

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2015.03.004

# 不同粒径配比型煤渗流特性与体积应变关系 试验研究

徐峰<sup>1</sup>, 刘戎<sup>2</sup>, 王涛<sup>3</sup>, 郭新元<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 湖北 武汉 430071; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室 重庆 400044; 3. 云南驰宏锌锗股份有限公司 云南 曲靖 654211)

**摘要:** 采用重庆市打通一矿  $K_1$  煤层制作的不同粒径配比的型煤为研究对象, 利用重庆大学自行研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置进行试验, 根据试验过程中型煤的变形形状提出了一种新的体积应变计算方法, 探讨不同粒径配比型煤渗流特性与体积应变的关系。试验研究表明: 试件渗流速度与粒径大小和粒径配比有关。粒径均匀的试件, 粗粒径的渗流速度大于细粒径的渗流速度; 不同粒径配比的试件, 180 ~ 250  $\mu\text{m}$  (细粒径) 含量越多渗流速度越慢; 渗流速度与体积应变有较好的分段线性关系。体积应变减小阶段, 各种粒径配比下的试件渗流速度均线性减小; 体积反向增大阶段, 180 ~ 250  $\mu\text{m}$  (细粒径) 含量高于一定值的试件渗流速度不变, 反之低于该值时渗流速度增大, 但增大斜率较前面降低斜率较平缓。

**关键词:** 粒径; 型煤; 瓦斯; 渗流特性; 体积应变

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 1003-496X(2015)03-0014-04

## Test Study on Relation of Seepage Characteristics and Volumetric Strain for Coal Briquette in Different Particle Size

XU Feng<sup>1</sup>, LIU Rong<sup>2</sup>, WANG Tao<sup>3</sup>, GUO Xinyuan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Yunnan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing 654211, China)

**Abstract:** The study objective in this paper is the coal briquette in different particle size from the  $K_1$  coal seam of Chongqing Datong 1<sup>#</sup> Mine. By utilizing the self-developed triaxial servo-controlled seepage equipment for thermo-fluid-solid coupling of coal containing machine, we propose a new computing method of volumetric strain in accordance of deformed shape in process of test to find the relationship between the seepage characteristic and volumetric strain in the condition of coal briquette in difference particle size. Test results show that seepage velocity is related to the particle size; seepage velocity in large particle size of coal briquette is faster than it in small particle size when the coal briquette test specimen is uniformity; the higher of particle size which is from 180 to 250  $\mu\text{m}$ , the slower of the seepage velocity. There is a better relation between seepage velocity and volumetric strain. Seepage velocity is linear reduction in every particle size in the stage of volumetric strain decreasing. The seepage velocity will maintain steady when the content of 180 to 250  $\mu\text{m}$  mesh corn is upon a level in the stage of volume increase reversing. In contrast, when the content of 180 to 250  $\mu\text{m}$  mesh corn is under a level, the seepage velocity will increase. The increased velocity of seepage velocity is slower than the reduced velocity.

**Key words:** particle size; coal briquette; gas; seepage characteristic; volumetric strain

在国内外的煤矿生产过程中,由瓦斯导致的矿山灾害不仅数量多,而且危害大。因而瓦斯在煤岩中渗流特性的研究对瓦斯抽采具有重要的指导意义。近些年,国内学者在瓦斯渗流方面进行了大量

的研究,在煤岩渗流方面得到一定的研究成果<sup>[1-11]</sup>。但这些成果几乎都是以颗粒均匀的型煤或原煤为研究对象,而忽略了型煤粒径对渗流影响的重要性。基于此,采用不同粒径配比的型煤作为研究对象,并采用一种新的体积应变计算方法用以研究渗流速度与体积应变的关系。

基金项目: 重庆大学大学生科研训练计划资助项目(121910)

## 1 试验准备及过程

### 1.1 型煤的制作

根据试验研究需要,试验所用煤样全部取自重庆市松藻煤电公司打通一矿K<sub>1</sub>煤层。首先将取回煤块在试验室粉碎机上粉碎,并筛选出380~830 μm和180~250 μm 2种粒径的颗粒。然后按照试验时型煤的需要进行5种不同试件的质量配比,并压制规格为φ50 mm×100 mm的圆柱形型煤试件,成型过程中稳定压力20 MPa保持20 min,以保证型煤具有足够的强度特性,最后将制备好的型煤在烘烤箱内烘8 h。

