

联合震源破裂信息反演解析巨厚覆岩强矿震 应力触发机制

杨 耀¹, 曹安业^{1,2,3}, 刘耀琪¹, 白贤栖¹, 王常彬⁴, 薛成春¹, 王 强¹

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 蒙陕矿区白垩系志丹群巨厚覆岩呈不整合沉积环境, 深部开采导致引起地表震感的强矿震频发, 已严重制约矿区高效生产。为解决矿区强矿震震源破裂信息挖掘不准确、内部应力触发机制不清晰造成矿震灾害防控效果不理想的难题, 以矿区某矿典型强矿震频发工作面为研究背景, 在初步探明地层岩移特征基础上, 通过主成分分析预处理提取波形有效成分, 结合混合矩张量反演方法筛选合理震源机制解, 修正应力反演模型、优化应力反演算法, 联合震源破裂信息反演了强矿震发生前后覆岩应力场分布特征, 引入不稳定系数评估了覆岩运移状态, 定量解析了强矿震应力触发机制。结果表明: 主成分分析方法能够快速提取井下复杂波形有效信息, 应用于矩张量反演可显著降低波形理论振幅与观测振幅间误差, 保证获取用于应力反演的震源破裂信息的准确度; 改进后的应力反演算法满足典型张拉、压缩及复合破裂模式震源反演要求, 将主应力方向、应力形因子等误差评估系数由改进前的 60% 降低至 20% 以下, 验证了改进算法应用于煤矿开采复杂破裂模式震源应力场反演的合理性; 强矿震孕育过程中, 最大主应力相对其他主应力显著增大且作用方位转变为近似竖向方向, 最大主应力偏转对诱发巨厚覆岩强矿震起控制作用, 覆岩结构破断失稳与主应力场状态变化相互影响, 其竖向单轴挤压作用导致巨厚覆岩剧烈运动并瞬时断裂释放大量弹性能是强矿震频发的主要原因。研究结论可为从应力调控方面实现源头弱化减震提供理论支撑。

关键词: 矿震; 破裂信息; 巨厚覆岩; 应力反演; 触发机制

中图分类号: TD325 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)04-2077-14

Stress triggering mechanism of strong mine earthquake in huge thick strata revealed by inversion of joint source rupture information

YANG Yao¹, CAO Anye^{1,2,3}, LIU Yaoqi¹, BAI Xianxi¹, WANG Changbin⁴, XUE Chengchun¹, WANG Qiang¹

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

收稿日期: 2024-04-03 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 陈思成 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0350

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004603); 江苏省创新支撑计划国际科技合作/港澳台科技合作-重点国别产业技术研发合作资助项目(BZ2023050); 国家自然科学基金资助项目(52274098)

作者简介: 杨 耀(1998—), 男, 贵州六盘水人, 博士研究生。E-mail: yangyao@cumt.edu.cn

通讯作者: 曹安业(1982—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: caoanye@163.com

引用格式: 杨耀, 曹安业, 刘耀琪, 等. 联合震源破裂信息反演解析巨厚覆岩强矿震应力触发机制[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2077-2090.

YANG Yao, CAO Anye, LIU Yaoqi, et al. Stress triggering mechanism of strong mine earthquake in huge thick strata revealed by inversion of joint source rupture information[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2077-2090.



移动阅读

Abstract: Under the condition of unconformable deposition of the Cretaceous Zhidan Group huge thick strata in the Inner Mongolia-Shanxi mining area, frequent occurrence of strong mine earthquake (SME) during deep mining, resulting in tremors at the surface, has severely constrained efficient production at the area. In order to solve the problem of inaccurate source information and unclear stress triggering mechanism, which makes it difficult to prevent and control SME, the working face of a mine in the area where SME occurred frequently is used as a background for the study, based on preliminary detection of stratigraphic rock movement characteristics, the principal component analysis (PCA) was applied to extract the effective components of waveforms, the hybrid moment tensor inversion (HMTI) are used to solve focal mechanism of SME, stress inversion model modified, and stress inversion algorithm optimised, based on the algorithm, solved the distribution characteristics of the stress field before and after the occurrence of SME, introduced instability coefficients to evaluate the stability of the overburden, and analysed the stress triggering mechanism of SME. The results show that the PCA can extract the key information of complex waveforms, and applied to the HMTI can significantly reduce the error between the theoretical and observed amplitudes of waveforms, and ensure the accuracy of the source rupture information used for stress inversion. The improved algorithm meets the requirements of typical tension, compression and composite rupture source, and can reduce the error from 60% to less than 20%, which verifies the reasonableness of the algorithm applied to the complex rupture source stress field inversion in coal mine. Before the occurrence of SME, the maximum principal stress increases significantly compared with other principal stresses, and the direction is approximately vertical, and the deflection of the maximum principal stress plays a controlling role in inducing SME, the fracture of the huge thick strata interacts with the changes in the direction and magnitude of the principal stress, and under the effect of vertical uniaxial compression of the maximum principal stress, the huge thick strata moves violently and instantaneously releases its elastic energy, resulting in the occurrence of SME. The conclusions of the study can provide theoretical support for reducing the frequency of SME by weakening the huge thick strata in terms of stress regulation.

Key words: mine earthquake; rupture information; huge thick strata; stress inversion; trigger mechanism

0 引言

蒙陕矿区自2020年起大规模开发,高能级、大体量矿震活动凸显,区别于井下冲击地压灾害,矿区内地震主要引起地表出现震感^[1],造成矿区居民恐慌的同时,逐渐演变为公共安全问题^[2]。2021年至今,矿区共发生14起2.0级以上强矿震,频度高、防控难使其已成为困扰矿区高效生产最大难题^[3]。矿区主采煤层所属地层呈典型不整合沉积特征^[4],尤以白垩系志丹群巨厚覆岩最为显著,如何提高复杂沉积环境下强矿震矩张量求解精度、准确反演孕震区应力场分布特征,是定量解析强矿震应力触发机制的关键,可为从应力调控方面实现源头弱化减震提供理论支撑,是保障我国西部煤炭资源高效开发的重大需求。

震源机制解是合理解释矿震内在破裂模式的有力途径,关键在于如何减小矩张量反演误差。吴坤波等^[5]基于矩张量反演获取了震源机制解,认为厚硬岩层沿邻近采空区剪切破坏、混合剪切破坏相互促进是导致强矿震频发的原因。陈栋等^[6]在求解微震事件震源机制解基础上,揭示了开采活动对地质不连续面破裂的促进作用机制。曹安业等^[7]反演得到褶皱、断层构造及高应力煤柱区3类矿井典型冲击地压频发区

矿震主导破裂机制,对比分析了不同破裂机制影响下震源强度、扰动规模的差异性。CHENG等^[8]利用事件间相对辐射模式开发了震源机制联合反演算法,结合事件间波形S/P幅值比对反演结果进行修正。ROSS等^[9]基于P波到时与初动方向大数据训练卷积神经网络模型,通过预处理反演数据极大提高了震源机制求解精准率。KUANG等^[10]通过约束波形位移幅值相对变化以降低震源定位、速度模型对矩张量反演精度的影响。LINZER^[11]定义了理论与观测波形位移幅值均方根RMS,以评估矩张量反演误差。ZHAO等^[12]设定了RMS阈值作为筛选合理震源矩张量解的依据。已有研究通过优化反演模型、提升数据质量实现了震源矩张量反演误差的大幅降低,但应用场景地质条件简单,因矿区地层复杂沉积、煤矿台站稀疏布置因素造成可用波形数少、信噪比低等难以克服,矩张量反演误差仍未降低。

解析应力场分布演化特征对于揭示矿山动力灾变机制具有指导意义^[13],始终是相关领域学者研究焦点。康红普等^[14]将煤矿井下应力场划分为原岩应力场、采动应力场及支护应力场,认为采矿工程地下空间围岩变形与破坏的根本为应力驱动引起。张剑等^[15]研究表明断层附近水平主应力方向发生扭转是导致

矿区原岩应力场异常和离散的主要影响因素。李铁等^[16]基于震源机制解析了矿井尺度岩体采动应力场规律,发现因断层切割导致岩体主应力性质表现出分区特征。刘洋等^[17]开展不规则煤柱区应力场反演研究,阐述了最大主应力对煤柱变形破坏的控制作用。SONG等^[18]分析了坚硬顶板破断诱发矿震破裂机制,通过反演应力场揭示了诱发矿震活动的主控因素。AMEMOUTOU等^[19]通过反演水力压裂区局部应力场分布认为较小的应力扰动也可能导致岩体破坏,揭示了压裂区域高频矿震触发机制。MARTÍNEZ-GARZÓN等^[20]进一步分析了水力压裂过程孔隙压力变化对应力场反演结果的影响。上述研究表明掌握应力场分布对于井下安全开采的重要性,并解释了因采掘部署、地质条件及卸压降载诱发矿震的力学机制,但仅基于剪切破裂模型建立的应力反演方法无法兼顾采动诱发的其他破裂模式震源,难以实现应力场的准确反演。

