

文章编号: 0253-9993(2012)01-0107-06

# 煤岩全应力-应变过程中渗透特性的研究

王广荣 薛东杰 郝海莲 周宏伟

(中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

**摘要:** 选取安徽淮南张集矿的煤样,对加工成的 9 个标准试件( $\phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ ) 进行全应力-应变过程中的渗透测试及 CT 扫描试验。渗透试验结果表明:煤岩的渗透率-应变曲线与应力-应变曲线具有相似的变化规律,且渗透率表现出应变滞后性,表明瓦斯在煤岩中的流动特性与受载过程中煤岩内部产生的损伤演化密切相关;围压使煤岩内部的瓦斯通道发生压密闭合,导致渗透率随围压的增大而减小。在渗透试验前后对试件进行 CT 扫描,结果表明,渗透试验前试件上基本观测不到有微观孔隙裂隙的存在,渗透试验后有明显的贯通裂缝产生,导致试件的渗透率在应力-应变峰后呈现急剧上升的趋势。

**关键词:** 煤岩; 全应力-应变过程; 滞后性; 围压; 渗透率

**中图分类号:** TD712.51 **文献标志码:** A

## Study on permeability characteristics of coal rock in complete stress-strain process

WANG Guang-rong, XUE Dong-jie, GAO Hai-lian, ZHOU Hong-wei

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Nine standard coal samples with dimensions of 50 mm in diameter and 100 mm in height, which were taken from Zhangji Coal Mine in Huainan City of Anhui Province, and tested on gas flow regularities of complete stress-strain process and the X-ray industrial CT. The results of the permeability tests show that the permeability-strain curves are similar to stress-strain curves of the coal rock, and stress hysteretic nature is shown in permeability-strain curves, which indicates that the close relativity between the character of gas flow in the coal samples and the damage evolution of coal samples during the loading processes. The permeability is decreased with the developing of confining pressure which causes consolidation in the gas thoroughfare of coal samples. Tests by the X-ray industrial CT before and after the permeability tests show that there are rare micro-porosity and micro-fracture observed before the permeability tests, and clear cracks found after the permeability tests which indicate sharp rising of permeability after the peak of stress-strain curves.

**Key words:** coal rock; complete stress-strain process; hysteretic performances; confining pressure; permeability

煤层渗透率跟储层所处的地应力状态、温度、孔隙压力、以及吸附/解吸的气体有关。煤矿开采过程中伴随着工作面前方采动应力的变化,具体表现为煤岩单元体垂向应力的增加与水平应力的卸载,在此过程中煤岩体单元在已有裂隙的基础上又产生新的裂隙,同时瓦斯的渗透特性伴随着变化,一方面裂隙的

产生有利于瓦斯的渗透,另一方面瓦斯的聚集又会对煤岩体产生作用,二者是相互统一的。目前学者对于煤的渗透率影响因素已进行了大量研究。在煤矿生产的各个阶段都有可能遇到瓦斯问题,包括瓦斯爆炸及煤与瓦斯突出等<sup>[1-3]</sup>,这些瓦斯灾害会对煤矿的安全生产造成很大的危害,带来严重的人员伤亡以及巨

收稿日期: 2011-07-29 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201201); 国家科技支撑计划资助项目(2008BAB36B07); 国家自然科学基金资助项目(50674092)

作者简介: 王广荣(1985—),女,北京人,硕士研究生。E-mail: wangguangrong@qq.com

大的经济损失。虽然瓦斯这种爆炸性以及窒息性的气体导致煤矿发生严重事故,但是在开采过程中直接向空气中排放不仅会严重污染环境还会造成能源的流失与浪费。总之,不管是防治瓦斯突出和瓦斯爆炸等瓦斯灾害,还是要获得廉价高效的能源气体,都与瓦斯在煤层的运移规律密不可分。在自然状态下,煤岩多处于三轴应力状态,而在矿井的生产过程中,采掘工程使煤层内原有的地应力场及瓦斯压力场的平衡遭到了破坏,从而使煤岩内的应力重新分布并形成了瓦斯的流动。在煤层瓦斯运移过程中,其中渗透率作为瓦斯渗流力学与工程的重要参数,能够衡量煤层内瓦斯流动的难易情况<sup>[4-11]</sup>。

