

非贯通裂隙介质单轴受力条件下的损伤本构关系探讨

陈蕴生¹, 韩 信¹, 李 宁^{1, 2}, 马立新¹, 蒲毅彬², 廖全荣²

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 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实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在对裂隙与孔隙、微裂隙两类不同层次损伤的演化特征与相互关系进行试验研究与分析的基础上, 分别确定了表征这两类损伤的奇异损伤变量和分布损伤变量, 推导了单轴压缩条件下非贯通裂隙介质损伤本构方程, 并运用试验结果对其进行了验证。

关键词: 岩土力学; 非贯通裂隙介质; CT 识别; 细观损伤; 损伤变量; 损伤本构方程

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5926 - 06

DISCUSSION ON DAMAGE CONSTITUTIVE RELATION OF NON-INTERPENETRATED CRACK MEDIA UNDER UNIAXIAL STRESS

CHEN Yun-sheng¹, HAN Xin¹, LI Ning^{1, 2}, MA Li-xin¹, PU Yi-bin², LIAO Quan-rong²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the analysis of relationship between damage evolution of crack and evolution of micro-crack, singularity damage variable and distribution damage variable have been defined, which can illustrate two kinds of damages, and the damage constitutive equation of non-interpenetrated crack material under uniaxial compressive condition has been built and validated by tests.

Key words: rock and soil mechanics; non-interpenetrated crack material; CT identification; meso-damage; damage variable; damage constitutive relation

1 引 言

自从 1976 年 Dougill 将损伤力学引入岩石材料以来, 岩石损伤力学研究已成为当今岩石力学研究领域的热门课题之一^[1~8]。本构关系研究是岩石力学的一项基础性的研究课题^[4~8]。近年来, CT 技术被引入到岩石损伤研究中, 并取得了重要研究成果^[4~10]。

非贯通裂隙岩体作为一种工程中常见的地质体, 其力学特性是工程界和理论界都普遍关注的。非贯通裂隙介质包含有两种类型的初始损伤, 一类是规则的裂隙, 另一类是随机分布的孔隙和微小裂隙。前者一般称为“奇异损伤”, 本文将后者称作“分布损伤”。奇异损伤是主导因素, 其演化决定着分布损伤的演化特征和规律。在加载过程中, 两类损伤表现出不同演化特征, 但又存在着本质上的联系。因此, 要想建立客观描述非贯通裂隙介质损伤与变形

收稿日期: 2005 - 05 - 20; **修回日期:** 2005 - 10 - 10

基金项目: 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研项目(05JS34); 国家自然科学基金资助项目(50479023); 高等学校博士点基金项目(20040700001)

作者简介: 陈蕴生(1962 -), 男, 硕士, 1983 年毕业于河北地质学院水文地质专业, 现任副教授, 主要从事岩石力学试验方面的教学与研究工作。E-mail: yschen@xaut.edu.cn。

机理的本构关系, 就应分别考虑上述两类损伤演化特征的差异与联系, 特别是对奇异损伤的作用和演化特征作出客观的分析, 并在本构方程中体现出来。

本文首次利用 CT 技术对单轴加载条件下非贯通裂隙介质细观损伤演化规律进行研究, 并对分布损伤和奇异损伤的作用和演化特征作出客观分析, 并在本构方程中体现出来。本文就此问题进行初步探讨。

2 试验简介

模拟裂隙岩体的试件由水泥砂浆浇注而成, 其中无裂隙试件单轴抗压强度为 16.664 MPa; 试样形状为 100 mm×100 mm×210 mm 的柱状, 分为 4 组, 分别包含有倾角为 30°, 45°, 60°和 90°的非贯通裂隙(见图 1)。本文的试验部分在中国科学院冻土工程国家重点试验室内的 MTS 试验机上完成, 试验数据由计算机自动采集。试验采用单轴加载, 应变控制, 应变速率为 0.5 mm/min, 在加载过程中可对试件进行实时 CT 扫描, 具体试验条件参见文[9, 10]。

