

冻结裂隙岩石加卸载破坏机理 CT 实时试验

Real-time CT test of damage failure mechanism of frozen cracked rock in loading and unloading condition

任建喜^{1,2}

(1. 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, 甘肃 兰州 730000; 2. 西安科技大学, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用自制的岩石力学三轴 CT 加载系统, 完成了具有单一裂纹的裂隙岩石在负温条件下的加卸载损伤破坏机理 CT 实时对比试验研究。分析了冻结裂隙岩石加卸载损伤全过程的 CT 图像和 CT 数的演化规律。结果表明, 与连续加载情况下相比, 冻结裂隙岩石的卸围压破坏突发性强, 岩石扩容强烈。

关键词: 寒区; 裂隙岩石; 加载; 卸载; CT 实时试验

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)05-0641-04

作者简介: 任建喜(1968-), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士后, 主要从事岩土工程的教学和研究工作。

REN Jianxi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Using the specified triaxial loading equipment corresponding to the CT machine, the comparison of real-time computerized tomography testing of damage failure mechanism of cracked rock in cold region under successive triaxial loading and unloading has been accomplished. The evolution law of CT number and CT images in the complete process of damage failure of frozen cracked rock is studied. It shows that it is easy for failure phenomenon to happen suddenly in the process of unloading of frozen cracked rock compared to the successive triaxial loading. The size of volume expansion of frozen cracked rock in unloading condition is larger than that in successive loading condition.

Key words: cold region; cracked rock; loading; unloading; CT real-time testing

0 概 述^{*}

我国东北及西北寒冷(年平均气温低于 -1°C)地区有铁路、公路隧道 30 多座, 受寒冷破坏的病害相当普遍, 由于地下水沿裂缝渗入洞口, 冬季洞壁面挂冰, 路面积冰影响通车, 在多年反复冻融下节理岩体冻胀破坏, 引起衬砌破坏, 严重的导致部分围岩失稳, 隧洞无法正常使用。如青藏铁路线上的昆仑山隧道全长 1686 m, 最大埋深 100 m, 年平均气温 -3.6°C , 隧道洞身通过板岩夹片岩, 以片岩为主, 洞身全部位于冻岩之中。另外, 海拔 3792 m 的青海省祁连山区大坂山隧道等冻害破坏严重, 由于冻胀力的作用, 衬砌裂纹宽度达 5 cm, 严重影响正常交通。随着西部大开发步伐的加大, 有关寒区节理岩体工程稳定性的科学评价、正确的开挖支护技术及其冻融灾害防治问题的研究已经迫在眉睫, 成为急需解决的关键科学问题^[1]。寒区裂隙岩体的破坏与众多因素有关, 如温度的变化、水冰相变、水分迁移、裂隙渗流、加载卸荷等。本文利用自制的岩石力学三轴 CT 加载系统^[2], 完成了裂隙岩石在负温条件下的加卸载损伤破坏机理 CT 实时对比试验研究。目的是为西部寒区隧道工程的稳定性评价、施工措施的采取, 寒区隧道灾害防治提供重要的理论支持。

1 试验设备与试验内容和方法

1.1 试验设备^[2]

新研制的 CT 专用三轴加载设备外形: $\Phi 240\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$, 最大轴向压力设计为 400 kN, 围压为 20 MPa。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 mm^3 (层厚 1 mm), 密度对比分辨率为 0.3% (3Hu)。试验时, 将专用加载设备水平的放在人床上, 在进行宏观试验的同时完成 CT 细观扫描监测研究。

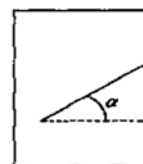


图 1 裂纹试样示意图

Fig. 1 Diagram of cracked rock sample

1.2 试验内容

寒区裂隙岩体隧道施工过程中的开挖本质上是裂

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10201029, 10172057); 陕西省教育厅基金资助项目(02JK126)

收稿日期: 2003-12-18

隙岩体受到卸载作用,而隧道的衬砌本质上是裂隙岩体受到加载作用。针对这一实际情况,本文设计了下面的试验内容来研究寒区裂隙岩体的加卸载破坏机理。

考虑到冻结节理岩体破坏问题非常复杂,其破坏与加载方式、环境温度、节理的几何特征、岩体的含水率、含冰量等密切相关。本文仅对含单一裂纹的红砂岩试样的有关内容进行研究,研究的内容有:①单一裂纹岩石在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的三轴连续加载破坏 CT 检测试验。②单一裂纹岩石在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的三轴卸围压破坏 CT 检测试验。

