

谭毅,张少普,何满潮,等. 巨厚砂岩下采动覆岩裂隙场及微震时空演化规律研究[J]. 矿业科学学报,2025,10(1):70-85. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024921

TAN Yi,ZHANG Shaopu,HE Manchao,et al. Fissure field and microseismic spatiotemporal evolution patterns in mining overburden under giant thick sandstone[J]. Journal of Mining Science and Technology,2025,10(1):70-85. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024921

巨厚砂岩下采动覆岩裂隙场及微震 时空演化规律研究

谭毅^{1,2,3},张少普¹,何满潮³,郭文兵^{1,2},丁国利⁴,王宇¹,程浩¹,李辉¹

1. 河南理工大学能源科学与工程学院,河南焦作 454000;

2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心,河南焦作 454000;

3. 河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 210098;

4. 中天合创能源有限责任公司,内蒙古鄂尔多斯 017316

摘要:采动覆岩裂隙演化高度及分布形态是顶板水害防治重要参数之一。以内蒙古某矿3105工作面为工程背景,基于数值模拟、分形几何理论及微震事件三维空间分析明晰采动覆岩裂隙场及微震时空演化规律。结果如下:①采动覆岩裂隙场呈现“裂隙产生-发育演化-局部压实-周期扩展-大部压实”动态演化规律,采动裂隙网络场发育、扩展、穿透演化分形特征;②阐明了采动覆岩失稳破断、运移与微震事件局部“高频次-大能量”集中区时空演化规律,“高频次-大能量”与“低频次-小能量”集中区呈现周期分布,同工作面周期来压特征相吻合,微震事件集中区发生位置普遍超前工作面80~120 m;③数值模拟采动覆岩裂隙演化高度与微震监测所得结果基本一致;④倾向高位岩层微震事件“高频次-大能量”与“低频次-小能量”集中区呈现两端高、中间低“类马鞍形”分布,走向高位岩层微震事件能量集中区呈现“椭球状”分布,数量集中区呈现“条带状”分布。

关键词:微震监测;数值模拟;采动覆岩;裂隙场演化;分形特征

中图分类号:TD 325

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2025)01-0070-16

Fissure field and microseismic spatiotemporal evolution patterns in mining overburden under giant thick sandstone

TAN Yi^{1,2,3},ZHANG Shaopu¹,HE Manchao³,GUO Wenbing^{1,2},DING Guoli⁴,
WANG Yu¹,CHENG Hao¹,LI Hui¹

1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China;

2. Henan Provincial Collaborative Innovation Center for Coal Safety Production, Jiaozuo Henan 454000, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Hehai University, Nanjing Jiangsu 210098, China;

4. Zhongtian Hechuang Energy Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia 017316, China

Abstract:The evolution height and distribution pattern of fractures in overburden strata induced by

收稿日期:2024-08-03 修回日期:2024-11-21

基金项目:国家自然科学基金(52322403,52174108,51974105);河南省优秀青年科学基金(222300420045)

作者简介:谭毅(1985—),男,四川遂宁人,博士,教授,主要从事矿山压力与岩层控制、采动损害与灾害防控、“三下”采煤方面的研究工作。E-mail:517237667@qq.com

mining are among the crucial parameters for preventing and controlling roof water disasters. Taking the 3105 working face of a specific mine in Inner Mongolia as the engineering background, and utilizing numerical simulation, fractal geometry theory, and three-dimensional spatial analysis of microseismic events, we aim to clarify the spatiotemporal evolution laws of the mining-induced overburden fracture field and microseismic events. The results are as follows: ① Revealed the dynamic evolution law of “fracture generation, development, evolution, local compaction, periodic expansion, and large-scale compaction” in the mining overburden fracture field, as well as the fractal characteristics of the development, expansion, and penetration evolution of the mining fracture network field. ② This paper elucidates the spatiotemporal evolution law of the local “High frequency - high energy” concentration zone associated with mining-induced overburden instability, fracture, migration, and microseismic events. The “High frequency-high energy” and “Low frequency-small energy” concentration zones exhibit a periodic distribution, which aligns with the periodic weight-bearing characteristics of the working face. Typically, the location of microseismic event concentration zones precedes the working face by 80-120 m. ③ The evolution of the height of mining-induced fractures in the overburden rock, as determined by numerical simulation and microseismic monitoring, is basically consistent. ④ The concentration areas of “High frequency-high energy” and “Low frequency-small energy” microseismic events tend to show a “Saddle like” distribution with high ends and low middle, while the energy concentration areas of high-level microseismic events tend to show an “Ellipsoidal” distribution, and the quantity concentration areas show a “Strip like” distribution.

Key words: microseismic monitoring; numerical simulation; mining the overlying rock; fracture field evolution; fractal feature

随着我国中东部浅层煤炭资源日益枯竭,煤炭生产不断向西部及深部转移。深部高强度开采与复杂地质条件耦合作用下煤矿灾害频发,严重制约了煤矿安全高效生产^[1-2]。采动覆岩裂隙是地表水或地下含水层在煤层和岩层中流动的通道。掌握裂隙场的演化规律及分布特征,有助于分析矿井涌水的来源和途径,进而采取合理的防治水措施。

煤岩体采动覆岩裂隙场存在明显的分形特征^[3-4],故基于分形理论可以描述煤岩体采动裂隙网络场动态时空演化特征。有学者^[5-7]基于分形维数理论对采动岩体裂隙网络场、覆岩移动、断层数量等做出了定量表征,揭示了该条件下采动岩体裂隙演化规律;谢和平等^[8]基于分形几何理论研究了岩体裂隙时空演化过程中裂隙的分形规律;李树刚等^[9]基于相似模拟及分形几何理论对重复采动覆岩裂隙网络演化分形特征进行了研究,得出了上层开采与下层开采分形维数不同的演化趋势;王志国^[10]通过物理模拟和数值模拟等方法,基于分形几何、逾渗与重正化理论,对深部煤层采动覆岩裂隙演化规律及其移动破坏规律展开了研究;赵毅

鑫等^[11]基于相似模拟实验、图像处理、分形理论和数值模拟,对 8.8 m 超大采高工作面采动覆岩裂隙演化及能量耗散规律展开研究,并得出了充分采动后依据裂隙发育形态采场覆岩可划分为 6 个区域;李全生等^[12]通过理论分析与数值模拟从覆岩裂隙、底板裂隙与地表裂缝 3 方面介绍了裂隙、裂缝演化规律及分布特征;李宏艳等^[13]基于相似模拟与数理统计对采动影响区覆岩裂隙时空演化规律展开研究,基于分形理论定量将采动影响覆岩裂隙场划分为 4 个区域;赵洪宝等^[14]基于数值模拟并通过分形几何理论分析了不同采高条件下工作面覆岩近场裂隙演化规律,得到钻孔瓦斯抽采最优工作面采高。

姜福兴等^[15-17]基于微地震系统监测技术研究得出采动围岩的破裂形态,并基于微地震监测数据与矿压规律研究,揭示了采动覆岩空间裂隙场与采动应力场的相关关系,极大地推广了微震监测技术在煤矿领域的应用;程关文^[18]基于微震监测系统对底板破坏程度和突水通道的“动态”破裂失稳过程及活化规律展开研究,建立了较为准确的煤矿底

板突水危险性预测预报方法;王悦等^[19]通过微震监测系统、理论计算与钻孔声波测试对工作面底板破坏深度进行综合研究,验证了微震监测系统对底板岩石破裂位置定位的准确性;靳德武等^[20]采用微震监测技术对底板采动裂隙扩展及导水通道识别展开研究,认为微震能量密度及连通度可表征底板岩层采动裂隙的导通性;韩刚等^[21]基于现场监测、统计分析对采动覆岩空间破裂分布形态及采动应力场分布规律进行了深入分析,得到采动覆岩破裂剧烈区的具体层位及超前工作面的发生距离;肖鹏等^[22]采用物理模拟试验、微震监测仪器及压力传感器等对回采工作面微震事件的分布特征及其与底板压力变化规律进行综合分析,得出了裂隙密度与微震事件能量频次变化均表现为先增大后减小的趋势。

前述研究成果主要是针对采动覆岩裂隙演化规律或微震监测覆岩破坏方面,但鲜有对巨厚砂岩下深埋厚煤层采动覆岩动态演化裂隙网络场及微震事件动态时空演化规律进行研究。基于此,通过数值模拟并引入分形几何理论,对采动覆岩裂隙网络场动态时空演化分形特征定量表征,并基于微震监测实测分析揭示了采动覆岩裂隙场演化过程中微震事件“低频次-小能量”“高频次-大能量”集中区时空演化及分布规律。

1 工程概况及难点分析

1.1 工程概况

3105工作面位于内蒙古某煤矿井田西部边界,现开采3-1煤层,其东侧为已开采的3103工作面,3105工作面走向长为3 890 m,倾向长为312 m。工作面平均埋深724 m,煤层平均厚度5 m,煤层平均倾角为1.5°,为近水平煤层,工作面上方存在超过400 m的砂岩层,主要为细粒砂岩、中粒砂岩,采用综合机械化后退式采煤方法,自然垮落法控制顶板。顶板岩性以砂质泥岩为主,其次为细粒砂岩、粉砂岩,底板岩性多为砂质泥岩(图1)。

1.2 难点分析

3105工作面属于典型的巨厚砂岩下深埋厚煤层超长工作面开采,普遍具有高地应力、强扰动性、采动裂隙相对发育及强矿压显现等特征,易导致工作面采动覆岩裂隙网络场呈现非匀速演化、煤壁片帮、巷道破坏等现象。

