



杨科,孙啸天,刘帅,等. 远距离下保护层开采卸压增透效应及瓦斯抽采方案[J]. 矿业安全与环保,2024,51(2):1-9.  
YANG Ke,SUN Xiaotian,LIU Shuai, et al. Pressure relief and permeability enhancement effect and gas extraction scheme of long-distance lower protective layer mining[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(2):1-9.  
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230263

扫码阅读下载

## 安全科学

# 远距离下保护层开采卸压增透效应及瓦斯抽采方案

杨科<sup>1,2</sup>,孙啸天<sup>1</sup>,刘帅<sup>1</sup>,郭鹏慧<sup>1</sup>,张寨男<sup>1</sup>

1. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽淮南 232001;
2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室),安徽合肥 230031)

**摘要:**针对深部远距离下保护层开采后上覆保护层卸压及瓦斯治理难的问题,以朱仙庄煤矿Ⅲ1031工作面工程条件为背景,采用相似模拟和数值模拟相结合的方法,研究了远距离下保护层开采过程中覆岩的应力演化规律、变形破坏特征和卸压增透效果。结果表明:保护层开采,产生延伸至被保护层的纵贯式穿层裂隙,基本顶发生平均步距 15 m 左右的周期破断,煤层压力先减小,采空区中部重新压实后,应力开始逐渐恢复;在围岩内形成应力增高区域,而应力在向采空区中部演化时,则以近似于弧状的应力递减圈形态发育。因煤层采动在采空区两侧形成离层裂隙发育区,为瓦斯流动提供通道,被保护层也因此得到卸压,其卸压率达到 0.91,增透率增幅为 5%~20%,被保护层出现明显卸压增透效应。为解决保护层开采后瓦斯需卸压抽采的问题,设计了穿层钻孔、顺层钻孔、高位钻孔配合拦截钻孔和采空区埋管的瓦斯抽采方案。

**关键词:**卸压增透;瓦斯抽采;远距离;下保护层开采;相似模拟;数值模拟

**中图分类号:**TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-4495(2024)02-0001-09

## Pressure relief and permeability enhancement effect and gas extraction scheme of long-distance lower protective layer mining

YANG Ke<sup>1,2</sup>, SUN Xiaotian<sup>1</sup>, LIU Shuai<sup>1</sup>, GUO Penghui<sup>1</sup>, ZHANG Zhainan<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In view of the difficulty of pressure relief and gas control of overlying protected layer after deep and long-distance lower protective layer mining, based on the engineering conditions of Ⅲ1031 working face in Zhuxianzhuang Coal Mine, the stress evolution law, deformation and failure characteristics and pressure relief and permeability enhancement effect of the overlying strata during long-distance lower protective layer mining were studied by means of similar simulation and numerical simulation. The results show that the protective layer mining produces a longitudinal penetrating fracture extending to the protected layer, and the main roof breaks periodically with an average step of about 15 m. The pressure of the coal seam decreases firstly, and the stress returns to the approximate original rock stress state after recompacting in the middle of the goaf. The stress-concentrated area is formed in the surrounding rock, and when the stress evolves to the middle of the goaf, it develops in an arc-like stress decreasing circle. Because of the coal seam mining, the separated layer fracture development area is formed on both sides of the goaf, which provides a channel for gas flow, and the protected layer is also relieved. The pressure relief rate reaches 0.91, and the antireflection increase rate is 5% to 20%. The protected layer has obvious effect of pressure relief and antireflection. In order to solve the problem of pressure relief and gas extraction protective layer mining,

收稿日期:2023-04-03;2024-04-15 修订

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U21A20110)

作者简介:杨科(1979—),男,四川叙永人,博士,教授,主要从事煤岩瓦斯动力灾害方面的研究工作。E-mail: yksp2003@163.com。

a gas extraction scheme was designed including cross-layer drilling, bedding drilling, high-level drilling with interception drilling and buried pipe in goaf.

**Keywords:** pressure relief and permeability enhancement; gas extraction; long-distance; lower protective layer mining; similar simulation; numerical simulation

随着地表浅层煤炭资源的消耗殆尽,深部煤炭开发已成为常态。然而,因深部开采伴随着“三高”(高应力、高瓦斯含量、高非均质性)、“强扰动和强时效”等状况,现有研究成果无法解决动力灾害形成机制不清、预报难、防治难等问题,致使煤岩瓦斯动力灾害日趋严重<sup>[1-2]</sup>,而保护层开采是一种预防深部开采煤与瓦斯突出的有效手段<sup>[3-4]</sup>。远距离下保护层是指相对层间距为  $20 < R \leq 40$  m ( $R$  为保护层与被保护层间的当量相对层间距)的煤或岩层<sup>[5]</sup>。大量工程应用表明,在保护层开采过程中,煤体应力变化、应变状态、煤体之间的结构和瓦斯流动规律等均会对煤体稳定性产生较大的影响。因此,针对覆岩的运移、裂隙动态演化和卸压增透效果进行研究,对下保护层的开发具有一定的现实意义。

国内外学者针对覆岩移动、裂隙形成、扩展途径与裂隙场分布等问题的研究日益深入<sup>[6-9]</sup>。钱鸣高院士<sup>[10]</sup>揭示了“O”形圈采动裂隙的横向“三区”和垂直“三带”的开采特征;后续研究人员在此基础上运用数值模拟等手段,较全面地分析了采场覆岩应力的演化特征和结构演化规律。随着基本顶周期破断,采动裂隙呈梯形演化;采空区裂隙在应力集中和采动效应的影响下逐渐被压实,最终呈现周期性动态演化<sup>[11-13]</sup>。部分研究人员围绕“三下”采煤规程展开了讨论<sup>[14]</sup>;余学义等<sup>[15]</sup>认为导水裂隙带的形状呈“拱形”;杨科等<sup>[16]</sup>提出 4 种不同采厚采空区覆岩中裂隙演化形态。另一些学者根据覆岩裂隙由下到上逐渐扩散和发展的规律,对厚煤层覆岩开采断裂发展机理进行研究,发现采动覆岩存在卸荷—膨胀—再压缩等动态变化规律<sup>[17-20]</sup>。

