

### 千米深井解放层开采卸压机理及效果分析

高亚楠 张垚 张德飞 张玉栋 赵卫东 蔚立元

#### 引用本文:

高亚楠, 张垚, 张德飞, 等. 千米深井解放层开采卸压机理及效果分析[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(8): 116–126.

GAO Yanan, ZHANG Yao, ZHANG Defei, et al. Pressure relief mechanisms and effects of liberation seam mining in –m–deep coal mines: A case study of the Huafeng coal mine in Tai’ an, China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(8): 116–126.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.12.0915>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 近直立特厚煤层深孔爆破防治冲击地压效果检测

Effect of deep hole blasting for rock burst prevention and control in suberect and extremely thick coal seams

煤田地质与勘探. 2017, 45(4): 135–140 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.04.024>

##### 厚表土层深井卸压开采地面钻井变形破坏及其预防——以淮南顾桥矿为例

Deformation and damage of pressure-relieved gas extraction wells in deep mining under thick surface soil and their prevention: With Guqiao of Huainan mine as an example

煤田地质与勘探. 2018, 46(5): 159–166 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.025>

##### 软煤夹层水射流层状卸压增透抽采瓦斯数值模拟及试验

Numerical simulation and test of gas drainage with water jet layered pressure relief and permeability enhancement in soft coal seam

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 54–61 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.007>

##### 综采工作面回撤巷强矿压显现机理及控制技术

Mechanism and control of strong ground pressure in fully mechanized mining face

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 110–116 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.014>

##### 深部带压开采：传承与创新

Deep mining under safe water pressure of aquifer: Inheritance and innovation

煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 170–181 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.018>

##### 井下高压水射流切割煤层增透效果数值模拟

Numerical simulation study on permeability enhancement effect of high pressure water cutting coal seam

煤田地质与勘探. 2017, 45(2): 45–49 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.02.008>



移动阅读

高亚楠, 张垚, 张德飞, 等. 千米深井解放层开采卸压机理及效果分析——以华丰煤矿为例[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(8): 116–126. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.12.0915

GAO Yanan, ZHANG Yao, ZHANG Defei, et al. Pressure relief mechanisms and effects of liberation seam mining in 1 000-m-deep coal mines: A case study of the Huafeng coal mine in Tai'an, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(8): 116–126. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.12.0915

# 千米深井解放层开采卸压机理及效果分析

## ——以华丰煤矿为例

高亚楠<sup>1,2,3,4</sup>, 张 垚<sup>2,3,4</sup>, 张德飞<sup>2,3,5</sup>, 张玉栋<sup>3</sup>, 赵卫东<sup>5</sup>, 蔚立元<sup>2,3</sup>

- (1. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077; 2. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 上海市中侨职业技术大学 建筑工程学院, 上海 201500; 5. 新汶矿业集团有限责任公司 华丰煤矿, 山东 泰安 271413)

**摘要:** 解放层开采是煤与瓦斯突出、冲击地压等煤矿动力灾害防治的重要措施, 以山东泰安千米深井华丰煤矿 2613、2412 工作面为背景, 采用物理模拟与数值模拟相结合的方法, 围绕解放层开采卸压机理、卸压效果评价等工程科学问题开展研究, 明晰解放层开采后上覆岩层运动规律及矿压变化特征, 厘清被解放层采动过程中采场应力与岩层位移演化规律, 进而对解放层开采卸压效果和被解放层开采可行性进行指标化评价。结果表明: (1) 解放层开采过程中, 上覆岩层逐渐垮落形成漏斗状、非对称的多固支梁状结构, 解放层开采结束后, 采场左右两端分别形成对被解放层起永久性卸压保护的类悬臂梁结构, 左右保护角分别为 54°、60°。(2) 解放层上覆岩层划分为“永久性卸压保护区”和“采空触研压实区”, 两种应力分布区对应解放层顶板应力最大值约 20、36 MPa, 对应被解放层内最大应力值约 29、24 MPa, 被解放层受两种应力区的叠加影响。(3) 解放层开采结束后, 工作面两端出现应力积聚, 其他区域上覆岩层整体处于卸压状态, “采空触研压实区”的持续发育已影响到被解放层, 被解放层 50~100 m 区域沉降量约等于采高。(4) 被解放层开采过程中, 覆岩板裂指数  $f$  为 0.5, 小于临界值 0.7, 不具有发生强矿压动力灾害的倾向, 上覆岩层扰动范围较开采前变化极小, 同时结合覆岩破坏形态, 可知, 被解放层开采始终处于解放层卸压范围内, 解放层卸压充分, 被解放层开采具有可行性。

**关键词:** 千米深井; 解放层开采; 卸压机理; 卸压效果; 开采可行性

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2023)08-0116-11

## Pressure relief mechanisms and effects of liberation seam mining in 1 000-m-deep coal mines: A case study of the Huafeng coal mine in Tai'an, China

GAO Yanan<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Yao<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Defei<sup>2,3,5</sup>, ZHANG Yudong<sup>3</sup>, ZHAO Weidong<sup>5</sup>, YU Liyuan<sup>2,3</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. School of Architectural Engineering, Shanghai Zhongqiao Vocational and Technical University, Shanghai 201500, China; 5. Huafeng Coal Mine of Xinwen Mining Group Co., Ltd., Tai'an 271413, China)

**Abstract:** Liberation seam mining serves as an important approach to the prevention of deep dynamic disasters such as

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-05-16

基金项目: 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室开放基金项目(2021SKMS02); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023KYJD1006)

第一作者: 高亚楠, 1985 年生, 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 从事矿山岩石力学与开采理论方向研究. E-mail: yngao@cumt.edu.cn

通信作者: 张垚, 1992 年生, 男, 山西朔州人, 博士研究生, 从事矿山岩石力学与开采理论方向研究. E-mail: zycqdy@163.com

coal and gas outbursts, as well as rock bursts. Based on the Nos. 2613 and 2412 mining faces of a 1 000-m-depth coal mine in the Huafeng Coal Mine in Tai'an, Shandong, this study investigated the engineering scientific issues such as the pressure relief mechanisms and effect evaluation of liberation seam mining through physical and numerical simulations. As a result, it determined the movement law of overburden strata and the characteristics of underground pressure after the mining of the liberation seam and ascertained the evolutionary laws of the stope stress and stratum displacement during the mining of the liberated seam. Accordingly, it evaluated the pressure relief effect of the liberation seam mining and the feasibility of the liberation seam mining based on various indices. The results are as follows: (1) During the mining of the liberation seam, the overburden strata gradually collapsed, forming a funnel-shaped, asymmetric multi-end fixed beam structure. After the liberation seam mining, quasi-cantilever beam structures, which provided permanent pressure relief protection for the liberated seam, were formed at the left and right ends of the stope, with left and right protection angles of  $54^{\circ}$  and  $66^{\circ}$ , respectively; (2) The overburden strata of the liberation seam can be divided into the protection zone of permanent pressure relief and the compaction zone of gangue in the goaf. Corresponding to the protection zone and the compaction zone, the maximum stress on the roof of the liberated seam was about 20 MPa and 36 MPa, respectively, and the maximum stress within the liberated seam was approximately 29 MPa and 24 MPa, respectively. The liberated seam was subjected to the combined effects of the two stress zones; (3) After the mining of the liberation seam, stress accumulated at both ends of its mining face, and the overburden strata in other zones were in the pressure relief state. The continuous propagation of the compaction zone affected the liberated seam, whose subsidence at distances of 50-100 m from the liberation seam roughly equaled the mining height; (4) During the mining of the liberated seam, the overburden rock showed a palling index ( $f$ ) of 0.5, which was less than the critical value 0.7, indicating that the dynamic disaster of high underground pressure was unlikely to happen in the liberated seam. Moreover, the overburden strata's disturbance range varied slightly compared to that before mining. In combination with the failure morphology of the overburden strata, it can be concluded that the liberated seam was always within the pressure relief range during its mining. Therefore, due to the sufficient pressure relief of the liberation seam, the mining of the liberated seam is feasible.

