

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.001

长期荷载作用下煤层渗透率演化规律的试验分析

许江, 叶桂兵, 刘东, 李波波, 程明俊

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;

b. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:利用三轴渗透装置开展了不同环境温度和不同有效应力条件下长期荷载作用前后含瓦斯煤的渗透率演化试验研究,并在此基础上分析了长期荷载作用前后煤样渗透率对有效应力以及环境温度的敏感性。研究表明:环境温度一定时,长期荷载作用前后含瓦斯煤渗透率都将随有效应力增加而降低,且其有效应力敏感性也降低,而当有效应力一定时,含瓦斯煤渗透率及其环境温度敏感性都将随着环境温度的增加而降低;长期荷载作用前后渗透率差在不同环境温度和不同有效应力条件下的变化也存在差异,体现出较强的热-力-流耦合效应;长期荷载作用前后,环境温度敏感性系数差将随有效应力的增加,先是增加然后减小,在有效应力为4.3 MPa左右变为负值,有效应力敏感性系数差将随环境温度的增加减小,在26℃左右以后变为负值。

关键词:渗透率;有效应力;敏感性分析;长期荷载

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)09-001-07

Experimental analysis of the evolution law of the coal seam gas permeability under long-term load

XU Jiang, YE Guibing, LIU Dong, LI Bobo, CHENG Mingjun

(a. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control,

Chongqing University, Chongqing 400044, China;

b. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Gas-filled coal permeability evolution tests are carried out before and after the long-term load with temperature and effective stress changing by using the triaxial permeability equipment. Based on the experiments, temperature sensitivity coefficient and effective stress sensitivity coefficient of the permeability of the coal sample are analyzed before and after the long-term load. The experimental results are shown as follows: 1) Before and after the long-term load, with the increase of effective stress, the permeability and effective stress sensitivity coefficient both decrease when the temperature keeps constant. At the same time, with the increase of temperature, the permeability and temperature sensitivity coefficient also decrease when the effective stress keeps constant; 2) The difference of the permeability between before and after long-term load is different with temperature and effective stress changing, and it reflects thermal-fluid-solid coupling effect; 3) Before and after the long-term load, the difference of temperature sensitivity coefficient

收稿日期:2013-04-07

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-004);国家自然科学基金资助项目(50974141);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB201203)

作者简介:许江(1960-),男,重庆大学博士生导师,教授,主要从事岩石力学与工程方向研究,(E-mail)jiangxu@cqu.edu.cn。

60 ℃;然后再将新一批次的含瓦斯煤试件施加三轴荷载 30 d,其轴向应力恒定为 6.8 MPa,侧向应力恒定为 1.3 MPa,进气端与出气端瓦斯压力均恒定为 0.1 MPa,其有效应力恒定为 3 MPa,再测试其瓦斯渗流流量。

瓦斯渗流流量测试方法如下:首先测进口端瓦斯压力为 0.5 MPa、环境温度为 20 ℃时,有效应力依次为 1、2、3、4、5、6 MPa 的流量;换新试件,并改变环境温度为 30 ℃测得上述不同有效应力下的流量,以此进行,直至环境温度为 60 ℃时。长期加载作用之后,测试步骤与上同。

2 试验结果

2.1 长期荷载作用前后煤岩渗透率对比

各种不同试验条件下,含瓦斯煤渗透率测试结果如图 2 所示,通过对比长期荷载作用前后渗透率的变化可以发现,有效应力一定时,长期荷载作用前后,煤岩渗透率都将随环境温度的增加而降低,而后趋于平缓;环境温度一定时,渗透率随有效应力的增加而降低,而后趋于平缓。

