

文章编号: 1000-7598(2010)11-3447-05

孔隙压力对煤岩基质解吸变形影响的试验研究

吕祥锋¹, 潘一山¹, 刘建军², 唐巨鹏¹, 狄军贞³

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 成都 610500;
3. 辽宁工程技术大学 建筑与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 煤层气开采过程中, 伴随着煤层气不断地吸附、解吸和渗流, 煤体产生变形, 极易导致煤和瓦斯突出事故。以晋城天地王坡煤矿为例, 通过实验室内试验, 模拟煤层气在复杂地层漫长的形成和逐渐开采过程, 得到了孔隙压力与解吸量、应变的变化关系, 并拟合得出其相应关系表达式, 揭示了一些新的规律: (1) 初期解吸速度较快, 解吸量随着时间的增长而不断增加, 后期解吸速度减缓, 解吸量逐渐趋于稳定; (2) 孔隙压力与解吸量、应变呈现抛物线曲线关系, 随孔隙压力的升高, 吸附和膨胀变形占主导, 其值均在增大; (3) 存在最小孔隙压力值, 随孔隙压力的增大, 解吸时间增长, 孔隙压力越小, 吸附解吸规律越不明显, 对于晋城天地王坡煤矿 3#煤样, 该值在 1.0 MPa 左右; (4) 不同加载方式对解吸量和变形量影响较大, 先部分加载吸附后全部载荷解吸结果同比加全部载荷吸附解吸结果高 13%~77%。试验结果可为煤层气(CBM)抽放安全和煤与瓦斯突出防治提供理论依据。

关 键 词: 煤层气; 解吸; 变形; 孔隙压力

中图分类号: TD 821; O 242

文献标识码: A

Experimental study of effect of pore pressure on desorption deformation of coal matrix

LÜ Xiang-feng¹, PAN Yi-shan¹, LIU Jian-jun², TANG Ju-peng¹, DI Jun-zhen³

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. School of Architecture and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: With the adsorption, desorption and seepage of coalbed methane(CBM), coal mass deformation easily leads to coal-gas outburst in the process of production. Taking Tiandiwangpo Mine in Jincheng for example, the experiment of adsorption, desorption and seepage of coalbed methane(CBM) and deformation are simulated under complicated stresses condition. The relationships among pore pressure, desorption quantity and deformation are presented. The relationship expressions are studied. Some novel laws are obtained as follows. (1) At the beginning, desorption quantity increases rapidly over time; then it is stabilized latterly. (2) With the rising of pore pressure, the value of desorption quantity and deformation are increased; the desorption quantity and deformation are in parabolic curve relationship with pore pressure. (3) A minimal pore pressure exists; desorption time will increase with the increasing of pore pressure; the laws of desorption quantity and time will inconsistent when it is smaller than the minimal pore pressure. For the coal sample No.3, the minimal pore pressure is about 1.0 MPa. (4) Desorption quantity and coal mass deformation have a lot to do with loading methods; the result of loading method II is higher than loading method I about 13%-77%. The results provide a theoretical basis for security of coalbed methane(CBM) drainage and controlling of coal-gas outburst.

Key words: coalbed methane; desorption; deformation; pore pressure

1 引 言

煤体的形成是一个复杂而漫长的地质过程, 在煤体形成过程中大量的气体生成, 这种气体以甲烷为主, 俗称为瓦斯或煤层气^[1-4]。煤的开采过程伴

随着瓦斯气体的解吸、扩散和运移以及煤岩体变形, 煤和瓦斯突出事故常有发生, 给人民财产和生命安全带来极大的危害。目前, 国内外学者对应力作用下煤岩的渗透性能及瓦斯对煤体力学性质等方面进行了很多理论和试验研究, C R McKee 等^[1]和

收稿日期: 2009-11-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 50874082); 国家自然科学基金青年项目 (No. 10502023); 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目 (No. 2010CB226803); 辽宁省教育厅高等学校科技计划项目 (No. 2008274)。

