

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.16

基于 PFC^{2D} 的花岗岩新生裂隙萌生扩展过程分析

钱庆波¹, 徐金明^{1,2}, 黄继忠²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海大学文化遗产保护基础科学研究院, 上海 200444)

摘要: 岩石中新生裂隙萌生扩展过程是分析岩石工程性质的重要基础, 可以使用颗粒流方法进行研究。本文使用花岗岩室内单轴压缩试验结果标定细观力学性质参数, 使用图像处理技术确定花岗岩细观组分的实际分布, 通过编制颗粒流代码来确定新生裂隙的类型和萌生扩展过程, 分析了岩石变形破坏过程中不同类型新生裂隙变化的阶段性。结果表明, 在单轴压缩条件下, 花岗岩中新生裂隙萌生时首先出现剪切裂隙, 然后出现拉伸裂隙, 新生裂隙类型以拉伸裂隙为主; 第一条新生剪切裂隙和拉伸裂隙分别出现在石英-黑云母、长石-石英之间; 新生拉伸裂隙和剪切裂隙走向分别以 $331^{\circ} \sim 340^{\circ}$ 和以 $341^{\circ} \sim 350^{\circ}$ 为主; 在峰值荷载前后新生裂隙扩展表现出明显不同的特点, 在峰值荷载之前新生裂隙经受了压密、剪切裂隙增长、拉伸裂隙和剪切裂隙共同增长等阶段, 在峰值荷载之后新生裂隙主要经受了拉伸裂隙和剪切裂隙快速增长阶段。本文结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; 实际分布; 颗粒流; 新生裂隙

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0122-09

Analysis on the initiation and propagation of newly-generated cracks in granite using PFC^{2D}

QIAN Qingbo¹, XU Jinming^{1,2}, HUANG Jizhong²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Institute for the Conservation of Cultural Heritage, Shanghai 200444, China)

Abstract: The initiation and propagation process of newly-generated micro-cracks in rocks is an important basis for analyzing the engineering properties of rocks which can be investigated using particle flow simulation method. In this study, the meso-scale mechanical properties of the granite were calibrated by the laboratory uniaxial compressive experiment, and the real composition distribution of the meso-components in granite was determined by the image processing technology. The particle flow code was then used to determine the types and the initiation and propagation process of newly-generated micro-cracks. The features of the newly-generated cracks in various stages during the deformation or failure process in rocks were furthermore explored. The results show that: (1) under the uniaxial compression load, the most initiated cracks are tensile ones with the firstly-generated shear cracks and following by tensile cracks; (2) the first newly-generated shear crack occurred between the quartz and biotite, as well as the first newly-generated tensile crack occurred between feldspar and quartz; (3) the strikes of the newly-generated tensile and shear cracks are 331° to 340° and 341° to 350° respectively; (4) the propagation of newly-generated cracks shows different features before and after peak load. Before peak load, the newly-generated cracks undergo the stages of compaction, growth of shear

收稿日期: 2019-01-21; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472254)

第一作者: 钱庆波(1992-), 男, 江西上饶人, 硕士, 主要从事岩土工程的科研工作。E-mail: qianqingbo_5@163.com

通讯作者: 徐金明(1963-), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: xjming@163.com

crack with increase of tensile and shear cracks, and rapid increase of tensile and shear cracks, while the tensile and shear cracks increase rapidly after peak load. These results will provide certain reference for the analysis of rock deformation or failure mechanism.

Keywords: granite; real distribution; particle flow; newly-generated cracks

0 引言

岩石通常由不同细观组分组成,而不同组分类型和分布对岩石力学特性有很大影响。岩石中新生裂隙的萌生扩展过程对岩石的变形破坏具有决定作用,是分析岩石工程性质的重要基础。

目前,使用数值方法研究岩石的变形破坏过程已有许多成果。张仕林等^[1]使用单轴压缩试验和数值模拟研究了红砂岩中张开度对裂隙扩展的影响,表明含裂隙试件的起裂强度、峰值强度及弹性模量等力学参数随裂隙张开度的增大均呈线性减少;钟波波等^[2]运用 RFPA(岩石破裂过程分析)软件研究了裂纹分布和围压对岩石裂纹扩展过程的影响,认为试样平均峰值强度随裂纹倾角增加而增加、试样破裂形式在高低围压下具有明显不同的特点;周喻等^[3]使用节理颗粒流模型分别进行了岩石宏观和细观力学演化特征和破坏机制的分析,发现荷载增加后新生裂纹在节理面附近产生,并且节理面剪切位移和颗粒破坏数相应增加;朱泽奇等^[4]使用 FLAC(连续介质快速拉氏分析)软件对花岗岩进行了破坏过程模拟,分析了破坏过程的应力集中现象,应力集中主要出现在长石颗粒分布区域,压应力集中区平行于加载方向分布,拉应力集中区垂直于加载方向分布;唐春安等^[5]采用 RFPA 软件对含预置裂隙岩石进行了单轴压缩数值模拟,研究了岩石非均质性对裂纹扩展过程的影响,分析了受压试件在裂纹扩展过程中的应力场、应变场及声发射现象。

