

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.16

花岗岩变形破坏过程中不同细观组分的分形特征

周祥运 徐金明 刘绍峰

(上海大学土木工程系, 上海 200444)

摘要: 岩石变形破坏过程取决于不同细观组分的变化, 可以用分形特征来反映。根据单轴压缩试验时拍摄的试验视频, 把花岗岩变形破坏过程分成变形阶段、破坏时裂隙较少、破坏时裂隙较多等三个阶段, 采用阈值分割法得到不同组分的实际分布, 采用盒维数法计算简单分形维数, 采用广义和多重分形谱分别表征广义和多重分形维数, 研究了不同细观组分分形维数的变化情况。结果表明, 在变形阶段, 黑云母和长石简单分形维数基本稳定, 但石英的变化较大, 长石和石英不均匀指数基本稳定而黑云母的变化较大; 在破坏阶段, 裂隙较少时, 黑云母和石英简单分形维数突然增大, 但长石的却突然减小, 黑云母不均匀指数和形状指数突然减小, 但长石和石英的却突然增大; 在破坏阶段, 裂隙较多时, 三种组分的形状指数变化都较大。研究成果对分析岩石变形破坏机理具有一定的参考价值。

关键词: 花岗岩; 试验视频; 细观组分; 分形维数

中图分类号: P642.3

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)03-0113-07

Fractal features of meso-compositions in granite during deformation and failure

ZHOU Xiangyun, XU Jinming, LIU Shaofeng

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The deformation and failure process of rock depends on the changes in the various meso-compositions. These variations can be reflected by the fractal features. In current research, according to the test video images photographed during the laboratory uni-axial compression tests, the deformation failure process was divided into three stages including the deformation stage, the failure stage with less cracks, and stage of failure with great cracks. The distributions of various meso-compositions were obtained using the grayscale threshold segmentation. The simple fractal dimension was computed using the box-counting method, while the generalized and multi fractal dimensions were represented respectively by the generalized and multi dimension spectra. The changes in the fractal dimensions of various compositions were thereafter investigated. It shows that during deformation stage, the simple fractal dimensions of biotite and feldspar are stable while those of quartz changes greatly, the uniformity of feldspar and quartz are stable while those of biotite changes greatly; during failure stages with less cracks, the simple fractal dimensions of biotite and quartz increase quickly while those of feldspar decrease quickly, uniformity and shape index of biotite decrease quickly while those of feldspar and quartz increase quickly; during failure stages with great cracks, the shape indexes of biotite, feldspar, and quartz have relatively great values. The findings in the current study may be used as a reference for analyzing the deformation failure mechanism of rock materials.

收稿日期: 2017-08-20; 修订日期: 2018-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472254)

第一作者: 周祥运(1992-), 男, 岩土工程硕士研究生, 主要从事岩土工程的科研工作。E-mail: zhouxianyun_03@163.com

通讯作者: 徐金明(1963-), 男, 岩土工程博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程和工程地质计算技术的教学和科研工作。

E-mail: xjming@163.com

Keywords: granite; test video; meso-compositions; fractal dimensions

0 引言

花岗岩通常由长石、石英、黑云母等不同细观组分组成。岩石的变形破坏过程取决于这些细观组分的变化情况。这种变化可以使用不同组分的分形维数来表征。

使用分形方法研究岩土材料的变形破坏过程已经取得了许多进展。通常使用基于盒维数法的简单分形维数进行研究。比如,李长江等^[1-2]使用滑坡空间分布的简单分形维数计算方法,进行滑坡易发程度的区划和评价,提出了不同尺度范围内降雨量—滑坡频度关系的分形;Pia 等^[3]提出了一种混合单元的分形模型,预测了多孔岩石的渗透性;李守臣等^[4]建立了单轴压缩条件下岩石分形维数与岩石顶部位移的非线性演化模型;Li 等^[5]研究了岩石节理粗糙度系数与岩石结构表面分形维数之间的定量关系。将简单分形维数与数字图像处理技术相结合,彭瑞东等^[6]对石灰岩拉伸过程中的扫描电子显微(SEM)图像计算分形维数,得到岩石表面分形维数随载荷增大而逐渐增大的结论;宫伟力等^[7]探讨了煤岩细观裂隙计算机断层扫描(CT)图像分形维数与煤岩孔隙度的关系;陈世江等^[8]用岩石节理图像分形维数和起伏度来描述节理的粗糙度系数;Liu 等^[9]研究了煤岩及其在甲烷吸附状态下的分形特性。

