

文章编号: 1000-7598(2012)12-3592-06

基于变分水平集方法获取岩石的细观结构

冯宝成^{1,2}, 曹金凤^{1,2}, 高洪秀^{1,2}, 岳军^{1,2}

(1. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛理工大学 数值计算与应用研究所, 山东 青岛 266520)

摘要: 岩土工程材料的细观结构特征会在很大程度上影响其宏观力学行为。随着数字图像处理技术的逐渐成熟, 基于变分水平集方法的偏微分方程(PDE)方法在图像处理中越来越受重视。在岩石数字图像的基础上, 运用基于变分水平集方法的C-V模型, 结合图像的背景填充技术实现花岗岩图片的3相分割(长石、石英和云母), 为进一步力学分析提供条件。上述方法可以量化岩石细观结构, 最终获得能够准确反映岩石内部特征的图片, 为将来的有限元分析提供真实几何模型。处理结果表明, 通过选取适当的迭代次数和数字图像处理技术, 该法能够获得较高质量的岩石细观结构量化图。

关键词: 数字图像处理; 花岗岩; 细观结构; 变分水平集方法; C-V模型

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Obtaining rock's mesostructure based on variational level set method

FENG Bao-cheng^{1,2}, CAO Jin-feng^{1,2}, GAO Hong-xiu^{1,2}, YUE Jun^{1,2}

(1. School of Science, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266520, China;

2. Institute of Numerical Computation and Application, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266520, China)

Abstract: The geotechnical material's actual mesostructure is significant in that its characteristics will largely affect its macroscopic mechanical behavior. With the digital image processing technology being more and more mature, the partial differential equations (PDE) method based on variation level set attracts increasing attention meanwhile finds increasingly more application in the field of image processing. C-V model, as a frequently used method, is a typical one among those using the PDE method. This paper deals with how to use C-V model combined with background filling technology to realize the three-phase split (feldspar, quartz and mica) of the granite pictures after the digital image of the rock has been got; thus to provide the conditions for further mechanical analysis. The purpose of quantifying the mesostructure of rock can be achieved by the method described in this paper, which ultimately can be used to get pictures that accurately reflect the internal characteristics of the rock, thus to provide real geometry model for finite element analysis in the future. The numerical value results indicate that the PDE method is very effective indeed. By selecting the appropriate number of iterations, it can get a higher quality of the rock mesostructure quantitative geometric images consistent with the real mesostructure images.

Key words: digital image processing; granite; mesostructure; variation level set method; C-V model

1 引言

天然岩石由于其组分的多样性和长期的地质构造作用而呈现出强烈的非均质各向异性, 其内部微、细观结构对岩石的力学性能有着非常重要的影响^[1]。对于岩石细观力学的分析研究, 其重点是将岩石细观结构准确地引入细观结构几何模型, 从而可以借助力学分析软件对其力学特性作出较为准确的分析。非均质材料和研究材料微结构对宏观性能

的影响, 已引起越来越多的研究者的重视, 对非均质各向异性进行数值试验研究具有重大理论意义和实际应用前景, 是当前岩石力学损伤破坏研究的热点和难点^[2]。

在对岩石的细观结构做出较为准确的分析之前, 首先要获得准确的岩石细观结构的图像, 这是对岩石做进一步力学分析的前提。近年来, 采用数字图像处理技术逼近岩石的真实细观结构取得了进展^[3-4]。陈沙等^[5]利用彩色空间的多阈值区域分割方

收稿日期: 2011-08-15

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目(No. J11LE04); 国家科技重大专项子课题“南海北部陆坡区地质灾害风险评价预测研究”(No. 2011ZX05056-001-02)。

第一作者简介: 冯宝成, 男, 1971年生, 硕士, 副教授, 主要从事数学算法和数字图像处理方面的教学和研究工作。E-mail: fbch2010@126.com

法对岩石图像进行了分割处理, 岳中琦等^[6]利用区域分割和边缘检测还原了岩石细观结构。Yue 等^[7]和 Chen 等^[8-10]采用数字图像技术获得岩土工程材料的真实细观结构, 并建立了数值计算与材料真实细观结构的耦合分析方法。朱泽奇等^[11]在数字图像处理的基础上, 探讨了岩石破坏过程中的应力集中现象。于庆磊等^[12]利用数字图像处理技术, 研究了岩石细观结构对其变形和强度的影响。基于 PDE 方法的数字图像处理技术, 较好地解决了传统的滤波算子在对图像进行滤波处理中所存在的模糊边缘不足问题, 该方法在平滑噪声的同时, 可以使边缘得到保持, 而且具有很好的稳定性。