这里采用在真实岩石试样上人为制造裂纹的方法模拟节理岩体。实验温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。节理的倾角为 30° ,开度为 1.8 mm (见图 1)。冻结裂隙试样的准备包括:① $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下烘干 24 h ,测定其天然含水率;②常温下饱水 24 h ,测定其饱水含水率;③ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下,冻结 24 h 。

1.3 CT 试验方法

单一裂纹岩石在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的连续加载破坏 CT 检测试验是利用专用加载仓在宏观试验进行的同时,选择不同的断面进行 CT 扫描,研究负温环境下三轴压缩裂隙岩石的破坏规律。

现重点介绍单一裂纹岩石在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的卸围压破坏 CT 检测试验的方法。卸围压试验时的应力路径是(以 1[#] 试样为例):先将试件加载到某一应力状态($\sigma_1^i, \sigma_2, \sigma_3$), $\sigma_2 = \sigma_3$,然后保持 $\sigma_1 \equiv \sigma_1^i$,同时以某一速率卸围压,直到某一应力状态($\sigma_1^i, \sigma_2^i, \sigma_3^i$)时岩石破坏。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 1[#] 砂岩取 $\sigma_1^i = 43.18\text{ MPa}$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 5.0\text{ MPa}$,破坏时 $\sigma_2^i = \sigma_3^i = 2.2\text{ MPa}$ 。在 $\sigma_1 \equiv 43.18\text{ MPa}$,围压以 0.002 MPa/s 的速率从 5.0 MPa 卸到 2.2 MPa 时,试件破坏,在围压为 5.0 MPa , 4.0 MPa , 2.5 MPa , 2.2 MPa 时分别作了 CT 扫描。

2 试验结果

2.1 冻结裂隙试样有关参数的测定结果

测试结果表明,1[#] 试样的天然含水率为 0.79% ,饱水含水率为 6.59% 。

2.2 冻结裂隙试样卸荷破坏过程 CT 分析

现以 1[#] 试样的卸围压试验结果为例进行分析。图 2 是 1[#] 试样的扫描定位线图,图上标的“1, 2, 3, 4, 5”代表第 1, 2, 3, 4, 5 层的位置。

表 1 给出了 5 个扫描层的 CT 数及方差的试验结果。表 2 给出了岩石试件的 CT 数及方差的统计结果。

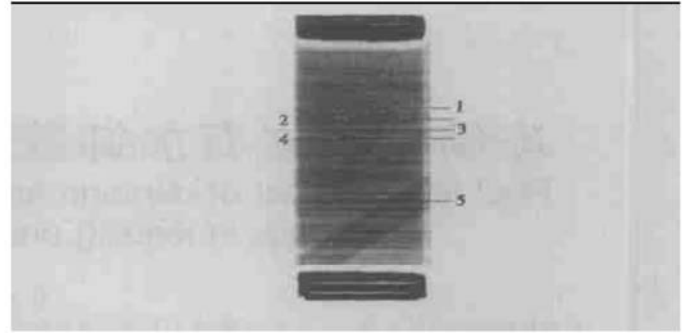


图 2 1[#] 试件扫描定位线

Fig. 2 Scan position of sample 1[#]

图 3, 4 分别是第 3, 5 扫描层卸荷破坏全过程 CT 试验图像。图 3 上标“h”处为事先预制的裂纹。

由 CT 检测的原理^[3]可知,CT 数本质上反映物质的密度,即 CT 数越高相当于物质密度越高,CT 数与物质的密度成正比,比如,当微裂纹闭和时,岩石密度增大,CT 数增大,而当裂纹张开时,岩石密度减少,CT 数下减方差增大。因此,可以通过岩石破坏过程中 CT 数的演化规律来研究裂纹的萌生、演化、发展、宏观裂纹的形成等现象。

