

煤岩三轴细观损伤演化规律的CT动态试验*

葛修润¹ 任建喜² 蒲毅彬³ 马巍³ 朱元林³

(¹中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) (²西安矿业学院建筑工程系 西安 710054)

(³中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室 兰州 730000)

摘要 利用本文第一作者主持设计和研制的与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(computerized tomography)试验。得到了在不同荷载作用下煤岩中微孔洞被压密 微裂纹萌生 分叉 发展 断裂 破坏 卸载等各个阶段清晰的CT图象,引入了初始损伤影响因子,定义了一个基于CT数的新的损伤变量。

关键词 煤岩, 岩石, CT 试验, 细观损伤演化, 损伤变量

分类号 TU 4583

1 前言

岩石损伤力学特性研究是当前岩石力学领域中广泛关注的前沿课题之一。细观损伤力学的研究是从材料内的微裂纹、空洞等细观尺度上研究各类损伤的形态,分布及其演化特性。Dougill(1976年)最早把损伤力学应用于岩石材料, Krjacinovic Dragon, Costin 等都指出过岩石损伤的特点,建立了相应的模型和理论。在国内,谢和平(1987, 1988年)最早在岩石、混凝土损伤力学方面进行过研究^[1]。凌建明(1992年)利用微加载装置进行了岩石材料在电镜下的即时加载观测,建立了脆性岩石损伤模型^[2]。吴紫汪等(1997年)利用CT技术研究了冻土的蠕变特征^[3]。杨更社(1996, 1998年), H. Kawakata(1997年)等利用CT扫描对岩石的初始细观损伤特性进行了研究^[4~6]。杨更社等(1999年)对单轴受力状态下的损伤扩展进行了CT分析^[7]。本文利用我们最新研制成功的CT加载设备,进行三轴和单轴压缩下的煤岩试件细观损伤扩展情况的CT动态即时扫描试验,探求煤岩破坏机理,目的是建立合理的损伤演化方程和统计意义上的岩石损伤本构关系,为进一步进行岩体强度分析和变形控制提供科学依据。这在国内外尚未见报道,是一种创新的试验手段。

2 煤岩损伤演化CT动态试验

2.1 试验设备

由本文第一作者主持总体设计和研制成功的CT专用三轴加载设备外形: 240 mm × 1 000 mm, 最大轴向压力设计为 400 kN, 围压为 20 MPa, 轴向工作行程 40 mm, 可进行轴向压力和变形的量测, 可对国际标准圆柱形岩石试件进行破坏试验, 试件尺寸: $\phi 80$ mm × 100 mm。也可对 $\phi 1.8$ mm × 150 mm 的土样进行破坏试验。此设备是为冻土工程国家重点实验室的CT机配套研制的专用三轴加载设备, 经适当改装后也可用于冻土试验研究。

CT机是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), 密度对比分辨率为 0.3% (3Hu)。

2.2 试验对象

试验所用岩石材料是于1999年3月28日~4月4日采自陕西蒲白矿务局南桥煤矿的西一大巷和采二区煤巷(巷道埋深 340 m)的砂岩(平均容重为 24.5 kN/m³)和煤岩(平均容重为 14.7 kN/m³)。

2.3 试验过程

试验于1999年4月15~17日在冻土工程国家

1999年7月5日收到初稿, 1999年8月2日收到修改稿。

* 中国科学院兰州冰川冻土工程国家重点实验室资助项目(No. 9802)。

作者 葛修润 简介: 男, 65岁, 1959年毕业于前苏联敖德萨建筑工程学院水利系, 现任研究员, 中国工程院院士, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。

重点实验室 CT 室进行。对煤岩试件进行了三轴细观损伤扩展规律的 CT 动态扫描试验。各试件从上到下分四个层次，在加载过程中的各个阶段对各层位进行即时 CT 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，从细观尺度研究煤岩的破坏机理。

