

文章编号: 1001-4888(2005)03-0448-07

基于图像处理技术和 CT 试验的裂纹量化描述^{*}

尹小涛¹, 党发宁^{1,2}, 丁卫华^{1,2}, 陈厚群^{1,3}

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所
冻土工程国家重点试验室, 兰州 730000; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100041)

摘要: 首先对 CT 试验和基于数学形态学的图像处理技术进行了简单介绍。在此基础上, 定义了裂纹的提取方法和判定准则, 并在此提取结果的基础上, 建立了一套对图像进行信息提取、几何测量和空间描述的量化参数体系。以某砂岩 CT 试验为例, 进行了岩土 CT 图像量化描述。该方法也探索了一种岩土力学 CT 试验数据分析的新途径。

关键词: 图像处理技术; CT 试验; 定量化; 裂纹

中图分类号: TU22

文献标识码: A

1 前言

岩土体是一种具有特殊性质的天然缺陷材料, 其独特的物理力学性质与其形成、发育、演化的地质历史过程和人类活动的侵扰密切相关。面对这些随机分布于岩土体中具有不规则几何形状和不同空间尺度的天然或加载缺陷, 要想对其在某一层次进行定性或定量描述或追踪显示, 就非传统的数学力学刻画手段和测试方法所能做到的。计算机层析成像技术(computerized tomography), 简称: CT 技术, 它是一种无损检测技术, 由于其具有可以动态、定量和无损伤的量测岩土材料在受力过程中内部结构的变化过程等优点, 所以很快被引入并辐射到相关研究领域。文[1, 2, 3, 5, 6]分别利用电子显微镜、电镜扫描和数码摄影等图像测量方法对岩石中裂纹和微结构的破坏过程进行了追踪显示, 并对其细观机理进行了探讨; 文[4, 8]利用 CT 图像对岩石的破坏过程进行了研究, 以上研究均没有对所获取含裂纹岩石图像进行进一步的裂纹提取工作和量化描述, 因此略显不足。如何把研究的目标直接指向感兴趣的区域, 是利用图像测量技术研究岩土体破坏过程所面临的一大课题。这也是研究局部化问题^[10]前应该率先解决的技术问题, 而且裂纹的空间扩展形态和其几何量化描述也是断裂力学研究人员一直以来关心的问题。这就提出了如何利用图像测量技术解决裂纹提取和测量的问题, 该问题的解决也能用来校验基于图像的有限元模型^[9]和断裂模型^[7]的有效性。

建立在定量化基础上的裂纹演化过程有助于弄清问题的本质并进行对比研究, 在弄清楚如何坏和多大坏的基础上, 就可以为工程设计和工程整治措施的提出提供试验支持。这也是本文在 CT 试验的基础上提出裂纹提取和量化描述的目的所在。

2 试验过程及结果

2.1 试验条件及过程

^{*} 收稿日期: 2004-07-16; 修订日期: 2005-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372078)和陕西省教育厅专项科研计划项目(01JK139)

通讯作者: 党发宁(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为岩土计算力学。E-mail: dangfn@mail.xaut.edu.cn

试验样品采自陕西省耀县双岔河,为二叠纪长石细砂岩,泥质胶结。容重 26.36kN/m^3 ,含水量 0.25% ,加工规格:直径 50mm ,高 100mm 。

本次 CT 试验在中国科学院冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室进口的德国 SIMENS SOM-ATOM PLUS 型 X 射线螺旋 CT 机上进行。该机空间分辨率: $0.35\text{mm} \times 0.35\text{mm}$,可识别最小体积: 0.12mm^3 ,密度对比分辨率: 0.3% (3HU)。

加载设备为葛修润院士设计的 CT 专用三轴装置,未加围压,荷载控制,分 15 级逐步加轴压,平均加荷速率 $7.29 \times 10^{-3} \text{MPa/s}$,直到岩样已经破坏时停止试验。每次扫描时固定轴压,分 5 层扫描,扫描层位相互间隔 2cm 。

