

# 渗流状态下砂岩的三维实时 CT 观测

崔中兴<sup>1,2</sup>, 仵彦卿<sup>1,2</sup>, 蒲毅彬<sup>2</sup>, 林峰<sup>3</sup>, 张飞跃<sup>1</sup>, 冯小太<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. 西安煤航遥感应用研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 利用中低压多功能 CT 专用渗流实验装置, 进行了三维应力状态下砂岩的渗流实时 CT 观测试验研究。为使试验具有对比性, 分别进行干燥试样的常规三轴试验和渗流三轴试验的 CT 实时观测, 取得了渗流对岩石损伤演化规律影响的初步成果。根据试验过程的应力-应变曲线, 提出试样强度和变形折减率的计算公式; 分析了干燥试样和渗透试样 CT 数与应力的相关关系; 提出了确定裂缝宽度的像素量测法; 提出根据测区平均 CT 数与测区面积的相关关系来确定裂缝宽度的数值计算方法。

**关键词:** 岩石力学; 实时 CT 观测; 渗流; 三维应力状态; 强度和变形折减率

**中图分类号:** TU 458

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)08-1390-06

## TRIAXIAL REAL-TIME OBSERVATIONS OF SANDSTONE UNDER SEEPAGE BY X-RAY CT SCAN

CUI Zhong-xing<sup>1,2</sup>, WU Yan-qing<sup>1,2</sup>, PU Yi-bin<sup>2</sup>, LIN Feng<sup>3</sup>, ZHANG Fei-yue<sup>1</sup>, FENG Xiao-tai<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Aerophotogrammetry and Remote Sensing Bureau of China Coal, Xi'an, 710054, China)

**Abstract:** By using the mid-low-pressure multi-function CT special seepage experiment equipment, the experimental study on real-time CT observation of sandstone under seepage and 3D stress is carried out. Considering the comparability of test results, the normal triaxial tests on dry specimens and triaxial tests on seepage specimens are observed by X-ray CT scan in real-time, respectively, and the initial results that the seepage affects the sandstone damage evolution are obtained. In accordance with the stress and strain curves, the strength calculation formulas of test specimens and deformation discount rate are introduced, and the relative relations of CT value of dry test specimens and seepage test specimens with stress are analyzed. At the same time, the image measuring method to determine the width of cracks is proposed. The paper also introduces the numerical calculation method with which the width of cracks is determined according to the relative relations between the average CT data and measuring areas

**Key words:** rock mechanics; real-time CT observation; seepage; 3D stress state; strength and deformation discount rate

## 1 引言

地质灾害的产生, 主要是由于岩体内温度场、渗流场和应力场的改变, 引起岩石内部细观裂纹扩

展演化的结果在宏观上岩体应力应变特征变化的客观表现<sup>[1]</sup>。应力场、渗流场耦合系统是实际工程中经常遇到的问题。因此, 研究水-岩相互作用的力学机制和岩石内部细观损伤演化过程及其破裂模

**收稿日期:** 2004-03-30; **修回日期:** 2004-04-26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(10172071); 陕西省教育厅专项(00JK218)

**作者简介:** 崔中兴(1954-), 男, 硕士, 1978年毕业于西北农学院水利工程系水工建筑专业, 现为在职博士研究生, 主要从事岩体力学、土工合成材料应用等方面的教学与研究工作。E-mail: cuizhx@xaut.edu.cn.

式, 从细观到宏观 2 个方面揭示出水-岩相互作用的损伤扩展机理, 可为工程岩体的稳定性评价提供理论依据。

计算机断层成像技术(computerized tomography)在岩石细观破坏观测中取得了极大成功。吴紫旺、马巍等人利用 CT 技术研究了冻土的蠕变特性, 杨更社(1995)、Kawakata 等人利用 CT 扫描对岩石材料的初始细观损伤特性进行了研究, 同时, 对损伤扩展进行了初步探讨。文[2]利用最新研制的 CT 加载设备, 在三轴和单轴压缩两种状态下, 对试验全过程的岩石细观损伤扩展规律进行了实时扫描试验。利用 CT 实时检测手段进行岩石细观损伤演化机理研究是目前国内外岩石细观损伤研究的发展趋势。