笔者采用相似模拟和数值模拟的方法,分析朱仙庄煤矿Ⅲ1031 工作面下保护层开采卸压效果,通过分析下保护层采动过程中覆岩裂隙发育、应力演化和被保护层变形情况,推断被保护层卸压率、增透率和覆岩“三带”的高度,并提出瓦斯抽采方案。以对类似地质条件下矿井的卸压效果评价提供参考。

## 1 工程概况

朱仙庄煤矿Ⅲ3 采区埋深-700 ~ -1 100 m,首采工作面为Ⅲ1031 工作面,其中 8 煤层和 10 煤层的

平均厚度分别为 10.64、2.61 m,煤层之间的平均距离为 70.56 m,其等效相对层间距为  $20 < R \leq 40$  m,属于远距离下保护层,具备下保护层开采的自然条件<sup>[21]</sup>。8 煤层、10 煤层位置关系如图 1 所示。

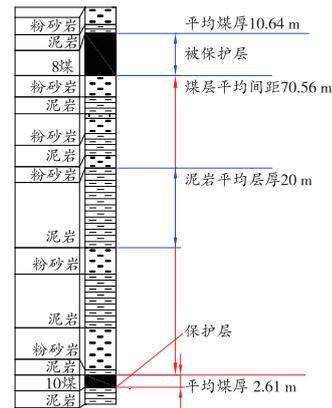


图 1 8 煤层和 10 煤层位置关系

Fig. 1 Position relationship between coal seams 8 and 10

8 煤层和 10 煤层瓦斯含量和压力均较高,8 煤层相对瓦斯涌出量为  $6.5 \text{ m}^3/\text{t}$ ,10 煤层绝对瓦斯涌出量为  $33.26 \text{ m}^3/\text{min}$ 。结合矿井条件得出朱仙庄煤矿属于深部瓦斯突出矿井,其中 8 煤层和 10 煤层均属于突出煤层。各煤层瓦斯参数指标见表 1。

表 1 瓦斯参数指标  
Table 1 Gas parameter indicators

煤层编号	瓦斯压力/ MPa	瓦斯含量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	吸附性常数		坚固性系数	瓦斯放散初速度 $\Delta P$
			$a/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$b/$ $\text{MPa}^{-1}$		
8	6.48	15.40	15.74	0.61	0.43	11
10	0.74	6.36	22.94	0.88	1.00	19

在分析远距离煤层的存在条件及特点的基础上,考虑到 8 煤层具有较强的突出危险性,基于开采保护层不能对被保护层开采造成损害的原则,结合各煤层的瓦斯参数指标,最终确定将瓦斯含量较低的 10 煤层作为下保护层先行开采,从而减小煤与瓦斯突出风险。

## 2 远距离下保护层开采卸压特征

### 2.1 远距离下保护层开采相似模拟试验研究

#### 2.1.1 相似模型建立

结合朱仙庄矿区的具体地质情况,建立以现场

为背景的相似模型。模型架几何尺寸为 3 000 mm×1 500 mm×300 mm。以煤层的开采情况和模型框架的尺寸为依据,确定模型具体参数,见表 2。

表 2 主要相似常数  
Table 2 Main similarity constants

模型几何尺寸			相似常数				
长/ mm	高/ mm	宽/ mm	几何比 $C_l$	重度比 $C_\gamma$	应力比 $C_\sigma$	弹性模 量比	时间比
3 000	1 500	300	1 : 100	3 : 5	3 : 500	3 : 500	1 : 12

采用 50 mm×50 mm 的网格位移测点观测方法,对采动过程中覆岩层移情况进行更准确的观测。设置 3 条应力测线,分别位于 10 煤层直接顶、8 煤层顶板和底板,用于监测 10 煤层和 8 煤层应力变化规律,每条测线布置 9 个压力盒(共 27 个),如图 2 所示。10 煤层自左向右开采,在模型两侧各留设 300 mm 边界煤柱以消除边界效应的影响。每间隔 2 h 开采 50 mm,直至煤层模型开挖完成。

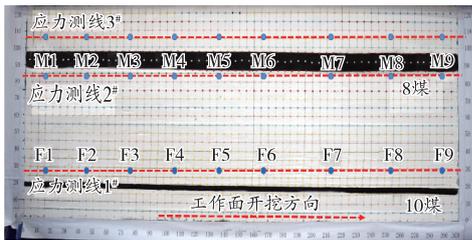
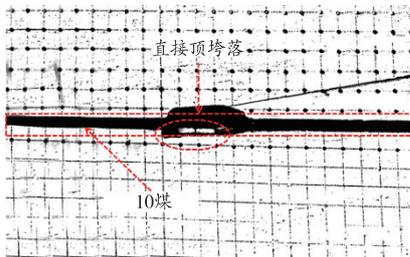


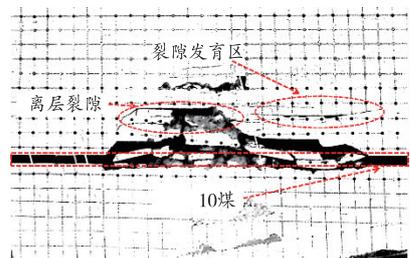
图 2 工作面相似模型和应力测线布置  
Fig. 2 Similarity model and stress measurement line layout of the working face

