

DOI: 10.11779/CJGE202109019

基于微震监测的应力场反演方法及其工程应用研究

唐超, 李庶林*, 周梦婧, 刘胤池

(厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 360015)

摘要: 确定工程中岩体所处的应力场环境是灾害监测预警与应用的基础, 在微震震源机制解的基础上探索采用联合迭代反演方法反演应力场, 该方法采用不稳定性系数 I 作为约束结合经典的线性反演方法反演应力场, 有效避免了两个断层面的模糊性对反演结果的不利影响, 提高了反演精度。通过多次反演选取能够产生最大不稳定性系数的摩擦系数 μ 作为岩体的摩擦系数, 并通过应力与摩擦系数定义了主破裂面。对一起典型的岩体破裂微震定位事件案例, 首先分析了破裂类型以及破裂面方位, 并对破裂的时间演化进行了推测; 其次分析了加入不同程度噪声对应力反演结果的影响, 并给出了分析结果; 最后对应力场分布进行了分析, 结果表明最大主应力轴的方位角与倾角为 $229.86^\circ/48.57^\circ$; 中间主应力轴的方位角与倾角为 $353.89^\circ/26.28^\circ$; 最小主应力轴的方位角与倾角为 $100.08^\circ/29.44^\circ$, 应力的分布与震源机制解 P/T 轴分布具有一致性; 主破裂面的方位较好地符合了此次微震事件实际监测结果。

关键词: 微震监测; 应力场反演; 震源机制; 矩张量; 岩体破裂

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)09-1730-09

作者简介: 唐超(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事微震震源机制及应力场反演方面的研究。E-mail: 25320181152879@stu.xmu.edu.cn。

Stress inversion based on microseismic monitoring and its engineering application

TANG Chao, LI Shu-lin, ZHOU Meng-jing, LIU Yin-chi

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Determining the stress field environment of rock mass in engineering is the basis of disaster monitoring, disaster warning and its application. A joint iterative inversion method is used to retrieve the stress field based on the focal mechanism. The method uses instability coefficient I as a constraint and combines it with the classical linear inversion method to retrieve the stress field, which can effectively avoid the negative influences of the fuzziness of the two fault planes on the inversion results and improve the accuracy of the results. To determine the optimal friction coefficient of rock mass, the friction coefficient which can produce the maximum instability coefficient is selected as that of rock mass through multiple inversion. The concept of the main fault plane is defined by the friction coefficient and stress. A typical case of rock fracture microseismic location event is presented and analyzed. Firstly, the source mechanism is analyzed, the type of fracture and the orientation of the fracture surface are obtained, and the time evolution of the fracture is predicted. Secondly, the error of the stress inversion results with different levels of noise is analyzed, and the results are presented. Finally, the distributions of stress field are analyzed, and the results show that the azimuth angle and inclination angle of the maximum principal stress axis are 229.86° and 48.57° . The azimuth angle and inclination angle of the intermediate principal stress axis are 353.89° and 26.28° . The azimuth angle and inclination angle of the minimum principal stress axis are 100.08° and 29.44° . The distribution of stress axes is consistent with the P/T axes of the focal mechanism. The orientation of the main fault plane is in great agreement with the actual monitoring results.

Key words: microseismic monitoring; stress field inversion; focal mechanism; moment tensor; rock mass fracture

0 引言

微震监测技术近年来在中国矿山安全、水电工程、隧道工程、能源储存等领域得到了广泛的应用, 并取得了一定的应用效果^[1-4], 许多学者对微震监测技术的理论, 如定位技术、震源机制解、基于微震参数的灾

害预警模型等相关内容开展了深入的研究, 以期改善或提高微震监测技术的应用效果或推动微震技术在工

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51674218)

收稿日期: 2020-11-12

*通信作者 (E-mail: shulin.li@163.com)

程中的应用技术理论的发展^[5-6]。目前微震技术在岩体工程灾害预警方面已经取得了长足的进步,但还有很多急需解决的理论难题,如震源机制、应力反演等。尤其是微震应力反演方面国内外研究并不多见。在实际工程中岩体处在特定的应力场中,岩体的破裂和破坏是由于在外部场应力作用下岩体内部应力的变化所导致的。许多学者应用震源机制的 P/T 轴分布来解释大、中尺度岩体破裂及孕震机理,然而单个岩体破裂的震源机制反映的是破裂源处应力释放的特征,并不涉及岩体所受的应力环境条件即所受的外荷载条件。因此,开展外场应力分布研究对于解释大、中尺度岩体破裂机理、灾害预警与防治具有重要的理论意义与工程实用价值。

