



移动扫码阅读

袁国涛, 张明伟, 王 杰, 等. 采动覆岩微震分区演化特征的数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 36-46.

YUAN Guotao, ZHANG Mingwei, WANG Jie, *et al.* Numerical simulation study on sub-regional evolution of microseismic characteristics of mining overburden rock[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 36-46.

## 采动覆岩微震分区演化特征的数值模拟研究

袁国涛<sup>1</sup>, 张明伟<sup>1</sup>, 王 杰<sup>2</sup>, 卫 俊<sup>1</sup>, 杨 坤<sup>1</sup>

(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 221000; 2. 中煤科工集团西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了探究采动覆岩的破裂分区特征与微震演化规律, 以某矿井工程地质条件为背景, 根据矩张量与颗粒流理论构建了微震模拟方法, 实现了对回采工作面覆岩微震演化特征的模拟研究。研究表明: 采动覆岩的微震事件矩震级集中在 $-2.7 \sim -1$ , 微震破裂强度符合常见的正态分布性质, 微震发生频次与微震矩震级的关系也满足经典的矩震级-频度关系式; 微震事件在采场横向上表现出明显的区域分布特征, 采空区左右煤壁中的微震事件先于采空区顶板发生, 微震事件围绕采掘空间向两侧发展, 且存在一定的超前性与滞后性; 当工作面开采一定距离后, 采空区上覆岩层的垂向应力表现出“双峰值”特征, 微震事件迅速向上延伸, 并在上覆软弱岩层内集聚、发育, 使得微震事件在竖向上同样表现出明显的分层分布特征; 根据采场的应力、位移以及微震分布特征, 可以将上覆岩层划分为“横四区”与“竖三带”, 各个破裂区域的微震事件破裂类型占比各不相同, 煤壁支撑区与离层区分别为剪切型与拉伸型微震事件的主要占比区域。此外, 对研究区域建立了微震监测系统, 现场监测与数值模拟结果基本吻合, 表明构建的微震模拟方法适用性较好, 可以从细观层面再现采动覆岩的微震演化过程, 研究结果为揭示采动裂隙演化机理提供一定的理论基础。

**关键词:** 采动覆岩; 微震; 矩张量; 颗粒流; 破裂类型

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)08-0036-11

### Numerical simulation study on sub-regional evolution of microseismic characteristics of mining overburden rock

YUAN Guotao<sup>1</sup>, ZHANG Mingwei<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>2</sup>, WEI Jun<sup>1</sup>, YANG Kun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Deep Geotechnical Mechanics and Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221000, China; 2. Xi'an Research Institute Co., Ltd, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to explore the fracture zone characteristics and microseismic evolution within overburden rock above mining coal seam, based on the geological engineering conditions of a mine, a microseismic simulation method was constructed according to the moment tensor and particle flow theory, and the microseismic evolution characteristics of overburden rock above panels were simulated. The results show that the magnitude of microseismic events in mining-disturbed overburden is between  $-2.7$  and  $-1$ , and the microseismic fracture strength conforms to the Gaussian distribution. The relationship between microseismic frequency and moment magnitude also satisfies the classical moment magnitude-frequency relationship. The microseismic events show prominent regional distribution characteristics in the horizontal direction of the panel. The microseismic events in the left and right coal walls of the goaf occur earlier than the roof above goaf, and the microseismic events develop to both sides around the mining space, and there is a certain advance and lag. When the panel is mined for a certain distance, the vertical stress of the overburden above the goaf shows a 'double peak' characteristic, and the microseismic events extend upward rapidly and gather and develop in the weak overburden so that the microseismic events also show prominent layered distribution characteristics in the vertical direction. According to the stress, displacement, and microseismic distribution characteristics

收稿日期: 2022-05-09 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0693

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074260); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019QNA26)

作者简介: 袁国涛(1993—), 男, 山东菏泽人, 博士研究生。E-mail: guotaoyuan@cumt.edu.cn

通讯作者: 张明伟(1984—), 男, 山东潍坊人, 副研究员, 博士。E-mail: mingweizhang@cumt.edu.cn

within overburden, the overburden can be divided into 'four horizontal zones' and 'three vertical zones'. The proportion of microseismic events and fracture types in each fracture area is different. The coal wall supported and bed separation areas are the large proportion areas of shear and tensile microseismic events, respectively. In addition, a microseismic monitoring system was established for the study area. The field monitoring and numerical simulation results are consistent, indicating that the constructed microseismic simulation method has a good applicability and can reproduce the microseismic evolution process of mining-disturbed overburden from the mesoscopic level. The research results provide a theoretical basis for revealing the evolution mechanism of mining-induced fractures.

**Key words:** mining overburden rock; microseism; moment tensor; particle flow; fracture type

## 0 引言

采动覆岩裂隙延展规律研究作为工程界十分关注的课题,与采掘过程中发生的各类工程灾害、环境灾害等问题密切相关<sup>[1-2]</sup>。因此,有效掌握开采煤层引起的覆岩破坏特征及裂隙演化规律,对煤矿的安全生产和绿色开采具有十分重要的意义。微震监测技术起源于地球物理学领域<sup>[3]</sup>,因具有大区域性、高连续性等特点,近几年被广泛应用于岩体破裂过程的实时监测中,并取得了诸多有益的研究成果。CHENG等<sup>[4]</sup>基于矿山地质资料与微震监测技术,研究了采动覆岩横向和垂向的微震事件分布规律,并在此基础上构建了覆岩在横向和垂向的破裂分区方法。侯恩科等<sup>[5]</sup>利用井-地联合微震监测技术,从微震事件的能量和密度角度探讨深埋煤层开采顶板覆岩破坏过程及导水裂隙带发育高度。孟祥军等<sup>[6]</sup>运用微震监测技术对工作面推进过程中微震事件进行实时记录,并分析了采动覆岩的裂隙发育形态特征和演化趋势,为高位钻场瓦斯抽采参数设计与优化提供一定的依据。

综上所述,前人关于采动覆岩裂隙已进行了大量微震监测现场实践工作,并取得了丰富的研究成果。但是对于采动覆岩微震演化特征背后的细观机制研究较少,加上微震监测技术在实际工况应用中,存在定位误差偏大<sup>[7]</sup>、源能计算方法不固定<sup>[8]</sup>等特点,因此急需寻求另一种研究方法对此加以完善与补充,从细观层面上揭示采动覆岩微震演化特征背后的力学机制。颗粒流离散元计算方法可以从细观层面再现岩体破裂过程,已被广泛应用于各类围岩力学特性与工程的模拟<sup>[9-10]</sup>,此外,有学者将该方法与矩张量理论结合,成功实现了室内尺度的岩体破裂过程的声发射模拟<sup>[11-13]</sup>。鉴于此,基于颗粒流离散元计算方法建立了采动覆岩的数值模型,并在此基础上采用矩张量理论微震计算方法,对不同破裂分区条件下的微震事件演化规律进行分析,深入探讨采动覆岩的细观破裂过程,为从微震监测角度揭示采动裂隙演化机理提供一定的理论基础。

