

岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探

Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage propagation law of rock

葛修润^{1,2,4}, 任建喜^{1,2,3}, 蒲毅彬¹, 马巍¹, 朱元林¹

(1. 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; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 3. 西安科技学院 建筑工程系, 陕西 西安 710054; 4. 上海交通大学, 上海 200030)

摘要: 利用笔者研制的 CT(Computerized Tomography) 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理, 得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律。

关键词: 岩石疲劳损伤; CT 实时分析; 损伤扩展; 门槛值

中图分类号: TU 452; TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)02-0191-05

作者简介: 葛修润, 男, 1934 年生, 1959 年毕业于前苏联敖德萨建筑工程学院, 研究员, 博导, 中国工程院院士, 主要从事岩土力学与工程的研究工作。

GE Xi-run^{1,2,4}, REN Jian-xi^{1,2,3}, PU Yi-bin¹, MA Wei¹, ZHU Yuan-lin¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 4. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: It's the first time in the research field of rock mechanics that the computerized tomography (CT) real-time testing of fatigue damage meso-propagation law of rock have been accomplished in this paper using the specified loading equipment of the CT machine developed by the authors. Through the meso-scale CT testing, it was confirmed that the fatigue damage of rock has a threshold value. The law of fatigue damage of rock about the variation of cyclic loading maximum stress value was studied. The initial fatigue meso-damage propagation law is given.

Keywords: fatigue damage of rock; CT real-time analyse; damage propagation; threshold value

1 概 述^y

岩石在周期性荷载作用下的力学性能对岩体工程的长期稳定性具有重要影响, 开展岩石疲劳损伤机理研究具有重要的理论价值和实用意义。葛修润等利用 MTS 电液伺服刚性压力机进行了大量的试验研究, 提出了岩石在循环荷载作用下存在疲劳门槛值和疲劳破坏受变形控制等观点^[1]。由于岩石细观试验研究能为宏观损伤理论提供重要的试验基础, 有助于对岩石破坏机理的认识, 已经受到广泛的重视。近年来, 计算机断层识别技术即 CT(Computerized Tomography) 技术以其无扰动、可多层面分析和能采用国际标准试件等优点受到岩土工程研究者的关注^[2,3]。葛修润等利用自己研制成功的 CT 三轴加载系统, 在国内外首次完成了三轴压缩荷载作用下煤岩、砂岩破坏全过程细观损伤扩展规律的 CT 实时试验, 得到了岩石损伤演化的初步规律^[4-5]。本文利用上面所述的设备完成了岩石疲劳损伤断裂 CT 细观实时试验, 目的是从细观尺度对岩石疲劳破坏机理进行探讨, 进而为岩体工程强度分析和变形控制提供科学依据。类似的试验方法国内外尚未见报道, 是一种新的研究岩石疲劳细观损伤试验手段。

2 试验设备与试验过程

2.1 专用加载设备与 CT 机

试验在由葛修润主持总体设计并研制的 CT 专用三轴加载设备上进行, 有关技术指标见文献[5]。此设备可完成准静态下岩石、冻土、融土、冻岩、冰等介质破坏全过程的三轴(单轴)压缩 CT 试验和蠕变 CT 试验等。

CT 机为 SIEMENS SOMATOM plus 型 X 射线螺旋 CT 机, 空间分辨率 0.35 mm × 0.35 mm, 可识别的最小体积为 0.12 mm³(层厚 1 mm), 密度对比分辨率 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)。

2.2 试验过程

试验所用岩石为陕西韩城砂岩, 为保证试样的均一性, 采样和加工过程采取了严格的措施。

(1) 静态岩石破坏全过程宏观试验

岩石静态全过程应力应变曲线宏观试验是在长江

^y 基金项目: 中科院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室资助项目(9802, 2003)

收稿日期: 2000-03-23

科学院岩基所利用中国科学院武汉岩土力学研究所生产的 RMT-150 型岩石力学多功能试验机完成, 静态试验分单轴压缩试验和三轴压缩试验两种形式, 应变率控制在 10^{-5} s^{-1} 。静态试验的结果可为细观试验的控制和宏细观试验结果的对比分析提供重要依据。

