

文章编号: 1006-6616 (2008) 04-0374-07

# 气固耦合作用下温度对煤瓦斯渗透率影响规律的实验研究

杨新乐<sup>1,2</sup>, 张永利<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学, 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学, 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 为得到温度对煤瓦斯渗透率的影响规律, 在实验室通过改装三轴渗透仪, 进行了不同温度条件下煤瓦斯的渗透率测定实验。实验结果表明, 在不同温度下, 渗透率随有效应力的减小均呈二次抛物线趋势, 即渗透率先减小后增大。在卸载初期, 温度较低时煤瓦斯渗透率下降梯度比高温时大, 渗透率值较高; 卸载后期, 较高温度时煤瓦斯渗透率上升梯度比低温时大, 渗透率值大。由实验可知, 煤层气开采过程中, 对于不同温度, 煤瓦斯渗透率的变化关系均具有典型煤层气开采的三阶段主导作用特征。有效应力、气体吸热和煤固体受热是影响煤体渗透率的重要因素。在卸载初期, 煤固体受热膨胀及有效应力对渗透率起主导作用, 卸载中后期, 气体滑脱和气体吸热对渗透率起主导作用。实验分析后认为, 开采煤层气时采用先压裂后注热的方式将有助于提高煤层气的产量。

**关键词:** 煤瓦斯; 渗透率; 有效应力; 温度

中图分类号: TD82; P694

文献标识码: A

## 0 引言

煤层气又称煤层瓦斯, 在世界大部分地区由于“高储低渗”的特性, 一直为各国研究者所关注。煤层气的抽放开采, 不仅可以缓解我国能源短缺的问题, 又可以有效防治矿井瓦斯事故, 同时保护大气环境。在煤层气成藏和开采过程中, 煤层渗透率是影响瓦斯在煤层中的吸附量、解吸渗流量、渗流速度、抽放难易程度及煤与瓦斯突出强度的重要参数。目前, 国内外众多学者对煤层瓦斯的渗透率进行过大量的研究。国外有: Sommerton 等<sup>[1]</sup>研究了应力对煤体的渗透性的影响; Brace<sup>[2]</sup>进行了应力作用下岩体渗透率变化规律研究; Enever 和 Hening<sup>[3]</sup>找到煤体有效应力对渗透率的影响规律。国内有: 周世宁和林柏泉<sup>[4]</sup>、赵阳升和胡耀青<sup>[5]</sup>、吴世跃和赵文<sup>[6]</sup>、唐巨鹏和潘一山等<sup>[7]</sup>、姜德义和张广洋等<sup>[8]</sup>、谭学术和鲜学福

收稿日期: 2008-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50674053); 辽宁工程技术大学校青年基金资助, 大型工况装备实验室青年教师培养计划。

作者简介: 杨新乐 (1980-), 男, 辽宁盘锦人, 讲师, 博士在读, 从事工程流体力学研究。E-mail: yxL\_2003@sina.com.

等<sup>[9]</sup>等许多学者在应力对渗透率的影响方面取得了大量的研究成果, 这些成果主要集中在研究轴压、围压和瓦斯压力的不同组合即有效应力的变化对煤层渗透率的影响。理论表明, 温度对煤层气渗透率的变化有着重要影响<sup>[10]</sup>, 目前围绕这一问题, 一些学者也进行了相应的实验, 梁冰等<sup>[11]</sup>通过实验得到非等温条件下煤层气吸附量随时间变化的关系, 程瑞端等<sup>[12]</sup>在实验室通过两种煤样研究了温度对煤样渗透率的影响规律, 然而, 近些年在关于温度对煤层气渗透率的影响的研究领域内, 相关实验并不多见, 而渗透率随温度的变化规律始终未在学术界达成一致。为了更确切的验证温度对煤瓦斯渗透率的影响效果, 本文在改进具有自主知识产权的实验装置上, 利用较多的煤样在实验室进行实验, 得出卸载条件下不同温度煤瓦斯渗透率随水平有效应力的变化规律供相关研究学者参考。