源于变分方法和形变模型的 PDE 方法^[13-15]已经成为图像处理与分析的重要工作之一。变分水平集方法是众多 PDE 方法中的 1 种, 它是通过极小化水平集函数的能量泛函来得到水平集函数的偏微分方程, 也就是先根据长度和面积等提出能量泛函, 然后基于变分法^[16]写出相关的偏微分方程, 当偏微分方程得到稳定解时也就得到最后的分割结果。

C-V 模型是基于变分水平集方法的 1 种几何活动轮廓模型, 它是 1 种重要的图形分割模型, 具有稳定的数值实现方法, 比较适应拓扑结构的变化。

选取二维花岗岩数字图片, 本文运用基于变分水平集方法的 C-V 模型提取其中的各成分区域, 进而获得花岗岩的细观结构。在岩石细观结构图像分析方面, 基于 PDE 技术处理岩石图片的方法相比于以前人工加机器识别的处理方法, 具有下列特点:

(1) 操作过程简单、效率较高, 并且能够获得较好的结果图。该法不仅能够分离出与原图非常吻合的各成分区域, 而且能够得到连续光滑的边界曲线。

(2) 与扫描电镜或 CT 扫描技术相比, PDE 处理技术的成本更加低廉。该法只需要借助于普通数码相机获取清晰的岩石细观结构图片, 普通台式计算机和相关软件即可。

2 数字图像处理

2.1 根据灰度值对岩石细观结构进行分区

花岗岩是 1 种深成酸性火成岩, 一般由长石, 石英和云母组成。本文选取 136×97 像素的岩石图片作为数字图像处理的研究对象(如图 1 所示)。基于专门的数学处理软件 Matlab 7.0 获得了灰度个数直方图, 如图 2 所示。

由图 1 可以看出, 云母的颜色最深, 其灰度值最小; 长石的颜色最浅, 其灰度值最大; 而石英的

灰度值居中。再从图 2 可以看出: 花岗岩图片的灰度值呈现出比较明显的变化, 灰度值在 90~110、160~180 之间有较大的跳跃。鉴于此, 本文基于不同的灰度值划分为不同区间, 由大到小分别是长石、石英和云母。本文并非根据灰度值的绝对大小来区分长石、石英和云母的所在区域, 而是由基于 PDE (偏微分方程) 的曲线根据灰度值的梯度来自动搜寻边界。当图像灰度值梯度的偏微分方程达到稳定时, 能量泛函也将取极小值, 该稳定状态也就是分割区域的边界。

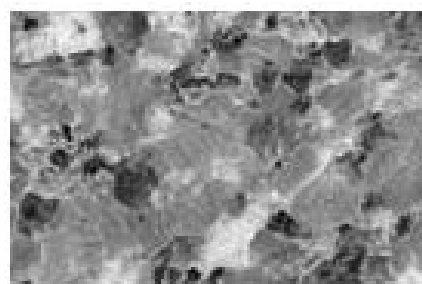


图 1 岩石原图

Fig.1 Original image of rock

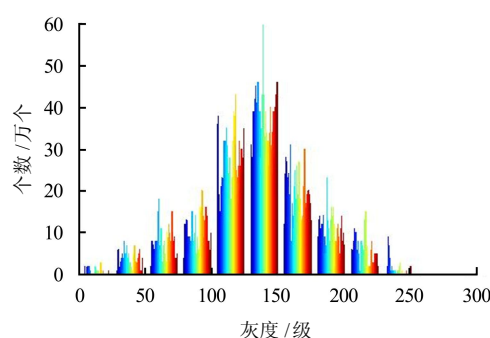


图 2 灰度个数直方图

Fig.2 Histogram of gray value number

2.2 传统的 C-V 模型

数字图像处理技术是随着计算机技术的发展而逐渐发展起来的 1 个新的应用领域。近年来, 基于变分水平集方法的非线性图像处理方法——C-V 模型已经受到越来越多研究者的关注。

C-V 模型是由 Chan 等^[13]提出的图像分割模型, 该模型首先假定图像有 2 个同质区域(目标和背景)组成。然后通过极小化(式(1))所示的能量泛函来实现分割。

