

不同破断距下开采覆岩裂隙网络分形特征研究

刘俊熙¹,张士川^{1,2},沈宝堂¹,肖越³,李杨杨¹,张有成¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102209;

3. 山东东山古城煤矿有限公司, 山东 济宁 272100)

摘要:为研究神东矿区不同破断距下开采覆岩裂隙网络分形特征,分析了基本顶周期破断距影响因素,选取大柳塔煤矿 52505 和上湾煤矿 12401 工作面进行物理相似模拟实验,探究了不同破断距影响下覆岩裂隙网络分布特征,借助 Matlab 软件获取不同覆岩裂隙网络分布分形维数,定量描述了覆岩裂隙发育特征,进一步探讨了覆岩裂隙传播影响下不同岩层沉降规律。研究表明:影响基本顶周期破断距主要因素包括基本顶厚度、抗拉强度以及承载载荷;大柳塔 52505 工作面、上湾 12401 工作面模拟开采平均破断距分别为 20 和 30.4 m;不同破断距下覆岩裂隙网络的分形维数随煤层工作面推进呈现阶梯形增长态势,分形维数可较好地表征覆岩裂隙分布。两工作面最高离层裂隙发育高度与分形维数变化趋势均近似呈非线性正相关;不同破断距对覆岩整体裂隙发育扩展趋势影响显著,工作面回采前期大柳塔 52505 工作面分形维数相对较低,回采中后期则相反,破断距小,覆岩整体裂隙发育程度相对较高;两工作面覆岩沉降曲线呈“凸”型,近似以采空区中部对称。

关键词:破断距;覆岩运动;覆岩裂隙网络;分形维数;周期来压

中图分类号:TD325

文献标志码:A

Study on fractal characteristics of fracture network in overlying strata mining under different breaking distances

LIU Junxi¹, ZHANG Shichuan^{1,2}, SHEN Baotang¹, XIAO Yue³, LI Yangyang¹, ZHANG Youcheng¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China;

3. Shandong Dongshan Gucheng Coal Mine Co. Ltd, Jining 272100, China)

Abstract: To investigate the fractal characteristics of the fracture network in overlying strata mining under different breaking distances in Shandong mining area, this study summarized and analyzed the influencing factors of basic roof periodic breaking distance. The 52505 working face of Daliuta coal mine and the 12401 working face of Shangwan coal mine were selected for physical similarity simulation experiments and the distribution characteristics of the overburden fracture network under different breaking distances were explored. With the help of Matlab, the fractal dimension values of different overburden fracture network distributions were obtained and the development characteristics of overburden fracture were quantitatively described. The settlement law of different strata under the influence of overburden fracture propagation was further discussed. The results show that the main factors affecting the periodic fracture distance of the main roof include the thickness, the tensile strength, and the bearing load of the

收稿日期:2023-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52004147);山东省自然科学基金项目(ZR2020QE129);煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室 2020 年开放基金项目(GJNY-20-113-19)

作者简介:刘俊熙(1998—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

张士川(1989—),男,山东济宁人,副教授,博士,主要从事矿井水害防治与岩体力学等方面的教学和科研工作,本文通信作者。E-mail:zsc373260186@sdust.edu.cn

main roof. The average breaking distances of simulated mining in Daliuta 52505 working face and Shangwan 12401 working face are 20 and 30.4 m respectively. The fractal dimension of the overburden fracture network under different breaking distances shows a stepwise growth trend with the advancement of the coal seam working face, and the fractal dimension can better characterize the distribution of overburden fractures. The variation trend of the highest separation fracture development height and fractal dimension of the two working faces is an approximately nonlinear positive correlation. Different breaking distances have a significant impact on the development and expansion trend of the overall fracture of the overlying strata. The fractal dimension value of Daliuta 52505 working face is relatively low in the early stage of working face mining, but it is opposite in the middle and late stages of mining. The fracture distance is small, and the overall fracture development degree of the overlying rock is relatively higher. The subsidence curve of the overlying strata of the two working faces is “convex”, which is approximately symmetrical to the middle of the goaf.

Key words: breaking distance; strata movement; overburden fracture network; fractal dimension; periodic pressure

神东矿区作为我国最大的煤炭生产基地之一,多为浅埋深、薄基岩及厚松散层煤田,且具有煤层倾角小、厚度大、构造简单等优势。该区域矿井一次采全高、工作面推进速度快等高强开采特点,使工作面顶板来压显现强烈,采动损伤由下至上传递,导致覆岩裂隙网络发育更加复杂,形成了瓦斯运移、突水溃砂优势通道^[1-4],从而破坏覆岩整体稳定性,危及作业人员人身安全,制约矿山安全生产。

针对覆岩受强开采扰动影响的裂隙分布特征,众多学者进行了深入研究。在理论研究方面,来兴平等^[5]引入开采损害理论,研究了厚松散层下三软煤层开采覆岩运移规律及导水裂隙带分布特征;赵毅鑫等^[6]基于分形维数理论,对上湾煤矿超大采高工作面采动裂隙演化及耗散规律进行了详尽分析;潘卫东等^[7]构建了薄基岩覆岩裂隙扩展渐变破坏模型,研究表明,近距离煤层的重复采动极大地增加了覆岩岩体内裂隙密度及宽度;黄庆享等^[8]应用裂隙尖端断裂能量理论和 Griffith 准则分析上覆岩层裂隙二次扩展机理,给出了宏观裂隙扩展速度和高度计算公式;杨达明等^[9]采用压力拱理论分析工作面开采后覆岩破坏情况。由于实际工程中覆岩运移及裂隙时空演化过程不易监测,而实验室物理相似模拟能够较好反映现场情况。Li 等^[10]研究得出浅厚煤层开采中关键层的断裂特征和失稳运动模式对覆岩裂隙分布有显著影响;崔峰等^[11]采用物理相似模拟实验研究了特厚煤层重复采动影响下覆岩裂隙发育规律,得出裂隙数量与开采深度呈正相关的结论;Miao 等^[12]研究了浅埋沟谷地貌、厚基岩条件下工作面覆岩裂隙演化规律,得出该赋存条件下采高是决定导水裂隙带高度的主因;赵鹏翔等^[13]、陈广金等^[14]研究了煤层群开采覆岩裂隙演化规律及分布形态特征。