此外,采用以广义分形为基础的多重分形理论来研究岩土材料的变形破坏过程,也取得了一些进展。谢和平等^[10]用改进投影覆盖法来测定岩石断裂表面的分形维数,分析了断裂表面的多重分形性质;刘树新等^[11]使用多重分形方法研究岩石强度的 Weibull 参数,改进了岩石的损伤统计本构模型;许福乐等^[12]用多重分形对煤岩声发射强度时间序列进行了分析,认为这一序列的波动特性是一个多重分形过程;蔡江东等^[13]运用广义多重分形理论对受压破坏的声发射信号进行了分析,发现岩石加载初期与濒临破坏时声发射信号特征参数存在显著差异;邹飞等^[14]用广义多重分形理论对类岩石材料表面损伤的演化进行了描述,分析了图像灰度相关性系数分布演化与试件表面变形局部化在时域和空域的对对应关系。

现有研究成果中,分形维数多使用基于盒维数法的简单分形维数,而广义分形维数和多重分形维数考虑不多,计算分形维数时难以考虑多种组分分布的细节,分形维数随加载水平增加而变化的具体过程也考虑得不多。本文拟以花岗岩为例,根据岩石室内试验

过程中拍摄得到的试验视频,使用数字图像处理技术提取任一加载时刻岩石中不同细观组分的实际位置,研究不同细观组分分形维数随时间的变化过程,为进一步研究岩石的变形破坏机理打好基础。

1 室内抗压强度试验

1.1 试验方法

试样取自甘肃北山的花岗岩。经过室内切割制成 50 mm × 50 mm × 100 mm 的试块,按照国际岩石力学试验规程对试样两端面及侧面进行仔细打磨,试样断面平整度及侧面平整度分别为 0.02 mm、0.3 mm。

采用 RMT-150C 型岩石力学伺服试验系统进行室内抗压强度试验。试验前,在试样周围布置三台型号为佳能 600D 的摄像机(最大像素和有效像素分别为 1 870 万和 1 800 万、最高分辨率为 5 184 × 3 456),一台摆在试样的正面位置,其余两台摆放在试样的侧面位置。试验过程采用位移控制,加载速率控制为 0.006 mm/s,连续加载直至试样完全破坏。使用摄像机拍摄整个试验过程,得到试验视频图像。视频图像的记录格式为 MOV。

1.2 试验结果

图 1 中 σ_{max} 为峰值应力,由图 1 和图 2 可以看出,

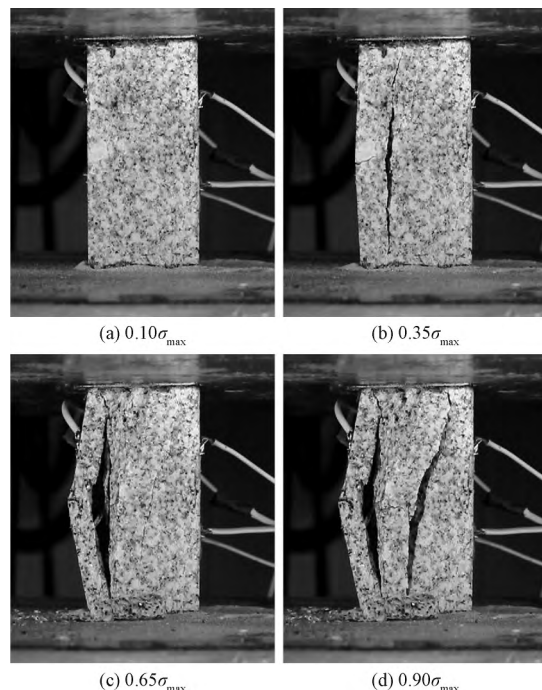


图 1 不同加载水平时的花岗岩试件外观图

Fig. 1 Outlines of granite specimen at different load stages

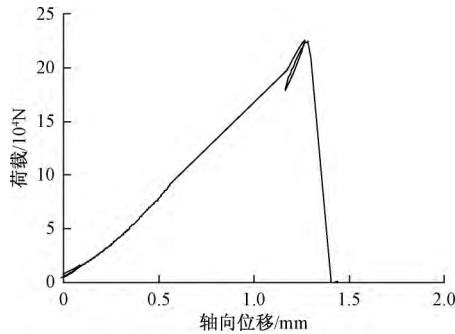


图 2 花岗岩试件的荷载-轴向位移曲线

Fig. 2 Load-axial displacement curve of granite sample

在加载初期,岩样没有发生明显变形;应力水平为 $0.35\sigma_{max}$ 时,岩样左侧中部出现第一条主裂隙,裂隙从试件中部向两端扩展,发生纵向破坏;应力水平为 $0.65\sigma_{max}$ 时,裂隙已经扩展到两端,把试件分割成左半部的小试块和右半部的岩样主体部分,岩样上部被迅速压密、并出现脱落;应力水平为 $0.90\sigma_{max}$ 时,岩样右半部出现了第二条主裂隙,裂隙从中部出发、扩展到贯穿试件右半部。

