

王 磊,谢广祥,王金安. 采场围岩应力壳对破坏场的影响规律及应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2009–2014. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0534

Wang Lei, Xie Guangxiang, Wang Jin'an. Numerical investigation on the influence of surrounding rock stress shell on fractured field[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2009–2014. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0534

## 采场围岩应力壳对破坏场的影响规律及应用

王 磊<sup>1,2</sup>, 谢广祥<sup>1</sup>, 王金安<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控安徽省重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为获得高瓦斯工作面采动应力场对煤岩破坏导致渗透性变化的影响规律, 进而指导瓦斯抽采的工程应用, 采用计算机数值模拟对长壁工作面围岩应力壳分布及对破坏场的影响进行了研究和分析, 获得了采场围岩应力壳对破坏场的影响规律。研究表明: 长壁工作面围岩应力壳是煤层和围岩的破坏和裂隙发育的主控因素, 破坏和裂隙一般发育在应力壳高应力集中带下方的卸压区内, 在应力壳高应力集中带及其上方岩层破坏和裂隙并不发育; 受应力壳壳基的影响, 工作面煤壁前方、回风巷下帮及运输巷上帮煤体的破坏发育区域均分布在壳基内侧的低应力区内; 高瓦斯低透气性煤层距工作面煤壁 15 m 内破坏和裂隙发育, 此区域渗透性强, 应加强煤层顺层钻孔的抽采力度。高抽巷、地面钻井及穿层钻孔的布置均应考虑应力壳的形态和破坏场的发育, 钻孔抽采位置宜选择在应力壳下低应力区内。

**关键词:** 应力壳; 破坏场; 数值模拟; 瓦斯抽采

**中图分类号:** TD323

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-9993(2015)09-2009-06

## Numerical investigation on the influence of surrounding rock stress shell on fractured field

WANG Lei<sup>1,2</sup>, XIE Guang-xiang<sup>1</sup>, WANG Jin-an<sup>2</sup>

(1. Anhui Province Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To investigate the influence of mining-induced stress on the breakage of coal and the change of permeability in high gas coal working face, a numerical simulation was conducted to deeply examine the relationship of stress shell distribution with failure field. The results indicate that the stress shell in long wall mining working face is the main cause for inducing the failure of coal and rock. Rock failure and newly-born fissures mostly occur in the stress releasing zone under the high stress concentrated area, while little evidence of new fissures development is shown in the places above the stress shell concentration zone. In addition, the coal failure areas, which are in front of coal wall at working face, in the down side call wall of return roadway and in the upside coal wall of haulage roadway, are distributed in low stress area inside the shell base. Failure and fissures mostly develop within 15 m from the coal wall of high gas and low permeability coal seam. Permeability is strong in this area, and the extraction of drill holes along coal seam should be strengthened in this area. The spatial distributional configuration and development of stress shell should be fully considered when surface drainage holes, gas drainage road and drainage holes along seam are laid out. The effect of gas drainage is the best when holes are drilled in low stress area where failure and cracks are well developed.

收稿日期: 2015-04-15 责任编辑: 常 琛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)前期研究专项资助项目(2014CB260403); 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-12-0599); 国家自然科学基金资助项目(U1361208)

