

煤层群开采覆岩裂隙发育规律及分形演化特征研究*

班金^{1,2}, 曹健^{1,2,3,4}, 董红娟^{1,2,3,4}, 赵宇琦^{1,2}, 师世图^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 3. 内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010; 4. 内蒙古煤炭绿色开采与绿色利用协同创新中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要:我国神府东胜煤田煤炭资源储量丰富且大量赋存近距离煤层群。煤层群开采产生的裂隙极易贯通至地表造成地表沉降和水土流失,为掌握煤层群开采覆岩裂隙发育规律,以哈拉沟煤矿1-2上煤层和1-2煤层开采为背景,通过物理相似模拟实验和分形维数计算相结合的方法开展研究,揭示了重复采动影响下覆岩裂隙发育规律,提出了重复采动影响下岩体裂隙分形维数演化分段:单一煤层分维缓升段、单一煤层分维快升段、分维稳定段和重复采动二次升维阶段。

关键词:煤层群开采;重复采动;覆岩裂隙;分形维数

中图分类号:TD325 文献标识码:A

文章编号:2095-2295(2026)01-0089-07

DOI:10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.012

Research on the development law and fractal evolution characteristics of overburden rock fissures in coal seam group mining

BAN Jin¹, CAO Jian^{1,2,3,4}, DONG Hongjuan^{1,2,3,4}, ZHAO Yuqi^{1,2}, SHI Shitu^{1,2}

(1. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, China; 3. Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou 014010, China; 4. Inner Mongolia Cooperative Innovation Center for Coal Green Mining and Green Utilization, Baotou 014010, China)

Abstract: China's Shenfu Dongsheng Coal Field is rich in coal resources and is endowed with a large number of proximal coal seam groups. The fissures created by the mining of coal seam clusters are highly susceptible to penetrating to the surface causing subsidence and soil erosion. In order to grasp the development law of overburden fissure of coal seam group mining, the research was carried out through the combination of physical similarity simulation experiments and fractal dimension calculations with the background of mining of 1-2 Upper Coal Seam and 1-2 Coal Seam in Haragou Coal Mine. The overlying rock fracture development law under the influence of repetitive mining was revealed, and the fractal dimension evolution segments of rock fracture under the influence of repetitive mining were proposed: single coal seam fractal dimension slow ascending section, single coal seam fractal dimension fast ascending section, fractal dimension stabilizing section, and repetitive mining second ascending dimension stage.

Key words: coalbed group mining; repeated mining; overburden fractures; fractal dimension

* 基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2022QN05007);内蒙古自治区本级事业单位引进优秀人才支持项目(0701012101);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2023QNJS088);双一流建设和特色发展引导资金项目(YLXKZX-NKD-053)。

作者简介:班金,男,本科生。

通信作者:曹健,男,教授,E-mail:2020913@imust.edu.cn

收稿日期:2024-10-29

我国西部神府东胜煤田煤炭资源储量丰富,煤层普遍具有层间距小、埋藏浅等特点,当前,大多数矿井采用全部垮落法处理采空区,在煤层群开采过程中尤其是在下部煤层重复采动影响下,覆岩裂隙活化发育,并贯通至地表,造成地表下沉、水土流失等一系列问题,严重危害生态环境。

目前,我国许多学者针对煤层开采后覆岩垮落和裂隙发育进行研究。张瑾等^[1]根据组合梁理论和关键层理论,对覆岩破断垮落和导水裂隙带发育高度进行了研究;黄庆亨等^[2-3]提出了通过上下煤层不同煤柱留设方式可有效减缓地表下沉,同时使得下沉更为均匀;王文才等^[4]针对近距离煤层的开采,通过井下窥视法和数值模拟研究了覆岩破坏规律;黄冬斌等^[5]分析了断层对采动裂隙演化的影响;张传玖等^[6]以多煤层采动为背景,从开采过程中覆岩破断角度反映了裂隙发育状况;李亚涛等^[7]基于弹性力学和断裂力学,针对倾斜煤层深入研究了导水裂隙带发育高度及其影响因素;王坤等^[8]采用光频域反射技术对覆岩裂隙演化过程进行分析,分析了采场裂隙时空演化规律;王伟等^[9]通过现场实测与经验公式计算结合的方法,研究了坚硬顶板下综放工作面裂隙发育高度;叶正亮等^[10]分析了裂隙对地表漏风的影响;马其等^[11]揭示了双煤柱条件下的覆岩运动和地表沉降规律;臧德梁^[12]研究了在复杂水文地质条件下首采面围岩裂隙发育规律和矿压规律;李振华等^[13]揭示了溶洞对导水裂隙发育的规律;曹健等^[14-15]分别在单一煤层开采和重复采动情况下,研究了覆岩裂隙发育和采高的关系,同时分析了长壁工作面开采条件下上行裂隙的发育机理。