首先, 在图像域上定义活动轮廓线 C , 这条曲线将图像 u 划分为两部分, 分别记为 $\text{inside}(C)$ 和 $\text{outside}(C)$, c_1 、 c_2 分别表示曲线 C 内、外部区域的图像灰度平均值。定义能量函数的表达式为

$$\begin{aligned}
 F(u) = & \mu \int_{\Omega} \delta(u) |\nabla u| ds + \nu \int_{\Omega} H(u) ds + \\
 & \lambda_1 \int_{\Omega} |u_0 - c_1|^2 H(u) ds + \\
 & \lambda_2 \int_{\Omega} |u_0 - c_2|^2 (1 - H(u)) ds
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中： μ 、 ν 、 λ_1 、 λ_2 为各项的权重（一般 $\nu=0$ ），前两项 μ 、 ν 为光滑项（第 1 项表示长度，第 2 项表示面积）， λ_1 、 λ_2 为拟合项； u_0 为原图像； $H(u)$ 、 $\delta(u)$ 分别为 Heaviside 和 Dirac 函数。 c_1 和 c_2 分别通过下式计算得到：

$$c_1 = \frac{\int_{\Omega} u_0 H(u) ds}{\int_{\Omega} H(u) ds}, \quad c_2 = \frac{\int_{\Omega} u_0 (1 - H(u)) ds}{\int_{\Omega} (1 - H(u)) ds} \quad (2)$$

利用变分法和最速下降法得到相应的演化方程为

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} = & \delta(u) \left[\mu \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) - \nu - \lambda_1 (u_0 - c_1)^2 + \lambda_2 (u_0 - c_2)^2 \right]
 \end{aligned} \quad (3)$$

C-V 模型是在内力和外力共同作用下的可变形模型。其中，内力与曲线自身相关，其作用是保持模型的连续和平滑，而外力与图像数据相关，其作用是将模型拉向目标物体的边界或其他感兴趣的图像特征处。该模型具有下列优点：

(1) 完全基于提供的图像数据来完成分割，而无需待分割图像区域的任何先验知识。

(2) C-V 模型是通过最优化能量泛函（式（1））获得，它是基于图像的全局信息，可以得到全局优化的图像分割结果。

3 试验处理和比较

3.1 改进的 C-V 模型

由于传统的 C-V 模型只能对岩石图片进行两相分割，本文的花岗岩则由 3 种不同的矿物构成，需要进行 3 相分割。鉴于此，本文在传统 C-V 模型的基础上进行了改进：通过重复使用 C-V 模型，获得 3 相岩石细观结构。基本原理如下：运行 1 次 C-V 模型后，得到图 3 中的白色矩形域部分，然后使用背景填充技术^[17]改变原目标（即矩形域）的灰度值，使原目标的灰度与背景的灰度比较接近，因为在图像中原目标和背景具有相同的灰度，所以原目标就转化为背景，进而改变了新目标（椭圆形域）和背景间的对比度，使新目标更容易识别，这样将构成新的岩石图像。再次运行 C-V 模型将新目标从背景中分离出来，从而实现了岩石图片的三相分离。

3.2 模型验证

采用处理人工模拟岩石图片并比较面积的方法来验证模型的正确性和准确性。首先，人工合成 1 幅岩石图片（见图 3(a)），原图总大小是 200×100 像素，矩形区域表示长石，它的大小为 57×37 像素；椭圆区域表示云母，它的长轴大小为 70 像素，短轴大小为 34 像素；剩下的区域表示石英。经过第 1 次处理，准确地把矩形区域分割出来（见图 3(b)），经过第 2 次处理又分割出椭圆形区域（见图 3(c)）。比较结果图和原图可以看出：处理结果是希望获得的分区结果，证明该方法在实际工程中具有可行性和正确性。对处理后的椭圆区域和长方形区域测算它们的面积分别是 1 907、2 124 像素。

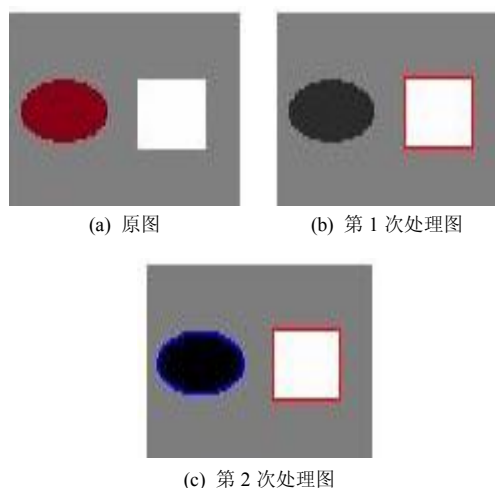


图 3 模拟岩石图片的处理结果图

Fig.3 Segmented results of simulated rocks

对图片进行处理前、后各区域的面积值如表 1 所示。其中，其他区域的面积用总面积减矩形域与椭圆区的面积得到。从比较结果可以看出：借助于本文所介绍数学模型处理前、后的面积基本不变，误差非常小，最大误差小于 0.2%，并且出现误差的主要原因是计算所致。所以这种方法的准确性能够满足一般工程应用上的要求。