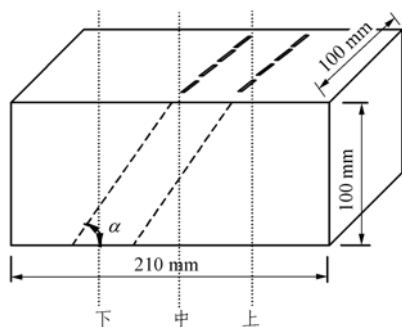


图 1 试样结构示意图
Fig.1 Structure of sample

3 试验分析

非贯通裂隙介质中的两类不同层初始损伤 - 裂隙和孔隙、微裂纹, 在加载过程中二者表现出截然不同的演化特征, 又存在着内在联系。为了进一步分析裂隙的变形特征及其对试件的影响, 在 CT 图像上对裂隙区和除裂隙外的区域(非裂隙区)的灰度均值分别进行统计, 并将上、中、下 3 个断面的统计结果作平均分析(见图 2, 3)。CT 图像中 CT 数较低的暗色区域为试件中的各种缺陷(初始损伤), 其中较规则的为裂隙, 随机分布的为孔隙和微裂隙。

由图 2, 3 可见, 裂隙区灰度均值随应力变化规

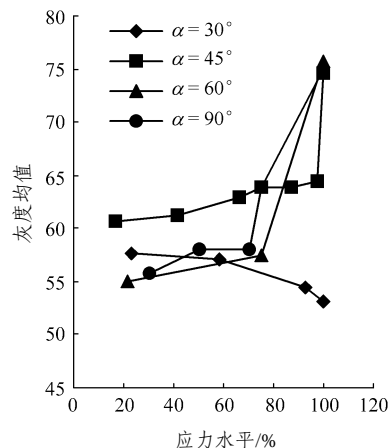


图 2 裂隙区灰度均值与应力水平关系曲线
Fig.2 Relationship curves of crack gray-scale and stress-level

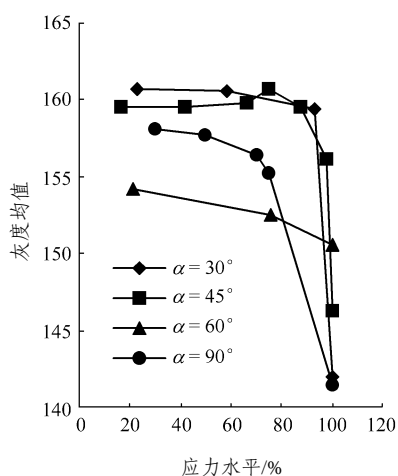


图 3 非裂隙区灰度均值与应力水平关系曲线
Fig.3 Relationship curves of non-crack gray-scale and stress-level

律与非裂隙区截然不同。裂隙区除 $\alpha = 30^\circ$ 试件灰度均值随应力水平的提高而降低外, 其他均是随应力而升高的, 反映出裂隙不断压缩、闭合的变形过程; 而非裂隙区域除 $\alpha = 45^\circ$ 试件在低应力水平灰度均值增高, 75%以后开始降低外, 其余均随应力水平的提高而持续降低, 反映了该区域损伤面积随应力增加而不断扩大的损伤演化过程。

比较 $\alpha = 45^\circ$ 试件裂隙区与非裂隙区灰度均值曲线可以发现, 在 75% 应力水平以前, 二者均随应力水平的提高而增长, 且增长速率不断增大; 75% 应力水平以后, 裂隙区曲线变缓, 增长速率降低, 而非裂隙区则开始下降。这是由于裂隙压缩至一定程度后, 由端部开始开裂, 并向非裂隙区扩展, 裂隙的压缩变形速率有所降低, 同时导致非裂隙区灰度均值下降; 当应力进一步增大并接近极限应力时, 裂隙加速变形和扩展, 曲线斜率又逐渐增大, 非裂

