

文章编号:0253-9993(2013)06-0942-06

# 煤与瓦斯共采覆岩应力及渗透耦合特性实验研究

李宏艳<sup>1,2</sup>, 王维华<sup>1,2</sup>, 齐庆新<sup>1,2</sup>, 张浪<sup>1,2</sup>, 季文博<sup>1,2,3</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 矿山安全技术研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院) 北京 100013; 3. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院 北京 100083)

**摘要:**为探索煤层开采过程中上覆岩体应力与其渗透性相互耦合特性,开展了煤与瓦斯共采相似模拟实验研究。采用柔性加载方式以及平面应变模型,模拟随工作面推进上覆围岩应力及渗透性的变化规律。结果表明:受采动影响,上覆围岩应力与渗透率变化呈现一定的分区特征。具体表现为,随采面推进,煤柱后方应力集中区域向远离采空区转移,应力集中系数降低,渗透率与压应力分布呈正相关关系;远离采空区向高位延伸方向,应力降低幅度有递减趋势,有明显应力拱向高位及广度扩展特征,当达到充分采动时,此特征趋于减弱;提出覆岩渗透规律具有“拱上梁”的假设特征,即在拱顶位置,渗透率有不升反降趋势。

**关键词:**煤与瓦斯共采;柔性加载;相似模拟;耦合

**中图分类号:**TD712.6 **文献标志码:**A

## Experimental study on coupling of stress and permeability in overlying strata at longwall panel for efficient coal and methane co-extraction

LI Hong-yan<sup>1,2</sup>, WANG Wei-hua<sup>1,2</sup>, QI Qing-xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Lang<sup>1,2</sup>, JI Wen-bo<sup>1,2,3</sup>

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to understand the coupling characteristics of stress and permeability in overlying strata, an analog experimental simulation was conducted to study the co-extraction of coal and methane in longwall coal mine. The experiment used a plane strain model and flexible loading to simulate the variation characteristics of stress in overlying strata and permeability in advanced coal face. The results show that a partition tendency exists: with the coal face advancing, the concentration area of stress inside coal pillar removes away from the gob, the coefficient of concentration decreases, and the permeability and stress demonstrates a direct proportional relationship. The range of stress decrease experiences a tendency of slow in the direction from goaf to high position. In addition, the stress arch expands vertically and horizontally at the same time, while it will recede at a fully extraction phase.

**Key words:** co-extraction of coal and methane; flexible loading; analog simulation; coupling

实验室相似材料模拟一直是研究采矿工程围岩应力、位移和渗透特性的重要手段和有效方法<sup>[1-2]</sup>。大量文献及工程实际表明<sup>[3-6]</sup>, 矿井瓦斯的排空和井下瓦斯灾害严重威胁环境和安全开采。瓦斯是一种清洁能源,并且在含煤地层中储量较大,在目标煤层

煤体高效采出的基础上,充分利用“卸压增透”的特性,将含于地层内部的瓦斯合理有效的抽采出来是煤与瓦斯共采技术实施的关键。许多学者针对煤与瓦斯共采体系下岩层控制及瓦斯赋存特性、抽采技术进行了研究,取得了丰硕成果。比利时学者 A. Labasse

收稿日期:2012-11-12 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201206);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-001,2011ZX05063-009)

作者简介:李宏艳(1978—),女,河北唐山人,高级工程师,博士。E-mail:lhylhb@163.com

提出预成裂隙梁理论,为煤岩裂隙演化规律进一步发展起了推动作用<sup>[7-8]</sup>;宋振骥院士<sup>[9]</sup>提出递岩梁理论,主要阐述了基本顶岩层断裂呈假塑性状态特征;缪协兴等<sup>[8,10-11]</sup>提出了关键层理论,描述了不同岩性上覆岩体在采动覆岩变形破坏和运动演化过程中起不同作用,其中某些坚硬岩层对覆岩移动起控制作用;在此基础上,许家林等<sup>[12-13]</sup>建立了卸压瓦斯抽放的“O”形圈理论;周世宁等<sup>[14-16]</sup>根据矿山应力分布规律,通过理论分析形式,提出了煤层瓦斯赋存与流动的渗流理论。

