、横波定向精度,最后通过矿井地震勘探常用的反射波现场试验验证极化参数求解的可靠性。

1 全空间地震波时频域极化分析方法

矿井地震属于全空间条件下近场勘探,多类地震

波混叠,需从时间、频率 2 个维度联合计算分析。为准确计算地震波传播方向,笔者首先构建基于基本小波函数形态不固定的广义 S 变换的时频域复协方差矩阵,然后求解三分量地震信号的优势能量方向。同时,为进一步验证方向计算的准确性,开展已知震源点聚焦定位对比研究,具体理论方法如下。

1.1 基于广义 S 变换的时频域复协方差矩阵构建

设时间域信号 $h(\tau)$ 的傅里叶变换为

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中, j 为虚数单位; f 为频率; τ 为时间。

对时间序列 $h(\tau)$ 乘以一个窗函数 $w(\tau)$ 得

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) w(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

设 $w(\tau)$ 为归一化的高斯窗,且利用参数 σ 控制其时窗宽度,利用参数 t 控制其时窗位置,则有

$$w(\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),可得到对时间序列 $h(\tau)$ 在 t 时刻加高斯窗的谱为

$$\text{GST}(t, f, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-\frac{(\tau-t)^2}{2\sigma^2}} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

将窗宽控制参数 σ 设置成与频率 f 成反比的关系,以此让高斯窗的宽度自适应于频率,则有

$$\sigma(f) = \frac{1}{\delta |f|^p} \quad (5)$$

δ 和 p 为控制时窗宽度变化的 2 个参数^[16],进一步获得广义 S 变换的表达式为

$$\text{GST}(t, f) = \frac{\delta |f|^p}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-\frac{\delta^2 p (\tau-t)^2}{2}} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

通过广义 S 变换计算时频谱,再利用 Hilbert 变换构建时频谱的解析信号。在时频域内 t 时刻, f 频率处的复协方差矩阵 $\mathbf{MS}(t, f)$ 可描述为

$$\mathbf{MS}(t, f) = \begin{bmatrix} I_{xx}(t, f) & I_{xy}(t, f) & I_{xz}(t, f) \\ I_{xy}(t, f) & I_{yy}(t, f) & I_{yz}(t, f) \\ I_{xz}(t, f) & I_{yz}(t, f) & I_{zz}(t, f) \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵中各元素定义为

$$\begin{aligned} I_{km}(t, f) = & |\text{SC}_k(t, f)| |\text{SC}_m(t, f)| \times \\ & \left\{ \sin c \left[\frac{\Omega_k(t, f) - \Omega_m(t, f)}{2} T_{km}(t, f) \right] \times \right. \\ & \cos [\arg \text{SC}_k(t, f) - \arg \text{SC}_m(t, f)] + \\ & \left. \sin c \left[\frac{\Omega_k(t, f) + \Omega_m(t, f)}{2} T_{km}(t, f) \right] \times \right. \\ & \left. \cos [\arg \text{SC}_k(t, f) + \arg \text{SC}_m(t, f)] \right\} - \\ & \mu_{km}(t, f) \mu_{mk}(t, f) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $|\text{SC}_k(t, f)|$ 和 $|\text{SC}_m(t, f)|$ 为 2 组解析信号的瞬时振幅; Ω_k 和 Ω_m 为瞬时频率; $\arg$ 为瞬时相位; $\mu_{km}(t, f)$ 为均值,其定义为

$$\mu_{km}(t, f) = \Re[\text{SC}_k(t, f)] \sin c \left[\frac{T_{km}(t, f) \Omega_k(t, f)}{2} \right], \quad (k, m = x, y, z) \quad (9)$$

