

岩石卸荷损伤演化机理 CT 实时分析初探

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

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

(³ 中国科学院兰州寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室 兰州 730000)

(⁴ 上海交通大学 上海 200030)

摘要 利用作者已研制成功的与CT机配套的专用三轴加载试验设备,在国内外首次完成了岩石卸荷损伤断裂破坏全过程的实时CT试验。得到了岩石卸荷损伤演化过程中从裂纹发育、扩展、贯通到断裂破坏全过程的CT图像。通过与岩石连续加载破坏过程细观试验结果比较发现,岩石卸荷破坏比连续加载情形下岩石破坏更具突发性。由静态连续加载岩石细观损伤机理出发,将静态岩石全过程曲线划分为5个阶段。得到了卸荷条件下岩石损伤扩展的初步规律。

关键词 岩石, CT 实时分析, 损伤扩展机理, 卸荷细观损伤

分类号 TU 452, TU 458+. 3

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2000)06-0697-05

1 概 述

边坡或地下工程开挖引起的岩体卸荷破坏问题因与连续加载情况下的破坏机理不同,引起岩石力学领域的广泛关注^[1~5]。但已有的试验研究都采用宏观试验手段,有关细观卸荷试验方面的研究成果尚不多见。细观损伤试验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。近年来,计算机断层识别技术即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岩土工程研究者的关注^[6~10]。本文利用文[9]的设备完成了卸围压作用下岩石损伤断裂破坏全过程的CT细观实时试验。这在国内外尚未见报道,是一种创新的岩石细观卸荷损伤试验方法。

2 试验设备与试验过程

2.1 专用加载设备与CT机

本文的试验是利用已研制成功的CT专用三轴加载设备进行的。此CT专用三轴加载装置是由本文第二作者主持总体设计的,有关技术指标见文[9]。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)压缩试验和蠕变试验等。

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 mm^3 (层厚 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)。

2.2 试验对象

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。

2.3 试验过程

2.3.1 静态宏观试验

岩石静态全过程应力应变曲线宏观试验在长江科学院岩基所利用RMT-150岩石力学试验机完成,应变率控制在 $10^{-5}/\text{s}$ 。静态试验的结果可为CT细观试验的控制提供重要依据。

2.3.2 岩石卸荷细观试验

CT细观试验在冻土工程国家重点实验室进行,这里以5#砂岩的试验结果为例进行分析($\rho = 24.23\text{ kN/m}^3$)。5#砂岩试件的扫描条件见表1。试件被从上到下分为5个横断面扫描层位,定位方式与文[9]类似。

2000年3月24日收到初稿,2000年6月3日收到修改稿。

* 中国科学院兰州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(NO. 9802, No. 2000- 3)项目。

作者 任建喜 简介,男,32岁,博士生,1990年毕业于西安矿业学院建工系矿井建设专业,现任讲师,主要从事岩石力学及工程方面的教学和研究工作。

表 1 扫描条件

Table 1 Scan test conditions

电压 /kV	电流 /mA	时间 /s	标记	层厚 /mm	放大 系数	X/Y
137	275	0.7	OM	3	7.0	1/-12

试验应力路径是：先将试件加载到临近破坏前的某一应力状态($\sigma_1^F, \sigma_2, \sigma_3$), $\sigma_2 = \sigma_3$, 然后保持 $\sigma_1 \equiv \sigma_1^F$, 同时以 0.004 MPa/s 的速率卸围压, 直到某一应力状态($\sigma_1^F, \sigma_2^F, \sigma_3^F$) 岩石破坏。在整个试验过程中, 在不同应力状态进行 CT 扫描, 重点扫描卸荷破坏阶段的损伤发展情况。对 5# 砂岩取 $\sigma_1^F = 95.08$ MPa, $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa, 破坏时 $\sigma_2^F = \sigma_3^F = 5.8$ MPa。

3 结果分析

3.1 砂岩初始细观损伤特性

在未加载时, 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), 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 初始损伤试验数据

Table 2 Testing results of initial damage

扫描层位	CT 数/方差
1	1583.1/35.37
2	1573.0/42.65
3	1594.5/38.98
4	1560.4/35.71
5	1604.4/40.21

3.2 连续加载岩石破坏细观机理

进行连续加载情况下岩石破坏 CT 试验是为了与卸荷 CT 试验的结果作对比分析。韩城砂岩三轴(单轴)压缩 CT 试验得到的损伤演化规律与文[10]中蒲白砂岩的损伤演化机理近似, 篇幅有限, 不再详述。