近年来,岩石变形破坏过程中裂隙萌生扩展特征的研究,也取得了很多成果。王江峰等^[6]采用 RFPA 软件对单裂纹扩展规律进行了研究,认为均质性好的岩体起裂应力大于均质性差的岩体;WANG 等^[7]使用花岗岩压缩试验,研究了岩体变形破坏的尺寸效应,估算出岩体的表征单元体最小尺寸为 $9\text{ m} \times 9\text{ m}$;高美奔等^[8]对岩石变形破坏阶段特征进行分析,提出了岩石强度特征值确定的新方法,得出压密应力、起裂应力和损伤应力分别为峰值应力的 0.1、0.56 和 0.68 倍;付金伟等^[9]使用树脂试件单轴压缩试验分析了裂隙的扩展机制,试件破坏分为 4 个阶段,三维情况比二维情况更为复杂;NICKSIAR 和 MARTIN^[10]研究了低孔隙

率岩石的裂纹萌生扩展过程,提出了确定低孔隙岩石中裂隙萌生的 LSR 法(侧向应变反应法);朱红光等^[11]采用 CT(计算机层析)对岩石变形破坏中的裂隙演化特征进行识别,使用分形指标 R_d 分析了微裂隙的演化过程,发现随应力增加、 R_d 呈现增加-减小-增加的变化;李延春等^[12]根据三轴加载条件下岩石试件的 CT 实时扫描结果,研究了裂隙的扩展过程,表明在外荷载作用下裂隙压密明显、翼裂纹扩展较缓慢、自相似扩展较明显;任建喜等^[13]进行了单轴压缩条件下含单一裂隙砂岩细观损伤破坏机理的 CT 实时试验,发现裂纹宽度在损伤快速阶段增长较快、在峰值荷载后加速增加;HAZZARD 等^[14]分析了岩石中产生颗粒破坏的声发射特征;黄明利等^[15]应用 RFPA 软件对不同粒度和缺陷分布的岩石进行了破裂过程的数值模拟,发现非均质对岩石裂纹扩展影响较大;傅宇方等^[16]采用 RFPA 软件研究了不同围压下孔壁周边裂纹演化机制,指出裂纹的演化与局部应力集中、岩石材料的非均质性有关。

现有成果虽然通过建立岩石数值模型分析了岩石的力学性质和破坏过程,但对岩石中细观组分的实际分布重视不够、新生裂隙的萌生扩展过程分析也不够深入。本文拟根据室内单轴压缩试验视频,采用数字图像处理技术建立基于实际分布的花岗岩颗粒流模型,根据数值模拟结果分析单轴压缩条件下岩石中新生裂隙的类型、分布、萌生扩展过程及其与细观组分的关系。

1 数值模型的建立

1.1 岩石中不同组分实际位置的确定

岩块为花岗岩,取自甘肃北山地区。将岩块加工成 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的试块、进行单轴压缩试验,使用摄像机拍摄试验过程并得到试验视频,使用数字图像处理技术分析视频中的单帧图像,将单帧彩色图像转化为灰度图像(图 1)。使用阈值分割法和点选技术,得到了岩石中不同细观组分的像素坐标。考虑到图像坐标系和颗粒流模型中物理坐标系的差异,对细观组分位置坐标进行转换、得到了不同组分的实际分布。

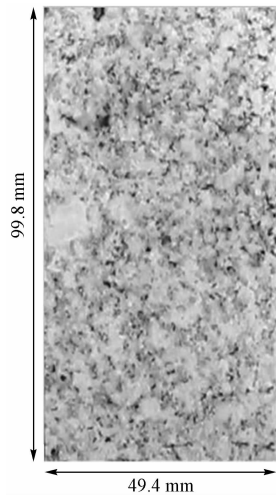


图 1 花岗岩试块的灰度图像

Fig. 1 Gray image of granite specimen

1.2 花岗岩试样几何模型的建立

本文根据实际分布来建立岩石颗粒流模拟的几何模型。颗粒圆盘最小半径 $R_{\min}$ 取 0.5 mm, 最大半径和最小半径比为 1.66, 颗粒分布采用 PFC^{2D} (二维颗粒流代码) 中的 FishTank 包随机生成。所建花岗岩颗粒流模型如图 2 所示。

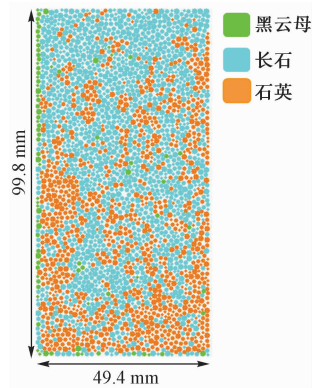


图 2 基于组分实际分布的花岗岩颗粒流模型

Fig. 2 Particle flow model of granite based on real composition distribution

1.3 花岗岩细观力学性质参数的确定

颗粒之间连接采用平行粘结模型, 相应细观力学性质参数根据室内试验结果来标定。室内单轴压缩试验得到的宏观力学性质参数为: 弹性模量 $E = 54.32 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.154$, 峰值应力 $\sigma = 81.77 \text{ MPa}$ 。根据这些参数, 参考 POTYONDY 等^[17]、徐金明等^[18]的方法, 得到细观力学性质参数(表 1)。室内试验与模拟试验应力-应变全过程曲线如图 3 所示。

