

使用试验视频图像研究花岗岩中 不同矿物成分的变化特征

孙 皓,徐金明,吴红斌

(上海大学土木工程系,上海 200072)

摘要: 结合灰度分界阈值分割法和粒子图像测速技术,对单轴压缩条件下花岗岩变形破坏过程中不同矿物成分(黑云母、长石和石英)的变化特征进行了研究。由室内单轴压缩试验获得花岗岩变形破坏过程的试验视频图像;由灰度分界阈值分割法获得视频图像中岩石表面不同矿物成分的位置;使用粒子图像测速技术得到岩石表面不同时刻的位移;采用应变计算公式的差分格式得到不同位置不同方向的应变大小;在此基础上,研究了不同变形阶段岩石中不同方向应变的变化特征及其与矿物成分分布的关系。结果表明:裂缝出现前,花岗岩表面各矿物成分变形方向主要沿水平方向;裂缝发展过程中,长石变形方向主要是竖直方向,石英变形方向主要是水平方向;三种矿物成分中,最大主应变从大到小的顺序为黑云母、长石、石英。

关键词: 花岗岩;变形过程;视频图像处理

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)05-0044-06

花岗岩通常是由黑云母、长石、石英等矿物成分组成的一种非均质材料。不同矿物成分的分布特征决定了花岗岩在外力作用下的变形破坏过程。因此,分析不同矿物成分变化过程对花岗岩变形破坏过程研究具有重要意义。

关于矿物成分特征对岩石宏观力学特性和变形破坏过程的影响,已有很多成果。赵斌等^[1]使用 X 衍射及电镜扫描技术分析不同矿物微观结构对岩石力学性质参数的影响;于庆磊等^[2]根据数值模拟结果,认为非均匀性对花岗岩抗压强度影响较大;李海波等^[3]在建立花岗岩材料的本构模型基础上,分析了裂缝扩展引起的岩石非线性应变特征;HE 等^[4]利用电镜扫描技术分析单轴压缩条件下花岗岩中微裂缝的产生机理和出现位置;岳中琦等^[5]和陈沙等^[6]使用灰度阈值分割法建立了花岗岩结构有限元计算模型,分析了花岗岩的变形破坏过程;张岩等^[7]利用灰度阈值分割法分析了单轴压缩条件下花岗岩中不同组分区域的定向性变化情况。

近年来,一些学者使用视频图像处理技术研究非均质材料的表面位移、应变和变形破坏机理。徐金明等^[8]利用最大相关匹配技术和小变形假设实现了石灰岩视频图像中不同位置相对位移的计算;Koerber 等^[9]基于图像相关性分析研究了单轴压缩条件下复合材料应变场与破坏特征间的关系;Ardalan 和 Davood^[10]利用粒子图像测速技术分析不同加载条件下碳纤维混凝土中的应变分布特征;Zhang 等^[11]利用数字图像相关测量方法分析了动力荷载作用下大理岩中应变分布与裂缝扩展过程的关系;XU 等^[12]利用 MATLAB 自编程序分析了石灰岩表面的应变分布特征;雷冬等^[13]使用高速相机所摄视频图像研究了花岗岩表面的应变分布特征。

总的来说,现有研究成果主要通过视频图像分析技术分析材料表面的整体应变情况,而对材料变形破坏过程中不同矿物成分的变化特点重视不够。本文拟在灰度分界阈值分割法确定花岗岩表面不同矿物成分位置基础上,使用视频图像处理技术获得单轴压缩条件下岩石表面的应变分布,进而分析变形破坏过程中花岗岩表面不同矿物成分的变化特征及其与不同类型应变分布的关系。

1 试验视频图像的获取

本次试验所用花岗岩取自浙江省湖州市。岩块经

收稿日期: 2014-01-21; 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972191)