### 2.1.2 保护层开采覆岩裂隙演化特征研究

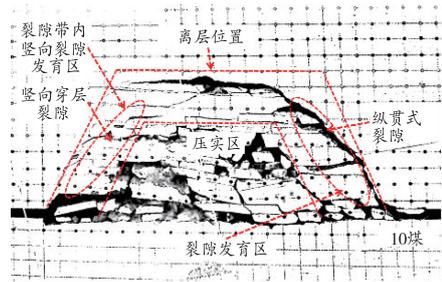
10 煤层上覆岩层裂隙发育过程如图 3 所示。



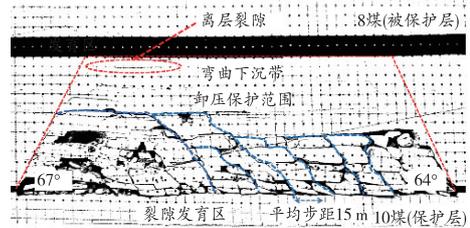
(a) 开采 25 m



(b) 开采 90 m



(c) 开采 120 m



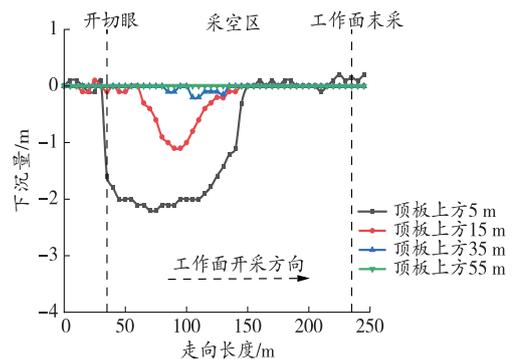
(d) 开采 235 m

图 3 10 煤层上覆岩层裂隙发育过程  
Fig. 3 Development process of fractures in overlying strata of coal seam 10

由图 3 可知:当工作面推进至 25 m 时,由于直接顶的顶板持续弯曲和变形,其在拉应力的影响下产生崩塌垮落,此时基本顶是完好的,没有发生破裂;当基本顶达到最大跨度时断裂,其上部产生离层裂隙,在底板两侧产生纵贯式(竖向穿层)裂隙;基本顶发生平均步距为 15 m 左右的周期破断,覆岩竖向裂隙与离层裂隙呈现出梯形动态演化;继续开采,工作面两侧裂隙持续发育,采空区中部原有的裂隙逐渐被压实;开采至 235 m 时,被保护层底板已经出现离层裂隙,但 10 煤层与 8 煤层之间岩层还未被竖向穿层裂隙完全贯穿。上覆岩层在断裂后,在开切眼和工作面处形成基本对称的垮落角,垮落角分别约为 67°和 64°。

### 2.1.3 上覆岩层变形运移特征

不同推进距离下采空区顶板上方不同层位垂直接移曲线如图 4 所示。



(a) 推进 85 m

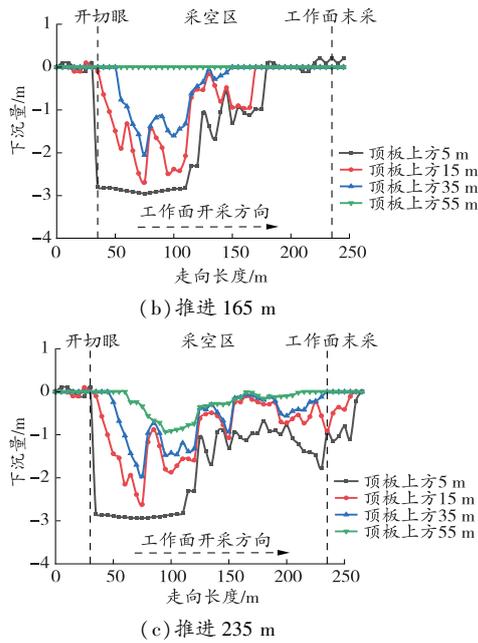


图 4 不同推进距离下采空区顶板上方不同层位垂直位移曲线  
Fig. 4 Vertical displacement curves of different layers above the goaf roof under different advancing distances

图 4 中的下沉曲线形态表明,距顶板不同位置测线的垂直位移呈现连续波动变化特征。随着工作面推进,基本顶破断,采空区内顶板位移量增大,覆岩垮落范围也在逐步扩大,但开切眼前方及煤壁后方顶板垂直位移较小。其原因是基本顶发生周期性破断后,岩石互相作用,构成一种三铰拱状平衡结构,从而造成下沉曲线的波动性。推进至 235 m 时,8 煤层底板岩层开始下沉,但下沉趋势较为平缓,最大下沉量为 1.1 m。垂直位移数值表明,不同层位的岩层下沉量不同,且与 10 煤层顶板的距离越近,其位移量越大。

#### 2.1.4 覆岩应力演化特征

8 煤层底板不同位置应力变化曲线如图 5 所示。

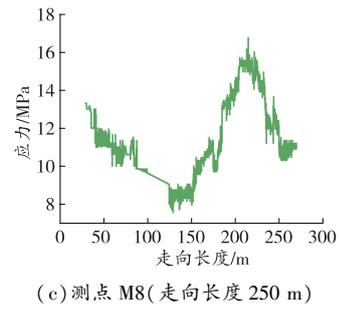
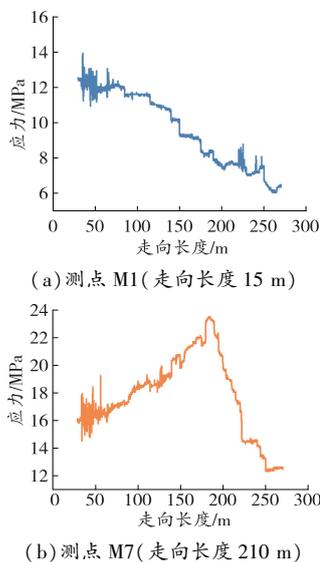


图 5 8 煤层底板不同位置应力变化曲线

Fig. 5 Test curves for stress changes at different positions on the floor of coal seam 8

由图 5 可以看出,初采阶段应力一直在降低,说明开采过程中工作面顶板前方因覆岩垮落而一直在卸压,其卸压范围也在逐步增大;下保护层开采到压力传感器前 15~20 m 时应力达到峰值,当工作面开采通过传感器后开始快速卸压。随着工作面推进,在采空区走向中部应力开始逐渐增大,说明采空区中部垮落的岩体被弯曲下沉的岩层重新压实。