缪协兴等<sup>[12]</sup>对全应力-应变过程中煤岩所受到的应力、应变以及渗透率三者之间的关系进行了研究,并且拟合出了岩石渗透率、应力及应变的方程关系式。尹光志等<sup>[13]</sup>采用自己研制的装置测定了不同围压作用下,不同粒径的煤岩在全应力-应变过程中瓦斯的渗流速度与应变的变化关系,并且还得到围压对渗透速度-应变关系曲线的影响及渗透速度-轴向荷载关系曲线的影响。杨永杰等<sup>[14]</sup>采用水作为渗透介质,选取了两种物理性质差别较大的煤岩试样在不同有效侧压下进行了渗透试验,得出煤样全应力-应变关系和应变-渗透率关系对比曲线,分析了两种煤岩在变形-破坏全过程的渗透率变化特征,以及有效侧压对煤岩变形-渗透率特征的影响。李树刚等<sup>[15]</sup>通过煤岩全应力-应变渗透试验的测试,首次拟合出对应于煤样全应力-应变过程的渗透系数-应变过程。胡耀青等<sup>[16]</sup>通过煤岩全应力-应变渗透测试试验,拟合出渗透系数与体积应力的关系曲线,且得出渗透系数与孔隙压力的抛物线关系。上述研究主要集中在从实验角度开展煤体的渗透特性方面研究,较少从微观角度分析煤体渗透特性变化产生的机理与过程。

本文从实验角度、理论分析及数值模拟方面揭示煤层在全应力-应变过程中瓦斯的运移规律,为防治煤矿井中瓦斯事故及开发煤层气提供重要的科学理论依据。

## 1 试验过程

### 1.1 试样制备

试验巷道为李一矿-660 mW2EB<sub>8</sub>工作面运输巷,位于-660 m 西二采区东翼,东至开 F13-8-1 断层,西至-660 m 西二石门,巷道标高-653 m,巷道设计长度 500 m。巷道采用 3 号 U 型棚支护,断面面积 9.32 m<sup>2</sup>。该区域 B<sub>8</sub>煤层厚度为 3.0~4.0 m,平均为 3.5 m,煤岩层走向 140°~160°,倾角 20°~25°,平均

23°。煤层直接顶板为厚 4.0~6.0 m 的灰白色层状细粒砂岩,岩层层理发育。煤层底板为厚 4.0~6.0 m 的灰色块状、性脆、致密页岩,含植物化石。

本文的煤岩试样取自安徽省淮南市张集矿,从标高为-690 m 的采煤工作面处取得。该煤样质地坚硬致密,强度较大,可以直接加工成原煤标准试件。采用水钻法将原煤样加工成尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$  的圆柱体,共 9 个,取其编号分别为 C01、C02、C03、C04、C05、C06、C07、C08、C09,如图 1 所示。

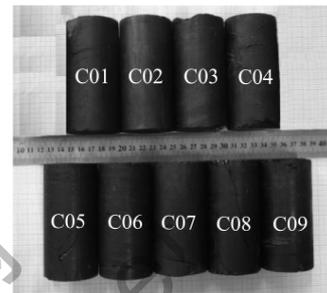


图 1 标准煤试件

Fig. 1. Standard coal samples

### 1.2 试验设备及测试原理

煤岩的全应力-应变过程中渗透特性的测试试验是在重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室进行的,通过含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置测试出标准试件在全应力-应变过程中渗透率随应变的变化情况。该渗流装置可进行不同温度及不同瓦斯压力下,煤样试件在全应力-应变过程中渗透特性随应变的变化特征及煤岩的变形破坏特征方面的试验研究,如图 2 所示。

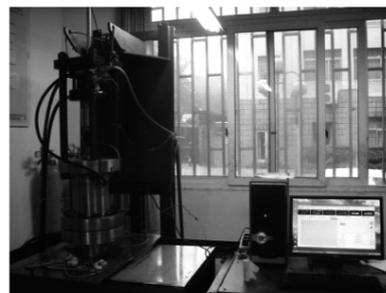


图 2 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置

Fig. 2. Triaxial servo-controlled seepage equipment for thermo-fluid-solid coupling of coal containing methane

渗透试验过程中系统每秒采集 1 次数据,记录试验过程中的轴向力、轴向位移、径向位移、围压、温度及瓦斯流量的大小,根据达西定律计算出试件不同时间的渗透率大小,计算公式为

$$K = \frac{2qp_0\mu L}{A(p_1^2 - p_2^2)}$$

式中  $K$  为渗透率  $\mu\text{m}^2$ ;  $q$  为瓦斯流量  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $p_0$  为测量