作者简介: 孙皓(1989-),男,硕士研究生,主要从事岩土材料变形破坏机理的研究。

通讯作者: 徐金明(1963-),男,教授,博士生导师,从事岩土工程与工程地质计算技术教学和科研工作。

E-mail: xjming@163.com

切割后磨光,制成尺寸为90mm×65mm×65mm试件。使用YE-2000型液压式压力试验机对花岗岩进行轴向压缩试验,使用HDR-CX150E型Sony摄像机拍摄试件试样正立面的变化过程,正立面尺寸为90mm×65mm,摄像机镜头距离试件50cm。

试验过程中,连续拍摄了166.44s视频图像(加载总时为56s)。其中,第20s时开始对试件进行加载,第61.28s时试件出现水平方向裂缝,第62.00s时试件出现竖直方向裂缝,第76s时试件完全破坏。选取第20~76s的视频图像进行研究。为分析方便,将开始加载时刻设为第0s。

2 不同矿物成分变化特征的计算

2.1 应变的计算

2.1.1 位移的计算

花岗岩表面各时刻的位移采用粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry)进行计算。计算时,使用相关分析得到两帧图像中相关系数最大的图块,将图块位移作为图块中心点的位移。

2.1.2 基于位移分布的应变估计

在得到不同位置位移的基础上,使用应变计算公式的差分格式进行应变计算:

$$\varepsilon_x = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{i,j} = \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{\Delta y} \quad (2)$$

式中: Δx ——水平位移 $u_{i,j}$ 和 $u_{i+1,j}$ 之间的距离;

Δy ——竖向位移 $v_{i,j}$ 和 $v_{i,j+1}$ 之间的距离。

常规计算过程会放大图像噪声、增大应变误差。本次研究时通过增加差分节点距离的方法来减小这一误差。同时,采用局部最小二乘拟合法计算应变。拟合计算时,对位移数据的一个局部子域进行计算,中心点与子域边界相距 n 个数据点,再以 $2n+1$ 个差分节点、使用局部最小二乘法求得水平方向应变 ε_x 、竖直方向应变 ε_y 及剪切应变 γ_{xy} 。差分节点长度较小会导致较大应变误差,而差分节点长度较大又会丢失应变计算时的细节部分。由于 n 从1到5时应变值方差不断减小, $n=5\sim 10$ 时应变方差变化不大,研究时以11个差分节点数计算应变。

为了研究变形破坏过程中不同矿物成分变化与主应变之间的关系,使用水平方向应变 ε_x 、竖直方向应变 ε_y 及剪切应变 γ_{xy} 计算最大主应变和最大剪切应变。计算发现,加载过程中各矿物成分最大剪切

应变变化情况相似,因此,本文使用最大主应变大小、最大主应变方向来表征不同矿物成分的变化特征。由于裂缝区域变形为大变形,研究时不计算裂缝区域的应变。

2.2 矿物位置的提取

研究时,首先将试验视频转换成多个单帧图像、截取单帧图像中的试件区域进行研究,进而将截取区域图像进行灰度化处理、并进行光照不均匀性修正、根据灰度分界阈值提取花岗岩的矿物成分(研究时,裂缝与黑云母、黑云母与长石、长石与石英的灰度分界阈值分别取21、48、83)。由于图像中存在噪点,而噪点处使用灰度分界阈值直接判断会引起误差。此时,矿物成分类型采用肉眼鉴别方法确定。图1为开始加载第0s时,试件表面不同矿物成分的分布情况。