综观前人研究成果,均没有考虑在煤与瓦斯共采时围岩应力动态变化和渗透性分布特征,目前此方面的相关研究相对较少。采用自行研制的煤与瓦斯共采实验台,采取柔性加载的方式处理边界受力情况,模拟煤层开采、应力重新分布和裂隙演化过程中覆岩应力及渗流规律,为煤与瓦斯共采工程实施提供理论

参考。

## 1 实验设计和实验过程

### 1.1 实验背景和装置

模拟工程背景为天地王坡煤矿,该煤矿属于高瓦斯矿井,采煤方法为综合机械化放顶煤采煤法,主采煤层3号煤层为无烟煤,原始瓦斯含量8.87~12.80 m<sup>3</sup>/t,透气性系数1.895~2.249 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d)。煤层埋深810.01~815.24 m,煤厚5.23 m。所研究的工作面为3212工作面,其主采煤层围岩为上石炭统太原组和下二迭统山西组,煤厚4.20~7.89 m,平均5.82 m,顶板为黑色泥岩,底板为粉砂岩或泥岩,煤层倾角0~14°。工作面走向长2 039 m,倾斜长180 m。设计割煤高度3.0 m,截深0.8 m,工作面年推进度为2 300 m。主要层位及岩性见表1。

表1 主要层位及岩性

Table 1 The major strata and rock properties

顶、底板名称	岩石名称	厚度/m	特征
基本顶	中砂岩	8.89	深灰色,硅钙质胶结,局部含大量云母,有时含炭质条带,具斜波状层理
直接顶	砂质泥岩	4.00	灰黑色,夹薄层泥岩,局部有粗粉砂岩,可见植物化石碎片
伪顶	炭质泥岩	0.30	黑色,质软,可见植物化石,随采掘脱落
3号煤	贫煤	6.24	黑色,中条带状结构,有垂直层面的裂隙
直接底	泥岩或细粉砂岩	2.10	灰黑色,含细粉砂岩和植物化石
基本底	中砂岩	3.20	灰色,具水平层理,贝壳状断口

采用辽宁工程技术大学煤与瓦斯共采试验台,试验台尺寸1 000 mm×900 mm×300 mm(长×宽×高),根据实验模拟的开采范围和模型实验台尺寸,设计模型长度1 m(实际模拟走向长度200 m),高度0.9 m(实际模拟岩层总厚度180 m),该试验台采用平面应变模型,为三向受约束,克服了传统相似模拟双向受约束的条件。

### 1.2 实验实施方案

模型几何相似条件 $\alpha_L=200$ ,时间相似条件 $\alpha_t=14.1$ ,视密度相似条件 $\alpha_r=1.8$ ,岩石强度相似条件 $\alpha_\sigma=360$ 。试验相似模型煤岩的厚度,强度指标及模型材料配比见表2。

试验铺设总厚度为90 cm,岩层之间加云母粉使模型层理分明。铺设模型过程的同时布置相关应力测点,其应力测点布置如图1所示,应力观测集中在水平同层位和垂向位置共两条测线,测量随工作面推进的应力变化趋势。采用DDS型准静态数据采集仪和振弦式土压力盒(最大承载压力0.5 MPa,分辨率0.001 MPa)全桥连接构成应力采集系统如图2所

示,用图形容法和拍摄法记录开采过程中各阶段的岩层垮落运动情况,图3为铺设好的模拟实验台。覆岩重力按补偿载荷采用囊式柔性加载方式施加模型上部边界,优点在于提供不间断连续恒定载荷,克服传统边界加载由于覆岩向下移动,边界受力状态改变的缺点。

实验研究内容为:

(1)考虑边界三向受限、边界柔性加载情况下,受工作面推进扰动影响,上覆围岩应力时空变化规律。

(2)考虑边界三向受限、边界柔性加载情况下,受工作面推进扰动影响,覆岩渗透特性变化规律研究。

### 1.3 实验数据处理

覆岩受扰动影响应力分析值均采用通过数据采集仪采集的应变信号,根据标定应力直接转化而来,由于考虑绝对应力意义不大,实验分析均采用采动应力减去初始应力的差值来描述,覆岩渗透规律的描述统一采用排水取气法测取气体流量,由于所需实验气





