

文章编号:1000-582X(2011)04-058-04

阜新盆地煤层气渗流规律实验

张先敏¹,冯其红¹,陈东²,黄勇²

(1. 中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266555;2. 中联煤层气国家工程研究中心,北京 100071)

摘要:以阜新盆地王营煤矿采集加工的原煤煤样为研究对象,利用 3 轴渗透仪,对煤样的渗透率和有效应力之间的变化关系以及煤样中甲烷渗流规律进行了实验研究。实验结果表明,煤样渗透率具有应力敏感性,渗透率随有效应力的增加呈非线性递减关系,具有负指数规律,这与前人的研究结果吻合较好;在不同围压、含水率情况下,实验得到的甲烷渗流规律曲线具有明显的非线性特征,真实地反映了实验过程中煤体变形对甲烷渗流的作用。考虑有效应力对煤体变形的影响,建立了描述煤层甲烷非线性渗流特征的运动方程,且所建立的运动方程与实验数据具有很好的吻合性,拟合相关系数高达 99.6% 以上,说明实验方法和建立的运动方程是合理的。

关键词:煤层气;渗流;有效应力;压力梯度

中图分类号:TE312

文献标志码:A

Experimental study of coalbed methane seepage in fuxin basin

ZHANG Xian-min¹, FENG Qi-hong¹, CHEN Dong², HUANG Yong²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong P. R. China;
2. National Engineering Research Center China United Coalbed Methane Corporation Limited, Beijing 100071, P. R. China)

Abstract: Taking raw coal samples collected from the wangying colliery in Fuxin basin as the research object, the experiment of coalbed methane seepage law is conducted by the triaxial osmoscope and the relationship between effective stress and coal permeability is presented. The experiment results indicate that the coal permeability is of stress sensitivity and tended to decline in exponent with the increment of effective stress, which is consistent with the former research results. The seepage flow curves from experiments demonstrate the nonlinear characteristics under different confining pressures and moisture contents, and it accurately reflecte the effect of coal body deformation on the coalbed methane seepage flow in the experimental process. Therefore considering the influence of effective stress on the coal body deformation, a new motion equation for the nonlinear percolation characteristic of coalbed methane is established. Moreover, the motion equation is correlated well with the experimental data, and the fitting correlation coefficients are above 99.6%.

Key words: coalbed methane; seepage; effective stress; pressure gradient

目前,国内外学者在应力对煤样渗透率影响方面进行了大量研究工作。Sommerton 等^[1]研究了应力

对块状烟煤试样渗透率的影响;随后, Harpalani 和 McPherson^[2]、Durucan 和 Edwards 等^[3]分别进行了应

收稿日期:2010-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40974056);国家 973 计划资助项目(2009219606);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(10CX04011A;09CX05004A)

作者简介:张先敏(1980-),男,中国石油大学(华东)博士,主要从事油气渗流理论及其应用方向研究,

(Tel)13616470018;(E-mail)xianmzh@gmail.com。

力状态下煤样渗透率的变化规律实验研究,发现煤样渗透率通常对应力非常敏感。McKee等^[4]开展了煤体渗透率与有效应力之间的理论关系研究;Enever和Henning^[5]得到了煤体有效应力对渗透率的影响规律。在国内,林柏泉和周世宁^[6]在围压不变的前提下研究了孔隙压力与渗透率以及煤样变形间的关系;谭学术^[7]、姜德义^[8]等通过成型煤样的渗透实验得到了煤样渗透率与有效应力之间的关系;赵阳升等^[9-10]揭示了煤的渗透系数随孔隙压力和体积应力变化的关系;唐巨鹏等^[11]给出了有效应力与煤样渗透率间的关系;李志强等^[12]进行了不同温度、不同应力条件下的煤体渗流实验。以上研究主要集中于应力对煤样渗透性的影响方面,尹光志等^[13-14]对突出煤试样中甲烷的渗透特性进行了试验研究,得出了甲烷渗流速度与孔隙压力、轴压的关系式;李祥春等^[15]通过实验研究了应力和温度影响下煤体的渗流规律。通过阜新原煤煤样的甲烷渗流实验研究,考虑煤岩变形和甲烷渗流之间的相互作用,提出了描述煤层甲烷非线性渗流特征的运动方程。

1 实验设备及方法

实验采用辽宁工程技术大学工程力学研究所研制开发的温控三轴煤层气解吸渗透仪(见图1),试验煤样取自于辽宁省阜新矿业集团王营煤矿,煤种以长焰煤为主。将采集煤样筛选,选取具有水平层理的煤样在实验室内加工成50 mm×50 mm×100 mm规格的标准试件,实验气体采用纯度为99.99%的甲烷气。