作者简介: 王 磊(1980—), 男, 山东济宁人, 副教授。Tel: 0554-6631588, E-mail: leiwang723@126.com

**Key words:** stress shell; fractured field; numerical simulation; gas extraction

研究表明长壁工作面围岩存在由高应力束组成的应力壳(并非某一客观实体),应力壳的壳体位于上覆岩层弯曲带和采场周围未采煤岩体内,壳基作用在工作面前后方和侧翼未采煤层边缘,壳基的应力即形成采场周围的支承压力<sup>[1-2]</sup>。采场围岩最主要力学场特征是位于上覆围岩应力壳保护下的低应力区内,应力壳中的主应力大于壳体内外岩体的应力,上覆岩体的荷载和压力通过应力壳传递到采场周边,应力壳是采场围岩的最主要承载力系,大部分采场前方、后方、周边和邻近巷道的矿压显现受控于应力壳的存在和由其变化带来的影响,应力壳是控制采场三维宏观矿压分布和显现的主体。应力壳的形成机制和演化形态随工作面一次开采厚度、开采速度、工作面长度和工作面围岩性质的改变而相应发生变化<sup>[3-6]</sup>。应力壳的存在及其力学特征合理揭示了综放采场矿压趋于缓和的力学本质,并为临近工作面巷道围岩的载荷控制向变形控制转变的支护理念提供了理论依据;基于应力壳壳基造成的高应力集中,阐释了采场支承压力的展布规律,并为高瓦斯工作面综放开采缓解动力灾害现场实践进行了科学解释<sup>[7-11]</sup>。而进入深部开采,煤层瓦斯含量与压力增加,采动应力场的分布势必影响覆岩的运动与破坏场的演化发展,进而诱发顶板及瓦斯灾害等若干事故的发生<sup>[12-14]</sup>。本文在应力壳研究的基础上,旨在揭示高瓦斯工作面围岩应力壳对煤岩拉剪复合破坏场的影响规律,探索煤岩破坏场与采动应力演化的相关性,进而优化高瓦斯工作面瓦斯抽采的工艺参数。

## 1 工程地质条件及计算模型的建立

煤岩的拉剪复合破坏可造成煤岩裂隙充分发育,透气性大大增强,有利于高瓦斯工作面瓦斯抽采<sup>[15-16]</sup>。为获得高瓦斯长壁工作面围岩应力壳对破坏场的影响,以淮北矿业集团祁南矿 714 工作面工程地质条件及开采技术条件为背景,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件开展了应力场特征及对破坏场影响的研究(图 1)。

714 工作面位于 8<sub>1</sub> 采区右翼第二区段,其左侧与 713 工作面相邻,上部与 712 工作面采空区相邻,下部与 716 工作面相邻,右侧以 BF19 断层保护煤柱为边界。地面标高 +22 m,工作面标高 -445.8 ~ -516.9 m,走向长度 865 m,倾斜长度 150 m。工作面联合回采 7<sub>1</sub>、7<sub>2</sub> 两层煤。煤层总厚(含 7<sub>2</sub>、7<sub>1</sub> 及夹矸) 0.3 ~ 6.0 m,一般为 3.5 ~ 5.0 m,平均 4.8 m,夹

矸厚度 0 ~ 2.0 m,一般为 0.5 ~ 0.9 m,平均厚 0.8 m,夹矸岩性为碎块状泥岩,结构松散。7<sub>1</sub> 煤层局部沉积缺失,可采范围内煤层厚 0.6 ~ 2.0 m,一般 1.2 ~ 1.8 m,平均 1.5 m,7<sub>2</sub> 煤厚 0.3 ~ 3.5 m,一般 2.2 ~ 2.8 m,平均 2.5 m。714 工作面三维计算模型走向长 1 000 m,倾斜宽 480 m,模型高度为 260 m。模型中包括 7<sub>1</sub>、7<sub>2</sub> 煤层与顶底板岩层,取平均煤层倾角 10°。煤层厚度 5.2 m,工作面倾斜长度 150 m。三维模型共划分有 182 950 个三维单元,共 195 576 个结点,图 2 是由计算机生成的三维计算模型网格图。模型侧面限制水平移动,模型底面限制垂直移动,模型上部施加垂直载荷模拟上覆岩层的自重。除采用运动方程求解静力问题外,还采取机械衰减方法来获得非惯性静态或准静态解,采用显式算法来获得模型全部运动方程(包括内变量)的时间步长解,进而追踪材料的渐进破坏和垮落,采空区垮落矸石用体积硬化模型进行描述。