隙区灰度均值则迅速下降。由此可清楚地看出非贯通裂隙介质在损伤演化过程中，裂隙与其周围介质之间的内在联系，以及裂隙对整个试件变形所起的主导作用。

非裂隙区灰度均值随应力的变化趋势与整个扫描断面的灰度均值随应力的变化趋势基本一致，也就是说，后者无法反映出裂隙的变形特征及其对试件变形的主导作用。若用扫描断面的灰度均值(或CT数)定义损伤变量，就忽略了裂隙的作用，不可能真实地描述非贯通裂隙介质的损伤机理。因此，在建立非贯通裂隙介质损伤本构关系时，应分别定义表征2种不同层次损伤——裂隙和孔隙(包括微裂隙)的损伤变量。

4 损伤本构关系的建立

4.1 损伤变量的确定

损伤力学研究的首要问题是选择恰当的代表损伤的状态变量——损伤变量。对于非贯通裂隙介质，在加载过程中，伴随着裂隙的张开与闭合，都会在裂隙的两端产生应力集中，造成试件内部应力场的不协调。应力集中与应力场不协调是导致裂纹由裂隙端部开始萌生、扩展及损伤演化局部化的直接原因。对于非贯通裂隙介质，裂隙闭合的过程同时伴随着裂隙端部岩桥的应力集中的过程，也应被视为损伤累积的过程。

裂隙变形(张开与闭合)量的大小，在一定程度上反映了裂隙端部应力集中程度，因此，用裂隙变形量来计算奇异损伤变量，不仅体现了非贯通裂隙介质损伤演化的局部化特点，也间接地表征了应力集中引起的介质力学性质的劣化过程。

在CT图像上，裂隙的张开，使裂隙带灰度均值降低；裂隙的压缩、闭合则导致裂隙带密度增大，CT图像上裂隙区灰度均值增高。

奇异损伤变量定义如下：

$$D_f = \lambda \frac{|\Delta G|}{G_0} \tag{1}$$

式中： D_f 为奇异损伤变量； ΔG 为裂隙带灰度均值变化量； G_0 为初始应力水平裂隙带灰度均值； λ 为状态参数，在剪切、剪切与张裂隙混合、张裂不同状态下分别取不同的值。

分布损伤变量用非裂隙区孔隙、微裂隙面积与总面积的比值来定义。

$$D_m = \frac{\tilde{p}}{p} \tag{2}$$

式中： D_m 为分布损伤变量； \tilde{p} 为非裂隙区孔隙、微裂隙面积； p 为总面积。

4.2 损伤演化方程

奇异损伤变量与应力水平之间的关系见图4，二者近似呈线性关系，拟合得出奇异损伤演化方程为

$$D_f = K_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^\alpha \tag{3}$$

式中： α 为荷载作用方向与裂隙之间的夹角，分别为 30° ， 45° ， 60° ， 90° ；对应的斜率 K_1 相应取为0.0514，0.0662，0.2615。而 $\alpha = 60^\circ$ 试件由于扫描次数少，拟合误差较大。由斜率与裂隙角度之间关系(图4)可知，斜率 K_1 与裂隙角度 α 呈指数关系：

$$K_1 = 0.0207e^{0.0279\alpha} \tag{4}$$

由式(4)可确定 $\alpha = 60^\circ$ 时，试件奇异损伤变量在演化方程中的斜率。

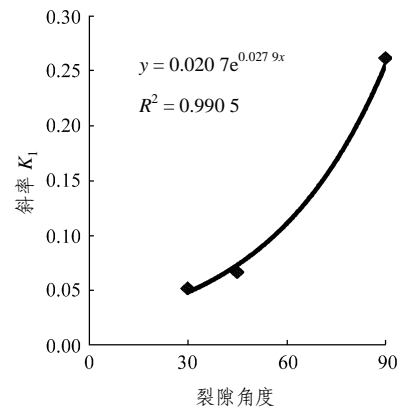


图4 斜率 K_1 与裂隙角度 α 关系
Fig.4 Relationship of K_1 and α

分布损伤变量与应力水平之间的关系如图5所示。由图5可见，在低应力水平时，分布损伤变量随应力水平的提高而缓慢线性变化，应力达到某一水平后，分布损伤变量开始快速增长。不同角度裂隙试件其分布损伤变量快速增长的起始应力水平不同。