**Keywords:** 1 000-m-deep mine; liberation seam mining; pressure relief mechanism; pressure relief effect; feasibility of mining

长期大规模开采导致浅部煤炭资源逐渐枯竭,深部开采已然成为我国煤炭资源开发的现状和未来趋势<sup>[1-3]</sup>,其所面临的煤与瓦斯突出、冲击地压等诱发的复合动力灾害更加严重与复杂,我国山西、陕西、河南、山东等先进煤炭产能基地现均已出现了此类困扰<sup>[4-6]</sup>。

目前,针对深部矿井复合动力灾害的防治思路及措施有2种,一种是以卸压爆破法<sup>[7-8]</sup>、煤层注水法<sup>[9-10]</sup>、大直径钻孔卸压法<sup>[11-12]</sup>、顶板定向水力致裂法<sup>[13-14]</sup>、高压水射流煤层割缝法<sup>[15-16]</sup>、液态 $\text{CO}_2$ 致裂防治法<sup>[17-18]</sup>等为代表的主动解危防治措施,由于只能对采场空间进行局部改造,强矿压问题的解决在时间空间上具有局限性<sup>[19]</sup>。另一种是以解放层开采为代表的源头防治措施,可实现采场强矿压的大范围卸压,具有区域性、超前性和主动性的优点<sup>[20-21]</sup>,已在深部矿井强矿压治理中得到了广泛应用<sup>[22]</sup>。

为实现对深部矿井强矿压的科学防控,前人对解放层开采的卸压机理和效果进行了一系列研究,如,解放层开采影响因素<sup>[23]</sup>、有效卸压范围的界定<sup>[24-27]</sup>、被解放层内应力与变形的分布规律<sup>[28-32]</sup>等,这为强矿压煤层的安全开采提供了有效的技术指导。事实上,解放层的提前开采,可释放高位岩层弹性能,改善被解放

层开采中能量积聚与释放的空间分布状况<sup>[33]</sup>。因此,有学者提出在无合适解放层可选取时,可将软岩作为解放层开采的强矿压治理方案<sup>[34]</sup>。

然而在实际工程中,解放层开采后上覆岩层并非完全处于卸压状态,根据采场应力变形分布特征科学合理布置被解放层工作面,对被解放层的全卸压开采至关重要。为此,部分学者基于解放层开采机理,对被解放层内的应力分区<sup>[26-27,35-36]</sup>、变形分区<sup>[37]</sup>等进行了具体研究,准确划定了被解放层内的卸压区、应力集中区及原岩应力区等区域的分布范围。以此为基础,结合现场实测得到的卸压区域范围,进一步对工作面长度和推进速度等进行优化设计,实现被解放煤层的全卸压开采<sup>[38]</sup>。

以上问题的研究已经非常丰富,但千米采深煤层倾斜赋存条件下的解放层开采卸压机理却鲜有提及。笔者以千米深井华丰煤矿2613工作面(解放层)、2412工作面(被解放层)为研究对象,采用物理模拟与数值模拟相结合的方法,先后探索了解放层开采卸压机理、被解放层应力场分布演化特征,进而对被解放层的开采可行性进行了定量分析与评价。研究成果可为类似条件矿井的安全高效开采提供科学指导。

## 1 工程概况

华丰煤矿主采的 4 号、6 号煤层,埋深超 1 100 m,平均厚度分别为 6.4、1.5 m,两煤层平均法向距离 40 m,相对层间距达 26.67 m;煤岩层为单一倾伏向斜构造,倾角 32°~38°,采用上行开采。受强矿压影响,该矿自建井生产,巷道累计破坏超过 2 km,断面收缩率达到了 75%,累计工作面破坏长度约 400 m,单体液压支柱共破坏超过 500 根,铰接顶梁 600 余根。

由于 4 号煤层鉴定具有弱冲击倾向性,冲击危险性等级为中等;6 号煤层鉴定具有弱冲击倾向性,冲击危险性等级为弱级;6 号煤层顶板属于无冲击倾向岩

层。为有效防治强矿压,同时提高煤炭资源采出率,该矿自 2001 年起应用“采六保四”的解放层开采技术。随着煤层工作面不断向深部延伸,强矿压显现也越来越突出,为更加科学合理地防治矿井强矿压,有必要对解放层开采时上覆煤岩层的结构及矿压演化规律进行深入分析研究。

本文研究对象 2613、2412 工作面位于矿井-1 100 m 水平二采下山区,其中 2613 工作面走向长度 1 740 m,倾斜长度 150 m,倾角 33°~36°(平均 34°);2412 工作面走向长度 1 800 m,倾斜长度 160 m,倾角 30°~34°(平均 32°)。两煤层间存在多层坚硬砂岩,工作面综合柱状图如图 1 所示。

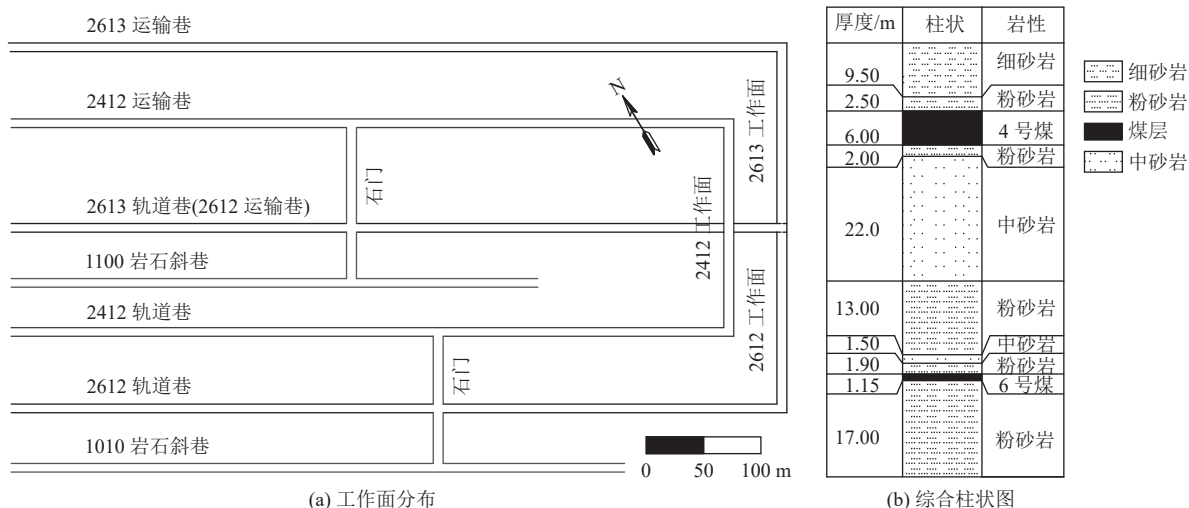


图 1 工作面概况

Fig.1 Overview of mining faces

## 2 解放层开采覆岩运动规律物理模拟

### 2.1 试验方法

为揭示解放层开采扰动下上覆岩层的运动规律及裂隙发育特征,首先开展物理模拟试验。试验采用 KD-01 平面应变模拟实验台,该实验台可在外部施加垂直方向载荷。模型尺寸长×宽×高为 2.50 m×0.30 m×1.86 m,共由 16 个煤岩层组成(表 1),模型几何比为 100 : 1,应力比为 170 : 1,模型上部施加的载荷约 0.145 MPa,相似材料由砂子、碳酸钙、石膏按一定比例配比制作<sup>[39]</sup>。岩层力学参数及模拟参数见表 1,试验模型如图 2a、图 2b 所示。