表 1 处理前后各区域面积

Table 1 Areas of segmented regions before and after segmentation

区域	面积 / 像素		处理前后面积差占总像素百分比 / %
	处理前	处理后	
椭圆区域	1 869	1 907	0.190
矩形区域	2 109	2 124	0.075
其他区域	16 022	15 969	0.265

3.3 模型实现

本文基于专门的数值分析软件 Matlab7.0，对

图 1 所示的岩石图片进行处理, 选择各个参数值如下: $\mu = 300$, $\nu = 0$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$, $\Delta t = 0.1$ 。

具体的运行流程为: ①读入岩石图片, 预设好各常数; ②初始化轮廓曲线, $u(x, y, t) = u_0(x, y)$; $t = 0$; ③由式 (2) 计算 c_1 和 c_2 的值; ④迭代计算偏微分方程 (3), 即运行 C-V 模型; ⑤根据阈值判断, 将面积小于阈值的区域取消, 只留下面积大于阈值的区域。本文选取阈值为 30 像素。初始化参数后, 二次运行 C-V 模型: ⑥采用背景填充技术产生 1 个新的岩石图像 u_1 ; ⑦重新初始化水平集函数 $u_1(x, y, t) = u_{10}(x, y)$, $t = 0$; ⑧再次运行过程③与④ (此时可以选择不同的迭代次数), 最终得到岩石 3 相组分的分割图像。

对图片进行数值处理的过程中, 第 1 次基于 PDE 方程 (式 (3)) 对图片迭代 700 次处理, 用时 20 s 得到图 4(b) 中的计算结果, 该图与原图像关于长石区域 (白色区域) 比较相似, 但中间包含许多小的白色区域, 这些小区域实质上是一些极其微小的颗粒, 它对各种力学行为的分析结果影响不大, 在工程问题的处理中可以忽略。鉴于此, 本文中通过选择阈值的方法, 对于小于阈值的区域全部取消, 处理后的结果如图 4(c) 所示。

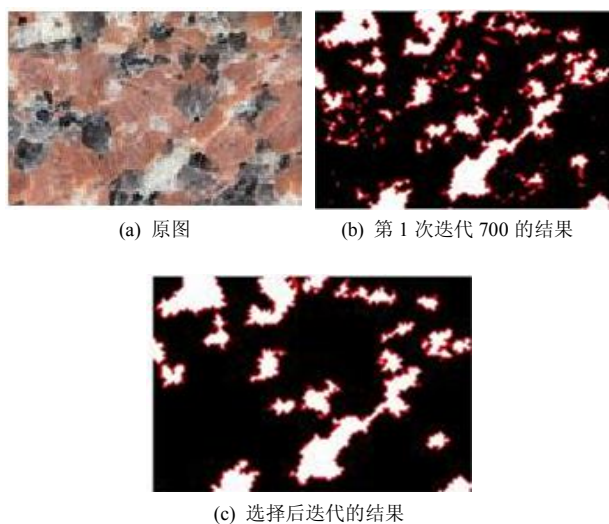


图 4 不同迭代次数对应的处理结果图

Fig.4 Segmented results of different iterations

经过此次处理, 灰度值较大的长石区域从原图中已经分离, 而云母和石英仍没有分离出来。此时, 对原图做相应灰度转换后, 再次运行程序得到如图 5(b) 所示的结果。运行程序的过程中, 由于云母和石英的灰度值均较小, 导致迭代次数和运行时间均有所增加。此处, 1 000、3 000 表示第 1 次运行 C-V 模型时迭代 1 000 次, 第 2 次运行时迭代 3 000

次。

将原图与处理结果图进行比较, 可以发现:

(1) 为了对比鲜明, 本文更改了处理结果 (见图 3) 中 3 个区域的灰度值, 图中的白色区域表示长石; 黑色区域表示云母; 剩余区域表示石英区域。处理后的结果能够准确地反映岩石的细观结构。