式中, $\Re(\cdot)$ 为复数的实部,函数 $\sin c(t)$ 为辛格函数,其定义为

$$\sin c(t) = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ \sin(t)/t & t \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$T_{km}(t, f)$ 为自适应时窗长度,其定义为

$$T_{km}(t, f) = \frac{4\pi N}{\Omega_k(t, f) + \Omega_m(t, f)} \quad (11)$$

式中, N 为整数,是一个经验参数,用于刻画不同极化属性, N 取较大值时可刻画三维复杂极化属性^[4],一般取 1 或 2。

当 3 个分量时频谱中对应时频点的瞬时频率相等时, $\Omega(t, f) = \Omega_k(t, f) = \Omega_m(t, f)$, $T_{km}(t, f)$ 可简化为 $2\pi N/\Omega(t, f)$,复协方差矩阵可以化简为

$$\begin{aligned} I_{km}(t, f) = & |\text{SC}_k(t, f)| |\text{SC}_m(t, f)| \times \\ & \cos [\arg \text{SC}_k(t, f) - \arg \text{SC}_m(t, f)] = \\ & \Re[\text{SC}_k(t, f) \text{SC}_m^*(t, f)] \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $*$ 为复共轭。

1.2 极化参数计算

地震波矢量特征可以用极化参数描述,这些参数可以通过在时频域中求取复协方差矩阵的最大特征值 λ_1 及其对应的归一化特征向量 (V_x, V_y, V_z) 获得。

优势极化方位角计算公式为

$$\theta(t) = \arctan[\Re(V_x)/\Re(V_y)] \quad (13)$$

其中 $-90^\circ \leq \theta(t) \leq 90^\circ$, 为极化主轴在 XOY 面的投影与 Y 轴的夹角,当极化主轴偏向 X 轴正方向时, $\theta(t) > 0^\circ$; 当极化主轴偏向 X 轴负方向时, $\theta(t) < 0^\circ$ 。

优势极化倾角计算公式为

$$\phi(t) = \arctan \left\{ \frac{\Re(V_z)}{[\Re(V_x) + \Re(V_y)]^{1/2}} \right\} \quad (14)$$

其中, $-90^\circ \leq \phi(t) \leq 90^\circ$, 为极化主轴与 XOY 面的夹角,当极化主轴偏向 Z 轴正方向时, $\phi(t) > 0^\circ$; 当极化主轴偏向 Z 轴负方向时, $\phi(t) < 0^\circ$ 。

1.3 聚焦定位方法

与微震定位不同,地震勘探震源点位置已知,为了验证上述极化参数准确性,利用检波点位置及其极化倾角、方位角反向求解震源点位置,其计算方法如下:设检波点 i 的空间坐标和主极化轴归一化矢量分别为 $\mathbf{P}_i = (x_i, y_i, z_i)$ 和 $\mathbf{\gamma}_i = (c_i, n_i, l_i)$, 设空间任意一点 $\mathbf{P} = (x, y, z)$ 。向量 $\mathbf{PP}_i$ 与向量 $\mathbf{\gamma}_i$ 的向量积代表向

量 γ_i 和向量 PP_i 共起点的情况下所构成平行四边形的面积。对该向量积除以空间矢量的模可获得 P 点到空间矢量的最短距离:

$$d_i = \frac{|\gamma_i \times PP_i|}{|\gamma_i|} = \frac{\left\| \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_i - x & y_i - y & z_i - z \\ c_i & n_i & l_i \end{vmatrix} \right\|}{\sqrt{c_i^2 + n_i^2 + l_i^2}}$$

(15)

$$D = \sum_{i=1}^k d_i, (k \geq 2)$$

(16)

求取 D 的最小值所对应的 (x, y, z) 为震源点在三维空间内的位置。

2 三维数值模拟及算法验证

2.1 合成信号及极化特征分析

为了验证极化分析对三分量信号在时频域上区分多类型波和计算极化参数的准确性,开展正弦波合成信号分析实验。合成信号由 A,B,C,D,E,F 共 6 个信号组成,合成信号具体参数见表 1。其中 B,C 信号在时间域混叠,E,F 信号在时间域混叠,在时间域可分为 4 段信号,如图 1 所示。其中每组信号均为 501 个采样点,采样频率为 2.5 kHz,对合成信号进行时频域极化分析,结果如图 2 所示。时频谱上可清晰区分 A,B,C,D,E,F 信号,图 2(a)显示的 6 个信号的方位角与理论方位角一致,正、负方位角均无误差;图 2(b)显示的 6 个信号的倾角与理论倾角一致,正、负倾角均无误差。

