

# 岩石单轴细观损伤演化特性的 CT 实时分析

任建喜 葛修润 蒲毅彬 马巍 朱元林

(西安科技学院) (中国科学院武汉岩土力学研究所) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)

**摘要** 利用最新研制成功的 CT (Computerized Tomography, 简称 CT) 专用岩石三轴试验加载设备, 完成了三轴(单轴)压缩荷载作用下岩石损伤扩展规律的 CT 实时试验。得到非常清晰的岩石破坏全过程中从微孔洞被压密到微裂纹发生、发展、贯通、卸荷破坏等各个阶段的 CT 图象。引入了初始损伤影响因子及闭合影响系数, 建议了一个新的损伤变量。从 CT 细观试验结果出发, 给出了应力损伤门槛值, 将准静态岩石应力应变全过程曲线分为 5 个阶段, 得到了岩石损伤演化的初步规律。结果表明, 利用这套设备进行岩石细观损伤力学特性的研究是一种创新的方法, CT 专用加载设备的研制是成功的。

**关键词** 岩石 细观损伤演化 损伤变量 本构模型

## 1 引言

由于岩石细观损伤扩展机理的试验研究能为宏观损伤理论的建立提供重要的试验基础而备受重视, 岩石细观损伤试验研究的主要设备有带有微型加载装置的光学显微镜<sup>[1]</sup>和扫描电镜<sup>[2]</sup>及计算机断层扫描仪即 CT 机等。近年来 CT 技术以其无扰动、可多层次分析和能采用国际标准试件等优点受到关注, F. Verhelst, et al. 利用 CT 技术研究了岩石试件的初始损伤<sup>[3]</sup>。杨更社等<sup>[4]</sup>, H. kawakata, et al.<sup>[5]</sup> 利用 CT 扫描对岩石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。葛修润等利用自己为冻土工程国家重点实验室 CT 机配套研制成功的三轴加载系统, 在国内外首次完成了三轴(单轴)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<sup>[6,7]</sup>, 本文介绍的是单轴压缩岩石损伤演化 CT 实时试验的结果。岩石破坏全过程的 CT 实时扫描试验的目的是建立合理的岩石损伤演化方程和本构关系, 探求岩石破坏机理。

## 2 CT 检测原理与试验设备

### 2.1 CT 检测原理<sup>[8]</sup>

普通 X 射线设备把三维空间的图象投影到二维平面上, 高密度物质的图象将掩盖低密度物质的图象, 而 CT 机是通过计算机图象重建, 使指定层面上不同密度的

材料信息以高分辨率的数字图象显示出来。

在 X 射线穿透物质的过程中, 其强度呈指数关系衰减, 物质的密度是由物质对于 X 射线的衰减系数来体现的, 不同物质对 X 射线的吸收系数不同。X 射线 CT 机在人体检测方面应用的最为成功, 在研究 CT 图象时, 人们更关心的是各组织密度间的差异(病变), 而不是密度的绝对值, 因此, CT 机的发明者之一英国的 Hounsfield 教授给出了 CT 数的概念, 其定义为:

$$\text{某物质的 CT 数} = 1000 \times \left( \frac{\mu_{\text{该物质}} - \mu_w}{\mu_w} \right) \quad (1)$$

即某物质的 CT 数等于该物质对 X 射线的吸收系数与水的吸收系数之差再与水的吸收系数相比之后乘以 1000。其单位名称为 HU (Hounsfield Unit); 1000 即为 HU 的分度因数 (scaling factor)。按此定义, 空气的 CT 数为 -1000 (HU), 纯水为 0 (HU)。物质的 CT 数本质上反映物质的密度, 即物质的 CT 数越高相当于密度越高。

