

文章编号:1000-582X(2011)07-091-05

具突出危险原煤瓦斯渗流特性试验

曹树刚¹,白燕杰^{1,2},李勇¹,郭平¹,刘延保^{1,3}

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044;

2. 中国煤炭科工集团重庆设计研究院,重庆 400016; 3. 中国煤炭科工集团重庆研究院,重庆 400037)

摘要:采用自主研发的三轴瓦斯渗透仪进行了原煤试件在固定瓦斯压力下,不同围压和轴向压力的瓦斯渗流实验。实验结果表明,随着围压的增加,原煤煤样的渗流速度呈下降趋势,这种影响对原始损伤严重的煤体更加明显,并建立了渗流速度-围压二次函数关系的一般表达式。原煤煤样的渗流速度-应变关系类似于应力-应变关系,因此,可以利用原煤渗流速度的变化间接反映煤体的受力损伤演化过程,有效应力对原煤煤样的渗流速度影响总体上可以分为敏感阶段和平缓阶段,在敏感阶段,煤样的渗流速度变化大,而在平缓阶段,煤样的渗流速度变化小。在不同的应力条件下,煤体中孔隙裂隙发育程度和开闭程度不同,影响煤体内的瓦斯内能和弹性变形能,也影响煤体的破坏形式。

关键词:采矿工程;原煤;渗流速度;有效应力

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Experiments of coal's gas seepage with outburst dangers

CAO Shu-gang¹, BAI Yan-jie^{1,2}, LI Yong¹, GUO Ping¹, LIU Yan-bao^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. China Coal Technology & Engineering Group, Chongqing Design & Research Institute, Chongqing 400016, P. R. China; 3. China Coal Technology & Engineering Group, Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, P. R. China)

Abstract: The experiments of outburst coal's gas seepage are carried out by triaxial permeameter which is independently developed. Under the condition of fixed gas pressure, different confining pressures and axial pressures acting on raw coal test samples are tested. It shows that as the increasing of confining pressure, coal sample seepage velocity tends to decline, and this phenomenon is more obvious for the coal with serious original injury. The relationship between seepage velocity and confining pressure can be described as a quadratic function, and its general expression is established. Coal sample's seepage velocity-strain path is similar to stress-strain path, therefore, the changes in coal seepage velocity indirectly reflects the process of the evolvement of coal damage. The influence of effective stress on coal sample seepage velocity can be concluded as hypersensitive stage and smooth stage, and in the hypersensitive stage, seepage velocity of the coal sample vary quickly, while in smooth stage, its variety is not obvious. In different stress conditions, the degree of development for hole and cranny of coal affect coal gas energy and elastic deformation energy in coal body as well as the form of coal destruction.

Key words: mining engineering; coal; seepage velocity; effective stress

收稿日期:2011-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674111, 51074197);重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC2010BB6118);中央高校基本科研业务费资助(CDJXS11241181)

作者简介:曹树刚(1955-),男,博士,重庆大学教授、博士生导师,主要从事采矿工程、安全工程的教学与研究,(E-mail)caosg@cqu.edu.cn。

随着矿井开采不断向深部延伸,采场所受的地应力随之加大,煤层瓦斯含量和瓦斯压力均有增加的趋势,煤与瓦斯突出危险也越来越大。在矿井生产过程中,采掘工程破坏了原岩应力场的平衡和原始瓦斯应力的平衡,引起采掘周围岩体的应力重新分布和瓦斯流动^[1],使矿井瓦斯问题也越来越严重。