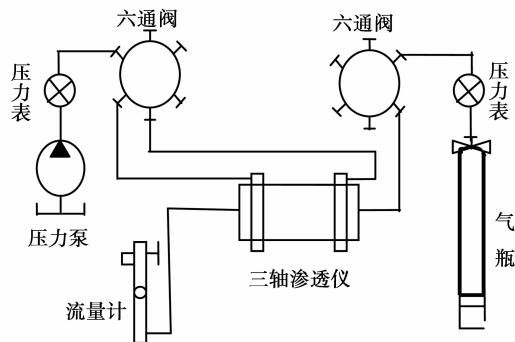


图1 3轴应力下煤层气渗透实验装置示意图

实验方法:选取制作好的煤样,称重后将其通过夹持器固定,并用热缩管密封后置入真3轴渗透仪,密闭仪器,通过温控传感器系统对煤样加温至设定值后保持温度恒定,利用手动试压泵对煤样施加轴压、围压至设定值后,开启储能罐阀门使压力保持稳定;开启高压甲烷气瓶进气阀门,通过高压调节阀调节入口压力至设定值后,关闭出气口阀门,连续通入甲烷气体12 h,此时近似认为煤样吸附已经平衡。

打开出气口阀门,待出口气体流量趋于稳定状态,读取流量计中气体流量值。进行不同含水率条件下煤层甲烷渗流规律实验时,将煤样称重后浸入盛有清水的烧杯中,待吸取一定量的水后将煤样取出,再次称重并计算煤样含水率,然后按照前述实验步骤进行实验研究。为了保证实验过程中煤样和热缩管之间的密封,孔隙压力最大值必须低于给定围压值。

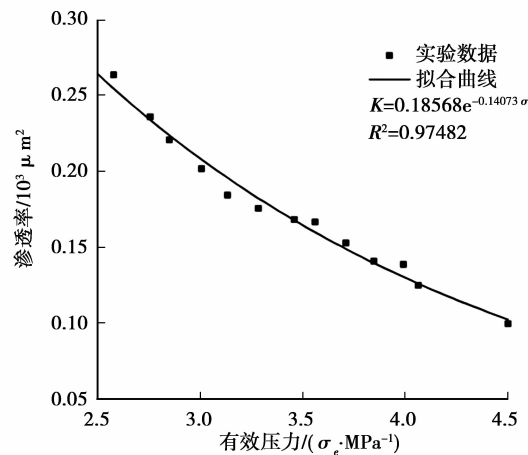
2 实验结果及分析

2.1 有效应力对煤层气渗流规律的影响

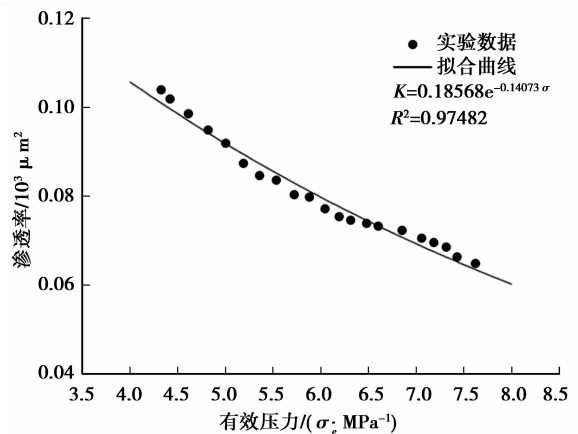
在恒温条件下,测定了围压和轴压为5 MPa、8.5 MPa条件下煤样渗透率与有效应力的关系。基于实验得出的不同孔隙压力下的流量数据,代入式(1)即可计算煤样渗透率,并得到渗透率随有效应力的变化曲线如图2所示

$$K = \frac{2p_a q_L \mu_L L}{A(p_1^2 - p_2^2)}, \quad (1)$$

式中: K 为煤样渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$); p_a 为大气压力(MPa); p_1 为煤样入口端压力(MPa); p_2 为煤样出口端压力,取0.1 MPa; L 为煤样长度(m); q_L 为标准状态下流体流量(m^3/s); μ_L 为气体动力粘度($\text{mPa}\cdot\text{s}$); A 为煤样截面积(m^2)。



(a) 围压5 MPa



(b) 围压8.5 MPa

图2 渗透率与有效应力关系曲线图

由于实验加载过程中,有效应力不断减小,使得孔隙结构变形得到部分恢复。由图 2 可知,渗透率随着有效应力的增大而减小,其关系曲线呈负指数递减变化趋势,经回归拟合得到关系方程为

$$K = ae^{-b\sigma_e}, \quad (2)$$

式中: a 、 b 分别为拟合系数且均大于 0; σ_e 为有效应力(MPa)。

通过对实验数据的整理分析后,得到渗流速度与压力梯度的关系如图 3 所示。由图 3 可知,关系曲线具有非常明显的非线性特征。分析其原因可能为:在围压和轴压保持不变的情况下,随着入口端压力的增加,孔隙压力增大,煤样所受有效应力减小,煤体内部的裂缝和孔隙闭合减少,同时,煤样两端的压差也增大,使得甲烷渗透的驱动力加大,甲烷渗流速度在煤体变形作用下呈现非线性增加。因此,提出如下描述煤层甲烷非线性渗流规律的运动方程

