

# 煤层瓦斯渗流过程中压力分布的滑脱效应

岳高伟<sup>1,2</sup>, 岳基伟<sup>1</sup>, 许梦飞<sup>2</sup>

1. 河南理工大学安全科学与工程学院, 焦作 454000
2. 河南理工大学土木工程学院, 焦作 454000

**摘要** 气体在多孔介质中渗流时, 不仅需克服启动压力梯度, 而且受气体滑脱效应的影响。基于煤层瓦斯的渗流特性, 建立考虑滑脱效应的煤层瓦斯渗流模型, 并对煤层瓦斯渗流过程的压力分布进行数值模拟。计算结果表明, 在一定煤层深度内, 与不考虑滑脱效应时煤层瓦斯压力分布相比, 考虑滑脱效应对其影响显著, 且随着暴露时间增长和距煤壁距离增大, 其差别更为明显。滑脱因子的变化将直接影响煤层内部气体压力的分布, 随着滑脱因子的增大, 气体压力减小, 滑脱越明显。与不考虑滑脱效应(Darcy解)瓦斯压力分布相比, 考虑滑脱效应时煤层瓦斯压力分布曲线更接近实测数据, 表明在研究煤层渗流过程中须考虑滑脱效应。

**关键词** 瓦斯渗流; 滑脱效应; 瓦斯压力; 煤层

**中图分类号** TD823.82

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.02.011

## Effect of coal seam gas seepage on gas pressure distribution

YUE Gaowei<sup>1,2</sup>, YUE Jiwei<sup>1</sup>, XU Mengfei<sup>2</sup>

1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China
2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

**Abstract** Many experiments indicate that for the gas seepage in the porous media, not only the threshold pressure gradient is important, but also the slippage effects should be considered. Based on the characteristics of the gas seepage in coal seams, a non-linear seepage mathematical model through the coal seam is built, with consideration of the threshold pressure gradient and the slippage effects, to numerically simulate the gas pressure distribution in the process of the coal seam gas seepage. It is shown that the slippage has a larger effect on the gas pressure in a certain coal seam depth, and with the increase of the depth and the passing of the time, the difference gets more obvious. The change of the slip factor  $b$  directly affects the gas pressure distribution in the coal seam, and with the increase of the slip factor, the gas pressure reduces and the slippage gets more obvious. As compared with the case without considering the slippage effect (the Darcy solution), the gas pressure distribution curves in the coal seam, with considering the slippage effect, are closer to the measured data, as is consistent to the actual gas seepage, which indicates that the slippage effect is very important in the process of the coal seam gas seepage. Some internal structural characteristics and the slippage flow mechanism in the coal seam are revealed, which will help for the theoretical prediction of the lane coal seam emission's width and for the coal-bed methane industrialization in hypotonic reservoirs.

**Keywords** gas seepage; slippage effect; gas pressure; coal seam

收稿日期: 2014-06-22; 修回日期: 2014-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274090); 中国博士后科学基金项目(2013M531673); 河南省科技攻关计划项目(142102310268); 河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室开放研究基金项目(2013KF-01)

作者简介: 岳高伟, 副教授, 研究方向为矿业安全与防治, 电子信箱: mxlygw@163.com; 岳基伟(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为瓦斯灾害与防治, 电子信箱: 1099615221@qq.com

引用格式: 岳高伟, 岳基伟, 许梦飞. 煤层瓦斯渗流过程中压力分布的滑脱效应[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 74-79.

在煤巷掘进时,煤层瓦斯压力与巷道气压存在较大压差时,瓦斯将从暴露煤层中不断涌出,且煤层暴露时间越长,一定煤层深度内的瓦斯压力越低。李云浩等<sup>[1]</sup>、王轶波等<sup>[2]</sup>、高建良等<sup>[3]</sup>、轩朴实<sup>[4]</sup>基于煤层瓦斯流动的动力学模型假设,运用达西定律(Darcy law),建立煤层瓦斯流动的动力学模型,数值计算了煤层瓦斯压力变化规律。但实验研究表明,瓦斯气体在煤层中渗流时,在煤孔隙壁面上的瓦斯渗流偏离线性Darcy现象,即为滑脱现象,对于低渗透的煤层,滑脱现象尤为明显,且滑脱效应可增加煤储层的渗透性能<sup>[5,6]</sup>。针对低渗透气藏开展的渗流特性试验和理论研究结果表明<sup>[7-11]</sup>,低渗透气藏流体在低速渗流时不仅需克服启动压力梯度,同时受气体滑脱效应的影响。而且在煤层中,滑脱效应作用范围随临界孔隙压力而变化,当大于某种特性条件时,气体滑脱效应逐渐消失<sup>[12,13]</sup>。