表 1 合成信号基本参数

Table 1 Basic parameters of synthesis signal

信号	主频/Hz	方位角/(°)	倾角/(°)
A	90	-45	-15
B	40	30	30
C	120	45	-10
D	130	30	15
E	60	15	-30
F	160	60	20

2.2 正演模拟信号极化特征分析及聚焦定位验证

为研究全空间条件下地震波矢量特征,建立三维数值模型。模型中心为震源点,在震源点的左侧、右侧、前方、后方、顶部及底部布置检波器,形成中心激发全方位接收的三维三分量地震观测系统,如图 3 所示。三维模型在 X,Y,Z 方向的大小分别为 400 m×400 m×400 m,震源点位于(0,0,0)原点处,三分量检波器在 XOY,XOZ,YOZ 面上以原点为中心直径为

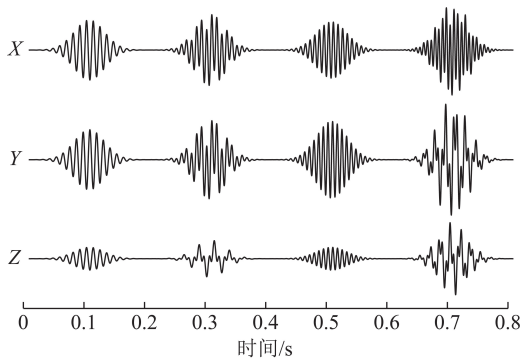


图 1 合成三分量信号

Fig.1 Synthesis of three-component signals

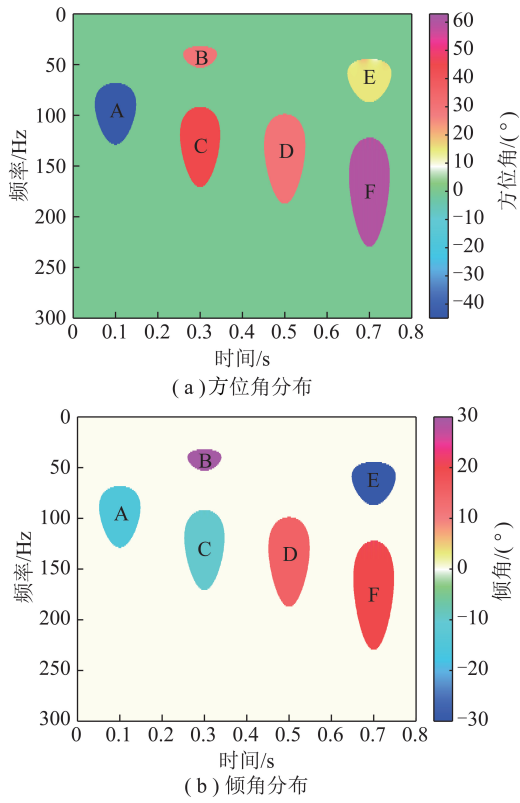


图 2 合成三分量信号方位角及倾角分布

Fig.2 Azimuth angle and inclination angle distribution of synthetic three-component signal

200 m 的圆形测线上以 15°间隔布置,累计 66 个检波器。模型在 X,Y,Z 方向上进行网格化,网格间距均为 0.3 m。模拟采用主频为 125 Hz 的零相位雷克子波,采样频率为 2.5 kHz。模型添加 PML 吸收边界,采用三维时空域高阶有限差分法进行数值模拟^[17]。

在数值模拟地震数据中选择一道(第 64 道)数据进行时频域极化分析,通过对比理论、计算的极化参数验证上述方法效果。利用直达波的理论到达时间、震源主频确定直达波的时频范围,在图 4 中可分析直达纵波、横波的极化参数,从图 5 可见直达纵波、