第一作者简介: 吕祥锋, 男, 1982 年生, 博士研究生, 从事煤层气开采理论及实验研究。E-mail: lvxiangfeng2006@126.com

J R E Enever 等^[2]研究了有效应力与煤体渗透率的影响关系; 蒋承林等^[3-6]在孔隙瓦斯压力与煤岩吸附-解吸变形规律方面做了许多研究工作; 赵阳升、胡耀青^[8]、刘贞堂^[7]、章梦涛、潘一山和梁冰等^[10]在瓦斯压力与煤的力学性质方面做了大量的试验研究。但是, 在孔隙压力与煤岩吸附-解吸变形规律研究方面, 机制还不清晰, 规律不太明确, 相关方面的报道也不多见, 而煤层气的吸附-解吸、扩散及渗流, 伴随着煤采出的整个过程^[9-13]。随着煤体的不断开采, 煤体和孔隙结构发生了很大变化, 直接影响着煤体变形及煤层气的运移, 因此, 研究煤层气运移机制, 进而寻求孔隙压力变化与煤岩基质变形之间的关系, 从而为煤田安全生产及煤层气的合理抽采提供基本理论依据。

2 试 验

试验煤样采自山西晋城天地王坡煤矿, 采出煤层距离地面约 350 m。煤样尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm。试验时, 先用 75% 的酒精清洗干净后贴应变片, 然后把煤样放置于三轴压力室的压头上, 将热缩管均匀受热后, 使得热缩管与煤样紧密包裹。试验煤样见图 1。

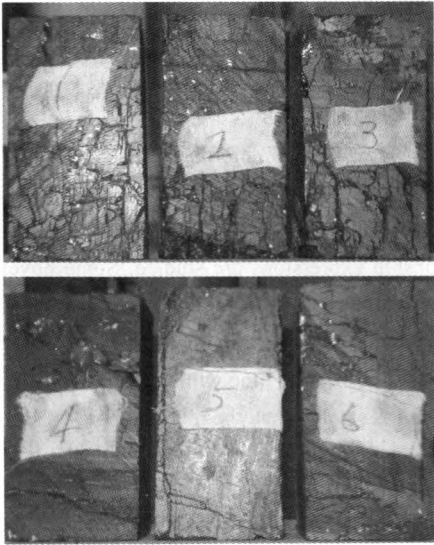


图 1 试验煤样
Fig.1 Experimental coal sample

试验在恒压条件进行, 环境温度为室温, 注气与层理方向平行。试验过程中改变注气压力及加载方式^[14-15]模拟煤层气在复杂地质结构中漫长的形成及卸压开采过程。由于煤层气主要成份为甲烷, 因此, 选择注入甲烷气体。先注气(高纯甲烷, 含量大于等于 99.995%)吸附 12 h, 稳定后解吸 12 h, 此时, 对于煤层气的吸附解吸漫长过程来讲, 吸附解