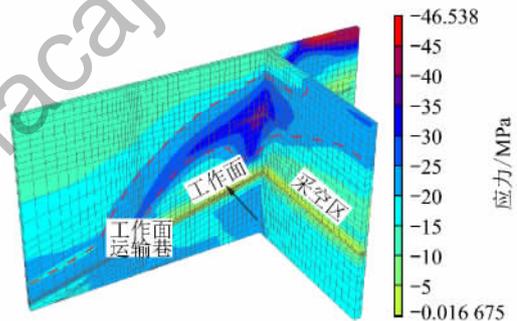


图 1 采场围岩三维应力分布

Fig. 1 Three-dimensional stress distribution

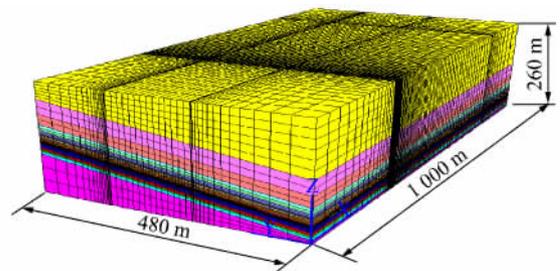


图 2 三维模型网格

Fig. 2 Grid of three-dimensional model

## 2 应力壳对工作面煤层破坏场的影响

图 3 给出 714 工作面周围煤层内的应力和破坏区分布。受应力壳壳基高应力集中作用的影响,工作面煤体边缘出现破坏。在 712 工作面采空区与 714 工作面之间留设的 5 m 宽煤柱全部进入破坏状态。沿倾斜工作面前方煤体的拉剪复合破坏区宽度略有

不同。工作面中上部工作面前方煤体边缘的拉剪复合破坏区宽度为 12.5 m,工作面中部工作面前方煤体边缘拉剪复合破坏区宽度 10 m,工作面下部工作面前方煤体边缘拉剪复合破坏区宽度 5 m。在 714 工作面回风巷下帮煤体中出现 9.3 m 宽的破坏区域,在工作面运输巷上帮煤层边缘,出现 5 m 宽的破坏区域。工作面煤层的破坏区分布和应力分布趋势相同,都是由靠近回风巷一侧向靠近运输巷一侧逐渐减小,煤层破坏区分布受应力分布的影响。煤层破坏区一般分布在应力卸压区内,且破坏程度也比较剧烈,见表 1。

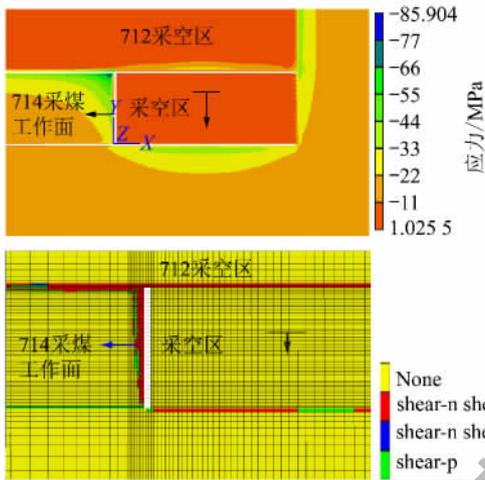


图 3 工作面煤层应力场和破坏场分布对比

Fig. 3 Comparison of the maximum principal stress distribution and fractured field distribution of coal seam

表 1 工作面应力分布与破坏分布区域特征对比分析  
Table 1 Character comparison of stress distribution and fractured field distribution m

位置	工作面推进方向			平行工作面方向	
	回风巷侧	工作面中部	运输巷侧	距回风巷下帮距离	距运输巷上帮距离
应力峰值距煤壁距离	12	9.4	6.3	10.1	5.5
煤层破坏区宽度	12.5	10	5	9.3	5

### 3 应力壳对采场围岩破坏场的影响

#### 3.1 走向方向应力场对围岩破坏场的影响规律

图 4 显示,工作面围岩不同走向剖面应力场及破坏场的分布特征。在工作面走向上工作面直接顶和煤壁前方一定范围内处于低应力状态,顶板岩层中的最大主应力作用在工作面前方,且作用位置超前于煤层内最大主应力作用的位置。在工作面上部直接顶和煤壁前方 10 m 左右的范围处于低应力区,采空区上方存在有高应力束组成的应力壳,壳基峰值应力位