层位	岩层岩性	岩层图例	厚度/m	埋深/m	岩层特征
1	风积沙		32	32	层理较多
2	中粒砂岩		43	75	有明显层理
3	细粒砂岩		29	104	层理不明显
4	中粒砂岩		16	120	有明显层理
5	细粒砂岩		30	150	层理不明显
6	中粒砂岩		38	188	层理不明显
7	细粒砂岩		26	214	有明显层理
8	中粒砂岩		43	257	层理不明显
9	细粒砂岩		46	303	层理不明显
10	中粒砂岩		24	327	有明显层理
11	细粒砂岩		70	397	层理不明显
12	砂质泥岩		61	458	有明显层理
13	粉砂岩		17	475	有明显层理
14	泥岩		31	506	层理较多
15	粉砂岩		22	528	层理不明显
16	砂质泥岩		30	558	有明显层理
17	泥岩		43	601	层理较多
18	砂质泥岩		13	614	有明显层理
19	粗粒砂岩		17	631	有明显层理
20	砂质泥岩		31	662	有明显层理
21	细粒砂岩		16	678	层理不明显
22	砂质泥岩		16	694	有明显层理
23	2-2中煤		7	701	层理较多
24	砂质泥岩		6	707	有明显层理
25	粉砂岩		7	714	层理较多
26	砂质泥岩		5	719	有明显层理
27	3-1煤		5	724	层理较多
28	砂质泥岩		26	750	有明显层理

图1 覆岩钻孔柱状图

Fig. 1 Columnar diagram of overburden drill holes

2 采动覆岩裂隙场时空演化特征研究

采动覆岩裂隙场具有范围大、非透明性等特征,受目前科学探测设备的限制,无法透明化、直观地研究巨厚砂岩下采动覆岩运移、破断形态、裂隙场时空演化规律。为此,基于模拟软件3DEC对工作面回采过程中采动裂隙场时空演化特征展开研究,并通过监测开采过程中大量微震事件,反演裂隙的发展和演化过程,将数值模拟结果与现场监测数据进行对比和验证,提高对采动裂隙场时空演化规律研究的准确性和可靠性。

2.1 基于数值模拟下采动覆岩裂隙场动态时空演化特征

2.1.1 数值模型构建

基于工作面覆岩钻孔柱状图构建数值模型。为提高数值软件运算速度,模型宽度设置为1 m,模型尺寸为1 000 m×1 m×411 m($X \times Y \times Z$)(图2)。煤岩体本构关系采用莫尔-库仑准则模型。模型单元尺寸参考工作面上覆岩层厚度及性质进行合理分层与合并处理。表1为煤岩体力学与结构面参数。

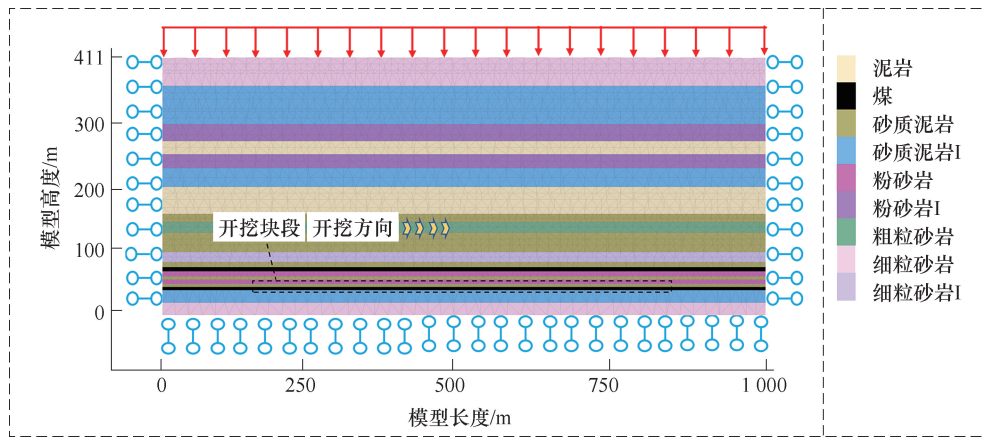


图 2 数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation model

表 1 煤岩体力学与结构面参数

Table 1 Mechanical and structural surface parameters of the coal rock body

岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa	节理法向刚度/ ($\text{GN} \cdot \text{m}^{-1}$)	节理切向刚度/ ($\text{GN} \cdot \text{m}^{-1}$)
细粒砂岩 I	2 580	10.3	7.4	2.8	37	3.3	1.75	1.75
中粒砂岩	2 600	15.6	10.5	3.3	41	4.1	2.65	2.65
细粒砂岩	2 580	11.2	7.1	3.1	38	3.4	1.85	1.85
砂质泥岩 I	2 480	4.3	2.4	1.6	31	2.2	1.25	1.25
粉砂岩 I	2 480	8.5	5.2	2.2	33	2.6	1.42	1.42
泥岩	2 450	3.5	2.2	1.2	26	1.6	0.95	0.95
粗粒砂岩	2 540	7.2	4.3	1.9	35	2.5	1.15	1.15
煤	1 400	2.1	1.2	1.0	22	0.9	0.42	0.42
粉砂岩	2 480	7.3	4.3	1.5	35	2.3	1.35	1.35
砂质泥岩	2 480	4.8	2.6	1.6	31	1.9	1.25	1.25

对模型顶部边界整体施加补偿载荷 9.0 MPa 垂直应力来代替未模拟部分覆岩自重应力,模型左右、前后及下边界设置为固定边界,上边界设置为自由边界,考虑到边界效应,在工作面左右留设保护煤柱。模拟开挖总长度 680 m,每次开挖步距为 40 m,分 17 步开挖完毕。

2.1.2 数值模拟结果分析

图 3 为工作面覆岩运移演化规律。在回采 40 m 期间,直接顶发生初次垮落,垮落后以破碎岩体充填至采空区,顶板上方覆岩脱离母体局部出现离层现象,裂隙最大高度为 28.5 m;在回采 80 m 期间,覆岩裂隙场在采场前方及上方迅速发育,直接顶岩层充分垮落并伴随着部分基本顶出现离层现象,裂隙最大高度为 50.5 m;在回采 160 m 期间,上覆坚硬岩层出现破断,破断后的岩块发生回转失稳压向采空区,局部以“悬臂梁”结

构破断,采空区垮落岩体逐渐压实,顶板覆岩裂隙高度与采空区以较大范围竖向破断裂隙相贯通,覆岩裂隙场不断发育、扩展及穿透演化,出现较多离层裂隙,覆岩破坏形态呈现“类梯形”分布,裂隙最大高度为 112.5 m;在回采 280 m 期间,工作面走向两侧竖向破断裂隙场继续贯通,局部破坏岩体呈现“砌体梁”结构形式,采空区垮落岩体进一步压实,裂隙最大高度为 115.5 m;在回采 400 m 期间,覆岩垮落呈现周期性演化,破坏裂隙高度增长缓慢,主要为横向裂隙发育、扩展、穿透演化,裂隙发育与压实数量总体处于动态稳定阶段,裂隙最大高度为 117.5 m;在回采 640 m 期间,走向两侧竖向破断裂隙场呈现贯通态势,采空区上方采动裂隙大部压实,离层裂隙在自重作用下大部处于压实闭合状态,裂隙高度最大为 118 m。