诸多学者对单一煤层或煤层群重复开采扰动下覆岩裂隙的产生及发育演化规律做了大量卓有成效的研究。而针对神东矿区开采覆岩裂隙发育演化规律的研究大多停留在初步定性分析层面上,对于神东矿区不同区域内不同开采地质参数下,覆岩采动裂隙网络空间分布演化规律的定量研究较少。因此,本研究以神东矿区大柳塔煤矿和上湾煤矿工作面为工程背景开展物理相似模拟实验,结合分形维数理论,定量分析不同破断距下覆岩裂隙网络演化特征,为类似条件工作面采动损害控制提供有益借鉴。

1 基本顶周期破断距影响因素

受采动影响,工作面每推进一段距离顶板即发生周期垮落现象。影响基本顶周期破断距的因素有:基本顶厚度、抗拉强度、破断岩块下沉量、承载载荷、传递到基本顶的支持力及直接顶与基本顶未破断岩梁接触长度。其中,岩层厚度、抗拉强度以及承载载荷是影响周期破断距的主要因素,破断距同岩层厚度和抗拉强度呈正相关^[15]。基于此,选取神东矿区地质构造相近、采矿方法相同,基本顶厚度及岩体力学性质不同的大柳塔煤矿 52505 和上湾煤矿 12401 工作面为工程背景,依次开展物理相似模拟实验、覆岩裂隙网络分形维数演化规律定量研究。

2 相似模拟实验方案

2.1 模型设计

为研究不同破断距下覆岩裂隙网络演化规律,根据工作面实际地质情况,设计二维相似模拟实验模型,工作面地质条件见表1。实验采用山东科技大学二维平面物理相似模拟实验台,实验台尺寸为190 cm×22 cm×150 cm(长×宽×高),为固定模型,装置前后用钢板约束。大柳塔煤矿52505工作面与上湾煤矿12401工作面平均采深分别为184和194 m,煤层平均采厚分别为6.7和8.6 m。根据实验模型装置尺寸、各岩层物理力学性质及现场开采参数,结合相似模拟理论,设计几何相似比 $\alpha_l=150$,容重相似比 $\alpha_r=1.5$,时间相似比

$\alpha_t=\sqrt{\alpha_l}=12.25$,应力及强度相似比 $\alpha_\sigma=\alpha_r\times\alpha_l=225$ 。实验采用全部垮落法处理采空区。

2.2 模型铺设

根据大柳塔煤矿52505工作面和上湾煤矿12401工作面地质柱状图,各岩层试件容重、抗压强度和弹性模量等物理参量,选择适宜材料及配比进行模型铺设。模拟材料以河砂、碳酸钙为骨料,石膏为胶结材料,云母作为岩层分层弱面进行模型搭建。待模型自然风干后在其表面喷涂白漆并分别设置水平和垂直线,均匀划分10 cm×10 cm网格,网格交点处布置反光片(位移监测点)共280个。52505工作面测线从下至上依次编号A1~A12,12401工作面测线从下至上依次编号B1~B12,分别在两工作面直接顶和基本顶顶部布设2条监测线,观察煤层开采过程中覆岩运移及裂隙发育情况,全程用高清摄像机记录。大柳塔52505和上湾12401工作面覆岩物理参数及配比分别见表2、表3。

表1 工作面开采条件概况

Table 1 Overview of working face mining conditions

开采条件	大柳塔 52505 工作面	上湾 12401 工作面
地面标高/m	1 083.4~1 229.3	1 188~1 300
底板标高/m	981.32~1 032.76	1 043~1 066
走向长度/m	301.3	299.2
推进长度/m	4 268.8	5 254.8
平均埋深/m	184.1	194.1
平均煤厚/m	7.2	9.2
设计采高/m	6.7	8.6
煤层倾角/(°)	1~3	1~3
松散层厚度/m	30	6.5
基岩厚度/m	154.1	187.6
采煤方法	一次采全高综合机械化采煤法	一次采全高综合机械化采煤法

表2 大柳塔52505工作面覆岩物理参数及配比

Table 2 Physical parameters and ratio of overlying strata in Daliuta 52505 working face

序号	岩层	厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	砂子/kg	碳酸钙/kg	石膏/kg
1	松散层	30.00	—	—	—	180.20	16.40	—
2	粉细砂岩	20.00	22.7	18.8	25.56	142.10	10.15	10.15
3	粉砂岩	7.00	23.2	22.0	30.95	45.18	3.87	2.58
4	泥岩	24.00	23.2	42.0	56.66	157.20	13.78	5.90
5	细砂岩	24.00	22.7	41.9	25.56	154.80	11.04	11.04
6	砂质泥岩	25.00	23.5	48.3	62.09	163.79	12.30	8.20
7	粉砂岩	40.00	23.2	22.0	30.95	258.03	22.09	14.72
8	细砂岩	12.70	22.6	41.9	25.56	85.97	6.15	6.15
9	粉砂岩	1.30	23.2	22.0	30.95	9.05	0.78	0.52
10	5-2煤	7.25	13.0	30.0	18.20	28.61	2.48	1.06
11	细砂岩	12.00	22.6	41.9	25.56	81.20	5.80	5.80

表 3 上湾 12401 工作面覆岩物理参数及配比

Table 3 Physical parameters and ratio of overburden rock in Shangwan 12401 working face

序号	岩层	厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	砂子/kg	碳酸钙/kg	石膏/kg
1	风积沙	6.50	—	—	—	33.85	3.08	—
2	细粒砂岩	26.95	23.9	32.0	44.6	143.96	14.40	33.59
3	砂质泥岩	20.21	24.1	22.8	23.0	22.49	8.31	19.38
4	中粒砂岩	6.90	24.8	38.0	46.0	138.45	5.84	5.84
5	粗粒砂岩	24.69	25.7	35.0	36.6	162.36	27.06	27.06
6	砂质泥岩	66.09	24.1	22.8	23.0	421.43	25.28	59.00
7	粗粒砂岩	9.38	25.7	35.0	36.6	61.65	10.27	10.27
8	细粒砂岩	14.16	23.9	32.0	44.6	140.81	10.56	24.64
9	砂质泥岩	9.22	24.0	27.4	33.8	58.41	3.50	8.18
10	泥岩	1.10	24.6	21.0	55.7	7.35	0.55	1.29
11	1-2 煤	9.26	14.7	15.0	10.5	38.69	5.42	2.32
12	泥岩	1.10	24.6	21.0	55.7	7.35	0.55	1.29
13	粉砂岩	1.99	23.8	35.0	40.6	12.15	0.81	3.24
14	砂质泥岩	6.54	24.1	22.8	23.0	44.81	2.69	6.27