## 1 采动覆岩的破裂分区模型

大量的研究表明,煤层开采后,上覆岩体的应力平衡被打破,应力重新分布。图1为采场上覆岩层的破裂分区模型考虑到煤壁支撑区的影响,在水平方向可以将顶板岩层划分为4个区,从左到右分别为原岩区(A区)、煤壁支撑区(B区)、离层区(C区)和再压实区(D区)<sup>[4,14]</sup>。4个区域的应力状态不同,其岩体运移规律以及破裂特征也有所不同。原岩区位于采空区前方,超前距离较远,处于应力平衡状态,在回采期间一般不会产生新的裂隙。煤壁支撑区紧靠回采工作面前方,受超前应力的影响,压力峰值出现在工作面前方一定距离处,工作面到支撑压力峰值位置的煤岩体处于极限平衡状态,主要由剪应力控制,煤壁支撑区范围 $l_1$ 、倾角 $\beta_1$ 与顶板岩层刚度及所受超前应力等因素有关。离层区主要由拉应力主导,该区域岩层在重力应力作用下发生弯曲变形,由于煤岩体力学性质的差异,所表现的弯曲变形程度不同,从而导致层间裂隙的形成<sup>[15]</sup>。此外,在拉应力作用下岩层会产生断裂破坏,并不断向上发展,随着原生裂隙与次生裂隙的不断延展,岩层之间也产生了复杂的剪应力,进而加速了裂隙和裂缝的发展,从而形成一定角度的裂隙并向上扩展。离层区裂隙的发展角 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 以及范围 $l_2$ 都与上覆岩体的刚度有关。再压实区为应力再平衡区,采空区顶板岩体经过垮落、裂隙延展等过程,在自重应力的作用下逐渐达到区域平衡状态,由于该部分区域是通过前两个区域过渡而来,因而此区域岩体破坏最为严重,整体弯曲下沉量最大。

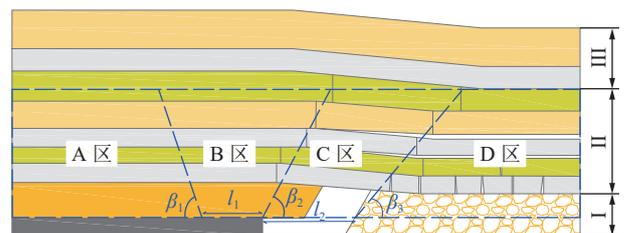


图1 采场上覆岩层的破裂分区模型

Fig.1 Fracture zoning model of strata on mining site

在垂直方向上,根据上覆岩体破断类型和裂隙发育情况,从下到上依次分为垮落带 I、裂缝带 II 和弯曲下沉带 III<sup>[14]</sup>,如图 1 所示。垮落带位于煤层上方,由杂乱无序的破碎煤岩体组成,纵向破断裂隙与横向离层裂隙在此区域纵横交错分布。裂缝带位于垮落带上方,其形成过程伴随着岩体的破断运移以及应力重分布,该区域存在 2 种类型的裂隙,第 1 类为采空区上覆岩层周期性破断下沉运动产生的破断裂隙,主要由拉应力控制,裂隙间的水平间距与岩层的破断步距近似相等;第 2 类为煤壁支撑区产生的岩层压剪裂隙,主要由剪应力控制,这类裂隙的分布相对杂乱无序,裂缝尺度通常小于前者,分布密度却要高于前者<sup>[16-17]</sup>。弯曲下沉带位于裂缝带上方的部分岩层与松散层区域,该区域岩体不发生破坏,只产生一定程度的弯曲变形。此外,有学者认为,关键层的存在对上覆岩层的变形和断裂过程起到决定性作用<sup>[18]</sup>,在关键层不发生断裂的前提下,关键层可以有效防止下方岩体破坏与运移传递到关键层之上的地层,最终导致了“竖三带”区域边界通常与关键地层一致。

综上所述,根据采场上覆岩层的应力、移动破断以及裂隙分布特征,可以简单的将上覆岩层划分为“横四区”与“竖三带”,通过深入研究各个分区的采动裂隙形成过程及类型,为采动覆岩破裂分区治理奠定坚实的基础。

## 2 数值模型建立与计算

### 2.1 工程概况

以兖州矿区某矿 325 工作面为研究背景。325 工作面埋深约 270 m,走向长度约 1 100 m,倾向宽度约 100 m,煤层平均厚度 8.2 m,煤层结构简单,赋存稳定,采用长壁式综采放顶煤开采。该工作面为单斜构造,煤层倾角平均约 4°,总体呈现南高北低的趋势。煤层直接顶为粉砂岩,坚固性系数  $f$  为 3.0~6.0,属于中硬覆岩,工作面钻孔柱状图如图 2 所示。

### 2.2 PFC 与微震离散元模拟实现

PFC 属于 Itasca 公司开发的力学分析软件,随着几十年的不断发展完善,已成为目前岩土、采矿领域相关问题数值计算最为有效的研究工具<sup>[10-11]</sup>。该软件主要是通过牛顿第二定律研究颗粒(簇)以及接触之间的力与位移的关系,从细观的角度来分析材料的宏观力学特性,进而实现煤岩材料裂纹萌生与扩展过程的模拟。然而,由于 PFC 中的颗粒尺寸几乎相同,因此颗粒之间的黏结键断裂所释放的能量几

岩性	柱状	层厚/m	底部距煤层高/m
第四系松散层		183.19	85.84
粗砂岩		1.51	84.33
黏土岩		12.01	72.32
中砂岩		4.32	68.00
黏土岩		2.13	65.87
中细砂岩互层		17.47	48.40
黏土岩		2.37	46.03
粉砂岩		11.69	34.34
黏土岩		2.45	31.89
粉砂岩		4.03	27.86
2号煤		0.65	27.21
黏土岩		1.85	25.36
中细砂岩互层		14.38	10.98
粉砂岩		10.98	0
3号煤		8.14	—
泥岩		1.19	-1.19
粉细砂岩互层		12.08	-13.27

图 2 325 工作面钻孔柱状

Fig.2 Drilling histogram near No. 325 working face

乎相同,这与真实的微震规律有所不同。为了更加可靠的描述微震破裂强度分布规律,一般将发生在特定时间和空间上相近的黏结断裂视为同一微震事件,当微震事件由多条微裂纹组成时,则将裂纹群的几何中心作为微震事件的质心<sup>[11]</sup>。

在岩石力学以及采矿领域,矩张量理论已成为研究岩体内部破裂震源机制及时空演化规律的主流工具<sup>[19-20]</sup>。一般来说,任何震源的应力状态都可以通过矩张量进行描述,在地震学中,矩张量可以通过记录震源释放出的动力波转化获得<sup>[20]</sup>;在 PFC 软件中,微震事件所属颗粒的位置、力和位移都是已知的,那么根据黏结破坏时周围颗粒接触力的变化很容易计算出微震事件的矩张量<sup>[11, 13]</sup>。