### 2.2 试验设备

新研制的 CT 专用三轴加载设备外形:  $\Phi 240\text{mm} \times 1000\text{mm}$ , 轴压缸内径  $\Phi 142\text{mm}$ , 最大轴向压力设计为 400kN, 围压为 20MPa, 轴向工作行程 40mm, 位移传感器量程为 0~50mm。此试验系统可完成岩石、土等介质在常温或负温(增加冷浴设备)下三轴(单轴)压缩荷载作用下的连续加载破坏 CT 试验、蠕变损伤 CT 试验、疲劳损伤 CT 试验和卸荷损伤 CT 试验等。岩石试件为国际标准圆柱形试件, 尺寸:  $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。土样的尺寸是:  $\Phi 61.8\text{mm} \times 150\text{mm}$ 。在完成上述试验的过程中, 可对指定的断面实时的进行 CT 扫描, 研究试件的细观变形破坏情况。由于试验仓将放在 CT 机的扫描区, 为减少试验仓体材料对

收稿日期: 1999-11-29

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资助项目 (NO. 9802)

CT扫描结果的影响，试验仓不能用重金属材料制作，故试验仓采用优质的轻金属材料 LY12 加工而成。此设备是为冻土工程国家重点实验室的 CT 机配套研制的专用设备，负责总体设计的是本文第二作者。

试验用 CT 机为 SIEMENS SOMATOM plus 型 X 射线螺旋 CT 机，空间分辨率  $0.35\text{mm} \times 0.35\text{mm}$ ，可识别的最小体积为  $0.12\text{mm}^3$  (层厚  $1\text{mm}$ )，密度对比分辨率为  $0.3\%$  (3Hu)。

### 3 试验过程及结果分析

#### 3.1 试验概况

试验所用岩石为陕西蒲白矿务局南桥煤矿砂岩 (平均容重为  $24.5\text{kN/m}^3$ )。试验于 1999 年 4 月 15 日 ~ 27 日在冻土工程国家重点实验室进行，完成了三轴 (单轴) 压缩下的岩石细观损伤扩展规律的 CT 实时试验。在加载过程中的各个阶段对各层位进行 CT 实时扫描，观察各断面裂纹的萌生、分叉、发展、断裂、卸载全过程的图象变化，从细观尺度研究岩石的破坏机理。

#### 3.2 结果分析

这里以  $6^\circ$  砂岩单轴压缩下的 CT 试验结果为例进行分析。 $6^\circ$  砂岩试件的扫描条件见表 1。图 1 (a) 是样品安装 CT 图象，图中之 1、2、3、4 对应从上到下的四个扫描层位，层厚  $3\text{mm}$ ，应变速率是  $2.79 \times$

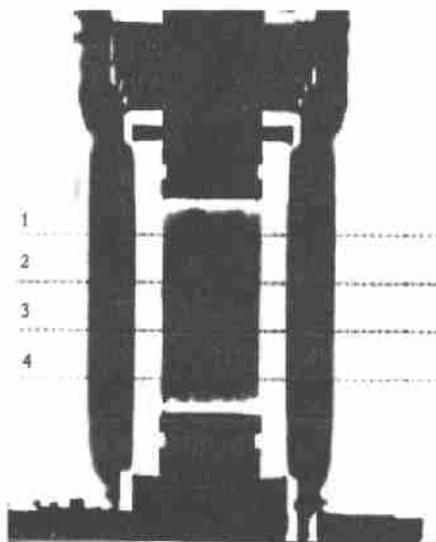
$10^{-5}/\text{s}$ ，属于准静态加载，共进行 7 次扫描 (表 2)。图 2 是试验测得的  $\sigma_1-\epsilon_1$  关系及扫描点示意图 (曲线上的数字对应表 2 中的扫描次序)。限于篇幅，这里仅给出部分图象，图 3 是第 2、3 层的初始图象，图 4 是第 2 层在不同加载阶段的图象，图中的 (a)，(b)，(c)，(d)，(e)，(f) 依次对应第 2、3、4、5、6、7 次扫描的图象。图中黑色为高密度区，白色为低密度区 (需说明的是，在 CT 机屏幕上得到的 CT 图象灰度大，非常清晰，本文看到的图象是经过冲洗 CT 底片、洗像过程后得到的，灰度降低，影响了 CT 图象质量)。