2 分形维数计算方法

2.1 简单分形维数

采用计盒维数法计算花岗岩视频图像的简单分形维数。计算公式为:

$$D = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N}{\log \varepsilon} \quad (1)$$

式中: ε ——正方形盒子边长;

N ——盒子个数。

在双对数坐标平面内,以直线拟合数据点 ($\log \varepsilon$, $\log N$) 直线斜率负值 D 就是简单分形维数。具体计算时,把花岗岩图像进行二值化处理,使每一个像素点用黑色或白色表示(即黑色代表 0、白色代表 1),用边长为 ε 的正方形盒子覆盖图像区域,统计包含有 1 的盒子个数 N ,采用不同大小的 ε (这里 $\varepsilon = 2, 3, 4, \dots, 100$) 覆盖图像区域,得到盒子数 $N_2, N_3, N_4, \dots, N_{100}$,根据式(1)得到分形维数。

2.2 广义分形维数

广义分形维数的计算公式为:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1} = \frac{\ln X_q(\varepsilon)}{(q-1) \ln \varepsilon}, \varepsilon \rightarrow 0 \quad (2)$$

式中: q ——是权重因子,研究时取 $|q|_{max} = 4$ (孙霞^[15]等);

$\tau(q)$ ——质量指数;

$X_q(\varepsilon)$ ——为配分函数。

由式(3)计算

$$X_q(\varepsilon) = \sum P_{ij}^q(\varepsilon) = \varepsilon^{\tau(q)} \quad (3)$$

式中: $P_{ij}(\varepsilon)$ ——图像区域的概率集。

得到 $P_{ij}(\varepsilon)$ 的方法为:用不同大小 ε 的正方形盒子去覆盖图像,计算每个盒子 (i, j) 中对象区域的像素数 n_{ij} 除以全部对象区域的总像素数 $\sum n_{ij}$,就得到每个盒子中对象区域占据的概率 $P_{ij}(\varepsilon)$ 。本次研究,取广义分形维数谱的最大值 D_{max} 和最小值 D_{min} 作为不同细观组分广义分形维数谱的度量。 D_{min} 主要反映组分区域中小面积区域的变化情况, D_{max} 主要反映组分区域中大面积区域的变化情况。

2.3 多重分形维数

研究多重分形维数时,首先获得多重分形谱 $f(\alpha)$ 。 $f(\alpha)$ 的计算公式为:

$$\tau(q) = \alpha q - f(\alpha) \quad \alpha = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad (4)$$

式中: α ——奇异性指数;

$f(\alpha)$ ——为多重分形谱。

对 $\tau(q)$ 和 q 作勒让德变换得到多重分形谱 $f(\alpha)$ 。

研究时用多重分形谱 $f(\alpha)$ 的不均匀指数 A 和形状指数 B 来表征细观组分的多重分形特征。 A 定义为 $f(\alpha)$ 的谱宽,即 $A = \alpha_{max} - \alpha_{min}$,反映了各组分区域概率测度分布的不均匀性程度。 B 定义为 $B = f(\alpha_{min}) - f(\alpha_{max})$,是各组分最大与最小区域概率的差值,是组分区域复杂程度、不规则程度和不均匀程度的度量,反映了多重分形谱的形状特征。

3 不同组分分形维数的变化特征

3.1 不同细观组分分布的确定

试验视频延时 6 分 58 秒。研究时,采用 MATLAB 平台、通过编制程序代码来实现不同变形破坏阶段分形维数的计算。为了便于编程处理,将试验视频由 MOV 格式转化为 AVI 格式。编程处理时,把图像剪裁得到 120×360 像素的图像区域,将未发生破坏到破坏、共 6.00 s (原视频 247 ~ 253 s) 的所有帧图像组成新视频。

将试件表面产生裂隙的时刻作为变形阶段和破坏阶段的分界时刻,根据裂隙出现的多少把岩石变形破坏过程分成变形阶段(没有裂隙)、破坏时裂隙较少(只存在第一条裂隙)、破坏时裂隙较多(多条裂隙存续时段)等三个阶段。三个阶段在原视频中对应的时刻(应力水平)分别为 247 ~ 250 s ($0.32\sigma_{max} \sim 0.36\sigma_{max}$)、250 ~ 251 s ($0.36\sigma_{max} \sim 0.38\sigma_{max}$)、251 ~ 253 s ($0.38\sigma_{max} \sim 0.40\sigma_{max}$)。为减少计算量,每隔 5

