

循环荷载下岩石损伤的 CT 细观试验研究

李树春^{1,2}, 许江¹, 杨春和^{1,3}, 蒲毅彬², 马巍²

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030; 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; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 利用 CT 机专用加载试验设备, 进行实时的两级循环荷载作用下岩石疲劳损伤演化 CT 细观试验, 得到岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律。研究表明: 一级循环荷载为强度的 38%~76% 时, 随着循环次数的增加, 上限应力处全区 CT 数标准差有增加的趋势, 密度和 CT 数有减小的趋势, 但变化很小, 说明这一过程损伤的积累是缓慢的; 二级循环荷载为强度的 45%~90% 时, 虽然试验时循环次数少于一级循环荷载, 但上限应力处全区 CT 数标准差、密度和 CT 数变化要大于一级循环荷载; 在岩石破坏前的 1 个循环, CT 数标准差、密度和 CT 数有较大变化。

关键词: 岩石力学; 裂纹; 循环荷载; 损伤

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)08 - 1604 - 06

STUDY OF CT MESO-EXPERIMENT OF ROCK DAMAGE UNDER CYCLIC LOAD

LI Shuchun^{1,2}, XU Jiang¹, YANG Chunhe^{1,3}, PU Yibin², MA Wei²

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The computerized tomography(CT) real-time tests of fatigue damage meso-propagation law of rock under two-grade cyclic loads have been accomplished using specified loading equipment of CT machine. It is shown that in the first grade of cyclic load equal to the strength of 38% to 76%, the standard deviation of CT number under the maximum stress increases with the increase of the number of cycle; while the density and CT number tend to decrease with relatively small variations. The process shows that the accumulation of damage is slow. In the second grade of cycle load equal to the strength of 45% to 90%, although the number of cycle is less than that in the first grade, the changes of standard deviation of CT number under the maximum stress, density and CT number are larger than those in the first grade; in the cycle before failure, the standard deviations of CT number, density and CT number change greatly.

Key words: rock mechanics; crack; cyclic load; damage

1 引言

在交通、建筑、采矿和水利等工程领域, 经常

遇到周期载荷作用及疲劳问题, 岩石在周期载荷作用下的强度和变形规律与静态载荷作用下有显著不同, 强度方面表现出劣化性; 变形方面则表现为记忆性、滞后性^[1]。周期载荷作用下岩石(体)的疲劳损

收稿日期: 2008 - 12 - 26; **修回日期:** 2009 - 04 - 13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CD724602); 国家自然科学基金资助项目(50574108); 教育部博士点基金资助项目(20060611006)

作者简介: 李树春(1971 -), 男, 博士, 1992年毕业于阜新矿业学院矿山测量专业, 主要从事岩石力学与工程、矿山岩移等方面的研究工作。E-mail: lsch2008@yahoo.com.cn

伤特性与工程的长期稳定性密切相关, 因此, 有必要对岩石的疲劳损伤特性进行深入研究。

在岩石疲劳问题的宏观力学研究方面, 提出在循环荷载作用下岩石不可逆变形发展的三阶段规律, 并提出以变形作为基准来度量岩体的强度和破坏^[1, 2]。席道瑛等^[3]研究分析了岩石的模量随循环数增加而下降, 衰减随循环数的增加而增大, 损伤随循环数的增加而增大直至破坏的变化规律。