目前,地应力场反演理论在天然地震领域得到了广泛的应用。已有研究表明天然地震与工程微地震未见明显的差异,可将天然地震的理论知识应用于工程地震的研究^[7]。因此,借鉴天然地震中基于震源机制解的应力场反演方法,为研究工程中区域作用应力提供了一条有效途径。在地震学研究中,最早研究剪切应力与断层关系的是 Wallcae^[8]及 Bott^[9],提出了断层的滑动方向与剪切应力方向一致的假设,称为 Wallace-Bott 假设;基于这一假设,Angrlier^[10]以地表的擦痕数据表示滑动方向来求解应力主轴方向;Etchecopar 等^[11]根据地表的节理数据,提出采用网格搜索算法求解应力张量;Gephart 等^[12]通过网格搜索法确定剪应力与断层面滑动方向偏离较小的节面为真实的断层面,并提出根据震源机制求解区域应力场;Michael^[13]在前人研究基础上于 1984 年提出一种基于擦痕数据反演应力场的方法,1987 年又提出了基于震源机制解反演应力场的线性方法^[14],大大提高了反演效率。然而,根据震源机制反演应力的方法都面对一个共同的难题,就是如何从两个正交的节面中识别出真实的断层面。Michael^[14]通过数值试验发现,断层面的模糊性会导致形状比扭曲,影响结果的准确性。为了解决这个难题,Hardbeck 等^[15]在线性反演方法基础上加入了阻尼因子,提出了阻尼区域尺度应力反演方法。Vavryčuk^[16]在前人研究的基础上提出了断层面的不稳定性概念,即选取更不稳定的节面作为真实的断层面,将不稳定性系数作为约束应用于线性反演,大大提高了反演结果的准确性,此方法称为联合迭代反演法。

国外近年来有关开展工程中的地应力场反演研究已有少量报道,其研究方法大多借鉴天然地震中的方法,而国内到目前为止鲜有相关方面的报道。本文针对香炉山钨矿一起典型的微震监测案例实测数据,首

先对其震源机制进行了相关的分析,分析了破裂类型和裂缝的时间演化过程。在震源机制的基础上采用联合迭代反演求解诱发此次微震事件的外场应力分布,探讨联合迭代反演求解方法的特点,分析了主破裂面方位,同时验证应力反演方法在工程岩体破裂中的适用性,可为后续的基于微震监测技术的灾害预警提供一定的参考。

1 联合迭代反演方法

1.1 线性反演方法

在线性反演方法中,首先设应力张量的 4 个参数:主应力轴 σ_1 , σ_2 , σ_3 和形状比 R , R 可以表示为

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

根据式 (1), R 值越大说明中间主应力轴和最小主应力轴越接近,当 $R=1$ 的极限情况下时,中间主应力与最小主应力的张性状态是一致的; R 值越小,中间主应力和最大主应力接近,当 $R=0$ 的极限情况下时,中间主应力与最大主应力的压性状态是一致的。已知断层面的正应力 σ_n 和切应力 τ :

$$\sigma_n = T_i n_i = \tau_{ij} n_j n_i \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau N_i &= T_i - \sigma_n n_i = \tau_{ij} n_j - \tau_{jk} n_j n_k n_i \\ &= \tau_{kj} n_j (\delta_{ik} - n_i n_k) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, δ_{ik} 为克罗内克符号, \mathbf{T} 为断层面的牵引力, \mathbf{n} 为断层法向, \mathbf{N} 为断层剪应力矢量的单位向量。为了计算式 (3),采用 Wallace-Bott 假设^[8-9],将断层的剪切应力的方向看作与断层面的滑动方向 s 一致,且假设不同断层面的牵引力相同。在将断层面的切应力 τ 进行归一化处理后,可将 (3) 写成如下的矩阵形式:

$$\mathbf{A} \mathbf{t} = \mathbf{s} \quad (4)$$

式中, \mathbf{t} 为应力张量,且满足 $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$, 则 $\mathbf{t} = [\tau_{11} \tau_{12} \tau_{13} \tau_{22} \tau_{23}]^T$ 。

系数矩阵 \mathbf{A} 为 3×5 的矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} n_1(n_2^2 + 2n_3^2) & n_2(-n_1^2 + n_3^2) & n_3(-2n_1^2 - n_2^2) \\ n_2(1 - 2n_1^2) & n_1(1 - 2n_2^2) & -2n_1 n_2 n_3 \\ n_3(1 - 2n_1^2) & -2n_1 n_2 n_3 & n_1(1 - 2n_3^2) \\ n_1(-n_2^2 + n_3^2) & n_2(n_1^2 + 2n_3^2) & n_3(-n_1^2 - 2n_2^2) \\ -2n_1 n_2 n_3 & n_3(1 - 2n_2^2) & n_2(1 - 2n_3^2) \end{bmatrix}。$$

\mathbf{s} 为滑动向量的单位向量。当有 K 组震源机制的时候, (4) 式变为关于应力张量 5 个未知量的 $3K$ 个线性方程组,一般 K 大于 2,故可采用 L2 范数的广义线性反演^[17]得到

$$\mathbf{t} = \mathbf{A}^g \mathbf{s} \quad (5)$$

1.2 断层不稳定性约束

震源机制两个节面模糊性导致线性反演结果的准确性不高, Lund 等^[18]在分析应力场中两个节面取向时,发现两个节面中其中一个节面的稳定性更差,更容易受到剪切断层活动的影响。这种两个节面其中一个更易受断层面活动影响的性质可通过莫尔库仑准则量化,见图 1^[19]。Vavryčuk 等^[19]在此基础上进一步提出断层不稳定性系数的概念,即通过比值来判断两个节面中更不稳定的面为真实断层面,不稳定性系数的表达式如下:

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - \sigma_1)}{\tau_c - \mu(\sigma_c - \sigma_1)} \quad (6)$$

式中 τ_c , σ_c 为最优取向断层面的剪切应力和有效正应力(图 1 中蓝点); τ , σ 分别为断面上的剪切应力和有效正应力。式(6)与对应应力值无关,断层不稳定性仅由摩擦系数 μ 、形状比 R 及断层面与主应力轴的方向余弦 n 来估计。对应力莫尔圆单位化,应力张量表示为

$$\sigma_1 = 1 \quad \sigma_2 = 1 - 2R \quad \sigma_3 = -1 \quad (7)$$

式中正值表示压缩,可得

$$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad \sigma_c = -\frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6),可得断层不稳定性系数的表达式为