以上学者通过不同方法对煤层开采过程中覆岩开裂机理进行了研究,同时在减缓地表下沉方面取得了重要成果,但在单一煤层开采和重复采动影响下,覆岩裂隙发育高度随工作面的推进而增长,增长速率并非简单的线性关系,以哈拉沟煤矿1-2上煤层和1-2煤层开采为工程背景,通过物理相似模拟实验和分形维数计算相结合的方法,对煤层群开采过程中,不同开采阶段覆岩裂隙发育高度进行分析,揭示了重复采动影响下覆岩裂隙发育规律,提出了重复采动影响下岩体裂隙分形维数演化分段。

1 物理模拟实验设计

哈拉沟煤矿主采1-2上煤、1-2煤、2-2煤、3-1煤,矿井地质构造简单,煤层埋深浅、层间距小,属于

典型的近距离煤层群。1-2上煤层和1-2煤层厚度均为2m左右,1-2上煤层埋深为49.68m,1-2煤层埋深为60.35m,两煤层间距为9.04m。煤层直接顶为泥岩、粉砂岩,老顶以粉砂岩为主,部分地段为中砂岩。

实验采用长×宽×高=2m×1.5m×0.2m的平面相似模拟实验台,几何相似比为1:100,选用河沙、石膏、大白粉、粉煤灰和水等作为相似材料,模拟煤层群开采并观察覆岩裂隙发育情况。相似材料配比如表1所示。原型与模型相似比常数为(其中,p-原型,m-模型):

重力相似条件如式(1):

$$\alpha_\gamma = \frac{\gamma_m}{\gamma_p} = \frac{2}{3} \quad (1)$$

式中: γ 为容重,N/m³。

重力加速度相似条件如式(2):

$$\alpha_g = \frac{g_m}{g_p} = \frac{1}{1} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度,m/s²。

时间相似条件如式(3):

$$\alpha_t = \frac{t_m}{t_p} = \sqrt{\alpha_1} = \frac{1}{10} \quad (3)$$

式中: t 为时间,s。

速度相似条件如式(4):

$$\alpha_v = \frac{v_m}{v_p} = \sqrt{\alpha_1} = 0.1 \quad (4)$$

式中: v 为速度,m/s。

位移相似条件如式(5):

$$\alpha_l = \alpha_s = \frac{1}{100} \quad (5)$$

式中: α 为位移,m。

内摩擦角相似条件如式(6):

$$\alpha_\phi = \frac{R_m}{R_p} = \frac{1}{1} \quad (6)$$

式中: R 为内摩擦角,°。

作用力相似条件如式(7):

$$\alpha_f = \frac{f_m}{f_p} = \alpha_g \alpha_\gamma \alpha_l^3 = 0.1 \times 10^{-5} \quad (7)$$

式中: f 为作用力,N。

强度、弹性模量、粘结力相似条件如式(8):

$$\alpha_R = \alpha_E = \alpha_C = \alpha_l \alpha_\gamma = \frac{1}{150} \quad (8)$$

