

安全科学与工程



移动扫码阅读

李树刚, 刘李东, 赵鹏翔, 等. 倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区辨识及抽采关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 105-115.

LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Key technologies for extraction and identification of gas target area for pressure relief in inclined thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 105-115.

倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区辨识及抽采关键技术

李树刚^{1,2}, 刘李东¹, 赵鹏翔^{1,2}, 林海飞^{1,2}, 卓日升¹

(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)

摘要: 为了研究倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区演化规律的煤层倾角效应, 运用物理相似模拟试验及理论分析相结合的研究方法, 开展不同煤层倾角条件下采动覆岩卸压瓦斯靶向区裂隙演化规律的研究, 得到了靶向区破断裂隙宽度、离层裂隙面积占比以及裂隙分形维数随煤层倾角变化的演化规律, 进而建立了靶向区演化煤层倾角效应模型。结果表明: 破断裂隙宽度呈现采空区两侧边界区域大于中部, 低层位大于高层位的分布特征, 同时破断裂隙宽度受铰接梁影响较强, 随着煤层倾角的增大 ($0^\circ < 15^\circ < 30^\circ$), 在第 1 层铰接梁所在层位上部邻近区域破断裂隙宽度相比下部邻近区域大幅度减小, 仅有下部邻近区域的 52.8%, 64.3% 以及 71.1%; 瓦斯运移优势通道带内离层裂隙面积占比呈现底部最大, 顶部次之, 中部最小的分布规律; 上覆岩层裂隙分形维数整体呈现先减小后增大的现象; 基于第 1 层铰接梁与裂隙分形维数极小值点所在层位两侧裂隙演化规律差异明显, 将瓦斯运移优势通道带按空间层位上的高低依次划分为低层位靶向区、中层位靶向区和高层位靶向区。最后, 基于采动裂隙椭抛带理论, 在工作面侧瓦斯运移优势通道带基础上, 建立了考虑煤层倾角因素的倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区空间形态数学方程, 形成了靶向区卸压瓦斯抽采方法选择依据, 为优化倾斜厚煤层工作面卸压瓦斯抽采布置参数提供参考依据。

关键词: 瓦斯抽采; 倾斜厚煤层; 卸压瓦斯; 靶向区; 裂隙演化; 椭抛带

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)08-0105-11

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

LI Shugang^{1,2}, LIU Lidong¹, ZHAO Pengxiang^{1,2}, LIN Haifei^{1,2}, ZHUO Risheng¹

(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)

Abstract: In order to study the dip angle effect on the evolution law of the target area for pressure relief gas drainage in inclined thick coal seams, the physical similarity simulation test and theoretical analysis were combined to study the fracture evolution in the target area under different coal seam dip angles. The evolution law of broken fracture's width, the area proportion of bed-separated fracture, and the fractal dimension of fracture with the change of coal seam dip angle in the target area were obtained, and then the coal seam dip angle effect model of the targeted area evolution was established. The results showed that the broken fracture's width presented the distribution characteristics that the boundary area on both sides of the goaf was greater than that in the middle, and the low horizon was greater than that in the higher horizon. What's more, the broken fracture's width was strongly affected by the hinged beam. With the increase of the coal seam dip angle ($0^\circ < 15^\circ < 30^\circ$), the broken fracture's width in the upper region of the first layer of hinged beam is significantly reduced compared with that in the lower region, which is only 52.8%, 64.3%, and 71.1%, respectively. The area proportion of bed-separated fracture in the dominant gas migration channel zone was the largest at the bottom, followed by the top, and the smallest in the middle. The

收稿日期: 2023-02-10 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0414

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52074217, 51974237, 52174205)

作者简介: 李树刚(1963—), 男, 甘肃会宁人, 教授, 博士。Tel: 029-85583143, E-mail: lishg@xust.edu.cn

通讯作者: 赵鹏翔(1987—), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士。E-mail: zhpaxh@sina.com

fractal dimension of overlying fractures decreased first and then increased as a whole. The fracture evolution laws were obviously different on both sides of the layer where the hinged beam of the first layer and the minimum fractal dimension of the fracture were located. Therefore, the dominant channel belt of gas migration was divided into low-layer target areas, middle-layer target areas, and high-layer target areas according to the level of the spatial horizon. Finally, based on the theory of mining fracture ellipse belts and the dominant gas migration channel zone at the working face side, the mathematical equation of the target area in inclined thick coal seams was established considering the coal seam dip angle, and the basis for selection of pressure relief gas drainage methods in the targeted area was formed. It provided a reference for optimizing the parameters of pressure relief gas drainage in an inclined, thick coal seam working face.

Key words: gas extraction; inclined thick coal seam; pressure relief gas; target area; fracture evolution; mining fracture ellipse belt

0 引言

煤炭是我国的兜底能源、发挥着压舱石作用,2022年全国原煤产量45.6亿t,创历史新高。全国拥有14个亿吨级煤炭生产基地,多数具有倾斜厚煤层开采情况,相对于容易开采煤层,倾斜厚煤层的开采会引发诸多的瓦斯灾害防控问题:采动煤体破碎总量增加,卸压瓦斯涌出强度加大;开采扰动煤岩范围扩大,瓦斯涌出来源构成复杂;采动覆岩垮落对称性差,瓦斯运储区域形态多变;采场上部瓦斯多层聚集,瓦斯抽采钻孔布置难度增加。现有的卸压瓦斯抽采关键技术及工艺参数未完全适宜倾斜厚煤层开采条件下的覆岩垮落与瓦斯运储规律,导致卸压抽采效率不佳,矿井瓦斯防治风险增大。因此需进一步明晰倾斜厚煤层开采条件下卸压瓦斯抽采区域演化特征,提高瓦斯抽采效率。

国内外众多学者对采动覆岩裂隙演化与瓦斯储运规律开展了大量研究,并获得了诸多成果^[1-3]。伍永平^[4-5]、来兴平^[6-7]、王红伟等^[8-9]建立了大倾角煤层走向长壁开采岩体结构空间模型,对非对称煤岩的滑落失稳,进而诱发动力学灾害的机理进行了深入分析。薛成春等^[10]建立了倾斜悬顶结构力学模型,分析了工作面顶板能量分布特征。陈梁^[11]建立了大倾角煤层巷道顶板块体结构自稳力学模型,给出了顶板结构自稳力学判据。施峰等^[12]发现上覆岩层变形的破坏程度总体上是随煤层倾角的增加呈减小趋势,其下沉剧烈区域和膨胀变形破坏剧烈区域呈逐渐向工作面上山方向发展的趋势。