点的大气压力,取  $0.1 \text{ MPa}$ ;  $\mu$  为瓦斯的黏度系数,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时取为  $1.087 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;  $L$  为试件的长度,  $\text{m}$ ;  $A$  为试件的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $p_1$ ,  $p_2$  分别为进气口和出气口的瓦斯压力,  $\text{MPa}$ 。

采用中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室的 X 射线工业 CT 设备(图 3)进行试样微细观结构扫描试验。CT 设备主要由放射源和探测器组成。基本工作原理是利用射线穿透物体,收集由于物体的吸收而衰减了的射线强度,测量并记录足够多的衰减线积分,就可获得令人满意的图像质量<sup>[17]</sup>。计算机层析成像(CT)技术可以动态、定量和无损伤的量测岩土材料的内部结构,是研究岩土材料内部微细观孔隙结构的一种有效手段,CT 设备也是最佳的无损检测设备之一。



图 3 X 射线工业 CT

Fig. 3 X-ray industrial CT

### 1.3 试验过程

(1) 对不同围压及不同瓦斯压力组合条件下煤岩试件在全应力-应变过程中瓦斯的流动特性进行测试,具体试验方案见表 1,试验步骤:①在渗透试验前,每个标准试件放入干燥箱中进行烘干处理,烘干时间为  $24 \text{ h}$ ,然后测试出每个试件的直径、高度和质量。②施加一定的围压和轴压,其中施加围压前先采用力控制的方式施加一定的轴压,将试件先固定住,防止围压作用破坏试件,调节甲烷出气阀门保持一定的瓦斯压力,且保证瓦斯压力小于围压,从而将试件处于静水压力状态下。③关闭出气阀门,向试件内充甲烷,充气时间为  $1 \text{ h}$ ,从而达到吸附平衡。最后启动电脑进行试验,试验过程中采用位移控制的方式施加轴压,加载速率为  $0.1 \text{ mm/min}$ 。

(2) 采用 X 射线工业 CT 系统对煤岩标准试件在渗透试验前后分别进行 CT 扫描。在煤岩渗透试验前,分别对每个试件自做标记的一端面起向上  $30 \sim 35 \text{ mm}$  之间自上而下地均匀扫描 51 层,扫描间隔为  $0.1 \text{ mm}$ 。渗透试验完成后分别对此 9 个试件相同

部位进行相同方案的 CT 扫描。

表 1 试验方案

Table 1 Testing schemes adopted in the tests

试件编号	围压/MPa	瓦斯进气口压力/MPa
C01	9	1.0
C02	6	1.5
C03	3	2.0
C04	9	1.5
C05	6	2.0
C06	3	1.0
C07	9	2.0
C08	6	1.0
C09	3	1.5

## 2 试验结果及分析

### 2.1 渗透特性测试结果

渗透试验得出 9 个标准试件在不同围压及瓦斯压力下的全应力-应变过程中的渗透率变化曲线,如图 4 所示,可以看出煤岩试件的应变-渗透率曲线与应力-应变曲线的变化趋势基本一致,但渗透率的变化表现出应变滞后的特点,这表明煤岩渗透率的变化与其内部的损伤演化过程有密切的联系。应变滞后性主要是因为瓦斯的吸附-解吸过程以及在煤岩中的流动过程都需要一定的时间。

煤岩的渗透率在其应力-应变过程中的不同阶段有不同的变化趋势,分析总结如下:

(1) 煤岩压密阶段。由于煤岩属于孔裂隙介质,孔隙与裂隙是瓦斯渗透的主要通道,在受压的初始阶段,这些通道出现压密闭合,从而导致煤岩的渗透率随应变的增大而呈现减小趋势。9 个试件中 C02、C04、C06、C08 在此阶段渗透率都有明显的减小趋势,试件 C01、C03、C05、C07、C09 在峰值前的渗透率基本为 0。这可能是由于这批煤岩试样质地较好,坚硬致密,强度较高,原生孔隙、裂隙较少,造成瓦斯基本不渗透。

