

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.09.015

## 硬质体构造对煤层瓦斯流动的力学控制效应

张春华<sup>1a,2</sup>, 张卫亮<sup>1b</sup>, 王继仁<sup>1b</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 a. 矿业技术学院, 辽宁 葫芦岛 125105; b. 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;  
2. 山西焦煤集团博士后科研工作站, 太原 030022)

**摘要:**为研究煤层内硬质体构造对瓦斯流动的力学控制效应,运用数值模拟分析和现场验证相结合的研究方法,对正常煤层和含硬质体煤层掘进工作面的应力异常分布特性、煤层渗透性变化和瓦斯流动规律进行了对比分析。研究表明:掘进工作面前方硬质体构造附近的集中应力就像一道“闭合闸门”,明显降低了附近煤体的渗透性,阻碍了较远处煤体内的瓦斯向掘进工作面的正常渗流流动,这是高瓦斯矿井采掘过程中瓦斯异常涌出的诱因之一。为避免高瓦斯煤层掘进工作面瓦斯异常涌出威胁,所采取的各种卸压增透措施必须打开或卸除这个“闭合闸门”,为前方煤层瓦斯的安全释放提供畅通通道。

**关键词:**掘进工作面;应力集中;煤渗透性;瓦斯运移;瓦斯涌出;控制

**中图分类号:**X936

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2014)08-113-06

## Mechanical control effect of hard tectonic structure on coal seam gas flow

ZHANG Chunhua<sup>1a,2</sup>, ZHANG Weiliang<sup>1b</sup>, WANG Jiren<sup>1b</sup>

(1a. Ming Industry Technology College, Huludao, Liaoning 125105; 1b. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;  
2. Postdoctoral Scientific Research Workstation of Shanxi Coking Coal, Taiyuan 030022, China)

**Abstract:** To analyze the controlling effect of hard tectonic structure to gas flow at the coal seam heading face, two physical mechanical models are established, normal coal seam driving and hard body embedding coal seam driving. Then according to the above two numerical models, it numerically analyzes the stress distribution characteristics, the coal seam permeability change and the gas flow rule at the coal seam heading face by using rock fracture finite element software RFPA<sup>2D</sup>-GAS with solid-gas coupling analysis module, and carries on comprehensive comparative analysis. Finally, combining with two ordinary cases from product field, it verifies the conclusion from the numerical simulation that the concentrated stress influences the coal seam permeability and controls the gas flow. The results show that: the concentrated stress at the coal heading face with hard tectonic structure is like a “closed gate”, as it makes the coal seam permeability obviously lower and blocks the normal migration of gas in the vicinity to the freedom space. In order to eliminate the gas abnormal emission threat at the high gassy coal seam heading face, stress and gas relief measures must be taken to rip the “closed gate” and effectively remove the concentrated stress to provide safe releasing channels for the blocked gas.

**Key words:** heading face; stress concentration; coal permeability; gas migration; gas emission; control

**收稿日期:**2014-07-15

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51304112);校基金项目(SCDY2013029)

**作者简介:**张春华(1980-),男,博士,辽宁工程技术大学副教授,主要从事煤矿瓦斯灾害防治与矿井火灾防治方面的教学与研究工作,(Email)zch9820@163.com。

由于煤巷掘进围岩卸压程度低、瓦斯抽采不尽充分、空间狭窄、前方未知因素多,掘进工作面是煤与瓦斯突出多发地点<sup>[1-2]</sup>。为了预防瓦斯灾害,人们采用各种强化卸压增透技术,增加抽采钻孔(巷道),提高瓦斯抽采流量,努力改善高瓦斯(突出)矿井安全生产环境<sup>[3-8]</sup>。

煤层内的瓦斯除受到狭窄流动通道、煤体分子吸附等因素影响外,还受到应力的控制<sup>[9-11]</sup>。煤巷掘进工作面前方的集中应力,就像河流中安设的一道闸门,阻止深部煤层瓦斯向工作面顺畅流动。而当掘进工作面前方煤体出现局部硬煤构造时,附近应力集中更加明显,闸门效应更加严重<sup>[12-13]</sup>。