吸并未达到真正意义的饱和。用排水法测量解吸气体体积作为煤样吸附气体量, 同时记录相应应变值。试验原理和试验装置实物图分别如图 2、3 所示。

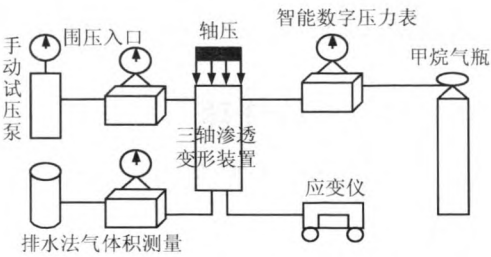


图 2 煤岩基质解吸变形试验原理示意图
Fig.2 Experimental scheme of desorption deformation

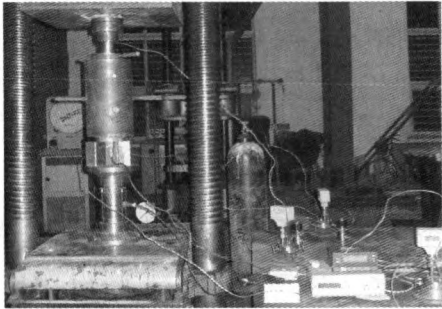


图 3 煤岩基质解吸变形试验装置实物图
Fig.3 Experimental device for desorption deformation

3 结果及分析

对不同注气压力及不同加载方式下煤岩基质解吸变形的试验研究, 得到试验部分数据见表 1。加载方式 I: 试验中, 对试验煤样施加初始煤层压力吸附解吸, 得到解吸过程的变形规律。加载方式 II: 试验过程中, 先对试验煤样施加部分压力吸附, 其中, 围压大于注气压力, 在全压条件下进行解吸。

表 1 试验参数及部分结果数据
Table 1 Experimental parameters and partial results

注气压力 /MPa	吸附、解吸 时间/h	轴压围压 (全压值) /MPa	解吸量 /mL	横向 应变 /10 ⁻⁶	纵向 应变 /10 ⁻⁶	加载状态
1.2	12、12	6.5、5.7	265.1	-80	-44	加载方式 I: 加全压 吸附后解吸
2.8	12、12	6.5、5.7	406.3	-107	-64	加载方式 I: 加全压 吸附后解吸
4.7	12、12	6.5、5.7	764.3	-133	-101	加载方式 I: 加全压 吸附后解吸
1.2	12、12	6.5、5.7	374.4	-94	-58	加载方式 II: 3.0、 2.5 MPa 吸附后全压 解吸
2.8	12、12	6.5、5.7	719.5	-121	-86	加载方式 II: 4.5、 3.5 MPa 吸附后全压 解吸
4.7	12、12	6.5、5.7	1204.5	-166	-129	加载方式 II: 6.0、 5.7MPa 吸附后全压 解吸

3.1 解吸量与解吸时间关系

试验结果表明, 加载至轴压 6.5 MPa、围压 5.7 MPa、孔隙压力分别为 1.2、2.8、4.7 MPa 时, 注气吸附解吸各 12 h, 解吸量随着时间的增长而不断增大(图 4), 最终解吸量随时间增长趋于稳定状态。且孔隙压力越大, 吸附煤层气量越多, 表现出吸附占主导。通过改变不同的加载方式模拟实际地层及煤体的复杂形成和煤层气逐渐开采的过程, 也说明了煤层气的开采过程存在着有效应力、基质收缩及滑脱效应各占主导的 3 阶段。

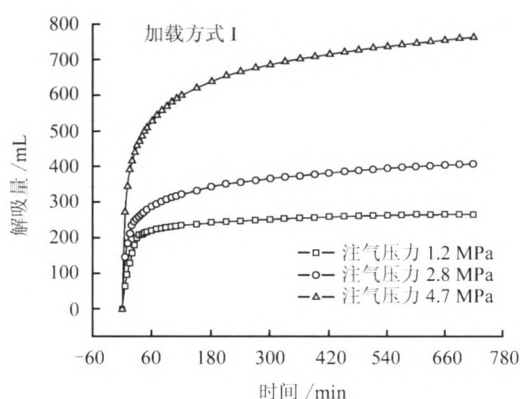


图 4 解吸量与时间变化关系

Fig.4 Relation curves of desorption quantity and time

试验结果还表明, 加载方式对煤岩基质解吸量影响很大, 加载方式 II 条件下试验数据值比方式 I 相比高 13%~77%, 且解吸量随时间变化规律更好(图 5)。分析其原因主要在于, 加载方式 I 条件下, 轴压和围压较大, 煤岩孔隙处于压缩状态, 孔隙收缩后, 其体积减小, 吸附和解吸量都相对较小; 加载方式 II 条件下, 吸附过程轴压围压较小, 煤岩孔隙体积增大, 吸附能力增强, 吸附量增加, 当增加轴压、围压解吸时, 煤岩基质受压缩变形, 大量瓦斯解吸, 也说明煤是在逐步原始载荷条件下形成的, 而煤层气的吸附、解吸也是在逐步加载条件下进行的, 加载方式 II 更符合煤层气吸附、解吸实际条件。