(2) 线弹性变形阶段。由试件 C02、C04、C06、C08 的渗透率-应变曲线可以看出其渗透率大约是在煤岩线弹性阶段的中点处达到最小,随后煤岩渗透率的变化趋势发生明显变化,由随应变增加而减小的趋势变为随应变增加而增加的趋势。根据前人对含瓦斯煤岩力学性质的试验研究表明,在此点处,煤岩中已经出现了新的孔隙、裂隙,故此时虽然渗透率达到最小,但煤岩中瓦斯的流动通道并不是最狭窄的,这表明瓦斯流动具有应变滞后性的特点。

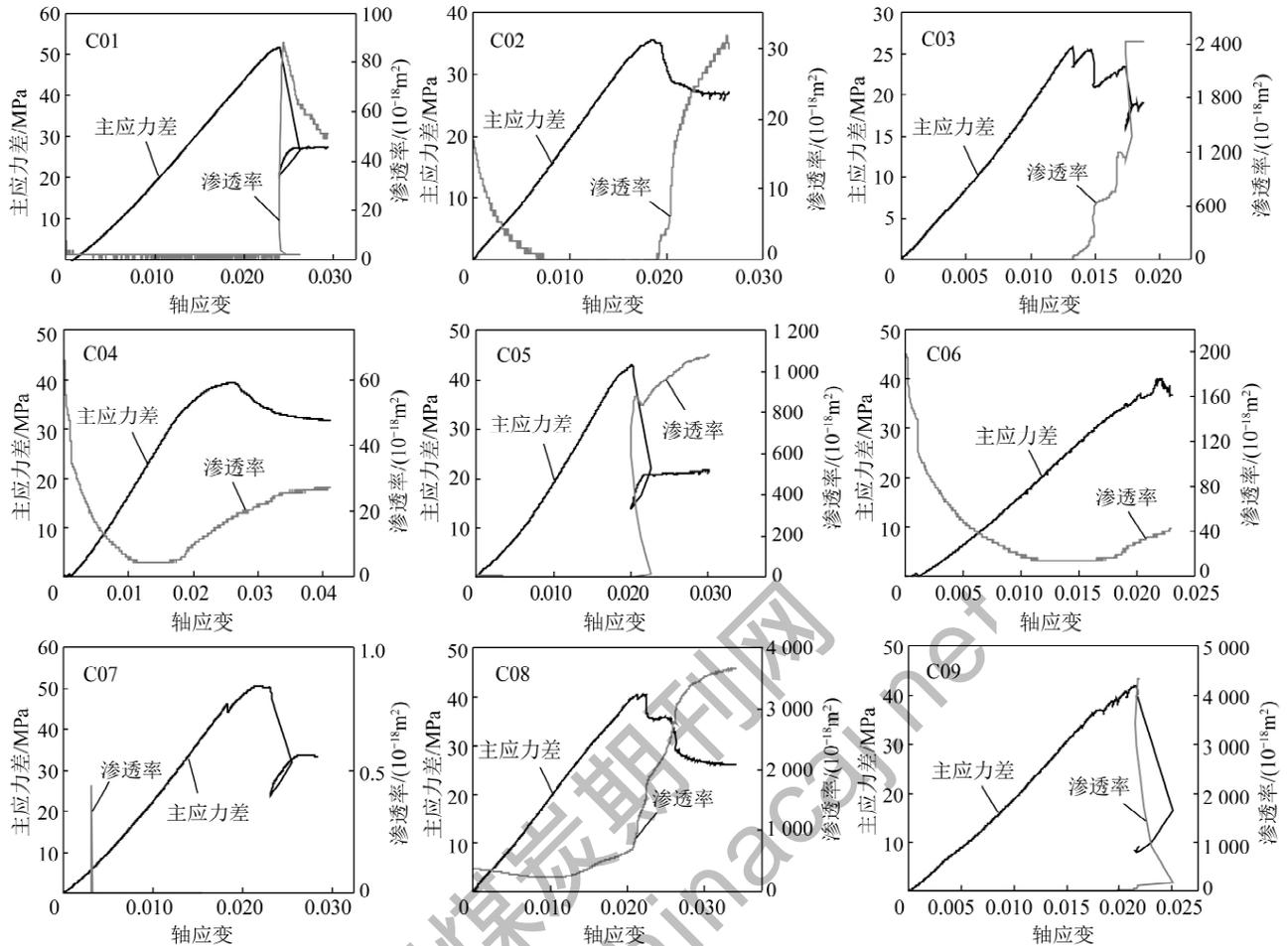


图4 煤岩试件全应力-应变过程中的渗透率变化曲线

Fig. 4 Permeability curves of coal samples in complete stress-strain process

(3) 非线性阶段及峰值强度阶段。随轴向力的逐渐增加,煤岩内部裂隙进一步扩展、贯通,逐渐出现宏观裂缝。在峰值时,试件丧失了最大的承载能力,随后煤岩的渗透率由缓慢的增大演化为急剧增大。