刘洪永^[13-14]、赵鹏翔^[15]、皮希宇^[16]等建立了不同倾角、不同推进速度、不同采高下采动卸压瓦斯运移优势通道演化模型。林海飞等^[17]研究了煤层群重复采动卸压瓦斯运移区动态演化规律,确定了工作面附近覆岩关键层形成的砌体梁结构与其下方岩层之间的离层裂隙为卸压瓦斯运移的空间并给出了相应的判别方法。李树刚^[18-19]、丁洋^[20]、李小琴^[21]等采用数值模拟与理论分析相结合的方法研究了煤层倾角、原始瓦斯含量等因素影响下的采空区卸压瓦

斯分布规律。高建良^[22-24]、张增辉^[25]、丁洋等^[26]认为通风方式、抽采方式、开采方式的不同对瓦斯流动有很大的影响。杨科^[27]研究发现关键层破断裂隙贯通时,被保护层透气性系数得到急剧增大,关键层的运移对被保护层瓦斯涌出起控制作用。许江^[28-29]、彭守建等^[30-31]基于自主研发的多场耦合煤层气开采物理模拟试验平台,研究了不同抽采条件对瓦斯运移的影响规律。

因此,以新疆硫磺沟煤矿(4-5)06工作面为试验原型,研究在不同煤层倾角条件下倾斜厚煤层裂隙演化规律,辨识出采动上覆岩层裂隙场中可持续高效抽采卸压瓦斯的靶向区,并结合采动覆岩裂隙椭圆带理论,构建了不同煤层倾角影响下的倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区空间形态演化控制模型,为进一步优化卸压瓦斯抽采布置参数提供参考依据。

1 试验

1.1 试验背景

新疆硫磺沟煤矿(4-5)06工作面煤层倾角 $25^{\circ} \sim 33^{\circ}$,平均 29° ,煤层厚度为5.5~6.8m,平均厚度为6.15m,瓦斯涌出量为 $18.9 \text{ m}^3/\text{min}$ 。工作面所在4-5煤层位于西山窑组下段中部,煤层厚度变异系数为13.09%,全区稳定可采,煤层结构较简单,局部夹矸,夹矸岩性一般为泥岩和碳质泥岩,为稳定煤层。

1.2 试验方法

试验以(4-5)06工作面为原型,依托西安科技大学西部煤矿开采及灾害防治重点试验室的二维物理相似模拟试验平台,开展相似比为1:100的物理模拟试验,研究不同煤层倾角下倾斜厚煤层采动覆岩裂隙演化规律。试验模型两侧留有宽10cm煤柱,可减小边界效应。受实验台尺寸影响,工作面开采宽度为80cm,开采高度为底板以上6cm的4-5煤层,如图1所示。为保证试验能有效还原现场采空区内覆岩实际垮落规律与裂隙演化特征,需保证模型与工作面原型之间在几何、运动、动力等重要物理力学参数上相似,最终得到模型的相似常数,见表1。

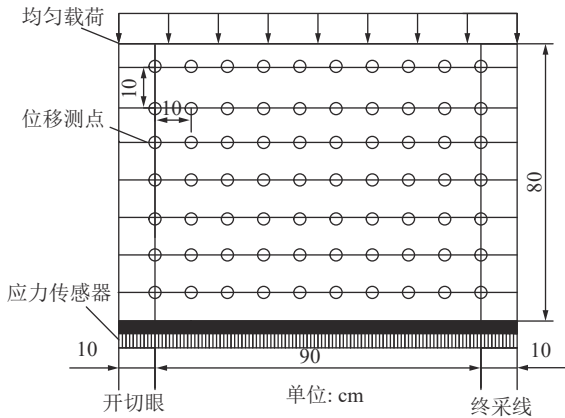


图 1 物理相似模拟试验模型

Fig.1 Physically similar simulation test model

表 1 模型相似常数

Table 1 Model similarity constants

模型架尺寸/ (mm×mm×mm)	相似常数					
	几何 α_L	时间 α_t	容重 α_γ	泊松比 α_μ	应力 α_σ	强度 α_E
1 200×800×100	100	10	1.5	1.0	150	150

基于相似理论, 试验选取砂子、石膏、大白粉、煤灰等作为模拟岩体的主要材料, 通过合适配比达到模拟现场各岩层的效果。结合模型的大小, 计算搭建各岩层 1 cm 高度的材料用量, 模拟煤岩体物理力学参数及配比结果见表 2, 3, 相似材料配比计算步骤如下。

表 2 煤岩层物理力学参数

Table 2 Physical-mechanical parameters of terrain

岩性	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量/GPa	抗压 强度/MPa	泊松比
炭质泥岩	26.40	56	48.8	0.278
中-细砂岩	26.60	50	65.1	0.280
细砂岩	26.20	43	69.0	0.260
粉砂岩	26.00	54	58.5	0.253
煤层	14.60	14	13.5	0.275

首先计算模拟试验模型中每个岩层中所有材料的总质量:

$$G = (lwh_m\gamma \times 10^3) / g \quad (1)$$

式中: G 为一层厚 1 cm 模拟岩层中所有材料的总质量, kg; γ 为模型材料的容重, N/m^3 ; g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ N}/\text{kg}$; l 、 w 、 h_m 为模型长度、宽度、高度, m。

然后计算搭建试验模型一层 1 cm 模拟岩体所需要的某种材料的质量:

$$m_i = GR_i \quad (2)$$

式中: m_i 为一层厚 1 cm 模拟岩体中需要的某种材料的质量, kg; R_i 为某种材料在一层模拟岩体中的比例。

表 3 1 cm 不同模拟岩体配比

Table 3 Proportions of different simulated rock masses

序号	岩性	厚度/cm	材料质量/kg			
			沙子	石膏	大白粉	煤灰
1	粉砂岩	2	2.614	0.075	0.298	—
2	细砂岩	8	2.613	0.149	0.224	—
3	粉砂岩	4	2.614	0.075	0.298	—
4	细砂岩	13	2.613	0.149	0.224	—
5	粉砂岩	3	2.614	0.075	0.298	—
6	中-细砂岩	7	2.613	0.111	0.261	—
7	细砂岩	7	2.613	0.149	0.224	—
8	粉砂岩	9	2.614	0.075	0.298	—
9	细砂岩	10	2.613	0.149	0.224	—
10	粉砂岩	6	2.614	0.075	0.298	—
11	炭质泥岩	1	2.654	0.099	0.233	—
12	粉砂岩	5	2.614	0.075	0.298	—
13	细砂岩	3	2.613	0.149	0.224	—
14	粉砂岩	5	2.614	0.075	0.298	—
15	炭质泥岩	3	2.654	0.099	0.233	—
16	细砂岩	6	2.613	0.149	0.224	—
17	中-细砂岩	5	2.613	0.111	0.261	—
18	粉砂岩	5	2.614	0.075	0.298	—
19	炭质泥岩	4	2.654	0.099	0.233	—
20	细砂岩	5	2.613	0.149	0.224	—
21	粉砂岩	17	2.614	0.075	0.298	—
22	细砂岩	3	2.613	0.149	0.224	—
23	炭质泥岩	1	2.654	0.099	0.233	—
24	煤层	6	1.342	0.059	0.239	1.346