物理模拟试验模型 6 号煤层的开挖高度为 1.5 m,试验开采速度为 20 cm/h,即每 15 min 开挖 1 次,开挖长度 5 cm。6 号煤层两边各留 25 cm 的保护煤柱,从模型左侧开始对 6 号煤层模拟开挖 200 m。为准确测得各岩层真实位移数据,采用高清数码相机实时捕捉煤层开采后的岩层运动状态,后续采用 VIC-2D 软件

分析得到各岩层位移信息(图 2c)。

为准确测量岩层应力分布状况,在模型内部 6 号煤层顶板和 4 号煤各布置 1 组(5 个)压力盒(图 2a),编号为 1—5、6—10。试验采用振弦式压力盒,其灵敏度为 0.004%,工作温度区间为-20~70℃,使用 TS2890 测量仪通过半桥连接法采集信息(图 2d)。

### 2.2 试验结果

#### 1) 解放层开采覆岩裂隙发育规律

随着 6 号煤层工作面的开采推进,上覆各岩层裂隙持续发育分别经历了:直接顶悬顶离层(图 3a)、直接顶弯曲下沉(图 3b)、直接顶垮落触矸(图 3c)、覆岩非对称结构形成(图 3d)、低位裂隙闭合及高位离层(图 3e)、被解放层弯曲下沉(图 3f),具体如下。

如图 3a、图 3b 所示,在采位 55~60 m 区域,工作面直接顶裂隙发育并逐渐开始出现离层,采位到达 60 m 时,直接顶弯曲下沉触矸,形成一个长约 60 m 两端固支约束的梁结构。如图 3b、图 3c 所示,在采位 60~85 m

表 1 岩层力学参数及模拟参数  
Table 1 Mechanical parameters and simulation parameter of the strata

岩性	埋深/m	厚度/m	模拟厚度/cm	抗压强度/MPa	模拟强度/kPa	备注
中砂岩	1 014.45	30.00	30	66.00	388.24	
粉砂岩	1 024.45	10.00	10	37.76	222.12	
1号煤层	1 025.45	1.00	1	15.80	93.00	
粉砂岩	1 039.45	14.00	14	37.76	222.12	
中砂岩	1 050.45	11.00	11	66.00	388.24	
细砂岩	1 059.95	9.50	9.5	73.40	431.76	细(粉)砂岩
粉砂岩	1 062.45	2.50	2.5	37.76	222.12	
4号煤层	1 068.45	6.00	6	15.80	93.00	
粉砂岩	1 070.45	2.00	2	37.76	222.12	中(粉)砂岩
中砂岩	1 092.45	22.00	22	66.00	388.24	
粉砂岩	1 105.45	13.00	13	37.76	222.12	粉(中)砂岩
中砂岩	1 106.95	1.50	1.5	66.00	388.24	
粉砂岩	1 108.85	1.90	1.9	37.76	222.12	
6号煤层	1 110.00	1.15	1.15	15.80	93.00	
粉砂岩	1 127.00	17.00	17	37.76	222.12	底基岩
粉砂岩	1 157.00	30.00	30	37.76	222.12	

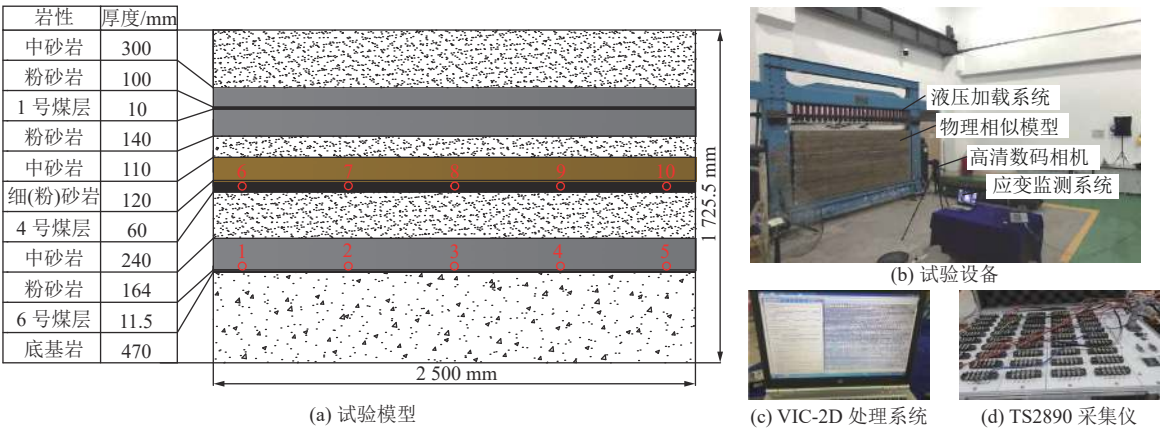


图 2 试验模型及设备  
Fig.2 Test model and devices

区域,上覆低位岩层离层并形成裂隙带,采位到达 85 m 时,基本顶离层达到最大值,高约 1 m,长约 70 m。如图 3c、图 3d 所示,在采位 85~125 m 区域,上覆低位岩层裂隙带持续发育并发生群体离层,离层带逐渐向高位岩层扩张,整体岩层垮落形成一个漏斗状、非对称、中间位移最大的多固支梁状结构。如图 3d、图 3e 所示,在采位 125~160 m 区域,上覆岩层裂隙带持续向高位岩层发育,4 号煤层底板出现长约 55 m 裂隙,而低位岩层间的离层量逐渐减小并趋于闭合,6 号煤层直接顶与采空区触矸压实,且范围逐步扩大。如图 3e、图 3f 所示,在采位 160~200 m 区域,低位岩层裂隙带趋于完全闭合,受 6 号煤层直接顶与采空区触矸压实范围扩大影响,工作面临近开采完毕时直接顶破断形

成砌体梁结构,出现了一条贯穿直接顶、基本顶的长约 10 m 的纵向裂隙。如图 3f 所示,工作面开采完后,4 号煤层中部有明显弯曲沉降现象,6 号煤层左右两端分别形成一个裂隙带未完全闭合的类悬臂梁结构,保护角分别为 54°(左)和 60°(右),该保护角分布规律与矿井类似相关试验研究的结果相吻合<sup>[40]</sup>。

2) 解放层开采覆岩位移变化规律

基于 DIC 软件 VIC-2D 分析,可以得到上覆各岩层位移变化规律。图 4 展示了解放层开采各阶段采场覆岩位移变化趋势,红色代表该区域的位移变化较小,紫色则代表该区域的位移变化较大,结合覆岩裂隙发育与运移规律(图 3),可以看到,工作面开采初期,顶板位移量变化较小;开采到 60 m 时,顶板开始出现离层