3 数据分析

3.1 损伤演化规律的分析

(1) 以 4# 煤岩(容重 14.9 kN/m^3)的试验结果为例进行分析。对 4# 煤岩试件的扫描条件见表 1。4# 煤岩分 4 个扫描层进行 7 次扫描，共得到 28 幅图像。图 1 是样品安装 CT 图像，图中之 1, 2, 3, 4 对应从上到下的四个扫描层位，层厚 3 mm，应变速率是 $2.41 \times 10^{-5} / \text{s}$ ，属于准静态加载，试验耗时 66 min。图 2~ 8 各图中 ~ 对应的是试件从上到下 4 个扫描层面的 CT 图像。表 2 给出了 7 次扫描时对应的应力状态。表 3 是试验数据统计分析表。

表 1 扫描条件

Table 1 Scan test condition

试验时间	电压 /kV	电流 /mA	时间 /s	标记	层厚 /mm	放大系数	X/Y	间隔 /mm
4月16日	137	220	2	OM	3	6.5	10/6	22

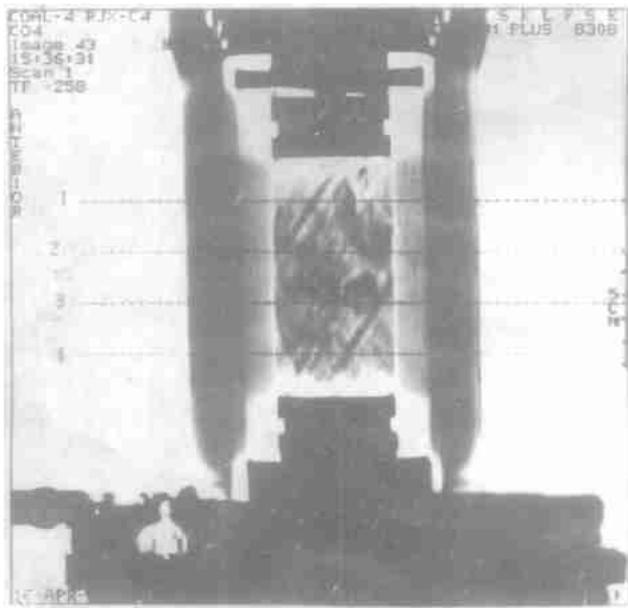


图 1 4# 煤岩试件安装 CT 图像

Fig 1 CT image of 4# coal sample installed in a pressure room

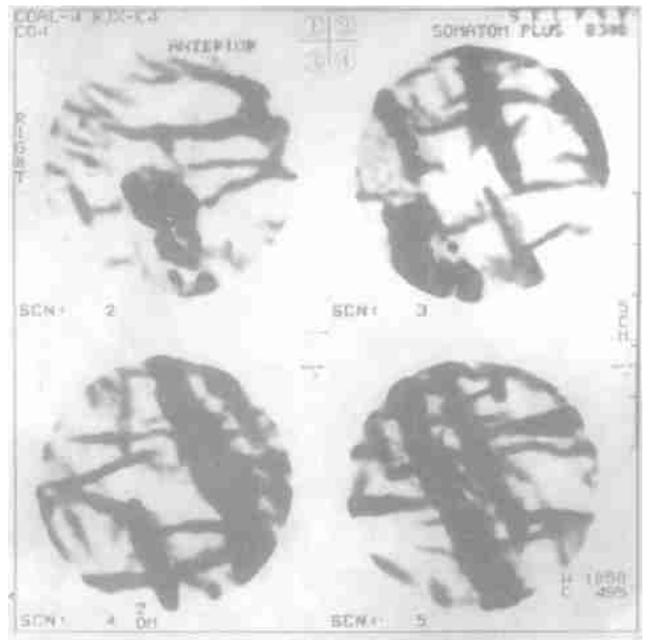


