

徐佳俊,陈宇龙,蒋成荣,等. CO<sub>2</sub>在煤层中的渗流特性试验[J]. 矿业安全与环保,2017,44(4):10-13.  
文章编号:1008-4495(2017)04-0010-04

## CO<sub>2</sub>在煤层中的渗流特性试验

徐佳俊<sup>1a</sup>,陈宇龙<sup>2</sup>,蒋成荣<sup>1a</sup>,刘昌庚<sup>1a</sup>,曾成华<sup>1b</sup>

(1. 攀枝花学院 a. 资源与环境工程学院; b. 生物与化学工程学院,四川 攀枝花 617000;  
2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

**摘要:**利用含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置,开展了不同压力条件下 CO<sub>2</sub> 气体在煤层中的渗流特性试验,并探讨了煤岩渗透速率对应力变化响应的敏感性。研究表明,在相同轴压不同围压条件下,随着孔隙压力的增大,CO<sub>2</sub> 渗透速率增大;围压越大,CO<sub>2</sub> 渗透速率越小;在相同围压不同轴压条件下,随着轴压的增大,CO<sub>2</sub> 渗透速率随之减小。孔隙压力越大,应力敏感性系数负向增大,煤样对应力的敏感性越好。在不同轴压与围压条件下,随着应力的升高,应力敏感性系数逐渐降低,即应力越高,煤样渗透速率对应力的敏感性越差。

**关键词:**CO<sub>2</sub>;煤岩;渗透速率;应力敏感性系数

中图分类号:TD713

文献标志码:A

网络出版时间:2017-08-03 14:43

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.TD.20170803.1443.006.html>

### Test on Carbon Dioxide Permeability in Coal Seam

XU Jiajun<sup>1a</sup>, CHEN Yulong<sup>2</sup>, JIANG Chengrong<sup>1a</sup>, LIU Changgeng<sup>1a</sup>, ZENG Chenghua<sup>1b</sup>

(1. a. School of Resources and Environmental Engineering; b. School of Biology and Chemical Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the triaxial servo-controlled seepage equipment for thermo-fluid-solid coupling of gas-containing coal, permeability tests of carbon dioxide in the coal seam under the conditions of different pressures were conducted and the sensitivity of the coal-rock permeability to the stress change response was discussed. The research results showed that the infiltration rate of carbon dioxide increased with the increase of the pore pressure under the conditions of same confining pressure and different axial pressure; the larger the confining pressure, the smaller the permeability of carbon dioxide; under the conditions of same confining pressure and different axial pressure, the permeability of carbon dioxide decreased with the increase of the axial pressure. When the pore pressure became larger, the sensitivity coefficient of the stress increased negatively, the sensitivity of coal sample to the stress was better. Under the conditions of different axial pressure and confining pressure, the sensitivity coefficient of the stress gradually decreased with the increase of stress, the higher the stress, the worse the sensitivity of coal sample permeability to the stress.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>; coal-rock; infiltration rate; stress sensitivity coefficient

全球气候的不断变化将对地球环境造成威胁。为减少温室气体的排放,各种减排技术应运而生。例如提高能源利用效率和使用可再生能源,可减少有害气体排放。化石燃料在燃烧过程中将产生大量

的温室气体 CO<sub>2</sub>,其地质封存已经成为一种减排途径。CO<sub>2</sub>地质封存是指收集并储存人为活动产生的 CO<sub>2</sub>,将其储存在地壳深部的地质构造中。CO<sub>2</sub>地质封存被认为只是一种 CO<sub>2</sub>的处置方法,但不能真正消除大气中多余的 CO<sub>2</sub>。

用于储藏 CO<sub>2</sub>的地下场所包括油气已开采的储油(气)裂隙、埋深较大无法开采的煤层、盐田含盐层或其他含有盐水的岩层(但不能含有大量碳氢类化合物)。目前一些大型的 CO<sub>2</sub>地质封存项目已进行

收稿日期:2017-03-07;2017-06-16 修订

基金项目:科技部重点国际合作项目(2013DFA21720)

作者简介:徐佳俊(1990—),男,湖北鄂州人,硕士,助教,主要从事采矿工程专业的教学与研究工作。E-mail:20122002022@cqu.edu.cn.