在影响瓦斯流动的地应力、瓦斯压力、煤层渗透性系数和瓦斯含量系数等基本参数中,地应力影响煤层的透气性,而煤层的透气性对瓦斯的保存与释放、瓦斯压力变化起着重要的作用^[2]。因此,研究应力对原煤的渗流影响是十分必要的。国内外有关科技工作者做了大量的研究工作,并取得了一些研究成果。尹光志等^[3-4]研究了瓦斯压力及地应力对突出煤瓦斯渗流的影响;杨永杰等^[5]进行了煤岩全应力-应变过程中的渗透性试验,得出了煤岩在变形破坏过程中的渗透率变化规律;易俊等^[6]进行了应力场和温度场作用下瓦斯的渗流特性实验研究,得到了渗透率与应力、温度的表达式;唐巨鹏^[7]等模拟了煤层气在复杂地应力条件下的赋存和运移开采过程,得到了有效应力与煤层气解吸和渗流特性间的关系;刘保县等^[8-9]研究了电场和交变电场对煤瓦斯渗流的影响;黄启翔等^[10]通过保持轴向压力不变而改变围压和保持围压不变而改变轴向压力两种加载方式,对型煤试件的瓦斯渗透特性进行了实验研究;王宏图等^[11-12]研究了地应力、地温、地电效应和地电场对煤中瓦斯渗流的影响;孙培德等^[13]通过变化的围压和孔隙压力的作用,系统地研究了含瓦斯煤在变形过程中渗透率的变化规律;Harpalani, S. 等^[14]进行了煤的常规渗透率实验研究;Matthew J. Mavor 等^[15]得出了有效应力与煤岩体的耦合关系式。

以上成果,主要采用型煤试件进行试验研究,对于模拟真实环境存在一定差异,而且,目前并未形成公认的渗流速度与应力的函数关系。笔者采用原煤试件在三轴渗透仪上进行实验,研究围压、轴向压力和有效应力等应力条件下原煤瓦斯渗流影响,对于预测煤与瓦斯突出具有一定价值。

1 实验设备及实验方法

1.1 实验设备

本实验利用了实验室自行研制的三轴渗透仪。该设备如图 1 所示,主要包括数字控制系统(施加围压和轴压)、引伸计、瓦斯罐(施加瓦斯压力)、三轴瓦斯渗透仪、数字化瓦斯流量计等,可以模拟研究在不同的应力作用下原煤的渗流特性。

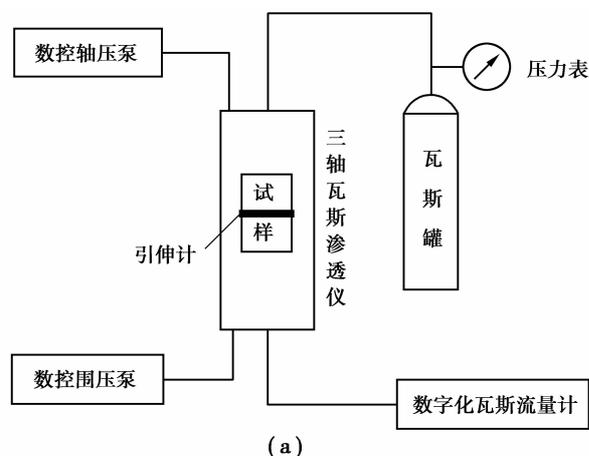


图 1 自压式三轴渗透仪

1.2 试样制备及实验方法

利用便携式取芯设备在重庆市松藻矿区渝阳煤矿井下钻取强突出危险 8# 煤层的原煤煤芯,在实验室人工切割、打磨,最后利用抛光机进行上、下端面抛光,加工成 $\varphi=50\text{ mm}$ 、 $h=100\text{ mm}$ 的圆柱体标准试件。为了保证实验结果的稳定性及可比性,在原煤试件加工完成后,选取节理裂纹分布等相近的作为实验试件。煤样试件如图 2 所示。



图 2 煤样试件

本次渗流实验采用纯度为 99.99%、压力为 0.30 MPa 的甲烷气体,分别在 2、3、4、5、6 MPa 的围压和变轴向压力等条件下,研究围压、轴向压力及有效应力对原煤试样瓦斯渗流的影响。具体实验步骤如下:

1)将加工成 $\varphi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的原煤试件放置在渗透实验装置上,用热缩胶套住,并用吹风机加热使其紧贴煤壁,安装好三轴瓦斯渗透仪。