普遍认为,地质构造是煤与瓦斯突出发生的一个重要地质因素,但截至目前,地质构造对突出的影响机制还没有形成统一的认识。笔者认为,可根据受力环境和瓦斯赋存特征等将地质构造破断区划分为两种类型:1)增压型地质构造破断区,其边界围岩坚硬,透气性低,承受高的集中应力,内部孔隙和裂隙发育,汇聚和保存大量承压瓦斯,易诱发采掘工作面的瓦斯动力灾害;2)减压型地质构造破断区,其边界应力解除或深移,贯通型裂隙发育,瓦斯大量逸散或能安全地流向工作面,不易诱发采掘工作面的瓦斯动力灾害。

在煤层中,上述“增压型地质构造破断区”坚硬的边界围岩——“硬质体构造”,往往是硬质煤包裹体、断盘顶底板或火成岩侵入等,其力学强度明显大于周围煤层。在采掘过程中,这些硬质体构造将会影响附近煤体应力的分布,进而控制深部煤层瓦的流动,将会影响人们对前方瓦斯突出危险程度的预判,是一种潜在的威胁。

这一危险和复杂的动力现象,很难在现场跟踪实测研究,大都根据已经发生的突出现场状况进行理论推理,或在实验室展开模拟试验,笔者者采取计算机模拟和现场验证相结合的方法进行研究。所用的 RFPA<sup>2D</sup>-GAS 软件,是基于煤岩破裂过程固-气耦合动力学模型开发的,它考虑了煤岩介质材料力学性质的非均匀性以及煤岩介质变形破裂过程中透气性的非线性变化特性,可以借助该软件从细观的角度开展本问题的研究<sup>[14-15]</sup>。

## 1 数值模型的建立

### 1.1 本构方程

主要包括三部分:瓦斯渗流场方程、煤岩体变形场方程和透气系数-损伤演化方程<sup>[16-19]</sup>。

煤体中瓦斯的渗流流动符合线性渗透规律,将煤层瓦斯气体简化为理想气体,渗流按等温过程处理,根据气体状态方程和质量守恒定律,煤岩体中瓦斯渗流场方程为

$$\alpha_p \nabla^2 P = \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: $\alpha_p = 4\lambda A^{-1} P^{0.75}$ ,  $\lambda$  为透气系数,  $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ;  $A$  为煤层瓦斯含量系数,  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{0.5})$ ;  $P$  为煤层瓦斯压力  $p$  的平方,  $P = p^2, \text{MPa}^2$ ;  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子。

以位移表示的考虑瓦斯压力的煤岩体变形场方程可表示为

$$(G+k) \cdot u_{j,j} + G \cdot u_{i,jj} + f_i + (\alpha \cdot p)_{,i} = 0, \quad (2)$$

式中: $G, k$  为剪切模量和拉梅常数; $u$  为变形位移; $f$  为体力,  $\text{MPa}$ ;  $i, j = 1, 2, 3$ ;  $\alpha$  为瓦斯压力系数,  $0 < \alpha < 1$ 。其中,剪切模量和拉梅常数中涉及的材料力学参数(如强度、弹性模量等)服从 Weibull 统计分布。

受采掘工程影响,围岩的细观单元会在剪应力或拉应力作用下发生损伤变形,其透气性也会随之发生变化,据此建立透气系数  $\lambda$  与损伤变量  $D$  (标量,  $D=0$  时,单元完好;  $0 < D < 1$  时,单元损伤;  $D=1$  时,单元破坏)之间的演化关系方程。

$$\lambda = \lambda_0 \xi e^{-\beta(\sigma_i - \alpha p)}, \quad (3)$$

式中: $\lambda_0$  为初始透气系数; $\xi$  为透气系数增大倍率,当  $D$  为 0 时,  $\xi = 1$ ;  $\beta$  为耦合系数,体现应力对瓦斯压力的影响; $\sigma_i$  ( $i=1, 3$ ) 为围岩细观单元的瞬时压拉应力。

式(1)~(3)即组成了固气耦合作用下,煤岩体中瓦斯的渗流流动数学模型。

### 1.2 数值模型

图 1 显示的是当硬质体构造为硬质煤时,所构建的煤层掘进物理力学模型。

如图 1 所示,建模主要考虑 2 种情况:(a)正常煤层掘进;(b)含硬质体构造煤层掘进。(a)、(b)模型的力学和渗流边界条件相同,不同的是(b)模型煤层中存在硬质煤构造,其跨度范围为距左边界 14~18 m。模型

