

文章编号:1000-582X(2009)03-0303-05

煤样渗透率对有效应力敏感性实验分析

彭守建,许江,陶云奇,程明俊

(重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆400030)

摘要:研究煤样渗透率对有效应力的敏感性。实验结果表明,在低有效应力水平下,煤样渗透率随着有效应力的增加而迅速减小,其变化规律符合负指数函数关系。由于煤层渗透率的影响因素比较复杂,定义了煤样渗透率对有效应力的敏感性系数,从而将影响因素进行归一化处理。根据渗透实验结果,拟合得到敏感系数与有效应力之间的幂函数关系,该敏感系数反映出煤样渗透率随有效应力的变化趋势。最后推导出基于敏感系数的煤样渗透率与有效应力的函数关系式。

关键词:有效应力;渗透率;敏感系数

中图分类号:TD713

文献标志码:A

Coefficient of sensitiveness between permeability and effective pressure of coal samples

PENG Shou-jian, XU Jiang, TAO Yun-qi, CHENG Ming-jun

(Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: A study of the coefficient of sensitiveness between permeability and effective pressure of coal samples is conducted based on experimentation and analysis. Test results indicate that the permeability of coal samples drops rapidly as the effective pressure increases under a low effective pressure level. The variation relationship between them can be described by an exponential equation. The coupling mechanism of seepage in coal beds has not been completely made clear so far, and the coupling factors affecting the permeability of coal samples are too complex to describe. The coefficient of sensitiveness between the permeability of coal samples and effective pressure is defined accordingly so as to normalize these factors. It is shown that the variation relationship between the coefficient and the effective pressure can be described by a power function. Such a coefficient can evaluate well the changing trend of the permeability of coal samples related to the effective pressure. The between coal sample permeability and the effective pressure is deduced based on the coefficient of sensitiveness.

Key words: pressure effects; mechanical permeability; coefficient of sensitiveness

煤是一种孔裂隙结构的岩石,煤层瓦斯渗流特性及运移规律除与煤体本身的结构、煤质等因素有

关以外,还受到地球物理场(通常包括地应力场、地温场和地电场)等多种因素的影响。在矿井开采过

收稿日期:2008-11-13

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50534080);重庆市科技攻关计划重大资助项目(CSCT,2006AA7002)

作者简介:彭守建(1983-),男,重庆大学博士研究生,主要从事煤与瓦斯突出灾害预测及控制研究。

许江(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65111236;(E-mail)jiangxu@cqu.edu.cn。

程中,瓦斯渗流场与煤体应力场的耦合作用普遍存在,尤其是在危害巨大的煤与瓦斯突出现象中流固两场耦合的作用显著。

近年来,流固耦合成为了渗流力学研究领域的热点。自 Biot^[1]提出了有效应力与渗透场之间关系以来,国内外学者在应力场对煤岩体渗透性影响方面相继开展了一系列的研究:在国外,研究者通过实验发现应力对煤体渗透性的影响显著,结合实验数据及理论分析得到了有效应力与煤岩体渗透率之间的耦合关系式^[2-8];在国内,林柏泉和周世宁^[9]较早地进行了模拟地应力环境下煤样瓦斯的渗透率实验;此后,学者们通过对含瓦斯煤体有效应力的分析,实验研究了三轴应力条件下及有效应力下煤的渗透性,相应得到了应力与煤的渗透率之间的关系式^[9-16]。

然而,由于煤层所处地质环境复杂,其渗透率影响因素多样性显著,目前还没有形成一个被公认的煤层渗透率与有效应力的函数关系式。拟通过实验研究,由所定义的煤样渗透率对有效应力的敏感性系数,将影响因素进行归一化处理,从而推导基于敏感性系数的煤样渗透率与有效应力的函数关系式。

1 渗透实验

1.1 煤样采集与制作

实验所用煤样分别取自重庆市能源投资集团公司松藻煤电公司打通一矿 8 号煤层及其石壕矿 8 号煤层以及平顶山煤业集团一矿戊 8 煤层,各煤样煤质工业分析结果参见表 1。