从已完成的煤岩, 砂岩等岩性的静态 CT 分析结果得到的岩石静态破坏全过程细观损伤力学机理出发, 岩石宏观全过程曲线可分如下为 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缓慢稳定扩展;

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。

有关上述 5 个阶段在岩石全过程曲线中各个阶段的应力分界值的详细情况及本构关系研究的内容将另文介绍。

3.3 岩石细观卸荷机理

在 $\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa 时, 围压以 0.004 MPa/s 的速率从 10 MPa 卸到 5.8 MPa 时, 试件破坏。在围压为 10, 8, 6, 5.8 MPa 时分别作了 CT 扫描, 由于篇幅原因, 仅给出第 1, 3, 5 扫描层的 CT 图像、CT 数及方差的试验结果(表 3, 图 1~3)。

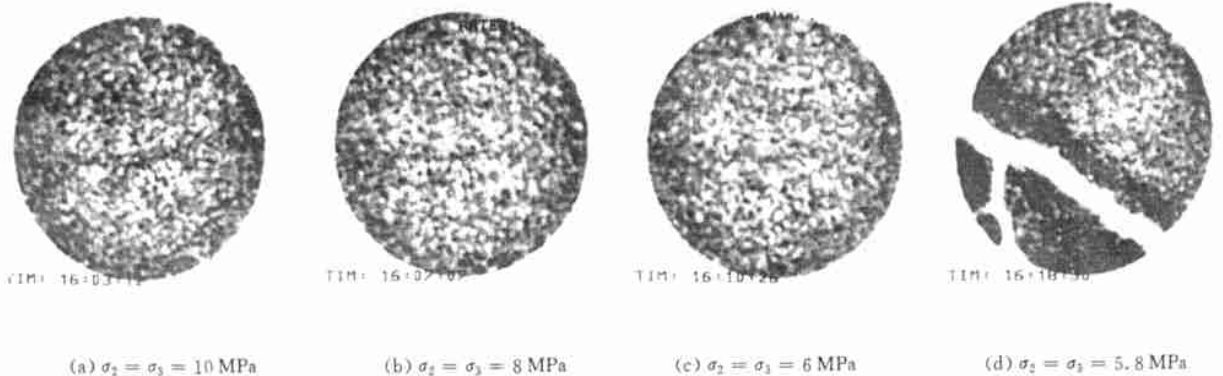


图 1 第 1 扫描层卸荷各阶段 CT 图像($\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa)

Fig. 1 CT images of the 1st scan section in each unloading stage ($\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa)

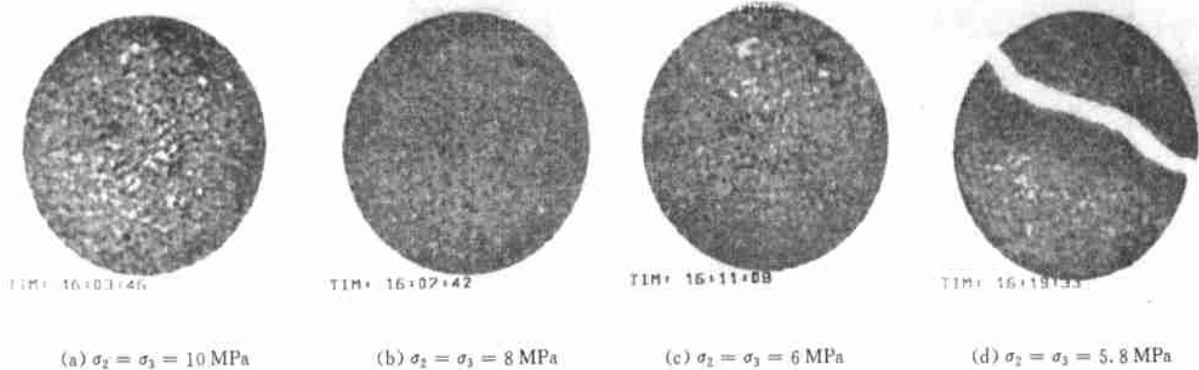


图 2 第 3 扫描层卸荷各阶段 CT 图像 ($\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa)

Fig. 2 CT images of the 3rd scan section in each unloading stage ($\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa)

