

文章编号:0253-9993(2011)12-1968-06

# 基于千米钻机的“三软”煤层瓦斯治理技术及应用

林柏泉<sup>1,2,3,4</sup>,李庆钊<sup>1,2,3,4</sup>,杨 威<sup>1,2,3,4</sup>,吴海进<sup>1,2,3,4</sup>,郝志勇<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116;3. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;4. 中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程中心,江苏 徐州 221116)

**摘 要:**在系统分析了三软煤层综放开采工作面超前支撑应力及采空区垂直区带划分的基础上,结合煤矿地质特点,提出了基于千米长钻孔技术的“三位立体”瓦斯综合治理技术措施,并进行了现场实际应用。研究结果显示:实施该技术措施后,51109 工作面煤层瓦斯抽采率显著提高,达 67.3%,风排瓦斯浓度降至 0.3%,工作面瓦斯涌出不均匀系数由 2.5 降至 1.6,瓦斯频繁超限的难题得到有效的解决,表明“三位立体”瓦斯综合抽采技术措施是一种适合该类地质条件的煤矿瓦斯综合治理技术方案。

**关键词:**瓦斯治理;VLD-1000 型千米钻机;三软煤层;瓦斯抽采

**中图分类号:**TD713.3 **文献标志码:**A

## Gas control technology and applications for the three-soft coal seam based on VLD-1000 drilling systems

LIN Bai-quan<sup>1,2,3,4</sup>, LI Qing-zhao<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Wei<sup>1,2,3,4</sup>, WU Hai-jin<sup>1,2,3,4</sup>, HAO Zhi-yong<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, Xuzhou 221116, China; 4. National Engineering Research Center for Coal Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Abutment pressure distributions of overlying coal seam and horizontal zone partitions of gob area were analyzed systematically. Based on the coal mine geological characteristics, “three dimensional” gas comprehensive drainage technique was proposed and applied in the No. 51109 working face of Jiaojiazhai Coal Mine, China. The results show that after the gas control technique implemented, the gas drainage ratio of No. 51109 coal seam significantly increases to 67.3%, the gas concentration of ventilation air methane (VAM) decreases to 0.3%, and the imbalance factor of gas emission correspondingly decreases from 2.5 to 1.6. The difficult problems of gas over emitted are effectively solved in this coal mine. This shows that the “three dimensional” gas comprehensive drainage technique is a suitable and effective measure for the gas emission control in this coal mine or the similar coal geological areas.

**Key words:** gas control; VLD-1000 drilling system; three-soft coal seam; gas drainage

煤与瓦斯共采是指煤炭开采与瓦斯抽采利用综合一体化的开发模式,是采煤与采气两个系统的有机结合。因此,如何有效地实现煤与瓦斯的共同开采,不仅是煤炭行业发展的必然途径,同时在保持我国经济持续发展对能源的需求以及进一步提升我国煤矿安全高效洁净生产水平等方面具有极其重要的意

义<sup>[1-3]</sup>。

煤层的采动将引起煤岩体的大范围移动、破坏及应力的重新分布,应力的释放与裂隙的发育为煤层的解析、流动及富集创造了条件,为瓦斯的高效抽采奠定了基础<sup>[4-6]</sup>。

然而,对于目前的普通钻孔钻进系统,由于钻机

没有导向控制装置,使得瓦斯抽采钻孔无法随着煤层地质的实际变化情况作出相应的调整,同时在实际钻进过程中由于地质条件的复杂性使得大多数钻孔的有效深度不能完全满足瓦斯抽采的实际要求<sup>[7]</sup>。深孔定向钻进有效克服了上述缺点,然而目前由于煤田地质的复杂性,使得将深孔定向钻进广泛应用于煤矿瓦斯的有效抽采等领域,尚存在诸多问题亟待解决<sup>[8-10]</sup>。本文结合煤矿实际特点,深入分析了煤层采动所造成的应力场及裂隙场的演化规律,提出了基于“千米长钻孔”技术的“三软煤层”瓦斯综合治理的“三位立体瓦斯综合治理技术方案”。