3 开采覆岩裂隙网络分布演化特征研究

大柳塔 52505 工作面和上湾 12401 工作面实际开采速度均为 13.84 m/d,综合考虑现场地质、开采条件等客观因素,依据时间相似比,保证煤层上覆岩层充分运移,两模型每 44 min 由左向右开挖一次,每次掘进 5 cm。为降低边界效应对实验过程的影响,两模型进刀端与停采线侧至模型两侧边界均留设 20 cm 保护煤柱。将实验数据按几何相似比转换为实际开采数据,即模型开挖距离 150 cm,模拟实际工作面推进 225 m。试验采用全部垮落法处理采空区顶板。

3.1 大柳塔 52505 工作面开采覆岩裂隙演化规律

大柳塔 52505 工作面整个开采活动基本顶共发生 8 次周期垮落,周期破断距不等,为 15~25 m,平均破断距 20 m(见表 4)。自开切眼处开始推进,推进至 36 m 时(图 1(a)),直接顶与老顶分离并初次垮落至采空区,垮落岩块长度 4.1 m 至 7.7 m;推进至 65 m 时(图 1(b)),基本顶达到极限垮距失稳,进刀端和工作面两侧产生“V”型破断裂隙后基本顶初次破断,其顶部与上部未失稳岩层(粉砂岩)产生 5.7 m 离层,初次破断距 65 m;推进至 87 m 时(图 1(c)),采空区顶部上方出现大面积离层,破断裂隙和层间裂隙分布范围进一步扩大,关键层底层发生垮落,出现 6.6 m 离层,基本顶出现第 1 次周期来压,破断距 21.5 m;推进至 121 m 时(图 1(d)),采空区上方产生两处离层,顶板在工作面侧未完全垮落而形成“铰接梁”结构,由于关键层失稳破断,上覆未垮落岩层在自重和围岩载荷影响下大范围垮落,破断裂隙迅速发育至距煤层 55.8 m 处,基本顶第 3 次周期破断,破断距 15.5 m;推进至 162 m 时(图 1(e)),层间裂隙发育至距煤层顶板 93.3 m,采空区两侧裂隙继续发育,覆岩中部冒落岩层的破断裂隙和层间裂隙被逐步压实。工作面推进至距开切眼 225 m 时停采(图 1(f)),开切眼和停采线两侧永久裂隙发育至地表,受采动影响覆岩最终呈现出明显的“三带”分布特征。实验所得大柳塔 52505 工作面基本顶周期破断距同文献[16]现场实测结果基本吻合。

表 4 大柳塔 52505 工作面周期破断距统计

Table 4 Periodic breaking step distance statistics of Daliuta 52505 working face m

名称	破断距	推进距离
首次破断	65	65
第 1 次周期破断	21.5	87
第 2 次周期破断	19	106
第 3 次周期破断	15.5	121
第 4 次周期破断	24	145
第 5 次周期破断	17	162
第 6 次周期破断	20	182
第 7 次周期破断	18	200
第 8 次周期破断	25	225

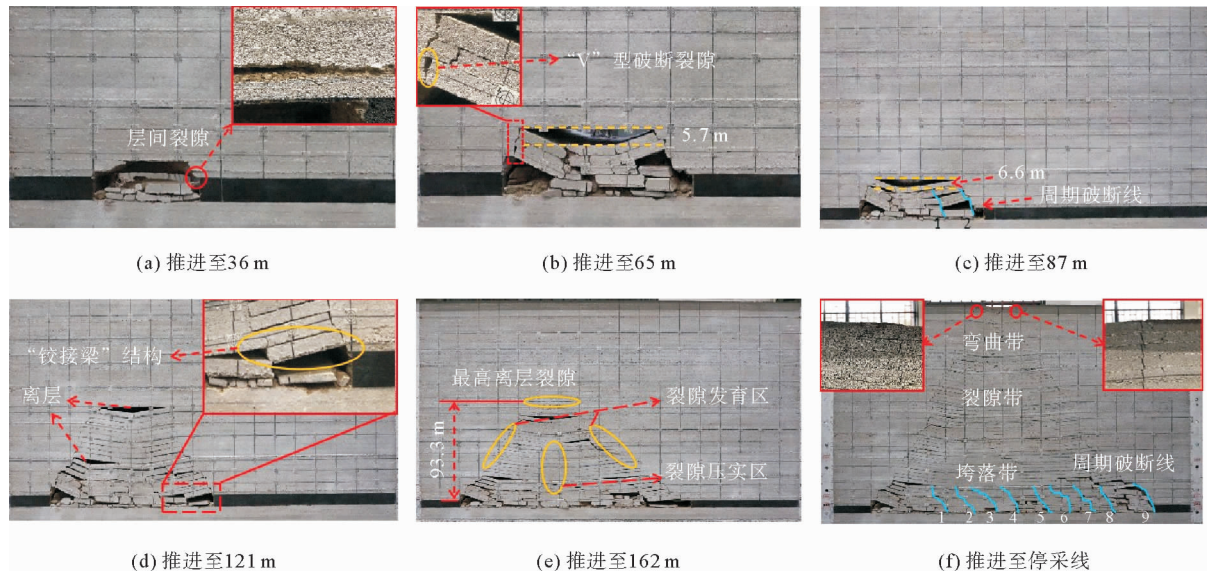


图 1 大柳塔 52505 工作面覆岩垮落形态

Fig. 1 Overburden rock caving form of Daliuta 52505 working face

3.2 上湾 12401 工作面开采覆岩裂隙演化规律

上湾煤矿 12401 工作面整个开采过程共经历 5 次周期破断,破断距分别为 31、28、31、32 和 30 m,平均破断距 30.4 m(见表 5)。自开切眼开始推进,上顶煤随采随落(图 2(a))。推进至 71 m 时(图 2(b)),直接顶原岩应力平衡状态被打破,两侧应力集中,诱发破断裂隙发育,由于煤层采高大,顶板运移自由空间大,故垮落顶板并未形成铰接梁结构,而是滑落至采空区,岩块破碎程度较剧烈,视为工作面发生初次来压,顶板垮落高度距煤层顶板约 22 m,层间裂缝继续向上扩展。工作面推进至 102 m(图 2(c)),基本顶触矸后形成砌体梁结构,视为工作面发生首次周期来压,第 1 次周期破断距 31 m,岩层垮落高度增至 27.3 m。