2.2 试验结果

CT 试验提供的试验结果是包含物理信息 (CT 数和灰度值) 的数字图像,图像为以 8 位数存储的灰度图像,图像矩阵大小为: 512×512 像素,像素单元尺寸为 0.15mm ,CT 数以 12 位数存储,共有 4096 个阶位。限于篇幅此处只列出本文研究的目标——断面 4 在 10 个加载阶段的 CT 图像,其中在第 3、5、7 加载阶段未扫描。

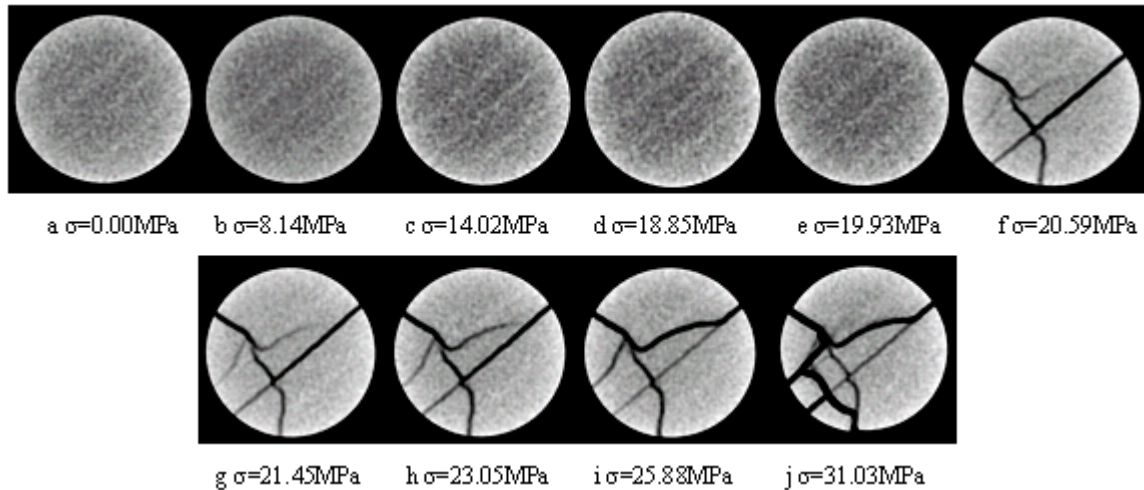


图1 第四扫描断面 CT 图像

Fig. 1 CT images of the 4th scanning section

3 图像处理技术及裂纹提取方法

3.1 二值图像描述的数学算法

本文抛开了用传统的数学建模进行分析的观点,从集合的角度刻画、识别和分析图像。图像的运算由集合的运算来定义,一切算法均定义在对由像素点集进行操作的基础之上,如未特殊注明的点均指像素点。文中涉及的 4 个最基本的数学形态学算法^[11,12]的具体定义如下:

图像平移的定义: $A_b = \{a+b | a \in A\}$,表示图 A 中每一个点经点 b 平移所得的新点,所有这些新点所构成的图像便是图像 A 经 b 平移所得结果,如图 2-a;图像反射的定义: $A = \{-a | a \in A\}$,表示图 A 中每一个点经原点反射所得的新点,所有这些新点所构成的图像便是图像 A 经反射所得结果,如图 2-b;图像膨胀的定义: $A \oplus B = \bigcup_{b_i \in B} A_{b_i}$,表示图 A 中每一个点经点图像 B 中每一个点 b_i 平移所得的新点,所有这些新点取数学中的并运算所构成的图像便是图像 A 经 B 膨胀所得结果,如图 2-c;图像腐蚀的定义: $A \ominus B = \bigcup_{b_i \in B} A_{b_i}$,表示图 A 中每一个点经图像 B 中每一个点 b_i 平移所得的新点,所有这些新点取集合中的交运算所构成的图像便是图像 A 经 B 腐蚀所得结果,如图 2-d。

