

基于试验视频图像的花岗岩细观组分运动过程研究

刘芳^{1,2}, 徐金明¹

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 嘉兴南洋职业技术学院 船舶与建筑工程系, 浙江 嘉兴 314003)

摘要: 单轴压缩条件下花岗岩中不同细观组分的运动过程对花岗岩变形破坏过程分析具有重要意义, 可以使用视频图像处理技术进行研究。根据花岗岩试件室内常规单轴压缩试验时摄取的试验视频, 在提取单帧图像、进行灰度化和二值化处理基础上, 得到试样中石英、长石、黑云母的实际分布, 用 Fourier 变换指数评价这些细观组分的形状特征及其随时间的变化过程, 使用粒子图像测速技术得到不同时刻、不同细观组分的位移情况, 研究细观组分的运动方向、破坏顺序及其与岩石变形破坏过程的关系。结果表明, Fourier 变换指数可以用于定量评价花岗岩细观组分的形状特征和细观组分形状的改变过程; 在单轴受压过程中, 不同细观组分发生明显变形的先后顺序是黑云母、长石、石英; 细观组分的运动方向主要是垂直于加荷方向。本文研究成果对于分析岩石变形破坏机理具有一定的参考价值。

关键词: 岩石力学; 花岗岩; 视频图像; 细观组分; 运动; Fourier 变换

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)08-1602-07

An investigation on movements of meso-compositions of granite specimen using video image processing

LIU Fang^{1,2}, XU Jinming¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Branch of Ship and Construction Engineering, Jiaxing Nanyang Polytechnic Institute, Jiaxing, Zhejiang 314003, China)

Abstract: The analysis of the movements of various meso-compositions of granite specimen is of great significance in exploring the deformation/failure process of rock material and can be performed using the video image processing techniques. In the current study, the video images were photographed during the laboratory axial compression test. The frame images were extracted from the original video recordings and transformed into the grayscale and binary ones. The actual distributions of the quartz, feldspar, and biotite existed on the specimen were pin-pointed according to the image features of the corresponding compositions. The Fourier transform based shape indices were then used to describe the geometry features and to examine the changes of the indices with time. The particle image velocimetry technique was thereafter used to compute the displacements of various meso-compositions at different times. The relations between the deformation/failure of the specimen and the movement directions/sequences of the meso-compositions were also explored. It shows that Fourier indices may effectively quantify the shape characteristics and their changes of meso-materials on the granite specimen. During the axial compression, the failure of the meso-compositions in the granite specimen were in sequence of biotite, feldspar, and quartz. The components perpendicular to the axial load were the principal parts of the displacements in these minerals.

Key words: rock mechanics; granite; video image; meso-composition; movement; Fourier transform

收稿日期: 2015-07-31; **修回日期:** 2016-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472254, 40972191)

Supported by the Natural Sciences Foundation of China(Grant Nos. 41472254 and 40972191)

作者简介: 刘芳(1983-), 女, 2005年毕业于山西大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。Email: liufangfc@126.com.

通讯作者: 徐金明(1963-), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: xjming@shu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1066

1 引 言

花岗岩主要由长石、石英和黑云母等细观组分组成，这些细观组分的分布特征、运动过程，对花岗岩宏观力学性状具有重要影响。从细观尺度出发，分析花岗岩中不同细观组分与岩石变形破坏过程的关系，对研究花岗岩的变形破坏机制具有重要意义。

近年来，使用数字图像处理技术研究岩石的变形破坏问题有了很大进展。W. J. Xu 等^[1]使用数字图像处理技术研究了土石混合体内部的细观结构特征，分析了土石混合体块石含量与抗剪强度的关系。M. C. Weng 等^[2]研究了受力状态下砂岩变形及细观组分的运动。温世亿等^[3]研究了岩石微细结构与宏观力学行为的关系。刘招伟和李元海^[4]对岩石试件的变形破裂进行了研究。朱泽奇等^[5]利用图像处理技术研究了岩石破坏过程中的应力集中现象。徐金明等^[6]根据试验视频图像和粒子图像测速技术研究了石灰岩中既有裂纹端点的变化过程及新生裂隙的萌生扩展过程。陈中一等^[7]使用室内试验视频图像和多目标跟踪技术分析了变形破坏过程时岩石中多条裂隙长度、宽度、面积随时间的变化过程。于庆磊等^[8]使用数字图像处理技术研究了花岗岩细观结构及其对岩石变形和强度的影响。陈 沙等^[9]基于数字图像处理技术提出一种非均质岩土工程结构的二维数字分析方法。J. M. Xu 等^[10]使用粒子测速技术研究了石灰岩中的应变场。J. J. Charles 等^[11]提出了使用图像数字特征进行岩石分类的方法。T. L. Nguyen 等^[12]通过改进传统的数字图像相关方法，得到了单轴压缩条件下那不勒斯凝灰岩数字图像中倾斜裂纹在时域和空域中的演变过程。B. Grasemann 等^[13]研究了长石、黑云母与断裂方向的关系。

