

文章编号:0253-9993(2012)08-1348-06

多因素叠加作用下煤储层渗透率的动态变化规律

汪吉林^{1,2}, 秦 勇^{1,2}, 傅雪海^{1,2}

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院 江苏 徐州 221116; 2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室(中国矿业大学), 江苏 徐州 221116)

摘要:分析了煤储层渗透率的主要影响因素,讨论了有关黏性渗流的基本理论问题。在不同轴压、围压和气体压力梯度下,对山西晋城矿区原状无烟煤煤样进行了三维应力场的CH₄渗流实验,计算并分析了有效应力、煤基质收缩、气体滑脱效应等因素对渗透率的影响及其叠加作用的表现。认为吸附态的CH₄分子组成了煤储层孔-裂隙气体渗流的边界层,滑脱效应存在于边界层以外,煤储层渗透率的动态变化是有效应力、煤基质收缩效应和滑脱效应叠加作用的结果,渗透率在压力梯度0~0.1 MPa阶段衰减最为显著,滑脱效应对渗透率的贡献远小于基质收缩效应,且随着压力梯度的增大而几乎可以忽略。

关键词:煤储层;渗透率;叠加作用;影响因素;黏性渗流

中图分类号:P618.11;TD712.1 **文献标志码:**A

Dynamic changes laws of the coal reservoirs permeability under the superimposition of multi influential factors

WANG Ji-lin^{1,2}, QIN Yong^{1,2}, FU Xue-hai^{1,2}

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of CBM Resources and Reservoir Formation History, Ministry of Education (China University of Mining and Technology), Xuzhou 221116, China)

Abstract: The primary influential factors of coal reservoirs permeability were analyzed, and the basic theoretic problems about viscid seepage of coal reservoirs were discussed. In different conditions of axial compression, confining pressure and pressure gradient of gas, the seepage CH₄ experiments of some anthracite samples, which were picked from Jincheng mining area, Shanxi Province, were carried out in three-dimensional stress field. It was calculated and analyzed the factors of effective stress, coal matrix shrinkage and slippage effect of gas affect permeability, and how the actions of superimposition behave. It is considered that the boundary layer consists of molecules of CH₄ in adsorption state when gas permeating in pore-fissure of coal reservoirs. The slippage effect occurs out of the boundary layer. The dynamic changes of the coal reservoirs permeability are the superimposition of such influential factors as effective stress, coal matrix shrinkage and slippage effect. The permeability attenuates observably as the pressure gradient from 0 to 0.1 MPa. The magnitude of contribution what slippage effect does for permeability is far less than coal matrix shrinkage effect. The effect of slippage may be ignored when pressure gradient increases.

Key words: coal reservoirs; permeability; superimposition; influential factor; viscid seepage

煤储层是由宏观裂隙、显微裂隙和孔隙组成的三元孔、裂隙介质,孔隙是煤层气的主要储集场所,宏观裂隙是煤层气的运移通道,而显微裂隙则是沟通孔隙与裂隙的桥梁^[1]。裂隙系统是煤储层渗流的通道,

故割理方向与煤层气抽采效果关系密切^[2]。很多学者探讨了煤储层孔、裂隙的发育特征及其控制因素、形成机理、对产能的影响等^[3-6]。研究认为煤储层渗透率与地应力(埋深)、储层裂隙、储层压力和水文地

收稿日期:2011-09-05 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金重点基金资助项目(40730422);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2009CB219605);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010LKDZ07)

作者简介:汪吉林(1969—),男,安徽桐城人,副教授,博士。Tel:0516-83591011, E-mail:wjl_cumt@163.com

质条件等因素存在密切关系^[7-9]。近年来有关煤岩渗透率的实验研究不断深入,如三轴应力作用下煤岩/型煤的渗透率变化规律及温度的影响^[10-13];煤基质收缩对渗透率影响^[14];煤岩多相流的渗透性研究^[15-16];含瓦斯煤(型煤)的渗透性研究^[17-19];吸附作用对煤的渗透率影响^[20-22]等。傅雪海等还在渗透实验的基础上建立了有关数学模型,开展数值模拟,探讨了煤基质力学效应与煤储层渗透率耦合关系^[23-24]。