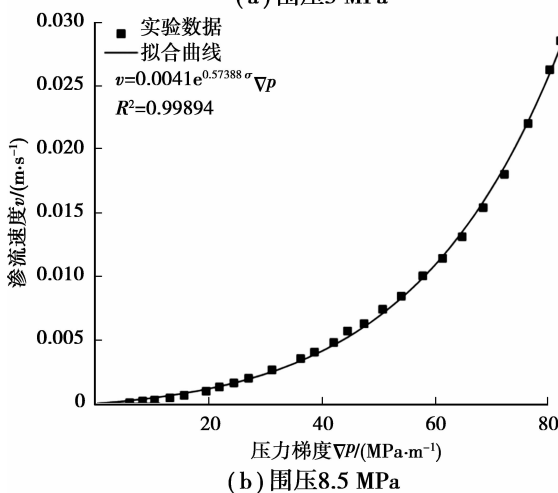
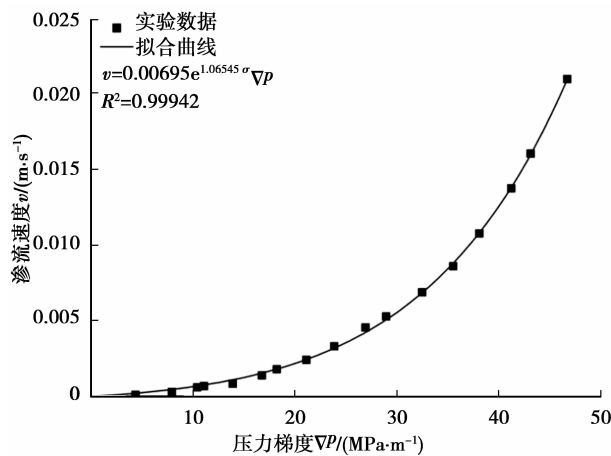


图 3 不同围压情况下甲烷非线性渗流特征曲线

$$v = a_1 e^{-b_1 \sigma_e} \nabla p, \quad (3)$$

式中, v 为渗流速度(m/s); ∇p 为压力梯度(MPa/m); σ_e 为有效应力(MPa); a_1 、 b_1 分别为由实验确定的参数。当 $a_1 = K/\mu$, $b_1 = 0$ 时,即为达西定

律。采用式(3)对实验结果进行了拟合,拟合曲线与实验结果吻合很好,能很好地描述煤层甲烷非线性渗流的全过程。

2.2 含水率对煤层气渗流规律的影响

选取煤样,测量质量和尺寸后将其浸入清水中,并在煤样吸入一定量的水分后取出,量取质量,计算煤样含水率,之后用夹持器将煤样固定后,用热缩管密封,装入真三轴渗透仪,进行流量测定。实验完成后,取出煤样,去除热缩管,将煤样再次浸入清水中,测算煤样含水率,重复上述实验步骤,直至实验结束。保持围压相同,通入一定压力的甲烷气体,进行不同含水率(0.446%,0.603%和0.830%)条件下煤样甲烷渗流规律研究,整理数据后得到不同含水率条件下煤样的渗流曲线如图 4。

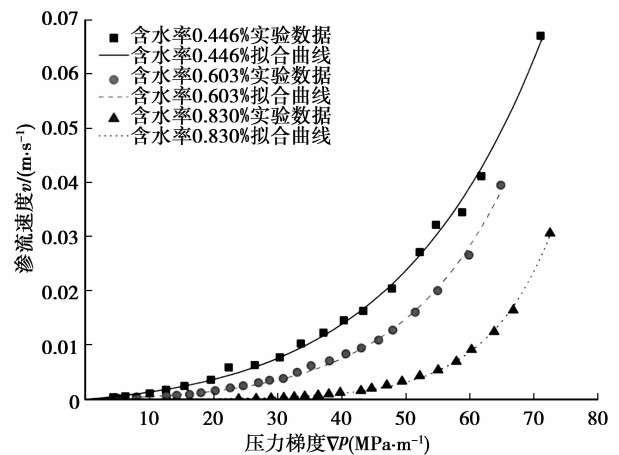


图 4 不同含水率条件下甲烷非线性渗流特征曲线

从图 4 中可以看出,在围压、轴压一定的情况下,不同含水率条件下甲烷渗流速度与压力梯度仍然呈明显的非线性关系,煤样含水率对甲烷渗流速度的影响明显。相同压力梯度作用下,随着含水率的增加,甲烷渗流速度呈下降趋势,说明水的存在使得煤样的有效渗透率减小。对实验结果进行整理分析,采用式(3)拟合得到不同含水率情况下甲烷渗流速度 v 与压力梯度 ∇p 的关系拟合方程以及相关系数如表 1 所示。