(4) 应变软化阶段。峰值强度后,破裂煤体将沿破裂面发生错动,裂隙的张开度及连通度随变形扩展而提高,裂隙的连通性充分发育,渗透率依然呈增加的趋势,但是增加趋势逐渐趋于平缓,此时瓦斯流动主要以宏观流动为主。

由于每个试件的内部结构不同,这对试验结果也会造成一定的影响。当试件在瓦斯压力分别为 1.0, 1.5 和 2.0 MPa 时,由图 4 可知,渗透率基本是随围压的增大而呈减小趋势。总体来说,随围压的增大,煤岩在不同的应力-应变阶段,其渗透率均出现不同程度地降低,说明围压对试件内部的裂隙起了压密闭合作用,限制了试件内部裂隙的张开及扩展程度。

## 2.2 细观结构分析结果

### 2.2.1 渗透试验后试件裂隙结构特征

由于这批煤样的质地较坚硬致密,9 个标准煤岩

试件渗透试验前的 CT 图片上基本观测不到孔隙、裂隙的分布,渗透试验后的 CT 图片上基本都能观测到明显的裂隙分布,所以重点对试验后的 CT 图片进行了处理,采用 Matlab 软件<sup>[11]</sup>对所得到的 CT 图像进行处理,对其裂隙的分布进行了提取,并计算出不同试件截面上的孔隙面积及孔隙的分形维数,从而对破裂后煤岩的裂隙分布特征提供一定的数值依据。分别计算渗透试验后 9 个标准试件第 25 扫描层上的分形维数及孔隙面积,以此作为每个试件的孔隙面积及孔隙分形维数代表值,结果见表 2。

理论孔隙率是用计算所得的孔隙面积除以标准试件覆盖的像素个数。9 个试件的孔隙分形维数在 1.30 ~ 1.52 之间,说明这批试件的孔隙结构均质性不是很好,孔隙表面较光滑。将每个煤岩试件的孔隙面积与标准试件覆盖像素个数的比值定义为理论孔隙度。9 个试件的孔隙面积差异较大,试件 C06 渗透试验后的孔隙面积为 7 082 像素,理论孔隙率为 1.172%,而试件 C08 渗透试验后的孔隙面积为 49 827 像素,对应的理论孔隙率为 8.249%。所得的

各个试件孔隙结构的分形维数差异不大,试件 C08 的孔隙结构分形维数最大,为 1.516 1,而试件 C06 的孔隙结构分形维数最小,为 1.300 7。

表 2 煤岩试件的渗透试验后的扫描结果  
Table 2 Scanning results of permeability tests  
in coal specimens

试件编号	分形维数	孔隙面积/像素	理论孔隙率/%
C01	1.441 2	29 194	4.833
C02	1.416 2	20 057	3.321
C03	1.380 4	18 910	3.131
C04	1.329 0	8 689	1.439
C05	1.439 5	29 392	4.866
C06	1.300 7	7 082	1.172
C07	1.474 2	36 338	6.016
C08	1.516 1	49 827	8.249
C09	1.446 9	26 094	4.320