3.2 几何体边界提取算法及空间形态描述

现实的岩土材料中所包含的各种物性特征,多为不规则几何形状。如何对岩土 CT 图像中包含的感兴趣的具有不规则几何形状的区域进行合理描述,特引入边界提取算法^[11,12]对其几何参数进行测

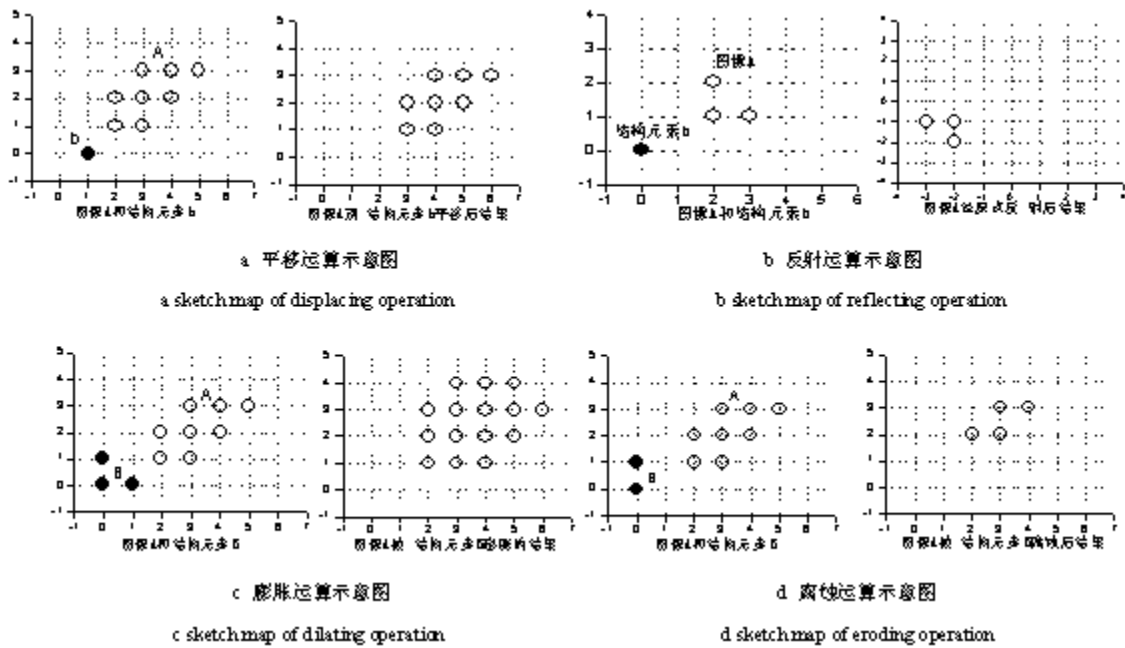


图 2 四种二值图像基本运算算法

Fig. 2 4 kinds of basic algorithm used in binary image

量,引入形状因子^[12]对其空间形态进行描述,其定义分别如下:

$$U(X) = (X - (X \ominus H)) \quad (1)$$

其中, U 表示构成兴趣域的周长的点集, H 表示恰当的结构元素,具体算法操作及结果见图 3。周长的计算就是统计边界提取运算后所形成的点集,面积运算是周长点集加上边界内点所构成的点集。

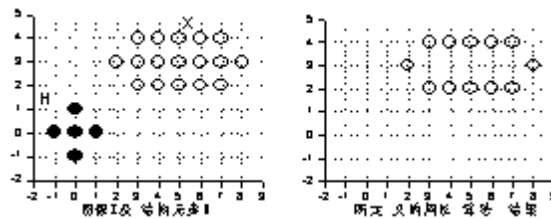


Fig. 3 Sketch map of the edge pick-up algorithm

$$FF(X) = \frac{U(X)}{2 \sqrt{\pi A(X)}} \quad (2)$$

式中, $U(X)$ 表示 ROI 周长, $A(X)$ 表示其面积。如果几何形状为圆形,则 FF 值为 1;如果 X 的几何形状与圆的偏离程度越大,形状越不规则,则 FF 值越大。借此实现对其几何形状的比较描述。