岩石变形破坏过程与岩石中细观组分颗粒的形状变化有关。而颗粒形状特征常用边界特征法、几何参数法、矩特征参数法、Fourier 变换参数(Fourier 指数)来表征。Fourier 变换形状描述法将二维问题转化为一维问题处理，可以大大减少计算工作量。R. Wettimuny 和 D. Penumadu^[14]用 Fourier 指数描述了不同图形的形状特征。J. P. Macsleyne 等^[15]提出了使用图像特征识别颗粒形状的方法。L. B. Wang 等^[16]采用 Fourier 指数对颗粒形状进行了定量描述。章志勇等^[17]把多尺度通用 Fourier 描述子应用于灰度图像检索系统的研究。

已有研究中，使用数字图像处理技术研究岩石变形破坏时对颗粒(细观组分)形状变化的重视不

够、未能充分刻画形状变化的细节，而颗粒形状变化研究也没有与变形破坏过程有效结合起来。由于细观组分运动过程通常在试验视频图像中能够反映出来，Fourier 变换指数可以刻画运动过程中细观组分形态变化的细节，因此，本文拟根据花岗岩单轴压缩试验视频，在对图像进行灰度化和二值化处理基础上，使用 Fourier 变换指数来描述不同细观组分的形状，研究变形破坏过程中试件表面不同细观组分的移动过程。

2 花岗岩细观成分的提取

2.1 原始视频的获取

本次研究所用的花岗岩取自浙江省湖州市的白鹤岭边坡。将现场岩块在室内切割、磨平，制成 50 mm×50 mm×50 mm 的试块，将 HDR-CX150E 型 Sony 摄像机安装于试块的正前方。对试块进行等速度均匀加载。

室内单轴压缩试验时，进行了试验过程的全程摄录，获得了 MTS 格式的试验视频与相应的应力-应变曲线(见图 1)。

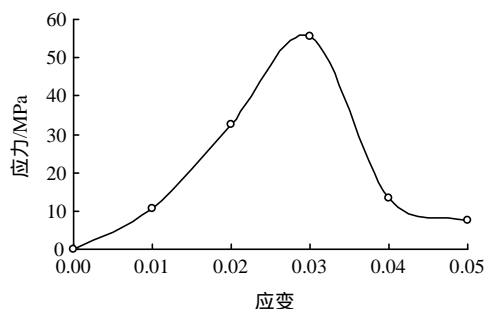


图 1 花岗岩的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of granite specimen

2.2 静态帧图像的获取

研究时，将 MTS 格式的原始试验视频转化为可读格式(AVI 格式)的视频图像。视频图像总时间为 315 s，摄制帧率为 25 帧/s，共 7 892 帧单帧图像(静态图像)。视频图像中某一时刻的单帧图像如图 2 所示。对每一单帧图像，只截取试块中的一个正方形区域用于岩石裂纹处变形研究。正方形区域的像素坐标分别为(1 200, 800), (1 200, 1 280), (1 680, 1 280), (1 680, 800)。图像中每一像素的实际宽度为 0.077 mm，即 0.077 mm/pixel，正方形的边长是 24 mm。