不同组分颗粒之间的连接强度存在差异, 根据不同组分硬度大小关系(石英 > 长石 > 黑云母), 将长石-长石的平行连接强度作为细观力学参数基本值, 石英-石英、黑云母-黑云母的平行连接强度取基本值的 1.6 倍和 0.3 倍, 不同组分之间的平行连接强度取相应细观组分平行连接强度的平均值。

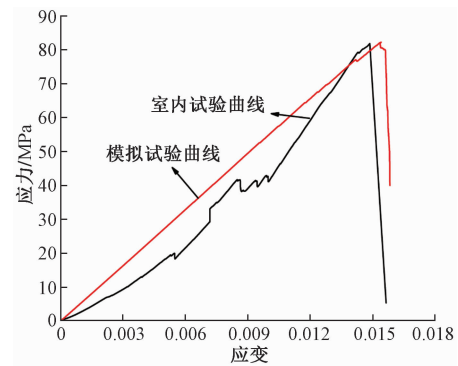


图 3 试件的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of specimen

表 1 颗粒流模型中花岗岩的细观物理力学性质参数

Table 1 Meso-scale physical and mechanical parameters of granite by particle flow simulation

材料	参数类型	参数单位	参数大小
颗粒	最小半径	m, $\times 10^{-3}$	0.5
	粒径比	-	1.66
	密度	kg/cm ³	2.63
	弹性模量	Pa, $\times 10^9$	21
	刚度比	-	1
	摩擦系数	-	0.5
	法向强度均值	Pa, $\times 10^6$	27.9
胶结物 (平行连接)	法向强度标准差	Pa, $\times 10^6$	5
	刚度比	-	1.2
	切向强度均值	Pa, $\times 10^6$	23.9
	切向强度标准差	Pa, $\times 10^6$	5
	接触模量	Pa, $\times 10^9$	1.6
	半径乘值	-	1

2 新生裂隙萌生扩展过程分析

2.1 不同类型新生裂隙萌生的判别方法

花岗岩中的新生裂隙包括两种类型: 剪切裂隙和拉伸裂隙。新生裂隙的萌生扩展受制于岩石中的局部应力集中。定义

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{F}_n}{A}, \quad \bar{\tau} = \frac{\bar{F}_s}{A} \quad (1)$$

$$\bar{\tau}_c = \bar{c} - \sigma \tan \bar{\varphi} \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}$ ——平行连接的法向应力;
 $\bar{F}_n$ ——平行连接键受到的拉力;
 $\bar{A}$ ——颗粒的横截面面积;
 $\bar{\tau}$ ——平行连接的切向应力;
 $\bar{F}_s$ ——平行连接键受到的剪力;
 $\bar{c}$ ——黏聚力;
 σ ——平行连接剪切破坏面上的正应力;
 φ ——内摩擦角。 $\bar{\sigma} > \sigma_c$ 时发生拉伸破坏, $\bar{\tau} > \tau_c$ 时发生剪切破坏;
 τ_c ——平行连接切向连接强度;
 σ_c ——平行连接法向连接强度。

本文使用 FISHCALL 跟踪颗粒接触点破坏情况,

根据内置函数传递参数来确定外荷作用下岩石中新生剪切和拉伸裂隙的位置和类型。

2.2 不同类型新生裂隙萌生方向的变化

为便于后续分析,对于任一加载时刻,将应力水平定义为外荷大小与峰值荷载的比值;将试件上部、左边和右边方向分别设置为 0° (或 360° , 正北)、 270° 、 90° 。

由于节理走向玫瑰花图可以直观反映节理走向的分布特征,研究时通过编制 FISH 代码得到每条新生裂隙的位置与走向。不同应力水平下新生拉伸和剪切裂隙的走向统计结果见图 4, 峰值荷载后应力水平 0.49 时 (即岩石破坏时) 新生拉伸和剪切裂隙走向的统计结果分别见表 2 和表 3。