## 1 轩岗焦家寨煤矿 51109 工作面的开采条件

大同煤矿集团轩岗煤电责任有限公司焦家寨煤矿属于宁武煤田,当前所采 51109 工作面位于焦家寨矿综采下山西翼,上界为 51107 采空区,下界为实体煤层,上覆 2 号煤层 2219 采空区,下伏 6 号煤层为实体煤,工作面走向长 670 m,倾斜长 130 m。51109 工作面所采 5 号煤层为该矿主要可采煤层之一,位于石炭系太原组下部,为一单斜构造,平均倾角 12°。受构造应力的影响,煤体松软、破碎。工作面采用综采放顶煤采煤方法和“U”通风型式,图 1 为 5 号煤层综合柱状图。

图例	厚度/m	岩性说明
	6.0	中细石英砂岩
	3.4	砂质页岩及粉细砂岩
	0.5	泥质页岩
	5.8~13.0	5号煤层
	1.5	页岩及泥岩
	8.0	中粗粒砂岩

图 1 岩层综合柱状图(轩岗焦家寨煤矿)

Fig. 1 Lithology of coal stratum in Jiaojiazhai Coal Mine, Xuangang region

自 2004 年实施综放开采至今,大量统计分析显示,综放工作面瓦斯涌出强度大、不均匀系数高,受基本顶周期来压影响,经常造成长时间的瓦斯超限。该矿对综放工作面瓦斯的治理先后采取了隅角设置隔离墙、挂风障、安设抽排风机等多种措施来抽采采空区及尾部输送机尾瓦斯,采取顺层平行钻孔进行煤体采前预抽以及布置本煤层斜交钻孔进行边采边抽等

多种技术措施,然而由于本煤层赋存属于“三软、低透气性”煤层,煤层透气性系数仅为 0.006 1 ~ 0.191 0 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup> · d),钻孔瓦斯流量衰减系数为 0.316 5 ~ 0.519 6 d<sup>-1</sup>。上述技术措施实施中瓦斯抽采流量小、瓦斯浓度低且衰减快,顺层平行钻孔采前预抽瓦斯仅为 0.41 m<sup>3</sup>/min、斜交钻孔仅为 0.28 m<sup>3</sup>/min,对综放瓦斯涌出的治理效果极不明显。

因此,为了保证煤矿井下安全、高效的生产作业,该矿急需专门针对自身煤层赋存特点且合理有效的技术措施来实现综放瓦斯的有效治理,从而为煤矿的生产提供安全保障。

## 2 综放开采煤岩体应力分布特性分析

### 2.1 工作面前方煤岩体支撑应力分布

煤层开采过程中将引起上覆煤岩体的大范围移动,从而造成应力的重构及煤岩体裂隙的发育,工作面推进方向上煤岩体支承压力则动态体现了上覆岩层的演化过程。

煤层厚度、埋深及开采强度等因素均对支承应力大小及其分布存在显著的影响,特别是应力集中峰值、峰值点的位置等随开采条件的不同而变化明显。研究表明,随着工作面的不断推进,作用在煤壁前方的支承应力从原始应力状态开始增大,当峰值应力超过煤体强度极限后,煤体中的支承压力逐渐减小至残余应力(图 2),形成了一个完整的时空演化过程<sup>[5,11]</sup>。

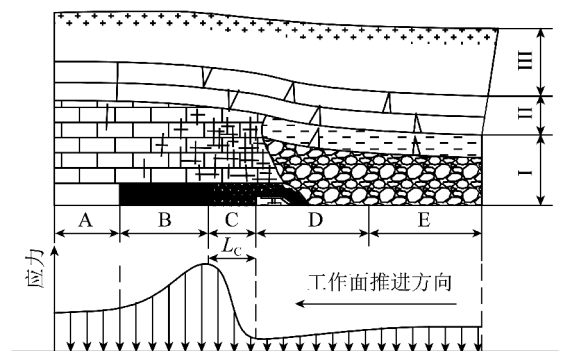


图 2 工作面走向支撑应力分布

Fig. 2 Abutment pressure distributions of overlying coal seam and rocks

结合本试点煤矿的特点,采用实验及数值计算的方法,描述了焦家寨煤矿三软煤层综放开采过程中工作面超前支撑应力的分布情况,具体见表 1。由表 1 可以看出,综放开采推进过程中,在工作面前方 5 ~ 10 m 处发生超前支撑应力的集中现象,但由于三软煤层的特点,应力集中系数较低( $K \approx 1.5$ )。超前应力的集中与释放将造成煤体的压缩与膨胀破裂,有利