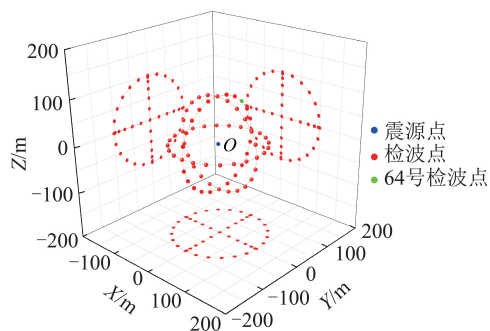


图3 三维观测系统

Fig.3 Three-dimensional observing system

横波质点振动轨迹。图4为第64道数据求得的极化方位角、极化倾角。由图4(a)可看出,在时间0.03 s和0.06 s附近各有一团能量,分别为纵波、横波能量。直达纵波、横波的方位角均为 3.3° ,与理论值 0° 存在部分偏差。由图4(b)可看出,时间0.03 s附近的直达纵波倾角为 45° ,与理论值 45° 无偏差。时间0.06 s附近处的直达横波倾角为 -45° ,与理论值 -45° 无偏差。计算其他65道地震波时频域极化参数,并利用直达纵波的极化信息对震源点进行反向聚焦定位,结果如图6所示,在200 m直径范围内,求解震源点与已知震源点的直线距离误差仅为0.548 6 m。

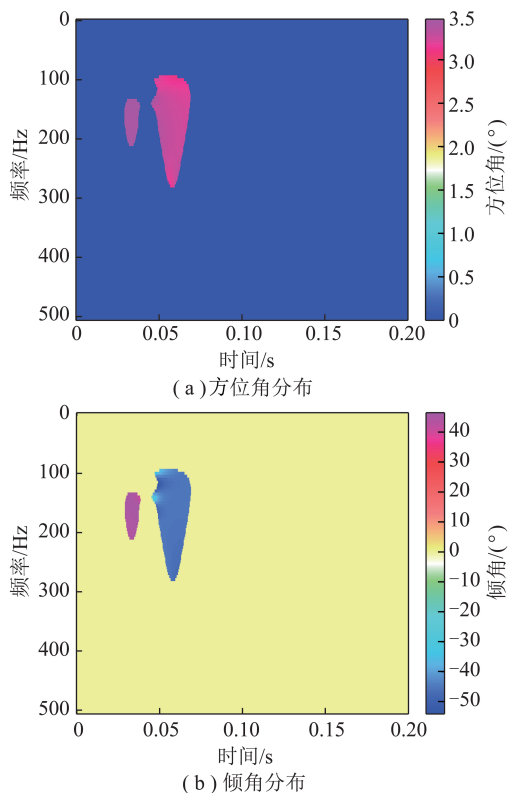
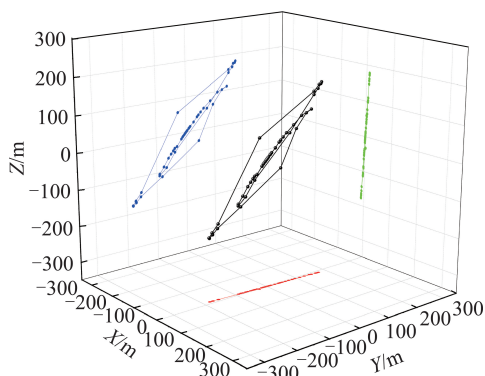
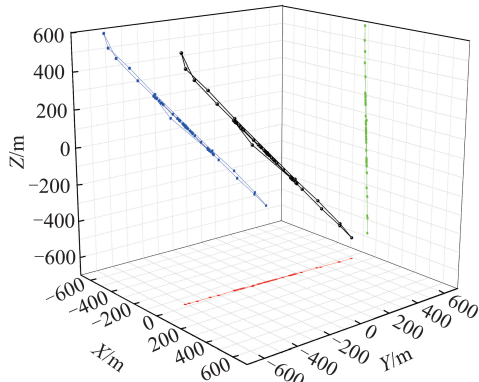