表 1 扫描条件

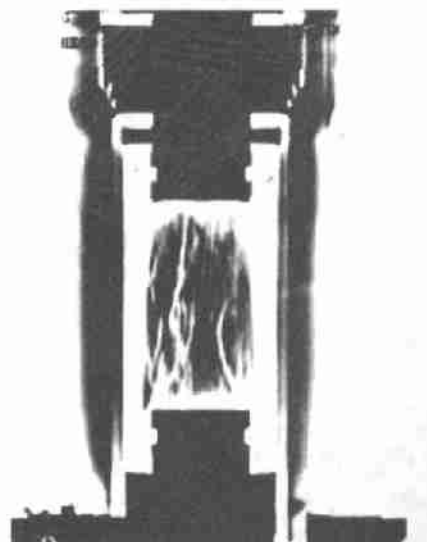
电压/kV	电流/mA	时间/s	标记	层厚/mm	放大系数	X/Y	间隔/mm
120	210	2	OM	3	6.5	10/3	23

表 2 各次扫描对应的应力状态 ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 0\text{MPa}$ )

扫描次序	1	2	3	4	5	6	7
$\sigma_1/\text{MPa}$	0	12.99	25.37	36.57	39.56	2.99	1.32
$\epsilon_1/\%$	0	1.89	4.40	6.92	7.55	10.69	25.79
备注	初始					卸荷	卸荷



(a) 初始状态及各层定位线



(b) 破坏后图象

图 1  $6^\circ$  砂岩安装 CT 图象

(1) 在未加载时对各层进行了扫描, 无论是各层的 CT 数 (表 3) 还是图象 (图 3) 均不相同, 另外, 同一层各像素 (图 3 (a)) 的 CT 数也不同, 可见, 岩石是一种典型的具有不均匀初始损伤的介质。

(2) 在  $\sigma_1$  增为 12.99MPa 时, 各层的 CT 数及岩石试件的 CT 数 (定义各层 CT 数的均值为岩石试件的 CT 数, 各层 CT 数的方差的均值为岩石试件 CT 数的方差) 都有升高, 发生这一现象的本质是各层的初始微孔洞 (损伤) 出现闭合, 部分 CT 图象变黑 (图 4 (a)), 岩石被压密, 密度增加。

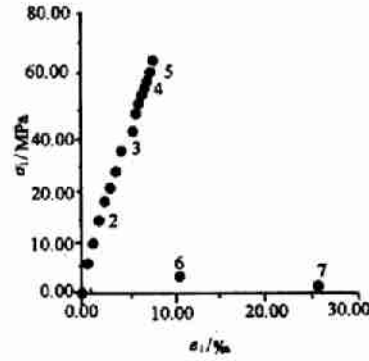


图 2  $\sigma_1 \sim \epsilon_1$  的关系曲线

表 3 6° 砂岩各扫描层试验结果

第 1 扫描层			第 2 扫描层			第 3 扫描层			第 4 扫描层			扫描次序
ME	SD	$\Delta s$	ME	SD	$\Delta s$	ME	SD	$\Delta s$	ME	SD	$\Delta s$	
1687.0	332.98		1660.0	303.08		1607.1	187.94		1613.6	270.06		1
1687.7	334.71		1667.4	293.43		1609.6	179.74		1616.4	271.14		2
1688.7	334.55		1668.8	296.43		1610.7	179.49		1613.8	261.07		3
1677.5	344.47		1650.2	317.81		1566.7	236.47	0.49	1599.1	261.00	0.49	4
1665.7	368.80		1649.0	321.76		1513.4	362.09	1.21	1595.9	362.14	0.96	5
1596.5	427.0	0.62	1505.2	487.03	2.44	1427.1	448.42	2.44	1468.8	377.71	3.72	6
1514.3	573.80	2.95	1345.3	699.25	2.95	1261.5	684.83	4.76	1327.0	558.4	5.02	7