(2) 岩石疲劳损伤 CT 细观试验

CT 细观试验在冻土工程国家重点实验室进行, 岩石疲劳试验分为单轴、三轴进行。为保证试验结果的可比性, 各试件采用统一的扫描条件, 见表 1。试件从上到下在横断面分 5 个扫描层位进行扫描, 定位方式参见文献[5]。用 σ_{\max} 表示循环荷载时轴向应力的最大值 (MPa), σ_{\min} 表示循环荷载时轴向应力的最小值 (MPa), σ_a 表示循环荷载时轴向应力的变动幅值 (MPa), $\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, 加载波形见图 1。

表 1 扫描条件

Table 1 Scanning test conditions

电压 / kV	电流 / mA	时间 / s	标记	层厚 / mm	放大系数	X/Y
137	195	0.7	OM	3	7.0	1/- 12

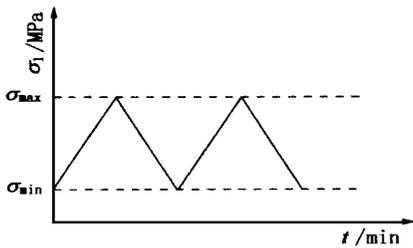


图 1 循环加载波形示意图

Fig. 1 Diagram of waveform of cyclic loading

3 结果分析

3.1 砂岩初始细观损伤特性

在未加载时, 各个试件均进行了 5 个层位的 CT 扫描。结果表明, 无论是 5 层的图像还是 CT 数与方差均不相同(表 2 是 # 4 砂岩初始状态试验数据), 而 CT 数在本质上反映物质的密度, 因此可以说, 韩城砂岩是一种典型的具有以微孔洞为主的初始损伤的地质材料, 且初始损伤具有不均匀性。

表 2 # 4 砂岩初始损伤试验数据

Table 2 Test results of initial damage of # 4 sandstone sample

扫描层位	CT 数	方差
1	1566.6	34.74
2	1611.3	35.11
3	1583.5	41.10
4	1603.4	40.18
5	1575.9	38.78

3.2 疲劳损伤演化机理

(1) 疲劳损伤门槛值的 CT 试验验证

对 # 9 砂岩连续加载至 $\sigma_1 = 33.34 \text{ MPa}$ 时做三轴状态下的循环荷载试验, 循环荷载是指轴向荷载, 而围压保持不变 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 10 \text{ MPa}$, $\sigma_{\max} = 33.34 \text{ MPa}$, $\sigma_{\min} = 21.62 \text{ MPa}$, $\sigma_a = 11.72 \text{ MPa}$, 已知该围压时, 砂岩峰值强度 $\sigma_1^c \approx 104 \text{ MPa}$), 试验结果(表 3)表明, 在第 6 次 $\sigma_1 = 33.34 \text{ MPa}$ 时, 第 1, 3, 5 扫描层的 CT 数均比初始状态有所增加(# 9 试件各层的 CT 数增加较多, 这主要是该试件的孔隙率较大的原因), 试件被压密。在第 6 次循环 σ_1 卸荷至 21.62 MPa 时, 各层的 CT 数都有极少量的增加, 如第 3 层的 CT 数增加了 0.5, 而方差增大了 0.52, 这表明, 在这一卸荷过程中, 有极少量的回弹发生, 部分微裂隙张开。在第 11, 16 次循环时, 在 $\sigma_1 = 33.34 \text{ MPa}$ 时, 各层 CT 数增大, 方差减小, 从图像上看, 第 3 层从边缘开始向里逐步加密(图 2, 黑色为高密度区, 白色为低密度区。要说明的是, 在 CT 机屏幕上得到的 CT 图像灰度大, 非常清晰, 本文看到的图像是经过冲洗 CT 底片、洗像过程后得到的, 灰度降低, 影响了 CT 图像质量)。而对试件的 CT 数分析可以看出(从平均的意义上讲, 对试件 CT 数的变化规律进行分析也许更有意义), 经过 16 次循环后, 试件的 CT 数略有增加, 试件被压密, 试件的方差减小, 说明微孔洞有闭合现象发生。从这一趋势可以推测, 在此应力状态下, 再经过一定次数的循环荷载后, 试件的损伤演化不会有太大的变化。这说明, 在较低应力处 ($\sigma_{\max} = 33.34 \text{ MPa} = 32\% \sigma_1^c$) 即循环荷载时轴向应力值低于静态试验的门槛值时, 循环荷载试验对岩石损伤发展影响不大。

