

单轴压缩下粉砂岩声发射事件与撞击对比试验研究

王春来, 李炜强, 卢辉, 王福利, 李仕博, 郭袁进, 刘畅, 李长江, 刘超, 罗茗

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要:为更深入地研究岩石受载失稳过程中声发射(AE)撞击和事件参数对岩石内部损伤的响应关系, 试验采用 PCI-2 全数字化声发射信号采集分析系统及 TAW-2000 型微机伺服岩石力学实验系统, 对粉砂岩进行单轴加载声发射监测, 观察粉砂岩在单轴加载过程中声发射事件参数与撞击参数的变化特征。通过参数对比分析, 发现事件参数与撞击参数对粉砂岩破坏表征的优劣性, 得出如下结论: AE 撞击参数较 AE 事件参数变化趋势明显, 更能体现岩石内部损伤过程; 在岩石受载中期声发射活动相对前后期较为平稳且各参数值也相对偏低; 在粉砂岩未处于失稳破坏阶段时, 撞击数与事件数的变化趋向相同; 但受载末期撞击数迅速增加而事件数很少, 两者变化呈不同趋向, 其直观地反映出岩石内部裂隙发展过程。

关键词:单轴压缩; 声发射; 事件; 撞击; 信号参数

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 2095-2783(2015)03-0291-05

Experimental study on the acoustic emission characteristic parameters of siltstone at uniaxial compression

Wang Chunlai, Li Weiqiang, Lu Hui, Wang Fuli, Li Shibo, Guo Yuanjin, Liu Chang, Li Changjiang, Liu Chao, Luo Ming

(Faculty of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To intensively study the effects of acoustic emission (AE) hit and event parameters in rock loading rupture process, physical experiments on the uniaxial compression of siltstones were carried out using PCI-2 digital AE signal collection/analysis system and TAW-2000 computer servo rock mechanics system, and the corresponding variation characteristic of the AE parameters upon loading was studied. The results show that AE hit parameters have more features and can better reflect the rock damage process than the AE event parameters. In the middle stage of the rock loading, AE activity is relatively stable and the parameter values are relatively low. Before the siltstone instable destruction stage, the hit and the event have the same variation tendency. However, at the end of the loading, the hit number increases suddenly while that of the event decreases, this difference reflects intuitively the rock fracture development.

Key words: uniaxial compression; acoustic emission; event; hit; signal parameter

声发射(acoustic emission, AE)是指材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象^[1]。在 Obert 和 Duvall 发现受压作用下岩石结构内部有声发射活动存在后, 声发射技术广泛应用于金属矿山、煤矿及隧道工程的岩体稳定性与安全性问题的监测与预报中^[2-3]。声发射作为岩石破坏过程中的一种伴生现象, 蕴含着岩石内部破坏过程的大量信息, 能很好地反映岩石内部损伤过程^[4]。国内外学者对岩石受力损伤过程中的声发射信号特征做了大量的室内研究, 如李庶林等^[5-6]、尹贤刚等^[7]、付小敏^[8]对单轴压缩条件下的岩石声发射特征进行了研究; 余贤斌等^[9]针对岩石声发射特征进行了不同加载条件下的试验研究并发现了岩石声发射特征的差异; 尹贤刚等^[10]对岩石破坏声发射平静期及其分形特征做了大量研究; 许江等^[11]对单轴压缩下声发射定位实验的影响因素进行了试验分析; 吴胜兴等^[12]对混凝土

静态轴拉下声发射硬件设置及各参数相关性做了较为详细的论述。这些研究成果对声发射技术在岩石动态监测方面^[13-15]的应用具有重要的参考价值, 但上述研究大量采用事件累计数来演示岩石内部损伤过程, 而对撞击参数和事件参数之间的优劣性认识不清。本试验针对撞击参数和事件参数对粉砂岩受载损伤过程表征的优劣性做了较为详尽的数据和图像对比分析, 得出的结论能很好地判定岩石内部损伤程度。