表中: ME: CT 数, SD: 方差,  $\Delta s$ : 不同应力状态时断面面积增加值 ( $\text{cm}^2$ )。

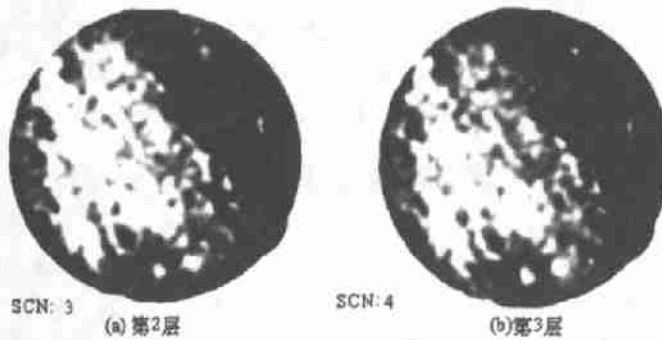


图 3 初始损伤 CT 图象

表 4 6° 砂岩试件试验结果

扫描次序	1	2	3	4	5	6	7
ME	1641.93	1645.28	1645.00	1623.38	1606.00	1499.40	1362.03
$\Delta ME$		3.35	3.07	-18.55	-35.93	-142.53	-279.90
SD	206.00	269.76	267.89	289.94	353.70	435.04	629.08
$\Delta SD$		63.76	61.89	83.94	147.70	229.04	423.08

表中, ME 为岩石试件 CT 数,  $\Delta ME$  为岩石试件 CT 数的变化值; SD 为岩石试件 CT 数的方差,  $\Delta SD$  为岩石试件 CT 数方差的变化值。

(3) 在  $\sigma_1$  从 12.99MPa 增为 25.37MPa 的过程 (不含  $\sigma_1 = 25.37\text{MPa}$ ) 中, 各层的 CT 数和试件的 CT 数变化都不大, 图象变化也不大, 可以认为, 此阶段岩石的细观损伤未有大的变化, 岩石处于准线性阶

段。  
(4) 当  $\sigma_1 = 25.37\text{MPa}$  时, 第 4 层的 CT 数开始下降, CT 数从 1616.4 降为 1613.8, 减小了 1.6‰, 而试件的 CT 数减小了 0.2‰, 虽然 CT 数下降不多, 但

这是一个重要的信号,表明细观损伤开始演化,此时 $\sigma_1 = 0.61\sigma_c$  (峰值强度),可以初步认为此值为试件损伤门槛值,这与有关的宏观试验结果吻合<sup>[9]</sup>。

(5) 当 $\sigma_1 = 36.57\text{MPa}$ 时,各层和试件的 CT 数开始下降,方差增长,第 3, 4 层有少量扩容现象发生,

由于微裂纹的相互影响,微裂纹出现伸长、分叉、贯通现象,第 2 层有贯通性主裂纹出现,左下方垂直主裂纹的方向出现一分叉裂纹(图 4 (c)), $\sigma_1$  从 25.37MPa 到 36.57MPa 这一阶段是损伤开始演化并稳定扩展的阶段。