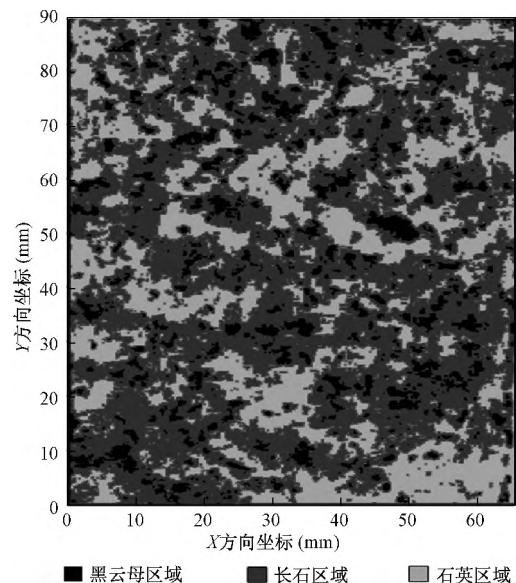


图1 花岗岩各矿物成分区域

Fig. 1 Mineral distributions on granite specimen

2.3 不同矿物成分应变的计算

计算某一矿物成分应变时,首先根据试件实际尺寸和图像像素大小关系确定试件表面任意点对应的物理位置。在此基础上,矿物区域中任意一点应变根据该矿物所处位置、使用粒子测速技术所得该点应变来确定,进而得到岩石变形破坏过程中任意时刻任一矿物成分最大主应变大小和方向。最大主应变方向采用与 x 方向的夹角表示。在花岗岩表面任取12点,各点的矿物成分与加载第10s时最大主应变如表1所示。

表 1 不同位置矿物成分的最大主应变

Table 1 Major principle strain for various minerals at different positions

位置	坐标 (mm)	图像坐标 (像素)	矿物成分	最大主应变	最大主应变方向(°)
A	(20,30)	(182,533)	石英	0.050	24.86
B	(30,30)	(272,533)	长石	0.018	150.07
C	(40,30)	(363,533)	长石	0.010	54.30
D	(50,30)	(454,533)	石英	-0.011	179.44
E	(20,40)	(182,437)	长石	-0.070	143.77
F	(30,40)	(272,437)	长石	0.051	88.49
G	(40,40)	(363,437)	石英	0.134	12.35
H	(50,40)	(454,437)	长石	0.061	104.09
I	(20,50)	(182,346)	石英	-0.008	101.67
J	(30,50)	(272,346)	长石	0.043	169.67
K	(40,50)	(363,346)	石英	-0.001	48.74
L	(50,50)	(454,346)	黑云母	0.042	20.87

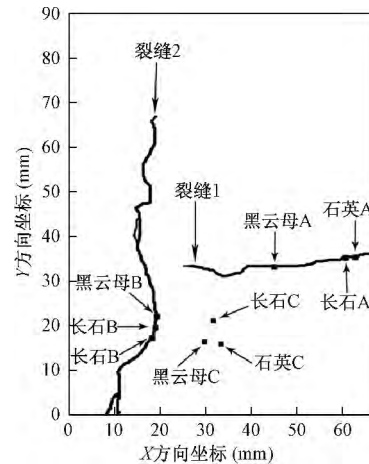


图 2 不同矿物成分的分析位置

Fig. 2 Positions of the studied minerals

3 不同变形阶段各矿物的变化特征

3.1 裂缝出现前不同矿物成分的变化特征

3.1.1 不同矿物成分的分析位置

试验过程中,花岗岩表面出现 2 条裂缝(图 2)。取图 2 中裂缝 1(黑云母 A、长石 A、石英 A)、裂缝 2(黑云母 B、长石 B、石英 B)、未出现裂缝区域(黑云母 C、长石 C、石英 C)作为分析位置,来研究矿物成分类型、分布、变化及其与不同裂缝扩展阶段的关系。

3.1.2 矿物成分中最大主应变的变化特征

图 3 为不同区域中不同矿物成分中最大主应变随时间的变化曲线。裂缝 1 和 2 分别出现在时刻 41.28s 和 42.00s,图中只分别标出了 2 条裂缝中不同矿物成分在 41.28s 和 42.00s 前的应变值变化情况。由图 3 可知,在加载过程中,黑云母、长石、石英中的最大主应变随时间上下跳动。