按已计算好的试验模型中各分层材料所需量, 称出相应质量的配料, 通过加水混合搅拌, 制得模拟岩层, 各模拟岩层逐层叠合并夯实。各模拟岩层所在层位与工作面实际地质赋存情况保持一致, 并在模型顶部增加物理配重以替代超出试验台尺寸的岩层。待试验模型风干后进行模拟开采, 观测开采扰动过后的上覆岩层破断裂隙、离层裂隙演化规律。

2 试验结果

2.1 破断裂隙分布规律

破断裂隙是卸压瓦斯向上升浮、运移的主要途径, 是衡量一定区域渗透性的重要特征参数。为方便数据统计与分析, 定义以开切眼为原点, 工作面所

在为水平延展方向,垂直于煤层底板为竖直延展方向,每5 m宽度为一个统计单元,同一单元内所有破断裂隙宽度之和与单元宽度的比值作为该区域破断裂隙密度。不同煤层倾角下采动覆岩破断裂隙密度在采空区内分布如图2所示。

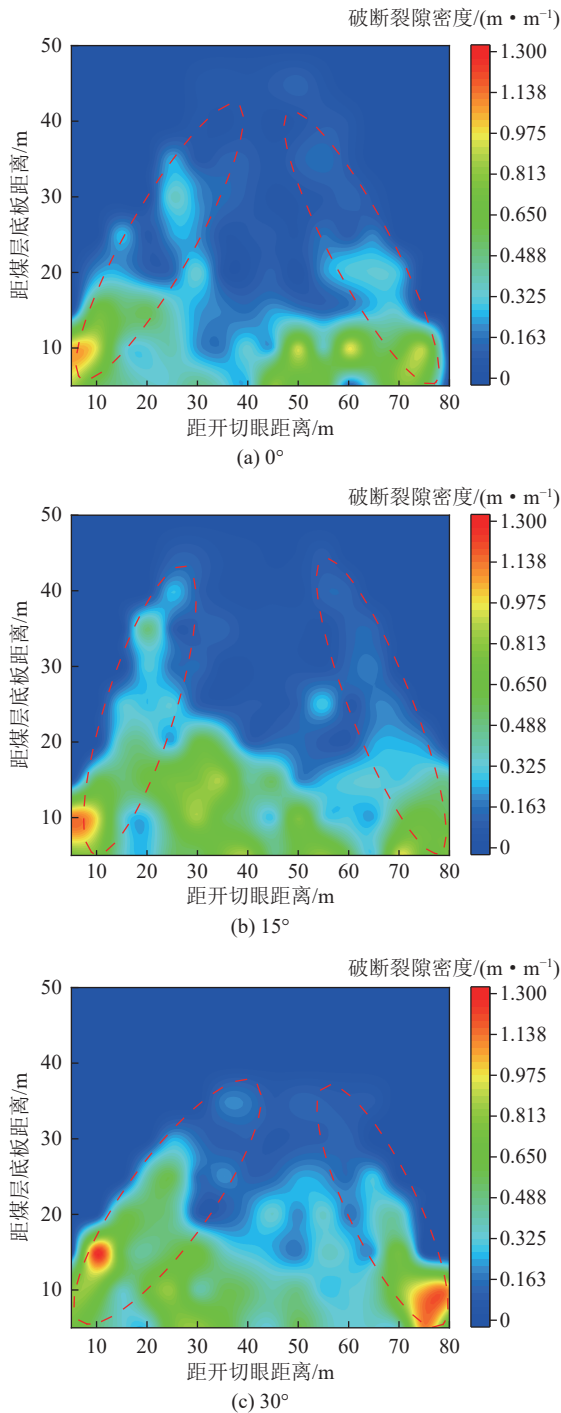


图2 不同煤层倾角破断裂隙宽度分布规律

Fig.2 Distribution law of broken fracture's width at different coal seam dip angles

破断裂隙宽度在采空区内呈现边界大于中部,低层位大于高层位的分布特征。采空区两侧瓦斯运

移优势通道带内的垮落岩层主要以铰接梁的形式存在,破断裂隙在铰接梁两端发育充分,裂隙张开度较大^[32-33]。受周期性垮落影响,工作面一侧的铰接梁在连接节点回转,与周围岩体之间的破断裂隙迅速闭合,裂隙张开度减小。采空区两侧铰接梁的形成与消失是导致两侧瓦斯运移优势通道带破断裂隙宽度大于中部的的主要原因。低层位垮落带区域岩体垮落后堆砌形式混乱,相互之间保留较大的破断裂隙。距煤层底板距离越大,进入裂隙带区域后,岩体垮落后堆砌形式越发规则有序,相邻岩体之间的破断裂隙出现部分闭合乃至消失的现象,因此在竖直延展方向上破断裂隙宽度较大的区域主要分布于低层位的垮落带。

2.2 覆岩离层裂隙分布规律

离层裂隙是卸压瓦斯的主要储集空间,是衡量一定区域瓦斯储集能力的主要特征参数。不同煤层倾角下采动覆岩离层裂隙在采空区内分布规律如图3所示。由于开展的是二维物理相似模拟试验,因此通过单位面积内(5 m×5 m)离层裂隙的面积占比作为衡量依据。

由图3可知,瓦斯运移优势通道带内离层裂隙面积占比呈现底部最大,顶部次之,中部最小的分布规律;随着倾角的增大,在工作面推进至相同距离时,顶部离层裂隙的面积占比逐渐增大。这是由于边界铰接梁形成后,更高层位的覆岩受采动影响破断、垮落后堆积次序与垮落前接近,岩体之间仅存在少量离层裂隙,使得中部区域离层裂隙面积占比最小。铰接梁下方的冒落带垮落岩体堆积混乱,岩体之间存在大量离层裂隙,垮落岩体与边界悬臂梁之间存在较大的未填充空间,使得底部区域离层裂隙面积占比最大。顶部的坚硬岩层垮落之前会与下方邻近层形成跨度较大的空洞空间,且随着煤层倾角的增大,坚硬岩层在垮落之前的跨度增加,导致下方空洞空间的宽度和跨度同样增大,进而导致在瓦斯运移优势通道带顶部出现相对较大的离层裂隙面积占比情况。

2.3 覆岩分形维数演化规律

裂隙分形维数是描述一定区域内裂隙发育复杂程度的度量值,分形维数值越大,裂隙发育程度越充分,卸压瓦斯在该区域渗透、运移综合能力越强。利用FracLab软件处理距煤层底板不同距离下的工作面侧瓦斯运移优势通道带裂隙区域图片,获得了如图4所示的不同煤层倾角下裂隙分形维数演化规律图,并根据其变化趋势,进行了公式拟合,结果见表4。