得如火如荼<sup>[1-13]</sup>。在接下来的几年里将会有更多的CO<sub>2</sub>地质封存项目成为能源领域相关部门的合作项目。在部分正在进行的项目中,CO<sub>2</sub>被储藏于煤层之中。将CO<sub>2</sub>封存在无法开采的煤层中是一种减少温室气体排放量的新选择。煤层吸附CO<sub>2</sub>的能力比吸附瓦斯的能力还强<sup>[14]</sup>。但是,在地质封存项目实施之前,必须了解CO<sub>2</sub>封存对储层渗透率的影响。

为了成功实施CO<sub>2</sub>地质封存,有必要对地质封存的稳定性进行监测,以确保CO<sub>2</sub>地质封存后不会明显地再次释放到大气中。而且,为了制订成功的地质封存方案,需要提出一种可靠的方法能较好预测CO<sub>2</sub>在储存煤层内部的运移规律。这种方法的制订须以煤的特性为基础,如CO<sub>2</sub>在煤层中的渗透性。在CO<sub>2</sub>地质封存后,煤的渗透性会随CO<sub>2</sub>吸附程度的不同而改变。但是,有关煤体的膨胀对其渗透性的影响,还有待进一步明确。

大量的CO<sub>2</sub>注入地层必然引起注入区域孔隙压力增大,根据有效应力原理,注入区域岩体的有效应力降低,从而导致该区域一定范围内应力场的改变。如图1所示,从力学角度来看,CO<sub>2</sub>的注入和运移改变了初始的应力场和孔压场。

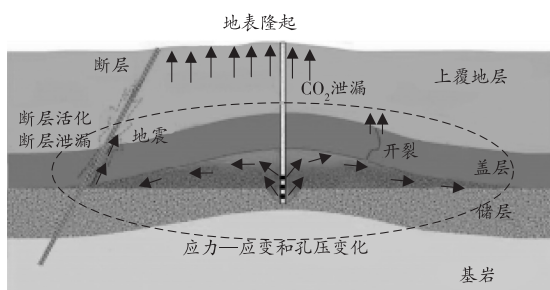


图1 CO<sub>2</sub>注入和运移引起的力学问题<sup>[15]</sup>

利用重庆大学研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置,开展不同轴压、围压及孔隙压力条件下,CO<sub>2</sub>气体在煤层中的渗透特性的试验,探讨了煤岩渗透速率对应力变化响应的敏感性。

## 1 试验方法

煤是一种物理结构相当独特的材料,其含有呈正交关系的两组结构面(层理和节理),煤基质(煤基质和矿物组分)的孔隙率值非常低。有关研究认为,流体通过以下两种机理在煤层内发生运移:以压力梯度为动力的达西流和以浓度梯度为动力的Fick扩散。扩散是一个较慢的过程并发生在煤质中,达西流则发生在煤的裂隙系统中。所以,只有当煤的体积大到包含裂隙,才能人为改变煤的渗透速率。试验用煤样取自山西晋城无烟煤矿业集团赵庄矿3#煤

层,将取回的煤样采用“水泥浇筑固定法”<sup>[16]</sup>制作成Φ50 mm×100 mm的圆柱体原煤试件,烘干后置于干燥箱内备用。

采用体积分数为99.99%的CO<sub>2</sub>进行不同孔隙压力、轴压和围压条件下的渗流试验。在固定轴压和围压下,分别施加大小为0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 MPa的孔隙压力。同时考虑围压大小(3.0、4.0、5.0、6.0 MPa)对渗流的影响。试验全过程由计算机控制并采集数据。