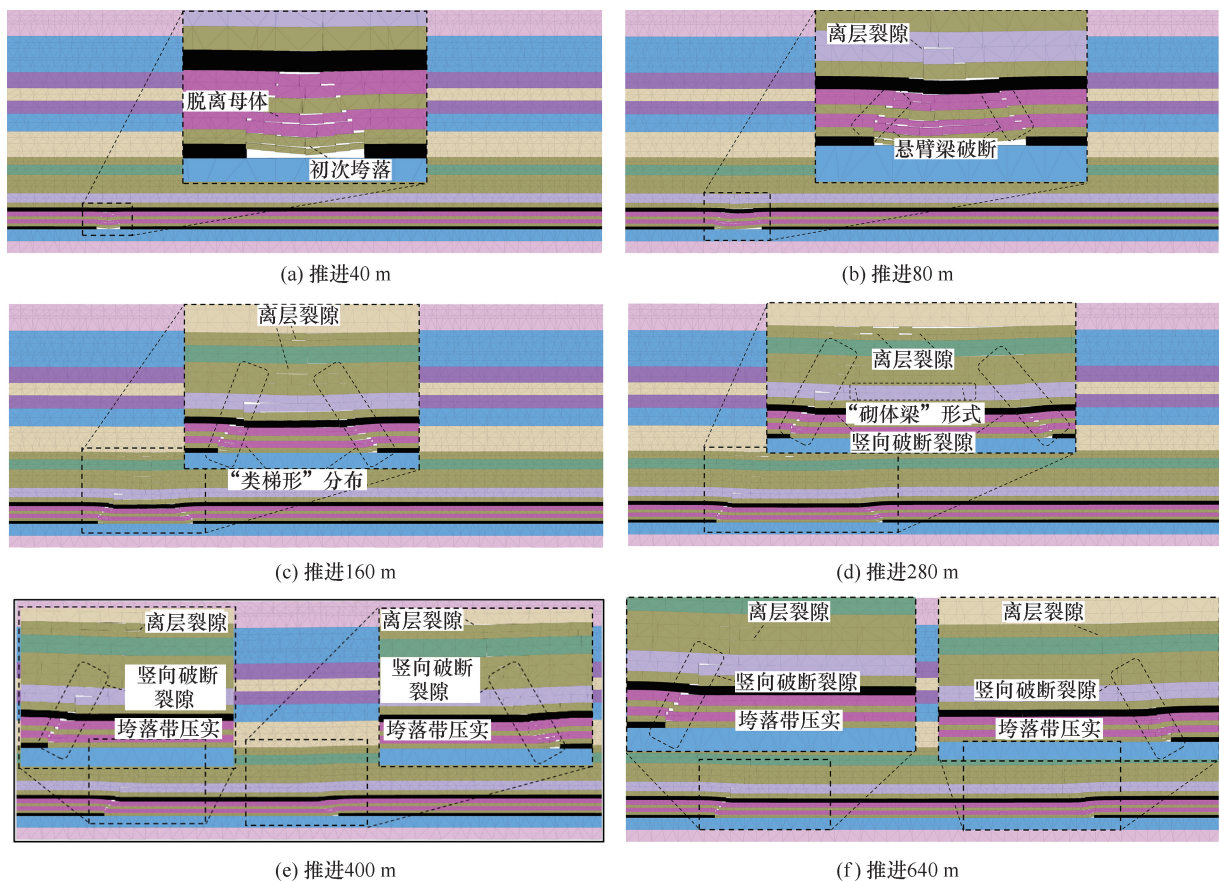


图3 工作面覆岩运移演化规律

Fig. 3 Evolution patterns of overburden transportation in working face

2.2 采动覆岩裂隙分形演化特征

煤层采后采动覆岩裂隙动态演化普遍具有复杂性、随机性等特征。基于计盒维数法计算覆岩裂隙网络的分形维数,可以精准描述采动覆岩裂隙时空演化进程中裂隙场的分形特征,对研究采动岩体裂隙发育、扩展、穿透演化规律具有重要意义。基于此,引入分形几何理论对采动覆岩裂隙动态时空演化分布形态及裂隙场进行研究。分形维数理论计算公式:

$$D = \lim_{N \rightarrow 0} \frac{\lg M}{-\lg N} \quad (1)$$

式中, D 为分形维数; M 为全部裂隙网络的方格数量; N 为覆盖裂隙网络图形的方格边长。

2.2.1 不同推进度采动覆岩裂隙分形特征分析

基于离散元 3DEC 数值模拟结果与 MATLAB 软件,研究采动覆岩裂隙时空与分形维数演化特征。图 4 为分形维数计算流程。

选取具有典型采动覆岩裂隙网络场形态特征图片进行二值化处理及分形维数计算。图 5 为采动覆岩裂隙二值图与分维值图。工作面不同推进距离采动覆岩裂隙分形数维相关系数均大于

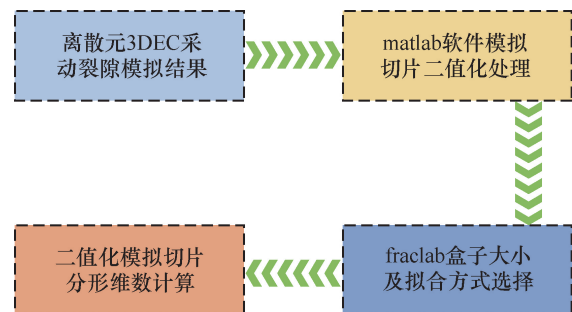


图4 分形维数计算流程

Fig. 4 Procedure for fractal dimension calculation process

99%,最大误差为6%,可知采动覆岩裂隙场动态时空演化特征具有较强规律的分形特征^[23]。

基于裂隙场演化二值图可得:工作面采动覆岩裂隙网络场主要以旧采动裂隙的逐渐压实及新采动裂隙不断产生的动态演化为主。采动覆岩裂隙场随工作面回采的推进基本呈现非匀速扩展、穿透演化态势。在回采40 m期间,大部直接顶脱离母体发生初次垮落,采动裂隙迅速发育,覆岩裂隙分形维数为1.108;在回采80~160 m期间,因剪切裂隙发育在工作面两端出现明显采动裂隙,随开采范

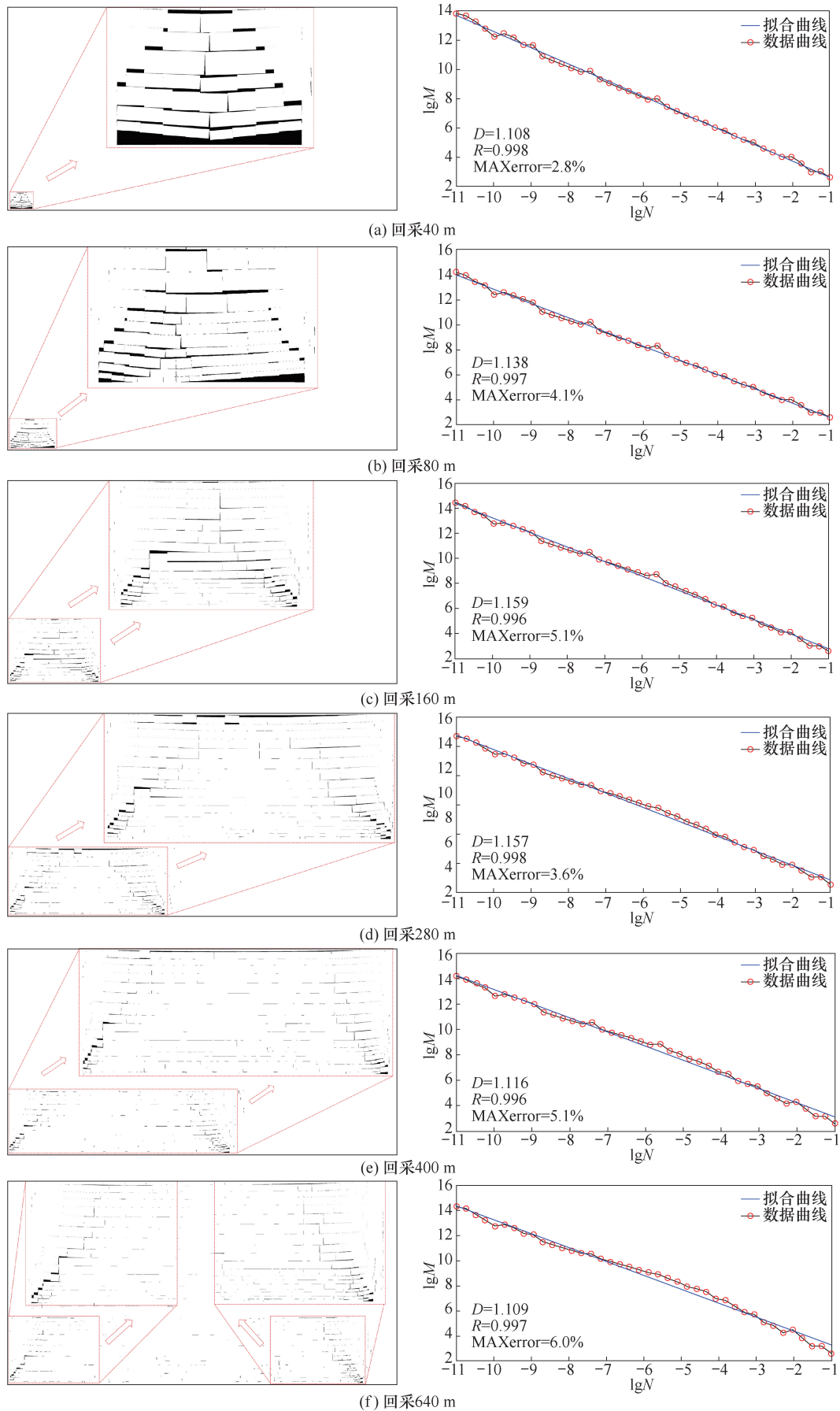


图 5 采动覆岩裂隙二值图与分维值图

Fig. 5 Bivariate and subdimensional plot of fissure in mining overburden

围增大裂隙分形维数由 1.138 增至 1.159;在回采 280 m 期间,采动裂隙场演化自下而上逐渐扩展、穿透演化,走向两侧竖向破断裂隙呈现贯通形态,裂隙分形维数为 1.157;在回采 400 m 期间,采动覆岩裂隙发育形态呈现周期性演化态势,采动覆岩裂隙动态时空演化特征与工作面回采距离存在同步协调性及动态时空耦合破坏特征,整体裂隙压实趋势高于裂隙发育趋势,覆岩裂隙分形维数降至 1.116;在回采 640 m 期间,采动覆岩新裂隙产生、演化与旧裂隙压实、闭合基本趋于同一化。

2.2.2 子研究区分形维数分析

为进一步研究采动覆岩裂隙动态时空演化特征,对采动覆岩裂隙网络场典型时空演化阶段进行细致分区,将局部数值模拟整体研究区域细化为

45×30(X×Z)共 1 350 个子研究区域,运用计盒维数计算原理及 MATLAB 数值软件对各子研究区域进行分形维数计算。

图 6 为采动覆岩裂隙场分形维数三维映射关系。工作面回采过程中采动覆岩裂隙场时空演化呈现“裂隙产生-发育演化-局部压实-周期扩展-大部压实”特征。采动覆岩裂隙在采动应力、覆岩力学参数、原生裂隙及超前采动微裂隙等影响下,呈现相对规律性的发育、扩展、穿透演化态势,随工作面推进距离增大,采动影响岩层范围增大,采动覆岩裂隙范围不断扩大,此过程横向离层裂隙与竖向破断裂隙逐渐贯通、穿透,形成复杂的采动覆岩裂隙网络场。采动覆岩裂隙网络场发育演化是导致层间失稳与层面断裂破坏的主因之一。采动裂

