

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.12.014

# 气体运移导致煤体结构变形演化特征研究 ——以注入氦气为例

王春光<sup>1,2,3</sup>, 王长盛<sup>1</sup>, 陶志刚<sup>2</sup>, 蒋宇静<sup>1</sup>, 谭云亮<sup>1</sup>, 魏明尧<sup>3</sup>, 崔光磊<sup>3</sup>, 吴学震<sup>1,4</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071

4. 长崎大学 工学研究科, 日本 长崎 852-8521)

**摘 要:** 气体运移引起煤体变形是研究煤层气抽采、预防瓦斯突出与温室气体的地质封存的核心问题。一般认为, 有效应力变化是控制岩土类材料骨架变形的关键因素。但大量测试结果表明, 煤的渗透率与有效应力(或者孔隙压力)表现出非线性关系。为此, 应实时观测在静孔隙压力与三轴应力状态下氦气流动导致原煤变形演化全过程。在静孔隙压力状态下煤体经历从收缩到回弹过程。注气压力越大, 煤的收缩与回弹量越大, 且收缩量总是大于回弹量。在三轴应力状态下注气初期煤样迅速膨胀。随着注气达到平衡状态, 煤变形过程与约束条件表现出紧密相关性, 即在应力约束下煤的膨胀率相比注气初期明显减缓; 在位移约束下煤由膨胀转向收缩。上述试验结果表明, 仅有孔隙压力作用下, 煤基质与裂隙之间孔隙压力差可以压缩煤体, 随着气体扩散的进行, 可恢复煤的部分压缩变形量。在三轴应力状态下, 煤的总体变形是裂隙与基质两者变形共同作用的结果。在应力约束下煤基质与裂隙可以自由膨胀。而煤体在位移约束下, 因气体扩散导致煤基质膨胀只能挤压裂隙。根据上述实测结果探讨注气导致煤骨架变形演化机制, 为深入理解煤裂隙与基质相互作用对煤渗透率演化提供试验依据。

**关 键 词:** 注气; 裂隙与基质; 边界条件

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)12-3439-08

## Structure deformation of coal induced by gas migration ——A case of injecting helium gas into intact coal

WANG Chun-guang<sup>1,2,3</sup>, WANG Chang-sheng<sup>1</sup>, TAO Zhi-gang<sup>2</sup>, JIANG Yu-jing<sup>1</sup>,  
TAN Yun-liang<sup>1</sup>, WEI Ming-yao<sup>3</sup>, CUI Guang-lei<sup>3</sup>, WU Xue-zhen<sup>1,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanic and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

4. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan)

**Abstract:** Coal deformation induced by gas migration is significant to investigate coal bed methane recovery and geological sequestration of greenhouse gas. Generally, the variations of effective stress result in the shrinkage of geo-materials. However, the relationship between coal permeability and effective stress or pore pressure is nonlinear from extensive experimental results. Therefore, experiments are performed to study coal deformation caused by the flow of injected pure helium gas under hydrostatic pressure and triaxial stress conditions, respectively. Experimental results show that the coal sample undergoes a transition from shrinkage to recovery under hydrostatic pressure. Although both the coal shrinkage and recovery are proportional to the pressure of injected gas, the magnitude of shrinkage is greater than that of recovery. Under triaxial stress conditions, the coal sample rapidly expands at the beginning of helium injection. As the gas injection approaches equilibrium, the coal deformation is significantly controlled by the boundary condition. The coal expansion rate changes slowly under stress controlled condition, while the coal transits from expansion to shrinkage under displacement controlled condition. The above results indicate that the gas pressure difference between coal matrices and cleats is able to compress the matrix volume, and such compressed coal also could recover due to gas diffusion. In addition, the coal deformation is controlled by the interaction between cleats and matrix. It can be explained that

收稿日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41202194, No. 51474204, No. 51134005); 山东省自然科学基金(No. ZR2012EEQ021); 中国博士后科学基金(No. 2013M542097); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(No. SKLGDUEK1421); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费; 山东省高等学校青年骨干教师国内访问学者项目; 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金(No. Z014006)资助。

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41202194, 51474204 and 51134005), Natural Science Foundation of Shandong Province(Grant No. ZR2012EEQ021), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2013M542097), the Open Project of State Key Laboratory in CUMTB(Grant No. SKLGDUEK1421), ‘Taishan Scholar’ at SDUST, ‘Young Core Instructor and Domestic Visitor’ Foundation From college of Shandong Province and Open Project of State Key Laboratory in IRSM (Grant No. Z014006).

第一作者简介: 王春光, 男, 1982年生, 在读博士后, 讲师, 主要从事煤与瓦斯耦合机理方面的研究工作。E-mail: chunguangkuangda@126.com

coal matrices and cleats expand freely under the stress controlled boundary, while the coal matrix expansion induced by gas diffusion only narrow the aperture of cleats under displacement controlled condition. In conclusion, this study demonstrates the deformation evolution of coal induced by gas injection based on experimental results, which is particularly significant for deeply understanding the coal permeability.

