

# Experimental Study on Seepage Properties of Raw Coal under Unloading Confining Pressure

Dongming Zhang<sup>1,2</sup>, Yushun Yang<sup>1,2</sup>, Song Yang<sup>3</sup>, Wende Sun<sup>3</sup>, Yanguang Xue<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing

<sup>2</sup>College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing

<sup>3</sup>Shanmushu Mine, FuRong Company, Sichuan Coal Group, Yibin Sichuan

Email: zhangdm@cqu.edu.cn

Received: Mar. 30<sup>th</sup>, 2018; accepted: Apr. 16<sup>th</sup>, 2018; published: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2018

## Abstract

Based on the "THM coupled with servo-controlled seepage apparatus for containing-gas coal", performed on raw coal samples of 2 + 3# coal seam in Shamushu coal mine, Sichuan coal group as the research object, an experimental study was carried out to investigate the permeability property with different gas pressure and different moisture content; these tests include fixed axial stress and unloading confining stress. The results show that, with the unloading confining pressure, the pores of coal samples open slowly, the porosity increases, the gas permeability increases, and the permeability of coal sample increases gradually, and the relationship between permeability and confining pressure is negative exponential function. The permeability of coal samples increases with the increase of gas pressure, and decreases with the increase of moisture content in early stage of unloading confining pressure. The higher the gas pressure, the higher the permeability of coal samples. The greater the water content, the lower the permeability of coal samples. During the unloading process, the radial strain of coal sample gradually recovers and increases gradually, and the Poisson's ratio of coal sample decreases with the increase of radial strain during loading and unloading

## Keywords

Unloading Confining, Moisture Content, Permeability, Coal Containing Gas, Experimental Research

## 卸围压作用下原煤渗透特性试验研究

张东明<sup>1,2</sup>, 杨玉顺<sup>1,2</sup>, 杨松<sup>3</sup>, 孙文德<sup>3</sup>, 薛燕光<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>重庆大学, 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆

<sup>2</sup>重庆大学, 资源及环境科学学院, 重庆

<sup>3</sup>四川芙蓉集团实业有限责任公司杉木树煤矿, 四川 宜宾  
Email: zhangdm@cqu.edu.cn

收稿日期: 2018年3月30日; 录用日期: 2018年4月16日; 发布日期: 2018年4月23日

## 摘要

利用自行研制的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流试验装置, 以川煤集团杉木树煤矿2 + 3#煤层制作的原煤样为研究对象, 进行不同瓦斯压力和不同含水率卸围压条件下(固定轴压卸围压)含瓦斯煤渗透特性的试验研究, 研究表明, 随着围压的卸载, 煤样孔隙缓慢张开, 孔隙率增大, 气体通过煤样能力增强, 煤样渗透率逐渐增大, 且煤样渗透率与围压呈负指数函数关系; 卸围压初期煤样渗透率随瓦斯压力的增加逐渐增大, 随含水率的增加呈波动状减小; 瓦斯压力越大, 煤样渗透率越高。含水率越大, 煤样渗透率越低; 卸载过程中煤样径向应变逐渐恢复呈上凸型缓慢增大, 加卸载过程中煤样泊松比随径向应变的增加呈下凸型减小。

## 关键词

卸围压, 含水率, 渗透率, 含瓦斯煤, 试验研究

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

瓦斯事故是我国煤矿灾害中较为突出的事故之一, 尤其是高瓦斯低渗煤层严重制约我国煤与瓦斯资源的安全共采[1] [2]。同时, 煤层渗透率也是影响煤层瓦斯赋存、运移、抽放以及煤与瓦斯突出的重要参数之一, 煤层瓦斯抽采是防治煤与瓦斯突出的有效手段之一, 地下采煤过程中瓦斯向煤体破坏区域运移, 而瓦斯在煤层中运移受煤体结构、地质构造、应力状态、水分特性等多重因素影响。工作面回采过程中, 前方煤体应力状态发生变化, 经历复杂的加载和卸载的共同作用。不同加卸载条件对含瓦斯煤的力学特性有不同的影响。目前, 对于不同卸荷条件下含瓦斯煤岩变形特性及渗透规律研究较多, 祝捷等[3]认为有效应力是研究煤体变形和渗透率关系的重要参数。许江等[4] [5]研究了加卸载及循环载荷下煤样渗透率变化规律; Jiang 等[6]研究了在分级循环加载条件下煤体的渗透性、声发射特性和能量耗散特性。孙光中等[7]认为循环加卸载使煤样中孔隙进一步压缩, 渗透率损失量增大, 同时渗透率对于有效应力的敏感度降低。王登科等[8]分析了不同应力路径下的含瓦斯煤渗透特性, 并建立了渗透率与轴向压力、围压、瓦斯压力等之间的关系。