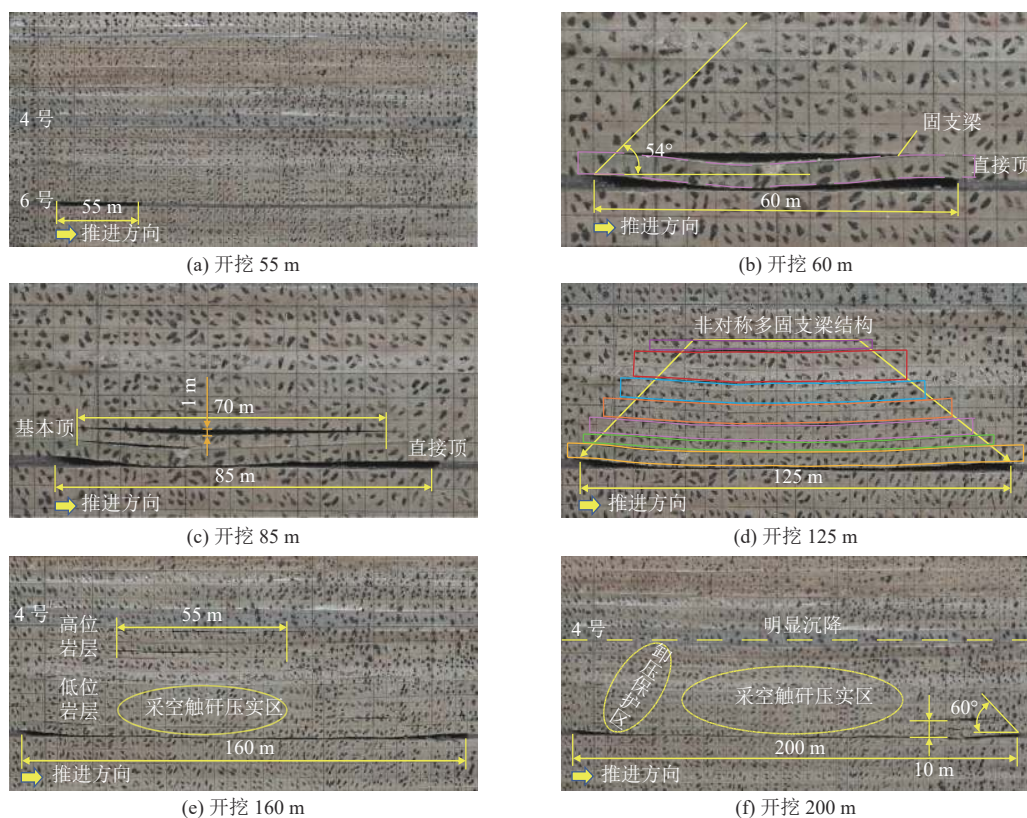


图 3 解放层开采覆岩结构演化

Fig.3 Evolution of overburden strata' structure during the liberation seam mining

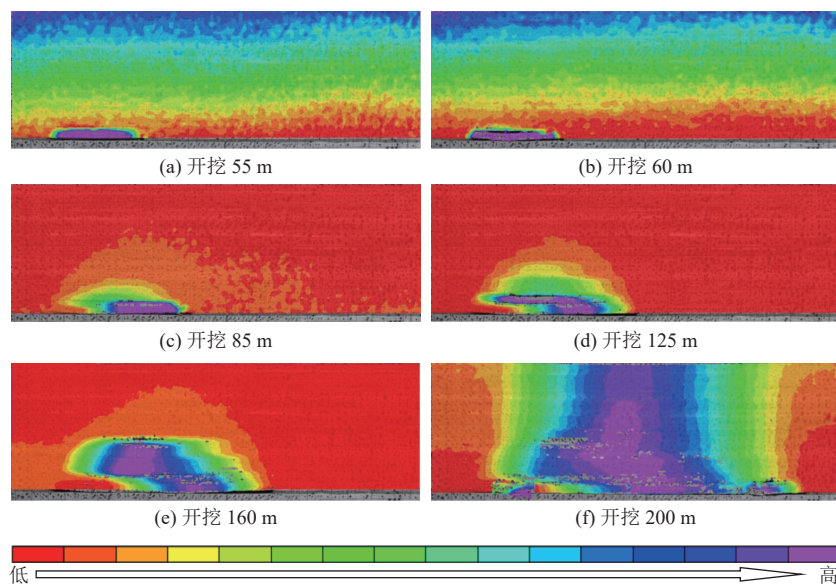


图 4 解放层开采覆岩位移变化趋势

Fig.4 Displacement of overburden strata during the mining of the liberation seam

现象; 开采到 125 m 时, 上覆岩层整体下沉, 呈现非对称、中间位移最大的分布状态; 开采到 125~160 m 时, 4 号煤层乃至 4 号煤层上方岩层下沉明显, 同时 6 号煤层上部低位岩层层间距逐渐减小并趋于闭合; 开采结束时, 工作面上覆岩层整体出现下沉, 这表明 6 号煤层采空触矸区形成, 而两端形成位移相对较小的卸压保护区域。上覆岩层位移变化规律, 与宏观裂隙发育

观测结果基本吻合。

### 3) 覆岩应力分布

图 5 为解放层开采过程中 6 号煤层工作面顶板应力变化曲线, 可以看到, 工作面推进前 120 m, 6 号煤层顶板内应力约等于原岩应力(20 MPa), 变化幅度较小。开采推进到 120~200 m 时, 6 号煤层顶板内的应力变化较大, 压实区域应力最大值约 36 MPa, 卸压区域应

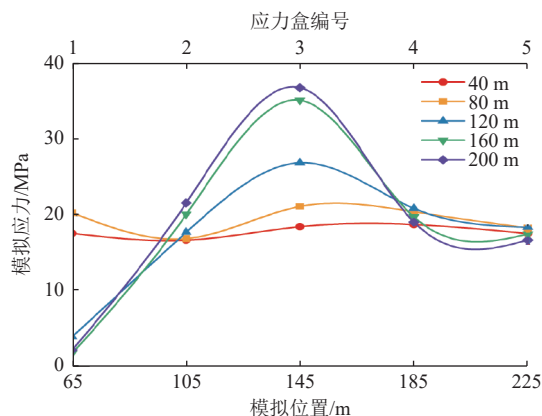


图5 解放层6号煤层顶板应力演化

Fig.5 Stress on the roof of liberation seam No.6

力减小到约4 MPa,工作面左边区域比右边区域的卸压效果更明显。

图6为对应的被解放层4号煤层顶板应力变化曲线,受采动影响,上覆岩层裂隙带持续向高位岩层扩展,这导致4号煤层顶板内的应力开始逐渐出现变化,应力分布先减小后增大再减小,其中压实区域应力最大值约24 MPa,最小值约13 MPa,而卸压区域应力则增大到29 MPa,这表明被解放层同时受解放层顶板“永久性卸压保护区”和“采空触矸压实区”的叠加影响。

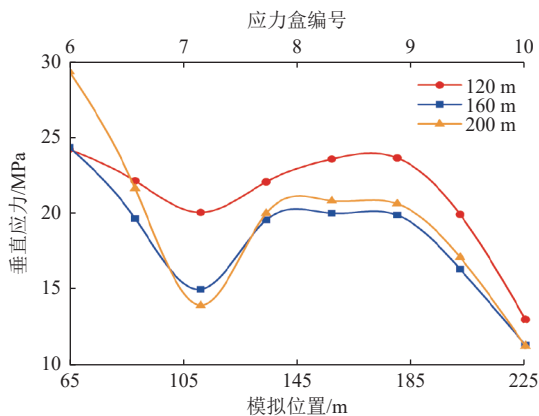


图6 被解放层4号煤层应力演化

Fig.6 Stress on the roof of liberated seam No.4

图7为解放层6号煤层顶板应力集中系数条形图,图8为被解放层4号煤层应力集中系数条形图。可以看出,随着工作面的持续开挖,解放层顶板应力集中系数与被解放层应力集中系数的变化越明显,其中解放层开采结束后在工作面中部的顶板应力集中系数最大,约1.8;而被解放层的应力集中系数从左到右呈现先减小后增大再减小的变化趋势,但总体小于1.5,这也从侧面说明了解放层开采卸压的有效性。