**Keywords:** gas injection; cleat and matrix; boundary condition

## 1 引言

气体运移引起煤体结构变形是研究煤层气抽采、煤与瓦斯突出和温室气体地质封存的关键问题。大量工程实践表明,我国深部煤储层具有高应力、高含气、强吸附、低渗透<sup>[1]</sup>的特点。目前在各大煤矿区实施井下瓦斯抽采有两类:①采动卸压抽采效果好,但受条件限制;②采前预抽无卸压条件,抽采效果差。由于受到采掘开挖以及钻孔周边损伤裂隙区造成的漏气影响,出现抽采浓度衰减快(在短时间内衰减到6%~20%)、抽采寿命短的共性问题<sup>[2-3]</sup>。由此可以看出,虽然采用各种增透技术可以在短期内提高抽气量,但仅是提高致裂煤层的局部渗透率,未扰动区域的渗透率仍然受到原生裂隙制约。需要指明的是,煤储层不仅包含相互正交的割理(裂隙)系统,还包括多种尺度的微孔隙<sup>[4]</sup>,这种复杂的孔隙结构赋予煤储层具有与常规天然气储层明显不同的传导特性<sup>[5-9]</sup>,主要表现为:①低渗透性;②对甲烷与二氧化碳气体有强吸附性;③吸附气体解吸引起煤基质收缩。一般认为,煤层气体运移以2种方式进行(见图1):一种是在裂隙系统进行的渗流过程;另一种是在煤基质进行气体吸附与扩散过程。因此,研究气体渗流与扩散过程对煤骨架变形影响对准确预测煤层渗透率演化有重要意义。

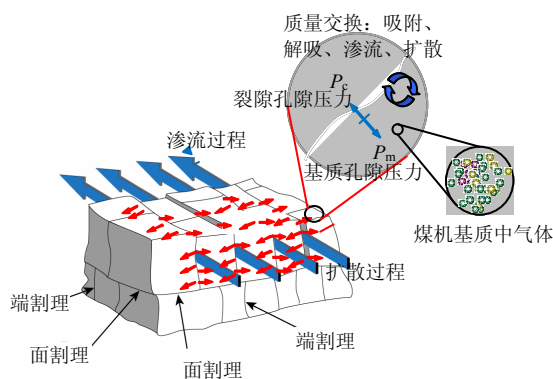


图1 气体在煤端割理与面割理结构中运移方式示意图  
Fig.1 Schematic diagram of gas migration manner within face-butt cleat system of coal mass

煤层渗透率或骨架变形受到煤的变质程度、地温、含气量与气体种类以及地应力等多种因素影响<sup>[10-11]</sup>。随着煤层气(瓦斯)抽采进行,孔隙压力的降低使煤渗透率显现出应力敏感性<sup>[12]</sup>。虽然使用

有效应力原理可以解释砂岩等常规储层变形特征<sup>[13]</sup>,但由于气体吸附会导致煤基质出现膨胀或收缩,这使煤体裂隙开度变化预测变得更加复杂。为此,周世宁等<sup>[14]</sup>认为,瓦斯压力升高扩张微孔隙与微裂隙,并且气体与煤作用引起煤表面张力发生变化;袁梅等<sup>[15]</sup>观测对无烟煤注入甲烷同时加、卸载时,气体压力升高与有效应力增大后渗透率均呈先减小后增大,在加载过程中煤应变变量减小,在卸载过程中煤应变变量增大;尹光志等<sup>[16]</sup>在外部应力恒定条件下观测煤的渗透速率随瓦斯压力升高而增大;刘延保等<sup>[17]</sup>观测不同瓦斯压力下煤的吸附膨胀变形,发现煤应变率随时间逐渐减小至稳定,认为这种煤应变收缩主要归结于瓦斯压力对煤体的压缩作用;潘哲军等<sup>[18]</sup>实测发现,在围压与气压作用下煤的吸附变形量增加,导致渗透率显著降低;吴宇等<sup>[19]</sup>通过数值研究认为,气压较低时,吸附引起的膨胀效应将占主导地位,在高压条件下,有效应力将占主导地位;Majewska等<sup>[20]</sup>在试验中发现煤体会在吸附初期膨胀后有收缩趋势,归结于注入气压的压缩效应占主导地位;吕祥锋等<sup>[21]</sup>对原煤注入甲烷后观测到孔隙压力越大,煤中气体解吸量与煤应变相应增多。

基于上述煤体变形特征,相关煤渗透率模型分为两类:一类是单轴应变假设,简化煤应力-应变关系,适用于大范围煤层条件;另一类是三轴应力假设<sup>[22]</sup>。同时认为,煤基质是不可压缩,其体积模量要大于煤体的体积模量,因此,通常将Biot系数简化为1<sup>[23-24]</sup>。值得注意的是,多数研究工作关注煤吸附/解吸气体引起膨胀/收缩与煤的整体压缩变形相互关系。随着相关研究深入,学术界逐渐认识到孔隙压力对煤基质的压缩变形不能忽视,即Biot系数介于0~1<sup>[25-26]</sup>之间。这意味着煤基质变形不能全部改变裂隙开度变化<sup>[27-28]</sup>,煤裂隙与基质的有效应力相互作用对其孔隙结构存在调整作用。相比气-煤界面发生吸附/解吸过程可以在短时间内完成,而煤基质内气体扩散是缓慢过程。这将导致煤基质内孔隙压力需要较长时间才能与裂隙的孔隙压力平衡,表现出裂隙与基质有效应力变化不同步,导致裂隙开度与基质块体体积长时间处于动态变化之中。