同时,垮落带顶部与裂隙带底部时空运移和抗弯强度存在差异,两带交界处形成高度为 6.5 m 的离层;当工作面推进至 130 m(图 2(d)),采空区上部岩层垮落高度迅速增至 62.3 m,开采煤层上部岩层垮落现象更为突出,此时离层高度 5.1 m,基本顶发生第 2 次周期来压;工作面推进至 193 m(图 2(e)),裂隙带中部横纵裂隙逐渐闭合,工作面侧新生裂隙不断发育,离层最大高度降至 1.7 m。工作面推进至停采线时(图 2(f)),覆岩破断裂隙已贯穿至地表,煤层采动覆岩至下而上“三带”划分明显。其中,垮落带 41.3 m,约为采高的 4.8 倍;裂隙带 109.2 m,约为采高的 12.7 倍。实验所得上湾 12401 工作面基本顶破断距同文献[17]现场实测结果基本吻合,验证了实验数据的可靠性。

4 覆岩裂隙网络分形特征分析

4.1 分形维数计算方法

采动覆岩裂隙动态发展具有复杂性,分形几何能定量描述采动覆岩裂隙分布的无序性。采用 Matlab 工具箱中的 Fraclab 分形分析软件,计算采取面积覆盖法,以尺度 ϵ 的方格网覆盖受采动影响岩体裂隙分布区域,计算位于不同尺度网格中长度不小于相应网格尺度的采动岩体裂隙数量 $N(\epsilon)$,利用式(1)对不同空间占位的裂隙赋存状态进行分形维数定量计算。

表 5 上湾 12401 工作面周期破断距统计

Table 5 Periodic breaking step distance statistics of Shangwan 12401 working face m

名称	破断距	推进距离
首次破断	71	71
第 1 次周期破断	31	102
第 2 次周期破断	28	130
第 3 次周期破断	31	161
第 4 次周期破断	32	193
第 5 次周期破断	30	225

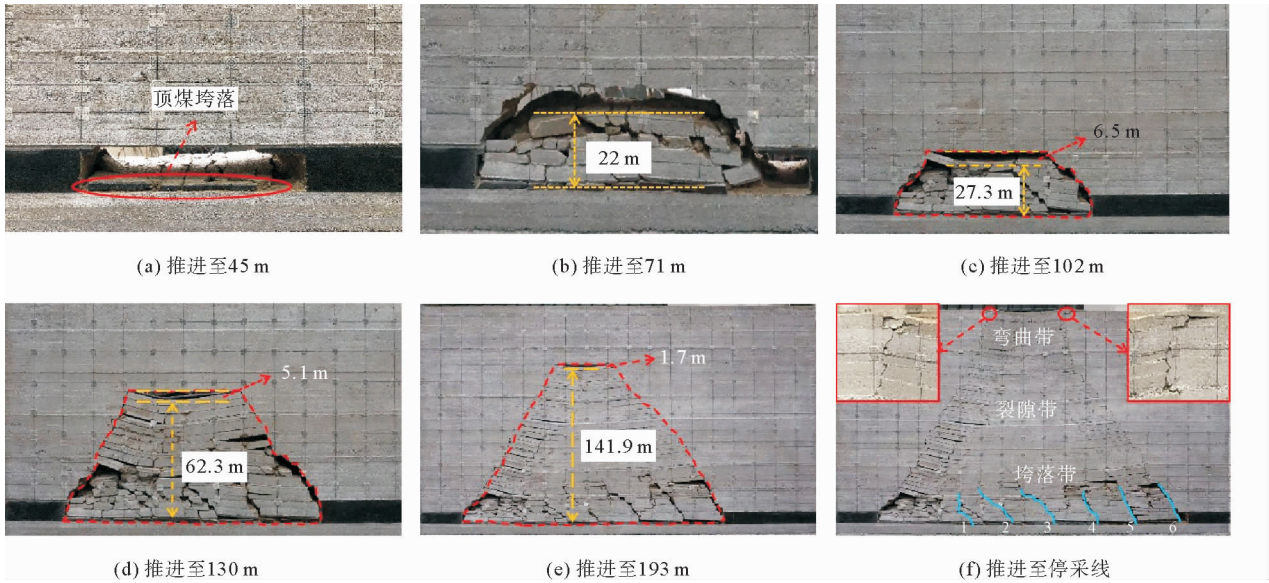


图 2 上湾 12401 工作面覆岩垮落形态

Fig. 2 Overburden rock caving form of Shangwan 12401 working face

$$D = -\frac{\ln N(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)} \tag{1}$$

式中： D 为分形维数， ϵ 为网格尺度裂隙边长， $N(\epsilon)$ 为网格尺度裂隙条数。

将工作面推进不同距离覆岩裂隙演化图使用 Matlab 和 Photoshop 依次进行二值化、去干扰和反色处理 (图 3)。将裂隙网络色值取反图导入 Fraclab 工具箱进行分析计算,得到 $\ln N(\epsilon) \sim \ln(1/\epsilon)$ 关系曲线,导出计算结果基于最小二乘法进行线性拟合,拟合结果为一次函数,函数斜率的绝对值即为所求区域覆岩裂隙分形维数。