根据解放层与被解放层的顶板应力分布变化状况,将解放层顶板划分为“永久性卸压保护区(低应力区)”和“采空触矸压实区(高应力区)”,分布区间分别为

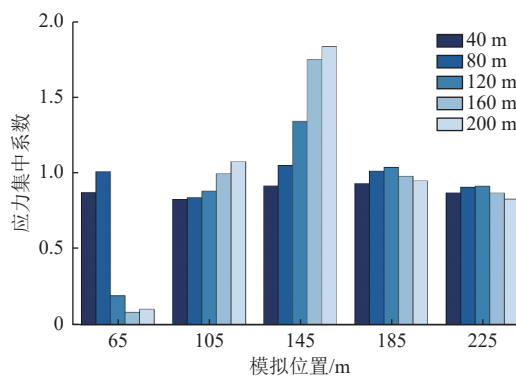


图7 解放层6号煤层顶板应力集中系数

Fig.7 Stress concentration coefficient of the roof of the liberation seam No.6

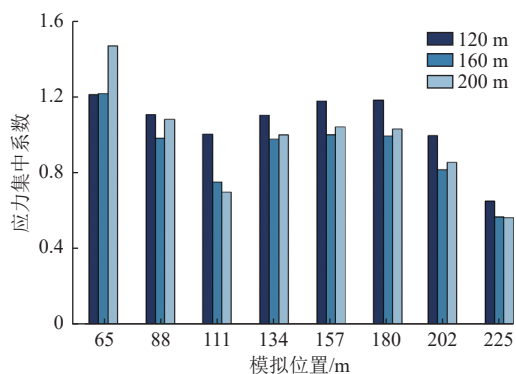


图8 被解放层4号煤层应力集中系数

Fig.8 Stress concentration coefficient of the liberated seam No.4

65~105 m、105~180 m。应力分布区间的准确划定,可为后期4号煤层工作面布置的确定提供重要依据,从而降低4号煤层开采期间的强矿压显现。

### 3 解放层倾向布置开采卸压效果

物理模拟研究了煤层工作面沿走向开采过程中,上覆岩层的结构及矿压演化规律,探索了卸压保护区、采空触矸压实区、保护角等关键问题。另一方面,华丰矿区煤层赋存倾角约30°,因此,分析煤层倾斜布置开采时的岩层移动与矿压演化规律是系统揭示千米强矿压深井解放层开采卸压机理必须研究的问题,这里采用数值计算方法,对煤岩层倾斜布置时的解放层开采卸压效果进行分析。

#### 3.1 模型建立

如图9所示,模型设计6号煤层倾斜布置,对6号煤层的各个工作面依次进行顺序开挖。根据井田实际工况,先布置两个切眼作为上、下平巷,以地表为x轴,以下平巷与地表垂线为y轴,可得下平巷坐标(0, -1 250),上平巷坐标(265, -1 095),设置6个开挖步骤:50、100、150、200、250、300 m。该数值模拟采用的是边界元计算方法。该方法以定义在边界上的边界积分方程为控制方程,通过对边界分元插值离散,且利用微分算子

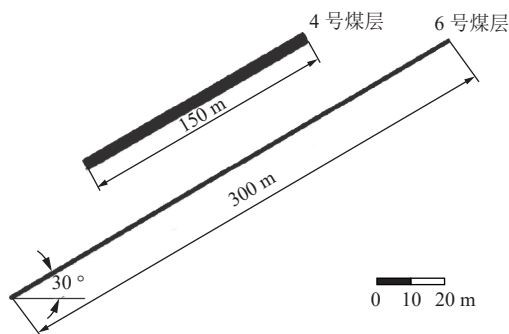


图9 倾向布置开采数值计算模型

Fig.9 Numerical calculation model of mining of inclined coal seams

的解析基本解作为边界积分方程的核函数,有解析与数值相结合的特点,具有较高的精度,本文根据煤岩层埋深条件设置模型应力条件,通过模型内的开挖面控制边界条件,进而获得以开挖面为核心的域内解。图9中,4号煤层代表2412工作面所在煤岩层,6号煤层代表2613工作面所在煤岩层。

### 3.2 结果分析

#### 1) 覆岩应力场演化规律

在实际工程中,第一主应力是矿山压力中最为关键的指标,故本文重点分析6号煤层开采过程中采场第一主应力变化情况。

如图10所示,6号煤层未开采前,采场只在切眼处有应力集中现象,其余位置处于原岩应力状态。开采50m时,切眼和工作面前方出现应力积聚,此时低位岩层形成裂隙带,裂隙带局部压力有所减小。6号煤层开采到100~200m区域,工作面前方应力持续积聚,随着直接顶下沉形成触矸压实区,顶板上方应力有所增大。6号煤层开采到200~300m区域,触矸压实区进一步增大,整个工作面受卸压区与压实区共同影响,沿开采方向顶板的应力变化规律为:减小—增大—减小。对比6号煤层开采前后应力场可知,除切眼及顶板上方触矸压实区,整体覆岩处于卸压状态。

#### 2) 被解放层内应力及位移变化规律

根据物理模拟试验得到的6号煤层开采保护角、

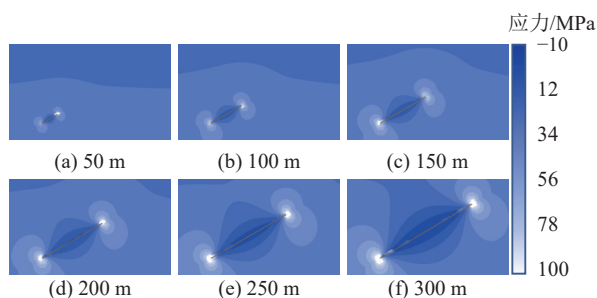


图10 解放层开采覆岩第一主应力云图

Fig.10 The first principal stress nephogram during the mining of the liberation seam

卸压区影响范围以及6号煤层与4号煤层之间的法向距离,确定4号煤层工作面位于6号煤层上方中部位置,模拟开挖长度为150m,对4号煤层内的位移和应力分别进行分析。由图11可知,随着6号煤层的开采,4号煤层沉降量逐步增大,这与物理模型试验几乎一致。6号煤层开采完毕后,4号煤层内50~100m区域,位移持续保持在最大值附近,沉降量约等于采高。这说明“采空触矸压实区”的持续发育已影响到4号煤层,故,若在此处布置4号煤层上平巷需加强支护强度。由图12可知,在6号煤层开采前100m,4号煤层内的应力变化很小,远场应力约等于地应力,4号煤层基本不受6号煤层影响。随着6号煤层持续推进,4号煤层受解放层开采的影响持续扩大,4号煤层内与6号煤层开采位置所对应的区域存在应力积聚。6号煤层开采完毕后,整个4号煤层60~100m区域处于卸压状态,该区域内第一主应力值约10MPa。