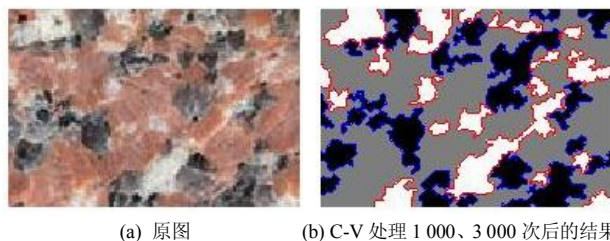


图 5 迭代 1 000、3 000 次后的结果图

Fig.5 Segmented results after 1 000 and 3 000 iterations

(2) 结果图中白色区域的边界线就是长石区域的边界线; 而黑色区域的边界线就是云母区域的边界线。如果将整个图片的长方形边界认为是连续曲线, 则长石区域和云母区域的边界线均连续、封闭且光滑。在该细观结构模型的基础上, 可以继续进行其他处理。例如, 提取边界曲线的数据建立有限元模型, 进一步获取细观结构对宏观力学行为的影响等。

3.4 数值模拟方案的比较

本文在不断调试程序分析问题的过程中, 对不同算法、不同迭代次数都进行了比较 (如图 6、7 所示)。可以发现: 在岩石细观结构图像分析方面, 基于变分水平集方法中的 C-V 模型处理岩石图片可以得到比较理想的结果。

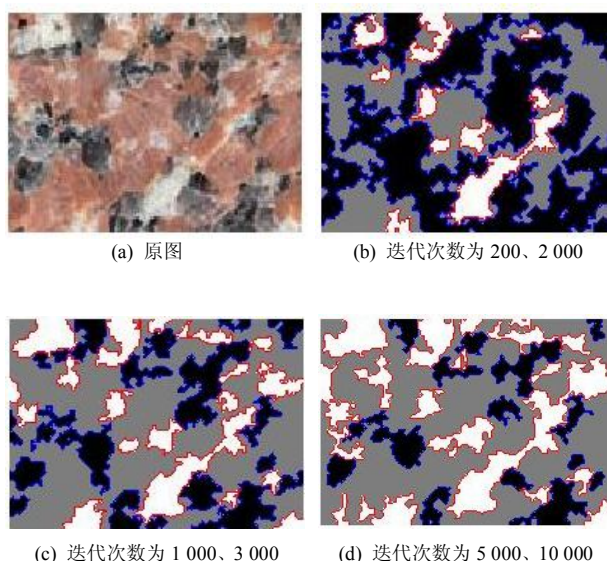


图 6 不同迭代次数的结果图

Fig.6 Segmented results of different iterations

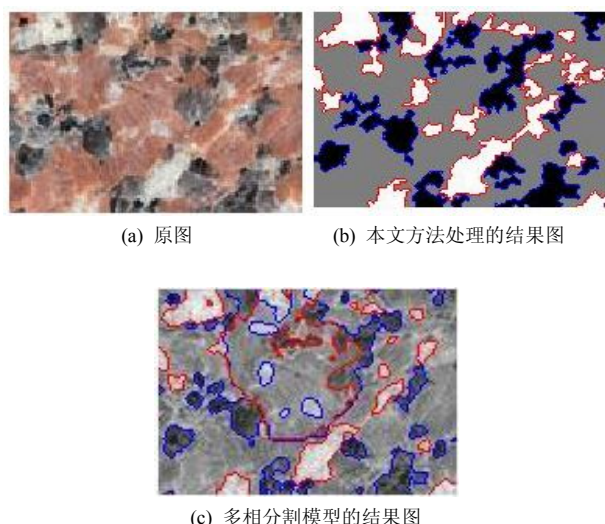


图 7 不同图像处理方法之间的比较

Fig.7 Results of two different image processing methods

图 6 给出了不同迭代次数与处理结果之间的关系,可以看出:迭代次数比较少时(如图 6(b))所示:白色区域(长石)没有收敛到图像的边缘,而灰色区域(石英)明显比实际区域小,从而导致黑色区域(云母)明显比实际区域大。迭代次数比较多时(如图 6(d))所示:白色区域(长石)包含了一些不明显的区域,比实际区域明显偏大,而灰色区域(石英)也明显比实际区域大;这样导致黑色区域(云母)明显比实际区域小。因此,实际分析时所选迭代次数应该适当,不能选择得太多或太少。当然,迭代次数的选取与图片的大小有关,也与程序中各参数的选择有一定关系。

