

# 基于微震监测的掘进对巷道围岩稳定性影响规律

吴昊<sup>1</sup>, 李青锋<sup>1,2,3\*</sup>, 朱川曲<sup>1,2,3</sup>, 唐佩<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 矿业工程研究院, 湖南 湘潭 411201;  
3. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为了得到岩体破裂滑移对巷道围岩(煤柱、煤体及顶板)的影响,以山西潞宁煤矿 22117 风巷为研究背景,利用微震监测系统对潞宁煤矿 22117 风巷进行微震监测,得到围岩破裂的微震响应特征并对其进行分析.结合现场实际情况,利用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟软件建立三维模型,并进行数值模拟计算,对巷道掘进时顶板稳定性规律进行分析.结果表明:掘进对顶板影响表现为由巷道顶板-煤柱及其上方顶板-煤体及其上方顶板逐渐发展的一个过渡过程;巷道顶板受掘进直接影响的范围为距迎头 32.6 m 范围内;掘进动力扰动对后方煤柱顶板破裂的微震具有滞后效应,滞后范围约为 93.3 m.

**关键词:** 围岩稳定性;微震监测;数值模拟;过渡过程;滞后效应

中图分类号:TD76 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)01-0021-09

## Influence Law of Driving on Surrounding Rock Stability of Roadway Based on Microseismic Monitoring

WU Hao<sup>1</sup>, LI Qingfeng<sup>1,2,3</sup>, ZHU Chuanqu<sup>1,2,3</sup>, TANG Pei<sup>1</sup>

(1. College of Resources, environment & Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Institute of Mining Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Hunan University of Science and Technology, Key Laboratory of Gas and Roof Disaster Prevention and Control Safety Production, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to get the influence of rock mass fracture slip on roadway surrounding rock (coal pillar, coal body and roof), taking 22117 coal mine in Shanxi Province as the research background, the microseismic monitoring system is used to monitor 22117 air roadway in Luning coal mine, and the microseismic response characteristics of surrounding rock fracture are obtained and analyzed. Combined with the actual situation on site, the 3D model is established by using FLAC<sup>3D</sup> simulation software, and the numerical simulation calculation is carried out to analyze the roof rule during roadway tunneling. The results show that the influence of tunneling on the roof is a transitional process in which the roof - coal pillar and its upper roof - coal body and its upper roof gradually develop. The range of roadway roof directly affected by tunneling is within 32.6 m from the heading face. The driving dynamic disturbance has a hysteresis effect on the microseismic of the rear coal pillar roof rupture, with a hysteresis range of about 93.3 m.

**Keywords:** surrounding rock stability; microseismic monitoring; numerical simulation; transition process; hysteresis effect

微震监测技术是利用煤岩破裂产生的微震信息来研究煤岩结构和稳定性的一种实时、动态、连续的地

球物理监测方法<sup>[1,2]</sup>,利用微震监测系统与传统检测技术结合定量监测围岩破坏情况,能弥补传统定性分析围岩破坏的局限性<sup>[3]</sup>.不同掘进阶段的微震能量和频次表现形式不同,但具有一定规律性<sup>[4]</sup>.汤国水<sup>[5]</sup>基于高精度微震监测技术,发现了工作面开采扰动、临近采空区覆岩运动和重叠煤柱的耦合作用引起微震事件能量级别变高,从而导致综放工作面矿压显现更为剧烈;周春华<sup>[6]</sup>首次采用微震和电磁辐射联合监测方法对岩爆的前兆信息进行了识别和特征分析,得出了在岩爆诱发期,微震累计能量呈增加趋势,同时呈现视应力减小及累计视体积骤增等特征;孔令海<sup>[7]</sup>对采场围岩破裂和微震事件分布进行分析,得出微震事件数量分布极值区与工作面煤壁的距离等于支承压压力高应力区距工作面煤壁的距离与基本顶岩梁的一次断裂步距之和;崔峰,杨彦斌<sup>[8]</sup>提出了实体煤下微震事件主要发生在工作面前方顶板岩层中,能量释放值高于采空区下,采空区下微震事件主要发生在工作面后方顶板岩层中,发生的频次高于实体煤下回采;程关文,王悦等<sup>[9]</sup>通过对煤矿采动影响微震区微震事件的空间和能量的空间分布规律分析,研究微震事件数沿垂直方向的突变性,进而确定煤矿顶板中对变形和破坏起控制作用的关键层.此外还有大量国内外学者利用微震对矿山顶板的稳定进行了大量研究并取得了许多成果<sup>[10-14]</sup>.

笔者利用微震监测系统,以山西潞宁煤矿 22117 为研究背景,研究 22117 工作面上覆岩层破断对煤柱、煤体及顶板产生的影响,得出了巷道顶板、煤柱以及煤体的微震响应特征,并通过数值模拟方法验证了试验的可靠性,对 22117 工作面安全生产具有实践指导意义,同时为类似工作面生产提供有效的建议.

## 1 工程概况

22117 回风巷位于井田东南部的二二采区,上部为二二采区 22115 已回采工作面,保护煤柱为 15 m,下部为二二采区 22117 规划工作面未采动区域,西南为二二采区三条下山,东北部为矿井井田边界.其构造简单,无断层及岩溶陷落柱等复杂地质情况,工作面区域内煤层结构亦简单,中部夹不连续的薄层炭质泥岩夹矸,煤层直接顶主要由以长石为主的 2.6 m 细粒砂岩、3.0 m 砂质泥岩以及 5.0 m 粉砂岩组成,总厚 16 m;基本顶主要由 2.6 m 中粒砂岩、以石英为主的 23.0 m 细粒砂岩组成,总厚 26 m.煤岩层综合柱状图如图 1 所示.