然由于煤岩层赋存条件不同,但总体都存在共性,应力释放到一定程度,覆岩出现明显裂隙,工作面上方和切眼上方均呈现 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的裂隙<sup>[18]</sup>,工作面上方裂隙由于其向前推进,裂隙呈现原始—闭合—张开—扩展—闭合的阶段,其张开和扩展具有延迟于工作面推进的特性。工作面上方裂隙存在动态产生和闭合过程,但开切眼上方裂隙呈现永久存在的趋势,并向采空区侧一定范围内存在碎胀、回转、挤压、铰接或面接触及下沉的特性,承受上方冒落岩体自重和地应力的特点,如图4所示。覆岩裂隙由产生到闭合过程与应力情况有关,图5为对监测的水平测点垂向应力和纵向测点垂向应力数据。

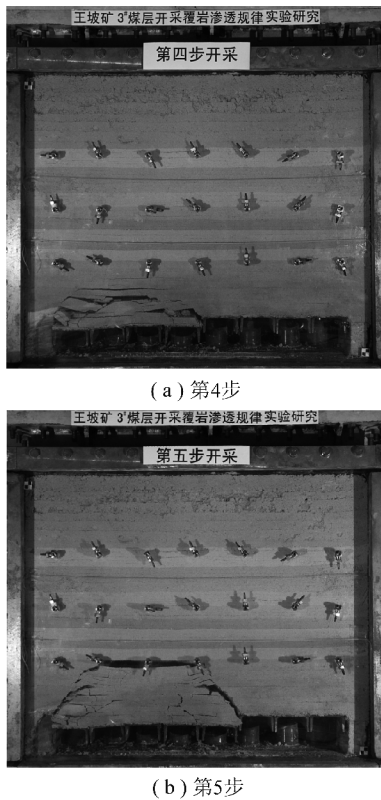


图4 第4,5步开采裂隙演化

Fig. 4 The fourth and fifth step mining fracture evolution

图5(a)为同层位应力变化随工作面推进之间关系,总体上应力由稳定至升高再降低之后稳定并小有回升趋势,分析原因是采用平面应变模型,四周约束以及上方覆岩垮落后重力的影响。所设置测点在一个层位,总体特征相似,按传统对采空区垮落带是采高3~6倍定义,所设测点布置在断裂带范围内,工作面推进过应力峰值以后,并不立即出现应力迅速释放现象,而是待工作面推过其投影位置3~5 m才开始迅速卸压,这一过程说明,由于下方存在应力拱的缘故,应力拱起主要支撑并传递上覆岩体载荷和压力,并且随工作面的推进,其应力拱也是呈现动态变

