

文章编号: 1000-7598(2012)02-0422-06

不同频率循环荷载作用下花岗岩 细观疲劳损伤量化试验研究

倪晓慧^{1,2,3}, 李晓娟^{1,2,3}, 朱珍德^{2,3}, 杜时贵^{1,4}

(1.绍兴文理学院 土木工程系, 浙江 绍兴 312000; 2.河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098;
3.河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 4.浙江工业职业技术学院, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 花岗岩宏观尺度疲劳破坏是由于细观尺度微裂纹的萌生、发育和贯通引起的, 所以对处于细观尺度的微裂纹特征进行量化分析, 对于理解花岗岩的动力特性有一定的意义。首先利用 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机, 采用振幅为 10 MPa, 频率分别为 0.01、0.02、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00 Hz 的正弦循环荷载作为动力扰动, 对海南昌江花岗岩试样进行单轴循环荷载试验。然后, 利用扫描电镜 (SEM) 拍摄得到花岗岩的大量细观结构图片, 运用数字图像处理技术获取微裂纹的细观几何信息, 从方位角、长度、宽度和面积对不同荷载频率相应的花岗岩细观尺度微裂纹特征进行量化分析。研究表明, 随着循环荷载频率的增加, 微裂纹方位角发育离散性增加, 而其统计均值则在某一区间内波动; 微裂纹长度的发育则较快, 而仅当荷载频率达到 1 Hz 时, 宽度才有一定的发展, 同时, 能量耗散的方式也发生一定的变化。

关 键 词: 不同频率; 循环荷载; 微裂纹; 量化

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

Quantitative test study of meso-damage of granite under cyclic load with different frequencies

NI Xiao-hui^{1,2,3}, LI Xiao-juan^{1,2,3}, ZHU Zhen-de^{2,3}, DU Shi-gui^{1,4}

(1. Department of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Goemechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

Abstract: The failure damage of granite under cyclic load is caused by the propagation and coalescent of cracks at mesoscale, so it is helpful to understand the mechanical behaviours of rock by quantitatively investigating on meso-damage of granite. The uniaxial cyclic fatigue tests on granite coming from Changjiang of Hainan province are done on the RMT-150B multi-function automatic rigid rock servo material testing machine. Stress amplitude of 10 MPa and sine wave cyclic loads with five different frequencies of 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 Hz are adopted as dynamic disturbance. A great deal of mesostructural images of Changjiang granite in Hainan province have been obtained by means of scanning electron microscopy(SEM). The mesostructural images of marble are processed by regional growing theory based on image processing technique. The meso-damage information of granite microcracks is obtained from SEM images. Quantitative analysis of meso-damage characteristics under cyclic fatigue load is made from angle, length, width and area. It is shown that with the frequency of cyclic load increasing, the dispersion of microcrack growth azimuth value increases and the average of microcrack growth azimuth value fluctuates in the range. The development of microcrack length is fast; but only when the frequency is 1 Hz, the microcrack width begins to develop and the method of energy dissipation changes.

Key words: different frequencies; cyclic load; microcrack; quantification

1 引 言

土木工程中, 各类岩石材料经常受到动荷载作

用。岩石材料在动荷载作用下, 其力学性能和变形性能发生显著改变^[1]; 同时, 岩石作为一种典型的包含多尺度损伤缺陷的复杂天然介质, 其宏观尺度

收稿日期: 2010-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41172292); 浙江省教育厅科研计划资助项目 (No. Y201018524); 绍兴文理学院校级科研项目。

第一作者简介: 倪晓慧, 男, 1979 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学方面的工作。E-mail: nixh2010@163.com

的受力破坏则是由细观尺度上微裂纹萌生、发育及汇聚成核的损伤破坏引起的^[2-3]。因此, 将岩石细观微裂纹的特征同宏观动力破坏的力学机制联系起来进行研究, 对进一步理解和研究岩石材料的宏观动力特性具有重要意义。