帧抽取一幅图像进行研究。

新视频中花岗岩试样应力、累计位移与时间的变化图见图 3。

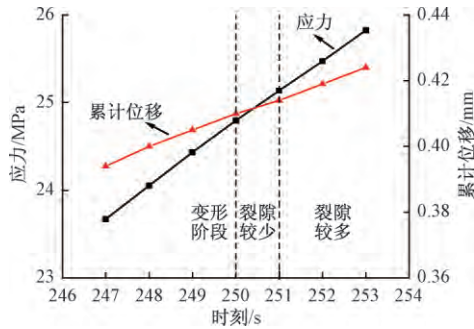


图 3 花岗岩试件应力、累计位移与时间关系图

Fig. 3 Variations of stress and accumulative displacement with time of granite specimen

采用点选统计法确定花岗岩中不同细观组分之间的灰度分界阈值^[16]。裂隙-黑云母、黑云母-长石、长石-石英的灰度分界阈值分别为 59、135、203。根据这些分界阈值,得到岩石中不同细观组分的具体类型与实际分布。

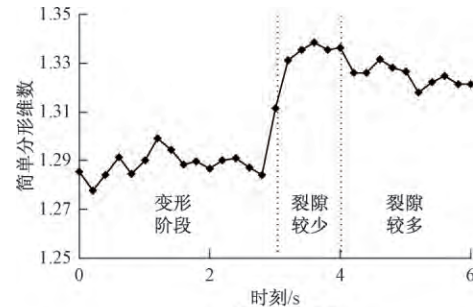
3.2 不同组分的分形特征

3.2.1 黑云母的分形特征

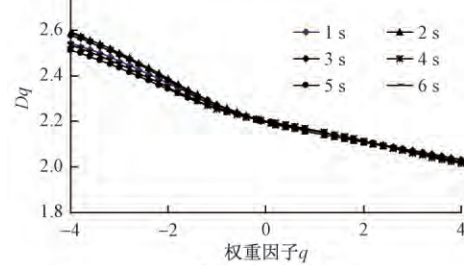
由图 4 可知,在变形阶段,黑云母的简单分形维数变化不大,广义分形维数变化较大, D_{min} 由 2.541 增大到 2.597, D_{max} 由 2.026 增大到 2.034, A 和 B 也变化较大, A 由 0.360 增大到 0.600, B 由 0.963 增大到 1.059;在破坏阶段,裂隙较少时,黑云母简单分形维数突然增大,由 1.284 增到 1.331,广义分形维数发生突降, D_{min} 由 2.597 降到 2.533, D_{max} 由 2.034 降到 2.008, A 和 B 突然降低, A 由 0.600 突降到 0.393, B 由 1.059 突降到 1.000;在破坏阶段,裂隙较多时,黑云母的简单分形维数变化较大,由 1.336 减小到 1.321, D_{min} 由 2.512 增大到 2.554, D_{max} 由 2.017 增大到 2.016, A 和 B 变化都较大, A 由 0.420 增大到 0.472, B 由 0.961 增大到 1.026。

3.2.2 长石的分形特征

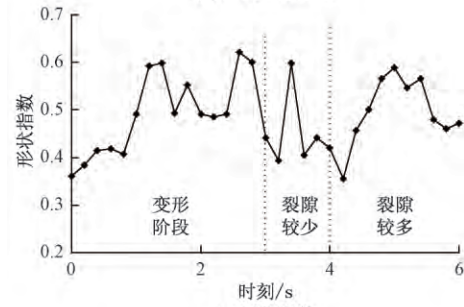
由图 5 可知,在变形阶段,长石的简单分形维数变化不大,广义分形维数、 A 和 B 变化也较平稳;在破坏阶段,裂隙较少时,简单分形维数突然减小,由 1.954 突降到 1.938, D_{min} 突然增大,由 2.343 增大到 2.441, D_{max} 突然降低,由 2.239 减小到 2.229, A 和 B 都突然增加, A 由 0.454 增大到 0.823, B 由 0.258 增大到 0.482;在破坏阶段,裂隙较多时,长石简单分形维数变



