

运用 MTfit 和 MSATSI 研究某煤矿微地震的震源机制和应力场

徐睿¹, 战凯¹, 孔超², 王聪², 王超³, 梁春涛¹

(1. 地球勘探与信息技术教育部重点实验室 成都理工大学, 成都 610059;

2. 山东科岳科技有限公司, 济南 250014;

3. 山东能源集团有限公司, 济南 250014)

摘要: 微地震监测对矿山安全至关重要, 它可以为煤矿安全提供预警。首次将 MTfit 和 MSATSI 技术应用于东滩煤矿 63_上06 工作面微地震分析, 选取 53 个关键事件, 反演震源机制, 并确定最大水平主压应力方向, 得到了采矿活动与震源机制和岩层破裂之间的关联。结果表明, 六采区微地震震源机制主要表现为正断和逆断型, 显示出明显的 CLVD 成分, 并且拉张和压缩破裂在本煤矿震源机制中占主导地位。同时, 应力场分析可圈定最大水平主压应力方向, 明确围岩的构造应力状态, 为理解工作面开采引发的岩体破裂和应力重组提供了新的视角。

关键词: MTfit; MSATSI; 微地震监测; 震源机制; 应力场反演

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2025.01.05

0 引言

地震矩张量分析是地震学和监测研究中的一种关键手段, 能够提供关于震源机制以及地震活动性质、机制和潜在影响的重要信息。应力场反演是基于矩张量的深入分析, 使用这种技术可以得到水平面上最大主压应力方向, 中间主压应力方向和最小主压应力方向(最大拉应力方向), 其中最大主压应力方向对于煤矿的安全防护和指导开采都具有先导性作用。

Gilbert^[1]首次在震源研究工作中引入矩张量的概念, Knopoff and Randall^[2]将矩张量分解为体积分量和偏分量, Vavryčuk^[3]在应用中给定实际的物理意义, Dreger and Helmberger^[4]基于 P 波信息在时间域内进行地震矩张量反演的方法(TDMT-

INV), Zhu and Helmberger^[5]提出基于全波形反演的 CAP 方法, 反演震源的矩张量, Pugh^[6]提出 MTfit 方法, 仅使用 P 波的初至极性进行矩张量和双力偶源反演的贝叶斯正演模型反演, Grzegorz et al^[7], 使用 P 波初至极性和第一个脉冲的面积反演矩张量, Vavryčuk^[8]提出一种 CLVD-ISO 钻石图的方法, 绘制矩张量中补偿线性偶极子成分占比和各向同性部分占比来判断震源的类型, 相较于 hudson 模型, 钻石图更加直观反映了震源性质。吴顺川^[9]总结了矩张量反演方法, 将其应用到岩体破裂上, 李秋辰等^[10]基于矩张量震源机制反演应用到地应力反演, 具有很广阔的适用范围。

对于理解地壳力学和地震的孕震机制, 通过分析震源机制来预测应力场的方向是一个关键的手段。在全球地震学领域, 形式应力反演(Formal Stress Inversion, 下文简称 FSI)是一项成熟的技术

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(4217040570, 41674059)

第一作者: 徐睿(1999—), 男, 硕士, 主要从事微地震定位、震源机制及应力场反演研究, E-mail: xurui_vv@foxmail.com。

通信作者: 战凯(1993—), 男, 博士, 主要从事微地震定位、震相拾取、层析成像、速度变化等研究, E-mail: zhankai@stu.cdut.edu.cn。

术,Hardebeck and Michael^[11], Yoshida et al^[12] 将其用于研究与大地震相关的构造过程。亚东菊等^[13]通过基于裂缝预测与流体预测技术的煤层顶板富水性研究,为地壳力学和地震孕震机制的理解提供了新视角。金文辉等^[14]基于叠前岩石力学参数反演的三维地应力预测研究,进一步证实了 FSI 技术在油气和地热储层开发中的重要性。此外, Terakawa et al^[15]利用 FSI 技术还可以获取有关应力场方向的信息,对于油气和地热储层的开发具有重要意义。Martínez-Garzón et al^[16]利用最大水平应力方向($\sigma_{H \max}$)评估油藏开发中的诸如钻井和泄漏风险。此外,McGarr et al^[17]通过 FSI 技术,在实验室岩石变形实验框架中更好地理解微观尺度下破裂过程的物理特性。在此基础上, Jeanne Hardebeck and Andy Michael^[18]在 2006 年编写加入了阻尼因子的区域尺度应力场反演的 SATSI 算法。基于 SATSI 发展出的 MSATSI,广泛的应用到各种小区域的应力场研究。

煤矿微地震的破裂机制解析和开采区水平最大主压应力方向和聚焦应力集中位置对于煤矿安全预警是基本更是关键,所以我们尝试使用 MTfit 和 MSATSI 研究煤矿微地震震源机制与应力场。笔者以正在开采的东滩煤矿 63_上06 工作面为例,首次采用东滩六采区 2023 年 8 月 24 日—9 月 30 日微地震数据进行震源机制和局部应力场分析。煤矿上使用的接触性方法测量主应力方向,成本高,消耗时间长,而利用微地震事件反演得到震源机制和应力场,节约成本,方便快捷,为煤矿安全提供强有力的理论和应用支持。

