

中文引用格式:双海清,刘子嘉,林海飞,等.缓倾斜煤层高位定向长钻孔抽采卸压瓦斯技术研究[J].中国安全科学学报,2024,34(增1):102-108.

英文引用格式:SHUANG Haiqing, LIU Zijia, LIN Haifei, et al. Research on high directional and long drilling technology for extracting pressure relief gas in slowly inclined coal bed[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1):102-108.

# 缓倾斜煤层高位定向长钻孔抽采卸压瓦斯技术研究\*

双海清<sup>1,2,3</sup>副教授,刘子嘉<sup>1</sup>,林海飞<sup>1,2,3</sup>教授,周斌<sup>1,2,3</sup>副教授,张文琦<sup>1</sup>,罗永刚<sup>4</sup>

(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 陕西长武亭南煤业有限责任公司,陕西 咸阳 713600)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.S1.0024

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51904238);陕西省自然科学基金资助(2019JQ-337,2022JQ-365);陕西省教育厅专项科学研究计划(22JK0460)。

**【摘要】**为探究缓倾斜煤层覆岩采动裂隙时空演化及卸压瓦斯富集区的变化特征,采用物理相似模拟和现场监测方法,分析采动覆岩裂隙演化和裂隙分布特征;研究卸压瓦斯富集区演化特征,确定高位定向钻孔的合理布置参数方案,并进行效果检验。结果表明:试验工作面沿煤层走向垮落带高度13 m,裂隙带高度68.5 m,沿工作面倾向裂隙网络受煤层倾角影响,工作面断裂角为54°~59°,裂隙发育的开度自工作面向上逐渐增大,瓦斯运移通道呈现出明显的非对称性特征;高位定向钻孔全生命周期瓦斯抽采过程依据其抽采体积分数可分为抽采初期、抽采中期和抽采末期3个阶段,其中抽采初期抽采体积分数偏低,抽采中期为钻孔抽采生命周期内的高效抽采阶段,进入抽采末期抽采体积分数呈现急剧下降的趋势;高位定向长钻孔抽采技术实施后,工作面上隅角、回风巷瓦斯体积分数均小于0.8%,瓦斯抽采效果良好,高位钻孔的布置方式较为合理。

**【关键词】**缓倾斜煤层;高位定向长钻孔;瓦斯抽采;卸压瓦斯;采动裂隙

## Research on high directional and long drilling technology for extracting pressure relief gas in slowly inclined coal bed

SHUANG Haiqing<sup>1,2,3</sup>, LIU Zijia<sup>1</sup>, LIN Haifei<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Bin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wenqi<sup>1</sup>, LUO Yonggang<sup>4</sup>

(1 College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology,

Xi'an Shaanxi 710054, China; 2 Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention,

Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China;

3 Western Engineering Research Center of Mine Gas Intelligent Drainage for Coal Industry,

Xi'an Shaanxi 710054, China; 4 Shaanxi Changwu Tingnan Coal Co., Xianyang Shaanxi 713600, China)

**Abstract:** In order to investigate the spatio-temporal evolution of mining-induced fissures and change characteristics of pressure relief gas-enriched area in the overlying rock of the slowly inclined coal bed, physical similarity simulation and field monitoring method were used to analyze the evolution and distribution characteristics of the fissure in the overlying rock. The evolution characteristics of the pressure

relief gas-enriched area were studied to determine the parameter arrangement scheme of the high directional drilling holes, and the effect test was carried out. The results show that the test working face has a height of 13 m along the caving zone of the coal bed, and the height of the fissure zone is 68.5 m. The fissure network along the working face is affected by the inclination angle of the coal bed, and the fracture angle of the working face is  $54^{\circ} - 59^{\circ}$ . The openness of the fissure development is gradually increasing upward from the working face, and the gas transportation channel is asymmetric. The whole life cycle of the gas extraction process by high directional drilling can be divided into the early stage of extraction, the middle stage of extraction, and the end stage of extraction according to the extraction volume fraction. In the early stage of extraction, the volume fraction is low. The middle stage of extraction has high efficiency in the whole life cycle of extraction. In the late stage of extraction, the volume fraction shows a sharp decline. After the implementation of the high directional and long drilling technology, the volume fractions of the gas in the upper corners of the working face and in the return-air tunnel are all less than 0.8%, indicating a good effect of the gas extraction, and the arrangement of the high drilling holes is reasonable.