本文在孔隙压力较低情况下,引入煤层瓦斯渗流的滑脱机制,建立煤层瓦斯渗流的数学模型,数值计算瓦斯滑脱效应对煤层瓦斯压力分布特性的影响,同时,采用现场测试结果对理论结果进行验证。

## 1 数学模型

### 1.1 煤层瓦斯渗流的滑脱机制

在煤层掘进巷道中,由于煤层内部的瓦斯压力大于巷道内的大气压力,煤层中的瓦斯将发生迁移和排放。而煤体的低渗透性阻止瓦斯向巷道内扩散,因此,瓦斯在煤层中渗流主要是横向扩散。滑脱效应导致了煤层渗透率的改变,其表达式<sup>[14]</sup>为

$$k_g = k_l [1 + c/P_m] \quad (1)$$

式中, $k_g$ 为平均压力 $P_m$ 下气体渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $k_l$ 为克氏渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $P_m = (P_m + P_0)/2$ ,  $P_m$ 和 $P_0$ 分别为进口和出口压力; $c$ 为滑脱因子。Sampath等<sup>[15]</sup>给出了气体滑脱因子 $c$ 与气体克氏渗透率 $k_l$ 的实验公式

$$c = 0.0955 [k_l / \varphi_g]^{0.53} \quad (2)$$

式中, $\varphi_g$ 为介质孔隙率。

### 1.2 煤层瓦斯控制方程

通常巷道沿煤层掘进时,若所在煤层厚度小于巷道掘进高度,巷道能全部开切煤层,煤层瓦斯向掘进空间的渗流方向与巷道垂直,即为单向流动(图1)。水平煤层单向流动模型如图2所示。

在建立模型前作如下4个假设:1) 忽略煤体变形影响; 2) 煤层内各向同性; 3) 瓦斯在煤层中等温单相渗流; 4) 满足Kaluarachchi假定<sup>[16]</sup>,煤层中任意点瓦斯压力 $P$ 为平均压力 $P_m$ 。基于以上假设,建立如下煤层瓦斯控制公式。

1) 运动公式:

$$q_i = -\frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial x_i} = -\frac{k_l}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial x_i} \left[ 1 + \frac{c}{P} \right] \quad (3)$$

式中, $q_i$ 为瓦斯流速, $P$ 为瓦斯压力, $\mu_g$ 为瓦斯黏滞系数。

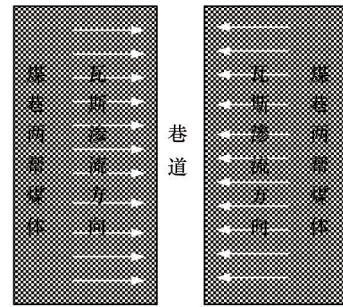


图1 煤层瓦斯渗流模型

Fig. 1 Coal seam gas seepage model of coal roadway

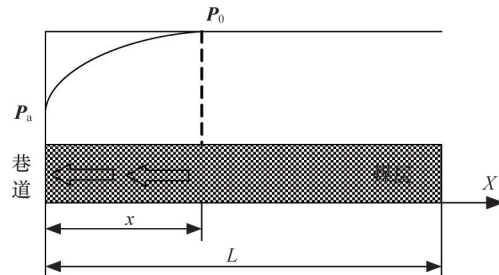


图2 水平煤层单向流动状态示意

Fig. 2 Sketch map of single flow in the horizontal coal seam

2) 气体状态公式:

$$\rho_g = \frac{M_g P}{RT} \quad (4)$$

式中, $R$ 为气体常数, $T$ 为绝对温度, $M_g$ 为气体摩尔质量。

3) 质量守恒公式:

$$\frac{\partial(\rho_g \varphi_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g q_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

将公式(3)、(4)代入公式(5)中,可得煤层瓦斯渗流的控制公式:

$$\mu_g \varphi_g \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_l \left( 1 + \frac{c}{P} \right) P \frac{\partial P}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

