

岩石细观结构对其变形强度影响的数值分析

于庆磊¹, 杨天鸿¹, 郑 超¹, 唐春安², 王培涛¹

(1. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110004; 2. 大连理工大学 土木与水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 利用数字图像处理技术表征岩石的非均匀性, 并映射到有限元网格中, 建立了能比较准确地反映岩石细观结构的数值模型。通过对花岗岩数字图像的处理, 利用该模型进行花岗岩单轴压缩数值试验, 研究花岗岩细观结构对其变形和强度的影响。研究表明, 花岗岩细观结构对应力集中影响显著, 在不同方向对花岗岩进行加载时, 其抗压强度差异较大, 表现出较强的各向异性行为, 但对花岗岩弹性模量的影响很小。基于数字图像的数值分析方法为研究岩石细观力学性质提供了一种新的方法。

关 键 词: 数字图像; 细观结构; 各向异性; 变形; 强度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Numerical analysis of influence of rock mesostructure on its deformation and strength

YU Qing-lei¹, YANG Tian-hong¹, ZHENG Chao¹, TANG Chun-an², WANG Pei-tao¹

(1. Center for Rock Instability & Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Digital image processing method is used as a tool to represent the heterogeneity of rock, which can be introduced into the finite element method; and a numerical model considering the real mesostructure of rock is established. By using this method to represent the heterogeneity of granite, a numerical specimen of granite is built to carry out uniaxial compressive tests. The influence of granite's mesostructure on its deformation and strength is studied. The results show that the mesostructure of granite has an important effect on stress concentration under loading. The compressive strength of granite is evidently different when loading under different directions, and presents anisotropic behavior. But the influence of mesostructure of granite on its elastic modulus is very small. The digital image-based numerical method proposed provides an effective tool to study the mesomechanical behaviors of rock and rock-like materials.

Key words: digital image; mesostructure; anisotropic; deformation; strength

1 引 言

岩石作为一种天然非均质材料, 包含大量不同的矿物颗粒、孔洞和微小裂隙等, 它们具有复杂的几何形态和几何分布。在这复杂的细观结构中, 颗粒几何分布和几何形态对试件的损伤演化过程和变形路径起控制作用, 决定了岩石宏观力学性质和破裂特性。岩石的细观结构, 即非均匀性, 是岩石力学研究中不容忽视的重要因素。

文献[1]指出: “岩石力学最根本的还在于弄清天然岩石的基本特性, 这是检验各种理论和概念、技术和方法的正确性的客观基础, 这也正是岩石力学发展的关键课题”。目前, 基于细观结构考虑的数值方法被看成是解决这一问题的有效途径, 其特点是引入简单的基元本构模型和简单的破坏准则, 同时考虑介质的非均匀性。许多学者利用此类模型研究了非均匀性对岩石宏观力学行为的影响。文献[2]采用细胞自动机模型研究了细观非均匀性对

收稿日期: 2010-03-09

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No.51034001); 国家自然科学基金资助项目(No. 50904013, No. 10872046, No. 50874024); 中央高校基本科研业务费资助(No.N100401003, No. N090101001); 中国博士后基金资助(No.20100480057)。

第一作者简介: 于庆磊, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩体结构识别与损伤表征、矿山岩体破坏失稳与控制方面的研究工作。E-mail: yuqinglei@mail.neu.edu.cn

脆性岩石宏观破坏模式的影响, 文献[3]采用基于有限元的 RFPA (realistic failure process analysis) 模型研究了岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响, 文献[4]研究了非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响, 文献[5]研究了非均匀性对岩石水压致裂过程的影响。在这些研究中岩石的非均匀性都是在统计分布的基础上利用 Monte-Carlo 方法生成虚拟细观结构, 一般都假定为 Weibull 分布, 但很少有文献说明这种虚拟的细观结构在多大程度能反映岩石真实的非均匀性^[6]。

近几年来, 数字图像处理技术在岩石力学与工程中得到了广泛的应用^[6-10]。岳中琦等^[6-8]在这方面做了许多研究工作, 他们把数字图像处理技术与有限元法 (FEM) 和有限差分法 (FDM) 等数值方法相结合, 研究了岩土工程材料细观结构对其内部应力分布的影响。本文在前人研究工作的基础上, 把数字图像处理技术引入岩石破裂过程分析系统 (RFPA) 中, 采用数字图像处理技术来表征岩石的非均匀性, 建立能比较准确地反映材料细观结构的数值模型, 并以花岗岩为例, 通过数值试验研究岩石细观结构对其变形和强度的影响。