大部分岩体都处于与地下水的相互作用之中。岩石的渗透性一般都极弱, 因此, 岩体的渗透性主要取决于裂隙的发育程度, 可认为水流只在岩体的裂隙网络中流动。在荷载作用下, 岩体绝大部分的变形发生在裂隙, 引起裂隙变形的的主要因素是应力和渗流, 岩体裂隙中的地下水具有渗透压力, 通过作用于岩体的裂隙隙面而使岩体变形, 而裂隙的过水能力又和裂隙隙宽的三次方成比例<sup>[2-10]</sup>。因此, 裂隙岩体渗流场受应力状态的影响很大, 而渗流场的改变将改变渗透体积分力的分布, 渗透体积分力又必将对应力场产生影响, 这个相互影响是岩体力学至关重要的特性。因此, 除应力外, 渗透压力也会对岩石造成变形损伤。

本文试图利用最新研制的中低压多功能 CT 机专用渗流试验装置, 对砂岩进行水岩相互作用过程的三维实时 CT 观测, 初步揭示渗流对岩石细观损伤扩展规律的影响。

## 2 渗流状态下砂岩的三维 CT 实时观测

### 2.1 试验设备

本文利用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最新研制的与 CT 机配套使用的中低压多功能岩土渗流试验装置, 开展课题的研究工作。该渗流装置具有应变和应力控制以及反压力和气压力控制、可进行轴向荷载和广变形测量等特点。试验时将压力室放在 CT 机的扫描区, 可进行试验全过程的实时观测。

扫描设备为 SIEMENS SOMATOM plus 型 X 射

线螺旋 CT 机, 其空间分辨率为  $0.35 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$ , 可识别层厚为  $1 \text{ mm}$  时的最小体积为  $0.12 \text{ mm}^3$ , 密度对比分辨率为  $0.3\%$ (3 Hu)。

为保证渗流全部通过试样, 作者设计制作了专用的渗流压头, 试验结果证明完全达到了渗流状态的要求, 取得了满意的成果。

### 2.2 试验材料

本文所述试验以中等胶结程度透水性较好的陕西铜川地区的砂岩作为研究样本, 制成高为  $100 \text{ mm}$ , 直径为  $\phi 50 \text{ mm}$  的标准试样。试样平均干燥密度为  $2.08 \sim 2.09 \text{ g/cm}^3$ 。

### 2.3 试验过程的 CT 观测成果分析

试验过程中将各试样由上到下分为 3 个层位, 在加载过程中对各层不同阶段的横截面进行 CT 扫描。为保证渗透水流完全由试样的横截面通过, 渗流状态下砂岩的围压均设定为  $4 \text{ MPa}$ , 渗压则由  $P=0, P=1, P=2, P=3$  和  $P=4 \text{ MPa}$  梯级构成,  $P=0 \text{ MPa}$  时的试验过程为干燥试样的试验过程。试验过程的应力-应变曲线见图 1。

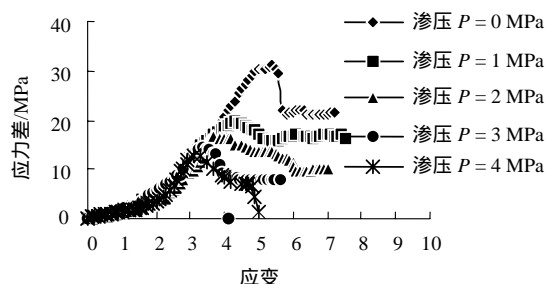


图 1 不同渗压作用下围压  $4 \text{ MPa}$  时砂岩试样的应力-应变曲线

Fig.1 Relation curves between stress-strain for sandstone under different seepage pressures when confining pressure is  $4 \text{ MPa}$

#### 2.3.1 渗压对试样强度和变形的折减率

由图 1~3 所示的试验结果可知, 随着渗压的增高, 试样的强度不断降低。当  $P=0 \text{ MPa}$  时, 试样的应力差为  $30.035 \text{ MPa}$ , 相应的位移为  $5.40 \text{ mm}$ ;  $P=1 \text{ MPa}$  时, 试样的应力差为  $19.65 \text{ MPa}$ , 相应的位移为  $4.30 \text{ mm}$ ;  $P=2 \text{ MPa}$  时, 试样的应力差为  $16.73 \text{ MPa}$ , 相应的位移为  $3.66 \text{ mm}$ ;  $P=3 \text{ MPa}$  时, 试样的应力差为  $14.40 \text{ MPa}$ , 位移为  $3.46 \text{ mm}$ ;  $P=4 \text{ MPa}$  时, 试样的应力差为  $12.918 \text{ MPa}$ , 相应的位移为  $3.10 \text{ mm}$ 。