近年来, 诸多学者^[4~11]开展了各种材料的 CT 细观试验研究, 对于岩石类材料, CT 技术已经在以下方面得到深入研究和应用: 多孔岩石孔隙连通性, 变形岩石中流体流动的可视化, 脆性断裂观测, 脆延性转化观测, 岩石在各种加载条件下的 CT 描述, 等等。此外, CT 技术的一个很重要的研究领域是岩石受载时的实时观测^[12~20], 实时观测的力学过程是连续的, 但扫描是根据需要进行的, 这一方法可以将岩石受载变形破坏全过程的损伤变化用其变形特征点的 CT 数或 CT 图像的变化来反映。例如, 葛修润等^[15]首次利用与 CT 机配套的专用加载设备, 进行了三轴和单轴荷载作用下煤岩破坏全过程的细观损伤演化规律的即时动态 CT 试验。任建喜等^[16]利用与 CT 机配套的专用三轴加载试验设备, 完成了岩石卸荷损伤断裂全过程的实时 CT 试验, 得到了卸荷条件下岩石损伤扩展的初步规律。任建喜等^[17]完成了单轴压缩荷载作用下岩石细观损伤扩展特性 CT 实时试验, 得到了清晰的岩石破坏全过程中微孔洞被压密, 微裂纹萌生、发展、贯通破坏和卸荷等不同发展阶段的 CT 图像。仵彦卿等^[18, 19]在 CT 观测基础上描述了岩石 CT 尺度的破裂阶段, 并对岩石小裂纹扩展过程进行了分析。

在岩石疲劳破坏的细观研究方面, 葛修润等^[20]利用 CT 机专用三轴加载试验设备, 进行了实时的岩石疲劳损伤演化 CT 细观试验。从细观尺度证实了岩石疲劳破坏存在门槛值, 研究了循环荷载最大应力值的变化对岩石疲劳破坏的影响机制, 得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律, 但试验中破坏试样的循环荷载次数较少。

另外, 自然界及岩石(体)工程中存在由低应力到高应力的多级循环荷载现象, 如日、月潮汐力作用^[21]及部分地震活动序列^[22]引起的岩石(体)破坏。对于多级循环荷载的研究, 目前主要以宏观变形试验结合声发射试验为主, 尚未见到应用 CT 设备进行

细观试验的报道, 有鉴于此, 本文进行了两级应力水平的循环荷载 CT 试验, 研究内容主要有:

- (1) 岩样在一个循环周期内不同应力水平(如比较应力上限和下限)时的 CT 数差别;
- (2) 岩样在周期荷载作用下, 同一上限应力水平处 CT 数的变化;
- (3) 岩样在周期荷载作用下, 不同级循环荷载上限应力水平 CT 数的变化;
- (4) 岩样在疲劳破坏过程中的细观损伤特性及裂纹失稳扩展导致岩石破坏的规律。

2 试验概述

2.1 试件的采取与加工

试件选用重庆细砂岩, 为尽可能降低因天然岩石试件个体差异造成的试验结果的离散性, 在大块完整无节理的砂岩体上采取密钻取样提取岩芯, 且以每 3 个自然位置临近的试件分为一组进行试验。将所采集的岩样采用湿式加工法加工成 50 mm×100 mm 的圆柱体标准试件, 端面平行度控制在 ±0.02 mm 以内, 加工成形后对试件进行 24 h 烘干后称重, 其后置于室内保持自然风干状态 1 个月以上, 等试验前再次称重以测定其含水量, 砂岩试样物理参数见表 1。

表 1 砂岩试样物理参数

Table 1 Physical parameters of sandstone sample

试件编号	质量/g	密度/(g·cm ⁻³)	含水量/%	干密度/(g·cm ⁻³)
CT3	453.5	2.312	0.308 7	2.305

2.2 准备试验

CT 试验前要先测定其抗压强度等力学参数, 为细观试验的控制提供依据。该试验在重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室进行, 加载设备采用 MTS815 岩石力学测试系统。由于进行 CT 试验时加载设备不同, 加载速率难以严格控制, 故准备试验采用 2 种不同位移速率的单轴静态加载方式进行测试, 试件 F1 和 F2 位移速率均为 0.1 mm/min, 试件 F3 和 F14 位移速率均为 0.2 mm/min。平均抗压强度取 4 个试件平均值为 83.3 MPa, 极限荷载取 4 个试件平均值为 155 kN(见表 2)。由表 2 可以看出, 在这 2 种加载速率下, 砂岩抗压强度和弹性模量等力学数据基本相同。