因此,笔者以内蒙古呼吉尔特矿区某强矿震频发工作面为工程背景,将受噪声严重干扰波形进行主成

分分析预处理实现了波形有效成分提取,结合混合矩张量反演方法剔除不符合反演要求的矩张量解,保证了用于反演应力场的震源破裂信息的准确度;修正了应力反演模型使其兼顾张拉、压缩等混合破裂震源,优化了应力反演算法,通过分析应力反演误差验证了修正算法的合理性;联合震源破裂信息反演了强矿震发生前后覆岩应力场分布,引入不稳定系数评估了覆岩运移状态,定量解析了强矿震应力触发机制,以期为矿区及类似条件矿井开采诱发强矿震的风险评估与源头防控等提供参考。

1 工程概况

1.1 地层开采条件

内蒙古呼吉尔特矿区某矿12盘区为南北两翼布置,南翼1208工作面2019年12月开始回采,采用综放开采工艺开采2-2煤层,煤层厚度为8.51~9.51 m,平均厚度为9.08 m。1208工作面西临1206A工作面,2个工作面停采线对齐布置,长度均为290 m,留设5 m窄煤柱,工作面平面布置情况如图1所示。

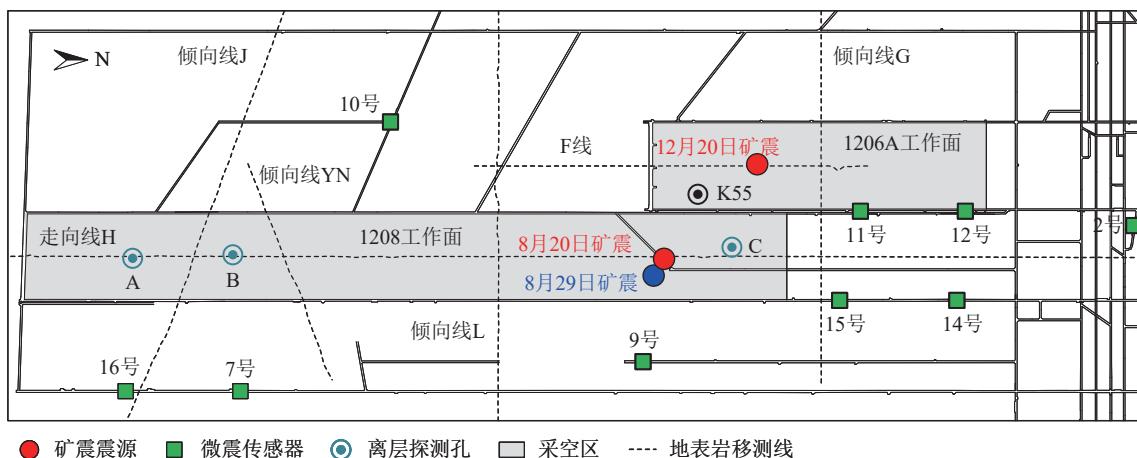


图1 工作面平面布置

Fig.1 Layout of working face

2021年5月,1208工作面由实体煤转变为邻空回采,随后于8月20日发生矿震,工作面停采51天,停产期间于8月29日发生矿震,恢复生产后于12月20日再次发生矿震,工作面继续停产,引起地表出现震感的矿震问题严重制约了矿井的正常生产。

矿震震源附近K55地质钻孔柱状如图2所示,地层呈现出第四系薄表土、白垩系厚砂岩层组合的显著赋存特点,笔者将白垩系厚砂岩组合层称为巨厚覆岩,其下部岩层则以砂岩、砂质泥岩互层为主。为探究巨厚覆岩典型赋存与矿震现象间联系,微震传感器包络工作面开采区域布置,沿工作面走向、倾向布置了多条地表岩移测线,沿工作面走向布置了3个地面离层

探测孔,布置情况如图1所示。

1.2 震源分布与岩移规律

统计1208工作面回采期间(2019年12月—2021年12月)能级大于 10^4 J的微震事件,共733起,震源定位分布如图3a所示,整体微震能级介于 10^4 ~ 10^5 J,3起矿震事件则均超过了 10^5 J。综合考虑工作面在区域I、II回采期间震源聚集特征,开展地表岩移监测及覆岩离层探测工作。

图3b、图3c分别为区域I、II地表岩移与离层探测情况。区域I实体煤回采,地表缓慢沉降,于2021年11月达到最大沉降量约0.2 m后,地表沉降无明显变化,距煤层352.3 m处覆岩内部孔壁完好,表

地层名称	层厚/m	柱状图	岩性
白垩系志丹群 K _{zh}	14.80		表土层
	61.65		细粒砂岩
	30.87		粉砂岩
	35.66		中粒砂岩
	36.23		细粒砂岩
	20.49		粉砂岩
	19.96		细粒砂岩
	28.13		中粒砂岩
	26.02		细粒砂岩
侏罗系 安定组 J _{2a}	62.04		中粒砂岩
	8.11		砂质泥岩
	10.19		粉砂岩
	30.59		中粒砂岩
	12.15		砂质泥岩
侏罗系 直罗组 J _{2z}	19.02		细粒砂岩
	75.68		砂质泥岩
	18.89		细粒砂岩
	10.34		粉砂岩
	15.37		砂质泥岩
	10.16		粉砂岩
侏罗系 延安组 J _{1-2y}	26.38		砂质泥岩
	26.12		中粒砂岩
	12.86		粉砂岩
	12.77		砂质泥岩
侏罗系 延安组 J _{1-2y}	31.05		细粒砂岩
	9.70		2-2煤

图2 K55 钻孔柱状

Fig.2 K55 drill hole column

明上覆岩层活动趋于稳定。

进入邻空回采阶段,位于1206A开切眼前方开采范围地表呈阶梯式沉降,在经历3起矿震事件后,覆岩结构稳定性降低,地表最大沉降接近1 m;离层探测结果显示,强矿震发生前,巨厚覆岩内部孔壁无裂隙,其下部岩层内部出现环状裂缝,强矿震发生后,巨厚覆岩内部孔壁塌孔,而其下部岩层内部塌孔离层现象更为明显。

结合工作面震源分布特征与地表岩移规律,对于典型巨厚覆岩赋存条件,覆岩运移与高能级微震事件密切相关,巨厚覆岩破断则极大可能诱发矿震事件。因此,解释矿震震源破裂机制,尤其进一步探究矿震震源内在应力触发机制对于有效防控矿震灾害极为重要。

2 基于主成分分析的震源机制反演

2.1 波形主成分提取

获取震源破裂机制是求解其应力作用机制的关键,矩张量反演作为分析矿震震源破裂机制的有效方法,存在众多类型^[21],综合考虑矩张量求解精度、反演迭代速度等要求,笔者选取混合矩张量反演方法进行矿震震源机制反演^[22];同时为克服煤矿复杂环境开采

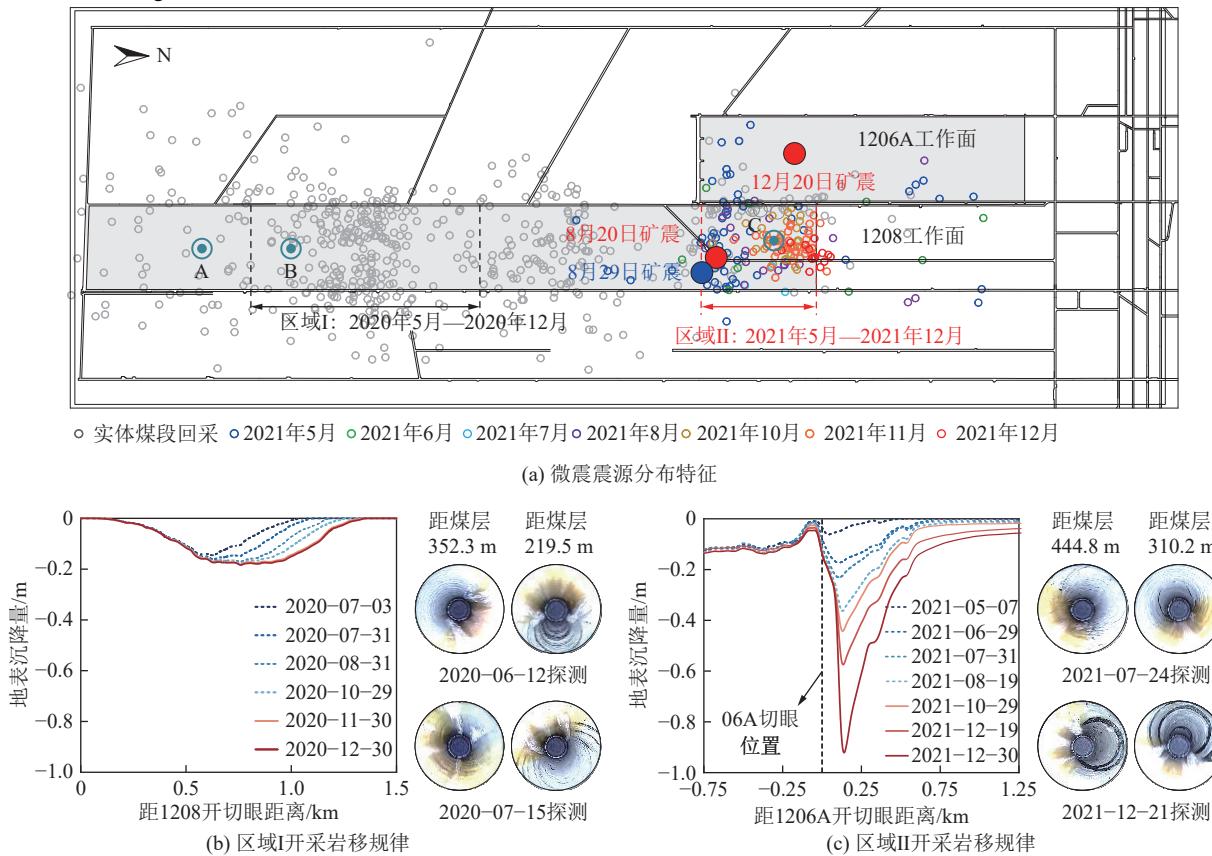


图3 微震震源分布特征与覆岩破断运移规律

Fig.3 Distribution characteristics of microseismic sources and overburden fracture transport pattern