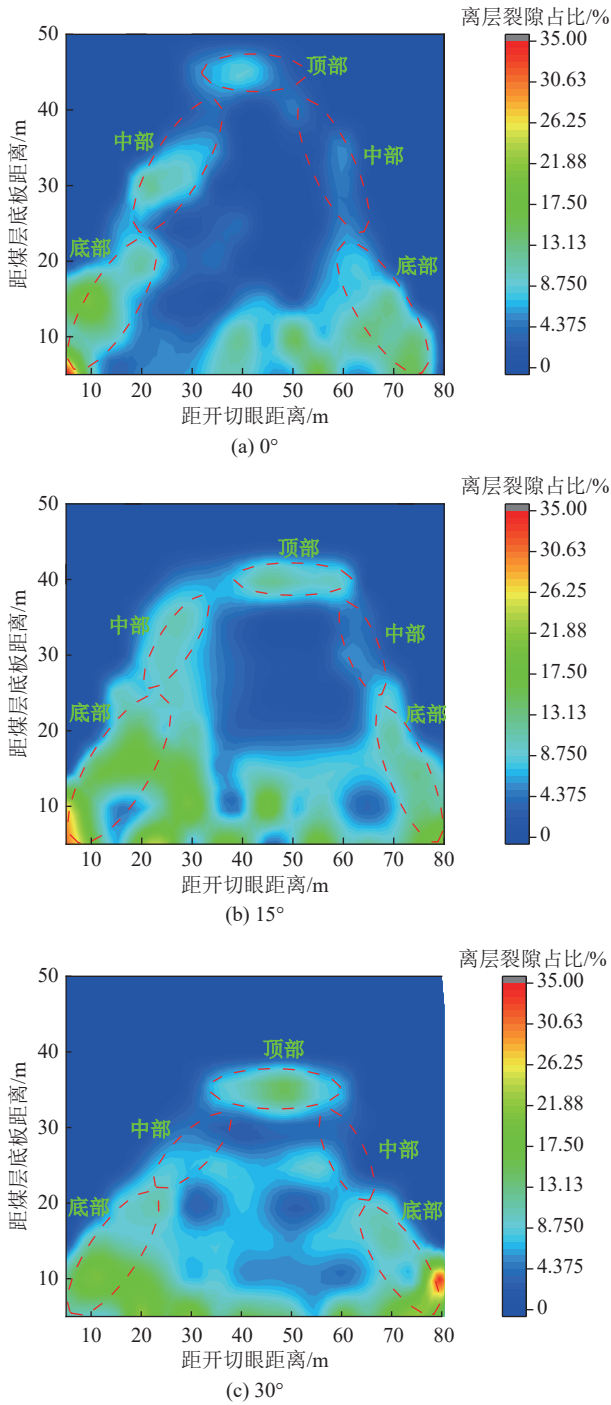


图3 不同煤层倾角离层裂隙面积占比分布规律

Fig.3 Distribution law of area proportion of bed-separated fracture at different coal seam dip angles

工作面侧瓦斯运移优势通道带内裂隙的分形维数呈现先减小后增大的现象。煤层倾角越大，裂隙分形维数值普遍越大，拟合曲线极小值点离煤层底板越近 (29.5 m<31.3 m<34.0 m)。这是由于煤层倾角越大，工作面侧瓦斯运移优势通道带内垮落覆岩所受下滑效应越强，垮落岩体整体性向开切眼侧转移，不易与边界形成铰接结构，导致工作面侧出现较大的未填充空洞区，增大了该区域分形维数。煤层

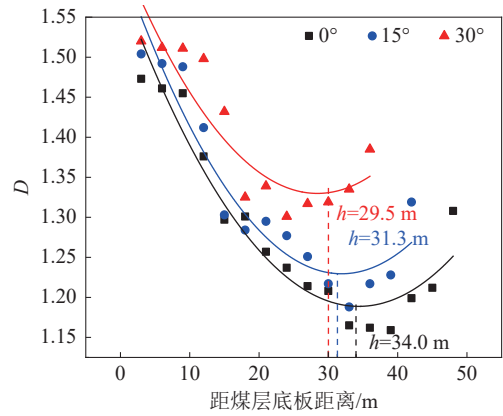


图4 工作面侧瓦斯运移优势通道带裂隙分形维数

Fig.4 Fractal dimension of fractures in dominant channel zone of gas migration on working face side

表4 不同煤层倾角工作面侧瓦斯运移优势通道带分形维数拟合关系

Table 4 Fractal dimension fitting relationship of gas migration predominant channel zone on working face side with different coal seam dip angles

煤层倾角/(°)	分形维数拟合公式	R ²
0	$D_0 = 3.383 \times 10^{-4}h^2 - 0.023h + 1.589$	0.918
15	$D_{15} = 3.837 \times 10^{-4}h^2 - 0.024h + 1.620$	0.891
30	$D_{30} = 3.726 \times 10^{-4}h^2 - 0.022h + 1.631$	0.789

倾角越大，岩体在垂直煤层底板方向承受的重力矩越小，在更低层位出现较大空洞区域的概率增加，分形维数整体呈现先减小后增大的现象，极小值点所在层位更低。

由于优势通道带的裂隙分形维数受到煤层倾角和与煤层底板距离的共同影响，为了能量化描述优势通道带的分形维数与两者之间的关系，根据优势通道带分形维数演化的拟合趋势，将优势通道带分形维数同工作面煤层倾角以及与煤层底板距离进行多元拟合，得到拟合关系为

