



倾斜厚煤层仰斜综采工作面覆岩瓦斯缓渗分区域方法及分形特征研究

赵鹏翔 王玉龙 李树刚 林海飞 金士魁 卓日升 双海清

引用本文:

赵鹏翔, 王玉龙, 李树刚, 等. 倾斜厚煤层仰斜综采工作面覆岩瓦斯缓渗分区域方法及分形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 71–83.

ZHAO Pengxiang, WANG Yulong, LI Shugang. Division method and fractal characteristics of overburden gas slow permeability zone in up-dip fully mechanized face of inclined thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 71–83.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1444>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤层倾角对仰斜工作面覆岩压实区裂隙演化规律的影响

Dip angle effect of coal seam on crack propagation rule of compacted area at fully-mechanized rise mining face

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 65–72 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1b3c8626-c046-43da-8d18-c7d5f9605f87>

倾斜厚煤层综放工作面伪斜长度与上隅角瓦斯浓度耦合机制研究

Coupling mechanism of pseudo-slope length change and gas concentration in upper corner of fully mechanized caving surface of inclined thick coal seam in Xinjiang

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 73–85 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1279>

倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区辨识及抽采关键技术

Key technologies for extraction and identification of gas target area for pressure relief in inclined thick coal seam

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 105–115 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0414>

厚煤层大采高综放工作面覆岩断裂演化规律研究

Study on evolution law of overburden fracture in fully-mechanized top-coal caving face with large mining height in thick coal seam

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 1–12 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1926>

倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制

Asymmetric characteristics of “three-field” in overburden of inclined coal seam groups and target extraction mechanism

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 177–192 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0068>

综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析

Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 95–104 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e08afc7e-8f5d-412a-b51d-5130c2e2c994>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

赵鹏翔, 王玉龙, 李树刚, 等. 倾斜厚煤层仰斜综采工作面覆岩瓦斯缓渗分区域方法及分形特征研究[J]. 煤炭科学与技术, 2023, 51(S2): 71-83.

ZHAO Pengxiang, WANG Yulong, LI Shugang, et al. Division method and fractal characteristics of overburden gas slow permeability zone in up-dip fully mechanized face of inclined thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 71-83.

倾斜厚煤层仰斜综采工作面覆岩瓦斯缓渗区 分域方法及分形特征研究

赵鹏翔^{1,2,3,4}, 王玉龙¹, 李树刚^{1,2,3}, 林海飞^{1,2,3,4}, 金士魁^{4,5}, 卓日升¹, 双海清^{1,2,3}

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 煤炭行业西部矿井瓦斯智能抽采工程研究中心, 陕西 西安 710054; 4. 新疆煤及煤层气工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000;

5. 新疆维吾尔自治区煤炭科学研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 为研究倾斜厚煤层仰斜综采工作面覆岩瓦斯缓渗区的分域方法及分形特征, 以分形理论和灰色理论为基础, 采用平面物理相似模拟试验方法, 开展了仰斜综采工作面覆岩瓦斯缓渗区裂隙演化规律研究, 得到了覆岩瓦斯缓渗区的动态扩展规律, 进而构建了覆岩瓦斯缓渗区精细分域方法, 并采用灰色关联分析方法对覆岩瓦斯缓渗区沿横向(工作面推进方向)和纵向(垂直于煤层底板向上方向)分形维数与离层量、破断裂隙密度及应力集中系数之间的最大关联度分别进行确定。研究结果表明: 覆岩瓦斯缓渗区在第一次周期来压后初步形成, 其后每次周期来压时, 覆岩瓦斯缓渗区两侧的垮落角均不断减小而宽度和高度均不断增大。具体表现为从缓渗区初次形成至缓渗区充分发育期间, 缓渗区开切眼侧和工作面侧的垮落角分别从68.3°和76.2°减小到44.7°和53.5°; 而缓渗区的宽度和高度分别从16.3 m和19.2 m增大到52.1 m和38.4 m。根据建立的覆岩瓦斯缓渗区分域准则及流程, 结合灰色关联分析方法, 得到覆岩瓦斯缓渗区沿横向和纵向分形维数变化均与离层量变化相关性最强($r_1=0.93, r_1^*=0.91$), 并通过试验验证了理论计算的准确性。因此, 在后期确定卸压瓦斯抽采钻孔(巷道)终孔(巷)时, 可通过现场观测离层量对覆岩瓦斯缓渗区边界进行判断, 研究结果对采空区卸压瓦斯精准高效抽采具有一定的指导意义。

关键词: 倾斜厚煤层; 仰斜综采工作面; 覆岩瓦斯缓渗区; 分域方法; 分形特征

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)S2-0071-13

Division method and fractal characteristics of overburden gas slow permeability zone in up-dip fully mechanized face of inclined thick coal seam

ZHAO Pengxiang^{1,2,3,4}, WANG Yulong¹, LI Shugang^{1,2,3}, LIN Haifei^{1,2,3,4},
JIN Shikui^{4,5}, ZHUO Risheng¹, SHUANG Haiqing^{1,2,3}

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Western Engineering Research Center of Mine Gas Intelligent Drainage for Coal Industry, Xi'an 710054, China; 4. Xinjiang Coal and CBM Engineering Technology Research Center, Urumqi 830000, China; 5. Xinjiang Uygur Autonomous Region Coal Science Research Institute, Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to study the division method and fractal characteristics of the overburden gas slow permeability zone in up-dip fully mechanized face of inclined thick coal seam, based on the fractal theory and grey theory, the plane physical similarity simulation experiment was used to study the crack evolution law of the overburden gas slow permeability zone in up-dip fully mechanized face. The dynamic expansion law of the overburden gas slow permeability zone was obtained, and then the division method of the overburden gas slow per-

收稿日期: 2022-09-06 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1444

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(51974237); 陕西省青年科技新星资助项目(2020KJXX-004); 新疆自然科学基金青年基金资助项目(2019D01B42)

作者简介: 赵鹏翔(1987—), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士生导师。E-mail: zhpxhs@sina.com

meability zone was constructed. The grey correlation analysis method was used to determine the maximum correlation degree between the horizontal direction (the advancing direction of the working face) and vertical direction (perpendicular to the upward direction of the coal seam floor) fractal dimensions of the overburden gas slow permeability zone and the separation amount, the fracture density and the stress concentration coefficient. The results show that the overburden gas slow permeability zone is initially formed after the first periodic weighting. After each periodic weighting, the caving angle on both sides of the overburden gas slow permeability zone decreases continuously and the width and height increase continuously. Specifically, from the initial formation of the slow permeability zone to the full development of the slow permeability zone, the caving angles of the open-off cut side and the working face side of the slow permeability zone are reduced from 68.3° and 76.2° to 44.7° and 53.5° respectively. The width and height of the slow permeability zone increased from 16.3 m and 19.2 m to 52.1 m and 38.4 m respectively. According to the established division criterion and process of the overburden gas slow permeability zone, combined with the grey correlation analysis method, it is obtained that the variation of fractal dimension along the horizontal and vertical directions of the overburden gas slow permeability zone has the strongest correlation with the variation of the separation amount ($r_1=0.93, r_1^*=0.91$), and the accuracy of theoretical calculation is verified by experiments. Therefore, when the final hole (roadway) of pressure relief gas extraction borehole (roadway) is determined in the later stage, the boundary of the overburden gas slow permeability area can be judged by field observing the separation amount. The research results have certain guiding significance for accurate and efficient extraction of pressure relief gas in goaf.

Key words: inclined thick coal seam; up-dip fully mechanized face; overburden gas slow permeability zone; division method; fractal characteristics

0 引言

随着浅部煤炭储量的日益减少,我国中部地区煤炭资源开发逐渐转向地层深部,倾斜厚煤层开采比例越来越高,且大部分煤层由于透气性低实施预抽煤层瓦斯虽能达到开采要求,但仍需进行卸压瓦斯抽采^[1-3]。综采面覆岩瓦斯缓渗区(采空区上覆岩层发生垮落堆积后,瓦斯气体渗流、扩散更困难的局部区域)的准确判定有助于提高瓦斯抽采系统布置的精准性,对大幅提高卸压瓦斯抽采效果,降低瓦斯超限频率至关重要。