图 2 初始未加载时的各层面 CT 图像

Fig 2 CT image of each scan section in initial state

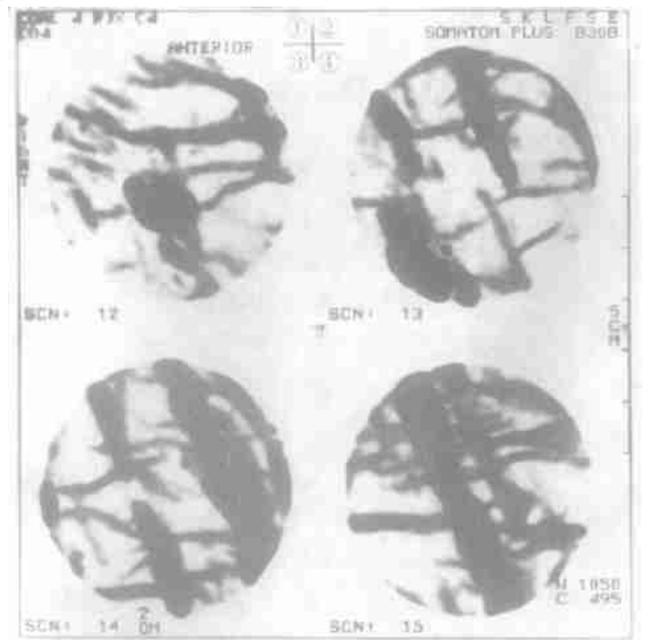


图 3 $\sigma_1 = 6.12 \text{ MPa}$ 时的各层面 CT 图像

Fig 3 CT image of each scan section ($\sigma_1 = 6.12 \text{ MPa}$)

图 2 之 ~ 是从上到下 4 个扫描层的初始细观损伤 CT 图象，可以清晰看到煤岩初始损伤非常明显，既有孔洞，也有微裂纹存在，高密度区夹有煤矸石材料。由表 2 可知，这 4 幅图像对应的 CT 数和方差均不相同，而 CT 数分布本质上反映密度的分布，方差表示损伤种类(孔洞，微裂纹)的分布情况。这表明，煤岩无论是同一层面的损伤分布还是各层面的损伤分布都表现出初始细观损伤分布的不均匀性。

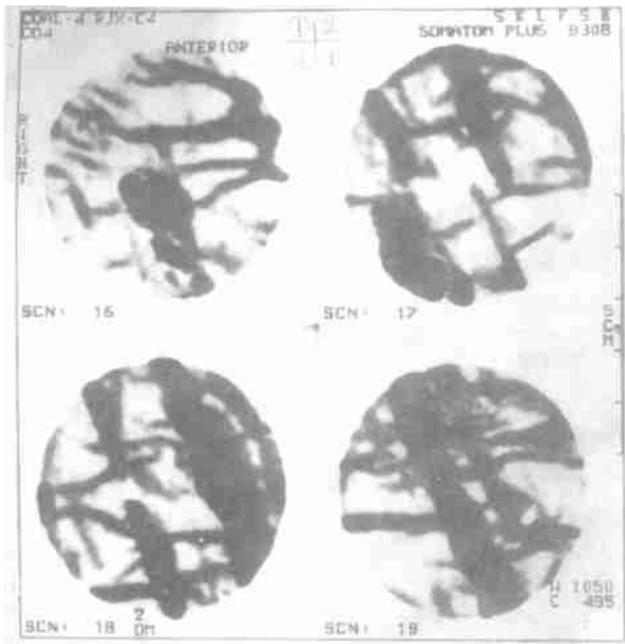


图 4 $\sigma_1 = 9.08\text{MPa}$ 时的各层面 CT 图像

Fig 4 CT image of each scan section ($\sigma_1 = 9.08\text{MPa}$)