当黏结键在外部负载下发生断裂时,每个黏结键断裂都代表一个微裂纹。微裂纹两端原先接触的颗粒为源颗粒,随着微裂纹的产生,裂纹周围的源颗粒将发生移动,进而引起接触力发生变化。将源颗粒上所有接触的接触力变化量乘以对应的力臂,并进行求和运算,得到表征微震事件的矩张量分量  $M_{ij}$ <sup>[11, 13]</sup>,其表达式为

$$M_{ij} = \sum_s \Delta F_i \delta_j \quad (1)$$

式中,  $\Delta F_i$  为接触力变化量的第  $i$  个分量;  $\delta_j$  为接触点与微裂纹中心距离的第  $j$  个分量;  $S$  为破裂面,图 3 为 PFC 中微震事件模拟的实现过程示意。

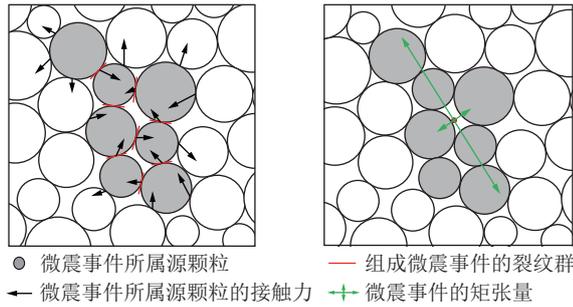


图 3 PFC 中微震事件模拟的实现过程

Fig.3 Realization process of microseismic event simulation in PFC

微震现场试验和监测结果表明,微震事件释放的能量随时间不断演化。那么对应的矩张量也可以表示为时间的函数<sup>[20-21]</sup>。在 PFC 模拟方法中,可以通过计算每一时步下的矩张量,获得具有全程时间相关性的矩张量。然而,在实际的运算中,若存储所有微震事件的全程时间相关性的矩张量,将耗费大量的内存及存储资源。为了提高计算效率,采用具有最大标量力矩值的矩张量作为每一微震事件的矩张量并存储。根据矩张量矩阵,标量力矩  $M_0$  的表达式<sup>[11]</sup>为:

$$M_0 = \left( \frac{\sum_{j=1}^3 m_j^2}{2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $m_j$  为矩张量矩阵的第  $j$  个特征值。根据微震事件矩张量的最大标量力矩,可由式(3)计算微震事件的矩震级  $M$ :

$$M = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6 \quad (3)$$

矩震级  $M$  反映了微震事件的破裂强度。值得说明的是,上述矩震级求解公式借鉴了地震学中矩震级标度的定义方法,它是一个均匀震级模型,适合于震级尺度范围很宽的统计,目前被广泛应用于地震以及微震事件的破裂强度表征<sup>[11,13,21]</sup>。

此外,为了量化矩张量的破裂类型,需对微震矩张量做一步分解工作,进而建立矩张量参量和岩体破裂类型之间的关系。本文采用 FEIGNIER<sup>[21]</sup> 提出的破裂类型判据,该判据对于矩震级较小的微震事件具有较好的适用性<sup>[21-22]</sup>。

$$R = \frac{\text{tr}(M_{ij})}{|\text{tr}(M_{ij})| + \sum |m_i^*|} \times 100 \quad (4)$$

式中:  $R$  为各向同性组分所占的比例;  $\text{tr}(M_{ij})$  为矩张量的迹;  $m_i^*$  为偏张量的特征值,  $m_i^* = M_i - \text{tr}(M)/3$ ;  $M_i$  为矩张量的 3 个特征值。根据  $R$  值可以将微震事件破

裂源分为张拉型破裂、剪切型破裂和内缩型破裂,有如下判据<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} R > 40 & \text{震源以张拉破裂为主} \\ 40 \geq R \geq -40 & \text{震源以剪切破裂为主} \\ R < -40 & \text{震源以内缩破裂为主} \end{cases} \quad (5)$$

依据上述微震矩张量原理编制 FISH 函数,并将其应用到煤层开采的 PFC 模拟求解中。

### 2.3 模型建立与参数选取

考虑模型加载边界条件影响,建立长×宽为 150 m×120 m 的二维颗粒流采场模型,如图 4 所示。在模型底部施加垂直位移约束,左、右两侧施加水平位移约束。模型顶部施加 3.7 MPa 的垂直载荷,模拟上覆厚度 170 m 的第四系松散层。模型中颗粒最小粒径为 0.3 m,粒径比为 1.5,煤层上方分别布置横向与竖向 2 条测线,由 24 个测量圆组成,测量圆半径为 5 m。模拟采高为 8 m,开采步距为 10 m,总的回采距离为 100 m。由于上覆岩层中存在厚度较小的岩层,为此对相邻岩层的力学性质相差不大的岩层进行了合并,最终确定的采场模型共计 15 层。

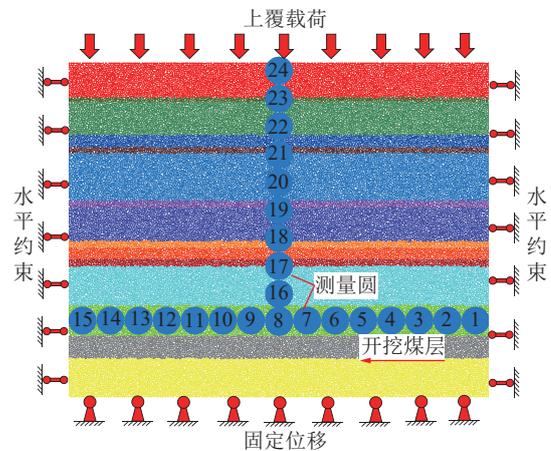


图 4 所建数值模型

Fig.4 Numerical model established

选取使用较为广泛的平行黏结模型作为本构模型, PFC 模拟参数的标定工作是一个极其复杂的过程,这里采用经验公式法<sup>[23]</sup>,将材料宏观力学参数转化为 PFC 模拟中的的细观参数值。之后通过试错法调整模型中细观力学参数值,直到其所获得的宏观力学参数完全匹配为止。为了简化分析,本文仅匹配单轴抗压强度,当两者的相对误差小于 5% 时,把对应的细观参数作为各个岩层的细观参数值,最终获得的采场模型的细观参数见表 1。