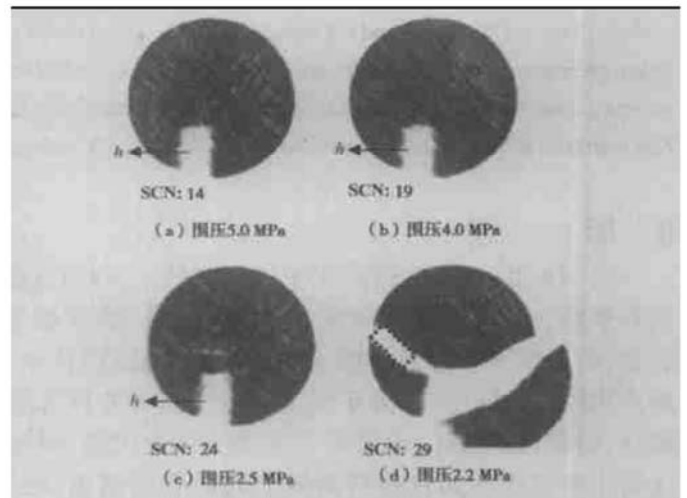


图 3 第 3 层卸荷过程 CT 图像

Fig. 3 CT images of 3rd scan section in unloading process

(1) 损伤发展的迟滞阶段

在围压从 5.0 MPa 下降为 4.0 MPa 时,各层 CT 数的变化规律不一样(见表 1)。第 1, 2, 4, 5 层的 CT 数有少量的增加,这些层的微裂纹、微孔洞有一定的闭合。与此同时,第 4, 5 层的方差略有增大,说明第 4, 5 层的损伤各向异性增强。而在上述应力状态发生转变的过程中,第 3 层的 CT 数下降了 11.8 ,裂纹发生张开,但是,第 3 层的方差略有减少,说明第 3 层的损伤各向异性减弱。这说明在同一应力状态下,同一试件的不同层位的损伤演化规律不同。

比较岩石试件的 CT 数(5 层 CT 数的平均值)变化可以知道(见表 2),在此应力阶段,岩石试件的 CT 数

表 1 各扫描层试验数据($\sigma_1 = 43.18 \text{ MPa}$)

Table 1 CT test data of each scan section($\sigma_1 = 43.18 \text{ MPa}$)

顺序	第 1 层 ME/SD	第 2 层 ME/SD	第 3 层 ME/SD	第 4 层 ME/SD	第 5 层 ME/SD	围压 /MPa
1	1506. 1/126. 0	1499. 9/134. 7	1506. 4/159. 2	1485. 2/152. 9	1555. 2/61. 6	5. 0
2	1513. 5/121. 2	1508. 3/132. 7	1494. 6/149. 5	1488. 7/154. 2	1560. 4/64. 0	4. 0
3	1490. 0/111. 5	1492. 8/125. 3	1484. 0/140. 4	1474. 9/142. 4	1536. 1/52. 9	2. 5
4	1379. 7/403. 3	1273. 1/519. 7	1184. 4/591. 9	1113. 5/645. 6	1188. 6/627. 1	2. 2

注: ME: CT 数, SD: CT 数的方差

有很小的增加(CT 数增加了 2. 5), 岩石试件的 CT 数的方差有所减小(方差减小了 2. 6) 。比较 CT 图像可以发现, 在围压从 5. 0 MPa 下降为 4. 0 MPa 时, 各扫描层没有出现明显的微裂纹(见图 3(b), 4(b)) 。

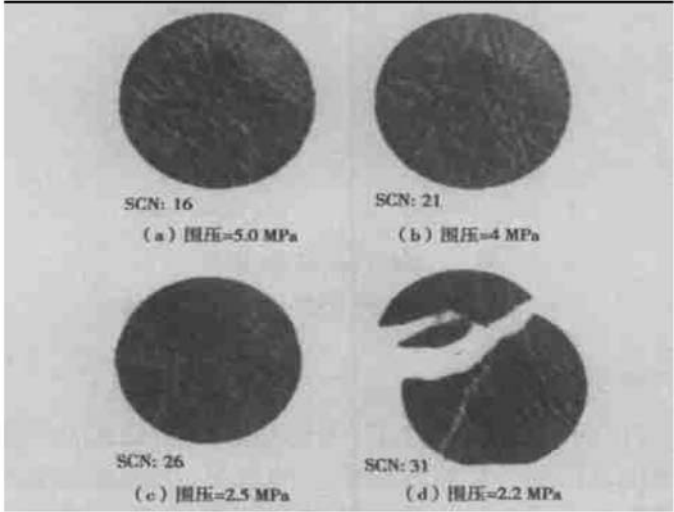


图 4 第 5 层卸荷过程 CT 图像

Fig. 4 CT images of 5th scan section in unloading process

(2) 破坏征兆的出现

在围压从 4. 0 MPa 下降为 2. 5MPa 时, 各层和岩石试件的 CT 数都开始下降。其中, 第 5 层的 CT 数下降的最多, 该层的 CT 数下降了 24. 3。而岩石试件的 CT 数下降了 15, 换句话说, 各层的 CT 数平均降低了 15。从 CT 图像来分析, CT 图像的部分区域从黑变白, 极微小的裂纹开始出现。CT 数的降低意味着已有的微裂纹将贯通形成宏观裂纹, 破坏即将开始。这一阶段是冻结裂隙岩石卸荷破坏的前兆阶段。