令 $\alpha = \mu_g \varphi_g / k_l$ ,考虑煤层瓦斯为单向流动,则瓦斯渗流公式(6)转化为

$$\alpha \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( 1 + \frac{c}{P} \right) P \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (7)$$

4) 初边值条件:

$$\text{初始条件 } P(x, t)|_{t=0} = P_0 \quad (8)$$

$$\text{边界条件 } \begin{aligned} P(x, t)|_{x=0} &= P_a \\ P(x, t)|_{x=L} &= P_0 \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $P_a$ 为巷道气压,取0.1 MPa。

## 2 理论分析

为分析滑脱效应对煤层瓦斯渗流过程中压力动态分布特征的影响,在定解条件下,令孔隙率 $\varphi_g$ 为15%,初始压力 $P_0$

为0.3 MPa, 边界压力 $P_a$ 为0.1 MPa, 渗透率 $k_g$ 为 $1.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , 温度 $T$ 为298 K, 动力黏度 $\mu_g$ 为 $1.1067 \times 10^{-11} \text{ Pa}$ , 模型长度 $L$ 为50 m, 对建立的数学模型进行数值模拟, 结果如下。

从图3和图4可以看出, 在一定煤层深度内, 与不考虑滑

脱效应(Darcy解)时瓦斯压力的时空变化规律相比, 考虑滑脱效应时, 瓦斯压力明显变小, 且随着煤层暴露时间增长, 瓦斯释放更多, 瓦斯压力也更小。因此, 在研究煤层瓦斯渗流中应考虑其滑脱效应。

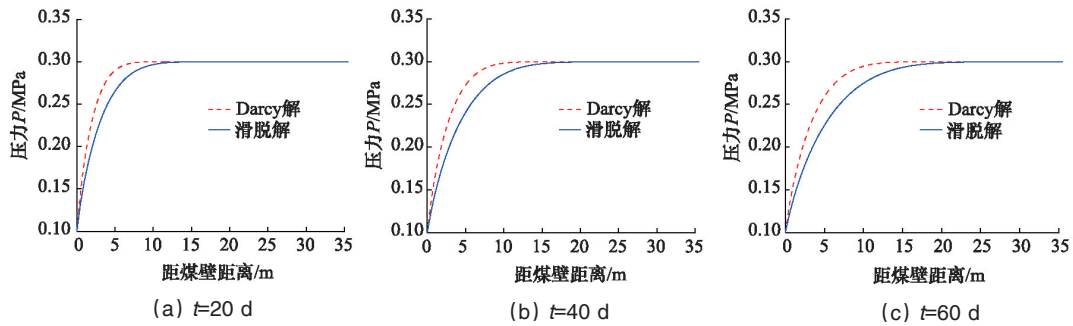


图3 不同时间内考虑滑脱与未考虑滑脱效应条件下瓦斯压力分布

Fig. 3 Gas pressure distribution in different times

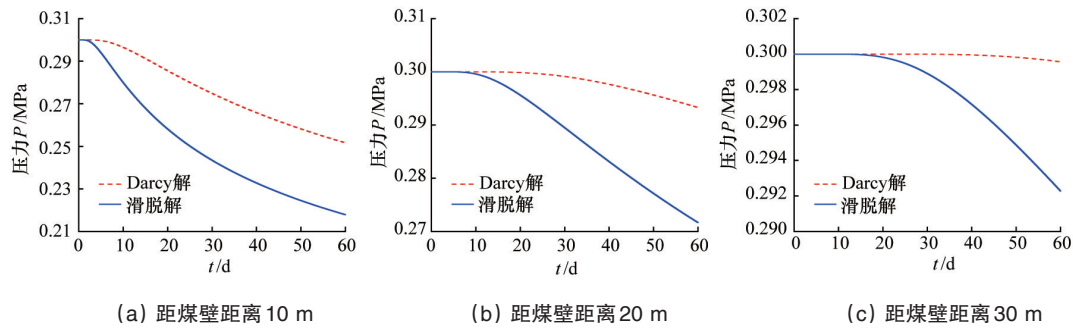


图4 Darcy解与考虑滑脱效应时不同煤层深度瓦斯压力分布

Fig. 4 Gas pressure distribution at different distances from roadway

图5和图6为不同滑脱因子对煤层瓦斯压力分布的影响, 从图6可以看出, 随着滑脱因子增大, 同深度煤层瓦斯压力更小, 与王勇杰等<sup>[7]</sup>的实测结果一致。在煤层瓦斯渗流过程中, 当滑脱因子增大时, 不仅越来越多的气体分子脱离煤壁面, 且临近层瓦斯分子动量交换增强, 带动更多的煤壁孔道处瓦斯分子定向流动, 从而导致一定深度煤层内部瓦斯压力降低更大。