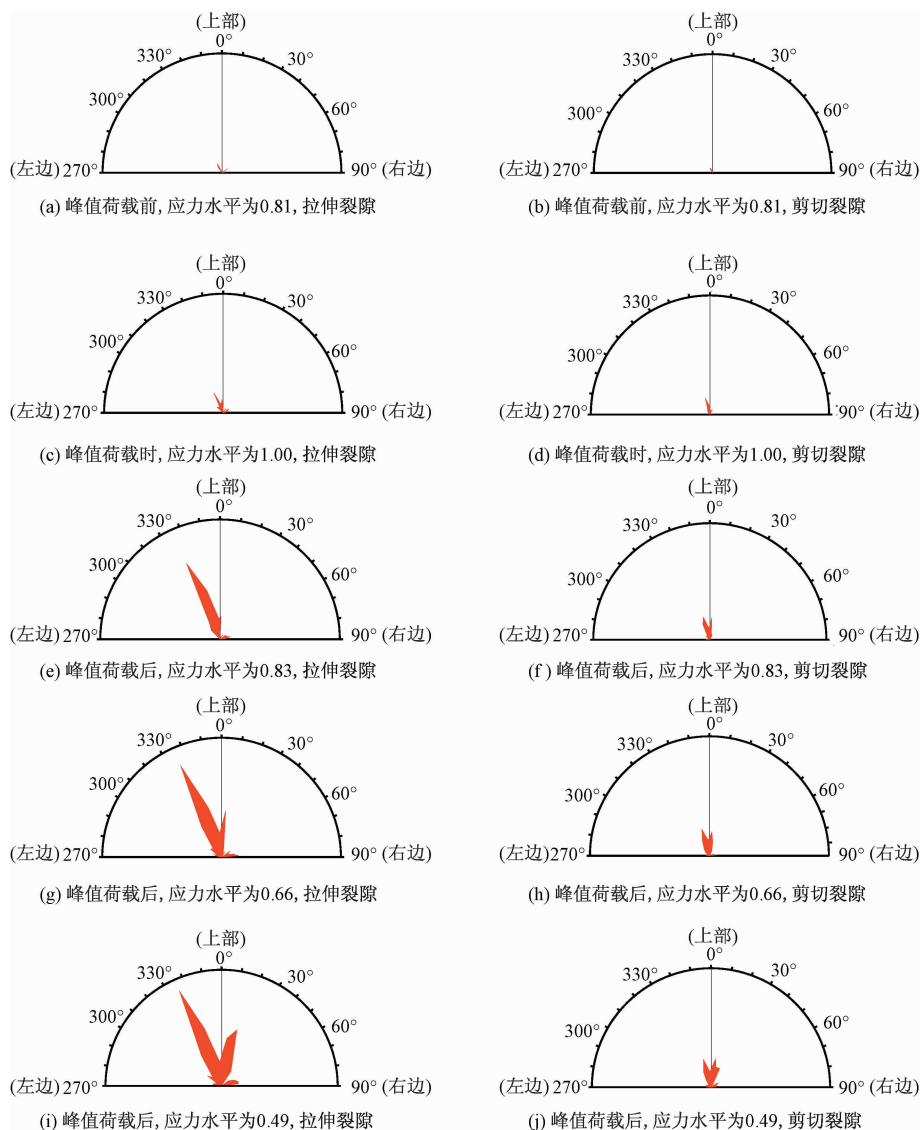


图 4 不同应力水平下新生裂隙走向玫瑰花图

Fig. 4 Strike Rose diagrams of newly-generated cracks with various load levels

表 2 峰值荷载后应力水平 0.49 时新生拉伸裂隙走向分布

Table 2 Strike distribution of newly-generated tensile cracks at stress level of 0.49 after peak load

走向区间	平均走向/(°)	条数	走向区间	平均走向/(°)	条数
1° ~ 10°	6	28	270° ~ 280°	275	5
11° ~ 20°	15	35	281° ~ 290°	286	5
21° ~ 30°	26	14	291° ~ 300°	296	3
31° ~ 40°	33	10	301° ~ 310°	305	10
41° ~ 50°	0	0	311° ~ 320°	313	7
51° ~ 60°	54	5	321° ~ 330°	326	21
61° ~ 70°	65	8	331° ~ 340°	336	61
71° ~ 80°	75	10	341° ~ 350°	344	34
81° ~ 90°	84	10	351° ~ 360°	356	14

表 3 峰值荷载后应力水平 0.49 时新生剪切裂隙走向分布

Table 3 Strike distributions of newly-generated shear cracks at stress level of 0.49 after peak load

走向区间	平均走向/(°)	条数	走向区间	平均走向/(°)	条数
1° ~ 10°	5	14	270° ~ 280°	272	3
11° ~ 20°	14	10	281° ~ 290°	281	2
21° ~ 30°	30	10	291° ~ 300°	294	3
31° ~ 40°	36	2	301° ~ 310°	306	2
41° ~ 50°	41	1	311° ~ 320°	317	2
51° ~ 60°	57	4	321° ~ 330°	326	4
61° ~ 70°	64	4	331° ~ 340°	334	10
71° ~ 80°	76	3	341° ~ 350°	345	16
81° ~ 90°	87	3	351° ~ 360°	356	8

由图 4 可以看出,在峰值应力前,应力水平 0.81 时,新生裂隙较少,新生拉伸裂隙主要分布于 331° ~ 340°,新生剪切裂隙主要分布于 321° ~ 330°;在峰值应力时,拉伸裂隙在 331° ~ 340° 增加较多、裂隙分布较为集中,而剪切裂隙在 341° ~ 350° 增加较多;在峰值应力后,拉伸和剪切裂隙增加较快、相应区间分别主要是 331° ~ 340° 和 341° ~ 350°,试件进入破坏阶段时新生拉伸裂隙主要分布于 1° ~ 10°、11° ~ 20°、331° ~ 340° 和 341° ~ 350° (尤其是 331° ~ 340°)、新生剪切裂隙较多分布于 1° ~ 10° 和 341° ~ 350° (尤其是 341° ~ 350°)。