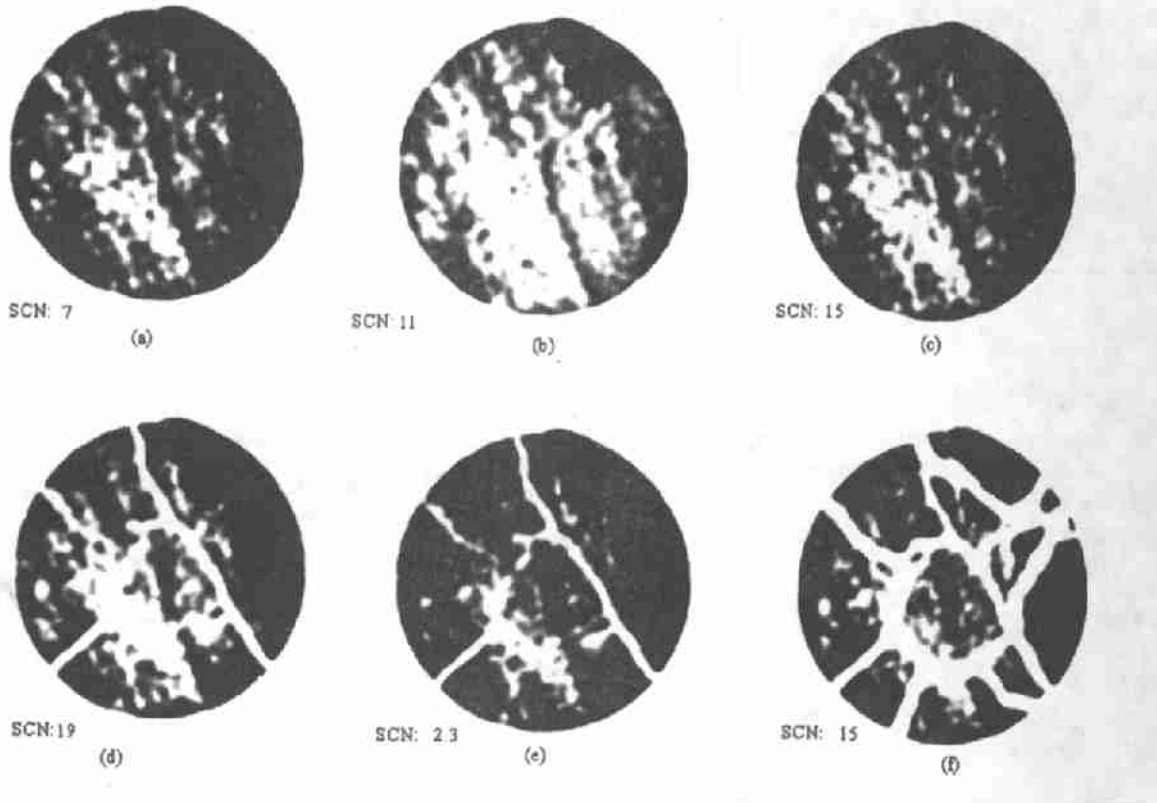


图 4 第 2 层在各个加载阶段的 CT 图象

(6) 在 $\sigma_1$  增为 39.56MPa 时,各层 CT 数下降速度加大,方差增长迅速,从图象上(图 4 (d))看,第 2 层已贯通的裂纹继续张开,同时有少量的微裂纹萌生。这一阶段是破坏前兆阶段,即损伤演化速度最快的阶段,当 $\sigma_1$  增为 41.61MPa,试件受力达到峰值强度 $\sigma_c$ ,由于应力下降很快,未能进行 CT 扫描。

(7)  $\sigma_1$  卸荷到 2.99, 1.32MPa 的过程中,CT 数急剧下降,方差迅速变大,已贯通的主裂纹迅速张开变宽,前述第 2 层的分叉裂纹开始完全贯通,形成十字交叉的主裂纹,同时有多条新的裂纹出现,试件彻底破坏(图 4 (e) ~ (f))。从破坏后试件的平片可以看出,裂纹扩展的方向与 $\sigma_1$  成小角度,主裂面不是一个平面。而是折曲面,主裂纹面两侧的物质因折曲状主裂面的滑移产生剪胀现象(图 1 (b))。

(8) 试验发现,同一应力状态时,同一试件的不同层面有着不同的损伤扩展特性,即损伤演化的不均

匀性。而在同一受力状态时,同一层面的不同区域的损伤演化表现出局部化现象。

(9) 从上述单轴砂岩 CT 分析结果可知,岩石宏观全过程曲线可分为 5 个阶段。第 1 阶段是损伤弱化阶段,这一阶段的 CT 数在初始损伤的基础上略有升高,方差减小,岩石密度增大,强度提高。第 2 阶段是准线性阶段,这一阶段的 CT 数和方差变化不大,岩石处于准弹性变形阶段。第 3 阶段是损伤开始演化和稳定发展阶段,这一阶段的 CT 数开始下降,方差略有升高,岩石微裂纹开始萌生并稳定扩展。第 4 阶段是损伤加速发展阶段,这一阶段的 CT 数减小速度加快,方差加速增大,微裂纹汇合贯通,出现宏观裂纹,岩石强度很快达到峰值。第 5 阶段是峰后损伤迅速发展阶段,这一阶段的 CT 数下降速度最快,方差上升几十倍,已形成的宏观裂纹迅速张开,岩石急剧扩容。有关这 5 个阶段在岩石全过程曲线中的应力分界值的详细情况将另文介绍。