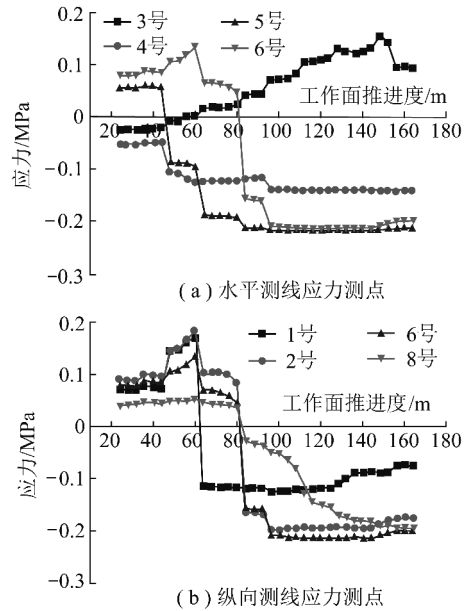


图5 两条测线测点支承压力变化曲线

Fig. 5 Change curves of abutment pressure of two survey lines measuring point

化,逐渐向高位转移,其转移的同时,监测点在应力集中的位置迅速应力释放,由弹性区域转变为塑性区域或损伤区域。其中3号测点位于保护煤柱上方,开切眼时,由于受采场应力释放的影响,其应力存在一定释放,但随工作面的推进,支撑应力区域不断扩大,应力拱拱脚向开切眼后方移动<sup>[19]</sup>,拱高不断增加,其影响区域3号测点处,存在应力升高;随采煤工作面的推进,其采场跨度越来越大,动态应力拱的位置也在向远离采空区方向扩散,出现5号测点在工作面推过5 m时才出现迅速卸压,而6号测点在工作面推过2~3 m即出现迅速卸压情况。图5(b)为纵向测点应力变化随工作面推进之间的关系,可以看出,纵向测点应力值明显存在分区特性,越靠近采空区工作面测点应力集中系数越大,远离采空区的测点应力集中系数较小,甚至应力集中情况不明显。集中系数分布在1.6~1.9,远离工作面测点应力卸压周期长,越靠近工作面测点,卸压速度越快,但总体均呈应力由稳定到升高再降低的趋势,但降低幅度和工作面推进有关,远离工作面测点的应力集中系数也呈递减趋势。

### 3 柔性加载方式下,上覆围岩渗透特性分析

随工作面的推进,上覆围岩渗透特性也呈现一定变化规律,前人研究结果表明,煤岩体渗透特性反映其受力和破坏损伤情况,卸压增透机理已广泛应用于现场瓦斯开采和治理等工程中,图6为采动影响下,上覆围岩在煤层开采期间渗透特性变化规律。根据卸压增透机理,结合实验渗透规律的数据,围岩渗透

特性降低有 2 个原因:① 在原岩应力基础上,应力集中导致煤岩体压实效应,裂隙闭合等;② 在增透的基础上,由于来压和承受压力的增加,导致渗透特性降低。但煤岩渗透特性在工作面采过以后,采空区上方均出现不同程度的卸压增透实验现象。由于采煤开切眼的影响,覆岩应力重新分布,导致所有测点均有一定幅度的渗透率增大趋势。在实验中由于其周期来压为 15~20 m,即其裂隙张开期持续时间为延迟于工作面推进 3~5 d,在此期间覆岩表现出高导高透高渗的“三高”特性;由于上方覆岩冒落、断裂形成砌体梁结构,断裂岩石体碎胀效应减弱,其渗透特性减弱,但依然高于初始渗透特性。