3.3 裂纹提取方法

对某点是否隶属于裂纹的判定可以用该点和相邻各点的密度变化量来衡量。天然缺陷和加载劣化破坏了 CT 数空间一定范围内分布的均匀性,而 CT 数的空间分布情况一经扫描就是一组确定的数,这组 CT 数的空间分布综合反映了加载过程对材料性质劣化的影响及物质空间分布上的差异性。因此,本文设想利用静态数据空间分布的不均匀性来提取裂纹,现定义各像素点的 CT 数变化量和基于此的裂纹判定准则如下:

$$\Delta H_{i,j} = \max(\Delta H_{i-(i+1),j}, \Delta H_{i,j-(j+1)}) \quad (3)$$

其中, $\Delta H_{i-(i+1),j} = |H_{i,j} - H_{i+1,j}|$, $\Delta H_{i,j-(j+1)} = |H_{i,j} - H_{i,j+1}|$, $i=1,2,\dots,512$; $j=1,2,\dots,512$ 。

$H_{i,j}$ 为第*i*行、第*j*列的CT单元上的CT数。由于图像的512行和512列处于图像的边缘,远离裂纹区和岩样扫描区,所以定义 $\Delta H_{i,j}=0$,即认为其对裂纹提取没有影响。

当 $\Delta H_{i,j}<\xi$,该点归入非裂纹区;当 $\Delta H_{i,j}\geq\xi$,该点归入裂纹区,其中 ξ 为裂纹提取阈值。为确定阈值 ξ ,现取图1中各CT图像矩阵的256行和258列上的CT数研究其空间分布规律。

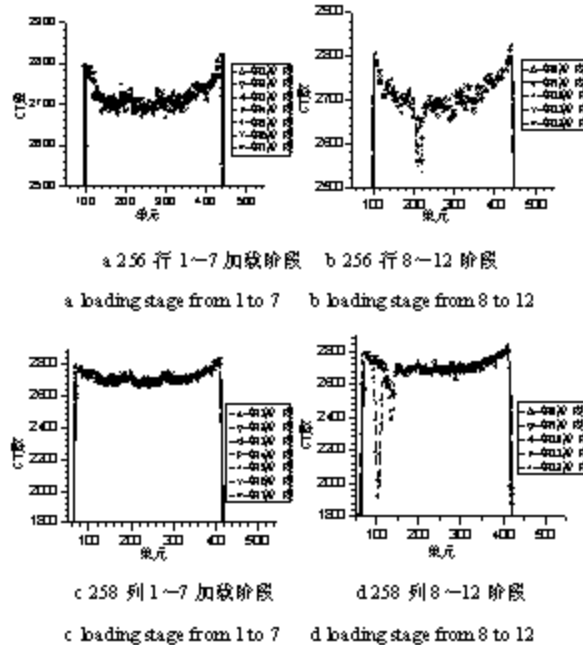


图4 256行和258列CT数变化曲线

Fig. 4 Curve of CT number in 256 row and column

从图4-a可以看出每条线上的前后两点的CT数变化不大,一般很少超过10,说明空间均匀性较好;7条线几乎重叠,说明加载对材料性质的影响不大,加载前后CT数空间分布的均匀性没有剧烈变化。图4-b可以看出5条线在210的位置上前后两点CT数变化达20~40,总体偏离原值100左右。从图4-c可以看出每条线上的前后两点的CT数变化不大,一般很少超过10,7条线几乎重叠,说明加载对材料性质的影响不大。图4-d可以看出5条线在140的位置上前后两点CT数变化20~40;在第12加载阶段,在110和140位置CT数变化幅度均较大,总体偏离原值200~800。材料由于加载产生的裂纹造成了CT数局部均匀性的变化,这种局部CT数的剧烈波动现象为裂纹寻找提供了线索,经上述分析选定 $\xi=20$ 。