一般认为煤储层渗透率的动态变化主要与有效应力、煤基质收缩、气体滑脱效应等 3 个方面因素有关^[1],其动态变化的规律性在有关实验中得到证实,其规律性多在单因素条件下表现较为明显,但随着地应力、煤层气压力梯度等环境条件的改变,在多重影响因素叠加作用下,其动态变化过程更为复杂,也存在一些争议,尚需进一步研究。

(1) 关于非线性渗流。现有的煤层气渗流问题,基本上仍是基于达西定律,研究表明:低渗孔-裂隙介质的渗流呈非线性^[25],但是非线性渗流方程中的参数难以确定,不便于实际使用,所以在实践中仍宜采用基于达西定律的线性渗流,毕竟其非线性仅表现于低压力梯度段,整体上仍近似为达西流,其在渗透率动态变化规律分析中影响是很小的。

(2) 关于滑脱效应:1941 年 Klinkenberg 在实验中发现了气体在低渗介质渗流过程中存在滑脱效应^[26],并给出了考虑气体滑脱效应的气测渗透率(K_g)表达式,即

$$K_g = K_0(1 + b/p_m) \quad (1)$$

$$b = 4c\lambda p_m/r \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2\rho_m} \quad (3)$$

式中, K_0 为绝对渗透率; p_m 为实验进、出口平均压力; b 为与气体性质、孔隙结构有关的常数; c 为近似于 1 的比例常数; λ 为对应于平均压力 p_m 时的气体分子平均自由程; r 为介质孔隙半径; d 为气体分子直径; ρ_m 为气体分子数量密度。

有关研究探讨了煤储层 CH_4 渗流的滑脱效应特征^[27-29],但也有学者认为气体在岩石孔隙中的流动不存在滑脱效应,气测渗透率偏高和对压力依赖性的原因与气体渗流的非线性、气体的黏度和边界层等因素有关^[30]。

(3) 关于气体的黏度。在流体力学中,流体的黏性系数(黏度)有两个:动力黏性系数(即动力黏度 μ)和运动黏性系数(即运动黏度 γ),气体渗透率计算中引用的黏度是动力黏度(单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 或 $\text{mPa}\cdot\text{s}$)。

气体的动力黏度随温度升高而增大,不同温度下的 μ 可用 Sutherland 公式计算,即

$$\mu \approx \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \frac{T_0 + C}{T + C} \quad (4)$$

其中, μ_0 为温度 T_0 (273.15 K)下的动力黏度; C 取决于气体种类,称为 Sutherland 常数。此外实验证实,在压力不太高时(小于 10 MPa),压力对气体动力黏度影响很小,可以忽略^[31]。

(4) 关于边界层问题。流体渗流时,在固壁附近很薄的一层区域内,沿固壁的切向速度迅速下降为 0,这个薄层被称为边界层。边界层厚度定义有名义厚度和位移厚度之分:若 U_e 为外部势流区的切向速度,当边界层内的切向速度 $u = 0.99U_e$ 时,法向距离 BG (或 CE)即为名义厚度(δ);边界层的位移厚度(δ^*)按式(5)计算。

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) dy \quad (5)$$

其中, dy 为切向速度的法向微分;位移厚度可用线段 AB (或 CD)表示,它的取值应使三角形 ABF 与三角形 DEF 面积相等(图 1)^[32]。此外还有动量厚度的概念,不再讨论。

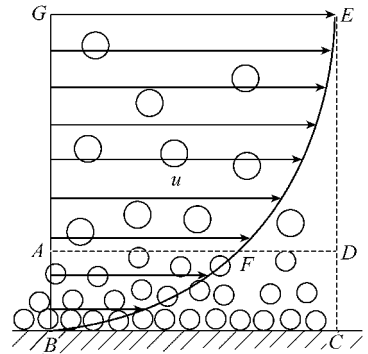


图 1 煤储层边界层结构示意图(根据文献[33]修改)

Fig. 1 Schematic diagram of boundary layer structure of coal reservoir(modify according to reference[33])