1 工区介绍

笔者研究了 2023.08.24—2023.09.07 时间段内东滩煤矿 63_上06 工作面产生的地震事件。利用科岳科技(山东)集团有限公司研发的微震定位系统 KJ1222,定位得到 910 个事件。事件分布集中在工作面附近以及采空区,其中红点代表监测到的微地震事件,黑色三角形代表微震探头(图 1)。煤矿微地震按发生位置可分为两类,一类发生在采空区,距离工作面较远,煤层上覆硬岩层向采空区横向错动发生断裂,此类事件一般能量较大,对生产安全不会造成影响;另一类是发生在开采面附近约 100 m 的范围内,和矿山的生产有关,随工作面推进产生新的岩层断裂,这里重点关注的是第二类开采面附近的

压裂地震。

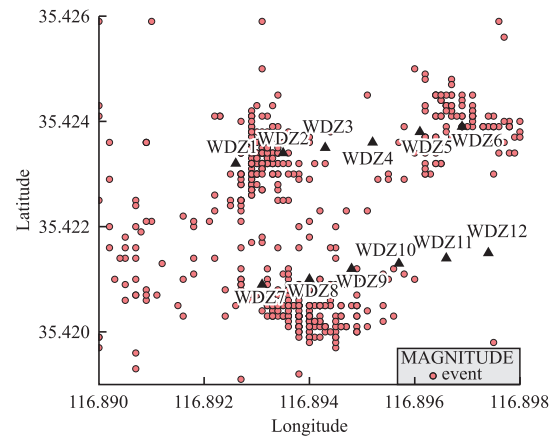


图 1 微震事件分布

Fig. 1 Microseismic event distribution

我们筛选了台站包围较好的事件,使台站分布在事件的四周,即在微震探头 WDZ1—WDZ12 所在巷道±150 m 的范围内的事件,用于后续的 P 波初至极性的拾取。并用 MTfit 方法利用极性反演震源机制,再通过震源机制采用 MSATSI 反演区域最大主压应力。

2 反演方法

2.1 MTfit

MTfit 是一种基于贝叶斯方法的矩张量反演程序,由 Pugh^[6,19]提出。不同于 FPFIT^[20]、HASH^[21]和 FOCMEC^[22]等常规方法,MTfit 利用贝叶斯框架和包括极性及振幅比在内的数据,估算双耦合全矩张量模型空间的概率密度函数,为震源参数提供全方位的估算^[23]。

体波初动极性分析为震源机制解析提供了基础——不同观测站记录到的地震 P 波初至极性存在差异。

图 2 展示了垂直断层的走滑地震。地震初动分为向上和向下两种类型,对于地表台站的垂直分量,初动向上和向下对应着膨胀和压缩。根据初动分为四个象限——两个压缩象限和两个膨胀象限,它们由两个互相垂直的截面(断层面和辅助面)分隔。台站在震源的不同位置记录到的 P 波初动不同,即区分膨胀和压缩象限,可以确定震源机制,这需要至少一组 P 波初动数据。如有足够的台站覆盖,可以明确断层面和辅助面。

在对实际数据拾取极性时有一种特殊情况——

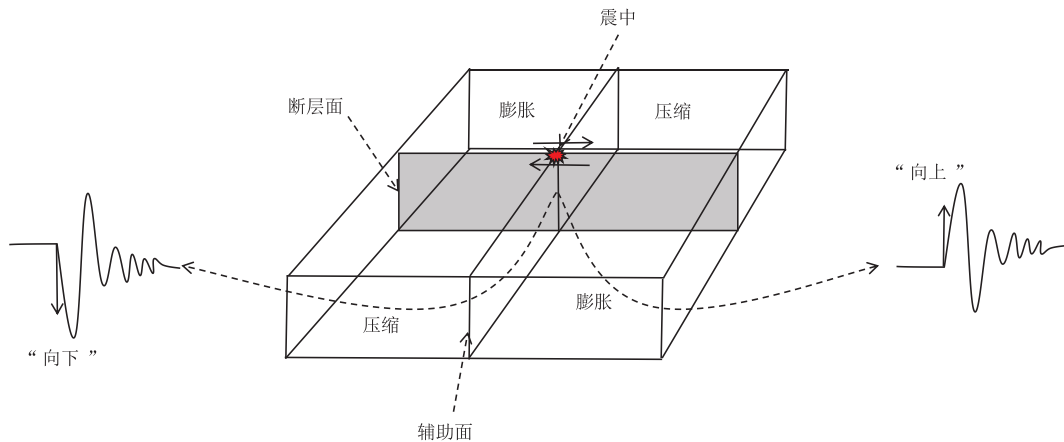


图2 位于不同方向的地震计观测到的地震P波初动(修改自STEIN^[24])

Fig. 2 The seismic P-wave initial motion observed by seismometers in different stations