**Keywords:** slowly inclined coal bed; high directional and long drilling holes; gas extraction; pressure relief gas; mining-induced fissures

## 0 引言

煤层开采后会引发上覆岩层运动以及裂隙场的改变,采动裂隙场的形成会为卸压瓦斯的储存和运输提供通道<sup>[1-2]</sup>。针对煤层透气性低的特点,大部分采掘工作面以布置普通高位钻孔抽采卸压瓦斯为主<sup>[3-5]</sup>。相较水平煤层而言,倾斜煤层上覆岩层的运动和裂隙发育特征更为复杂<sup>[6-8]</sup>。为此,开展缓倾斜煤层的采动裂隙演化特征研究,成为实现缓倾斜工作面卸压瓦斯精准防治的基础。

目前,众多学者针对倾斜煤层开采后覆岩裂隙演化特征及瓦斯抽采技术开展了大量研究。冯锦艳<sup>[9]</sup>、王金安<sup>[10]</sup>等针对倾斜煤层,利用物理相似模拟手段分析了覆岩采动裂隙演化特征,并量化描述了其裂隙分布特征。刘传安等<sup>[11]</sup>认为不同区域岩体构造破断的分区特征是导致大倾角煤层覆岩采动裂隙形态分布呈现不对称性特征的重要原因。李春元<sup>[12]</sup>、甘智慧<sup>[13]</sup>等运用数值模拟方法探究了倾斜煤层开采底板破裂及其应力分布特征。在此基础上,伍永平等<sup>[14]</sup>认为采场围岩具有不对称应力分布特征,并建立了大倾角煤层采场力学模型。解盘石等<sup>[15]</sup>分析了大倾角大采高采场顶板结构特征与演化特征,得到顶板结构与煤壁的相互作用特征。以上研究成果为倾斜煤层卸压瓦斯抽采技术的发展提供了一定理论基础,能够有针对性地描述采动覆岩裂隙的演化特征。然而,对于缓倾斜煤层而言,煤层产状同时具备倾斜煤层及水平煤层的空间分布特征,采动影响下的覆岩裂隙和卸压瓦斯抽采特征缺

乏系统研究。

鉴于此,笔者拟通过物理相似模拟试验,探究缓倾斜煤层开采条件下的覆岩裂隙演化特征,进而确定卸压瓦斯富集区,提出了高位定向长钻孔布置方法并进行工程应用,以期为缓倾斜煤层煤与瓦斯共采提供理论支持。

## 1 工程背景及试验方案

### 1.1 工程背景

试验工作面埋藏深度为 514~573 m,主采已 15 煤,该煤层赋存条件稳定,煤层厚度为 3.4~3.85 m,平均厚度 3.6 m,煤层倾角平均为  $12^{\circ}$ 。工作面可采长度 1 989.6 m,倾向宽度 248 m,平均煤层瓦斯含量为  $9.66 \text{ m}^3/\text{t}$ ,瓦斯压力为 1.2 MPa,瓦斯放散初速度  $28.1 \text{ m/s}$ ,工作面不同岩性煤层分布情况见表 1。

### 1.2 试验方法

根据几何、动力和时间相似条件及现场实际条件,得到物理相似模拟模型相似比见表 2。试验平台选用 2 m 二维物理相似模拟试验台,试验台长和宽分别为 2.0 和 0.2 m。另外还有 1.5 m 可变倾角物理相似模拟试验台,试验台长和宽分别为 1.5 和 0.15 m。模拟工作面回采时,走向模型边界预留 20 cm 煤柱,倾向模型两侧分别各留 14、20 cm 煤柱。走向及倾向均为在煤层顶板 5 cm 的位置布置第 1 条测线,随后每 10 cm 布置 1 条测线,测线上隔 10 cm 为一固定测点,直至模型顶部,开采过程中同步记录煤层底板的应力变化。