1 声发射试验

1.1 试验设备

1.1.1 加载系统

试验采用 TAW-2000 微机控制高温岩石三轴试验机, 此系统可实时动态地显示应力与应变变化曲线, 准确测量轴向和径向变形, 自动采集岩石受载下

收稿日期: 2014-07-24

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120023120008); 国家自然科学基金资助项目(51374217); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011QZ01); 校级大学生创新创业训练计划资助项目(201411413069, Y20141106, Y20131110)

作者简介: 王春来(1976—), 男, 副教授, 主要研究方向为岩爆(冲击地压)发生机理、微震监测预警及控制技术, tswcl@126.com

的变化数据。试验软件采用 Visnml C++ 语言编程,具有很好的软件自检功能。本试验采用等位移加载方式对岩石试件进行单轴压缩试验,声发射信号采集与岩石加载同步进行。

1.1.2 声发射采集系统

试验所用是美国物理声学公司生产的 PCI-2 全数字化声发射信号采集分析系统,本系统有 6 个通道,能同时实现特征参数提取和波形处理,采用 300 kHz 的微型传感器进行信号采集,能准确获取撞击和事件的信息。本试验前置放大器设置为 40 dB 的增益,AE 硬件设置:阈值设置为 45 dB,采样率设为 1 MHz,AE 定时参数 PDT、HDT、HLT 分别设置为 50、150、200,以保证优质的信号采集。传感器与岩石表面间用凡士林耦合接触并用胶带固定,与端面留有间隔以减弱端部效应,如图 1 所示,6 个传感器交错布置在试件上下部。每次试验数据采集前先进行断铅试验,以检查各通道的信号接收。

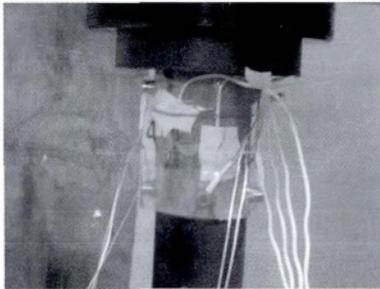


图 1 传感器布置

1.2 试验试样准备

试样为山东某矿采取的粉砂岩,加工为直径 50 mm、高度 100 mm 的 8 个标准试件,部分试件存在着原生裂纹(见图 2)。试验正式开始前,先选取一个试件进行压缩试验,根据采集结果对 AE 硬件设置进行校正,将采样率和定时参数做以上调整,以达到最佳的信号收集。

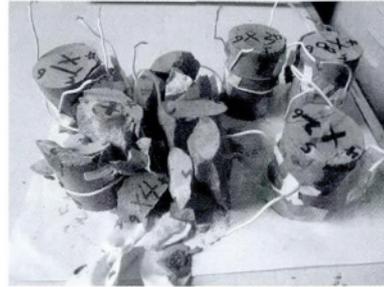


图 2 试件

2 试验结果及分析

2.1 波数设置对信号采集的影响

试验开始前必须获取声发射在试样中的波速,因为波速是进行声发射定位的重要参量,波速通过断铅试验由材料声学特征矩阵自动测试功能获得。由于取自同一岩体的试件性质相差不大,可以多次测量取平均值作为 AE 硬件波速设置值,本试验测得粉砂岩中声发射传播速度为 2 230 m/s。图 3 为进行波速和滤波设置后,AE 事件定位对岩石内部实时损伤过程呈现结果。