近年来, 国内外学者开展了各类岩石材料的宏观动力特性研究。Tutuncu 等^[4]得到沉积岩应力-应变滞后回线的特征与荷载的频率等因素有关的结论; Eberhardt 等^[5-6]对岩石单轴循环过程中的断裂损伤力学特性进行了分析研究; 葛修润等^[7]通过对循环荷载作用下岩石变形和强度特征的系统研究, 认为影响岩石的疲劳寿命主要因素有岩石内部结构和荷载特征等; 杨永杰等^[8]对岩石单轴压缩循环荷载条件下的强度和变形特征等问题进行了研究。学者蒋宇等^[1]、许江等^[9]等、徐速超等^[10]、李楠等^[11]从声发射特征角度对岩石循环加、卸载力学特性和损伤演化特征进行了相关研究。同时, 随着分析测试方法的发展, 国内外学者在岩石材料的细观尺度研究方面也取得了一定的研究成果。Wu 等^[12]利用光学显微镜和 SEM 研究了 Darley Dale 砂岩在压缩破坏中的各向异性损伤的微观力学演化过程, 得到了微裂纹密度与应变之间的关系。李炼等^[13]利用 SEM 研究了花岗岩的微裂纹损伤破坏过程。朱珍德等^[14]对四川锦屏地区大理岩微裂纹的几何参数进行了统计分析研究。

然而, 在试验中将细观微损伤定量分析和在不同频率下岩石疲劳荷载试验两者有机结合起来报道还较为鲜见, 本文设计基于海南昌江花岗岩在不同频率循环荷载作用下细观疲劳损伤量化试验方案, 研究了循环荷载的频率对花岗岩细观尺度微裂纹萌生及发育特征的影响。研究基于细观尺度, 从微裂纹的方位角、长度、宽度及面积 4 个方面, 对花岗岩经历单轴循环加卸载后的微裂纹发育特征进行阐述和分析, 定量地分析了昌江花岗岩循环荷载作用过程中的细观损伤特征, 为疲劳损伤岩石力学的理论分析奠定基础。

2 花岗岩细观疲劳损伤量化试验

为了定量获取不同频率轴向循环荷载作用对花岗岩试样产生的微损伤, 试验由两部分组成:

(1) 花岗岩不同频率单轴循环荷载试验; (2) 基于 SEM 的花岗岩微损伤量化试验。

2.1 花岗岩单轴不同频率循环荷载试验

岩样为海南昌江核电厂核岛地面下 30~45 m 深处的花岗岩, 宏观均匀一致, 矿物成分主要为长

石、石英和云母, 平均密度在 2.63 g/cm^3 左右。试验前对加工好的岩样外观进行仔细观察, 确定没有肉眼可见的节理及裂纹等薄弱面, 以确保试验用岩样之间宏观上无明显差异。按照《水利水电工程岩石试验规程》的制样要求, 加工成 $\phi 58 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的标准圆柱形试样, 端面平行度控制在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内。试验先后共制备 7 组试样 (3 个试样/组), 每组对应应于不同频率的循环荷载试验。

试验采用河海大学岩土工程研究所 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机。试验机的轴向最大荷载为 1 000 kN, 波形参数可为斜坡、正弦波、三角波、方波, 频率参数可为 0.001~1.000 Hz。本文单轴循环荷载试验在部分参数不变的情况下 (见表 1), 对不同组试样采用不同的加载频率进行试验: 1 组—0.01 Hz、2 组—0.02 Hz、3 组—0.05 Hz、4 组—0.10 Hz、5 组—0.20 Hz、6 组—0.50 Hz、7 组—1.00 Hz。

表 1 单轴循环荷载试验参数

Table 1 Testing parameters of uniaxial cyclic loading

预加载 / MPa	波形	振幅 / MPa	循环次数
30	正弦波	10	30

2.2 基于 SEM 的花岗岩微损伤量化试验

利用 SEM 设备对经历循环荷载作用后的花岗岩试样切片进行细观尺度 ($10 \sim 10^2 \mu\text{m}$) 观察, 提取微损伤的基本几何信息并进行相应量化处理和统计分析。

2.2.1 切片的制备

试验采用 Hitachi S-3000h 型扫描电镜提取循环荷载作用后的花岗岩试样的微损伤信息。首先, 将经历不同频率单轴循环荷载作用的花岗岩试样进行编号。然后, 根据所使用 SEM 设备样品台行程范围和试样自身特点, 设计制备试验切片。一方面由于经历循环荷载后的花岗岩试样质地疏松, 制备精确尺寸切片较为困难; 另一方面为减少由于制备切片产生的二次损伤对微损伤统计数据的影响, 确定试验用切片的具体制作步骤如下:

(1) 首先取一块经历过循环荷载试验的花岗岩试样, 沿径向切割出 2 个大致的半圆柱状试样 (Z 为施加循环荷载方向), 见图 1(a)及(b);

(2) 在半圆柱试样上, 尽量多的切出尺寸大小控制在 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 左右的长方体切片, 并用千分尺度量每个切片的具体尺寸, 见图 1(c);

(3) 将切片用丙酮清洗除去表面杂质, 而后镀

金, 并按不同编号将相应切片进行分类。

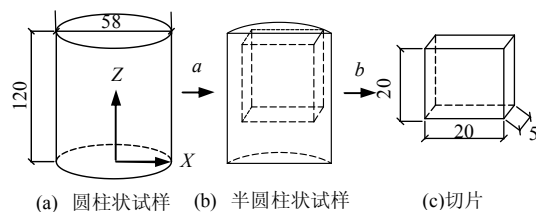


图 1 试样的制备流程图 (单位: mm)

Fig.1 Flowchart of making section (unit: mm)

2.2.2 基于 SEM 的花岗岩微损伤采集和量化

根据花岗岩细观损伤扫描电子显微镜图像的特点, 在课题组研究成果^[14]基础上, 通过编写基于 Matlab 图像处理工具箱的损伤特征识别程序, 实现对包含于 SEM 图像中的试样微损伤信息进行获取 (见图 2), 具体程序原理及操作方法参见文献[15]。

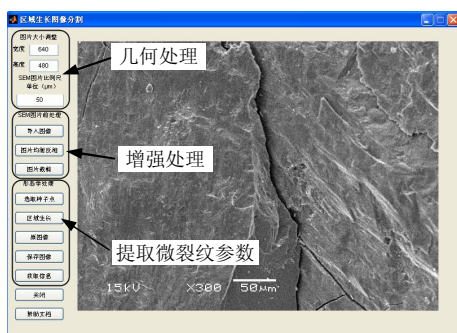


图 2 SEM 图像损伤信息数据化程序

Fig.2 Introduction of the program about datamation of SEM image

3 花岗岩细观疲劳损伤量化试验结果

在宏观尺度上, 通过对花岗岩试件施加不同频率单轴循环荷载试验可见, 随着循环荷载频率的增加, 经历试验后的花岗岩试样质地表现出更加疏松的特点, 同时较多试样的局部区域出现不同程度上矿物的破碎散落, 但并未出现试样完全被压溃的特征。

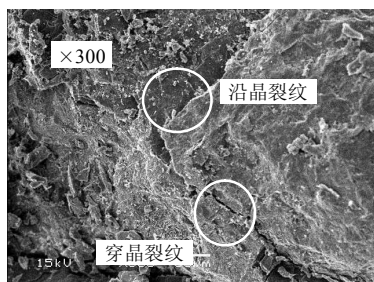


图 3 微裂纹表现形式示意图

Fig.3 The damage characteristics of microcracks

通过花岗岩细观疲劳损伤量化试验, 在细观尺度上, 试样内部疲劳微损伤的总体特征主要表现为随着循环荷载频率的增加, 微裂纹的数量和尺寸均有所增加, 其中沿晶裂纹和穿晶裂纹两类微裂纹形式分布广泛 (图 3)。根据在 SEM 图像中岩石细观尺度微损伤的特点^[14], 本文从微裂纹的方位角 (见图 4)、长度、宽度和面积 4 个角度对花岗岩试样的细观尺度疲劳损伤特征进行阐述和分析。

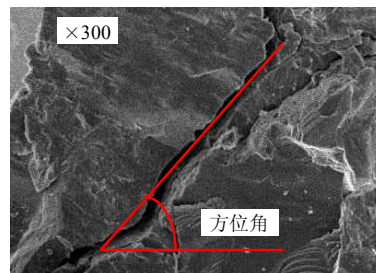


图 4 微裂纹方位角的示意图

Fig.4 The azimuth angle of microcrack

为得到不同频率循环荷载下试样微裂纹方位角、长度、宽度的统计分布特征, 基于 7 组 21 个经历不同频率循环荷载试验的花岗岩试样微裂纹的基本几何数据, 对不同频率荷载相应试样作方位角概率、长度概率、宽度概率直方图, 通过分析, 试样中 3 类微裂纹基本几何参数较好地符合广义极限分布^[16] (generalized extreme value, 简称 GEV) 的分布特点 (见图 5), 故文中涉及的统计平均值和统计方差未作说明时, 均相应于广义极限分布 (GEV)。

