

文章编号: 0253-9993(2008)09-1030-05

# 吸附作用对煤的渗透率影响规律实验研究

隆清明, 赵旭生, 孙东玲, 邹银辉

(煤炭科学研究总院 重庆研究院, 重庆 400037)

**摘要:** 运用自制的瓦斯渗透仪, 在不同压差条件下, 通过对不同吸附特性煤样、不同吸附性能气体、吸附不同气体含量情况下的煤渗透性实验, 研究了吸附作用对煤的渗透率的影响规律. 结果表明: 吸附作用越强、吸附瓦斯量越多, 煤的渗透率越小, 这与现场实际结果相符.

**关键词:** 吸附; 渗透率; 瓦斯; 气压

中图分类号: P618.11 文献标识码: A

## Experimental study on coal permeability by adsorption

LONG Qing-ming, ZHAO Xu-sheng, SUN Dong-ling, ZOU Yin-hui

(Chongqing Branch, China Coal Research Institute, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** Using self-developed gas-seepage experimental installation, in different pressure conditions, performed coal permeability experiments on different adsorption characteristics of coal sample, different gases adsorption, and different gas adsorption content, and studied the influence law of adsorption on coal permeability. The results show that the greater adsorption, the more gas adsorption capacity is, and the coal permeability becomes smaller. And this accords with the locale practice results.

**Key words:** adsorption; permeability; gas; pressure

瓦斯在煤层中的流动过程非常复杂, 包括瓦斯吸附、解吸、扩散和渗流, 同时在一定程度上会带来煤岩变形、应力变化、温度变化等耦合作用, 瓦斯运移的机理至今尚不够清晰<sup>[1-8]</sup>. 渗透率是进行煤层瓦斯流动分析的重要参数, 是标志瓦斯抽采难易程度的关键参数, 同时也是理论计算瓦斯涌出量的主要参数之一, 所以煤的渗透率是煤矿瓦斯防治领域的基础煤层瓦斯参数之一. 国内外学者对于煤的渗透率影响因素进行了大量的研究, 在应力、水分、温度等因素对渗透率的影响规律方面得出了重要的结论. 但对于瓦斯吸附作用对渗透率影响规律的研究较少, 含瓦斯煤的渗透规律需要进一步研究. 本文根据实验测定数据的分析, 结合现场实际, 研究了吸附作用对煤的渗透率影响规律.

## 1 实验装置与方法

### 1.1 煤样制备

根据本研究的目的, 实验煤样分别取自淮南李嘴孜矿, 南桐矿务局新田湾矿, 林东矿务局林丰矿. 先将所取煤样粉碎为 0.25 mm 以下颗粒, 然后在渗透缸内壁均匀涂抹密封胶并装入煤粉, 加压至 100 MPa 恒压 4 h 一次成型.

收稿日期: 2007-10-10 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2005CB221502)

作者简介: 隆清明(1982—), 男, 山东东营人, 硕士研究生. Tel: 023-65239348, E-mail: cqlqm2008@163.com

## 1.2 实验装置与实验方法

实验装置(图1)采用煤炭科学研究总院重庆研究院自行研制的“瓦斯渗透仪”,在恒温情况下进行.实验采用不同气体、不同孔隙压力、不同吸附特性煤样、在不同压差条件下测量试样气体渗透流量的方法测定渗透率.渗透流量测量采用排水法与气体微流量计法相结合的测量方法.具体步骤如下:

- (1) 将恒温水浴加热到 30 ℃,对试样恒温脱气 30 min;
- (2) 恒温状态下通入测试气体,调节进、出口压力吸附平衡 24 h(氦气除外)后测量气体渗透流量;
- (3) 测试气体的顺序为:甲烷,氦气,二氧化碳.