## 1 实验系统及实验步骤

### 1.1 实验系统

本实验系统在具有自主知识产权的三轴渗透仪装置基础上, 加入温度控制系统形成。实验系统包括加压系统、稳压系统、瓦斯压力供给系统、温度控制系统、气体测量系统。实验系统及实验装置如图 1、图 2 所示。煤样轴压及围压由手动试压泵通过六通阀供给, 加压后通过稳压器(自制)保持压力稳定; 孔隙压力通过气体压力调节阀调节, 孔隙压力、围压及轴压数值由 CWY100 精密数字压力表读出, 精度 0.2 级; 在三轴渗透仪上安装加热棒对煤样包围介质(水)加热来改变煤样温度, 温度控制采用热电偶测温原理, 使用 N-6000 智能型数显温度控制仪控制; 渗流气体量值通过转子流量计直接读取。实验用煤样取自长春华兴煤矿、辽宁铁法煤矿、辽宁阜新海州矿及五龙矿。实验用气体采用纯度 99.99% 的甲烷气, 由于甲烷有微毒, 实验室保持通风。

### 1.2 实验步骤

1) 煤样制备。新鲜煤样运送至实验室后经切割机切割成 50mm×50mm×100mm 的标准煤试样后, 称重后置于真空干燥箱内, 加热到 100℃~105℃时恒温 8h, 再冷却至室温后备用。

2) 选取合适的煤样(选取表面裂隙水平层理特征明显的煤样)装入三轴渗透仪, 装入时要用胶布和热缩套进行密封, 防止加压时水浸入煤样中, 破坏实验。

3) 三轴渗透仪密闭后, 先加上预先设定好的最大围压和轴压, 关闭六通阀围压、轴压接口保持围压、轴压固定后, 打开孔隙压接口加孔隙压实验设定最大孔隙压值, 使煤样进行甲烷吸附。

4) 吸附平衡后(本文实验取 24h 为标准吸附时间, 24h 后认为吸附近似平衡), 对煤样进行加热升温, 升到实验指定的温度。开启出气口, 用流量计测定气体流量, 测量时取三次测量结果, 平均值作为最终值。

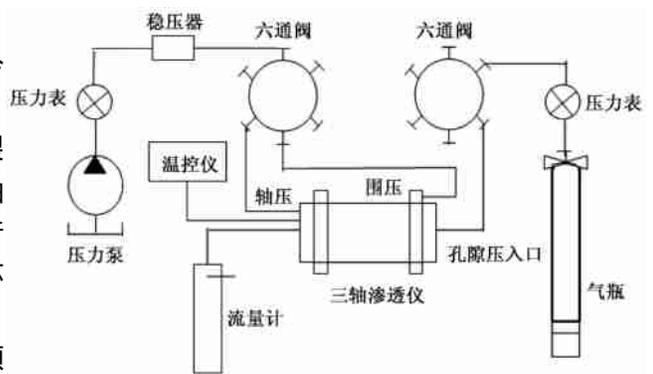


图 1 温控三轴渗透率测定实验系统示意图

Fig. 1 The scheme of experimental system of measuring three-axial permeability controlled by temperature

5) 围压保持不变, 降低轴压和孔隙压, 测定卸载条件下气体的流量并计算煤样渗透率。

6) 在一个温度测完后卸下围压和轴压, 继续升温到指定下一温度, 然后重复 3、4、5 的步骤, 记录数据并整理。

## 2 实验数据处理及分析

煤是具有孔隙—裂隙的多孔介质岩石, 按照前人研究成果, 煤瓦斯渗透率可以由公式 (1) 计算:

$$k = \frac{2p_2 L \mu Q}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (1)$$