分为3层,顶、底板岩层各厚18 m,煤层厚4 m。模型尺寸40 m×40 m,划分为200×200个单元,采用平面应力分析。渗透边界:四周流量为零,为不透气边界;位移及载荷约束:左右边界位移为零(固定约束),上边界载荷为10 MPa(相当于400~500 m埋深处地应力)。模型开挖从左边界开始,每步4 m,共开挖2步。高瓦斯煤层的初始瓦斯压力为2.0 MPa,数值模型力学及渗流参数参照淮南矿区C13煤及顶底板。具体其他煤岩体力学及渗流参数见表1。

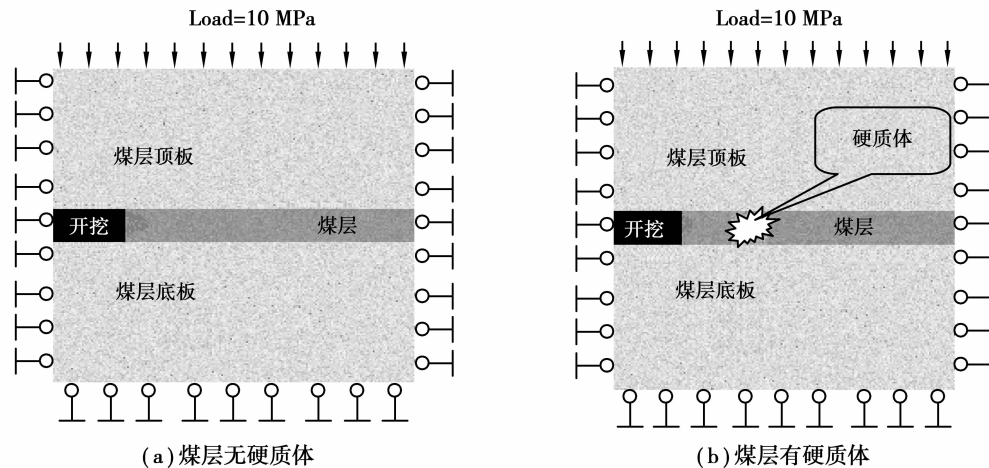


图1 煤层掘进数值模型

表1 数值模型力学及渗流参数

	均质度	弹性模量均值/MPa	抗压强度均值/MPa	摩擦角/(°)	泊松比	容重/(N·mm <sup>-3</sup> )	渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )
煤层	3	4 000	30	30	0.4	1.4	5.00
顶底板	8	100 000	100	40	0.25	2.5	0.01
硬质体	3	6 000	40	35	0.3	1.5	5.00

## 2 模拟结果及分析

图2显示的是在正常煤层掘进时,工作面前方煤体应力“三带”分布情况。可以看出,当掘进工作面推进4 m和8 m时,前方卸压带范围均为3 m,而应力集中带宽度要比目前普遍认为的5~15 m要宽,只是应力集中系数越往深部越小。

图3显示的是相应的煤层渗透性能分布情况。在开挖4 m和开挖8 m时,卸压区内煤层的渗透性能突增几十倍以上,有利于瓦斯流动。而在应力集中带内,煤层渗透性有所降低,不利于煤层瓦斯的流动。