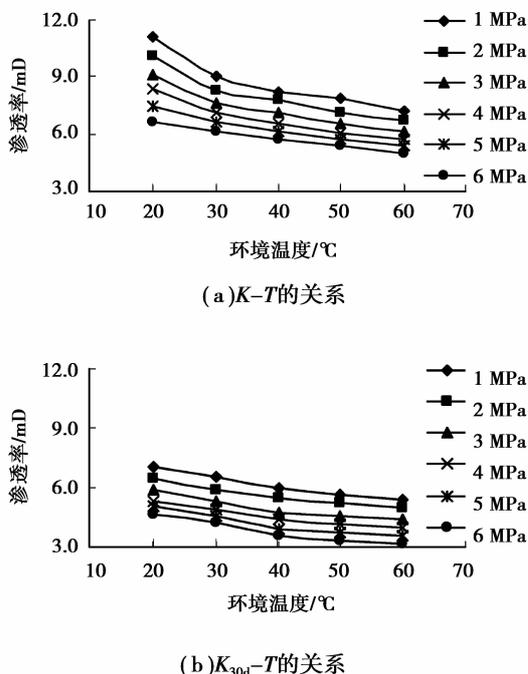


图 2 长期荷载作用前后渗透率的演化

将长期荷载作用前渗透率减去长期荷载作用后的渗透率,得到图 3 所示曲线。分析发现其差值皆为正值,说明长期荷载作用后含瓦斯煤渗透率将降低,进一步分析还可以发现以下特点:

1)从图 3(a)可以看到,有效应力一定时,渗透率差随环境温度的增加,在 20 ℃到 30 ℃这段区间里,有效应力 1、2、3、4 MPa 条件下的渗透率差随环境温度升高急剧下降,5 MPa 和 6 MPa 条件下的渗透率差平缓下降,说明 30 ℃以下时,长期荷载对低水平有效应力时渗透率影响显著,且随着环境温度增加和有效应力的增加越来越不明显,而对较高有效应力时的渗透率影响相对较弱;在 30 ℃到 40 ℃环境温度区间,长期荷载作用前后渗透率差随着环境温度增加而略有上升趋势;在环境温度高于 40 ℃后,各有效应力条件下的渗透率差都开始下降,说明长期荷载作用对其渗透率影响随着环境温度升高越来越小,而且长期加载作用前后渗透率差随环境温度变化受有效应力影响小。结果说明流体在多孔介质中流动时,体现了很强的热-力-流耦合效应,渗透率受到环境温度场和应力场的双重作用。

2)从图 3(b)可以看到,环境温度一定时,渗透率差随有效应力增加,20 ℃条件下的渗透率差有明显的下降趋势;30 ℃和 40 ℃条件下的渗透率差平缓波动下降,50 ℃和 60 ℃条件下的渗透率差波动缓慢上升,最终几乎都趋向于一个稳定的值。可见,在较高环境温度时,长期荷载作用前后渗透率差值与有效应力关系并不明显;而在较高有效应力时,长期荷载作用前后渗透率差随环境温度变化也不明显。

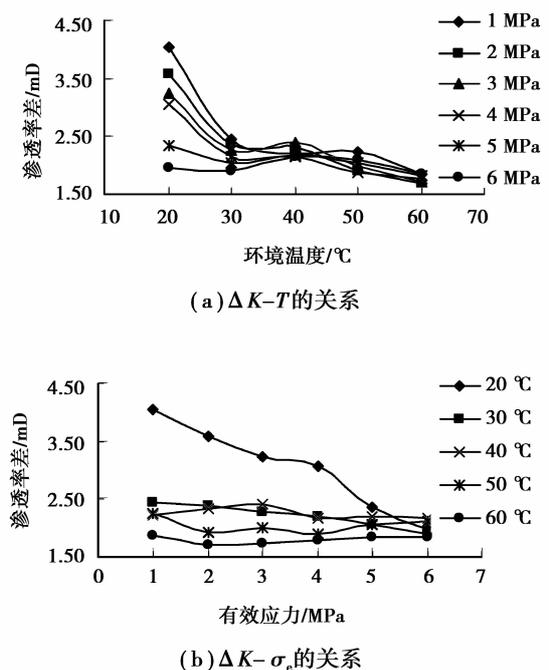


图 3 长期荷载作用前后渗透率差

3 长期荷载作用对渗透率敏感性的影响

3.1 环境温度敏感性分析

笔者引用了环境温度敏感性系数^[19],它指当有效应力和瓦斯压力保持恒定时,环境温度每升高 1 ℃所引起的煤渗透率的相对变化量,即

$$C_T = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial T}, \quad (3)$$

式中: C_T 为环境温度敏感性系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; K_0 为渗透率的初始值, mD(文中取环境温度为 20 ℃时的渗透率值为渗透率的初始值); ∂K 为渗透率变化量, mD; ∂T 为环境温度变化量, $^{\circ}\text{C}$ 。