表 1 不同岩性煤岩层的分布情况

Table 1 Distribution of coal beds of different lithologies

厚度/m	岩性	岩性描述
5.0	细砂岩	棕灰色,中部含少量方解石及菱铁矿,局部胶结有泥岩碎块
4.8	中粒砂岩	灰白色,中夹薄层砂质泥岩,含少量白云母及菱铁结核
1.4	细砂岩	棕黄色细砂岩,含白云母碎片
4.8	砂质泥岩	棕黄色及灰色砂质泥岩,下部 0.9 m 为浅灰色泥岩
1.9	砂质泥岩	黄灰色砂质泥岩中部含褐紫色菱铁矿结核
3.1	泥岩	浅灰色泥岩,含植物化石碎片,中部夹灰黄色砂质泥岩
1.9	砂质泥岩	深灰色、黑色砂质泥岩,含白云母碎片
2.1	细砂岩	灰黄色细砂岩,夹粉砂岩和白云母碎片
1.2	粗砂岩	灰色粗砂岩,中部含少量泥质砂岩
1.8	粗砂岩	浅灰至灰白色粗砂岩,含白云母片
1.9	泥质砂岩	深灰色,下部为泥岩,局部夹薄层煤线
2.0	细砂岩	浅灰色细砂岩,中部含白云母
3.0	泥质砂岩	深灰色泥质砂岩
4.1	砂质泥岩	黑色砂质泥岩,平行层面含少量白云母碎片
3.5	己 <sub>15</sub> 煤	黑色块状,光亮型煤

表 2 模拟试验相似比

Table 2 Simulation test similarity ratio

相似比	几何比	时间比	容重比	应力比	强度比
	$\alpha_L$	$\alpha_t$	$\alpha_\gamma$	$\alpha_\sigma$	$\alpha_E$
走向模型	100	10	1.5	150	150
倾向模型	200	14	1.5	300	300

## 2 试验结果分析

### 2.1 工作面走向覆岩裂隙演化特征

不同推进距离下走向覆岩裂隙演化如图 1 所示。当工作面推进至 36 m 时,基本顶发生断裂,覆岩出现了明显的离层裂隙和破断裂隙,采空区覆岩基本顶初次来压,岩梁长度为 28 m。当工作面继续推进至 40 m,离层裂隙和破断裂隙明显增多,第 1 次周期来压后,垮落高度距煤层顶板的距离为 9 m;工作面推进至 102 m 时,采空区覆岩破坏范围和裂隙高度进一步扩大,垮落高度为 62 m 左右,裂隙带上方岩层下沉,形成了较为明显的垮落带、裂隙带和弯曲下沉带;随着工作面的推进,顶板发生多次周期来

压,工作面推进至 154 m 时,发生第 9 次周期来压,最终测量出走向模型的垮落带高度为 13 m,裂隙带高度为 68.5 m,该工作面初次来压步距为 36 m,平均周期来压步距为 12.9 m。采空区覆岩中间部位形成压实区,两侧裂隙发育较为完善,在工作面风流压力梯度作用下卸压瓦斯在裂隙通道内流动,使得裂隙通道内瓦斯富集。