图4 计算所得极化方位角与极化倾角

Fig.4 Calculated polarization azimuth angle and polarization inclination angle



(a) P波质点振动轨迹



(b) S波质点振动轨迹

图5 第64道三分量信号质点振动轨迹

Fig.5 Particle vibration trajectory diagram of the 64th three-component data

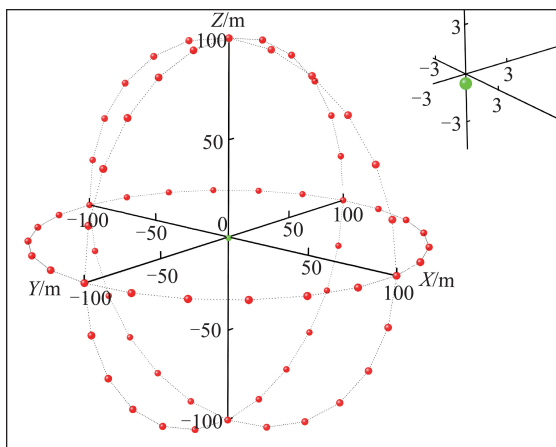


图6 检波点反向聚焦定位震源点(右上角为原点位置局部放大)

Fig.6 Positioning source point by reverse focusing of receiver point (Local amplification at the origin at the upper right corner)

3 现场试验

实际矿井地震勘探过程中,除利用透射波之外^[18],还常采用反射波^[19],特别是煤层条件下反射槽波勘探是井下通用方法^[20]。为此,开展了现场实

测并针对反射槽波信号进一步验证方法有效性。

安徽某矿 1034 工作面位于三采区深部,煤层顶板标高 $-603.8 \sim -466.0$ m,煤厚 $3.0 \sim 5.2$ m,平均 3.9 m,煤层倾角 $5^\circ \sim 18^\circ$,平均 10° ,顶板为灰白色中粒砂岩,底板为粉砂岩。1034 回风巷外帮发育有 F13 正断层,与回风巷相距 $57 \sim 108$ m,走向 NE,倾向 NW,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$,落差 $100 \sim 200$ m,其在矿区内延展长度 5.20 km,利用地面、井下钻探进行断层探查,断层控制程度可靠。以 R1 检波点为原点,每隔 10 m 布置 1 个检波点,震源点设置在 132.5 m 处,三分量地震勘探观测系统如图 7 所示,S1 炮激发 R1~R27 道接收的三分量地震记录如图 8 所示。