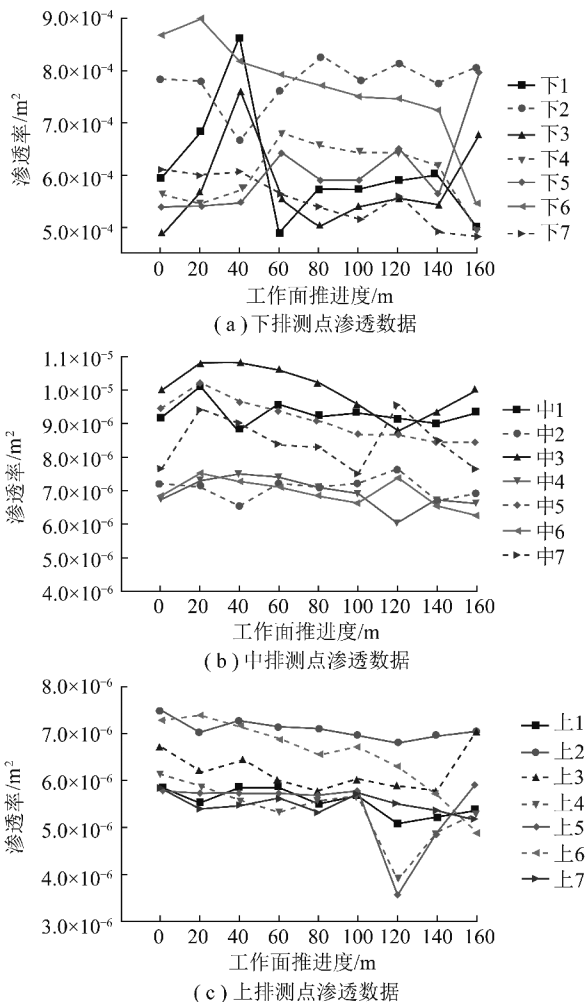


图 6 渗透特性测线数据变化曲线

Fig. 6 Change curves of survey lines data of permeability

图 6(a) 为下排测点渗透率变化趋势,可以看出,在顶板初次来压前,工作面上方下 2 测点渗透率降低,其两侧下 1 和下 3 测点渗透率大幅度增加,以及图 6(b), (c) 工作面来压后,在工作面推进 120 m 位置处,由于主关键层垮断,垮断上方测点中 3、中 4 渗透率降低,其余中排测点渗透率呈小幅升高趋势。综

合分析其原因,提出“拱上梁”假设,假设宏观应力拱的存在,由于是采场承载和传递压力和荷载的主要结构形式,在拱顶处,梁结构出现应力集中,致使其上方覆岩应力集中,导致渗透特性降低,周围应力得以释放和转移,出现渗透率增加的趋势。综合比较 3 条测线各测点渗透率变化波动幅度,可以得出,靠近采区工作面测线测取的值波动越大,反映其受力和裂隙演化情况比较复杂,高位测线测点渗透率变化幅度不大,主要由于采动影响未波及所在区域。在工作面推进到 60 m 时,采空区直接顶初次来压,工作面前方和开切眼后方由于应力集中,渗透率迅速降低,其余测点渗透率有增高的趋势。随工作面向前推进,采场两端煤柱应力得以向远离采空区一侧移动,应力集中程度降低,应力集中范围增大<sup>[15]</sup>,表现在此时煤柱端渗透特性在极值点处有升高趋势。图 5(a) 中水平应力测点同时对应图 6(a) 中 1~4 号渗透监测点。由于实验选用平面应变对称模型,采空区两端开切眼和工作面前方应力集中区应力-渗透特点是,在采场初次来压前,受开切眼影响,扰动覆岩应力分布,此时工作面上方覆岩均有卸压特征,渗透率呈增大趋势,但 2 号渗透监测点,在工作面推进 40 m 时出现大幅降低,此时对比应力特征,也有一定幅度的增压趋势,分析其原因主要是,此时其下方存在承重应力拱,上方压力在拱顶位置集中。在采场初次来压时,随工作面的推进,上覆岩体应力转移,在两端煤柱应力集中,渗透特性急剧下降,同时在宏观覆岩裂隙拱下方煤体渗透特性有不同程度的增加,随工作面前移,周期来压以及临近采止线处达到充分采动时,宏观裂隙拱内越靠近采场中心位置的测点由于覆岩自重原因,观测点渗透特性有下降趋势。而采场上方远离中心位置,靠近工作面及切眼上方宏观裂隙拱边缘附近渗透测点渗透特性有增大趋势,即符合公认的“O”形圈理论,进而验证试验的有效与合理性。

## 4 结 论

(1) 采用柔性加载方式模拟了采场上覆围岩应力特性。结果表明,采空区上覆围岩应力分布随工作面的推进呈现一定的分区特性。在空间上,切眼后方和采面前方应力集中系数随距工作面距离的增加呈减小趋势,甚至无明显集中情况;在时间上,随工作面推进,其应力集中系数也呈现减小趋势,表现出应力集中位置向远离采空区位置移动,即采场上方应力拱拱脚向煤柱内部转移。其上方测点出现应力在采区上方覆岩内降低幅度与采场距离成反比,越高位测点应力下降幅度越小。

(2)采用柔性加载方式模拟上覆围岩渗透规律提出“拱上梁”假设,表明在采场上方一定层位覆岩渗透规律出现不升反降的趋势,主要是由于采场宏观裂隙拱外区域存在承载和传递压力及荷载的一种应力拱结构,在该拱拱顶处出现应力集中区域和渗透降低区域,该假设提出基于传统的拱、梁结构假说。