有文献认为滑脱效应不存在,其重要依据就是气体分子沿壁面滑移不符合边界层理论:若存在滑移,流体的速度梯度(剪切速率)将为无穷大,但这是不可能的^[30]。笔者认为这是一个佯谬:其一,煤层气分子完全可以以吸附态形式附着于煤储层孔-裂隙的壁面,实际上它的速度就是 0,远离壁面,气体分子的流速逐渐趋近于正常流速;其二,气体分子的滑移固然不是沿固态壁面发生,但是可以沿着临界层的壁面发生(图 1)。如此,则滑脱效应与边界层理论并不矛盾。

另外,边界层厚度与雷诺数的开方成反比^[32],而

雷诺数与气体平均流速、密度成正比,故气体压力梯度增大,则平均流速、密度增大,即雷诺数增大,而边界层厚度则减小。

1 实验原理及过程

1.1 实验目的及样品制备

在改变应力条件和气体压力梯度条件下,测试煤岩样品的 CH_4 渗透率,研究煤储层渗透率的动态变化规律。样品采集于山西晋城寺河煤矿西区 3 号煤层,采深 400 m 左右,为硬质无烟煤。井下采集大块煤样,实验室中按 $\phi 50 \text{ mm} \times$ 高 100 mm 标准圆柱进行加工,1~3 号煤样为垂直层面方向,4 号煤样为平行于层面方向。

1.2 测试过程

根据有关资料,寺河矿井下煤层瓦斯压力为 1~2 MPa,400 m 深的自重应力估算约为 10 MPa。为了观察不同应力、气体压力梯度条件下的渗透率变化,设计的实验方案为:

(1) 分 4,6,8,10 MPa 四种轴向应力条件,相应的围压为 2,3,4,5 MPa;

(2) 在每阶段应力环境条件下,分别施加 0.5,1,2,4 MPa 的 CH_4 气体压力,测试各级气压下的 CH_4 渗透率;

(3) 加载过程中,记录样品的应力-应变,测试完渗透率后,继续加载,测量应力-应变,直至样品破坏。

利用重庆大学研制的煤体三轴渗流试验机进行本项实验。实验中煤样侧壁用硅胶封闭,首先将试样通入 CH_4 气体,时间超过 1 h,直至流量稳定,以保证 CH_4 在孔-裂隙中完成吸附,然后分阶段开、闭阀门进行测试。

1.3 实验结果

根据达西定律推导出的气体渗透率(K_g) 计算公式^[33]为

$$K_g = \frac{2p_0 q_g \mu_g L}{A(p_1^2 - p_0^2)} \quad (6)$$

式中, p_0 为试样出口端气压(按 1 个标准大气压计); q_g 为气体流量; μ_g 为气体黏度, CH_4 黏度取值为 $1.08 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; L 为试样长度; A 为试样横断面积; p_1 为试样进口端气压。

根据前文基本问题的分析,压强对气体黏度的影响可以忽略,故计算中 CH_4 的黏度值不变。通过实验测试,得到各煤样在不同应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)、不同压力梯度(∇p)下的渗透率(表 1),将计算结果分别汇总,绘制出不同压力梯度下渗透率与应力差关系曲线

(图 2)和不同应力差下渗透率与压力梯度关系曲线(图 3)。

表 1 1 号试样渗透率测试结果

Table 1 Results of permeability testing of No. 1 sample

轴压/ MPa	($\sigma_1 - \sigma_3$)/ MPa	压力梯度/ ($\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1}$)	流量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透率/ (10^{-15} m^2)
4.11	2.11	0.040	1.467	0.077	2.083
4.11	2.11	0.091	2.367	0.124	1.494
4.11	2.11	0.192	7.133	0.374	2.133
6.18	3.18	0.040	1.300	0.068	1.845
6.18	3.18	0.091	1.800	0.094	1.136
6.18	3.18	0.192	4.033	0.211	1.205
6.18	3.18	0.293	9.883	0.518	1.935
8.25	4.24	0.040	1.217	0.064	1.727
8.24	4.24	0.091	1.517	0.080	0.957
8.24	4.24	0.192	2.767	0.145	0.827
8.25	4.25	0.394	12.033	0.631	1.752
10.29	5.29	0.040	1.183	0.062	1.678
10.30	5.30	0.091	1.367	0.072	0.861
10.30	5.30	0.192	2.167	0.114	0.647
10.56	5.56	0.395	6.383	0.335	0.928