$$D = 3.621 \times 10^{-4}h^2 - 0.026h + 0.0246 \ln(\theta - 2.836) + 1.619$$

$$R^2 = 0.781 \tag{3}$$

式中：D为优势通道带分形维数；h为距煤层底板距离，m；θ为煤层倾角，(°)。

3 讨论

3.1 靶向区层位判定

破断裂隙为卸压瓦斯主要升浮途径，离层裂隙为卸压瓦斯主要储集空间，裂隙分形维数则表明单位空间内的裂隙复杂程度。因此，以工作面侧瓦斯

运移优势通道带内破断裂隙宽度、离层裂隙面积占比、裂隙分形维数距煤层底板距离的变化规律为基础,得到了不同煤层倾角下瓦斯运移优势通道带内裂隙演化规律,如图5所示。

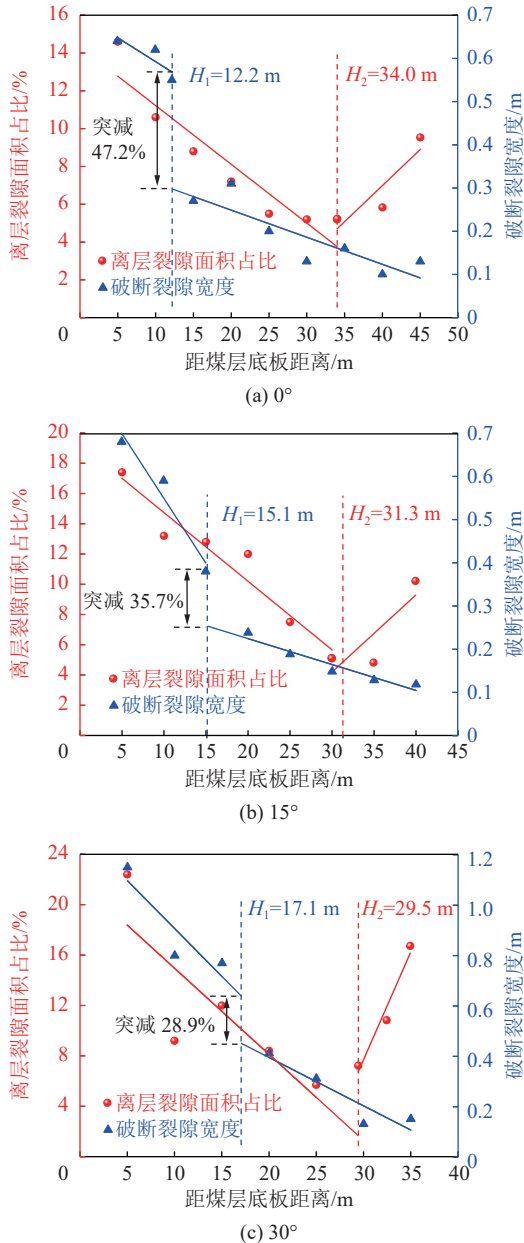


图5 工作面侧瓦斯运移优势通道带裂隙演化规律

Fig.5 Evolution law of fractures in the gas migration dominant channel zone on the working face side

以第1层铰接梁 H_1 所在层位为顶部边界,下方区域破断裂隙宽度与离层裂隙面积占比最大,且在交界处破断裂隙宽度出现大幅度下降,不同煤层倾角下 ($0^\circ < 15^\circ < 30^\circ$) 破断裂隙宽度迅速收缩 47.2%, 35.7% 以及 28.9%。破断裂隙为卸压瓦斯主要升浮途径,根据式(4)可知,当破断裂隙宽度减小时将导致卸压瓦斯气体流量急剧缩减,大量卸压瓦斯气体

在 H_1 层位向上运移活动受阻。

$$Q = \frac{k(p_1^2 - p_2^2)A}{2p_0L\mu} \quad (4)$$

式中: Q 为气体流量, m^3/s ; k 为渗透率, m^2 ; μ 为气体动力黏度, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$; A 为气体流经截面, $A = \pi r^2$, m^2 ; r 为破断裂隙宽度, m ; L 为气体流动距离, m ; P_0 为标准大气压力, MPa ; P_1 为气体进入破断裂隙的初始压力值, MPa ; P_2 为气体通过破断裂隙后的压力, MPa ;

以瓦斯运移优势通道带裂隙分形维数极小值点 H_2 所在层位为边界的顶部区域,离层裂隙面积占比呈增大趋势,破断裂隙宽度保持减小趋势,但裂隙分形维数保持增大趋势。该裂隙演化规律表明随着层位的增加,升浮通道持续减小,但可储集瓦斯的空间增长迅速。

位于 H_1 与 H_2 两分界线之间的区域处于卸压瓦斯向上升浮运移的主要通道上,瓦斯相对密度为 0.554,在压力梯度作用下单位空间内的卸压瓦斯逐渐增多,并持续促使卸压瓦斯向上快速运移。离层裂隙面积占比与破断裂隙宽度均保持减小趋势,表明该区域瓦斯向上升浮通道与储集空间持续减小。

第1层铰接梁 H_1 与裂隙分形维数极小值点 H_2 所在层位两侧裂隙演化规律差异明显,基于此将优势通道带划分为3个层位的靶向区,按空间层位上的高低依次为低层位靶向区、中层位靶向区和高层位靶向区,如图6所示。

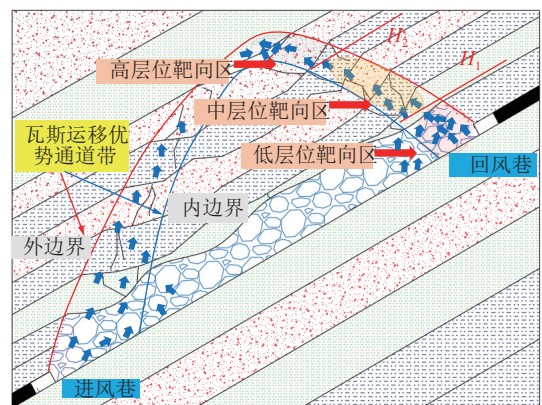


图6 倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区分布

Fig.6 Distribution of target area for pressure relief gas drainage in inclined thick coal seam

3.2 靶向区空间模型构建

铰接梁的形成标志着采空内垮落覆岩从混乱堆积区域开始过渡到相对有序的区域,根据模拟试验中第1层铰接梁 H_1 随煤层倾角的增大所在层位的演化规律,对其进行线性拟合,如式(5)所示。

$$H_1 = 0.16\theta + 12.35 \quad R^2 = 0.988 \quad (5)$$

式中： H_1 为第 1 层铰接梁所在层位； q 为煤层倾角，(°)。

裂隙分形维数极小值点 H_2 所在水平作为中、高层位靶向区边界，可通过对式 (3) 求导获得，如式 (6) 所示，当 D' 为 0 时即可获得不同倾角下的裂隙分形维数极小值点所在水平。

$$D' = 2ah + b \ln(\theta + c) + d \quad (6)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{2 \tan \theta x}{H - h/D} \right)^2 - \frac{4 \sin \theta}{h_3} + 1 + \frac{(y - c)^2}{(L_a - c)^2} = \frac{h_1 - z}{h_1 K_{c_1}} \\ \left(x - \frac{h_3}{2 \sin \theta} + \frac{A_1 - A_2}{2} \right)^2 + \frac{(y - c)^2}{(c - B_1)^2} = \frac{h_2 - z}{h_2 K_{c_2}} \\ \left[\frac{H}{2} - \frac{h/D \times \cot \theta}{2} - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \right]^2 + \frac{(y - c)^2}{(c - B_1)^2} = \frac{h_2 - z}{h_2 K_{c_2}} \end{cases} \quad (7)$$

