

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.S1.081

# 单轴压缩条件下花岗岩中不同矿物的形状变化

安晨昊, 徐金明, 孙 皓, 刘 芳

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

**摘 要:** 岩石中不同矿物的形状变化反映了岩石的变形破坏过程。在分析花岗岩试样表面图像不同矿物纹理特征基础上, 使用室内单轴压缩试验视频图像和灰度分界阈值分割法, 研究了单帧图像中不同矿物的分布特征, 使用形状参数描述了岩石变形过程中不同成分的形状特征, 探讨了不同成分区域形状变化与裂隙扩展过程的关系。结果表明, 花岗岩变形过程中圆形度的大小顺序为长石 > 黑云母 > 石英, 内切圆半径的大小顺序为黑云母 > 长石 > 石英; 离散指数的大小顺序为长石 > 石英 > 黑云母; 长石承受了轴向力的主要部分, 形状变化与所处位置关系较大; 破坏过程中裂隙面积出现大小顺序为长石、石英、黑云母, 裂隙扩展较快时裂隙大多出现在长石和石英区域。

**关 键 词:** 花岗岩; 试验视频; 图像处理; 形状特征

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 - (2015) 增 1 - 0471 - 05

## Shape changes of various minerals on granite surface during uniaxial compression test

AN Chen-hao, XU Jin-ming, SUN Hao, LIU Fang

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The shape changes of the minerals on the surface reflect the deformation/failure process of the rock material. In the current study, after analyzing the textual features of various mineral regions on a granite specimen surface, the video images photographed during the laboratory uniaxial compression test and the grayscale threshold segmentation were used to investigate the distributions of the minerals in each frame. The shape parameters were extracted from the frame to depict the configuration features of various compositions at any time during the deformations of the rock. The relations between the changes in shape parameters of various compositions and the propagation process of cracks were further explored. It is shown that during the deformation of the granite under the external load, the magnitude sequence of the circularity is feldspar, biotite, and quartz; that of the inscribed circle radius is biotite, feldspar, and quartz; and that of the variance index is feldspar, biotite, and quartz; the feldspar region beard the most part of the axial load; and the shape changes of the feldspar regions are much depended on the actual locations; during the failure of the specimen; the magnitude sequences of the areas are feldspar, quartz, and biotite where new cracks generated; and the most of the cracks propagated on the feldspar and quartz regions if the cracks developed quickly.

**Keywords:** granite; test video; image processing; shape feature

## 1 引 言

岩石通常是不同矿物成分组成的地质体, 岩石中不同矿物在类型、形状、分布等方面的特征决定了岩石的变形破坏过程。换言之, 岩石的变形破坏过程可用这一过程中不同矿物成分的形状参数变化

来定量表征。

外荷作用下岩土材料颗粒形状变化的研究已经取得了一些成果, Wang 等<sup>[1]</sup>用傅里叶变换参数对颗粒形状进行了定量描述, 刘清秉等<sup>[2]</sup>分析了颗粒形状对砂土力学性质的影响, 叶建雄等<sup>[3]</sup>探讨了砂粒形状与流动度的关系, Haverkamp<sup>[4]</sup>研究了土的渗透

收稿日期: 2015-03-28

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51472254); 上海市科委重点支撑项目 (No.13231200400); 上海市青年科技启明星计划项目 (No.13QB140340); 上海市产学研合作年度计划项目 (No.沪 CXY-2013-9)

第一作者简介: 安晨昊, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程的科研工作。E-mail: anchenhao\_1@163.com