2.3 不同类型新生裂隙数目的变化

图 5 为试件中不同类型新生裂隙数目随加载时刻的变化情况。由图 5 可以看出,外荷作用下花岗岩中新生裂隙的萌生扩展过程在峰值应力前后表现出不同的特点:在峰值应力之前(峰前),试件经受了裂隙压密阶段(第 I 阶段)、剪切裂隙增长阶段(第 II 阶段)、拉伸裂隙和剪切裂隙共同增长阶段(第 III 阶段);在峰值应力之后(第 IV 阶段),试件中拉伸和剪切裂隙快速增长。

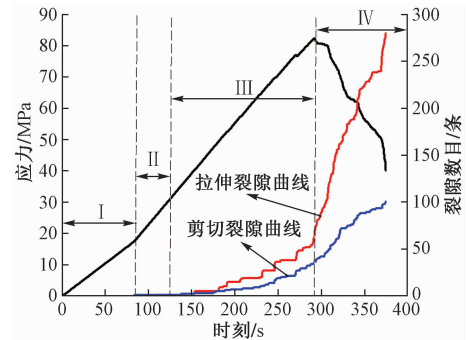


图 5 不同时刻不同类型新生裂隙的数目
Fig. 5 Number of various new-generated micro-cracks at various times

2.3.1 第 I 阶段新生裂隙萌生扩展特征

图 6 表示第 I 阶段新生剪切裂隙数目的变化。由图 6 可以看出,在第 I 阶段(即 84 s 前),花岗岩逐步压密、未出现新生裂隙。

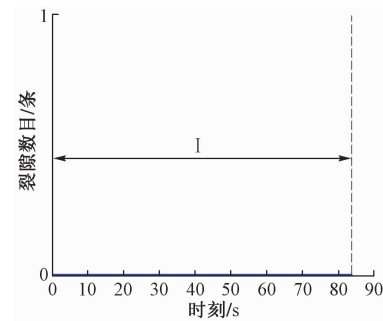


图 6 第 I 阶段花岗岩中新生裂隙数目的变化过程
Fig. 6 Number of newly-generated crack vs. time in granite

2.3.2 第 II 和第 III 阶段新生裂隙萌生扩展特征

图 7 表示第 II 和第 III 阶段不同应力水平下岩石中不同类型新生裂隙的分布。由图 7 可以看出,在外荷较小时,试件中首先出现剪切裂隙、位于试件左上角

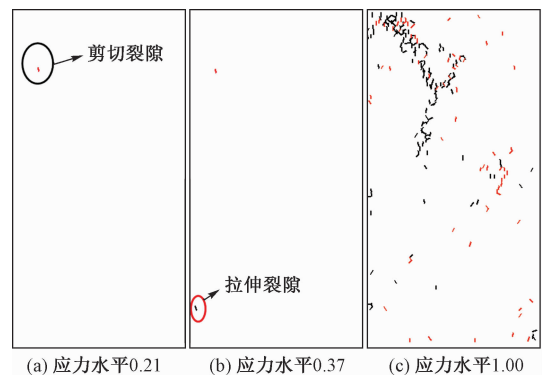


图 7 不同应力水平下花岗岩中的新生裂隙分布
Fig. 7 Distribution of newly-generated microcracks in granite at various load levels

(图7(a));随后,在试件左下角出现拉伸裂隙(图7(b)),剪切裂隙较拉伸裂隙分布更为广泛(图7(c));随着加载的进行,拉伸裂隙和剪切裂隙数目都不断增加,左上角出现剪切带。

图8表示第Ⅱ和第Ⅲ阶段试件中不同类型裂隙数目的变化情况。由图8可知,在第Ⅱ阶段,剪切裂隙较早出现;在第Ⅲ阶段,随着加载的继续,拉伸裂隙出现,拉伸裂隙和剪切裂隙共同增长;外荷近峰值应力时,裂隙稳定增长,拉伸裂隙数目从0增长到62,剪切裂隙数目从1增长到35条,拉伸裂隙增长速度比剪切裂隙更快一些。

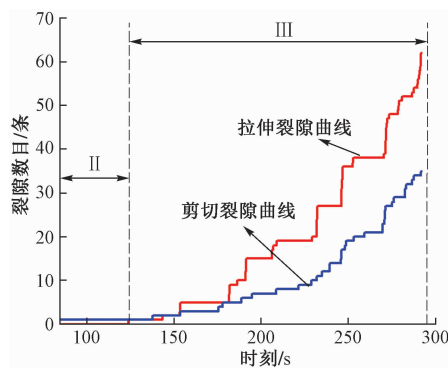


图8 第Ⅱ和第Ⅲ阶段花岗岩中新生裂隙数目的变化过程

Fig.8 Number of cracks at stages of II and III

2.3.3 第Ⅳ阶段新生裂隙萌生扩展特征

图9表示第Ⅳ阶段不同应力水平时岩石中不同类型新生裂隙的分布情况。由图9可以看出,在峰值应力后不久,试件左上角剪切带基本贯通,剪切带向下侧中部发展(图9(a))。此后(图9(b)),随着加载的继续,出现了很多的新生裂隙,剪切带逐渐发展为破裂面,破裂面向试件中部发展;同时在试件右上角出现两条剪切带,一条与左侧向中部扩展的剪切带连接,另一条向右侧发展。由图9还可以看出,在第Ⅳ阶段,新生裂隙中的拉伸裂隙数目明显多于新生剪切数目。