2)施加一定的围压和轴压,通入瓦斯,检查装置的气密性,让原煤试件在 0.30 MPa 的瓦斯压力下充分吸附 24 h。

3)施加 2 MPa 围压。

4)逐级改变轴压,让试件吸附 30 min 的瓦斯,再释放 10 min 的瓦斯,待瓦斯流量稳定后,测定原煤试件渗流速度。

5)分别施加 3、4、5、6 MPa 的围压,再逐级改变轴压,测试原煤试件的渗流速度变化量。

2 实验结果及实验分析

2.1 渗流速度与围压关系

实验结果见图 3。当轴向压力为 2 MPa,围压从 2 MPa 增加到 6 MPa 的条件下,煤样中的瓦斯渗流速度从 0.067 L/min 降到 0.018 L/min;当轴向压力为 3 MPa,围压从 2 MPa 增加到 6 MPa 的条件下,瓦斯渗流速度从 0.063 L/min 降到 0.018 L/min;当轴向压力为 4 MPa,围压从 2 MPa 增加到 6 MPa 的条件下,瓦斯渗流速度从 0.060 L/min 降到 0.018 L/min;当轴向压力为 5 MPa,围压从 2 MPa 增加到 6 MPa 的条件下,瓦斯渗流速度从 0.059 L/min 降到 0.017 L/min;当轴向压力为 6 MPa,围压从 2 MPa 增加到 6 MPa 的条件下,瓦斯渗流速度从 0.054 L/min 降到 0.017 L/min。以上 5 种情况说明,在围压较低的情况下,原煤煤样内部的孔隙裂隙发育良好,瓦斯渗流速度较大。随着围压的升高,孔隙裂隙逐渐闭合,减小了瓦斯流动通道,致使瓦斯的渗流速度降低,最后趋于稳定。

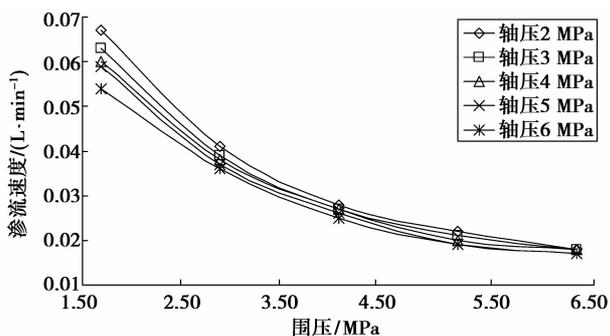


图 3 煤样渗流速度与围压的关系曲线

利用不同轴向压力实验数据,拟合得出原煤煤样的渗流速度与围压的关系,如表 1 和图 4 所示。

表 1 渗流速度与围压拟合关系表

轴向压力 σ_a /MPa	渗流速度(V)与围压(σ_r)关系函数	R^2
2	$V=0.003 6\sigma_r^2-0.040 8\sigma_r+0.133 0$	0.992 3
3	$V=0.003 4\sigma_r^2-0.038 2\sigma_r+0.124 8$	0.993 9
4	$V=0.003 1\sigma_r^2-0.035 3\sigma_r+0.117 4$	0.996 2
5	$V=0.003 1\sigma_r^2-0.035 3\sigma_r+0.116 4$	0.996 2
6	$V=0.002 6\sigma_r^2-0.030 2\sigma_r+0.103 6$	0.999 0