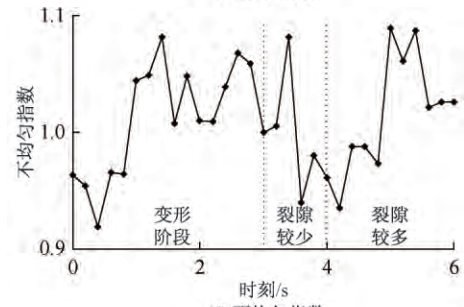
(a) 简单分形维数



(b) 广义分形维数



(c) 形状指数



(d) 不均匀指数

图 4 黑云母分形维数随时间的变化

Fig. 4 Variations of fractal dimensions with time of biotite

化不大, D_{max} 变化不大, D_{min} 变化较大,由 2.398 增大到 2.431, A 和 B 的变化也较大, A 由 0.688 增大到 0.805, B 由 0.409 增大到 0.479。

3.2.3 石英的分形特征

由图 6 可知,在变形阶段,石英简单分形维数变化较大,由 1.786 降到 1.777,广义分形维数变化较大, D_{min} 由 2.637 减到 2.626, D_{max} 由 2.139 降到 2.130, A 和 B 变化不大;在破坏阶段,裂隙较少时,简单分形维数突然增大,由 1.777 突增到 1.790,广义分形维数突

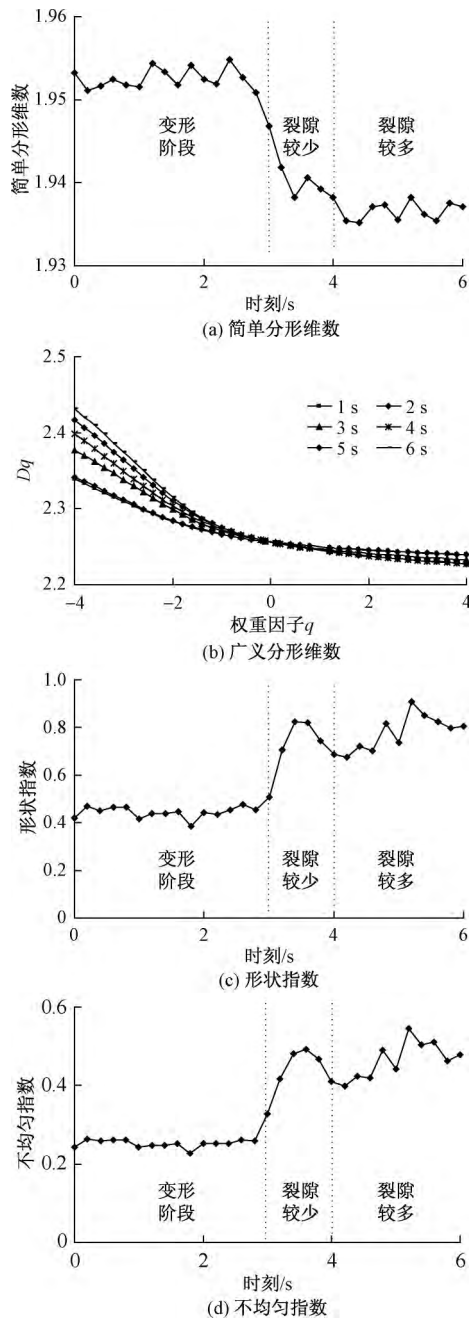


图5 长石分形维数随时间的变化

Fig. 5 Variations of fractal dimensions with time of feldspar

然增大, D_{min} 由 2.626 增到 2.666, D_{max} 由 2.130 增到 2.136, A 和 B 都突然增加, A 由 0.714 增到 0.839, B 由 0.900 增到 0.979; 在破坏阶段, 裂隙较多时, 简单分形维数稍有变化, 由 1.791 增加到 1.795, 广义分形维数变化较大, D_{min} 由 2.700 减小到 2.666, D_{max} 由 2.136 增大到 2.141, A 由 0.908 减小到 0.863, B 由 1.026 减小到 0.965。