## 2 数据处理方法

在试样径向应变固定约束的情况下,参照常规岩芯分析方法<sup>[9]</sup>,分别测量煤样进、出气端压差为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 MPa 下的气体流量,由式(1)计算出每一个压差对应的平均气体压力  $p_m$  ( $p_m = (p_1 + p_2)/2$  为孔隙气压)时的渗透率.

$$K_c = \frac{2\mu p_0 Q_0 L}{F(p_1^2 - p_2^2)}, \quad (1)$$

式中,  $K_c$  为煤样的实测渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}$ ;  $\mu$  为气体的绝对黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $p_0$  为实验时的大气压, MPa;  $Q_0$  为气体流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $L$  为煤体试件长度, cm;  $F$  为渗透有效面积,  $\text{cm}^2$ ;  $p_1, p_2$  分别为入口、出口压力, MPa.

气体克氏渗透率为

$$K = K_c / (1 + b/p_m),$$

式中,  $K$  为克氏渗透率;  $b$  为克林伯格系数,  $b$  与气体性质、孔隙结构有关,其计算式为

$$b = \frac{16c\mu}{W} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}},$$

式中,  $c$  为常数;  $W$  为煤样裂隙宽度,  $\mu\text{m}$ ;  $R$  为通用气体常数;  $T$  为绝对温度, K;  $M$  为气体分子量.

实验室对同一煤样在相同条件下进行 He 渗透性测试,实验测得氦气克林伯格系数  $b_{\text{He}}$ ,通过非吸附物质氦气克林伯格系数  $b_{\text{He}}$ 推算甲烷与二氧化碳的克林伯格系数  $b_{\text{CH}_4}$ 与  $b_{\text{CO}_2}$ ,进而消除实测渗透率  $K_c$ .由于克林伯格效应引起的渗透率变化,得出相应的气体克氏渗透率  $K$ .

## 3 实验结果

### 3.1 吸附平衡前、后煤样渗透率的测定

在进行渗透率测定时,通常的做法是在不对煤样进行吸附平衡的情况下直接测定流量,然后计算渗透率,此时煤样吸附的瓦斯较少;为了分析含瓦斯煤的渗透规律,需要首先对煤样充气,待瓦斯吸附平衡后测定含瓦斯煤的渗透率.为了对比吸附作用对渗透率的影响,分别对同一煤样,在相同压差条件下测定了瓦斯吸附平衡前、后煤样渗透率的变化.结果表明:煤样吸附瓦斯后,在相同瓦斯压力(煤样进、出口端平均瓦斯)条件下,渗透率比吸附前的明显减少(图2).

### 3.2 不同瓦斯含量下煤样渗透率的测定

对含不同瓦斯量的同一煤样进行渗透率测定,结果表明,随煤样中瓦斯压力的增高,煤样的渗透性呈下降趋势(图2,3).

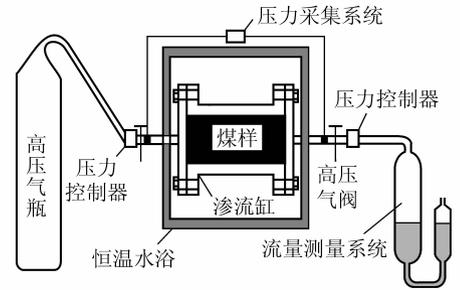


图1 实验装置

Fig. 1 The experimental device

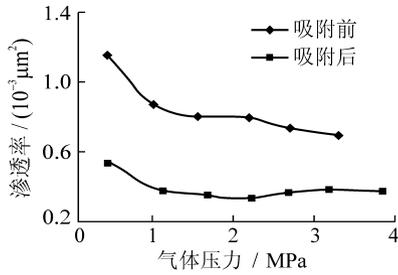


图2 吸附瓦斯前、后煤样渗透率的变化

Fig. 2 Permeability change before and after adsorption gas

不同瓦斯压力对应不同瓦斯含量, 图 4 为含瓦斯煤样的渗透率随瓦斯含量的变化趋势。

### 3.3 煤样对不同吸附性能气体渗透率的测定

同一煤样对不同的气体, 其吸附性能差异较大, 煤对  $\text{CO}_2$  的吸附性能大于  $\text{CH}_4$ , 一般认为煤对 He 基本没有吸附性。为分析吸附作用对渗透率的影响, 针对同一煤样分别测定不同吸附性气体的渗透率, 结果表明: 在相同的气体压力下, He 的渗透性大于  $\text{CH}_4$ , 而  $\text{CH}_4$  的渗透性大于  $\text{CO}_2$  (图 5)。