以上研究大多是对干燥煤样进行, 而煤层中瓦斯抽采必然伴随着水分的存在, 特别是下行孔进行瓦斯抽采是更是受到水的影响, 因此考虑水分的影响更能客观反映出瓦斯气体在煤层中的赋存状态和流动规律。目前关于水分对含瓦斯煤渗透特性影响的研究并不多见, 冯增朝等[9]从吸附角度考虑了含水率的影响; 尹光志等[10]研究认为煤体含水率与甲烷有效渗透率关系可用线性函数表述; Wang 等[11]以构造没为研究对象认为随着含水率的增加煤的孔隙率降低, 从而最终导致煤的渗透率降低; 魏建平等[12]

指出,水分及围压都是影响煤样渗透率的重要因素,且与渗透率呈负相关关系。可以看出目前关于水分对含瓦斯煤渗透特性影响的研究较少,且大多实验研究采用型煤进行。因此,本文采用原煤研究卸围压作用下不同瓦斯压力和不同含水率条件含瓦斯煤渗透特性,以期对低渗煤层瓦斯治理提供一定的理论指导。

## 2. 实验装置与方案

### 2.1. 实验装置

实验采用重庆大学自行研制的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置[10],如图1所示。

### 2.2. 实验样品

本实验样品取自川煤集团杉木树煤矿2+3#煤层,首先利用 $\varnothing 50$  mm的岩芯管在新鲜块煤上钻取出长度大于100 mm的岩芯,然后利用端磨机将岩芯打磨成 $\varnothing 50 \times 100$  mm的标准煤样,且将试件的端面平整度控制的0.05 mm内,最后将制作好的原煤试样置于干燥箱内烘干,煤样如图2所示。

### 2.3. 试验方案

为了获得卸围压条件下含瓦斯煤力学性质的演化特性以及渗透率变化规律,分别选取烘干煤样和制作不同含水率煤样。烘干煤样选取不同瓦斯压力分别为0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa和3.0 MPa,



Figure 1. Tri-axial stress thermal-hydrological-mechanical Coal Gas Permeameter

图1. 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置



Figure 2. Raw coal samples for testing

图2. 试验所用原煤煤样

加卸载比 5:1; 含水率煤样, 制取不同含水率分别为 1.18%、1.78%、2.11%、2.82% 和 3.28%, 固定瓦斯压力 1.0 MPa, 加卸载比 5:1 条件下, 卸围压后瓦斯煤力学性质的演化特性以及渗透率变化规律。

本次渗透试验采用纯度为 99.99% 的甲烷气体, 试验过程中控制  $p_1 < \text{围压}(\sigma_2 = \sigma_3)$ , 否则会使热缩管密封失效而使试验失败。试验数据记录频率是 1 s/次。试验前, 首先用标准金属试件对系统的气密性进行检测。具体试验步骤如下:

1) 先用热缩管密封煤样, 防止试验过程中瓦斯气体从侧面逸出, 具体: 用硅胶均匀涂抹煤样侧表面, 置于通风处晾干。截取长 15 cm 热缩管, 将煤样放入管内中部, 把试样置于底座上, 放上压头, 用电吹风对热缩管加热使其收缩紧握于煤样、底座及上压头, 用金属箍固定热缩管两端于底座和压头上, 待硅胶干后小心放下压力室, 拧紧螺丝使其与基座紧密结合, 把渗流系统推上压力机平台准备试验。