式中: α_R 为强度,Pa; α_E 为弹性模量,Pa; α_C 为粘结力,Pa。

表 1 相似材料配比表
Table 1 Similar material proportioning

序号	岩层名称	岩层厚度 /m	累计厚度 /m	耗材/kg			
				河沙	石膏	大白粉	粉煤灰
1	风积沙	9.74	9.74	4.26	0.095	0.38	
2	红土	1.60	11.34	沙(4.61):土(4.61):油(1.02)			
3	细粒砂岩	5.06	16.40	28.78	1.08	2.53	
4	粉砂岩	5.20	21.60	29.95	1.00	2.33	
5	中粒泥岩	4.42	26.02	25.14	0.62	0.69	
6	粗粒砂岩	6.23	32.25	35.88	1.20	2.79	
7	细粒砂岩	4.08	36.33	23.20	0.87	2.04	
8	泥岩	1.85	38.18	10.66	0.24	0.95	
9	粉砂岩	10.24	48.42	58.98	1.95	4.61	
10	泥岩	1.32	49.74	7.60	0.17	0.68	
11	1-2 上煤	2.00	51.74	4.52	0.23	1.13	4.52
12	泥岩	1.33	53.07	7.66	0.17	0.68	
13	细粒砂岩	3.61	56.68	20.54	0.77	1.80	
14	泥岩	2.10	58.78	12.10	0.27	1.07	
15	细粒砂岩	2.00	60.78	11.38	0.42	1.00	
16	1-2 煤	2.00	62.78	4.52	0.23	1.13	4.52
17	细粒砂岩	3.00	65.78	17.01	0.63	1.50	

为观察开采后覆岩裂隙发育情况,实验选用相机记录每次开挖后顶板覆岩垮落形态及裂隙发育情况,采用裂缝测宽仪对开挖后形成的裂缝进行测量,如图 1(a)所示。

煤层采用下行开采方式,首先开采 1-2 上煤层,待 1-2 上煤层覆岩垮落稳定后再开采下部 1-2 煤层,为消除边界效应,工作面左右两边各留设 20 m 边界煤柱,实验从左至右开挖,每次开挖步距为 2 cm,物理模拟实验模型如图 1(b)所示。

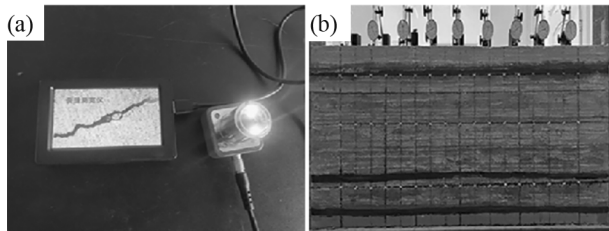


图 1 物理相似模拟实验及仪器

Fig. 1 Physical similarity simulation experiment and instrument

(a) 实验模型图; (b) 裂缝测宽仪。

2 顶部煤层开采覆岩裂隙发育规律

当工作面推进至 16 m 时,如图 2(a)所示,1-2

上煤层直接顶泥岩发生垮落,垮落高度为 1.32 m。工作面继续推进,当工作面推进至 27 m 时,如图 2(b)所示,上覆岩层发生垮落,垮落高度为 5.5 m。工作面推进至 44 m 时,如图 2(c)所示,基本顶初次破断,垮落高度为 11.5 m。工作面推进至 56 m 时,如图 2(d)所示,煤层顶板 15 m 处产生长 20 m 宽 1 m 的离层,但此时地表未发生变化。

工作面继续推进至 64 m 时,如图 3(a)所示,原有离层闭合,在煤层顶板 21 m 处产生长 35 m 宽 1 m 的新离层。工作面继续推进至 74 m 时,如图 3(b)所示,此时工作面达到充分采动离层闭合,裂隙发育至地表,高度为 49.74 m。工作面推进至 120 m 时,如图 3(c)所示,离层完全闭合,左侧切眼侧处地表产生宽为 0.74 m 的裂缝。工作面推进至 155 m 时,如图 3(d)所示,该煤层开采完毕。

根据实验过程可得出,在 1-2 上煤层开采过程中,工作面开采初期,直接顶垮落,随工作面推进,覆岩裂隙发育高度增速较大。当基本顶初次垮落并进入周期性垮落阶段时,随工作面推进,覆岩裂隙发育高度增量较大。工作面开采后期,随工作面推进,裂隙发育高度变化不大。