于工作面前方 15 m 以远的煤层中。工作面周围煤岩几乎全部进入屈服和破坏。工作面上部围岩破坏高度约为 22 m,工作面煤壁前方 10~12.5 m 范围内围岩也进入破坏状态,工作面一定范围内顶底板破坏均较严重。工作面中部围岩破坏程度略小于上部,煤壁前方约 7.5 m 的煤层处于破坏状态。工作面下部围岩破坏程度最小,前方煤壁破坏区宽度约 5 m,工作面上方围岩破坏区也相应较小,破坏高度约 13 m。

围岩破坏场的变化发展与应力分布的变化表现出以下的特点:工作面围岩的破坏区基本分布在应力壳下内的卸压区内(表 2),工作面靠近回风巷一侧围岩的破坏程度明显大于工作面中部和下部。工作面中部破坏区向未开采煤体延伸较深,破坏程度也比靠近运输巷一侧剧烈。

表 2 围岩应力分布与破坏分布区域特征对比分析

Table 2 Character comparison of stress distribution and fractured field distribution m

位置	倾向		走向	
	工回风巷侧	工作面中部	工运输巷侧	回风巷侧距工作面距离 / 运输巷侧距工作面距离
应力壳高度	28	36.5	22	10 / 4.5
覆岩破坏高度	22	18	13	7.5 / 5

#### 3.2 倾斜方向应力场对围岩破坏场的影响规律

图 5 分别给出工作面前方 150, 15 和 5 m 处沿煤层倾斜剖面上工作面围岩的最大主应力及破坏场分布。距工作面 150 m 处受上区段煤层开采后压力重新分布的影响,在未进入本工作面支承压力超前影响范围时,倾斜剖面岩体中的最大主应力发生在本工作面上端煤层中,应力峰值距回风巷下帮煤体边缘 2.5 m,而回风巷则位于沿倾斜煤体边缘卸压区内。在距工作面前方 15 m 处,倾斜剖面上岩体的应力集中峰值和应力集中区的分布范围明显增大,最大应力峰值仍在工作面上部煤层边缘。在同一位置剖面上,煤层内的应力普遍高于顶底板岩层。工作面煤层上方覆岩应力集中形成应力壳,高度约为 13 m。而在距工作面前方 5 m 处,应力壳形态更加明显,高度约为 19 m 左右。

随着接近工作面,倾斜剖面上岩体的破坏区是沿倾斜由上至下逐步扩展,到工作面附近煤层顶底板及围岩出现大范围的破坏,距工作面前方 150 m 处,未进入本工作面超前支承压力影响范围内时,倾斜剖面的岩体破坏区主要集中在上阶段 712 工作面采空区下侧煤层边缘,5 m 宽的阶段煤柱全部进入破坏状态,在回风巷的顶底岩层和上下帮的煤层中出现拉剪