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - 1)}{\mu + \sqrt{1+\mu^2}} \quad (9)$$

式中

$$\sigma = n_1^2 + (1-2R)n_2^2 - n_3^2 \quad (10)$$

$$\tau = \left\{ n_1^2 + (1-2R)^2 n_2^2 + n_3^2 - \left[n_1^2 + (1-2R)n_2^2 - n_3^2 \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (11)$$

式中, n 为主应力坐标系下断层的法向量,断层不稳定性系数 I 范围为 0 (最稳定断层) 到 1 (最不稳定断层),具体见图 2^[19],其中最不稳定断层为剪切活动的最优断层的取向。选取不稳定性系数 I 较大的节面作为真实的断层面,结合 Michael 的线性反演方法进行迭代反演。在反演时需要知道摩擦系数 μ 的值,其取值范围一般为 0.2~1,但在实际工程中很难测得摩擦系数的确切值。数值试验表明,反演法对摩擦系数 μ 不太敏感^[17],为了避免摩擦系数对反演的影响,将摩擦系数从 0.2~1 每间隔 0.05 取一个值重复多次反演,在多次反演过程中将能够产生最大不稳定性系数的 μ 值作为最优值,最后将最优摩擦系数和产生相对较大不稳定性系数的断层参数代入线性反演求出最优应力张量。完整的应力反演过程如图 3 所示。

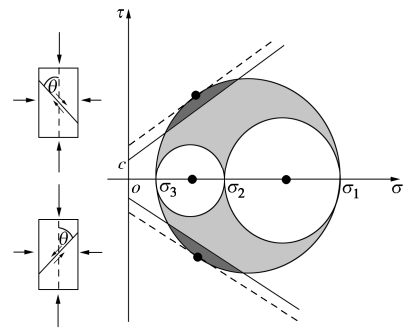


图 1 莫尔-库仑破坏准则

Fig. 1 Mohr-Coulomb failure criterion

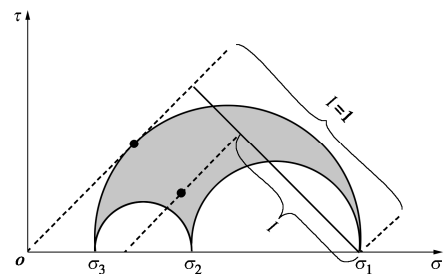


图 2 断层不稳定性系数 I 在莫尔圆中的定义

Fig. 2 Definition of fault instability in Mohr circle

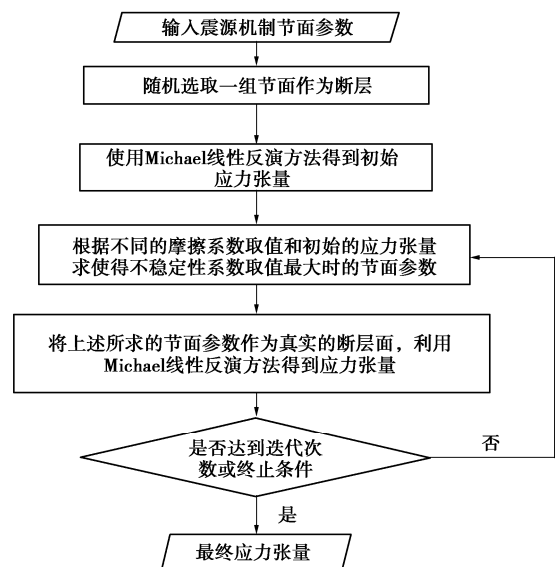


图 3 联合迭代反演法流程图

Fig. 3 Flow chart of joint iterative method

1.3 主破裂面

在应力作用下各个方向发生破裂的可能性不同,这种可能性可以粗略地通过不稳定性系数 I 来描述^[20],即式(9)。不稳定性系数越高,其发生大的破裂的可能性就越高,越容易发生破坏。显然,一个主要的破裂面即是在应力场中取向最优的破裂面,其不稳定性系数应该最高,如图 4(a)中的黑色圆点。这一平面和沿着这个平面方向发生的破裂称为主破裂面,主破裂面的震源机制称主震源机制,主破裂面和主震源机制的方

位可根据应力场及破裂面上的摩擦系数求出。如图 4 所示^[20], 每一个应力场至少允许存在两个主破裂面以及主震源机制。这是因为应力莫尔圆存在上下两个部分。主震源机制的 B 轴与中间主应力轴 σ_2 一致。 P/T 轴在 $\sigma_1 - \sigma_3$ 平面上。最大主应力轴 σ_1 位于主震源机制两个 P 轴之间; 最小主应力轴 σ_3 位于两个主震源机制的 T 轴之间。两个主破裂面与 σ_1 轴之间的夹角通过式 (12) 计算。通过求解主震源机制我们能够得到在特定应力条件下最可能发生大破裂所在平面的产状。

$$\theta = 0.5 \arctan \mu^{-1} \quad (12)$$

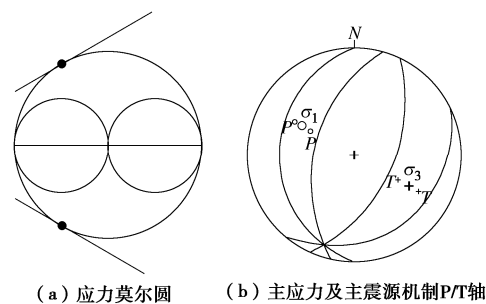


图 4 主震源机制
Fig. 4 Principal focal mechanism

2 工程案例

2.1 工程背景

江西省香炉山钨矿, 由于受前期破坏性开采等历史开采原因的影响, 采空区内矿柱开裂、剥落、顶板冒顶、矿柱与顶板大规模垮塌等地压显现较为严重, 矿山开采面临着严峻的安全生产问题。该矿针对日益严重的地压灾害问题, 于 2010 年起开展了多通道微震监测技术应用研究, 并于 2018 年将微震监测系统扩建为 84 通道, 是目前国际上通道数最多的微震监测系统。