上述表明Ⅲ 1031 工作面开采过程中对 8 煤层产生了明显的应力扰动,使得 8 煤层底板一定范围内的原岩应力场发生变化。综上分析,下保护层开采后,覆岩断裂和应力变化的时机不同,从而使得被保护层处于卸压状态,导致岩层错断,形成大小不同的裂隙。

### 2.2 数值模型分析

#### 2.2.1 数值模型建立

以朱仙庄煤矿Ⅲ 1031 工作面煤岩赋存特征与物理力学性质为依据,建立数值模型。模型走向和倾向长度分别为 1 400、180 m,倾向和走向两侧各留设 120 m 边界煤柱,可有效减小边界效应对计算结果的影响,推进长度取其面长,以实现“见方效应”。基于 M-C 强度准则对煤岩体屈服破坏进行判断,通过对煤岩的物理力学参数进行测试,得出模拟所需的煤岩力学参数,具体见表 3。

表 3 主要岩层力学参数  
Table 3 Main rock mechanics parameters

岩层类别	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/GPa	内摩擦角/(°)	泊松比	切变模量/GPa
8 煤	1.29	6.63	1.76	2.55	30.5	0.064	1.38
粉砂岩	5.29	70.16	6.26	6.04	39.0	0.170	4.13
泥岩	3.99	41.42	3.21	4.25	31.5	0.037	1.56
细砂岩	5.72	37.62	11.53	4.57	35.5	0.184	4.52
10 煤	1.31	1.53	1.76	2.67	24.0	0.060	1.20

2.2.2 应力场演化规律

III 1031 工作面不同推进距离下垂直应力分布情况如图 6 所示。

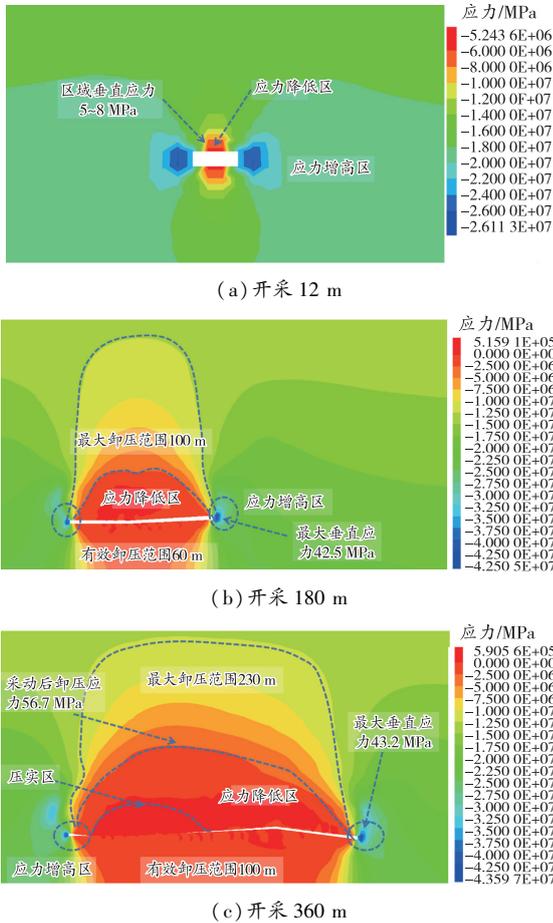


图 6 III 1031 工作面不同推进距离下垂直应力分布情况  
Fig. 6 Vertical stress distribution at different advancing distances in the III1031 working face

由图 6 可知:初采阶段,上覆岩层中部出现应力降低区即卸压区,但此区域内垂直应力为 5~8 MPa,说明该区域出现拉应力,对采空区顶板造成宏观拉伸破坏;随工作面推进,在围岩内形成应力增高区域,最大集中应力在煤壁处达 43.2 MPa,离采空区越远垂直应力越小,直至减小为原岩应力;采空区内部形成应力恢复区,在其边缘垂直应力几乎为 0,由外向内则是以近似于圆弧状的应力递减圈发育,最大影响范围 230 m,其中有效卸压范围达 100 m。采空区中部弯曲下沉岩层压实顶板垮落的岩体形成压实区,此后压实区应力开始逐渐增大。

综上分析可知,10 煤层开采后,顶底板产生位移变形,应力状态发生改变,随着工作面推进,垂直应力增幅减缓,其有效卸压范围波及 8 煤层区域,可对其产生卸压效应。

为更好地反映被保护层应力动态变化情况,在

被保护层中间相应位置设置应力测量点,其应力分布如图 7 所示。

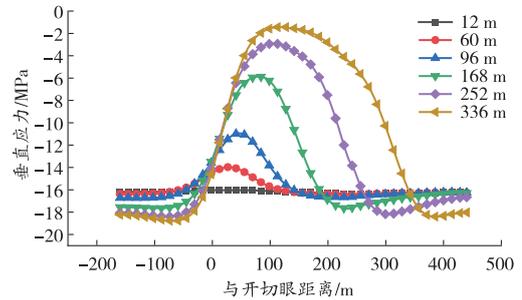


图 7 被保护层垂直应力随开采距离的变化曲线  
Fig. 7 Distribution curve of vertical stress in the protected layer with respect to mining distance

由图 7 可知,随着开采距离增大,采动导致应力场分布随之发生改变,工作面前方会出现应力增高区,采空区由于顶板宏观拉伸破断而充分卸压,顶板应力降低区和应力增高区范围也随开采推进不断扩大。卸压率是衡量卸压效果的一个重要指标,其计算公式如下:

$$\eta_s = \sigma'_z / \sigma_z \quad (1)$$

式中: $\eta_s$  为卸压率; $\sigma'_z$  为卸压垂直应力,即原始垂直应力与卸压后垂直应力之差,MPa; $\sigma_z$  为原始垂直应力,MPa。

