

DOI: 10.11779/CJGE202103005

岩石轴压 CT 图像的分区损伤信息与临界破坏识别

刘树新¹, 邢 杰¹, 郑 旭¹, 陈世杰²

(1. 内蒙古科技大学矿业研究院, 内蒙古 包头 014010; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 岩石三轴压缩试验过程中虽然损伤不断积累, 但宏观破坏前其 CT 图像却没有明显的变化, 因此在峰值前仅通过 CT 数难以准确分析其损伤破坏信息。为了识别岩石的损伤信息及临界破坏特征, 将轴压过程中的砂岩 CT 图像进行分区, 使用位置线上灰度的变化代表分区内灰度的变化。CT 图像中某一位置线上灰度值的变化曲线是一种起伏、粗糙的曲线, 利用描述粗糙曲线的分形 R_d 指标定量分析砂岩损伤规律, 并基于 CT 图像上全部位置线的 R_d 值总和来定义损伤变量, 用其表征砂岩的损伤程度。计算结果表明荷载水平在 0.84 左右时, R_d 值波动大, 损伤变量加速增大, 表明损伤进入了加速发展阶段, 岩石处于损坏破坏的临界状态。由此可以合理地预测岩石的损伤破坏。

关键词: 砂岩; CT 图像; 分形指标; 临界损伤信息

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)03-0432-07

作者简介: 刘树新(1971—), 男, 博士, 教授, 从事岩石力学与采矿工程方面的教学科研工作。E-mail: sxbt@163.com。

Zonal damage information and critical failure identification of CT images of rock under triaxial compression

LIU Shu-xin¹, XING Jie¹, ZHENG Xu¹, CHEN Shi-jie²

(1. Mining Institute of Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Cold and Arid Regions

Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The CT image and value do not change obviously before the macro-failure under triaxial compression experiments on rock during damage accumulation, so it is difficult to analyze accurately the damage information only through the change of CT number. In order to identify the damage information and critical failure characteristics of sandstone, the CT image is partitioned, and the change of grey level on the position line is used to represent the change of the grey level in the subarea. The grey value curve is a rough curve representing grey change of a certain location online in the CT image. It is used to describe quantitatively the rules of sandstone damage by fractal R_d index, the damage variable is defined as the sum of R_d value of all the position line in the CT image, and it reflects the damage degree of rock. The calculated results show that when the load is about 0.84, the value of R_d has obvious fluctuations and the damage variable increases rapidly, which denotes that the damage has entered a phase of accelerated development, and the rock is in a critical damage state. The proposed method can be used to predict reasonably the damage and failure of rock.

Key words: sandstone; CT image; fractal index; critical damage information

0 引 言

地下工程中的原岩是一种不均匀性材料, 其中一般存在微裂隙、孔隙等初始损伤。在工程开采造成的扰动或周围地质环境因素的影响下, 导致原岩中的微裂隙等进一步发展、岩石破坏是由内部的微裂隙等细观缺陷逐渐发展的结果^[1-3]。借助 CT 扫描设备能探测出岩石内部裂纹的萌生、扩展和贯通状况。杨更社等运用 CT 识别技术, 通过 CT 数和其分布情况来表征岩石内部的损伤特征^[4-6]。任建喜等完成了不同天然岩石的 CT 扫描试验, 研究了岩石从脆性到延性转化过程中的损伤规律, 并对岩石内部天然孔隙空间分布等

进行了分析^[7-10]。丁卫华等对岩石密度损伤增量及损伤分形特征进行了研究, 提出了 CT 数与岩石密度损伤增量的定量关系式及分形描述方法^[11-14]。另外, 随着 CT 识别和核磁共振技术的发展, 被更加广泛地运用于研究混凝土和岩石等材料的结构损伤和破坏^[15-16]。

岩石损伤破坏过程是岩石内部的微裂纹演化扩展过程, 由于受到分辨率的限制, 通过 CT 图像只能获取 CT 分辨率尺度的裂纹, 并不能揭示 CT 分辨率尺

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51264028); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY11147)

收稿日期: 2020-06-19

度裂纹形成前局部化变形的产生与发展。在实验室岩样三轴试验加载过程中,砂岩在宏观破坏前其 CT 图像和 CT 值没有明显的变化,达到峰值时 CT 图像上才出现明显裂纹且 CT 数显著增大,且岩石从损伤积累到宏观破坏经历时间很短,难以在峰值前仅通过 CT 数的变化准确分析其损伤破坏信息,因此探索基于 CT 图像所反映出的信息来识别砂岩的临界损伤破坏,可为实现矿山灾害信息早期识别与临界预警信息判别提供理论依据。

1 三轴受力状态下砂岩 CT 扫描试验

砂岩试样取自于神华乌海能源公司平沟煤矿,试样高度是 100 mm,直径是 50 mm。对砂岩的端头平面进行处理,使其端面不平整程度控制在 0.02 mm 以内,试样的端头平面的垂线与圆心轴线间构成的夹角应不大于 0.25° 。CT 试验是在中科院寒旱所飞利浦双排螺旋 CT 扫描装置和配套的三轴加载设备上完成的,试验过程中扫描层的厚度为 3 mm,共进行 8 次 CT 扫描,试样最终出现宏观上的破坏。