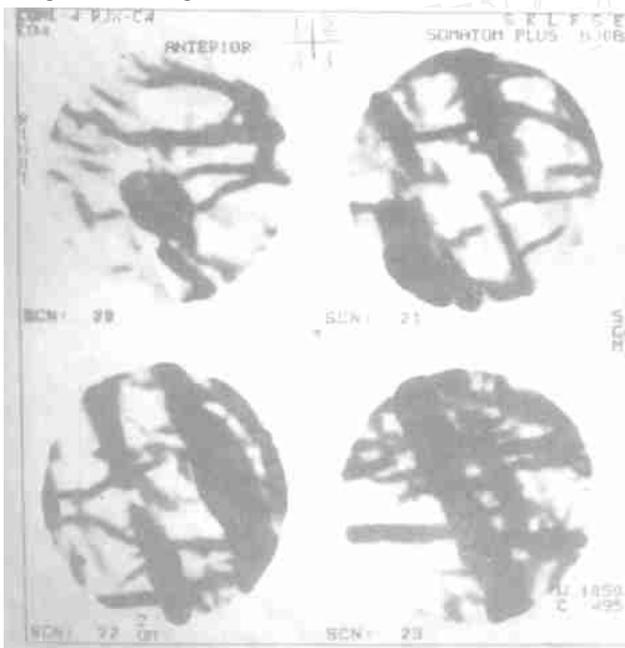


图 5 $\sigma_1 = 13.77\text{MPa}$ 时的各层面 CT 图像

Fig 5 CT image of each scan section ($\sigma_1 = 13.77\text{MPa}$)

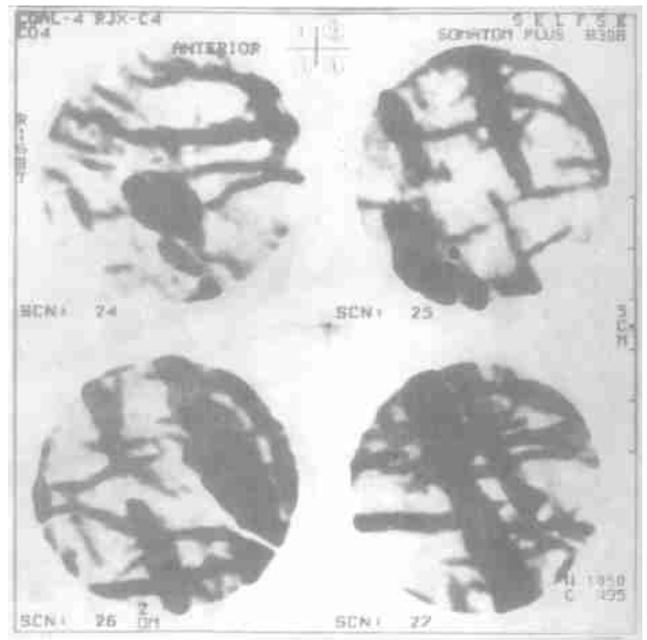


图 6 $\sigma_1 = 18.67\text{MPa}$ 时的各层面 CT 图像

Fig 6 CT image of each scan section ($\sigma_1 = 18.67\text{MPa}$)

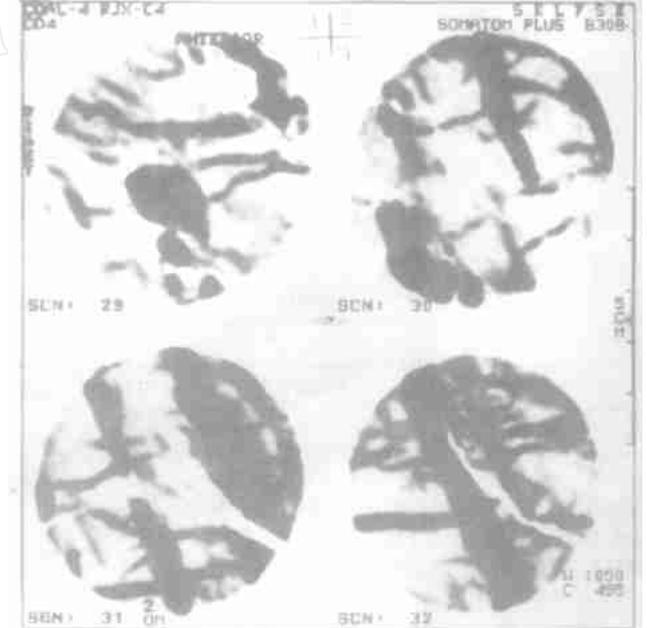


图 7 卸载到 $\sigma_1 = 5.62\text{MPa}$ 时的各层面 CT 图像

Fig 7 CT image of each scan section ($\sigma_1 = 5.62\text{MPa}$) (in unloading condition)