于煤层瓦斯解析释放及流动富集,从而为工作面煤体 瓦斯的抽采及钻孔的布置提供了基础。

表1 焦家寨煤矿5号煤层放顶煤开采工作面支撑压力参数

Table 1 Abutment pressure parameters for top-coal caving in No. 5 coal seam

工作面	煤层赋存条件			支撑压力特征		
	煤层厚度/m	标高/m	倾角/(°)	坚固性系数 $f$	$K$	$L_c$ /m
51109	11.0~13.9	-520~-640	10~15	0.11~0.19	约为1.5	5~10

## 2.2 采空区的“O型圈”理论

原始应力状态下煤体虽然具有一定的孔隙结构,但其渗透却极低。研究表明煤岩体的渗透性与地应力间具有较强的敏感性,随着地应力的释放,煤体的透气性<sup>[12]</sup>将极大地增加。在煤层开采过程中,煤岩体原始应力将被破坏,在岩层的变形及运动中得到重构。煤层开采后,采空区在垂直方向上可分为3带(垮落带、裂隙带及弯曲下沉带)<sup>[13]</sup>,如图3所示。钱鸣高首次提出了煤层开采后采空区的“O型圈”及“关键层理论”<sup>[14-15]</sup>,采动裂隙“O型圈”是卸压瓦斯流动的通道和贮存空间,为大面积、长时间地抽采卸压瓦斯提供了理论指导。

## 2.3 焦家寨矿51109工作面涌出瓦斯组成及统计规律分析

5号煤层51109工作面瓦斯涌出的基本组成见表2,由表2可知,由于煤层松软透气性低(煤层透气性系数:0.006 1~0.191 0 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d)),煤壁释放瓦斯量所占比例较小,而采空区瓦斯的涌出占绝大多

多数。因此,如何实现采空区瓦斯的有效抽采对工作面瓦斯治理具有至关重要的作用。

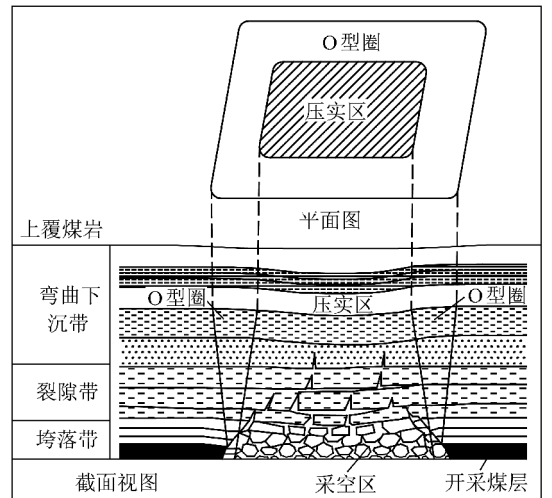


图3 采空区顶板裂隙特征及“O型圈”

Fig. 3 Vertical distribution of mining fractures in overlying rocks and the schematic diagram of “abscission circle”

表2 5号煤层瓦斯涌出组成特征

Table 2 Gas emission composition of working face in No. 5 coal seam

总涌出量/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	煤壁瓦斯释放量 I/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	采空区瓦斯涌出量 II/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	比例 I/%	比例 II/%	工作面标高/m
10.35	2.26	8.09	21.8	78.2	-520
15.44	5.34	10.10	34.6	65.4	-640

注:5号煤层51109工作面产量:3 000 t/d

通过对轩岗焦家寨煤矿51109工作面的现场统计分析,发现该矿51109综放工作面瓦斯涌出具有3个特点:

(1)上隅角、尾部输送机机尾瓦斯大,时有超限,局部最大可达2%,尤其以尾部输送机机尾显著;

(2)由于中班为检修班,早班、夜班为生产班,采空区集聚的瓦斯、新鲜煤壁释放的瓦斯大量集中于中班释放,因而夜班工作面回风流、上隅角瓦斯浓度比早班偏低0.2%~0.3%;

(3)受基本顶周期来压影响,工作面每推进25~35 m发生一次较长时间瓦斯超限,造成回风流、上隅

角瓦斯均超限,有时可达3~4 h。

## 3 基于千米钻机的“三位立体”瓦斯综合抽采技术

### 3.1 “近千米”长钻孔及其布置工艺参数

以采动应力及裂隙分布规律为指导,充分利用采动所形成的“O型圈”,因此千米钻孔均设计布置在5号煤层顶板的裂隙带中,距5号煤顶板12~38 m范围内,钻孔长度为500~800 m,钻孔数量不少于2个;主钻孔轨迹水平投影平行于回风巷且回风巷下帮5~20 m范围内,终孔位于工作面前方,同时施工一