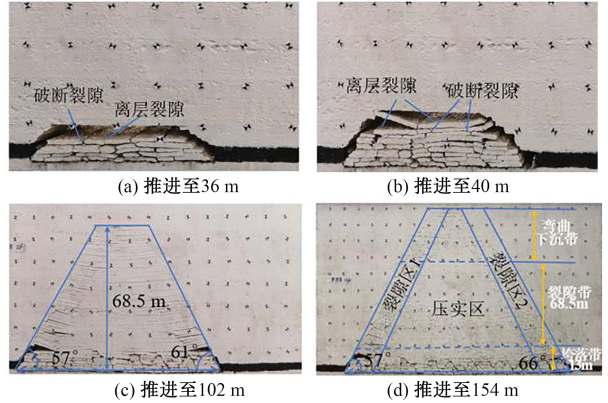


图 1 走向覆岩裂隙演化

Fig.1 Evolution of fissure along overlying rock

沿煤层走向开采后上覆岩层下沉量曲线如图 2 所示。10 条测线的最大下沉量分别为 0.3、0.9、1.3、1.8、1.9、2.2、2.5、3.3、3.4 和 3.5 m,采空区贯通时上覆岩层产生滑移导致各个测线下沉位移最大值向工作面切眼位置处靠近,其中,距离煤层顶板 95 m 的下沉量及其范围最小,距离煤层顶板 85~25 m 的 7 条测线最大下沉量较为接近,距离煤层顶板 15~5 m 的 2 条测线的下沉量明显大于其他几条测线并且范围最宽。

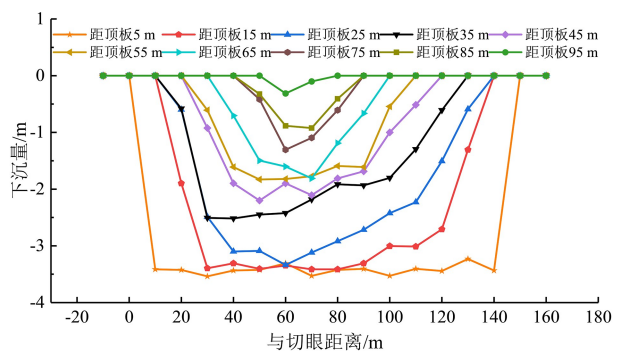


图 2 工作面推进至 154 m 时上覆岩层下沉量

Fig.2 Subsidence of overlying rock layer when working face advances to 154 m

### 2.2 工作面倾向覆岩裂隙演化特征

工作面倾向模型覆岩采动裂隙分布如图 3 所示,受到煤层倾角以及重力的影响,缓倾斜煤层工作

面开采后的覆岩采动裂隙分布和水平煤层开采后的覆岩采动裂隙分布具有不同特征。缓倾斜煤层覆岩裂隙同样具有明显的垮落带和裂隙带特征,其覆岩采动裂隙分布具有不对称性,工作面上端头断裂角 $59^\circ$ ,下端头断裂角 $54^\circ$ ,上覆岩层最远破断裂隙距煤层顶板 $70\text{ m}$ ,上端头离层裂隙宽度 $30\text{ m}$ ,下端头离层裂隙宽度 $20\text{ m}$ 。

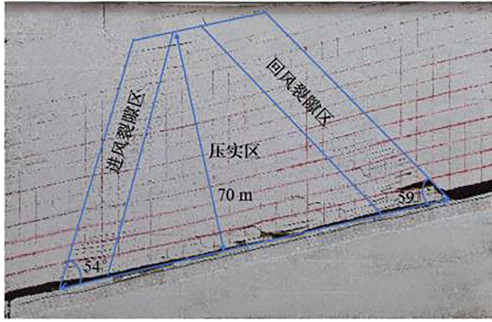


图 3 倾向模型覆岩裂隙分布

Fig.3 Fissure distribution of overlying rock by propensity model

根据应力、位移以及裂隙发育程度的不同,可将工作面从左侧至右侧分为进风裂隙区、压实区和回风裂隙区。受到煤层倾角和采动应力的影响,工作面上端头和中部区域的顶板垮落后向下端头产生一定滑移,工作面中部受上覆岩层压应力的影响,造成下端头一部分采动裂隙被压实。在采动回风裂隙区处,横向离层裂隙与纵向破断裂隙之间贯通,采动卸压影响范围内的次生裂隙逐渐形成宏观的裂隙网络,成为卸压瓦斯运移的主要通道。

沿煤层倾向开采后 5 条测线下沉量曲线如图 4 所示。5 条测线的最大下沉量分别为 2.7、2.9、3.0、3.1 和 3.5 m,工作面上方距煤层顶板 10 m 处下沉量最大。随着测线与顶板距离增大,上覆岩层下沉量逐渐减小。由图 4 可知:峰值位置位于距工作面