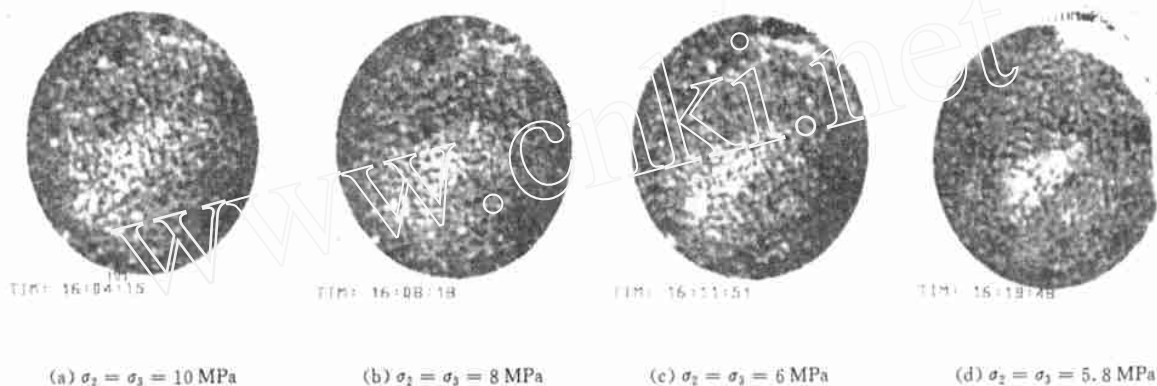


图 3 第 5 扫描层卸荷各阶段 CT 图像 ($\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa)

Fig. 3 CT images of the 5th scan section in each unloading stage ($\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa)

表 3 卸荷过程试验结果 ($\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa)

Table 3 Testing results of unloading process ($\sigma_1 \equiv 95.08$ MPa)

$(\sigma_2 = \sigma_3)$ /MPa	第 1 扫描层 CT 数/方差	第 3 扫描层 CT 数/方差	第 5 扫描层 CT 数/方差	试件 CT 数 /方差
10.0	1590.0/ 35.02	1638.8/ 35.88	1634.1/ 42.19	1621.0/ 37.70
8.0	1584.7/ 35.41	1632.2/ 36.35	1639.2/ 42.57	1618.7/ 38.11
6.0	1586.3/ 35.44	1620.7/ 37.22	1631.1/ 42.43	1612.7/ 38.36
5.8	1521.1/ 263.43	1550.9/ 253.81	1563.4/ 224.09	1545.1/ 247.11

3.3.1 裂纹扩展的迟滞现象

卸荷细观试验结果表明,在围压从10MPa卸为8MPa的过程中,第1,3层的CT数和试件的CT数都有下降,而方差增大(此处定义各扫描层CT数的均值为岩石试件的CT数,各扫描层CT数方差的均值为岩石试件的方差)。比如,第3扫描层的CT数下降了4%,方差增大了1.3%(以围压等于10.

MPa时的CT数和方差为基准,下同),同时,岩石试件的CT数下降了1.4%,方差增大了10.8%。从图像(图1~3)可知,这一阶段是卸荷阶段的微裂纹发育阶段,微裂纹数增多但未有宏观裂纹出现。在这一阶段,第5扫描层CT数变化规律与第1,3扫描层及岩石试件的CT数的变化规律相反,在围压由10MPa降为8MPa时,CT数升高3.12%,这很可能是端部效应的影响。在围压从8MPa降为6MPa这一阶段,第3,5扫描层及试件的CT数都表现出下降的趋势,如第3扫描层围压为6MPa时CT数比围压为8MPa时下降了7.05%,方差增大了23.9%,同时,岩石试件的CT数比围压为8MPa时下降了3.7%,方差增大了6.56%。从这一阶段的图像变化上看,这两层图像总体上表现出由高密度(黑色)向低密度(白色)转化,微孔洞变大,微裂纹增多,但宏观裂纹尚未形成。需指出的是,在这一应力阶段第2扫描层也有上述围压从10MPa卸至8MPa阶段第5扫描层所发生的CT数增大的端部效应现象,其CT数变化规律与这一应力阶段(围压从8MPa卸至6MPa)第3,5扫描层CT数及试件CT