3.3 不同组分分形特征的比较

不同组分、不同分形维数的不同变化模式, 反映了

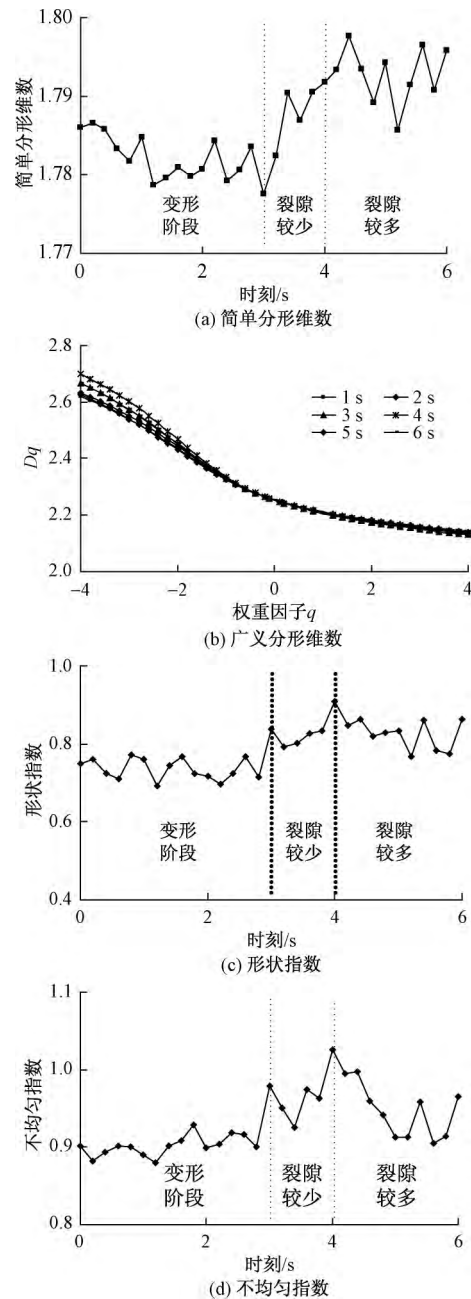


图6 石英分形维数随时间的变化

Fig. 6 Variations of fractal dimensions with time of quartz

不同组分区域的面积大小、复杂程度、不规则程度、不均匀程度的不同变化情况, 可以将前述不同分形维数绘于同一张图上来对比分析岩石变形破坏过程中不同细观组分分形维数的变化特点。

图7为不同细观组分简单分形维数变化的比较。由图7可知, 在变形阶段和破坏阶段裂隙较多时, 三种组分的简单分形维数都变化不大; 破坏阶段裂隙较少时, 石英简单分形维数变化不大, 黑云母简单分形维数增大, 长石简单分形维数减小, 简单分形维数变化大小

顺序是: 黑云母 > 长石 > 石英。

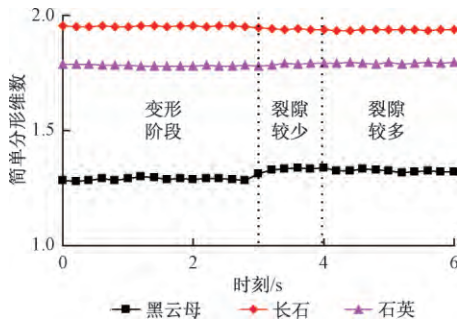


图 7 不同细观组分简单分形维数变化的对比

Fig. 7 Variations of simple fractal dimensions with time in various meso-compositions

图 8 为不同细观组分广义分形维数最大值 D_{max} 和最小值 D_{min} 的比较。由图 8 可知,在变形阶段,三种组分 D_{max} 变化都不大,长石 D_{min} 的变化不大,黑云母和石英 D_{min} 的变化较大, D_{min} 变化大小顺序为黑云母 > 石英 > 长石,变形主要发生在黑云母和石英小面积区域;在破坏阶段、裂隙较少时,三种组分广义分形维数变化都较大,石英 D_{max} 变化相对较小,黑云母和长石 D_{max} 减小,长石和石英 D_{min} 突然增大而黑云母 D_{min} 突然减小;在破坏阶段、裂隙较多时,三种组分 D_{max} 变化不大、 D_{min} 变化较大,变形主要发生在面积较小的区域。

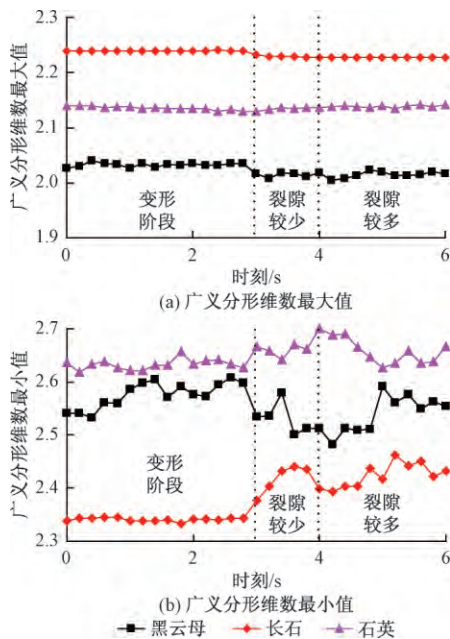


图 8 不同细观组分广义分形维数变化的对比

Fig. 8 Variations of generalized fractal dimensions with time in various meso-compositions