图 4 给出了长期荷载作用前后各有效应力条件下环境温度敏感性系数的变化(图 4 中 B. LTL 表示长期荷载作用前; A. LTL 表示长期荷载作用后),可

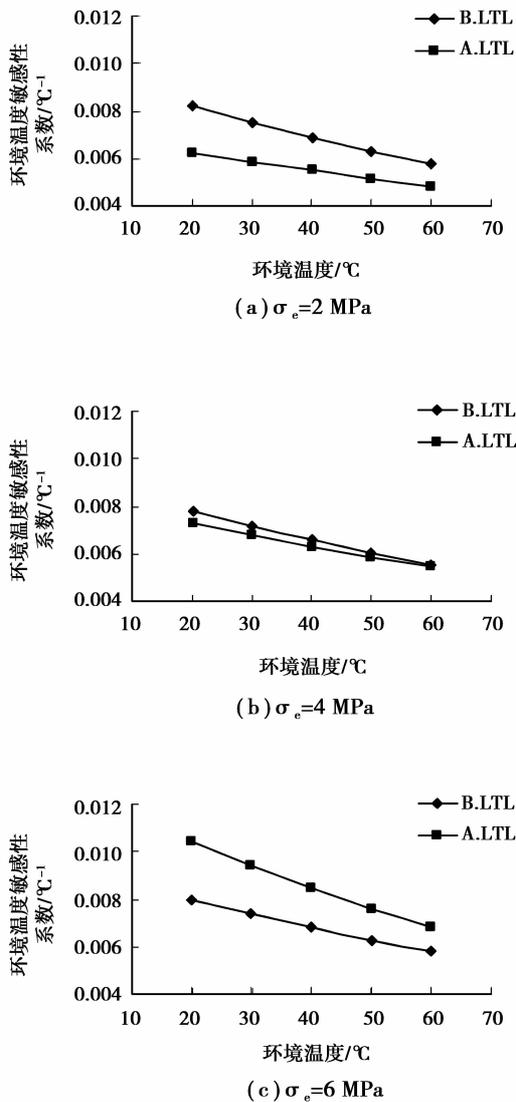


图 4 长期荷载作用前后渗透率敏感性系数对比

以看出长期荷载作用前后环境温度敏感性变化明显,分析图 4 可以发现:

1)各有效应力条件下,长期荷载作用前后,煤岩渗透率对环境温度的敏感性系数都是随着环境温度的增加而降低,即环境温度的增加,环境温度对渗透率的影响程度越来越低。分析认为,主要是因为,在低环境温度情况下,环境温度引起的膨胀变形较为明显,随着环境温度的增加,在轴向应力和侧向应力的限制作用下,这种膨胀变形越来越困难,即敏感性越来越低。另外,也说明长期荷载改变了敏感性系数的大小,但并不能改变这一变化的趋势。

2)随着环境温度的增加,长期荷载作用前后的敏感性差异性越来越小。在低环境温度情况下,长期荷载引起的环境温度的敏感性变化量较大,即敏感性差异性较大,随着环境温度的增加,其变化量越来越小,即敏感性差异性较小。

长期荷载作用前后环境温度敏感性系数差值随有效应力变化如图 5 所示。长期荷载作用前后,敏感性系数差随着有效应力的增加,先增加然后减小,在有效应力为 4.3 MPa 左右变为负值。说明低有效应力下长期荷载作用前渗透率对环境温度的敏感性高于长期荷载作用后,而在较高的有效应力(4 MPa 以上)时,则相反。分析认为,这主要是因为长期荷载作用引起煤样的塑性变形,孔裂隙收缩,长期荷载作用以后在低有效应力作用下,随着环境温度增加,基质膨胀在一定程度上压缩了孔裂隙,但这种变形量显然较长期荷载作用前小,渗透率变化量随环境温度增加变小,敏感性低于长期荷载作用前;而在较高有效应力下,环境温度升高导致的基质膨胀受高有效应力作用使得孔裂隙更加收缩,渗透率变化量大,敏感性高于长期荷载作用前。