表2 砂岩力学参数

Table 2 Mechanical parameters for sandstone

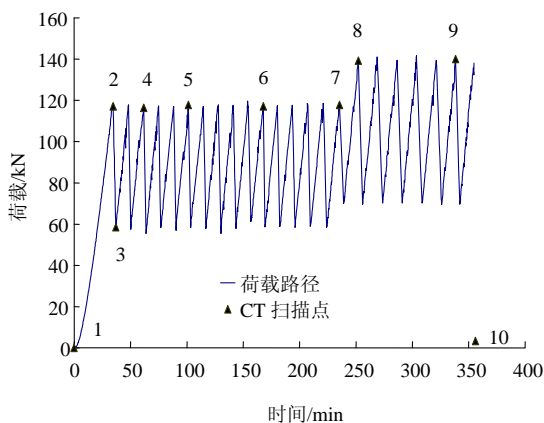
试件编号	抗压强度/MPa	极限荷载/kN	弹性模量/GPa	泊松比
F1	83.1	155.0	16.18	0.29
F2	83.2	155.0	16.46	0.30
F3	82.2	153.5	15.90	0.25
F14	83.7	156.5	16.10	0.27
平均值	83.3	155.0	16.16	0.28

2.3 CT 试验

CT 试验是在 CT 专用三轴加载设备上进行。CT 机为 SIEMENS SOMATOM plus 型 X 射线螺旋 CT 机，空间分辨率为 0.35 mm×0.35 mm，可识别的最小体积为 0.12 mm³(层厚为 1 mm)，密度对比分辨率为 0.3%(3 Hu)，用上述 CT 机进行岩石细观损伤力学试验可满足细观力学研究尺度的下限(10⁻⁴ m)。

试件 CT1 为速率调整及 CT 试扫样品，试件 CT2 为单调加载试验样品，试件 CT3 为循环荷载试验样品。由于循环荷载试验需要的 CT 扫描次数较多，为节约经费，试件 CT3 从上到下分为 3 个扫描层，在加载过程中的各个阶段对各层位进行实时 CT 扫描，从细观尺度研究砂岩的损伤过程和破坏特征。

加载方案设计为单轴两级循环加载，试验时密切关注岩样的应力 - 应变变化与 CT 扫描结果，首先取较小循环上限荷载，如果期间扫描的 CT 数与标准差变化不大，则增加循环上限荷载，直到岩石破坏。如图 1 所示，循环荷载共分两级，一级循环



1—初始；2—初始加载上限；3—初始卸载下限；4—一级循环第 2 个循环上限；5—一级循环第 5 个循环上限；6—一级循环第 10 个循环上限；7—一级循环第 15 个循环上限；8—二级循环第 1 个循环上限；9—二级循环第 6 个循环上限；10—破坏后即时扫描

图 1 试件 CT3 的 CT 扫描点

Fig.1 Scanning points of sample CT3

荷载为强度的 38%~76%时，共进行了 15 个循环；二级循环荷载为强度的 45%~90%时，在进行了 6 个半循环后破坏。共进行了 10 次扫描。

图 2 是试件 CT3 最后 2 次扫描的图片，其编号规则是：试样号 - 扫描点号 - 层位。

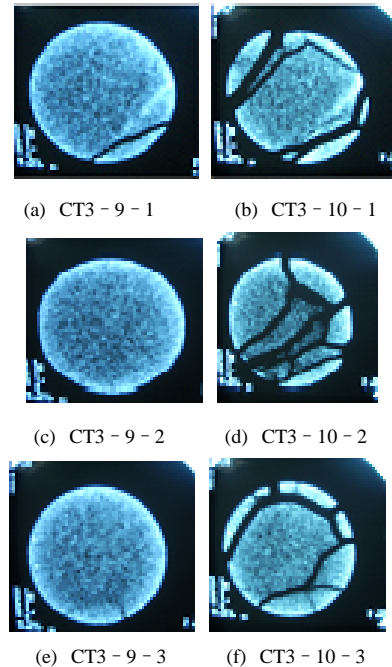


图 2 试件 CT3 扫描图片

Fig.2 Scanning images of sample CT3

2.4 CT 数与试件密度关系建立

(1) CT 数的基本方程

在一定的扫描条件下，经过校准的 CT 扫描图像反演出扫描层面的数据分布，采用卷积算法，在满足一定的空间分辨率条件下图像点的 CT 数：

$$H = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \times 1000 \quad (1)$$