(3) 裂隙岩石的卸荷破坏

在围压从 2. 5 MPa 下降为 2. 2 MPa 时, 各层和岩石试件的 CT 数开始急剧下降, CT 数发生跳跃性减少, 方差发生跳跃性增大(表 1), 发生这些现象的原因是试件的宏观裂纹形成, 试件扩容明显, 裂隙试件发生突发性破坏。

显然(见图 3(a)), 新的裂纹的起裂是从预制裂纹的尖端开始的, 预制裂纹的尖端发生拉伸破坏。可见, 已有裂纹的存在对新的裂纹的起裂和演化发展方向起

了决定性的作用。

需要指出的是, 由于洗 CT 相片时, 裂纹附近低密度区的信息有一定的丢失, 图 3(d), 图 4(d) 中宏观裂纹的宽度并不是真实的裂纹宽度。根据文[3], 破坏时第 3 层左上角指定长度(15. 2 mm) 裂纹(图 3(d) 标矩形框处) 的宽度为 0. 91 mm。

表 2 岩石试件的试验数据

Table 2 Test data of rock sample($\sigma_1 = 43.18 \text{ MPa}$)

顺序	岩石试件 ME/SD	岩石试件 Δ ME/ Δ SD	围压 /MPa
1	1510. 6/126. 9		5. 0
2	1513. 1/124. 3	2. 5/ - 2. 6	4. 0
3	1495. 6/114. 5	- 15/ - 12. 4	2. 5
4	1227. 9/557. 5	- 282. 7/430. 6	2. 2

注: ME: CT 数, SD: CT 数的方差, Δ ME: CT 数的增量(以第 1 次扫描为基准), Δ SD: CT 数方差的增量(以第 1 次扫描为基准)

(4) 特殊区域分析

上面分析了卸荷破坏过程中各层和整个试件的 CT 细观损伤演化规律。现对第 3 层的特殊区域进行分析, 研究损伤的局部化现象。图 5 给出了 3 个圆域, 标“1”的大圆区域是研究第 3 层 CT 数的区域, 只所以没有取全部的横截面积, 是为了减小边缘效应的影响。图 5 上标“2, 3”的两个特殊区域的面积都为 2. 72 cm^2 , 现定义标“2”的区域为“裂隙区域”。标“3”的区域为“对称区域”。表 3 给出了“裂隙区域”和“对称区域”的 CT 数和方差变化的统计数据。

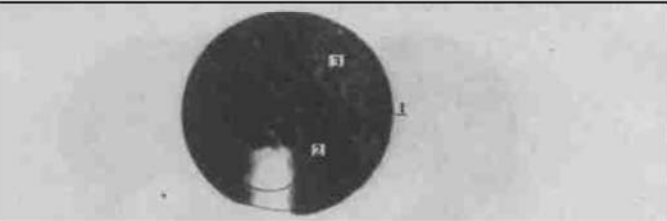


图 5 第 3 层特殊区域示意图

Fig. 5 Diagram of special area of 3rd scan section

在围压从 5. 0 MPa 降为 4. 0 MPa 的过程中, “裂隙区域”和“对称区域”的 CT 数都开始减小。在围压从 4. 0 MPa 降为 2. 5 MPa 的过程中, “裂隙区域”和“对称区域”的 CT 数都继续减小, 并且“裂隙区域”的 CT 数

从上一应力阶段下降 12.4 变为本应力阶段下降 20.6, 该区域的 CT 数下降速度明显高于“对称区域”(见表 3), 这表明, 已有裂隙存在的区域的损伤演化速度比对应的完整区域的损伤演化速度快得多。

表 3 第 3 层特殊区域的试验数据($\sigma_1=43.18\text{ MPa}$)

Table 3 Test data of special area of 3rd scan section ($\sigma_1=43.18\text{ MPa}$)

顺序 /MPa	围压	裂隙区域 ME/SD	裂隙区域 $\Delta\text{ME}/\Delta\text{SD}$	对称区域 ME/SD	对称区域 $\Delta\text{ME}/\Delta\text{SD}$
1	5.0	1385.3/267.0		1563.8/72.0	
2	4.0	1372.9/258.1	- 12.4/- 8.9	1536.1/52.8	- 27.7/- 19.2
3	2.5	1364.7/238.6	- 20.6/- 28.4	1527.8/58.7	- 36/- 13.3
4	2.2	906.8/641.3	- 478.5/374.3	1534.1/55.0	- 29.7/- 17

表中符号说明同表 2。

围压从 2.5 MPa 降为 2.2 MPa 过程中,“裂隙区域”的 CT 数开始快速减小,而“对称区域”的 CT 数反而增多,这说明在“裂隙区域”中新裂隙出现的同时,“对称区域”有微裂隙闭合挤密的现象发生,同一应力阶段同一扫描层的不同区域存在损伤演化规律完全相反的情况。