3.2 孔隙压力与解吸变形关系

孔隙压力与解吸量、横向应变和纵向应变的关系曲线如图 6~8 所示。由图可以看出, 随着孔隙压力的增大, 解吸量及应变量均在增加, 孔隙压力与解吸量、应变呈现出抛物线性关系, 说明随着孔隙压力的增加, 吸附过程占主导, 煤体吸附气体后会产生较大的膨胀变形, 与中国矿业大学蒋承林等^[3-6]的试验结果中瓦斯压力升高与膨胀变形增加

规律具有一致性。由于吸附解吸是可逆的过程, 因此, 煤层气卸压开采中, 解吸占主导, 煤岩将发生以收缩为主导的变形。试验结果数据中, 应变为负号表示煤岩基质为收缩变形。

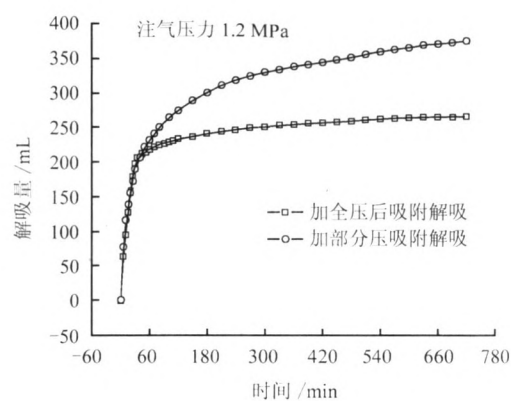


图 5 不同加载方式解吸量与时间关系

Fig.5 Relation curves of desorption quantity and time in different loading methods

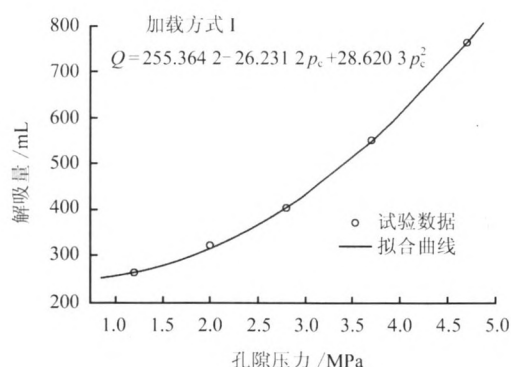


图 6 孔隙压力与解吸量拟合曲线

Fig.6 Fitting curve between pore pressure and desorption quantity

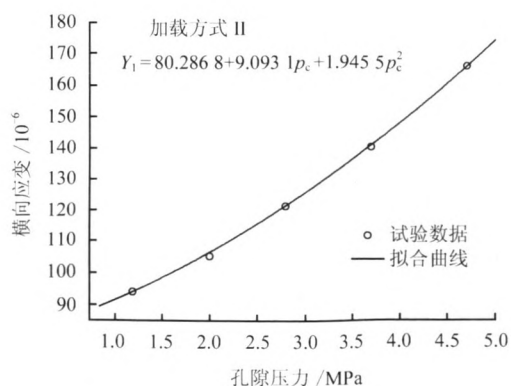


图 7 孔隙压力与横向应变拟合曲线

Fig.7 Fitting curve between pore pressure and lateral strain

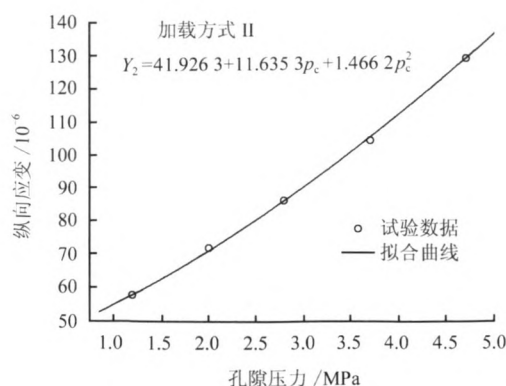


图 8 孔隙压力与纵向应变拟合曲线
Fig.8 Fitting curve between pore pressure and longitudinal strain