经计算,下保护层开采后,其上覆被保护层(8 煤层)的卸压率为 0.91,被保护层平均应力降低 80%以上,表明下保护层(10 煤层)开采具有良好的卸压效果。

2.2.3 被保护层位移分析

随着推进距离增加,同一情况下,与保护层相比,被保护层受自身厚度和结构的影响,其顶底板破断时机产生差异,进而导致其位移场演化过程产生类似阶梯状的扩散规律。不同破断速率加剧了被保护层煤体裂隙的形成,为瓦斯的扩散提供了通道。下保护层开采过程 8 煤层内垂直位移分布如图 8 所示。

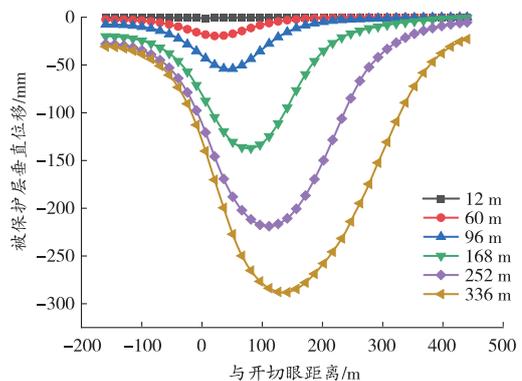


图 8 随开采距离增加被保护层垂直位移分布  
Fig. 8 Vertical displacement distribution of the protected layer with mining distance

由图 8 可见,随着开采距离增加,被保护层(8 煤层)的垂直位移在变化趋势上与应力基本保持一致,8 煤层顶底板岩层受到采动应力变化的影响而发生变形破断。随开采距离的增大,被保护层卸压范围逐渐增大,沿工作面走向被保护层卸压位移呈现先增至最大,后逐渐降低的变化趋势,工作面中部的下沉位移最大,卸压效果较好。垂直应力和垂直位移在沿工作面走向呈现出相同的变化趋势。

膨胀变形率可以表示被保护层的膨胀变形情况,基于此,可以进一步评价保护层的卸压效果。其计算公式如下:

$$\xi = u/M \quad (2)$$

式中: $\xi$  为被保护层的变形量(大于 0 为膨胀变形,小于 0 为压缩变形),定义为膨胀变形率,%; $u$  为煤层顶底板之间的相对位移,mm; $M$  为被保护煤层的相对厚度,mm。

膨胀变形率可由式(2)计算得出,并由此绘制被保护层膨胀变形率曲线,如图 9 所示。

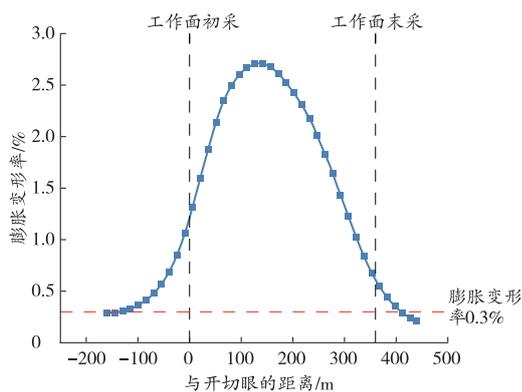


图 9 被保护层膨胀变形率

Fig. 9 Expansion deformation rate of the protected layer

由图 9 可知,随 10 煤层开采距离的增大,被保护层的膨胀变形率也在逐渐增大,最高为 2.5% 左右,并且在对应区域内的膨胀变形率均大于《防治煤与瓦斯突出细则》规定的 0.3%,因此可认为远距离下保护层(10 煤层)开采能达到预期效果。

### 3 卸压增透效果评价

#### 3.1 下保护层开采后覆岩“三带”发育高度确定

下保护层开采后,顶底板煤岩体发生上下错动、变形膨胀,进而促使不同裂隙发育,而在岩层卸压后瓦斯的聚积和流动在一定程度上受裂隙发育特点所制约,因此在不同分区中采用的卸压瓦斯抽采方式也不尽相同。在设计卸压瓦斯抽放方案时,必须对覆岩破坏特性有一定的了解。

1) 为明确工作面开采后覆岩“三带”发育高度,

依据“三下”采煤规程,对于下保护层开采厚度小于 3.0 m 的煤层,其垮落带、裂隙带高度计算公式如下:

$$H_m = \frac{100 \sum M}{2.1 \sum M + 16} + 2.5 \quad (3)$$

$$H_l = \frac{100 \sum M}{1.2 \sum M + 2.0} + 8.9 \quad (4)$$

式中: $H_m$  为垮落带高度,m; $H_l$  为裂隙带高度,m; $\sum M$  为采煤厚度,m。

计算得到最大导水裂隙带高度  $H_d$ (垮落带与裂隙带高度之和)约为 73.91 m。

2) 在此基础上,通过前文相似模拟,得到在上覆岩层稳定后,“三带”发育的整体分布规律。工作面开采结束后,根据上覆岩层不同分带内矸石分布形态及裂隙发育特征,判断 32 m 以下为垮落带,离层裂隙发育高度 56 m 为裂隙带,即导水裂隙带发育高度为 88 m,如图 10 所示。

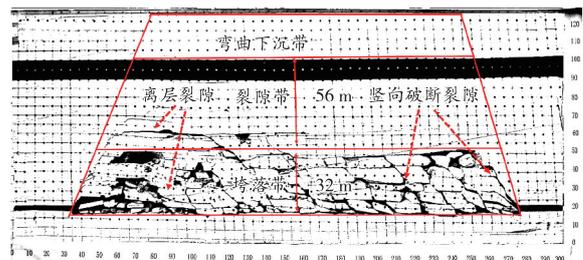


图 10 覆岩“三带”分布特征图

Fig. 10 Distribution characteristics of the “three zones”