综上所述,本文以注气导致煤的有效应力变化为切入点,分别采用静孔隙压力状态(关注气体扩散对煤基质变形影响)与三轴应力状态条件下(关

注不同边界条件下有效应力变化煤体变形) 注气导致煤体应变过程, 揭示裂隙渗流与基质扩散耦合对煤变形控制机制, 这将为深入研究煤层渗透率演化提供试验依据。

## 2 试验方法

### 2.1 煤样描述

测试煤样取自山东省新巨龙煤矿。煤块从工作面取回实验室后进行取芯、打磨加工成长为 8 cm, 直径为 2.5 cm 圆柱状煤芯。对加煤芯进行 micro-CT 全尺寸扫描。图 2(a)给出煤芯全尺寸 CT 重构三维图像。CT 灰度图像中白色亮斑表征高密度组分, 黑色区域表征中密度组分与低密度或孔隙组分。由于煤裂隙很容易充填矿物质<sup>[29]</sup>, 可以用矿物质分布标记为煤的层理形态。对获取的全尺寸 CT 图像进行阈值分割, 得到矿物组分的空间形貌(见图 2(b)中灰色区域), 可以推测煤层理大致垂直煤芯的轴向。将煤芯外表面用酒精擦拭干净后, 分别沿其轴向与环向粘贴电阻应变片(煤芯的体积应变  $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_a + 2\Delta\varepsilon_r$ , 其中  $\Delta\varepsilon_a$  为轴向应变,  $\Delta\varepsilon_r$  为环向应变)。根据层理走向, 可以认为, 轴向应变表征垂直层理方向应变, 而环向应变表征顺层理方向应变。

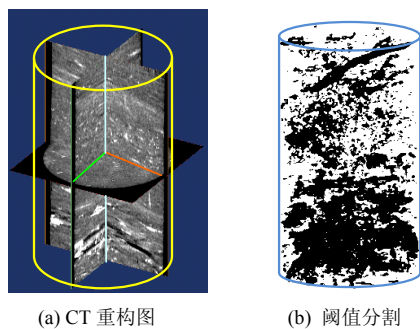


图 2 测试煤芯的 CT 图像与阈值分割图像  
Fig.2 3D CT image and threshold segmentation method of coal sample

本研究使用的测试系统主要包括夹持器、气源、标准气体室、数据采集仪、柱塞泵与气体传感器(见图 3)。其中夹持器由壳体、注气腔与出气腔组成。气源出口设有减压阀, 可以根据试验要求调节标准气体室内气压。本研究采用测试气体为氦气, 主要是考虑到氦气不会对煤引起吸附膨胀效应, 仅考虑注气压力对煤骨架影响。

为了研究气体渗流与扩散对煤骨架变形影响, 本文采用两类测试过程: 一类是在静孔隙压力状态下注气。在测试中不对煤施加外部应力, 煤表面没

有胶套密封并且裂隙未闭合, 注入气体直接流入煤体, 在短时间内煤裂隙孔隙压力与气源压力平衡, 注气压力可直接作用在煤基质(见图 4(a))。

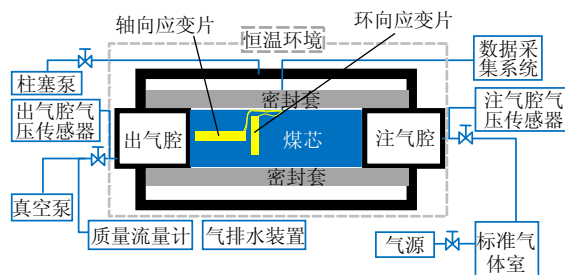


图 3 注气测试系统结构示意图  
Fig.3 Schematic diagram of gas injection facility

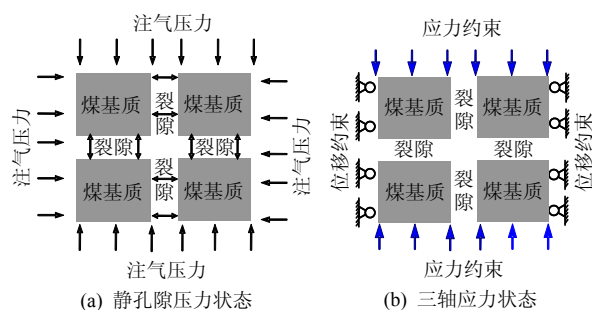


图 4 煤试样边界条件示意图  
Fig.4 Schematic diagram of boundary condition of coal sample

另一类是在三轴应力状态下注气。该过程采用有侧向位移约束的假三轴应力条件(见图 4(b)), 旨在将煤层简化为无限大水平面后在任意竖直面与水平面上无剪应力存在。在垂向覆岩自重应力作用下煤层只能产生垂向变形, 不能有侧向变形和剪切变形。一旦气体注入后, 煤体内孔隙压力升高导致煤裂隙与基质的有效应力变化, 进而改变不同边界条件下轴向与环向应变。

### 2.2 静孔隙压力状态测试过程

标准气体室内初始气压见表 1。具体测试过程为: 首先使夹持器内温度达到 30 °C 恒温状态, 开启真空泵将煤芯抽真空使夹持器内真空度达到  $10^{-3}$  Pa, 将标准气体室内气压达到预设值, 再将标准气体、室内气体导入夹持器内。全过程采集煤芯的应变数据, 直到煤应变趋于变化平稳即可终止该注气压力测试, 重复上述步骤进行下一级注气测试。

表 1 测试参数  
Table 1 Measured stress parameters

类别	静孔隙压力状态	三轴应力状态(环向应力 6 MPa)
注气压力/MPa	1.85, 3.75, 5.20, 6.70	1.098, 2.075, 2.965, 3.697

### 2.3 三轴应力状态测试过程

标准气体室内初始压力见表 1。在 30 °C 恒温环境夹持器内真空度达到  $10^{-3}$  Pa 条件后, 首先启动柱塞泵往夹持器腔内施压, 使煤芯环向应力升至 6 MPa。在煤芯与标准气体室之间安设气体调节阀, 可以控制气体进入煤芯的速率。氦气从注气腔进入煤芯, 从另一端流出并存储在出气腔内, 实时采集记录煤芯应变数据和夹持器注气腔与出气腔气压变化, 直至夹持器两端气压平衡, 即可终止本级压力测试。重新对煤芯抽真空后, 重复上述步骤进行不同注气压力测试。