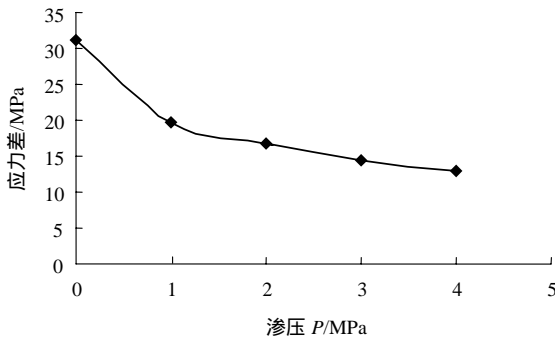


图2 相同围压作用下渗压对试样强度的影响

Fig.2 Influence of seepage specimen strength under equal confining pressure

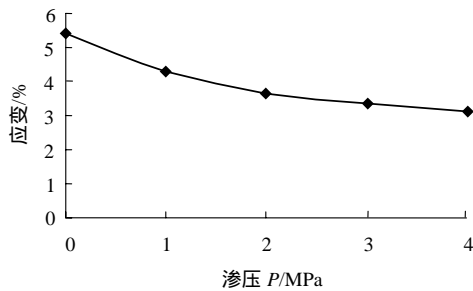


图3 相同围压作用下渗压对试样变形的影响

Fig.3 Influence of seepage press on specimen deformation under equal confining pressure

对于图 2, 3 所示的试验曲线, 将  $P = 0$  MPa 时的值作为基点, 分别用图 2, 3 中  $P = 0, P = 1, P = 2, P = 3$  和  $P = 4$  MPa 时的峰值强度及其相对应的变形值除以  $P = 0$  MPa 时的强度值和变形值, 可绘制成如图 4 所示的渗压对试样强度及其变形的折减率曲线图。

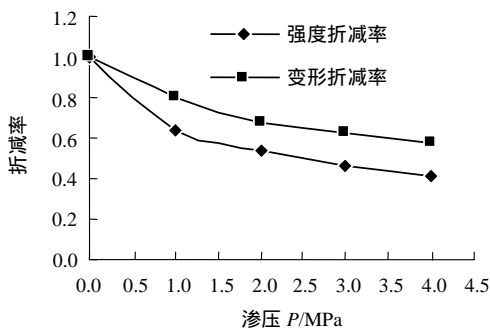


图4 相同围压作用下渗压对试样强度和变形的折减率  
Fig.4 Discount rate of specimen strength and deformation by seepage under equal confining pressure

对图 4 所示的曲线分别进行拟合, 可得渗压对试样强度的折减率公式:

$$y = e^{-\frac{\sqrt{P}}{2.1863}} \tag{1}$$

渗压对试样变形的折减率公式:

$$y = e^{-\frac{\sqrt{P}}{3.6438}} \tag{2}$$

式中:  $P = 0, 1, 2, 3, 4$  MPa, 当  $P = 0$  MPa 时为干燥试样的试验值。

### 2.3.2 CT 数与应力的相关关系

如图 5 所示, 由干燥试样的 CT 数与应力的相关关系可知, 试样全区的平均初始 CT 数为 1 420.10, 随着应力的增大, 试样的 CT 数也逐渐增大。当应力增大到约 20 MPa 时, CT 数开始减小, 表明试样内部结构发生了变化, 直接的结果是试样内部开始产生微细裂纹, 使得试样的密度降低, 导致 CT 数减小。当试样达到峰值强度后, CT 数继续减小, 直到试样达到残余应力阶段, 应力强度保持在 21.214 MPa, CT 数又开始增大, 至试验结束时, 试样的残余强度保持在 21.379 MPa, CT 数上升至 1 557.6。这说明试样在残余强度阶段直至试验结束这段过程中, 受到较强的压密作用。