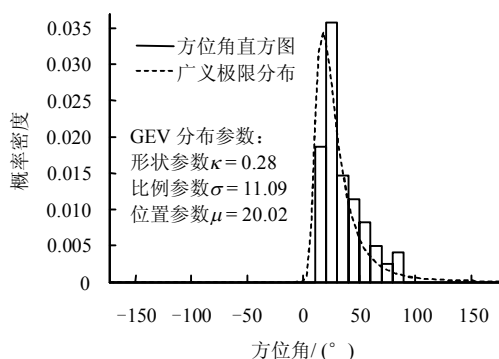


图 5 微裂纹方位角统计直方图 (1 Hz)

Fig.5 Histogram of microcrack azimuth angle (1 Hz)

3.1 方位角

结合图 6、7 可见, 微裂纹方位角统计平均值在不同频率时基本处于 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 区间和方位角统计方差随着频率的增长不断增加 (由 286 增至 651) 的这一特点, 说明经历各种不同频率循环荷载的花

岗岩试样中, 微裂纹萌生及发展的方向主要集中在偏于循环荷载作用的轴向方向, 同时, 频率的增长促使微裂纹萌生和发展的方向趋于离散化。这是由于不同类型微裂纹萌生和发展的能量阈值有所不同, 以及不同类型微裂纹发展方向各有特点所造成的。

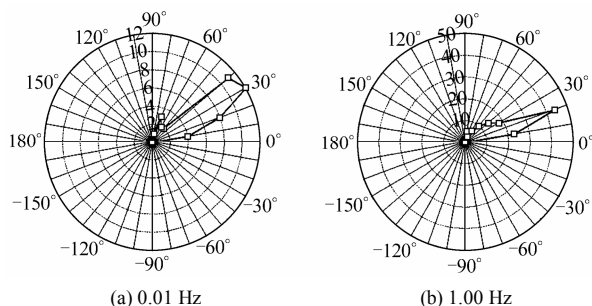


图6 微裂纹方位角的风玫瑰图

Fig.6 Wind rose of microcrack azimuth angle

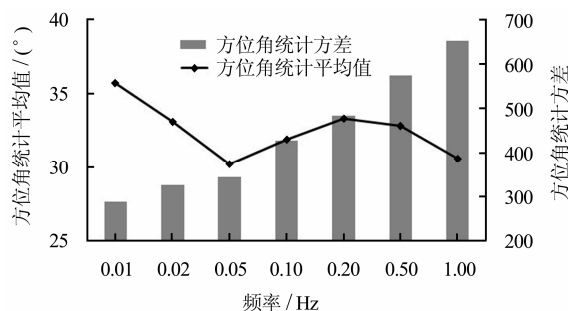


图7 微裂纹方位角统计平均值及方差

Fig.7 Statistical average and variance of microcrack azimuth angle

3.2 长度和宽度

由图8可知, 微裂纹长度统计平均值表现为随着频率增加逐渐由 $72\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $122\text{ }\mu\text{m}$, 平均值增幅由5%增至18%, 而长度统计方差则出现显著下降, 由1585降至721, 说明在频率较低的循环荷载作用时, 仅有少部分微裂纹会在长度尺寸上有较大的发展; 而随着荷载频率的增加, 花岗岩试样中微裂纹长度尺寸发育较快, 且此类微裂纹在试样全部微裂纹数量中所占比例也在迅速增加。

与长度的变化特点相比 (见图9和表3), 在 $0.01\sim 0.5\text{ Hz}$ 频率区间, 微裂纹的宽度统计平均值仅在 $4\sim 6\text{ }\mu\text{m}$ 区间内波动, 而统计方差值也变化不大 (大致处于 $220\sim 260$ 区间内), 这说明在 $0.01\sim 0.50\text{ Hz}$ 频率区间中, 微裂纹宽度尺寸发育较为缓慢; 当荷载频率增至 1 Hz 时, 宽度统计平均值突然由 $6\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $12\text{ }\mu\text{m}$, 增幅达100%, 统计方差由216增至342, 这说明在荷载频率为 1 Hz 时, 有部分微