2 实验结果分析

从实验结果可看出,煤样渗透率与应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)呈非线性相关关系(图 2),经拟合两者呈负指数相关(表 2),其机理为有效应力增大导致煤样裂隙趋于闭合,导致渗透率降低。

表 2 1 号试样渗透率与应力差拟合关系

Table 2 Fitting relationship of permeability and stress difference of No. 1 sample

压力梯度/ ($\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1}$)	拟合关系	相关系数 R^2
0.040	$K=0.822(\sigma_1 - \sigma_3)^{-0.24}$	0.987
0.091	$K=0.421(\sigma_1 - \sigma_3)^{-0.60}$	0.995
0.192	$K=0.531(\sigma_1 - \sigma_3)^{-1.30}$	0.997

渗透率与压力梯度也呈非线性关系,且更为明显,渗透率在压力梯度 0~0.1 MPa 阶段衰减最显著(图 3)。经拟合两者亦较符合负指数相关关系(表 3),其机理应为煤基质收缩效应和滑脱效应的叠加作用。

根据基质收缩效应机理,储层压力降低使得煤层气解吸,煤基质收缩而导致微裂隙张开,渗透率增大,而实验中随着压力梯度增大,则吸附作用增强,煤基质膨胀而导致微裂隙闭合,为基质收缩效应的逆过程,故渗透率降低。

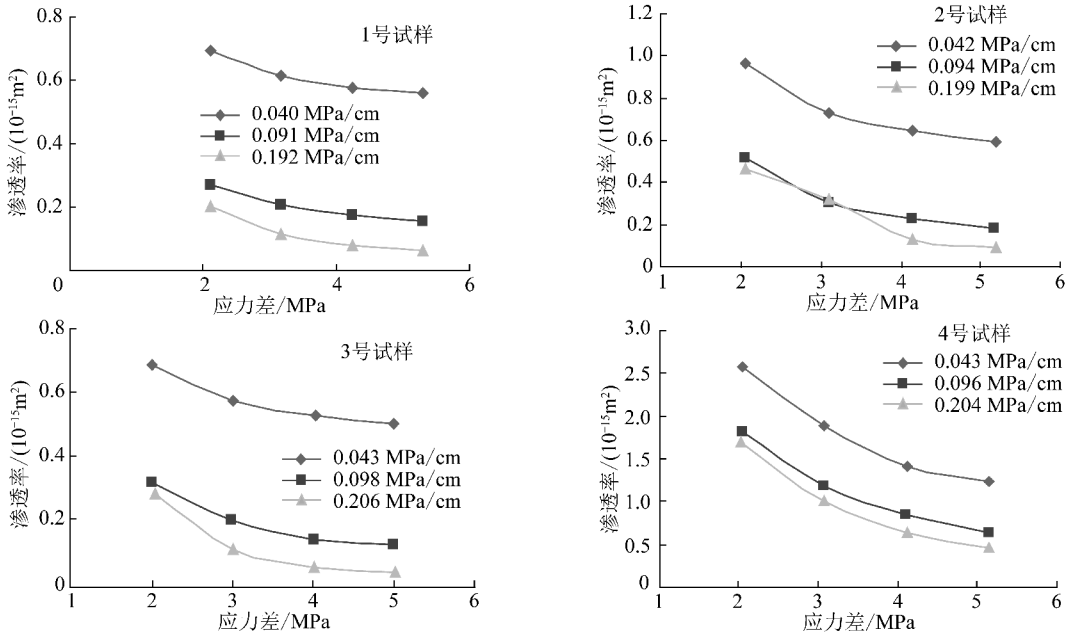


图 2 不同压力梯度下渗透率与应力差关系曲线

Fig. 2 Relation curves between permeability and stress difference in different pressure gradient