数变化规律相反。在上述两个阶段,岩石卸荷损伤演化规律与连续加载破坏情况不同,在连续加载的同一应力阶段,CT 图像表明,在前一阶段形成的裂纹随应力的提高而不断发展,裂纹伸长变宽^[10]。通过对比发现,岩石卸荷过程中裂纹发育有一稳定的迟滞过程发生,而在围压从 6 MPa 卸至 5.8 MPa,围压卸载值仅为 0.2 MPa 这一不大的数值时,从 CT 试验观察到了岩石卸荷断裂破坏的突发性。

3.3.2 卸荷破坏的突发性

在围压由 6 MPa 卸至 5.8 MPa 这一阶段,各层及试件的 CT 数都急剧减小,方差迅速增大(如第 3 扫描层的 CT 数减小了 53.6%,是围压从 10 MPa 卸至 6 MPa 阶段 CT 数减小量的 49 倍,方差增加 6073.9%,是围压从 10 MPa 卸至 6 MPa 阶段方差增加量的 164.1 倍)。从图像上看,第 1 扫描层在左下方形成一贯通性主裂纹,且有一从主裂纹分叉出的宏观裂纹(图 1(d)),第 3 扫描层在右上部出现一贯通性主裂纹(图 2(d)),第 5 扫描层右上方岩石出现破碎性主裂纹,扩容现象明显(图 3(d))。在这一阶段,各扫描层的微裂纹迅速汇合、伸长、贯通,宏观裂纹形成,损伤迅速累积,导致岩石发生突发性断裂破坏,这是卸荷破坏与连续加载破坏机理的一个重要不同点。

3.3.3 卸荷破坏突发性的力学机理

5# 砂岩加载至 $\sigma_1 = 95.08$ MPa, $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa 的三轴压缩应力状态是卸围压试验的初始应力状态,且应力较高,岩石未发生破坏。在 $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa 卸至 8, 6, 5.8 MPa 的过程中,相当于给试件侧向(σ_2, σ_3 方向)加上一个与 σ_2, σ_3 方向相反的拉应力 R_1 ,如在 $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa 卸至 8 MPa 时 $R_1 = 2$ MPa。卸围压时,在垂直卸荷方向的截面上产生张裂面,这说明,卸荷作用对岩石破坏的影响是很大的。从实质上讲,卸围压相当于岩石在初始应力状态下沿 $\sigma_2 = \sigma_3$ 方向叠加了反向的拉应力,它导致岩石的破坏。

通常,卸荷试验的卸荷途径有多种,本文 5# 砂岩的卸荷路径相当于最大主应力(σ_1)不变,最小主应力($\sigma_2 = \sigma_3$)卸载,这种卸荷路径最危险。随着 $\sigma_2 = \sigma_3$ 的减小,应力莫尔圆急速增大,与库仑曲线很快相切(对某一种岩石来说,库仑曲线保持不变),剪应力 τ 快速增至破坏强度 τ_{max} ,岩石发生突发性破坏。

3.3.4 损伤演化的不均匀性

需指出的是,在围压从 10 MPa 卸为 8 MPa 时,第 5 扫描层的 CT 数略有升高,方差略有增大,这说明,这一阶段该层在微裂纹微孔洞发育增大的同时伴有微孔洞微裂纹的闭和现象发生。这与前述的第

1, 3 扫描层损伤演化情况不同,即卸荷损伤演化具有不均匀性(在围压从 8 MPa 卸至 6 MPa 的过程中第一扫描层也有此现象发生)。

3.3.5 损伤演化的局部化及主破裂面方向

从图 3 可知,第 5 扫描层的右上部首先出现宏观裂纹,原因何在。取包含这一裂纹的 1.45 cm² 的椭圆区域进行分析发现(表 4),在围压从 10 MPa 卸至 8, 6 MPa 直到 5.8 MPa 的这几个应力阶段,这一区域 CT 数的变化都是减少的趋势,且下降速度比第 5 层及岩石试件的 CT 数在相同应力阶段时下降快的多。如在围压从 10 MPa 降为 8 MPa 这一阶段,该区域的 CT 数下降了 5.2%,而岩石试件的 CT 数仅下降了 1.4%,该区域 CT 数下降率为岩石试件 CT 数下降率的 3.71 倍,但这一阶段第 5 层的 CT 数还略有增加。从图像上看,此区域是该层最早出现裂纹伸长、分叉的区域,此即第 5 扫描层上表现出的损伤演化局部化现象。

另外,由试件破坏的平片可知,岩石卸荷破坏与连续加载破坏一样,主破裂面是一折曲面,其方向与最大主应力方向成一小角度。

表 4 第 5 扫描层“危险区域”数据($\sigma_1 = 95.08$ MPa)