目前国内外众多学者针对煤层开采后裂隙场空间形态及覆岩变化特征开展了大量研究。GHABRAIE^[4]、DAVID^[5]等研究了覆岩移动带的变形失稳规律。钱鸣高等^[6-7]提出了“O”形圈模型,并建立了描绘整体岩层移动的“关键层”理论。袁亮等^[8-10]提出了高位环形裂隙体模型。杨科等^[11]提出了覆岩采动裂隙演化类似于“U”形高帽状。李树刚等^[12-15]提出了采动裂隙“椭抛带”理论,并建立了多因素影响下采动裂隙“椭抛带”压实区演化综合效应模型。刘洪永等^[16]通过数值仿真研究了不同推进速度下优势瓦斯通道时空分布特征,并建立了基于采动裂隙“椭抛带”理论的优势瓦斯通道时空形态理论模型。以上学者的研究主要是针对近水平煤层,而倾斜煤层上覆岩层的裂隙演化规律相较于近水平煤层具有一定差异。为此,伍永平等^[17-18]建立了非对称约束条件下大倾角煤层开采“关键层”覆岩结构特征模型。解盘石等^[19]研究了大倾角近距离煤层群长壁采场顶

板破断垮落特征,并对采场顶板易发生弯曲破断的位置进行了确定。ZHOU等^[20]揭示了不同煤层倾角条件下覆岩位移场的变化规律,并利用对称性指数对覆岩位移场的非对称演化进行了深入研究。

近年来,随着分形-岩石力学理论的不断发展,越来越多的学者借助分形理论开展了覆岩裂隙网络定量研究。谢和平等^[21-23]应用分形维数对放顶煤巷道裂隙的分布和复杂程度进行了表征,并得出了采动岩体裂隙分布的自相似规律。周宏伟等^[24]结合分形理论研究了开采宽度、采场矿压及岩层沉降等因素影响的覆岩裂隙分形维数动态演化规律。WANG等^[25]研究了上行开采条件下覆岩裂隙网络的分形特征,发现随着开采宽度的增加,裂隙网络的分形维数呈现出快速上升、缓慢增加、稳定变化三阶段分布特征。杨滨滨等^[26]研究了近距离煤层重复采动条件下覆岩裂隙时空演化特征,得出沿工作面推进方向上、下行开采覆岩裂隙分形维数分别呈“马鞍型”和“梯型”变化。赵毅鑫等^[27]研究了浅埋超大采高工作面覆岩裂隙演化及能量耗散规律,得出覆岩裂隙分形维数在关键层破断前后呈上升-稳定-下降趋势。ZHAO等^[28-30]研究了不同采高、煤层倾角、回采率下瓦斯运移优势通道的分布特征,并基于分形理论揭示了采动裂隙在工作面不同分区内的分形维数演化规律。

上述研究成果为开展覆岩瓦斯缓渗区裂隙演化规律研究提供了理论依据,能够有针对性地描述覆岩瓦斯缓渗区的变化特征,但目前围绕覆岩瓦斯缓渗区进行分域研究较少。因此,笔者以山西某高瓦斯矿井为原型,通过物理相似模拟试验及理论分析

研究,得到了覆岩瓦斯缓渗分区域方法及分形演化特征。研究结果为后期在倾斜厚煤层仰斜综采面确定卸压瓦斯抽采钻孔(巷道)终孔(巷)时抽采系统的精确布置提供了一定的理论基础,对采空区卸压瓦斯精准高效抽采具有一定的指导意义。

1 物理相似模拟试验

1.1 试验原型

以山西某高瓦斯矿井综采工作面为原型,该工作面主采15煤。工作面走向长度2 081 m,倾向长度180 m,平均埋深410 m,煤层平均厚度4.5 m,平均倾角30°,沿顶板一次采全高。煤层中含夹矸1~3层,厚0.38~1.10 m,煤层直接顶为泥岩,基本顶为中砂岩。

1.2 试验方案

试验采用平面模型,模型尺寸为1 100 mm×150 mm×800 mm(长×宽×高)。根据相似模拟试验原

则,物理模型需满足相似三定理,如力学、几何等物理量与试验原型相似,依据工作面实际参数对物理模型相似常数进行计算^[29],具体见表1。

表1 物理模型相似常数
Table 1 Physical model similarity constants

参数	时间	几何	强度	容重	应力	泊松比
相似常数	10	100	150	1.5	150	1.0

根据试验原型上覆岩层分布情况对物理模拟试验相似材料配比进行计算(表2)。在进行物理模型搭建时,先调节试验台至30°,然后将应力传感器安装于试验台底部,最后依据配比表称取沙子、淀粉及石膏,加水混合搅拌后逐层进行铺设,并在相邻岩层间均匀覆盖云母片作为层间分层材料,直至铺设完成。在物理模型搭建完成后,先调节试验台至水平,然后待模型自然晾干3~4周后进行位移测点及顶部配重布置,如图1、2所示。

表2 物理模型相似材料配比
Table 2 Physical model similar material ratio

序号	岩层	厚度/cm	质量/kg				
			沙子	淀粉	石膏	煤粉	水
20	粉砂岩	7.0	4.13	0.11	0.45	0	0.43
19	砂质泥岩	4.0	4.19	0.20	0.30	0	0.45
18	12煤	0.5	4.23	0.09	0.36	2.11	0.68
17	砂质泥岩	5.0	4.19	0.20	0.30	0	0.45
16	细砂岩	5.0	4.13	0.22	0.33	0	0.43
15	铝质泥岩	4.0	4.18	0.10	0.40	0	0.45
14	细砂岩	2.0	4.13	0.22	0.33	0	0.43
13	砂质泥岩	7.0	4.19	0.20	0.30	0	0.45
12	石灰岩	3.0	4.10	0.29	0.29	0	0.47
11	13煤	0.5	4.23	0.09	0.36	2.11	0.68
10	砂质泥岩	5.0	4.19	0.20	0.30	0	0.45
9	细砂岩	6.0	4.13	0.22	0.33	0	0.43
8	粉砂岩	4.0	4.13	0.11	0.45	0	0.43
7	石灰岩	7.0	4.10	0.29	0.29	0	0.47
6	14煤	1.0	4.23	0.09	0.36	2.11	0.68
5	砂质泥岩	5.0	4.19	0.20	0.30	0	0.45
4	粉砂岩	3.0	4.13	0.11	0.45	0	0.43
3	中砂岩	7.0	4.13	0.14	0.35	0	0.43
2	泥岩	3.0	4.19	0.15	0.40	0	0.45
1	15煤	4.5	4.23	0.09	0.36	2.11	0.68

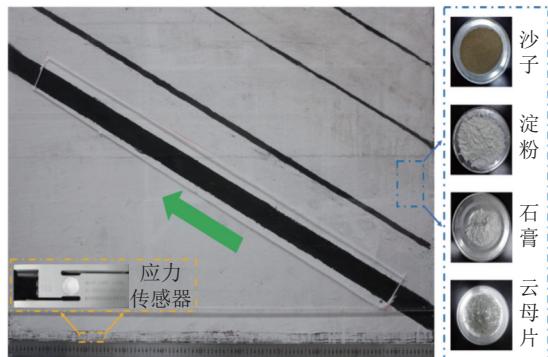


图1 二维物理试验模型

Fig.1 Two-dimensional physical experiment model

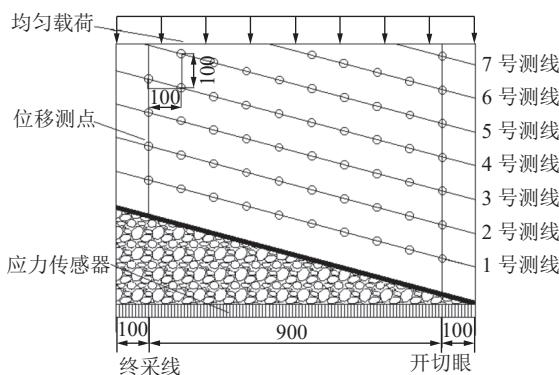


图2 应力传感器及测点布置

Fig.2 Stress sensor and measurement point layout

在模拟工作面推进时,为减小模型回采过程中边界效应对试验结果造成影响,先在模型两侧各留10 cm煤柱,接着开切眼宽8 cm,之后依次2、3 cm循环仰斜开采,确保与现场实际来压步距相似^[31]。每次开采结束,待覆岩发育稳定分别测量记录离层量、破断裂隙密度、煤层底板应力及岩层垮落形态。

2 试验结果

2.1 仰斜开采覆岩瓦斯缓渗区边界特征参数分布规律

2.1.1 覆岩离层量分布规律

覆岩离层量分布规律如图3所示,在工作面回采过程中,开切眼侧和工作面侧垮落覆岩受铰接梁限制,岩层间离层裂隙充分发育,为瓦斯气体扩散提供横向通道,伴随着上覆岩层垮落,岩层间离层裂隙重新达到稳定状态,岩层间裂隙离层量的突变为判断覆岩瓦斯缓渗区边界提供一定的支撑^[28]。由图3可知,在采空区两侧的裂隙区内,覆岩具有较大的离层量,而在采空区中部的缓渗区内,由于垮落覆岩受压实程度强,上下相邻岩层间的离层裂隙更易闭合消失,从而离层量较小。在缓渗区中部的全缓渗区内覆岩离层量均小于1.5 m,此区域内瓦斯气体的扩