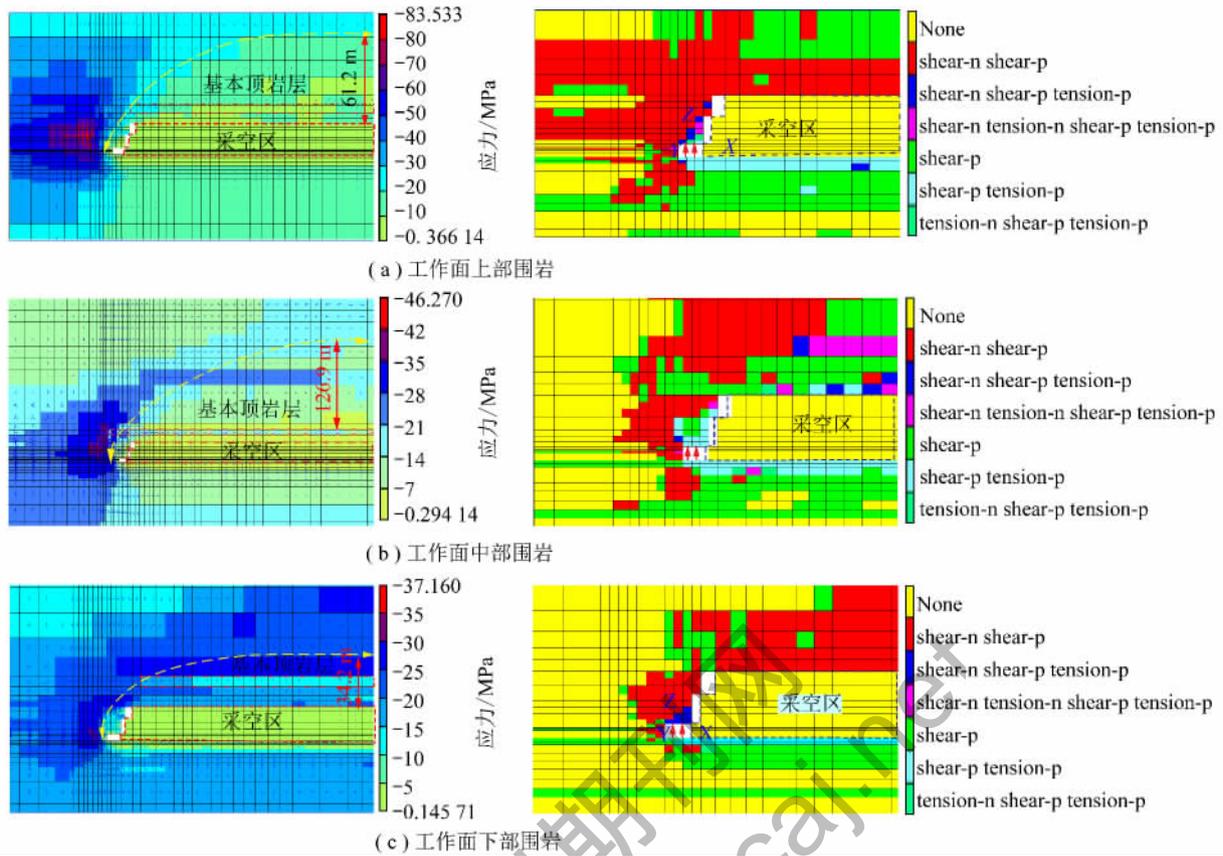


图 4 沿煤层走向工作面上部、中部和下部围岩最大主应力分布与破坏场对比

Fig. 4 Comparison of the maximum principal stress distribution and fractured field distribution of surrounding rock on the top , in the center and under of face on the strike

复合破坏状态,工作面中部和运输巷,围岩稳定性良好;在距工作面煤壁 15 m 处,围岩出现局部破坏,但破坏发育程度不剧烈;距工作面 5 m 处,工作面煤层和围岩破坏进一步加剧。应力壳与破坏场分布范围见表 3。

表 3 围岩应力分布与破坏分布区域特征对比分析

Table 3 Character comparison of stress distribution and fractured field distribution

位置		工作面回风巷侧	工作面中部	工作面运输巷侧
150	应力壳高度	0	0	0
	上覆岩层破坏区高度	0	0	0
15	应力壳高度	15	10	0
	上覆岩层破坏区高度	12	9	0
5	应力壳高度	19	17	11
	上覆岩层破坏区高度	17	15	9

综合应力分布与破坏场分布分析,煤层和围岩的破坏场受应力场分布影响,破坏和裂隙一般发育在应力壳下的卸压区内。在应力壳的高应力集中带及其外部的岩层破坏和裂隙并不发育。因此煤层的透气

性和应力分布具有相关性,应力越大越集中,煤层和围岩的透气性越差,相反,在高应力作用下的卸压区内,煤层和围岩的透气性增强,利于瓦斯流动,瓦斯抽采效果最佳。

#### 4 714 工作面煤层瓦斯抽采工艺优化

由于工作面煤层透气性较大的破坏区均发育在围岩应力壳壳体内的低应力区内,而在壳基和壳体外部发育较弱。因此,高瓦斯低透气性煤层的瓦斯抽采要充分考虑到应力壳的影响和破坏场的分布规律。数值模拟研究发现 714 工作面煤层距工作面煤壁 15 m 内破坏和裂隙发育,此区域渗透性强,但实践中由于临近工作面巷道变形较大,转载机、胶带机等设备较多,为便于作业煤层顺层抽采管路距工作面 20 m 以远基本拆除(图 6(a)),但在回采过程中发现瓦斯涌出量仍较大。为此,在 714 工作面进行了顺层钻孔抽采参数优化,加强工作面前方 20 m 范围内抽排管路的维护,确保此区域内的充分抽采(图 6(b)),并对优化抽排参数前后的工作面瓦斯涌出情况进行了对比分析(图 7)。