通讯作者: 徐金明, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: xjming@163.com

性与形状参数的关系 ,MacSleyne 等<sup>[5]</sup>提出了使用图像数字特征识别颗粒形状的方法。

近年来将颗粒流方法和颗粒形状变化结合起来研究岩土材料的变形破坏过程也取得了很大进展,孔亮等<sup>[6]</sup>利用颗粒流模拟分析了颗粒形状对类砂土力学性质的影响。宿辉等<sup>[7]</sup>使用不同形状的团粒 (clump) 单元,研究了片麻花岗岩中应力性质与裂纹扩展模式的关系。刘广等<sup>[8]</sup>通过构建 4 种代表性矿物颗粒的形状,并使用球度指标来定量描述,实现了不同颗粒形状下石英砂岩的三轴颗粒流模拟试验。

现有研究难以刻画岩石变形破坏过程中矿物形状变化的细节,所用团粒也不能真正描述不同矿物颗粒的实际变化。试验视频图像可以反映任意时刻、任意位置矿物成分变化的细节,可以通过定量描述矿物颗粒形状变化刻画岩石的变形破坏过程。本文拟以花岗岩为例,根据单轴压缩条件下的室内试验视频图像,通过编制 Matlab 平台应用程序,利用灰度分界阈值分割法来区分花岗岩中的黑云母、长石、石英,分析岩石变形破坏过程中不同位置、不同矿物成分的形状参数变化特征。

## 2 形状参数的计算方法

### 2.1 试验视频和矿物区域的获取

试验所用花岗岩取自甘肃省玉门市北山地区,切割、磨光后制成尺寸为 100 mm×50 mm×50 mm 的试件。使用邦威 200 t 伺服压力机进行花岗岩单轴压缩试验,使用佳能 EOS 600D 摄像机拍摄外荷作用下的试验视频,摄像机镜头距试件约 100 cm。试验过程加载总时长为 670 s,连续拍摄了 736.00 s 的视频图像,20 s 时开始对试件加载,255.88 s 时试件表面开始出现裂隙,690 s 时试件完全破坏。

研究时,由试验视频抽取单帧静态图像,将每帧图像进行灰度化处理,截取试样位置进行分析。将黑云母-石英、长石-石英的分界阈值分别定为 168 和 200,根据这一阈值提取岩石中的不同成分。试验视频的整个处理过程通过编制 Matlab 平台应用程序来实现。

### 2.2 矿物区域形状参数的计算

矿物颗粒形状参数使用圆形度  $R_0$ 、内切圆半径  $r$ 、离散指数  $e$  来表征,分别表示区域接近圆的程度、内切圆的半径、形状的复杂性,计算公式分别为

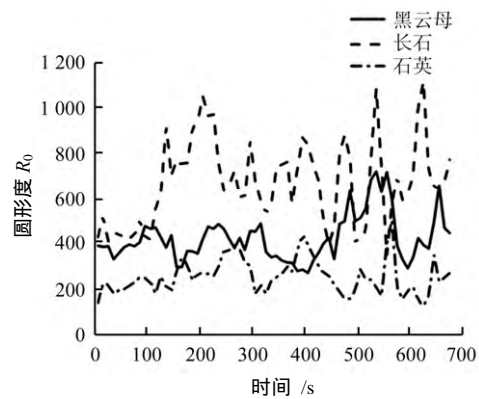
$$\left. \begin{aligned} R_0 &= 4\pi S / L^2 \\ r &= 2S / L ; e = L^2 / S \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $S$  为对象区域的面积; $L$  为对象区域的周长。

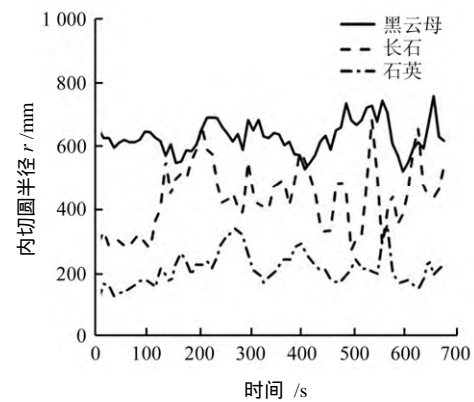
为消除噪点和光线差异的影响,将每 10 s 内形状参数平均值作为代表值。由于每帧图像中不同成分区域大小不一、区域与边界相接形状互不相同,选取每帧图像中面积最大,且不与边界接触的 20 个区域,取这些区域的形状参数平均值进行分析。