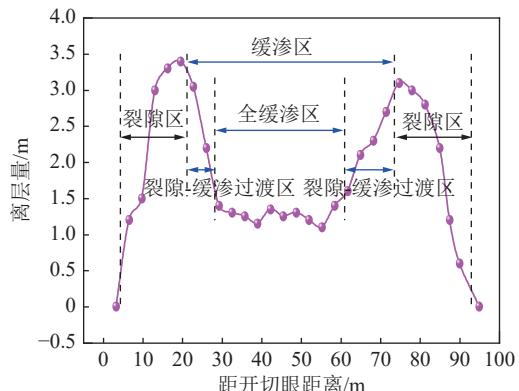


图3 覆岩离层量分布

Fig.3 Distribution of overburden separation amount

散将明显更为困难。

2.1.2 覆岩破断裂隙密度分布规律

覆岩破断裂隙密度分布规律如图4所示,随着工作面推进,受集中应力作用采场上部岩层周期性垮落,在各岩层内形成竖向破断裂隙,为瓦斯气体运移提供竖向通道,覆岩破断裂隙密度的突变为判断覆岩瓦斯缓渗区边界提供一定的支撑^[28]。由图4可知,在下滑效应的作用下,垮落岩块沿煤层倾向不断向开切眼侧进行滑落,造成工作面侧的垮落空间增大而开切眼侧垮落空间减少,同时受开切眼侧垮落岩块的限制,相邻岩块之间会形成反倾斜砌体结构,导致开切眼侧的破断裂隙密度明显大于工作面侧。此外,在缓渗区中部的全缓渗区内破断裂隙密度达到最小值2.5条/m,此区域内瓦斯气体的运移将明显受阻。

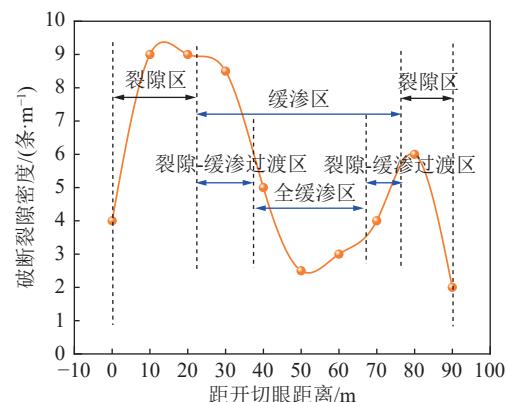


图4 覆岩破断裂隙密度分布

Fig.4 Distribution of overburden fracture density

2.1.3 煤层底板应力分布规律

煤层底板应力分布规律如图5所示,利用提前布置在试验台底部的应力传感器,对工作面推进过程的煤层底板应力进行采集。由图5可知,采空区

底板的应力相较于回采前明显变小且在裂隙区和缓渗区交界处,底板应力会有明显变化。这是由于在采空区两侧的裂隙区内,垮落覆岩之间易形成具有支撑作用的铰接结构,而在采空区中部的缓渗区内,下部已垮落覆岩可直接受到上部覆岩的压实作用,从而导致如图5中局部放大区域所示,中部缓渗区的应力集中系数比裂隙区的应力集中系数大,且在缓渗区中部的全缓渗区内应力集中系数达到最大值0.28。

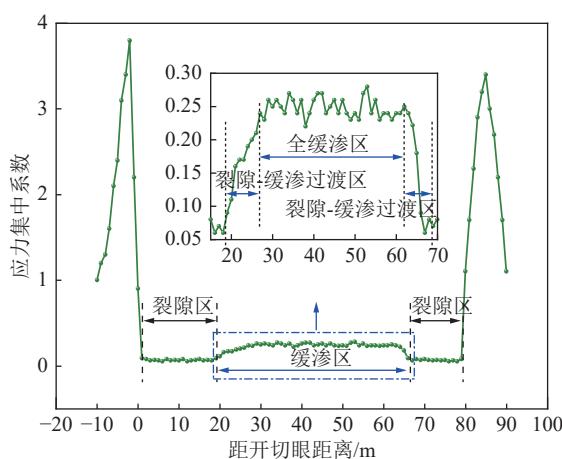


图5 煤层底板应力分布

Fig.5 Stress distribution of coal seam floor

通过对上述仰斜开采覆岩瓦斯缓渗区边界特征参数分布规律的研究,得到缓渗区宽度分布如图6所示。由图6可知,离层量对应工作面侧裂隙-缓渗过渡区的宽度最大为12.6 m,破断裂隙密度对应开切眼侧裂隙-缓渗过渡区的宽度最大为14.9 m,煤层底板应力对应全缓渗区的宽度最大为35.1 m。此外,离层量对应开切眼侧裂隙-缓渗过渡区的宽度小于工作面侧裂隙-缓渗过渡区的宽度,而破断裂隙密度

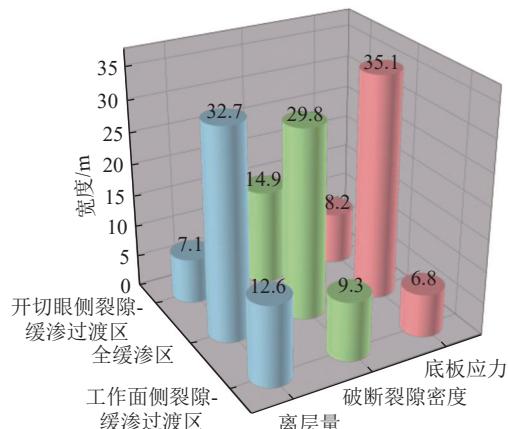


图6 覆岩瓦斯缓渗区宽度分布

Fig.6 Width distribution of overburden gas slow permeability zone

和煤层底板应力对应开切眼侧裂隙-缓渗过渡区的宽度均大于工作面侧裂隙-缓渗过渡区的宽度。

2.2 仰斜开采覆岩瓦斯缓渗区动态扩展规律

由于采动覆岩的裂隙分布具有很好的分形特征^[32],因此可用分形维数定量描述裂隙演化程度。模型开采过程中共发生包含初次来压在内的7次来压,每次来压后用高清相机记录覆岩垮落照片,然后再对其进行切片划分,最后将所划分切片逐次批量导入自研的“计盒-关联”分形维数一体化综合分析软件进行二值化处理和分形分析,所得分形维数越高,表明切片区域的裂隙发育情况越复杂。覆岩瓦斯缓渗区垮落角扩展规律如图7所示,由图7可知,覆岩瓦斯缓渗区两侧垮落角随工作面的持续推进均表现出逐渐减小的变化规律。具体表现为从缓渗区初次形成至缓渗区充分发育期间,缓渗区开切眼侧的垮落角从68.3°减小到44.7°,减小幅度34.6%;缓渗区工作面侧的垮落角从76.2°减小到53.5°,减小幅度29.8%。此外,受煤层倾角影响,每次来压工作面侧的垮落角均大于开切眼侧。

覆岩瓦斯缓渗区宽度扩展规律如图8所示,工作面开采后,上覆岩层发生破断及垮落,在两侧裂隙区内产生大量的离层、破断裂隙,而采区中部缓渗区由于受压实程度强,裂隙不断闭合,造成在两者交界处横向分形维数发生明显变化。由图8可知,覆岩瓦斯缓渗区宽度随工作面的持续推进表现出逐渐增大的变化规律。具体表现为从缓渗区初次形成至缓渗区充分发育期间,缓渗区的宽度从16.3 m增大到52.1 m,缓渗区沿横向不断发生扩展。

覆岩瓦斯缓渗区高度扩展规律如图9所示,受采动影响,覆岩发生垮落在其顶部形成铰接结构,由于铰接结构下部覆岩受压实作用强,可得缓渗区上边界处于每次来压形成铰接结构的下部。由于铰接结构区域分形维数大,在缓渗区顶部与铰接结构交界处纵向分形维数发生明显增高。由图9可知,覆岩瓦斯缓渗区高度随工作面的持续推进表现出逐渐增大的变化规律。具体表现为从缓渗区初次形成至缓渗区充分发育期间,缓渗区的高度从19.2 m增大到38.4 m,缓渗区沿纵向不断发生扩展。