表 2 各次扫描对应的应力状态 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 5\text{MPa}$)

Table 2 Stress state of each scan test ($\sigma_2 = \sigma_3 = 5\text{MPa}$)

扫描次序	σ_1 /MPa	$(\sigma_1 - \sigma_2)$ /MPa	ϵ_1 /%	备注
第 1 次扫描				初始状态
第 2 次扫描	6.12	1.12	6.33	
第 3 次扫描	9.08	4.08	6.49	
第 4 次扫描	13.77	8.77	6.77	
第 5 次扫描	18.67	13.67	7.15	
第 6 次扫描	5.62	0.62	7.82	卸荷
第 7 次扫描	5.16	0.16	9.56	卸荷

由表 3, 4 可知, 在 σ_1 从 0 MPa 升为 6.12 MPa 这一阶段, 无论是 4 个扫描层还是煤岩试件各层 CT 数均值都有升高, 实质上是原始的微裂隙和孔洞 (初始损伤) 出现闭合, 致使岩石材料被压密, 密度增加, 这从图 3 可清晰地看到, 在一些区域白色图像变为黑色 (黑色为高密度区, 白色为低密度区)。在 σ_1 为 9.08 MPa 时, 从图 4 中, 图可以看到发生了少量裂纹的萌生现象, 并且第 2~4 扫描层开始有少量扩容现象发生, 而第一扫描层未发生扩容现象。这说明, 在同一荷载作用下同一试件的不同层面有

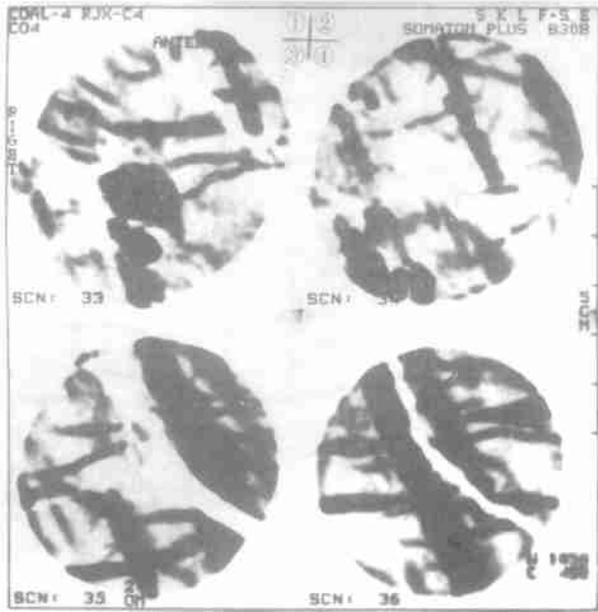


图 8 卸载到 $\sigma_1 = 5.16\text{MPa}$ 时的各层面 CT 图像
 Fig 8 CT image of each scan section ($\sigma_1 = 5.16\text{MPa}$)
 (in unloading condition)

着不同的损伤扩展特性, 即损伤演化的不均匀性。

当 σ_1 升至 13.77MPa 时, 前一阶段萌生的裂纹开始伸长, 同时又有较多新的微裂纹的萌生, 这时

各扫描层及试件的 CT 数(某一应力状态下各扫描层 CT 数之均值)均开始下降, 而方差增大, 第 2~ 4 扫描层的扩容现象继续发生。在 σ_1 从 13.77MPa 升到 18.67MPa 这一阶段, 各层及试件的 CT 数开始明显下降。第 2, 3 扫描层的裂纹开始分叉、伸长贯通(图 6 之 , 图), 第 4 扫描层有新的裂纹萌生、伸长、接近于贯通。这一阶段是破坏前兆阶段, 也是损伤演化速度最快的阶段。在 σ_1 达 18.67MPa 时, σ_1 达峰值强度, 裂隙彻底贯通, 第 2, 3 扫描层出现引起试件破坏的主裂隙断裂区。在 σ_1 从峰值卸载为 5.62MPa 和 5.16MPa 时, 已贯通的主裂纹变宽, 各层的扩容现象都急剧发生(图 7, 8)。