孔隙压力 $p$ 由下式确定:

$$p = (p_0 + p_1) / 2 \quad (1)$$

式中: $p_1$ 为进气口压力,MPa; $p_0$ 为出气口压力(大气压),MPa。

煤岩渗透速率 $K$ 由下式确定:

$$K = \frac{2qp_0\mu_g L}{A(p_1^2 - p_0^2)} \quad (2)$$

式中: $q$ 为体积流量,m<sup>3</sup>/s; $\mu_g$ 为在试验温度条件下气体的动力黏度,Pa·s; $L$ 为煤样长度,m; $A$ 为煤样横截面面积,m<sup>2</sup>。

## 2 试验结果及分析

在轴压3 MPa、5种不同围压条件下,孔隙压力与原煤试件渗透速率之间的关系见图2。

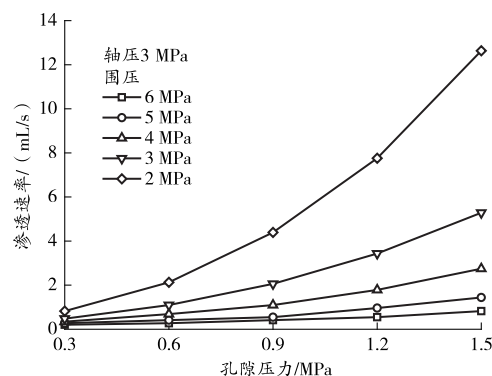


图2 不同围压条件下的孔隙压力与原煤试件渗透速率之间的关系

由图2可以看出,CO<sub>2</sub>渗透速率随着孔隙压力的增大而增大。这是因为随着孔隙压力的增大,煤样两端的气体压差增大,驱动CO<sub>2</sub>在煤样中渗透的力也越大,使得CO<sub>2</sub>渗透速率增大。煤岩吸附CO<sub>2</sub>将产生膨胀变形,但由于围压的作用,煤岩的径向变形受到限制,则煤基质吸附气体产生的膨胀变形朝内部发展挤压孔裂隙,使渗流通道被压缩,渗透速率减小。围压越大,煤体内部的孔裂隙闭合的程度越高,渗透速率越小。

在围压3 MPa、5种不同轴压条件下,孔隙压力

与原煤试件渗透速率之间的关系见图3。

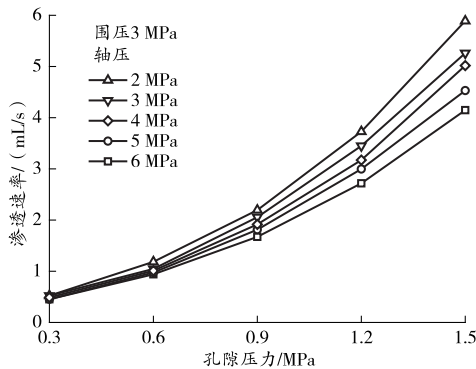


图3 不同轴压条件下的孔隙压力与原煤试件渗透速率之间的关系

由图3可以看出,CO<sub>2</sub>渗透速率随着孔隙压力的增大而增大;随着轴压的增大,CO<sub>2</sub>渗透速率随之减小。这也是因为孔裂隙闭合所致。

### 3 应力敏感性分析

为定量探讨煤岩渗透速率对应力的响应程度,特定义应力敏感性系数  $C_s$ ,即每升高 1.0 MPa 的应力所引起的煤岩渗透速率的相对变化量为:

$$C_s = - \frac{\partial K}{K_0 \partial p} \quad (3)$$

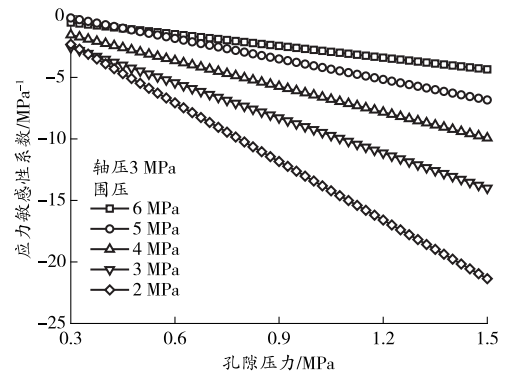
式中: $\partial K$  为煤岩的渗透速率变化量, mL/s;  $\partial p$  为应力变化量, MPa;  $K_0$  为第 1 个测点所测得的煤岩渗透速率值, mL/s。