2.2 微震案例简介

在东部二坑口 597 采场附近, 微震系统于 2018 年 10 月 27 日 0: 47—3: 32 接收到 17 起聚簇性定位事件, 定位事件主要集中在#9 传感器和#10 传感器附近。#9 传感器与#10 传感器处于同一水平, 两传感器相距约 33 m。定位事件在空间分布上表现较为集中, 为一个典型的连续发生的微震事件簇群, 见图 5, 其中第 17 个事件的能量最大。

该矿在晚上 19: 00—早晨 7: 00 之间不存在井下作业活动, 定位事件发生的时刻处于凌晨, 不可能是井下爆破作业或者其他人员作业所导致的定位事件, 只能是岩体破裂的定位事件; 从定位事件波形图的主频特征、能量特征等参数也可看出为明显的岩石破裂信号特征, 典型的微震事件波形图见图 6。

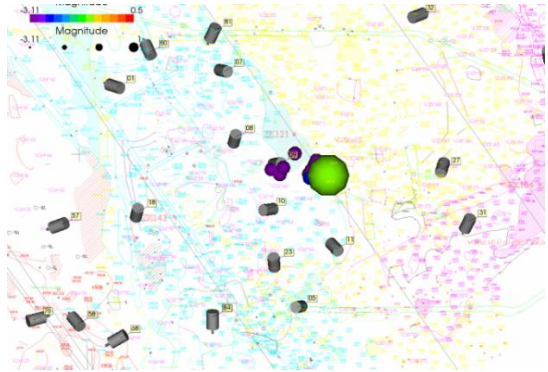


图 5 微震定位事件分布图
Fig. 5 Diagram of microseismic event location

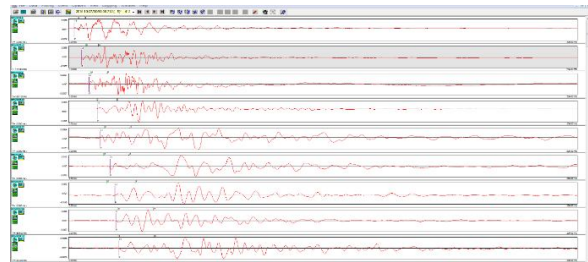


图 6 典型微震定位事件波形图
Fig. 6 Signals of typical microseismic event location

2.3 震源机制解

采用 P 波远场位移求出矩张量, 关于矩张量反演、矩张量分解的知识可参考文献[6], 此处不做赘述。17 个震源机制节面表示如图 7 所示, 总体表示为 3 种类型的破裂面。第一种大约呈走向 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 范围内的正 (或逆) 断层型破裂面, 如图 7 (a) 所示; 第二种大约呈走向 $160^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内的正 (或逆) 断层型破裂面, 如图 7 (b) 所示; 第三种大约呈走向 $200^{\circ} \sim 250^{\circ}$ 的正 (或逆) 断层型破裂面, 如图 7 (c)。将 3 种类型破裂面分别代入第 2 节中不稳定系数的计算^[21], 得到 3 种类型所有震源机制的应力分布情况。3 种破裂面的应力总体处于较高应力状态, 其结果如图 8 所示, 但是各组破裂面上的应力差别较明显。相较于第三组破裂面, 第一组和第二组破裂面的不稳定性系数较小, 处于低应力状态; 第三组破裂面不稳定性系数最大, 处于高应力状态。且在最不稳定、应力最高的第三组破裂面中, 包含了能量最大的第 17 个震源机制, 而形成第三组破裂面的所有微震定位事件在时间上普遍靠后。因此有理由推测此次事件首先在第一组和第二组破裂面范围内形成了微破裂 (当然在这个过程中也有少量第三组破裂面方向上的破裂), 随着能量的聚集、局部应力的不断增加形成了第三组范围内的主破裂面。按照文献[21]中方法对所求的矩张量进行分解, 得到了震源类型图如图 9 所示。在该震源类型图中, 在第一象限的边缘表明为纯拉伸破坏, 在第三象