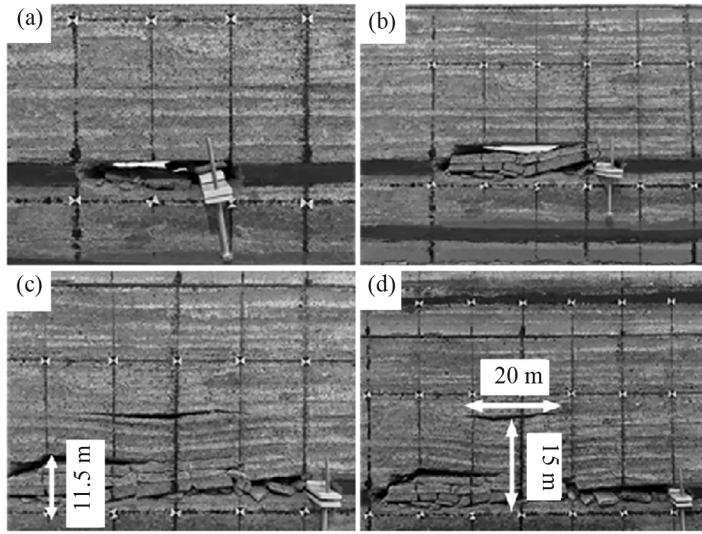


图2 1-2上煤开采至56 m覆岩裂隙发育情况

Fig. 2 Fracture development in overburden when the 1-2 upper seam advances to 56 m

(a)推进至16 m;(b)推进至27 m;(c)推进至44 m;(d)推进至56 m。

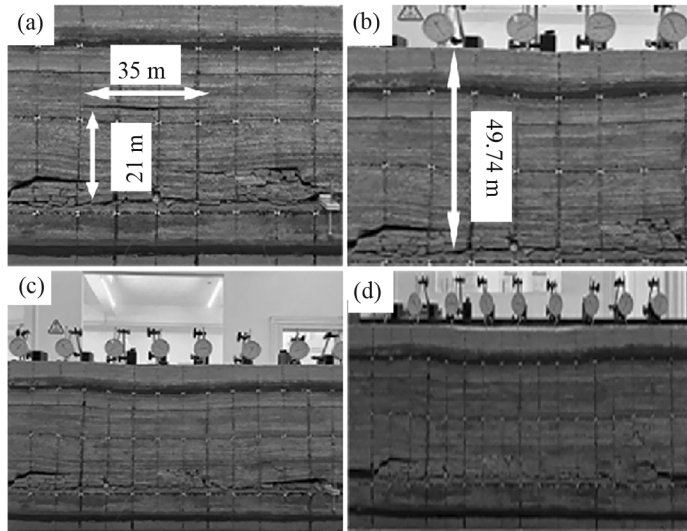


图3 1-2上煤开采56 m至完毕覆岩裂隙发育情况

Fig. 3 Fracture development in overburden when the 1-2 upper seam mining

(a)推进至64 m;(b)推进至74 m;(c)推进至120 m;(d)上煤层开采完毕。

3 下部煤层重复开采覆岩裂隙活化发育规律

当工作面推进至18 m时,如图4(a)所示,1-2煤层直接顶垮落,垮落高度为3 m。当工作面推进至30 m时,如图4(b)所示,1-2上煤层与1-2煤层间隔岩层发生破断,上下煤层采空区贯通,原本压实闭合的裂隙重新活化发育,裂隙发育至地表,高度为

60.78 m。随着下部煤层工作面不断推进,间隔岩层发生周期性破断,当工作面推进至120 m时,如图4(c)所示,右侧停采煤柱侧地表处产生宽1.69 m的裂缝,如图4(d)所示。当工作面推进至155 m时,下部煤层开采完毕,相较于单一煤层开采,地表下沉明显,地表裂缝进一步扩大,左侧切眼侧处产生裂缝宽度为3.05 m,右侧停采煤柱侧处产生裂缝宽度为2.95 m。