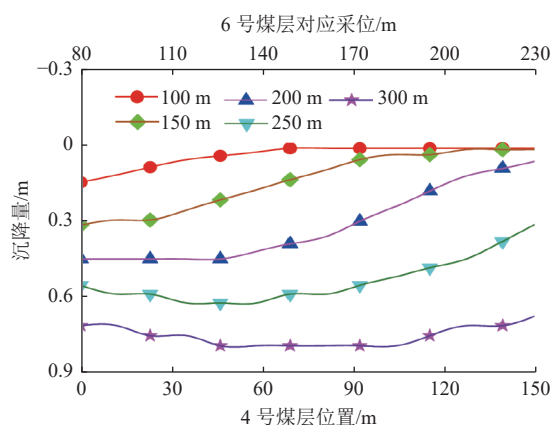


图11 被解放层位移变化

Fig.11 Displacement of the liberated seam

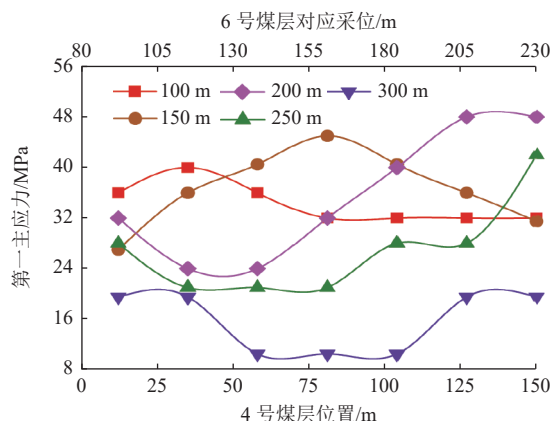


图12 被解放层第一主应力变化

Fig.12 The first principal stress of the liberated seam

### 4 被解放层安全开采可行性评价

为研究6号煤层开采卸压效果,在第3章解放层开采数值模型开挖的基础上,对被解放层进行模拟开

挖。分析 4 号煤层开采过程中的采场应力与位移变化规律, 评价其安全开采可行性。4 号煤层开挖总长度为 150 m, 布置在 6 号煤层上方中部位置, 分 6 个开挖步骤完成, 分别是 25、50、75、100、125、150 m。

#### 4.1 采场应力演化

对 4 号煤层开采过程中的采场第一主应力进行分析, 如图 13 所示。结果表明, 4 号煤层开采时切眼处和采场前方均有应力集中现象, 但均远小于解放层开采时相同位置处的应力值, 即被解放层开采范围处于卸压区域内。

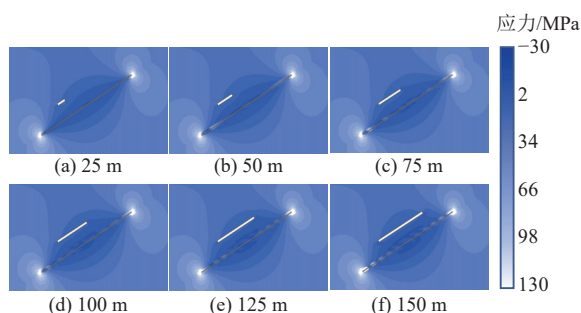


图 13 被解放层开采第一主应力云图

Fig.13 The first principal stress nephogram of the liberated seam

通过覆岩应力场, 计算采场板裂程度, 从而得出解放层开采发生强矿压动力灾害的可能性, 采场板裂准则(Spalling Criterion) 计算公式<sup>[41-42]</sup> 如下:

$$f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$  为第一主应力;  $\sigma_3$  为第三主应力;  $\sigma_c$  为单轴抗压强度;  $f$  为板裂指数, 大于 0.4 意味着煤岩体内部开始发生破裂损伤, 大于 0.7 意味着具有强矿压动力灾害倾向<sup>[41-42]</sup>。

图 14 为被解放层开采 Spalling Criterion 云图, 由图可知, 被解放层模拟开采 0 到 125 m 过程中, 下平巷处的  $f$  值要略大于周围岩层, 但是仍然比 0.7 要小, 说明解放层开采完成后采场卸压效果较好, 被解放层处于永久性卸压区内, 周围岩层发生强矿压动力灾害可

能性很小。被解放层开采完毕后(图 14f), 随着岩层与岩层之间相对运动趋于稳定,  $f$  在上平巷、下平巷的积聚效应消失, 被解放层上覆岩层的  $f$  值小于 0.5, 发生强矿压动力灾害的可能性较小。

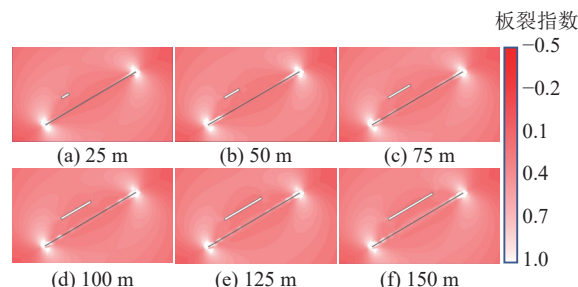


图 14 被解放层开采过程中覆岩板裂指数变化云图

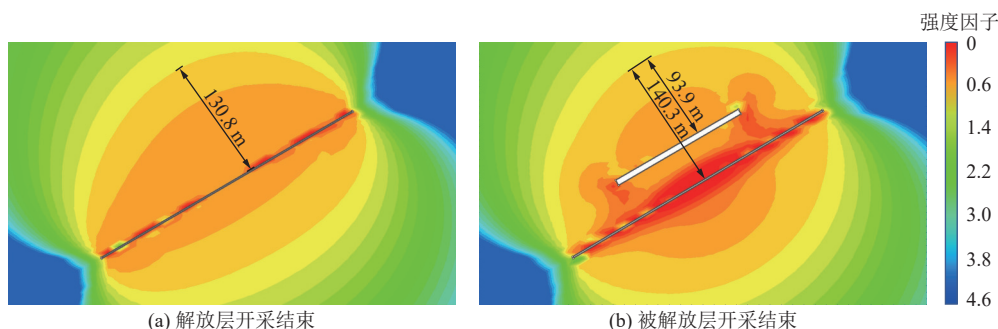
Fig.14 Nephogram of overburden rocks' spalling index during the mining of the liberated seam

#### 4.2 扰动范围

被解放层的开采, 会在解放层开采的基础上造成覆岩的“二次扰动”, 其范围可以在一定程度反映解放层开采的卸压效果。即, 如果被解放层开采的“二次扰动”范围较解放层开采扰动没有较大变化, 则说明解放层开采卸压效果较为充分, 反之亦然。基于此, 本文引入强度因子(Strength Factor)对采场扰动范围进行分析。Strength Factor 是采场内各点岩层强度与扰动应力的比值。当 Strength Factor 大于 1 时, 说明岩层受扰程度较小; 当 Strength Factor 小于 1 时, 说明岩层受扰程度较大。

如图 15 所示, 通过 Strength Factor 云图可以看出, 解放层开采结束后, 距解放层法向 130.8 m(被解放层法向 90.8 m) 范围内的岩层, Strength Factor 值小于 1, 受扰动程度较大; 被解放层开采结束后, 受扰动影响较大的岩层距解放层法向 140.3 m(被解放层法向 93.9 m)。被解放层开采对上覆岩层影响范围较解放层开采仅增加了约 9.5 m。

结合上述得出的解放层与被解放层开采扰动岩层范围, 选取分析上覆距解放层法向 150 m 处岩层的位



(a) 解放层开采结束

(b) 被解放层开采结束

图 15 采场 Strength Factor 云图

Fig.15 The strength factor nephogram of the stope

移变化。如图 16 所示,被解放层开采过程中,上覆距解放层 150 m 处岩层的最大沉降量仅仅不到 0.6 m。由此可见,被解放层开采过程中的“二次扰动”范围和扰动程度均不显著,解放层开采卸压充分。