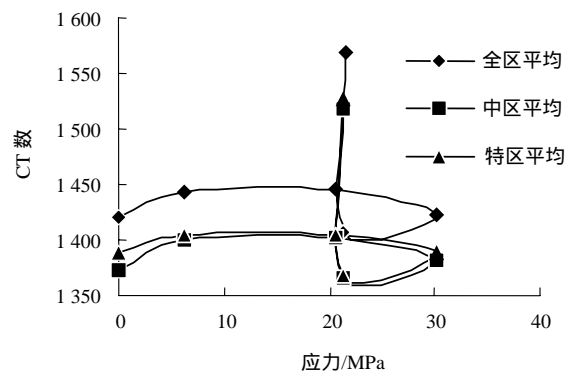


图5  $P = 0$  MPa 时试样强度与 CT 数变化的相关关系  
Fig.5 Relative relation of CT value variation with the strength of specimen when  $P = 0$  MPa

图 6 所示为  $P = 3$  MPa 时的渗透试样 CT 数与应力的关系。由图 6 可知, 当应力由 0 增至 2.825 MPa 时, 试样处于初始压密阶段; 由 2.825 MPa 增至 6.518 MPa 阶段, CT 数由 1 375.8 迅速攀升至 1 540; 此后试样处于硬化阶段, 应力 - 应变曲线呈陡峭上升状, 直至达到试样的峰值强度 14.40 MPa, CT 数仅增大到 1 550。即应力由 6.518 MPa 大幅度增至 14.40 MPa 的过程中, CT 数基本没有变化。这说明试样在应力为 6.518 MPa 阶段前, 就已得到充分的压密, 使试样进入充分的硬化阶段。

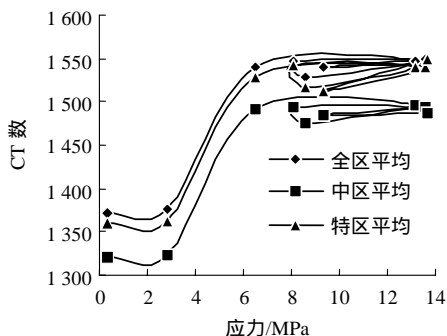


图 6  $P = 3$  MPa 时渗透试样 CT 数与应力的关系  
Fig.6 Relative relation of CT value with stress of specimen when  $P = 3$  MPa

### 3 裂缝宽度的量测与计算

#### 3.1 基于数字图像像素的裂缝宽度量测

图 7 所示为含裂缝试样不同视角方向的三维 CT 图像。数字图像是由像素组成的，各种不同的图像均以像素所组成的矩阵来表达，数字图像的分辨率即是以每英寸所能表示的像素来表达的，图像的比例则以每像素所代表的实际距离来表示。因此，可在已知比例的图像上量测出任意 2 点的实际距离。

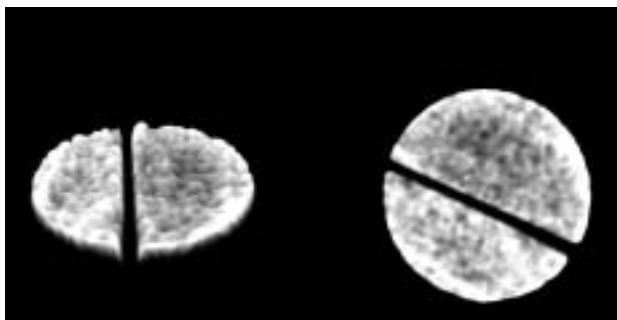


图 7 含裂缝试样不同视角方向的三维 CT 图像  
Fig.7 3D CT image in different viewing directions of the specimen with crack

试验所采用的试样直径为 50 mm，由此可算出图像的实际比例尺，进而量测裂缝的实际宽度。

如图 8 所示，试样直径为 2 009 像素，代表实际距离 50 mm，则每像素所代表的实际距离为  $50 / 2\,009 = 0.024\,888$  mm。则可通过量测裂缝宽度的像素数来计算裂缝的实际宽度。

图 9 为裂缝宽度量测的示意图。由图 9 可知，裂缝宽度占 86.738 5 像素，而每像素代表实际距离 0.024 888 mm，则裂缝实际宽度为 86.738 5 乘以 0.024 888 mm 等于 2.158 747 88 mm。