图 7 中 0 ~ 10 d 和 11 ~ 20 d 分别为抽采参数优

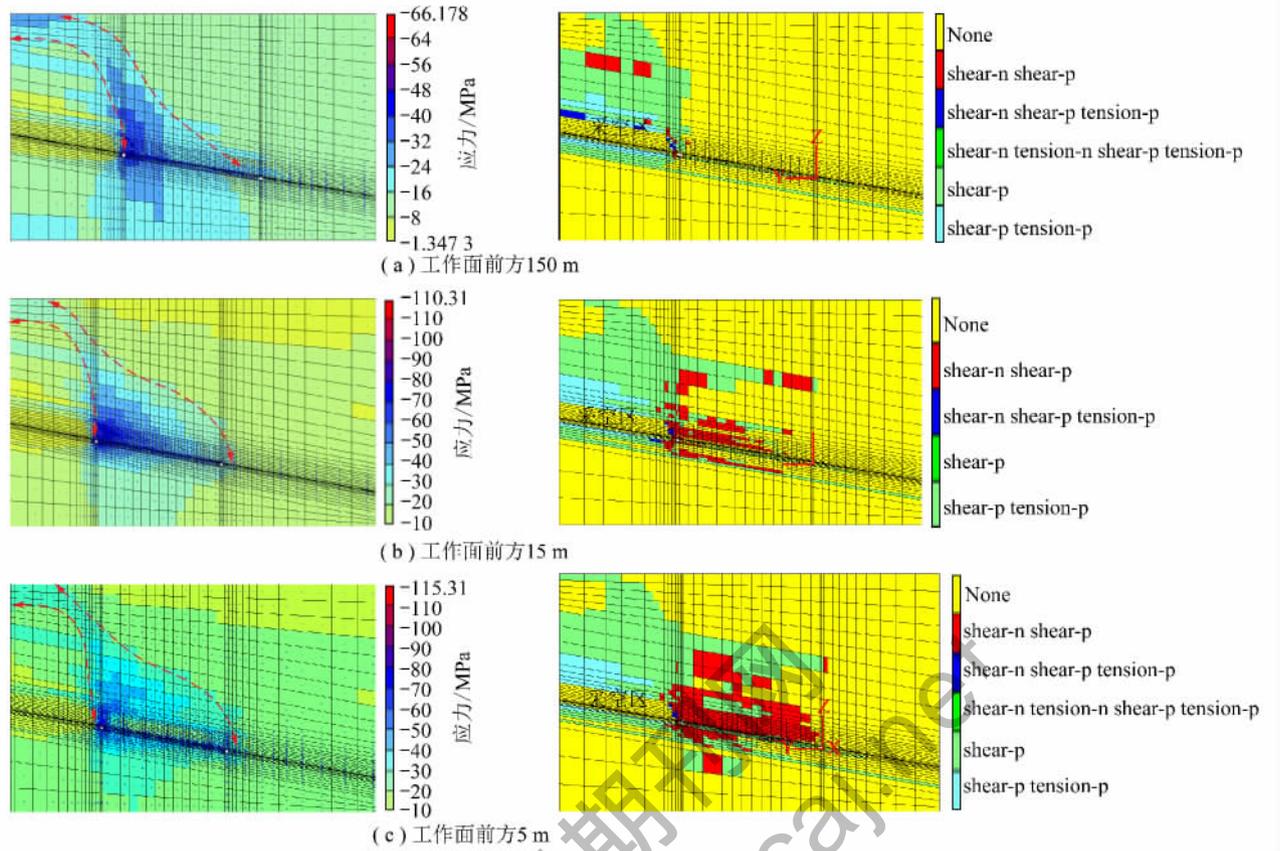


图5 沿煤层倾斜剖面工作面前方 150 ,15 5 m 围岩主应力分布与破坏场对比

Fig. 5 Comparison of the principal stress distribution of surrounding rock at 150 ,15 5 meters distance ahead of face to the dip