拟合的孔隙压力与解吸量、应变量的关系曲线, 呈现二次抛物线分布特征, 并得到其对应的关系表达式 (1)、(2)。由拟合曲线可知, 存在着最小的孔隙压力, 当孔隙压力小于最小值时, 吸附解吸过程规律更不明显, 对于晋城天地王坡煤矿而言, 最小值在 1.0 MPa 左右。随着孔隙压力的增加, 解吸量、应变均在增加, 存在孔隙压力的最大值(临界孔隙压力), 即当孔隙压力达到临界值后, 吸附饱和, 孔隙、裂隙不能再吸附气体而发生膨胀变形, 煤体在外界应力作用下将逐渐收缩。因此, 天然状态下存在煤层气合适的孔隙压力, 这时吸附解吸最理想, 吸附解吸时间最短, 吸附解吸量最大。对于晋城天地王坡煤矿 3# 煤样测定结果, 孔隙压力值在 4.0 MPa 左右为宜。

加载方式 I 拟合关系:

$$\left. \begin{aligned} Q &= 255.364 2 - 26.231 2 p_c + 28.620 3 p_c^2 \\ \varepsilon_1 &= 56.686 8 + 20.521 6 p_c - 0.911 7 p_c^2 \\ \varepsilon_2 &= 35.694 7 + 4.530 1 p_c + 1.992 5 p_c^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

加载方式 II 拟合关系:

$$\left. \begin{aligned} Q &= 153.567 6 + 170.458 2 p_c + 11.307 3 p_c^2 \\ \varepsilon_1 &= 80.286 8 + 9.093 1 p_c + 1.945 5 p_c^2 \\ \varepsilon_2 &= 41.926 3 + 11.635 3 p_c + 1.466 2 p_c^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: Q 为解吸量 (mL); ε_1 为横向应变 (10^{-6}); ε_2 为纵向应变 (10^{-6}); p_c 为孔隙压力 (MPa)。

4 结 论

(1) 初期解吸速度较快, 解吸量随着时间的增长而不断增加, 随着时间的增长, 后期解吸量逐渐趋于稳定; 孔隙压力与解吸量、应变呈现抛物线曲线关系, 随孔隙压力的升高, 吸附和膨胀变形占主导,

其值均增大, 与文献[5]所得规律基本一致。

(2) 存在最小孔隙压力值, 随孔隙压力的增大, 解吸时间增长, 孔隙压力越小, 吸附解吸规律越不明显, 对于晋城天地王坡煤矿 3# 煤样测定结果, 该值为 1.0 MPa 左右。

(3) 不同加载方式对解吸量和变形量影响很大, 先部分加载吸附后全部压力解吸试验结果同比加全部载荷吸附解吸结果高 13%~77%。

(4) 对孔隙压力与解吸量、应变数据进行拟合, 根据拟合结果可知, 加载方式 II 试验结果较高, 且拟合效果较好, 更符合煤层实际条件, 关系为式 (1) 和式 (2)。

从晋城天地王坡煤矿解吸变形规律得到了孔隙压力与解吸量和应变的变化关系, 对进一步深入研究有一定的参考价值。而煤岩基质解吸变形的研究是一项复杂的工作, 需要进行更多实验研究分析, 才能得出更具普遍一致性的规律。