2) 启动液压油泵, 关闭出气阀门, 打开排气阀排出压力室内空气, 调节控制围压阀门, 根据试验方案加载初始轴压和围压至静水压力 3 MPa。

3) 检查装置的密封性, 确认无误后连接进气管, 打开瓦斯罐开关, 调节减压阀往煤样中通入瓦斯气体, 施加瓦斯压力至预定值, 并保持瓦斯压力不变, 让煤样充分吸附 24 h。

4) 待瓦斯吸附平衡(约 24 h)后, 轴压以 0.05 kN/s 加载至 12 MPa, 围压以 0.02 MPa/s 加载至 9 MPa; 固定轴压, 然后以 5:1 速率卸载围压至高于瓦斯压力 0.5 MPa。

5) 更换煤样, 改变瓦斯压力或煤样含水率, 重复上述步骤, 进行新的瓦斯渗流试验。

### 3. 结果分析

根据前人研究结果, 试验过程瓦斯在煤岩中渗流符合达西定律, 则含瓦斯煤渗透率的计算公式为:

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

式中:  $k$  为渗透率( $\text{m}^2$ );  $v$  为煤体的瓦斯渗流速度( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\mu$  为瓦斯动力黏滞系数, 本试验取  $1.087 \times 10^{-11}$  MPa·s;  $L$  为煤岩试样的长度(m);  $p_n$  为 1 个标准大气压(MPa);  $A$  为试样横截面积( $\text{m}^2$ );  $p_1, p_2$  分别为进出口甲烷压力(MPa)。

#### 3.1. 不同瓦斯压力煤样渗透率与围压的关系

不同瓦斯压力 0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa 和 3.0 MPa 条件下, 随着轴压和围压加载, 煤样孔隙压密压实, 孔隙率减小, 气体通过煤样难度增大, 煤样渗透率逐渐减缓。固定轴压不变, 卸围压过程如图 3 可知, 煤样渗透率随着围压的卸载逐渐增大, 卸围压初期, 煤样渗透率缓慢增加, 随着围压的继续卸载, 煤样渗透率增加速率加快。根据图 4 的试验数据, 可得到不同试验条件下煤样渗透率与围压之间的拟合方程, 见表 1 所示。同时由表 1 可知, 随着围压的卸载, 煤样渗透率呈负指数关系逐渐增大, 这与前人的研究结果[12]一致。且同等围压条件下, 瓦斯压力越大, 煤样渗透率越大。

围压卸载初期煤样渗透率与瓦斯压力变化如图 4 所示, 可知, 随着瓦斯压力的增加, 煤样渗透率逐渐增大, 瓦斯压力增至 1.0 MPa 时, 煤样渗透率增大为 0.5 MPa 时的 10.6 倍; 瓦斯压力增至 1.5 MPa 时, 煤样渗透率增大为 1.0 MPa 时的 2.0 倍; 瓦斯压力增至 2.0 MPa 时, 煤样渗透率增大为 1.5 MPa 时的 1.66 倍; 瓦斯压力增至 3.0 MPa 时, 煤样渗透率增大为 2.0 MPa 时的 14.03 倍。由于原煤样的非均匀、不连续和各向异性, 造成结果离散型较大。