式中： L_a 为工作面宽度，m； L_b 为工作面推进距离，m； h_1 为瓦斯运移通道内边界高度，m； h_2 为瓦斯运移通道的外边界高度，m； K_{c_1} 、 K_{c_2} 分别为瓦斯运移通道内外边界所包围的垮落岩体的碎胀系数； c 为 h_1 、 h_2 到进风巷的距离，m； A_1 、 A_2 为开切眼、工作面上方采空区椭抛带宽，m； B_1 、 B_2 为在工作面进、回风巷处椭抛带带宽，m； θ 为煤层倾角； h_3 为工作面移动前后的水

式中： D' 为裂隙分形维数拟合表达式 (3) 的一阶导数； a 、 b 、 c 、 d 为常数，由具体试验获得。

通过二维物理相似模拟试验结果可以发现，受煤层倾角影响，瓦斯运移优势通道带呈非对称分布形态，基于采动裂隙椭抛带理论，文献 [15] 建立了不同煤层倾角下的瓦斯运移优势通道带表征方程，如式 (7) 所示。

平距离之差，m； H 为瓦斯运移通道与开切眼垂直高度差，m； x 为煤层走向， y 为煤层倾向， z 为上覆岩层高度。

靶向区左右边界为瓦斯运移优势通道带内外边界，上下边界为第 1 层铰接梁和分形维数极小值点所在层位，且整体位于工作面一侧，据此可建立倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区空间形态数学表征方程：

$$\begin{cases} \left(\frac{2 \tan \theta x}{H - h/D} \right)^2 - \frac{4 \sin \theta}{h_3} + 1 + \frac{(y - c)^2}{(L_a - c)^2} = \frac{h_1 - z}{h_1 K_{c_1}} \\ \left(x - \frac{h_3}{2 \sin \theta} + \frac{A_1 - A_2}{2} \right)^2 + \frac{(y - c)^2}{(c - B_1)^2} = \frac{h_2 - z}{h_2 K_{c_2}} \quad \left(y > \frac{L_a}{2} \right) \\ \left[\frac{H}{2} - \frac{h/D \cdot \cot \theta}{2} - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \right]^2 + \frac{(y - c)^2}{(c - B_1)^2} = \frac{h_2 - z}{h_2 K_{c_2}} \\ H_1 = 0.16\theta + 12.35 \\ D' = 2ah + b \ln(\theta + c) + d \end{cases} \quad (8)$$

3.3 靶向区卸压瓦斯抽采方法选择

工作面回采前，根据煤层赋存、瓦斯赋存、工作面条件等预测工作面瓦斯涌出量，参考《煤矿瓦斯治理 10 条经验》、NB/T 51003—2012《采煤工作面瓦斯综合治理设计规范》可分级选择采动卸压瓦斯抽采方法。针对倾斜厚煤层开采，以瓦斯涌出量为主，综合考虑瓦斯来源、瓦斯抽采方法等影响因素，结合靶向区裂隙演化规律，形成靶向区卸压瓦斯抽采方法选择依据，见表 5。

4 工程实践

4.1 抽采布置参数优化

以兖矿新疆硫磺沟煤矿 (4-5)06 工作面为依托，开展工程实践。根据模型计算分析，其低层位靶向区位于工作面回风巷一侧后方走向距离 0~25.4 m，倾向距离 -5~10 m，垂直煤层底板 0~17 m 的范围；其中层位靶向区位于工作面后方走向距离 4~30.2 m，倾向距离 2.6~28.5 m，垂直煤层底板 17~30.5 m 的范围。

表 5 各层位靶向区卸压瓦斯抽采方法选择依据

Table 5 Basis for selection of pressure relief gas drainage methods in target areas of each layer

工作面瓦斯涌出量/(m ³ ·min ⁻¹)	卸压瓦斯抽采方法	所属区域
≤10	插管或埋管	低层位靶向区
10~20	常规高位钻孔抽采或定向长钻孔为主，插管或埋管抽采为辅	低、中层位靶向区
20~50	瓦斯抽采巷或定向高位孔或地面孔抽采为主，插管或埋管抽采为辅	低、中、高层位靶向区
≥50	抽采巷、高位钻孔、埋管、地面钻井等综合抽采	低、中、高层位靶向区

根据工作面现有瓦斯抽采设备及抽采钻孔布置设计,结合瓦斯涌出量与靶向区范围判定,对其原高位钻场卸压瓦斯抽采钻孔布置参数(表6)进行了优化,见表7,相对位置关系如图7所示。综合考虑钻

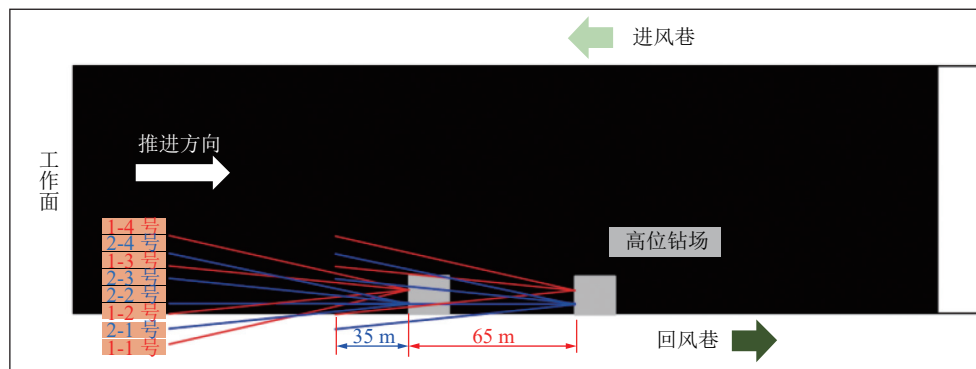
孔施工成本与瓦斯抽采效率,将优化后的高位钻孔多布置于中层位靶向区内,且偏向于中下部区域。同时,将其上隅角埋管深度优化至15 m,位于低层位靶向区中部区域。

表6 13号高位钻场原钻孔布置参数
Table 6 Original drill layout parameters of No.13 high-level drilling site

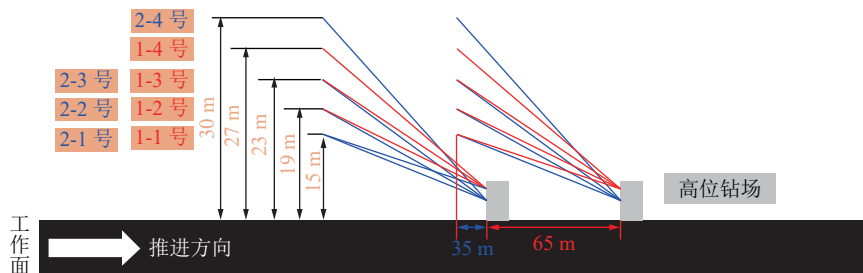
钻场编号	钻孔编号	钻孔直径/mm	与轨道巷夹角/(°)	倾角/(°)	孔长/m	终孔距煤层底板高度/m
13号	1-1	120	左偏4.1	12.0	102.5	15
	2-1		左偏2.1	13.3	102.8	19
	1-2		0	12.4	102.4	19
	2-2		右偏2.0	13.7	103.0	23
	1-3		右偏4.1	12.8	102.8	23
	2-3		右偏6.1	14.1	103.7	27
	1-4		右偏8.2	13.2	103.7	30
	2-4		右偏10.2	14.4	104.9	34
	1-5		右偏12.2	13.4	105.2	34