3 讨 论

3.1 覆岩瓦斯缓渗区精细分域方法

3.1.1 覆岩瓦斯缓渗区分域准则及流程

煤层在开采过程中,上覆岩层会发生不同程度的复杂移动和变形,同时伴随着离层裂隙与破断裂

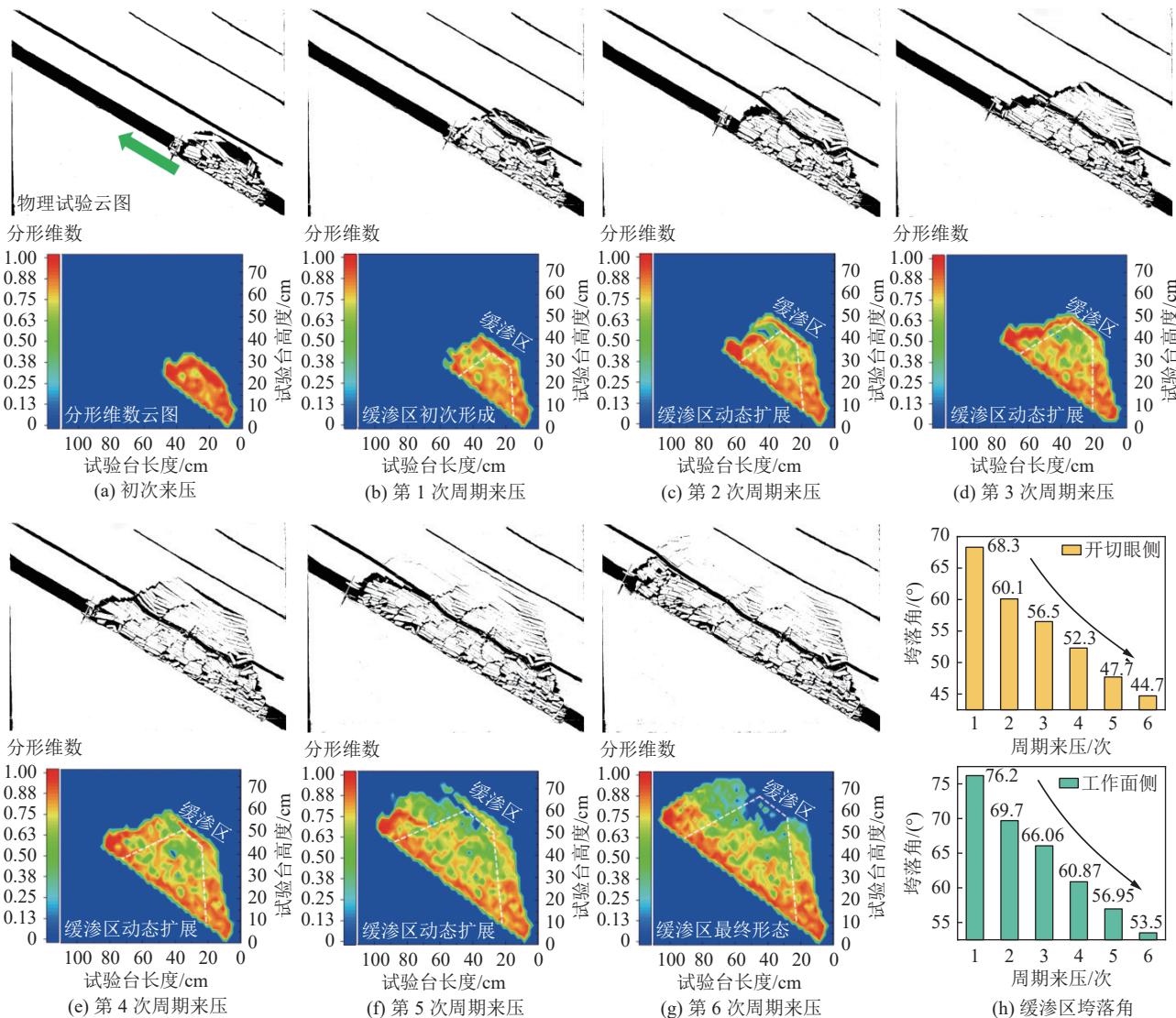


图7 覆岩瓦斯缓渗区垮落角扩展规律

Fig.7 Caving angle expansion law of overburden gas slow permeability zone

隙的产生。通过对覆岩瓦斯缓渗区动态扩展规律的研究,构建如图10所示覆岩瓦斯缓渗区分域准则。

为更好地对覆岩瓦斯缓渗区空间位置进行界定,按照构建的覆岩瓦斯缓渗区分域准则对缓渗区的上边界和外边界进行理论计算^[33-34]。

1)缓渗区上边界模型。在采空区纵向方向,将缓渗区上边界定义为距煤层底板的距离,记为 S_u :

$$S_u = \sum_{i=1}^i h_i \quad (1)$$

式中: h_i 为第 i 层岩层的厚度, m。

采场上覆第 i 层悬空岩层可用固支梁结构进行代替,且岩层上部均匀施加有载荷 q_i ,则上覆第 i 层岩层的悬空距 l_{si} 与回采工作面推进距离 L 之间关系可用式(2)表示,其发生初次破断时的极限破断距

l_{simax} 可用式(3)表示,具体如下:

$$l_{si} = L - \left(\sum_{i=1}^{i-1} h_i \cot \beta_{q1} + \sum_{i=1}^{i-1} h_i \cot \beta_{q2} \right) \quad (2)$$

$$l_{simax} = h_i \sqrt{2R_T/q_i} \quad (3)$$

式中: β_{q1} 、 β_{q2} 分别为工作面上下两巷处覆岩破断角, ($^{\circ}$); R_T 为第 i 层岩层的极限抗拉强度, MPa; q_i 为岩层承受载荷, kN, 根据关键层理论^[35], $q_i = \frac{E_i h_i^3 (\gamma_i h_i + \dots + \gamma_n h_n)}{E_i h_i^3 + E_{i+1} h_{i+1}^3 + \dots + E_n h_n^3}$; γ_i 为岩层容重, kN/m^3 ; E_i 为岩层的弹性模量, GPa。

假设岩层“砌体梁”结构向上传递至上覆第 i 层硬岩层时支撑其弹性基础满足 Winkler 地基模型,则上覆第 i 层硬岩层达到极限破断距时的最大弯曲下沉量 y_i 可用式(4)表示^[35],其下方的空间自由高度 A_i 可用式(5)表示,具体如下:

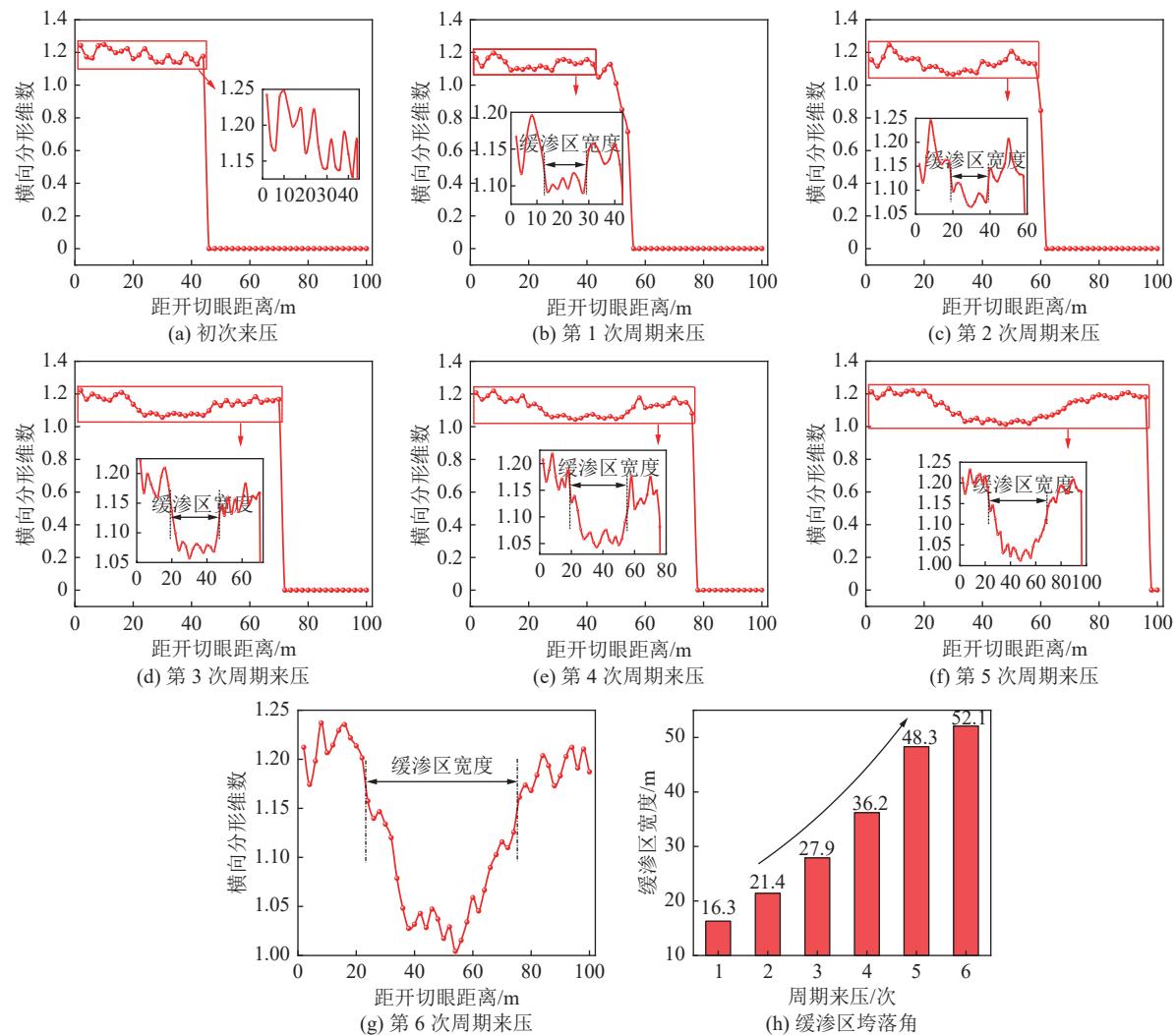


图 8 覆岩瓦斯缓渗区宽度扩展规律

Fig.8 The width expansion law of overburden gas slow permeability zone

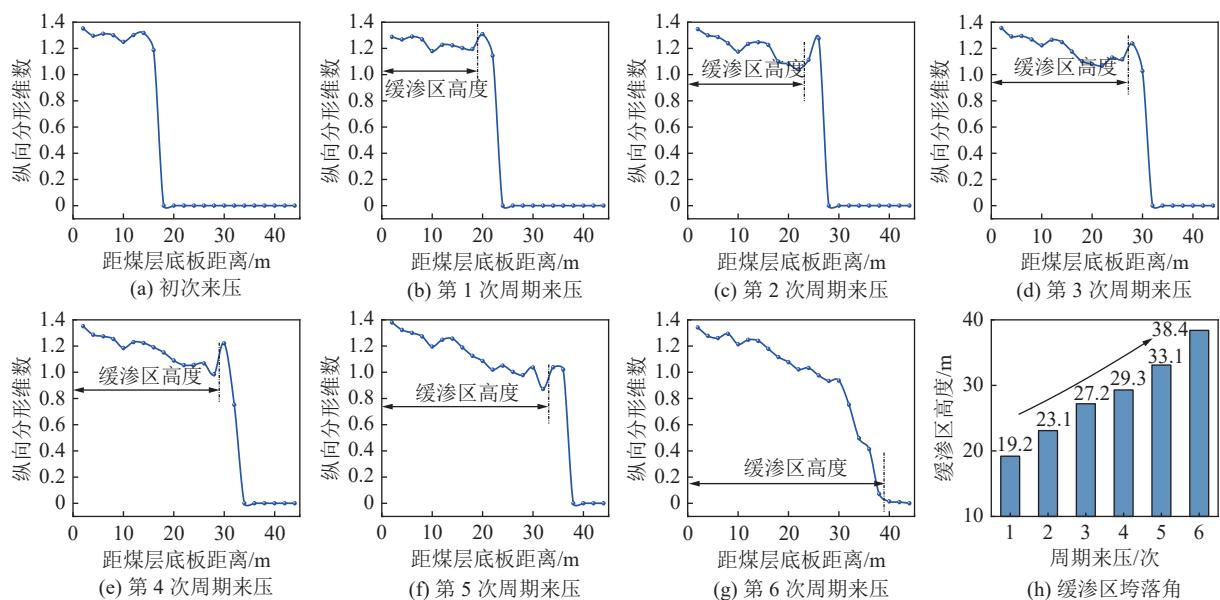


图 9 覆岩瓦斯缓渗区高度扩展规律

Fig.9 Height expansion law of overburden gas slow permeability zone

$$y_i = \frac{q_i}{E_i I_i} \left[\frac{12\alpha-1}{24} l_h 4 + \left(\frac{\sqrt{2}}{\omega l_h} + \frac{1}{2} - \alpha \right) \frac{l_h^2}{\omega^2} \right] \quad (4)$$

$$\Delta_i = M - \left(\sum_{i=1}^{i-1} h_i (k_{si} - 1) \right) \quad (5)$$

式中: I_i 为岩层惯性矩, m^4 ; l_h 为岩层极限破断距之半, m ; $\omega = (K/E_i I_i)^{1/4}$, $\alpha = (\sqrt{2}\omega^2 l_h^2 + 6\omega l_h + 6\sqrt{2})/[6\omega l_h \times (2 + \sqrt{2}\omega l_h)]$, K 为弹性地基系数, $K = (E_0/d_0)^{1/2}$, E_0 为地基弹性模量, GPa , d_0 为垫层厚度, m ; k_{si} 为岩层残余碎胀系数; M 为煤层采高, m 。

当采场上覆第 i 层岩层发生破断, 则需符合以下条件:

$$\begin{cases} l_{si} > L_{simax} \\ y_i < \Delta_i \end{cases} \quad (6)$$

将式(2)—式(5)代入式(6), 即:

$$\begin{cases} L - \left(\sum_{i=1}^{i-1} h_i \cot \beta_{q1} + \sum_{i=1}^{i-1} h_i \cot \beta_{q2} \right) > h_i \sqrt{\frac{2R_T}{q_i}} \\ \frac{q_i}{E_i I_i} \left[\frac{12\alpha-1}{24} l_h 4 + \left(\frac{\sqrt{2}}{\omega l_h} + \frac{1}{2} - \alpha \right) \frac{l_h^2}{\omega^2} \right] < M - \left(\sum_{i=1}^{i-1} h_i (k_{si} - 1) \right) \end{cases} \quad (7)$$

因此, 当工作面采高和岩层力学参数确定后, 可利用式(7)对岩层是否满足破断进行判据, 从而对缓渗区的上边界进行确定。

2) 缓渗区外边界模型。在采空区横向方向, 缓渗区外边界定义为距临近侧煤柱的水平距离, 记为 S_o 。由于区域呈环形, 因此, 需对走向、倾向两个方向的外边界进行界定, 其中走向、倾向方向的外边界分别记为 S_{os} 和 S_{od} :

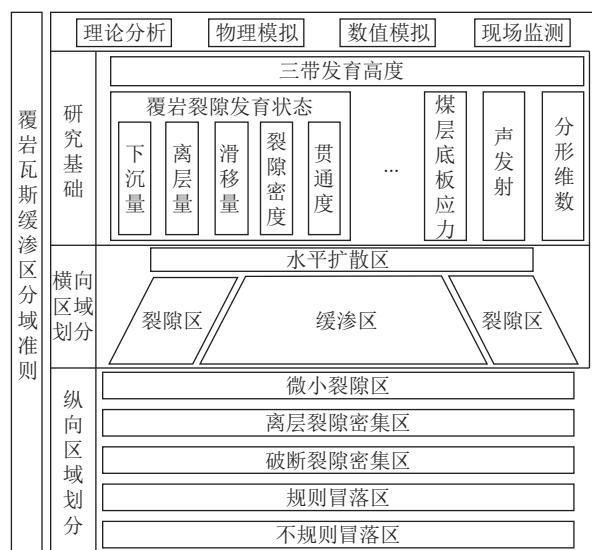


图 10 覆岩瓦斯缓渗区分域准则

Fig.10 Division criteria of overburden gas slow permeability zone

$$\begin{cases} S_{os} = F_{os} + F_w \\ S_{od} = F_{od} + F_w \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_{os} 、 F_{od} 为走向、倾向方向裂隙区外边界距临近侧煤柱的水平距离, m ; F_w 为裂隙区的宽度, m 。

由于缓渗区的外边界即裂隙区的内边界, 因此首先对裂隙区走向、倾向方向的外边界进行确定。在走向方向上, 走向覆岩破断角 β_s 可用式(9)计算; 在倾向方向上, 根据覆岩移动变形特征, 倾向覆岩破断角 β_d 需按照一定系数进行角度修正^[36], 具体如下:

$$\beta_s = \arccot \frac{\sum_{j=1}^m h_j \cot \beta_j}{\sum_{j=1}^m h_j} = \sum_{j=1}^n h_k \cot \beta_k \quad (9)$$

$$\beta_d = \arccot \frac{\sum_{j=1}^m h_j \cot \beta_j}{\sum_{j=1}^m h_j} = \sum_{j=1}^n h_k \cot \beta_k + kA \quad (10)$$

式中: m 和 n 分别为第一关键层下方直接顶板岩层数量和煤层至缓渗区上边界范围内的关键层数量; h_j 、 β_j 和 h_k 、 β_k 为分别为第 j 层岩层的厚度与破断角与第 k 层关键层及其载荷层的总厚度与组合破断角; k 为与覆岩性质有关的修正系数, 取值 $0.3 \sim 0.8$; A 为煤层倾角, 上、下山侧分别取正、负值。