肉眼辨识出样品花岗岩的 3 种矿物成分：云母(主要为黑色)、石英(主要为白色)和长石(主要为灰白色)，如图 3 所示。

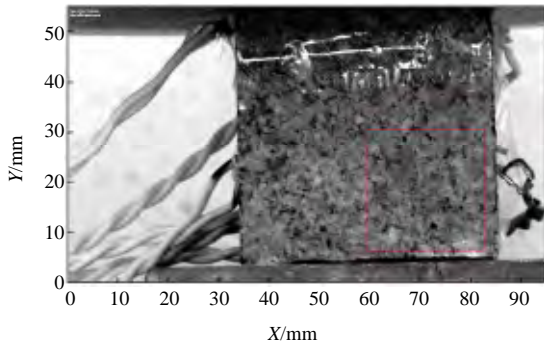


图2 视频中一幅单帧图像
Fig.2 A frame in video image

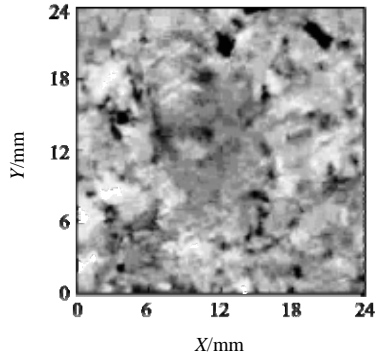
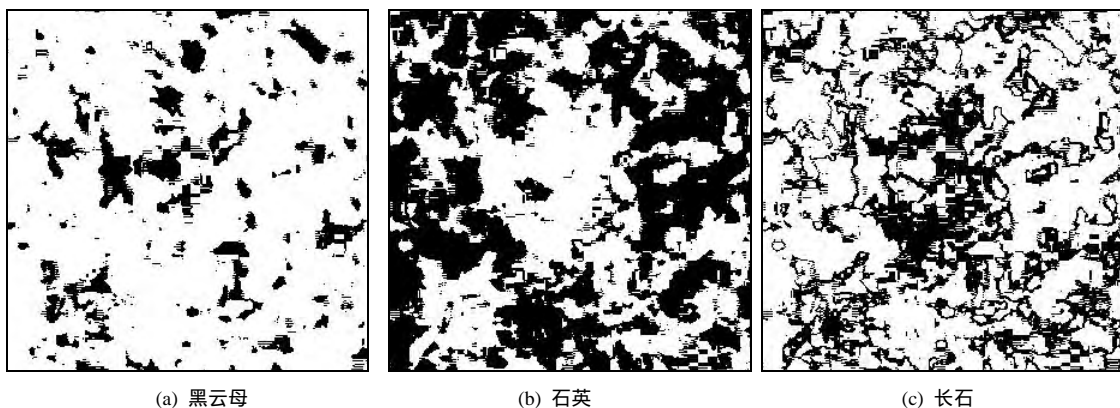


图3 截取区域的灰度图像
Fig.3 Cropped regions in grayscale image

3 基于 Fourier 指数变化的颗粒形状的变化过程

3.1 细观组分分布的确定

花岗岩中的细观组分(长石、石英和黑云母)是单帧图像中的图像对象,其实际分布可以利用灰度分界阈值法得到。对于任一单帧图像,使用点选与统计法获得黑云母-石英、长石-石英之间的区分阈值为 84 和 145,把像素值大小分成[0, 84), [84, 145)和[145, 255]三个区间,得到黑云母、石英和长石分布的二值图像,如图 4 所示。



(a) 黑云母 (b) 石英 (c) 长石

图 4 花岗岩中不同细观组分的分布

Fig.4 Distributions of meso-compositions on surface of granite specimen

3.2 颗粒形状 Fourier 变换指数的计算

某一时刻图像中的对象,可以使用数字特征来描述。常用的数字特征包括像素统计特征、边缘特征和区域特征等。安晨昊等^[18]使用圆形度、内切圆半径和离散指数描述花岗岩不同细观组分颗粒的形状特征。马少鹏等^[19]使用灰度相关性描述了花岗岩变形破坏过程。本文将用 Fourier 变换指数来定量描述任一时刻、任一单帧图像中细观组分的形状特征。

图像对象边界上的任意一点(X, Y),可以使用极坐标来表示(见图 5)。封闭边界可以表示为 Fourier 级数:

$$R(\theta) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} [a_m \cos(m\theta) + b_m \sin(m\theta)] \quad (1a)$$

其中,

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(\theta) d\theta \quad (1b)$$

式中: $R(\theta)$ 为颗粒的直径; $a_m, b_m (m = 1, 2, \dots)$ 为 Fourier 展开系数; a_0 为颗粒形状的平均直径, m 为变量 a, b 的总数,反映了颗粒边界形状的复杂程度(m 越大、边缘越是凹凸不平)。

式(1)中, $R(\theta)$ 随角度 $\theta (0 < \theta < 2\pi)$ 的改变而改变。某一对象边界的全局和细部特征可分别用低阶和高阶 Fourier 指数描述。若 m 不是无限大(比如 n_3),则可定义 3 个 Fourier 变换指数:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \sum_{m=1}^{n_1} A_m \\ F_2 &= \sum_{m=n_1+1}^{m=n_1+n_2} A_m \\ F_3 &= \sum_{m=n_1+n_2+1}^{m=n_3} A_m \end{aligned} \right\} \quad (2a)$$