表1 采场模型的细观参数  
Table 1 Mesoscopic parameters of slope model

序号	岩性	厚度/m	容重/ (kg·m <sup>-3</sup> )	接触模量/ GPa	接触刚度比	平行黏结 模量/GPa	平行黏结 刚度比	平行黏结法向 强度/MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/(°)	摩擦因数
1	第四系土层	12.5	2 155	3.5	1.8	6.5	1.8	7.6	12.2	41.6	0.8
2	粗砂岩	1.5	2 452	8.2	1.5	8.2	1.5	17.2	15.0	33.4	0.6
3	黏土岩	12.0	2 650	6.9	1.7	26.9	1.7	12.0	7.1	36.2	0.7
4	中砂岩	4.5	2 500	7.8	1.1	7.8	9.2	12.8	9.2	37.8	0.8
5	黏土岩	2.0	2 650	4.1	1.7	24.1	1.7	9.9	5.1	33.0	0.6
6	中细砂岩互层	17.0	2 410	10.6	1.2	10.6	1.2	15.9	10.2	38.0	0.8
7	黏土岩	2.5	2 650	7.6	1.9	7.6	1.9	9.2	5.8	34.9	0.8
8	粉砂岩	12.0	2 590	9.5	1.8	9.5	1.8	8.8	7.5	35.3	0.6
9	黏土岩	2.5	2 650	7.2	1.6	7.2	1.6	5.4	3.2	34.9	0.7
10	粉砂岩	4.0	2 590	10.1	1.9	10.1	1.9	9.8	4.2	31.1	0.8
11	黏土岩	2.5	2 620	7.2	1.9	7.2	1.9	7.8	4.2	33.7	0.8
12	中细砂岩互层	14.0	2 490	18.6	1.5	18.6	1.5	8.8	4.1	30.2	0.7
13	粉砂岩	11.0	2 650	9.9	1.9	9.9	1.9	5.4	3.6	35.0	0.8
14	3号煤层	8.0	1 380	2.5	1.9	2.5	1.9	3.5	3.2	28.9	0.4
15	底板	14.0	2 500	9.5	1.7	9.5	1.7	10.8	5.2	35.0	0.8

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 采动影响下覆岩应力与位移演化特征

PFC模型中的接触作用是传递载荷的路径和方式,用于表征颗粒间的相互作用,数值大的力值表征结构的主承载区,通过力场分析可揭示覆岩采动时内部力的传递路径和过程。图5给出了沿工作面走向的覆岩力场演化分布特征。为了更好地表征力场的分布,将采场的力场最大值统一设置为 $8 \times 10^6$  N。由图5可知,煤层开挖后,开挖区上方形成应力释放区,煤壁前方形成应力集中区,随工作面的不断向前推进,上覆岩层的应力释放区随之变大,最强接触力拱的范围也逐渐增大,当煤层开采至40 m时,煤层直顶板发生断裂,且出现离层现象,由于顶板岩层刚度不同,力场上表现出明显的分层特征;当煤层开采至80 m时,煤层直顶板发生大规模破断,最强接触力拱高度达到最大值80 m;当煤层开采至100 m时,采空区出现压实区,强接触力逐渐在采空区上方恢复,应力进入新的平衡状态。

图6给出了横向与竖向两条测线垂向应力分布曲线,测线上的应力测点分布位置如图4所示。由图6a可以看出,随着工作面的持续推进,煤壁前方的直接顶最大垂向应力呈现增大的趋势,当煤层开采至60 m时,垂向应力达到最大,约19 MPa。此外,直接顶最大垂向应力位置随着工作面的回采也向煤壁前方移动,当工作面回采10 m时,最大垂向应力

位置出现在煤壁前方10 m处,当工作面回采40 m时,最大垂向应力位置出现在煤壁前方40 m处。由图6b可知,随着埋深的增加,垂向应力也随之增大。当煤层开挖超过40 m后,竖向侧线的垂向应力表现出“双峰值”特征,在煤层上方约45 m处,出现了第1个峰值,在煤层上方75 m处,出现了第2个峰值,可以看出采空区顶板在应力分布上表现出明显的分层特征,与前面的分析基本一致。煤层上方80 m以上区域应力几乎不随着煤层的开采发生改变,也间接说明了采场的最大应力拱高度约80 m。

图7给出了沿工作面走向的覆岩位移场演化分布特征,位移场最大值统一设置为5 m。由图7可以看出,当煤层开采至40 m时,采空区上方岩体率先出现位移量,位移云图上为一个“拱形”,由于此时仍然处于开采初期,覆岩主要下沉量发生在煤层直接顶上。当煤层开采至60 m时,位移云图上的“拱形”区域也持续增大,伴随着部分顶板的垮落,位移云图又呈现出阶梯状分布。当煤层开采至100 m时,采空区覆岩进入新的平衡,覆岩位移量达到最大值,最大覆岩位移量范围集中在采空区上方35 m范围内。

#### 3.2 采动覆岩微震演化特征

根据前文的离散元微震模拟方法,得到了整个采场的微震事件演化结果,当模型开挖至100 m时,共监测微震事件7 822个,图8给出了微震事件发

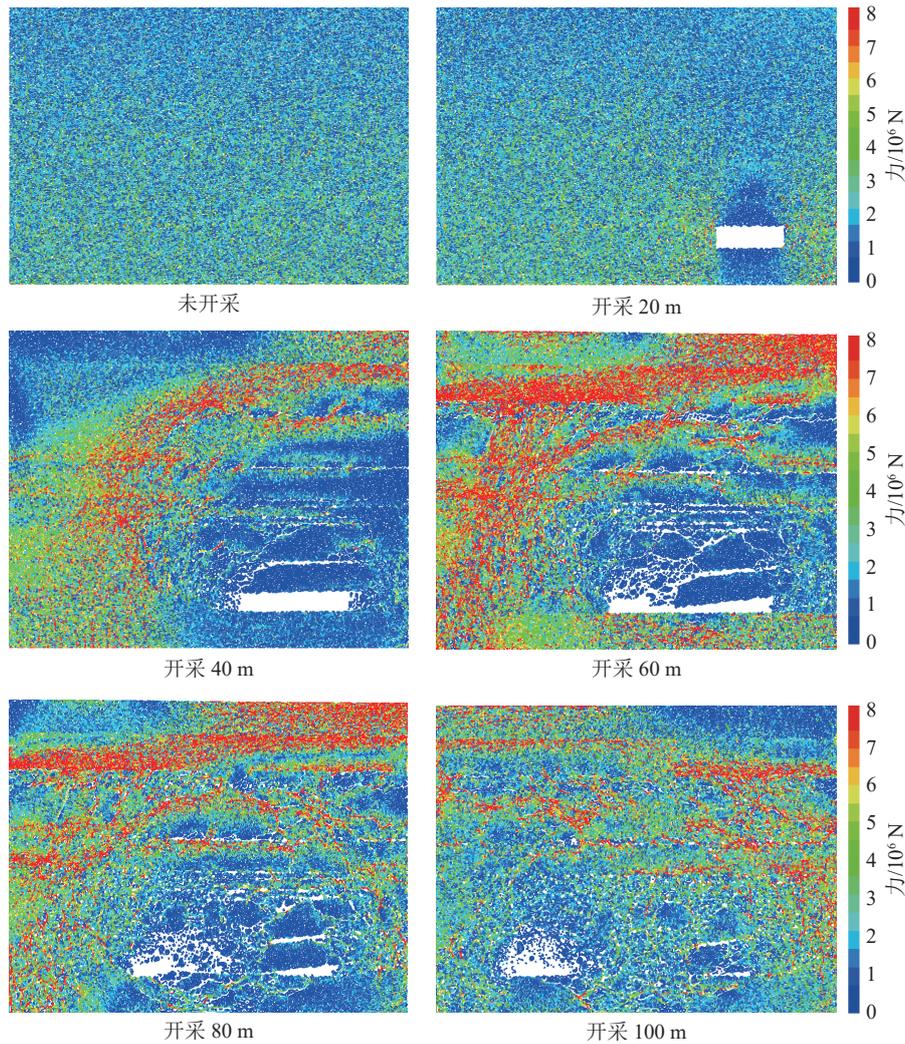


图 5 沿工作面走向的覆岩力场演化分布特征

Fig.5 Evolution and distribution characteristics of overburden force field along working face strike