表 1 拟合方程及相关系数

含水率/%	拟合方程	R^2
0.446	$v = 0.00110e^{0.62164\sigma_e} \nabla p$	0.9967
0.603	$v = 0.00101e^{0.90502\sigma_e} \nabla p$	0.9970
0.830	$v = 0.00058e^{1.64714\sigma_e} \nabla p$	0.9988

由表 1 可以得出,采用式(3)拟合实验数据的相关系数很高,进一步说明所建立运动方程的合理性。

3 结 论

对阜新盆地原煤煤样在不同围压、含水率情况下的渗流规律进行了实验研究,主要结论如下:

1)煤样渗透率与有效应力之间的变化曲线呈负指数规律,在围压一定的情况下,甲烷渗流速度与压力梯度呈明显的非线性关系,建立了二者之间的关系方程,且所建立的运动方程与实验数据具有很好的吻合性。

2)煤样在不同含水率条件下的渗流实验表明,在围压一定的情况下,煤样含水率对甲烷渗流速度的影响明显,且随着含水率的增加,甲烷渗流速度呈下降趋势。不同围压、含水率情况下,所建立的运动方程与实验数据之间的拟合相关系数高达99.6%以上。

参考文献:

- [1] SOMERTON W H, SOYLEMEZOGLU I M and DUDLEY R C. Effect of stress on permeability of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geological Abstracts, 1975, 12:129-145.
- [2] HARPALANI S, MCPHERSON M J. Effect of stress on permeability of coal[C]. Proceedings of the 26th US Symposium on Rock Mechanics, 1985:831-839.
- [3] DURUCAN S, EDWARDS J S. The effects of stress and fracturing on permeability of coal[J]. Mining Science and Technology, 1986, 3: 205-216.
- [4] MCKEE C R, BUMB A C and KOEING R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal[C]. Proceedings of the 1987 Coalbed Methane Symposium, 1987: 183-193.
- [5] ENEVER J R E, HENNING A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir model[C]// Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium. [S. l.]:IEEE, 1997: 13-22.
- [6] 林柏泉,周世宁. 煤样瓦斯渗透率的实验研究[J]. 中国矿业学院学报, 1987, 16(1): 21-28.
LIN BAI-QUAN, ZHOU SHI-NING. Experimental investigation on the permeability of the coal samples containing methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1987, 16(1): 21-28.
- [7] 谭学术,鲜学福,张广洋,等. 煤的渗透性研究[J]. 西安科技学院学报, 1994, 1: 22-25.
TAN XUE-SHU, XIAN XUE-FU, ZHANG GUANG-YANG, et al. Research on the permeability of coal[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1994, 1: 22-25.
- [8] 姜德义,张广洋,胡耀华,等. 有效应力对煤层气渗透率影响的研究[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 1997, 20(5): 22-25.
JIANG DE-YI, ZHANG GUANG-YANG, HU YAO-HUA, et al. Study on affection to permeability of gas of coal layers by effective stress [J]. Journal of Chongqing university: natural science edition, 1997, 20(5): 22-25.
- [9] 靳钟铭,赵阳升,贺军,等. 含瓦斯煤层力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 271-279.
JIN ZHONG-MING, ZHAO YANG-SHENG, HE JUN, et al. An experimental study on the mechanical properties of gas-bearing coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(3): 271-279.
- [10] 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实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651-653.
ZHAO YANG-SHENG, HU YAO-QING, YANG DONG, et al. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3-D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651-653.
- [11] 唐巨鹏,潘一山,李成全,等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1563-1568.
TANG JU-PENG, PAN YI-SHAN, LI CHENG-QUAN, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1563-1568.
- [12] 李志强,鲜学福,隆晴明. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 523-527.
LI ZHI-QIANG, XIAN XUE-FU, LONG QING-MING. Experiment study of coal permeability under different temperature and Stress[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4): 523-527.
- [13] 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 GUANG-ZHI, LI XIAO-QUAN, ZHAO HONG-BAO, et al. Experimental research on effect of geostress on outburst coal's seepage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2557-2561.
- [14] 尹光志,李小双,赵洪宝,等. 瓦斯压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, 2009, 28(4): 697-702.
YIN GUANG-ZHI, LI XIAO-SHUANG, ZHAO HONG-BAO, et al. Experimental research on effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 697-702.
- [15] 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 XIANG-CHUN, NIE BAI-SHENG, LIU FANG-BIN, et al. An experimental study on seepage flow in coal under triaxial stress [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 19-21.