3) 利用应力判别法分析覆岩“三带”的发育程度。开采至 360 m 时走向方向采空区中央位置覆岩主应力随采空区顶板距离的变化曲线如图 11 所示。

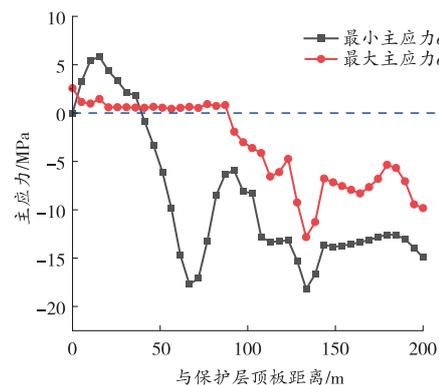


图 11 工作面推进 360 m 时最大主应力、最小主应力变化曲线  
Fig. 11 Maximum and minimum principal stress variation curves when the working face advances 360 meters

判别法<sup>[22]</sup>规定垮落带位于 2 个方向均为拉应力的区域( $\sigma_1 > 0, \sigma_3 > 0$ ),而垮落带外围岩层中分布着拉应力和压应力共同存在的区域( $\sigma_1 > 0, \sigma_3 < 0$ ),可以把这个区域规定为裂隙带上限。由图 11 可知,当距离未超过 38 m 时,2 条主应力曲线数值均大于 0,

即最大和最小主应力都是拉应力;当距离增大时,最小主应力首先朝着小于 0 的方向变化,即首先转变为压应力;当最大主应力也由正值变为负值时,此时距离增大到 87 m。分析数据可得,当工作面推进距离达到 360 m 时,垮落带发育高度为 38 m,导水裂隙带发育高度为 87 m。

### 3.2 卸压增透效果分析

结合前文分析可知,随着推进距离增大,对被保护层产生明显应力降低和膨胀变形的影响,导致裂隙尺度逐渐增大,裂隙之间相互贯通形成宏观大尺度裂隙比重增大,为煤层内存在的瓦斯流动和解吸提供条件。为了解保护层开采后的卸压增透效果,对被保护层的塑性区情况进行分析,并引入基于平板流体理论推导得到的增透率<sup>[22-23]</sup>作为衡量指标,其计算公式如下:

$$\omega = \frac{k-k_0}{k_0} = \frac{k}{k_0} - 1 = \frac{\left(1 - \frac{\varepsilon_V}{3\eta_0}\right)^2 \left(1 - \frac{\varepsilon_V}{\eta_0}\right)}{(1 - \varepsilon_V)} - 1 \quad (5)$$

式中: $\omega$  为增透率,即单位体积的渗透率的改变量,%; $k_0$ 、 $k$  为裂隙煤体的初始渗透率和特定状态下的渗透率, $\text{m}^2$ ; $\varepsilon_V$  为煤体仅考虑膨胀变形条件下的体积应变(负值); $\eta_0$  为初始孔隙率,根据朱仙庄矿区的实际地质情况选取 0.08。

通过式(5)计算可得增透率曲线。被保护层增透率分布及塑性区变化情况,如图 12~13 所示。

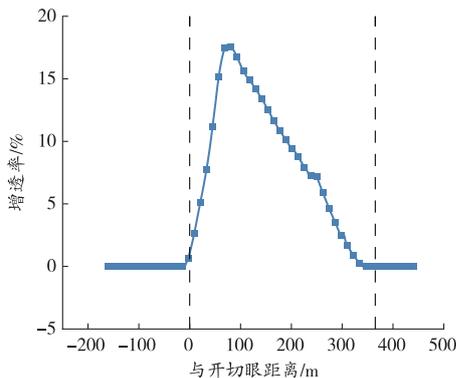


图 12 不同推进距离下被保护层增透率分布

Fig. 12 Distribution of enhanced transparency of the protected layer under different advancing distances

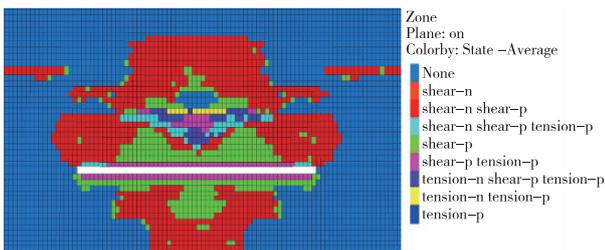


图 13 塑性区变化情况

Fig. 13 Changes in plastic zone

由图 12 可知,随着工作面的推进,增透率曲线呈“凸形”分布,在采空区正下方处达到最大值,说明此区域增透效果最佳。由图 13 可知,从岩层破坏形态来看,此时采空区上方的围岩以拉伸破坏下沉为主,底板呈现出“倒梯形”塑性破坏,形成较大范围的垮落松动区。被保护层则以剪切和拉伸破坏为主,此时煤层内的裂隙网络变化错综复杂,各种长短裂隙不断增多,裂隙分布情况越来越复杂,充足的空间变化有利于瓦斯气体的解吸和流动;从宏观上看,煤层的渗透性是在持续提高。在发生塑性失稳破坏的区域内,渗透率增幅变大,在 10 煤层距离开切眼 50~250 m 内有显著的增透效应,增幅为 5%~20%。

综上所述,朱仙庄煤矿 III3 采区将 10 煤层作为下保护层进行开采,可以使围岩塑性破坏区范围不断增大,延伸至保护层,对保护层产生卸压增透效果。此时,8 煤层的应力和膨胀变形发生显著的变化,其渗透率也随之提高,有助于煤层瓦斯的解吸及扩散。保护层开采对被保护层起到良好的卸压作用,对改善瓦斯抽采效果也具有一定的作用。

## 4 远距离下保护层开采卸压瓦斯抽采方案

为验证保护层开采的卸压效果,通过模拟研究分析,对覆岩裂隙发育高度进行预测,得出在保护层开采之后,导水裂隙带发育高度大约为 88 m 的结论。在这种情况下,保护层和被保护层之间的距离较远,仅仅依靠开采保护层进行卸压,是无法达到完全消除煤与瓦斯突出的目的,必须要结合其他相关措施。保护层开采后,需要卸压抽采的瓦斯主要来源有:保护层和被保护层通过采动裂隙和构造裂隙而流动的瓦斯。故在开采过程中,将瓦斯治理分为 2 个方面,即保护层卸压瓦斯抽采和被保护层瓦斯抽采。