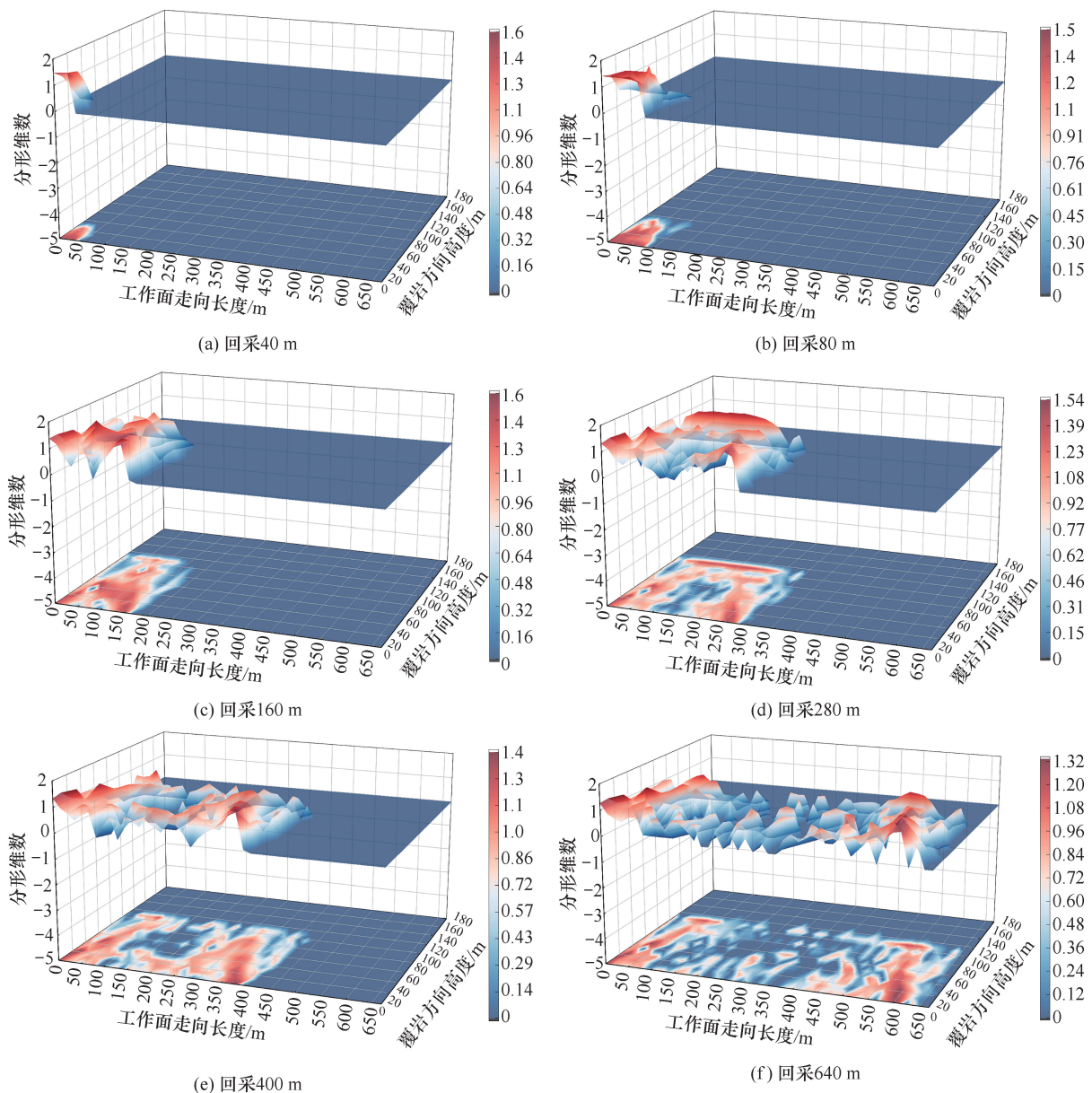


图 6 采动覆岩裂隙场分形维数三维映射关系

Fig. 6 Three-dimensional mapping relations for fractal dimensions of fissure fields in mining overburden

隙发育演化在空间上呈现自下而上、由表及里扩展、穿透演化,在时间上呈自短而长态势^[24],且采空区上方采动覆岩裂隙大部压实,覆岩周期破断处采动裂隙发育、扩展、穿透演化具有更强的分形特征。

依据裂隙场发育分形维数大小及分布形态,将

不同推进度子研究区域划分为垮落裂隙区、裂隙压实区、离层裂隙区、竖向破断裂隙 I 区、竖向破断裂隙 II 区(图 7)。竖向破断裂隙 I(II)区为优势导水(瓦斯运移)通道,为重点防治区域,采动覆岩呈现周期性破断、运移变形破坏。

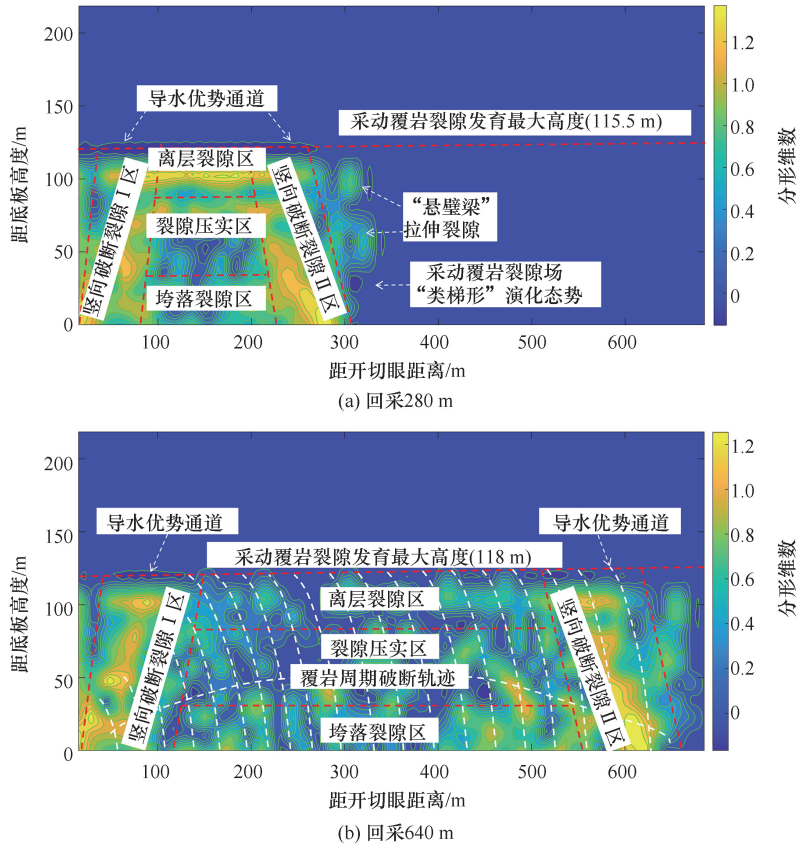


图 7 裂隙场发育演化形态区域网格划分

Fig. 7 Regional gridding of fracture field development and evolutionary patterns

图 8 为采动覆岩裂隙发育高度演化特征。自工作面开切眼起,随推进距离逐渐增大,顶板上方覆岩不断弯曲下沉,采动覆岩原生裂隙及超前采动微裂隙逐渐向上方、前方发育、扩展、穿透演化。数值模拟所得采动覆岩裂隙演化高度与微震监测所

得覆岩破坏高度基本一致,当推进度为 480 m 时,基本达到采动覆岩裂隙发育最高点,此后采动破坏仅发生在横向方向。

3 微震监测系统构建与分析

3.1 微震监测系统

3.1.1 微震监测原理

煤层开采顶板采动覆岩断裂、运移、裂隙产生扩展、穿透演化可以通过微震监测系统区域监测^[25]。ARAMIS M/E 微震监测系统可以实现对采掘区域范围的微震事件进行实时监测,并进行记录、震源定位及微震活动信号能量计算。当岩石损伤、破裂产生的微震活动信号触发了附近传感器,即可被定位并计算微震能量大小,揭示矿区微震事件活动周期规律、能量强弱及微震事件分布规律,进而研究采动覆岩裂隙发育高度及分布形态,同时识别潜在的矿山动力灾害初始活动规律,实现煤矿

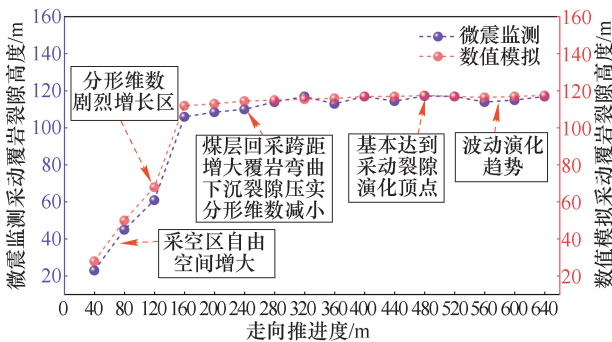


图 8 采动覆岩裂隙发育高度演化特征

Fig. 8 Characteristics of highly evolved fissure development in mining overburden