4 在岩土CT图像量化描述中的应用

利用公式(3)计算每一点相对于相邻点CT数的变化量,再利用裂纹提取准则,在阈值 $\xi=20$ 时对断面4每个加载阶段的CT图像进行了裂纹提取,所得结果见图5。

从所提取的裂纹扩展过程结果图可以看出,在 $\sigma=0.00\sim19.93\text{MPa}$ 阶段,呈现随机分布,且没有搭接贯通的趋势,这是由于成岩作用形成的物相差异或初始损伤造成的,其对裂纹的产生有影响但不起主导作用。在 $\sigma=20.59\sim31.03\text{MPa}$ 阶段,主裂纹突然出现且贯通,随后次一级裂纹再次切割岩样,使其更加破碎。在整个裂纹提取结果中可以看出,边缘部分有一个圆形区域,这是由于CT伪影造成的,是假像。在后续几何测量中以剔除边界伪影后的裂纹为准,剔除结果见图6。

为实现对裂纹的几何测量,即面积、周长、长度和形状因子等量化参数的计算,利用图像处理技术中的边界提取算法,周长提取结果见图7,并对裂纹周长进行了计算;对裂纹图像直接进行了像素单元数的统计,对其乘以 $0.15\times0.15\text{mm}^2$,即得面积值,同时对该区域的CT数均值进行了计算;利用骨架细化算法进行了裂纹长度提取,结果见图8。

从长度提取结果图8可以看出,有很多小毛刺,这是由于更细小的裂纹出现而造成的,它为再次破

裂指明了潜在的方向。经过对图像处理结果的测量和计算,获取了裂纹空间扩展过程和几何量化变化结果。对于计算获取的裂纹区 CT 数均值、裂纹面积、裂纹周长、裂纹长度和裂纹形状因子等量化参数列于表 1。从形状因子的计算结果知道,随着裂纹的出现,其形状偏离圆形越来越远,但后面随着裂纹的区域的扩展,岩样变得更破碎,这反而造成 FF 变小。