## 3 不同矿物成分的形状变化特征

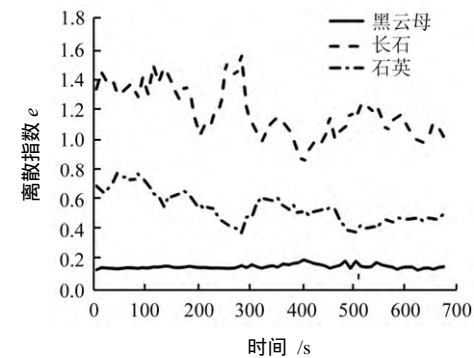
不同形状参数(圆形度、内切圆半径、离散指数)随时间的变化曲线如图 1 所示。



(a) 圆形度  $R_0$



(b) 内切圆半径  $r$



(c) 离散指数  $e$

图 1 不同时刻不同成分形状参数随时间变化的曲线  
Fig.1 Shape parameters with time curves of various composition

由图 1 (a) 可知, 3 种成分区域的圆形度有所差异, 加载过程中圆形度  $R_0$  从大到小顺序为长石、黑云母、石英; 黑云母圆形度在花岗岩出现裂隙时出现明显变化, 长石圆形度在开始加荷时变化明显, 而在试件破坏阶段变化不明显; 石英圆形度在整个加载过程中没有明显变化。由图 1 (b) 可知, 3 种成分内切圆半径也具有明显差异。加载过程中, 内切圆半径  $r$  从大到小顺序为黑云母、长石、石英, 黑云母内切圆半径随时间变化趋势与圆形度相似、但增大程度没有圆形度明显, 长石内切圆半径变化类似于黑云母, 石英内切圆半径在整个加载过程中没有明显变化。由图 1 (c) 可知, 加载过程中离散指数  $e$  从大到小顺序为长石、石英、黑云母, 黑云母离散指数在加载过程中没有明显变化, 长石形状离散指数在试件出现裂隙前后突然增大, 石英离散指数与轴向力变化有较大关系。

#### 4 矿物形状变化与裂隙扩展的关系

##### 4.1 花岗岩表面的裂隙开展过程

裂隙面积和平均宽度随时间的变化曲线分别如图 2、3 所示。

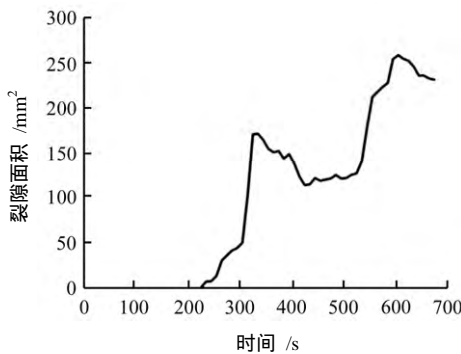


图 2 加载后裂隙面积随时间变化曲线

Fig.2 Curve of crack area with time under external loads

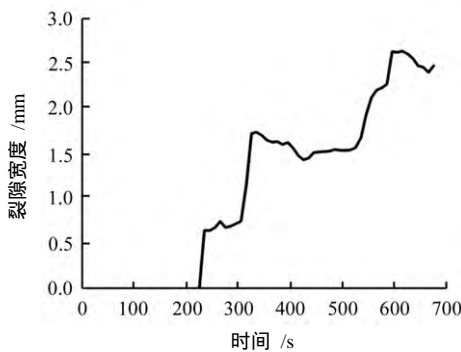
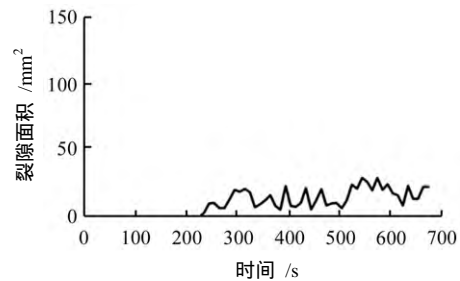