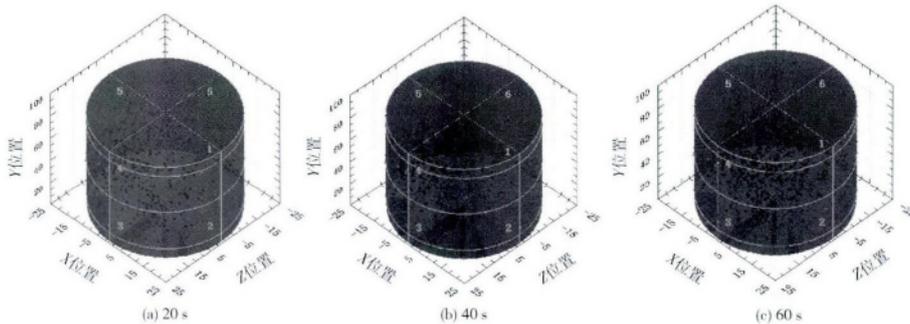


图 3 声发射事件定位

2.2 撞击信号参数与事件信号参数对岩石破裂损伤表征的优劣性

AEwin 软件本身具有很强的读图作图功能,操作者可以通过图形设置功能获取各参数间的关系图。作图依据信号来源数据有撞击和事件两种,选取不同数据作图对岩石内部损伤程度的反映不同。幅值超过阈值并使某一个通道获取数据的任何信号称为一个撞击,反映声发射活动的总量和频度,常用于声发射活动性评价。而声源会在介质的各个方向传播,声发射信号会以撞击的形式被一个或多个通道检测。同一个撞击被多个通道同时检测到并能

进行定位而形成事件,因此声发射信号撞击总数远大于事件总数。撞击参数包括幅值、能量、上升时间、持续时间、信号强度、计数,平均频率等参数,事件参数还包括定位坐标和源幅值。定义 0.5 s 内事件累计数为事件数,0.5 s 内的撞击累计数为撞击数。根据文献[12]可知,声发射幅值、计数、持续时间、上升时间和信号强度这 5 个参数之间存在显著的相关性,且各试件声发射活动变化大致相同。