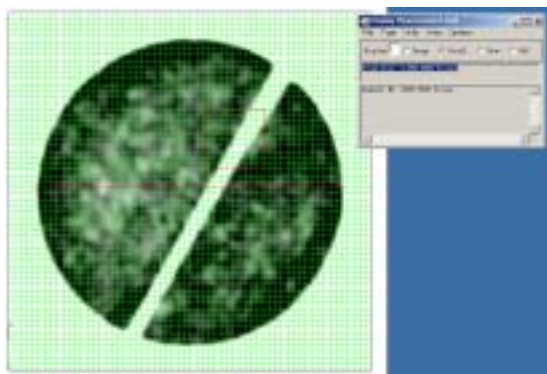


图 8 试样直径量测  
Fig.8 Measuring for the diameter of specimen

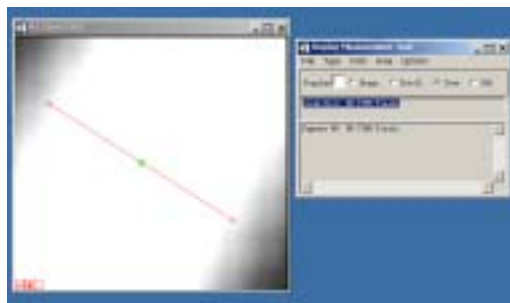


图 9 裂缝宽度量测  
Fig.9 Measuring for width of crack

#### 3.2 基于测区平均 CT 数与 $R/b$ 关系曲线的裂缝宽度求解

根据观测结果，可分别得出如表 1，2 所示的干燥试样和渗流试样的基本数据。利用表 1，2 的结果可绘出 CT 数与  $R/b$  关系曲线(图 10)及 CT 数与  $S_{\text{缝}i}/S_i$  之关系曲线(图 11)。

由图 10，11 可知，渗流状态下试样的 CT 数比干燥状态下试样的 CT 数值要大。根据 CT 数的定义，可知水的 CT 数为 0，空气的 CT 数为 -1 000，当试样中的裂缝被水所充填，使得裂缝中空气的 CT 数过渡为水的 CT 数时，其表现形式为 CT 数的增

表 1 干燥试样基本数据表  
Table 1 Basic data of samples

R/cm	CT 数	$S_i/\text{cm}^2$	$S_{\text{缝}i}/\text{cm}^2$	R/b	$S_{\text{缝}i}/S_i$
2.303 4	1 700.3	16.66	0.920 5	23.034	5.53
1.603 2	1 670.5	8.07	0.640 8	16.032	7.94
0.902 9	1 581.9	2.56	0.360 2	9.029	14.07
0.784 1	1 400.7	1.93	0.312 7	7.841	16.20
0.665 3	1 125.4	1.39	0.265 0	6.653	19.06

表 2 渗流试样基本数据表  
Table 2 Basic data of seepage test samples

R/cm	CT 数	$S_i/\text{cm}^2$	$S_{\text{缝}i}/\text{cm}^2$	R/b	$S_{\text{缝}i}/S_i$
2.303 4	1 768.8	16.66	0.920 5	23.034	5.53
1.603 2	1 738.1	8.07	0.640 8	16.032	7.94
0.902 9	1 658.2	2.56	0.360 2	9.029	14.07
0.784 1	1 450.5	1.93	0.312 7	7.841	16.20
0.665 3	1 228.0	1.39	0.265 0	6.653	19.06