2 数值模型

2.1 非均匀性表征

在本文的数值模型中, 岩石非均匀性通过数字图像处理技术来表征, 并通过该技术对岩石内部的细观介质分类, 确定其几何形态。图 1 是花岗岩试件表面图像, 图像的像素尺寸为 200 像素×200 像素, 实际尺寸为 100 mm×100 mm。虽然该图像是 24 bit 的真彩色图像, 但彩色变化并不明显, 因此图像处理选择在 HSI (Hue 为色度, Saturation 为饱和度, Intensity 为亮度) 彩色空间中通过亮度 I 值的变化进行多阈值分割。

花岗岩中主要含有 3 种矿物介质, 即石英、长石和云母, 图 2 为某一扫描线上 I 值的变化曲线, 与图中扫描线穿过的矿物介质的位置进行对比, 采用反复试验的方法, 最终选取的分割阈值分别为 95 和 195, 这样把 I 值分成了 0~95, 96~195 和 196~255 三个区间, 对图像进行分割处理后, 内部的细观介质被分成了 3 类。图 3 是采用数字图像处理方法得到的花岗岩非均匀性数字化表征图像, 图中白色代表石英, 灰色代表长石, 黑色代表云母。可以看出, 非均匀性表征图像基本反映了花岗岩中 3 种主要矿物的空间分布和颗粒形状。

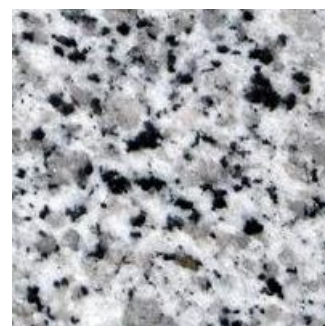


图 1 花岗岩数字图像
Fig.1 Digital image of granite

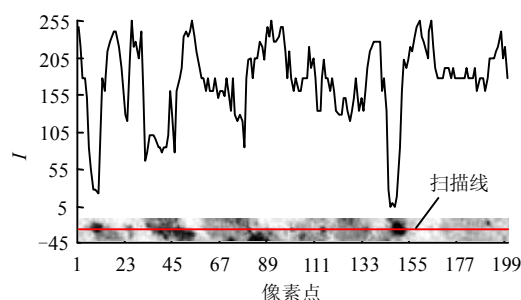


图 2 扫描线上 I 值变化曲线
Fig.2 Variable curve of I along the scanning line indicated

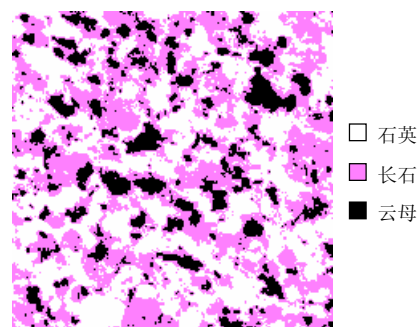


图 3 花岗岩非均匀性表征图像
Fig.3 Characterization image of granite's heterogeneity

2.2 花岗岩数值模型

由图 3 所示的数字图像描述的花岗岩的非均匀性通过方形单元映射的方法可以很方便地转化成有限元网格数据^[7, 11]。数字图像是由一个矩形排列的像素点组成, 每个像素点是一个小正方形, 均可作为有限元计算中的四边形单元。其中每个单元的 4 个节点坐标通过图像实际尺寸与像素尺寸之间的比例关系, 可以转换为相应的矢量空间的物理坐标, 整个图像就可转换为正方形有限元网格, 然后根据每个像素点所属颜色的类别, 给每个单元赋予相应的材料参数, 从而把数字图像表征的非均匀性引入到数值模型中。转化后的数值模型如图 4 所示, 图中颜色愈亮表示弹性模量愈大。花岗岩中细观介质

的材料参数见表 1。在矿物颗粒的尺度上假定矿物为均匀介质, 并未考虑各自内部的非均匀性。

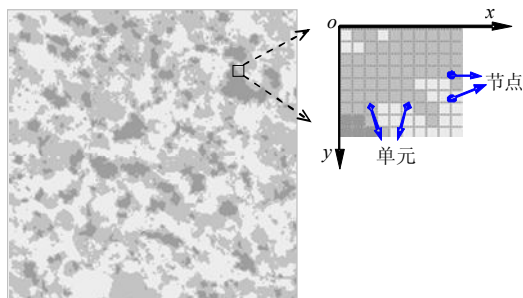


图 4 花岗岩转化后的 RFPA 数值模型与网格
Fig.4 Numerical model of granite in RFPA after transformation and mesh grid