(2) 从图 6~ 8 还可看到裂纹起始扩展的方向与最大主应力方向平行或成小角度, 但其进一步扩展的方向有所不同。对于各层中的极黑点来说, 这些点所在的区域为高密度区, 其对损伤演化有特殊意义, 裂纹的分支将沿高密度颗粒周围形成(图 7 之图), 从图 7, 8 看出, 三轴荷载作用下的形成的主裂面并不是一个平面, 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。

(3) 为了研究主裂纹区域裂纹萌生、分叉、发展的损伤规律, 取第 4 扫描层包含主裂纹的区域进行详细分析(图 9 中标出的椭圆区域)。

表 3 4# 煤岩各断面 CT 试验数据统计分析

Table 3 CT test results analysis of 4# coal sample sections

第一扫描层			第二扫描层			第三扫描层			第四扫描层			备注
ME	SD	ΔS	ME	SD	ΔS	ME	SD	ΔS	ME	SD	ΔS	
514.3	434.89		585.2	505.52		607.6	458.6		548.8	337.91		1
516.0	426.19		601.0	549.99		645.8	483.75		585.4	412.67		2
518.7	428.93		600.1	551.16	0.71	639.6	485.72	1.18	582.9	403.7	0.71	3
507.2	408.86		590.4	555.48	0.94	621.4	522.37	1.92	580.8	463.78	0.94	4
489.16	410.86	0.73	576.2	517.98	1.68	620.5	486.35	1.92	574.7	410.52	0.94	5
453.2	408.66	3.68	521.7	461.99	2.68	619.8	503.77	2.66	570.1	407.31	1.68	6
357.8	428.44	4.82	440.1	306.60	3.94	573.9	467.85	3.17	535.2	312.77	1.92	7

注: ME 为 CT 数; SD 为方差; ΔS 为不同应力状态时断面面积变化值(cm^2); 备注中的“1, 2, 3, 4, 5, 6, 7”对应表 2 中的扫描次序。

表 4 4# 煤岩试件试验数据分析

Table 4 CT test results analysis of 4# coal sample

扫描次序	ME	ΔME	SD	ΔSD
1	563.97		434.10	
2	587.05	23.08	468.12	34.02
3	585.33	21.36	467.39	33.29
4	574.95	10.98	487.62	53.52
5	565.17	1.2	456.34	22.24
6	541.20	- 22.77	445.43	11.33
7	501.75	- 62.22	393.92	- 40.18

注: $ME = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 ME_i$, 试件的 CT 数; $SD = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 SD_i$; ΔME 为试件不同应力水平时的 CT 数与最初次扫描时 CT 数的变化值; ΔSD 为试件不同应力水平时 CT 数的方差与最初次扫描时 CT 数方差的变化值。

表 5 第四扫描层“危险区域”CT 数分析

Table 5 CT values analysis of “dangerous area” of 4th scan section

扫描次序	ME	ΔME	SD	ΔSD
第 1 次扫描	540.7		183.67	
第 2 次扫描	759.4	218.7	505.45	321.78
第 3 次扫描	755.2	214.5	473.79	290.12
第 4 次扫描	740.5	199.8	625.24	441.57
第 5 次扫描	700.6	159.9	487.45	303.78
第 6 次扫描	632.4	91.7	419.79	236.12
第 7 次扫描	440.4	- 100.3	218.57	34.9

注: ME 为 CT 数, ΔME 为不同应力状态时 CT 数与最初次扫描时 CT 数的变化值; SD 为方差, ΔSD 为不同应力状态时 CT 数方差与最初次扫描时 CT 数方差的变化值。