台站挪移、微震波形有限且易受噪声污染导致信噪比低的缺点,基于主成分分析方法(PCA)^[23],分离波形干扰噪声,可增强波形信号的信噪比,提取优质波形主成分信息以减小矩张量反演误差。

假设震源被*i*个传感器接收到震动信号,以*i*个监测波形数据构建数据矩阵*X*,构建协方差矩阵*XX^T*并求解其特征值与特征向量,因协方差矩阵为对称矩阵,将其对角化为

$$XX^T = U\omega U^T \quad (1)$$

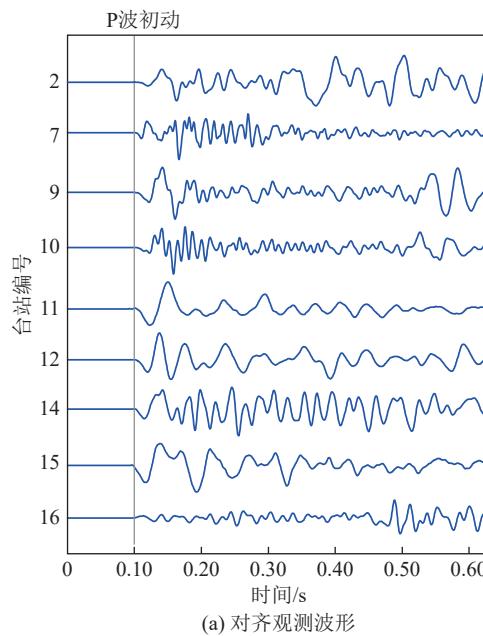
式中: *U*为特征值对应的正交特征向量组成的正交矩阵; *ω*为对角矩阵。

将波形矩阵*X*在特征向量空间投影,即为矩阵*X*的主成分*X_{PCA}*:

$$X_{PCA} = XU \quad (2)$$

原数据可通过特征向量矩阵和数据在特征向量空间的坐标进行重构:

$$X = X_{PCA}U^T \quad (3)$$



震动信号的第1主成分波形对应了事件的特征波形,因此通过PCA分解的系数乘以第1主成分即可得到波形的有效幅值,即PCA幅值,其中,可由这些系数组成波形主成分权重矩阵*W*,则波形的PCA幅值*X_(i)*可表示为

$$X_{(i)} = X_{PCA}^{(1)} W_{(i)}^T \quad (4)$$

将波形PCA幅值与权重矩阵代入标准的矩张量反演中,得到基于PCA方法的震源矩张量求解公式:

$$M = (G^T W G)^{-1} G^T W u \quad (5)$$

式中:格林函数*G*为反映震动波传播介质属性的*n*×6阶矩阵; *M*由6个独立矩张量组成, *M*=[*M*₁₁ *M*₂₂ *M*₃₃ *M*₂₃ *M*₁₃ *M*₁₂]; *u*为表示远场位移的*n*×1阶矩阵。

图4为应用PCA方法提取震动信号主成分的示意,采用SBPX方法^[24]进行P波到时标定后将波形数据对齐以便于主成分提取,如图4a所示;图4b为波形及其第1主成分;图4c为震动波形的第1、2、3、4主成分。

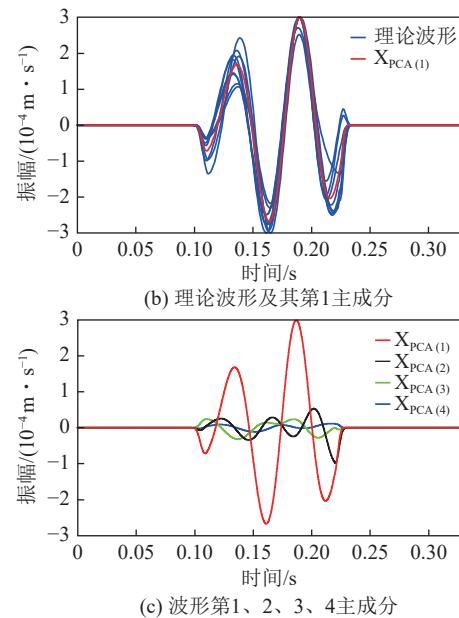


图4 基于主成分分析方法的微震波形预处理

Fig.4 Waveform preprocessing based on principal component analysis method

对于1208工作面回采期间诱发的733起能级大于10⁴J的微震事件,均采用主成分分析方法预处理波形,求解震源矩张量初始解后,根据矩张量解将所有震源筛选为不同的震源群,当震源群波形位移幅值的理论值与观测值间误差小于设定的阈值时反演结束。震源群中某一震源波形理论幅值*A_i^{synth}*与观测幅值*A_i^{obs}*的归一化误差RMS可表示为^[11]

$$RMS = \frac{\sqrt{\sum (A_i^{synth} - A_i^{obs})^2}}{\sqrt{\sum (A_i^{synth})^2}} \quad (6)$$

分别使用PCA波形与初始波形进行矩张量反演,幅值归一化误差分布如图5所示。由图5可知,采用PCA波形反演时,RMS小于0.1的微震占主导,共702次,RMS大于0.1的微震事件仅31次。显然,应

用PCA预处理的煤矿矿震波形进行矩张量反演,能够有效降低反演误差。同时,在后续研究中将剔除RMS大于0.1的微震事件。

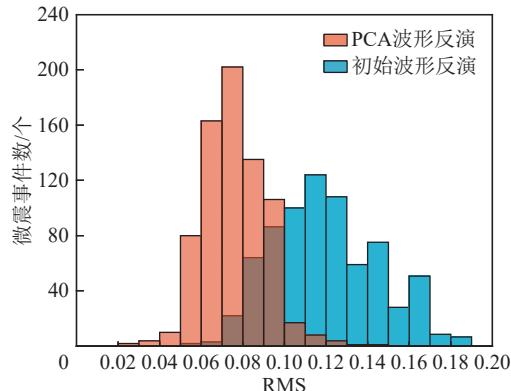


图5 波形振幅误差分析
Fig.5 Waveform amplitude error analysis

2.2 矩张量分解及表示

获取矩张量 \mathbf{M} 后,本征值化得到特征值 $(M_1, M_2, M_3, M_1 \geq M_2 \geq M_3)$,将其分解为 ISO、CLVD 及 DC 分量,分别表示震源的各向同性、轴向拉伸及剪切破裂成分,其中,CLVD、DC 分量之和称为偏矩张量 \mathbf{M}^* 。将矩张量分解^[25],得到矩张量 \mathbf{M} 的 ISO、CLVD 及 DC 分量的百分比 c_{ISO} 、 c_{CLVD} 和 c_{DC} 可表示为

$$\begin{cases} c_{\text{ISO}} = [\text{tr}(\mathbf{M})/3|M_{\text{max}}|] \times 100\% \\ c_{\text{CLVD}} = 2\varepsilon(1 - |c_{\text{ISO}}|) \\ c_{\text{DC}} = 1 - |c_{\text{ISO}}| - |c_{\text{CLVD}}| \end{cases} \quad (7)$$

式中: M_{max} 为矩张量 \mathbf{M} 的特征值的最大绝对值, $M_{\text{max}} = \max(|M_1|, |M_2|, |M_3|)$;参数 ε 用来衡量 CLVD 分量相对于 DC 分量的大小, $\varepsilon = -|M^*|_{\text{min}}/|M^*|_{\text{max}}$; $|M^*|_{\text{max}}$ 、 $|M^*|_{\text{min}}$ 分别表示偏矩张量 \mathbf{M}^* 的特征值绝对值的最大、最小值; $c_{\text{DC}} > 0$;对于张拉破裂震源, $c_{\text{ISO}} > 0$ 且 $c_{\text{CLVD}} > 0$;对于压缩破裂震源, $c_{\text{ISO}} < 0$ 且 $c_{\text{CLVD}} < 0$ 。