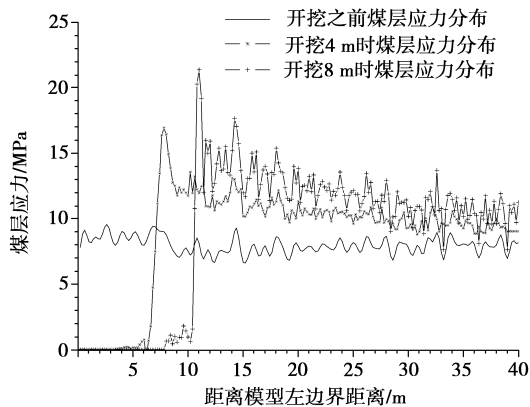


图2 无硬质体煤层掘进应力分布

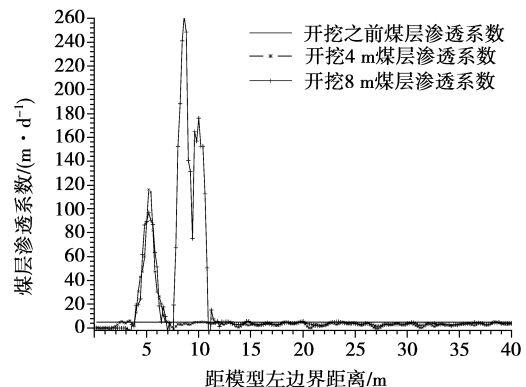


图3 无硬质体煤层掘进煤体渗透系数变化

图 4 显示的是当存在硬质体构造时,掘进工作面前方煤体应力分布情况。在掘进之前,煤层硬质体区就已经出现了明显的应力集中现象,应力集中系数约为 1.5。在掘进 4 m 和 8 m 时,工作面前方的卸压带范围仅为 1 m,比图正常缩短了 2 m。掘进工作面前方出现了多个应力集中区,硬质体区域的应力集中系数达到 2.5。在硬质体构造以里的区域,应力集中程度相比正常条件有所降低,这和硬质体构造承担了更多的支撑应力有关。

图 5 显示的是相应条件下煤层渗透系数分布情况。在掘进之前,由于应力异常集中,硬质体区的煤层渗透能力要比附近煤体的明显减弱。开挖之后,卸压带范围内的煤体渗透能力增加,而硬质体区煤层渗透性比开挖之前进一步降低。

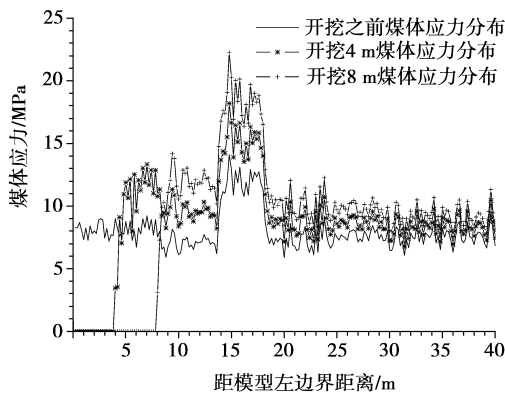


图 4 有硬质体煤层掘进应力分布

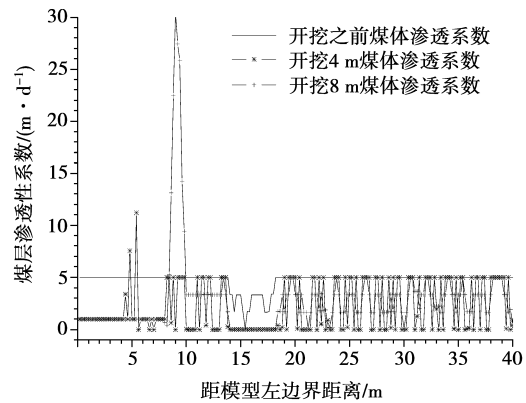


图 5 有硬质体煤层掘进煤体渗透系数变化

图 6 显示的是当掘进 8 m 时,工作面前方煤体瓦斯流场分布情况。在正常煤层掘进时,瓦斯流场比较均匀,煤层瓦斯流速较大,最大达 1.4 m/s;而当工作面前方存在硬质体构造时,瓦斯流速明显减小,最大仅为 0.042 m/s。