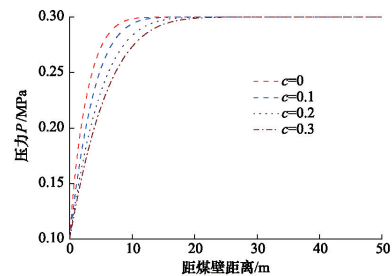


图5 滑脱因子c对煤层瓦斯压力分布的影响

Fig. 5 Effect of slip factor  $c$  on gas pressure distribution

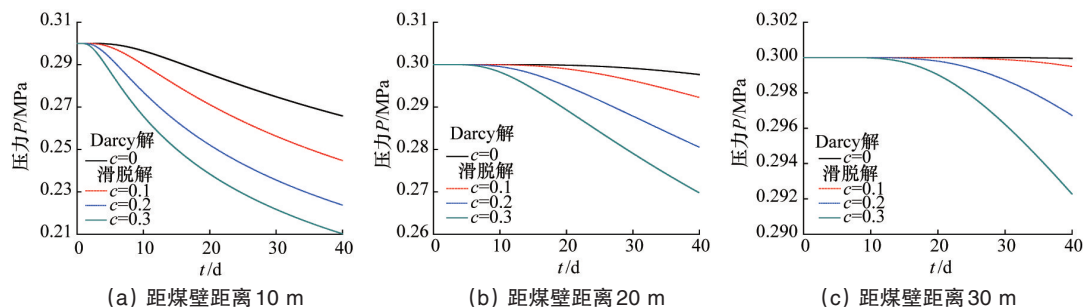


图6 滑脱因子对不同煤层深度瓦斯压力分布的影响

Fig. 6 Gas pressure distribution at different distances from roadway with different slip factors

### 3 工程应用

#### 3.1 煤层瓦斯参数测试

对于煤层内瓦斯压力的分布规律,本研究在山西阳城阳泰集团伏岩煤业有限公司,以3013运输顺槽和北胶带大巷为试验地点,采用CHP50M煤层瓦斯含量快速测定仪测量巷帮煤体不同暴露时间及不同深度的瓦斯含量 $Q$ ,根据Langmuir公式(式(10))确定该处的瓦斯压力 $P$ 。

$$Q = \frac{abP}{1+bP} \frac{1}{1+0.31M_{ad}} \frac{100-A_{ad}-V_{daf}}{100} \quad (10)$$

式中, $a$ 、 $b$ 为瓦斯吸附常数; $M_{ad}$ 为煤中水分,%; $A_{ad}$ 为煤中灰分,%; $V_{daf}$ 为煤中挥发分,%。不同测试点(钻孔)初始瓦斯含量如表1所示。试验点瓦斯参数如表2所示。

由表1和图7可以看出,尽管不同钻孔位置煤层初始瓦斯含量和压力不同,但煤体暴露一段时间后,由于瓦斯不断

从煤层中渗流到巷道大气中,越接近巷道煤壁,瓦斯含量越低。

表1 试验点瓦斯初始含量及压力

Table 1 Initial gas content and pressure of the experiment sites

测试点	初始瓦斯含量/( $m^3 \cdot t^{-1}$ )	初始瓦斯压力/MPa
3013 运输顺槽	1号钻孔	9.29
	2号钻孔	7.50
	3号钻孔	8.93
北胶带大巷	4号钻孔	12.03
	5号钻孔	13.00
	5号钻孔	11.97

表2 试验点瓦斯参数

Table 2 Gas parameters of the experiment sites

测试点	$k_g/m^2$	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{daf}/\%$	$\varphi_g/\%$	$a/(m^3 \cdot t^{-1})$	$b/(10^{-4} Pa^{-1})$	$P_g/MPa$
3013运输顺槽	$0.14 \times 10^{-15}$	1.02	12.78	6.57	11.32	37.217	0.949	0.10
北胶带大巷	$0.12 \times 10^{-15}$	0.78	13.91	7.86	10.90	36.760	0.955	0.10