### 3.3 损伤变量

通过CT数的数学建模,文献[4]给出如下损伤变量的表达式:

$$D = -\frac{1}{m_0^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (2)$$

式中  $m_0$ : CT机的空间分辨率;  $\Delta\rho$ : 岩石损伤演化过程中密度的变化值;  $\rho_0$ : 岩石的密度。

显然,确定  $D$  的关键是确定  $\Delta\rho$ , 由CT原理,经运算,

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = \frac{1000 + H_{mb}}{1000 + H_{mb}} \cdot \rho_b - \rho_0 \quad (3)$$

式中  $H_{mb}$  及  $\rho_b$  为无损岩石的CT数及密度,  $H_{mb}$  为某一应力状态下试件的CT数。岩石是一种天然赋存的材料,严格的讲,没有一种无损的岩石材料存在,故上式中的  $\rho_b$  和  $H_{mb}$  将难以确定,文献[4]未明确指出如何确定这两个值。本文通过CT试验发现,在初始加载阶段,由于  $\sigma_1$  的方向与初始微裂纹方向的角度不同,CT数的变化有两种情况,第一种情况:无压密阶段,CT数随着荷载的增大逐步下降直至试件破坏;第二种情况:一开始加载有压密阶段,即CT数比初始状态时的CT数增大一定的值后,CT数下降,损伤开始扩展。

在损伤演化规律的研究中,我们关心的是损伤扩展过程中密度的变化,故可针对不同情况,对  $\rho_b$  和  $H_{mb}$  进行取值。对第一种情况来说,可将具有初始损伤的岩石的  $\rho_b$  和CT数  $H_{mb}$  作为  $\rho_b$  和  $H_{mb}$  来进行计算;对第二种情况,可将压密后的CT数及密度作为  $\rho_b$  和  $H_{mb}$  的值。考虑到试件压密后的CT数与  $H_{mb}$  的关系。这里引入闭合影响系数  $\alpha_c$  来考虑压密阶段的影响,即取  $\alpha_c H_{mb}$  及此时密度作为无损岩石的  $\rho_b$  和  $H_{mb}$  来进行计算。可见,第一种情况是  $\alpha_c = 1$  时的特例。

按上述定义,经运算可知,

$$D = \frac{1}{m_0^2} \left( 1 - \frac{1000 + H_{mb}}{1000 + \alpha_c H_{mb}} \right) \quad (4)$$

应当指出,(4)式没有考虑初始损伤对  $D$  的影响,作者建议将上式右端乘一个初始损伤影响因子  $\alpha_0$ , 用来考虑初始损伤对  $D$  的影响,即:

$$D = \frac{\alpha_0}{m_0^2} \left( 1 - \frac{1000 + H_{mb}}{1000 + \alpha_c H_{mb}} \right) \quad (5)$$

(5)式即是作者建议的一个新的基于CT数的损伤变量。 $\alpha_0$  的值应大于1,其值可由实验得到的应力应变关系曲线与本构模型的理论公式拟后确定。 $\alpha_0$  的确定取决于试件在加载初期被压密的程度,即CT

数比初始未加载时的增加量(本质上讲,  $\alpha_0$  由岩石的孔隙率决定)。如6#砂岩的  $\alpha_0 = 1645.28/1641.93 = 1.002$ , 由于本次试验阈值以后的扫描次数较少,  $\alpha_0$  的确定有一定困难,这里暂取为1.05,将阈值后各应力状态的岩石试件CT数(表4)代入(5)式,可得  $D$  与  $\sigma_1$  的关系(表5)。结果表明,随着  $\sigma_1$  的增加,损伤变量  $D$  呈非线性增长,既岩石细观损伤演化是一个典型的不可逆非线性累积过程。

表5  $D$  与  $\sigma_1$  的关系

$\sigma_1/\text{MPa}$	25.37	36.57	39.56	2.99	1.32
$D$	0	0.071	0.127	0.472	0.918

## 4 结论与讨论

(1) 利用作者最新研制成功的CT机专用三轴加载设备,完成了三轴(单轴)荷载作用下岩石细观损伤扩展规律CT实时试验,得到了岩石从微孔洞被压密到微裂纹发生、分叉、发展、断裂破坏直到卸荷等各阶段清晰的CT图象,这为从细观尺度探寻岩石破坏机理提供了一个创新的试验方法。初步的试验表明,这种方法是先进可行的,将有力的推动岩石损伤力学试验技术的发展。