个或多个分支孔以抽采采空区垮落带、裂隙带的高浓度瓦斯。

所用千米钻机为澳大利亚 VLD-1000 型,钻机电机功率为 95 kW,理论钻孔深度 1 000 m,钻杆型号为  $\phi 70 \text{ mm} \times 3\ 000 \text{ mm}$ ,钻孔直径为 95 mm,钻进方向可以随钻调整。最终施工的成孔状况见表 3 及图 4 所示。

表 3 51109 工作面千米钻孔参数

Table 3 Parameters of 1 000 m length drilling holes

编号	长度/m	孔径/mm	距煤层顶板/m	距回风巷/m
Zk1	648	96	15	7
Zk2	585	96	15	14

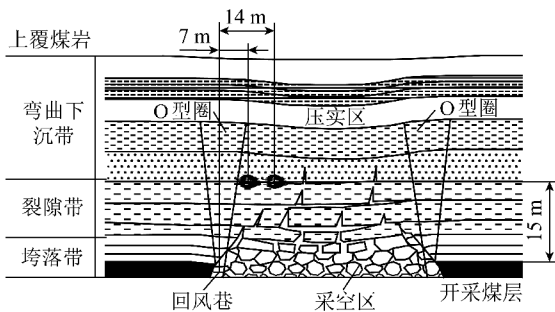


图 4 千米钻孔布置示意

Fig. 4 Allocations of 1 000 m length drilling holes

### 3.2 回风巷斜交高位钻孔及其布置参数

在采煤工作面推进的过程中,工作面前方煤岩体受超前支撑应力集中与释放的作用从而导致煤体发生压缩与膨胀等变形破坏,使得煤体产生部分裂隙,煤层透气性增加。

如 2.1 节所述,应力集中最大值发生在工作面中部前方,峰值点距煤壁 5 ~ 10 m,分布范围 30 ~ 60 m 内。为充分利用超前应力集中所导致的煤层透气性的增加,瓦斯抽采中设计在采煤工作面回风巷内每隔一定距离施工一个高位钻场或间隔一定距离施工一个钻孔组,向工作面上方(靠机尾部)施工钻孔,钻孔位于工作面顶板上方 5 ~ 10 m 范围内的裂隙带内,钻孔长度为 30 ~ 40 m,其目的在于抽采工作面前方煤体的卸压瓦斯及采空区瓦斯。详细设计钻孔布置情况,如图 5 所示,施工中首个钻孔距工作面不小于 10 m,工作面推进过程中当斜交高位钻孔距煤壁小于 10 m 时停止抽采。

### 3.3 上隅角埋管抽采

上隅角埋管(图 6)瓦斯抽采是通过抽采管路实施一个负压区,主要用于上隅角积聚瓦斯及采空区涌出瓦斯的抽采。本方案在抽采主管末端实施一带 4 ~

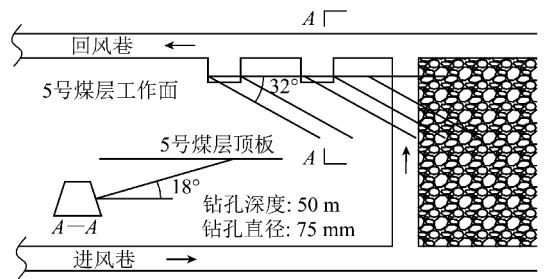


图 5 回风巷斜交高位钻孔布置

Fig. 5 Allocations of oblique crossed boreholes in air returning gateway

8 个分支接头,各分支管出口接 1 寸或 2 寸铠装胶皮软管,软管插入上隅角后呈发散排列,并由支架进行悬挂布置,同时隅角采用挡风帘等予以密封以提高抽采效果,埋管插入深度可根据抽采效果进行调整。