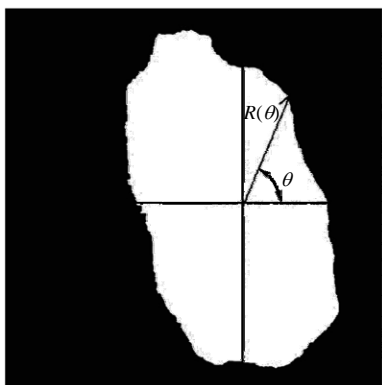


图 5 图像对象边界的 Fourier 变换

Fig.5 Description of Fourier transform for boundary of an image object

其中，

$$A_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \quad (2b)$$

式中： A_m 为形状指数， F_1 为形状系数， F_2 为棱角指数， F_3 为纹理系数(L. B. Wang 等^[16])。

式(2)中 n_1, n_2, n_3 为可变参数，正是这些可变参数将形状系数、棱角指数和纹理系数区分开来，可以通过花岗岩细观组分颗粒形状获得 n_1, n_2, n_3 的大小。其中，形状系数可细化描述花岗岩细观颗

粒的扁圆程度，颗粒越扁长、形状系数就越大，颗粒越接近于圆形、形状系数就越小。棱角指数详尽说明了颗粒外形的突出情况，颗粒表面棱角突出越多、棱角指数越大。纹理系数则是棱角指数基础上对颗粒形状的细致刻画。由于 n_1, n_2, n_3 的可变动性，Fourier 变换指数可以有效描述花岗岩中不同细观组分颗粒的形状特征。

式(2)中 n_1, n_2, n_3 与 Fourier 变换指数之间的关系见图 6。由图 6(a)可知， F_1 随着 n_1 的增大而增大： $n_1=5$ 时曲线开始变缓， $n_1 > 5$ 时 n_1 的改变对 F_1 的影响减小，可取 $n_1=5$ ；由图 6(b)可知， F_2 在 $n_2=20$ 时开始增长缓慢， $n_2 > 20$ 时 n_2 的改变对 F_2 的影响减小，可取 $n_2=20$ ；由图 6(c)可知， F_3 在 $n_3=50$ 时开始增长缓慢，可取 $n_3=50$ 。所以，花岗岩细观组分黑云母、长石和石英的 Fourier 变换指数中，取 $n_1=5, n_2=20, n_3=50$ 。

从图 4 中黑云母、石英、长石颗粒区域中各选出 5 个颗粒(见图 7)，用前述确定的 n_1, n_2, n_3 分别计算这些颗粒的形状系数、棱角指数和纹理系数，计算结果见表 1。

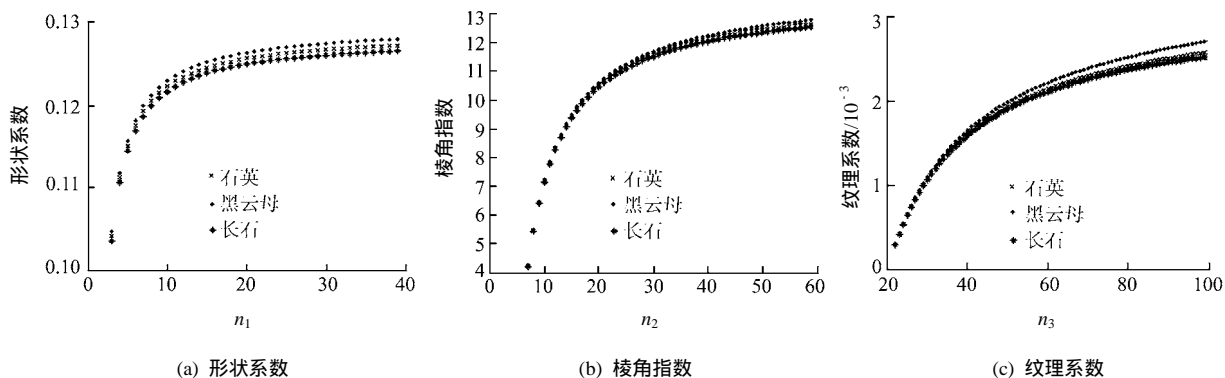


图 6 花岗岩细观组分的 Fourier 变换指数

Fig.6 Fourier-transform-based shape descriptors of meso-compositions on granite specimen