在低应力水平时，分布损伤变量的演化方程为

$$D_m = K_2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right) + A \tag{5}$$

式中： K_2 为斜率，反映了分布损伤的演化速率； A 为截距，表征了初始分布损伤的大小。 K_2 与 A 的取值见表1。

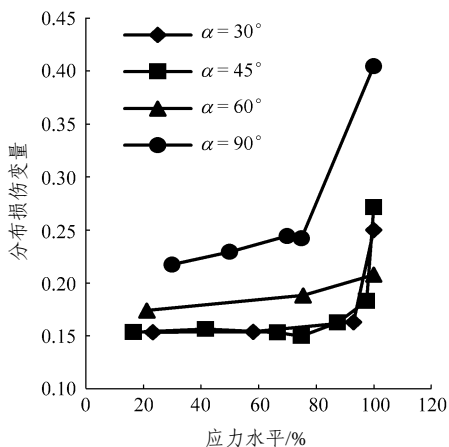


图 5 分布损伤变量与应力水平关系曲线

Fig.5 Relationship curves of distribution damage variable and stress-level

表 1 K_2 值与 A 值
Table 1 Values of K_2 and A

$\alpha / (^\circ)$	K_2	A
30	0.013 3	0.148 8
45	0.005 3	0.151 8
60	0.025 6	0.168 3
90	0.056 7	0.199 4

在加速增长阶段，拟合得到分布损伤变量演化方程为

$$D_m = Be^{c\left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)} \quad (6)$$

式(6)中的 B , C 取值见表 2。

表 2 B 值与 C 值
Table 2 Values of B and C

$\alpha / (^\circ)$	B	C
30	0.091 2	0.839 4
45	0.034 6	1.871 0
60	0.137 5	0.411 8
90	0.115 4	1.161 7

4.3 损伤本构方程的推导

试件的变形主要由裂隙变形和材料变形两部分构成，采用串联的弹性闭合元件和弹性变形元件计算试件的总应变，以 ε , ε_f 和 ε_m 分别表示总应变、裂隙应变和材料应变，则有

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_m \quad (7)$$

应力条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_f = \sigma_m \\ \varepsilon_f &= \frac{\sigma}{E_f} \\ \varepsilon_f &= \varepsilon_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{E_f}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： ε_{\max} 为裂隙最大应变变量，取裂隙在加载方向最大闭合量，计算公式为

$$\varepsilon_{\max} = \frac{b}{L} \sin \alpha \times 100\% \quad (9)$$

式中： b 为裂隙宽度， L 为试件高度。

根据应变等价性假设：

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\tilde{\sigma}}{E_f}} \right) = \varepsilon_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{E_f(1-D_f)}} \right) \quad (10)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\tilde{\sigma}}{E_m} = \frac{\sigma}{E_m(1-D_m)} \quad (11)$$

式中： $\tilde{\sigma}$ 为有效应力。

将式(10), (11)代入式(7)可得

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{E_f(1-D_f)}} \right) + \frac{\sigma}{E_m(1-D_m)} \quad (12)$$

式(12)即为非贯通裂隙介质损伤本构方程。

5 损伤本构方程的验证

将式(12)计算结果与 MTS 试验结果及 CT 试验应力水平 - 应变曲线作一比较，对损伤本构方程进行验证。

图 6~9 分别为 $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 试件计算、MTS 试验和 CT 试验的应力水平 - 应变曲线。