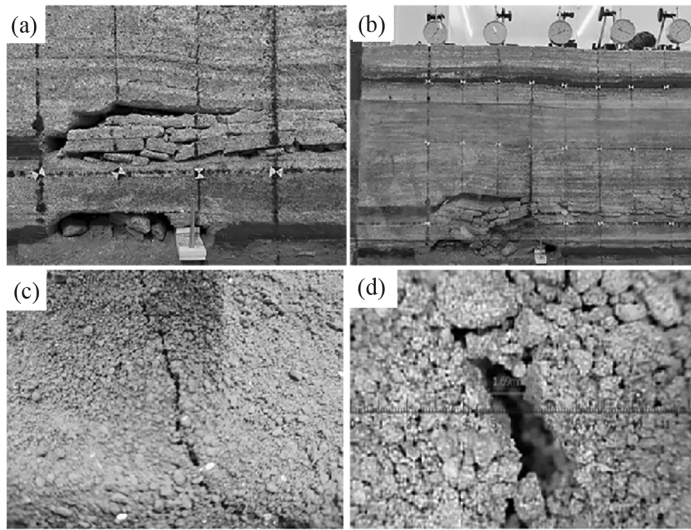


图4 1-2煤开采覆岩裂隙发育情况

Fig. 4 Fracture development in overburden during 1-2 seam mining

(a)推进至18 m;(b)推进至30 m;(c)推进至120 m产生裂缝;(d)裂缝宽度。

根据实验过程可得出,在1-2煤层开采过程中,下部煤层开采初期,直接顶垮落,间隔岩层未破断,随工作面推进,覆岩裂隙发育高度增速较缓。当间隔岩层破断后,上下煤层采空区贯通,上覆岩层裂隙活化发育,此时覆岩裂隙发育高度跳跃增大,裂隙发育至地表。此后,间隔岩层进入周期性破断阶段,随工作面推进,覆岩裂隙发育高度变化不大。

4 煤层群开采覆岩裂隙分形演化特征

不同推进距离下覆岩裂隙分形维数如表2所示,随工作面推进,覆岩裂隙分形维数相关系数 R^2 在97%以上,表明在不同推进距离下的采动岩体裂隙网络分布具有良好的自相似性,分形维数 D 在1.117~1.378之间。如图5所示,上、下煤层各开采16次,每次开挖10 m(第16次开挖5 m),随工作面推进,岩体裂隙网络分形维数呈增大趋势。

分析可得,随工作面推进,采动覆岩裂隙分形维数变化情况可分为4个阶段:

1)单一煤层分维缓慢升维阶段($L = 1 \sim 4$):

该阶段为工作面初采阶段,直接顶垮落,随工作面推进,覆岩产生离层裂隙,表现为缓慢升维,分形维数从1.117缓慢增长到1.173。该阶段分形维数 D 和开采次数 L 满足线性关系,如图6所示,相关系数 R^2 为0.983,回归公式为式(9):

$$D = 0.0187L + 1.096. \quad (9)$$

表2 工作面推进距离—分形维数特征表

Table 2 Longwall face advancing distance vs. Fractal dimension characteristics

单一煤层开采 /m	分形维数 D	相关系数 R^2	重复采动 /m	分形维数 D	相关系数 R^2
10	1.117	0.996	10	1.293	0.981
20	1.131	0.996	20	1.296	0.980
30	1.150	0.995	30	1.310	0.977
40	1.173	0.994	40	1.331	0.978
50	1.216	0.996	50	1.334	0.982
60	1.236	0.992	60	1.341	0.981
70	1.238	0.991	70	1.352	0.984
80	1.244	0.988	80	1.362	0.985
90	1.250	0.987	90	1.369	0.982
100	1.269	0.985	100	1.372	0.982
110	1.272	0.983	110	1.370	0.982
120	1.257	0.982	120	1.374	0.983
130	1.283	0.987	130	1.375	0.987
140	1.286	0.983	140	1.369	0.987
150	1.282	0.983	150	1.373	0.987
155	1.278	0.983	155	1.378	0.987

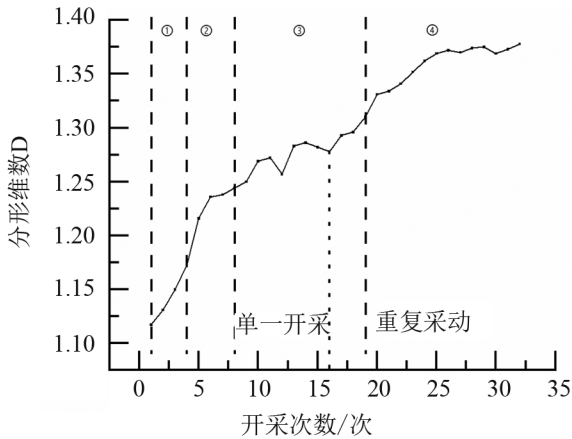


图5 开采次数—分形维数关系图

Fig.5 Mining times vs. Fractal dimension

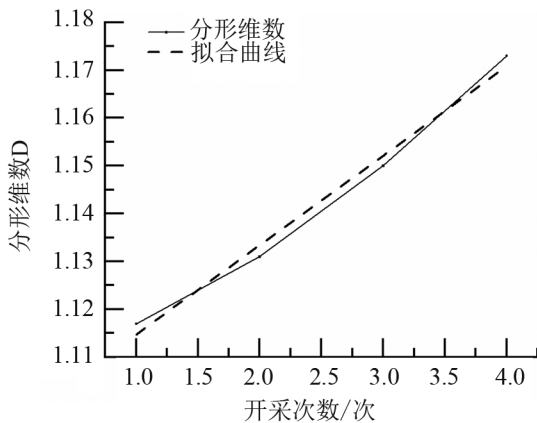


图6 单一煤层分维缓升段

Fig.6 The slow rising stage of fractal dimension in single coal seam mining

2) 单一煤层分维快升阶段 ($L = 4 \sim 8$):