Table 4 Data of “dangerous area” of the 5th scan section ($\sigma_1 = 95.08$ MPa)

$(\sigma_2 = \sigma_3)$ /MPa	CT 数/方差
10.0	1635.9/40.24
8.0	1627.4/39.31
6.0	1616.5/42.94
5.8	1367.4/229.14

4 结论与讨论

(1) 本文利用作者已研制成功的与 CT 机配套的专用三轴加载系统,完成了岩石卸荷损伤破坏全过程 CT 实时扫描试验,得到了岩石卸荷损伤演化过程中从裂纹发育、扩展、贯通到断裂破坏全过程的 CT 图像,国内外都尚未见类似的报导。

(2) CT 细观试验发现,韩城砂岩的初始细观损伤具有不均匀性,与连续加载破坏时一样,岩石卸荷损伤演化也具有局部化现象和不均匀性^[9, 10]。

(3) 试验表明,岩石卸荷破坏与连续加载破坏的主要不同点有:卸荷破坏开始时,裂纹发展有一迟滞阶段(裂纹发展相对稳定)。从细观试验得出的上述结论对岩爆现象的机理分析具有重要意义。本文对岩石卸围压破坏细观机理研究得出的结论对岩体开挖卸荷机理的研究具有重要参考价值,从某种意义上讲,岩体卸荷破坏与其有相似性。但需说明的是,岩体中节理的分布密度、方向、长度、厚

度、贯通性等指标对岩体开挖卸荷破坏起主导作用,对岩体开挖卸荷细观机理研究可通过相似模拟材料的CT实时卸荷试验完成,岩石卸荷CT试验的结果不可完全用于岩体开挖卸荷问题的解释。

(4) 作者从静态岩石连续加载破坏的细观机理出发,将岩石破坏全过程宏观曲线分为损伤弱化阶段,准线性阶段,损伤开始演化和稳定发展阶段,损伤加速发展阶段和峰后损伤急剧发展阶段。

(5) 需指出的是,本文就轴压不变卸围压的岩石破坏机理进行了初步研究,有关卸围压又卸轴压,并考虑围压和轴压卸载速率异同等多种情况的岩石卸荷CT细观试验系统研究工作正在进行。另外,文中“卸荷”的内涵与塑性力学中加卸载准则中的“卸荷(载)”不同,从后者的观点来说,文中的卸围压在屈服面上是加荷,直至岩石破坏(屈服面发展至破坏面)。

参 考 文 献

1 凌建明. 卸荷条件下岩体损伤破坏特性的研究[A]. 见: 葛修润

- 主编. 计算机方法在岩石力学中的应用[C]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994. 520~526
- 2 哈秋龄, 李建林. 长江三峡工程岩石边坡卸荷岩体宏观力学参数研究——永久船闸陡高边坡岩体力学研究(二)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996. 32~74
- 3 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24~29
- 4 哈秋龄. 岩石边坡工程与卸荷非线性岩石(体)力学[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 386~391
- 5 吴刚, 孙钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 615~621
- 6 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
- 7 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
- 8 杨更社, 谢定义, 张长庆等. 岩石损伤扩展力学特性的CT分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 250~254
- 9 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
- 10 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

PRIMARY STUDY OF REAL-TIME CT TESTING OF UNLOADING DAMAGE EVOLUTION LAW OF ROCK

Ren Jianxi^{1,2,3}, Ge Xiurun^{2,3,4}, Pu Yibin³, Ma Wei³, Zhu Yuanlin³

⁽¹⁾ Department of Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054 China

⁽²⁾ Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China

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

⁽⁴⁾ Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030 China

Abstract It is the first time in rock mechanics field to make real-time CT testing of the meso-damage evolution law of the whole failure process of rock in unloading condition using the specified loading equipment corresponding to the CT machine developed by the authors. Through the CT testing, the clear CT images are obtained to include the whole process from the microcrack growth, propagation, penetration and failure of rock sample in unloading condition. Comparing to the testing results of rock failure under the successive loading and unloading condition, it is clear that it is easy for failure phenomenon to happen suddenly in the process of unloading condition of rock. For the static rock failure, the whole process curve is divided into five stages based on the meso-damage evolution law of rock in the successive loading condition. The initial unloading meso-damage evolution law is given.

Key words rock, real time CT analysis, damage evolution law, unloading meso-damage