生频次与微震矩震级的关系。由图 8 可以看出, 模拟结果较好的符合经典的矩震级-频度 ( $G-R$ ) 关系式( $\lg N = a - bM$ )<sup>[24]</sup>, 其中,  $M$  为微震事件矩震级,  $N$  为以矩震级  $M$  为中心的小区间在一定时期内发生微震的频次,  $a$  和  $b$  为待定系数,  $a$  表征在统计时间、区域内的微震活动水平,  $b$  值描述了在一定时间段里的大小震级事件数相对数,  $b$  值越小, 大震级事件相对越多。根据图 8 微震事件频次与震级关系可知, 模拟得到的微震事件  $b$  值约为 5, 略大于现场微震监测的结果值<sup>[24]</sup>, 这表明该模拟方法在模拟大震破裂事件时, 存在一定的不足, 需通过调整微震事件所属裂纹群的持续时间和空间, 增加最大标量力矩值上限, 从而达到减小微震事件  $b$  值的目的。此外, 模拟微震事件的矩震级范围主要集中在  $-2.7 \sim -1$ , 符合常见的正态分布性质。

图 9 给出了沿工作面走向的覆岩微震演化分布特征。由图 9 可知, 微震事件率先出现在采空区左

右的两侧煤壁中, 随着回采进尺的增加, 采空区上方也出现部分微震事件且逐步向上衍生, 当工作面开采至 40 m 的时候, 微震事件迅速向上发育, 在上覆软弱岩层微震事件聚集, 表现出明显的层位分布特征。当工作面开采至 60 m 时, 微震事件发育高度基本达到最大值, 约 78 m。此后, 随着回采进尺的继续增加, 微震事件的数量也在显著增加, 最大发育高度却不再变化, 微震事件主要在垮落带与裂缝带周围集聚、演化, 使得裂隙进一步发育、贯通, 当采空区出现新的压实区, 采空区覆岩微震事件也逐渐趋于平静。

为了更加详细的描述各个开采步下的采场微震事件矩震级分布情况, 绘制了各开采步下的采场微震事件矩震级分布图, 如图 10 所示。由图 10a 可知, 微震事件在横向上表现出明显的区域分布特征, 每个开采步里, 不同区域的微震事件矩震级发散程度也不尽相同。微震围绕采掘空间向两侧发展, 且存

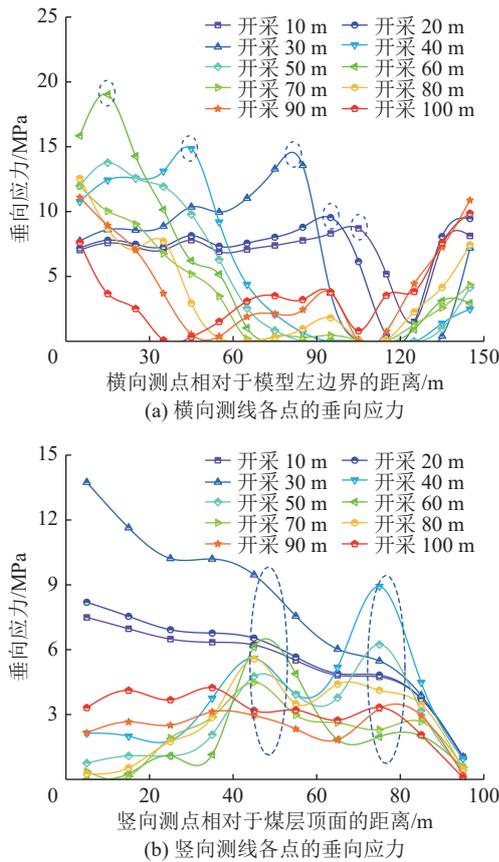


图 6 横向与竖向两条测线垂向应力分布曲线

Fig.6 Vertical stress distribution curve of two measuring lines, horizontal and vertical

在一定的超前性与滞后性,比如煤层开采至 30 m 时,在回采区域前方 35 m 范围与后方 55 m 范围内均有

微震事件发生。当煤层开采至 40 m 时,沿着采场横向均有微震事件的发生,表明此时开采扰动范围已贯穿整个采场。由图 10b 可以看出,微震事件在竖向上同样表现出明显的分层分布特征,随着工作面的推进,微震事件逐级向上衍生,在煤层上方 34 m 范围内,微震事件数量较多,矩震级相对较大且集中,由此表明该区域内岩体破坏较为严重,综合前面的分析可以确定模拟覆岩的垮落带高度约 34 m,裂缝带高度约 44 m。

### 3.3 微震事件分区分布特征

当煤层开采至 100 m 时,采场的裂隙延展范围达到最大,此时的微震事件分布代表了整个采场的最终微震发育状态。由前文可知,根据微震事件矩张量分解后的各向同性组分占比,将微震源分为 3 种破裂形式。为了更加直观的分析最终采场的微震事件破裂类型分布情况,按 10 m 间隔进行统计,分别绘制沿采场横向与竖向不同区间的微震事件破裂类型百分比堆积柱状图,如图 11 所示。由图 11a 可以看出,沿采场横向方向,各区间微震事件类型占比不尽相同,-30 ~ 0 m 与 100 ~ 130 m 区间为左右两侧煤壁区域,此区域以剪切型微震事件为主,0 ~ 100 m 区间为采空区区域,该区域拉伸型占比较大,这与该区间岩体发生离层、断裂破坏有关。由图 11b 可知,沿采场竖向方向,由下往上各区间的内缩型事件占比越来越小,而剪切型事件占比整体表现出增大的趋势,在 40 ~ 50 m 与 60 ~ 70 m 两个区间表现异常,

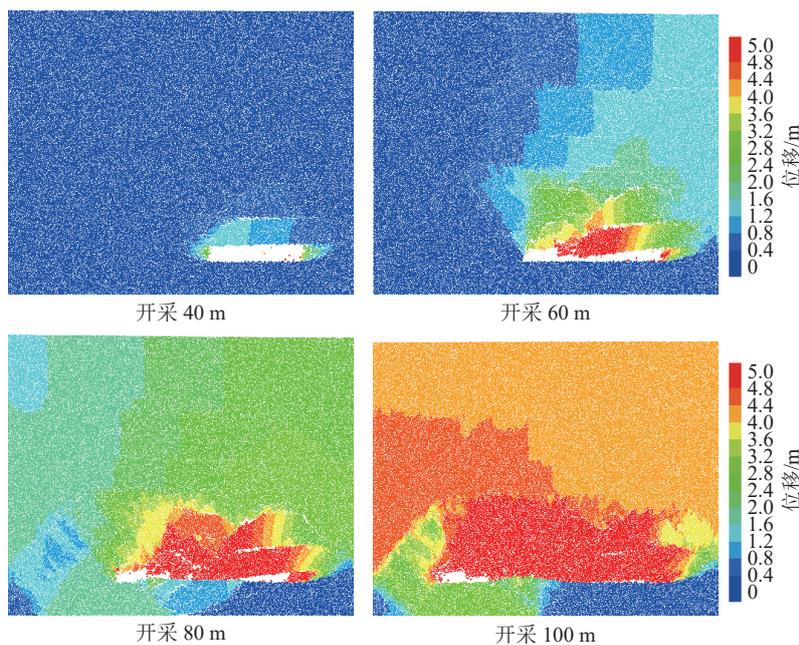


图 7 沿工作面走向的覆岩位移场演化分布特征

Fig.7 Evolution and distribution characteristics of overburden displacement field along working face strike