图 9 为不同细观组分形状指数变化的比较,图 10

为不同细观组分不均匀指数变化的比较。

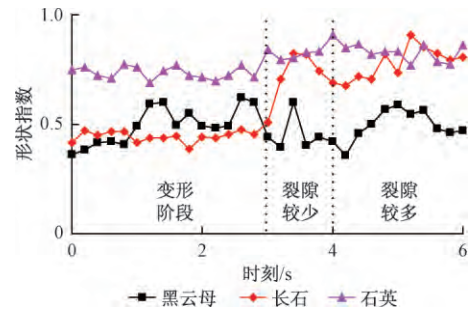


图 9 不同细观组分形状指数变化的对比

Fig. 9 Variations of shape index with time in various meso-compositions

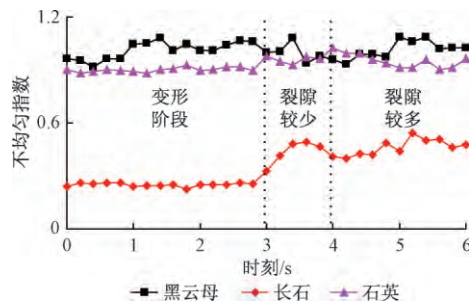


图 10 不同细观组分不均匀指数变化的对比

Fig. 10 Variations of non-uniformity index with time in various meso-compositions

由图 9 和图 10 可知,对多重分形谱参数(形状指数和不均匀指数)来说,在变形阶段,三种组分的形状指数变化都较大,长石和石英不均匀指数变化不大而黑云母不均匀指数变化较大,可能是黑云母面积很小且分布较分散、受外力影响最大;在破坏阶段、裂隙较少时,黑云母不均匀指数和形状指数突然减小,而长石和石英的不均匀指数和形状指数却突然增大;在破坏阶段、裂隙较多时,三种组分的形状指数变化都较大,而三种组分的不均匀指数变化相对较小。

4 结论

根据花岗岩的单轴压缩试验结果和试验过程中拍摄的试验视频,使用数字图像处理技术研究了岩石变形破坏过程中不同细观组分简单分形维数、广义分形维数、多重分形维数的变化特征,得到如下结论:

- (1) 在变形阶段,黑云母和长石的简单分形维数变化不大,石英简单分形维数变化较大,三种组分广义分形维数最大值变化不大,广义分形维数最小值变化

大小顺序为黑云母 > 石英 > 长石, 三种组分的形状指数变化较大, 长石和石英不均匀指数变化不大而黑云母不均匀指数变化较大;

(2) 在破坏阶段、裂隙较少时, 黑云母和石英的简单分形维数突然增大、而长石简单分形维数突然减小, 石英广义分形维数最大值变化不大、黑云母和长石广义分形维数最大值减小, 长石和石英广义分形维数最小值突然增大、而黑云母广义分形维数最小值突然减小, 黑云母不均匀指数和形状指数均突然减小、而长石和石英的不均匀指数和形状指数均突然增大;

(3) 在破坏阶段、裂隙较多时, 不同组分的简单分形维数变化不大, 广义分形维数最大值变化不大、而广义分形维数最小值变化较大, 三种组分形状指数变化较大、而不均匀指数变化较小。

参考文献:

- [1] 李长江, 麻士华, 孙乐玲, 等. 基于分形的滑坡易发程度区划方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2): 17-24.
LI Changjiang, MA Tuhua, SUN Leling, et al. Fractal-based landslide susceptibility mapping [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(2): 17-24.
- [2] 李长江, 麻士华, 李炜, 等. 滑坡频度-降雨量的分形关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 87-93.
LI Changjiang, MA Tuhua, LI Wei, et al. Fractal relation of landslide frequency and rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 87-93.
- [3] Giorgio Pia, Ulrico Sanna. An intermingled fractal units model and method to predict permeability in porous rock [J]. International Journal of Engineering Science, 2014, 75: 31-39.
- [4] 李守臣, 李德, 武力, 等. 非均质岩石单轴压缩试验破坏过程细观模拟及分形特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 849-854.
LI Shouchen, LI De, WU Li, et al. Meso-simulation and fractal characteristics for uniaxial compression test of inhomogeneous rock [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 849-854.
- [5] Li Y R, Huang R Q. Relationship between joint roughness coefficient and fractal dimension of rock fracture surfaces [J]. International Journal of Rock

- Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 15-22.
- [6] 彭瑞东, 鞠杨, 谢和平. 灰岩拉伸过程中细观结构演化的分形特征[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2579-2588.
PENG Ruidong, JU Yang, XIE Heping. Fractal characterization of meso-structural evolution during tension of limestone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2579-2588.
- [7] 宫伟力, 安千里, 赵海燕, 等. 基于图像描述的煤岩裂隙 CT 图像多尺度特征[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 371-381.
GONG Weili, AN Qianli, ZHAO Haiyan, et al. Multiple scale characterization of CT image for coal rock fractures based on image description [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 371-381.
- [8] 陈世江, 朱万成, 张敏思, 等. 基于数字图像处理技术的岩石节理分形描述[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2087-2092.
CHEN Shijiang, ZHU Wancheng, ZHANG Minsi, et al. Fractal description of rock joints based on digital image processing technique [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2087-2092.
- [9] Liu X F, Nie B S. Fractal characteristics of coal samples utilizing image analysis and gas adsorption [J]. Fuel, 2016, 182: 314-322.
- [10] 谢和平, 王金安. 岩石节理(断裂)表面的多重分形性质[J]. 力学学报, 1998, 30(3): 314-320.
XIE Heping, WANG Jin'an. Multi-fractal behaviors of fracture surfaces in rocks [J]. Acta Mechanica Sinica, 1998, 30(3): 314-320.
- [11] 刘树新, 刘长武, 韩小刚, 等. 基于损伤多重分形特征的岩石强度 Weibull 参数研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1786-1791.
LIU Shuxin, LIU Changwu, HAN Xiaogang, et al. Weibull distribution parameters of rock strength based on multi-fractal characteristics of rock damage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1786-1791.
- [12] 许福乐, 王恩元, 宋大钊, 等. 煤岩破坏声发射强度长程相关性和多重分形分布研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2111-2122.
XU Fule, WANG Enyuan, SONG Dazhao, et al. Long-range correlation and multifractal distribution of acoustic emission of coal-rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2111-2122.

(下转第 132 页)

- 190 - 194 + 203.
HE Fangchan , LI Zongkun. Experimental study of wetting expansibility and mechanical properties of weak expansive soil in Nanyang section of South-to-North Water Diversion Project [J]. Rock and Soil Mechanics , 2013(S2) : 190 - 194 + 203.
- [9] 黄斌,程展林,徐晗. 膨胀土膨胀模型及边坡工程应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3550 - 3555.
HUANG Bin , CHENG Zhanlin , XU Han. Experimental study of expansion model of expansive soil considering state water content and density [J]. Rock and Soil Mechanics , 2014, 35(12): 3550 - 3555.
- [10] 高游,孙德安,吕海波. 弱膨胀土浸水变形特性及其预测[J]. 岩土力学, 2015(3): 755 - 761.
GAO You , SUN De'an , LYU Haibo. Deformation characteristics of weakly expansive soil and its prediction [J]. Rock and Soil Mechanics , 2015(3): 755 - 761.
- [11] 韦秉旭,周玉峰,刘义高,等. 基于工程应用的膨胀土本构模型[J]. 中国公路学报, 2007(2): 18 - 22 + 50.
WEI Binxu , ZHOU Yufeng , LIU Yigao , et al. Constitutive model for expansive soil based on engineering application [J]. China Journal of Highway and Transport , 2007(2): 18 - 22 + 50.
- [12] 李振,邢义川. 侧限条件下膨胀土增湿变形计算模式研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 215 - 222.
LI Zhen , XING Yichuan. Study on the calculation methods of the moistening deformation for the expansive soil under lateral restraint condition [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed) , 2011, 39(5): 215 - 222.

(上接第 119 页)

- [13] 蔡江东,陈亚东,张道明. 基于多重分形的岩石声发射信号特征解构分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(5): 963 - 968.
CAI Jiandong , CHEN Yadong , ZHANG Daoming. Study on the feature of acoustic emission of rock under compression experiment based on multi-fractal theory [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering , 2012, 8(5): 963 - 968.
- [14] 邹飞,李海波,周青春,等. 基于数字图像灰度相关性的类岩石材料损伤分形特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 731 - 738.
ZOU Fei , LI Haibo , ZHOU Qingchun , et al. Fractal features study of rock-like material damage based on gray correlation of digital images [J]. Rock and Soil Mechanics , 2012, 33(3): 731 - 738.
- [15] 孙霞,吴自勤,黄韵. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
SUN Xia , WU Ziqin , HUANG Yun. Fractal theory and its applications [M]. Hefei: China Science and Technology University Press , 2003.
- [16] 朱健伟,叶伟英,徐金明,等. 基于视频图像和扩展有限元法的花岗岩裂缝扩展过程[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 122 - 126.
ZHU Jianwei , YE Weiyang , XU Jinming , et al. Simulation of propagation of cracks in granite based on digital image processing and extended finite element method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control , 2013, 24(3): 122 - 126.