### 1.2 试验设备

试验采用重庆大学自主研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置<sup>[12]</sup>,该试验装置可在三轴压缩条件下模拟不同地应力条件,不同瓦斯压力和不同温度下煤岩变形以及瓦斯渗流特性的试验。

### 1.3 试验步骤

在型煤侧面均匀涂抹702硅橡胶,把圆筒热缩管套在型煤试件上并用热风吹使其均匀受热收缩紧贴试件,以防止试验时瓦斯从试件侧面流出。

按试验要求安放试件,将围压、轴压加到一定值,向煤样中通入瓦斯气体并保持2 h使其达到吸附平衡,再进行围压、轴压和瓦斯压力的加载。

渗流试验采用气体为纯瓦斯,瓦斯压力为0.9 MPa,试验围压为2 MPa。研究不同粒径配比的型煤渗流速度和体积应变的关系。型煤A、B、C、D、E按不同粒径配比情况见表1。

表1 型煤不同粒径配比情况表

粒径/μm	A 粒径 配比/%	B 粒径 配比/%	C 粒径 配比/%	D 粒径 配比/%	E 粒径 配比/%
380~830	100	75	50	25	0
180~250	0	25	50	75	100

## 2 体积应变模型假设

试验后试件的变形形状如图1<sup>[7]</sup>,简化模型如图2。在煤岩三轴压缩过程中,由于型煤较软,煤岩产生剪切膨胀变形。使得煤岩中部径向膨胀较大,而两端由于橡胶套管的束缚和端头摩擦作用的影响,径向变形微乎其微。但是径向变形测量却是在煤岩中部(图3的B'与B处)安放应变计或贴应变片,这给试验的径向变形测量以及体积应变的计算带来了较大的误差甚至错误。根据试验中型煤的实

际变形情况采用了针对型煤的一种新的体积应变计算方法。该方法认为两端未发生径向变形,中间产生最大的径向变形,且径向变形大小沿着试件轴向方向呈现二次曲线。

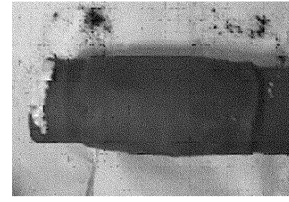


图1 试验后试件的变形形状

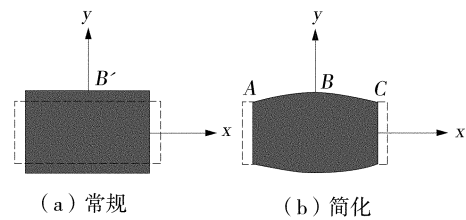


图2 试件变形模型

根据体积应变 $\varepsilon_v$ :

$$\varepsilon_v = -(v - v_0) / v_0 \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_v$ 是试件的体积应变; $v$ 是试件变形后体积 $\mu\text{m}^3$ ; $v_0$ 是试件变形前的体积 $\mu\text{m}^3$ 。

由图2(a),体积应变为:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_1$ 是试件轴向( $x$ 方向)的应变; $\varepsilon_2$ 是试件径向( $y$ 方向)的应变。因为采用压缩为正,拉伸为负,所以 $\varepsilon_1 > 0$ , $\varepsilon_2 < 0$ 。

图2(b)右端坐标:

$$A(- (1 - \varepsilon_1) h/2, r)$$

$$B(0, r(1 - \varepsilon_2))$$

$$C((1 - \varepsilon_1) h/2, r)$$

式中: $r$ 是型煤的半径,mm; $h$ 是型煤的高度,mm。

根据A、B、C 3点可以求出弧ABC的曲线方程:

$$y = ax^2 + b \quad (3)$$

式中: $a = \frac{4r\varepsilon_2}{h^2(1 + \varepsilon_1)^2}$ ; $b = r(1 - \varepsilon_2)$ 。

根据积分式,变形后的体积:

$$v = \int_{-h(1-\varepsilon_1)/2}^{h(1-\varepsilon_1)/2} \pi y^2 dx = \pi r^2 h [2\varepsilon_2(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)/3 + (1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2^2/5 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)^2] \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)得:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 4\varepsilon_2/3 + o(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \quad (5)$$