图 9 第 4 扫描层“危险区域”示意图

Fig 9 “Dangerous area” of the 4th scan section

通过对最后裂纹萌生及发展之区域(面积为 4.72 cm²)的分析可知(表 5),这一区域初始的 CT 数为 540.7,比试件的 CT 数 563.97 减少了 23.27,说明这一区域在未加载时的密度明显低于整个试件的密度,最后成为加载时最先发生主裂纹的区域。在 σ_1 从 9.08MPa—18.67MPa 这一阶段,CT 数均值下降了 58.6,而同一时期,煤岩试件的 CT 数下降了 21.88,这一区域 CT 值的下降量是整个试件 CT 数下降量的 2.67 倍。这说明岩石材料的最终破坏是由一条或多条主裂纹决定的,这一区域是岩石材料初始孔隙(损伤)较多的区域,即结构不均匀的区域是易于首先破坏的区域。这就是由 CT 图像看到的岩石损伤扩展局部化现象。

(4) 对比单轴和三轴下试件的 CT 试验结果(限于篇幅,这里未给出 CT 图像)可知,同一类岩样单轴压缩时的轴向 σ_1 小于三轴压缩时的轴向 σ_1 值,并且三轴荷载作用时的轴向应变明显小于单轴时轴向应变。从图像上看,其微裂纹萌生发展及主裂纹发生发展断裂的阶段不同。由于围压的作用,三轴时生成的微裂纹数多于单轴时萌生的裂纹数。单轴荷载作用下试件多为脆性破坏,而三轴时随着围压的增加,塑性破坏特征愈来愈明显。

3.2 损伤变量 D 的确定

通过 CT 数的数学建模,文[5]给出如下损伤变量的表达式:

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

式中: m_0 为 CT 机的空间分辨率;

$\Delta\rho$ 为岩石材料损伤演化过程中密度的变化值;

ρ_0 为岩石的初始密度。

显然,确定损伤变量 D 的关键是确定 $\Delta\rho$,下面推导由 CT 数定义的 $\Delta\rho$,这里定义 H_m 代表岩石材料的 CT 数。

根据 CT 原理, H_m 值与岩石材料密度之间成正比, H_m 值的分布规律本质上反映了岩石密度的分布规律, H_m 值与岩石对 X 射线的吸收系数 μ 成正比,即

$$H_m = k\mu \quad (2)$$

式中: k 为一常数。

假设无损岩石基体材料以外的各种损伤(孔洞和微裂隙)仅为空气所充填,忽略水的影响,则

$$\mu = \mu^m \rho = (1 - \alpha)\rho_b \mu_b^m + \alpha\rho_a \mu_a^m \quad (3)$$

式中: ρ 为损伤扩展过程某一应力状态时岩石材料的密度;

ρ_b, ρ_a 为无损岩石材料和空气的密度;

α 为孔隙率;

μ_b^m, μ_a^m 为无损岩石材料和空气对 X 射线的吸收系数。

在空间分辨单元内的密度为

$$\rho = (1 - \alpha)\rho_b + \alpha\rho_a \quad (4)$$

由式(2), (3) 联立方程组求解可得出 μ, α 且令空气的密度 $\rho_a = 0$, 空气的 CT 值 $H_a = -1000$, 代入式(4), 经运算得出

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = \frac{1000 + H_m}{1000 + H_{mb}} \rho_b - \rho_0 \quad (5)$$

式中: H_{mb} 为无损岩石的 CT 值。

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,故式(5)中的 ρ_b 和 H_{mb} 将难以确定。本课题的研究目的是进行损伤演化规律的研究,我们关心的是损伤扩展过程中密度的变化,故可将具有初始损伤的岩石材料的密度 ρ_0 , CT 数 H_{m0} 作为 ρ_b, H_{mb} 来进行计算。 H_{m0} 可由初始损伤特性 CT 试验确定,为提高试验精度,建议作此试验时,一个试件的扫描层数最好为 30 层左右,先求出试件各个层面的初始损伤 CT 数的均值,再求出同组各个试件 CT 数的均值(这里定义某一应力状态下试件各扫描层位的 CT 数的均值为岩石试件的 CT 数),此值即为 H_{m0} 。