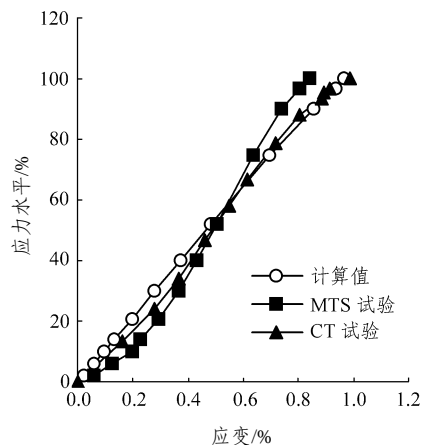


图 6 $\alpha = 30^\circ$ 试件应力水平 - 应变曲线

Fig.6 Relationship curves of stress level and strain($\alpha = 30^\circ$)

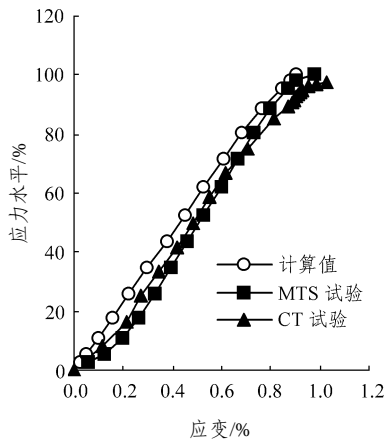


图7 $\alpha = 45^\circ$ 试件应力水平 - 应变曲线

Fig.7 Relationship curves of stress level and strain($\alpha = 45^\circ$)

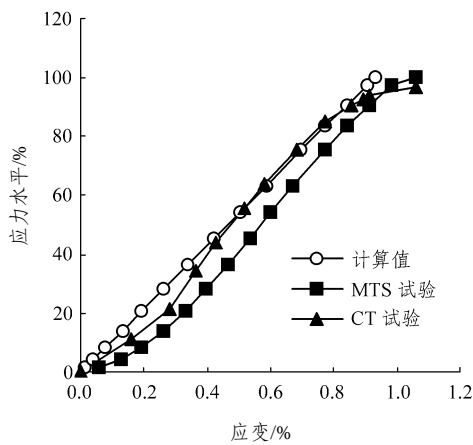


图8 $\alpha = 60^\circ$ 试件应力水平 - 应变曲线

Fig.8 Relationship curves of stress level and strain($\alpha = 60^\circ$)

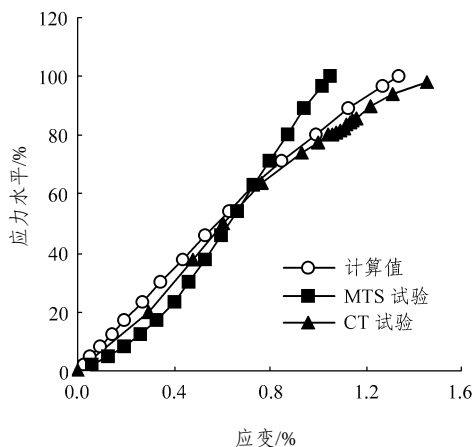


图9 $\alpha = 90^\circ$ 试件应力水平 - 应变曲线

Fig.9 Relationship curves of stress level and strain($\alpha = 90^\circ$)

由图 6~9 可见, 计算结果与试验结果基本吻合, 但尚有一定的差距, 其原因主要有以下几点:

(1) 计算结果与 MTS 试验结果差别较大, 而与

CT 试验结果吻合得要好一些, 这是由于方程中奇异损伤变量与分布损伤变量的计算是依据于 CT 试验结果, 其值是由 CT 试验结果拟合而得出的;

(2) 由于 CT 不能连续扫描, 且价格昂贵, 为节省经费, 试验时加载初期扫描间隔安排较大, 临近破坏时扫描密度才逐渐加大, 因此难以捕捉到试件在初始压密过程中内部结构的变化, 无法对此阶段细观损伤演化作出客观的分析与评价, 在公式推导时也就不能对其作针对性考虑, 因此, 在加载初期计算结果均小于试验值。