动力灾害安全预警。图9为微震监测系统结构。

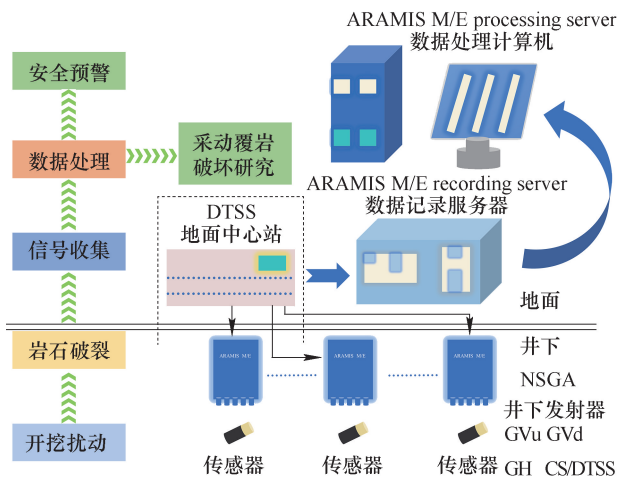


图9 微震监测系统结构

Fig. 9 Architecture of microseismic monitoring system

3.1.2 微震监测台网构建

为研究3105工作面开采过程中采动覆岩断裂、运移、裂隙发育演化过程中能量、频次动态时空演化特征,基于ARAMIS M/E微震监测系统对3105工作面进行24 h全天不间断监测。3105工作面微震监测台网共布置5个微震测点(2个微震探头,3个微震拾震器),可实现对工作面回采期间监测全域覆盖。通过优化微震监测台网布置及相关硬件、软件参数设置和修改,可以提高整个系统的监测精度。通过校验炮信号实际发生位置与微震监测系统三维空间定位位置对比分析,三维空间定位误差小于6.8 m。微震探头与微震拾震器功能一致,都用于监测微震事件信号,微震拾震器安装在水泥浇筑台上,微震探头安装在顶板锚杆上。图10为微震监测系统布置及安装。

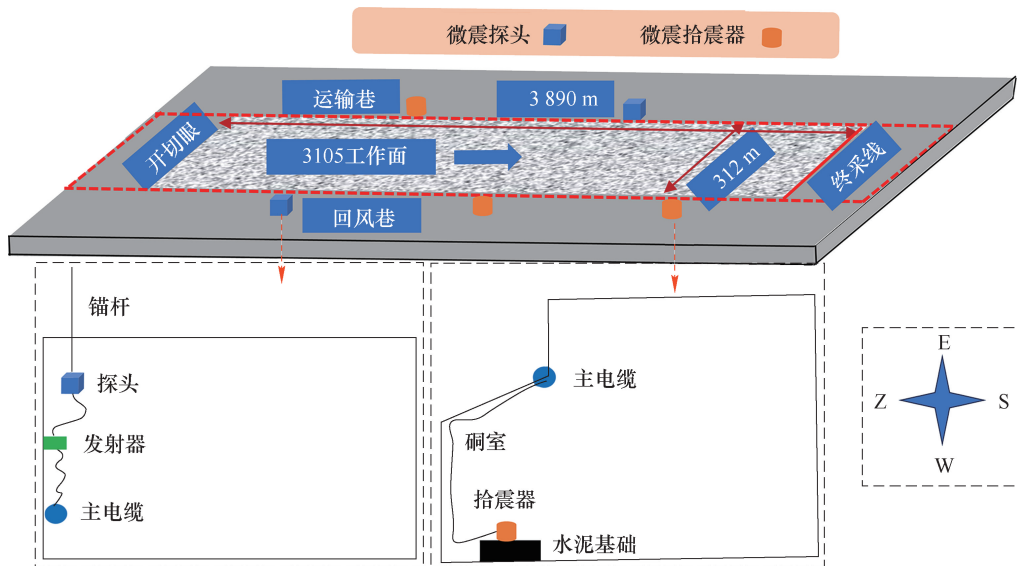


图10 微震监测系统布置及安装

Fig. 10 Layout and installation of microseismic monitoring

3.2 微震监测系统数据分析

煤层采后在开挖扰动下应力发生重新分布,在应力场重新平衡过程中局部应力强度超过岩层的次生结构面的承载强度时,岩层结构面产生新的裂隙,在岩体新裂隙产生过程中释放能量而发生大量微震事件。顶板覆岩在不同区域受载发生能量聚集,当聚集能量达到其自身承受极限时发生变形或破裂,突然释放能量并产生弹性波。在减压区内低强度岩石发生变形或破裂,在支承压力区内高强度岩石发生变形或破裂。顶板覆岩发生整体变形或破裂与岩石本身非均质性关系密切,每个岩石变形或破裂的发生伴随着一个微地震现象,岩石

在不同应力场内所发生的变形或破裂信号,产生于不同强度岩石成分变形或破裂。对微震事件发生位置、频次及能量大小与井下现场片帮等现象进行研究。

图11为走向距开切眼1029~1289 m微震事件-进尺演化。回采该区段期间,共发生1211个微震事件,累积总能量22 MJ,进尺260 m。由图11可看出,工作面回采速度越快,发生微震事件能量越大及频次越高,“高频次-大能量”集中区呈现周期分布且同工作面周期来压特征相吻合。微震事件日发生频次、日累积释放能量与日进尺演化趋势呈现正相关。

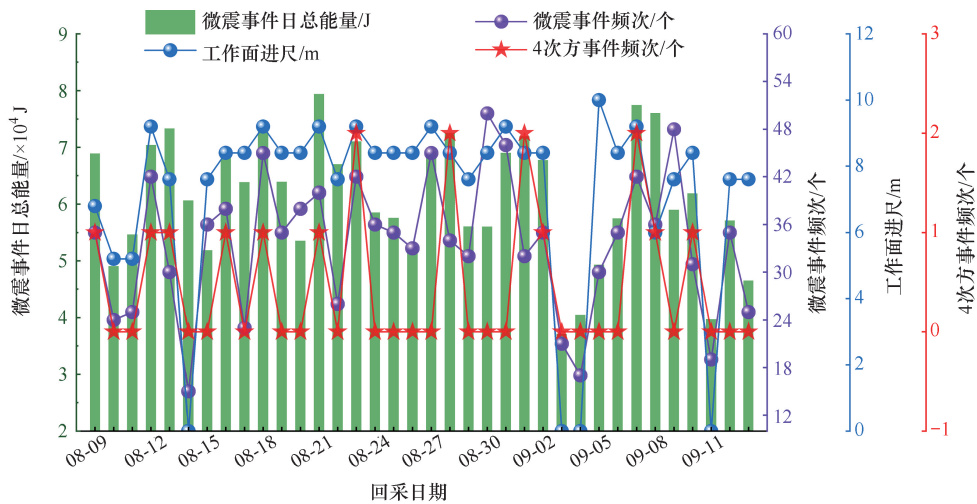


图 11 走向距开切眼 1 029~1 289 m 微震事件-进尺演化

Fig. 11 Toward a microseismic event-footprint evolution from 1 029 to 1 289 m from the open cut eye

图 12 为走向距开切眼 1 029~1 289 m 微震事件能量-密度云图。自煤层底板起 20 m 高度内微震事件 350 个,占比 28.9%,能量 0.73 MJ,占比 33.3%;距离煤层顶板越远,微震事件频次及能量呈现减少趋势,但中位坚硬岩层(距煤层顶板 41 m 的细粒砂岩)破断处微震事件能量与下方 20 m 内呈现持平状态,但事件数量减少较

多;20~40 m 高度内微震事件 277 个,占比 22.87%,能量 0.41 MJ,占比 18.6%;40~60 m 高度内微震事件 154 个,占比 12.72%,能量 0.37 MJ,占比 16.8%。事件定位最高发生层位距煤层底板 115.5 m。发生的 17 次微震大能量事件,基本都在垮落带及坚硬岩层(16 m 厚细粒砂岩)层位。

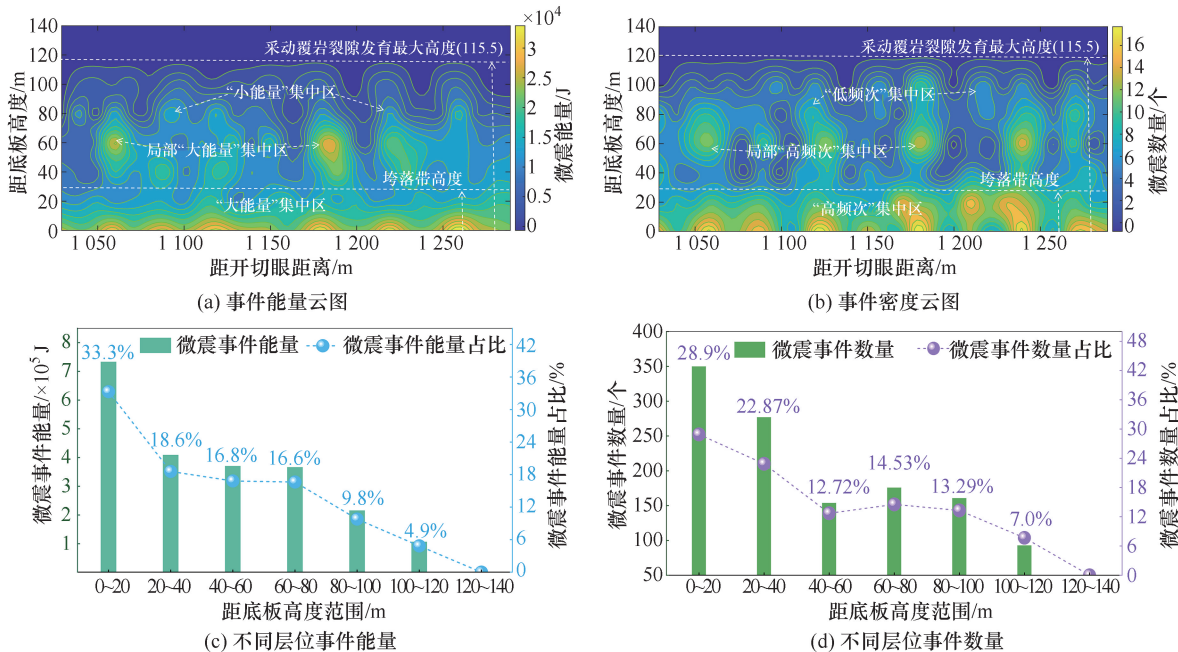


图 12 走向距开切眼 1 029~1 289 m 微震事件能量-密度云图

Fig. 12 Toward the energy-density cloud of microseismic events 1 029~1 289 m from the open cut eye