2.3 卸围压破坏机理

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。从岩石受力状态的转换来看,卸围压的过程是试件从高围压受力状态向低围压状态的转变,也就是从塑性状态向脆性状态的转变,卸围压时岩石破坏的突发性实际上是岩石发生了脆性破坏。而岩石在三轴压缩连续加载时,围压保持不变,轴向应力不断增大,塑性较强。

需要指出的是,卸荷试验的卸荷途径有多种,上述砂岩的卸荷路径相当于最大主应力不变,最小主应力卸载,这种卸荷路径最危险。

2.4 加卸荷破坏机理的对比分析

本文完成了与前述 1# 裂隙试件完全相同的 5# 试件的连续加载破坏 CT 试验(1# 和 5# 试件的试验环境完全一样),目的是研究冻结裂隙岩石连续加载和卸围压破坏细观机理的异同。

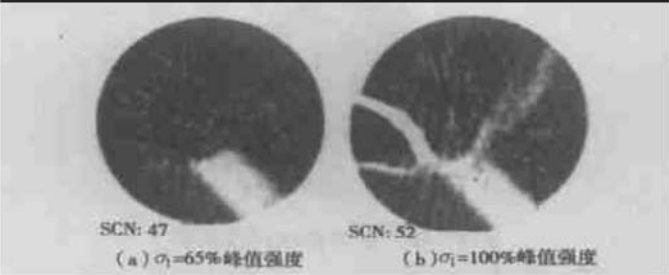


图 6 5# 试件第 3 层连续加载过程 CT 图像(围压= 5.0 MPa)

Fig. 6 CT images of 3rd scan section of sample 5# in successive loading process(confining pressure= 5.0 MPa)

5# 裂隙红砂岩三轴压缩破坏时(围压为 5 MPa) 的

偏应力抗压强度为 52.59 MPa。图 6 是 5# 试件第 3 层连续加载破坏过程中的 CT 图像。图 6(b) 是在达到峰值强度时该层的 CT 图像,对比图 3(d) 可知,连续加载破坏相对卸围压破坏来说,破坏相对稳定,卸荷破坏时能量释放快,裂隙岩石的破坏发生很突然。

卸荷破坏时生成的宏观裂纹的宽度远大于连续加载破坏时生成的宏观裂纹的宽度。卸荷破坏时,裂隙岩石的扩容量比连续加载破坏时的扩容量大的多。另外从破坏时的平片(见图 7)也可以看出,1# 试件比 5# 试件的扩容量大的多。

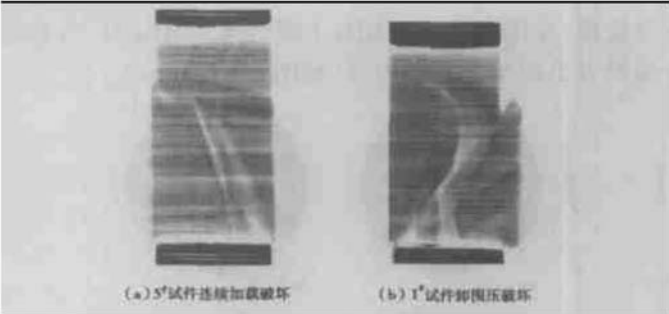


图 7 加卸荷破坏 CT 图像

Fig. 7 CT images of loading and unloading

3 小结与讨论

(1) 寒区负温条件下,无论是连续加载还是三轴卸围压路径都会导致裂隙岩石的破坏,但是加卸载破坏的机理不同。与连续加载情况下相比,冻结裂隙岩石的卸围压破坏突发性强,岩石扩容强烈,这说明在高地应力寒区节理岩体工程(边坡、隧洞)施工过程中,应关注岩爆的发生发展,研究其治理措施。

(2) 冻结裂隙岩石的加载和卸载损伤破坏过程都是一个典型的非线性动力学过程,加载损伤演化和卸载损伤演化都存在局部化现象。

(3) 无论是连续加载还是卸围压破坏,对于冻结裂隙岩石来说,其微裂纹的起裂和最终破坏面形成与已有裂隙的角度和位置密切相关。

(4) 不同裂纹数目、不同裂纹角度等不同几何特征的冻结裂隙岩石在各种负温、围压下的加卸荷破坏机理对比研究是下一步的重点工作。

参考文献:

[1] 王志坚,张鲁新. 青藏铁路建设过程中的冻土环境问题. 冰川冻土, 2002, 24(5): 588- 592.

[2] 葛修润,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.

[3] 任建喜,葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425- 431.