试件破坏外观情况的室内试验和颗粒流模拟结果见图10。由图10可以看出,根据模拟结果,试件破坏发生在左上角、与室内试验时试样左上角首先出现片帮脱落基本一致。但是,数值模拟时试件右侧出现的第二条裂隙一直向右发展、并形成贯通裂隙,而室内试验中试件右上侧破坏出现后向下扩展;数值模拟时第三条贯通裂隙在试件右侧出现后一直向左扩展并贯通,而室内试验中第三条贯通裂隙在试件右侧萌生、向试件左侧和中下部扩展。

图11表示第Ⅳ阶段试件中新生拉伸和剪切裂隙

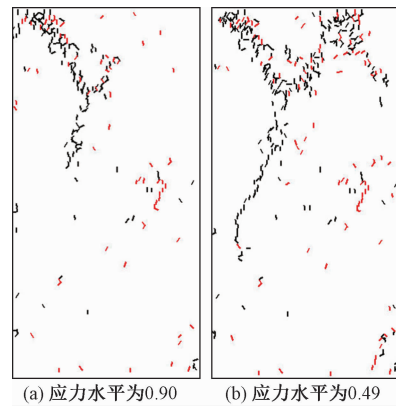


图9 峰值荷载后不同应力水平下的新生裂隙分布

Fig.9 Distribution of newly-generated micro-cracks with various stress levels after peak load

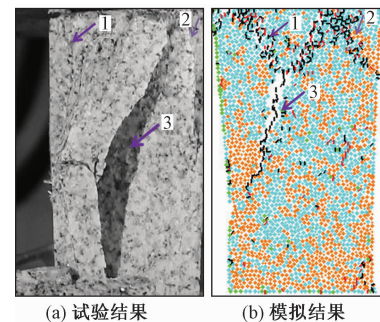


图10 试件破坏外观的试验结果和模拟结果

Fig.10 Outline of granite sample after failure from laboratory test and particle flow simulation

数目的变化情况。从图11可以看出,应力达到最大值时,试件完整性没有完全丧失、还具有一定的承载能力;随着加载的继续,应力快速下降,拉伸裂隙和剪切裂隙数目快速增长,拉伸裂隙数目从62增加到280条,剪切裂隙数目从35增加到101条,拉伸裂隙数目增长快于剪切裂隙增长,花岗岩逐步拉伸破坏。

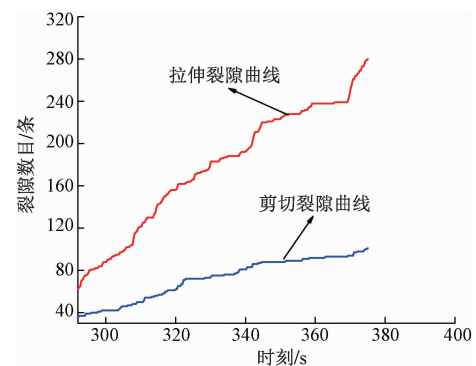


图11 第Ⅳ阶段花岗岩中新生裂隙数目的变化过程

Fig.11 Number of tensile cracks at stage IV

2.4 新生裂隙萌生扩展与细观组分的关系

下面使用颗粒流模拟结果来分析新生裂隙萌生扩展与细观组分的关系。

图 12 和图 13 分别为峰值荷载前第一条新生剪切和拉伸裂隙出现时不同细观组分分布与局部放大图,应力水平分别为 0.21 和 0.37,加载时刻分别为 84 s 和 124 s。从图 12 和图 13 可以看出,在峰值荷载前,第一条新生剪切裂隙出现在石英组分和黑云母组分之间,第一条新生拉伸裂隙出现在长石组分和石英组分之间。