下面仅对试样六事件与撞击的能量、持续时间、信号强度和幅值 4 个参数作对比研究。图 4 和图 5 为试件六的试验数据散点图,图中每个散点分别代

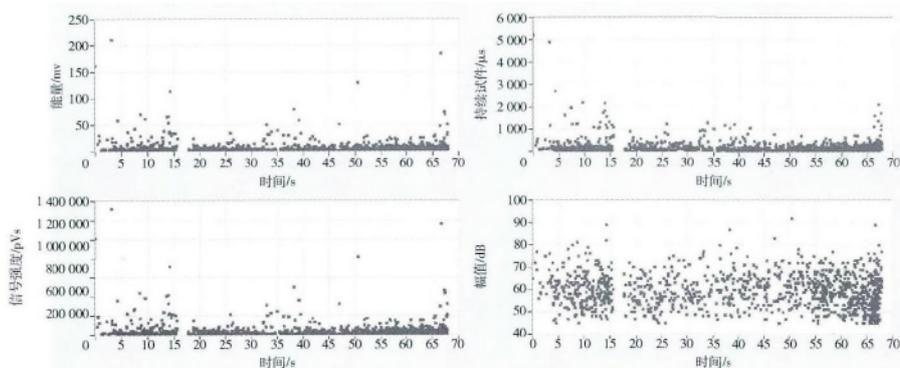


图 4 事件参数对时间散点图

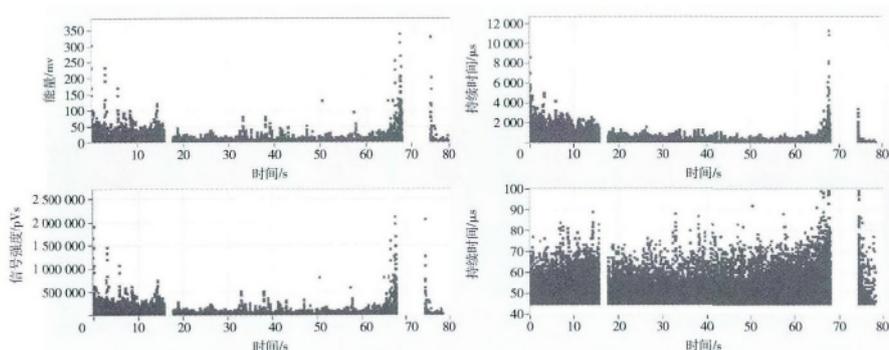


图 5 撞击参数对时间散点图

表一个事件和一个撞击。由图中可以直观地看出,事件信号参数离散性很大。1 224 个事件中绝大部分集中于图像底部,仅零星的点浮于图像上方,且加载末期事件数几乎没有,对岩石受载过程中内部损伤演化反映不够明显,不利于体现岩石微震失稳的突变性;而撞击信号参数更富特点,在试件受载期间撞击参数持续存在,且在不同的变形阶段均具有较明显的变化特征。针对各试件中均存在的数据空白区,推测认为信号幅值未过门槛值而造成信号数据空白,这也成为日后工作重点。因此,仅用定位事件参数来评价岩石内部损伤虽具有一定的真实性,但不能全面地呈现岩石失稳损伤过程,而撞击参数能较好地表征岩石声发射活动。

2.3 AE 撞击参数和事件参数在不同变形阶段的变化特征

观察各试件受压损伤过程中参数变化(图 6 和图 7),并结合粉砂岩本身岩性特点得出以下规律:在岩石初始压密阶段,各试件撞击和事件的累计数、信号强度均呈上升趋势,而持续时间、上升时间均呈下降趋势;在受载中期,由于岩石整体蓄能及各试件内部微裂面结构不同,各试件参数变化不一,但总体呈现为各参数值相对前后期偏低;在受载末期,AE 撞击和 AE 事件各参数值急剧增加,表明岩石内部裂纹加剧扩展直至裂隙贯通。由图 6 可知,试件六在达到峰值强度后,声发射事件数突变为零,此时明显地观察到岩石表面出现贯通的裂纹。分析认为信号源

位置相对传感器变动,声发射无法形成稳定三维定位,才会出现事件都达到峰值后突然消失的现象。但在受载末期岩石内部有裂隙扩展或裂隙间岩块相互摩擦,试件仍有声发射产生,各传感器能继续收集到撞击信号。

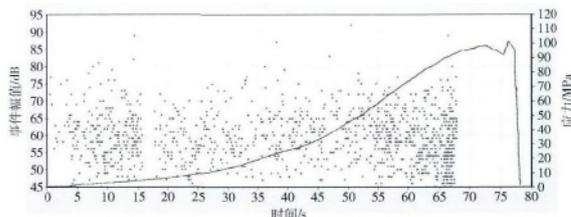


图 6 试样六事件幅值和应力关系

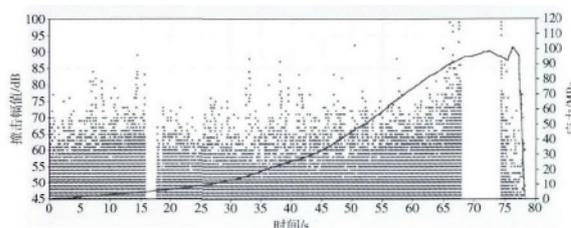


图 7 试样六撞击幅值和应力关系

对比各试件撞击数和事件数变化规律发现:在岩石失稳破坏前,事件数与撞击数变化趋向大致相同;但在受载末期两者变化趋向不同,撞击数处于活跃状态而事件数很小甚至为零。如图 8 试件六的事

件数在 79 s 后迅速降低而撞击数仍处于峰值状态, 同样在图 9 中事件数在 68 s 后突然变为零而撞击数仍存在。分析认为岩石裂隙扩展呈现宏观的破坏后岩块受压错动, 致使声发射被无法准确定位。