此外,基于震源矩张量 \mathbf{M} 特征值 M_1, M_2, M_3 及 M_1, M_3 对应的特征向量 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3$,由式(8)求解震源破裂面法向向量 \mathbf{n} 与滑移向量 \mathbf{v} ,进而为获取破裂面破裂产状信息以便后续分析。

$$\begin{cases} \mathbf{n} = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}}\mathbf{e}_1 + \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}}\mathbf{e}_3 \\ \mathbf{v} = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}}\mathbf{e}_1 - \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}}\mathbf{e}_3 \end{cases} \quad (8)$$

以“12-20”矿震为例,将矩张量分解为 ISO、CLVD 及 DC 分量如图6所示,3个分量占比分别达到 30.06%、56.87%、13.07%,震源破裂面走向角、倾角与滑动角分别为 139.93° 、 24.42° 、 94.03° 。矩张量

以轴向拉伸成分为主,判别 12 月 20 日矿震震源为纯张拉破裂类型。

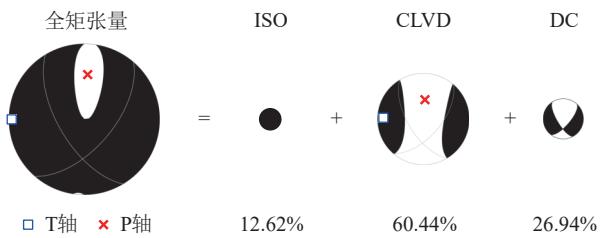


图6 12-20 矿震震源矩张量分解示意

Fig.6 Moment tensor decomposition of 12-20 Mine Earthquake

为便于震源破裂机制统计分析,应用月牙图可直观展示矿震震源破裂信息^[26]。如图7所示,洋红色弧线表示轴向拉伸与剪切成分,即偏矩张量;蓝色弧线表示各向同性与剪切成分;红色、绿色弧线分别对震源沙滩球进行区分,红色弧线上部沙滩球均为各向同性张拉,而绿色弧线下部沙滩球则与之相反。引用地球经纬度表达方法^[27],对于图7中标注点,月牙图纬线自上而下、经线(子午线)由左向右表示矿震震源破裂类型由纯张拉向纯压缩转变。

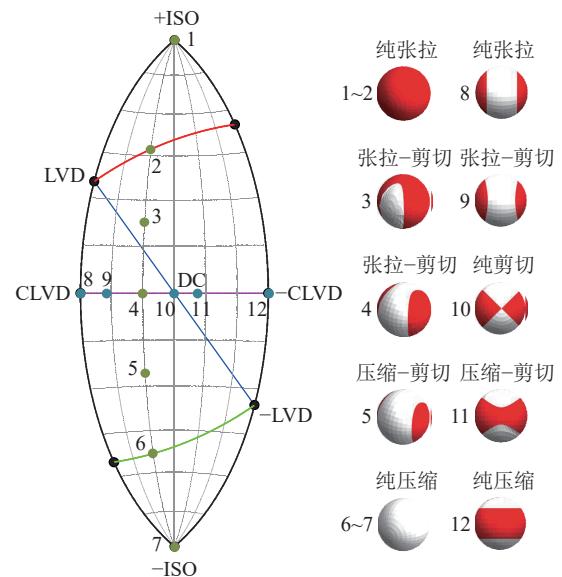


图7 震源破裂机制解的月牙图表示方法

Fig.7 Lune diagram representation of the solution of the source rupture mechanism

通过月牙图展示 3 起强矿震事件如图8所示,结合考虑矩张量 ISO、CLVD 及 DC 分量占比的矿震震源破裂判据^[12],判别“8月 20 日”、“8月 29 日”和“12月 20 日”矿震震源分别为纯张拉、纯剪切及纯张拉破裂类型。其中,“8月 20 日”“12月 20 日”矿震以轴向拉伸破裂占主导,“8月 29 日”矿震震源矩张量以剪切成分为主,各向同性与轴向拉伸占比很小,震源破裂为纯剪切类型,月牙图上表现为接近图形中心位置。

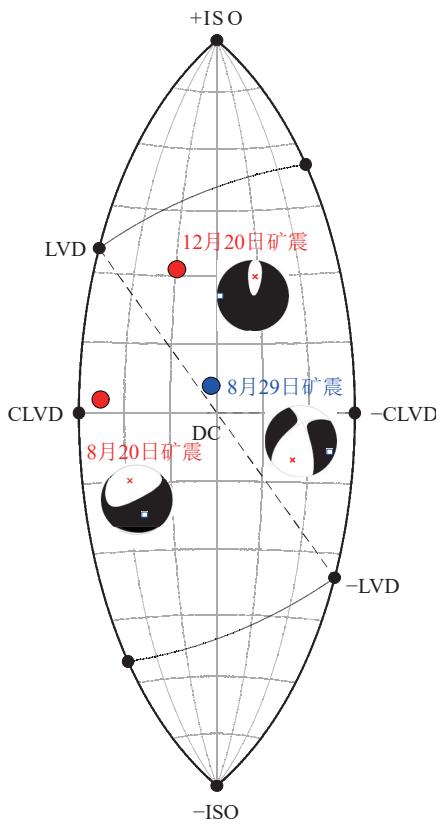


图 8 矿震事件的月牙图表示

Fig.8 Lune diagram representation of the mine earthquake

3 联合震源群破裂信息的应力反演

3.1 应力反演模型修正

判识震源破裂机制有助于理解矿震诱发机理,但对于进一步解析巨厚覆岩活动与矿震孕育触发间联

$$A = \begin{bmatrix} n_1(1-n_1^2) & -n_1n_2^2 & -n_1n_3^2 \\ -n_2n_1^2 & n_2(1-n_2^2) & -n_2n_3^2 \\ -n_3n_1^2 & -n_3n_2^2 & n_3(1-n_3^2) \end{bmatrix}$$

式中: n_1 、 n_2 、 n_3 分别为法向向量 \mathbf{n} 在 ENU 坐标系中东、北、天方向的分量。

假设研究区诱发 m 个微震事件, 即存在 m 个微震震源破裂面, 基于式 (12), 采用线性最小二乘法求解 $3 \times m$ 个线性方程后可求得主应力。

但上述应力反演方法是基于纯剪切破坏机制模型提出, 结合图 8, 煤矿矿震震源并非仅有纯剪切类型, 而是存在如图 9 所示的包含张拉、压缩等 5 种典型破裂类型, 对于煤矿开采环境, 采用上述方法反演采场应力场分布具有明显的局限性, 因此, 需要对该方法进行修正。

学者 JIA 等^[30]提出了综合考虑张拉、压缩破裂的应力反演修正模型, 如图 10 所示。

系, 揭示矿震震源内在应力场分布特征及其作用机制是关键。基于 BOTT 理论^[28], 美国学者 MICHAEL^[29]提出了震源应力的线性反演方法, 假设 σ_{ij} 为破裂面应力张量, 则破裂面有效牵引应力 \mathbf{T}_i 为

$$\mathbf{T}_i = \sigma_{ij} \mathbf{n}_j \quad (9)$$

式中: \mathbf{n}_j 为法向向量 \mathbf{n} 在东-北-天 (ENU) 坐标系中坐标轴上的分量。

有效牵引应力 \mathbf{T}_i 沿破裂面法向与切向的应力分量 σ_n 与 τ_i 可表示为

$$\begin{cases} \sigma_n = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{n}_i = \sigma_{nn} \\ \tau_i = \mathbf{T}_i - \sigma_n \mathbf{n}_i = \sigma_{kj} \mathbf{n}_k (\delta_{ik} - \mathbf{n}_i \mathbf{n}_k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{n}_i 、 \mathbf{n}_k 为法向向量 \mathbf{n} 在 ENU 坐标系中坐标轴上的分量; σ_{kj} 为应力张量 σ 在 jk 平面的投影; δ_{ik} 为克罗内克符号; i 、 j 、 k 为张量运算中的自由指标, 取值范围为 1、2、3, 对应 3 个正交方向, 分别表示东、北、天方向的分量。

考虑到式 (10) 暂无法确定绝对应力值, 因此将式 (10) 中切向应力归一化, 震源应力反演方程 \mathbf{V} 转换为

$$\mathbf{V} = \sigma_{kj} \mathbf{n}_j (\delta_{ik} - \mathbf{n}_i \mathbf{n}_k) \quad (11)$$

将式 (11) 以矩阵形式表示:

$$\mathbf{A}\sigma = \mathbf{V} \quad (12)$$

由于应力张量中的各项同性分量不受到破裂面滑动方向的约束, 故将其约束为 0, 即: $\sigma_{33} = -(\sigma_{11} + \sigma_{22})$, 则简化后的应力张量 $\sigma = [\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{33} \ \sigma_{23} \ \sigma_{13} \ \sigma_{12}]$; \mathbf{A} 为破裂面法向向量 \mathbf{n} 组成的 3×6 阶矩阵, 矩阵 \mathbf{A} 可表示为

$$\begin{bmatrix} -2n_1n_2n_3 & n_3(1-2n_1^2) & n_2(1-2n_1^2) \\ n_3(1-2n_2^2) & -2n_1n_2n_3 & n_1(1-2n_2^2) \\ n_2(1-2n_3^2) & n_1(1-2n_3^2) & -2n_1n_2n_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