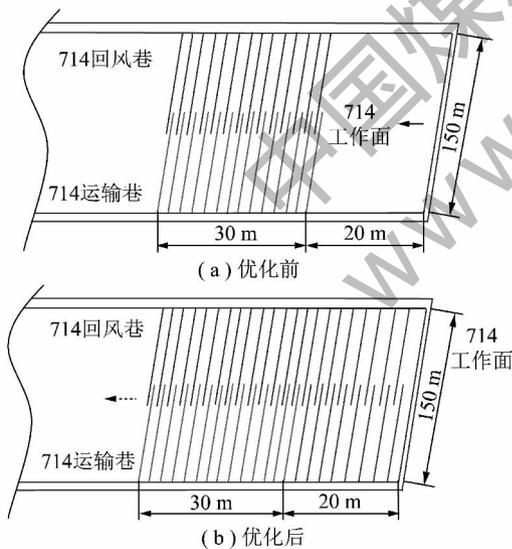


图6 祁南矿 714 工作面优化前后钻孔参数示意

Fig. 6 Schematic diagram of drilling parameter before and after the optimization of 714 working face

优化前和优化后工作面瓦斯绝对涌出量情况,可以看出,优化抽采参数后,工作面瓦斯涌出明显降低,说明加大工作面煤层位于应力壳下低应力破坏发育区域的抽采力度可以有效降低煤层内残余瓦斯含量,明显减少工作面瓦斯涌出,为工作面瓦斯有效治理奠定了基础。与顺层孔抽采类似,高抽巷、地面钻井及穿层

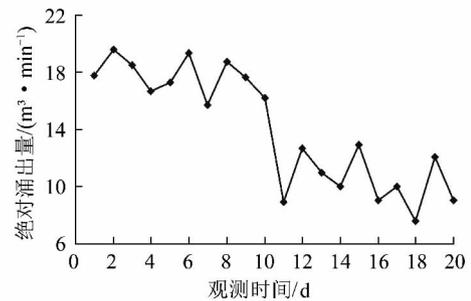


图7 抽排参数优化前后工作面瓦斯涌出量

Fig. 7 Working face absolute gas emission rate before and after the parametric optimization of gas drainage

钻孔的布置均应考虑应力壳的形态和破坏场的发育,钻孔抽采位置宜选择在应力壳下低应力区内。

### 5 结 论

(1) 长壁工作面围岩应力壳是煤层和围岩的破坏和裂隙发育的主控因素,破坏和裂隙一般发育在应力壳高应力集中带下方的卸压区内,在应力壳高应力集中带及其上方岩层破坏和裂隙并不发育。

(2) 应力壳壳基作用在采场前方、后方和周边的煤层上形成应力集中的支承压力,受其影响,工作面煤壁前方、回风巷下帮及运输巷上帮煤体的破坏发育

区域均分布在壳基内侧的低应力区内。

(3) 高瓦斯低透气性煤层距工作面煤壁 15 m 内破坏和裂隙发育,此区域渗透性强,应加强煤层顺层钻孔的抽采力度。高抽巷、地面钻井及穿层钻孔的布置均应考虑应力壳的形态和破坏场的发育,钻孔抽采位置宜选择在应力壳下低应力区内。