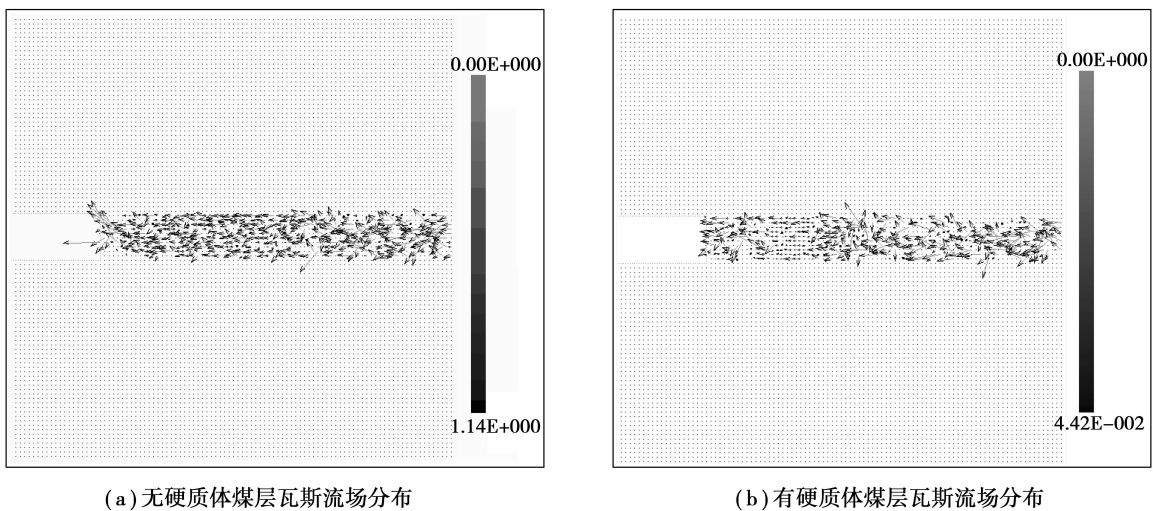


图 6 掘进 8 m 时工作面前方煤体瓦斯流场

综上所述可知,硬质体构造的存在,在附近形成了更明显的应力集中,对瓦斯的封锁作用更加明显。在实际生产中,当进行瓦斯参数测定或进行瓦斯抽采时,如果钻孔没能穿过该区域,所得瓦斯参数结果可能与实际值有所偏差,比如瓦斯流量偏小,瓦斯压力偏低等,这将可能造成对掘进工作面前方煤体瓦斯灾害程度的误判,给安全生产带来隐患。

### 3 现场案例验证

在陕西某高瓦斯矿井测定煤层瓦斯压力时,首先按设计方案要在掘进工作面迎头施工一个  $5^\circ$  仰角、30 m

深的钻孔。在钻进 8 m 时,遇到一段较硬的煤体,跨度 3 m,钻屑量明显增加。通过这段硬质煤体后,突然从钻孔喷出大量瓦斯和水,喷出距离超过 6 m。经测定,该区域煤层瓦斯压力为 1.04 MPa(表压)。后经分析,打钻初期瓦斯大量喷出是由于硬质煤体对深部瓦斯的封锁控制作用。此外,在鹤岗矿务局突出煤层掘进跟踪考察过程中,作者多次遇到工作面通过一段较硬的煤岩后,瓦斯涌出量明显增大,这种现象也和硬质体对深部煤层瓦斯的封锁控制有关。

## 4 结 论

1)高瓦斯煤巷掘进工作面前方围岩应力存在“三带”,卸压带是安全屏障,而应力集中带像一道闭合的“闸门”,紧紧封住远处煤层瓦斯,阻止其向自由空间正常流动。

2)当煤层掘进工作面前方存在硬质体或受其他形式地质构造影响时,待掘煤体中会出现多个应力集中峰区,应力集中带变宽,应力集中系数增大,对远处煤层瓦斯的“闸门”封闭效应更加明显。