式中:  $k$ —煤瓦斯渗透率,  $\text{cm}^2$ ;  $L$ —煤样的长度,  $\text{cm}$ ;  $Q$ —瓦斯流量  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $\mu$ —甲烷的动力粘性系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $A$ —煤样的截面积  $\text{cm}^2$ ;  $p_1$ —煤样进气端压力  $\text{MPa}$ ;  $p_2$ —煤样出气端压力  $\text{MPa}$ 。

有效应力概念最早是由 Terzaghi 在 1925 年所做试验基础上提出来的, 并引入土力学中。1960 年 Cook 将其进行了修正并应用于岩石类材料中, 则煤体骨架所受有效应力用数学张量表示为:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (2)$$

式中:  $\sigma'_{ij}$  为煤体骨架所受有效应力,  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_{ij}$  为煤体骨架所受总应力,  $\text{MPa}$ ;  $\alpha$  为与煤体有关的系数, 无量纲, 且  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 为数据处理简便,  $\alpha$  取为 1;  $p$  为煤体骨架所受孔隙压力,  $\text{MPa}$ ;  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号。

由 (2) 式可知: 煤体骨架中任意一点的有效应力等于该点所受应力减去孔隙压力。本文研究煤层气实际开采时渗透率变化规律, 在这一过程中, 轴压和孔隙压力均为变量, 同时考虑实验中轴压对煤样变形影响较大, 因此水平有效应力可近似体现有效应力的作用。为此按照文献 [7] 给出的公式 (3) 来计算水平有效应力。

$$\sigma = \sigma_1 - 1/2(p_1 + p_2) \quad (3)$$

即水平有效应力=轴压—孔隙压。公式 (3) 可用于考察气固耦合作用对煤瓦斯渗透率的影响。

根据公式 (1)、(3), 将实验数据进行整理作图。图 3~图 6 为不同温度条件下, 煤瓦斯渗透率  $k$  随水平有效应力  $\sigma$  变化的实验曲线图。

1) 由图 3~6, 四种煤样在不同温度情况下, 渗透率均表现为随水平有效应力的增加而减小, 先迅速减小后略有增加的抛物线形式。利用 origin 软件进行数据拟合, 拟合方程形式:  $k_i = a\sigma^2 + b\sigma + c$ , ( $i=1, 2, 3, 4$ )。其中  $a, b, c$  为拟合系数, 脚标 1, 2, 3, 4 分别代表  $20^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}$ 。得到四种煤样水平有效应力与渗透率的抛物线拟合方程。



图 2 温控三轴渗透率测定实验装置  
Fig 2 The experimental instrument of measuring three-axial permeability controlled by temperature