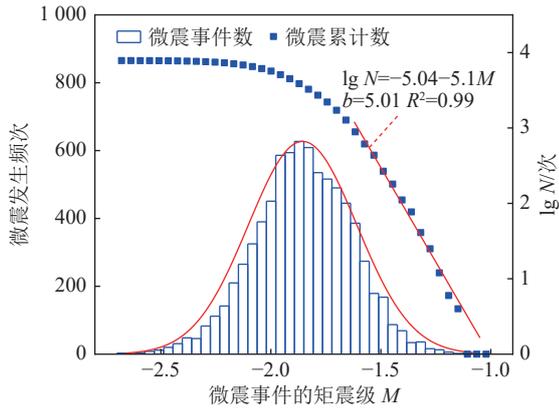


图 8 微震事件矩震级-频度关系

Fig.8 Moment magnitude-frequency relationship of microseismic events

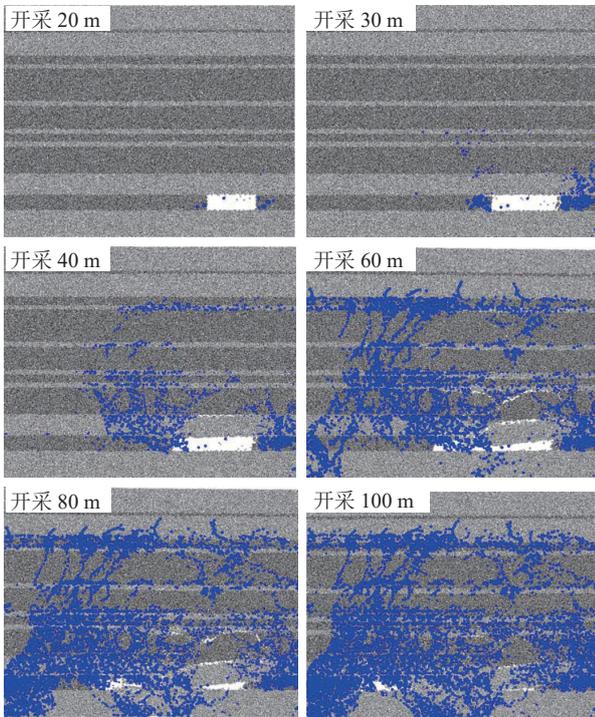


图 9 沿工作面走向的覆岩微震演化分布特征

Fig.9 Distribution characteristics of overlying rock microseismic evolution along working face strike

拉伸型微震事件有所增加,这是由于该区间内存在软弱岩层,出现了明显了离层裂隙,从而增大了拉伸型微震事件的占比。

由前文的分析可知,采场覆岩不同破裂区域所表现出的应力、运移规律是不同的,再结合微震事件的分布、集聚演化特征,可以确定采场上覆岩层的各个分区情况。考虑到各个破裂区域的界限并不明显,且破裂分区的详细划分并不是本文的研究重点,所以这里仅通过模拟结果的力场、位移场以及微震分布云图粗略地确定了最终采场覆岩的破裂分区情况,如图 12 所示。进而统计出了各分区的微震事件破

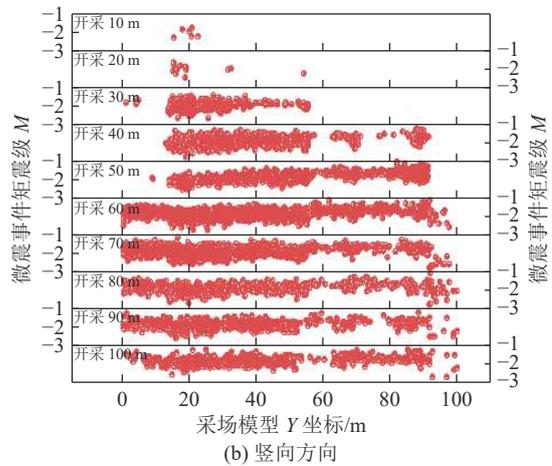
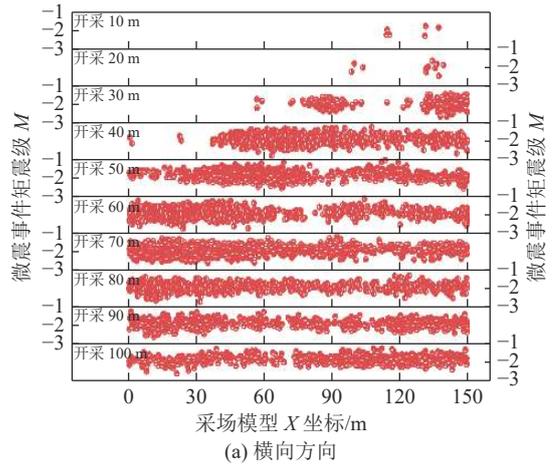


图 10 各开采步下的采场微震事件震级分布情况

Fig.10 Magnitude distribution of stope microseismic events at each mining step

裂类型占比,如图 13 所示。由图 13 可知,在煤壁支撑区(B区)中,剪切型微震事件占比最大,该区域裂隙张开度较小,原始裂隙在超前应力作用下发生闭合。离层区(C区)中拉伸型微震事件占比最大,此区域岩层裂隙张开较大,裂隙率和渗透率迅速提高。再压实区(D区)以拉伸型与剪切型微震事件为主,此区域的穿层裂隙和层间离层在地应力的作用下逐渐闭合,裂隙率和渗透率呈现下降的趋势。垮落带中拉伸型微震事件占比最大,上升至裂缝带时,剪切型微震事件的占比超过拉伸型。综上所述,离层区(C区)的拉伸型微震事件占比最大,由此可以作为瓦斯抽采、水害治理的主要裂隙导通区。

#### 4 模拟结果现场验证

为了验证模拟结果的可靠性,在 325 工作面布置了微震监测系统,共完成了为期 12 d 的实时动态监测,期间共获得信噪比较高的微震事件 182 个。图 14 给出了基于现场监测的微震事件垂向分布图。