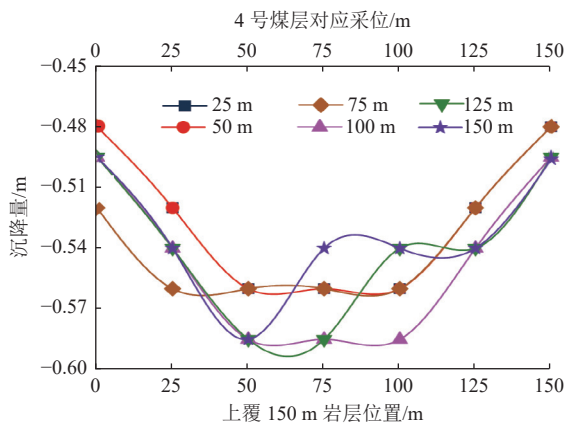


图 16 被解放层开采过程中上覆岩层位移

Fig.16 The displacement of the overburden strata during the mining of the liberated seam

### 4.3 采场破坏形态

覆岩破坏形态反映了采场应力的重新分布,可用于解放层开采卸压机理解释与卸压效果评价。为分析采场覆岩破坏形态,引入了 Angelier 应力比指标<sup>[43-44]</sup>如下式:

$$\phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2)$$

式中:  $\phi$  为应力比指标;  $\sigma_2$  为第二主应力。

Angelier 应力比介于 0~1, 可用于描述主应力值分布的对称性。对于任何给定的平面, 该指标控制剪应力方向, 可用于判定岩层破断的失效模式。

如图 17 所示, 解放层开采结束后, 其两端的永久性卸压保护区发生的是剪切破坏(X), 中间顶板压实区域发生的是拉压破坏(I)。被解放层开采的前 50 m, 只受解放层卸压区域影响, 周围岩层发生剪切破坏; 随着被解放层持续推进, 在 50~125 m 进入解放层触矸压实区域, 周围岩层开始出现拉压破坏; 在开采接近结束时,

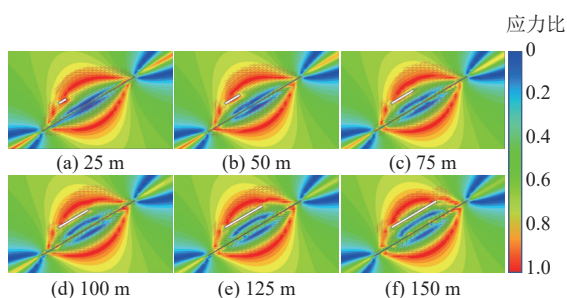


图 17 被解放层开采过程中覆岩 Angelier 应力比云图

Fig.17 The Angelier stress ratio nephograms of the overburden rocks during the mining of the liberated seam

被解放层受到右端解放层卸压区域影响, 又出现了新的剪切破坏。这一结果与本文第 2、第 3 章得出的解放层开采卸压机理及采场应力分布情况一致, 更为重要的是, 被解放的开采始终处于解放层开采扰动造成的破坏区域内, 这也意味着被解放层的开采, 始终处于解放层开采的卸压范围内, 再次验证了解放层开采卸压效果良好, 被解放层开采具有较高可行性。

## 5 结论

a. 厘清了千米深井解放层开采卸压机理。随解放层开采, 岩层裂隙与离层从低位岩层向高位岩层发育, 上覆岩层垮落后形成漏斗状、非对称的多固支梁状结构; 解放层开采结束后, 左右两端形成裂隙带未完全闭合的类悬臂梁结构, 该结构对被解放层起永久性卸压保护。

b. 揭示了被解放层内的应力场演化特征。根据解放层开采顶板应力变化特征, 将解放层顶板划分为 2 个区域, 即“永久性卸压保护区”和“采空触矸压实区”, 通过应力场分析, 可以推断, 被解放层内应力受上述 2 个区域的叠加影响。

c. 评价了被解放层开采的可行性。解放层开采后, 除工作面两端, 其他区域上覆岩层卸压充分; 被解放层开采过程中, 无发生强矿压灾害倾向, 上覆岩层受扰动范围较解放层开采结束几乎无变化; 由覆岩破坏形态可知, 被解放层开采过程中始终处于解放层卸压范围内。

d. 根据实际工程, 讨论了千米深井解放层开采的卸压机理、效果及卸压分区等, 评价了被解放层开采的可行性。考虑大规模采场, 分析多工作面采动下矿压显现规律, 确定多工作面协同开采方案, 是接续研究重点, 可为强矿压防控和煤炭资源高效回收提供科技支撑。

## 参考文献(References)

- [1] 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): 3301-3314.  
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): 3301-3314.
- [2] 崔峰, 张廷辉, 来兴平, 等. 冲击地压矿井不同采动强度下的开采扰动特征及其产能[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3781-3793.  
CUI Feng, ZHANG Tinghui, LAI Xingping, et al. Mining disturbance characteristics and productivity of rock burst mines under different mining intensities[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3781-3793.
- [3] 赵善坤, 齐庆新, 李云鹏, 等. 煤矿深部开采冲击地压应力控制技术理论与实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(Sup.2): 626-636.

- ZHAO Shankun, QI Qingxin, LI Yunpeng, et al. Theory and practice of rockburst stress control technology in deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Sup.2): 626–636.
- [4] CAI Wu, DOU Linming, SI Guangyao, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses[J]. Engineering, 2021, 7(5): 687–700.
- [5] KARACAN C Ö, RUIZ F A, COTÈ M, et al. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(2–3): 121–156.
- [6] LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu, et al. Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 192–200.
- [7] 刘少虹, 潘俊锋, 刘金亮, 等. 基于卸支耦合的冲击地压煤层卸压爆破参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 21–29.
- LIU Shaohong, PAN Junfeng, LIU Jinliang, et al. Optimization of blasting parameters for rock burst coal seam based on pressure release and support coupling[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 21–29.
- [8] 刘志刚, 曹安业, 井广成. 煤体卸压爆破参数正交试验优化设计研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 931–939.
- LIU Zhigang, CAO Anye, JING Guangcheng. Research on parameters optimization of stress relief blasting in coal roadway using orthogonal experiment[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5): 931–939.
- [9] 李兵, 杜伟乾, 李昱江, 等. 煤层注水软化工法及效果分析[J]. 煤炭科技, 2022, 43(1): 74–77.
- LI Bing, DU Weiqian, LI Yujang, et al. Coal seam water flooding softening method and effect analysis[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2022, 43(1): 74–77.
- [10] 王超. 煤层注水防治冲击地压效果分析及可注性鉴定研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(1): 92–95.
- WANG Chao. Effect analysis of rock burst prevention and study on infusibility judging for coal seam water infusion[J]. Coal Engineering, 2018, 50(1): 92–95.
- [11] 贾传洋, 蒋宇静, 张学朋, 等. 大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1115–1122.
- JIA Chuanyang, JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng, et al. Laboratory and numerical experiments on pressure relief mechanism of large-diameter boreholes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1115–1122.
- [12] 李小彦, 孙德全, 谢风华, 等. 大直径钻孔卸压对围岩强度与锚固力影响研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1): 79–84.
- LI Xiaoyan, SUN Dequan, XIE Fenghua, et al. Research on the influence of large diameter borehole pressure relief on surrounding rock strength and anchoring force[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(1): 79–84.
- [13] 杜涛涛, 窦林名, 蓝航. 定向水力致裂防冲原理数值模拟研究[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(4): 444–449.
- DU Taotao, DOU Linming, LAN Hang. Simulation on rockburst prevention by directional hydraulic fracture[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2012, 32(4): 444–449.
- [14] 黄炳香, 王友壮. 顶板钻孔割缝导向水压裂缝扩展的现场试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2002–2008.
- HUANG Bingxiang, WANG Youzhuang. Field investigation on crack propagation of directional hydraulic fracturing in hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2002–2008.
- [15] 卢义玉, 葛兆龙, 李晓红, 等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 55–58.
- LU Yiyu, GE Zhaolong, LI Xiaohong, et al. Investigation of a self-excited pulsed water jet for rock cross-cutting to uncover coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 55–58.
- [16] 林柏泉, 赵洋, 刘厅, 等. 水力割缝煤体多场耦合响应规律研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 662–667.
- LIN Baiquan, ZHAO Yang, LIU Ting, et al. Coupling response law of multi-field in coal seam after hydraulic slotting[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(5): 662–667.
- [17] 张宏伟, 朱峰, 李云鹏, 等. 液态CO<sub>2</sub>致裂技术在冲击地压防治中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 23–29.
- ZHANG Hongwei, ZHU Feng, LI Yunpeng, et al. Application of liquid CO<sub>2</sub> fracturing technique in rock burst control[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 23–29.
- [18] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态CO<sub>2</sub>相变定向射孔致裂增透技术及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1938–1950.
- ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO<sub>2</sub> phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1938–1950.
- [19] 吴学松, 买巧利, 于贵良. 特厚煤层上部远距离解放层开采卸压效果研究[J]. 煤炭科技, 2021, 42(4): 44–48.
- WU Xuesong, MAI Qiaoli, YU Guiliang. Research on the decompression effect of long-distance liberation seam mining in the upper part of extra thick coal[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2021, 42(4): 44–48.
- [20] 沈荣喜, 王恩元, 刘贞堂, 等. 近距离下保护层开采防冲机理及技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊1): 63–67.
- SHEN Rongxi, WANG Enyuan, LIU Zhentang, et al. Rockburst prevention mechanism and technique of close-distance lower protective seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Sup.1): 63–67.
- [21] 邵景忠. 区域性防治瓦斯突出措施: 解放层的分类、作用原理及应用[J]. 煤炭技术, 2008, 27(6): 91–92.
- SHAO Jingzhong. Measures of regional prevention and cure gas outburst: Classify function and application of releasing coal seam[J]. Coal Technology, 2008, 27(6): 91–92.
- [22] 易恩兵. 深井强冲击煤层解放层开采防治冲击地压研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(5): 126–128.
- YI Enbing. Research on mine rock burst from liberated seam mining with high burst tendency in deep mine[J]. Coal Technology, 2014, 33(5): 126–128.
- [23] 杨勇翔. 开采解放层防治冲击地压的初步探讨[J]. 煤矿安全, 1987(2): 25–30.
- YANG Yongxiang. Preliminary discussion on prevention and