令 $\rho_0 = \rho_b, H_{mb}$ 代入式(5), 得到 $\Delta\rho$, 将 $\Delta\rho$ 代入式(1), 则有

$$D = \frac{1}{m_0^2} \left(1 - \frac{1000 + H_m}{1000 + H_{m0}}\right) \quad (6)$$

如前所述,式(6)是基于初始损伤岩石的 ρ_0, H_{m0} 作为 ρ_b, H_{mb} 得到的,没有考虑初始损伤对 D 的

影响。作者建议将上式右端乘以一个初始损伤影响因子 e ，用来考虑初始损伤对 D 的影响，即

$$D = \frac{e}{m_0^2} \left(1 - \frac{1000 + H_m}{1000 + H_{m0}} \right) \quad (7)$$

这即是作者建议的一个新的基于 CT 数定义的损伤变量，式中 e 的值应大于 1，具体数值应由试验确定。

4 结 语

(1) 本文利用作者最新研制的与 CT 机配套的专用三轴加载设备，进行了三轴(单轴)荷载作用下煤岩破坏全过程的细观损伤扩展规律即时动态 CT 扫描试验研究，这在国内外尚属首次。

(2) 这套设备的研制是成功的。在三轴(单轴)试验中得到了在不同荷载作用下煤岩材料中微孔洞被压密 微裂纹萌生 分叉 发展 断裂 破坏 卸载等各个阶段清晰的 CT 图像。

(3) 本文进行的煤岩细观损伤扩展规律的 CT 动态试验，将煤岩细观损伤的识别尺度提到 $0.35 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ，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，这种方法是先进的、可行的，将有力的推动岩石损伤力学试验技术的发展，而先进的细观损伤扩展规律试

验技术的发展将为宏观损伤理论研究提供重要的试验基础，并可为进一步建立合理的损伤演化方程、本构关系和研究岩石破坏机理提供科学依据。

(4) CT 试验结果表明煤岩试件初始损伤分布的不均匀性和损伤演化的不均匀性。

(5) 本文引入初始损伤影响因子，建议了一个基于 CT 数的新的损伤变量，有利于 CT 试验结果的分析从定性走向定量。

参 考 文 献

- 1 谢和平. 岩石混凝土损伤力学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990, 152~ 166
- 2 凌建明. 节理岩体损伤力学及时效损伤特性的研究[博士学位论文]. 上海: 同济大学, 1992, 55~ 59
- 3 吴紫汪, 马 巍, 浦毅彬等. 冻土蠕变变形特征细观分析. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 1~ 6
- 4 杨更社, 谢定义, 张长庆等. 岩石损伤特性的 CT 识别. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 48~ 54
- 5 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279~ 285
- 6 KawaKata H, Cho A, Yanagidani T, et al. 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
- 7 杨更社, 谢定义, 张长庆等. 岩石损伤扩展力学特性的 CT 分析. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 250~ 254

A REAL - IN - TIME CT TRIAXIAL TESTING STUDY OF MESO-DAMAGE EVOLUTION LAW OF COAL

Ge Xiurun¹ Ren Jianxi² Pu Yibin³ Ma Wei³ Zhu Yuanlin³

⁽¹⁾ Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China

⁽²⁾ Department of Civil Engineering, Xi'an Institute of Mining & Technology, Xi'an 710054 China

⁽³⁾ State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG CAS, Lanzhou 730000 China

Abstract The dynamic computerized tomography test of meso-damage evolution law is completed for the whole destroyed process of coal rock sample using the newest specified loading equipment corresponding to the CT machine in triaxial and uniaxial compression. Through CT scanning, the clear CT image is obtained which includes the microhole (microcrack) compressed, the microcrack growth, the microcrack bifurcation, the microcrack development, crack fracture, rock sample destroyed, unloading in the different stress state. The CT values, CT images and the other data are analysed. An initial damage effect coefficient is considered, a new damage variable based on CT values is defined. The coal rock damage propagation law is researched.

Key words rock, CT test, meso-damage evolution, damage variable