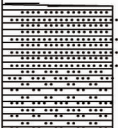



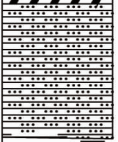
岩石名称	柱状	厚度/m	岩性描述
粒中粒砂岩、细砂岩		26	灰色,厚层状,水平层理发育,较坚硬,结构从上到下中粗粒、细粒砂.局部顶部夹灰黑色砂质泥岩薄层,中部夹灰白色粉砂岩薄层
细粒砂岩、泥岩、粉砂岩		16	灰白色,水平层理发育,易破碎
煤		1~5 3.5	侏 2# 煤层,黑色,金属光泽,内生裂隙发育,煤层结构简单,局部含有不连续薄层炭质泥岩夹矸,全区稳定可采
泥岩		14	深灰色,中厚层状构造,参差状断口,见植物根茎化石
细砂岩		7	灰白色,厚层状,成份以石英为主,长石次之,含暗矿物,次圆状,分选中等,钙质胶结,较坚硬

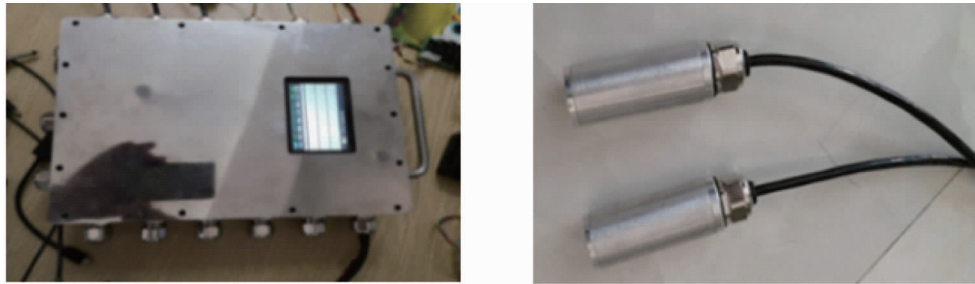
图 1 煤岩层综合柱状图

## 2 微震监测与数据分析

### 2.1 监测系统及其安装

煤岩体内部产生破裂并伴随有声发射现象产生,煤岩体所受的应力越高破裂形成也越快,声发射频次

也随之增加<sup>[15]</sup>,对于煤岩体破裂及其声发射信号可以由高精度宽频声发射、微震监测系统采集并分析.如图 2 所示,为武汉长盛煤安科技有限公司自行研发的新一代岩石破裂高精度智能声发射、微震监测系统,该系统由硬件和软件两部分构成,主要由传感器、采集仪及其配置软件、数据传输软件、监控软件、波形实时动态监测软件、围岩灾害孕育过程微震信息实时辨识与分析软件、围岩灾害孕育过程信息三维动态显示软件组成.可以实现 24 h 实时监测和自动采集、分析以及定位等,对监控范围的岩体进行稳定性评估,为矿山安全提供技术保障.根据图 3 设置安装示意图,以主机位置为中心向两边布设传感器.



(a) 监测系统监测主机

(b) 声发射及微震动传感器

记录单元		操作和分析软件技术参数	
接收器端口	12	数据采集	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 采样间隔: 31.25, 62.5, 125, 250 <math>\mu</math>s</li> <li>● 记录长度: 最小 451.1 ms, 最大 1 808.5 ms</li> </ul>
记录道数	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 9 道地震信号</li> <li>● 3 道电磁信号</li> </ul>		
记录单元		操作和分析软件技术参数	
采样间隔	31.25, 62.5, 125, 250 $\mu$ s	微震数据处理	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 道数: 1~9</li> <li>● 处理流程:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• 数据长度设置</li> <li>• 带通滤波</li> <li>• 初至拾取</li> <li>• 拾取处理</li> <li>• P、S 波分离</li> <li>• 速度分析</li> <li>• 微震数据定位</li> </ul> </li> </ul>
记录带宽	10 000 Hz, 5 000 Hz		
模数转换	24 位		
记录长度	2 048 样点		
最大输入信号	$\pm 10$ Vpp		
动态范围	120 dB		
微震灵敏度	1 000 mV/g $\pm 5\%$		
频率范围	0.5~15 000.0 Hz		
响应频率	20 kHz		

(c) 系统及传感器性能指标

图 2 微震监测系统

## 2.2 监督设备及其安装概况

为了解 22117 风巷煤柱、煤壁以及顶板受前方掘进的影响,于 2019 年 5 月 23 日在 22117 风巷上帮煤柱以及下帮煤壁处安装高精度声发射微震与电磁耦合一体化监测系统进行监测.监测时共安装主机一台,加速度传感器 9 个以及电磁传感器 2 个,安装时主机位置位于离风巷入口处 556.86 m 左右的煤柱侧,主机正下方是 5<sup>#</sup>和 10<sup>#</sup>传感器,其中 4<sup>#</sup>传感器位于主机前方,与 5<sup>#</sup>(10<sup>#</sup>)传感器距离为 6.44 m,6<sup>#</sup>传感器位于主机后方,与 5<sup>#</sup>(10<sup>#</sup>)传感器距离为 6.54 m,而 1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,7<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>,9<sup>#</sup>以及 11<sup>#</sup>传感器位于煤壁一侧,其中 11<sup>#</sup>传感器与 10<sup>#</sup>(5<sup>#</sup>)传感器位置相对,1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>传感器位于前方,7<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>,9<sup>#</sup>传感器位于后方,其中 1<sup>#</sup>与 2<sup>#</sup>传感器距离为 7.4 m,2<sup>#</sup>与 3<sup>#</sup>传感器距离为 6.04 m,3<sup>#</sup>与 11<sup>#</sup>传感器距离为 14.2 m,11<sup>#</sup>与 7<sup>#</sup>传感器距离为 14.05 m,7<sup>#</sup>与 8<sup>#</sup>传感器距离为 5.4 m,8<sup>#</sup>与 9<sup>#</sup>传感器距离为 4.7 m.传感器空间分布图如 4 所示.