式中： H 为 CT 数， μ 为图像点(及其邻域)的 X 射线吸收系数， μ_w 为纯水的 X 射线吸收系数。由式(1)可知，真空的 CT 数为 -1 000，纯水的 CT 数为 0。

(2) 方程的简化

式(1)可以简化为

$$H = (\mu' - 1) \times 1000 \quad (2)$$

其中，

$$\mu' = \mu / \mu_w$$

(3) 水、砂岩两相物质的吸收性质

对 X 射线的吸收使原子内层能级电子跃迁，与分子构成无关，物质对射线吸收符合加成原理，即

$$\mu = W_v \mu_w + \gamma_d \mu_s \quad (3)$$

从而得到

$$\mu' = W_v + \gamma_d \mu'_s \quad (4a)$$

其中,

$$\mu'_s = \mu_s / \mu_w \quad (4b)$$

式中: γ_d 为砂岩干密度, W_v 为砂岩体积含水量, μ_s 为单位密度砂岩吸收系数。

(4) 已知水、砂岩两相物质含量, 求解砂岩体吸收系数

联立式(2), (3)得

$$\mu'_s = \frac{H / 1000 + 1 - W_v}{\gamma_d} \quad (5)$$

已知岩样参数和其对应的 CT 数, 可以计算出代表砂岩体性质的吸收系数。

(5) 观测砂岩体密度变化

已知砂岩体吸收系数, 在确定含水量时, 只要从 CT 扫描图像提取某个感兴趣区的平均数据, 通过 CT 数求解砂岩干密度:

$$\gamma_d = \frac{H / 1000 + 1 - W_v}{\mu'_s} \quad (6)$$

3 扫描结果分析

3.1 损伤演化过程中的 CT 数变化

为分析试验过程中样品某一扫描层面由内至外的不同变化, 将扫描层面分为不同区域进行扫描。全区为整个扫描层面, 大区、中心均是以样品截面中心为圆心, 以圆面积确定的半径区内的测量数据, 大区面积为 11.80 cm², 中心面积为 3.06 cm²。外环是以截面全区扣除大区内对应数据后的计算值, 中环是以大区扣除中心内对应数据后的计算值。

经过试样的初始扫描并对比其他试样, 发现试件 CT3 结构较为均匀; 初始加载到上限应力(强度的 76%), 经过压密阶段、弹性变形阶段, 并进入微裂纹的稳定发展阶段, 全区及各 CT 数及密度均有所增加, 全区 CT 数标准差增加, 各分区 CT 数标准差增减不一, 反映了各层内部及层间存在较大应力差异。

在单一循环中, 对比第 2, 3 次扫描发现, 上限应力处 CT 数、密度和 CT 数标准差均大于下限应力处, 但相差不大。现考虑随循环数增加, 各上限应力扫描点参数演化情况。