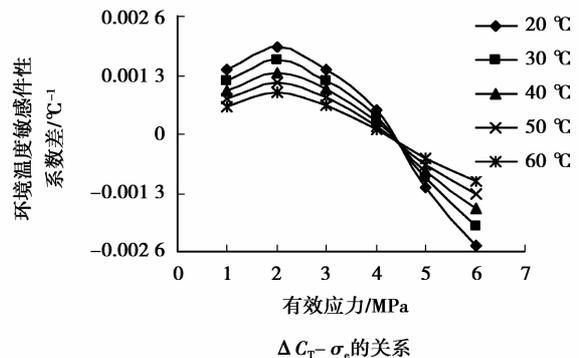


图 5 长期荷载作用前后环境温度敏感性系数差对比

3.2 有效应力敏感性分析

与环境温度敏感性系数类似,笔者同样引用了有效应力敏感性系数^[20]。它指当有效应力和瓦斯压力保持恒定时,有效应力每升高1 MPa所引起的煤渗透率的相对变化量,即

$$C_K = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial \sigma_e} \quad (4)$$

式中: C_K 为有效应力敏感性系数, MPa^{-1} ; K_0 为渗透率的初始值, mD ; ∂K 为渗透率变化量, mD ; $\partial \sigma_e$ 为有效应力变化量, MPa^{-1} 。

图6给出了不同环境温度条件下长期荷载作用前后有效应力敏感性系数变化(图6中B.LTL表示长期荷载作用前;A.LTL表示长期荷载作用后),分析图6发现:

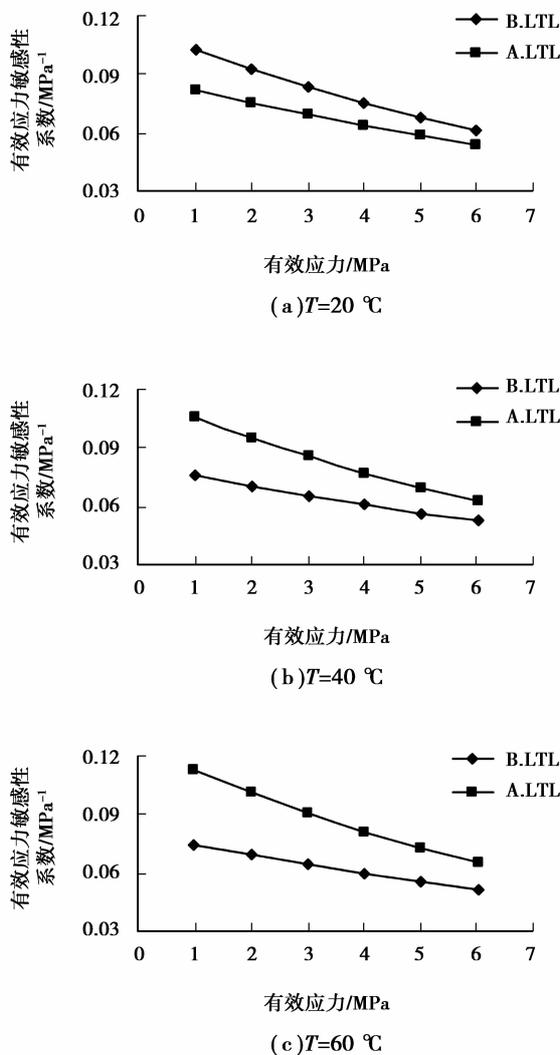
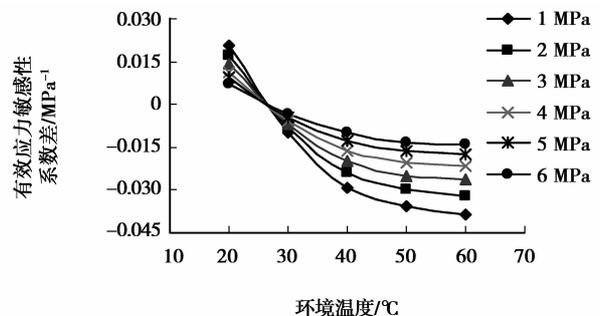