- control of rock burst in mining liberated layer[J]. *Safety in Coal Mines*, 1987(2): 25–30.
- [24] 马大勋. 关于上保护层的实验研究与探讨[J]. *煤炭学报*, 1986(3): 1–9.  
MA Daxun. Experimental research and discussion on extraction of upper protective seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 1986(3): 1–9.
- [25] TU Qingyi, CHENG Yuanping. Stress evolution and coal seam deformation through the mining of a remote upper protective layer[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2019, 41(3): 338–348.
- [26] 王海锋. 采场下伏煤岩体卸压作用原理及在被保护层卸压瓦斯抽采中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.  
WANG Haifeng. Pressure relief functional principle of stope underlying coal-rock mass and application in gas extraction of protected coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [27] 王海锋, 程远平, 刘桂建, 等. 被保护层保护范围的扩界及连续开采技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(4): 595–599.  
WANG Haifeng, CHENG Yuanping, LIU Guijian, et al. Range extender of protection and continuous mining technology of protected seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(4): 595–599.
- [28] 李明好. 下保护层开采卸压范围及卸压程度的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2005.  
LI Minghao. Research on the range and degree of pressure relief during mining of the lower protective layer[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2005.
- [29] 王洛锋. 深部大倾角强冲击厚煤层开采解放层卸压效果研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2008.  
WANG Luofeng. Study on destressing effects after mining protective seams of the deep thick coal seam with large obliquity and high burst liability[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2008.
- [30] 王洛锋, 姜福兴, 于正兴. 深部强冲击厚煤层开采上、下解放层卸压效果相似模拟试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(3): 442–446.  
WANG Luofeng, JIANG Fuxing, YU Zhengxing. Similar material simulation experiment on destressing effects of the deep thick coal seam with high burst liability after mining upper and lower protective seams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(3): 442–446.
- [31] GAO Rui, YU Bin, XIA Hongchun, et al. Reduction of stress acting on a thick, deep coal seam by protective-seam mining[J]. *Energies*, 2017, 10(8): 1209.
- [32] WANG Zhongchang, BIAN Wenrui. Analysis of pressure relief effect on the protective layer of hard roof and extra-thickness coal seam mining[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(1): 163–172.
- [33] 吴向前, 窦林名, 吕长国, 等. 上解放层开采对下煤层卸压作用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(3): 28–31.  
WU Xiangqian, DOU Linming, LYU Changguo, et al. Study on upper liberated seam mining to pressure releasing function of low seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(3): 28–31.
- [34] CHENG Xiang, ZHAO Guangming, LI Yingming, et al. Mining-induced pressure-relief mechanism of coal-rock mass for different protective layer mining modes[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(7): 1–15.
- [35] 涂敏, 缪协兴, 黄乃斌. 远程下保护层开采被保护煤层变形规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2006, 23(3): 253–257.  
TU Min, MIAO Xiexing, HUANG Naibin. Deformation rule of protected coal seam exploited by using the long distance lower protective seam method[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(3): 253–257.
- [36] ZHANG Hongtu, WEN Zhihui, YAO Banghua, et al. Numerical simulation on stress evolution and deformation of overlying coal seam in lower protective layer mining[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(5): 3623–3633.
- [37] 马占国, 涂敏, 马继刚, 等. 远距离下保护层开采煤岩体变形特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2008, 25(3): 253–257.  
MA Zhanguo, TU Min, MA Jigang, et al. Rock mass deformation characteristics for coal mining at remote lower protective seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(3): 253–257.
- [38] CHANG Zhongbao, HUI Qingbo, LI Yutong, et al. Optimization of roadway layout and its effect analysis for lower protective seam in fully mechanized caving mining[M]. *Progress in Mine Safety Science and Engineering II*, 2014.
- [39] 张玉栋. 千米强矿压深井解放层开采卸压机理及效果分析研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
ZHANG Yudong. Study on pressure relief mechanism and effect analysis of liberation seam mining with coal mine of strong ground pressure under the depth of 1000m[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [40] 刘金海, 姜福兴, 张宗文, 等. 超前离层诱发矿震的机理及其微震特征[J]. *湖南科技大学学报 (自然科学版)*, 2011, 26(1): 28–32.  
LIU Jinhai, JIANG Fuxing, ZHANG Zongwen, et al. Mechanism of mine earthquake induced by lead separation and its microseismic characteristics[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 26(1): 28–32.
- [41] CASTRO L A M, GRABINSKY M W, MCCREATH D R. Damage initiation through extension fracturing in a moderately jointed brittle rock mass[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 110.
- [42] CASTRO L A M, MCCREATH D R, KAISER P. Rockmass strength determination from breakouts in tunnels and boreholes[J]. *International Society for Rock Mechanics*, 1995.
- [43] ANGELIER J. Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites faillés: l'utilité d'une confrontation entre les méthodes dynamiques et cinématiques: Erratum[J]. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, 1976, 283: 466.
- [44] ORIFE T, LISLE R J. Numerical processing of palaeostress results[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(6): 949–957.

(责任编辑 郭东琼)