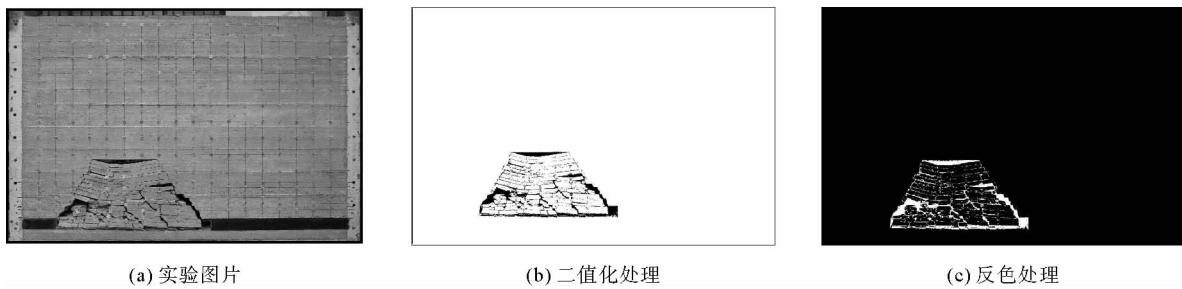


图 3 图片处理演示

Fig. 3 Picture processing demonstration

4.2 不同破断距下覆岩裂隙演化分形规律

为分析不同破断距下不同工作面覆岩裂隙分形维数随工作面推进演化趋势,将两工作面每次周期破断时覆岩裂隙网络进行分维值计算,对应的分形维数演化曲线见图 4。可知,两工作面覆岩裂隙分形维数曲线均呈阶梯形增长趋势,分为跳跃式上升段和缓慢波动段。其中,跳跃式上升段对应开采过程中覆岩裂隙“张开-闭合”不平衡无序结构状态,缓慢波动段对应开采过程中覆岩裂隙“张开-闭合”平衡有序结构状态。

按照分形维数增加速率的不同,将大柳塔 52505 工作面分形维数随推进距离变化曲线大致分为 3 个阶段:阶段 1(45~106 m)为低速增长阶段,此阶段经历基本顶初次垮塌和两次周期垮塌,分形维数由 1.651 2 升至 1.663 1;阶段 2(106~182 m)为中速增长阶段,此阶段经历关键层失稳破断,上覆岩层大范围垮落,由

于不同岩性岩层抗弯强度存在差异,两岩性交界处产生大面积离层,覆岩分形维数由 1.663 1 升至 1.695 7;阶段 3(182 m~停采线)为高速增长阶段,工作面推进至 225 m 时,开切眼和停采线侧破断裂隙已发育至地表,且工作面侧新生裂隙密度和发育程度优于压实区闭合裂隙,覆岩分形维数由 1.695 7 跃至 1.737 5。上湾 12401 工作面分形维数随推进距离变化曲线大致经历 2 个阶段:阶段 1(45~130 m)覆岩分维值由 1.651 7 升至 1.671 3,采动覆岩内裂隙不断新生,同时部分裂隙与原生裂隙贯通、压实,分形维数增长幅度较小;阶段 2(130 m~停采线)覆岩分形维数曲线增长幅度显著提高,由 1.671 3 跃至 1.725 9。相比大柳塔 52505 工作面,上湾 12401 工作面推进周期破断步距更大,周期破断前在断裂线处积聚大量能量,工作面推进至周期破断点时,能量急剧释放,宏观表现为上覆岩层破断,新生裂隙迅速发育扩展,从而分形维数大。覆岩裂隙网络分形维数直接反映其空间占位情况(裂隙的发育、贯通和闭合),空间占位大小直接表现为覆岩裂隙分布的复杂程度,故分形维数可较好地表征覆岩裂隙分布。

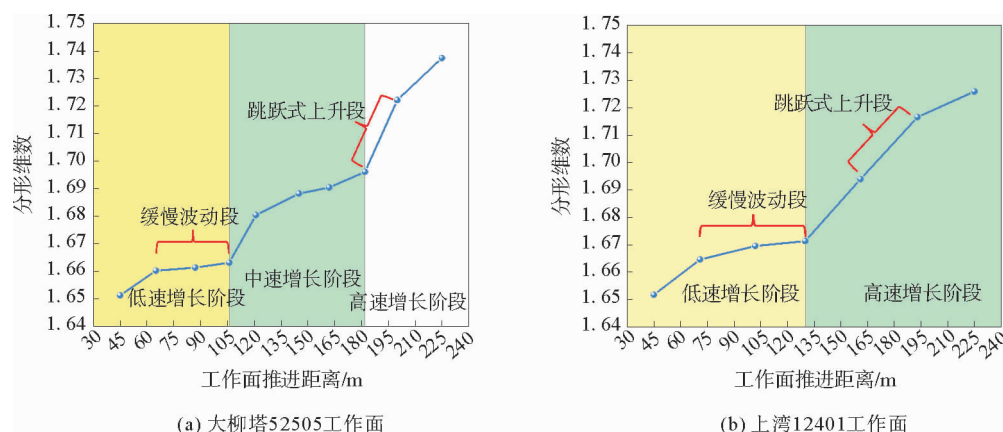


图 4 不同破断步距工作面分形维数曲线

Fig. 4 Fractal dimension curves of working faces with different fracture steps

4.3 工作面导水裂隙带发育高度与分形维数关系

为研究两工作面导水裂隙带发育高度与分形维数间的关系,沿煤层走向选取距开切眼 60~195 m 范围,测量覆岩导水裂隙带发育高度,并计算相应的覆岩裂隙网络分形维数,绘制关系曲线如图 5~6 所示。

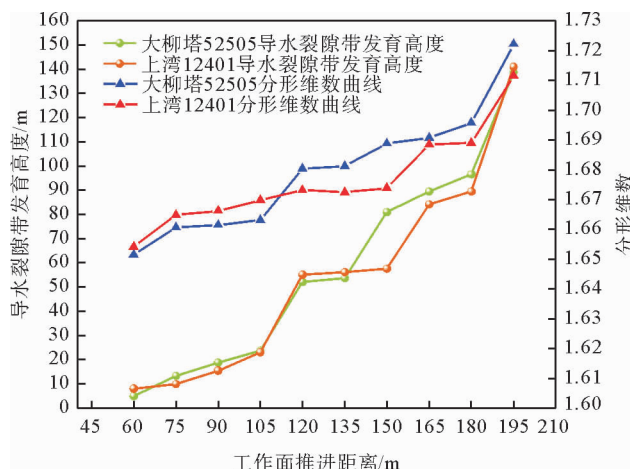


图 5 导水裂隙带发育高度和分形维数随推进过程对比

Fig. 5 Comparison of development height and fractal dimension of water flowing fractured zone with mining process