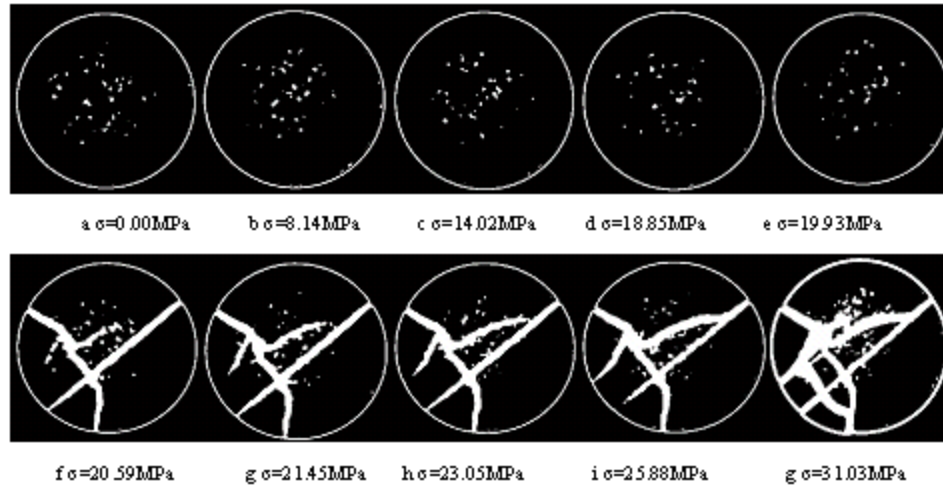


图 5 裂纹提取结果二值图像

Fig. 5 Binary image of the pick-up crack

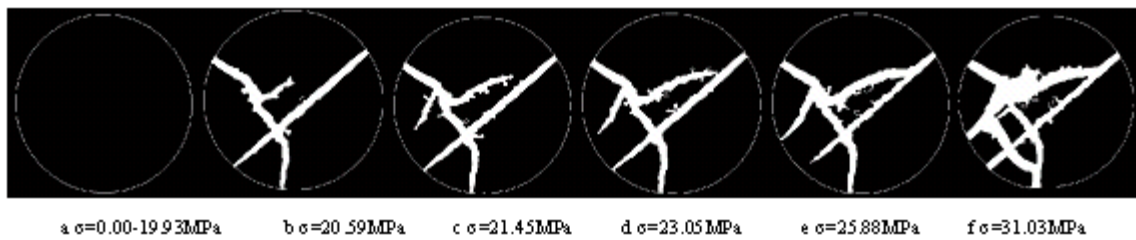


图 6 剔除边界伪影后的裂纹二值图像

Fig. 6 Binary image of crack eliminated edge false shadow



图 7 裂纹周长提取结果

Fig. 7 Pick-up results of crack's perimeter

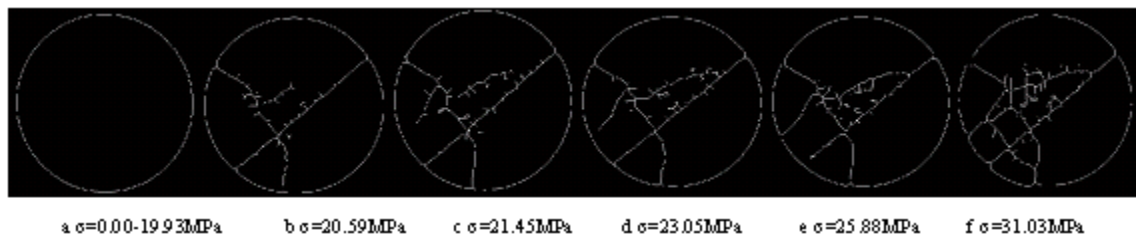


图 8 裂纹长度提取结果

Fig. 8 Pick-up results of crack's length

表 1 裂纹几何描述及测量结果表
Tab.1 Measure results of crack's geometrical description

σ (MPa)	裂纹				
	CT 数均值(HU)	周长(mm)	面积(mm ²)	长度(mm)	FF
20.59	1561.17	190.05	737.66	127.05	3.50
21.45	1547.18	241.65	874.01	164.85	4.08
23.05	1535.95	250.95	927.42	168.45	4.12
25.88	1500.96	256.65	978.08	180.75	4.10
31.03	1351.31	295.05	1552.25	244.35	3.74

5 结语与展望

本文主要围绕解决如何利用 CT 图像或一般图像资料提取裂纹的几何参数和物理参数展开,这有利于解决局部化问题中破损发生的位置和破损量的大小等问题,即把研究的目标指定到感兴趣的区域,并对其信息的变化进行追踪。本文主要工作如下:

- (1) 定义了基于 CT 图像的裂纹提取算法和判定准则,并对阈值进行了选定,即 $\xi=20$ 。
- (2) 在此阈值下,进行了裂纹提取,并对其边界伪影进行了剔除操作。在此结果的基础上,对其边界进行了提取;对其骨架进行了细化操作,并最终对裂纹进行了几何参数的测量。

参考文献:

[1] 赵永红. 受单轴压缩大理岩充填割缝周围的微裂纹生长 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15):2504~2509 (Zhao Yonghong. Mini-crack development from a cemented fracture in marble specimen under uniaxial compression. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(15):2504~2509 (in Chinese))

[2] 王泽云,刘立,刘保县. 岩石微结构与微裂纹的损伤演化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10):1599~1603(Wang Zeyun, Liu Li, Liu Baoxian. Characteristics of damage evolution of micropore and microcrack in rock. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(10):1599~1603 (in Chinese))