#### 参考文献:

- [1] 谢广祥. 综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征[J]. 煤炭学报 2005 30(3): 309-313.  
Xie Guangxiang. Mechanical characteristics of fully mechanized top-coal caving face and surrounding rock stress shell [J]. Journal of China Coal Society 2005 30(3): 309-313.
- [2] Xie Guangxiang, Chang Jucui, Yang Ke. Investigation on displacement field characteristics of tunnel's surrounding rock and coal seam at FMTCC face [J]. Journal of Coal Science & Engineering(China) 2006 12(2): 1-5.
- [3] 谢广祥. 采高对工作面及围岩应力壳的力学特征影响[J]. 煤炭学报 2006 31(1): 6-10.  
Xie Guangxiang. Influence of mining thickness on mechanical characteristics of working face and surrounding rock stress shell [J]. Journal of China Coal Society 2006 31(1): 6-10.
- [4] 谢广祥, 王磊. 采场围岩应力壳力学特征的工作面长度效应[J]. 煤炭学报 2008 33(12): 1336-1340.  
Xie Guangxiang, Wang Lei. Effect of longwall length on mechanical characteristics of surrounding rock stress shell in mining face [J]. Journal of China Coal Society 2008 33(12): 1336-1340.
- [5] 谢广祥, 王磊. 采场围岩应力壳力学特征的岩性效应[J]. 煤炭学报 2013 38(1): 44-49.  
Xie Guangxiang, Wang Lei. Lithologic effect on the mechanical characteristics of mining-induced stress shell [J]. Journal of China Coal Society 2013 38(1): 44-49.
- [6] 谢广祥, 常聚才, 华心祝. 开采速度对综放面围岩力学特征影响研究[J]. 岩土工程学报 2007 29(7): 963-967.  
Xie Guangxiang, Chang Jucui, Hua Xinzhu. Influence of mining velocity on mechanical characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2007 29(7): 963-967.
- [7] 陆明心, 郝海金, 吴健. 综放开采上位岩层的平衡结构及其对采场矿压显现的影响[J]. 煤炭学报 2002 27(6): 591-595.  
Lu Mingxin, Hao Haijin, Wu Jian. The balance structure of main roof and its action to top coal in longwall top coal caving working face [J]. Journal of China Coal Society 2002 27(6): 591-595.
- [8] 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 2003: 274-278.
- [9] 谢广祥. 综放采场围岩三维力学特征[M]. 北京: 煤炭工业出版社 2007: 25-36.
- [10] 谢广祥, 王磊. 工作面支承压力采厚效应解析[J]. 煤炭学报 2008 33(4): 361-363.  
Xie Guangxiang, Wang Lei. Effect of mining thickness on abutment pressure of working face [J]. Journal of China Coal Society 2008 33(4): 361-363.
- [11] 谢广祥, 杨科, 常聚才, 等. 综放采场围岩支承压力分布及动力灾害的层厚效应[J]. 煤炭学报 2006 31(6): 731-735.  
Xie Guangxiang, Yang Ke, Chang Jucui, et al. Surrounding rock abutment pressure distribution and thickness effect of dynamic catastrophic in fully mechanized sublevel mining stope [J]. Journal of China Coal Society 2006 31(6): 731-735.
- [12] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报 2005 24(16): 2803-2813.  
He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005 24(16): 2803-2813.
- [13] 王振, 胡千庭, 文光才, 等. 采动应力场分布特征及其对煤矿瓦斯动力灾害的控制作用分析[J]. 煤炭学报 2011 36(4): 623-627.  
Wang Zhen, Hu Qianting, Wen Guangcai, et al. Study on the distribution laws of mining pressure field and its control action on dynamic disasters in coal mines [J]. Journal of China Coal Society 2011 36(4): 623-627.
- [14] 翁明月, 徐金海, 李冲. 综放工作面煤岩破坏及矿压显现与瓦斯涌出关系的实测研究[J]. 煤炭学报 2011 36(10): 1709-1714.  
Weng Mingyue, Xu Jinhai, Li Chong. Relationship of coal and rock damage underground behavior and methane gushing in fully-mechanized caving mining face [J]. Journal of China Coal Society 2011 36(10): 1709-1714.
- [15] 张拥军, 于广明, 路世豹, 等. 近距离上保护层开采瓦斯运移规律数值分析[J]. 岩土力学 2010 31(S1): 399-404.  
Zhang Yongjun, Yu Guangming, Lu Shibao, et al. Numerical analysis of gas flow law with short distance upper protective layer gas extraction [J]. Rock and Soil Mechanics 2010 31(S1): 399-404.
- [16] 石必明, 俞启香, 周世宁. 保护层开采远距离煤岩破裂变形数值模拟[J]. 中国矿业大学学报 2004 33(3): 259-263.  
Shi Biming, Yu Qixiang, Zhou Shining. Numerical simulation of far-distance rock strata failure and deformation caused by mining protecting stratum [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2004 33(3): 259-263.