3)煤巷掘进工作面前方煤体存在硬质构造时,要注意应力集中增宽问题,需要适当增加煤巷掘进工作面各措施孔的超前距,做到有效增加卸压带,消除瓦斯突出或喷出危险。

### 参考文献:

- [1] 高建良, 刘金金. 压入式局部通风倾斜巷道掘进[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(6): 199-201.  
GAO Jianliang, LIU Jinjin. Probing the regularity of the gas distribution in a sloping had face on the background of forced auxiliary ventilation[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(6): 199-201.
- [2] 梁冰, 刘蓟南, 孙维吉, 等. 掘进工作面瓦斯流动规律数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4): 46-51.  
LIANG Bing, LIU Jinan, SUN Weiji, et al. Numerical simulation of flowing gas on heading face during coal mining[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(4): 46-51.
- [3] Liu Zegong. New development of gas extraction technology with releasing pressure and increasing permeability in soft coal seam with high gas content and low gas permeability[C]//Liang Jiakun, Ji Guoyou, Yuan Liang, et al. Proceedings of China International Conference on Coal Mine Gas Control and Utilization. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008: 269-275.
- [4] 张春华, 刘泽功, 徐涛, 等. 石门对掘揭开急倾斜煤层突出与爆破增透消突技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 85-89.  
ZHANG Chuhua, LIU Zegong, XU Tao, et al. Coal and gas outburst in steep inclined coal seam uncovered by two reverse drifts and technology of outburst elimination by increasing permeability with blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 85-89.
- [5] 刘泽功, 张春华, 刘健, 等. 低透气煤层预裂瓦斯运移数值模拟及抽采试验[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 17-22.  
LIU Zegong, ZHANG Chunhua, LIU Jian, et al. Numerical simulation of gas migration in pre-split coal seam with low permeability and experiment of gas extraction[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 29(4): 17-22.
- [6] 王仁东, 郭永旺, 高飞. 高压注水消突试验研究[J]. 中州煤炭, 2011(10): 12-14.  
WANG Rendong, GUO Yongwang, GAO Fei. Gas research on test of outburst elimination by high pressure water injection[J]. Coal Science and Technology Zhongzhou Coal, 2011(10): 12-14.
- [7] 孟凡伟, 张海宾, 杨威, 等. 穿层割缝技术及其在递进掩护式巷道掘进中的应用[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 86-90.  
MENG Fanwei, ZHANG Haibin, YANG Wei, et al. The pressure relief and permeability mechanism of slotting through strata and its application[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(1): 86-90.
- [8] 翟成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1996-2001.  
ZHAI Cheng, LI Xianzhong, LI Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1996-2001.
- [9] 周世宁. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999: 12-38.
- [10] 王刚, 程卫民, 王宏伟, 等. 掘进工作面前方地应力与孔隙压力分布的数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(5): 9-14, 92.  
WANG Gang, CHENG Weimin, WANG Hongwei, et al. Numerical simulation research on the distribution of ground

- stress and pore pressure in front of heading faces[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(5):9-14, 92.
- [11] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋, 等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651-653.
- ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, YANG Dong, et al. Experimental study on gas seepage law of rock related to adsorption under 3D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651-653.
- [12] 罗新荣, 夏宁宁, 贾真真. 掘进煤巷应力仿真和延时煤与瓦斯突出机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 571-575.
- LUO Xinrong, XIA Ningning, JIA Zhenzhen. Research on stress simulation and mechanism of delaying coal and gas outburst in coal driving[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(5): 571-575.
- [13] Beamish B B, Crosdale P J. Instantaneous outbursts in underground coal mines: an overview and association with coal type [J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/2/3/4): 27-55.
- [14] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值实验[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 5.
- [15] 徐涛, 唐春安, 宋力, 等. 含瓦斯煤岩破裂过程流固耦合数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1667-1673.
- XU Tao, TANG Chun'an, SONG Li, et al. Numerical simulation of coupled gas flow in failure process of gassy coal-rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1667-1673.
- [16] 张春华, 刘泽功, 刘健, 等. 立井揭高瓦斯深埋煤层围岩力学特性数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2010(7): 8-11.
- ZHANG Chunhua, LIU Zegong, LIU Jian, et al. Numerical simulation on mechanical mechanism of the wall rock in deep embedding coal seam with high gas pressure uncovered by vertical shaft[J]. Safety in Coal Mines, 2010(7): 8-11.
- [17] 徐涛, 唐春安, 杨天鸿. 含瓦斯煤岩破裂过程与突出机理理论、模型与数值试验[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [18] 徐涛, 杨天鸿, 唐春安, 等. 含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合数值模拟[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(3): 293-296.
- XU Tao, YANG Tianhong, TANG Chun'an, et al. Numerical simulation on coupled solid-gas flow in failure process of gaseous coal and rock[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2005, 26(3): 293-296.
- [19] Dziurzynski W, Krach A. Mathematical model of methane emission caused by a collapse of rock mass crump[J]. Archives of Mining Sciences, 2001, 46(4): 433-449.

(编辑 郑洁)