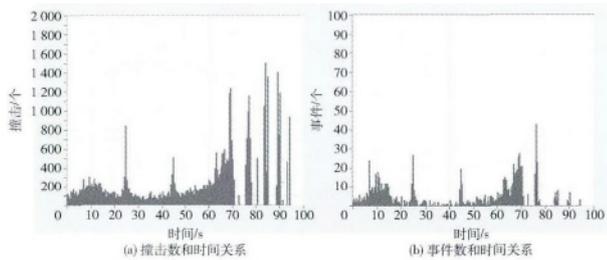


图 8 试样三撞击数和事件数

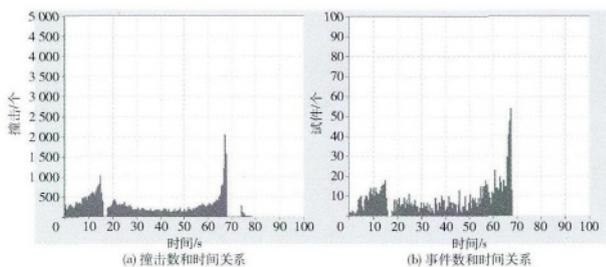


图 9 试样六撞击数和事件数

3 结 论

通过对粉砂岩进行单轴压缩条件下声发射监测试验, 从声发射定位、幅值、持续时间、累计数等参数结果做对比分析, 得出以下结论。

1) 波速是进行声发射定位的重要参数, 每类试件在 AE 硬件设置前都需反复进行断铅试验, 利用材料声学特征矩阵自动测试功能获得波速测试值, 以保证声发射定位的准确性。

2) 用定位事件参数来评价岩石内部损伤虽具有一定的真实性, 但不能全面地呈现岩石失稳损伤过程, 而撞击参数能较好地表征岩石声发射活动。

3) 岩石受载压密阶段, 两者累计数、信号强度均呈上升趋势, 而上升时间、持续时间呈下降趋势; 受载中期, 各参数值较前后期偏低且变化平稳, 为岩石整体蓄能阶段, 声发射能量释放减少; 岩石失稳破裂阶段, 各参数值迅速上升。

4) 可以利用撞击数与事件数变化趋向的异同来表征岩石内部损伤程度, 较事件累计数等参数更能直观地反映岩石内部裂隙发育情况。

[参考文献] (References)

[1] 杨明伟. 声发射检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Yang Mingwei. Acoustic Emission Testing [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)

[2] 胡昌洋, 杨钢锋, 等. 声发射技术及其在检测中的应用 [J]. 计量与测试技术, 2008, 35(6): 1-3.
Hu Changyang, Yang Gangfeng, et al. AE technology

and application in the test [J]. Metrology and Measurement Technique, 2008, 35(6): 1-3. (in Chinese)

- [3] 秦四清, 李造鼎, 张俤元, 等. 岩石声发射技术概论 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993: 58-76.
Qin Siqing, Li Zaoding, Zhang Zhuoyuan, et al. An Introduction to Acoustic Emission Techniques in Rocks [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993: 58-76. (in Chinese)
- [4] 裴建良, 刘建峰, 张茹, 等. 单轴压缩条件下花岗岩声发射事件空间分布的分维特征研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(6): 51-55.
Pei Jianliang, Liu Jianfeng, Zhang Ru, et al. Fractal study on spatial distribution of acoustic emission events of granite specimens under uniaxial compression [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(6): 51-55. (in Chinese)
- [5] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499-2503.
Li Shulin, Yin Xiangang, Wang Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503. (in Chinese)
- [6] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特征研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 147-152.
Li Shulin, Tang Haiyan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 147-152. (in Chinese)
- [7] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏过程的声发射特征研究 [J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(3): 9-11.
Yin Xiangang, Li Shulin, Tang Haiyan, et al. Study on characteristics of acoustic emission in process of rock failure [J]. Mining Research and Development, 2003, 23(3): 9-11. (in Chinese)
- [8] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2005, 32(1): 17-21.
Fu Xiaomin. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2005, 32(1): 17-21. (in Chinese)
- [9] 余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 137-142.
Yu Xianbin, Xie Qiang, Li Xinyi, et al. Acoustic emission of rocks under direct tension, brazilian and uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 137-142. (in Chinese)
- [10] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3383-3390.
Yin Xiangang, Li Shulin, Tang Haiyan, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3383-3390. (in