表 1 震源机制节面 1 及其节面 2 参数
Table 1 Fault parameters of nodal planes No. 1 and No. 2

事件编号	走向 1/(°)	倾角 1/(°)	滑动角 1/(°)	走向 2/(°)	倾角 2/(°)	滑动角 2/(°)
1	159.38	49.90	87.55	343.16	40.16	92.89
2	79.30	44.67	-96.12	267.87	45.65	-83.98
3	229.37	33.20	-78.19	35.92	57.58	-97.62
4	87.17	47.93	97.81	255.60	42.65	81.43
5	80.87	27.90	-111.29	284.66	64.15	-79.11
6	252.71	21.71	104.51	57.14	69.01	84.30
7	161.45	9.55	-94.78	346.30	80.47	-89.19
8	196.60	15.20	-83.52	9.89	74.89	-91.75
9	83.77	38.89	79.43	277.25	51.88	98.41
10	123.77	3.39	-127.33	341.15	87.29	-87.93
11	185.47	53.79	-90.46	6.24	36.21	-89.37
12	68.93	40.64	-107.31	271.25	51.55	-75.67
13	233.41	38.63	-82.05	43.28	51.80	-96.29
14	61.81	49.93	85.76	248.37	40.25	95.02
15	169.87	28.82	-91.70	351.81	61.19	-89.06
16	218.12	35.77	-86.69	34.04	54.29	-92.38
17	202.89	35.15	85.17	28.79	54.99	93.39

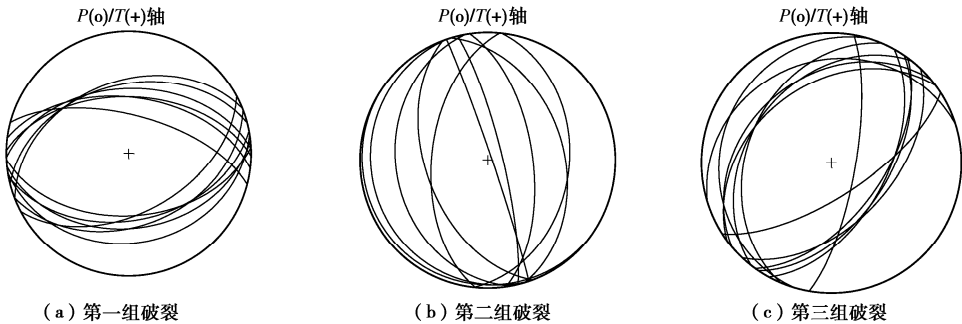


图 7 震源机制的节平面

Fig. 7 Nodal plane of focal mechanism

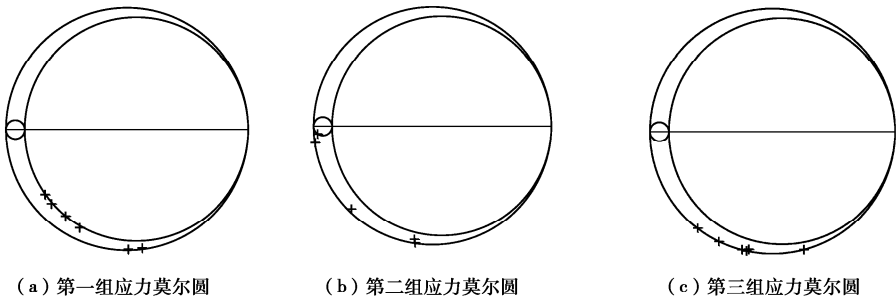


图 8 震源机制解的应力莫尔圆

Fig. 8 Stress Mohr circles

限的边缘为纯压缩破坏，第一象限和第三象限内为张拉破坏或压剪切破坏。从图 9 中可知，此次定位事件的破坏类型主要为压剪型破坏和张拉型破坏，与实际观测到的张性破坏是一致的。将矩张量分解为各项同性（ISO）、双力偶（DC）、以及补偿矢量线性偶极（CLVD）。根据矩张量的 DC 分量求解断层面的参数，所有定位事件的两个断层面参数结果见表 1。将表 1 中的参数应用于后续的应力反演分析。

2.4 联合迭代反演应力

（1）噪声水平对应力场反演影响

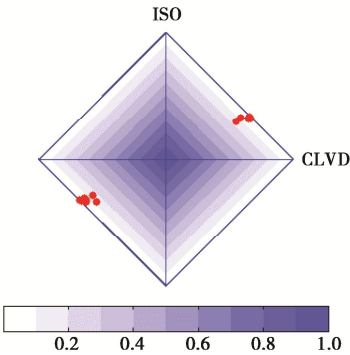


图 9 震源类型图

Fig. 9 Diagram of source type

对香炉山钨矿监测到的 17 个定位事件利用联合迭代反演法求解该定位事件簇区域内的应力场。由于在实际反演应力场的过程中所使用的震源机制解总是具有一定的不确定性,在反演时将这种不确定性视为噪声。为了了解震源机制不确定性对应力场反演结果的影响,加入随机噪声 5°, 10°, 15°, 20°, 重复反演 100 次, 噪声水平分别对应实际断层法向与加入噪声后断层法向的夹角。在本次研究中选取的震源机制解在不同的噪声水平下使用相同的反演参数求解对应的应力模型,结果见表 2。通过分析可知,随着噪声水平 5° ~ 20° 增大,最大主应力轴 σ_1 误差为 12° ~ 22°, 中间主应力轴 σ_2 误差为 16° ~ 31°, 最小主应力轴 σ_3 误差为 10° ~ 23°, 说明噪声水平的大小即震源机制的不确定性对应力反演结果的准确性影响很大。从图 10 中不同噪声水平下应力轴的置信度也可见,随着噪声水平增大置信度减小。