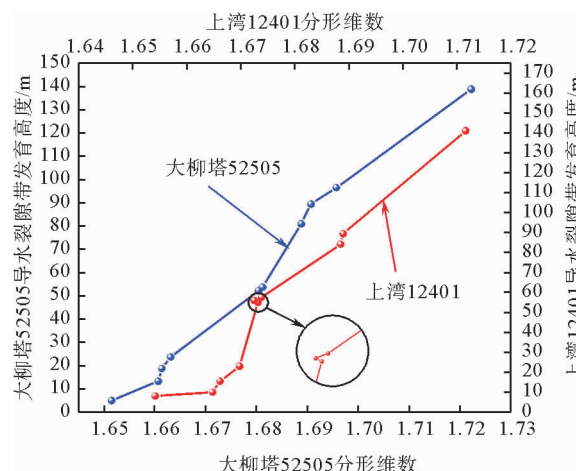


图 6 导水裂隙带发育高度和分形维数关系

Fig. 6 Relationship between development height and fractal dimension of water flowing fractured zone

从图 5 可以看出,工作面推进 60~135 m 范围内,导水裂隙带发育高度态势趋于一致,同工作面推进距离呈正相关变化趋势。分形维数曲线亦表现出同样的增加趋势,但增幅不同,105 m 过后,大柳塔 52505 工作面较上湾 12401 工作面分形维数表现出显著的增维现象,此范围内,前者分形维数增量平均值为 0.005 9,后者分形维数增量平均值为 0.0039。工作面推进 135~195 m 范围内,两工作面导水裂隙带发育高度差异明显,大柳塔 52505 工作面高于上湾 12401 工作面,此阶段导水裂隙带发育高度与分形维数的变化呈现一定的涨落同一性。图 6 表明,随着工作面推进,导水裂隙带发育高度与分形维数均近似呈现出非线性正相关性,随分形维数的增加而增加。应注意,上湾 12401 工作面导水裂隙带发育高度在 56.1 m 时,分形维数出现降低,表明此过程采动裂隙扩展贯通或是闭合现象较明显。

4.4 工作面覆岩裂隙发育趋势预测

大柳塔 52505 和上湾 12401 工作面不同推进距离下分形维数拟合曲线见表 6,图 7 为两工作面分形维数 D 随推进距离变化拟合曲线及 95% 置信区间分布。

相比之下,上湾 12401 工作面 D 值拟合曲线斜率较小,推进相同距离时,大柳塔 52505 工作面覆岩裂隙分形维数增量较大。原因是两工作面周期破断距不同,大柳塔 52505 工作面周期破断距小,破断次数多,覆岩裂隙发育更为充分。可见破断距对覆岩整体裂隙发育扩展趋势有显著影响。

图 8 为相同推进距离下两工作面分形维数曲线、覆岩裂隙网络发育形态对比。结合图 7 可知,工作面推进前期,上湾 12401 工作面覆岩裂隙分形维数大于大柳塔 52505 工作面,原因是上湾 12401 工作面采高大,顶板回转垮落自由空间大,来压显现剧烈,致使垮落至采空区的岩块较为破碎, D 值大。随着工作面不断推进,大柳塔 52505 工作面覆岩裂隙分形维数超过上湾 12401 工作面,直至开采结束。推进至停采线时,二者 D 值差 0.011 6,表明大柳塔 52505 工作面整体裂隙发育趋势较上湾 12401 工作面显著。综上所述,基本顶破断距越小,分形维数值越大,覆岩裂隙网络发育情况越复杂,裂隙分布越不规则,工作面推进中后期形成更为错综复杂的突水溃砂通道可能性增大,在后续作业中须加强风险评估。

5 工作面覆岩位移规律分析

煤层开采导致覆岩裂隙网络沿走向和上覆岩层发育,进而产生水平变形和垂直位移,岩层水平变形不明显,故主要对垂直位移进行监测分析,两工作面覆岩位移沉降曲面图如图 9。可以看出,覆岩整体下沉曲线呈梯形,近似以采空区中部对称下沉。两工作面覆岩位移沉降曲线自下至上宽度渐小,即覆岩距离煤层顶板越近的岩层位移越大,这是因为垮落至采空区的破断岩块具有碎胀性。此外,上覆连续性较好的岩层在运移过程中也会出现碎胀现象,导致近地表监测线位移变化较小,而近煤层侧监测线受强开采扰动影响,位移变化量较大。大柳塔 52505 工作面上覆岩层最大下沉点位于工作面推进 150 m 处的直接顶顶部,最大下沉位移为 7.1 m;最小下沉点位于工作面推进 120 m 时 A12 监测线处,为 0.6 m。上湾 12401 工作面上覆岩层最

表 6 两工作面分形维数拟合曲线和相关系数

Table 6 Fractal dimension fitting curve and correlation coefficient of two working faces

工作面	拟合曲线	相关系数
大柳塔 52505	$y = 4.996 \times 10^{-4}x + 1.619$	0.92
上湾 12401	$y = 3.866 \times 10^{-4}x + 1.629$	0.90

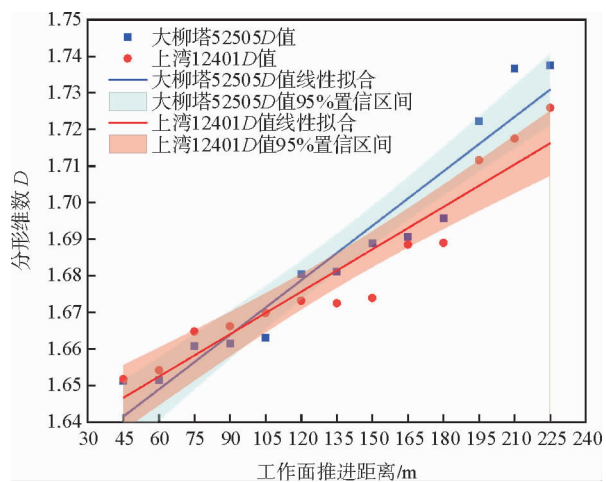


图 7 两工作面不同推进距离下 D 值拟合曲线

Fig. 7 D value fitting curve under different advancing distances of two working faces