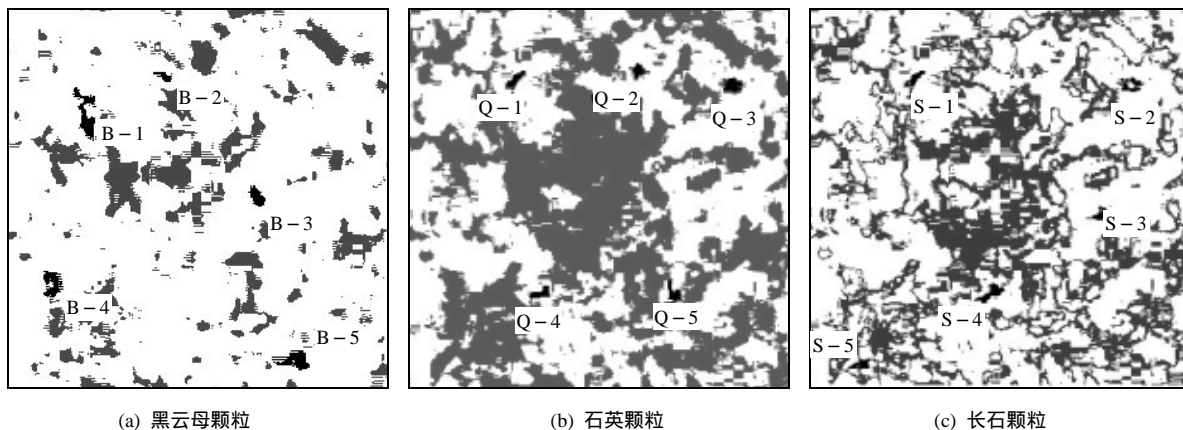


图 7 Fourier 变换指数计算颗粒的位置

Fig.7 Locations of selected particles in computing Fourier-transform-based shape descriptors

表 1 花岗岩细观组分的 Fourier 变换指数

Table 1 Fourier-transform-based shape descriptors of meso-compositions on granite specimens

岩石类别	颗粒编号	Fourier 变换指数		
		形状系数	棱角指数	纹理系数
黑云母	B 1	0.137 2	0.039 2	0.027 9
	B 2	0.012 8	0.004 6	0.017 9
	B 3	0.021 9	0.007 9	0.002 1
	B 4	0.010 8	0.004 4	0.001 5
	B 5	0.044 2	0.021 1	0.005 0
石英	Q 1	0.039 1	0.006 4	0.032 2
	Q 2	0.010 8	0.002 3	0.012 8
	Q 3	0.004 8	0.001 8	0.036 3
	Q 4	0.005 9	0.000 8	0.006 5
	Q 5	0.035 5	0.009 6	0.004 0
长石	S 1	0.065 6	0.001 6	0.027 7
	S 2	0.008 0	0.003 2	0.001 4
	S 3	0.018 6	0.004 1	0.022 8
	S 4	0.024 9	0.005 7	0.034 3
	S 5	0.005 1	0.001 7	0.006 8

由图 7 和表 1 可以看出，黑云母颗粒中，颗粒 B-1 比其余颗粒扁长，颗粒 B-4 比其余颗粒接近圆形；石英颗粒中，颗粒 Q-1 比其余颗粒扁长，颗粒 Q-3 比其余颗粒接近圆形；长石颗粒中，颗粒 S-1 比其余颗粒扁长，颗粒 S-5 比其余颗粒接近圆形。

由图 7 和表 1 可以看出，黑云母颗粒中，颗粒 B-1 边缘凹凸较多；颗粒 Q-5 边缘突出多；长石颗粒中，颗粒 S-4 边缘突出较多。

由图 7 和表 1 还可以看出，颗粒 B-1, Q-3, S-4 的纹理系数都比较大。因此，使用 Fourier 变换指数描述颗粒形状能反映花岗岩不同细观组分颗粒的扁圆程度、棱角突出程度。颗粒越扁平、越狭长，形状系数就越大；反之，颗粒越圆，形状系数越小。颗粒表面棱角数目越多、突出越明显，棱角指数就越大。纹理系数则是棱角指数基础上颗粒形状的细化描述。