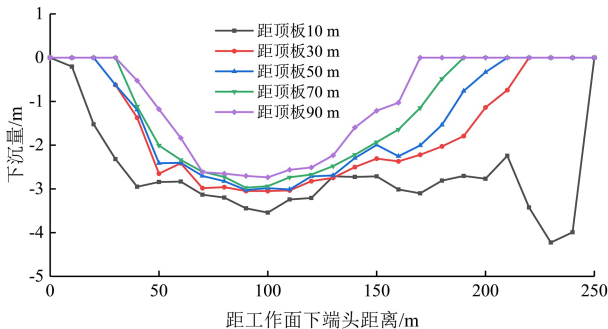


图 4 工作面倾向上覆岩层下沉量

Fig.4 Subsidence of overlying rock layer along working face

下端头 $100\text{ m}$ 处,偏离采场中心,由于重力影响导致上覆岩层破断后靠近下端头侧的顶板位移最大。

### 3 工程应用

#### 3.1 缓倾斜煤层采动卸压瓦斯分布特征

覆岩采动裂隙分布特征直接影响着卸压瓦斯的储运通道,受到煤层倾角的影响,工作面上端头的采动裂隙张开程度更加明显。采动覆岩垮落带内的垮落岩体主要为破碎状态,纵向裂隙较为发育。而裂隙带中主要以离层裂隙为主,纵向破断裂隙相对较少,透气性较好,为卸压瓦斯提供了良好的运移通道。卸压瓦斯由于升浮特性将会沿垮落带在裂隙区内向上端头运移,瓦斯在采动闭合裂隙和离层裂隙中储存。随着工作面的推进,采动裂隙区不断向高层位扩展,最终形成瓦斯富集区域,如图 5 所示。

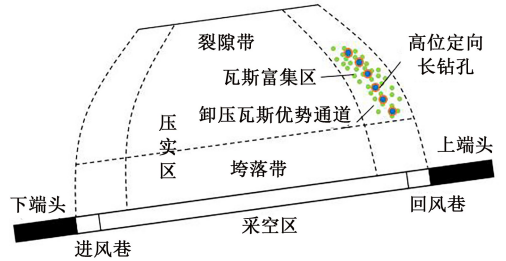


图 5 高位定向钻孔倾向布置

Fig.5 Layout of high directional drilling tendency

#### 3.2 高位定向钻孔布置方案

根据物理相似模拟试验得到采动覆岩裂隙分布特征,靠近回风巷侧卸压充分且存在大量裂隙,瓦斯富集区位于上端头断裂角 $59^\circ$ 内的裂隙带,该区域是布设高位定向抽采钻孔的最佳区域,每个钻场设计 6 个高位定向长钻孔,钻孔直径为 $120\text{ mm}$ 。同时,该钻场拟采用直径 $73\text{ mm}$ 钢制筛管,用来防止钻孔塌孔等情况对抽采效果的影响。具体钻孔参数见表 3。

表 3 高位定向钻孔布置参数

Table 3 Parameters of high directional drilling hole arrangement

钻孔编号	距顶板高度/m	距回风巷下帮/m	钻孔长度/m	下筛管深度/m
1	18	25	522	489
2	21	30	525	510
3	24	35	525	327
4	27	38	522	457
5	30	43	513	501
6	36	48	501	501

### 3.3 钻孔全生命周期变化特征

实测该高位定向钻场不同层位的钻孔瓦斯抽采体积分数,其钻孔瓦斯抽采变化特征如图6所示。由图6可知:钻孔抽采的全生命周期分为3阶段。①抽采初期阶段。此阶段内瓦斯抽采体积分数偏小且平缓,其上覆岩层裂隙发育未到钻孔位置,低层位瓦斯抽采体积分数维持在2%左右,高层位瓦斯抽采体积分数基本在3%波动。②抽采中期阶段。随着裂隙进一步向上发育到钻孔位置,钻孔终孔位置位于卸压瓦斯优势通道内,瓦斯抽采体积分数呈现