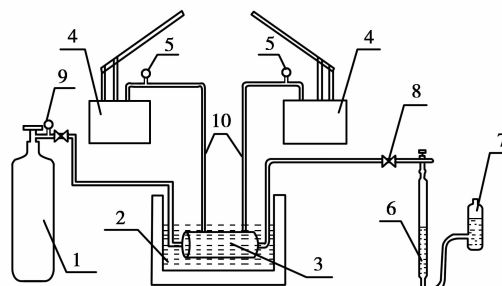
表 1 实验煤样的基本物理参数

| 煤样 | $M_{ad}/\%$ | $A_d/\%$ | $V_{daf}/\%$ | 型煤体积密度 $\rho/(g \cdot mm^{-3})$ |
|----|-------------|----------|--------------|------------------------------------|
| Y1 | 1.66 | 20.66 | 8.71 | 1.27×10^{-3} |
| Y2 | 0.53 | 19.33 | 10.02 | 1.14×10^{-3} |
| Y3 | 0.58 | 19.92 | 30.92 | 1.41×10^{-3} |

由于原煤样加工比较困难,即使能制成样品也是煤层中的个别硬块,不能完全代表实际的煤层特征,而成型煤样与原煤样的瓦斯渗透率变化规律却具有较好的一致性。因此,采用成型煤样来模拟真实煤层。具体加工程序如下,首先将原煤粉碎,并筛选介于 0.18~0.25 mm 的煤粉;其次添加适量水分,在 200 t 材料试验机上用 100 MPa 的压力压制成型,最后将成型煤样在 80 °C 下烘干 6 h,待冷却后置于干燥皿内备用。成型煤样规格为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \pm 2.5 \text{ mm}$ 。

1.2 实验设备

实验所用装置为煤炭科学研究总院重庆研究院研制的三轴渗透装置,该装置可以产生最大围压 25 MPa 以及最大孔隙压力 6 MPa,图 1 具体给出了其工作原理示意图及实物照片。



1.高压瓦斯瓶; 2.恒温水槽; 3.三轴渗透仪; 4.手动液压泵; 5.油压表; 6.玻璃量管; 7.水准瓶; 8.阀门; 9.减压阀; 10.液接管。



(b)

图 1 三维应力条件下煤样渗透实验装置

1.3 实验方法

实验中,充分考虑外加围压及瓦斯压力的作用,以有效应力为变量,在瓦斯压力一定的情况下,通过改变轴压和围压,来测试不同有效应力条件下煤的渗透率,再根据实验结果建立煤样渗透率与有效应力之间的函数关系式。

实验时,平均有效应力由 1、2、3、4、5 和 6 MPa 逐级加载,温度控制在 30 °C。具体实验步骤如下: 1)先调节恒温水槽至设定值,再将三轴渗透仪置入水槽,略加轴压将试件压住,然后逐级由低至高施加轴压与围压,并在此过程中始终保持轴压大于围压,围压大于瓦斯压力,初次实验时应将煤样连续抽真空 1 h; 2)待煤样吸附平衡后,打开阀门,在瓦斯气体流量稳定后,开始测定流量并记录数据。测定完毕后即加载下一级应力,应力加载速率控制在 0.2 MPa/s 左右。

2 煤样渗透率与有效应力的关系

已有研究成果表明^[11-13],有效应力是导致煤体

变形的重要因素,在加卸载过程中,有效应力与渗透率的变化之间存在明显的耦合作用。一般而言,有效应力是指作用于煤层的地应力与其存在于孔隙或裂隙中的流体压力之差,实验的有效应力采用平均有效应力来描述,即

$$\sigma_e = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_r) - \frac{1}{2}(p_1 + p_2), \quad (1)$$

式中: p_1 和 p_2 分别为煤样进口端与出口端的瓦斯压力(MPa),实验中 p_2 取0.1 MPa; σ_a 为轴向压力(MPa); σ_r 为环向压力(MPa)。