通过对微震事件活动空间域、时间域及采动覆岩裂隙网络场综合分析得出,微震事件“高频次-大能量”集中区基本覆盖垮落带,局部“高频次-大能量”集中区基本覆盖分形维数剧烈增大区域及

坚硬岩层断裂、运移区域。在采场附近、超前工作面处、后方采空区均出现微震事件。采空区破碎岩体在上覆岩层运移应力下发生岩体破裂,微震事件滞后工作面最远为 109 m,超前工作面位置最远为

186 m,微震事件集中区在超前工作面 80 m 左右开始出现。中位坚硬岩层发生 7 次破断、运移变形,由图 12(a)(b)可知,中位坚硬岩层破断、运移变形发生微震事件“高频次-大能量”集中区间隔为 19.5~32.5 m,与采动覆岩剧烈演化裂隙场呈现同步演化趋势;微震事件“高频次-大能量”集中区覆盖垮落带且呈现周期性分布,与图 13 走向距开切眼 1 029~1 289 m 工作面 32 号、92 号、152 号支架来压特征相吻合,大致分为 7 个周期且集中在中位坚硬岩层发生破断、运移变形位置处。微震事件能量集中区呈现“椭球状”分布,数量集中区呈现“条带状”分布。

图 14 为走向距开切眼 2 351~2 597 m 微震事件-进尺演化。回采该区段期间,共发生 1 002 个微震事件,累积总能量 1.93 MJ,进尺 246 m,微震事件日发生频次、日累积释放能量与日进尺演化趋

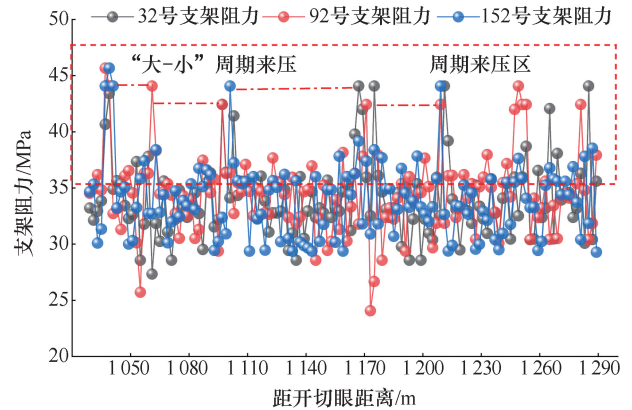


图 13 走向距开切眼 1 029~1 289 m 工作面 32、92、152 号支架来压特征

Fig. 13 Toward the working face 1 029~1 289 m from the open cutting eye 32#-92#-152# bracket to pressure features

势基本一致,局部覆岩运移、破断处微震事件表现为“高频次-大能量”集中区现象。

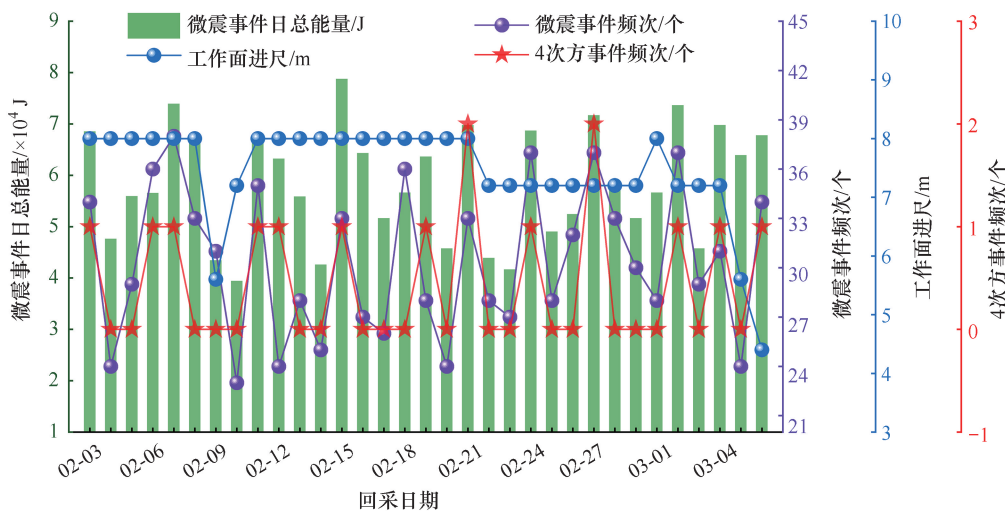


图 14 走向距开切眼 2 351~2 597 m 微震事件-进尺演化

Fig. 14 Toward the microseismic event-footprint evolution from 2 351 to 2 597 m from the open cut eye

图 15 为走向距开切眼 2 351~2 597 m 微震事件能量-密度云图。微震事件“高频次-大能量”集中区全部覆盖垮落带且覆盖局部裂隙带,呈现周期

性分布特征。因细粒砂岩力学参数、节理裂隙影响,7 个“高频次-大能量”集中区集中于中位坚硬岩层破断、运移变形处。15 次微震大能量事件,其

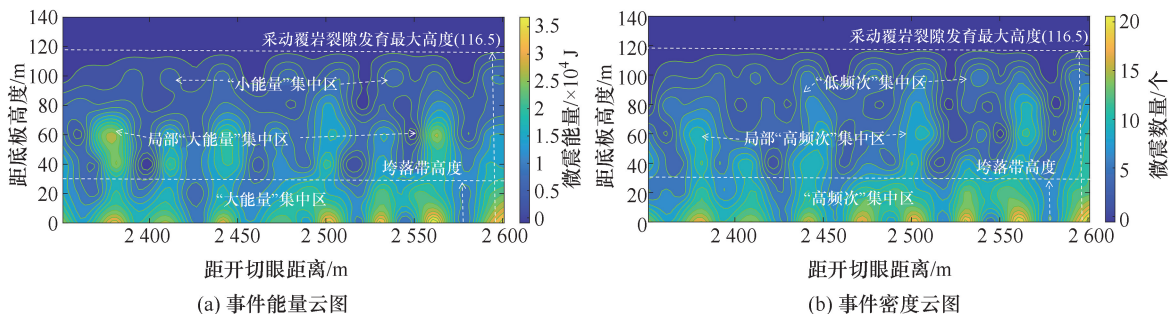


图 15 走向距开切眼 2 351~2 597 m 微震事件能量-密度云图

Fig. 15 Toward the energy-density cloud of microseismic events 2 351~2 597m from the open cut eye

中有 6 次发生在细粒砂岩周期破断、运移变形处。微震事件“高频次-大能量”集中区与“低频次-小能量”集中区存在明显的大小周期分布现象,与图 16 走向距开切眼 2 351~2 597 m 工作面 32、92、152 号支架来压特征基本一致,周期步距为 17.5~37.5 m,平均为 27.5 m。微震事件定位最高距煤

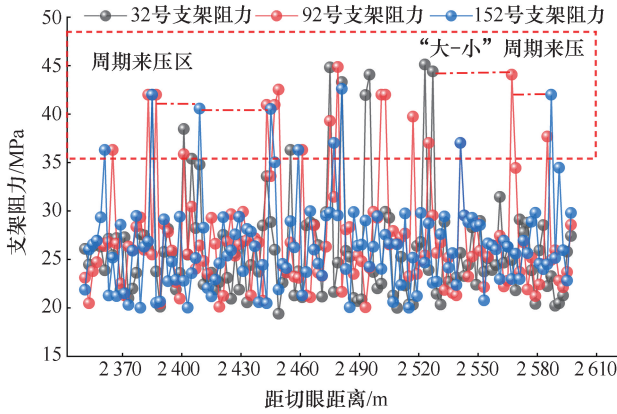


图 16 走向距开切眼 2 351~2 597 m 工作面 32、92、152 号支架来压特征

Fig. 16 Toward the working face of No. 32, No. 92 and No. 152 bracket from the open cutting eye 2 351~2 597 m to pressure features

层底板 116.5 m,超前工作面最远达 190 m,微震事件集中区在超前工作面 120 m 左右开始出现。

工作面走向 2 351~2 597 m 段倾向方向 0~306 m 范围内微震事件能量、密度云图如图 17 所示。在倾向方向高位岩层微震事件“高频次-大能量”与“低频次-小能量”集中区呈现两端高中间低的“类马鞍形”分布,即倾向方向高位岩层采动覆岩裂隙发育演化为两端高、中间低的“类马鞍形”破坏形态;在走向方向高位岩层微震事件集中区呈现波动的“锯齿状”演化态势,即走向方向高位岩层采动覆岩裂隙发育演化高度表现为“锯齿状”分布,其中微震事件能量集中区呈现“椭球状”分布,数量集中区呈现“条带状”分布。

图 18 为走向距开切眼 3 532~3 776 m 微震事件-进尺演化。回采该区段期间,共发生 1 294 个微震事件,累积总能量 2.09 MJ,进尺 244 m,微震事件日发生频次与日总能量基本呈现正相关演化趋势,局部覆岩运移、破断处微震事件表现为“高频次-大能量”与“低频次-小能量”伴随现象。