6 结 语

(1) 非贯通裂隙介质中的两类不同层次初始损伤 - 裂隙和孔隙 - 微裂纹, 在加载过程中二者表现出截然不同的演化特征, 又存在着内在联系。其中裂隙对整个介质的损伤演化起主导和控制作用, 而孔隙与微裂隙则对裂纹扩展的位置及扩展路径产生影响。这两类不同层次初始损伤的不同演化特征及其相互作用, 构成了非贯通裂隙介质损伤演化的基本模式和特点。

(2) 通过在 CT 图像上分别统计裂隙和非裂隙区域灰度均值的变化, 可以反映出裂隙和孔隙(包括微裂隙)两类不同层次损伤的不同演化特征及其二者之间的关系, 有利于揭示非贯通裂隙介质的变形破坏机理。

(3) 在对非贯通裂隙介质损伤演化的基本模式和特点进行分析和总结的基础上, 分别定义和计算了奇异损伤变量和分布损伤变量, 推导了单组非贯通裂隙介质单轴压缩条件下的损伤本构关系, 并进行了试验验证。

(4) 本文的损伤方程没有考虑以下几个问题: 一个是初始损伤问题, 公式对初始奇异损伤的影响反映不充分; 对于不同的破坏机理, 应该用不同的模型来描述, 但这势必使问题复杂化, 影响到模型的实际应用。本文试图以状态参数 λ 加以区别, 但如何定义这一参数, 目前尚没有结果, 计算时 λ 均取为 1。同时需要指出的是, 公式是在单组裂隙、单向压缩试验基础上推导的, 故只适用于该情况; 由于目前还不能在 CT 机上进行伺服试验, 对于软化过程中试件内部结构的变化还无法进行研究, 所以本文所提的本构方程只反映了峰值强度前试件的变形过程。

参考文献(References):

- [1] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.(Yu Shouwen, Feng Xiqiao. Damage Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.(in Chinese))
- [2] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.(Xie Heping. Rock Concrete Damage Mechanics[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [3] 凌建明, 孙 均. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 304 - 312.(Ling Jianming, Sun Jun. On microcrack damage of brittle rocks and its time-dependent characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 304 - 312.(in Chinese))
- [4] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石单轴受力 CT 识别损伤本构关系的探讨[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 29 - 34.(Yang Gengshe, Xie Dingyi, Zhang Changqing, et al. The discussion about damage constitutive relation of rock under uniaxial stress identified by CT[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2): 29 - 34.(in Chinese))
- [5] 杨更社, 孙 钧, 谢定义, 等. 岩石材料损伤变量与 CT 数间的关系分析[J]. 力学与实践, 1998, 20(4): 47 - 49.(Yang Gengshe, Sun Jun, Xie Dingyi, et al. Analysis of the relation between the damage variable and CT value of rock material[J]. Mechanics in Engineering, 1998, 20(4): 47 - 49.(in Chinese))
- [6] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(Ge Xiurun, Ren Jianxi, Pu Yibin, et al. A real-in-time CT triaxial testing study of meso-damage evolution law of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [7] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30 - 34.(Zhang Quansheng, Yang Gengshe, Ren Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30 - 34.(in Chinese))
- [8] 任建喜, 葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425 - 431.(Ren Jianxi, Ge Xiurun. Study of rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 425 - 431.(in Chinese))
- [9] 陈蕴生, 李 宁, 李爱国, 等. 非贯通节理介质细观损伤演化的 CT 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 702 - 706.(Chen Yunsheng, Li Ning, Li Aiguo, et al. Analysis of meso-damage process of non-interpenetrated jointed media by using CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 702 - 706.(in Chinese))
- [10] 陈蕴生, 李 宁, 韩 信, 等. 非贯通裂隙介质裂隙扩展规律的 CT 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2 665 - 2 670.(Chen Yunsheng, Li Ning, Han Xin, et al. Research on crack developing process in non-interpenetrated crack media by using CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2 665 - 2 670.(in Chinese))