3.3 细观颗粒形态参数的变化特征

花岗岩轴向受压变形过程中，细观组分的形状特征相应发生改变。下面用 Fourier 变换指数描述花岗岩变形过程中细观组分形状的变化过程。

试验时，试件在 300 s 时发生破坏。为缩短计算时间，取 288 ~ 296 s 视频图像进行研究，每隔 2

帧抽取一幅单帧图像(共抽取 100 幅)，对所抽取图像分别计算细观组分颗粒的 Fourier 变换指数。由于摄制帧率为每秒 25 帧、相邻两帧图像间隔时间仅为 0.04 s(= 1/25 s)，研究时忽略 1 s 内视频图像的阈值变化。

图 8 为图 7 中黑云母 B-1、石英 Q-2、长石 S-1 的 Fourier 变换指数随时间的变化曲线。

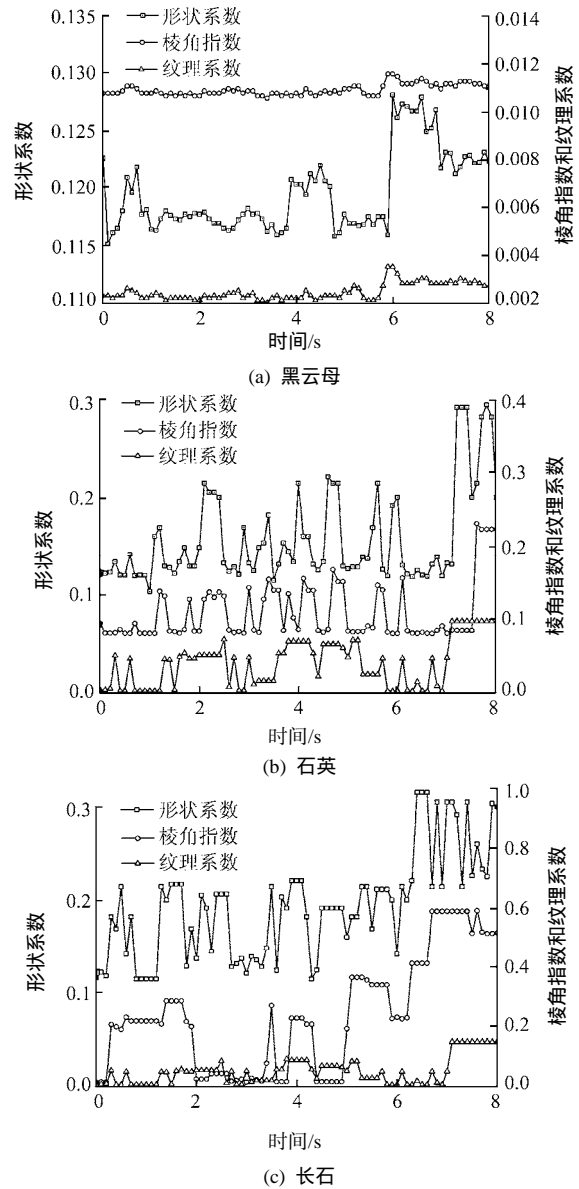


图 8 花岗岩中不同颗粒 Fourier 变换指数的变化过程
Fig.8 Changes of Fourier-transform-based shape descriptors for selected particles on granite specimen

由图 8 可以看出，轴向受压过程中花岗岩细观组分颗粒 Fourier 变换指数在某一时刻明显增大；黑云母颗粒 B-1、石英颗粒 Q-2、长石颗粒 S-1 的 Fourier 变换指数明显增大的时刻分别是 6.0, 7.3, 6.5 s。因此，在本组花岗岩变形过程中，黑云母区域首先产生变形、接着是长石区域、最后为石英区

域，这与视频中观测到的基本一致。这一顺序与细观组分莫氏硬度顺序基本一致：黑云母、长石、石英的莫氏硬度大致为 2.0~3.5, 6.0~6.5, 7.0。需要说明的是，本文所研究花岗岩的细观组分组合较为均匀；不同岩石中细观组分的变形顺序，与细观组分类型、组合特点、微裂隙分布都有一定关系。

4 不同细观组分的位移变化特征

4.1 基于粒子测速技术的位移计算

下面根据试验视频、使用粒子测速技术计算图 7 中不同颗粒在不同时刻的位移大小。计算连续两帧图像中某一点位移时，首先计算后一帧图像所有细观组分图像块质心与前一帧图像所选细观组分图像块质心的欧氏距离，将欧氏距离最小值对应的图像块视作前一帧图像在后一帧图像中的位置，将这一欧氏距离作为该图像块中心点的位移。重复上述过程，可以得到图像中任意一点的位移。位移计算结果通常以像素为单位(简称为“像素位移”)，可以根据像素坐标/物理坐标关系获得这些像素位移对应的物理位移。