裂纹宽度发育速度较快, 此频率循环荷载对花岗岩试样产生的能量, 则是以微裂纹长度和宽度共同发育的形式进行耗散的。

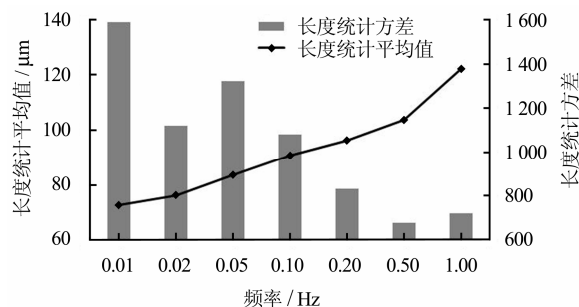


图8 微裂纹长度统计平均值及方差

Fig.8 Statistical average and variance of microcrack length

表2 微裂纹长度增幅

Table 2 Increase amplitudes of microcrack lengths

频率/Hz	增幅/%
0.01	
0.02	5
0.05	9
0.10	9
0.20	6
0.50	8
1.00	18

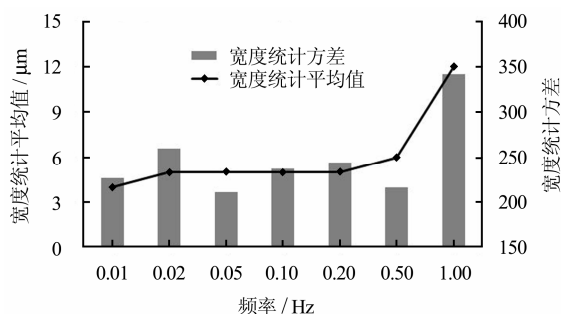


图9 微裂纹宽度统计平均值及方差

Fig.9 Statistical average and variance of microcrack width

表3 微裂纹宽度增幅

Table 2 Increase amplitudes of microcrack widths

频率/Hz	增幅/%
0.01	
0.02	25
0.05	0
0.10	0
0.20	0
0.50	20
1.00	100

3.3 面积和数量

根据获取的试样微裂纹面积的基本数据, 经比较分析可知, 不同试样单个微裂纹的面积分布基本没有统一的一个分布函数与之相匹配, 所以本文从微裂纹总面积角度对其变化特征进行阐述和分析。

由图 10, 随着频率的增加, 微裂纹总面积以较快速度增加, 尤其在频率为 0.02 Hz 和 1 Hz 时, 微裂纹总面积增幅分别约为 47% 和 29%, 说明从试样总体角度看, 与其前一频率相比, 此频率荷载作用下微裂纹发育更迅速。

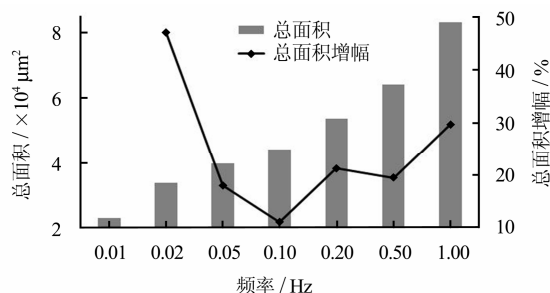


图 10 微裂纹总面积及增幅
Fig.10 Total area and increase amplitude of microcrack

表 4 微裂纹数量及增幅

Table 4 The number and increase amplitude of microcrack

频率 / Hz	数量(条)	增幅 / %
0.01	43	
0.02	57	33
0.05	69	21
0.10	76	10
0.20	87	15
0.50	101	16
1.00	123	22

在宏观尺度上由循环荷载施加于试样的能量, 其在细观尺度上耗散方式则主要表现为微裂纹萌生发育, 即微裂纹总面积的增加。综合微裂纹长度、宽度、总面积以及数量的试验统计数据 (图 8~10, 表 2~4) 可见, 荷载频率在 0.01~0.50 Hz 区间内, 能量的耗散主要以微裂纹数量及长度的增加为主要方式; 当荷载频率达 1 Hz 时, 能量的耗散则主要以微裂纹数量、长度及宽度的增加为主要方式。同时, 虽然在荷载作用过程中, 微裂纹间有一定程度的汇聚, 但大部分此类汇聚是区域性的、局部的 (见图 11), 因此, 许多试样在经历不同频率循环荷载作用后, 在宏观尺度并不出现整体压溃现象, 而是出现试样表面局部矿物破碎散落的现象。