表7 13号高位钻场钻孔布置参数
Table 7 Drill layout parameters of No.13 high-level drilling site

钻场编号	钻孔编号	钻孔直径/mm	与轨道巷夹角/(°)	倾角/(°)	孔长/m	终孔距煤层底板高度/m
13号	1-1	120	左偏6.2	7.8	101.5	15
	2-1		左偏4.1	12.0	102.5	15
	1-2		左偏2.1	13.3	102.8	19
	2-2		0	12.4	102.4	19
	1-3		右偏2.0	13.7	103.0	23
	2-3		右偏4.1	12.8	102.8	23
	1-4		右偏6.1	14.1	103.7	27
	2-4		右偏8.2	13.2	103.7	30



(a) 高位钻场俯视图



(b) 高位钻场侧视图

图7 高位钻场布置

Fig.7 Layout of high-level drilling field

4.2 卸压瓦斯综合抽采效果

工作面回采至13号钻场有效抽采范围时,高位钻孔开始进行卸压瓦斯抽采,其与上隅角埋管的瓦斯抽采纯量总量达到 $12.3 \sim 21.3 \text{ m}^3/\text{min}$,占绝对瓦斯涌出量的 $76.2\% \sim 88.6\%$,平均为 81.4% ,如图8所示。与参数优化前的12号钻场相比,卸压瓦斯抽采效率提升 15.3% ,上隅角、工作面、回风巷平均瓦斯体积分数为 0.31% 、 0.12% 和 0.22% ,均远低于《煤矿安全规程》规定的阈值 1% ,有效的保证了工作面的安全回采。

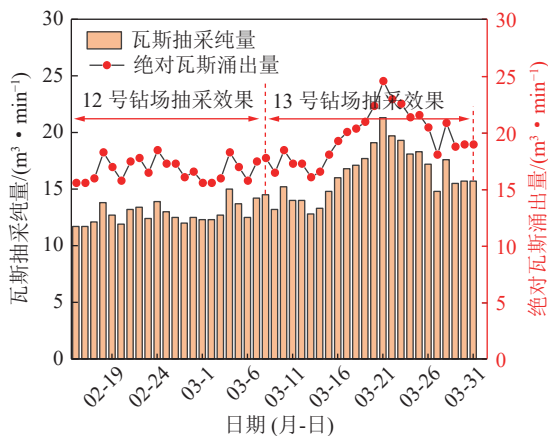


图8 瓦斯抽采效果

Fig.8 Gas extraction effect of drilling field

5 结 论

1) 采动上覆岩层裂隙场内,破断裂隙宽度呈现采空区两侧边界区域大于中部,低层位大于高层位的分布特征。同时破断裂隙宽度受铰接梁影响较强,随着煤层倾角的增大,第1层铰接梁所在层位上部区域破断裂隙宽度仅有下部区域的 52.8% 、 64.3% 以及 71.1% 。

2) 瓦斯运移优势通道带内离层裂隙面积占比呈现底部最大,顶部次之,中部最小的分布规律。裂隙分形维数整体呈现先减小后增大的规律。

3) 基于破断裂隙与离层裂隙在上覆岩层内的演化规律,将优势通道带按空间层位上的高低划分为3个层位的靶向区,依次为低层位靶向区、中层位靶向区和高层位靶向区。

4) 基于采动裂隙椭抛带理论,对工作面侧瓦斯运移优势通道带开展进一步的研究,建立了考虑煤层倾角因素的倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区空间形态数学方程,结合靶向区裂隙演化规律,形成了靶向区卸压瓦斯抽采方法选择依据,为优化倾斜厚煤层工作面卸压瓦斯抽采布置参数提供参考依据。

参考文献(References):

- 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 overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 466-469.
- 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.
- 李树刚,林海飞,赵鹏翔,等.采动裂隙椭抛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.
- 伍永平,杨玉冰,王同,等.大倾角走向长壁伪俯斜采场支架稳定性分析[J].煤炭科学技术,2022,50(1):60-69.
WU Yongping, YANG Yubing, WANG Tong, et al. Stability analysis of support under gangue filling condition in pitching oblique mining area of steeply dipping seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 60-69.
- 伍永平,刘旺海,解盘石,等.大倾角煤层长壁伪俯斜采场围岩应力演化及顶板破断特征[J].煤矿安全,2020,51(9):222-227.
WU Yongping, LIU Wanghai, XIE Panshi, et al. Stress evolution and roof breaking characteristics of surrounding rock in oblique longwall mining area of steeply dipping seam[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(9): 222-227.
- 来兴平,代晶晶,李超.急倾斜煤层开采覆岩联动致灾特征分析[J].煤炭学报,2020,45(1):122-130.
LAI Xingping, DAI Jingjing, LI Chao. Analysis on hazard characteristics of overburden structure in steeply inclined coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 122-130.
- 来兴平,刘简宁,崔峰,等.急斜煤层顶板裂隙扩展诱导能量时-空演变特征[J].西安科技大学学报,2018,38(4):562-568.
LAI Xingping, LIU Jianning, CUI Feng, et al. Spatio-temporal evolution mechanism of induced energy with roof-crack propagation in extremely steep coal seams[J]. Journal of Xi'an University of Science And Technology, 2018, 38(4): 562-568.
- 王红伟,伍永平,焦建强,等.大倾角煤层大采高工作面倾角对煤壁片帮的影响机制[J].采矿与安全工程学报,2019,36(4):728-735,752.
WANG Hongwei, WU Yongping, JIAO Jianqiang, et al. Study on effect of dip angle on coal wall spalling of working face with great mining height in steeply inclined coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(4): 728-735, 752.
- 王红伟,焦建强,伍永平,等.急倾斜厚煤层短壁综放采场承载结构泛化特征[J].煤炭科学技术,2021,49(11):56-64.
WANG Hongwei, JIAO Jianqiang, WU Yongping, et al. General-