表 1 花岗岩细观介质的材料参数
Table 1 Mechanical parameters of meso-material of granite

材料	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	泊松比	压拉比
石英	96	373	0.08	15
长石	67	172	0.27	12
云母	40	90	0.25	10

为了研究花岗岩细观结构的影响, 在获取花岗岩数字图像过程中, 利用 100 mm×100 mm 的正方形框架为工具 (图 5(a)), 获取第 1 幅花岗岩的数字图像 (图 1), 然后固定正方形的中心旋转 30°, 获取第 2 幅数字图像, 依次获取第 3 幅。利用获取的数字图像建立数值花岗岩试样, 分别进行 x 和 y 方向的单轴压缩试验, 共进行了 6 次。试验中, 保证数值花岗岩试件的细观结构基本相同来研究不同方向加载时花岗岩的强度变形特征。

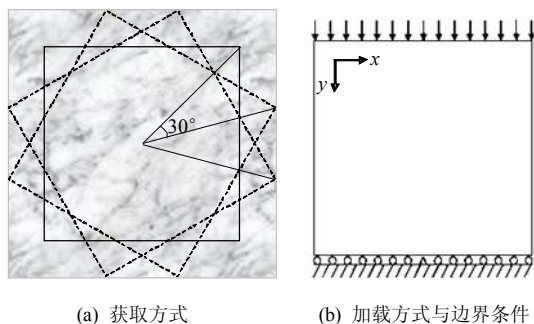


图 5 数值试验加载方式示意图
Fig.5 Schematic diagram of loading mode in numerical tests

加载模型示意图如图 5(b)所示。采用位移控制加载, 考虑平面应力问题, 单轴压缩试验位移加载初始值为 0.001 mm, 加载增量为 0.001 mm, 加载

直至试件破坏。细观单元采用带有残余强度的弹脆性本构关系^[12], 选择带有拉伸准则^[13](tension cut-off)的 Mohr-Coulomb 强度理论作为单元破坏的判据。数值试验在岩石破裂过程分析系统 (RFPA^{2D}) 平台上进行, 有关 RFPA 基本原理的详细介绍, 可参考文献[14]。

3 试验结果与分析

3.1 应力分布

图 6 是初始位移为 0.001 mm 时水平与垂直方向分别加载时的主应力分布。图中颜色的亮度表示应力值的大小, 颜色越亮, 应力越大。由图中可以看出, 虽然把各细观介质都看成是均匀材料, 但由于其形状和分布的影响, 出现明显的应力集中。由图中应力标度条可以看出, 在同等载荷水平下, 垂直加载时的最大主应力和最大剪应力的最大值分别比水平加载时大 8% 和 19.1%, 而最小主应力相差不大, 为 -2.3%。加载方向的改变, 相当于改变了颗粒形状, 尤其是颗粒边界与加载方向的作用关系, 可以认为, 改变了加载方向上的细观结构, 导致其应力分布和应力集中不尽相同, 从而导致强度各向异性。这种应力集中情况决定的试样破坏过程中的损伤演化, 可以推断, 随着加载的进行, 垂直加载下应力水平会率先达到单元的破坏阈值而发生破坏失稳, 亦即垂直加载下测得的抗压强度比水平加载得到的值要小。

3.2 变形、强度特征

表 2 为数值模拟的汇总结果, 加载方位角 α 为加载方向与竖立方向的夹角。由表可以看出, 在不同的方向进行加载时, 弹性模量差异并不大, 其最大值与最小值相差 0.7%, 花岗岩细观结构随加载方向的变化对弹性模量的影响不大, 岩石的变形性质可以认为是各向同性的。虽然在不同方向上进行加载试验, 但由于本文试验保证数值试件具有近似相同的细观结构, 在弹性变形阶段各细观介质弹性模量对宏观弹性模量的贡献基本是一样的, 亦即宏观弹性模量是细观介质弹性模量的平均效应, 弹性模量反映了岩石内部细观结构的平均行为^[15]。

但对比单轴抗压强度的模拟结果, 加载方向对强度影响比较显著。强度的最大值与最小值相差 14.1 MPa, 约为最小抗压强度的 24.2%, 岩石的强度特征表现出明显的各向异性。在本文模型中, 虽然各细观介质被认为是各向同性体, 但试件的宏观强度还是表现明显的各向异性, 这主要是花岗岩细观结构的影响。由于岩石内部非均匀的细观结构,

不同方向加载时造成的应力集中程度不同,从而导致试件在不同的加载水平下发生初始损伤并诱发岩石破坏。不同的加载水平导致计算得到的岩石抗压强度存在差异。由表 2 可以看出,水平方向加载