因此, 当采场覆岩破断至第 i 层岩层时, 裂隙区外边界距该侧煤柱水平距离 F_{os} 和 F_{od} 可用式(11)进行计算, 具体如下:

$$\begin{cases} F_{os} = H_i \cot \beta_s \\ F_{od} = H_i \cot (\beta_d + A) \cos A + H_i \sin A \end{cases} \quad (11)$$

式中: H_i 为第 i 层岩层与煤层的法向距离, m 。

在裂隙区外边界已经界定的基础上, 只需确定其宽度即可对缓渗区的外边界进行确定。假设区域内第一层岩层发生周期破断时的岩块长度一致 ($l_1 = l_2 = \dots = l_n = l$), 则当第 $n+1$ 破断岩块呈水平分布时, 裂隙区宽度 F_w 可用式(12)进行计算:

$$F_w = nl \quad (12)$$

设 l_1 岩块破断后其回转角为 θ_1 , 结合关键块体“S-R”稳定性^[35], 则:

$$\sin \theta_1 = \frac{W_1}{l} = \frac{1}{l} \left\{ M - \left[\sum_{r=0}^{r-1} h_r (k_r - 1) \right] - \sum h (k_z - 1) \right\} \quad (13)$$

式中: W_1 为第一破断岩块下沉值, m ; l 为破断岩块长度, $l = h_i \sqrt{R_T/3q_i}$, m ; h_r 为第 r 层基本顶岩层的厚度,

m ; k_r 为基本顶岩层及其上覆岩层的碎胀系数; Σh 为直接顶岩层的厚度, m ; k_z 为直接顶岩层的碎胀系数。

由“砌体梁”全结构计算得到的位移规律可知，破断岩块的回转角度满足：

$$\theta_2 \approx \frac{1}{4} \theta_1, \theta_3 \approx \left(\frac{1}{4}\right)^2 \theta_1, \dots, \theta_n \approx \left(\frac{1}{4}\right)^{n-1} \theta_1 \quad (14)$$

研究表明,当 θ_n 约为3%时^[33],覆岩离层裂隙和

$$F_w = h_i \sqrt{\frac{R_T}{3q_i}} \left\{ 1 - \frac{\ln 0.003}{\ln 4} + \frac{1}{\ln 4} \ln \arcsin \frac{M - \left[\sum_{r=0}^{r-1} h_r (k_r - 1) \right] - \sum h (k_z - 1)}{h_i \sqrt{\frac{R_T}{3q_i}}} \right\} \quad (16)$$

因此,通过联立式(8)、式(11)和式(16),即可对覆岩破断至第 i 层岩层时走向和倾向缓渗区的外边界进行确定。

根据构建的覆岩瓦斯缓渗区分域准则,结合缓

破断裂隙逐渐闭合, 第 $n+1$ 断裂岩块进入缓渗区。此时, 位于裂隙区范围内的破断岩块数量 n 可用式(14)计算:

$$n = 1 - \frac{\ln 0.003 - \ln \theta_1}{\ln 4} \quad (15)$$

联立式(12)、式(13)和式(15),可得裂隙区宽度 F_w 为:

$$n \frac{M - \left[\sum_{r=0}^{r-1} h_r (k_r - 1) \right] - \sum h (k_z - 1)}{h_i \sqrt{\frac{R_r}{3q_i}}} \quad (16)$$

渗区上边界、外边界理论计算公式与物理相似模拟试验研究结果,对覆岩瓦斯缓渗分区域流程进行设计,如图 11 所示,图 11 中, F_h 为裂隙发育高度; O_d 为距开切眼距离。

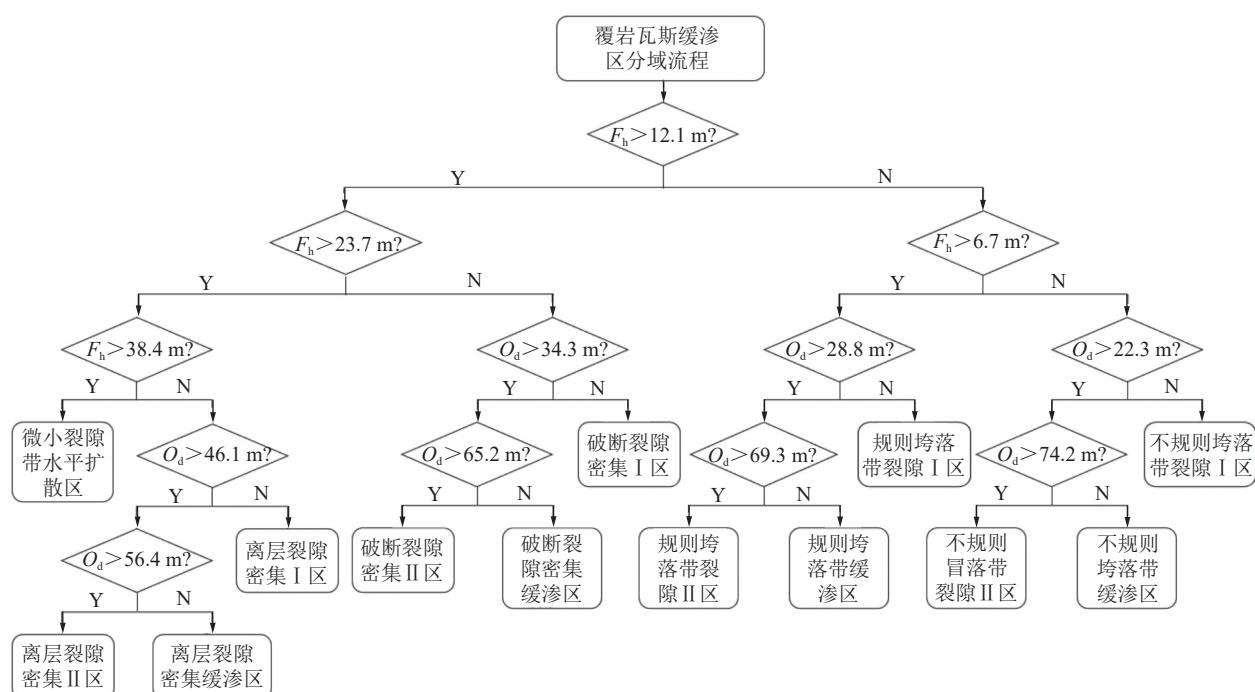


图 11 覆岩瓦斯缓渗区分域流程

Fig 11. Division process of overburden gas slow permeability zone

3.1.2 覆岩瓦斯缓渗区沿横纵向区域划分

为更好的开展覆岩瓦斯缓渗区分形特征研究,依据上节建立的覆岩瓦斯缓渗区分域准则及流程将模型缓渗区沿横向(工作面推进方向)和纵向(垂直于煤层底板向上方向)进行区域划分。其中横向用 H(Horizontal)表示,纵向用 V(Vertical)表示,通过分形理论以横向和纵向分形维数变化来定量研究缓渗区演化规律。

首先根据确定出的模型缓渗区边界,以缓渗区

底部边界宽度作为长,缓渗区上边界高度作为宽,对所得缓渗区范围进行截取,然后对其沿横向和纵向均按照 2 m 进行划分,如图 12 所示。其中横向划分为 26 个子区域,沿工作面推进方向依次记为 H1-H26;纵向划分为 19 个子区域,沿垂直于煤层底板向上方向依次记为 V1-V19。最后按照缓渗区划分结果对每个横向和纵向子区域的离层量、破断裂隙密度、应力集中系数及分形维数进行求解。

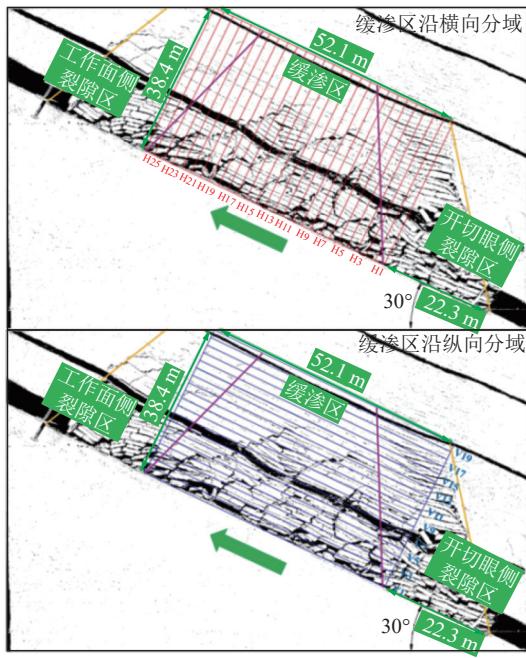


图 12 覆岩瓦斯缓渗区沿横纵向区域划分

Fig.12 Division of overburden gas slow permeability zone along horizontal and vertical areas