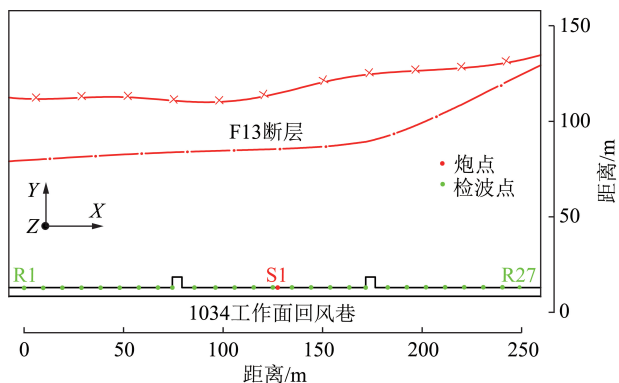


图 7 某矿 1034 工作面地震观测系统

Fig.7 Seismic observation system of 1034 working face

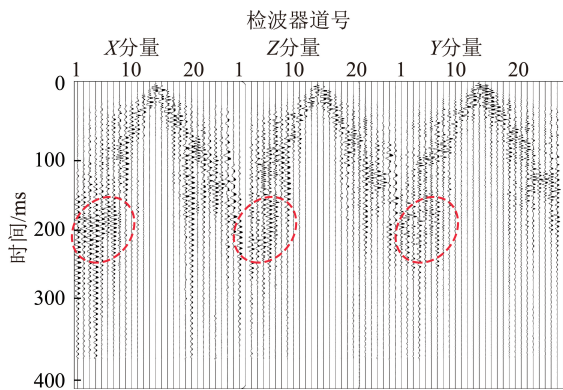


图 8 三分量地震记录

Fig.8 Three-component seismic records

观察三分量地震记录,图中红圈处(R1~R8 道记录)存在明显反射槽波信号。选取 R4 道进行分析,S1 炮、F13 断层与 R4 检波点的反射路径距离约 213.28 m,R4 检波点接收的反射槽波理论方位角约为 27° ,倾角则等同于煤层倾角,约 10° 。S1 炮激发、R4 三分量检波器接收的地震信号进行时频域极化分析,时频域方位角及时频域倾角如图 9,10 所示。根据已知断层位置计算反射槽波理论传播路径,时间 $0.18 \sim 0.25$ s,频率 $120 \sim 180$ Hz 区域为反射槽波。图

9(a)中该区域的方位角计算结果可见,反射槽波的方位角较稳定,约为 28° ,分析其主要为 Rayleigh 型反射槽波,与理论方位角偏差 1° 。图 9(b)显示反射槽波的倾角为 $10^\circ \sim 12^\circ$,与实际煤层 10° 倾角吻合。

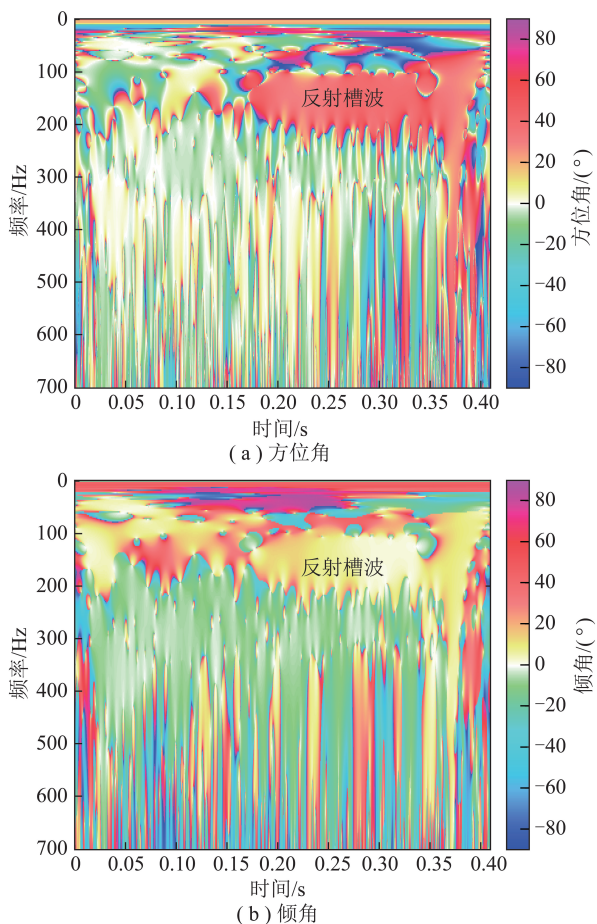


图 9 R4 道数据时频域极化方位角倾角分布

Fig.9 Time-frequency domain polarization azimuth angle and inclination angle distribution of R4 trace

4 结 论

(1)对三分量合成信号进行时频域极化分析,得到信号的时频位置与理论时频位置相对应,求解的方位角、倾角与理论值吻合;在时间和频率 2 个维度上,时频域极化分析可以精准确定混叠情况下多类型信号极化方向。

(2)针对中心激发-全方位接收的三维时空域高阶三分量模拟信号,直达波的方位角、倾角误差分别为 $3.3^\circ, 0^\circ$;在 200 m 直径范围内,根据检波点位置及地震波方位角、倾角聚焦定位的震源点与已知震源点的距离误差仅为 0.5486 m,验证了全空间条件下三分量地震波的时频域极化参数计算的精度。