(1) 区域密度演化

图 3 为各扫描点区域密度变化, 由图 3 可知,

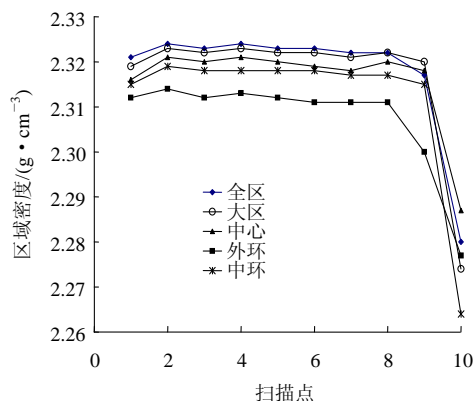


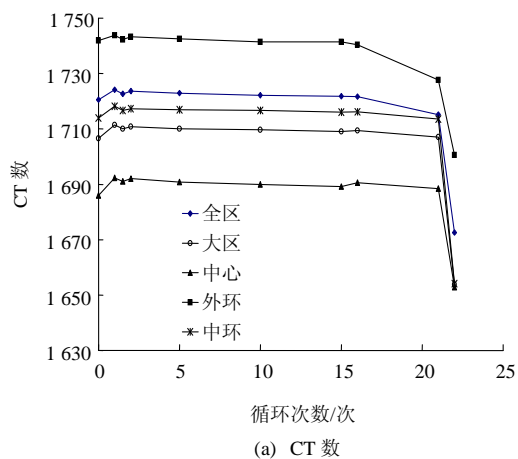
图 3 各扫描点区域密度变化图

Fig.3 Density evolvement of each scanning point

从初始加载到上限应力(扫描点 1~2), 全区密度增加 0.003 g/cm³, 一级循环荷载过程(扫描点 2~7), 全区密度减少 0.002 g/cm³, 从一级加载到二级(扫描点 7~8)全区密度未减少; 二级循环荷载过程(扫描点 8~9), 全区密度减少 0.005 g/cm³, 破坏阶段(扫描点 9~10), 全区密度急剧减少 0.037 g/cm³。其他各区密度演化规律与此大致相仿。由于从初始加载到上限应力包含了岩石的压密过程, 全区密度有所增加, 此后同样在上限应力处, 随着损伤发展, 全区密度有减小的趋势, 且在破坏过程中下降明显。

(2) CT 数演化

图 4 为各扫描点区域 CT 数和标准差变化, 由图 4(a)可知, 从初始加载到上限应力(扫描点 1~2), 全区 CT 数增加 3.7, 一级循环荷载过程(扫描点 2~7), 全区 CT 数减少 2.4, 从一级加载到二级(扫描点 7~8), 全区 CT 数减少 0.1; 二级循环荷载过程(扫描点 8~9), 全区 CT 数减少 6.5, 破坏阶段(扫描点 9~10), 全区 CT 数急剧减少 42.6。其他各区 CT 数演化规律与此大致相仿, 且 CT 数演化与全区密度演化具有相似的规律。



(a) CT 数

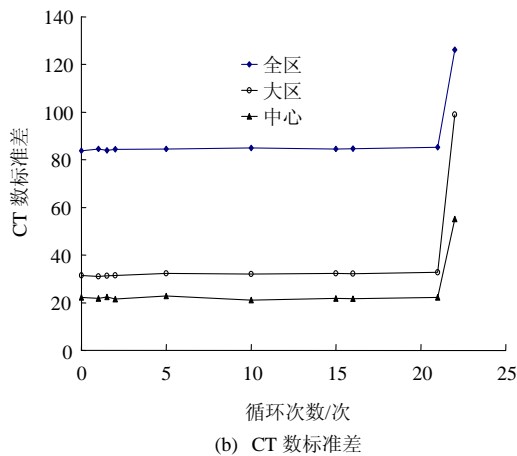


图4 各扫描点区域CT数和其标准差变化图

Fig.4 CT number and its standard deviation evolvement of each scanning points

(3) CT 数标准差演化

由图4(b)可知,从初始加载到上限应力(扫描点1~2),全区CT数标准差增加0.63,一级循环荷载过程(扫描点2~7),全区CT数标准差增加0.08,从一级加载到二级(扫描点7~8)全区CT数标准差增加0.08;二级循环荷载过程(扫描点8~9),全区CT数标准差增加0.66,破坏阶段(扫描点9~10),全区CT数标准差急剧增加40.86。其他各区CT数标准差演化规律与此大致相仿。

3.2 CT 数分析

总体来看,CT数有以下特点:

(1) 从CT数看出样品的均匀性比较好,除边缘加工干扰外,样品各层位一致;各区密度均匀,外环由于制样扰动密度稍低。

(2) 扫描点2初次加载至强度的76%,密度升高;扫描3卸载至强度的38%,结构回弹密度降低。

(3) 扫描点4~7均加载至强度的76%,随循环次数增加密度缓慢降低,损伤稍有增加。

(4) 扫描点8~9加载至强度的90%,循环5次后密度明显下降,最后一次循环导致破坏。

(5) 同样循环数下(如均取5次比较),高应力的循环荷载(二级)各参数变化比低应力的循环荷载(一级)大。

在第8次扫描前,各层CT数和标准差变化较小,且层间标准差差别不大,说明这一阶段前的微裂纹是散漫分布的,在第9次扫描时,全区CT数明显减小,标准差增大,各分区CT数、标准差增减不一,说明微裂纹散漫分布的“均衡”状态被打

破,部分裂纹开始加速扩展贯通,在第9次扫描时,第一扫描层出现局部宏观裂纹,第二扫描层未出现宏观裂纹,第三扫描层可以看到下部已发育的裂纹(见图2)。

由试验可以看出,岩样在第9次扫描前,其疲劳损伤演化进程较慢,在第9次扫描时只出现了一条较长的局部宏观裂纹,其贯通性主裂纹是在最后一次循环形成的,在这一循环过程中,损伤急剧发展,裂纹失稳扩展导致岩石破坏,试件CT3为剪切破坏。

由于CT数及其标准差反映了岩石区域密度均匀性,故可间接反映岩石微裂纹分布的随机性,或含微裂隙结构的岩石系统的有序度,本次试验表明,试样在第2~7次扫描时,各层及层间CT数标准差变化一直很小,说明此过程岩石微裂纹分布的随机性强,含微裂隙结构的岩石系统的有序度很低,或近似认为是无序的,二级循环荷载阶段,各参数变化稍大,而在第9次扫描开始,各参数急剧变化,岩石系统迅速从无序走向有序。

4 结 论

(1) 单一循环过程中,上限应力处CT数、密度和CT数标准差均大于下限应力处,但相差不大。

(2) 如只考虑上限应力处CT数变化,则循环荷载过程中(第2,4~9次扫描),全区密度减少,CT数减少,全区CT数标准差增加。

(3) 同样循环数下,高应力的循环荷载(二级)参数比低应力的循环荷载(一级)各参数变化大。

(4) 岩样在第9次扫描前,其疲劳损伤演化进程较慢,在第9次扫描时只出现了一条较长的局部宏观裂纹,其贯通性宏观主裂纹是在最后一次循环形成的,在这一循环过程中,损伤急剧发展,裂纹失稳扩展导致岩石破坏。

(5) 岩石的疲劳损伤破坏过程可以看作岩石系统从无序到有序的过程,符合耗散结构理论。

(6) 由于CT试验费用较高,无法应用大量样本进行试验,因此,本次试验具有探索性,所得初步结论尚需进一步验证。

参考文献(References):

- [1] 蒋宇,葛修润,任建喜.岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11):1810-1814.