基于图 10, 假设有效牵引力 \mathbf{T}_i 不再分解, 即 \mathbf{T}_i 方向与矩张量解析得到的破裂面滑移矢量 \mathbf{v} 平行, 因此对于张拉、压缩机制其滑移矢量并不平行于破裂面。

基于该假设, 式 (9) 可转化为

$$\mathbf{T}_i^e = \sigma_{ij}^e \mathbf{n}_j = (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \mathbf{P}) \mathbf{n}_j \quad (14)$$

式中: σ_{ij}^e 为修正模型的有效应力张量, MPa; \mathbf{P} 为岩体间水平推力, MPa。

式 (12) 的矩阵形式可表示为

$$\mathbf{A}\sigma^e = \mathbf{V} \quad (15)$$

破裂面法向向量组成的矩阵 \mathbf{A} 变换为

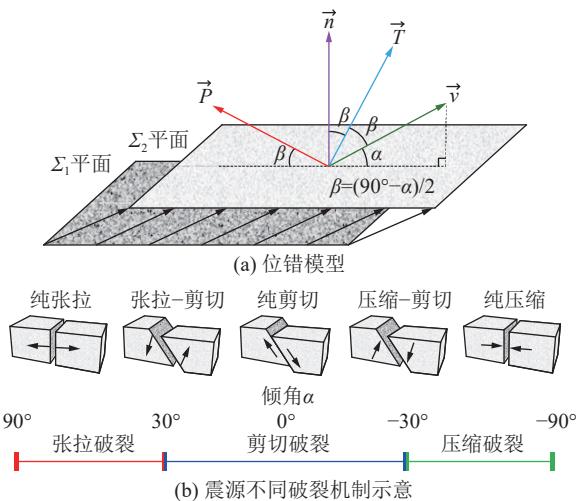


图 9 煤矿矿震震源典型破裂机制的力学模型

Fig.9 Mechanical modelling of typical rupture mechanisms of coal mine earthquake source

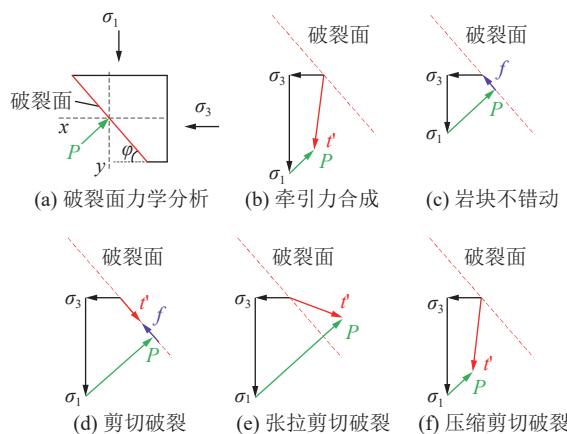


Fig.10 Mechanical analysis of source rupture surface

$$A = \begin{bmatrix} n_1 & 0 & 0 & 0 & n_3 & n_2 \\ 0 & n_2 & 0 & n_3 & 0 & n_1 \\ 0 & 0 & n_3 & n_2 & n_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

在应力反演过程中,并不能直接获取应力张量的绝对大小,根据震源破裂信息仅能求得4个参数,称为“约化应力张量”,即3个主应力(σ_1 、 σ_2 和 σ_3 ,分别为最大、中间、最小主压应力, MPa)和能够表示主应力相对大小的应力形因子 R ^[31]:

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (17)$$

应力形因子 R 取值范围为0~1。当 R 接近0时,主应力 σ_1 、 σ_2 接近,应力场呈双轴压缩状态;当 $R=0.5$ 时,压应力轴、中间应力轴和张应力轴相对稳定;当 R 接近1时,主应力 σ_2 、 σ_3 接近,应力场呈单轴压缩状态^[32]。

同时,为评估震源破裂面稳定性,引入震源破裂

失稳系数 I ^[33-34],用于评估矿震孕育期间的运移活动状态。系数 I 是根据摩尔库仑破坏准则定义的,如图11所示,其表达式可写为

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - \sigma_1)}{\tau_c - \mu(\sigma_c - \sigma_1)} \quad (18)$$

式中: τ_c 、 σ_c 分别为失稳破裂面的剪切牵引力和法向牵引力(图11中A点), N 、 σ 、 τ 分别为分析破裂面的法向牵引力和剪切牵引力(图11中B点), MPa; μ 为岩石摩擦因数。

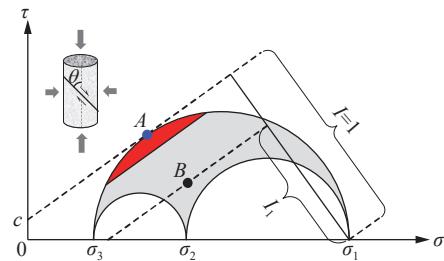


图 11 震源破裂面失稳系数的图形展示

Fig.11 Graphical presentation of instability coefficients at the rupture surface of source

根据式(17),将3个主应力进行缩放:

$$\begin{cases} \sigma_1 = 1 \\ \sigma_2 = 1 - 2R \\ \sigma_3 = -1 \end{cases} \quad (19)$$

结合图11可得到:

$$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}}, \sigma_c = \frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (20)$$

因此,式(18)可表示为

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - 1)}{\mu + \sqrt{1 + \mu^2}} \quad (21)$$

σ 、 τ 可表示为

$$\begin{cases} \sigma = l^2 + 1 - 2Rm^2 - n^2 \\ \tau = \sqrt{l^2 + (1 - 2R)^2 m^2 + n^2 - (l^2 + 1 - 2Rm^2 - n^2)^2} \end{cases} \quad (22)$$

式中: l 、 m 、 n 分别为破裂面法向 \mathbf{n} 与3个主应力方向的夹角余弦。

当 $I=0$ 时,破裂面最为稳定,随失稳系数增大至1,破裂面稳定性逐渐降低。图中红色填充区域表示失稳系数 $I \geq 0.9$,对于工作面开采过程中覆岩活动诱发的微震事件,震源破裂失稳系数超过0.9的震源占比越大,覆岩结构稳定性越差,诱发强矿震风险越高^[19]。

笔者基于Vavrycuk开发的线性迭代应力反演程序“STRESSINVERSE”^[35],结合应力反演修正力学模

型, 通过替换程序中的应力反演方程, 即将式(11)替换为式(14), 将反演程序“STRESSINVERSE”调整为理论上适用于煤矿采动诱发矿震震源破裂类型多样化特点的应力反演程序。后续进行应力反演时, 纯剪切破裂震源仍采用“STRESSINVERSE”程序进行反演, 而对于非纯剪切破裂类型的震源事件, 均采用修正后的应力反演程序进行反演。

3.2 应力反演误差分析

笔者以现有震源事件为基础数据验证应力反演修正模型的可靠性, 其中满足震源机制反演精度的微震震源破裂面产状信息分布如图12所示, 震源破裂面走向角、倾角及滑动角分别分布在 $50^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 、 $0\sim 50^{\circ}$ 及 $-100^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 范围。根据震源破裂模式将其破裂面产状信息输入不同的应力反演模型, 数值运算后即可得到震源主应力作用方位及其相对大小。

结合应力形因子 R 值、主应力方向作为应力反演误差评估指标, 通过分析在不同破裂面倾向与牵引方向夹角条件下的误差分布, 进一步验证应力反演修正模型应用于煤矿开采矿震震源应力反演的适

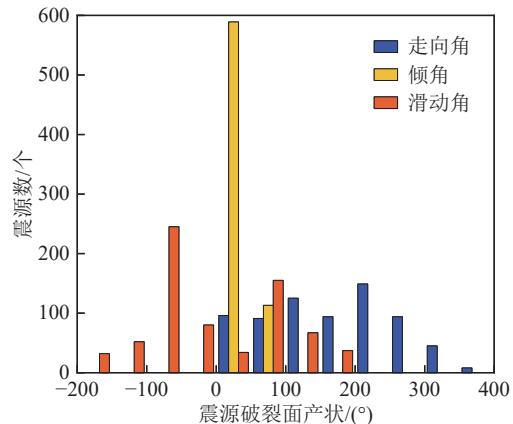


图12 矿震震源破裂面产状信息统计

Fig.12 Statistical information on the production of rupture surfaces at the source

用性。

图13为矿震震源应力反演模型修正前后的误差分析, 应力反演误差随破裂面倾向与牵引力方向夹角增大而增加。如图13a所示, 采用“STRESSINVERSE”程序进行应力反演时, 在破裂面倾向与牵引力方向夹