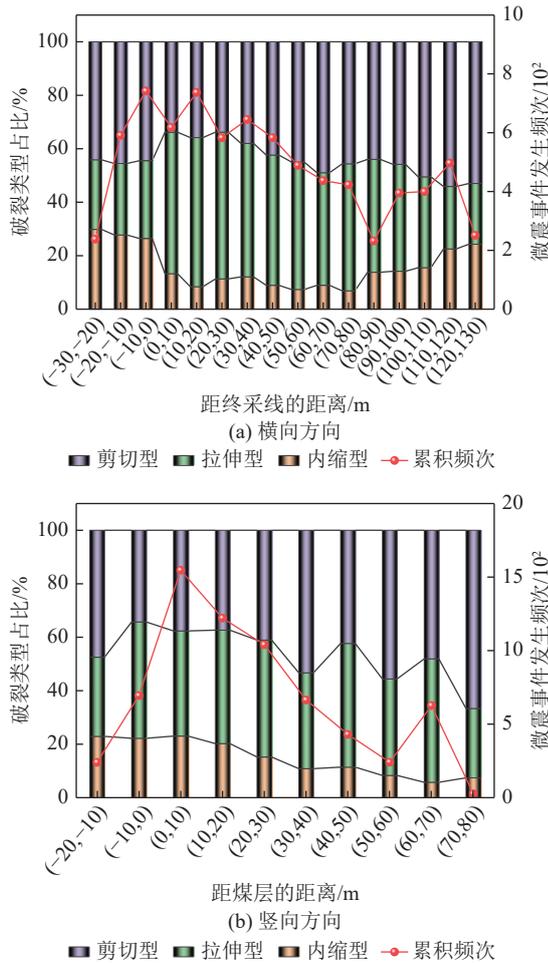


图 11 最终采场的不同区间微震事件破裂类型分布情况  
Fig.11 Distribution of rupture types of microseismic events in different intervals of the final stope

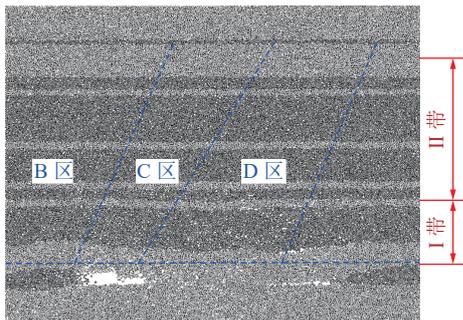


图 12 最终采场覆岩的破裂分区情况  
Fig.12 Fracture zoning of the overlying rock in the final stope

由图中不难看出，现场监测的微震事件最大发育高度约 80 m，在煤层上方约 35 m 范围内，微震事件数量较多，这与数值模拟结果基本一致。此外，根据数值模拟结果与微震演化特征，粗略划分了现场上覆岩层的各个分区情况。并根据震源机制解析<sup>[22]</sup>得到了各微震事件的破裂类型，在此基础上，统计了各分区的微震事件破裂类型所占比重，如图 15 所示。由

44

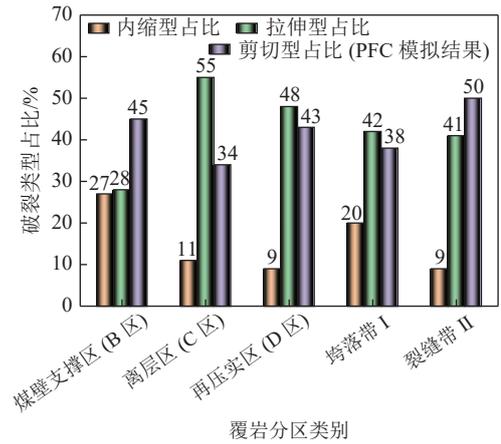


图 13 数值模拟的各分区微震事件破裂类型占比  
Fig.13 Proportion of rupture types of microseismic events in each zone of numerical simulation

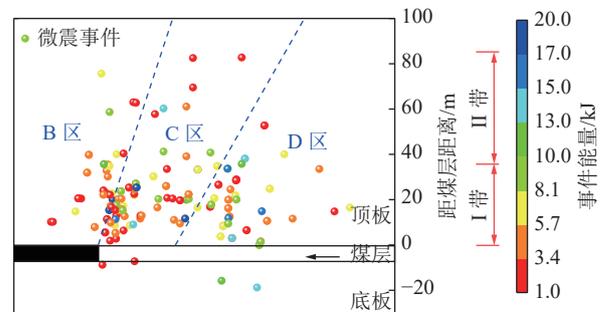


图 14 基于现场监测的微震事件垂向分布  
Fig.14 Vertical distribution of microseismic events based on field monitoring

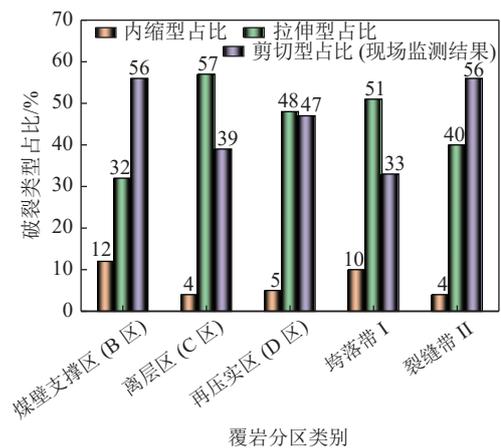


图 15 基于现场监测的各分区微震事件破裂类型占比  
Fig.15 Proportion of rupture types of microseismic events in each subregion based on field monitoring

图中可以看出，现场监测的各分区内缩型微震事件的比例略小于数值模拟结果。对于拉伸型与剪切型微震事件，现场监测与数值模拟结果表现出的规律基本一致。综上可以说明该方法建立的微震事件模拟理论适用性较好，可以较好的再现采动覆岩破坏

的微震演化过程。

## 5 结 论

1) 基于矩张量理论构建了 PFC 微震模拟方法,并将其应用到 325 工作面采动过程中覆岩破裂分区的模拟研究中。模拟结果表明,采动覆岩的微震事件矩震级集中在 $-2.7 \sim -1$ ,破裂强度符合常见的正态分布性质,微震事件发生频次与微震矩震级的关系也满足经典的矩震级-频度 ( $G-R$ ) 关系式。

2) 微震事件在横向上表现出明显的区域分布特征。采空区左右煤壁中的微震事件先于采空区顶板发生,微震事件围绕采掘空间向两侧发展,且存在一定的超前性与滞后性。采空区左右两侧煤壁区域以剪切型微震事件为主,采空区上覆岩层区域,拉伸型微震事件占比较大,这与该区间岩体发生离层、断裂破坏有关。

3) 随着工作面的推进,微震事件逐渐向上衍生,当工作面开采了一定距离后,采空区上覆岩层的垂向应力表现出“双峰值”特征,微震事件迅速向上延伸,并在上覆软弱岩层内集聚、发育,使得微震事件在竖向上同样表现出明显的分层分布特征。整体来看,由下往上各区间的内缩型微震事件所占的比重越来越小,而剪切型事件占比整体表现出增大的趋势。