不同的应力状态 CT 值可以用来分析岩石损伤发展,测量区域分成 3 个区域,内区、中间区域和外区,为了减少误差只有内区被分析,扫描层分布图如图 1 所示,岩样扫描层分为 40 层。

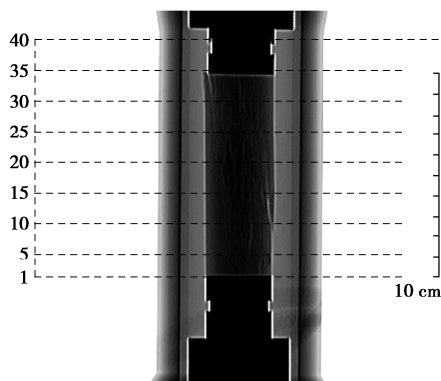


图 1 扫描层分布

Fig. 1 Distribution of scanning layers

为了减少轴向端约束效应的影响,取位于岩样中部的第 20 扫描层和接近于岩样端部的第 30 扫描层做为代表层进行分析,图 2 和图 3 显示当围压为 4 MPa 时的不同应力加载点路径及使用 X 射线 CT 扫描系统测量的不同轴向应力加载下试样的破坏模式。图 2 中,数字#1~#8 分别代表加载过程中的不同扫描次序号。

试验过程中对应于扫描顺序号#1至#8的第20和第30扫描层CT图像分别如图4和图5所示。图4(a)~(h)和图5(a)~(h)分别是对应扫描顺序#1~#8第20与第30扫描层的CT图像。在三轴压缩下岩石经历了峰前变形、峰值及峰后宏观破坏的全过程,随着损伤不断

积累,在加载到#6时达到峰值强度,之后达到峰值后状态,在#7, #8处CT图像体现出宏观裂纹,其宏观断裂模式主要是剪切破坏,岩样失效后只有一个主剪面,从而将岩样分成两部分而形成两侧剪切破坏面。