[3] 朱珍德,张勇,王春娟. 大理岩脆—延性转换的微观机理研究 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(1):31~35(Zhu Zhende, Zhang Yong, Wnaf Chunjuan. Study on microcosmic mechanics for brittle-ductile transition of marble. Journal of china coal society, 2005, 30(1):31~35(in Chinese))

[4] 任建喜. 冻结裂隙岩石加卸载破坏机理 CT 实时试验 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5):641~644(Ren Jianxi. Real-time CT test of damage failure mechanism of frozen cracked rock in loading and unloading condition. Chinese journal of geotechnical engineering, 2004, 26(5):641~644(in Chinese))

[5] 王宝军,施斌,刘志彬等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2):244~247 (Wang Baojun, Shi Bin, Liu Zhibin *et al.* Fractural study on microstructure of clayey soil by GIS. Chinese journal of geotechnical engineering, 2004, 26(2):244~247(in Chinese))

[6] Wang Weixing, Jiu Wenbiao, Huang Ying. Rock fracture tracing by image processing [J]. Journal of Fudan University, 2004, 43(5):930~933(in Chinese)

[7] 左宇军,李夕兵,赵国彦. 受静载作用的岩石动态断裂的突变模型 [J]. 煤炭学报, 2004, 29(6):654~658(Zuo Yujun, Li Xibing, Zhao Guoyan. A catastrophe model for dynamic fracture of static loaded rock. Journal of china coal society, 2004, 29(6):654~658(in Chinese))

[8] 代革联,李新虎. 岩石加卸载破坏细观机理 CT 实时分析 [J]. 工程地质学报, 2003, 12(1):104~108(Dai Gelian, Li Xinhui. CT real time testing of meso-failure mechanism of rock under loading and unloading condition. Journal of engineering geology, 2003, 12(1):104~108(in Chinese))

[9] 岳钟琦,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 Zhongqi, Chen Sha, Zheng Hong *et al.* Digital image proceeding based on finite element method for geomaterials. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(6):889~897(in Chinese))

- [10] 王学滨,海龙,黄梅等. 岩样单轴拉伸损伤不均匀性分析—第一部分:基本理论 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9):1446~1449(Wang Xuebin, Hai Long, Huang Mei *et al.* Inhomogeneity analysis of damage under uniaxial tension_(I) basic theory. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(9):1446~1449(in Chinese))
- [11] 飞思科技产品研发中心编. Matlab6.5 辅助图像处理 [M]. 北京:电子工业出版社, 2003 年 1 月(Issued by the researching and developing group of Feisi science and technology products. Assistant image disposal of Matlab6.5. Beijing:the publishing company of electronic industry, published in January 2003(in Chinese))
- [12] 唐常青等编着. 数学形态学方法及其应用 [M]. 北京:北京师范大学出版社, 1986 年 11 月(Tang Changqing. Method of morphology and its application. Beijing:the publishing company of beijing teacher-training university, published in November 1986(in Chinese))

Quantitative Description of Crack Based on the Image Measuring Technique and CT Test

YIN Xiao-tao¹, DANG Fa-ning^{1,2}, DING Wei-hua^{1,2}, CHEN Hou-qun^{1,3}

(1. Xi'an university of technology, geotechnical engineering research institute, Xi'an, 710048; 2. State key laboratory of frozen soil engineering, cold and arid region environmental and engineering research institute, the Chinese academy of science, Lan zhou, 730000; 3. China institute of water resources and hydropower research, Beijing, 100041)

Abstract: The principle of the image measuring technique based on the mathematic morphology and the CT test are briefly presented. On basis of these, the pick-up method of crack and criterion of its determination are defined, then the threshold ξ (equals to 20) is selected. Moreover, a set of quantitative description parameters about information pick-up in the region of interest, geometrical measuring and spatial description are defined. One of sandstone is taken as example to illustrate the quantitative description of the geotechnical CT image based on these techniques. A new analytical way for CT experimental datum of the geotechnical mechanics is developed.

Key words: image measuring technique; CT test; quantitative; crack