出明显的上升趋势,该阶段是钻孔抽采高效期;低层位钻孔瓦斯抽采体积分数在4%~11%范围内浮动,高层位钻孔瓦斯抽采体积分数在4%~8%之间,该阶段钻场与工作面距离平均长度为175 m。③抽采末期阶段。此阶段钻孔终孔层位逐渐降低,离工作面的距离较近,各个层位钻孔的瓦斯抽采体积分数急剧下降,瓦斯抽采体积分数基本维持着较低值,其中,低层位瓦斯抽采体积分数最高,维持在4%以下,高层位钻孔抽采体积分数保持在2%以上。

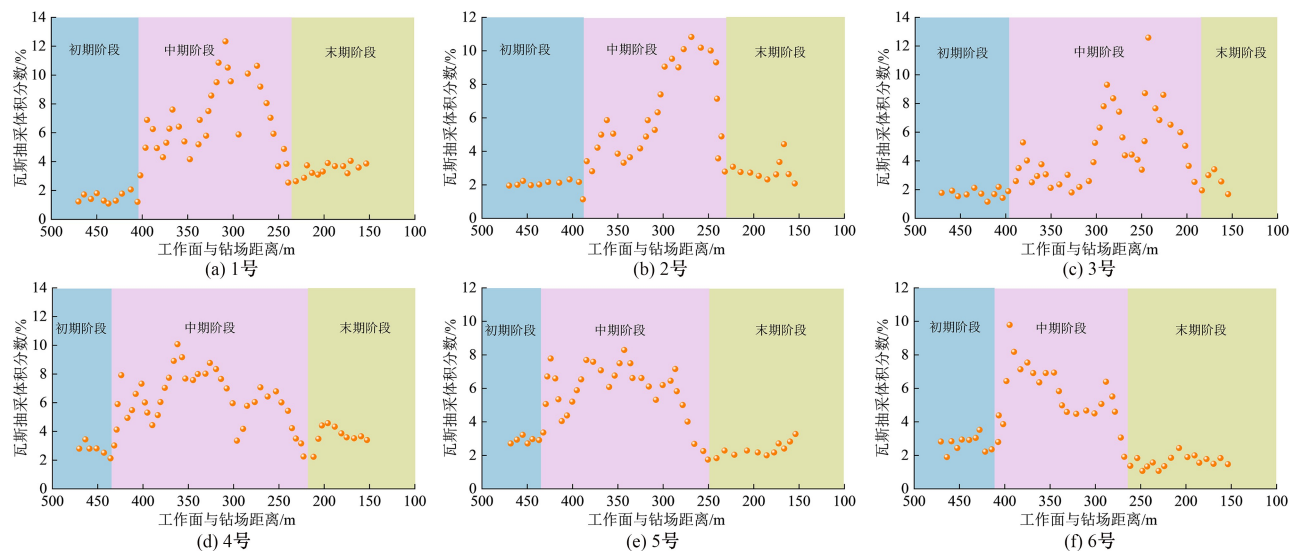


图6 高位定向钻孔瓦斯抽采效果

Fig.6 Effect of gas extraction from high directional drilling holes

该高位定向钻场各钻孔抽采阶段的抽采距离占比特征如图7所示。其中抽采中期持续时间平均占比达到53.9%,在4号钻孔抽采中期长度占比达到最大值65%,各钻孔抽采中期长度占比表现为逐渐升高,之后下降到最低值44%;抽采初期和抽采末期平均长度占比为19%、27%。对比不同层位高位定向长钻孔瓦斯抽采效果发现,当高位定向长钻孔层位进入瓦斯富集区时,瓦斯抽采体积分数逐渐提高,其中抽采初期长度占比维持在12%~27%之间,低层位钻孔抽采末期长度占比持续减少,最低达14%,随着钻孔层位上升抽采末期长度占比小幅回升,最大达37%。依据单个钻孔抽采卸压瓦斯机制,卸压瓦斯优势通道位置处布置不同层位的抽采钻孔,方可实现高层位钻孔高效抽采卸压瓦斯,低层位钻孔有效改变卸压瓦斯流场,最终确保高位钻孔在有效抽采时间内保障工作面卸压瓦斯体积分数不超限。