4.2 不同细观组分的位移特征分析

图 9 为花岗岩中不同细观组分在 288~292 s 范围内的位移。由图 9 可知，黑云母颗粒中，B-1 和 B-3 位移量很小，B-2, B-4, B-5 垂直于加载方向移动；石英颗粒中，Q-1 位移量很小，Q-2, Q-3, Q-4 和 Q-5 垂直于加载方向移动；长石颗粒中，S-3 和 S-4 位移量很小，S-1, S-2 和 S-5 的垂直于加载方向移动。总体上，黑云母和石英颗粒垂直于加载方向、向两侧移动，长石颗粒在原位置附近垂直于加载方向移动。这些特征与肉眼观察结果基本一致。

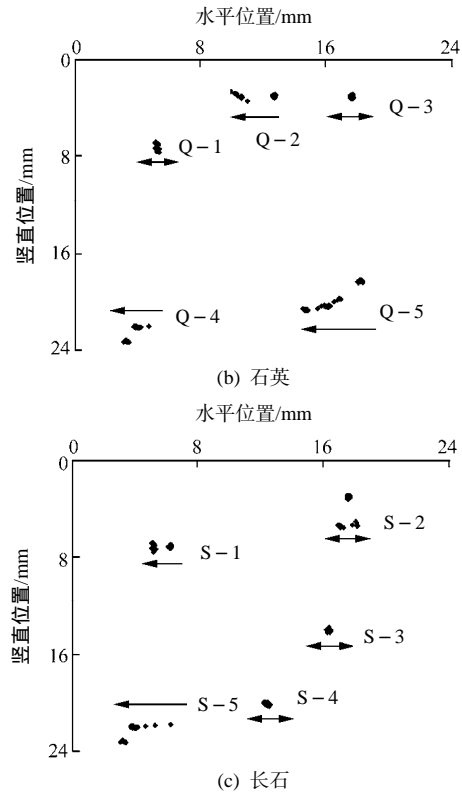
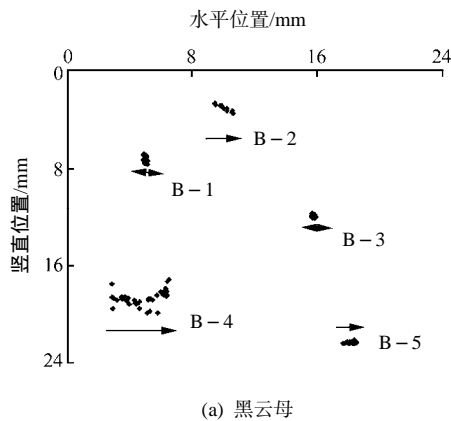


图 9 花岗岩中不同细观组分的位移

Fig.9 Displacements of meso-compositions on granite specimen

若将裂隙(断口)对象区域视作一种特殊的细观组分，使用前述方法还可以进一步分析岩石变形破坏过程中不同类型裂隙的出现时刻、萌生条件、形态特征、组合特点。

5 结 论

本文使用数字图像分析技术得到了花岗岩中不同细观组分的分布情况，将这些组分形状特征使用 3 个 Fourier 变换指数(形状系数、棱角指数、纹理系数)来表征，分析了受压过程中不同细观组分 Fourier 变换指数的变化过程，研究了岩石变形过程中不同细观组分的位移变化特征，得到如下结论：

- (1) Fourier 变换指数可以有效描述花岗岩中不同细观组分颗粒的形状特征：形状系数描述花岗岩细观颗粒的扁圆程度；棱角指数描述花岗岩细观颗粒的凹凸程度；纹理系数则是棱角指数基础上颗粒形状特征的细化描述。
- (2) 花岗岩轴向受压时，其细观组分颗粒的 Fourier 变换指数在某一时刻明显增大，变形的先后顺序是黑云母、长石、石英。
- (3) 根据花岗岩试件单轴压缩条件下的试验视

频,使用粒子测速技术,得到所选区域的黑云母、石英、长石运动均以垂直于加载方向为主。

参考文献(References):