表 2 不同噪声水平平均应力误差

Fig. 2 Average errors of stress direction with different levels of noise

噪声水平 /(°)	应力轴误差		
	σ_1	σ_2	σ_3
5	12	16	10
10	15	20	15
15	17	26	21
20	22	31	23

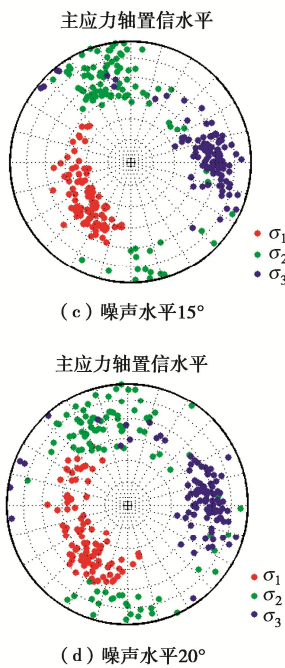
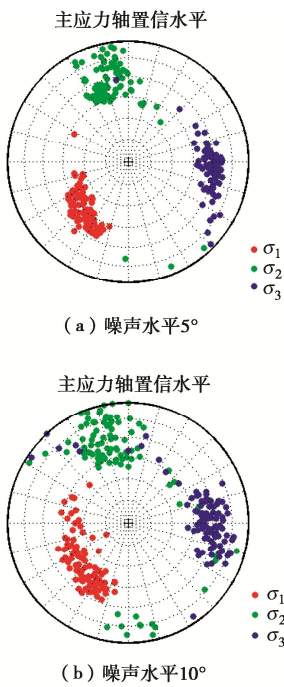


图 10 不同噪声水平下主应力轴的置信度

Fig. 10 Confidence levels of principal stress axis with different levels of noise

(2) 应力场反演分析

采用联合迭代反演方法对 17 个定位事件进行应力反演,加入 5° 的噪声,噪声重复反演 100 次,取摩擦系数的初始值为 0.2。最优的摩擦系数取值最终为 0.9。应力反演结果的主应力轴与震源机制解 P - T 轴的分布见图 11。3 个主应力轴方向和形状比见表 3。

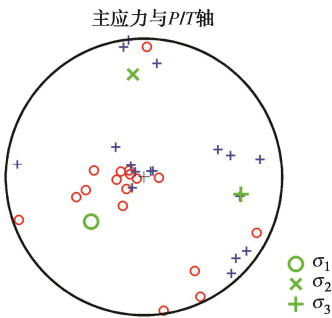


图 11 主应力和 P/T 轴分布图

Fig. 11 Diagram of principal stress and focal mechanism P/T axes

最大主应力轴的方位角与倾角为 229.86° / 48.57°; 中间主应力轴的方位角与倾角为 353.89° / 26.28°; 最小主应力轴的方位角与倾角为 100.08° / 29.44°。从应力主轴及 P/T 轴的分布可见,大部分震源机制解的 P 轴(图 11 中红圆点)能够围绕在最大主应力轴 σ_1 周围,具有较明显的优势方位,而小部分点离散。这可能与矿山的应力场不均匀有关。这一点从震源机制的多样性可以得出,图 12 为 17 组震源机制解的玫瑰花图。从图 12 中可见,断层的走向具有一

表 3 应力反演结果
Table 3 Results of stress inversion

应力主轴	σ_1	σ_2	σ_3	R
	方位角/倾角	方位角/倾角	方位角/倾角	
迭代反演	229.86° /48.57°	353.89° /26.28°	100.08° /29.44°	0.9