Chinese)

- [11] 许江,李树春,唐晓军,等. 单轴压缩下岩石声发射定位实验的影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 765-772.
Xu Jiang, Li Shuchun, Tang Xiaojun, et al. Influential factors of acoustic emission location experiment of rock under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 765-772. (in Chinese)
- [12] 吴胜兴,王燕,李佳,等. 混凝土静态轴拉声发射实验相关参数研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 196-204.
Wu Shengxing, Wang Yan, Li Jia, et al. Parameters of acoustic emission test of concrete under static uniaxial tension [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 196-204. (in Chinese)
- [13] 王春来,吴爱祥,徐必根,等. 某深井矿山微震监测系统建立与网络优化研究[C]//中国岩石力学与工程学会地下工程分会. 第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 2008: 127-135.
Wang Chunlai, Wu Aixiang, Xu Bigen, et al. Study on establishment and optimization network of the micro-seismic monitoring system in a deep mine [C]// Chinese society for rock mechanics and engineering. 10th congress symposium on Rock Mechanics & Engineering. Beijing: China electric power press, 2008: 127-135. (in Chinese)
- [14] 刘晓辉,吴爱祥,王春来,等. 某深井矿山岩爆预测模式研究[J]. 采矿安全与工程学报, 2012(1): 78-83.
Liu Xiaohui, Wu Aixiang, Wang Chunlai, et al. Study on rocks burst forecasting prediction in a deep mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012(1): 78-83. (in Chinese)
- [15] Wang Chunlai. Identification and early warning method for rock mass instability [J]. Disaster Advances, 2013, 6(12): 101-105.
-
- (上接第 290 页)
- [3] 赵天宇,王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2445-2452.
Zhao Tianyu, Wang Jinfang. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess soil considering density and wetting-drying cycle effects [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(6): 2445-2452. (in Chinese)
- [4] 徐敏. 非饱和带水分特征曲线的实验研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
Xu Min. Experiment Study on Soil-water Characteristic Curve in Unsaturated Zone [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [5] 徐绍辉,刘建立. 土壤水力性质确定方法研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 494-501.
Xu Shaohui, Liu Jianli. Advances in approaches for determining unsaturated soil hydraulic properties [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 494-501. (in Chinese)
- [6] 于沉香,张虎元,王志硕,等. 盐渍土土水特征曲线测试及预测[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 113-118.
Yu Chenxiang, Zhang Huyuan, Wang Zhishuo, et al. Test and prediction of SWCC of saline soil [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(2): 113-118. (in Chinese)
- [7] 刘建立,徐绍辉,刘慧. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 68-76.
Liu Jianli, Xu Shaohui, Liu Hui. A review of development in estimating soil water retention characteristics from soil data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 68-76. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—1999. Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [9] Van Genuchten M T. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.
- [10] Gardner W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228-232.
- [11] Fredlund D G, Xing Anqing. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [12] 伊盼盼,牛圣宽,韦昌富. 干密度和初始含水率对非饱和和重塑粉土土水特征曲线的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 42-46.
Yi Panpan, Niu Shengkuan, Wei Changfu. Effect of dry density and initial moisture content on soil water characteristic curve of remolded unsaturated silt [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(1): 42-46. (in Chinese)
- [13] Yang Chao, Sheng Daichao, Carter John P. Effect of hydraulic hysteresis on seepage analysis for unsaturated soils [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 41: 36-56.
- [14] 冯杰,尚燧延,刘佩贵. 大孔隙土壤与均质土壤水分特征曲线比较研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1006-1009.
Feng Jie, Shang Manyan, Liu Peigui. Comparative study on the soil water retention curve between macroporous soil and homogeneous soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 1006-1009. (in Chinese)