### 2.2.2 渗透试验前后对比

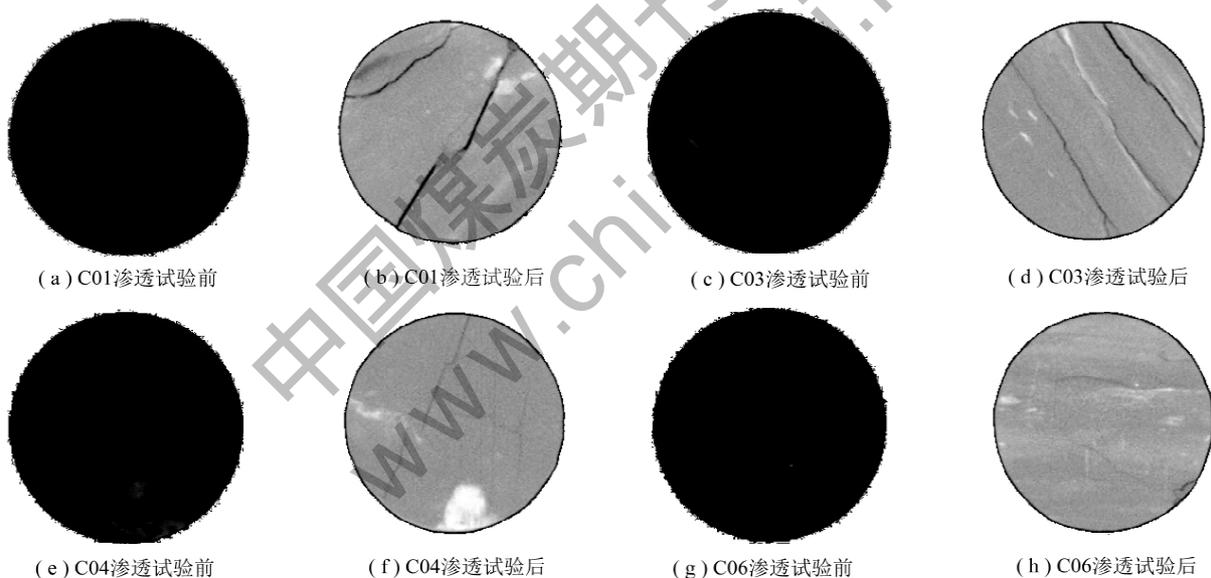


图 5 试件渗透前后微观结构差异

Fig. 5 Micro-structure differences before and after penetration

## 3 结 论

(1) 煤岩的渗透率-应变曲线与其全应力-应变曲线的变化规律相对应,且具有明显的应变滞后性。

(2) 在相同瓦斯压力的情况下随着围压的逐渐增大,煤岩在不同的应力-应变阶段其渗透率均出现不同程度地降低,其原因是围压对煤岩的原生裂隙有压密闭合的作用,且抑制了新生裂隙的扩展及张开。

(3) 渗透试验后试件的 CT 扫描图上可以观测到明显的裂缝,计算所得的分形维数均大于 1.3,表

明其孔隙结构的均质性不是很好,孔隙表面较光滑,理论孔隙率均大于 1.4。渗透试验后试件均被剪裂,产生一条或多条相平行的裂缝,裂缝的宽度明显,且纵向贯通,从而导致峰后试件的渗透率急剧上升,且大于初始渗透率的最大值。

取渗透试验前与试验后各个试件的第 25 层 CT 扫描层图片进行对比,以试件 C01、C03、C04 及 C06 为例,如图 5 所示。可以看出,试件在全应力-应变的过程中主要发生了剪切破坏,产生了明显的横向裂缝,裂缝的宽度较大,且多发生一条或多条相平行的主裂缝,主裂缝上还滋生了些许的细小裂缝向其周围延伸,从渗透试验后扫描到的 5 mm 区域内纵向观察到这些横向裂缝是纵向贯通的,导致试件在峰值后渗透率呈现出急剧上升的趋势,且其最大值都大于压密阶段的最大值。其中在试件 C04、C06 的 CT 图像上只观察到了些许细小裂缝,没有观察到明显被剪裂的裂缝,由图 4 可看出两试件在全应力应变峰后其渗透率并没有急剧上升,且峰后的渗透率最大值也低于压密阶段的最大值,可能是由于产生的细小裂缝并没有纵向贯通,且在围压的作用下,试件被进一步压密闭合,导致瓦斯的渗透通道在峰后比最初时变得更为狭窄。

明其孔隙结构的均质性不是很好,孔隙表面较光滑,理论孔隙率均大于 1.4。渗透试验后试件均被剪裂,产生一条或多条相平行的裂缝,裂缝的宽度明显,且纵向贯通,从而导致峰后试件的渗透率急剧上升,且大于初始渗透率的最大值。

### 参考文献:

- [1] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论与煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报 2009, 34(1): 1-8.  
Yuan Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction [J]. Journal of China Coal Society 2009, 34(1): 1-8.