### 4.1 保护层卸压瓦斯抽采方案

1) 网格密集穿层钻孔:穿层钻孔设计在底板瓦斯抽排巷内,实行密集布置;工作面内部全覆盖布置钻孔,钻孔穿透煤层施工至煤层顶板 0.5 m 处。在瓦斯抽排巷内按每隔 15 m 布置一钻场,钻场设计为 4.6 m×3.8 m×5.0 m(宽×高×长),钻孔孔径为 113 mm,工作面倾向中部钻孔终孔轴间距 5 m×8 m,如图 14 所示。

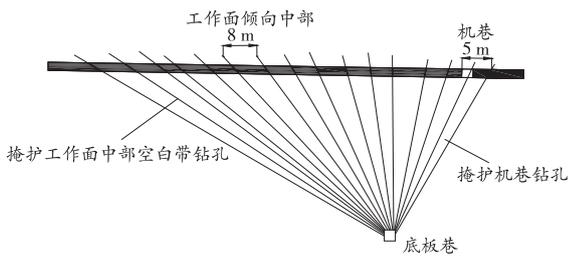


图 14 网格式密集穿层钻孔布置示意图  
Fig. 14 Layout of dense layer drilling in grid format

2) 顺层钻孔: 在机巷、风巷中沿着煤层的斜坡上, 每隔 5 m 布置钻孔, 孔径为 94 mm, 封孔长度不小于 8 m。

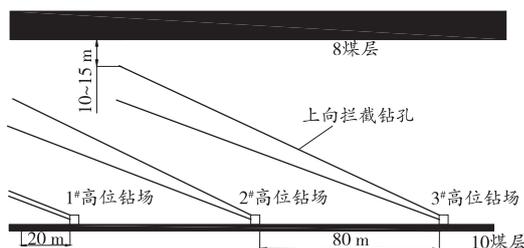
3) 高位钻孔: 沿工作面风巷, 按走向间距 80 m 布置钻孔, 钻场施工至煤层顶板岩层内, 钻孔孔径为 113 mm, 钻孔长度不小于 100 m; 每个高位钻场内施工布置高位钻孔 6 个, 钻孔倾向间距 10 m, 终孔位置距煤层顶板 10~15 m, 钻孔间距不大于 20 m。

4) 采空区埋管布置方式: 在回采过程中, 按照每 15 m 提前预埋管线, 2 趟管线以交替方式逐步进行抽采, 利用所产生的负压, 对采空区和上隅角所积聚的瓦斯进行抽采。

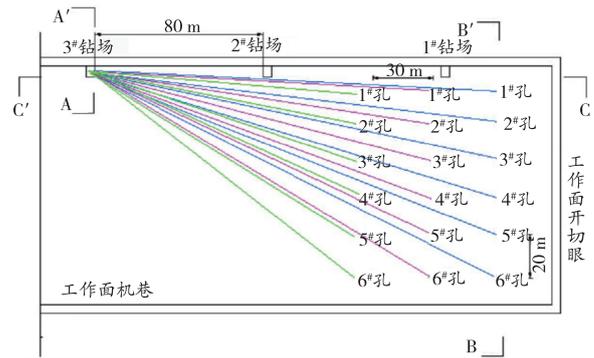
#### 4.2 被保护层瓦斯抽采方案

1) 地面钻井: 设计的地面钻井需要穿过 8 煤层直至 10 煤层底板处, 钻井开孔  $\phi 216$  mm, 钻井间距 120~150 m, 第一口钻井位于煤层倾斜方向距保护层工作面回风巷 50~80 m, 距离开切眼 40 m。

2) 上向拦截钻孔: 布置在 III 1031 工作面风巷高位钻场内, 如图 15(a) 所示。钻孔孔径为 113 mm, 钻孔内设置套管至垮落带 2 m 以上, 封孔长度不小于 8 m; 钻孔以 30 m $\times$ 20 m (走向 $\times$ 倾向) 标准覆盖工作面, 钻孔终孔位于 8 煤层底板 5~8 m 位置, 在保护层开采期间, 根据保护层回采进度, 利用抽采系统对被保护层开采卸压区域瓦斯实行递进式高负压抽采, 如图 15(b) 所示。



(a) 上向穿层拦截钻孔平面图



(b) 钻孔布置图

图 15 上向穿层拦截钻孔示意图  
Fig. 15 Schematic diagram of upward cross layer interception drilling

#### 4.3 被保护层开采效果考察方案

通过施工效果检验钻孔, 直接测定煤层残余瓦斯含量、煤层瓦斯压力, 对保护层开采卸压边界进行考察, 以及通过考察瓦斯抽采量、抽采率, 间接计算被保护层 8 煤层工作面煤层残余瓦斯含量。保证被保护层工作面布置在保护层有效卸压边界范围内, 煤层瓦斯含量降低至 5 m<sup>3</sup>/t 以下, 实测残余瓦斯压力小于 0.5 MPa。

#### 5 结论

1) 采动裂隙随工作面推进是动态变化的, 且基本顶出现周期性运动, 周期来压步距平均在 15 m 左右。当工作面推进至 235 m 时, 覆岩形成垮落带、裂隙带和弯曲下沉带“三带”空间分布特征。此时, 被保护层卸压更充分, 卸压保护角为 67°, 开切眼和工作面位置两侧的卸压范围基本对称。

2) 对被保护层的位移进行分析得出: 开采距离增加导致被保护层垂直位移与应力变化趋势一致, 岩层受到采动应力变化的影响发生变形破断。随开采距离增大, 被保护层卸压范围扩大, 工作面中部下沉位移最大, 卸压效果最佳。垂直应力和位移在工作面走向呈现出相同的变化趋势; 膨胀率从工作面两端至中间有增大的趋势, 最高在 2.5% 左右, 满足相关规定要求。