#### 3.2. 不同含水率煤样渗透率与围压的关系

固定瓦斯压力为 1.0 MPa, 不同含水率分别为 1.18%、1.78%、2.11%、2.82% 和 3.28% 条件下, 煤样

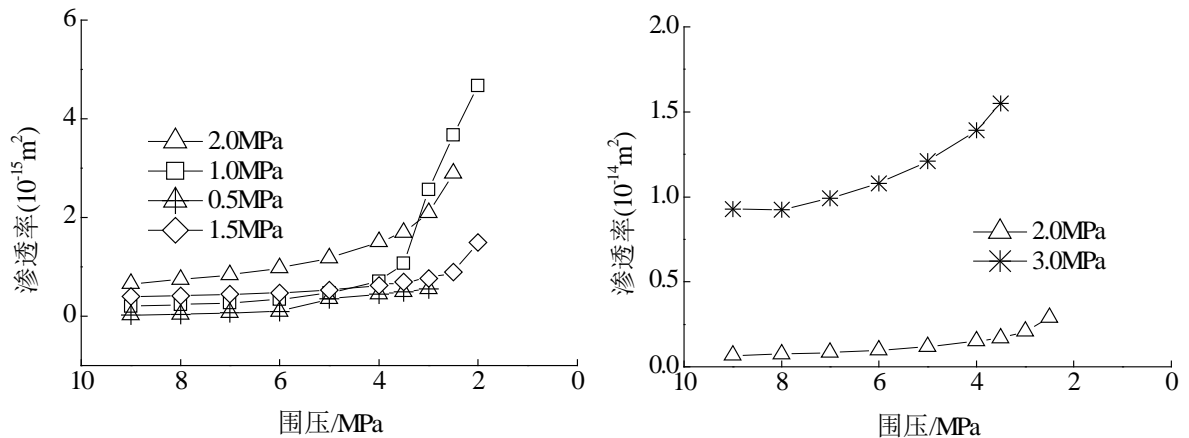


Figure 3. Relationship between coal permeability and confining pressure under different gas pressure

图 3. 不同瓦斯压力条件下煤样渗透率与围压关系

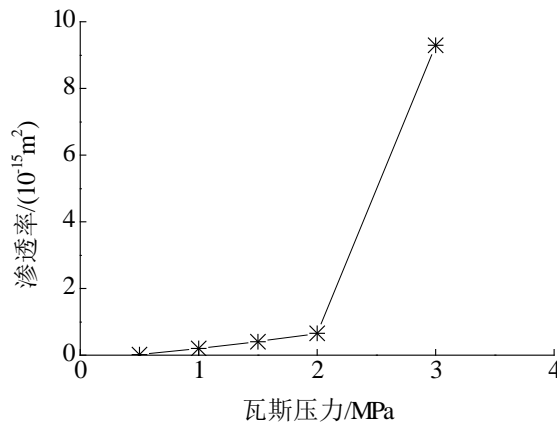


Figure 4. Curve of coal sample permeability and gas pressure

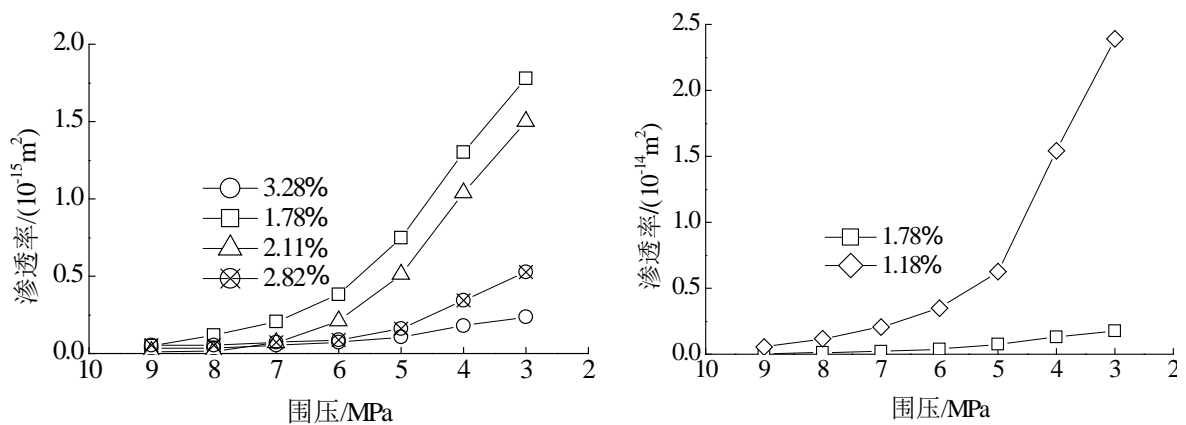
图 4. 煤样渗透率与瓦斯压力关系曲线

Table 1. Relationship between coal permeability and confining pressure fitting expression under different gas pressure