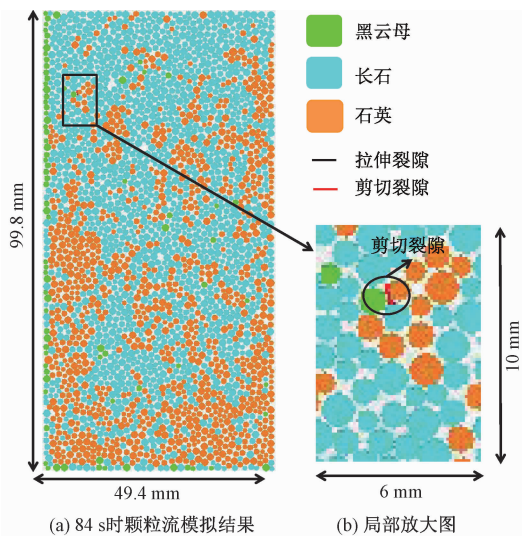


图 12 第一条新生剪切裂隙出现时不同细观组分分布

Fig. 12 Distribution of meso-components with firstly-generated shear crack

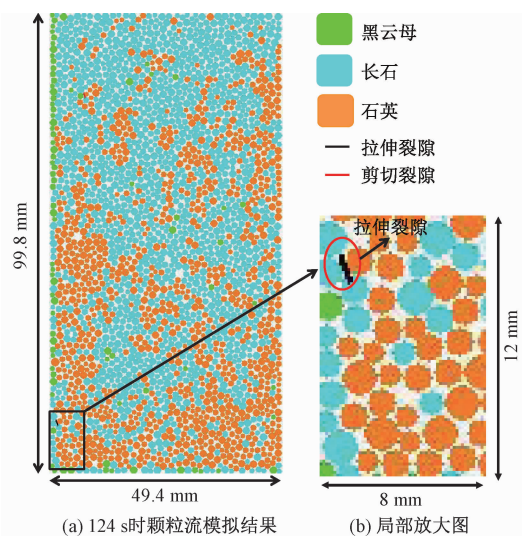


图 13 第一条新生拉伸裂隙出现时不同细观组分分布

Fig. 13 Distribution of meso-components with firstly-generated tensile crack

图 14 为破坏时不同细观组分分布与局部放大图,应力水平为 0.49,加载时刻为 375 s。从图 14 可以看出,在峰值荷载后,新生裂隙位置主要是长石-长石之间。

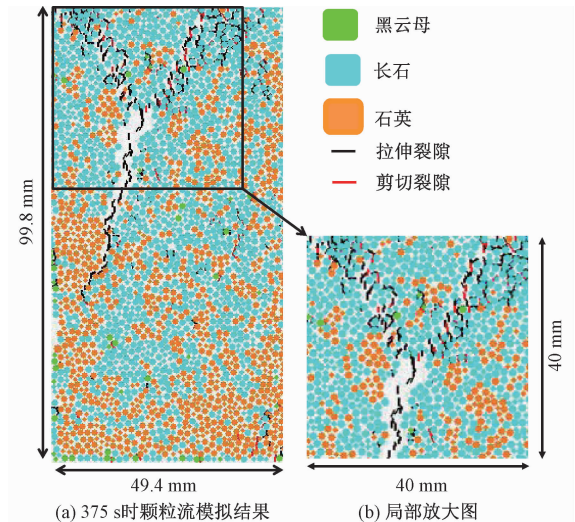


图 14 破坏时不同细观组分分布

Fig. 14 Distribution of failure meso-components cracks

3 结论

本文使用花岗岩室内单轴压缩试验视频和数字图像处理技术,建立了基于实际分布的岩石颗粒流模拟模型,分析了单轴压缩条件下岩石中新生裂隙的萌生扩展过程,探讨了新生裂隙类型、分布及其与细观组分的关系,得到以下结论:

(1) 将试件向上、向右、向左方向分别为 0° 、 90° 、 270° ,新生拉伸裂隙走向主要是 $1^\circ \sim 10^\circ$ 、 $11^\circ \sim 20^\circ$ 、 $331^\circ \sim 340^\circ$ 和 $341^\circ \sim 350^\circ$ (在 $331^\circ \sim 340^\circ$ 最多),新生剪切裂隙走向主要是 $1^\circ \sim 10^\circ$ 和 $341^\circ \sim 350^\circ$ (尤以 $341^\circ \sim 350^\circ$ 为多),新生裂隙类型以拉伸裂隙为主;

(2) 单轴压缩条件下,花岗岩中新生裂隙在峰值应力前后表现出不同的特点,在峰值应力前新生裂隙萌生扩展过程分为裂隙压密、剪切裂隙增长、拉伸裂隙和剪切裂隙共同增长三个阶段,在峰值应力后拉伸裂隙和剪切裂隙快速增长;

(3) 在峰值荷载前,应力水平为 0.21 时,在试件左上角出现剪切裂隙、位置是石英-黑云母之间;应力水平为 0.37 时,在试件左下角出现拉伸裂隙、位置是长石-石英之间;

(4) 在峰值荷载后,应力水平为 0.90 时试件左上角新生裂隙贯通成剪切带,此后剪切带向试件下侧中部扩展,应力水平降为 0.49 时剪切带发展为破裂面;

峰值荷载后的新生裂隙,主要位于长石-长石之间。

参考文献:

- [1] 张仕林, 杜贻腾, 李延春, 等. 单轴压缩荷载下红砂岩不同张开度三维通透裂隙扩展机理研究 [J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(4): 548-553.
ZHANG Shilin, DU Yiteng, LI Yanchun, et al. Propagation mechanism of 3D through fracture with under uniaxial load [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(4): 548-553.
- [2] 钟波波, 张永彬, 李宏. 基于 RFPA^{2D} 的岩石裂纹扩展模式的研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(2): 82-88.
ZHONG Bobo, ZHANG Yongbin, LI Hong. Study of mechanisms of crack propagation of rock based on RFPA^{2D} [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(2): 82-88.
- [3] 周喻, MSIRA A, 吴顺川, 等. 岩石节理直剪试验颗粒流宏观分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1245-1256.
ZHOU Yu, MISRA A, WU Shunchuan, et al. Macro-and meso-analyses of rock joint direct shear test using particle flow theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1245-1256.
- [4] 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]. 岩土力学, 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.
- [5] 唐春安, 刘红元, 秦四清, 等. 非均质性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 116-121.
TANG Chun'an, LIU Hongyuan, QIN Siqian, et al. Influence of heterogeneity on crack propagation modes in brittle rock [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 116-121.
- [6] 王江峰, 王振华, 臧冀川. 利用 RFPA^{2D} 对单裂纹扩展规律的研究 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(5): 26-29.
WANG Jiangfeng, WANG Zhenhua, ZHANG Jichuan. Study of single crack propagation by RFPA^{2D} [J]. Coal Technology, 2018, 37(5): 26-29.
- [7] WANG P H, YANG T Y, XU T, et al. Numerical analysis on scale effect of elasticity, strength and failure patterns of jointed rock masses [J]. Geosciences Journal, 2016, 20(4): 539-549.
- [8] 高美奔, 李天斌, 孟陆波, 等. 岩石变形破坏各阶段强度特征值确定方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 3577-3588.
GAO Meiben, LI Tianbin, MENG Lubo, et al. The method to identify characteristic stresses of rock in different stages during failure process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3577-3588.
- [9] 付金伟, 朱维申, 谢富东, 等. 岩石中三维双裂隙组扩展和贯通过程的试验研究和弹脆性模拟 [J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2489-2495.
FU Jinwei, ZHU Weishen, XIE Fudong, et al. Experimental studies and elasto-brittle simulation of propagation and coalescence process of two three-dimensional flaws in rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2489-2495.
- [10] NICKSIAR M, MARTIN C D. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45: 607-617.
- [11] 朱红光, 谢和平, 易成, 等. 岩石材料微裂隙演化的 CT 识别 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1230-1238.
ZHU Hongguang, XIE Heping, YI Cheng, et al. CT identification of microcracks evolution for rock materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1230-1238.
- [12] 李延春, 吕海波. 三轴压缩荷载作用下单裂隙扩展的 CT 实时扫描试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 289-296.
LI Yanchun, LYU Haibo. CT real-time scanning tests on single crack propagation under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 289-296.
- [13] 任建喜, 惠兴田. 裂隙岩石单轴压缩损伤扩展细观机 CT 分析初探 [J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 48-52.
REN Jianxi, HUI Xingtian. Primary study on meso-damage propagation mechanism of cracked-sandstone using computerized tomography under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S): 48-52.
- [14] HAZZARD J F, YOUNG R P, MAXWELL S C.

- Micromechanical modeling of cracking and failure in brittle rocks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B7): 16683 – 16697.
- [15] 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石破裂过程的数值模拟研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(4): 468 – 471.
HUANG Mingli, TANG Chunan, ZHU Wancheng. Numerical simulation on failure process of rock [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(4): 468 – 471.
- [16] 傅宇方, 黄明利, 任凤玉, 等. 不同围压条件下孔壁周边裂纹演化的数值模拟分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(5): 577 – 583.
FU Yufang, HUANG Mingli, REN Fengyu, et al. Numerical analysis of crack evolution around borehole on rock sample subjected to confining pressures [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 577 – 583.
- [17] POTYONDY D. A bonded-disk model for rock; relating micro-properties and macro-properties [C]// *Proceedings of the Third International Conference*. Virginia: [s. n.], 2002: 340 – 345.
- [18] 徐金明, 黄大勇, 朱洪昌. 基于细观组分实际分布的花岗岩宏细观关系研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊1): 2635 – 2643.
XU Jinming, HUANG Dayong, ZHU Hongchang. Relations between macro-and meso-scope mechanical parameters of granite based on actual distributions of mesocompositions [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S1): 2635 – 2643.

关于为《中国地质灾害与防治学报》征集照片的启事

为了使本刊论文内容更加形象、生动,便于读者清晰地识别地质灾害的各种地质作用及现象,反映治理措施及治后效果,本刊每期另附彩版照片。凡为彩版或封面提供照片者,每版应附 100 ~ 500 字说明,每张照片也应有相应说明。为保证出版效果,请提供原照片;若用数码相机拍摄,请采用 200 万像素以上的模式拍照。照片的分辨率应在 1 600 × 1 200 dpi 以上(Fine 或 High 模式);如照片文件为扫描版,请采用 600 dpi 以上的设置扫描。如用电子邮件发送,请提供照片的原电子文档 JPG 格式(勿自行用 Photoshop 或 ACDsee 等软件处理),以保证照片的清晰度。另请提供 1 份 Word 文档,但其仅供排版时参考,不能作为印刷、排版的原始稿件。提供的照片采用刊登后,付稿酬。欢迎各地、各界同仁踊跃选送各种典型照片(含国外照片)。

感谢您的支持与合作!

本刊网址: www.zgdzzhyfzxb.com

电子信箱: nitx@mail.cigem.gov.cn zhaoh@mail.cigem.gov.cn

《中国地质灾害与防治学报》编辑部