(2) 引入初始损伤影响因子及闭合影响系数,建议了一个基于CT数的新的损伤变量,这对CT试验结果的定量分析有重要意义。从CT细观试验得到了损伤阈值,将准静态岩石应力应变全过程曲线分为5个阶段,给出了单轴压缩作用下岩石损伤演化的初步规律。结果表明,岩石的初始损伤和损伤演化均表现出均匀性,岩石损伤演化具有局部化现象。

(3) 本文的工作是初步的,本次试验的扫描次数和层数较少,损伤阈值的确定有一定误差。系统的岩石损伤CT试验工作正在进行。岩石损伤本构模型和损伤演化方程的建立是下一步的重点工作。

### 参 考 文 献

- 1 许江. 对单轴应力状态下砂岩微观断裂发展过程的实验研究. 力学与实践, 1986, 8(4): 24~28
- 2 赵永红. 受压岩石中裂纹发育过程及分维变化特征. 科学通报, 1995, 40(7): 621~623
- 3 F. Verhelst, A. Vervoort, PH. Debosscher, K. U. Leuven. X-ray computerized tomography: determination of heterogeneities in rock samples, In: S. Sakurai ed. Proceedings of The 8<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995. 105~108

- 4 杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998, 79~80
- 5 H. KawaKata, A. Cho, T. Yanagidani, M. Shimada. The observations of faulting in Westerly granite under triaxial compression by X-ray CT scan; Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 1997. 34 (3-4): 151~162
- 6 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 马巍, 朱元林. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态实验. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (5): 497~502
- 7 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 马巍, 朱元林. 岩石细观损伤演化规律的 CT 实时试验研究. 中国科学 E, 2000, 30 (2): 104~111
- 8 G. T. 赫尔曼. 由投影重建图象-CT的理论基础. 严洪范等译. 北京: 科学出版社, 1985
- 9 王金龙, 林卓英, 吴玉山, 袁建新. 脆性岩石的损伤与裂隙扩展. 岩土力学, 1990, 11 (3): 1~8

**REAL - TIME CT TEST ON THE MESO - DAMAGE EVOLUTION OF ROCK UNDER UNIAXIAL COMPRESSION**

*Ren Jianxi*

(Xi'an University of Science & Technology)

*Ge Xiurun*

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences)

*Pu Yibin Ma Wei Zhu Yuanlin*

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERA CAS)

Abstract

A real-time computerized tomography (CT) test on the meso-damage evolution of rock under triaxial (uniaxial) compression is accomplished. Through CT scanning, clear CT images are obtained, It includes the whole process of rock failure from microhole compressed, growth, bifurcation, development, fracture failure, and unloading stage under different stress states. Initial damage effect factor and closed effect coefficient are introduced. Then a new damage variable based on CT numbers is proposed in the paper. Based on the results of CT test on the meso-damage of rock, the stress threshold value of rock damage is given. For static rock failure, the whole process curve is divided into five stages. The initial meso-damage evolution rule of rock is summarized. It is a creative technique using this equipment to study the meso-damage mechanics of rock.

**Key words:** rock, meso-damage evolution, damage variable, constitutive model

**任建喜** 讲师, 博士生, 主要从事岩土力学与工程的教学和研究工作。通讯地址: 710054 西安市雁塔路 14 号, 西安科技学院建筑工程系

**葛修润** 研究员, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事岩土力学与工程的研究工作。

**蒲毅彬** 高级工程师, 主要从事仪器仪表的开发研制和 CT 检测工作。

**马巍** 研究员, 冻土工程国家重点实验室副主任, 主要从事冻土力学与工程的研究工作。

**朱元林** 研究员, 博士生导师, 冻土工程国家重点实验室常务副主任, 主要从事冻土力学与工程的研究工作。