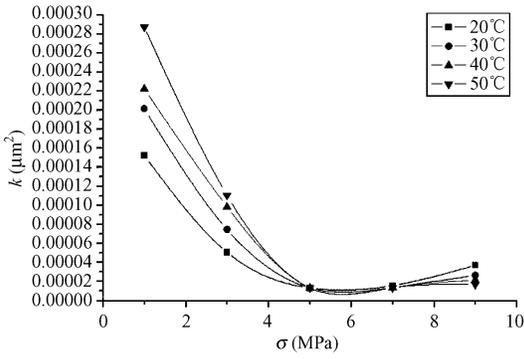


图 3 不同温度下华兴煤样渗透率随有效应力变化曲线

Fig 3 Changing curve of permeability for Huaxing coal at different temperatures

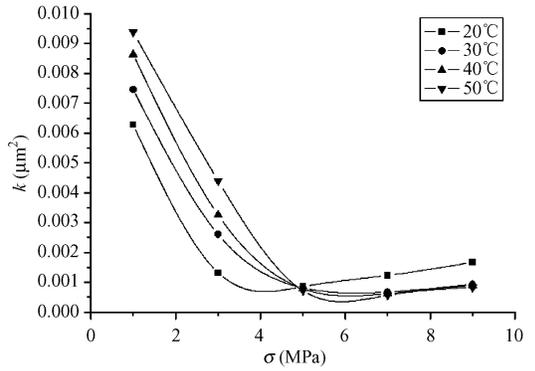


图 4 不同温度下铁法煤样渗透率随有效应力变化曲线

Fig 4 Changing curve of permeability for Tiefa coal at different temperatures

$$\begin{cases} k_1 = 5.11 \times 10^{-6} \sigma^2 - 6.44 \times 10^{-5} \sigma + 1.95 \times 10^{-4} \\ k_2 = 6.09 \times 10^{-6} \sigma^2 - 8.14 \times 10^{-5} \sigma + 2.59 \times 10^{-4} \\ k_3 = 6.23 \times 10^{-6} \sigma^2 - 8.67 \times 10^{-5} \sigma + 2.89 \times 10^{-4} \\ k_4 = 8.18 \times 10^{-6} \sigma^2 - 1.14 \times 10^{-4} \sigma + 3.74 \times 10^{-4} \end{cases}$$

$$\begin{cases} k_1 = 4.04 \times 10^{-6} \sigma^2 - 5.60 \times 10^{-5} \sigma + 1.85 \times 10^{-4} \\ k_2 = 5.57 \times 10^{-6} \sigma^2 - 7.75 \times 10^{-5} \sigma + 2.55 \times 10^{-4} \\ k_3 = 5.93 \times 10^{-6} \sigma^2 - 8.46 \times 10^{-5} \sigma + 2.87 \times 10^{-4} \\ k_4 = 9.31 \times 10^{-6} \sigma^2 - 1.29 \times 10^{-4} \sigma + 4.19 \times 10^{-4} \end{cases}$$

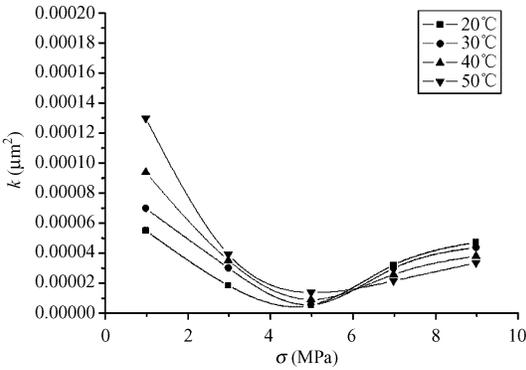


图 5 不同温度下海州煤样渗透率随有效应力变化曲线

Fig 5 Changing curve of permeability for Haizhou coal at different temperatures

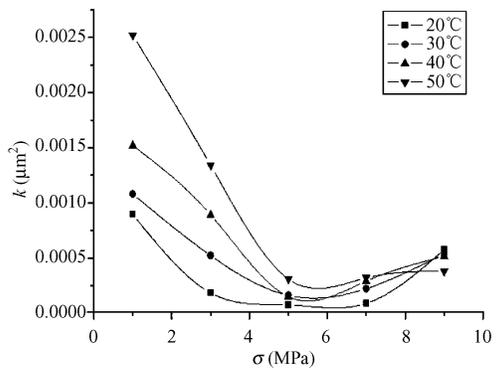


图 6 不同温度下五龙煤样渗透率随有效应力变化曲线

Fig 6 Changing curve of permeability for Wulong coal at different temperatures

$$\begin{cases} k_1 = 2.56 \times 10^{-6} \sigma^2 - 2.57 \times 10^{-5} \sigma + 7.09 \times 10^{-5} \\ k_2 = 2.79 \times 10^{-6} \sigma^2 - 3.05 \times 10^{-5} \sigma + 9.15 \times 10^{-5} \\ k_3 = 3.30 \times 10^{-6} \sigma^2 - 3.90 \times 10^{-5} \sigma + 1.22 \times 10^{-4} \\ k_4 = 4.26 \times 10^{-6} \sigma^2 - 5.31 \times 10^{-5} \sigma + 1.68 \times 10^{-4} \end{cases}$$