(3)针对矿井实测数据进行广义 S 变换的时频域极化分析处理,反射槽波的时频域方位角、倾角参

数与理论值一致,证实了矿井全空间三分量地震波时频域极化分析方法的有效性。

(4)全空间条件下时频域极化分析方法确定的地震波传播方向可为矿井地震勘探精细成像提供基础性支撑,并为井下地质构造的透射波层析成像、反射成像等提供基础约束条件。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [2] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报,2020,45(7):2331-2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331-2345.
- [3] 程建远,刘文明,朱梦博,等. 智能开采透明工作面地质模型梯级优化试验研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(7):118-126.
CHENG Jianyuan, LIU Wenming, ZHU Mengbo, et al. Experimental study on cascade optimization of geological models in intelligent mining transparency working face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 118-126.
- [4] 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.
- [5] 王勃,刘盛东,孙华超,等. CO₂震源的槽波勘探现场实验及前景讨论[J]. 煤炭学报,2022,47(2):906-914.
WANG Bo, LIU Shengdong, SUN Huachao, et al. Field experiment and prospect discussion of in-seam seismic survey for CO₂ source[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 906-914.
- [6] 马见青,李庆春. 利用时频域极化滤波压制地震面波[J]. 石油地球物理勘探,2015,50(6):1089-1097.
MA Jianqing, LI Qingchun. Seismic surface wave suppression with polarization filtering method in time-frequency domain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(6): 1089-1097.
- [7] 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.
- [8] KULESH M, DIALLO M S, HOLSCHNEIDER M, et al. Polarization analysis in the wavelet domain based on the adaptive covariance method[J]. Geophysical Journal International, 2007, 170(2): 667-678.
- [9] 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.
- [10] 程冰洁,胡治权,徐天吉,等. 小波域能量分类约束极化滤波法及应用[J]. 石油地球物理勘探,2015,50(5):815-823.
CHENG Bingjie, HU Zhiquan, XU Tianji, et al. Polarization filter-

- ring constrained by classified energy in the wavelet domain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(5): 815-823.
- [11] 张平松,欧元超,李圣林. 我国矿井物探技术及装备的发展现状与思考[J]. 煤炭科学技术,2021,49(7):1-15.
ZHANG Pingsong, OU Yuanchao, LI Shenglin. Development quo-status and thinking of mine geophysical prospecting technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7): 1-15.
- [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,2012:19-40.
WANG Bo. Study on whole space polarization migration imaging technology of mine seismic exploration[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012: 19-40.
- [13] 胡泽安,刘盛东,王勃. 煤层槽波的极化特征及其滤波[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2015,38(3):387-392.
HU Zean, LIU Shengdong, WANG Bo. Polarization characteristics of channel wave in coal seam and filtering[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2015(3): 387-392.
- [14] 金丹,王保利,豆旭谦,等. 频率域极化滤波在槽波信号处理中的应用[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1416-1422.
JIN Dan, WANG Baoli, DOU Xuqian, et al. Application of polarization filtering in frequency domain to in-seam wave processing[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1416-1422.
- [15] 冯磊,董郑,周明旻,等. 基于时频域极化滤波的勒夫型槽波提取[J]. 煤田地质与勘探,2016,44(3):103-108.
FENG Lei, DONG Zheng, ZHOU Minghuan, et al. Love channel wave extraction based on polarization filter in time-frequency domain[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 103-108.
- [16] 陈学华,贺振华,黄德济. 广义 S 变换及其时频滤波[J]. 信号处理,2008,24(1):28-31.
CHEN Xuehua, HE Zhenhua, HUANG Deji. Generalized S transform and its time-frequency filtering[J]. Signal Processing, 2008, 24(1): 28-31.
- [17] FANG Jinwei, CHEN Hanming, ZHOU Hui, et al. Three-dimensional elastic full-waveform inversion using temporal fourth-order finite-difference approximation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 1-5.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.