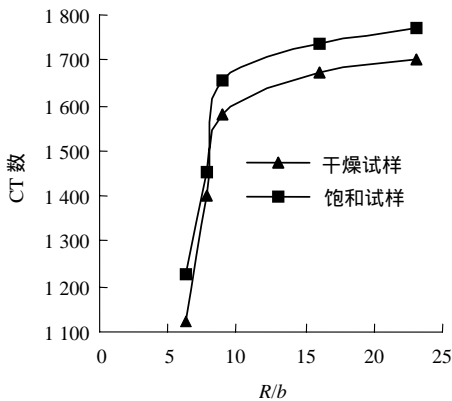


图 10 CT 数与 R/b 关系曲线

Fig.10 Relation curves between CT value and R/b

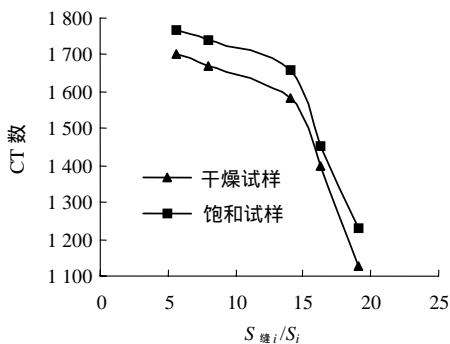


图 11 CT 数与  $S_{\text{缝}i}/S_i$  之关系曲线

Fig.11 Relation curves between CT value and  $S_{\text{缝}i}/S_i$

大。因此，在实际试验中由空气的 CT 数过渡为水的 CT 数时，CT 数在相同测区范围内的表现形式

呈现为增大的趋势。

拟合图 10 所示的干燥试样(为了节省篇幅，本文仅以干燥试样为例进行求解)的 CT 数与 R/b 之关系曲线，可得

$$\text{CT 数} = 1.1R^3 / b^3 - 55.4R^2 / b^2 + 848.9R / b - 2 406.0 \quad (3)$$

对式(3)进行变换后，可得关于试样裂缝半宽 b 的一元三次方程为

$$b^3 + C_1b^2 + C_2b + C_3 = 0 \quad (4)$$

式中： $C_1, C_2, C_3$  均为与 CT 数有关的系数。

式(4)为一个关于裂缝半宽 b 的一元三次方程，求解式(4)即可求得裂缝的半宽 b 值，进而即可求得整个裂缝的宽度。

## 4 结 语

由渗流状态下砂岩的三维实时 CT 观测试验结果分析，可初步得到揭示渗流与应力耦合对岩石细观损伤扩展规律影响的如下结论：

(1) 干燥状态的试样与渗流状态的试样在围压相同时，渗透压力作用可使试样强度降低，渗压越大，试样的强度越低，其相应的位移也越小，与干燥试样相比渗透试样将会提前达到屈服阶段。

(2) 从干燥试样的 CT 数与应力的相关关系可知，当应力增大到约 20 MPa 时，CT 数开始减小，说明试样内部结构发生了变化，直接的结果是试样内部开始产生微细裂纹，使得试样的密度降低，导致 CT 数减小。当试样达到峰值强度后，CT 数继续减小，直到试样达到残余应力阶段，应力强度保持在 21.214 MPa，CT 数又开始上升，至试验结束时，试样的残余强度保持在 21.379 MPa，CT 数上升至 1 557.6。这说明试样在残余强度阶段直至试验结束这段过程中受到较强的压密作用。

(3) 干燥状态试样与渗流状态试样试验结果表明，引起试样变形直至屈服的主要因素是应力和渗流，从不同围压下干燥试样的应力-应变试验曲线与本文图 1 所示的应力-应变试验曲线具有相同形式的特点可得出，渗压具有抵消围压的作用，说明除了应力能对岩石造成变形损伤外，渗透压力也会对岩石造成变形损伤，而且渗流与应力状态相互的影响很大。

(4) 裂缝宽度可通过像素量测法确定，此种方法比较直观，便于实际使用；根据测区平均 CT 数，

也可通过文中给出的公式由数值解法解得裂缝的宽度。

### 参考文献(References) :

- [1] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬等. 岩石细观损伤扩展规律的 CT 实时试验[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(2) : 104 – 111.(Ge Xiurun ,Ren Jianxi , Pu Yibin , et al. Research on CT dynamic fest of rock meso-damage propagation law[J]. Science in China(E Series), 2000, 30(2) : 104 – 111.(in Chinese))
- [2] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.(Wu Yanqing ,Zhang Zhuoyuan. Introduction of Rock Mass Hydraulic[M]. Chengdu : Southwest Jiaotong University Press , 1995.(in Chinese))
- [3] 蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣等. 陇东黄土湿陷过程的 CT 结构变化研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1) : 49 – 54.(Pu Yibin ,Chen Wanye , Liao Quanrong , et al. Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2000, 22(1) : 49 – 54.(in Chinese))
- [4] 柴军瑞, 李守义. 三峡库区泄滩滑坡渗流场与应力场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 23(8) : 1 280 – 1 284.(Chai Junrui , Li Shouyi. Coupling analysis of seepage and stress fields in Xietan landslide in Three Gorges Region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003, 23(8) : 1 280 – 1 284.(in Chinese))
- [5] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 22(10) : 1 651 – 1 655.(Liu Caihua , Chen Congxin , Fu Shaolan. Study on seepage characteristics of a