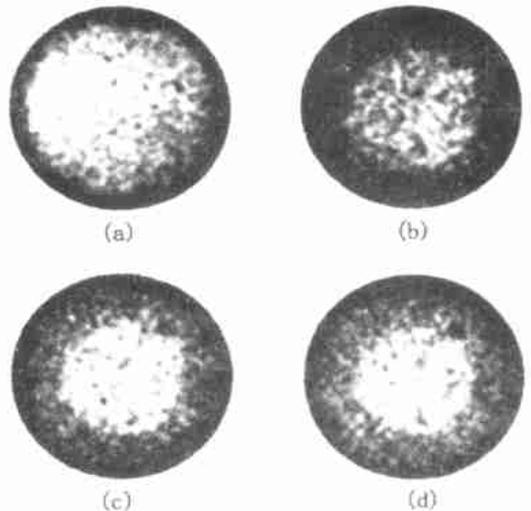


图 2 # 9 试件第三扫描层 CT 图像

Fig. 2 CT images of 3rd scanned section of # 9 sample

表3 #9 砂岩低应力循环试验数据($\sigma_2 = \sigma_3 = 10 \text{ MPa}$)

Table 3 Test results of #9 sandstone under low stress cyclic loading condition($\sigma_2 = \sigma_3 = 10 \text{ MPa}$)

σ_1 /MPa	第1扫描层		第3扫描层		第5扫描层		试件		循环 次数
	CT 数	方差	CT 数	方差	CT 数	方差	CT 数	方差	
—	1607.2	80.34	1623.7 ¹	60.88 ¹	1626.6	59.16	1619.2	66.80	初始
33.34	1642.9	53.27	1651.7 ^④	56.68 ^④	1648.6	64.35	1647.7	58.10	6
21.62	1643.3	53.10	1652.2	57.20	1649.3	64.08	1648.3	58.13	6
33.34	1645.4	52.24	1655.5 ^④	55.96 ^④	1650.9	62.40	1650.6	56.87	11
33.34	1646.2	50.76	1657.1 ^{1/4}	54.09 ^{1/4}	1652.7	60.51	1652.0	55.12	16

注:表中上标为¹、^④、^{1/4}的CT数和方差分别对应图2中(a)~(d)CT图像的CT数和方差

表4 #2 试件循环试验数据($\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \text{ MPa}$, $\sigma_{\max} = 29.17 \text{ MPa} = 60\% \sigma_c$)

Table 4 Cyclic loading test results of #2 sample ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \text{ MPa}$, $\sigma_{\max} = 29.17 \text{ MPa} = 60\% \sigma_c$)

σ_1 /MPa	第1扫描层		第3扫描层		第5扫描层		试件		循环 次数
	CT 数	方差	CT 数	方差	CT 数	方差	CT 数	方差	
29.17	1601.0	42.93	1609.3	42.88	1596.3	46.39	1602.2	46.07	1
15.39	1598.4	43.04	1613.4	42.93	1593.5	50.12	1601.8	45.36	1
29.17	1602.9 ¹	42.94 ¹	1610.1	43.03	1595.9	45.77	1602.0	43.91	2
15.39	1597.0 ^④	44.29 ^④	1608.6	43.57	1599.1	46.06	1601.4	44.64	2
29.17	1598.9 ^④	43.41 ^④	1603.2	42.65	1596.4	45.94	1601.2	44.00	3
15.39	1598.9 ^{1/4}	43.56 ^{1/4}	1596.4	45.94	1598.6	45.98	1598.0	45.16	3