该阶段为基本顶初次垮落和周期性垮落阶段,表现为快速升维,分形维数从 1.173 快速增至 1.244。该阶段分形维数 D 和开采次数 L 满足指数函数关系如图 7 所示,相关系数 R^2 为 0.987,回归公式为式(10):

$$D = 1.24366 - \frac{0.11694}{1 + \left(\frac{L}{4.24264}\right)^{7.2001}} \quad (10)$$

3) 分维缓升阶段 ($L = 8 \sim 19$):

① 顶部单一煤层达到充分采动后开采阶段:

该阶段顶部煤层自 80 m 处推进至 155 m,已达到充分采动,覆岩裂隙发育至地表,分形维数变化不大,在 1.244 ~ 1.278 之间。

② 下部煤层重复开采初采阶段:

该阶段下部煤层自切眼推进至 30 m 处,下部煤层直接顶垮落,间隔岩层未完全破断,上下煤层采空区未贯通,分形维数变化不大,为 1.293 ~ 1.310。如图 8 所示。

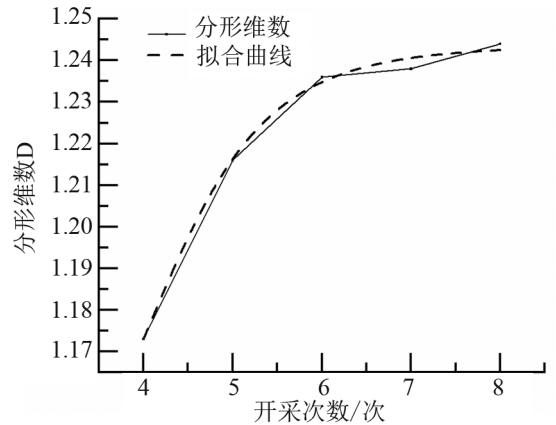


图7 单一煤层分维快升段

Fig.7 The rapid rising stage of fractal dimension in single coal seam mining

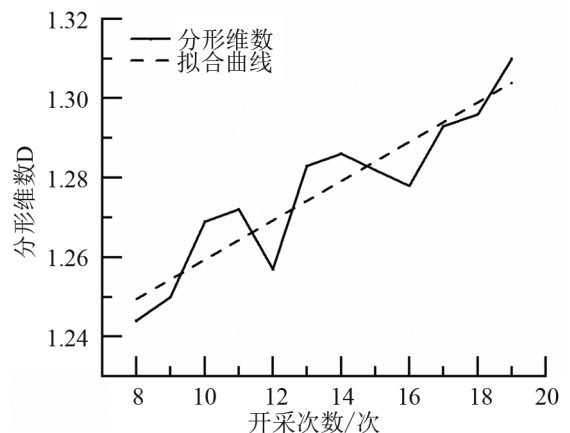


图8 重复采动分维缓升段

Fig.8 The slow rising stage of fractal dimension in repeated mining

4) 重复采动二次升维阶段 ($L = 19 \sim 32$):

该阶段间隔岩层完全破断,上下煤层采空区贯通,覆岩裂隙分形维数从 1.310 跳跃升至 1.331。工作面继续推进,达到充分采动后,间隔岩层发生周期性破断,覆岩裂隙发育高度无明显变化,趋于平稳,分形维数趋于稳定。该阶段分形维数 D 和开采次数 L 满足指数函数关系,如图 9 所示,相关系数 R^2 为 0.973,回归公式为式(11):

$$D = 1.376 - \frac{0.08414}{1 + \left(\frac{L}{20.912}\right)^{11.0519}} \quad (11)$$