数字图像处理技术中包含很多用来处理图像的方法。Chan 等^[18]在 2002 年提出了图像处理的多相分割模型,1 次可以对图像进行 3 相甚至更多相分割。对同一幅岩石图片,本文分别用这 2 种方法对图像进行 3 相分割,处理结果如图 7 所示。比较处理结果可以发现:图 7(c)的中央部分呈现出一定的不收敛性,长石区域和云母区域的边界线在中央部分有交叉,并出现错误的表示区域;图 7(c)中间部分有几块区域的边界线混乱不清,没有把各区域分割彻底。而应用本文方法处理得到的结果(见图 7(b))中,这些问题均未出现,并且区域分割完整,边界清晰。由此可见,该法在处理 3 相或多相岩石图片具有很大优势。

4 结 论

(1) 对传统 C-V 模型进行改进并结合背景处理技术,获得了花岗岩细观结构的 3 相组分,且 3 种组分的区域分界线封闭且连续;同时可以获得各分

界线的坐标值,为进一步的力学分析提供了数据支撑。

(2) 数据处理结果很好地反映了岩石各组分(长石、石英、云母)的分布情况,在花费较少的情况下获得岩石的 3 种组分,为细观结构对宏观力学行为的影响奠定基础,对分析和评价岩石的工程性质提供理论依据。

(3) 该方法能够逼近岩石的细观结构,在此基础上建立有限元几何模型,不仅使建立的模型更加准确,而且能够从源头上反映岩石非均质各向异性对宏观力学性能的影响,可以避免虚拟细观结构与真实细观结构可能出现差异的情况。

参 考 文 献

- [1] 盛金昌, 刘继山, 赵坚. 基于图像数字化技术的裂隙岩体非稳态渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1402—1407.
SHENG Jin-chang, LIU Ji-shan, ZHAO Jian. Analysis of transient fluid flow in fractured rock masses with digital image-based method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1402—1407.
- [2] 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 initial application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 551—559.
- [3] LEE H, CHOU E. Survey of image processing applications in civil engineering[C]//Proceedings of EF/NSF Conference on Digital Image Processing: Techniques and Applications in Civil Engineering. Hawaii: American Society of Civil Engineers, 1993: 203—210.
- [4] CHERMANT J L. Why automatic image analysis? An introduction to this issue[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2001, 23(2—3): 127—131.
- [5] 陈沙, 岳中琦, 谭国焕. 基于真实细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 Sha, YUE Zhong-qi, TAN Guo-huan. Actual mesostructure based three-dimensional numerical

- modeling method for heterogeneous geomaterials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(10): 1951—1959.
- [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 processing based on finite element for geomaterials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(6): 889—897.
- [7] 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.
- [8] CHEN S, YUE Z Q, THAM L G. Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(6): 939—957.
- [9] CHEN S, YUE Z Q, THAM L G. Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(6): 939—957.
- [10] 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, THAM L G. Digital image based numerical modeling method for heterogeneous geomaterials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 956—964.
- [11] 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 Ze-qi, XIAO Pei-wei, 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.
- [12] 于庆磊, 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]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3468—3472.
- YU Qing-lei, YANG Tian-hong, 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.
- [13] CHAN T, VESE L. Active contours without edges[J]. **IEEE Transactions on Images Processing**, 2001, 10(2): 266—277.
- [14] CREMERS D, ROUSSON M, DERICHE R. A review of statistical approaches to level set segmentation: Integrating color, texture, motion and shape[J]. **International Journal of Computer Vision**, 2007, 72(2): 195—215.
- [15] CASELLE V, MORE J M, SAPIRO G, et al. Introduction to the special issue on partial differential equations and geometry-driven diffusion in image processing and analysis[J]. **IEEE Transactions on Image Processing**, 1998, 7(3): 269—272.
- [16] ZHAO H K, CHAN T, MERRIMAN B, et al. A variational level set approach to multiphase motion[J]. **Journal of Computational Physics**, 1996, 127(1): 179—195.
- [17] HEINEMANN E G. Simultaneous brightness induction as a function of inducing-and test-field luminances[J]. **Journal of Experimental Psychology**, 1955, 50(2): 89—96.
- [18] CHAN T, VESE L. A multiphase level set framework for image segmentation using the Mumford and Shah model[J]. **International Journal of Computer Vision**, 2002, 50(3): 271—293.