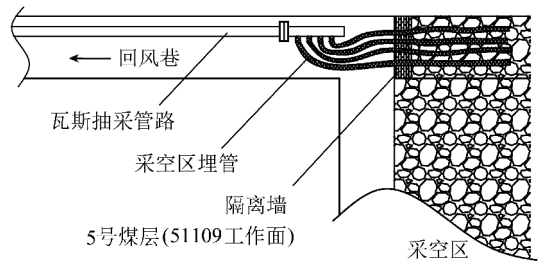


图 6 上隅角埋管抽采示意

Fig. 6 Upper corner gas control by flexible drainage pipe technology

## 4 综放瓦斯综合治理效果及分析

由于该矿煤层松软、透气性差、瓦斯含量中等 ( $4.686 \sim 5.470 \text{ m}^3/\text{t}$ ),工作面开采初期先后采取上、下隅角每推进 3 m 后用袋装煤粉砌墙,要求接顶、堆积严实,同时降低端头送风压差以减少采空区漏风量;工作面机道从上端头开始每隔 5 m 悬挂皮带风障,向后引导风流以稀释尾部输送机机尾瓦斯;此外,在工作面回风巷实施顺层平行钻孔,进行煤层瓦斯预抽及采动卸压瓦斯的抽采;同时在上隅角实施埋管抽采。虽然采取了诸多的瓦斯治理技术措施,但瓦斯治理效果依然不明显,初期治理效果见表 4。由此可知,瓦斯的抽采率极低(仅 7%),风排瓦斯浓度高达 0.73%、尾部输送机机尾浓度最高可达 2%,严重制约了煤矿的安全生产。

在“三位立体”瓦斯综合抽采技术实施后,3 套抽采系统(上隅角抽采、回风斜交高位钻孔抽采、千米钻孔抽采)同时抽采时的监测结果如图 7 及表 5 所示。由此可知,煤体瓦斯的总抽采率达 67.3%,风排瓦斯浓度基本波动在 0.2% ~ 0.4%,工作面瓦斯涌出的不均匀系数由最初的 2.5 降低为 1.6 左右,使得

表 4 51109 工作面采取本技术措施前的瓦斯涌出情况

Table 4 Gas emission characteristics of 51109 working face before taking the measures

工作面风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	风排瓦斯 浓度/%	平均风排瓦斯/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	平均瓦斯抽采 量/( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	平均绝对瓦斯涌出 量/( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	上隅角最大瓦 斯浓度/%	尾部输送机机尾 最大瓦斯浓度/%	抽采 率/%
1 645	0.73	12.0	0.9	12.9	2.1	2	7

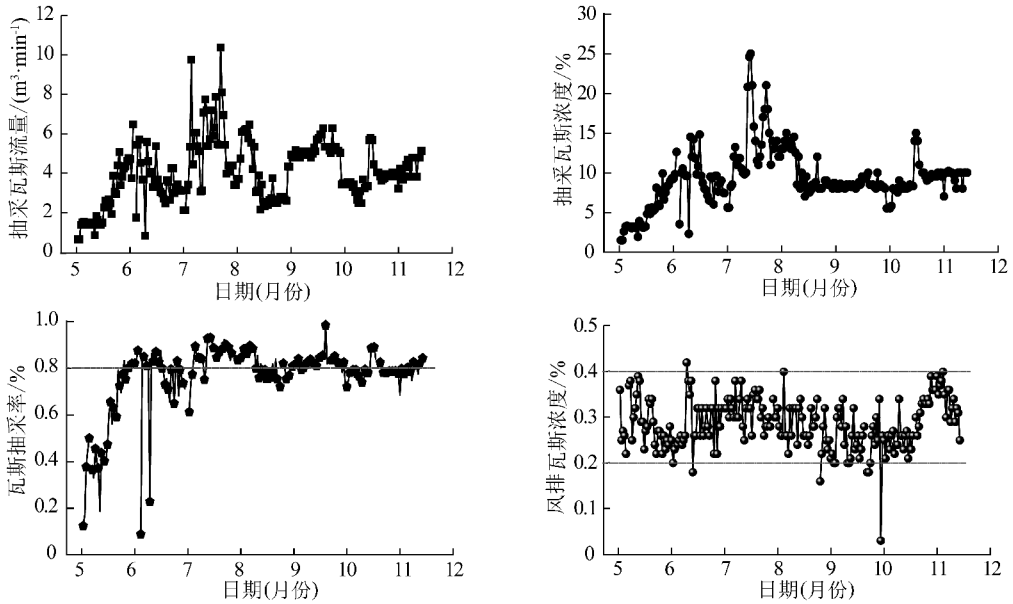


图 7 51109 工作面瓦斯抽采情况

Fig. 7 Gas drainage monitoring data of 51109 working face

表 5 3 套抽采系统同时运行时的抽采效果

Table 5 Effects by three units of gas drainage system

瓦斯涌出量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	风排瓦斯量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	上隅角抽采		斜交高位钻孔抽采		千米钻孔抽采		总抽采 率/%
		纯瓦斯量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	抽采率/%	纯瓦斯量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	抽采率/%	纯瓦斯量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	抽采率/%	
10.1	3.3	0.4	4	3.5	35	2.9	29	67.3