- [1] XU W J, YUE Z Q, HU R L. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 749–762.
- [2] WENG M C, TUNG S H, SHIH M H. Microscopic characteristics of problematic tertiary sandstone as revealed by grain-wide local deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(7): 1243–1251.
- [3] 温世亿,李静,苏霞,等.复杂应力条件下围岩破坏的细观特征研究[J].岩石力学,2010,31(8):2399–2406.(WEN Shiyi, LI Jing, SU Xia, et al. Studies of mesomechanical structure characters of surrounding rock failure under complex stress state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2399–2406.(in Chinese))
- [4] 刘招伟,李元海.含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J].工程力学,2010,27(8):133–139.(LIU Zhaowei, LI Yuanhai. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole under going uniaxial compressive load[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 133–139.(in Chinese))
- [5] 朱泽奇,肖培伟,盛谦,等.基于数字图像处理的非均质岩石材料破坏过程模拟[J].岩石力学,2011,32(12):3780–3786.(ZHU Zeqi, XIAO Peiwei, SHENG Qian, et al. Numerical simulation of fracture propagation of heterogeneous rock material based on digital image processing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3780–3786.(in Chinese))
- [6] 徐金明,韩娜娜,李岩松.石灰岩局部化变形的图像特征[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):2110–2115.(XU Jinming, HAN Nana, LI Yansong. Image features of localized deformation of limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2110–2115.(in Chinese))
- [7] 陈中一,徐金明,刘芳.花岗岩中多条裂隙的萌生扩展过程研究[J].水文地质工程地质,2015,42(5):96–101.(CHEN Zhongyi, XU Jinming, LIU Fang. Investigation of the initiation and propagation of multi-cracks in granite[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(5): 96–101.(in Chinese))
- [8] 于磊磊,杨天鸿,郑超,等.岩石细观结构对其变形强度影响的数值分析[J].岩石力学,2011,32(11):3468–3472.(YU Qinglei, YANG Tianhong, ZHENG Chao, et al. Numerical analysis of influence of rock mesostructure on its deformation and strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3468–3472.(in Chinese))
- [9] 陈沙,岳中琦,谭国焕.基于数字图像的非均质岩土工程材料的数值分析方法[J].岩土工程学报,2005,27(8):956–964.(CHEN Sha, YUE Zhongqi, TAN Guohuan. Digital image based numerical modeling method for heterogeneous geomaterials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 956–964.(in Chinese))
- [10] XU J M, CHENG C H, LU H P, et al. Strain field investigation of limestone specimen under uniaxial compression loads using particle image velocimetry[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(5): 1619–1625.
- [11] CHARLES J J, KUNCHEVA L I, WELLS B, et al. Stability of Kerogen classification with regard to image segmentation[J]. Mathematical Geosciences, 2009, 41(4): 475–486.
- [12] NGUYEN T L, HALL S A, VACHER P, et al. Fracture mechanisms in soft rock. Identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation[J]. Tectonophysics, 2011, 503(1/2): 117–128.
- [13] GRASEMANN B, EXNER U, TSCHEG G. Displacement-length scaling of brittle faults in ductile shear[J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33(11): 1650–1661.
- [14] WETTIMUNY R, PENUMADU D. Application of Fourier analysis to digital imaging for particle shape analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004, 18(1): 2–9.
- [15] MACSLEYNE J P, SIMMONS J P, GRAEF M D. On the use of 2D moment invariants for the automated classification of particle shapes[J]. Acta Materialia, 2008, 56(3): 427–437.
- [16] WANG L B, WANG X R, MOHAMMAD L, et al. Unified method to quantify aggregate shape angularity and texture using fourier analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 498–504.
- [17] 章志勇,潘志庚,张明敏,等.基于多尺度通用傅里叶描述子的灰度图像检索[J].中国图象图形学报,2005,10(5):611–615.(ZHANG Zhiyong, PAN Zhigeng, ZHANG Mingmin, et al. Multiscale generic Fourier descriptor for gray image retrieval[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(5): 611–615.(in Chinese))
- [18] 安晨昊,徐金明,孙皓,等.单轴压缩条件下花岗岩中不同矿物的形状变化[J].岩石力学,2015,36(增1):471–475.(AN Chenhao, XU Jinming, SUN Hao, et al. Shape changes of various minerals on granite surface during uniaxial compression test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 36(Supp.1): 471–475.(in Chinese))
- [19] 马少鹏,刘善军,赵永红.数字图像灰度相关性用以描述岩石试件损伤演化的研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):590–595.(MA Shaopeng, LIU Shanjun, ZHAO Yonghong. Gray correlation of digital images from loaded rock specimen surface to evaluate its damage evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 590–595.(in Chinese))