得到的强度为 68.21 MPa,垂直方向加载时强度为 63.91 MPa,垂直方向的强度比水平方向要小约 4 MPa,这进一步验证了前面的推断,也说明岩石强度对内部结构的细节非常敏感^[15]。

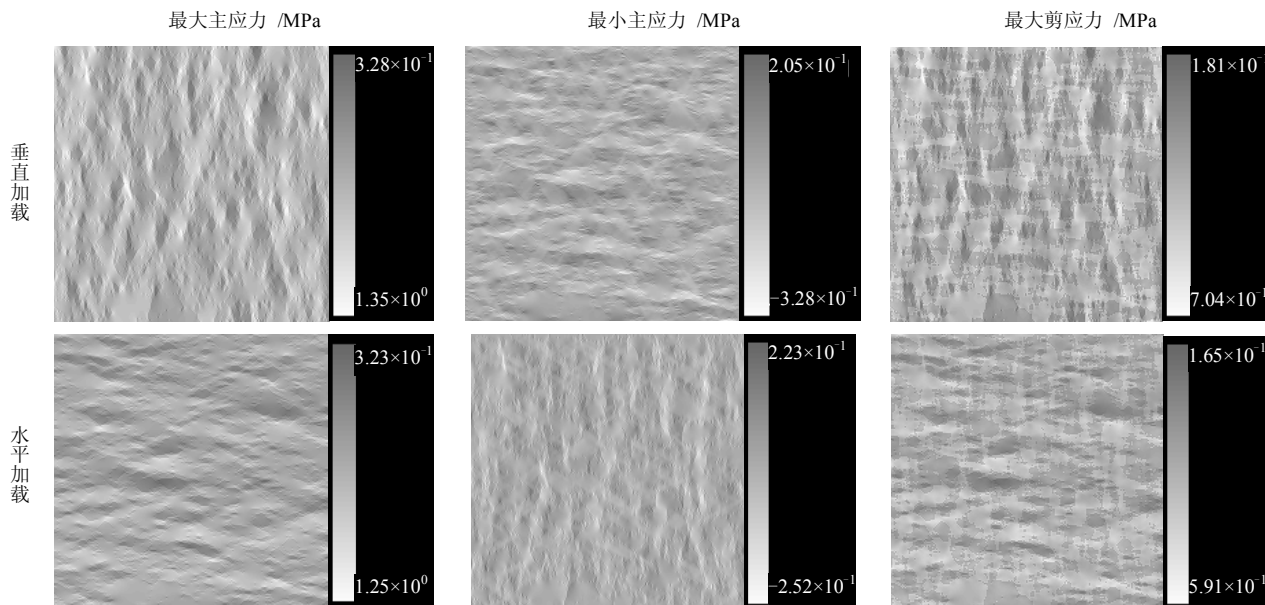


图 6 初始加载时数值花岗岩试样内部主应力分布

Fig.6 Principal stress distributions within granite sample under initial loading

表 2 花岗岩的弹性模量和单轴抗压强度数值模拟结果统计
Table 2 Elastic modulus and uniaxial compressive strength of granite obtained under different direction loading

加载方位角 $\alpha / (^{\circ})$	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa
0	72.53	63.91
30	72.83	63.15
60	72.92	58.56
90	72.88	68.21
120	72.64	65.82
150	72.39	72.74

图 7 显示的是归一化的弹性模量和单轴抗压强度各向异性椭圆(其他方向的弹性模量和强度由对称性得到),可以更直观地看出加载方向对变形和强度特征的影响。为了定量地说明细观结构对强度和弹性模量的影响,把不同方向加载得到的弹性模量和强度看作两组样本,计算其方差。为便于比较都用其最小值进行了均一化处理。弹性模量的方差 $D(E)=7.28 \times 10^{-6}$, 强度的方差 $D(\sigma_c)=5.64 \times 10^{-3}$ 。数值模拟得到抗压强度的方差是弹性模量方差的百倍。也就是说,不同方向加载得到强度值比弹性模量更离散。这一统计结果更加深了认识弹性模量是各细观组成介质变形能力的平均效应,而强度则对材料内部结构的细节十分敏感^[15]。岩石力学性质的