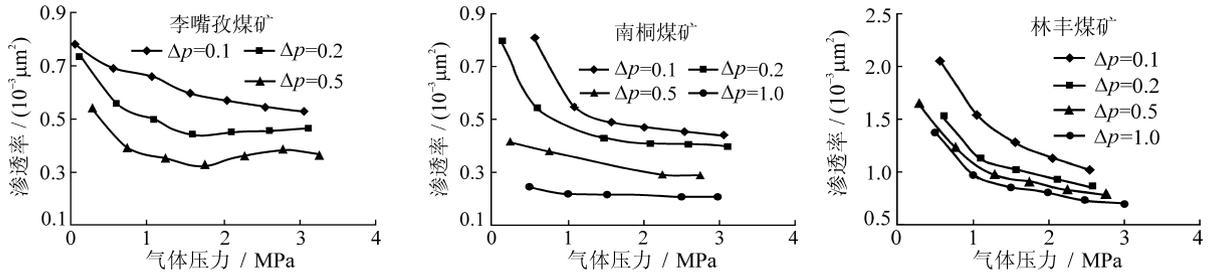
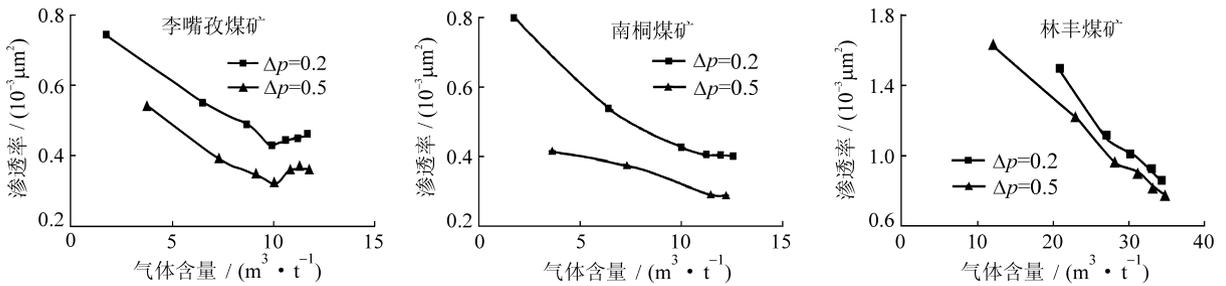
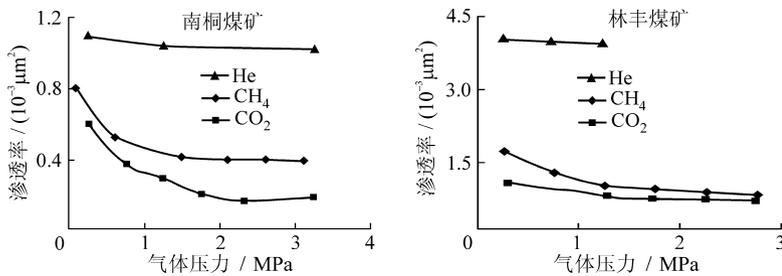
图3  $\text{CH}_4$  渗透率与气体压力的关系Fig. 3 Relationship curves between  $\text{CH}_4$  permeability and gas pressure图4  $\text{CH}_4$  渗透率与气体含量的关系Fig. 4 Relationship curves between  $\text{CH}_4$  permeability and gas content