图 3 加载后裂隙宽度随时间变化曲线

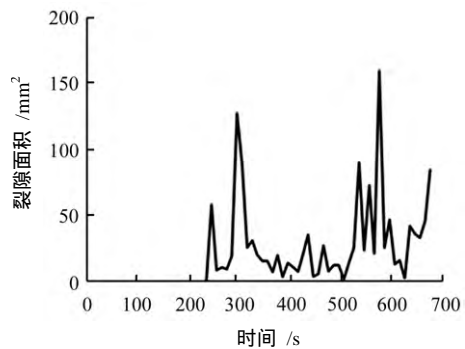
Fig.3 Curve of crack width with time under external loads

从两个图可以看出, 花岗岩破坏过程中裂隙面积和平均宽度增速都较快, 但在岩石开裂后裂隙面积和平均宽度会有所减小。

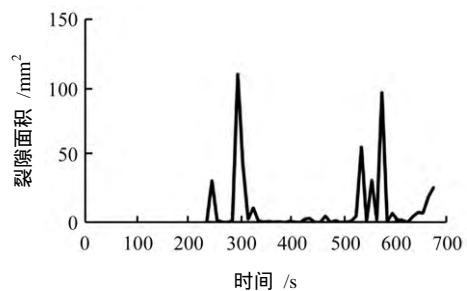
裂隙延伸会经过不同的成分, 裂隙宽度增加会使裂隙周围成分形状发生变化。不同成分区域每秒出现裂隙的面积随时间的变化如图 4 所示。从图中可以看出, 黑云母区域出现裂隙的面积最小, 石英区域次之, 长石区域最大。由图 4 (a) 可知, 黑云母区域在加载后第 235 s 出现裂隙, 随后出现裂隙面积的大小相近但小于长石区域和石英区域。图 4 (b)、图 4 (c) 显示, 长石和石英区域在加载后第 235 s 出现裂隙。由图 4 还可以看出, 在整个加载过程中黑云母区域出现裂隙面积分布较为均匀, 裂隙出现较快时裂隙基本出现在长石和石英区域。



(a) 黑云母



(b) 长石



(c) 石英

图 4 不同时刻不同成分区域出现的裂隙面积

Fig.4 Crack area of various compositions at different time

#### 4.2 不同成分区域形状参数与裂隙扩展的关系

试样在加载过程中不同位置、不同成分的形状也会发生变化。选取 8 个时刻图像进行分析。8 个时刻是：加载开始时（即加载后第 0 s）、加载开始到裂隙出现之间的某一时刻（取第 200 s）、裂隙即将出现的时刻（取第 235.84 s）、裂隙出现后的某一时刻（取第 235.88 s）、裂隙出现后裂隙长度/宽度迅速增加的某一时刻（取第 300 s）、裂隙停止扩展、轴向压力不断增大的某一时刻（取第 400 s）、轴向压力第二次峰值前的某一较近时刻（取第 500 s）和

轴向压力第二次峰值后的某一时刻（取第 600 s）。

采用灰度分界阈值分割法和形状判断法将这 8 帧图像中裂隙、黑云母、长石、石英区域提取出来，分别研究位于裂隙、靠近裂隙、远离裂隙的成分区域。不同成分区域不同时刻的面积大小见表 1。不同时刻各成分区域的圆形度  $R_0$ 、内切圆半径  $r$ 、离散指数  $e$  的计算结果分别见表 2~4。由表 1 可知，不同成分面积在裂隙出现前都出现减小趋势。由表 2~4 可知，3 种主要成分圆形度、内切圆半径、离散指数的变化趋势相近；即将出现裂隙时黑云母