注:表中上标为¹、^④、^{1/4}的CT数和方差分别对应图3中(a)~(d)CT图像的CT数和方差

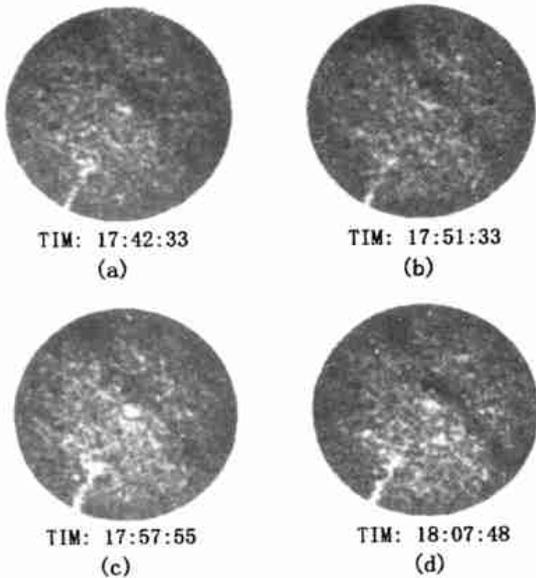


图3 #2 试件第1扫描层CT图像($\sigma_{\max} = 29.17 \text{ MPa}$)

Fig.3 CT images of 1st scanned section of #2 sample ($\sigma_{\max} = 29.17 \text{ MPa}$)

对#2 砂岩作单轴循环荷载试验($\sigma_1 = \sigma_{\max} = 29.17 \text{ MPa} = 60\% \sigma_c$, σ_c 为单轴抗压强度),在循环荷载应力最大值等于静态应力门槛值时的循环试验结果表明,随着循环次数的增多,试件的CT数不断减小,如第3次循环至 $\sigma_{\min} = 15.39 \text{ MPa}$ 时,CT数已由第1次循环时的1602.2下降为1598.0(见表4)。从第1扫描层的CT图像(见图3)可以看出,随着循环次数的增多,图3中左下方已发育的裂纹有细微的伸长,从这一

变化趋势可以推测,在这一应力状态下作循环荷载试验,经过一定次数循环后,损伤逐渐累积,将导致试件破坏。

以上试验从细观尺度表明了岩石疲劳破坏门槛值的存在。从细观上讲,该值对应试件某层开始发生裂纹萌生(CT数减小)的应力状态;从宏观上讲,该值对应静态全过程体积变形曲线的拐点,也就是体积压缩变形的最大点^[1]。

(2) 循环荷载时轴向应力最大值的变化对疲劳损伤发展的影响

对#2 砂岩在循环时轴向荷载应力最大值高于门槛值时做试验($\sigma_1 = \sigma_{\max} = 39.46 \text{ MPa} = 81\% \sigma_c$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$)。试验结果表明,随着循环次数的增多,试件的CT数一直处于下降的趋势,且下降速度较快,如仅经过3次循环后,试件CT数降低1.2%,而方差增多79.6%(以第1次循环 $\sigma_1 = \sigma_{\min} = 29.17 \text{ MPa}$ 为基准,见表5)。从CT图像看,在第1次循环 $\sigma_1 = 29.17 \text{ MPa}$ 时,尚未有宏观裂纹出现(见图4(a)),当 $\sigma_1 = 39.46 \text{ MPa}$ 时,出现贯通性主裂纹(见图4(b)),随后随着循环次数的增多,已发育的主裂纹开始张开变宽,损伤急剧发展(见图4(c)~(f))。

对#4 砂岩在三轴条件下保持围压不变,取 $\sigma_1 = 93.51 \text{ MPa}$ 时作高轴向应力下的循环荷载($\sigma_2 = \sigma_3 = 10 \text{ MPa}$, $\sigma_{\max} = 93.51 \text{ MPa}$, $\sigma_a = 31.39 \text{ MPa}$)试验。结果表明,第5扫描层的CT数下降速度比其它扫描层快得多,方差很快增大,试件首先在第5扫描层处发生局

表5 #2试件循环试验数据($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ MPa, $\sigma_{max} = 39.46$ MPa= 81% σ_c)

Table 5 Cyclic loading test results of #2 sample ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ MPa, $\sigma_{max} = 39.47$ MPa= 81% σ_c)