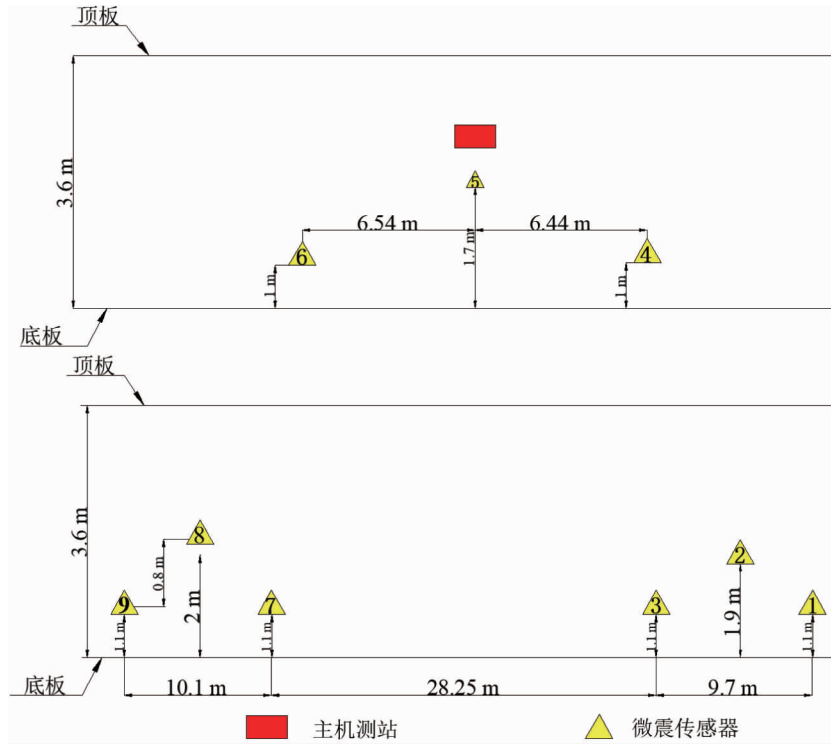


图3 设备安装

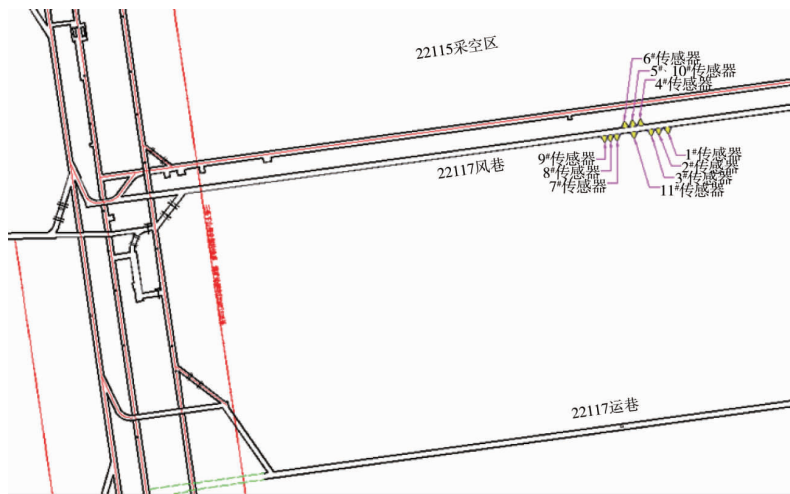


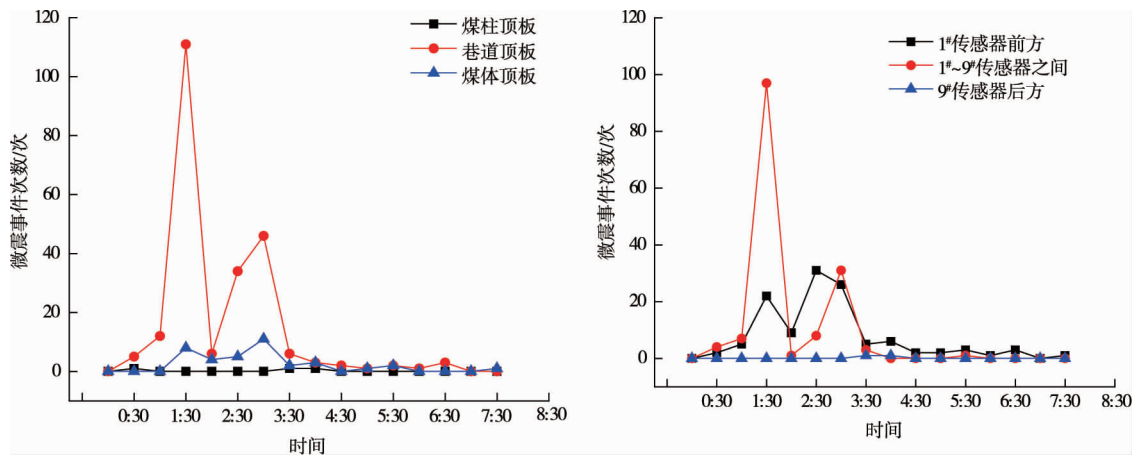
图4 22117风巷传感器空间分布

### 2.3 微震监测数据分析

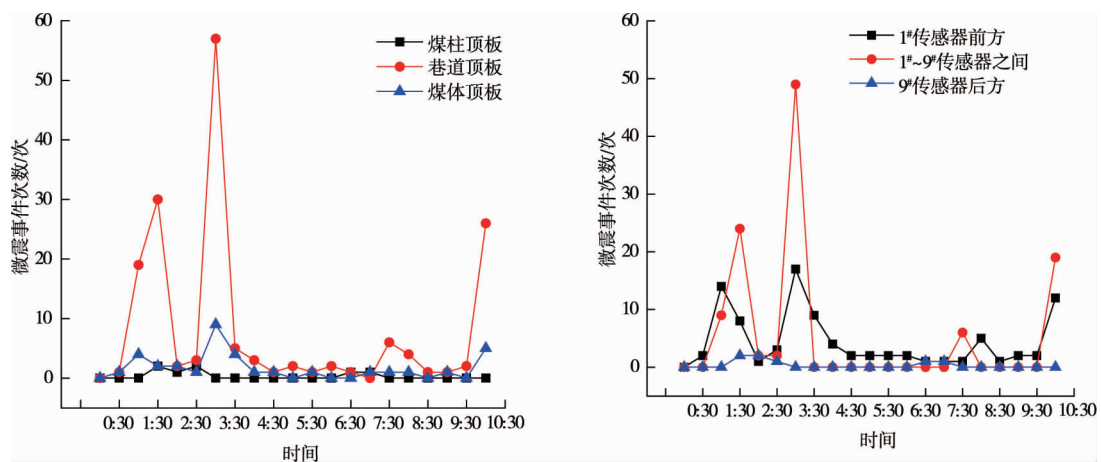
通过微震监测,统计了5月24日—6月17日巷道顶板、煤柱顶板、煤体顶板的微震事件次数以及事件发生的位置,选取具有代表性的日期绘制变化图,如图5~图7所示.其中22117掘进工作面掘进日进度如表1所示.

表1 22117风巷掘进日进度

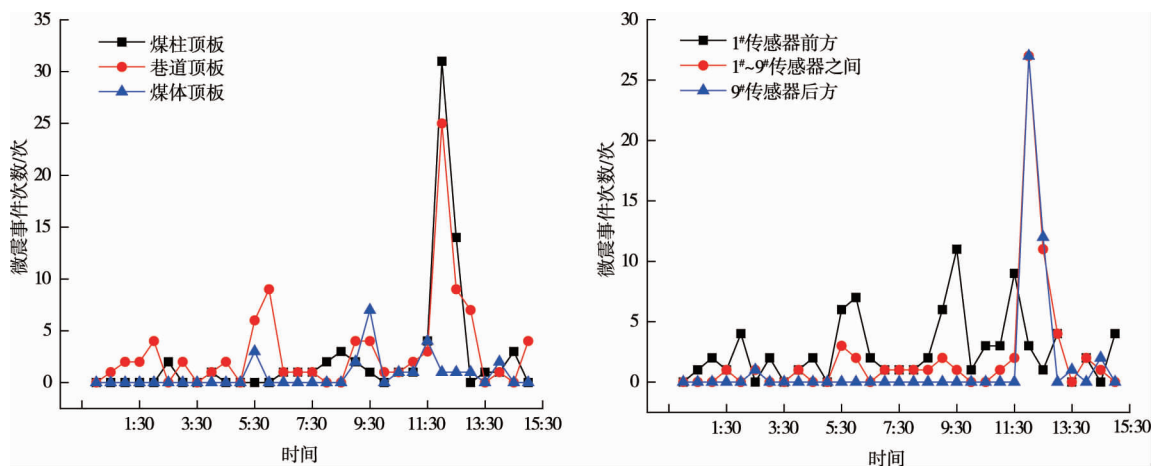
日期	设计进尺/m	累计进尺/m	日进尺/m	日期	设计进尺/m	累计进尺/m	日进尺/m
05-24	1 484	604.5	6.3	06-05	1 484	674.4	3.6
05-26	1 484	607.2	2.7	06-07	1 484	679.8	5.4
05-28	1 484	617.1	3.6	06-08	1 484	685.2	5.4
05-30	1 484	628.7	5.4	06-09	1 484	690.6	5.4
05-31	1 484	634.1	5.4	06-10	1 484	691.4	0.9
06-01	1 484	639.5	5.4	06-11	1 484	694.0	3.6
06-02	1 484	644.9	5.4	06-12	1 484	697.6	3.6
06-03	1 484	646.7	1.8	06-13	1 484	700.3	2.7
06-04	1 484	670.8	6.3	06-17	1 484	740.1	5.4