各向异性,不只是局限于大尺度的层状岩体或结构岩体中,小尺度的岩石试样强度也具有一定的各向异性性质^[16]。

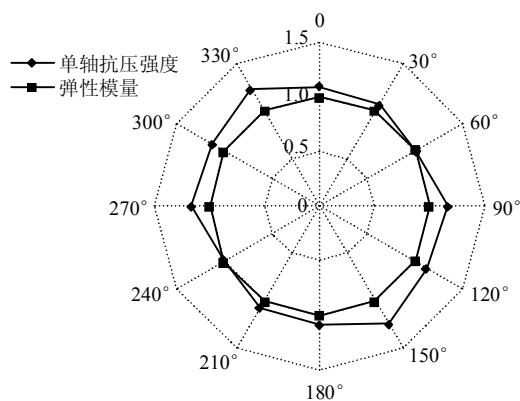


图 7 归一化的弹性模量和单轴抗压强度各向异性椭圆
Fig.7 Anisotropic ellipse of normalized elastic modulus and uniaxial compressive strength

虽然小尺度的岩石试件中不存在像宏观岩体中方向性明显的节理面,但岩石内部的矿物晶体之间的界面及其微裂隙均可认为是原生的“格里菲斯”缺陷,这种细微缺陷对岩石变形性质贡献很小,但对强度的影响较大。本文基于数字图像的方法可以识别岩石结构的细节并引入到数值模型,为深入

研究岩石细观力学行为提供了一种新的方法。

4 结 论

(1) 岩石细观结构对应力集中影响显著,造成了岩石强度的各向异性,岩石强度对其内部结构的细节非常敏感,但对岩石变形能力影响不大。

(2) 细观结构(非均匀性)是岩石破坏机制研究中必须考虑的重要因素,本文模型能反映出岩石类材料结构的细节,为研究岩石类材料的细观力学性质提供了一种新的手段。

参 考 文 献

- [1] 陶振宇. 试论岩石力学的最新进展[J]. 力学进展, 1992, 22(2): 161—172.
TAO Zhen-yu. Notes on recent development of rock mechanics[J]. *Advances in Mechanics*, 1992, 22(2): 161—172.
- [2] 王士民, 朱合华, 冯夏庭, 等. 细观非均匀性对脆性岩石材料宏观破坏形式的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 224—227.
WANG Shi-min, ZHU He-hua, FENG Xia-ting, et al. Influence of heterogeneity on macroscopical crack form of the brittle rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(2): 224—227.
- [3] 傅宇方, 梁正召, 唐春安. 岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 705—710.
FU Yu-fang, LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an. Numerical simulation on influence of mesoscopic heterogeneity on macroscopic behavior of rock failure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 705—710.
- [4] 唐春安, 刘红元, 秦四清, 等. 非均匀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 Hong-yuan, QIN Si-qing, et al. Influence of heterogeneity on crack propagation modes in brittle rock[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(1): 116—121.
- [5] 杨天鸿, 谭国焕, 唐春安. 非均匀性对岩石水压致裂过程的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 724—728.
YANG Tian-hong, TAN Guo-huan, TANG Chun-an. Influence of heterogeneity on hydraulic fracturing in rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(6): 724—728.
- [6] 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, 23(6): 889—897.
YUE Zhong-qi, CHEN Sha, ZHENG Hong, et al. Digital image proceeding based on finite element method for geomaterials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6): 889—897.
- [7] 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 Zhong-qi, TAN Guo-huan. Digital image based numerical modeling method for heterogeneous geomaterials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 956—964.
- [8] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30 (5): 375—397.
- [9] 范留明, 李宁. 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量方法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 792—797.
FAN Liu-ming, LI Ning. Study on rock mass joint measurement based on digital photogrammetry[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(5): 792—797.
- [10] 朱珍德, 张勇, 李术才, 等. 用数字图像相关技术进行红砂岩细观裂纹损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1123—1128.
ZHU Zhen-de, ZHANG Yong, LI Shu-cai, et al. Study on microcosmic crack damage properties of a red sandstone with digital image technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1123—1128.
- [11] 于庆磊, 唐春安, 唐世斌. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 551—559.
YU Qing-lei, TANG Chun-an, TANG Shi-bin. Digital image based characterization method of rock's heterogeneity and its primary application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 551—559.
- [12] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析(RFPA^{2D})系统的细观单元本构关系及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 24—29.
ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA^{2D} and its validations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 24—29.
- [13] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. London: Chapman and Hall, 1993: 106—108.
- [14] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] 白以龙, 汪海英, 夏蒙芬, 等. 固体的统计细观力学——连接多个耦合的时空尺度[J]. 力学进展, 2006, 36(2): 286—305.
BAI Yi-long, WANG Hai-ying, XIA Meng-fen, et al. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales[J]. *Advance in Mechanics*, 2006, 36(2): 286—305.
- [16] DOUGLASS P M, VOIGHT B. Anisotropy of granites: a reflection of microscopic fabric[J]. *Geotechnique*, 1969, 19(3): 376—398.