图 19 为走向距开切眼 3 532~3 776 m 微震事件能量-密度云图。发生 16 次微震大能量事件,其中 9 次发生在末采矿压异常显现阶段。

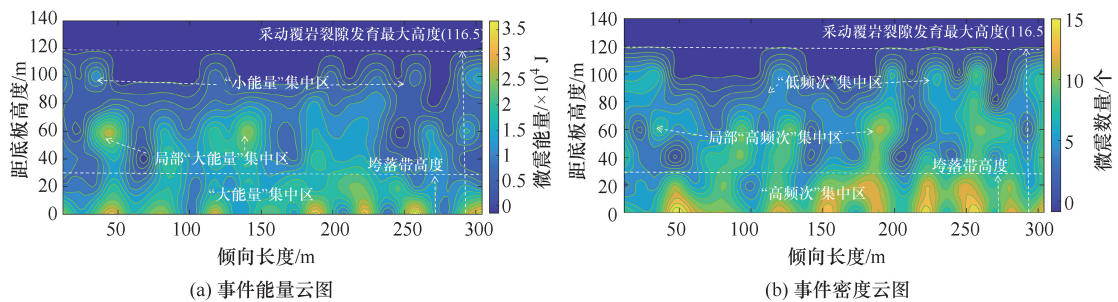


图 17 距开切眼 2 351~2 597 m 倾向微震事件能量-密度云图

Fig. 17 Energy-density nephogram of microseismic events with a tendency of 2 351~2 597 m from the open cut eye

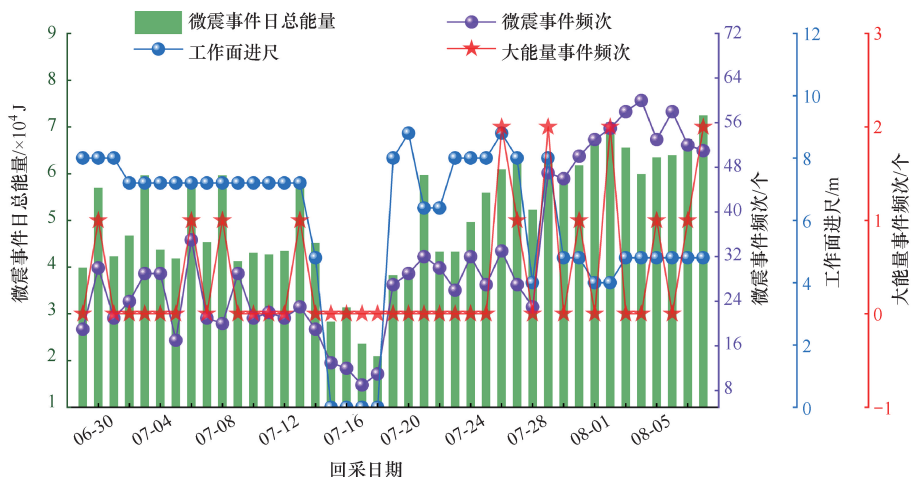


图 18 走向距开切眼 3 532~3 776 m 微震事件-进尺演化

Fig. 18 Toward a microseismic event-footprint evolution from 3 532 to 3 776 m from the open-cut eye

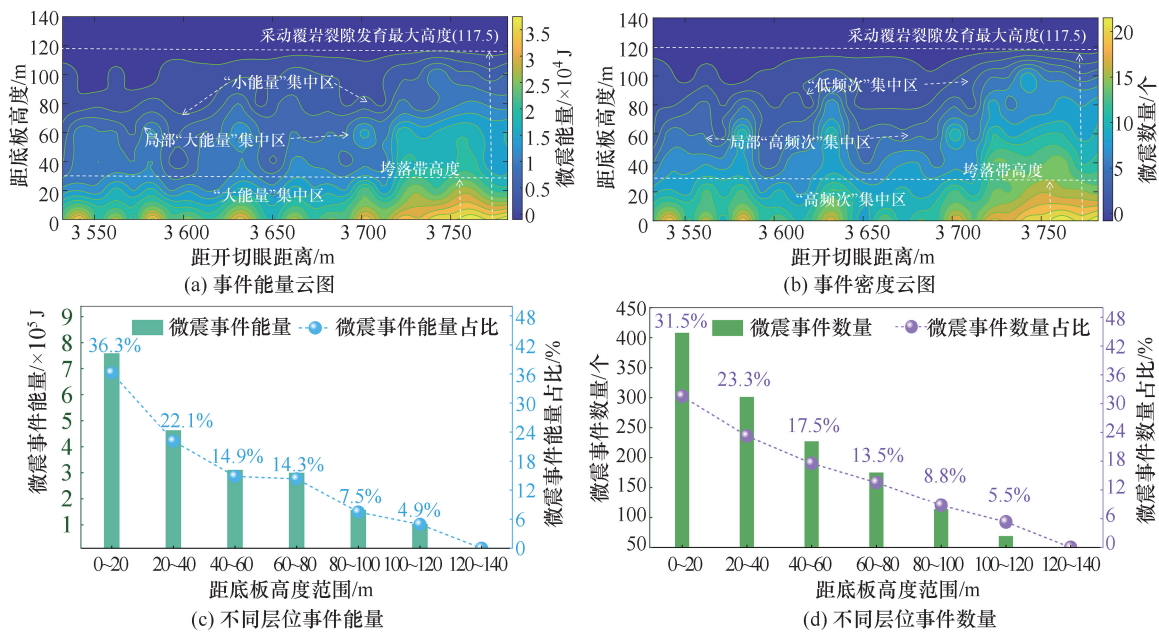


图 19 走向距开切眼 3 532~3 776 m 微震事件能量-密度云图

Fig. 19 Toward an energy-density cloud of microseismic events 3 532~3 776 m from the open cut eye

图 20 为走向距开切眼 3 532~3 776 m 工作面 32、92、152 号支架来压特征,由图 19、图 20 可看出,微震事件“高频次-大能量”集中区分为 6 个周期和 1 个较大面积集中区。由矿压监测得出,距开切眼 3 706 m 起工作面开始出现强矿压持续显现现象,工作面上、中、下部呈现持续来压状态,此时距工作面终采线大约 180 m,强矿压显现导致采动覆岩应力高度集中,高应力环境下岩体累积与释放能量更加剧烈且周期缩短,即岩体受采动影响加重且持续时间加长,采动覆岩裂隙剧烈演化,采动裂隙场分形特征规律性明显增强,表现为微震事件能量及发生频次出现大幅度上升并持续,微震监测结果同图 20 支架来压特征相吻合。

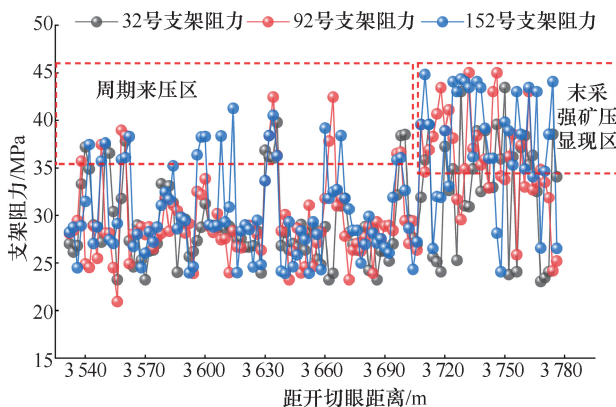


图 20 走向距开切眼 3 532~3 776 m 工作面 32、92、152 号支架来压特征

Fig. 20 Toward a distance of 3 532~3 776 m from the open cut eye working face No. 32, No. 92 and No. 152 bracket to pressure features

3.3 微震事件集中区与采动覆岩裂隙场时空演化分析

煤岩体在微破裂稳定扩展、穿透阶段发生微震事件多数为小能量微震事件,在非稳定破裂扩展、穿透阶段发生微震事件多数为大能量微震事件,且局部伴随小能量微震事件,超过煤岩体极限抗压强度后可能发生冲击现象^[26]。煤层采后采动覆岩在原岩应力与采动应力耦合作用下裂隙开始发育扩展、穿透演化,在微破裂稳定扩展、穿透阶段,采动覆岩小裂隙逐渐向前方及上方演化,裂隙分布集中区呈现低密度、小长度等特征,为“低频次-小能量”微震事件集中区,即采动覆岩裂隙缓慢增长区;在非稳定破裂扩展、穿透阶段,采动覆岩裂隙呈现剧烈且迅速扩展、穿透演化,裂隙分布集中区呈现高密度、大长度等特征,为“高频次-大能量”微震事件集中区,周边亦存在局部“低频次-小能量”微震事件集中区,即采动覆岩裂隙剧烈增长区。岩层采动裂隙时空演化特征经历“原生裂隙闭合阶段-弹性阶段-微破裂稳定扩展、穿透阶段-非稳定破裂扩展、穿透阶段”。

图 21 为煤岩体受载裂隙发育扩展演化机理。基于对回采 1 029~1 289、2 351~2 597、3 532~3 776 m 期间微震事件活动能量、频次、位置分布与数值模拟采动覆岩破断、运移变形分析可知,随工作面推进度逐渐增加,顶板覆岩垮落与坚硬岩层断裂、运移变形破坏呈现周期性演化,回采过程中监测到大量微震事件。微震事件“高频次-大能