根据表2的实验数据,可拟合得到煤样渗透率与有效应力之间的关系,如表3所示,其关系曲线则如图2所示。

表2 实验结果

| 有效应力 | 煤样 Y1 渗透率/mD | 煤样 Y2 渗透率/mD | 煤样 Y3 渗透率/mD |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 0.86 | 8.71 | 3.17 |
| 2 | 0.73 | 7.83 | 2.69 |
| 3 | 0.65 | 7.08 | 2.41 |
| 4 | 0.59 | 6.52 | 2.12 |
| 5 | 0.54 | 6.03 | 1.97 |
| 6 | 0.50 | 5.65 | 1.75 |

表3 渗透率与有效应力的拟合方程

| 煤样 | $K-\sigma_e$ 拟合公式 | 相关系数 R |
|----|---------------------------------|----------|
| Y1 | $K=0.9336\exp(-0.1109\sigma_e)$ | 0.9798 |
| Y2 | $K=9.3940\exp(-0.0886\sigma_e)$ | 0.9923 |
| Y3 | $K=3.4920\exp(-0.1189\sigma_e)$ | 0.9882 |

从图2可以看出,随着有效应力的增加,煤样的渗透率均呈现有规律地下降,表3表明该规律符合指数函数关系。这种变化是由于煤样在有效应力增大的情况下发生收缩变形,孔裂隙闭合,即煤样的微观结构发生了变化,从而导致煤样渗透率减小。同时从图上可以发现,在3个煤样中,Y2的渗透率最大,Y1的渗透率最小。这则是由于各煤样的孔隙率存在差异,虽然3个煤样的粒度和成型压力一致,但从表1可以看出,煤本身的物理性质存在差异,正是由于他们取自不同的煤层,其成煤环境的差异造成煤本身的孔隙度不同,因此,煤样的渗透率也有所不同。

此外,文献[12]表明,渗透率与有效应力关系曲线会存在拐点,拐点之前煤样渗透率随着有效应力的增加快速下降,拐点之后降幅则趋于平缓。该拐点有效应力一般为15~20 MPa,但由于此次渗流实验是在低有效应力作用下进行的,处于拐点之前的状态,因此看不到拐点前后的变化。不过从图2中

各曲线的发展趋势仍然可以看出,随着有效应力的进一步增加,各煤样的渗透率变化将趋于平缓,且差异越来越小。

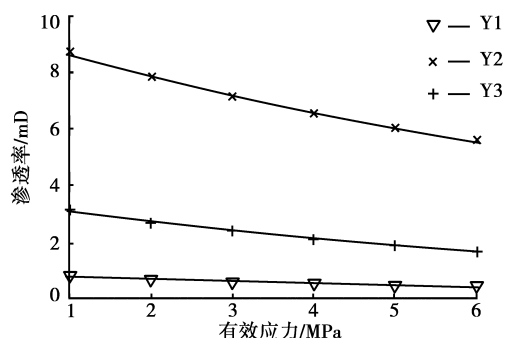


图2 煤样渗透率与有效应力间的关系

3 煤样渗透率对有效应力的敏感性分析

3.1 煤样渗透率对有效应力敏感系数的定义

在实际环境中,煤层渗透率的影响因素十分复杂,地质构造、应力状态、煤层埋深、煤体结构、煤岩煤质特征、煤阶及天然裂隙等都不同程度地影响着煤层渗透率,很难对各因素的影响关系进行一一描述。然而通过定义渗透率对有效应力的敏感系数^[17]

$$C_k = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial \sigma_e}, \quad (2)$$

可以很清晰地得到有效应力对渗透率的影响关系: C_k 值越大,表明煤样渗透率对有效应力的变化就越敏感,在有效应力相同变化幅度下,煤样渗透率变化值越大;反之, C_k 值越小,则敏感性不高,煤样渗透率随有效应力变化梯度就越小。