## 3 试验结果分析

### 3.1 静孔隙压力状态测试结果

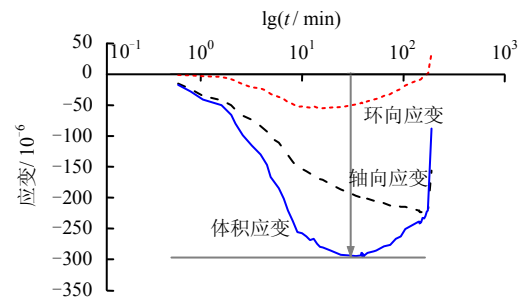
为了比较不同静孔隙压力状态下煤的应变演化过程, 本部分采用应变与时间对数形式表达(见图 5)。由于该测试条件下没有外部应力影响, 煤裂隙处于未闭合状态。在注气开始阶段随着氦气快速进入煤芯, 沿平行层理与垂直层理方向的应变均出现快速收缩。对比不同注气压力作用下煤变形初期曲线, 可以看出, 随着注气压力升高, 煤体积应变收缩量增大, 即在 1.9 MPa 收缩至  $-300 \times 10^{-6}$  (见图 5(a)); 在 3.75 MPa 收缩至  $-500 \times 10^{-6}$  (见图 5(b)); 在 5.1 MPa 收缩至  $-760 \times 10^{-6}$  (见图 5(c)); 在 6.6 MPa 收缩至  $-950 \times 10^{-6}$  (见图 5(d))。但随着注气持续进行, 煤样在经历过初期收缩后均出现回弹。在 1.9 MPa 与 3.75 MPa 注气压力作用下, 煤体积应变仅表现出少量回弹即保持稳定。而对于 5.1 MPa 注气压力, 煤应变从  $-760 \times 10^{-6}$  回弹至  $-400 \times 10^{-6}$ 。与此类似, 注气压力在 6.6 MPa 静压下应变从  $-950 \times 10^{-6}$  回弹至  $-300 \times 10^{-6}$ 。由此可以看出, 注气压力与回弹变形量呈正相关变化。此外, 在注气过程中煤体变形表现出显著各向异性特征, 垂直层理方向应变大于平行层理方向应变。

### 3.2 三轴应力状态测试结果

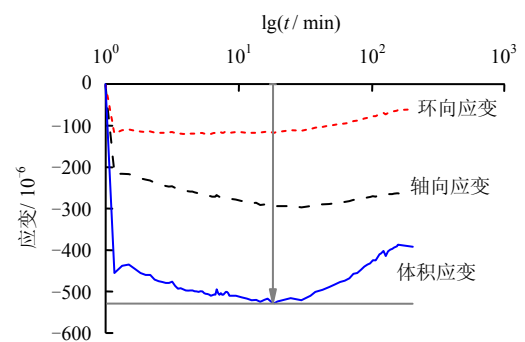
在侧限条件下不同注气压力注气导致煤变形结果见图 6。

如图 6(a)所示, 在 1.20 MPa 氦气注入煤芯初期, 煤轴向与环向应变均迅速增大, 其中轴向应变增加速率大于环向应变增加速率。轴向应变迅速增至  $98 \times 10^{-6}$  后基本保持不变, 直到 2 000 s 后开始缓慢降低至  $60 \times 10^{-6}$ 。而环向应变在注气 200 s 后增至  $47 \times 10^{-6}$ , 之后应变缓慢减小, 在 3 000 s 左右降至  $35 \times 10^{-6}$ 。在此阶段注气腔内气压缓慢降低, 而出气腔内气压相应缓慢升高。在注气 25 000 s 后煤芯

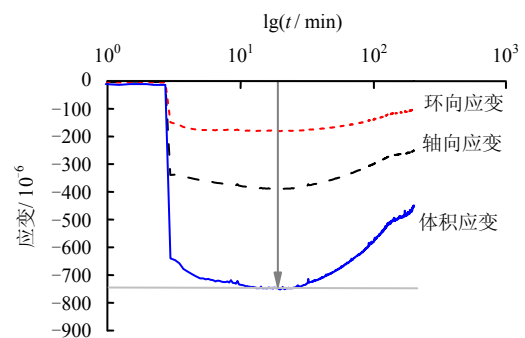
两端气压达到平衡, 此时平衡气压为 0.98 MPa。在煤芯内气压平衡后, 轴向与环向应变均缓慢增大, 在 70 000 s 后分别稳定在  $84 \times 10^{-6}$  和  $130 \times 10^{-6}$ 。



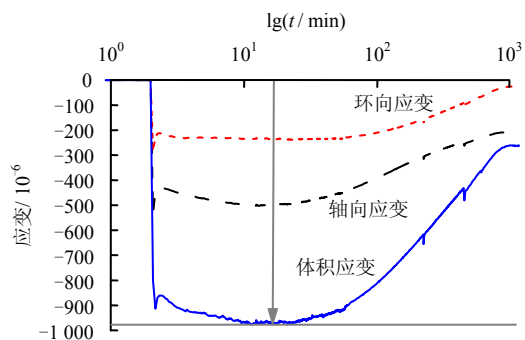
(a) 注气压力 1.85 MPa



(b) 注气压力 3.75 MPa



(c) 注气压力 5.20 MPa



(d) 注气压力 6.70 MPa

图 5 不同静孔隙压力状态煤变形曲线  
Fig.5 Evolution of coal strain under different hydrostatic pore pressure conditions