图6 长期荷载作用前后有效应力敏感性系数对比

1)不同环境温度条件下,煤岩渗透率对有效应力的敏感性系数随着有效应力的增加而降低,即随着有效应力的增加,有效应力对煤样渗透率的影响程度越来越小。分析认为,主要是因为,在低有效应力情况下,有效应力引起的压缩变形较大,随着有效应力的增加,这种变形越来越小,孔裂隙变化程度变小,表现为渗透率对有效应力的敏感程度越来越低。

2)在低有效应力情况下,长期荷载作用引起的有效应力敏感性差值变化量较大,而随着有效应力的增加,长期荷载作用前后有效应力敏感性系数的差异性也越来越小。分析认为,较低有效应力下,长期荷载作用对含瓦斯煤体的孔裂隙压缩相对于有效应力较为显著,而在高有效应力下,长期荷载产生的作用相对于有效应力来说变小,从而表现出长期荷载作用前后有效应力敏感性随着有效应力的增加差异性越来越小。

长期荷载作用前后有效应力敏感性系数差值随环境温度变化如图7所示,随着环境温度的增加,有效应力敏感性系数差随着环境温度的增加减小,在 $26\text{ }^\circ\text{C}$ 左右以后变为负数,说明了长期荷载作用后有效应力敏感性与长期荷载作用前相比先低后高。分析认为,这主要是因为,相对较低的环境温度条件下,长期荷载作用产生的孔裂隙塑性变形效应高于因环境温度和有效应力变化产生的孔裂隙变形,渗透率变化量减小,敏感性减弱,随着环境温度的增加,有效应力和环境温度的膨胀变形共同作用,渗透率变化量增加,在一定环境温度增长区间内敏感性增强。



$\Delta C_K - T$ 的关系

图7 长期荷载作用前后有效应力敏感性系数差

4 结 论

通过对不同环境温度、不同有效应力条件下长期荷载作用前后煤岩渗透率演化规律的试验研究,得到如下结论:

1)有效应力一定时,煤岩渗透率随环境温度的增加而降低,而后趋于平缓;环境温度一定时,煤岩渗透率随有效应力的增加而降低,而后趋于平缓;长期荷载作用并不能改变这一趋势,但是长期荷载作用降低了渗透率大小。其长期荷载作用前后渗透率差体现了很强的热-力-流耦合效应。

2)有效应力一定时,长期荷载作用前后,煤岩渗透率对环境温度的敏感性系数都随着环境温度的增加而降低,长期荷载作用前后环境温度敏感性系数差异性随着环境温度增加也越来越小;环境温度敏感性系数差随着有效应力的增加,先是增加然后减小,在有效应力为 4.3 MPa 左右变为负值。

3)环境温度一定时,长期荷载作用前后,煤岩渗透率对有效应力的敏感性系数随着有效应力的增加而降低,且有效应力敏感性系数差也随着有效应力的增加越来越小;长期荷载作用前后,有效应力敏感性系数差随着环境温度的增加减小,在 26 °C 左右以后变为负值。

参考文献:

- [1] Enever J R E, Henning A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir model [C]// Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium, May 12-17, 1997, Tuscaloosa, Alabama. Tuscaloosa: University of Alabama, 1997:13-22.
- [2] 赵阳升,胡耀青,杨栋,等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651-653.
ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3-D stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18 (6); 651-653.
- [3] 吴世跃,赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1674-1678.
WU Shiyue, ZHAO Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (10); 1674-1678.
- [4] 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 Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan, et al. Experimental study on effect of effective stress on adsorption and seepage of coalbed methane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1563-1568.
- [5] 杨胜来,崔飞飞,杨思松,等. 煤层气渗流特征实验研究[J]. 中国煤层气, 2005, 2(1): 36-39.
YANG Shenglai, CUI Feifei, YANG Sisong, et al. Experimental study on methanism of gas flow in coal bed [J]. China Coal Bed Methane, 2005, 2(1): 36-39.
- [6] 林柏泉,周世宁. 试样瓦斯渗透率的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1987, (1): 21-28.
LIN Baiquan, ZHOU Shining. Experimen investigation on the permeability of the coal samples containi methane [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1987, (1): 21-28.
- [7] 程瑞端,陈海焱,鲜学福,等. 温度对煤样渗透系数影响的实验研究[J]. 煤炭工程师, 1998, 27(1): 13-16.
HENG Ruiduan, CHEN Haiyan, XIAN Xuefu, et al. Experiments on the affection of temperature on permeability coefficient of coal samples [J]. Coal Engineer, 1998, 27(1): 13-16.
- [8] 梁冰. 温度对煤的瓦斯吸附性能影响的试验研究[J]. 黑龙江矿业学院学报, 2000, 10(1): 20-21.
LIANG Bing. Research on temperature effects on the gas absorption performance [J]. Journal of Heilongjiang Mining Institute, 2000, 10(1): 20-21.
- [9] 杨新乐,张永利,李成全,等. 考虑温度影响下煤层气解吸渗流规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1811-1814.
YANG Xinle, ZHANG Yongli, LI Chengquan, et al. Experimental study on desorption and seepage rules of coal-bed gas considering temperature conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1811-1814.
- [10] 杨新乐,张永利. 气固耦合作用下温度对煤瓦斯渗透率影响规律的实验研究[J]. 地质力学学报, 2008, 14(4): 374-380.
YANG Xinle, ZHANG Yongli. Experimental study of effect of temperature on coal gas permeability under gas-solid coupling [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14(4): 374-380.
- [11] 张广洋,胡耀华. 煤的瓦斯渗透性影响因素的探讨[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 1995, 18(3): 27-30.
ZHANG Guangyang, HU Yaohua. Study on the factors affecting gas permeability of coal [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1995,

- 18(3):27-30.
- [12] 李志强,鲜学福,隆晴明. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(4):523-527.
XU Zhiqiang, XIAN Xuefu, LONG Qingming. Experimental study of coal permeability under different temperatures and stresses [J]. Journal of China University of Mining and Technology,2009,38(4):523-527.
- [13] 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 Yongdong, XIAN Xuefu. An experimental research on the characteristics of methane seepage in stress field and temperature field [J]. China Mining Magazine,2007,16(5):113-116.
- [14] 贺玉龙. 三场耦合作用相关试验及耦合强度量化研究[D]. 成都:西南交通大学博士学位论文,2003.
- [15] 孙立东,赵永军,蔡东梅. 应力场、地温场、压力场对煤层气储层渗透率影响研究:以山西沁水盆地为例[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2007,26(3):12-14,31.
SUN Lidong, ZHAO Yongjun, CAI Dongmei. Research on effect of pressure, geo-temperature and stress fields on permeability of coal bed-gas-bearing seams in Qinshui basin [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 26(3): 12-14, 31.
- [16] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(Sup1):1801-1804.
SUN Peide. Testing study of coal specimen permeability during solid deformation process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Sup1):1801-1804.
- [17] 贺玉龙,杨立中. 温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):2420-2427.
HE Yulong, YANG Lizhong. Mechanism of effects of temperature and effective stress on permeability of sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14):2420-2427.
- [18] 许江,彭守建,陶云奇,等. 蠕变对含瓦斯煤渗透率影响的试验分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(11):2273-2279.
XU Jiang, PENG Shouajian, TAO Yunqi, et al. Experimental analysis of influence of creep on permeability of gas-bearing coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11):2273-2279.
- [19] 许江,张丹丹,彭守建,等. 三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(9):1948-1854.
XU Jiang, ZHANG Dandan, PENG Shouajian, et al. Experimental research on impact of temperature on seepage characteristics of coal containing methane under triaxial stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9):1948-1854.
- [20] 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 Shouajian, XU Jiang, TAO Yunqi, et al. Coefficient of sensitiveness between permeability and effective pressure of coal samples [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3):303-307.

(编辑 郑洁)