3.2 覆岩瓦斯缓渗区沿横纵向分形维数与边界特征参数之间的最大关联度分析

由上文研究可知,覆岩瓦斯缓渗区沿横纵向分形维数与离层量、破断裂隙密度及应力集中系数之间的变化存在一定的关联性。因此文章引入灰色理论,通过计算系统中的比较序列与参考序列之间的关联度来度量数据之间的关联强度情况,从而对覆岩瓦斯缓渗区沿横纵向分形维数与离层量、破断裂隙密度及应力集中系数之间的最大关联度进行确定。灰色关联分析的基本步骤如下^[37]:

1)根据研究目的对灰色关联分析比较体系进行确定。

设 v 个方案的 w 个原始指标值可构成如下原始方案比较矩阵 \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1w} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2w} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{v1} & x_{v2} & \dots & x_{vw} \end{bmatrix} \quad (17)$$

第 b 个方案的 w 个指标值构成集合 $X_b = (x_{b1}, x_{b2}, \dots, x_{bw})$ ($b = 1, 2, \dots, v$)

2)确定参考序列:

$$X_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0w}) \quad (18)$$

3)对指标数据进行无量纲化:

$$x_{bc}^* = \frac{x_{bc}}{\sum_{c=1}^w x_{bc}} (b = 0, \dots, v; c = 1, \dots, w) \quad (19)$$

经无量纲化处理的数据序列构成如下矩阵:

$$\mathbf{X}^* = \begin{bmatrix} X_0^* \\ X_1^* \\ X_2^* \\ \vdots \\ X_v^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{01}^* & X_{02}^* & \dots & X_{0w}^* \\ X_{11}^* & X_{12}^* & \dots & X_{1w}^* \\ X_{21}^* & X_{22}^* & \dots & X_{2w}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{v1}^* & X_{v2}^* & \dots & X_{vw}^* \end{bmatrix} \quad (20)$$

4)逐个计算每个被评价对象指标序列(比较序列)与参考序列对应元素的绝对差值,即 $|X_{0c}^* - X_{bc}^*|$ ($b = 1, \dots, v; c = 1, \dots, w$),并确定 $\min_b \min_c |X_{0c}^* - X_{bc}^*|$ 和 $\max_b \max_c |X_{0c}^* - X_{bc}^*|$ 。

5)计算每个比较序列与参考序列对应元素的关联系数:

$$\xi_{bc} = \frac{\min_b \min_c |X_{0c}^* - X_{bc}^*| + \rho \max_b \max_c |X_{0c}^* - X_{bc}^*|}{|X_{0c}^* - X_{bc}^*| + \rho \max_b \max_c |X_{0c}^* - X_{bc}^*|} \quad (21)$$

式中: ρ 为区分系数, $\rho \in [0, 1]$, 通常取值 0.5。

从而可得到关联系数矩阵:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \dots & \xi_{1w} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \dots & \xi_{2w} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{v1} & \xi_{v2} & \dots & \xi_{vw} \end{bmatrix} \quad (22)$$

6)计算每个比较序列与参考序列对应元素的关联系数均值:

$$r_b = \frac{1}{w} \sum_{c=1}^w \xi_{bc} \quad (23)$$

从而可得到关联度矩阵为:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_v \end{bmatrix} \quad (24)$$

由于分形维数可以很好的反映覆岩裂隙发育程度,因此在研究缓渗区沿横纵向分形维数与离层量、破断裂隙密度及应力集中系数的变化关系时,确定反映系统行为特征的参考数列为距开切眼(煤层底板)不同距离的横(纵)向子域所对应的分形维数,影

响系统行为的比较数列为距开切眼(煤层底板)不同距离的横(纵)向子域所对应的离层量、破断裂隙密度及应力集中系数。按照上式进行求解可得关联度如下:

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.93 \\ 0.79 \\ 0.87 \end{bmatrix} r^* = \begin{bmatrix} r_1^* \\ r_2^* \\ r_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.91 \\ 0.77 \\ 0.83 \end{bmatrix}$$

式中: $r_1(r_1^*)$ 、 $r_2(r_2^*)$ 、 $r_3(r_3^*)$ 分别为缓渗区沿横(纵)向分形维数与离层量、破断裂隙密度及应力集中系数之间的关联度。

由计算结果可知,缓渗区沿横纵向分形维数与离层量、破断裂隙密度及应力集中系数之间的关联度排序均为离层量>应力集中系数>破断裂隙密度,即离层量所对应的关联度均最大,缓渗区沿横纵向分形维数变化均与离层量变化相关性最强。

3.3 覆岩瓦斯缓渗区沿横纵向分形维数与离层量之间的变化规律分析

根据灰色关联分析结果,得到覆岩瓦斯缓渗区沿横纵向分形维数变化均与离层量变化相关性最强。为验证理论计算的准确性,按照覆岩瓦斯缓渗区划分结果对缓渗区沿横纵向分形维数与离层量之间的变化规律进行研究,如图 13 所示。

由图 13a 可知,随着横向子区域与开切眼间距的不断增大,在采动影响下,缓渗区两侧区域(裂隙-缓渗过渡区)易与相邻两侧的裂隙区形成铰接结构,造成缓渗区两侧区域产生大量离层裂隙,而在缓渗区中部(全缓渗区),旧跨落岩层不断被新跨落岩层挤压压实,造成离层裂隙不断发生闭合,使得缓渗区沿横向分形维数与离层量均总体呈现出先减小后增大的变化趋势。由图 13b 可知,随着纵向子区域与煤层底板距离的不断增大,空洞逐渐发生闭合,岩层垮落空间高度不断降低,在垂直于煤层底板向上方向覆岩垮落范围不断缩小,造成离层裂隙不断减少,且覆岩压实作用也将更加显著,使得缓渗区沿纵向分形维数与离层量均总体呈现出逐渐减小的变化趋势。根据试验分析结果,得到缓渗区沿横纵向分形维数变化均与离层量变化具有一致性,从而验证了灰色关联分析理论计算的准确性。因此可用离层量变化曲线来更好表征缓渗区演化规律,在后期确定卸压瓦斯抽采钻孔(巷道)终孔(巷)时,可通过现场观测覆岩离层量对缓渗区边界进行判断,有利于提升卸压瓦斯抽采效率。

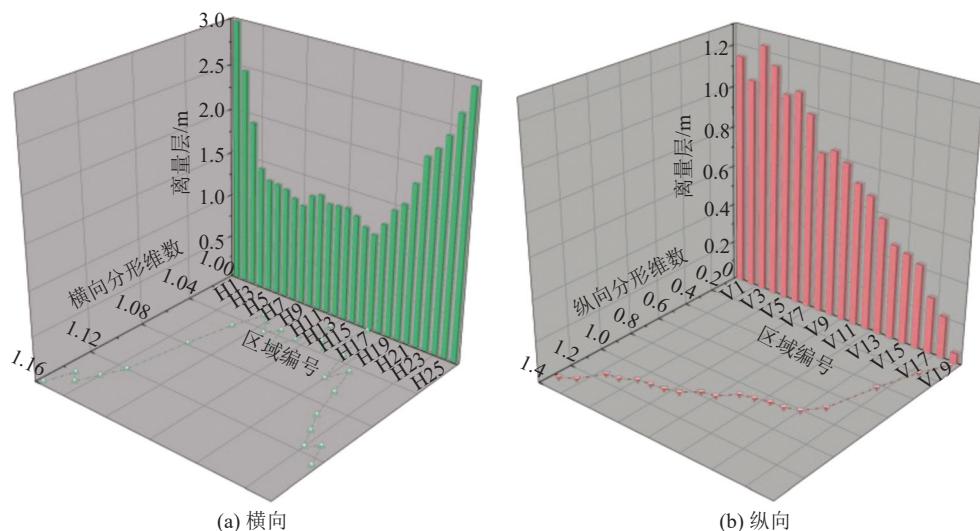


图 13 缓渗区沿横纵向分形维数与离层量之间的变化规律

Fig.13 Variation law between horizontal and vertical fractal dimension and separation amount in slow permeability zone

4 结 论

1) 离层量对应工作面侧裂隙-缓渗过渡区的宽度最大为 12.6 m, 破断裂隙密度对应开切眼侧裂隙-缓渗过渡区的宽度最大为 14.9 m, 煤层底板应力对应全缓渗区的宽度最大为 35.1 m。此外, 离层量对应开切眼侧裂隙-缓渗过渡区的宽度小于工作面侧裂