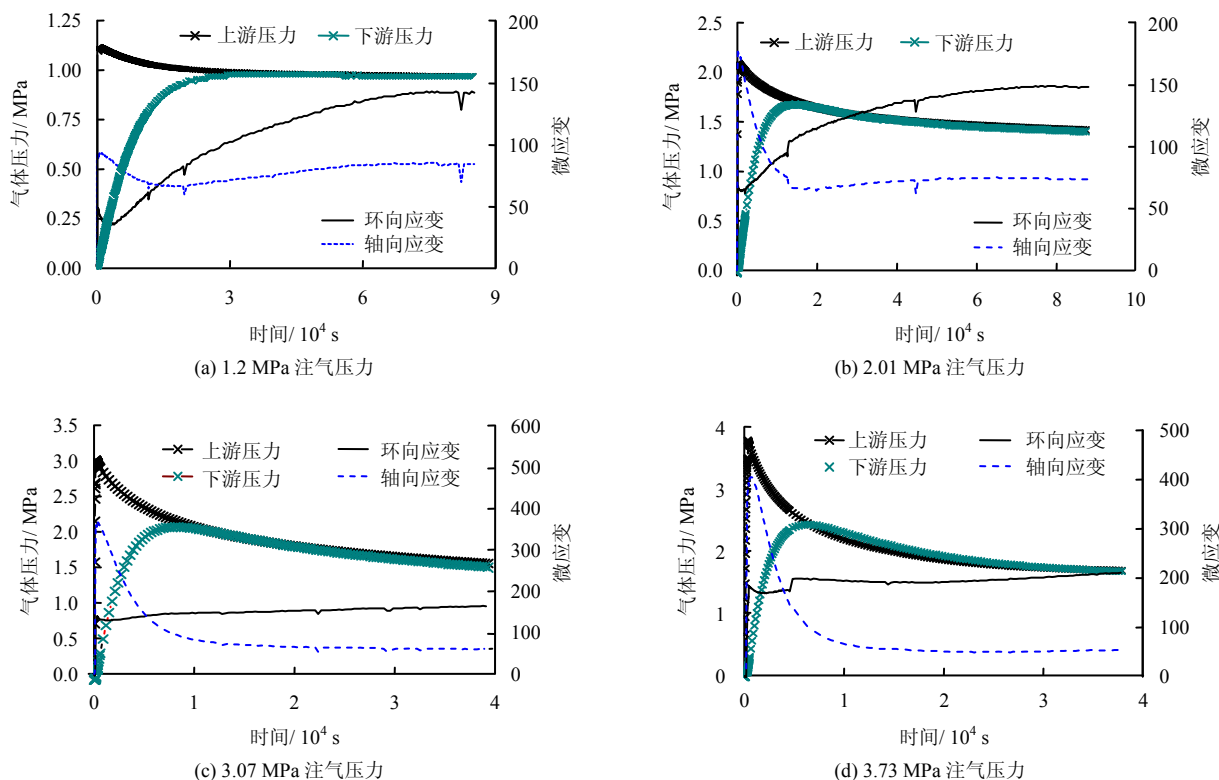


图 6 恒定应力条件下不同注气压力导致煤体变形演化过程  
 Fig.6 Gas injection induced evolution of coal strain under constant external stress

图 6(b)为注入 2.01 MPa 氦气后煤变形全过程曲线。与注入 1.2 MPa 氦气结果类似，轴向与环向应变分别在注气 240 s 内快速升至  $250 \times 10^{-6}$  与  $90 \times 10^{-6}$ ，之后轴向应变维持稳定至 800 s 左右后开始减小，在注气 12 000 s 后维持在  $75 \times 10^{-6}$ 。而环向应变稳定至 2 000 s 后开始缓慢增加，最终维持在  $180 \times 10^{-6}$ 。煤体内气压在 14 000 s 后达到 1.67 MPa 平衡压力，之后缓慢下降在 80 000 s 后基本保持在 1.3 MPa。

图 6(c)为注入 3.07 MPa 氦气煤变形全过程曲线。在注气开始后 160 s 内煤芯轴向应变迅速增至  $360 \times 10^{-6}$ ，450 s 后缓慢下降，在 10 000 s 后维持在  $50 \times 10^{-6}$  左右。环向应变在初期增大至  $140 \times 10^{-6}$  后保持到 1 000 s 后开始缓慢增大，最终保持在  $150 \times 10^{-6}$ 。煤两端气压平衡时间缩短至 10 000 s 左右，平衡点压力为 2.071 MPa，注气 40 000 s 后气压最终稳定至 1.5 MPa，轴向应变始终维持在  $50 \times 10^{-6}$  左右，环向应变缓慢增至  $163 \times 10^{-6}$  并保持稳定。

图 6(d)为对煤芯注入 3.73 MPa 氦气后煤变形全过程曲线。在注气 400 s 过程中煤轴向应变先增至  $400 \times 10^{-6}$ ，维持到 780 s 后减小至  $50 \times 10^{-6}$  左右。而环向应变在 470 s 后增至  $200 \times 10^{-6}$ 。煤体内气压平衡时间缩短至 6 600 s 左右，平衡点气压为 2.43 MPa。在此之后，随着夹持器内气体不断扩散至煤基质内部，造成煤体内气压逐渐降低并稳定在 1.69 MPa，