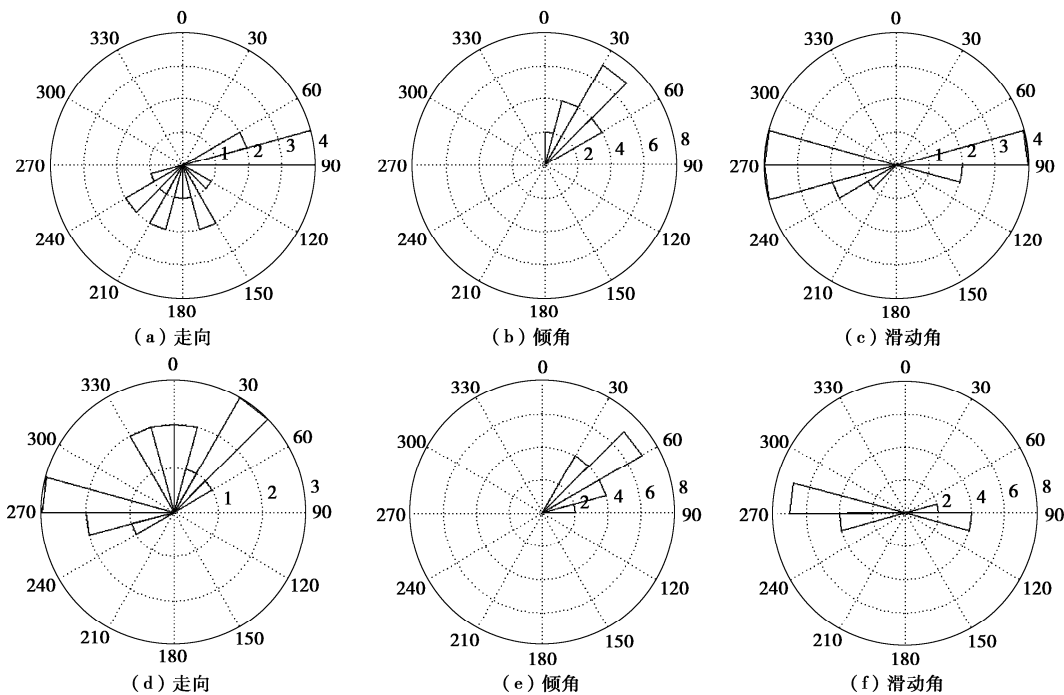


图 12 两个节面的断面解玫瑰花图

Fig. 12 Rose diagram of two nodal planes

定的分散性，倾角和滑动角则具有一致性。节面 1 与节面 2 的走向没有优势方位，分布均较分散；对于倾角两节面主要集中 30° ~60° ；对于滑动角两节面主要集中在 90° 和 270° 。从两节面的走向上印证了 17 个定位事件所在区域的应力场分布不均匀。而 T 轴(图 11 中蓝“加号”点)没有较明显的优势方位分布较为分散。由反演所得到的最优应力形状比为 0.9，说明中间主应力与最小主应力相差不大，可近似为相等。在近似的条件下，微震定位事件簇一定范围内总体上压应力轴呈现 SW-NE 方向挤压为主，而在与压应力垂直的平面上其应力状态总体上以张拉为主，即反演所得的最大主应力状态较确定。这也很好地对应对了 P 轴分布较为集中具有优势方位，而 T 轴不具有优势方位，分布分散。因为在垂直于压应力的平面内张性应力可以为任意方向。

通过应力分布以及最优的摩擦系数 $\mu = 0.9$ 求出在该应力场下主破裂面的参数如表 4 所示。可知求解的主破裂面 2 的方位位于第三组破裂面的范围内。而实际的监测结果表明第三组破裂面为此次定位事件的主破裂面，这与通过应力场分布及摩擦系数求解的主破裂面（表 4 中破裂面 2）较符合。又通过式（12）

可知主破裂面与主应力之间的夹角在摩擦系数确定的情况下是一定的，表明了所求解的应力场的分布是比较准确的。主震源机制与主应力轴在震源球上的上分布见图 13。

表 4 主破裂面的参数

Table 4 Parameters of principal faults

主破裂面	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
破裂面 1	178.01	81.72	116.58
破裂面 2	208.17	41.05	-47.60

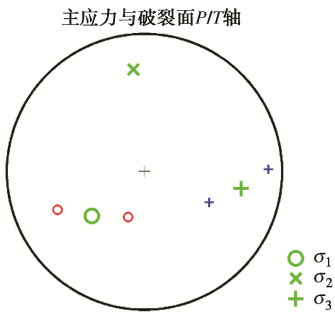


图 13 主应力与主破裂面 P/T 轴

Fig. 13 Principal nodal lines and P/T axes

针对一起矿山微震监测典型的岩体破裂案例，本文的研究结果表明应力场分布与震源机制解的 P/T 轴

分布具有一致性,说明采用应力反演求解定位事件簇所处的一定范围内的应力场分布是合适的。通过应力分布及破裂面上的摩擦系数求解的主破裂面与实际监测的主破裂面较符合。可见,本文的研究对于深入利用微震监测技术来研究工程岩体所处的地应力场环境以及推广微震技术在岩体工程中的灾害预警具有较好的参考意义。

3 结 论

本文采用了联合应力迭代反演方法理论反演应力场,针对反演时断层面的模糊性,采用不稳定系数判断相对不稳定的面作为真实的断层面。利用该方法对香炉山微震监测的17组数据进行应力反演,主要得到以下结论:

(1)此次香炉山的微震定位事件震源机制结果表明大致存在3组破裂面,第一组走向大致为 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 、第二组走向大致为 $160^{\circ} \sim 180^{\circ}$,相较于第三组,第一组和第二组处于低应力状态;第三组走向大致为 $200^{\circ} \sim 250^{\circ}$,处于高应力状态。第三组为此次定位事件的主要破裂面,第一组与第二组为第三组破裂发生前的微破裂事件。定位事件的破裂类型为压剪破裂和张拉破裂,与现场观测到的张性破坏是一致的。

(2)震源机制解的准确性对于应力反演结果的影响很大,在加入 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的噪声水平下,重复迭代100次,最大主应力轴 σ_1 误差为 $12^{\circ} \sim 22^{\circ}$,中间主应力轴 σ_2 误差为 $16^{\circ} \sim 31^{\circ}$,最小主应力轴 σ_3 误差为 $10^{\circ} \sim 23^{\circ}$ 。

(3)香炉山采场应力分布不均匀, P 轴具有优势方位,而 T 轴较为分散。其最大主应力轴走向和倾角为 $229.86^{\circ} \sim 48.57^{\circ}$,最小主应力轴走向和倾角为 $100.08^{\circ} \sim 29.44^{\circ}$ 。在微震定位事件簇一定范围内总体上压应力轴呈现SW-NE方向挤压为主,而在与张应力垂直的平面上其应力状态总体上以张拉为主,与P/T轴分布具有一致性。

(4)求解的主破裂面与实际的监测结果较符合,可通过主破裂面的概念去判定微震定位事件的主要破裂事件。

致 谢: 感谢捷克科学院地球物理研究所 Václav Vavryčuk 教授在应力场反演方面提供的帮助。

参考文献:

[1] 彭府华, 李庶林, 程建勇, 等. 中尺度复杂岩体应力波传播特性的微震试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 312 - 319. (PENG Fu-hua, LI Shu-lin, CHENG Jian-yong, et al. Experimental study on characteristics of stress wave

propagation in mesoscale and complex rock mass by micro-seismic monitoring[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 312 - 319. (in Chinese))