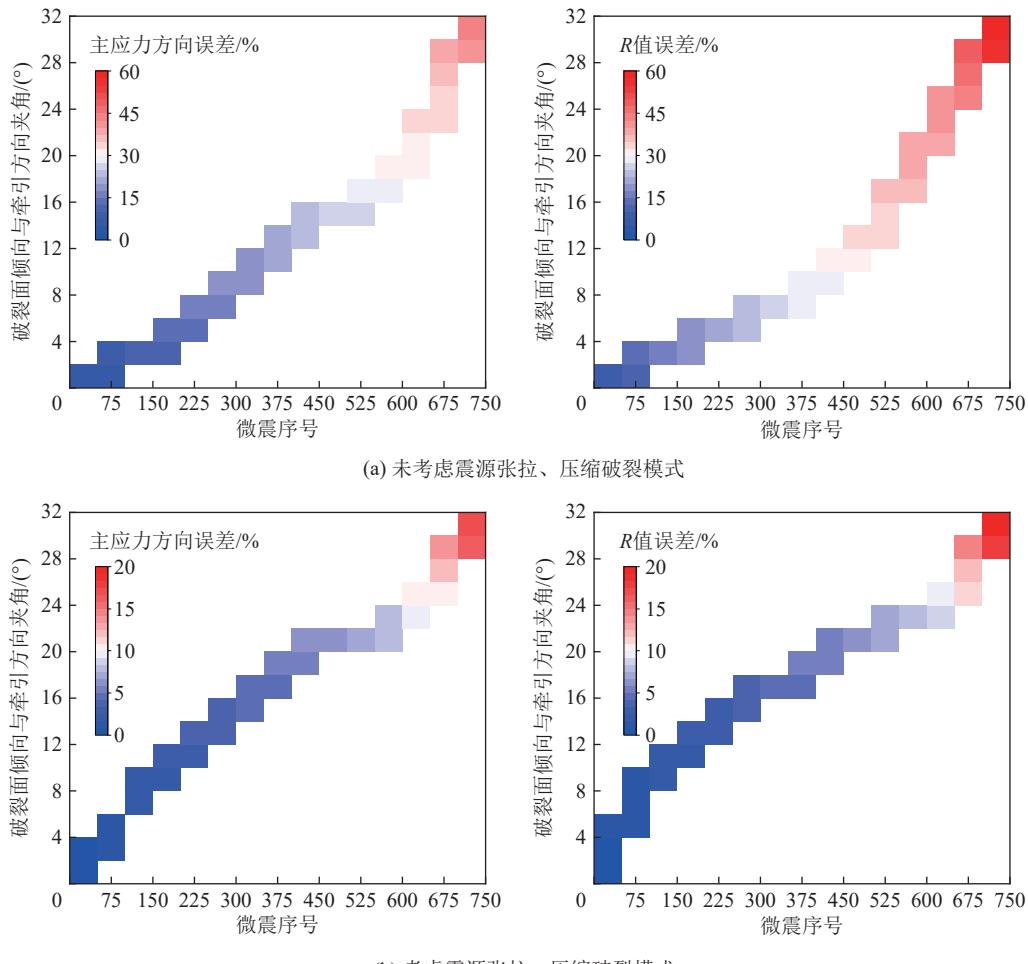


图13 震源应力反演模型修正前后误差分析

Fig.13 Error analysis before and after correction of stress inversion model

角增大至 20° 后,主应力方向、 R 值误差超过30%,当夹角超过 30° 后,主应力方向、 R 值误差升高趋势明显,其中 R 值误差更为敏感,接近60%。

基于应力反演修正模型的反演误差分析如图13b所示,在破裂面倾向与牵引力方向夹角达到 20° 时,主应力方向、 R 值误差介于5%左右。同时,随夹角逐渐增大,主应力方向、 R 值误差增长趋势较缓,直至夹角增大至 30° ,主应力方向、 R 值误差均未超过20%。

综上,考虑矿震震源张拉、压缩破裂模式的应力反演修正模型能够显著降低反演误差,可作为煤矿矿震震源应力反演的有效手段,后续将采用修正模型进行应力场反演。

4 巨厚覆岩强矿震应力触发机制

4.1 震源应力场孕育特征

考虑到该工作面由实体煤回采转变为邻空回采后,才频繁发生强矿震事件,因此,典型巨厚覆岩赋存条件下,临空开采是诱发矿震的主要开采技术原因。为揭示矿震应力触发机制,应先分析震源应力场孕育特征。本节根据工作面开采条件及强矿震发生情况,将工作面划分为3个研究区进行应力反演,划分情况如图14所示。

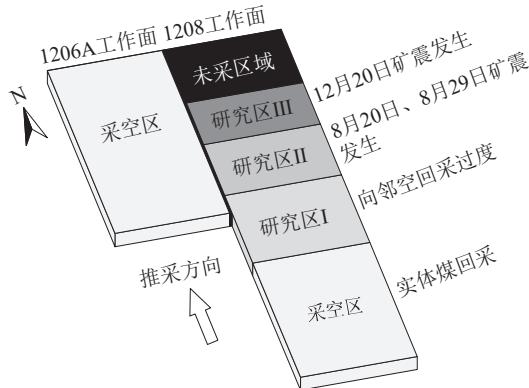


图14 研究区Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ划分情况

Fig.14 Distribution of the study areas I, II and III

研究区Ⅰ,工作面实体煤回采向邻空回采过渡(2021年1月—2021年4月),期间并未发生矿震;研究区Ⅱ,工作面邻空回采(2021年5月—2021年8月),期间发生了“8月20日、8月29日”矿震;研究区Ⅲ,工作面邻空回采(2021年9月—2021年12月),自“8月20日”矿震后停产51天,于2021年10月复产,期间发生了“12月20日”矿震。

获取震源群P、T轴分布特征后,数值计算得到在95%置信区间的主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方位分布情况

(表1),基于式(15)进一步转换得到3个研究区应力形因子 R 值,研究区Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ应力反演结果如图15所示。

表1 不同回采阶段主应力分布特征

Table 1 Characteristics of principal stress distribution in different mining stages

主应力/MPa	方位角/倾伏角/(°)		
	研究区Ⅰ (2021年1月—2021年4月)		
	研究区Ⅱ (2021年5月—2021年8月)		
σ_1	34.02/1.72	238.37/83.27	135.89/20.24
σ_2	303.74/9.97	335.72/0.86	261.67/57.76
σ_3	133.74/79.88	65.82/6.67	36.46/23.96

研究区Ⅰ的T轴具有较明显的优势方位,P轴分布则较为分散,表明工作面实体煤向邻空回采过渡阶段的最大主应力场分布不均匀,应力形因子 $R=0.34$,整体呈较为稳定的双轴挤压应力状态;进入研究区Ⅱ,优势主应力为最大主应力 σ_1 ,方位角、倾伏角分别为 238.37° 、 83.27° ,其应力形因子 $R=0.92$,区别于研究区Ⅰ,此时最大主应力 σ_1 明显大于其他主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 ,且 σ_2 、 σ_3 相差不大;对于研究区Ⅲ,P、T轴均较为分散, R 值为0.76,与研究区Ⅱ类似,整体呈现由最大主应力 σ_1 起主导控制作用的单轴挤压应力状态。

综上,巨厚覆岩赋存工作面开采条件由实体煤转变为邻空回采后,最大主应力方向、大小突变是较为典型的特征,巨厚覆岩破断诱发强矿震主要由最大主应力控制,表现为相邻采空区与后方采空区协同挤压作用。

4.2 强矿震应力触发机制

强矿震孕育触发过程主应力场突变伴随覆岩结构逐级破断,表明主应力场变化与覆岩结构稳定性存在一定关联性,因此通过分析覆岩结构稳定性特征,以进一步解析强矿震应力触发机制。在获取研究区Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ内各个震源破裂失稳系数 I 后,统计各研究区内系数 I 的大小分布情况,进而判别覆岩结构稳定状态。

图16为研究区Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ内震源群的失稳系数 I 的分布情况。研究区Ⅰ工作面尚处于实体煤回采阶段,失稳系数 I 小于0.9的震源数为24个,约占研究区总微震数30%,结合前文对覆岩离层探测结果,裂隙尚未发育至高位白垩系巨厚覆岩层,煤层上覆低位侏罗系延安组、直罗组为主要失稳岩层。研究区Ⅱ工作面邻空回采,裂隙快速发育至侏罗系安定组岩层高