图5 气体压力对渗透率的影响

Fig. 5 Influence of gas pressure on  $\text{CH}_4$  permeability

### 3.4 不同压差时煤样渗透率的测定

按照达西定律, 通过渗透物体的气体流速与物体的断面积、长度、压差存在一次函数关系, 当断面积、长度一定时, 流速与压差的关系为直线关系, 即渗透率恒定。但是, 煤样对瓦斯具有较强的吸附作用, 为求证瓦斯在煤体中的流动规律, 对同一煤样, 在应力、温度和水分基本相同的条件下, 测定不同压差时的煤样渗透率, 结果表明, 在煤样进、出气口端的平均瓦斯压力相同时, 煤样的渗透率随着压差 ( $\Delta p$ ) 的增大而减小 (图 6)。

对同一煤样, 在应力、温度和水分基本相同的条件下, 测定不同压差时的煤样渗透率, 结果表明, 在煤样进、出气口端的平均瓦斯压力相同时, 煤样的渗透率随着压差 ( $\Delta p$ ) 的增大而减小 (图 6)。

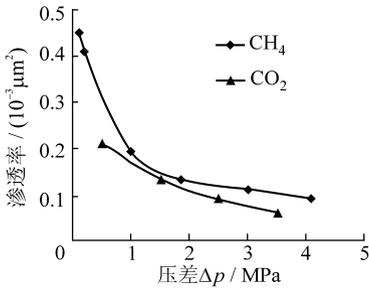


图6 渗透率 K 与压差 Δp 的关系

Fig. 6 Relationship curves between permeability and pressure dispersion

### 4 渗透率变化规律的分析

煤样的渗透率随气体压力的增加而减小，通过对图 2 各条曲线拟合可得出煤样渗透率随瓦斯压力的函数关系为

$$K = ap^3 + bp^2 + cp + d \approx K_0 [1 - f(p)]^3,$$

式中，a, b, c, d 为常数；f(p) 为压力的函数。

煤样的渗透率变化复杂，本实验中在温度恒定，径向应变受到严格约束，水分不变的情况下进行。对实验结果的原因初步分析认为：① 由于煤对瓦斯的吸附作用，吸附性气体与煤体发生耦合，使煤样产生吸附膨胀变形，由于径向应变无法释放，进而内应力增大孔隙率降低，使气体

通过面积减小，从而表现为渗透率随着瓦斯压力或瓦斯含量的增加而降低。由于气体吸附变形速度随压力增加而减小，表现为渗透率随压力的增加变化率降低。② 如果将煤样分成若干个微段，沿着煤样轴向方向，从进气端到出气端，对于各微段的煤样，瓦斯压力逐步下降，煤吸附瓦斯量也逐步减少，引起的吸附变形在轴向上呈非线性降低。气体的流动阻力降低，进而气体压降在试样中分布非线性降低。对外表现为渗透率随压差的变大而减小。③ 气体渗透率与气体种类有关，不同的气体引起的吸附变形不同，在气体流动通道上占据的空间不同，对外表现为渗透率及其变化率不同。

### 5 现场实测渗透性的变化

我国一些矿区曾经实测过煤层瓦斯抽放前、后透气性系数等参数的变化，结果见表 1。

表 1 煤层变形及透气性变化

Table 1 Coal seam deformation and permeability change

矿区	实验地点	煤体收缩变形/%	透气性系数变化
中梁山矿务局南矿井	+280 m 水平	0.15 ~ 0.26	增大 9 倍
北票矿务局台吉矿	4 号煤层		0.008 38 增至 0.18 m <sup>2</sup> / (MPa <sup>2</sup> · d)
芙蓉矿务局白皎矿	20102 <sub>下</sub> 工作面	0.115	透气性有了明显提高
松藻打通一矿	8 号煤层	0.22	由 (1.36 ~ 7.59) × 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> / (MPa <sup>2</sup> · d) 增至 0.02 m <sup>2</sup> / (MPa <sup>2</sup> · d)，即提高 50 倍
六枝矿务局大用矿	1175 <sub>2</sub> 采区进行了预抽 7 号煤层		由 0.068 2 增至 8.476 m <sup>2</sup> / (MPa <sup>2</sup> · d)，增加 124 倍
开府矿务局刘家沟矿	K <sub>2</sub> 煤层	0.175 ~ 0.260	增加 50 ~ 124 倍