(a) 5月25日



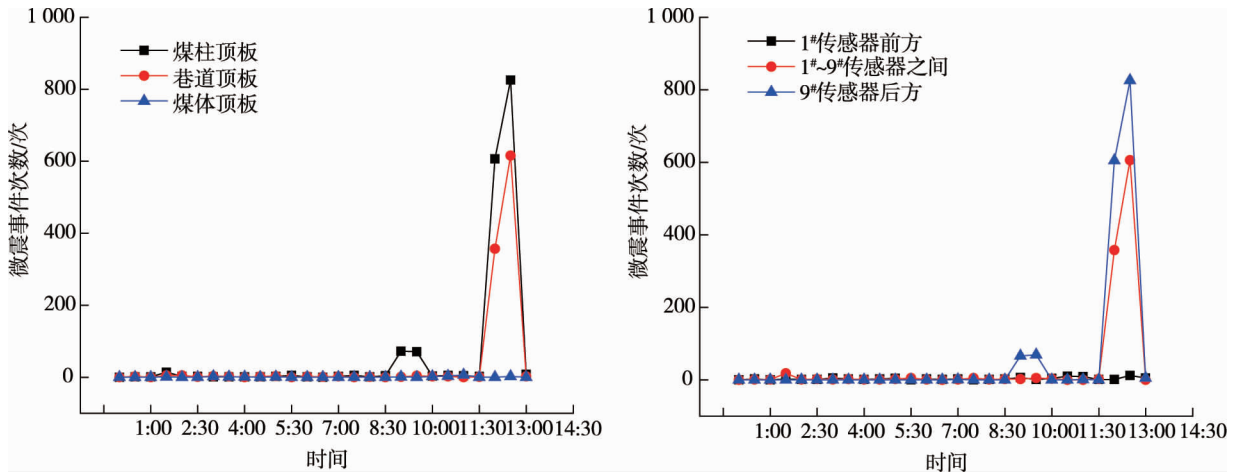
(b) 5月26日



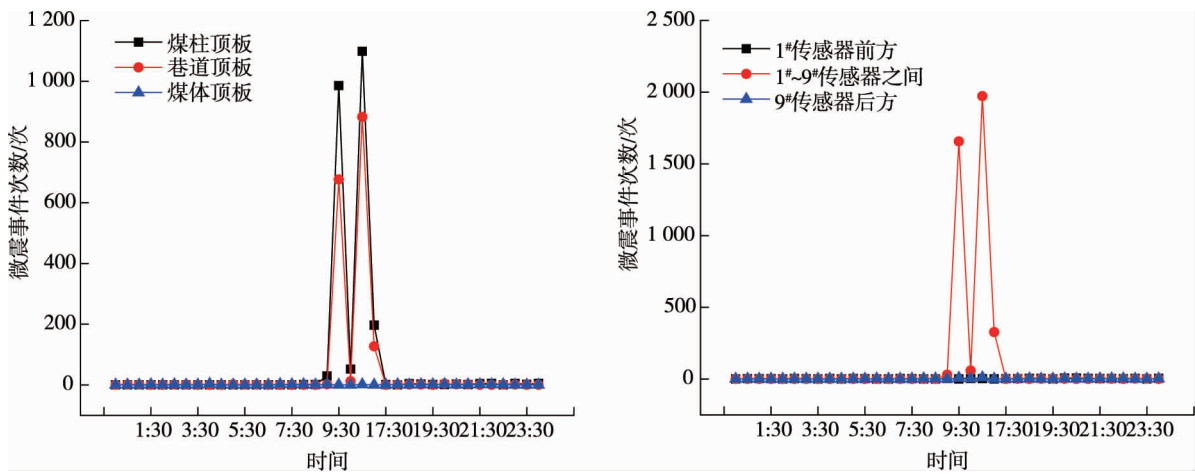
(c) 5月27日

图 5 5月25日—5月27日顶板微震事件统计

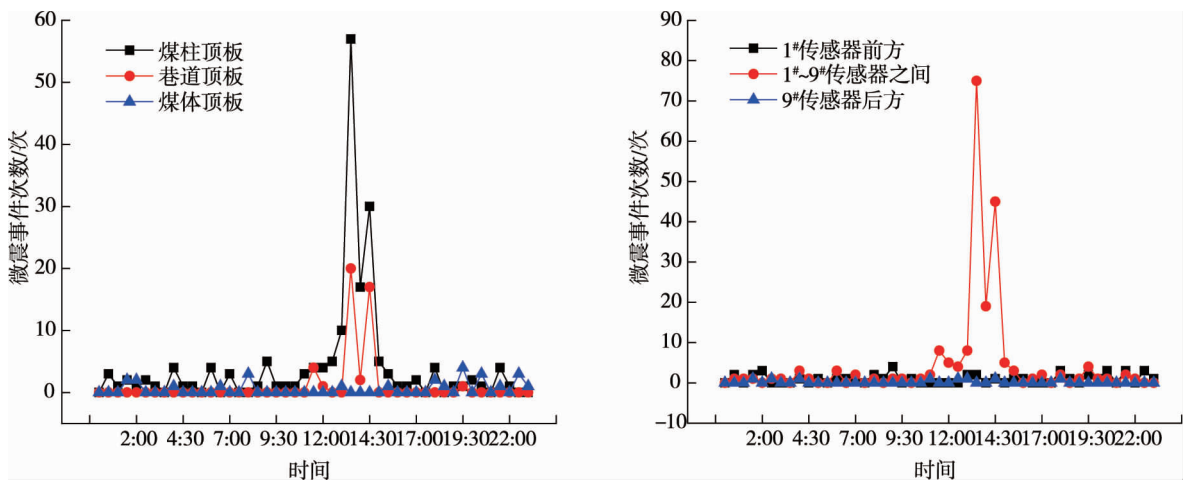
由于微震仪初始安装位置距离掘进头较近,故在掘进影响下,仪器1#~9#传感器范围内巷道顶板微震活动较为强烈.由图5a~图5c可以看出:随着掘进工作的进行,1#~9#传感器范围内顶板微震事件次数逐渐降低,煤柱顶板的微震频次逐渐增加,到5月27日时(此时1#传感器距离掘进头32.6 m),巷道顶板微震事件次数与前几日相比降到最低值,说明掘进对巷道顶板的影响范围为距掘进迎头32.6 m范围内;与此同时,煤柱顶板微震事件次数突然增加且微震强烈位置发生在9#传感器之后的范围内(此时9#传感器距掘进头84.59 m),说明掘进对煤柱及其顶板的影响滞后掘进迎头84.6 m左右.