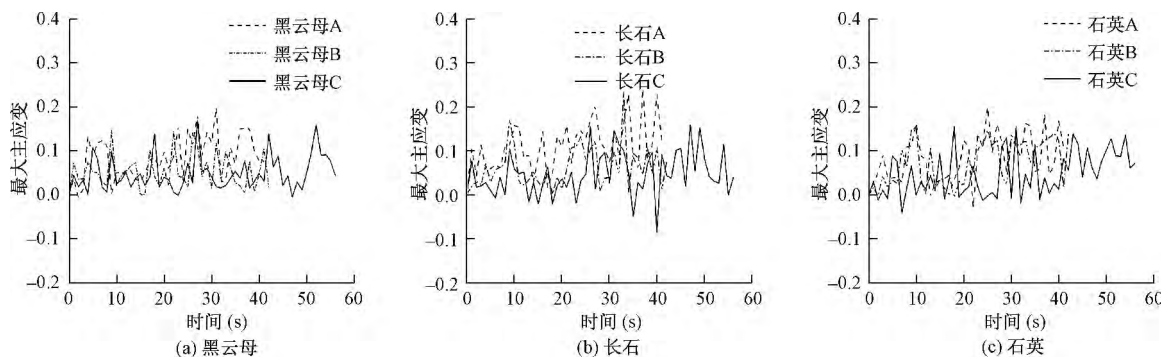


图 3 不同位置矿物成分最大主应变随时间的变化曲线

Fig. 3 Major principle strains with time for various minerals

3.2.2 裂缝所在区域各矿物成分最大主应变特征

2 个裂缝区域出现后不同矿物成分最大主应变大小随时间的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,最大

3.1.3 不同矿物成分最大主应变方向的变化

表 2 为裂缝区域 1 和裂缝 2 上不同矿物成分最大主应变方向的计算结果。由表 2 可知,各点最大主应变处于峰值时,不同矿物成分的最大主应变方向基本一致。裂缝 1 上黑云母、长石、石英最大主应变方向与裂缝延伸方向基本一致,裂缝 2 上黑云母、长石、石英最大主应变方向与裂缝延伸方向基本垂直。

3.2 裂缝发展时不同矿物成分的变化特征

3.2.1 裂缝区域的选取

观察试验视频发现,裂缝出现后花岗岩表面距离裂缝边界 5.5mm 外的区域不受裂缝影响。研究时分别取距裂缝 1 边界 5.5mm 内的区域为裂缝 1 所在区域(不包括裂缝),取距裂缝 2 边界 5.5mm 内的区域为裂缝 2 所在区域(不包括裂缝)。

主应变的变化过程可分为 3 个阶段:第一阶段为微裂缝出现阶段,对应时刻分别为 41.28s 之前(图 4a)和 42.00s 之前(图 4b),这一阶段中黑云母、长石、石英的

最大主应变大小基本相同、变化趋势较为平缓、且花岗岩表面没有出现可视裂隙; 第二阶段为裂隙延伸阶段, 历时范围分别为 41. 28 ~ 41. 44s(图 4a) 和 42. 00 ~ 42. 24s(图 4b) , 这一阶段中各矿物最大主应变迅速增加、裂隙区域不断延伸扩展; 第三阶段为花岗岩破坏阶段, 历时范围分别为 41. 38s 之后(图 4a) 和 42. 24s 之后(图 4b) , 这一阶段中不同矿物成分的最大主应变不再增加, 裂隙也不再延伸扩展。另外, 对于裂缝区域 1, 第二、三阶段平均最大主应变从大到小的顺序为黑云母、长石、石英; 对于裂缝区域 2, 不同矿物成分平均最大主应变相差很小。这三个阶段不同矿物成分的最大主应变特征, 也与张梅英^[14]采用扫描电镜技术的结果基本一致。

表 2 不同矿物成分分析位置的最大主应变方向

Table 2 Orientation of the major principle strain for various minerals in granite