显然,应力敏感性系数  $C_s$  能够反映煤岩渗透速率随应力的变化趋势,应力敏感性系数  $C_s$  值越大,表示煤岩渗透速率随应力的变化越显著。

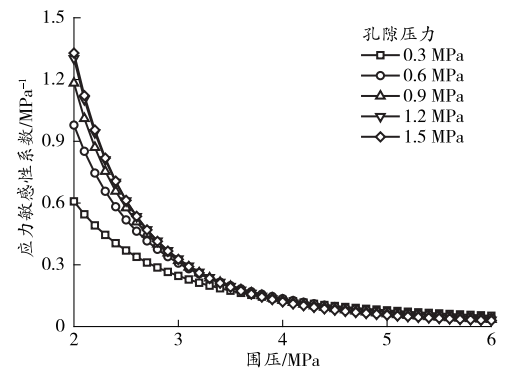
为确定煤的应力敏感性系数,首先需要对渗透速率—应力曲线进行拟合,然后将拟合结果代入式(3),再通过计算即可得到应力敏感性系数  $C_s$  与应力之间的函数关系。图4给出了应力敏感性系数随应力的变化关系,可以看出,孔隙压力越大,应力敏感性系数负向增大,煤样对应力的敏感性越好。在不同轴压与围压条件下,均有:随着应力的升高,应力敏感性系数逐渐降低,即应力越高,煤样渗透速率对应力的敏感性越差。

### 4 结论

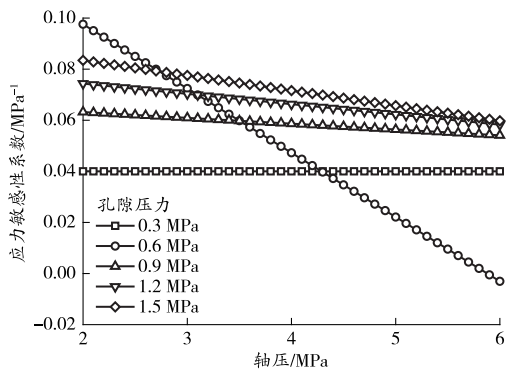
1) CO<sub>2</sub> 的渗透速率随着孔隙压力的增大而增大。这是因为随着孔隙压力的增大,煤样两端的气体压差增大,驱动 CO<sub>2</sub> 从煤样渗透的力也越大,使得 CO<sub>2</sub> 渗透速率增大。围压越大,煤体内部的孔裂隙闭合的程度越高,渗透速率越小。随着轴压的增大,渗透速率随之减小。这也是因为孔裂隙闭合所致。



(a) 应力敏感性系数—孔隙压力



(b) 应力敏感性系数—围压



(c) 应力敏感性系数—轴压

图4 应力敏感性系数随应力的变化曲线

2) 孔隙压力越大,应力敏感性系数负向增大,煤样对应力的敏感性越好。在不同轴压与围压条件下,随着应力的升高,应力敏感性系数逐渐降低,即应力越高,煤样渗透速率对应力的敏感性越差。

### 参考文献:

- [1] SIRIWARDANE H, HALKASMAA I, MCLENDON R, et al. Influence of carbon dioxide on coal permeability determined by pressure transient methods[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(1): 109-118.
- [2] WILSON T H, WELLS A W, DIEHL J R, et al. Ground-penetrating radar survey and tracer observations at the West Pearl Queen carbon sequestration pilot site, New Mexico