极性反转。刘胤池等人^[25]的研究表明:震源位置和检波器位置的不同对应采集到的P波初动信号可能会发生反转,具体反转规则如下(图3):

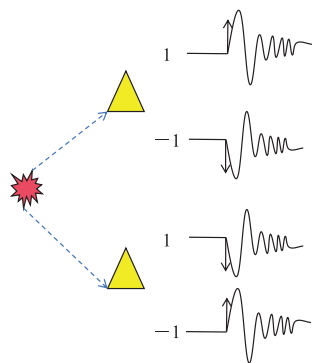


图3 极性反转情况分析

Fig. 3 Analysis of polarity reversal

当检波器在震源上方且波形初动向上,极性符号 $p=1$,初动向下,极性符号 $p=-1$;当检波器在震源下方且波动极性向上,极性符号 $p=-1$,初动向下,极性符号 $p=1$ 。MTfit 的输入是台站相对于震源点的方位角,离源角和极性,没有对台站深度和震源深度的判断,所以也没有考虑极性反转问题,在处理煤矿微地震事件时需要考虑反转极性,不然会得到相反的震源机制解。

2.2 MSATSI

MSATSI 是基于 SATSI 发展出的一款工具,它结合了传统方法、新颖的用户界面和直观的可视化工具。SATSI 的反演技术旨在找到符合震源机制序列的最优应力张量。

SATSI 反演方法的理论基础是 Michael^[26] 在 1984 年提出的,该方法通过最小化每个断层面的

滑移向量与求解的剪应力向量之间的差异来求解应力张量,即求解方程:

$$Gm = d \quad (1)$$

向量 m 为应力张量,向量 d 是由地震震源机制求解得到的滑动向量构成,数据核矩阵 G 由各震源机制的断层面法向量导出。使用高斯消去法求解。不确定性是通过对数据的自举重采样来估计的,如果实际断层面不确定,则可能包括随机选择两个震源机制节点面中的一个。

反演得到了三个主应力轴的方向和一个反映相对应力大小 R 的量(ϕ):

$$\phi = 1 - R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2)$$

其中 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 为由偏应力张量得到的三个主应力轴的大小。 R 值可以衡量中间主应力(σ_2)与最大压缩主应力(σ_1)和最小压缩主应力(σ_3)的相近程度。

3 反演成果

3.1 震源机制及应力场

据 Qian et al^[27] 的研究表明,在工作面推进煤矿开采时,工作面上和工作面与上顺槽顶板的夹角区域以及上顺槽顶板附近都会产生大量的微震事件,与我们实际监测到的微震事件分布相符。所以根据上述情况,我们将研究区细分为下图 4 所示的三个子区域,区域编号分别为①,②,③。

我们进一步筛选在研究区域内且波形清晰、极性清晰的事件。现场数据(2023.08.24—2023.09.07)我们挑选出符合条件的 53 个地震事件,并对这 53 个事件进行极性拾取和极性反转,从而反演出该

区域的震源机制(图 5),图 5 (a) 展示了优质的 53 次地震的全矩张量震源机制解,事件的深度由沙滩球的颜色体现,图 5(b) 显示了从震源机制中确定

的 P 轴,短棒方向代表 P 轴的方位角,颜色代表 P 轴的俯仰角,而图 5 (c) 和 图 5 (d) 分别提供了表明 P 轴方位角和俯仰角的玫瑰图,后文附地震目录表。

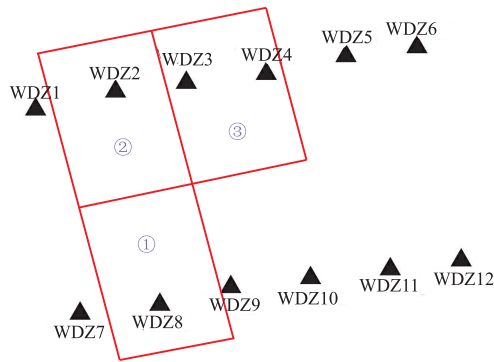


图 4 研究区分区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of research segmentation area