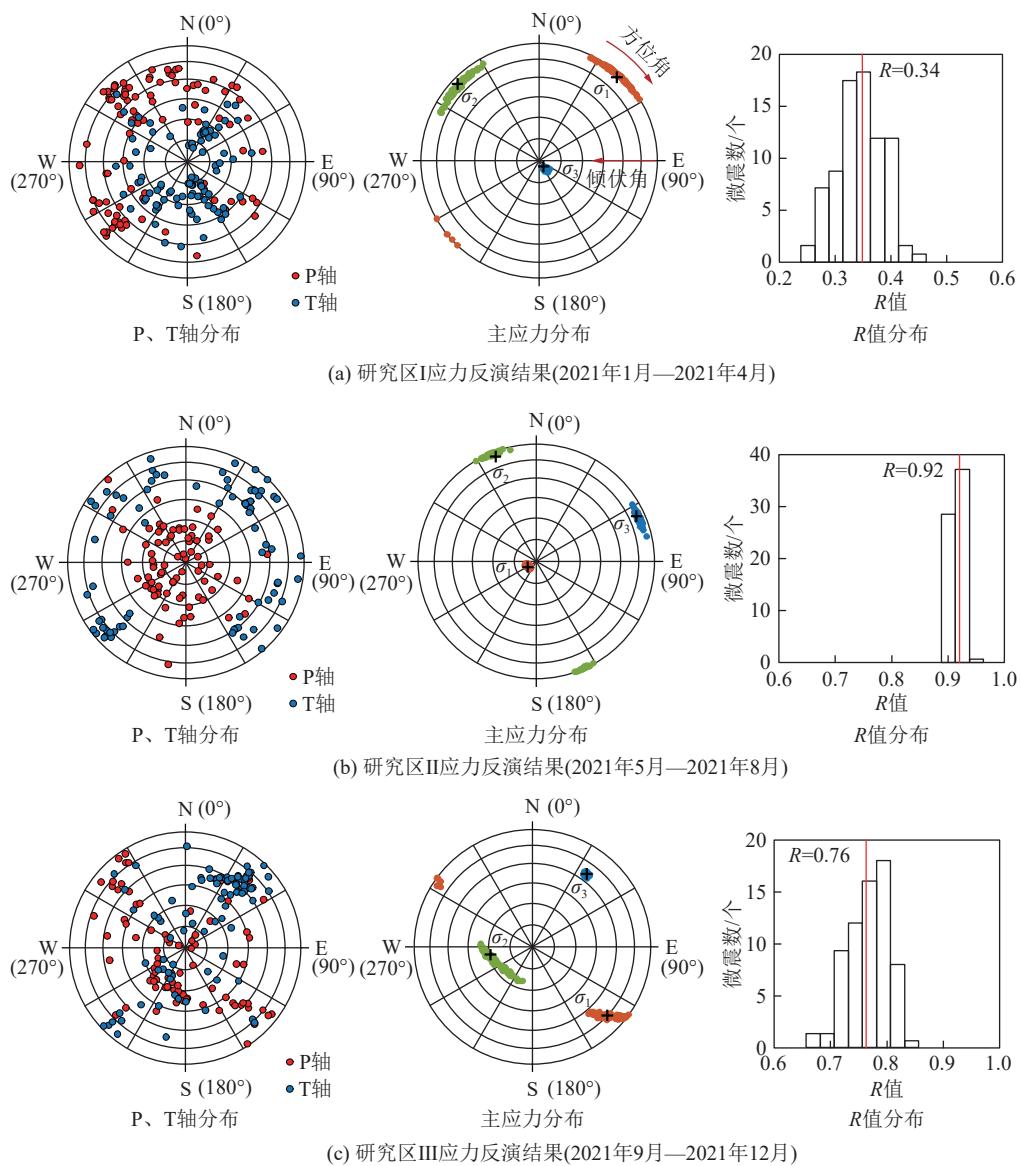


图 15 不同回采阶段应力场反演结果

Fig.15 Inversion results of stress field at different stages in coal mining

位,失稳系数超过 0.9 的震动事件显著增多,较研究区 I 增长约 60%,覆岩结构稳定性差,使得巨厚覆岩初次破断诱发强矿震,岩层结构稳定性随之降低,因此巨厚覆岩在工作面停产期间错动失稳导致强矿震再次发生。而工作面复产后,覆岩结构平衡状态被破坏,巨厚覆岩更易再次失稳破断引发强矿震。

工作面不同回采阶段覆岩结构主应力状态及强矿震应力触发机制如图 17 所示,对于实体煤回采阶段,超前支承压力影响较小,工作面整体处于较为稳定的挤压状态。工作面邻空回采后,最大主应力 σ_1 因侧向采空区影响显著高于其他主应力,方位转变为由侧向采空区指向工作面,同时倾伏角由近水平增大至 83.27° ,最大主应力 σ_1 突增且近似竖向作用于巨厚覆岩结构,从而触发了“8月 20 日”强矿震,后续工作面

停产期间,巨厚覆岩整体应力状态并未改变,在最大主应力 σ_1 挤压作用下破断巨厚覆岩错动失稳触发了“8月 29 日”强矿震。工作面继续临空推进,侧向、后方联结成片形成大范围采空区后,覆岩结构联动破断,最大主应力 σ_1 作用方位再次发生变化,且由于发生 2 起强矿震后,巨厚覆岩处于失稳状态,因最大主应力 σ_1 单轴挤压作用再次张拉破断诱发了“12月 20 日”强矿震。

综合分析巨厚覆岩赋存工作面邻空回采前后应力场分布与覆岩结构失稳特征,覆岩结构破断失稳与应力场状态变化相互影响,尤其最大主应力 σ_1 相对大小与作用方位突变对巨厚覆岩稳定性影响最大,主应力 σ_1 竖向单轴挤压作用导致巨厚覆岩剧烈运动并瞬时断裂释放大量弹性能是强矿震频发的主要原因。

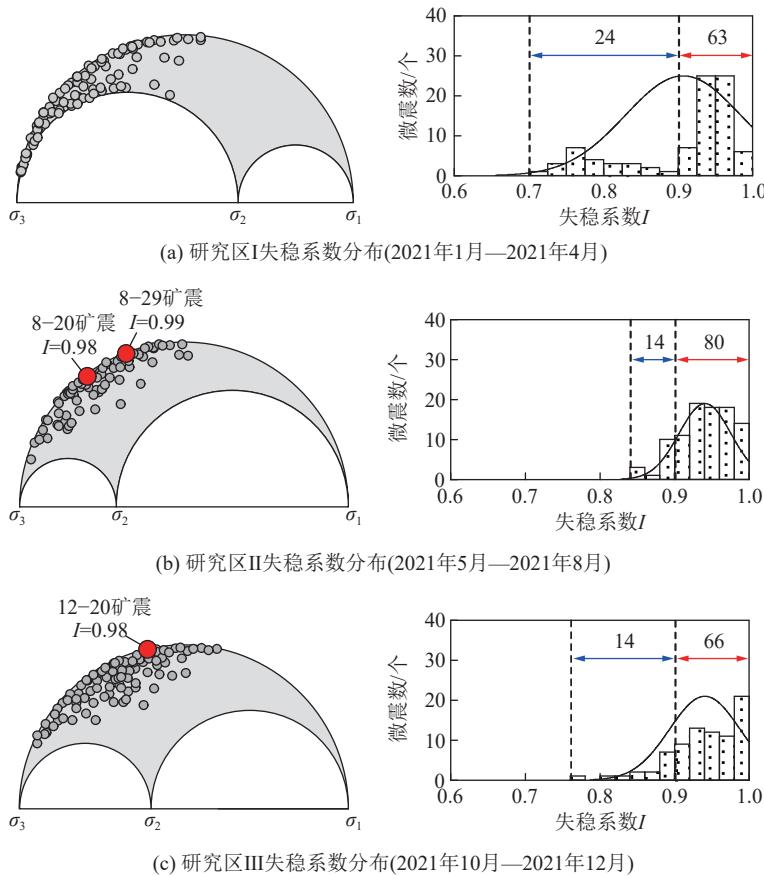


图 16 不同回采阶段震源破裂面失稳系数分布

Fig.16 Distribution of instability coefficients of rupture surfaces of source at different stages in coal mining

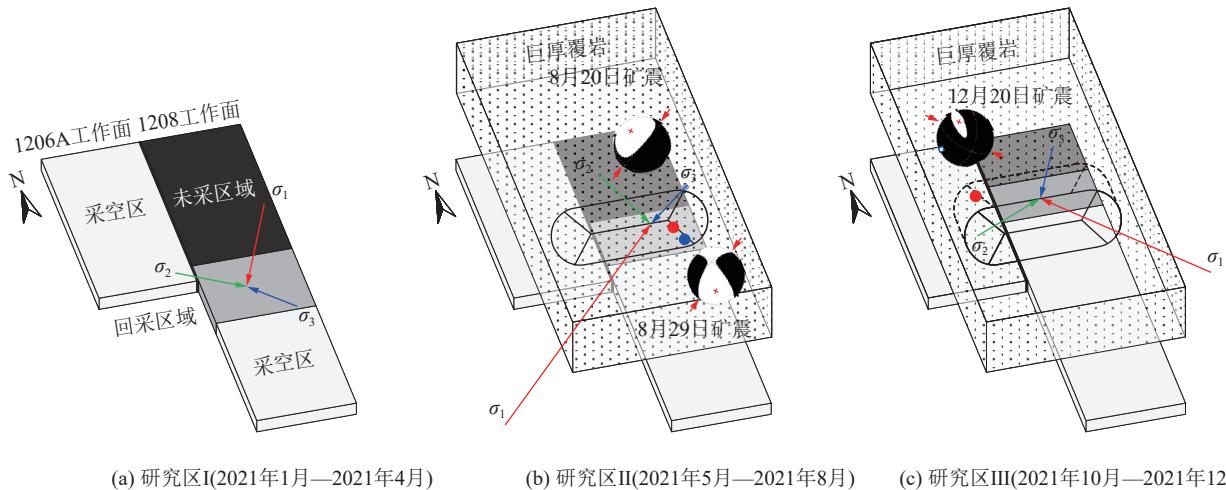


图 17 巨厚覆岩强矿震应力触发机制

Fig.17 Stress triggering mechanism of strong mine earthquake in the huge thick strata