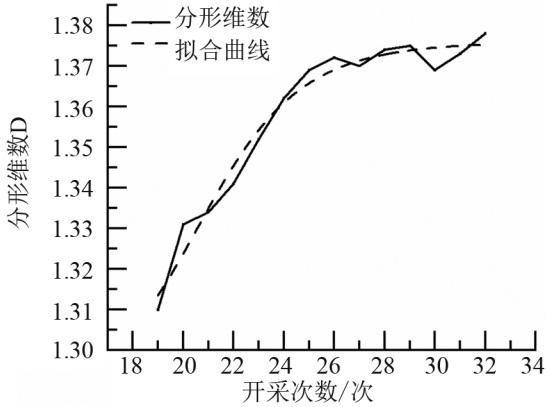


图9 重复采动二次升维段

Fig. 9 The secondary rising stage of fractal dimension in repeated mining

5 结论

1) 上煤层单一开采过程中, 开采初期随工作面推进, 覆岩裂隙发育高度增速较大, 当基本顶初次垮落并进入周期性垮落阶段时, 覆岩裂隙发育高度增量较大, 产生离层裂隙, 达到充分采动后离层闭合, 且工作面开采后期裂隙发育高度变化不大。

2) 下煤层重复采动过程中, 开采初期间隔岩层未发生破断, 此时覆岩裂隙发育增速较缓, 工作面继续推进, 间隔岩层完全破断后, 上覆岩层裂隙重新活化发育并贯通至地表, 此后, 随下煤层工作面推进, 间隔岩层发生周期性破断, 裂隙发育高度随工作面推进变化不大。

3) 重复采动裂隙分形维数演化共分为 4 个阶段: 第一阶段为单一煤层分维缓慢升维阶段, 即工作面初采阶段; 第二阶段为单一煤层分维快升阶段, 即基本顶初次垮落和周期性垮落阶段; 第三阶段为分维缓升阶段, 分为上煤层达到充分采动后开采阶段和下煤层重复开采初采阶段; 第四阶段为重复采动二次升维阶段, 即间隔岩层破断后开采阶段。

参考文献:

- [1] 张瑾, 段凯, 马军伟. 回采工作面覆岩破断规律及导水裂隙发育高度研究[J]. 价值工程, 2024, 43(29): 82.
- [2] 黄庆享, 曹健, 杜君武, 等. 浅埋近距煤层开采三场演化规律与合理煤柱错距研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 681.
- [3] 黄庆享, 曹健, 高彬, 等. 基于三场演化规律的浅埋近距煤层减损开采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1171.
- [4] 王文才, 吴周康, 李龙龙, 等. 近距离煤层重复采动覆岩破坏规律及“两带”发育高度分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(3): 160.
- [5] 黄冬斌, 康向涛, 高璐, 等. 煤层群中断层对采动裂隙演化规律的影响研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(9): 128.
- [6] 张传玖, 李宣良, 贾士耀, 等. 多煤层采动层间覆岩破断规律及稳定性控制研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(8): 104.
- [7] 李亚涛, 张宝安. 基于断裂力学倾斜煤层采空区顶板破坏高度研究[J]. 能源与环境, 2023, 45(12): 16.
- [8] 王坤, 孟祥瑞, 程详, 等. 基于光频域反射技术的采动裂隙演化规律及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(5): 1000.
- [9] 王伟, 王禹, 张嘉豪. 坚硬顶板综放工作面导水裂隙带高度研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(3): 87.
- [10] 叶正亮, 尚博, 胡冕, 等. 浅埋煤层大采高工作面地表裂隙漏风研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(8): 72.
- [11] 马其, 马骥, 韦纯福, 等. 双煤柱工作面开采覆岩运动及地表沉降规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(3): 73.
- [12] 臧德梁. 水文地质复杂矿井首采面矿压规律及围岩裂隙发育研究[J]. 山东煤炭科技, 2024, 42(9): 147.
- [13] 李振华, 李松涛, 杜锋, 等. 西南岩溶矿区采动影响下溶洞对导水裂隙发育规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 106.
- [14] 曹健, 师世图, 赵宇琦, 等. 浅埋近距煤层开采覆岩裂隙发育规律与影响因素[J]. 内蒙古科技大学学报, 2024, 43(2): 145.
- [15] CAO J, SU H, LI J, et al. Research on development mechanism and criterion of upward fractures in longwall face mining[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2023(1): 6776734.

(责任编辑: 张利萍)