大下沉点位于工作面推进 180 m 处的直接顶顶部,最大下沉位移 8.7 m;最小下沉点位于工作面推进 120 m 时 B12 监测线处,为 1.05 m。对比分析可知,大柳塔 52505 工作面覆岩两条监测线间位移差较小,相比于上湾 12401 工作面,覆岩沉降曲面坡度较缓,即覆岩沉降量同工作面采高、破断距呈正相关性。

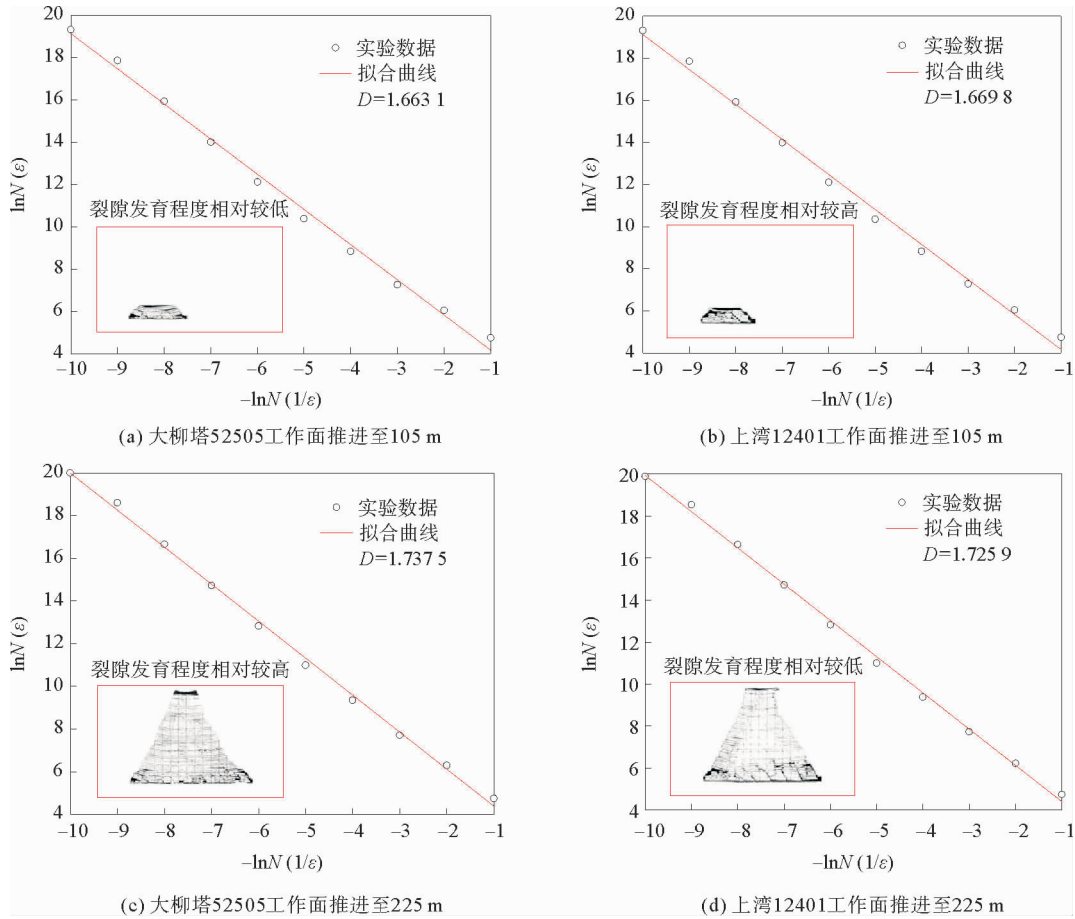


图 8 相同推进距离下两工作面分形维数

Fig. 8 Fractal dimension of two working faces under the same advancing distance

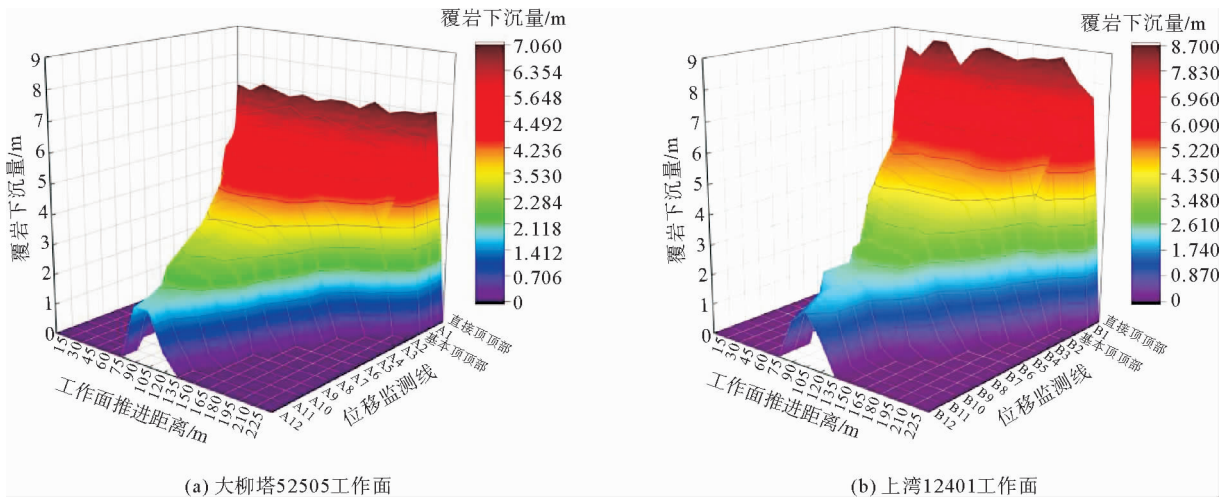


图 9 两工作面覆岩沉降曲面图

Fig. 9 Two working face overlying strata subsidence surface map

6 结论

采用物理相似模拟的实验方法,结合分形维数理论,研究了不同破断距下覆岩裂隙网络发展规律,主要结论如下。

1) 至开采结束,大柳塔 52505 工作面经历 8 次周期来压,平均破断距 20 m;上湾 12401 工作面经历 5 次周期来压,平均破断距 30.4 m。

2) 分形维数可较好地表征覆岩裂隙分布,不同破断距下覆岩裂隙网络的分形维数随着煤层工作面的推进呈现阶梯形增长态势;推进至停采线时,大柳塔 52505、上湾 12401 工作面覆岩裂隙分形维数值分别为 1.737 5、1.725 9。两者导水裂隙带发育高度与分形维数变化趋势均近似呈现非线性正相关,导水裂隙带发育高度随分形维数的增加而增加。