表 1. 不同瓦斯压力条件下煤样渗透率与围压关系拟合表达式

瓦斯压力/MPa	拟合曲线	$R^2$
0.5	$k = 4.245e^{-0.595\sigma_3}$	0.9692
1.0	$k = 5.9521e^{-0.4225\sigma_3}$	0.8599
1.5	$k = 1.0537e^{-0.1191\sigma_3}$	0.9243
2.0	$k = 3.8324e^{-0.2105\sigma_3}$	0.9366
3.0	$k = 2.0114e^{-0.0947\sigma_3}$	0.9243

渗透率随着围压的卸载缓慢增大，且卸载后期煤样渗透率增加速率加快。且含水率越大，煤样渗透率越小。由于围压卸载后煤样孔隙缓慢张开，孔隙率增加，气体通过煤样能力增强。且含水率 1.18% 时煤样渗透率最大，此试件在围压卸载过程中，沿煤样轴向形成贯穿裂隙，造成瓦斯通过煤样能力较大。根据图 5 的试验数据，可得到不同试验条件下煤样渗透率与围压之间的拟合方程，见表 2 所示。同时由表 2 可知，随着围压的卸载，煤样渗透率呈负指数关系逐渐增大。



**Figure 5.** Relationship between coal sample permeability and confining pressure under different moisture content  
**图 5.** 不同含水率条件下煤样渗透率与围压关系

**Table 2.** Relationship between coal permeability and confining pressure fitting expression under different moisture content  
**表 2.** 不同含水率条件下煤样渗透率与围压关系拟合表达式

含水率/%	拟合曲线	$R^2$
1.18	$k = 1.6258e^{-0.6278\sigma_3}$	0.9949
1.78	$k = 1.3042e^{-0.5967\sigma_3}$	0.9897
2.11	$k = 3.2654e^{-0.8916\sigma_3}$	0.9762
2.82	$k = 1.4681e^{-0.4086\sigma_3}$	0.9245
3.28	$k = 6.347e^{-0.3442\sigma_3}$	0.9717

围压卸载初期煤样渗透率与瓦斯压力变化如图 6 所示, 可知, 随着含水率的增加, 煤样渗透率迅速减小, 含水率 1.78% 时渗透率为含水率 1.18% 时的 0.21 倍; 含水率 2.11% 时煤样渗透率达到最小, 为 1.78% 时的 0.22 倍; 随后含水率继续增大, 煤样渗透率呈波动变化, 含水率 2.82% 时煤样渗透率为 2.11% 的 4.8 倍, 含水率 3.28% 时煤样渗透率为 2.82% 的 0.67 倍。整体上煤样渗透率随含水率的增加而减小, 由于原煤样的非均匀、不连续和各向异性, 造成结果呈波动变化。

### 3.3. 卸围压条件下煤样径向应变与围压的关系

不同瓦斯压力和含水率条件下卸围压过程中径向应变变化如图 7 所示。

随着轴压和围压的加载, 煤样孔隙压密压实, 孔隙率减小, 径向应变向正方向增大。固定轴压不变, 随着围压的卸载, 煤样孔隙缓慢张开, 孔隙率增大, 煤样径向应变恢复至初始加载时刻, 并呈上凸型向负方向缓慢增大。且不同瓦斯压力及含水率条件下, 煤样径向应变变化差异较大, 由于原煤试件离散性较大, 且仅有含水率 1.18% 下煤样发生破坏, 其余煤样均为破坏, 破坏煤样的全应力-应变曲线如图 8 所示。

### 3.4. 加卸围压条件下煤样径向应变与泊松比的关系

煤样加卸载过程中, 各试样在轴压和围压作用下发生轴向及径向变形, 从而导致泊松比等参数发生变化, 各试验条件下煤样泊松比等参数采用下式[13]计算:

$$\begin{cases} \mu = (C\sigma_1 - \sigma_3) / [\sigma_3(2C - 1) - \sigma_1] \\ C = \varepsilon_3 / \varepsilon_1 \end{cases} \quad (3)$$