(a) 5月29日



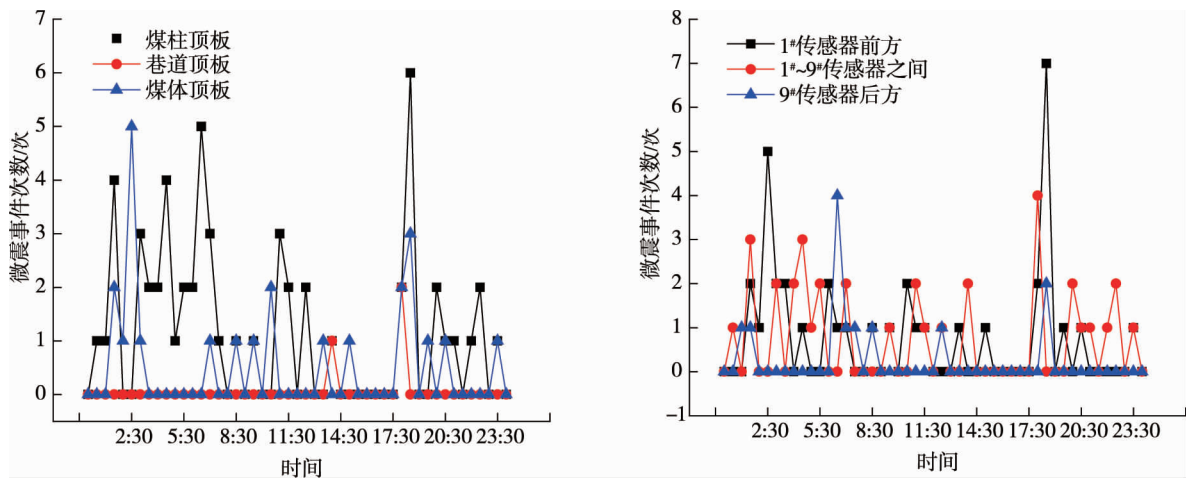
(b) 5月30日



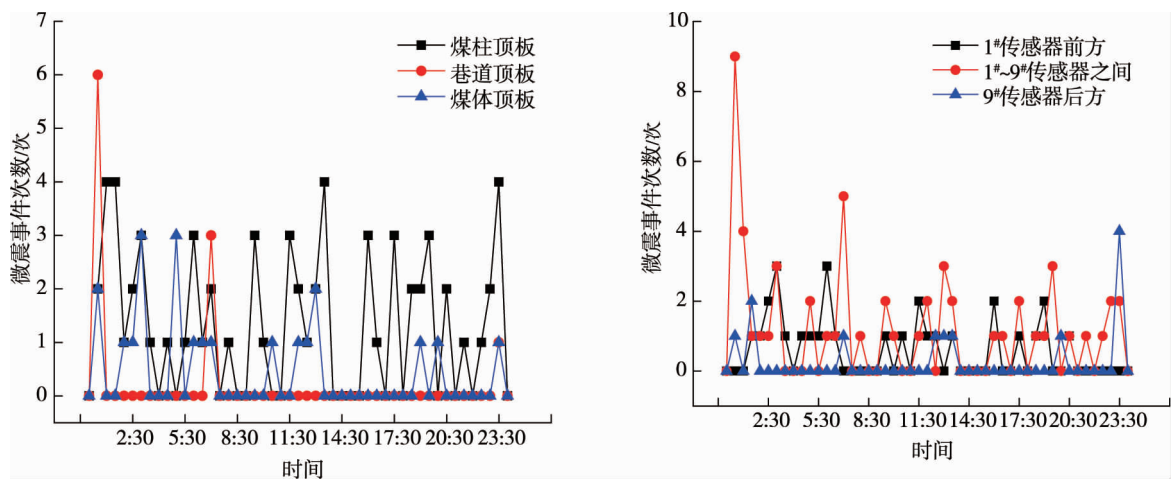
(c) 6月7日

图6 5月29日—6月7日顶板微震事件统计

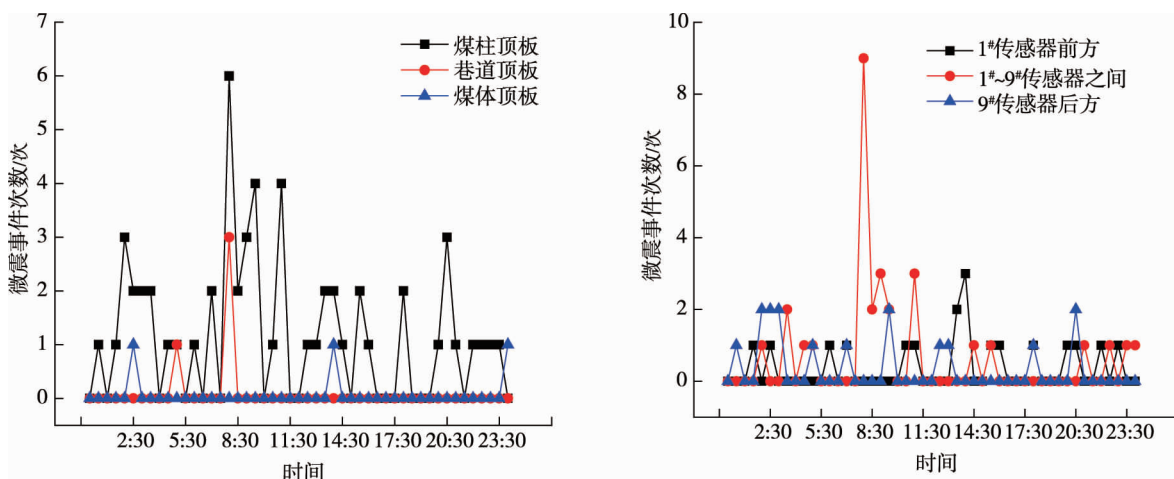
如图6a所示,到5月29日时,微震事件达到1 000次左右,基本还是集中在9#传感器后方,但在5月30日(图6b)时煤柱顶板微震事件次数达到最高,此时微震范围向前移动到了1#与9#传感器之间,与此同时巷道顶板的微震事件次数再次升高,直到6月7日(图6c),此时1#传感器距离掘进头93.3 m,微震事件次数才趋于稳定,在此期间微震事件基本都发生在1#与9#传感器之间,说明随着煤柱顶板岩层回转断裂、滑移,巷道围岩再次诱发较强烈的微震,即表现出巷道顶板和煤柱顶板(包括其下方煤柱)同时出现强烈的微震.



(a) 6月12日



(b) 6月13日



(c) 6月14日

图 7 6月12日—6月14日顶板微震事件统计

由图 7a~图 7c 可知,在 6 月 7 日之后由于巷道的继续掘进,微震仪与掘进头距离逐渐增加,信号逐渐减弱,巷道顶板、煤柱顶板以及煤体顶板微震事件次数整体趋于平稳,但煤柱顶板较巷道顶板及煤体顶板来说,微震事件次数依然较多,在 6 月 12 日之后煤体顶板微震事件次数相对较多,但是相对来说不是太明显,由此可见此时顶板活动不剧烈,对巷道稳定性影响较小。

从整个监测结果来看,掘进对顶板影响表现为由巷道顶板—煤柱顶板(包括其下方煤柱)—煤体顶板(包括其下方煤体)的一个过渡过程,巷道顶板受掘进直接影响的范围为距掘进迎头 32.6 m 范围内;随后,