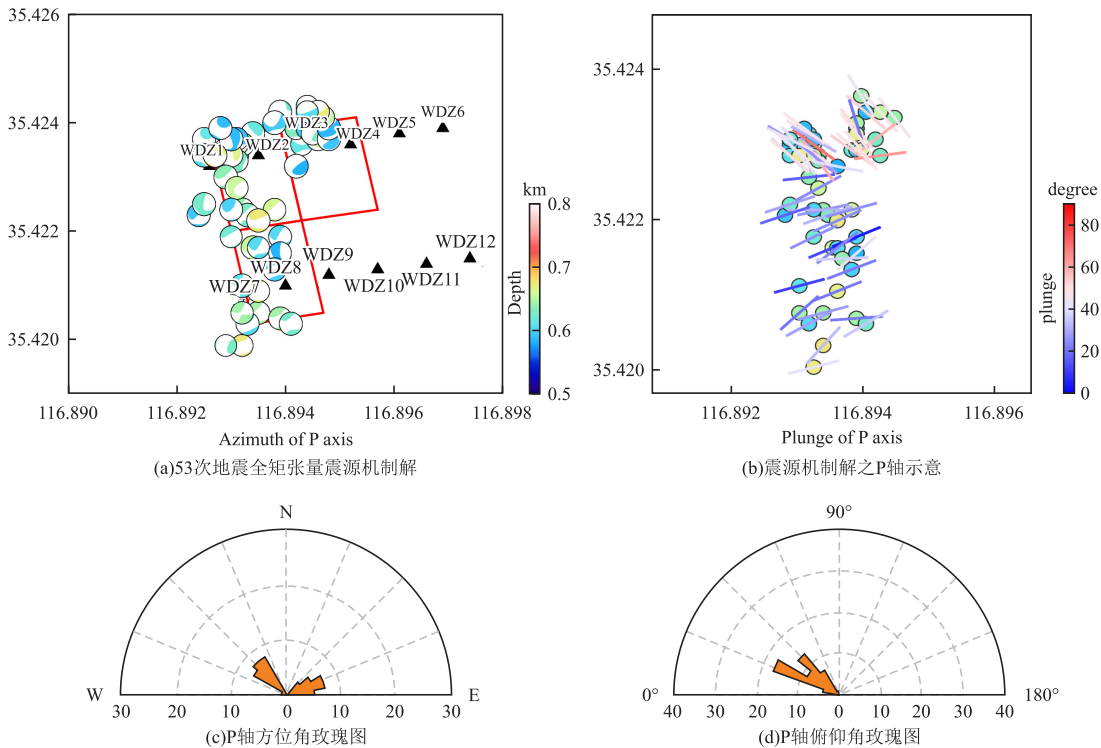


图 5 震源机制图

Fig. 5 Focal mechanism map

从图 5(a)中我们可以发现整个研究区的微地震事件的性质是正断和逆断居多,存在部分斜滑破裂事件,深度在-600 m 至-700 m 之间,且含有较高成分的 CLVD 分量,CLVD 机制的解释有一种类似于张力作用下裂缝张开,所以该区域具有高 CLVD 分量的机制可能是随着煤矿的开采,工作面的推进使得压实的煤层产生裂缝从而发生断裂。

在区域①,在工作面上发生的事件基本受到与顺槽方向平行的压力,而在②的左上角区域和③上发生的事件基本受到 N30°W-N60°W 的压力。我们统计了每个事件的 P 轴方位角和俯仰角,可以看出存在两个明显的优势方向,分别是 N45°W 和 N75°E,俯仰角在工作面时角度较缓,在顺槽方向上角度较陡。

为了得到各个子区域的主压应力方向,我们利用挑选的震源机制解分区进行了阻尼应力张量的反演,阻尼系数为 1.8(图 6)。图 6 展示了三个子区域地震的震源机制结果约束的应力场的方向。红色、绿色和蓝色的点分别代表从 95% 置信区间内的自助重采样中获得的 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 的反演结果。

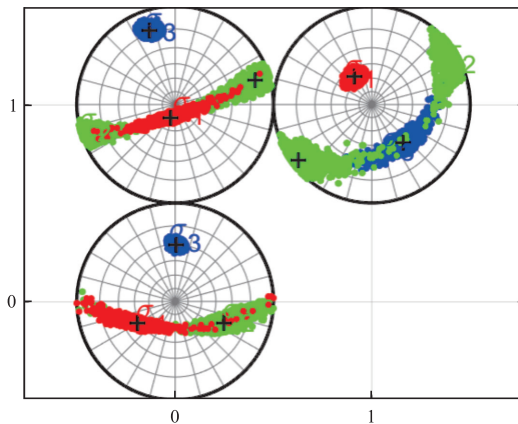


图 6 分区应力反演结果

Fig. 6 Inversion results of zonal stress

区域应力分布复杂,①属于工作面的南部,基本只受工作面 $N60^\circ E$ -E 向的压力(近乎垂直于工作面),根据震源机制可反演得到该区域的主压应力方向为 $N60^\circ E$ 。②区域受力比较复杂,从震源机制来看,既受到 $N60^\circ E$ -E 向的压力,又受到 NW 向的压力,故该区域主压应力方向取决于工作面或拐角事件占比权重,在现场数据中几乎持平,所以 σ_1 近乎落在投影球面圆心。③区域主要受 NW 向的压力,根据震源机制反演出 σ_1 方向为 $N30^\circ W$ 。

在分区细致研究局部应力场后,我们反演了整个研究区的水平主压应力方向,如图 7 所示。得到最大主压应力方向 σ_1 为 165° ,最小主压应力方向 σ_3 为 255° 。