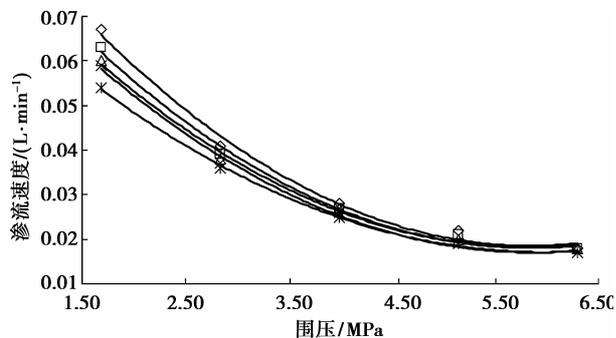


图 4 煤样渗流速度与围压的拟合关系曲线

图 4 显示了不同的轴向压力等级条件下,渗流速度与围压的关系呈二次函数分布。由此,可以得出渗流速度与围压的一般关系表达式

$$V = A\sigma_r^2 + B\sigma_r + C, \quad (1)$$

式中, A 、 B 、 C 为拟合常数。

2.2 渗流速度与轴向压力关系

图 5 给出了实验过程中煤样的渗流速度随轴压的变化规律。一般而言,煤样内部存在初始损伤,孔隙裂隙发育。实验的初始阶段,煤样的初始损伤在轴向压力作用下出现闭合,瓦斯流动通道变小,渗流速度从开始的 0.022 L/min 下降到 0.019 L/min;随着轴向压力的进一步增加,煤样渗流速度变化缓慢。就其原因,可以认为是煤样在围压、轴向压力的共同作用下,内部原生裂隙逐渐闭合,渗流通道变窄所致。最后,煤样的渗流速度在 0.019 L/min 附近波动。

2.3 渗流速度与有效应力关系

一般而言,有效应力是指作用于煤层的地应力与其存在于孔隙或裂隙中的流体压力之差。为了简化问题,采用平均有效应力来描述^[16]。本次实验的有效应力,即

$$\sigma_e = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_r) - \frac{1}{2}(p_1 + p_2), \quad (2)$$

式中: p_1 和 p_2 分别为原煤煤样进口端与出口端的瓦斯压力,MPa;实验中 p_2 取 0.1 MPa; σ_a 为轴向压力,MPa; σ_r 为环向压力,MPa。

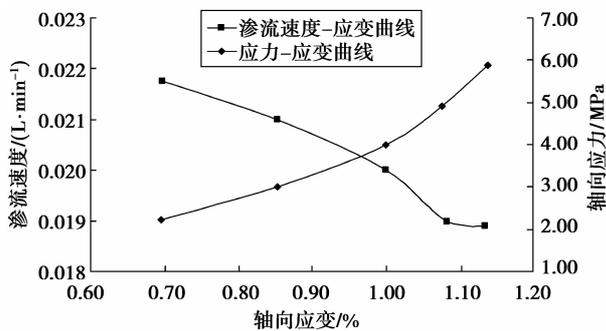


图 5 应力应变过程的渗流速度特征曲线

利用不同轴向压力和围压的实验数据和式(2), 计算相应的有效应力(见表 2), 得出如图 6 所示的渗流速度-有效应力的关系曲线。根据表 1, 拟合得到煤样渗流速度与有效应力之间的非线性关系:

$$V = 0.0036\sigma_e^2 - 0.0402\sigma_e + 0.1301 \quad (3)$$

式中: V 为原煤煤样的瓦斯渗流速度, L/min ; σ_e 为煤样所受的有效应力, MPa 。

表 2 实验结果

有效应力 /MPa	渗流速度 /($L \cdot min^{-1}$)	有效应力 /MPa	渗流速度 /($L \cdot min^{-1}$)
1.800	0.067	2.133	0.063
2.467	0.050	2.800	0.049
3.163	0.040	3.467	0.032
3.800	0.028	4.133	0.024
4.467	0.021	4.800	0.018
5.133	0.018	5.467	0.017
5.800	0.017		

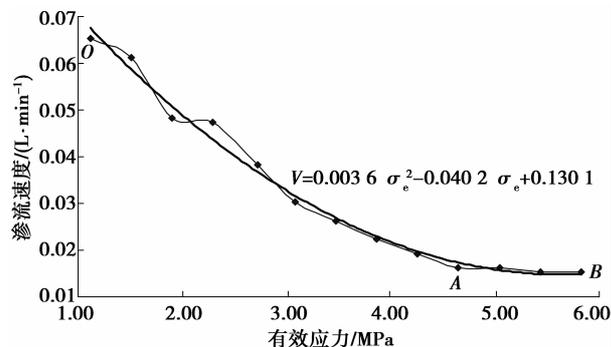


图 6 煤样渗流速度-有效应力的关系曲线

从图 6 中可以发现, 有效应力对原煤煤样试件的渗流速度影响总体上可以分为敏感阶段和平缓阶段。

1) 敏感阶段(OA 段): 此阶段中, 随着有效应力的增加, 煤样的渗流速度在急剧的下降。就其原因, 是由于原煤试件孔隙裂隙压密, 煤样中原有张开性结构面和微裂隙逐渐闭合, 形成早期的非线性变形。在此阶段, 试件体积随应力增大而减小。在敏感阶段, 煤样的渗流速度随有效应力变化明显。