此时轴向应变与环向应变也分别稳定在  $54 \times 10^{-6}$  和  $210 \times 10^{-6}$ 。

## 4 讨论

### 4.1 静孔隙压力状态氦气注入引起煤体变形演化特征

根据有效应力原理，当多孔弹性介质所受外部应力与其内部孔隙压相等时，介质骨架将不发生任何形变。对比本文 3.1 节所述不同静孔隙压力状态下煤的应变曲线可以看出，测试煤的整体形状随着注气进行出现先收缩后回弹现象，呈不对称下凹型变化。说明注气初期煤应变随时间变化率大于注气后期煤应变变化率。Robertson<sup>[30]</sup>通过实测与数值验证手段认为，裂隙系统渗透率高于煤基质渗透率大约 8 个数量级。这就意味着注入气体可以很容易进入煤裂隙系统，使其孔隙压力随之升高并迅速与外界压力平衡，而在此阶段煤基质的孔隙压力变化缓慢，煤基质在这种不平衡的孔隙压差作用下表现出快速收缩，在此之后，随着气体开始向基质内部运移（气体扩散与渗流并存），使基质内孔隙压力缓慢升高，导致在注气初期出现的不平衡孔隙压力差逐渐减小，压缩的基质开始出现回弹。考虑到煤基质相比裂隙非常致密，孔隙压力差平衡时间相应延长，在整体上表现出煤的回弹率低于压缩率。值得注意

的是,在相同孔隙尺寸以及气体性质条件下,孔隙压力越大,气体的扩散系数与煤基质的渗透性均相应增强<sup>[31]</sup>。从图7中也可以看出,注气压力越大,煤样的收缩量与回弹量也相应增大,且回弹量所占压缩比例逐渐增大。该结果证实,在高孔隙压力下煤基质内气体运移速率增强。

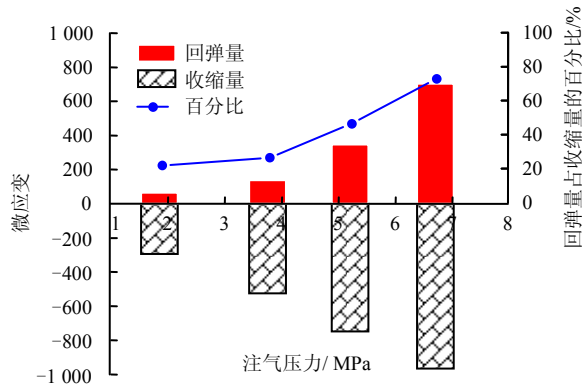


图7 静孔隙压力状态下煤体压缩与回弹量

Fig.7 Comparison between compressive strain and rebound strain under different hydrostatic conditions

#### 4.2 三轴应力状态氦气注入引起煤体变形演化特征

当外部应力作用时,煤体内裂隙与基质处于压缩状态,注入气体后引起裂隙与基质相互调整。对比上述6 MPa环向应力作用下不同压力氦气注入引起煤体应变曲线,可将煤体变形过程依次分为3个阶段。

第1阶段:注气初期煤体出现显著膨胀变形,这主要是因为裂隙系统孔隙压力升高而导致煤结构的面割理与端割理开度同时增大。虽然此时裂隙两侧的基质在外应力与孔隙压力双重作用下迅速收缩,却仍表现出整体膨胀。

第2阶段:在注气持续2 mins左右后,轴向应变表现出减小趋势,而环向应变维持稳定。造成这种应变各向异性趋势主要是不同边界条件所致。气体充满裂隙后就向其两侧的基质运移,引起基质内孔隙压力不断升高,有效应力随之降低。煤基质从注气前的压缩状态逐渐回弹。在两端轴向变形约束下,基质只能趋向裂隙回弹,挤压裂隙开度。在应力约束下,由于没有变形限制,煤体可以自由变形。随着注入气体从裂隙向基质运移,裂隙系统孔隙压力降低,而基质孔隙压力升高,因有效应力变化导致煤基质膨胀变形会抵消裂隙的收缩,因此,在该阶段出现应变基本维持稳定状态。

第3阶段:随着注气持续进行,煤的注气端与出气端气压逐渐达到平衡状态,意味着煤体各点裂隙系统内的渗流过程结束。注入气体开始以扩散过

程为主。随着气体不断进入煤基质的微孔隙,煤裂隙气压持续降低,基质的孔隙压力逐渐升高。相比上述第2阶段基质内气体运移过程,第3阶段的气体运移以在微孔(<2 nm)中扩散为主,基质可以持续膨胀。注气压力越高,意味着能够进入基质内气体数量越多、裂隙孔隙压力降幅越大,有效应力随之升高,这就导致在高注气压力下轴向与环向应变在后期变化量因煤的整体压缩而增幅变小。

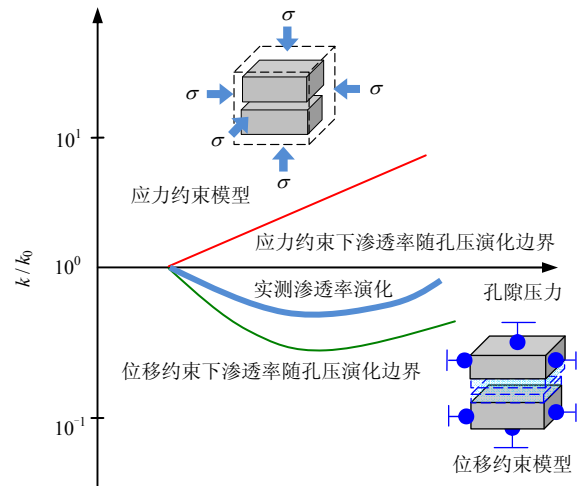


图8 不同边界条件下煤的渗透率演化过程示意图

Fig.8 Schematic diagram of permeability evolution of coal under different boundary conditions