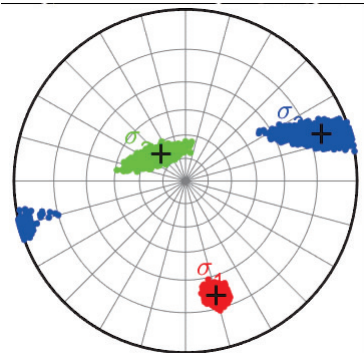


图 7 全区应力反演结果

Fig. 7 Stress inversion results of the whole region

3.2 破裂类型分析

矩张量分解可以用钻石图来显示和解释(图 8)。该图显示了源在 CLVD-ISO 坐标系中的位置,其中剪切分量(Double couple)由颜色深浅表示。纯剪切断裂的震源位于坐标原点或其附近。爆炸和内爆分别位于钻石的顶部和底部顶点。纯拉伸破裂和纯压缩破裂绘制在钻石图的边缘。沿着 CLVD 轴的点对于非平面断层上的断裂,钻石图的第一和第三个象限中的点对应于剪切-拉伸源和剪切-压缩源。

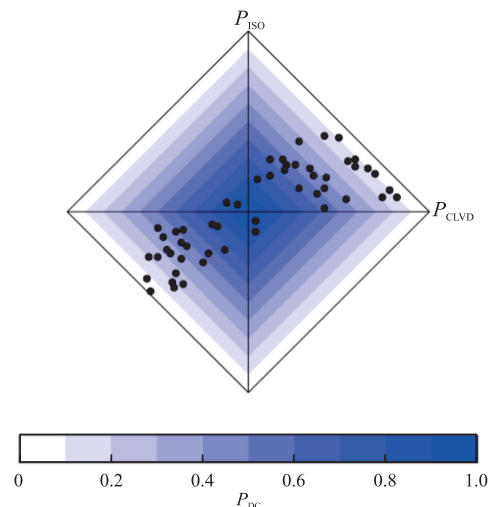


图 8 CLVD-ISO 钻石图

Fig. 8 CLVD-ISO diamond diagram

从图 8 中看出,事件基本分布在第一和第三象限,多为张拉破裂和压缩破裂,也存在张拉-剪切混合破裂和压缩-剪切混合破裂,也存在部分剪切破裂事件。震源点是不能落在钻石图的第二、四象限的,可图中有四个事件落在二、四象限,可能是由于噪声等原因导致矩张量反演造成误差。经统计剪切破裂占比 16.98%,张拉破裂占比 22.64%,压缩占比 26.42%,张拉-剪切混合破裂占比 20.75%,压缩-剪切波列占比 13.21%。结果表明,压缩和张拉破裂在东滩煤矿震源机制中占主导作用,少量的剪切破裂也不可忽略。对应于煤矿开采中,采空区顶板所受重力和铅直压应力通过岩梁传递向实体煤侧传递,从而导致煤体所受压应力超过其抗压强度而发生破裂,煤体上方顶板岩梁所受拉应力超过其抗拉强度而发生破裂。而相邻采空区原本相对稳定的岩块绞合结构受到破坏,从而发生顶板滑移失稳发生走滑断裂。

4 综合分析

4.1 研究区应力场验证

六采区位于东滩井田深部,共有断层 69 条,其中逆断层较发育,有 21 条,且绝大部分呈北东方向

展布,与褶皱轴平行。证明本区在地质历史上存在强大的北西、南东方向的压应力。

我们于 2017 年 10 月开始在六采区南翼轨皮 1# 联络巷,南总回风巷进行原岩应力的测量。通过实测得到的各应变点的应变值,应力计算的结果列于表 1,表 2。

表 1 联络巷原岩应力实测结果

Tab.1 Measured stress results of the primary rock of the connecting roadway

主应力	实测/MPa	方位角/°	倾角/°
σ_1	24.96	148.93	6.67
σ_2	11.33	54.67	56.74
σ_3	9.69	249.21	32.41

表 2 回风巷原岩应力实测结果

Tab.2 Measured stress results of the primary rock of the return air roadway

主应力	实测/MPa	方位角/°	倾角/°
σ_1	27.12	150.00	1.86
σ_2	16.04	57.09	57.47
σ_3	10.56	241.18	32.47

六采区实测最大水平应力的大小为 24.96 MPa~27.12 MPa,方向为 148.93°~150.00°,与图 7 中反演方向基本一致。63_上06 工作面顺槽的布置方位为 N79°,与最大主应力方向夹角为 71°,水平应力对 63_上06 工作面顺槽围岩应力影响较大,相对增大了巷道发生冲击地压的危险。最大主应力与工作面推进方向夹角也为 71°,水平应力作用使坚硬而巨厚的顶板不容易形成较大范围的岩梁结构,降低了产

生大级别震动的可能。

4.2 应力性因子分析

R 值是应力性因子,表征 3 个方向主应力的相对应力大小,主要体现为中间应力轴更加偏向于压应力还是张应力,也能说明最大主压应力轴和最大主张力轴的稳定性和确定性,计算公式:

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4)$$

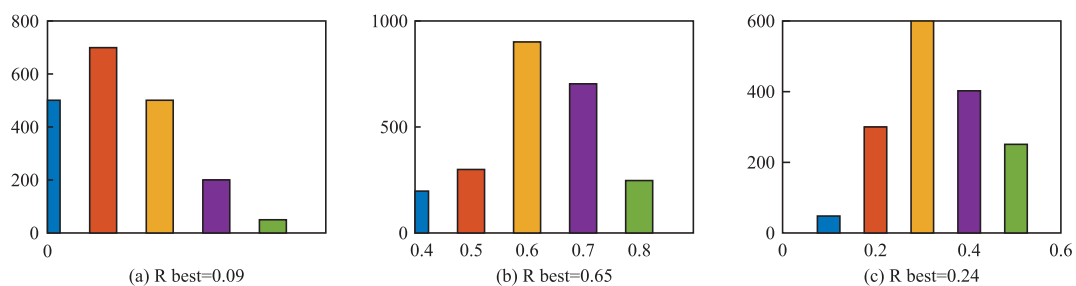


图 9 各子区域应力场反演 R 值

Fig.9 R-values of stress field inversion for each subregion

应力性因子(R 值)在工作面的两个区域①和②分别为 0.24 和 0.09(图 9),说明在工作面上,中间应力轴逐渐靠近最大主压应力轴,中间压应力轴也表现为压应力的性质,并且也证明工作面区域的构

造应力场比较复杂,可能受到多种构造力的作用,正如受到 NW 向的压力和 NE-E 向的压力,所以工作面上的 R 值低。而在上顺槽顶板上,即③的 R 值为 0.65,说明在上顺槽顶板上最大主压应力轴,中间应

力轴和最大主张力轴都比较稳定和确定,在上顺槽顶板上受到的构造应力相对简单。

5 结论

通过对煤矿开采区域内微震事件的全矩张量震源机制解和阻尼应力张量反演分析,本研究揭示了研究区域存在以正断层和逆断层为主,部分斜滑破裂事件的微地震活动,深度在 -600 m 至 -700 m 之间,含有较高比例的CLVD成分,表明工作面推进与开采活动导致煤层裂缝的产生和扩展。细分的三个子区域显示出不同的主压应力方向及其复杂性,且整体应力场方向与现场实际测量数据相吻合,进一步证实了研究区历史上的构造应力背景。此外,研究区内破裂类型主要为压缩和张拉破裂以及其与剪切破裂的混合形态,体现了煤矿开采导致的岩体应力重分布。应力性因子(R 值)的计算显示了不同区域主应力的相对复杂性和稳定性,对开采过程中的地震危险性评估及灾害防控提供了重要参考。

参考文献:

- [1] GILBERT F. Excitation of the normal modes of the earth by earthquake sources[J]. *Geophysical Journal*, 1971, 22(2): 223–226.
- [2] KNOPOFF L, RANDALL M J. The compensated linear-vector dipole: A possible mechanism for deep earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(26): 4957–4963.
- [3] VAVRYČUK V, BOHNHOFF M, JECHUMTÁLOVÁ Z, et al. Non-double-couple mechanisms of microearthquakes induced during the 2000 injection experiment at the KTB site, Germany: A result of tensile faulting or anisotropy of a rock? [J]. *Tectonophysics*, 2008, 456: 74–93.
- [4] DREGER D S, HELMBERGER D V. Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B5): 8107–8125.
- [5] ZHU L P, HELMBERGER D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(5): 1634–1641.
- [6] PUGH, D J, 2015, Bayesian Source Inversion of Microseismic Events, PhD Thesis, Department of Earth

Sciences, University of Cambridge.

- [7] KWIAŁTEK G, MARTÍNEZ-GARZÓN P, BOHNHOFF M. HybridMT: A MATLAB/shell environment package for seismic moment tensor inversion and refinement[J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(4): 964–976.
- [8] VAVRYČUK V. Moment tensor decompositions revisited[J]. *Journal of Seismology*, 2015, 19(1): 231–252.
- [9] 吴顺川, 黄小庆, 陈钊, 等. 岩体破裂矩张量反演方法及其应用[J]. *岩土力学*, 2016, 37(1): 1–18.
WU S C, HUANG X Q, CHEN F, et al. Inversion method of fracture moment tensor of rock mass and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(1): 1–18. (In Chinese)
- [10] 李秋辰, 王丽娟, 许文豪, 等. 基于震源机制的地应力反演[J/OL]. *地球物理学进展*, 2023 (2023–08–01). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20230801.1417.030.html>.
LI Q C, WANG L J, XU W H, et al. Inversion of crustal stress based on source mechanism [J/OL]. *Progress in geophysics*. [J/OL]. *Progress in geophysics*, 2023 (2023–08–01). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20230801.1417.030.html>. (In Chinese)
- [11] HARDEBECK J L, MICHAEL A J. Stress orientations at intermediate angles to the San Andreas Fault, California[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, doi:10.1029/2004JB003239.
- [12] YOSHIDA K, HASEGAWA A, OKADA T, et al. Stress before and after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(3): doi: 10.1029/2011GL049729.
- [13] 亚东菊, 田锦瑞, 殷全增, 等. 基于裂缝预测与流体预测技术的煤层顶板富水性研究——以葛泉矿2煤层为例[J]. *物探化探计算技术*, 2024, 46(1): 80–90.
YA D J, TIAN J R, YIN Q Z, et al. Study on water-rich roof of coal seam based on fracture prediction and fluid prediction technology——taking the two coal seams of Gequan Mine as an example[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2024, 46(1): 80–90. (In Chinese)
- [14] 金文辉, 井翠, 文冉, 等. 基于叠前岩石力学参数反演的三维地应力预测研究——以长宁区块页岩气为例[J]. *物探化探计算技术*, 2024, 46(1): 11–25.
JIN W H, JING C, WEN R, et al. Three-dimensional in-situ stress prediction based on pre-stack rock me-