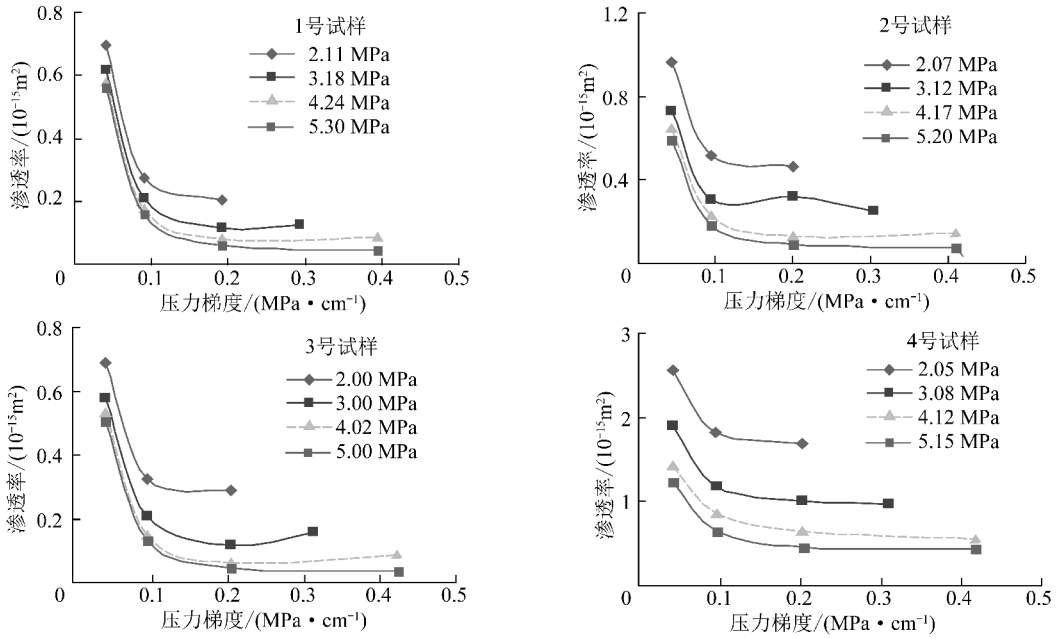


图 3 不同应力差下渗透率与压力梯度关系曲线

Fig. 3 Relation curves between permeability and pressure gradient in different stress difference

表 3 1 号试样渗透率与压力梯度拟合关系

Table 3 Fitting relationship between permeability and pressure gradient of No. 1 sample

$(\sigma_1 - \sigma_3) / \text{MPa}$	拟合关系	相关系数 R^2
2.11	$K = 0.044 \nabla p^{-0.83}$	0.935
3.18	$K = 0.031 \nabla p^{-0.87}$	0.890
4.24	$K = 0.025 \nabla p^{-0.88}$	0.850
5.30	$K = 0.011 \nabla p^{-1.17}$	0.944

根据式(1)~(3)可以计算有关滑脱效应的参数,因实验是在室温下进行,故有关 CH_4 的物理参数均取其常温下的数值,煤孔隙平均半径可由压汞实验获得,计算结果显示 b/p_m 随着压力梯度的增大而显著减小(表 4)。滑脱效应应该促使渗透率增加,但图 3 和表 4 的结果说明滑脱效应对渗透率的贡献远小于基质收缩效应(或吸附作用影响),且随着压力梯度的增大而几乎可以忽略。

此外,实验中垂直于煤层层面的煤样渗透率一般

表4 滑脱效应参数计算结果

Table 4 Calculation results of slippage effect parameters

p_m / MPa	分子自由 程 λ /nm	煤孔隙半 径 r /nm	b	b/p_m
0.1	58.90	50	0.471 1	4.711
1	5.97	50	0.477 3	0.477
2	2.98	50	0.477 3	0.239
4	1.49	50	0.477 3	0.119

不超过 10^{-15} m^2 , 而平行于煤层层面的煤样渗透率则明显大于垂直于层面的渗透率, 在较低应力差和较低压力梯度下相差达数倍, 这种现象反映了煤储层渗透率的各向异性, 应与微裂隙的发育规律有关。

3 结 论

(1) 渗透率计算中, 压力梯度对 CH_4 黏度的影响可以忽略不计, 吸附态的 CH_4 分子组成了煤储层孔-裂隙中气体渗流时的边界层, 滑脱效应存在于边界层以外。

(2) 煤储层渗透率与应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 呈负指数相关关系, 其机理为有效应力增大导致煤储层微裂隙趋于闭合, 导致渗透率降低。

(3) 渗透率与压力梯度也呈负指数相关关系, 其机理应为煤基质收缩效应和滑脱效应的叠加作用, 渗透率在压力梯度 $0 \sim 0.1 \text{ MPa}$ 阶段衰减最为显著。