隙-缓渗过渡区的宽度,而破断裂隙密度和煤层底板应力对应开切眼侧裂隙-缓渗过渡区的宽度均大于工作面侧裂隙-缓渗过渡区的宽度。

2) 覆岩瓦斯缓渗区在第一次周期来压后初步形成,其后每次周期来压时,覆岩瓦斯缓渗区两侧的垮落角均不断减小而宽度和高度均不断增大。具体表

现为从缓渗区初次形成至缓渗区充分发育期间,缓渗区开切眼侧的垮落角从68.3°减小到44.7°,缓渗区工作面侧的垮落角从76.2°减小到53.5°;缓渗区的宽度从16.3 m增大到52.1 m;缓渗区的高度从19.2 m增大到38.4 m。

3)根据建立的覆岩瓦斯缓渗区分域准则及流程,结合灰色关联分析方法,得到缓渗区沿横纵向分形维数变化均与离层量变化相关性最强,对应关联度排序分别为 $r_1=0.93>r_3=0.87>r_2=0.79$; $r_1^*=0.91>r_3^*=0.83>r_2^*=0.77$,并通过物理模拟试验验证了灰色关联分析理论计算的准确性。

参考文献(References):

- [1] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research progress on mechanics and mining theory of deep rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 林海飞,李树刚,赵鹏翔,等.我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展[J].煤炭科学技术,2018,46(1):28-35.
LIN Haifei, LI Shugang, ZHAO Pengxiang, et al. Research progress on pressure released gas drainage technology of mining cracking zone in overburden strata of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 28-35.
- [3] 李树刚,杨二豪,林海飞,等.深部开采卸压瓦斯精准抽采体系构建及实践[J].煤炭科学技术,2021,49(5):1-10.
LI Shugang, YANG Erhao, LIN Haifei, et al. Construction and practice of accurate gas drainage system for pressure relief gas in deep mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 1-10.
- [4] GHABRAIE B, REN G, SMITH J V. Characterising the multi-seam subsidence due to varying mining configuration, insights from physical modelling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 93(3): 269-279.
- [5] DAVID K, TIMMS W A, BARBOUR S L, et al. Tracking changes in the specific storage of overburden rock during longwall coal mining[J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 304-320.
- [6] 钱鸣高,许家林.覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J].煤炭学报,1998,23(5):466-469.
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “O-shape” circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlaying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 466-469.
- [7] 钱鸣高,许家林.煤炭开采与岩层运动[J].煤炭学报,2019,44(4):973-984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Coal mining and rock movement[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973-984.
- [8] YUAN Liang. Theory and practice of integrated coal production and gas extraction[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2015, 2(1): 3-11.
- [9] GUO Hua, YUAN Liang. An integrated approach to study of strata behaviour and gas flow dynamics and its application[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2015, 2(1): 12-21.
- [10] 袁亮,郭华,沈宝堂,等.低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体[J].煤炭学报,2011,36(3):357-365.
YUAN Liang, GUO Hua, SHEN Baotang, et al. Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of multiple coal seams with low permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 357-365.
- [11] 杨科,谢广祥.采动裂隙分布及其演化特征的采厚效应[J].煤炭学报,2008,33(10):1092-1096.
YANG Ke, XIE Guangxiang. Caving thickness effects on distribution and evolution characteristics of mining induced fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1092-1096.
- [12] 李树刚,林海飞,赵鹏翔,等.采动裂隙带动态演化及煤与甲烷共采[J].煤炭学报,2014,39(8):1455-1462.
LI Shugang, LIN Haifei, ZHAO Pengxiang, et al. Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1455-1462.
- [13] 李树刚,徐培耘,赵鹏翔,等.采动裂隙带时效诱导作用及卸压瓦斯抽采技术[J].煤炭科学技术,2008,46(9):146-152.
LI Shugang, XU Peiyun, ZHAO Pengxiang, et al. Aging induction and pressure relief gas extraction technology of mining-induced fracture ellipsoid strip[J]. Coal science and Technology, 2008, 46(9): 146-152.
- [14] 李树刚,刘李东,赵鹏翔,等.综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析[J].煤炭科学技术,2022,50(1):95-104.
LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 95-104.
- [15] 赵鹏翔,刘李东,李树刚,等.煤层倾角对仰斜综采工作面覆岩压实区演化规律的影响[J].煤炭科学技术,2021,49(11):65-72.
ZHAO Pengxiang, LIU Lidong, LI Shugang, et al. Dip angle effect of evolution coal seam in overburden compacted area of fully mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 65-72.
- [16] 刘洪永,程远平,周红星,等.综采长壁工作面推进速度对优势瓦斯通道的诱导与控制作用[J].煤炭学报,2015,40(4):809-815.
LIU Hongyong, CHENG Yuanping, ZHOU Hongxing, et al. Induction and control effect of advancing speed of longwall working face in fully mechanized mining on dominant gas channel[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 809-815.
- [17] 伍永平,解盘石,任世广.大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征分析[J].煤炭学报,2010,35(2):182-184.
WU Yongping, XIE Panshi, REN Shiguang. Analysis of asymmetric structure around coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 182-184.

- [18] LUO Shenghu, WANG Tong, WU Yongping, *et al.* Internal mechanism of asymmetric deformation and failure characteristics of the roof for longwall mining of a steeply dipping coal seam[J]. *Archives of Mining Science*, 2021, 66(1): 101–124.
- [19] 解盘石, 屈利利, 伍永平, 等. 大倾角近距离煤层群长壁采场顶板破断机理[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 65–74.
- XIE Panshi, QU Lili, WU Yongping, *et al.* Roof breaking mechanism of longwall stope with steeply dipping contiguous coal seam group[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 65–74.
- [20] ZHOU Shaoping, WU Kan, ZHOU Dawei, *et al.* Experimental Study on Displacement Field of Strata Overlying Goaf with Sloping Coal Seam[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34(6): 1847–1856.
- [21] XIE Heping, SANDERSON D J, PEACOCK D C P. A fractal model and energy dissipation for en echelon fractures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1994, 48(5): 655–662.
- [22] 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*, 1991, 18(2): 29–33.
- XIE Heping, YU Guangming, YANG Lun, *et al.* Research on the fractal effects of crack network in overburden rock stratum[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1991, 18(2): 29–33.
- [23] DENG Guangdi, XIE Heping, GAO Mingzhong, *et al.* Numerical simulation on the evolution of mining-induced fracture network in a coal seam and its overburden under the top coal caving method[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 5: 1–14.
- [24] 周宏伟, 张涛, 薛东杰, 等. 长壁工作面覆岩采动裂隙网络演化特征[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(12): 1957–1962.
- ZHOU Hongwei, ZHANG Tao, XUE Dongjie, *et al.* Evolution of mining-induced crack network in overburden strata of longwall face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(12): 1957–1962.
- [25] WANG Cheng, ZHANG Nianchao, HAN Yafeng, *et al.* Experiment research on overburden mining-induced fracture evolution and its fractal characteristics in ascending mining[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(1): 13–21.
- [26] 杨滨滨, 袁世冲, 郑德志, 等. 近距离煤层重复采动覆岩裂隙时空演化特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 255–263.
- YANG Binbin, YUAN Shichong, ZHENG Dezhi, *et al.* Spatial and temporal characteristics of overburden fractures due to repeated mining in close distance coal seams[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(2): 255–263.
- [27] 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 and Safety Engineering*, 2021, 38(1): 9–18, 30.
- [28] ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, *et al.* Fractal characteristics of gas migration channels at different mining heights[J]. *Fuel*, 2019, 271: 479–487.
- [29] ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, *et al.* Fractal characteristics of methane migration channels in inclined coal seams[J]. *Energy*, 2021, 225: 127–139.
- [30] ZHAO Pengxiang, WANG Jianan, LI Shugang, *et al.* Effects of recovery ratio on the fracture evolution of the overburden pressure-relief gas migration channel for a fully mechanized working face[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(2): 1011–1026.
- [31] 赵鹏翔, 卓日升, 李树刚, 等. 综采工作面推进速度对瓦斯运移优势通道演化的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(7): 99–108.
- ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, *et al.* The influence of the speed of fully mechanized mining face on the evolution of the dominant channel of gas migration[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(7): 99–108.
- [32] 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): 1023–1031.
- 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): 1023–1031.
- [33] 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]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(4): 817–826.
- [34] 郭文兵, 赵高博, 白二虎. 煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11): 3657–3666.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu. Critical failure of overlying rock strata and its criteria induced by high-intensity longwall mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3657–3666.
- [35] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2015: 65–99.
- QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mine pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2015: 65–99.
- [36] 郭文兵. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京: 应急管理出版社, 2019: 1–8.
- GUO Wenbing. Coal mining damage and protection[M]. Beijing: Emergency Management Press, 2019: 1–8.
- [37] 白利娜, 曾家瑶, 高为. 基于灰色关联分析的盘向斜煤层气有利井区优选[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(4): 169–173.
- BAI Li'na, ZENG Jiayao, GAO Wei. Optimization of favorable well of CBM based on grey correlation analysis in Panguan syncline[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(4): 169–173.