[2] 钱波, 杨莹, 徐奴文, 等. 白鹤滩水电站左岸边坡岩石损伤变形反馈分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1464 - 1471. (QIAN Bo, YANG Ying, XU Nu-wen, et al. Feedback analysis of rock damage deformation of slope at left bank of Baihetan Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1464 - 1471. (in Chinese))

[3] 于洋, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深部岩体隧洞即时型岩爆微震震源体积的分形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2173 - 2179. (YU Yang, FENG Xia-ting, CHENG Bin-rui, et al. Fractal characteristics of micro-seismic volume for different types of immediate rock-bursts in deep tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2173 - 2179. (in Chinese))

[4] 陆莱平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 772 - 775. (LU Cai-ping, DOU Lin-ming, WU Xing-rong, et al. Frequency spectrum analysis on microseismic monitoring and signal differentiation of rock material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 772 - 775. (in Chinese))

[5] 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(增刊 1): 1 - 18. (WU Shun-chuan, HUANG Xiao-qing, CHEN Fan, et al. Moment tensor inversion of rock failure and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 1 - 18. (in Chinese))

[6] 李庶林, 林恺帆, 周梦婧, 等. 基于矩张量分析的特大山体破坏前兆孕震机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2000 - 2009. (LI Shu-lin, LIN Kai-fan, ZHOU Meng-jing, et al. Study on failure precursors and seismogenic mechanisms of a large landslide based on moment tensor analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2000 - 2009. (in Chinese))

[7] MCGARR A. Some applications of seismic source mechanism studies to assessing underground hazard[C]// Proceedings of First International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines, 1984, Johannesburg.

[8] WALLACE R E. Geometry of shearing stress and relation to faulting[J]. The Journal of Geology, 1951, 59(2): 118 - 130.

[9] BOTT M H P. The mechanics of oblique slip faulting[J]. Geological Magazine, 1959, 96(2): 109 - 117.

- [10] ANGELIER J. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population[J]. *Tectonophysics*, 1979, **56**(3/4): T17 – T26.
- [11] ETCHECOPAR A, VASSEUR G, DAIGNIERES M. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis[J]. *Journal of Structural Geology*, 1981, **3**(1): 51 – 65.
- [12] GEPHART 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.
- [13] MICHAEL A J. Determination of stress from slip data: faults and folds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**(B13): 11517 – 11526.
- [14] MICHAEL A J. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, **92**(B1): 357 – 368.
- [15] 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*, 2006, **111**(B11): 1 – 11.
- [16] VAVRYČUK V. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, **199**(1): 69 – 77.
- [17] LAY T, WALLACE T C. *Modern Global Seismology*[M]. New York: Academic Press, 1995.
- [18] LUND B, SLUNGA R. Stress tensor inversion using detailed microearthquake information and stability constraints: Application to Ölfus in southwest Iceland[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, **104**(B7): 14947 – 14964.
- [19] 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.
- [20] VAVRYČUK V. Principal earthquakes: theory and observations from the 2008 west bohemia swarm[C]// AGU Fall Meeting Abstracts, 2011, San Francisco.
- [21] VAVRYČUK V. Moment tensor decompositions revisited[J]. *Journal of Seismology*, 2015, **19**(1): 231 – 252.
- ~~~~~
- (上接 1656 页)
- [17] HAREHDASHT S A, HUSSIEN M N, KARRAY M, et al. Influence of particle size and gradation on shear strength-dilation relation of granular materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, **56**: 208 – 227.
- [18] SU L J, CHAN T C F, YIN J H, et al. Influence of overburden pressure on soil nail pull-out resistance in a compacted fill[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134** (9): 1339 – 1347.
- [19] YIN J H, ZHOU W H. Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135** (9): 1198 – 1208.
- [20] NG C W W, ZHOU R Z B. Effects of soil suction on dilatancy of an unsaturated soil[C]// *Proc 16th Int Conf Soil Mech Geotech Engng*, 2005, Osaka.
- [21] HOSSAIN M A, YIN J H. Dilatancy and strength of an unsaturated soil-cement interface in direct shear tests[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, **15**(5): 04014081.
- [22] SCHLOSSER F. Behaviour and design of soil nailing[C]// *Proceedings of the International Symposium*, 1985, Bangkok.
- [23] YIN J H, SU L J, CHEUNG R W M, et al. The influence of grouting pressure on the pullout resistance of soil nails in compacted completely decomposed granite fill[J]. *Géotechnique*, 2008, **59** (2): 103 – 113.
- [24] WANG Q, YE X Y, WANG S Y, et al. Experimental investigation of compaction-grouted soil nails[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, **54** (12): 1728 – 1738.
- [25] 张旭辉, 吴欣, 俞建霖, 等. 浆囊袋压力型土钉新技术及工作机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(S2): 227 – 232. (ZHANG Xu-hui, WU Xin, YU Jian-lin, et al. New slurry pressure type soil-nailing technology and its working mechanism[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(S2): 227 – 232. (in Chinese))
- [26] ZHU H H, YIN J H, YEUNG A T, et al. Field pullout testing and performance evaluation of GFRP soil nails[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(7): 633 – 642.
- [27] YE X Y, WANG S Y, WANG Q, et al. Numerical and experimental studies of the mechanical behaviour for compaction-grouted soil nails in sandy soil[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, **90**: 202 – 214.
- [28] YE X Y, WANG S Y, XIAO X, et al. Numerical study for compaction-grouted soil nails with multiple grout bulbs[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, **19**(2): 04018193.