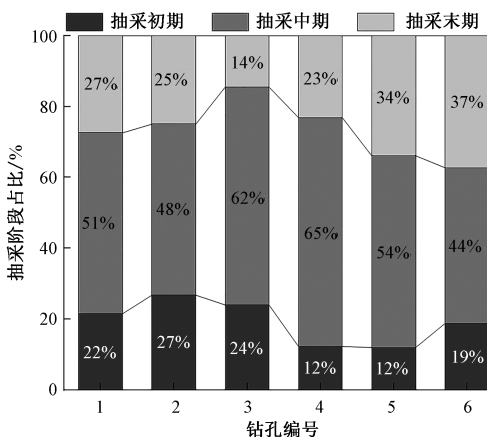


图7 各钻孔抽采阶段占比分布特征

Fig.7 Proportion characteristics of each extraction stage

### 3.4 工作面瓦斯防治效果

试验工作面上隅角瓦斯及回风巷瓦斯积聚情况如图8所示。由图8可知:工作面上隅角瓦斯体积分数为0.11%~0.71%,日均最大瓦斯体积分数为

0.47%; 回风巷瓦斯体积分数为 0.14%~0.69%, 日均瓦斯体积分数 0.46%; 工作面上隅角、回风巷瓦斯体积分数均小于该矿井制定的瓦斯体积分数警戒值 0.8%, 实现了工作面的安全开采。

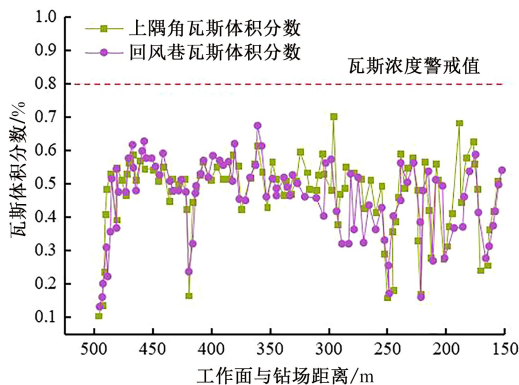


图 8 工作面上隅角和回风巷瓦斯体积分数

Fig.8 Volume fraction of gas in upper corner of working face and in return-air tunnel

## 4 结 论

1) 开采初期覆岩结构和裂隙活动程度较大, 随着工作面推进采动裂隙不断向上发育, 沿着煤层走向开采后, 工作面垮落带高度 13 m, 裂隙带高度 68.5 m。工作面断裂角  $54^{\circ} \sim 59^{\circ}$ , 且上端头断裂角大于下端头, 其中, 回风区域裂隙区大于进风区域。

2) 高位定向钻孔全生命周期瓦斯抽采依据抽采体积分数可分为抽采初期、抽采中期和抽采末期阶段。其中, 抽采初期抽采体积分数偏低, 抽采中期为钻孔抽采生命周期内的高效抽采阶段, 进入抽采末期抽采体积分数呈现急剧下降的趋势。