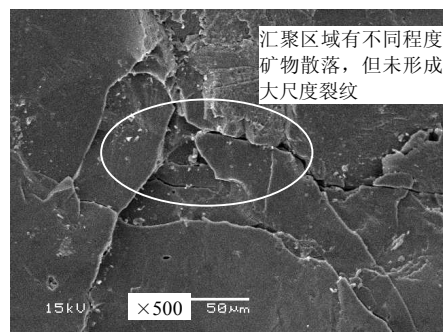


图 11 微裂纹汇聚特征示意图

Fig.11 SEM photographs showing the characteristics of microcracks convergence

4 结 论

(1) 基于海南昌江花岗岩在不同频率循环荷载作用下细观疲劳损伤量化试验方案为研究花岗岩疲劳损伤破坏机制提供了丰富的细观损伤信息;

(2) 对经历不同频率单轴循环荷载的花岗岩试样, 其细观尺度微裂纹的方位角主要集中在荷载作用的轴向方向; 随着荷载频率的增加, 微裂纹方位角离散化的程度增大;

(3) 在循环荷载频率处于 0.01~0.50 Hz 频率区间时, 微裂纹长度尺寸上增长较快, 宽度尺寸上则发育缓慢; 当荷载频率达到 1 Hz 时, 微裂纹在长度和宽度尺寸两方面均增长较快;

(4) 循环荷载频率在 0.01~0.50 Hz 区间内, 细观尺度的能量耗散方式, 即微裂纹面积增长方式, 主要有数量和长度的增加两个方式; 当荷载频率达 1 Hz 时, 能量耗散则主要以微裂纹数量、长度及宽度的增加 3 个方式进行。

参 考 文 献

- [1] 蒋宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1810—1814.
JIANG Yu, GE Xiu-run, REN Jian-xi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1810—1814.
- [2] MICHAEL E K, NEMAT-NASSER S, SUO Z G et al. New directions in mechanics[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37: 231—259.
- [3] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩土损伤力学宏观细观试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

- [4] TUTUNCU A N, POLIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, Part II: Hysteresis effects and influence of type of fluid on elastic moduli[J]. **Geophysics**, 1998, 63: 195—203.
- [5] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(3): 361—380.
- [6] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(2): 222—233.
- [7] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1581—1585.
- GE Xiu-run, JIANG Yu, LU Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1581—1585.
- [8] 杨永杰, 宋扬, 楚俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 201—205.
- YANG Yong-jie, SONG Yang, CHU Jun. Experimental study of characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 201—205.
- [9] 许江, 李树春, 唐晓军, 等. 基于声发射的岩石疲劳损伤演化[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 19—24.
- XU Jiang, LI Shu-chun, TANG Xiao-jun, et al. Rock fatigue damage evolution based on acoustic emission[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2009, 31(1): 19—24.
- [10] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 砂卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2929—2934.
- XU Su-chao, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 2929—2934.
- [11] 李楠, 王恩元, 赵恩来, 等. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1099—1103.
- LI Nan, WANG En-yuan, ZHAO En-lai, et al. Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multi-stage loading[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(7): 1099—1103.
- [12] YANG W X, WONG B P. Micromechanics of compressive failure and spatial evolution of anisotropic damage in Darley Dale sandstone[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(1): 143—160.
- [13] 李炼, 徐钺, 李启光, 等. 花岗岩板渐进破坏过程的微观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 940—947.
- LI Lian, TSUI Y, LEE P K K, et al. Progressive cracking of granite plate under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 940—947.
- [14] 朱珍德, 渠文平, 蒋志坚. 岩石细观结构量化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1313—1324.
- ZHU Zhen-de, QU Wen-ping, JIANG Zhi-jian. Quantitative test study on mesostructure of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1313—1324.
- [15] 倪骁慧, 朱珍德, 赵杰, 等. 岩石破裂全程数字化细观损伤力学试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3283—3290.
- NI Xiao-hui, ZHU Zhen-de, ZHAO Jie, et al. Meso-damage mechanical digitalization test of complete process of rock failure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3283—3290.
- [16] 现代应用数学手册编委会. 现代应用数学手册-概率统计与随机过程卷[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.