- [2] 谢和平,周宏伟,刘建峰,等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].煤炭学报,2011,36(7):1067-1074.  
Xie Heping,Zhou Hongwei,Liu Jianfeng,et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(7):1067-1074.
- [3] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [4] 许江,彭守建.含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置的研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):907-914.  
Xu Jiang,Peng Shoujian. Development and application of triaxial servo-controlled seepage equipment for thermo-fluid-solid coupling of coal containing methane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(5):907-914.
- [5] 张春会.非均匀随机裂隙展布岩体渗流应力耦合模型[J].煤炭学报,2009,34(11):1460-1464.  
Zhang Chunhui. Seepage stress coupled model of heterogeneous and random fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(11):1460-1464.
- [6] 王金安,冯锦艳,蔡美峰.急倾斜煤层开采覆岩裂隙演化与渗流的分形研究[J].煤炭学报,2008,33(2):162-165.  
Wang Jin'an,Feng Jinyan,Cai Meifeng. Fractal analysis on the crack evolution and fluid flow in the overburden strata caused by high steep thick coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(2):162-165.
- [7] 蒋长宝,尹光志,黄启翔,等.含瓦斯煤岩卸围压变形特征及瓦斯渗流试验[J].煤炭学报,2011,36(5):802-807.  
Jiang Changbao,Yin Guangzhi,Huang Qixiang,et al. Experiment of deformation property and gas permeation of containing-gas coal under confining pressure unloading process[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(5):802-807.
- [8] 夏永军,武文宾.不同掘进工艺煤巷瓦斯渗流场演化及对突出发动的作用分析[J].煤炭学报,2010,35(8):91-94.  
Xia Yongjun,Wu Wenbin. Evolution of gas seepage field and the function analysis for the outburst launch in different digging process[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(8):91-94.
- [9] 张东明,胡千庭,袁地镜.成型煤样瓦斯渗流的实验研究[J].煤炭学报,2011,36(2):288-292.  
Zhang Dongming,Hu Qianting,Yuan Dijing. An experiment research on gas seepage of standard coal briquette specimen[J]. Journal of China Coal Society,2010,36(2):288-292.
- [10] 孙培德,凌志仪.三轴应力作用下煤渗透率变化规律实验[J].重庆大学学报,2000,23(S1):28-31.  
Sun Peide,Ling Zhiyi. Experimental study of the law for permeability of coal under action of 3-triaxial compression[J]. Journal of Chongqing University,2000,23(S1):28-31.
- [11] 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,2001,20(S1):1801-1804.  
Sun Peide. Testing study on coal specimen permeability during solid deformation process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2001,20(S1):1801-1804.
- [12] 缪协兴,王连国.岩石渗透率与应力、应变关系的尖点突变模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4210-4214.  
Miao Xiexing,Wang Lianguo. Cusp catastrophe model of relations among permeability, stress and strain of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(23):4210-4214.
- [13] 尹光志,李广志,赵洪宝,等.煤岩全应力-应变过程中瓦斯流动特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):170-175.  
Yin Guangzhi,Li Guangzhi,Zhao Hongbao,et al. Experimental research on gas flow properties of coal specimens in complete stress-strain process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(1):170-175.
- [14] 杨永杰,宋扬,陈绍杰.煤岩全应力应变过程渗透性特征试验研究[J].岩土力学,2007,28(2):3812-3815.  
Yang Yongjie,Song Yang,Chen Shaojie. Test study on permeability properties of coal specimens in complete stress-strain process[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(2):3812-3815.
- [15] 李树刚,钱鸣高,石平五.煤岩全应力应变中的渗透系数-应变方程[J].煤田地质与勘探,2001,29(1):22-24.  
Li Shugang,Qian Minggao,Shi Pingwu. Permeability-strain equation relation to complete stress strain path of coal sample[J]. Coal Geology & Exploration,2001,29(1):22-24.
- [16] 胡耀青,赵阳升,魏锦平.三维应力作用下煤体瓦斯渗透规律实验研究[J].西安科技学院学报,1996,16(4):308-311.  
Hu Yaoqing,Zhao Yangsheng,Wei Jinping. Experimental study of permeating law of coal gas under action of 3 dimension stress[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,1996,16(4):308-311.
- [17] 尹小涛,党发宁,丁卫华,等.岩土 CT 图像中裂纹的形态学测量[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):539-544.  
Yin Xiaotao,Dang Faning,Ding Weihua,et al. Morphology measurement of crack in CT images rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(3):539-544.