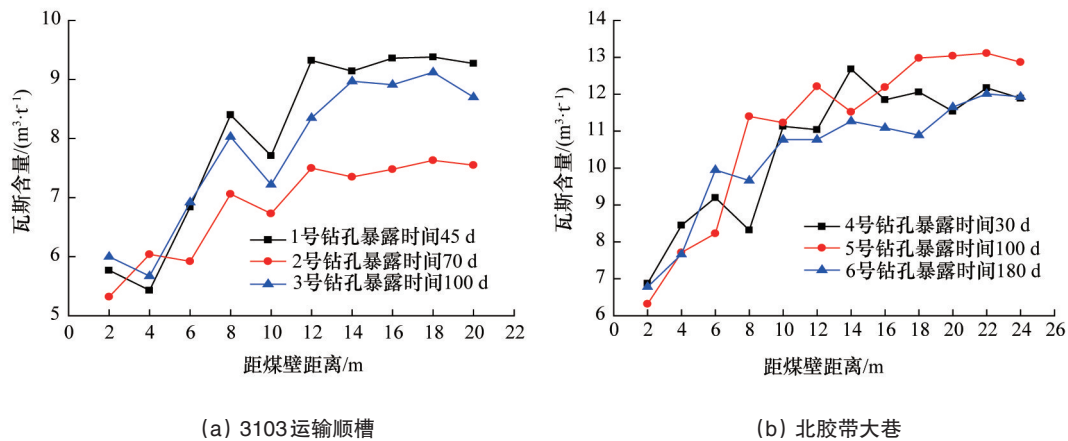


图7 不同暴露时间及不同深度煤层瓦斯含量测试结果

Fig. 7 Gas content test results with different exposure times and depths of coal seam

#### 3.2 煤层瓦斯压力分布对比分析

将图7中的瓦斯含量测试数据代入式(10),即可得到不同暴露时间、位置煤层瓦斯压力。图8和图9分别为伏岩煤业3103运输顺槽和北胶带大巷煤层不同暴露时间瓦斯压力分布的结果及数值模拟结果曲线,与Darcy解的煤层瓦斯压力分布相比,考虑滑脱效应时煤层瓦斯压力分布曲线更接近工程实际测试结果,说明煤层瓦斯渗流研究中须考虑滑脱效应。

从图8和图9理论计算和实测结果还可看出,到达一定深度后煤层瓦斯压力基本不再变化。同一钻孔、同一时间,某一测点的煤层瓦斯压力与其前后的2个测点值对比误差不超过5%时,即可认为已进入原始瓦斯带,此时所对应的煤层深度即为煤层瓦斯排放宽度。实测与理论计算的煤层瓦斯排放宽度对比如表3所示,考虑滑脱效应时煤层瓦斯排放带宽度基本与实测值一致,而不考虑滑脱效应(Darcy解)时计算得到的煤层瓦斯排放带宽度偏小。