σ_1 /MPa	第1扫描层		第3扫描层		第5扫描层		试件		循环 次数
	CT数	方差	CT数	方差	CT数	方差	CT数	方差	
29.17	1598.2	44.14	1607.7 ¹	43.15 ¹	1599.6	45.10	1601.8	44.13	1
39.46	1582.6	60.57	1591.0 ^④	89.96 ^④	1589.8	52.01	1587.8	57.51	1
29.17	1577.6	69.00	1584.8 ^④	100.86 ^④	1594.2	52.21	1585.5	74.02	2
39.46	1576.8	76.39	1585.6 ^¼	107.37 ^¼	1589.8	54.92	1584.1	79.56	2
29.17	1575.2	77.96	1582.8 ^½	106.18 ^½	1589.5	53.67	1582.5	79.27	3
39.46	1574.2	79.88	1580.8 ^¾	112.32 ^¾	1590.8	54.70	1581.8	82.30	3

注:表中上标为¹、^④、^④、^¼、^½、^¾的CT数和方差对应图4中(a)~(f)CT图像的CT数和方差

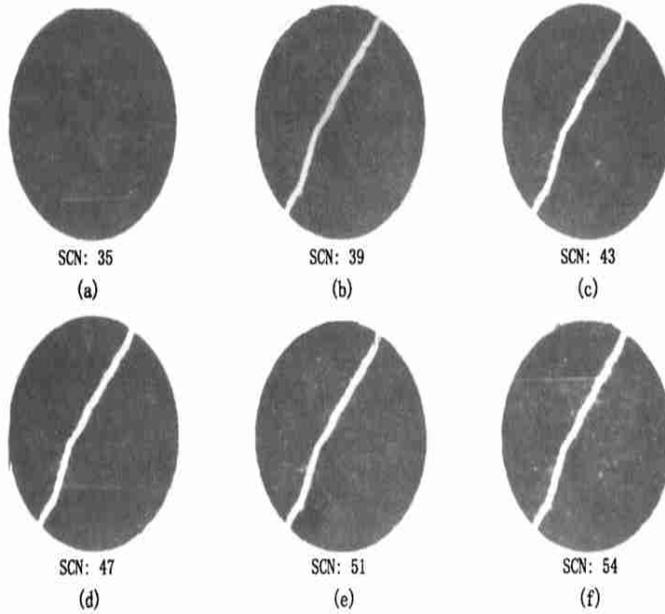


图4 #2试件第3扫描层CT图像($\sigma_{max} = 39.46$ MPa)

Fig. 4 CT images of 3rd scanned section of #2 sample($\sigma_{max} = 39.46$ MPa)

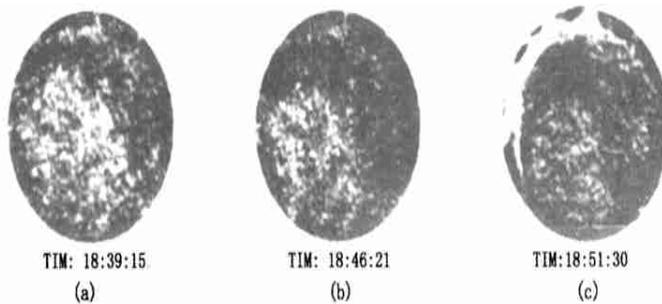


图5 #4试件第5扫描层CT图像($\sigma_{max} = 93.51$ MPa)

Fig. 5 CT images of 5th scanned section of #4 sample($\sigma_{max} = 93.51$ MPa)

部损伤演化,仅经过1.5个循环,试件发生破裂面与水平方向成45°的剪切破坏,损伤累积已导致试件突然破坏失稳(见表6,图5)。

上述试验表明,随着循环荷载轴向应力最大值增大,细观损伤演化速度加快,当 σ_{max} 接近 σ_1^c (三轴)或 σ_c (单轴)时,细观损伤急剧演化,微裂纹迅速汇合,伸