(3)覆岩应力与渗透规律呈对应关系,即在应力增高区域,其渗透特性有明显降低特征。

### 参考文献:

- [1] MT 223—90. 煤和岩石渗透率测定方法[S]. 1990.
- [2] 冯国瑞,任亚峰,王鲜霞. 白家庄煤矿垮落法残采区上行开采相似模拟实验研究[J]. 煤炭学报,2011,36(4):544-550.  
Feng Guorui, Ren Yafeng, Wang Xianxia. Experimental study on the upward mining of the left-over coal above gob area mined with caving method in Baijiazhuang Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4):544-550.
- [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(2):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(2):6-10.
- [4] Xie Heping, Yu Guangming, Yang Lun, et al. Experimental research on effects of initial joints on surface displacement due to coalmining [J]. Journal of Coal Science & Engineering(China), 1999, 5(1):16-23.
- [5] 张向东,范学理,赵德深. 覆岩运动的时空过程[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(1):56-59.  
Zhang Xiangdong, Fan Xueli, Zhao Deshen. Time and space process of overburden strata movement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1):56-59.
- [6] 钱鸣高,许家林,缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):343-347.  
Qian Minggao, Xu Jialin, Miao Xiexing. Green technique in coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4):343-347.
- [7] 吴财芳,曾勇,秦勇. 煤与瓦斯共采技术的研究现状及其应用发展[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):137-140.  
Wu Caifang, Zeng Yong, Qin Yong. Present situation, application, and development of simultaneous extraction of coal and gas [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2):137-140.
- [8] 吴佩芳. 中国煤层气产业发展面临的机遇和挑战[A]. 2002年第三届国际煤层气论坛论文集[C]. 徐州:中国矿业大学出版社,2002:20-21.  
Wu Peifang. Opportunity and challenge face to china coalbed gas industry development [A]. The 3th International Symposium on CBM/CMM in Xuzhou China [C]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2002:20-21.
- [9] 袁亮. 高瓦斯矿区复杂地质条件安全高效开采关键技术[J]. 煤炭学报,2006,31(2):174-178.  
Yuan Liang. Key technique to high efficiency and safe mining in highly gassy mining area with complex geologic condition [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2):174-178.
- [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,2003.  
Qian Minggao, Shi Pingwu. Underground pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [11] 宋振骥. 实用矿山压力控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1988.  
Song Zhenqi. Practical mining pressure control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988.
- [12] 宋振骥,蒋宇静. 采场顶板控制设计理论与方法的基础研究[J]. 山东矿业学院学报,1986,1(3):1-13.  
Song Zhenqi, Jiang Yujing. Basic research on the and method of control—designing in face [J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1986, 1(3):1-13.
- [13] 缪协兴,钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):25-29.  
Miao Xiexing, Qian Minggao. Advance in the key strata theory of mining rockmass [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1):25-29.
- [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] 许家林,孟广石. 应用上覆岩层采动裂隙“O”形圈特征抽放采空区瓦斯[J]. 煤矿安全,1995(7):1-3.  
Xu Jialin, Meng Guangshi. Application of overlying rock mining-induced fractures “O” ring characteristics of goaf gas drainage [J]. Safety in Coal Mines, 1995(7):1-3.
- [16] 钱鸣高,许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[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 overlaying strata [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5):466-469.
- [17] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1997.  
Zhou Shining, Lin Baiquan. Theory of gas storage and flow [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1997.
- [18] 白国良,梁冰,李树志. 采动影响下等效连续介质水岩耦合数学模型及应用[J]. 煤炭学报,2009,34(4):461-465.  
Bai Guoliang, Liang Bing, Li Shuzhi. An equivalent porous media water-rock coupling model impacted by coalmining and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4):461-465.
- [19] 陈天宇,梁冰,孙维吉,等. 复杂地质条件煤层气藏群井排采压力分布规律研究[J]. 煤炭学报,2011,36(4):603-608.  
Chen Tianyu, Liang Bing, Sun Weiji, et al. Research on pressure distribution regularity of complicatedly geologic CBM reservoir with multi-well exploitation [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4):603-608.