(4) 随着压力梯度增大, CH_4 吸附作用增强, 煤基质膨胀而导致微裂隙闭合, 渗透率降低, 为基质收缩效应的逆过程。滑脱效应对渗透率的贡献远小于基质收缩效应(或吸附作用影响), 且随着压力梯度的增大而几乎可以忽略。

参考文献:

- [1] 傅雪海, 秦 勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 10-158.
- [2] 陈金刚, 秦 勇, 宋全友, 等. 割理方向与煤层气抽放效果的关系及预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 223-226.
Chen Jingang, Qin Yong, Song Quanyou, et al. Coupling relationship between direction of coalbed cleat and methane drainage effect and its prediction model[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(3): 223-226.
- [3] 王生维, 侯光久, 张 明, 等. 晋城成庄煤层大裂隙系统研究[J]. 科学通报, 2005, 50(S1): 38-44.
Wang Shengwei, Hou Guangjiu, Zhang Ming, et al. Research on the coalbed macro-fracture system in Chengzhuang Mine of Jincheng[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(S1): 38-44.
- [4] 姚艳斌, 刘大猛, 黄文辉, 等. 两淮煤田煤储层孔-裂隙系统与煤层气产出性能研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 163-168.
Yao Yanbin, Liu Dameng, Huang Wenhui, et al. Research on the

pore-fractures system properties of coalbed methane reservoirs and recovery in Huainan and Huaibei coal-fields[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 163-168.

- [5] Wilfrido Solano-Acosta, Maria Mastalerz, Arndt Schimmelmann. Cleats and their relation to geologic lineaments and coalbed methane potential in Pennsylvanian coals in Indiana[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 72: 187-208.
- [6] Li G H. A study on the relationship between anthracite fissure-pore system and the production of coalbed methane in Jincheng[A]. Advances on CBM Reservoir and Developing Engineering[C]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2009: 94-99.
- [7] 叶建平, 史保生, 张春才. 中国煤储层渗透性及其主要影响因素[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 118-122.
Ye Jianping, Shi Baosheng, Zhang Chuncai. Coal reservoir permeability and its controlled factors in China[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(2): 118-122.
- [8] 傅雪海, 秦 勇, 李贵中. 沁水盆地中南部煤储层渗透率主控因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(3): 16-19.
Fu Xuehai, Qin Yong, Li Guizhong. An analysis on the principal control factor of coal reservoir permeability in central and southern Qinshui Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(3): 16-19.
- [9] 薄冬梅, 赵永军, 姜 林. 煤储层渗透性研究方法及其主要影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1): 18-21.
Bo Dongmei, Zhao Yongjun, Jiang Lin. Research method and main influencing factors of coal reservoir permeability[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 18-21.
- [10] 孙培德, 凌志仪. 三轴应力作用下煤渗透率变化规律实验[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(S1): 28-31.
Sun Peide, Ling Zhiyi. Experimental study of the law for permeability of coal under action of 3-Triaxial compression[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2000, 23(S1): 28-31.
- [11] Yang Dong, Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing. The constitute law of gas seepage in rock fractures undergoing three-dimensional stress[J]. Transport in Porous Media, 2006, 63(3): 463-472.
- [12] 李志强, 鲜学福. 煤体渗透率随温度和应力变化的实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(S1): 156-159.
Li Zhiqiang, Xian Xuefu. Study on experiment of coal permeability with temperature and stress changing[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28(S1): 156-159.
- [13] 李祥春, 聂百胜, 刘芳彬, 等. 三轴应力作用下煤体渗流规律实验[J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 19-21.
Li Xiangchun, Nie Baisheng, Liu Fangbin, et al. An experimental study on seepage flow in coal under triaxial stress[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 19-21.
- [14] 傅雪海, 李大华, 秦 勇, 等. 煤基质收缩对渗透率影响的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 129-131.
Fu Xuehai, Li Dahua, Qin Yong, et al. Experimental research of influence of coal matrix shrinkage on permeability[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(2): 129-131.
- [15] 傅雪海, 秦 勇, 姜 波, 等. 山西沁水盆地中-南部煤储层渗透率物理模拟与数值模拟[J]. 地质科学, 2003, 38(2): 221-