2) 平缓阶段(AB 段): 敏感阶段以后, 随着有效应力的进一步增大, 试件已进入弹性变形阶段, 在这一阶段内, 随着应力的增加, 岩石体积虽有变化, 但增量近似于零, 渗流速度与有效应力关系曲线趋于平缓, 煤样的渗流速度趋于稳定。

3 综合分析

上述研究结果表明, 在各种应力条件下, 原煤的渗流速度具有一定的差异。现场生产过程中, 可以认为在煤矿一个较小区域内原煤煤体中瓦斯压力为定值。随着采掘活动的不断进行, 煤体初始应力发生变化, 形成新的应力环境, 此时煤体中瓦斯渗流速度随应力与裂隙的相互作用而变化。当应力对裂隙的作用主要表现为压效果时, 渗流速度随应力的增加而降低(见图 6)。从能量积聚的角度来看, 煤体内部孔隙、裂隙闭合, 瓦斯流动速度降低, 瓦斯内能逐渐增加, 原煤发生煤与瓦斯突出的危险性增大。

此外, 有效应力是影响煤体变形的重要因素, 而煤体的变形在宏观上显现为渗流通道大小的改变, 从而影响煤体中瓦斯渗流速度的变化。在煤体初期受力阶段, 随着有效应力的增加, 瓦斯的赋存条件发生改变, 渗流速度表现为先减小后趋于稳定。若有效应力进一步增加, 导致煤体内的孔隙、裂隙发展, 瓦斯在其内部的渗流通道增大, 进一步释放煤体中固体介质积蓄的弹性能及瓦斯内能, 加剧孔隙、裂隙向宏观破裂发展。当煤体达到峰值强度后, 试件内部形成宏观断裂面, 瓦斯的渗流速度将达到最大值。此时, 在瓦斯内能和有效应力产生的弹性内能的共同作用下可能诱发煤与瓦斯突出。

原煤实验表明, 在瓦斯压力固定的情况下, 围压越小, 煤样的脆性度越大, 受力破坏越剧烈。在现场采掘工作面邻近围岩内, 由于常常具有较高的垂直应力和较小的水平应力, 可以认为该部分煤体的脆性度大, 发生煤与瓦斯突出的可能性大。

4 结论

基于以上对原煤瓦斯渗流特性的研究, 得到如下的主要结论:

1) 不同围压对原煤煤样渗流速度影响大。随着围压的增加, 试件渗流速度呈下降趋势, 这种影响对原始损伤严重的煤体更明显。渗流速度与围压的关系呈二次函数分布, 并建立了渗流速度-围压关系一般表达式。

2) 原煤煤样的应力-应变关系与渗流速度-应变关系的变化趋势基本一致, 说明原煤渗流速度的变化与煤体受力损伤演化过程密切相关。因此, 可以根据原煤渗流速度的变化间接反映煤体的受力损伤演化过程。

3)有效应力对原煤煤样的渗流速度影响总体上可以分为敏感阶段和平缓阶段。在敏感阶段,煤样的渗流速度变化大,而在平缓阶段,煤样的渗流速度变化小。

4)原煤渗流实验表明,在不同的应力条件下,原煤煤体中孔隙、裂隙发育程度和开闭程度不同,进而影响煤体内的瓦斯内能和弹性变形能,也影响煤体的破坏形式。因此,可以从原煤渗流特性的变化探讨煤与瓦斯突出机理。

参考文献:

- [1] 谭学术,鲜学福. 煤的渗透性的研究[J]. 西安矿业学院学报,1994,14(1):22-25.
TAN XUE-SHU, XIAN XUE-FU. Study on coal permeability[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1994,14(1):22-25.
- [2] 林柏泉,周世宁. 煤样瓦斯渗透率的试验研究[J]. 中国矿业大学学报,1987,16(1):21-28.
LIN BO-QUAN, ZHOU SHI-NING. Experimental study on gas permeability of coal example[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1987, 16(1):21-28.
- [3] 尹光志,李晓泉,赵洪宝,等. 地应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,2008,27(12):2557-2561.
YIN GUANG-ZHI, LI XIAO-QUAN, ZHAO HONG-BAO, et al. Experimental research on effect of geostress on outburst coal's gas seepage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12):2557-2561.
- [4] 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.
- [5] 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):381-385.
YANG YONG-JIE, SONG YANG, CHEN SHAOJIE. Test study on permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(2):381-385.
- [6] 易俊,姜永东,鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性实验研究[J]. 中国矿业,2007,16(5):113-116.
YI JUN, JIANG YONG-DONG, XIAN XUE-FU. An experimental research on the characters of methane seepage in stress field and temperature field[J]. China Mining Magazine,2007,16(5):113-116.
- [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):1563-1568.
TANG JU-PENG, PAN YISHAN, LI CHENG-QUAN, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coal bed methane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(8):1563-1568.
- [8] 刘保县,熊德国,鲜学福. 电场对煤瓦斯吸附渗流特性的影响[J]. 重庆大学学报,2006,29(2):83-85.
LIU BAO-XIAN, XIONG DE-GUO, XUAN XUE-FU. Effect of electric field on adsorption characteristics of coal gas [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(2):83-85.
- [9] 刘保县,鲜学福,王宏图,等. 交变电场对煤瓦斯渗流特性的影响实验[J]. 重庆大学学报,2000,23(S1):41-43.
LIU BAO-XIAN, XIAN XUE-FU, WANG HONG-TU, et al. Experimental study on effect of alternating electric field on the characteristics of coal and gas seepage [J]. Journal of Chongqing University, 2000,23(S1):41-43.
- [10] 黄启翔,尹光志,姜永东,等. 型煤试件在应力场中的瓦斯渗流特性分析[J]. 重庆大学学报,2008,31(12):1436-1440.
HUANG QI-XIANG, YIN GUANG-ZHI, JIANG YONG-DONG, et al. Gas seepage characteristics of briquette samples in a stress field [J]. Journal of Chongqing University,2008,31(12):1436-1440.
- [11] 王宏图,杜云贵,鲜学福,等. 受地应力、地温和地电效应影响的煤层瓦斯渗流方程[J]. 重庆大学学报,2000,23(S1):47-49.
WANG HONG-TU, DU YUN-GUI, XIAN XUE-FU, et al. Coalbed gas seepage equation affected by in-situ stress, geothermal temperature and geo-electric effect[J]. Journal of Chongqing University, 2000, 23(S1):47-49.
- [12] 王宏图,杜云贵,鲜学福,等. 地电场对煤中瓦斯渗流特性的影响[J]. 重庆大学学报,2000,23(S1):22-24.
WANG HONG-TU, DU YUN-GUI, XIAN XUE-FU, et al. The influence of geo-electric field on gas seepage properties in coal[J]. Journal of Chongqing University, 2000,23(S1):22-24.
- [13] 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:自然科学版,2000,23(S1):28-31.
SUN PEI-DE, LING ZHI-YI. Experimental study of the law for permeability of coal under action of 3-triaxial compression [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(S1):28-31.
- [14] HARPALANI S, MOPHERSON M J. The effect of gas evacuation on coal permeability test specimens [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1984, 21(3):361-364.
- [15] MAVOR M J, GUNTER W D. Secondary porosity and permeability of coal vs. gas composition and pressure[J]. Society of Petroleum Engineers, 2006, 9(2):114-125.
- [16] 彭守建,许江,陶云奇,等. 煤样渗透率对有效应力敏感性实验分析[J]. 重庆大学学报,2009,32(3):303-307.
PENG SHOU-JIAN, XU JIANG, TAO YUN-QI, et al. Coefficient of sensitiveness between permeability and effective pressure of coal samples [J]. Journal of Chongqing University,2009,32(3):303-307.