参 考 文 献

- [1] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal[C]// Geology and Coal-bed Methane Resources of the Northern San Juan Basin. Colorado. Fassett J E ed. USA: Rocky Mountain Association of Geologists Guidebook, 1988: 143—153.
- [2] 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. Tuscaloosa, AL, USA: University of Alabama, 1997: 13—22.
- [3] 蒋承林, 陈松立, 陈燕云. 煤样中初始释放瓦斯膨胀能的测定[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 395—400.
JIANG Cheng-lin, CHEN Song-li, CHEN Yan-yun. Measurement of the initial releasing energy of expanding methane from coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(4): 395—400.
- [4] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出过程中能量耗散规律的研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 173—178.
JIANG Cheng-lin, YU Qi-xiang. Rules of energy dissipation in coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 173—178.
- [5] 韩颖, 蒋承林. 初始释放瓦斯膨胀能与煤层瓦斯压力的关系[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 650—654.

- HAN Ying, JIANG Cheng-lin. Relationship between expansion energy of initial released gas and gas pressure[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(5): 650—654.
- [6] 蒋承林. 煤与瓦斯突出的预测模型及预测指标[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(4): 373—376.
- JIANG Cheng-lin. Forecast model and indexes of coal and gas outburst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1998, 27(4): 373—376.
- [7] 刘贞堂. 突出危险煤吸附瓦斯后变形规律的研究[J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(8): 29—31.
- LIU Zhen-tang. Study on the low of adsorption deformation of outburst coal[J]. *Coal Science and Technology*, 1996, 24(8): 29—31.
- [8] 赵阳升, 胡耀青. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 26—31.
- ZHAO Yang-sheng, HU Yao-qing. Experimental study on the law of effective stress by methane pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(3): 26—31.
- [9] 狄军贞, 刘建军. 基于 COMSOL Multiphysic 的煤层甲烷拟稳态吸附-运移数值模拟[J]. 中国煤层气, 2007, 4(3): 25—27.
- DI Jun-zhen, LIU Jian-jun. Numerical simulation based on COMSOL Multiphysic to steady and non-equilibrium adsorption-mobilization of coalbed methane[J]. *China Coalbed Methane*, 2007, 4(3): 25—27.
- [10] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 12—14.
- LIANG Bing, ZHANG Meng-tao, PAN Yi-shan, et al. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 12—14.
- [11] 刘建军, 刘先贵, 胡雅祯. 低渗透岩石非线性渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 556—561.
- LIU Jian-jun, LIU Xian-gui, HU Ya-ren. Study on nonlinear seepage of rock of low permeability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 556—561.
- [12] 章梦涛, 潘一山, 梁冰, 等. 煤岩流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [13] 张力, 郭勇义. 块煤瓦斯吸附动力过程的实验研究[J]. 煤矿安全, 2000, (9): 17—18.
- ZHANG Li, GUO Yong-yi. Experimental study of the dynamic process of block coal methane adsorption[J]. *Safety in Coal Mines*, 2000, (9): 17—18.
- [14] 范家文, 冯增朝, 段康廉, 等. 煤体变形及其瓦斯排放的相关性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(2): 172—174.
- FAN Jia-wen, FENG Zeng-chao, DUAN Kang-lian, et al. Relativity testing study of coal mass deformation and gas drainage[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2004, 35(2): 172—174.
- [15] 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 Yi-shan, LI Cheng-quan, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of Coalbed Methanes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1563—1568.
- [9] 胡其志, 冯夏庭, 周辉. 考虑温度损伤的岩盐蠕变本构关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2245—2248.
- HU Qi-zhi, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Study of creep model of rock salt with thermal damage considered[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2245—2248.
- [10] 朱珍德, 郭海庆. 裂隙岩体水力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 236—243.
- CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, WU Guo-jun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 236—243.
- [12] 长江水利委员会长江科学院. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [13] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [14] KRANZ R L. Crack-crack and crack-pore interactions in stresses granite[J]. *International Journal Rock Mechanics And Mining, Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(11): 37—47.

上接第 3446 页