位置	时刻(s)	最大主应变方向 θ_1 ($^\circ$)	垂直裂缝方向 θ_2 ($^\circ$)	$ \theta_1 - \theta_2 $ ($^\circ$)
黑云母 A	9	81. 33		86. 78
	22	91. 17		83. 38
	26	83. 75	174. 55	89. 19
	31	79. 14		84. 58
	41	77. 47		82. 92
长石 A	9	83. 73		84. 95
	24	79. 47		89. 21
	27	84. 65	168. 68	84. 03
	33	78. 96		89. 72
	38	87. 64		81. 04
石英 A	10	84. 05		79. 70
	23	72. 93		89. 19
	25	79. 77	163. 74	83. 97
	33	81. 90		81. 85
	39	86. 64		77. 10
黑云母 B	23	87. 12		2. 88
	25	68. 71		21. 29
	27	62. 90	90. 00	27. 10
	31	78. 91		11. 09
	38	77. 20		12. 80
长石 B	10	90. 48		10. 52
	27	82. 35		18. 65
	34	78. 56	101. 00	22. 44
	37	84. 97		16. 03
	40	127. 34		26. 34
石英 B	10	89. 52		5. 75
	25	94. 78		0. 49
	33	90. 88	95. 27	4. 39
	37	95. 78		0. 51
	40	95. 92		0. 65

下面进一步分析花岗岩中裂隙扩展过程中不同时刻各矿物成分最大主应变方向的变化情况。裂缝区域 1 所取时刻为 40. 88、41. 36、41. 84s, 裂缝区域 2 所取时刻为 41. 60、42. 12、42. 64s。研究时, 将最大主应变方向变化范围等分成 12 个区间,

各区间最大主应变方向以该区间方向均值来表征。图 5 为不同时刻不同矿物成分最大主应变方向分布的雷达图, a、b、c 对应于裂缝区域 1, d、e、f 对应于裂缝区域 2。

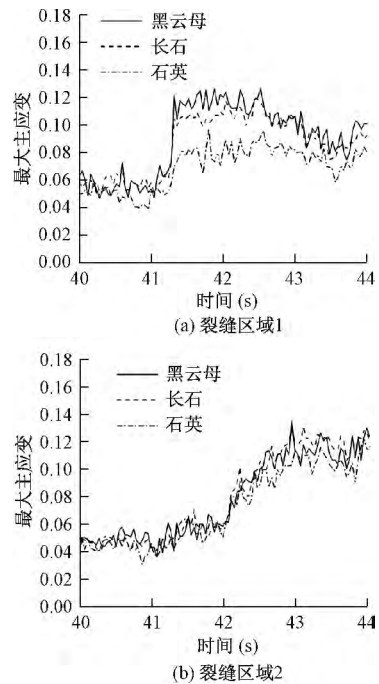


图 4 不同裂缝区域中不同矿物成分最大主应变平均值随时间的变化

Fig. 4 Changes in the mean major principle strains with time for various minerals

由图 5a、b、c 可知, 第一阶段中各矿物成分的主应变方向相差较大, 第二和第三阶段中各矿物成分主应变方向主要垂直于裂缝区域 1, 表现最为明显的分别是黑云母和长石。由图 5d、e、f 可知, 裂缝区域 2 各矿物成分最大主应变方向基本垂直于裂缝 2, 且石英表现得最为明显。由于裂缝区域 1 和 2 延伸方向分别接近于竖直方向和水平方向, 因此, 在花岗岩裂隙扩展过程中, 长石以竖直向变形为主, 石英以水平向变形为主, 黑云母变形方向与长石变形方向基本一致。