- (JIANG Yu, GE Xiurun, REN Jianxi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1 810 - 1 814.(in Chinese))
- [2] 蒋宇. 周期荷载作用下岩石疲劳破坏及变形发展规律[博士学位论文][D]. 上海: 上海交通大学, 2003.(JIANG Yu. Fatigue failure and deformation development law of rock under cyclic load[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003.(in Chinese))
- [3] 席道瑛, 薛彦伟, 宛新林. 循环荷载下饱和砂岩的疲劳损伤[J]. 物探化探计算技术, 2004, 26(3): 193 - 198.(XI Daoying, XUE Yanwei, WAN Xinlin. The damage of saturated sandstones under cyclic loading[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 26(3): 193 - 198.(in Chinese))
- [4] CNUDDÉ V, MASSCHAELE B, DIERICK M, et al. Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool[J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(5): 826 - 832.
- [5] HIRONO T, TAKAHASHI M, NAKASHIMA S. In-situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT[J]. Engineering Geology, 2003, 70(1/2): 64 - 73.
- [6] HIRONO T, TAKAHASHI M, NAKASHIMA S. Mathematical programs for the analysis of three-dimensional pore connectivity and anisotropic tortuosity of porous rocks using X-ray computerized tomography image data[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2007, 44(9): 1 233 - 1 247.
- [7] LOUIS L, WONG T F, BAUD P, et al. Imaging strain localization by X-ray computed tomography: discrete compaction bands in Diemelstadt sandstone[J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(5): 762 - 775.
- [8] VINEGAR H J, DE WAAL J A, WELLINGTON S L. CT studies of brittle failure in castlegate sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1991, 28(5): 441 - 450.
- [9] KAWAKATA H, CHO A, YANAGIDANI T, et al. Observations of faulting in westerly granite under triaxial compression by X-ray CT scan[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3): 151 - 162.
- [10] CHO S H, KUBOTA T S, OGATA Y, et al. Microscopic visualization of a granitic rock subject to dynamic tensile loading by using a micro X-ray CT system[J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2005, 66(4): 334 - 339.
- [11] SUZANNE R, DOMINIQUE N T, JACQUES D, et al. Brittle-to-ductile transition in Beaucaire marl from triaxial tests under the CT-scanner[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 653 - 671.
- [12] GE X, REN J, PU Y, et al. Real-in time CT test of the rock meso-damage propagation law[J]. Science in China(Series E: Technological Sciences), 2001, 44(3): 328 - 336.
- [13] FENG X T, CHEN S L, ZHOU H. Real-time computerized tomography(CT) experiments on sandstone damage evolution during triaxial compression with chemical corrosion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 181 - 192.
- [14] REN J X. Real-time computerized tomography(CT) test of failure process of jointed granite under unloading in the Three Gorges Project(TGP)[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2004, 10(2): 11 - 14.
- [15] 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))
- [16] 任建喜, 葛修润, 蒲毅彬, 等. 岩石卸荷损伤演化机制 CT 实时分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 697 - 701.(REN Jianxi, GE Xiurun, PU Yibin, et al. Primary study of real-time CT testing of unloading damage evolution law of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 697 - 701.(in Chinese))
- [17] 任建喜, 葛修润, 杨更社. 单轴压缩岩石损伤扩展细观机制 CT 实时试验[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 130 - 133.(REN Jianxi, GE Xiurun, YANG Gengshe. CT Real-time testing on damage propagation microscopic mechanism of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 130 - 133. (in Chinese))
- [18] 作彦卿, 丁卫华. 单轴条件下砂岩三维破裂过程的 CT 观测[J]. 工程地质学报, 2002, 10(1): 93 - 97.(WU Yanqing, DING Weihua. X-ray CT observation on three-dimensional fracturing process of sandstone specimen under uniaxial condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(1): 93 - 97.(in Chinese))
- [19] 作彦卿, 曹广祝, 王殿武. 基于 X-射线 CT 方法的岩石小裂纹扩展过程分析[J]. 应用力学学报, 2005, 22(3): 484 - 490.(WU Yanqing, CAO Guangzhu, WANG Dianwu. Micro-fracturing processes of rock by real-time observation of X-ray CT[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(3): 484 - 490.(in Chinese))
- [20] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 191 - 195.(GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage propagation law of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 191 - 195.(in Chinese))
- [21] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠, 等. 循环荷载下大试件岩石破坏声发射试验——岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(ZHANG Huihui, YAN Yuding, YU Huaizhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scale rock failure under cycling load—fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(in Chinese))
- [22] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬, 等. 加卸载响应比(LURR)理论的试验研究[J]. 中国地震, 2003, 19(1): 58 - 66.(YU Huaizhong, YIN Xiangchu, XIA Mengfen, et al. Experimental research on the theory of LURR(load/unload response ratio)[J]. Earthquake Research in China, 2003, 19(1): 58 - 66.(in Chinese))