3.2 煤样渗透率对有效应力敏感系数的实验研究

根据以上敏感系数的定义,在非连续变化的有效应力 σ_e 下所测得渗透率 K 值后,可用下式计算 C_k 值

$$C_k = -\frac{1}{K_0} \frac{\Delta K}{\Delta \sigma_e}. \quad (3)$$

将煤样渗透实验所获得的实验数据代入式(3),并经Matlab拟合后得到 $C_k-\sigma_e$ 拟合方程,如表4所示,其拟合曲线如图3所示。

表4 敏感性系数与有效应力的拟合方程

| 煤样 | $C_k-\sigma_e$ 拟合公式 | 相关系数 R |
|----|---------------------------------|----------|
| Y1 | $C_1 = 22.29\sigma_e^{-0.5697}$ | 0.999 |
| Y2 | $C_2 = 12.52\sigma_e^{-0.3142}$ | 0.987 |
| Y3 | $C_3 = 20.63\sigma_e^{-0.4706}$ | 0.991 |

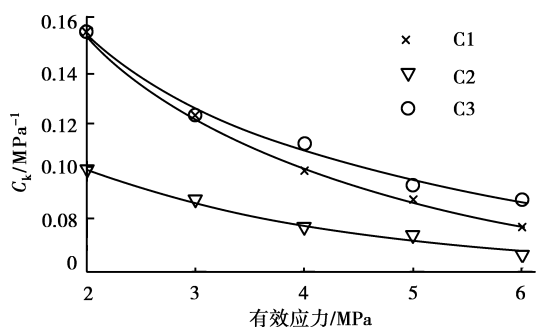


图 3 煤样敏感性系数与有效应力的拟合曲线

从图 3 可以看出, $C_k - \sigma_e$ 关系点较集中, 均匀分布在曲线两侧, 说明该曲线拟合精度较好, 因此, 煤样的 $C_k - \sigma_e$ 关系可采用幂函数进行拟合

$$C_k = m\sigma_e^{-n}, \quad (4)$$

式中的 m, n 为拟合参数。

分析图 3 可以得出, 煤样 Y3 渗透率对有效应力的敏感性最高, 煤样 Y2 渗透率对有效应力的敏感性最低, 说明在有效应力变化相同的情况下, 煤样 Y3 渗透率变化最大, 煤样 Y2 最小。此外, 煤样渗透率对有效应力的敏感系数随着有效应力的增加不断在减小, 从图上曲线发展趋势看, 随着有效应力进一步增加, C_k 值变化将趋于平缓, 这种变化规律与渗透率随有效应力的增加而变化趋缓是一致的, 这也说明 C_k 值能有效地反映渗透率随有效应力的变化趋势。

3.3 基于 C_k 值的煤样渗透率与有效应力的关系式

根据式(2), 如有效应力从 σ_{e0} 变化到 σ_e , 则有

$$K = K_0 \left(1 - \int_{\sigma_{e0}}^{\sigma_e} C_k d\sigma_e \right), \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得

$$K = K_0 \left(1 - \int_{\sigma_{e0}}^{\sigma_e} m\sigma_e^{-n} d\sigma_e \right), \quad (6)$$

将式(6)进一步积分可得

$$K = K_0 \left[1 - \frac{m}{1-n} (\sigma_e^{1-n} - \sigma_{e0}^{1-n}) \right]. \quad (7)$$

因此, 当求得某煤样渗透率对有效应力的敏感系数后, 就可以由式(5)或(7)求得各有效应力下该煤样的渗透率。由此一来, 煤样在各因素影响下的渗透率, 就能够通过影响因素归一化处理后的 C_k 值来求取, 这样便提高了研究单一影响因素即有效应力对煤样渗透率影响的准确性。

4 结 论

通过煤样渗透率对有效应力敏感性的实验研

究, 得到如下主要成果:

1) 有效应力对煤渗透率影响的实验结果表明, 在 30 °C 温度环境下, 在低有效应力作用下, 煤样渗透率随有效应力的增加迅速下降, 煤样渗透率对有效应力的敏感性较强, 且其变化规律符合负指数函数关系;