4 结论

(1) 本文使用灰度阈值分割法和粒子图像测速技术, 得到了花岗岩变形破坏过程中不同矿物成分不同方向的应变大小。

(2) 单轴压缩条件下, 花岗岩表面裂隙出现前, 不同矿物的最大主应变大小随时间上下跳动, 峰值处方向近于水平; 裂隙扩展时, 长石主要沿竖直方向变形,

石英主要沿水平方向变形; 三种矿物成分中, 最大主应变从大到小的顺序为黑云母、长石、石英。

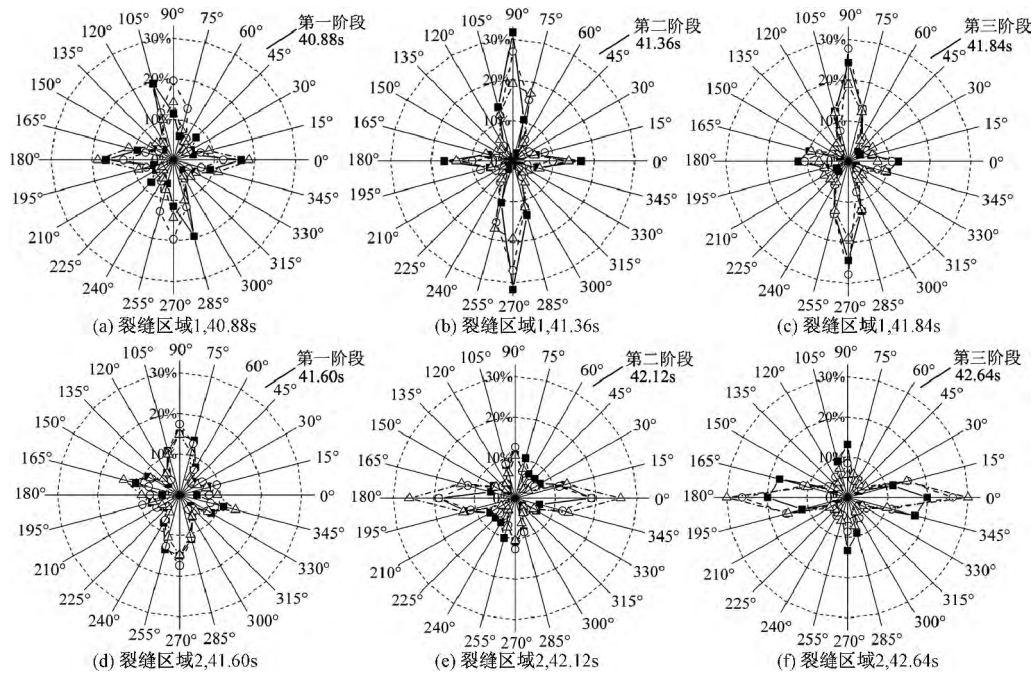


图 5 不同裂缝所在区域的矿物成分各阶段最大主应变方向分布图

Fig. 5 Major principle strain orientations of various minerals at various deformation stages

■—黑云母; ○—长石; △—石英

参考文献:

[1] 赵斌,王芝银,伍锦鹏. 矿物成分和微观结构与岩石材料力学性质的关系[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 59-63. [ZHAO B, WANG Z Y, WU J P. Relation between mineralogical composition and microstructure to the mechanical properties of rock materials [J]. Coal Geology and Exploration, 2013, 41(3): 59-63. (in Chinese)]

[2] 于庆磊,杨天鸿,郑超,等. 岩石微观结构对其变形强度影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3468-2472. [YU Q L, YANG T H, ZHEN C, et al. Numerical analysis of influence of rock mesostructure on its deformation and strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3468-2472. (in Chinese)]

[3] 李海波,赵坚,李俊如,等. 基于裂纹扩展能量平衡的花岗岩动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1683-1688. [LI H B, ZHAO J, LI J R, et al. Study on constitutive relation of rock under dynamic compression based on energy balance during crack growth [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 22(10): 1683-1688. (in Chinese)]

[4] HE Man-chao, NIE Wen, HAN Li-qiang, et al.

Microcrack analysis of Sanya granite fragments from rockburst tests [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20: 238-243.