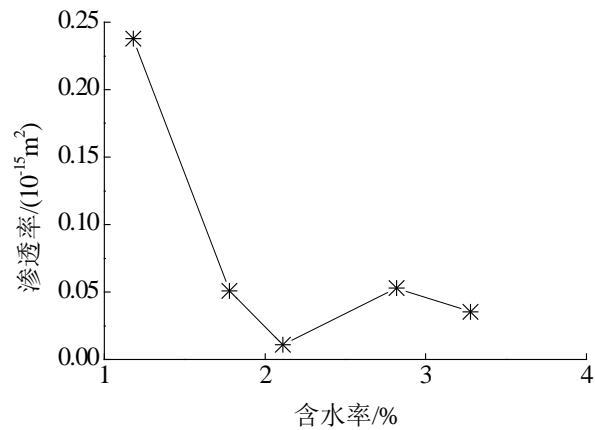


Figure 6. Curve of coal sample permeability and moisture content

图 6. 煤样渗透率与含水率关系曲线

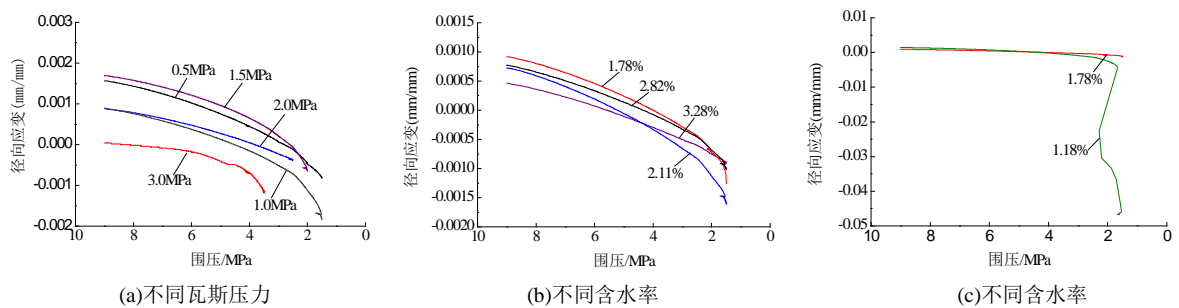


Figure 7. Curve of confining pressure and radial strain under unloading confining pressure

图 7. 卸围压条件下围压与径向应变关系曲线

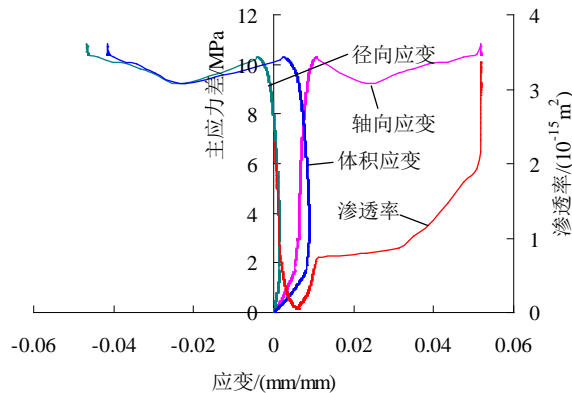
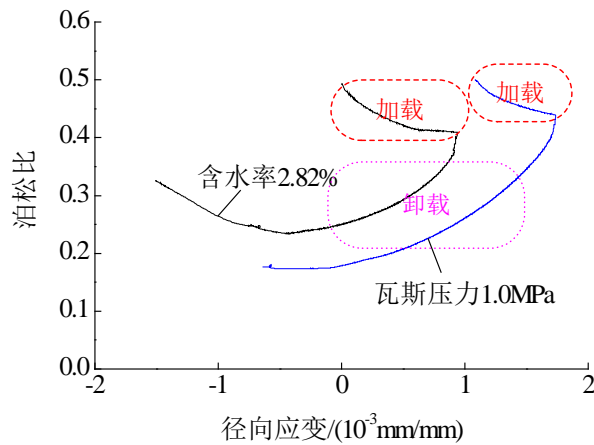


Figure 8. Stress-strain curve of coal sample under the condition of moisture content 1.18%

图 8. 含水率 1.18% 下煤岩破坏过程应力-应变曲线

式中,  $\mu$  为泊松比,  $C$  为某应力状态下径向应变  $\varepsilon_3$  与相对应的轴向应变  $\varepsilon_1$  的比值;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  分别为某应力状态下轴压及围压(MPa)。