经过瓦斯抽放，煤层中的瓦斯压力降低，瓦斯含量减小，煤体收缩，煤中的孔隙、裂隙发育，进而渗透率增大。透气性的变化充分证实了吸附作用对渗透率有较大的影响。

### 6 结 论

- (1) 吸附作用对煤的渗透率有明显的影响，对于地应力、温度、水分含量和裂隙发育程度相同的煤体，煤的吸附作用越强、瓦斯含量越大、瓦斯压力越高，煤的渗透性越小。
- (2) 随着煤含瓦斯量的增加，渗透率的减小率变小。
- (3) 在平均瓦斯压力一定的条件下，煤的渗透率随压差的增大而减小。

### 参考文献：

[1] 林柏泉, 周世宁. 煤样瓦斯渗透规律的实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 1987, 16 (1): 21 - 28.

- Lin Boquan, Zhou Shining. Experimental study on rules of gas seepage [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1987, 16 (1): 21-28.
- [2] 梁冰, 章梦涛, 潘一山. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应影响的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17 (5): 12-18.  
Liang Bing, Zhang Mengtao, Pan Yishan. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17 (5): 12-18.
- [3] 方恩才, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 含瓦斯煤的有效应力与力学变形破坏特征 [J]. 中国科技大学学报, 2001, 31 (6): 686-693.  
Fang Encai, Shen Zhaowu, Zhu Guiwang, et al. The effective stress and mechanical deformation and damage characteristics of gas-filled coal [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2001, 31 (6): 686-693.
- [4] 王学滨. 孔隙压力对岩样全部变形特征的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2005, 21 (6): 25-28.  
Wang Xuebin. Effect of pore pressure on entire deformational characteristics of rock specimen [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2005, 21 (6): 25-28.
- [5] 贺振华, 邓英尔, 刘树根, 等. 岩石弹性参数对渗流测试分析的影响 [J]. 天然气工业, 2006, 26 (6): 44-46.  
He Zhenhua, Deng Yinger, Liu Shugen, et al. Influence of rock elastic parameters on test analyses of flow in rock [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (6): 44-46.
- [6] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001 (S1): 1 801-1 804.  
Sun Peide. Testing study on coal specimen permeability during solid deformation process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001 (S1): 1 801-1 804.
- [7] 李涛, 何应付, 曹丽丽. 煤层气渗流规律与压力特征分析 [J]. 中国煤层气, 2006, 3 (2): 16-19.  
Li Tao, He Yingfu, Cao Lili. Analysis on flow through porous media and pressure characteristics of coalbed methane [J]. China Coalbed Methane, 2006, 3 (2): 16-19.
- [8] 徐曾和, 徐小荷, 徐继军. 可变形多孔介质渗透系数的测定方法 [J]. 实验力学, 1998, 13 (3): 314-319.  
Xu Zenghe, Xu Xiaohe, Xu Jijun. A testing method for determining the permeability of deformable porous materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13 (3): 314-319.
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. 岩芯常规分析方法 (SY/T 5336-1996) [S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.  
The Professional Standards Compilation Group of Peoples Republic of China. Method of core routine analysis (SY/T 5336-1996) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.

## 山西煤炭企业兼并重组, 将形成大企业办矿体制

为改变山西省煤矿开采“多、小、散、乱”的现状, 近日从山西省煤炭工业局了解到, 全省煤炭企业兼并重组规划方案和实施意见已经拟就, 今后 2~3 a, 山西省将通过大型煤炭企业兼并重组中小煤矿, 形成大企业办矿体制。

今年下半年, 山西省将组织实施同煤集团整合大同市南郊区、焦煤集团整合太原古交和万柏林区的 2 个方案, 同时, 完善同煤集团与左云县的整合方案以及临汾市的整合重组方案。

到 2010 年, 全省单独保留的合法矿井将在现有基础上进一步压减到 1 441 座; 平均单井规模将由目前的 33 万 t 提高到 67 万 t; 形成 3~5 个 5 000 万 t 级以上生产能力的大型煤炭集团公司。