- chanics parameter inversion: A case study of shale gas in Changning block. [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 46(1): 11–25. (In Chinese)
- [15] TERAOKAWA T, MILLER S A, DEICHMANN N. High fluid pressure and triggered earthquakes in the enhanced geothermal system in Basel, Switzerland[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi: 10.1029/2011JB008980.
- [16] MARTÍNEZ-GARZÓN P, BOHNHOFF M, KWIAŁEK G, et al. Stress tensor changes related to fluid injection at The Geysers geothermal field, California [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(11): 2596–2601.
- [17] MCGARR A, FLETCHER J B, BOETTCHER M, et al. Laboratory-based maximum slip rates in earthquake rupture zones and radiated energy[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(6): 3250–3260.
- [18] HARDEBECK J L, MICHAEL A J. Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the coalinga aftershock sequence[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi 10.1029/2005JB004144.
- [19] PUGH D J, WHITE R S, CHRISTIE P A F. A Bayesian method for microseismic source inversion [J]. Geophysical Journal International, 2016, 206(2): 1009–1038.
- [20] REASENBERG P, OPPENHEIMER D P, FITZPATRICK, et al. Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions [OL]. DOI:10.3133/OFR85739.
- [21] HARDEBECK J L. A new method for determining first-motion focal mechanisms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(6): 2264–2276.
- [22] SNOKE J A. FOCMEC: Focal mechanism determinations, Tech. rep.. source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J. Geophys. Res., 2003, 86(B4), 2825–2852.
- [23] PUGH D J, WHITE R S. MTfit: A Bayesian approach to seismic moment tensor inversion[J]. Seismological Research Letters, 2018, 89(4): 1507–1513.
- [24] STEIN S, WYSESSON M. An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure[M]. Malden, MA: Blackwell Pub., 2003.
- [25] MICHAEL A J. Determination of stress from slip data: Faults and folds[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1984, 89(B13): 11517–11526.
- [26] 刘胤池, 李庶林, 唐超. 岩体破裂震源机制解类型判据的改进及应用研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1335–1344.
- LIU Y C, LI S L, TANG C. Improvement and application of focal mechanism solution type criterion for rock mass fracture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1335–1344. (In Chinese)
- [27] QIAN J W, ZHANG H J, WESTMAN E. New time-lapse seismic tomographic scheme based on double-difference tomography and its application in monitoring temporal velocity variations caused by underground coal mining [J]. Geophysical Journal International, 2018, 215(3): 2093–2104.

附录 A 现场数据地震目录(包含 DC, CLVD, ISO 分量占比)

Field data seismic catalog (including DC, CLVD, ISO component proportion)

Event ID	Lon	Lat	Dep	PDC	PCLVD	PISO	M ₀ /(10 ¹⁰ Nm)	M _w
1	116.893 3	35.423 8	0.615	0.09	0.70	0.21	1.950 1	0.76
2	116.893 5	35.423 4	0.643	0.16	0.59	0.25	1.821 0	0.74
3	116.893 1	35.423 6	0.642	0.38	0.43	0.19	1.189 9	0.62
4	116.893 3	35.423 5	0.637	0.12	0.59	0.29	1.563 6	0.70
5	116.892 9	35.423 6	0.589	0.52	0.19	0.29	1.005 3	0.57
6	116.893 4	35.423 6	0.633	0.09	0.50	0.41	1.689 6	0.72
7	116.892 9	35.423 7	0.590	0.18	0.74	0.08	1.398 7	0.67
8	116.893 5	35.423 3	0.626	0.48	0.26	0.26	1.347 1	0.66
9	116.893 4	35.423 4	0.666	0.52	0.38	0.10	2.848 3	0.87
10	116.892 9	35.423 7	0.613	0.59	0.12	0.29	3.869 6	0.96
11	116.892 9	35.423 4	0.640	0.68	0.12	0.20	4.704 2	1.01
12	116.893 4	35.423 7	0.587	0.17	0.55	0.28	4.388 6	0.99