- single rock fracture under shear stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004, 22(10) : 1 651 – 1 655.(in Chinese))
- [6] 施 斌, 姜洪涛. 在外力作用下土体内部裂隙发育过程的 CT 研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5) : 537 – 541.(Shi Bin , Jiang Hongtao. A study on the development of failures inside soil under the external force using CT technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2000, 22(5) : 537 – 541.(in Chinese))
- [7] 杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1998. 76 – 79.(Yang Gengshe , Zhang Changqing. Damage and Detection of Rock Mass[M]. Xi an : Shanxi Science and Technology Press , 1998. 76 – 79.(in Chinese))
- [8] 任建喜. 三轴压缩岩石细观损伤扩展特性 CT 实时检测[J]. 实验力学, 2001, 16(4) : 1 – 7.(Ren Jianxi. Real-time CT monitoring for the meso-damage propagation characteristics of rock under triaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics , 2001, 16(4) : 1 – 7.(in Chinese))
- [9] 周创兵, 熊文林. 岩石节理的渗流广义立方定律[J]. 岩土力学, 1996, 17(4) : 1 – 7.(Zhou Chuangbing , Xiong Wenlin. A generalized cubic law for percolation-in rock joints[J]. Rock and Soil Mechanics , 1996, 17(4) : 1 – 7.(in Chinese))
- [10] 周创兵, 叶自桐, 韩 冰. 岩石节理非饱和和渗透特性初步研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6) : 1 – 4.(Zhou Chuangbing , Ye Zitong , Han Bing. A preliminary study on unsaturated permeability of rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1998, 20(6) : 1 – 4.(in Chinese))

(上接第 1 383 页)

## 《岩石力学与工程学报》2004 年第 23 期被 EI 收录论文(32 篇)(II)

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
17	基于优化算法的岩体初始应力场随机识别方法	李守巨 张 军 刘迎曦等	4 012 – 4 016
18	丹江口水库区构造应力场的数值模拟	刘素梅 徐礼华	4 017 – 4 021
19	重复压裂气井诱导应力场模拟研究	刘 洪 胡永全 赵金洲等	4 022 – 4 027
20	滑动最小二乘法深部地层应力场模拟计算中的应用研究	金业权 周创兵	4 028 – 4 032
21	平顶山一矿地应力分布特征研究	张延新 蔡美峰 王克忠	4 033 – 4 037
22	倾斜坡体中水工高压隧洞围岩应力场特性分析	王立忠 冯永冰	4 038 – 4 046
23	大型金属矿体开采地应力场变化及其对采区岩体移动范围的影响分析	李文秀 梅松华 翟淑花等	4 047 – 4 051
24	油田三维构造应力场、裂缝与油气运移	王连捷 王红才 王 薇等	4 052 – 4 057
25	中国西部钻孔应变仪台网工作回顾与前瞻	欧阳祖熙 张宗润 舒桂林	4 058 – 4 062
26	钻孔应变观测点到地面载荷干扰源最小“安静”距离的理论分析	邱泽华	4 063 – 4 067
27	岩梁变形监测的分布式光纤传感技术	柴 敬 魏世明 常心坦等	4 068 – 4 071
28	新疆分量式钻孔应变阶变异常的统计特征及其在地震预测中的应用研究	蒋靖祥 尹光华 王在华等	4 072 – 4 078
29	断层摩擦实验中的应力状态及摩擦强度	王泽利 何昌荣 周永胜等	4 079 – 4 083
30	利用声发射震源机制解研究 III 型剪切断层变形破坏特征	宋富喜 马胜利	4 084 – 4 089
31	中国大陆地壳应力环境基础数据库数据格式与标准	李 宏 谢富仁	4 090 – 4 094
32	岩石力学中两个基本问题的探讨	吕爱钟 焦春茂	4 095 – 4 098