3) 数值模拟结果表明: 当工作面推进距离达到 360 m 时, 垮落带发育高度为 38 m, 导水裂隙带发育高度为 87 m, 数值模拟结果与相似模拟和公式计算结果基本一致。

4) 开采保护层过程中, 分析了远距离煤层下保护层开采过程中的卸压增透效应, 8 煤层下方的增透率提高, 增幅为 5%~20%, 说明保护层开采对改善瓦斯抽采效果具有一定作用。结合保护层开采和

瓦斯抽采方案, 可达到矿井在低瓦斯状态下安全生产的目的。研究结果可以为其他矿区选择下保护层开采和瓦斯抽采提供一定的借鉴。

### 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 review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 王元杰, 徐刚, 陈法兵, 等. 深部厚硬岩层压裂控制冲击弱化机理及可压裂性评价[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(2): 15-23.  
WANG Yuanjie, XU Gang, CHEN Fabing, et al. Mining pressure weakening mechanism by ground fracturing and fracturing evaluation of hard rock strata [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(2): 15-23.
- [3] 康健东. 煤柱对上保护层开采卸压消突效果的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(4): 17-21.  
KANG Jiandong. Study on the influence of coal pillar on the pressure relief and outburst elimination of the upper protective layer mining [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(4): 17-21.
- [4] 王晶, 王晓蕾. 下保护层开采时被保护层裂隙发育与渗透特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(3): 62-70.  
WANG Jing, WANG Xiaolei. Seepage characteristic and fracture development of protected seam caused by mining protecting strata [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(3): 62-70.
- [5] 刘洪永, 陈远平, 赵长春, 等. 保护层的分类及判定方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 468-474.  
LIU Hongyong, CHENG Yuanping, ZHAO Changchun, et al. Classification and judgment method of the protective layers [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 468-474.
- [6] 李学良. 煤矿老采空区覆岩移动变形监测方法分析及应用[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 157-162.  
LI Xueliang. Analysis and application of monitoring method of overburden movement and deformation in old goaf of coal mine [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 157-162.
- [7] 邓广哲, 刘文静, 李刚, 等. 低渗煤层水力割缝钻孔抽采影响半径[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(4): 619-628.  
DENG Guangzhe, LIU Wenjing, LI Gang, et al. Influence radius of hydraulic slotted hole drainage in low permeability coal seam [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(4): 619-628.
- [8] 刘晓, 李勇, 宣德全, 等. 软煤夹层水射流层状卸压增透抽采瓦斯数值模拟及试验[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 54-61.  
LIU Xiao, LI Yong, XUAN Dequan, et al. Numerical simulation and test of gas drainage with water jet layered pressure relief and permeability enhancement in soft coal seam [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 54-61.
- [9] 曹偲, 赵旭生, 刘延保. 煤与瓦斯突出多物理场分布特征的数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(2): 7-11.  
CAO Ji, ZHAO Xusheng, LIU Yanbao. Numerical simulation on multiphysics field distribution characteristics of coal and gas outburst [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(2): 7-11.
- [10] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [11] 李全中, 胡海洋, 吉小峰. 厚煤层煤层气井水力压裂特点及效果评价[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(1): 92-96.  
LI Quanzhong, HU Haiyang, JI Xiaofeng. Characteristics and effect evaluation of hydraulic fracturing of CBM well with thick coal seam [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(1): 92-96.
- [12] 焦振华, 陶广美, 王浩, 等. 晋城矿区下保护层开采覆岩运移及裂隙演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 85-90.  
JIAO Zhenhua, TAO Guangmei, WANG Hao, et al. Overburden strata movement and fissure evolution in lower protective layer in Jincheng mining district [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 85-90.
- [13] 尹嘉帝, 张华磊, 涂敏. 综采工作面覆岩裂隙动态演化特征研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(6): 116-120.  
YIN Jiadi, ZHANG Hualei, TU Min. Dynamic evolution characteristics of overburden fractures in fully mechanized coal face [J]. Coal Engineering, 2020, 52(6): 116-120.
- [14] 胡炳南, 张华兴, 申宝宏. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [15] 余学义, 刘樟荣, 赵兵朝, 等. 王家沟煤矿条带充填开采导水裂隙发育规律研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(5): 83-86.  
YU Xueyi, LIU Zhangrong, ZHAO Bingchao, et al. Research on law of water flowing fracture development due to strip-filling mining in Wangjiagou coal mine [J]. Coal Engineering, 2015, 47(5): 83-86.
- [16] 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.
- [17] 徐连兵, 杨科, 赵新元. 充填开采覆岩裂隙时空演化实验研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(7): 86-91.  
XU Lianbing, YANG Ke, ZHAO Xinyuan. Experiment on temporal and spatial evolution of overburden fractures in backfill mining [J]. Coal Engineering, 2022, 54(7): 86-91.
- [18] 张勇, 张保, 张春雷, 等. 厚煤层采动裂隙发育演化规律及分布形态研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(6): 935-940.  
ZHANG Yong, ZHANG Bao, ZHANG Chunlei, et al. Study of the dynamic evolution rules and distribution pattern of mining-induced fractures of thick coal seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(6): 935-940.
- [19] 许家林, 秦伟, 轩大洋, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 35-43.  
XU Jialin, QIN Wei, XUAN Dayang, et al. Accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 35-43.
- [20] 陈军涛, 武强, 尹立明, 等. 高承压水上底板采动岩体裂隙演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 54-60.  
CHEN Juntao, WU Qiang, YIN Liming, et al. Law of crack evolution in floor rock mass above high confined water [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 54-60.
- [21] 保护层开采技术规范: AQ 1050—2008[S].
- [22] 程祥, 赵光明, 李英明, 等. 软岩保护层开采卸压增透效应及瓦斯抽采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 1045-1053.
- [23] XIE H P, XIE J, GAO M, et al. Theoretical and experimental validation of mining-enhanced permeability for simultaneous exploitation of coal and gas [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 35(5): 1045-1053.

(责任编辑: 陈玉涛)