- 229.
- Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. Physical and numerical simulations of permeability of coal reservoirs in central and southern part of the Qinshui Basin, Shanxi[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2003, 38(2):221-229.
- [16] 王锦山. 煤层气储层两相流渗透率试验研究[J]. *西安科技大学学报*, 2006, 26(1):24-26, 103.
- Wang Jinshan. Experimental research on permeability of double state flow in CBM reservoir[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2006, 26(1):24-26, 103.
- [17] 李树刚, 张天军, 陈占清, 等. 高瓦斯煤的渗透性试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2008, 36(4):8-11.
- Li Shugang, Zhang Tianjun, Chen Zhanqing, et al. Experiment research on the permeability of gas-rich coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2008, 36(4):8-11.
- [18] 尹光志, 李晓泉, 赵洪宝, 等. 地应力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12):2557-2561.
- Yin Guangzhi, Li Xiaoquan, Zhao Hongbao, et al. Experimental research on effect of geostress on outburst coal's gas seepage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12):2557-2561.
- [19] 胡国忠, 王宏图, 范晓刚, 等. 低渗透突出煤的瓦斯渗流规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(12):2527-2534.
- Hu Guozhong, Wang Hongtu, Fan Xiaogang, et al. Investigation on law of methane gas flow in coal with coal-gas outburst hazard and low permeability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12):2527-2534.
- [20] Gu F, Chalaturmyk R J. Numerical simulation of stress and strain due to gas sorption/desorption and their effects on in situ permeability of coalbeds[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2006, 45(10):52-62.
- [21] 隆清明, 赵旭生, 孙东玲, 等. 吸附作用对煤的渗透率影响规律实验研究[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(9):1030-1034.
- Long Qingming, Zhao Xusheng, Sun Dongling, et al. Experimental study on coal permeability by adsorption[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(9):1030-1034.
- [22] 李祥春, 郭勇义, 吴世跃. 煤吸附膨胀变形与孔隙率、渗透率关系的分析[J]. *太原理工大学学报*, 2005, 36(3):264-266.
- Li Xiangchun, Guo Yongyi, Wu Shiyue. Analysis of the relation of porosity, permeability and swelling deformation of coal[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2005, 36(3):264-266.
- [23] 傅雪海, 秦勇, 姜波, 等. 煤割理压缩实验及渗透率数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(6):573-577.
- Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. Compress experiment of coal cleat and mathematical simulation of coal reservoir permeability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(6):573-577.
- [24] 傅雪海, 彭金宁. 铁法长焰煤储层煤层气三级渗流数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(5):494-498.
- Fu Xuehai, Peng Jinning. Numerical simulation of three level seepage of coalbed methane on flame coal reservoirs in Tiefa basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(5):494-498.
- [25] 邓英尔, 谢和平, 黄润秋, 等. 低渗透孔隙-裂隙介质气体非线性渗流运动方程[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(4):1-4.
- Deng Yinger, Xie Heping, Huang Runqiu, et al. Law of gas nonlinear flow in low permeability pore-fissure media[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2006, 38(4):1-4.
- [26] Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquids and gases[A]. *API Drilling and Production Practice[C]*. 1941:200-213.
- [27] 罗瑞兰, 程林松, 朱华银, 等. 研究低渗气藏气体滑脱效应需注意的问题[J]. *天然气工业*, 2007, 27(4):92-94.
- Luo Ruilan, Cheng Linsong, Zhu Huayin, et al. Problems on the study of slippage effect in low-permeability gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(4):92-94.
- [28] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 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.
- [29] 覃建华, 肖晓春, 潘一山. 滑脱效应影响的低渗储层煤层气运移解析分析[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(4):619-622.
- Tan Jianhua, Xiao Xiaochun, Pan Yishan. Analytical solution of coal-bed methane migration with slippage effects in hypotonic reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(4):619-622.
- [30] 李传亮. 滑脱效应其实并不存在[J]. *天然气工业*, 2007, 27(10):85-87.
- [31] 王保国, 刘淑艳, 黄伟光. 气体动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005:42-43.
- [32] 朱克勤, 许春晓. 黏性流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2009:94-99.
- [33] DULL IEN F A L. 多孔介质-流体渗移与孔隙结构[M]. 北京:石油工业出版社, 1990:48-49.