- [J]. The Leading Edge, 2005, 24(7): 718-722.
- [3] GALE J, CHRISTENSEN N P, CUTLER A, et al. Demonstrating the potential for geological storage of CO<sub>2</sub>: the Sleipner and GESTCO projects [J]. Environmental Geosciences, 2001, 8(3): 160-165.
- [4] WEISHAUPTOVÁ Z, PRÍBYL O, SÝKOROVÁ I, et al. Effect of bituminous coal properties on carbon dioxide and methane high pressure sorption[J]. Fuel, 2015, 139:115-124.
- [5] OZDEMIR E. Role of pH on CO<sub>2</sub> sequestration in coal seams[J]. Fuel, 2016, 172: 130-138.
- [6] STAUFFER P H, VISWANATHAN H S, PAWAR R J, et al. A system model for geologic sequestration of carbon dioxide[J]. Environmental science & technology, 2008, 43(3): 565-570.
- [7] OZDEMIR E, SCHROEDER K. Effect of moisture on adsorption isotherms and adsorption capacities of CO<sub>2</sub> on coals[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(5): 2821-2831.
- [8] MASOUDIAN M S. Multiphysics of carbon dioxide sequestration in coalbeds: A review with a focus on geomechanical characteristics of coal[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(1): 93-112.
- [9] TANASE D, SASAKI T, YOSHII T, et al. Tomakomai CCS demonstration project in Japan[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 6571-6578.
- [10] TANAKA Y, ABE M, SAWADA Y, et al. Tomakomai CCS Demonstration Project in Japan, 2014 Update [J]. Energy Procedia, 2014, 63: 6111-6119.
- [11] YAMANOUCI Y, HIGASHINAKA M, YOSHII T, et al. Study of geological storage for a candidate CCS demonstration project in Tomakomai, Hokkaido, Japan [J]. Energy Procedia, 2011, 4: 5677-5684.
- [12] 孙东玲, 曹偈, 熊云威, 等. 突出过程中煤—瓦斯两相流运移规律的实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(2): 26-30.
- [13] 周东平, 沈大富, 余模华, 等. 地应力对瓦斯渗流特性影响的试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(S1): 6-8.
- [14] BURRUSS R C. CO<sub>2</sub> adsorption in coal seams as a function of rank and composition: a new task in USGS research on geologic sequestration of CO<sub>2</sub> [C]// Proceedings Coal-Seq II, Washington, DC, USA, May, 2003: 6-7.
- [15] 李小春, 袁维, 白冰. CO<sub>2</sub> 地质封存力学问题的数值模拟方法综述[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1762-1772.
- [16] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 两种含瓦斯煤样变形特性与抗压强度的实验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 410-417.

(责任编辑:李 琴)

=====

(上接第9页)

- [6] 杨明, 罗汉金, 黄颜珠, 等. 大宝山矿区氟污染特征及土壤溶出状态[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1291-1298.
- [7] BERMEA O M, CHAVEZ A C, HERNANDEZ E, et al. Determination of metals for leaching experiments of minetailings: Evaluation of the potential environmental hazard in the Guanajuatomining district, Mexico [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 73(4): 770-776.
- [8] 高海燕, 周建伟, 柴波. 合山市东矿矿区煤矸石淋滤液特征及其环境影响分析[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(2): 90-93.
- [9] 林美群, 马少健, 王桂芳, 等. 环境因素对硫化矿尾矿重金属溶出影响的模拟试验[J]. 金属矿山, 2008, 38(6): 108-111.
- [10] LEE P K, KANG M J, CHOI S H, et al. Sulfide oxidation and the natural attenuation of arsenic and trace metals in the waste rocks of the abandoned Seobotungsten mine, Korea [J]. Applied Geochemistry, 2005, 20(9): 1687-1703.
- [11] 马芳, 秦俊梅, 白中科. 不同风化程度对煤矸石盐分与pH值的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2007, 27(1): 55-58.
- [12] 王俊桃, 毛云, 刘锦梅, 等. 硫化矿物中无机盐及重金属离子溶出的影响因素探讨[J]. 安全与环境工程, 2007, 14(1): 4-8.
- [13] 侯新文, 尹明泉, 尹志轩, 等. 招远玲珑金矿废石模拟淋滤试验分析[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(11): 1541-1547.
- [14] 姜利国, 梁冰, 尹成薇. 淋溶作用下煤矸石产酸/产碱动力学的实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4): 502-510.
- [15] 王俊桃, 谢娟, 张益谦. 矿山废石淋溶对水环境的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(4): 92-96.

(责任编辑:李 琴)