省略高阶无穷小,最后可得:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 4\varepsilon_2/3 \quad (6)$$

式(6)即为根据型煤试件的剪胀性而提出的体积应变计算方法。与以前常用的体积应变计算式(2)具有较大的区别,对于此种类型的变形式(6)更具有实用性和准确性。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 渗流速度与轴向应变的关系

恒定围压和瓦斯压力条件下渗流速度和轴向应变曲线如图3。由图3可知,渗流速度在整个轴向应变阶段可以大致分为3个阶段。

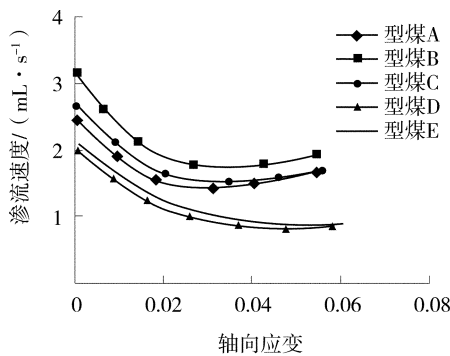


图3 轴向应变与渗流速度关系曲线

1) 线性减小阶段。随着轴向应变的增大,此时径向应变较小,试件内部的孔隙不断被压密而造成渗流速度减小。

2) 速度变化率减小直至0阶段。随着轴压继续增大,轴向应变增大,渗流速度向逐渐呈现“上凹”现象。是因为轴向应变的继续增大,煤样孔隙趋近于最小值,此时孔隙不易被继续压缩,所以渗流速度变化率也逐渐减低。

3) 试件A、B、C在达到渗流速度最小值后,由于轴向应变的增加,试件内部颗粒的错动,损伤不断产生,试件内部孔隙不断增加,裂隙会重新生成,导致渗流速度转而增大的效果。试件D、E在速度达到最小值后,渗流速度几乎维持不变。主要是因为试件D、E粒径较小,孔隙达到最小值后,颗粒之间的错动后依然保持较好的致密性结构,不同于粗颗粒会在试件内部形成一定的损伤面,所以试件D、E渗流速度一直保持稳定,并未出现增加的趋势。

#### 3.2 渗流速度与体积应变的关系

根据作者前面假设的变形模型的体积应变式

(6),渗流速度与体积应变的关系曲线如图4。从图4可以看出渗流速度与体积应变具有明显的分段线性关系。

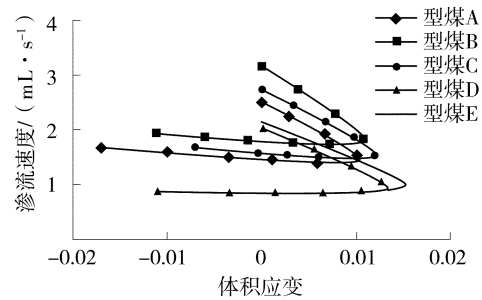


图4 体积应变与渗流速度关系曲线

##### 3.2.1 体积应变减小阶段

1) 试件A、B、C初速度较大是因为粗颗粒相对较多,给予了给多的渗流空间。对于型煤A初速度小于型煤B、C可能是因为型煤A是380~830 μm的均质颗粒组成,能够形成更加稳定致密的结构;试件D、E的初始速率较小,是因为细颗粒含量较多,形成的煤样致密性更高,孔隙较小,造成瓦斯流动相对困难;总体来说不同颗粒配比下的型煤渗流初速度和粒径大小和粒径配比均有关。

2) 由图4可知在体积压缩过程中,渗流速度与体积应变具有明显的线性关系。根据最小二乘法拟合出不同粒径配比型煤的渗流速度和体积应变减小阶段的线性函数关系,见式(7)。

$$V = -106.2\varepsilon_v + 2.55 \quad (R^2 = 0.994, \text{型煤A})$$

$$V = -129.2\varepsilon_v + 3.25 \quad (R^2 = 0.997, \text{型煤B})$$

$$V = -97.63\varepsilon_v + 2.75 \quad (R^2 = 0.998, \text{型煤C}) \quad (7)$$

$$V = -80.51\varepsilon_v + 2.07 \quad (R^2 = 0.998, \text{型煤D})$$

$$V = -74.60\varepsilon_v + 2.17 \quad (R^2 = 0.994, \text{型煤E})$$

式中:  $V$  是渗流速度, mL/s。

由式(7)可以看出,在不同粒径配比下,在体积应变减小阶段瓦斯渗流速度与体积应变呈现线性关系,进一步把它推广到一般情况下:

$$V = k\varepsilon_v + V_0 \quad (8)$$

式中:  $k$  是拟合参数,与粒径大小和配比有关;  $V_0$  是渗流初速度, mL/s。

不同粒径配比型煤的渗流速度斜率拟合曲线如图5。

由图5可得,在体积应变减小过程中渗流速度的减小快慢与试件粒径配比有关,总体来说,粗粒径含量越多,速度降越快。是因为粗颗粒孔隙性较好,更容易产生压缩变形,从而使得速率减小较快。由

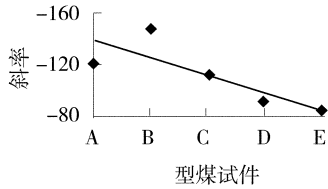


图5 不同粒径配比型煤渗流速度斜率拟合曲线

式(8)与图5可以对不同煤型试件通过测量渗流初速度来预测渗流速度与体积应变之间的关系。

### 3.2.2 体积应变增大阶段

由图4可知5个试件在体积增大阶段时,渗流速度与体积应变表现出明显的线性关系。试件A、B、C渗流速度随着体积应变的增大而增加,是因为试件发生剪切膨胀,造成裂隙的增多与贯通,对瓦斯渗流提供了更多更容易的渗流通道;试件D、E的速度几乎保持不变,因为颗粒太细,颗粒相互间的填充比较饱满,很难产生更多的孔隙、裂隙。

### 3.3 不同粒径配比试件的最大体积应变

不同粒径配比型煤最大体积应变拟合曲线如图6。由图6可知,最大体积应变随着细粒径(180~250 μm)含量的增多而增加,并且呈线性关系。在只考虑粒径前提下,细粒径具有更好的压缩性,同时也可以更好的解释细粒径的试件渗流速度较小。

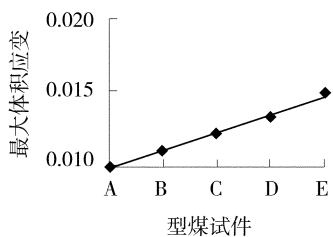


图6 不同粒径配比型煤最大体积应变拟合曲线

## 4 结论

1) 试件渗流速度与粒径大小和粒径配比均有关。粒径均匀的试件,粗粒径的渗流速度大于细粒径的渗流速度;不同粒径配比的型煤,180~250 μm含量越多渗流速度越慢。

2) 渗流速度与体积应变有较好的分段线性关系。体积应变减小阶段,各种粒径配比下的试件渗流速度均线性减小;体积反向增大阶段,180~250 μm含量高于一定值的试件渗流速度保持恒定,低于一定值则渗流速度线性增大,但增大斜率较前面降低斜率较平缓。

3) 细粒径含量与试件的最大体积应变呈现出

线性增加的关系。

### 参考文献:

- [1] 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,1990.
- [2] 孙培德,鲜学福.煤层瓦斯渗流力学的研究进展[J].焦作工学院学报:自然科学版,2001,20(3):161.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] 尹光志,李晓泉,赵洪宝,等.地应力对突出煤瓦斯渗流影响实验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):2557-1561.
- [7] 尹光志,李广治,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.
- [8] 赵洪宝,尹光志.煤样初始内部结构对瓦斯流动特性的影响[J].重庆大学学报,2010,33(9):74-78.
- [9] 李晓泉,尹光志.不同性质煤的微观特性及渗透特性对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(3):500-508.
- [10] 曹树刚,郭平,李勇,等.瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J].煤炭学报,2010,35(4):595-599.
- [11] 曹树刚,李勇,郭平,等.型煤与原煤全应力-应变过程渗流特性对比研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):899-906.
- [12] 许江,彭守建,尹光志,等.含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置的研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):907-914.

作者简介:徐峰(1991-),男,四川宜宾人,学士,2013年毕业于重庆大学,中国科学院武汉岩土力学研究所读硕士研究生,主要从事岩石力学与矿山安全研究。

(收稿日期:2014-04-03;责任编辑:王福厚)