3) 高位定向钻孔抽采瓦斯技术实施后, 上隅角、回风巷最大瓦斯体积分数均小于 0.8%, 瓦斯治理取得良好效果, 保障了试验工作面安全高效开采。

## 参 考 文 献

- [1] 袁亮. 煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2019,44(1):1-9.  
YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(1):1-9.
- [2] 李树刚, 钱鸣高, 石平五. 煤层采动后甲烷运移与聚集形态分析[J]. 煤田地质与勘探, 2000,28(5):31-33.  
LI Shugang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Methane migration and accumulation state after seam mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2000,28(5):31-33.
- [3] 郭明杰, 郭文兵, 赵高博, 等. 长壁开采覆岩内水平定向长钻孔位置特征与卸压瓦斯抽采机理[J]. 煤炭学报, 2023,48(10):3 750-3 765.  
GUO Mingjie, GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, et al. Position characteristics of horizontal-directional long boreholes in overlying strata and drainage mechanism of pressure-relief gas due to longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(10):3 750-3 765.
- [4] 龚选平, 武建军, 李树刚, 等. 低瓦斯煤层高强开采覆岩卸压瓦斯抽采合理布置研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020,37(2):419-428.  
GONG Xuanping, WU Jianjun, LI Shugang, et al. Reasonable arrangement of pressure relief gas extraction in overburden rock under high strength mining in low gas seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020,37(2):419-428.
- [5] 程洋, 赵光明, 李英明, 等. 软岩保护层开采覆岩采动裂隙带演化及卸压瓦斯抽采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020,37(3):533-542.  
CHENG Xiang, ZHAO Guangming, LI Yingming, et al. Evolution of overburden mining-induced fractured zone and pressure-relief gas drainage in soft rock protective seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020,37(3):533-542.
- [6] 徐阿猛, 胡洋, 尹立, 等. 极薄煤层高效钻采关键技术[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(7):98-104.  
XU Ameng, HU Yang, YIN Li, et al. Key technology of efficient drilling and mining in extremely thin coal seam[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(7):98-104.
- [7] 赵鹏翔, 常泽晨, 李树刚, 等. 厚煤层采空区定向钻孔分域抽采研究及应用[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1):70-79.  
ZHAO Pengxiang, CHANG Zechen, LI Shugang, et al. Research and application of directional drilling sub area extraction in thick coal seam goaf[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1):70-79.

- [8] 薛俊华, 肖健, 杜轩宏, 等. 我国煤矿保护层开采卸压瓦斯抽采现状及发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6):50-61.  
XUE Junhua, XIAO Jian, DU Xuanhong, et al. Current situation and development trend of pressure-relief gas extraction in the protective layer mining in coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6):50-61.
- [9] 冯锦艳, 刘旭杭, 于志全. 大倾角煤层采动裂隙演化规律[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8):1 971-1 978.  
FENG Jinyan, LIU Xuhang, YU Zhiquan. Numerical simulation study on the mining-induced fracture evolution of steep coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8):1 971-1 978.
- [10] 王金安, 张基伟, 高小明, 等. 大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(II):周期破断[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8):1 737-1 745.  
WANG Jin'an, ZHANG Jiwei, GAO Xiaoming, et al. Fracture mode and evolution of main roof stratum above fully mechanized top coal caving longwall coalface in steeply inclined thick coal seam(II): periodic fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8):1 737-1 745.
- [11] 刘传安, 杨京伟. 煤层倾角对采动裂隙演化规律的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3):51-54.  
LIU Chuan'an, YANG Jingwei. Seam inclination affected to evolution law of mining cracks[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3):51-54.
- [12] 李春元, 左建平, 张勇. 深部开采底板破坏与基本顶岩梁初次垮断的联动效应[J]. 岩土力学, 2021, 42(12):3 301-3 314.  
LI Chunyuan, ZUO Jianping, ZHANG Yong. The linkage effect between floor failure and first weighting of the main roof in deep longwall mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12):3 301-3 314.
- [13] 甘智慧, 尚慧, 杜荣军, 等. 基于FLAC3D和DEM数据的缓倾斜煤层开采沉降分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3):158-166.  
GAN Zhihui, SHANG Hui, DU Rongjun, et al. Mining subsidence analysis of gently inclined coal seams based on FLAC3D and DEM data[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3):158-166.
- [14] 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.
- [15] 解盘石, 伍永平, 罗生虎, 等. 大倾角大采高采场倾向梯阶结构演化及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5):953-959.  
XIE Panshi, WU Yongping, LUO Shenghu, et al. Structural evolution of ladder roof and its stability analyses for a fully-mechanized working face with a large mining height in steeply inclined coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5):953-959.



作者简介: 双海清 (1988—),男,陕西靖边人,博士,副教授,主要从事矿井瓦斯灾害防治、关停矿井开发利用等方面的研究。E-mail: shuanghaiqing@163.com。