量”集中区覆盖坚硬岩层破断、运移变形区,即采动覆岩裂隙剧烈增长区。走向采动覆岩裂隙发育扩展演化以“类梯形”呈现周期性态势演化,微震事件集中区呈现“锯齿状”分布。工作面采动覆岩裂隙剧烈增长区与微震事件“高频次-大能量”集中区大部重合且呈现同步演化趋势,缓慢增长区与微震事件局部“低频次-小能量”集中区大部重合。采动覆岩微震事件“高频次-大能量”与“低频次-小能量”集中区呈现周期分布,局部存在“大-小”周期现象。

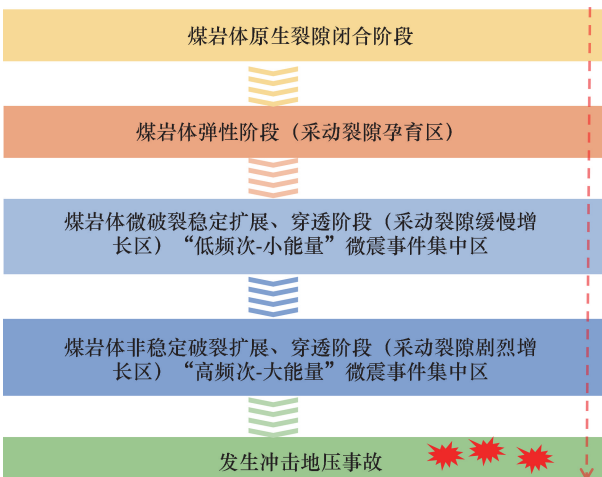


图 21 煤岩体受载裂隙发育扩展演化机理
Fig. 21 Evolution mechanism of loaded fissure development and expansion in coal rock body

4 结 论

基于数值模拟和微震监测揭示了巨厚砂岩下深埋厚煤层采动覆岩裂隙场及微震事件集中区时空演化、分布规律。研究成果对分析巨厚砂岩下深埋厚煤层开采矿井涌水来源和途径、采取有效的防治水措施提供了理论支持。

(1) 基于数值模拟揭示了 3105 工作面巨厚砂岩下深埋厚煤层采动覆岩裂隙网络发育、扩展、穿透演化具有规律的分形特征。回采过程中采动覆岩裂隙场呈现“裂隙产生-发育演化-局部压实-周期扩展-大部压实”动态扩展演化特征。

(2) 采用微震系统远距离、长时序监测阐明了采动覆岩失稳破断、运移与微震事件局部“高频次-大能量”集中区演化规律。微震事件“高频次-大能量”与“低频次-小能量”集中区呈现周期性分布,局部存在“大-小”周期现象,同工作面周期来压特征相吻合,微震事件集中区发生位置普遍超前工作面 80~120 m。

(3) 基于微震事件空间域、时间域及采动覆岩

裂隙场分析,明晰了微震事件局部“高频次-大能量”集中区与采动覆岩裂隙剧烈演化场呈现同步演化趋势,数值模拟采动覆岩裂隙演化高度与微震监测覆岩破坏所得高度基本一致。

(4) 通过微震事件三维空间定位分析得出,倾向高位岩层微震事件集中区呈现两端高、中间低的“类马鞍形”分布,走向高位岩层微震事件集中区呈现“锯齿状”分布;微震事件能量集中区呈现“椭圆状”分布,数量集中区呈现“条带状”分布。

参考文献

- [1] 袁亮,姜耀东,何学秋,等. 煤矿典型动力灾害风险精准辨识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报,2018,43(2): 306-318.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(2): 306-318.
- [2] 潘立友,牛衍凯,寇天司. 深部复杂立体边界采场冲击地压防控技术研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(6): 1124-1132.
PAN Liyou, NIU Yankai, KOU Tiansi. Prevention and control technology of rock burst in deep stope with complex solid boundary [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022,44(6): 1124-1132.
- [3] LA POINTE P R. A method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988,25(6): 421-429.
- [4] HATTON C G, MAIN I G, MEREDITH P G. Non-universal scaling of fracture length and opening displacement [J]. Nature, 1994,367(6459): 160-162.
- [5] GUDMUNDSSON A. Geometry, formation and development of tectonic fractures on the Reykjanes Peninsula, southwest Iceland [J]. Tectonophysics, 1987, 139 (3/4): 295-308.
- [6] SCHOLZ C H, COWIE P A. Determination of total strain from faulting using slip measurements [J]. Nature, 1990,346: 837-839.
- [7] WALSH J, WATTERSON J, YIELDING G. The importance of small-scale faulting in regional extension [J]. Nature, 1991,351(6325): 391-393.
- [8] 谢和平,于广明,杨伦,等. 采动岩体分形裂隙网络研究[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(2): 147-151.
XIE Heping, YU Guangming, YANG Lun, et al. Re-

- search on the fractal effects of crack network in overburden rock stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 147-151.
- [9] 李树刚, 秦伟博, 李志梁, 等. 重复采动覆岩裂隙网络演化分形特征[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2016, 35(12): 1384-1389.
LI Shugang, QIN Weibo, LI Zhiliang, et al. Research on fractal characterization of mined crack network evolution repeated coal mining[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2016, 35(12): 1384-1389.
- [10] 王志国. 深部开采上覆岩层中采动裂隙网络演化规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011.
WANG Zhiguo. Study on evolution law of mining fracture network in overlying strata of deep mining[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2011.
- [11] 赵毅鑫, 令春伟, 刘斌, 等. 浅埋超大采高工作面覆岩裂隙演化及能量耗散规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 9-18, 30.
ZHAO Yixin, LING Chunwei, LIU Bin, et al. Fracture evolution and energy dissipation of overlying strata in shallow-buried underground mining with ultra-high working face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 9-18, 30.
- [12] 李全生, 李晓斌, 许家林, 等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 28-47.
LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, et al. Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 28-47.
- [13] 李宏艳, 王维华, 齐庆新, 等. 基于分形理论的采动裂隙时空演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1023-1030.
LI Hongyan, WANG Weihua, QI Qingxin, et al. Study on fissure development rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1023-1030.
- [14] 赵洪宝, 高璐, 程辉, 等. 基于开采高度对工作面覆岩裂隙演化影响的钻孔瓦斯抽采研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(3): 435-445.
ZHAO Hongbao, GAO Lu, CHENG Hui, et al. Research on borehole gas extraction based on the influence of mining height on the evolution of overburden fracture in working face[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(3): 435-445.
- [15] 姜福兴. 微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 147-149.
JIANG Fuxing. Application of microseismic monitoring technology of strata fracturing in underground coal mine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 147-149.
- [16] 姜福兴, XUN Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23-25.
JIANG Fuxing, XUN Luo, YANG Shuhua. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 23-25.
- [17] 姜福兴, 杨淑华. 微地震监测揭示的采场围岩空间破裂形态[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 357-360.
JIANG Fuxing, YANG Shuhua. Spatial fracturing progresses of surrounding rock masses in longwall face monitored by microseismic monitoring techniques [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 357-360.
- [18] 程关文. 煤矿突水的微破裂前兆信息微震监测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 67-87.
CHENG Guanwen. Study on microseismic monitoring technology of micro-fracture precursor information of coal mine water inrush[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 67-87.
- [19] 王悦, 于水, 王苏健, 等. 微震监测技术在煤矿底板突水预警中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(8): 68-73.
WANG Yue, YU Shui, WANG Sujian, et al. Application of microseismic monitoring technology in water inrush warning of coal mine floor[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(8): 68-73.
- [20] 靳德武, 段建华, 李连崇, 等. 基于微震的底板采动裂隙扩展及导水通道识别技术研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 962-971.
JIN Dewu, DUAN Jianhua, LI Lianchong, et al. Microseismicity based research for mining induced fracture propagation and water pathway identification technology of floor[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 962-971.
- [21] 韩刚, 李旭东, 曲晓成, 等. 采场覆岩空间破裂与采动应力场分布关联性研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 53-58.
HAN Gang, LI Xudong, QU Xiaocheng, et al. Study on correlation between spatial fracturing of overlying strata and distribution of mining stress field in stope [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 53-58.
- [22] 肖鹏, 韩凯, 双海清, 等. 基于微震监测的覆岩裂隙演化规律相似模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 48-56.

- XIAO Peng, HAN Kai, SHUANG Haiqing, et al. Similar material simulation test study on evolution law of overburden fracture based on microseismic monitoring [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 48-56.
- [23] 徐超, 王凯, 郭琳, 等. 采动覆岩裂隙与渗流分形演化规律及工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(12): 2389-2403.
- XU Chao, WANG Kai, GUO Lin, et al. Fractal evolution law of overlying rock fracture and seepage caused by mining and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2389-2403.
- [24] 王新丰, 高明中, 李隆钦. 深部采场采动应力、覆岩运移以及裂隙场分布的时空耦合规律[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(4): 604-610.
- WANG Xinfeng, GAO Mingzhong, LI Longqin. Spatio-temporal coupling law of mining pressure, strata movement and fracture field distribution in deep stope[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(4): 604-610.
- [25] 崔峰, 杨彦斌, 来兴平, 等. 基于微震监测关键层破坏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.
- CUI Feng, YANG Yanbin, LAI Xingping, et al. Similar material simulation experimental study on rockbursts induced by key stratum breaking based on microseismic monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 803-814.
- [26] 崔峰, 张随林, 刘旭东, 等. 急倾斜巨厚煤层复杂空间结构区微震时空演化规律及诱冲机理[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(4): 1786-1803.
- CUI Feng, ZHANG Suilin, LIU Xudong, et al. Temporal and spatial evolution law of microseisms and induced impact mechanism in complex spatial structure area of steep and extremely thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(4): 1786-1803.

(责任编辑:张彩艳)