长、贯通,岩石断裂破坏。这说明,循环荷载轴向应力最大值的对疲劳损伤寿命影响很大, σ_{max} 越接近峰值强度,岩石越易发生疲劳损坏。

(3) 疲劳损伤演化过程中的局部化现象

从图3可知,第1扫描层的左下部首先出现微裂纹。取包含这一裂纹的1.00 cm²的椭圆区域进行分

析发现(见图 6, 表 7), 这一“危险区域”的 CT 数比该层的 CT 数及试件的 CT 数下降速度要快的多, 从图像上看, 此区域是该层最早出现裂纹伸长、分叉的区域, 此即损伤演化的局部化现象。

表 6 # 4 砂岩高应力循环试验数据 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 10 \text{ MPa}$)

Table 6 Test results of # 4 sandstone under high stress cyclic loading condition

σ_1 /MPa	第 5 扫描层		循环 次数
	CT 数	方差	
93.51	1599.2 ¹	48.28 ¹	1
62.12	1603.0 ^④	46.01 ^④	1
93.51	1584.9 ^④	95.55 ^④	2

注: 表中上标为¹、^④的 CT 数和方差分别对应图 5(a)~(c) CT 图像的 CT 数和方差

表 7 # 2 试件第 1 扫描层“危险区域”数据 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \text{ MPa}$)

Table 7 Data of “dangerous area” of 1st scanned section of # 2 sample ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \text{ MPa}$)

σ_1 /MPa	CT 数	方差
29.17 ¹	1561.7	46.46
39.46 ¹	1499.9	91.50
29.17 ^④	1478.7	103.20
39.46 ^④	1477.0	101.80

注: 表中上标为¹、^④的应力分别为第 1、3 次循环时应力值

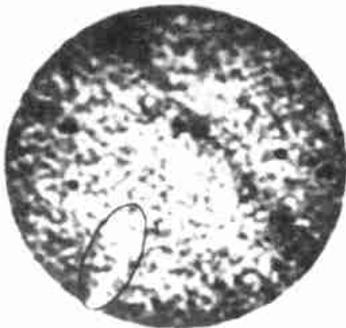


图 6 # 2 试件第 1 扫描层“危险区域”示意图

Fig. 6 “Dangerous area” of 1st scanned section of # 2 sample

(4) 损伤演化的不均匀性

上述各次循环试验结果表明, 在同一应力阶段, 无论是三轴还是单轴试验, 各扫描层的裂纹发展情况和 CT 数的变化均不相同, 此即从 CT 细观试验观测到的疲劳损伤演化的不均匀性。

4 结论与讨论

(1) 利用笔者研制的与 CT 机配套的专用三轴加载系统, 完成了周期性荷载作用下岩石疲劳破坏损伤扩展规律的 CT 细观实时试验的初步研究, 在国内外尚属首次。

(2) 从细观试验的角度证实了岩石疲劳破坏存在门槛值, 这一结论对岩体工程强度设计具有重要意义。试验结果表明, 韩城砂岩初始细观损伤具有不均匀性, 岩石疲劳损伤扩展具有不均匀性和局部化现象。循环荷载轴向应力最大值的变化对疲劳损伤寿命影响很大, σ_{\max} 越接近峰值强度, 岩石越易发生疲劳破坏。

(3) 由于经费限制, 文中实验的循环次数较少, 但对本文将循环荷载作用下岩石损伤演化的细观机理而非疲劳寿命作为研究目的来说, 是可行的, 有关进一步的工作尚在进行之中。

参考文献:

- 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56~ 60.
- 杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998. 79~ 80.
- 蒲毅彬, 朱元林. CT 用于冻结土、岩及冰的无损动态试验研究[J]. 自然科学进展, 1998, 8(2): 251~ 253.
- 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态实验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497~ 502.
- 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石细观损伤演化规律的 CT 实时试验研究[J]. 中国科学 E, 2000, 30(2): 104~ 111.

本刊取消订阅邮费启事

岩土工程学报, 双月刊, 单月 30 日出版。每期定价 10 元, 全年 60 元。本部不再另收订阅邮费, 欢迎读者直接向南京本部订阅。也可在当地邮局订阅, 本刊邮局发行代号 28- 62, 国外发行代号 BM520。

本刊编辑部