3) 不同破断距对覆岩整体裂隙发育扩展趋势影响显著。工作面回采前期大柳塔 52505 工作面分形维数相对较低,回采中后期则相反,破断距小,覆岩整体裂隙发育程度相对较高。

4) 通过对垂直位移监测线沉降分析得出,两工作面覆岩沉降曲线呈“凸”型,近似以采空区中部对称。覆岩沉降程度不一,大柳塔 52505 工作面上覆岩层最大下沉 7.1 m,上湾 12401 工作面上覆岩层最大下沉 8.7 m。因本研究着重分析神东矿区近水平浅埋煤层开采条件下的不同破断距覆岩裂隙网络分形特征,故所构建覆岩裂隙发育趋势预测模型主要适用于类似地质开采条件的矿井,对于其他条件下的覆岩裂隙分形特征,有待于更进一步研究。

参考文献:

- [1] 魏久传,赵智超,谢道雷,等.基于岩性及结构特征的砂岩含水层富水性评价[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(3):13-23.
WEI Jiuchuan,ZHAO Zhichao,XIE Daolei, et al. Water-abundance evaluation of sandstone aquifer based on lithologic and structural characteristics[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2020,39(3):13-23.
- [2] CHEN B, SHEN B T, ZHANG S C, et al. 3D morphology and formation mechanism of fractures developed by true triaxial stress[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2022,32(6),1273-1284.
- [3] 沈宝堂,柴顺杰,张士川,等. FRACOD 模拟裂纹扩展液-力耦合模块的研发及工程应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(3):26-34.
SHEN Baotang, CHAI Shunjie, ZHANG Shichuan, et al. Development and application of hydro-mechanical coupling function in simulation crack propagation of FRACOD[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2021,40(3):26-34.
- [4] 郭惟嘉,赵金海,尹立明,等. 断层突水非线性渗流-应力耦合研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2017,36(6):1-7.
GUO Weijia, ZHAO Jinhai, YIN Liming, et al. Study on fault water inrush mechanism and nonlinear seepage-stress coupling[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2017,36(6):1-7.
- [5] 来兴平,张旭东,单鹏飞,等. 厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙发育规律[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(9):1739-1750.
LAI Xingping, ZHANG Xudong, SHAN Pengfei, et al. Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(9):1739-1750.
- [6] 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.
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.
- [7] 潘卫东,姜鹏,许延春,等. 薄基岩近距离煤层开采“水-岩”致灾演变模型及规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(3):543-552.

- PAN Weidong,JIANG Peng,XU Yanchun,et al. The model and law of “water-rock” disaster in near-distance coal seam mining in thin bedrock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(3):543-552.
- [8] 黄庆享,韩金博. 浅埋近距离煤层开采裂隙演化机理研究[J]. 采矿与安全工程学报,2019,36(4):706-711.
HUANG Qingxiang,HAN Jinbo. Study on fracture evolution mechanism of shallow-buried close coal seam mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2019,36(4):706-711.
- [9] 杨达明,郭文兵,谭毅,等. 高强度开采覆岩岩性及其裂隙特征[J]. 煤炭学报,2019,44(3):786-795.
YANG Daming,GUO Wenbing,TAN Yi,et al. Lithology and fissure characteristics of overburden in high-intensity mining [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(3):786-795.
- [10] LI J W,LIU C Y,GUO X W,et al. Instability motion characteristics of overburden rock and the distribution pattern of fissures in shallow thick seam mining[J/OL]. Scientific Reports,2022,12(1). DOI:10. 1038/s41598-022-10205-z.
- [11] 崔峰,贾冲,来兴平,等. 缓倾斜冲击倾向性顶板特厚煤层重复采动下覆岩两带发育规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(3):514-524.
CUI Feng,JIA Chong,LAI Xingping,et al. Research on development law of overlying rock two zones under repeated mining in extra-thick coal seam with gently inclined and brusting liability roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(3):514-524.
- [12] MIAO K J,TU S H,TU H S,et al. Research on fractal evolution characteristics and safe mining technology of overburden fissures under gully water body[J/OL]. Fractal and Fractional,2022,6(9). DOI:10. 3390/fractalfract6090486.
- [13] 赵鹏翔,王超,李树刚,等. 巨厚煤层综放开采上覆临近采空区裂隙二次演化特征分析[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(1):13-24.
ZHAO Pengxiang,WANG Chao,LI Shugang,et al. Secondary evolution characteristics of fractures in overburden adjacent goafs during fully mechanized caving of extremely thick coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(1):13-24.
- [14] 陈广金,程志恒,周礼杰,等. 水力耦合条件下近距离煤层采动裂隙动态演化规律探究[J]. 煤炭工程,2022,54(10):117-123.
CHEN Guangjin,CHENG Zhiheng,ZHOU Lijie,et al. Dynamic evolution law of mining-induced fracture in contiguous coal seams under hydraulic coupling[J]. Coal Engineering,2022,54(10):117-123.
- [15] 刘一扬,宋选民,王仲伦. 厚硬岩层周期破断步距计算及影响因素分析[J]. 煤炭工程,2020,52(7):106-111.
LIU Yiyang,SONG Xuanmin,WANG Zhonglun. Calculation of periodical fracture interval and analysis of influencing factors in thick and hard rock strata[J]. Coal Engineering,2020,52(7):106-111.
- [16] 王创业,纪洪广. 大采高综采采场基本顶周期破断特征研究[J]. 煤矿安全,2019,50(5):226-230.
WANG Chuangye,JI Hongguang. Research of main roof periodic fracture features in fully mechanized coalface with large mining height[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(5):226-230.
- [17] 王海军,刘英杰. 8.8 m 特厚煤层采场覆岩运动与应力动态演化研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(11):68-76.
WANG Haijun,LIU Yingjie. Study on overlying stratas movement and stress dynamic evolution above working face in 8.8 m extra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology,2020,48(11):68-76.

(责任编辑:吕海亮)