#### 4.3 煤变形对煤渗透率影响分析

通常意义认为煤体渗透率是指煤裂隙的渗透率,一般采用立方定律 $k/k_0 = (\phi/\phi_0)^3$ 描述裂隙开度与渗透率变化关系。刘继山等<sup>[32]</sup>针对煤渗透率模型假设条件提出两种极端约束边界条件,一种是应力约束边界(控制煤样外部主应力恒定或者一个方向主应力变化);另一种是位移约束边界(限制煤样沿任意方向变形),如图8所示。虽然几乎所有室内渗透率测试过程都是采用恒定应力控制条件,但测试结果更接近于常体积状态。而且现场观测数据也表明,煤储层赋存状态更接近于恒定体积条件。例如在煤层气抽采过程中煤层渗透率会逐渐增加<sup>[33-34]</sup>;而使用CO<sub>2</sub>驱替煤层气时,煤层渗透率会逐渐降低并导致CO<sub>2</sub>注入率下降<sup>[35-36]</sup>。这些现象说明,在气体运移过程中,煤裂隙开度始终处于变化状态。

考虑到煤具有双重孔隙结构,裂隙开度变化一方面受有效应力影响;另一方面还受裂隙两侧基质变形的影响。虽然本研究采用的是不引起吸附效应的氦气作为注入流体,但从本文测试结果看,无论是在应力控制还是在位移控制条件下,气体都以渗流方式迅速充满裂隙,使煤裂隙孔隙压力升高,在

短时间内导致裂隙开度增加,煤渗透率也必然增加。当煤裂隙系统内孔隙压力平衡后,基质开始随着气体扩散使其内外压力差消失,最终发生回弹膨胀变形。在应力控制边界条件下表现为煤样整体继续膨胀,意味着裂隙开度处于张开,渗透率也相应增加状态,这与图 8 所示的应力控制下渗透率演化边界在趋势上是一致的。而在位移控制边界条件下表现为煤样整体出现膨胀-收缩转换,也就是裂隙开度或渗透率经历了先增大再减小过程。从图 7 可以看出,注气压力越大,煤的回弹量所在收缩量的比例逐渐增大,说明裂隙开度的收缩逐渐占主导,这与图 8 中位移控制下渗透率演化边界的前半段趋势也是吻合的。当然,由于受到试验条件限制,本文没有进行较高注气压力条件下煤体变形测试,这是在下一步研究工作中需要考虑的。

## 5 结 论

(1) 在无外部应力作用的静孔隙压力状态下,煤体经历从收缩到回弹过程,并且煤的收缩与回弹量随注气压力升高而增大,且收缩量总是大于回弹量。这意味着在煤内部裂隙与基质之间孔隙压力差的存在可以引起煤基质收缩变形,并且这种变形会因注入气体进入煤基质,持续削减孔隙压力差使收缩变形量得到部分回弹。

(2) 在有外部应力作用的三轴应力状态下,注气导致的煤变形包括裂隙与基质两部分。注气初期以显著导致裂隙扩张,随着气体不断进入煤内部,煤基质开始出现回弹。但煤在注气后期的变形过程与约束条件表现出紧密相关性,即在应力约束下,煤基质可以自由膨胀导致煤的膨胀率相比注气初期明显减缓。而在位移约束下,因气体扩散导致煤基质膨胀只能挤压临近裂隙,使煤整体在注气后期表现出收缩趋势。

## 参 考 文 献

- [1] 据宜文,姜波,王桂梁,等.构造煤结构与储层物性[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005.  
JU Yi-wen,JIANG Bo,WANG Gui-liang,et al.structures of deformed coal and physical properties of reservoirs[M].Xuzhou:China University of Mining and Technology Press,2005.
- [2] ZHOU FU-BAO,XIA TONG-QIANG,HU SHENG-YONG,et al.A novel technology to control the quality of pre-mining methane drainage[C]//Proceedings of 2013 International Pittsburgh Coal Conference.Beijing:[s. n.],2013:16-19.
- [3] XIA TONGQIANG,ZHOU FUBAO,LIU JISHAN,et al.Evaluation of the pre-drained coal seam gas quality[J].**Fuel**,2014,130(8):296-305.
- [4] BAE J S,BHATIA S K.High-pressure adsorption of methane and carbon dioxide on coal[J].**Energy and Fuels**,2006,20,2599-2607.
- [5] VANDAMME M,BROCHARD L,LECAMPION B,et al.Adsorption and strain:The CO<sub>2</sub>-induced swelling of coal[J].**Journal of the Mechanics and Physics of Solids**,2010,58:1489-1505.
- [6] WHITE C M.Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery—a review[J].**Energy and Fuels**,2005,19:659-724.
- [7] WANG F Y,ZHU P Z H,MASSAROTTO P,et al.Mass transfer in coal seams for CO<sub>2</sub> sequestration[J].**AIChE Journal**,2007,53:1028-1049.
- [8] KARACAN C Ö.Heterogeneous sorption and swelling in a confined and stressed coal during CO<sub>2</sub> injection[J].**Energy and Fuels**,2003,17(6):1595-1608.
- [9] LARSEN J W.The effects of dissolved CO<sub>2</sub> on coal structure and properties[J].**International Journal of Coal Geology**,2004,57:63-70.
- [10] 程远平,刘洪永,郭品坤,等.深部含瓦斯煤体渗透率演化及卸荷增透理论模型[J].**煤炭学报**,2014,39(8):1650-1658.  
CHENG Yuan-ping,LIU Hong-yong,GUO Pin-kun,et al.,A theoretical model and evolution characteristic of mining-enhanced permeability in deeper gassy coal seam[J].**Journal of China Coal Society**,2014,39(8):1650-1658.
- [11] JASINGE D,RANJITH P G,CHOI S K.Effects of effective stress changes on permeability of Latrobe valley brown coal[J].**Fuel**,2011,90:1292-1300.
- [12] SOMERTON W H,SOYLEMEZOGLU I M,DUDLEY R C.Effect of stress on permeability of coal[J].**International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences& Geomechanics**,1975,12:129-145.
- [13] BRACE W F.A note on permeability changes in geologic material due to stress[J].**Pure Applied Geophysics**,1978,116(4-5):627-633.
- [14] 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.  
ZHOU Shi-ning,LIN Bo-quan.The theory of gas flow and storage in coal seams[M].Beijing:China Coal Industry Publishing House,1999.
- [15] 袁梅,许江,李波波,等.气体压力加卸载过程中无烟煤变形及渗透特性的试验研究[J].**岩石力学与工程学报**,2014,33(10):2138-2247.