随着巷道向前掘进,掘进引起围岩应力重新分布并应力集中,以及掘进动力扰动使基本顶下方矸石压密,煤柱上方基本顶结构继续动态弯曲回转、破裂,微震表现较为剧烈,且煤柱顶板(包括其下方煤柱)微震事件发生位置由 9# 传感器后方逐渐前移至 1# 与 9# 传感器之间,说明因应力重新分布再平衡、矸石压密需要一定的时间保证,即掘进动力扰动对后方煤柱顶板破裂的微震具有滞后效应,受影响范围约滞后掘进头 93.3 m 左右.

### 3 巷道掘进期数值模拟

#### 3.1 数值计算模型的建立

利用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟分析软件建立 22117 工作面的三维数值计算模型(图 8),为尽可能精确模拟,对煤层采用应变硬化/软化模型,其他岩层则采用比较常见的 Mohr-Coulomb 模型,模型整体尺寸为(X)150 m×(Y)30 m×(Z)67 m 共划分为 201 000 个六面体单元,21 2908 个节点.采空区为 50 m,煤柱宽度为 15 m,巷道宽度取 5 m,高度取 4 m.模型设置左右边界及底部边界速度为 0,岩层上部按不同埋深施加应力,表 2 为根据矿山资料得出的煤岩体力学参数.

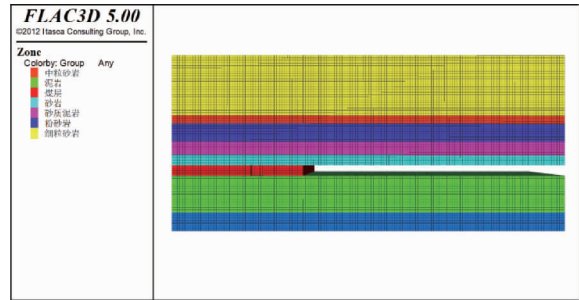


图 8 数值模型

表 2 煤岩体力学参数

岩层	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
细粒砂岩	2 700	20.97	1.27	9.30	34
泥岩	2 240	5.62	4.37	2.36	36
煤层	1 400	3.80	4.21	2.21	28
砂质泥岩	2 600	8.85	5.93	2.71	32
粉砂岩	2 650	14.60	6.18	8.99	34
中粒砂岩	2 340	14.22	5.15	4.67	37

#### 3.2 FLAC<sup>3D</sup> 模拟结果分析

根据 22117 风巷的掘进情况对巷道进行分步掘进,导出每一步掘进后的塑性区分布图并对其进行分析<sup>[16]</sup>,图 9 为各次掘进过程中模型塑性区分布云图.