续表

Event ID	Lon	Lat	Dep	PDC	PCLVD	PISO	M0/(10 ¹⁰ Nm)	Mw
13	116.893 2	35.423 9	0.587	0.44	0.36	0.20	2.050 6	0.78
14	116.892 9	35.423 4	0.607	0.42	0.34	0.24	2.341 8	0.81
15	116.893 1	35.423 4	0.670	0.59	0.28	0.13	4.709 6	1.01
16	116.893 3	35.423	0.635	0.53	0.21	0.26	2.706 4	0.86
17	116.8936	35.422 4	0.639	0.45	0.42	0.13	2.121 6	0.79
18	116.8935	35.422 8	0.655	0.33	0.28	0.39	1.548 3	0.70
19	116.893 7	35.422 3	0.628	0.16	0.42	0.42	3.616 9	0.94
20	116.893 4	35.422 4	0.600	0.85	0.04	-0.11	1.342 6	0.65
21	116.892 8	35.422 3	0.594	0.10	0.82	0.08	2.289 7	0.81
22	116.892 9	35.422 5	0.624	0.57	0.20	0.23	1.826 4	0.74
23	116.894 2	35.422 4	0.660	0.77	0.05	0.18	2.144 9	0.79
24	116.893 4	35.421 9	0.621	0.56	0.42	0.02	3.382 9	0.92
25	116.893 8	35.421 7	0.654	0.10	0.66	0.24	3.455 6	0.93
26	116.893 1	35.420 5	0.644	0.10	0.78	0.12	2.033 6	0.77
27	116.893 6	35.419 9	0.675	0.33	0.28	0.39	2.303 9	0.81
28	116.893 9	35.420 9	0.667	0.39	0.54	0.07	2.842 8	0.87
29	116.894 3	35.420 4	0.643	0.49	-0.40	-0.11	2.725 5	0.86
30	116.894 3	35.421 9	0.604	0.34	-0.45	-0.21	6.950 8	1.13
31	116.893 9	35.421 7	0.605	0.46	-0.37	-0.17	3.589 4	0.94
32	116.894 3	35.421 6	0.581	0.20	-0.55	-0.25	2.262 5	0.80
33	116.893 3	35.420 3	0.604	0.75	-0.17	-0.08	2.543 7	0.84
34	116.894 5	35.420 3	0.624	0.66	-0.13	-0.21	3.225 2	0.91
35	116.893 9	35.422 2	0.674	0.73	-0.20	-0.07	2.803 0	0.87
36	116.894 2	35.421 3	0.599	0.02	-0.54	-0.44	2.941 2	0.88
37	116.893 1	35.421	0.61	0.24	-0.36	-0.40	2.669 8	0.85
38	116.893 6	35.420 5	0.642	0.25	-0.50	-0.25	1.885 1	0.75
39	116.894 7	35.423 6	0.613	0.90	-0.06	0.04	1.035 4	0.58
40	116.894 6	35.423 9	0.632	0.26	-0.40	-0.34	1.690 5	0.72
41	116.894 8	35.423 9	0.597	0.07	-0.56	-0.37	2.500 5	0.83
42	116.895	35.423 7	0.659	0.17	-0.41	-0.42	1.991 5	0.77
43	116.894 3	35.424 2	0.618	0.83	-0.12	0.05	2.491 9	0.83
44	116.894 2	35.424	0.596	0.34	-0.43	-0.23	2.938 4	0.88
45	116.894 6	35.423 2	0.58	0.37	-0.37	-0.26	1.995 7	0.77
46	116.894 9	35.4238	0.627	0.47	-0.25	-0.28	1.041 6	0.58
47	116.893 3	35.4199	0.627	0.91	0.04	-0.05	1.924 0	0.76
48	116.895 2	35.4237	0.593	0.47	-0.34	-0.19	1.835 4	0.74
49	116.894 8	35.4243	0.618	0.41	-0.50	-0.09	2.260 2	0.80
50	116.895 2	35.4239	0.585	0.55	-0.22	-0.23	1.343 1	0.65
51	116.895 1	35.4241	0.65	0.54	-0.36	-0.10	2.227 6	0.80
52	116.895	35.4242	0.672	0.39	-0.47	-0.14	1.946 3	0.76
53	116.894 8	35.4242	0.606	0.19	-0.42	-0.39	2.405 6	0.82

Application of MTfit and MSATSI to study the focal mechanisms and stress fields of microseismic events in a certain coal mines

XU Rui¹, ZHAN Kai¹, KONG Chao², WANG Cong², WANG Chao³, LIANG Chuntao¹

(1. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Techniques of Ministry of Education

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Shandong Keyue Technology Company Limited, Jinan 250014, China;

3. Shangdong Energy Group Company Limited, Jinan 250014, China)

Abstract: Microseismic monitoring is crucial for mine safety as it offers early warning signals for coal mine security. For the first time, MTfit and MSATSI techniques were employed to analyze microseismic events at 63_{upper}06 working face in Dongtan Coal Mine, selecting 53 pivotal incidents to invert the source mechanisms and ascertain the orientation of the maximum horizontal principal stress. This has revealed the relationship between mining activities, source mechanics, and rock strata fractures. The findings indicate that the microseismic source mechanisms in the sixth mining area are predominantly characterized by normal and reverse faulting, with a significant CLVD component, and that tensile and compressive fracturing dominates the mine's seismicity. Furthermore, stress field analysis allows the identification of the direction of maximum horizontal principal compressive stress, clarifying the tectonic stress conditions of the surrounding rock and offering a fresh perspective for understanding rock mass fracture and stress reorganization triggered by face mining.

Keywords: MTfit; MSATSI; microseismic monitoring; focal mechanism; stress field inversion