- YUAN Mei, XU Jiang, LI Bobo, et al. Experimental study of permeability and deformation of anthracite during process of gaseous loading-unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(10): 2138—2247.
- [16] 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 study of effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 697—702.
- [17] 刘延保, 曹树刚, 李勇, 等. 煤体吸附瓦斯膨胀变形效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(12): 2484—2492.
- LIU Yan-bao, CAO Shu-gang, LI Yong, et al. Experimental study of swelling deformation effect of coal induced by gas adsorption[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(12): 2484—2492.
- [18] PAN Z J, CONNELL L D, CAMILLERI M. Laboratory characterization of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 82(3—4): 252—261.
- [19] WU Y, LIU J, ELSWORTH D, et al. Evolution of coal permeability: Contribution of heterogeneous swelling processes[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 88(2—3): 152—162.
- [20] MAJEWSKA ZOFIA, CEGLARSKA-STEFANŃSKA GRAŻYNA, MAJEWSKI STANISŁAW, et al. Binary gas sorption/desorption experiments on a bituminous coal: Simultaneous measurements on sorption kinetics, volumetric strain and acoustic emission[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 77: 90—102.
- [21] 吕祥锋, 潘一山, 刘建军, 等. 孔隙压力对煤岩基质解吸变形影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 31(11): 3447—3452.
- LÜ Xiang-feng, PAN Yi-shan, LIU Jian-jun, et al. Experimental study of effect of pore pressure on desorption deformation of coal matrix[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 31(11): 3447—3452.
- [22] LIU JISHAN, CHEN ZHONGWEI, DEREK ELSWORTH, et al. Interaction of multiple processes during CBM extraction: a critical review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 87: 175—189.
- [23] SHI J Q, DURUCAN S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery[J]. *Transport in Porous Media*, 2004, 56(1): 1—16.
- [24] LIU H H, RUTQVIST J. A new coal-permeability model: internal swelling stress and fracture-matrix interaction[J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 82(1): 157—171.
- [25] HOL S, SPIERS C J. Competition between adsorption-induced swelling and elastic compression of coal at CO<sub>2</sub> pressures up to 100 MPa[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2012, 60(11): 1862—1882.
- [26] PAN Z, CONNELL L D. A theoretical model for gas adsorption-induced coal swelling[J]. *International Journal Coal Geology*, 2007, 69(4): 243—252.
- [27] LIU JISHAN, WANG JIANGUO, CHEN ZHONGWEI, et al. Impact of transition from local swelling to macro swelling on the evolution of coal permeability[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 88: 31—40.
- [28] GUO PINGKUN, CHENG YUANPING, JIN KAN, et al. Impact of effective stress and matrix deformation on the coal fracture permeability[J]. *Transport in Porous Media*, 2014, 103: 99—115.
- [29] SPEARS D A, CASWELL S A. Mineral matter in coals: Cleat minerals and their origin in some coals from the English midlands[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1986, 6: 107—125.
- [30] ROBERTSON E P. Measurement and modeling of sorption-induced strain and permeability changes in coal[R]. [S. l.]: Idaho National Laboratory, 2005.
- [31] PENG Y, LIU J S, WEI M Y, et al. Why coal permeability changes under free swelling: New insights[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 133: 35—46.
- [32] LIU JISHAN, CHEN ZHONGWEI, ELSWORTH DEREK. Interactions of multiple processes during CBM extraction: A critical review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 87(3—4): 175—189.
- [33] CLARKSON C R, PAN Z, PALMER I D, et al. Predicting sorption-induced strain and permeability increase with depletion for CBM reservoirs[J]. *SPE Journal*, 2010, 15(1): 152—159.
- [34] CHERIAN B V. An integrated single-well reservoir properties in the wind dancer field[C]//Tight Gas Completions Conference. San Antonio: Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [35] REEVES S, TAILLEFERT A, PEKOT L, et al. The Allison unit CO<sub>2</sub>-ECBM pilot: a reservoir modelling study[R]. [S. l.]: U.S. Department of Energy, 2003.
- [36] WONG S. Enhanced coalbed methane and CO<sub>2</sub> storage in anthracitic coals—micro-pilot test at South Qinshui, Shanxi, China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(2): 215—222.