4) 基于采场最终应力、位移以及微震分布特征,可以将上覆岩层划分为“横四区”与“竖三带”,每个区域的微震事件破裂类型所占比重各不相同。煤壁支撑区与离层区分别为剪切型与拉伸型微震事件的主要占比区域。此外,对研究区域建立了微震监测系统,现场监测与数值模拟结果基本吻合,表明构建的 PFC 微震模拟方法对于采动覆岩破裂规律研究适用性较好。

### 参考文献(References):

- [1] 张 礼,齐庆新,张 勇,等.采动覆岩裂隙场三维形态特征及其渗透特性研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(4):695-705.  
ZHANG Li, QI Qingxin, ZHANG Yong, *et al.* Study on three-dimensional shape and permeability of mining-induced fractured field in overburden[J]. Rock Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(4): 695-705.
- [2] HE Changchun, LU Weiyong, ZHA Wenhua. Evolution mechanism of interconnected vertical fractures in the overburden of long-wall coal mining[J]. Geofluids, 2020, 2020(S1): 1-12.
- [3] 赵 永,杨天鸿,王述红,等.基于微震反演裂隙的采动岩体损伤分析方法及其工程应用[J].岩土工程学报,2022,44(2):305-314.  
ZHAO Yong, YANG Tianhong, WANG Shuhong, *et al.* Damage analysis method for mining rock mass based on microseismic-derived fractures and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 305-314.
- [4] CHENG Guanwen, MA Tianhui, TANG Chun'an, *et al.* A zoning model for coal mining-induced strata movement based on microseismic monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 94: 123-138.
- [5] 侯恩科,范继超,谢晓深,等.基于微震监测的深埋煤层顶板导水裂隙带发育特征[J].煤田地质与勘探,2020,48(5):89-96.  
HOU Enke, FAN Jichao, XIE Xiaoshen, *et al.* Development characteristics of water-conducting fractured zone in deep coal seam based on microseismic monitoring[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 89-96.
- [6] 孟祥军,赵鹏翔,王绪友,等.大倾角高瓦斯煤层采动覆岩“三带”微震监测及瓦斯抽采效果[J].煤炭科学技术,2022,50(1):177-185.  
MENG Xiangjun, ZHAO Pengxiang, WANG Xuyou, *et al.* "Three zones" microseismic monitoring and analysis of gas drainage effect of overlying strata in gob of high dip high gas seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 177-185.
- [7] 贾宝新,李 峰,潘一山,等.基于变步长加速搜索的微震源定位方法[J].岩土力学,2022,43(3):843-856.  
JIA Baoxin, LI Feng, PAN Yishan, *et al.* Microseismic source locating method based on variable step size accelerated search[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 843-856.
- [8] 王建群,朱权洁,张尔辉.矿山微震震源能量表达方法与应用研究[J].煤炭工程,2020,52(10):86-91.  
WANG Jianqun, ZHU Quanjie, ZHANG Erhui. A method for micro-seismic energy expressions in mine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(10): 86-91.
- [9] WANG Gang, WU Mengmeng, WANG Rui, *et al.* Height of the mining-induced fractured zone above a coal face[J]. Engineering Geology, 2017, 216: 140-152.
- [10] 靖洪文,吴疆宇,孟 波,等.深部矩形底煤巷围岩破坏失稳全过程宏观演化特征研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(1):82-93.  
JING Hongwen, WU Jiangyu, MENG Bo, *et al.* Macroscopic and mesoscopic evolution characteristics of surrounding rock of rectangular bottom coal roadway in deep during failure[J]. Rock Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(1): 82-93.
- [11] 周 喻,吴顺川,许学良,等.岩石破裂过程中声发射特性的颗粒流分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):951-959.  
ZHOU Yu, WU Shunchuan, XU Xueliang, *et al.* Particle flow analysis of acoustic emission characteristics during rock failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 951-959.
- [12] RAZIPERCHIKOLAEI Samin, ALVARADO Vladimir, YIN Shunde. Quantitative acoustic emissions source mechanisms analysis of soft and competent rocks through micromechanics-seismicity coupled modeling[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 21(3): 1-14.
- [13] ZHAO Yuan, ZHAO Guoyan, ZHOU Jing, *et al.* Failure mechanism analysis of rock in particle discrete element method simula-

- tion based on moment tensors[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 136: 104215.
- [14] 郭明杰, 郭文兵, 袁瑞甫, 等. 基于采动裂隙区域分布特征的定向钻孔空间位置研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(4): 817-826.
- GUO Mingjie, GUO Wenbing, YUAN Ruifu, *et al.* Spatial location determination of directional boreholes based on regional distribution characteristics of mining-induced overburden fractures[J]. *Rock Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(4): 817-826.
- [15] CHI Mingbo, ZHANG Dongsheng, LIU Honglin, *et al.* Simulation analysis of water resource damage feature and development degree of mining-induced fracture at ecologically fragile mining area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(3): 1-15.
- [16] 曹志国, 鞠金峰, 许家林. 采动覆岩导水裂隙主通道分布模型及其水流动特性[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(12): 3719-3728.
- CAO Zhiguo, JU Jinfeng, XU Jialin. Distribution model of water-conducted fracture main channel and its flow characteristics[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3719-3728.
- [17] 魏宗勇, 李树刚, 林海飞, 等. 大采高综采覆岩裂隙演化特征三维实验研究[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(4): 589-598.
- WEI Zongyong, LI Shugang, LIN Haifei, *et al.* Three-dimensional experimental study on evolution characteristics of overburden fractures in fully mechanized mining with large mining height[J]. *Journal of Xian University of Science and Technology*, 2020, 40(4): 589-598.
- [18] TI Zhengyi, LI Jiazhen, WANG Meng, *et al.* Fracture characteristics and zoning model of overburden during longwall Mining [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021.
- [19] 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量响应规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 722-733.
- CAO Anye, CHEN Fan, LIU Yaoqi. Fracture mechanism and source parameter response law of mine earthquake in frequent rock burst area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 722-733.
- [20] ZHAO Yong, YANG Tianhong, ZHANG Penghai, *et al.* Inversion of seepage channels based on mining-induced microseismic data[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 126: 104180.
- [21] FEIGNIER Bruno, YOUNG R Paul. Moment tensor inversion of induced microseismic events: Evidence of non-shear failures in the  $-4 < M < -2$  moment magnitude range[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(14): 1503-1506.
- [22] 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 Shulin, LIN Kaifan, ZHOU Mengjing, *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.
- [23] 刘红威, 赵阳升, REN Tingxiang, 等. 切顶成巷条件下采空区覆岩破坏与裂隙发育特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 77-89.
- LIU Hongwei, ZHAO Yangsheng, REN Tingxiang, *et al.* Characteristics of overburden failure and fracture development in gob of mining with gob-side entry formed by cutting roof[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2022, 51(1): 77-89.
- [24] 张楚旋, 李夕兵, 董陇军, 等. 顶板冒落后微震活动性参数分析及预警[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S1): 3214-3221.
- ZHANG Chuxuan, LI Xibing, DONG Longjun, *et al.* Analysis of microseismic activity parameters pre-and post roof caving and early warning[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S1): 3214-3221.