瓦斯频繁超限的难题得到很好地解决,保证了煤矿作业的安全,达到了瓦斯治理的预期目的。

## 5 结 论

(1) 焦家寨煤矿三软煤层综放开采推进过程中,超前支撑应力在工作面前方 5~10 m 处产生应力集中现象,应力集中系数约为 1.5。

(2) 51109 综放工作面瓦斯涌出呈现:上隅角、尾部输送机机尾瓦斯大(局部最大可达 2%),且受基本顶周期来压影响,工作面每推进 25~35 m 发生一次较长时间的瓦斯超限。

(3) 提出了基于千米长钻孔瓦斯抽采技术、风排巷斜交高位钻孔瓦斯抽采及上隅角埋管瓦斯抽采 3 种技术协同耦合的“三位立体”瓦斯综合治理技术措

施。该技术措施实施后,51109 工作面瓦斯抽采率显著提高,达 67.3%,风排瓦斯浓度降至 0.3%,工作面瓦斯涌出不均匀系数由 2.5 降至 1.6,瓦斯频繁超限的难题得到有效地解决。

## 参考文献:

- [1] 袁 亮. 留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 898-902.  
Yuan Liang. The technique of coal mining and gas extraction by roadway retaining and borehole drilling[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 898-902.
- [2] 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.
- [3] 袁亮.低透气性煤层群无煤柱煤气共采理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2008.  
Yuan Liang. Theory and practice of integrated pillarless coal production and methane extraction in multiseams of low permeability[M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2008.
- [4] 李铁,梅婷婷,李国旗,等.“三软”煤层冲击地压诱导煤与瓦斯突出力学机制研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1 283-1 288.  
Li Tie, Mei Tingting, Li Guoqi, et al. Mechanism of coal and gas outburst induced by rock burst in “three-soft” coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1 283-1 288.
- [5] 谢和平,周宏伟,刘建锋,等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].煤炭学报,2011,36(7):1 067-1 074.  
Xie Heping, Zhou Hongwei, Liu Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1 067-1 074.
- [6] 王振,胡千庭,文光才,等.采动应力场分布特征及其对煤岩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.
- [7] 王旭锋,张东升,李国君,等.铁法矿区高瓦斯低透气性煤层群卸压煤层气抽采钻孔布置[J].煤炭学报,2011,36(8):1 296-1 301.  
Wang Xufeng, Zhang Dongsheng, Li Guojun, et al. Borehole layout of coal mine methane drainage for high gassy and low permeability coal seams in Tiefa coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1 296-1 301.
- [8] 李伟,詹振江.淮北矿区“三软”极复杂煤层综采技术研究与实践[J].煤炭学报,2010,35(11):1 800-1 808.  
Li Wei, Zhan Zhenjiang. Study and practice on the technology of full-mechanized mining for the weak coal-bearing strata in Huaibei mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1 800-1 808.
- [9] 武华太.煤矿区瓦斯三区联动立体抽采技术的研究和实践[J].煤炭学报,2011,36(8):1 312-1 316.  
Wu Huatai. Study and practice on technology of three-zone linkage 3D coal bed methane drainage in coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1 312-1 316.
- [10] 王兆丰,田富超,赵彬,等.羽状千米长钻孔抽采效果考察试验[J].煤炭学报,2010,35(1):76-79.  
Wang Zhaofeng, Tian Fuchao, Zhao Bin, et al. The testing of gas drainage efficiency about feather-veined 1 000 m length-drill hole[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 76-79.
- [11] John G H, Hani S M. Numerical modeling of ore dilution in blast hole stopping[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(5): 692-703.
- [12] Wold M B, Connell L D, Choi S K. The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behaviour during coal mining[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 75: 1-14.
- [13] Karacan C Ö, Esterhuizen G S, Schatzel S, et al. Reservoir simulation based modeling for characterizing longwall methane emissions and gob gas venthole production[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 71: 225-245.
- [14] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.  
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin, et al. Key strata theory in ground control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [15] 钱鸣高,许家林.覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特性研究[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.