$$\begin{cases} k_1 = 4.50 \times 10^{-5} \sigma^2 - 4.86 \times 10^{-4} \sigma + 1.24 \times 10^{-3} \\ k_2 = 3.87 \times 10^{-5} \sigma^2 - 4.56 \times 10^{-4} \sigma + 1.44 \times 10^{-3} \\ k_3 = 4.63 \times 10^{-5} \sigma^2 - 5.93 \times 10^{-4} \sigma + 2.04 \times 10^{-3} \\ k_4 = 6.29 \times 10^{-5} \sigma^2 - 8.94 \times 10^{-4} \sigma + 3.30 \times 10^{-3} \end{cases}$$

2) 由图 3~6 可以看出, 卸载过程中, 煤体在不同温度下均体现了煤层气开采的三阶段主导作用特征。在卸载初期, 煤层水平有效应力不断降低, 渗透率逐渐减小, 此时水平有效应力对渗透率起主导作用; 当有效应力降低到某一数值时, 煤层气从煤基质表面脱附渗流, 煤基质收缩, 出现渗透率由降低到升高的拐点, 此时基质收缩起主导作用; 随着有效应力的进一步降低, 此时滑脱现象开始明显, 煤层气渗透率开始大幅度上升, 这一阶段为滑脱效应主导阶段。这与文献 [7]、[13] 所得常温时煤层气随有效应力变化趋势相一致, 实验在低水平有效应力区与文献 [12] 的实验规律相符合, 由此证明该实验装置的合理性。

3) 加热过程中, 一方面, 煤瓦斯分子吸收热量后, 分子内能增加, 活性增强, 更容易从煤基质表面脱附解吸出来, 这有利于渗透率的增加; 另一方面, 由于煤是具有孔隙-裂隙的双重弹性介质, 在加热后, 煤体孔隙裂隙受热膨胀, 发生应力变形, 气体渗流通道被挤压闭合, 对渗透率起减小作用。由图 3~6 可见, 在卸载初期, 对于煤样温度较低(常温)时, 煤样瓦斯渗透率下降梯度比高温时煤样瓦斯渗透率大, 这是因为在有效应力主导阶段, 高温时, 有效应力与煤固体受热膨胀共同对煤体挤压变形, 尽管气体吸收一定的热量动能增加, 但固体应力变形对渗透率的影响要明显高于气体, 此时渗透率值较低温时低; 在卸载后期, 高温时煤样瓦斯渗透率上升梯度比低温时大, 这是因为煤层压力大幅下降后, 煤体在应力和温度的影响下变形已经充分, 有效应力与煤固体受热影响已经不占主导阶段, 而此时, 气体吸收大量的热量使内能增加, 分子活性增强, 渗流能力增强, 从煤基质表面解吸出来的气体量增多, 气体吸热占主导阶段。故渗透率较低温时上升梯度大, 且渗透率值较低温时高。

温度对渗透率的影响, 在有效应力较低时明显, 而在有效应力较高时则不明显。

### 3 结论

1) 煤体在不同温度条件下, 渗透率随有效应力的加大而减小, 均呈现先迅速减小后稍许增大趋势, 具有典型煤层气开采三阶段主导作用特征。

2) 煤固体受热导致孔隙裂隙膨胀闭合, 对煤体渗透能力起阻碍作用; 气体分子吸热, 内能增加、活性增强对渗透率起改善作用, 在卸载不同阶段, 二者各有主导阶段。

3) 在煤层气开采初期, 煤层气依靠压差由煤层中大量解吸渗流出来, 此时温度对煤层气的渗流能力并无太大帮助, 当开采到一定时期后, 煤层压力进一步降低, 煤体充分变形后, 煤层气产量较低时(即由有效应力主导阶段向煤基质收缩主导阶段和滑脱效应主导阶段过渡时), 此时增加煤层温度和降低有效应力将提高煤层的渗透能力, 从而增加气体产量。