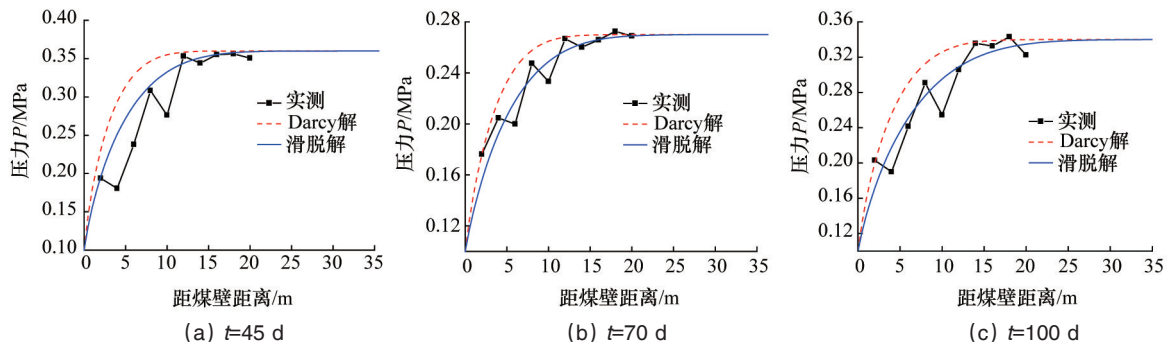


图8 3103运输顺槽煤层瓦斯压力分布对比

Fig. 8 Coal seam gas pressure distribution curves of 3103 transport gateway

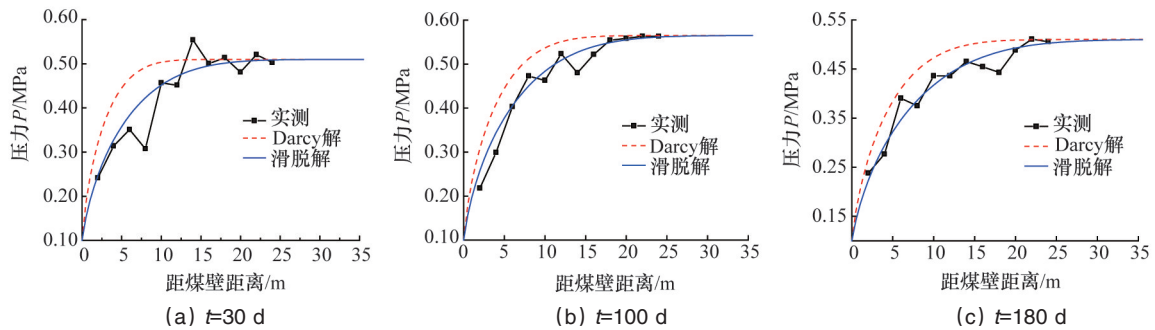


图9 北胶带大巷煤层瓦斯压力分布对比

Fig. 9 Coal seam gas pressure distribution curves of Beijiadai main road

表3 煤层瓦斯排放宽度对比

Table 3 Results of the emission's width

钻孔 编号	初始煤层瓦斯 压力/MPa	煤层暴露 时间/d	煤层瓦斯排放宽度/m		
			实测	Darcy解	滑脱解
1	0.352	45	10~12	8~9	11~12
2	0.267	70	10~12	7~8	11~13
3	0.334	100	12~14	9~10	13~14
4	0.512	30	12~14	7~8	12~13
5	0.576	100	16~18	12~13	17~18
6	0.508	180	20~22	16~17	21~22

#### 4 结论

通过建立考虑滑脱效应的煤层瓦斯渗流模型,对煤层瓦斯渗流过程的压力分布进行了数值模拟,并与现场测试结果进行了对比分析。结果表明:

1) 在一定煤层深度内,与Darcy解时的煤层瓦斯压力相比,滑脱效应对其影响更明显。随着煤层暴露时间增长,瓦斯释放更多,瓦斯压力也更小。

2) 一定煤层深度内,随着滑脱因子增大,同深度煤层瓦斯压力更小。为保证模型参数取值的准确性,应结合煤层瓦斯渗透试验来确定其滑脱因子。

3) 与不考虑滑脱效应(Darcy解)瓦斯压力分布相比,考虑滑脱效应的煤层瓦斯渗流的数值计算结果与现场实测结果更为吻合,表明煤层瓦斯渗流过程中滑脱效应起着重要的作用。

本研究提出的煤层瓦斯渗流滑脱机制,可为实现巷帮煤体瓦斯排放带宽度理论预测及低渗储层煤层气工业化开采提供一定的理论参考。

#### 参考文献(References)

- [1] 李云浩, 杨清岭, 杨鹏. 煤层瓦斯流动的数值模拟及在煤壁的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(2): 74-77.  
Li Yunhao, Yang Qingling, Yang Peng. The numerical simulation of gas flow in the coal seam and its application to the coal wall[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007, 3(2): 74-77.
- [2] 王轶波, 齐黎明, 马尚权, 等. 煤巷两帮卸压瓦斯带宽度理论分析及应用[J]. 中国煤炭, 2009, 35(2): 59-61.  
Wang Yibo, Qi Liming, Ma Shangquan, et al. Width of destressing gas zone in coal ribs: Theoretical analysis and its application[J]. China Coal, 2009, 35(2): 59-61.
- [3] 高建良, 侯三中. 掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1127-1131.  
Gao Jianliang, Hou Sanzhong. Dynamic distribution of gas pressure and emission around a diving roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1127-1131.
- [4] 轩朴实. 主控因素下巷帮煤体瓦斯排放带宽度计算方法研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2013.