2) 实验研究表明, 煤样渗透率对有效应力的敏感性系数 C_k 值变化随着有效应力 σ_e 的增加而趋缓, 其大小能够很好地反映煤样渗透率随有效应力的变化趋势, 由此推导出了基于 C_k 值的煤样渗透率与有效应力的关系式。

参考文献:

- [1] BOIT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12 (2): 155-164.
- [2] ENEVER J R E, HENNING A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coal bed methane exploration and reservoir model [C] // Proceedings of the 1997 International Coal-bed Methane Symposium, May 12-17, 1997, University of Alabama, Tuscaloosa, USA. Tuscaloosa, AL, USA: University of Alabama, 1997: 13-22.
- [3] HARPALANI S, CHEN G. Gas slippage and matrix shrinkage effects on coal permeability [C] // Proceedings of the 1993 International Coalbed Methane Symposium, May 17-21, 1993, University of Alabama, Tuscaloosa, USA. Tuscaloosa, AL, USA: University of Alabama, 1993: 285-294.
- [4] MAVOR M J, GUNTER W D. Secondary porosity and permeability of coal vs. gas composition and pressure [J]. Society of Petroleum Engineers, 2006, 9(2): 114-125.
- [5] SAHAY N, VARMA N K, NARAYAN A, et al. Determination of air permeability of coal pillars in underground coalmines [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2004, 52(5-6): 90-94.
- [6] SMITH D H, BROMHAL G, SAMS W N, et al. Simulating carbon dioxide sequestration/ECBM production in coal seams: effects of permeability anisotropies and the diffusion-time constant [J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2005, 8(2): 156-163.
- [7] WANG B S, ZHOU X Q, DAI G L. Experimental

- study on deep-hole pre-cracking blasting for roadway driving in coal seam with lower permeability [C] // Proceedings of the 2004 International Symposium on Safety Science and Technology, June 17-19, 2004, Worcester, Massachusetts, USA. USA; Worcester, 2004: 1643-1646.
- [8] PENG Y W, QI Q X, DENG Z G, et al. Experimental research on sensibility of permeability of coal samples under confining pressure status based on scale effect [J]. Journal of the China Coal Society, 2008, 33(5): 509-513.
- [9] 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(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(1):21-28.
- [10] 贺玉龙,杨立中.围压升降过程中岩体渗透率变化特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):415-419.
HE YU-LONG, YANG LI-ZHONG. Testing study on variational characteristics of rockmass permeability under loading-unloading of confining pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3):415-419.
- [11] 吴世跃,赵文.含吸附煤层气煤的有效应力分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1674-1678.
WU SHI-YUE, ZHAO WEN. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10):1674-1678.
- [12] 唐巨鹏,潘一山,李成全,等.有效应力对煤层气解吸渗流影响实验研究[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 adsorption and seepage of coalbed methane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8):1563-1568.
- [13] 殷黎明,杨春和,王贵宾,等.地应力对裂隙岩体渗流特性影响的研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):3071-3075.
YIN LI-MING, YANG CHUN-HE, WANG HUI-BIN, et al. Study on effect of geo-stress on permeability of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16):3071-3075.
- [14] 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(Sup):28-31.
SUN PEI-DE, LIN ZHI-YI. 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(Sup):28-31.
- [15] 金大伟,赵永军.煤储层渗透率复合因素数值模型研究[J].西安科技大学学报,2006,26(4):460-463.
JIN DA-WEI, ZHAO YONG-JUN. Numerical model of compound influencing factor on coal reservoir permeability[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(4):460-463.
- [16] 孙立东,赵永军,蔡东梅.应力场、地温场、压力场对煤层气储层渗透率影响研究:以山西沁水盆地为例[J].山东科技大学学报:自然科学版,2007,26(3):12-14.
SUN LI-DONG, ZHAO YONG-JUN, CAI DONG-MEI. Research on effect of pressure, geo-temperature and stress fields on permeability of coalbed-gas-bearing seams in Qinshui basin [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 26(3):12-14.
- [17] 熊伟.流固耦合渗流规律研究[D].北京:中国科学院渗流流体力学研究所,2002.

(编辑 赵 静)