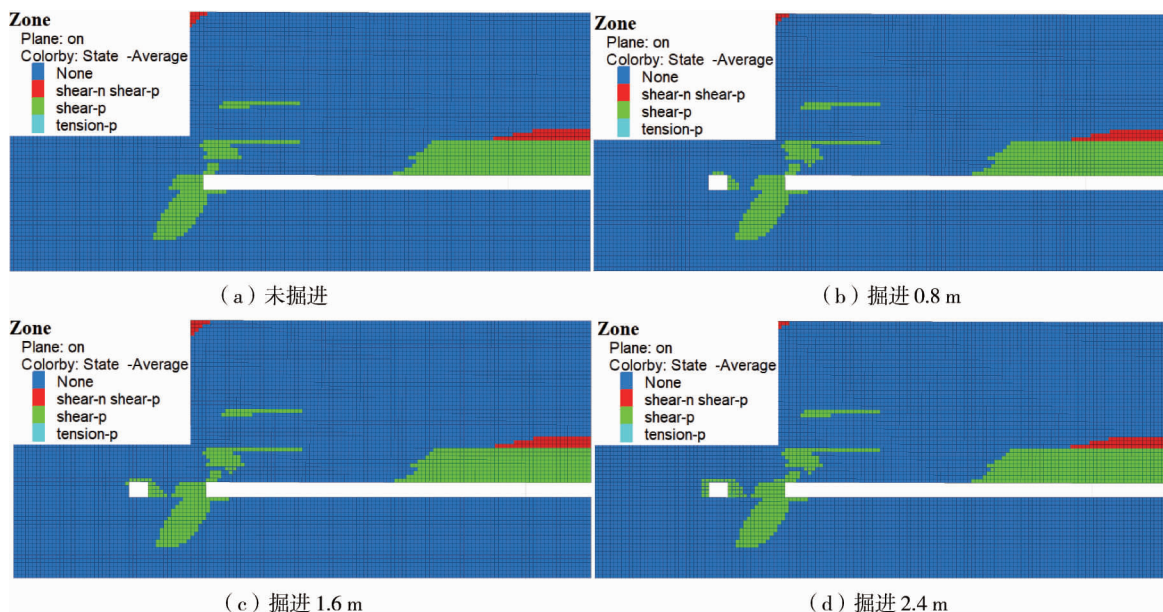


图 9 掘进过程中塑性区分布



由图9可以看出:在巷道未掘进时,靠近采空区侧的煤柱顶板及其下方煤柱出现塑性区,但此时塑性区的范围较小;巷道在掘进0.8 m后,巷道顶板开始发生塑性破坏,靠近巷道侧与采空区侧的煤柱及顶板也出现了塑性区;在巷道掘进1.6 m时可以发现,随着掘进的继续进行,煤柱及其上方顶板塑性区继续发育,且出现较大面积的塑性区,煤体侧则开始发生塑性破坏;巷道掘进2.4 m后,煤柱侧的塑性区发展整体趋于稳定,但煤体侧塑性区的发展相对较大。

从数值模拟结果来看,掘进对顶板的影响是一个逐渐发展的过渡过程,该过程大致为巷道顶板—煤柱顶板(包括其下方煤柱)—煤体顶板(包括其下方煤体),根据本次数值模拟结果可以进一步验证微震监测数据分析的正确性。

## 4 结论

1) 掘进对顶板影响规律为由巷道顶板—煤柱顶板(包括其下方煤柱)—煤体顶板(包括其下方煤体)逐渐发展的一个过渡过程。

2) 掘进对巷道顶板的影响范围为距掘进迎头32.6 m范围内,对煤柱及其顶板的影响滞后掘进迎头84.6 m左右。

3) 由于应力重新分布再平衡和矸石的压密需要一定的时间,所以掘进动力扰动对后方煤柱顶板破裂的微震具有滞后效应,受影响范围约滞后掘进迎头93.3 m左右。

## 参考文献:

- [1] 李楠,王恩元,Ge M C.微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J].煤炭学报,2017,42(s1):83-96.
- [2] Ge M C. Efficient mine microseismic monitoring[J]. International Journal of Coal Geology,2005,64(1/2):44-56.
- [3] 王雷,王琦,李术才,等.软岩巷道掘进期间微震活动特征及稳定性分析[J].采矿与安全工程学报,2018,35(1):10-18.
- [4] 王涛,李根,姜涛,等.深部厚煤层巷道掘进微震预警参数及临界指标研究[J].煤炭工程,2020,52(3):53-56.
- [5] 汤国水,朱志洁,韩永亮,等.基于微震监测的双系煤层开采覆岩运动与矿压显现关系[J].煤炭学报,2017,42(1):212-218.
- [6] 周春华,李云安,尹健民,等.基于微震与电磁辐射联合监测的多元岩爆预警方法研究[J].岩土工程学报,2020,42(3):457-466.
- [7] 孔令海.煤矿采场围岩微震事件与支承压力分布关系[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):525-531.
- [8] 崔峰,杨彦斌,来兴平,等.基于微震监测关键层破断诱发冲击地压的物理相似材料模拟实验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):803-814.
- [9] 程关文,王悦,马天辉,等.煤矿顶板岩体微震分布规律研究及其在顶板分带中的应用——以董家河煤矿微震监测为例[J].岩石力学与工程学报,2017,36(s2):4036-4046.
- [10] 陆菜平,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.
- [11] 王恩元,何学秋,李忠辉,等.煤岩电磁辐射技术及其应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [12] 朱权洁,姜福兴,王存文,等.微震波自动拾取与多通道联合定位优化[J].煤炭学报,2013,38(3):397-403.
- [13] 潘一山,赵扬锋,官福海,等.矿震监测定位系统的研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2007(5):1002-1011.
- [14] 陆菜平,窦林名,王耀峰,等.坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J].地球物理学报,2010,53(2):450-456.
- [15] 窦林名,陆菜平,牟宗龙,等.煤岩体的强度弱化减冲理论[J].河南理工大学学报(自然科学版),2005,24(3):169-175.
- [16] 王方田,梁宁宇,李岗,等.复杂应力环境煤柱坝体损伤破坏规律研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1145-1152.