取相同瓦斯压力为 1.0 MPa 条件下, 含水率 2.82% 和不含水煤样, 煤样泊松比-径向应变关系曲线如图 9 所示。可知, 加载过程中煤样径向应变向正方向增加, 煤样的泊松比随径向应变的增加呈下凸型减



**Figure 9.** Poisson's ratio-radial strain curve of coal sample under loading-unloading conditions

**图 9.** 加卸载条件下煤样泊松比-径向应变变化曲线

小；固定轴压不变，卸载过程中煤样径向应变缓慢恢复并向负方向增加，煤样的泊松比随径向应变的增加呈下凸型减小；围压继续卸载至一定值后，泊松比随径向应变的增加呈上凹型增大。

#### 4. 结论

通过对不同瓦斯压力和不同含水率条件下的原煤煤样进行了三轴压缩渗透试验研究，探讨了卸围压下不同瓦斯压力及含水率等条件下煤的力学性质和渗透特性，可得出如下结论：

1) 随着围压的卸载，煤样渗透率逐渐增大，卸围压初期，煤样渗透率缓慢增加，随着围压的继续卸载，煤样渗透率增加速率加快。且煤样渗透率与围压呈负指数函数关系。

2) 卸围压初期煤样渗透率随瓦斯压力的增加逐渐增大，随含水率的增加呈波动状减小。由于原煤煤样的非均匀、不连续和各向异性，导致试验结果离散性较大。

3) 瓦斯压力越大，煤样渗透率越高；含水率越大，煤样渗透率越低。随着围压的卸载，煤样孔隙缓慢张开，孔隙率增大，煤样径向应变恢复呈上凸型向负方向缓慢增大。

4) 加载过程中煤样径向应变向正方向增加，泊松比随径向应变的增加呈下凸型减小；卸载过程中煤样径向应变缓慢恢复并向负方向增加，泊松比随径向应变的增加呈下凸型减小。

#### 基金项目

川煤集团资助项目：向斜轴部“三软厚煤层综采防突及顶板控制技术研究”（2017001）。

#### 参考文献

- [1] 胡国忠, 许家林, 王宏图, 等. 低渗透煤与瓦斯的固-气动态耦合模型及数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 1-6.
- [2] 秦伟, 许家林, 彭小亚. 本煤层超前卸压瓦斯抽采的固-气耦合试验[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 1-6.
- [3] 祝捷, 姜耀东, 孟磊, 等. 载荷作用下煤体变形与渗透性的相关性研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 984-988.
- [4] 许江, 李波波, 周婷, 等. 加卸载条件下煤岩变形特性与渗透特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1493-1498.
- [5] 许江, 李波波, 周婷, 等. 循环荷载作用下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(2): 225-234.
- [6] Jiang, C., Duan, M., Yin, G., *et al.* (2017) Experimental Study on Seepage Properties, AE Characteristics and Energy



Dissipation of Coal under Tiered Cyclic Loading. *Engineering Geology*, **221**, 114-123.

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.005>

- [7] 孙光中, 荆永滨, 张瑞林, 等. 轴向应力循环加卸载作用下含瓦斯煤渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 928-938.
- [8] 王登科, 魏建平, 尹光志. 复杂应力路径下含瓦斯煤渗透性变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 303-310.
- [9] 冯增朝, 赵东, 赵阳升. 块煤含水率对其吸附性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2):3291-3295.
- [10] 尹光志, 蒋长宝, 许江, 等. 煤层气储层含水率对煤层气渗流影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(s2): 3401-3406.
- [11] Wang, S.G., Elsworth, D. and Liu, J.S. (2011) Permeability Evolution in Fractured Coal: The Roles of Fracture Geometry and Water-Content. *International Journal of Coal Geology*, **87**, 13-25.  
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.04.009>
- [12] 魏建平, 位乐, 王登科. 含水率对含瓦斯煤的渗流特性影响试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 97-103.
- [13] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456-460.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7301, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [me@hanspub.org](mailto:me@hanspub.org)