表 1 不同时刻不同成分区域的面积  
Table 1 Area of various compositions at different time

成分类型	成分位置	不同时刻(s)不同成分区域面积 /mm <sup>2</sup>							
		0.00	200.00	235.84	235.88	300.00	400.00	500.00	600.00
黑云母	裂隙位置	13.64	13.64	5.27					
	裂隙附近	16.73	17.09	14.18	17.45	17.45	16.36	16.18	15.82
	远离裂隙	27.27	26.00	21.45	24.73	22.18	24.91	24.36	28.00
长石	裂隙位置	37.27	33.09	34.91					
	裂隙附近	38.18	35.64	37.64	38.91	33.09	34.91	27.45	37.64
	远离裂隙	84.00	85.27	80.36	86.36	82.00	84.18	82.00	83.09
石英	裂隙位置	118.18	108.36	107.45					
	裂隙附近	83.64	75.82	75.27	58.18	74.00	75.27	62.91	67.09
	远离裂隙	221.45	203.82	203.45	213.09	216.73	220.55	214.55	193.45

表 2 不同时刻不同成分区域的圆形度  
Table 2 Circularity  $R_0$  of various compositions at different time

成分类型	成分位置	不同时刻(s)不同成分区域的圆形度 $R_0$							
		0.00	200.00	235.84	235.88	300.00	400.00	500.00	600.00
黑云母	裂隙位置	635.84	686.69	1640.63					
	裂隙附近	397.83	549.66	375.14	335.11	449.94	354.27	397.84	686.63
	远离裂隙	334.98	259.14	479.85	354.16	354.19	259.15	301.12	286.02
长石	裂隙位置	130.36	89.77	130.37					
	裂隙附近	225.27	206.32	168.19	197.71	225.31	225.29	155.91	174.92
	远离裂隙	55.59	42.38	47.82	49.86	43.22	44.98	42.39	48.82
石英	裂隙位置	33.92	35.15	37.10					
	裂隙附近	67.04	65.44	59.53	82.51	100.72	107.06	150.02	68.76
	远离裂隙	15.79	13.91	15.99	13.90	15.24	13.75	16.17	19.57

表 3 不同时刻各成分区域的内切圆半径  $r$   
Table 3 Inscribed circle radius  $r$  of various compositions at different time

成分类型	成分位置	不同时刻(s)各成分区域内切半径 /0.22 mm							
		0.00	200.00	235.84	235.88	300.00	400.00	500.00	600.00
黑云母	裂隙位置	5 363.4	5 573.8	8 616.8					
	裂隙附近	4 242.2	4 986.4	4 119.7	3 893.4	4 511.4	4 003.3	4 242.3	5 573.3
	远离裂隙	3 891.9	3 423.2	4 658.6	4 002.0	4 002.4	3 423.3	3 690.2	3 596.2
长石	裂隙位置	2 427.4	2 014.5	2 427.6					
	裂隙附近	3 190.9	3 053.8	2 757.2	2 989.3	3 191.5	3 191.2	2 655.1	2 811.7
	远离裂隙	1 583.6	1 382.7	1 469.0	1 499.7	1 396.5	1 424.5	1 382.9	1 484.1
石英	裂隙位置	1 236.3	1 258.8	1 293.3					
	裂隙附近	1 739.2	1 718.6	1 639.2	1 930.4	2 132.1	2 198.1	2 602.5	1 761.9
	远离裂隙	841.7	790.3	847.2	790.0	827.0	785.4	852.0	937.6

表 4 不同时刻各成分区域形状离散指数  
Table 4 Variance index  $e$  of various compositions at different time