- Xuan Pushi. Study on the calculation method of gas emission zone width of laneway's side under the main control factors[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2013.
- [5] Estes R K, Fulton P F. Gas slippage and permeability measurements[J]. Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1956, 207(3): 338-342.
- [6] 陈代殉. 渗流气体滑脱现象与渗透率变化的关系[J]. 力学学报, 2002, 34(1): 96-100.  
Chen Daixun. Gas slippage phenomenon and change of permeability when gas flows in tight porous media[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2002, 34(1): 96-100.
- [7] 叶礼友, 高树生, 熊伟, 等. 储层压力条件下低渗砂岩气藏气体渗流特征[J]. 复杂油气藏, 2011, 4(1): 59-62.  
Ye Liyou, Gao Shusheng, Xiong Wei, et al. Percolation characteristics of gas in sandstone gas reservoir with low permeability under reservoir pressure[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2011, 4(1): 59-62.
- [8] 肖晓春, 潘一山. 低渗煤储层气体滑脱效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3509-3515.  
Xiao Xiaochun, Pan Yishan. Experimental study on gas slippage effects in hypotonic coal reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Suppl 2): 3509-3515.
- [9] 薛国庆, 李闽, 罗碧华, 等. 低渗透气藏低速非线性渗流数值模拟研究[J]. 西南石油大学学报, 2009, 31(2): 163-166.  
Xue Guoqing, Li Min, Luo Bihua, et al. Low-speed and non-linear flow through porous media numerical simulation for low-permeability gas reservoir[J]. Journal of South-west Petroleum University, 2009, 31(2): 163-166.
- [10] 彭守建, 许江, 尹光志, 等. 基质收缩效应对含瓦斯煤渗流影响的实验分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2012, 35(5): 109-114.  
Peng Shoujian, Xu Jiang, Yin Guangzhi, et al. Experimental analysis of matrix shrinkage's influence on mechanical permeability of gas-filled coal[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2012, 35(5): 109-114.
- [11] 杨建, 康毅力, 李前贵, 等. 致密砂岩气藏微观结构及渗流特征[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 229-235.  
Yang Jian, Kang Yili, Li Qiangui, et al. Characters of micro-structure and percolation in tight sandstone gas reservoirs[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 229-235.
- [12] 朱益华, 陶果, 方伟, 等. 低渗气藏中气体渗流 Klinkenberg 效应研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1591-1596.  
Zhu Yihua, Tao Guo, Fang Wei, et al. Research progress of the Klinkenberg effect in tight gas reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1591-1596.
- [13] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 郝明强低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 44-47.  
Zhu Guangya, Liu Xiangui, Li Shutie, et al. A study of slippage effect of gas percolation in low permeability gas pools[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 44-47.
- [14] Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquid sand gases [J]. American Petroleum Institute Drilling and Production Practice, 1941, 3(2): 200-213.
- [15] Sampath K, Keighin C W. Factors affecting gas slippage in tight sandstones of cretaceous age in the Uinta Basin[J]. Journal of Petroleum Technology, 1982, 34(11): 2715-2720.
- [16] Kaluarachchi J J, Parker J C. Modeling multicomponent organic chemical transport in three fluid phase porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1990, 5: 349-374.
- [17] 王勇杰, 王昌杰, 高家碧. 低渗透多孔介质中气体滑脱行为的研究 [J]. 石油学报, 1995, 16(3): 101-105.  
Wang Yongjie, Wang Changjie, Gao Jiabi. A research of gas slip in low permeability porous media[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(3): 101-105.

(编辑 陈华姣)

## ·学术动态·



## 中国科协第96期“新观点新学说学术沙龙”助力 “可穿戴技术发展”

2014年11月6—7日,由中国科协主办、中国电子学会承办,主题为“可穿戴设备(技术)发展新潮流——主要特征、核心技术、发展趋势”的第96期“新观点新学说学术沙龙”在杭州举行。中国工程院院士俞梦孙、杭州电子科技大学副校长孙玲玲、中国医疗器械行业协会副秘书长管燕领衔组织本次沙龙。

来自高等学校、科研院所、企事业单位的40余位专家参加沙龙,围绕“可穿戴设备沙龙材料”、“智能手表现状和未来”、“电池在可穿戴产品中的应用”、“智能穿戴(硬件)产品的市场化挑战”、“开启移动大健康时代”、“移动医疗调查报告”、“产品差异化探讨——睡眠检测方法 & 改善建议”、“眼底图慢病检测云服务”、“物联平台介绍”等议题展开热烈讨论。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38560/16101603.html>。