[5] 岳中琦,陈沙,郑宏,等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 32(6): 889-897. [YUE Z Q, CHEN S, ZHENG H, et al. Digital image proceeding based on finite element method for geomaterials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 32(6): 889-897. (in Chinese)]

[6] 陈沙,岳中琦,谭国焕. 基于真实微观结构的岩土工程材料三维数值分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1951-1959. [CHEN S, YUE Z Q, TAN G H. Actual mesostructure based three-dimensional numerical modeling method for heterogeneous geomaterials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 1951-1959. (in Chinese)]

[7] 张岩,徐金明,张文清. 使用图像分析方法研究单轴压缩条件下花岗岩中微观组分的定向性变化[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 66-73. [ZHANG Y, XU J M, ZHANG W Q. Orientation of meso-components in granite under uniaxial compression using image analysis [J]. Hydrogeology

- & Engineering Geology ,2012 ,39(2) : 66 – 73. (in Chinese)]
- [8] 徐金明,王强,周廷文. 根据试验视频确定石灰岩中的位移场[J]. 水文地质工程地质,2010,37(2): 70 – 75. [XU J M, WANG Q, ZHOU T W. Displacement field of limestone using video images from laboratory tests [J]. Hydrogeology & Engineering Geology ,2010 ,37(2) : 70 – 75. (in Chinese)]
- [9] Koerber H ,Xavier J ,Camanho P P. High strain rate characterization of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation [J]. Mechanics of Materials ,2010 ,42: 1004 – 1019.
- [10] Ardalan Hosseini , Davood Mostofinejad. Effect of groove characteristics on CFRP-to-concrete bond behavior of EBROG joints: experimental study using particle image velocimetry (PIV) [J]. Construction and Building Materials ,2013 ,49: 364 – 373.
- [11] Zhang Q B , Zhao J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2013 ,60: 423 – 439.
- [12] XU Jin-ming , CHENG Chang-hong , LU Hai-ping. Strain field investigation of limestone specimen under uniaxial compression loads using particle image velocimetry [J]. Journal of Central South University of Technology ,2011 ,18: 1619 – 1625.
- [13] 雷冬,乔丕忠,李昂,等. 岩石动力破坏的高速数字图像相关研究[J]. 煤炭学报,2011,36(增2): 274 – 277. [LEI D , QIAO P Z , LI A , *et al.* High-speed digital image correlation studies for dynamic damage of rock [J]. Journal of China Coal Society , 2011 ,36(S 2) : 274 – 227. (in Chinese)]
- [14] 张梅英,袁建新,李廷芥,等. 单轴压缩过程中岩石变形破坏机理[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(1): 1 – 8. [ZHANG M Y , YUAN J X , LI T J , *et al.* Mechanism of deformation and failure for rock in uniaxial compression test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,1998 ,17(1) : 1 – 8. (in Chinese)]

An investigation of mineral composition changes on granite surface using video images from uniaxial compression test

SUN Hao , XU Jin-ming , WU Hong-bin

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

Abstract: Variations in minerals on the granite surface including biotite , feldspar and quartz are investigated by the comprehensively use of the video images , which is a threshold segmentation technique and the particle image velocimetry. The video images of the specimen surface , which reflect the deformation/failure process of the granite , are photographed in the laboratory uniaxial compression test. The position of each composition in each frame is extracted using the grayscale threshold segmentation. The displacement distributions and their changes with time are further computed using the particle image velocimetry technique. The different types of strains at various directions are thereafter obtained by using a differential format in theoretically computing strains. The changes in various strains with time and their relations with the mineral distributions are also explored. The results show that most of the deformations appeared in the horizontal direction before cracks initiate; as the cracks develop , most of the feldspar and quartz propagate respectively along the vertical and horizontal directions , whereas in the major principle strains , biotite is the largest , feldspar is medium , quartz is the least. The results presented herein may be referable in investigating the failure mechanism of rock materials.

Key words: granite; deformation procedure; video image processing

责任编辑:张明霞