### 4 讨论

煤层气在我国由于其低渗透的特性一直未能形成工业规模。目前, 煤层气增产技术主要围绕在压裂、气体驱替等技术。本文实验得出在一定开采阶段, 升高温度能够增强煤层的渗透性能, 为煤层气增产提供了一个新的途径, 即在煤层气开采中采用先压裂, 后加温的开采方式。在有效应力主导阶段进行煤层气压裂开采, 当煤层气产量减少后, 滑脱效应主导阶段, 对煤层升温进行开采将可能大幅度提高煤层气的产量。升高地层温度的方法较多, 如火烧、电加热、注热等。在这些技术中, 注水蒸汽技术在稠油开采应用较多, 且技术成熟, 将

该项技术应用到煤层气的增产中, 将能通过改变煤层温度达到提高煤层气产量的目的。但该项技术应用到煤层气开采需要考虑的问题很多, 如煤层的导热性能、水蒸气分子堵塞煤层气渗流通道等问题。因此, 采用新技术或如何改进旧技术是热采煤层气应进一步研究的问题。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Somerton W. J, Soylmezoglu I M, Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal [ J ]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 1975, 12 (2): 129~145.
- [ 2 ] Brace W F. A note on permeability change in geologic material due to stress [ J ]. *Pageoph*, 1978, 116 (4/5): 627~632.
- [ 3 ] Enever J R E, Hening A. the relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir mode [ A ]. In: *Proceedings of the 1997 international Coalbed Methane Symposium* [ C ]. Tuscaloosa AL, USA: University of Alatama, 1997, 13~22.
- [ 4 ] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论 [ M ]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [ 5 ] 赵阳升, 胡耀青. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的试验研究 [ J ]. *岩土工程学报*, 1995.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 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): 1564~1567.
- [ 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*, 1997, 20 (5): 22~25.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 孔祥言. 高等渗流力学 [ M ]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. 45~49.
- [ 11 ] 梁冰, 刘建军, 范厚彬, 等. 非等温条件下煤层中瓦斯流动的数学模型及数值解法 [ J ]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19 (1): 1~5.
- [ 12 ] 程瑞端, 陈海焱, 鲜学福, 等. 温度对煤样渗透系数影响的实验研究 [ J ]. *矿业安全与环保*, 1998, 1: 13~16.
- [ 13 ] Hapalanis, Schraufngel R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal [ J ]. *Fuel*, 1991, 69 (5): 551~556.

## EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECT OF TEMPERATURE ON COAL GAS PERMEABILITY UNDER GAS-SOLID COUPLING

YANG Xin-le<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-li<sup>2</sup>

(1. *School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;*

2. *School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China*)

**Abstract:** To observe the effect of temperature on coal gas permeability, an experiment of coal gas permeability was carried out at different temperatures through a three-axial penetration instrument. The results show that, at different temperatures, the permeability of coals assumes a trend of quadric parabola, that is, the permeability first decreases and then increases as the effective stress decreases. In the early unloading, the degressive gradient of coal gas permeability is greater at lower temperature than at high temperature. In the late unloading, coal gas permeability ascending gradient is greater at high temperature than at low temperature. The results show that, in the process of coal bed gas mining, the change of coal gas permeability demonstrate three master phases of typical coal bed methane mining at different temperatures. The effective stress, gas heating and coal solid heating are the important factors influencing coal body permeability. In the early unloading, coal solid heating, expansion and effective stress play a leading role in permeability; in the later unloading, gas sliding and gas absorbing heat play a leading role in permeability. After experimental analysis, adopting the exploitation way of coal bed methane fracturing after injection will help to improve production of coal bed methane.

**Key words:** coal gas; permeability; effective stress; temperature