- ization characteristics of bearing structure in short wall fully-mechanized top-coal caving mining face of steeply inclined thick seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(11): 56–64.
- [10] 薛成春, 曹安业, 郭文豪, 等. 深部大倾角厚煤层开采能量演化规律与冲击地压发生机理[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 876–885.
XUE Chengchun, CAO Anye, GUO Wenhao, *et al.* Energy evolution law and rock burst mechanism of deep thick seams with large inclination[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(5): 876–885.
- [11] 陈 梁. 采动影响下大倾角煤层巷道围岩破裂演化与失稳机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
CHEN Liang. Study on fracture evolution and instability mechanism of large dip coal seam roadway considering the effect of mining [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [12] 施 峰, 王宏图, 舒 才. 煤层倾角变化对采动覆岩变形规律影响的相似模拟试验研究[J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(12): 36–45.
SHI Feng, WANG Hongtu, SHU Cai. Similar simulation study on the influence of seam angle change on deformation law of overburden strata in coal seam mining[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(12): 36–45.
- [13] 刘洪水, 程远平, 陈海栋, 等. 高强度开采覆岩离层瓦斯通道特征及瓦斯渗流特性研究[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(9): 1437–1443.
LIU Hongyong, CHENG Yuanping, CHEN Haidong, *et al.* Characteristics of mining gas channel and gas flow properties of overlying stratum in high intensity mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(9): 1437–1443.
- [14] 刘洪水, 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.* Guidance and control effect of drawing speed on excellent gas channel at fully mechanized longwall face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 809–815.
- [15] ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, *et al.* Fractal characteristics of methane migration channels in inclined coal seams[J]. *Energy*, 2021, 225: 120127.
- [16] 皮希宇. 煤层群采动卸压煤与覆岩裂隙演化特征及其对瓦斯抽采的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
PI Xiyu. Evolution characteristics of cracks in coal and overlying strata caused by mining of coal seams and their influence on gas drainage [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [17] 林海飞, 李磊明, 李树刚, 等. 煤层群重复采动卸压瓦斯储运区演化规律实验研究[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(3): 385–393.
LIN Haifei, LI Leiming, LI Shugang, *et al.* Experimental study on evolution law of pressure relief gas storage and transportation area of repeated mining in coal seams [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 201, 41(3): 385–393.
- [18] 李树刚, 徐培耘, 林海飞, 等. 倾斜煤层卸压瓦斯导流抽采技术研究与实践[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(5): 1001–1008.
LI Shugang, XU Peiyun, LIN Haifei, *et al.* Technology research and engineering practice of pressure-relief gas diversion extraction in inclined coal seams[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2020, 37(5): 1001–1008.
- [19] 李树刚, 乌日宁, 赵鹏翔, 等. 综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 207–213.
LI Shugang, WU Rining, ZHAO Pengxiang, *et al.* Study on formation mechanism of gas flow active area in upper corner of fully-mechanized mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 207–213.
- [20] 丁 洋, 朱 冰, 李树刚, 等. 高突矿井采空区卸压瓦斯精准辨识及高效抽采[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3565–3577.
DING Yang, ZHU Bing, LI Shugang, *et al.* Accurate identification and efficient drainage of relieved methane in goaf of high outburst mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3565–3577.
- [21] 李小琴, 聂 鑫, 郝国才. 煤矿采空区卸压空间分布特征研究[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(4): 197–200.
LI Xiaoqin, NIE Xin, HAO Guocai. Study on spatial distribution characteristics of pressure relief in coal mine goaf research on spatial distribution characteristics of pressure relief in goaf of coal mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(4): 197–200.
- [22] 高建良, 孙望望. J型通风工作面采空区漏风与瓦斯浓度分布规律研究[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(1): 132–136.
GAO Jianliang, SUN Wangwang. Study on air leakage and gas concentration distribution law in working face goaf with J type ventilation system[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(1): 132–136.
- [23] 高建良, 李炫烨. 尾巷风量对“J”型通风工作面漏风及瓦斯分布的影响[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(8): 166–169.
GAO Jianliang, LI Xuanye. Effect of air volume in tail gateway on air leakage and gas distribution in “J” type ventilation working face[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(8): 166–169.
- [24] 高建良, 刘明信, 徐 文. 高抽巷抽采对采空区漏风规律的影响研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2): 141–145.
GAO Jianliang, LIU Mingxin, XU Wen. Influence study on high-position extraction tunnel on air-leakage law in goaf[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2015, 34(2): 141–145.
- [25] 张增辉, 薛彦平. 基于“U”型下行通风的综放工作面瓦斯治理数值模拟研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(12): 183–187, 193.
ZHANG Zenghui, XUE Yanping. Numerical simulation study on gas control in fully mechanized top coal caving face based on “U” downward ventilation[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(12): 183–187, 193.
- [26] 丁 洋, 宜 艳, 林海飞, 等. 高强开采综放工作面瓦斯浓度空间分布规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(1): 206–214.
DING Yang, YI Yan, LIN Haifei, *et al.* Spatial distribution law of gas concentration in the fully mechanized caving face of high in-

- tensity mining[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(1): 206–214.
- [27] 杨科, 刘帅. 深部远距离下保护层开采多关键层运移-裂隙演化-瓦斯涌出动态规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(5): 991–1000.
- YANG Ke, LIU Shuai. Rule of multi-key strata movement-fracture evolution-dynamics of gas emission in deep long distance lower protective layer mining[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2020, 37(5): 991–1000.
- [28] 许江, 刘龙荣, 刘东, 等. 煤层瓦斯抽采过程中煤岩变形的物理模拟实验[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(3): 562–570.
- XU Jiang, LIU Longrong, LIU Dong, *et al.* Physical simulation of coal and rock deformation in the process of coal seam gas extraction[J]. *Journal of China coal society*, 2015, 40(3): 562–570.
- [29] 许江, 刘龙荣, 彭守建, 等. 不同吸附性气体抽采过程中煤储层参数演化特征研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(6): 1647–1656.
- XU Jiang, LIU Longrong, PENG Shoujian, *et al.* Evolution characteristics of coal reservoir parameters in different adsorption gas extraction process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(6): 1647–1656.
- [30] 彭守建, 贾立, 许江, 等. 煤层瓦斯抽采多物理场参数动态响应特征及其耦合规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1235–1243.
- PENG Shoujian, JIA Li, XU Jiang, *et al.* Dynamic response characteristics and coupling law of multi physical field parameters in coal seam gas drainage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1235–1243.
- [31] 彭守建, 张超林, 梁永庆, 等. 抽采瓦斯过程中煤层瓦斯压力演化规律的物理模拟试验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(3): 571–578.
- PENG Shoujian, ZHANG Chaolin, LIANG Yongqing, *et al.* Physical simulation experiment on the evolution of gas pressure during CBM drainage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(3): 571–578.
- [32] 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.* Advancing speed of fully-mechanized coal mining face affected to evolution of gas migration dominant channel[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(7): 99–108.
- [33] 赵鹏翔, 卓日升, 李树刚, 等. 综采工作面瓦斯运移优势通道演化规律采高效应研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(4): 848–856.
- ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, *et al.* Study on the mining height evolution law of the dominant channel of gas migration in fully mechanized mining face[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2019, 36(4): 848–856.