成分类型	成分位置	不同时刻(s)各成分区域形状离散指数 $e$							
		0.00	200.00	235.84	235.88	300.00	400.00	500.00	600.00
黑云母	裂隙位置	0.019 8	0.018 3	0.007 7					
	裂隙附近	0.031 6	0.022 9	0.033 5	0.037 5	0.027 9	0.035 5	0.031 6	0.018 3
	远离裂隙	0.037 5	0.048 5	0.026 2	0.035 5	0.035 5	0.048 5	0.041 7	0.043 9
长石	裂隙位置	0.096 4	0.140 0	0.096 4					
	裂隙附近	0.055 8	0.060 9	0.074 7	0.063 6	0.055 8	0.055 8	0.080 6	0.071 8
	远离裂隙	0.226 1	0.296 5	0.262 8	0.252 0	0.290 7	0.279 4	0.296 5	0.257 4
石英	裂隙位置	0.370 5	0.357 5	0.338 7					
	裂隙附近	0.187 4	0.192 0	0.211 1	0.152 3	0.124 8	0.117 4	0.083 8	0.182 8
	远离裂隙	0.796 0	0.903 5	0.786 1	0.903 8	0.824 7	0.914 2	0.777 0	0.642 0

区域形状变化较大，裂隙附近黑云母在裂隙出现后形状变化较大、在裂隙扩展时达到峰值；长石是主要受力成分，裂隙上的长石在受力过程中形状变化加大、在试件破坏后恢复到未加载的情况，裂隙附近长石在裂隙出现前形状变化较大、承担了更大的应力，远离裂隙长石在加载过程中形状变化较小、承受了轴向力的主要部分；石英破坏与形状变化方式有关，石英圆形度和内切圆半径增大、离散指数减小时石英区域可能破坏，若形状变化趋势与此相反、则石英区域难以破坏。

## 5 结 论

(1) 花岗岩变形过程中，圆形度从大到小顺序为长石 > 黑云母 > 石英，内切圆半径从大到小顺序为黑云母 > 长石 > 石英，离散指数从大到小顺序为长石 > 石英 > 黑云母。

(2) 花岗岩即将出现裂隙时黑云母形状变化较大，整个变形破坏过程中长石承受了轴向力的主要部分、长石形状变化大小与所处位置关系较大、石英是否破坏与形状变化方式有关。

(3) 花岗岩破坏过程中裂隙面积和宽度增速都较快、但试件开裂后会减小，黑云母区域出现裂隙的面积最小、石英区域次之、长石区域最大，裂隙扩展较快时裂隙大多出现在长石和石英区域。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 刘清秉, 项伟, BUDHU M, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 191 - 197.  
LIU Qing-bing, XIANG Wei, BUDHU M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 191 - 197.
- [3] 叶建雄, 余林文, 颜从进, 等. 机制砂颗粒形状评价方法的相关性[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(4): 162 - 164.  
YE Jian-xiong, YU Lin-wen, YAN Cong-jin, et al. Correlation between particle shape and evaluation methods of manufactured sand[J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2012, 34(4): 162 - 164.
- [4] HAVERKAMP R, LEIJ F J, FUENTES C, et al. Soil water retention. I. Introduction of a shape index[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1881 - 1890.
- [5] MACSLEYNE J P, SIMMONS J P, GRAEF M D. On the use of 2-D moment invariants for the automated classification of particale shapes[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56: 427 - 437.
- [6] 孔亮, 彭仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 30(10): 2112 - 2119.  
KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 30(10): 2112 - 2119.
- [7] 宿辉, 唐阳, 段宇. 基于颗粒形状的节理花岗岩力学性能颗粒流模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 25(14): 123 - 130.  
SU Hui, TANG Yang, DUAN Yu. Numerical simulation research based on particle shape of joint mechanical property of gneissic granite by particle flow code[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 25(14): 123 - 130.
- [8] 刘广, 荣冠, 彭俊, 等. 矿物颗粒形状的岩石力学特性效应分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(3): 540 - 550.  
LIU Guang, RONG Guan, PENG Jun, et al. Mechanical behaviors of rock affected by mineral particle shapes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(3): 540 - 550.