5 结 论

1) 应用主成分分析方法提取了煤矿复杂震动波形主成分信息,结合混合矩张量反演方法可大幅降低波形理论振幅与观测振幅间误差,提高了巨厚覆岩赋存条件震源矩张量反演精度,保证了获取用于应力反演的震源破裂信息的准确度。

2) 通过修正应力反演力学模型,指导反演算法改进以满足张拉、压缩等非纯剪切破裂模式震源应力反演要求,将修正前主应力方向、应力形因子 R 值反演误差由 60% 降低至 20% 以下,表明改进算法更适用于巨厚覆岩矿震震源应力场反演。

3) 强矿震孕育过程中,最大主应力相对其他主应力显著增大,作用方位转变为近似竖向方向,表现为

侧向采空区与后方采空区的协同单向挤压,最大主应力状态改变对触发巨厚覆岩矿震起控制作用。

4) 覆岩结构破断失稳与应力场状态变化相互影响,工作面大范围采空后覆岩结构联动破断,引起最大主应力突变,在最大主应力竖向单轴挤压作用下,巨厚覆岩剧烈运动并瞬时断裂释放大量弹性性能是强矿震频发的主要原因。

参考文献(References):

- [1] 曹安业,窦林名,白贤柄,等.我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J].煤炭学报,2023,48(5):1894–1918.
CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1894–1918.
- [2] 白贤柄,曹安业,杨耀,等.高位巨厚覆岩运移规律及矿震触发机制研究[J].煤炭科学技术,2023,51(3):10–20.
BAI Xianxi, CAO Anye, YANG Yao, et al. Study on movement law of extremely thick strata and triggering mechanism of mine earthquakes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 10–20.
- [3] 杨耀,曹安业,白贤柄,等.深井巨厚覆岩邻空采动强矿震孕育发生机理[J].煤炭科学技术,2023,51(12):220–231.
YANG Yao, CAO Anye, BAI Xianxi, et al. Occurrence mechanism of strong mining tremors under mining near goaf in deep mine with extremely thick strata[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 220–231.
- [4] 李斌,任玺宁,崔春兰,等.补连塔煤矿中生界高分辨率层序地层与沉积环境演化[J].地质科学,2022,57(4):1262–1285.
LI Bin, REN Xining, CUI Chunlan, et al. High-resolution sequence stratigraphy and sedimentary environment evolution of Mesozoic in Bulianta coal mine[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 2022, 57(4): 1262–1285.
- [5] 吴坤波,邹俊鹏,焦玉勇,等.深部煤矿强矿震震源参数分析及震源机制研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(10):2540–2551.
WU Kunbo, ZOU Junpeng, JIAO Yuyong, et al. Study on the internal relationship of source parameters and focal mechanism of strong mine tremors in deep coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2540–2551.
- [6] 陈栋,王恩元,李楠.千秋煤矿微震震源参数特征以及震源机制分析[J].煤炭学报,2019,44(7):2011–2019.
CHEN Dong, WANG Enyuan, LI Nan. Analysis of microseismic source parameters and focal mechanism in Qianqiu Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2011–2019.
- [7] 曹安业,陈凡,刘耀琪,等.冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参数响应规律[J].煤炭学报,2022,47(2):722–733.
CAO Anye, CHEN Fan, LIU Yaoqi, et al. Response characteristics of rupture mechanism and source parameters of mining tremors in frequent coal burst area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 722–733.
- [8] CHENG Y F, ALLEN R M, TAIRA T. A new focal mechanism calculation algorithm (REFOC) using inter-event relative radiation patterns: Application to the earthquakes in the parkfield area[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2023, 128(3): e2022JB025006.
- [9] ROSS Z E, MEIER M A, HAUSSON E. P wave arrival picking and first-motion polarity determination with deep learning[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(6): 5120–5129.
- [10] KUANG W H, YUAN C C, ZHANG J, et al. Relative focal mechanism inversion and its application to Ridgecrest sequence[J]. *Seismological Research Letters*, 2023, 94(1): 305–317.
- [11] LINZER L M. A relative moment tensor inversion technique applied to seismicity induced by mining[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, 38(2): 81–104.
- [12] ZHAO Y, YANG T H, ZHANG P H, et al. Inversion of seepage channels based on mining-induced microseismic data[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 126: 104180.
- [13] 李铁,王金安,刘军.深部采动断层异变的强制逆冲机制[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3760–3765.
LI Tie, WANG Jin'an, LIU Jun. Forced thrust mechanism of fault mutation in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3760–3765.
- [14] 康红普,高富强.煤矿采动应力演化与围岩控制[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):1–40.
KANG Hongpu, GAO Fuqiang. Evolution of mining-induced stress and strata control in underground coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(1): 1–40.
- [15] 张剑,康红普,刘爱卿,等.山西西山矿区井下地应力场分布规律[J].煤炭学报,2020,45(12):4006–4016.
ZHANG Jian, KANG Hongpu, LIU Aiqing, et al. Distribution law of underground in-situ stress field in Xishan coal mine field, Shanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4006–4016.
- [16] 李铁,蔡美峰,孙丽娟,等.基于震源机制解的矿井采动应力场反演与应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(9):1747–1753.
LI Tie, CAI Meifeng, SUN Lijuan, et al. Inversion of mining-induced stress field and its application based on focal mechanism solution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1747–1753.
- [17] 刘洋,陆菜平,王华,等.不规则煤柱变形破坏机理矩张量反演研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(6):1201–1209.
LIU Yang, LU Caiping, WANG Hua, et al. Moment tensor inversion study on deformation and failure mechanism of the irregular coal pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(6): 1201–1209.
- [18] SONG C H, LU C P, LIU H Q, et al. Moment tensor and stress field inversions of mining-induced seismicity in A thick-hard roof zone[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(3): 2267–2287.
- [19] AMEMOUTOU A, MARTÍNEZ-GARZÓN P, KWIATEK G, et al. Earthquake source mechanisms and stress field variations associated with wastewater-induced seismicity in southern Kansas, USA[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(7): e2020JB021625.
- [20] MARTÍNEZ-GARZÓN P, VAVRYČUK V, KWIATEK G, et al.

- Sensitivity of stress inversion of focal mechanisms to pore pressure changes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(16): 8441–8450.
- [21] 吴顺川, 黄小庆, 陈钒, 等. 岩体破裂矩张量反演方法及其应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 1–18.
- WU Shunchuan, HUANG Xiaoqing, CHEN Fan, et al. Moment tensor inversion of rock failure and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 1–18.
- [22] 刘耀琪, 曹安业, 王常彬, 等. 基于震源机制与定位误差校准的冲击地压危险预测方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2065–2077.
- LIU Yaoqi, CAO Anye, WANG Changbin, et al. Prediction method of coal burst risk based on focal mechanism and location error calibration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 2065–2077.
- [23] VAVRYČUK V, ADAMOVÁ P, DOUBRAVOVÁ J, et al. Moment tensor inversion based on the principal component analysis of waveforms: Method and application to microearthquakes in west Bohemia, Czech republic[J]. *Seismological Research Letters*, 2017, 88(5): 1303–1315.
- [24] MEIER M A, HEATON T, CLINTON J. The Gutenberg algorithm: Evolutionary Bayesian magnitude estimates for earthquake early warning with a filter bank[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(5): 2774–2786.
- [25] VAVRYČUK V. Moment tensor decompositions revisited[J]. *Journal of Seismology*, 2015, 19(1): 231–252.
- [26] ALVIZURI C, TAPE C. Full moment tensor analysis of nuclear explosions in north Korea[J]. *Seismological Research Letters*, 2018, 89(6): 2139–2151.
- [27] TAPE W, TAPE C. A geometric setting for moment tensors[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(1): 476–498.
- [28] BOTT M H P. The mechanics of oblique slip faulting[J]. *Geological Magazine*, 1959, 96(2): 109–117.
- [29] MICHAEL A J. Determination of stress from slip data: Faults and folds[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B13): 11517–11526.
- [30] JIA S Q, EATON D W, WONG R C. Stress inversion of shear-tensile focal mechanisms with application to hydraulic fracture monitoring[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(1): 546–563.
- [31] GEOPHART J W, FORSYTH D W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B11): 9305–9320.
- [32] SASAKI S, KAIEDA H. Determination of stress state from focal mechanisms of microseismic events induced during hydraulic injection at the Hijiori hot dry rock site[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159(1): 489–516.
- [33] VAVRYČUK V. Principal earthquakes: Theory and observations from the 2008 west Bohemia swarm[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 305(3-4): 290–296.
- [34] VAVRYČUK V, BOUCHAALA F, FISCHER T. High-resolution fault image from accurate locations and focal mechanisms of the 2008 swarm earthquakes in West Bohemia, Czech Republic[J]. *Tectonophysics*, 2013, 590: 189–195.
- [35] VAVRYČUK V. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199(1): 69–77.