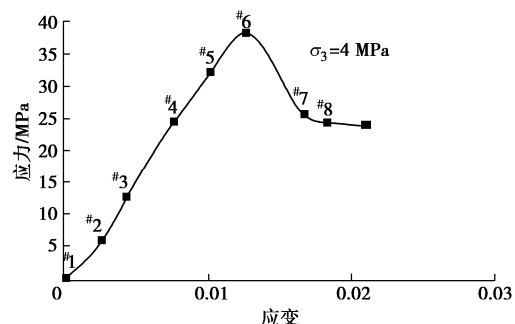


图 2 应力应变关系及不同的扫描次序

Fig. 2 Relationship between stress and strain

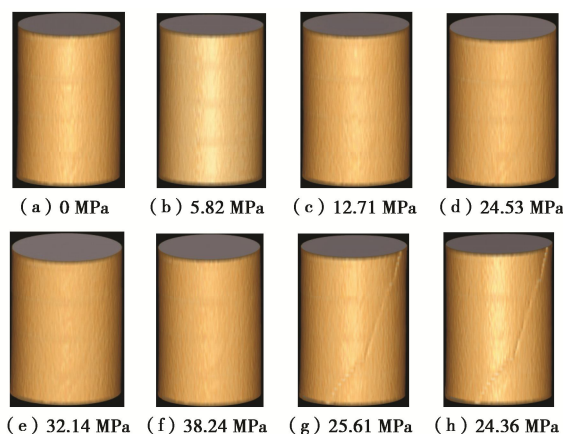


图 3 不同轴压岩样的三维图像

Fig. 3 Image of 3D rock specimen

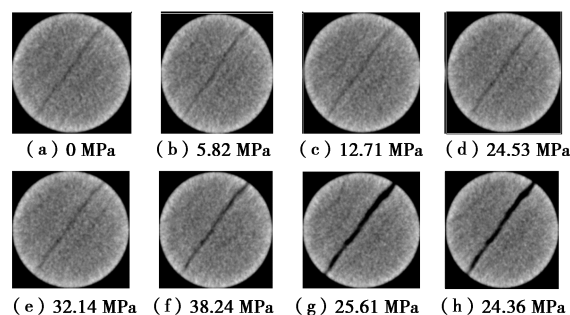


图 4 不同加载状况下第 20 扫描层的 CT 图像

Fig. 4 No.1 to No.8 CT images of 20th layer

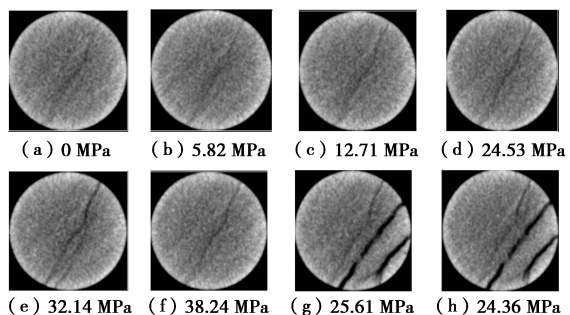


图 5 不同加载状况下第 30 扫描层的 CT 图像

Fig. 5 No.1 to No.8 CT images of 30th layer

用密度的变化来描述损伤,这在 CT 图像上表现为灰度变化,比较灰度变化方法本质是加载过程中岩石密度的变化能通过 CT 图像上灰度级的变化来反映,岩石损伤情况又可以通过密度变化来反映,因此就可以比较 CT 图像灰度级的变化来分析砂岩内部损伤演化情况。

在一定空间分辨率条件下,CT值可以通过使用卷积算法计算^[17],结果见表1。CT值与材料密度成正比,用H表示,SD为CT方差,各扫描层下H值及SD值与轴向应变的变化规律如图6所示。

表 1 加载过程中的 H 值和 SD 值

| Table 1 Values of H and SD during loading | | | | | | |
|---|----------|--------|----------|-----------|----------|-----------|
| 扫描号 | 轴向应力/MPa | 轴向应变/% | 第20扫描层 | | 第30扫描层 | |
| | | | <i>H</i> | <i>SD</i> | <i>H</i> | <i>SD</i> |
| 1 | 0 | 0 | 2207.4 | 37.6 | 2192.0 | 40.9 |
| 2 | 5.82 | 0.25 | 2208.8 | 40.7 | 2191.7 | 39.9 |
| 3 | 12.71 | 0.43 | 2208.8 | 38.9 | 2193.9 | 40.4 |
| 4 | 24.53 | 0.76 | 2209.2 | 40.0 | 2192.4 | 41.6 |
| 5 | 32.14 | 1.01 | 2207.1 | 44.2 | 2190.5 | 45.7 |
| 6 | 38.24 | 1.26 | 2204.2 | 50.2 | 2182.7 | 48.3 |
| 7 | 25.61 | 1.67 | 2177.6 | 123.3 | 2168.4 | 70.7 |
| 8 | 24.36 | 1.83 | 2172.5 | 142.3 | 2165.9 | 79.8 |

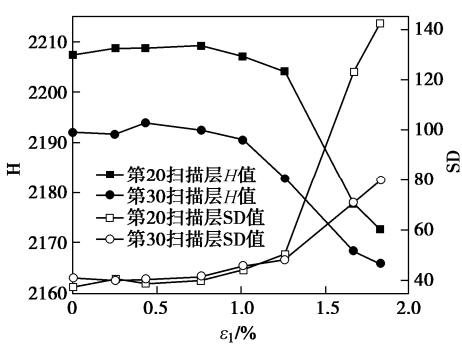


图 6 加载过程中 H 值、SD 值和轴向应变间关系

Fig. 6 Relationship among H, SD and axial strain

图6显示随轴向应变增加,第20和第30的扫描层CT值降低,SD值增加,但CT值和SD值变化很小。这意味着岩样峰前阶段没有明显的裂缝,在扫描号#6后有一个主要的裂纹出现并在试样的一端逐渐贯穿整个岩石,随后,在扫描号#6至#8,随着轴向应变的增加,主剪切裂纹出现但没有更多的新的裂纹产生,CT值迅速减小,SD值迅速增加。此外,相比第20和第30扫描层峰值后的图像,与第20层扫描层CT值和SD值相对较大,这意味着岩样中部密度较大,因此在未产生明显裂纹的峰值阶段之前,仅通过CT数的变化难以准确分析其损伤破坏信息。

2 砂岩分区损伤信息分析

在损伤力学中,为简化研究方法,对于含有自然微裂隙的岩石材料,通常将含有众多微裂隙的分区

简化成局部均匀场。为了识别砂岩的损伤信息及临界破坏,将CT图像扫描层分为6个对称的扇形区域,设每个扇形代表一个损伤均匀的分区域,利用该区域角平分位置线上灰度值的变化情况代替该区域的整体灰度级的变化,从而比较位置线上灰度的变化得到该区域岩石损伤的变化,再将各个扇形区域的位置线上灰度的变化进行统计后就能得到图像整体的效应,如图7所示。完整CT图像上的损伤演化情况可以使用全部6条位置线的灰度变化总和来表示。

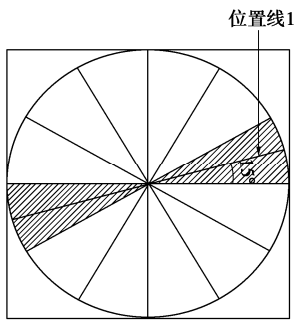


图 7 位置线示意图

Fig. 7 Schematic diagram of position line

CT扫描图某一位置线上各像素点的灰度值不同,沿着该位置线不同像素位置上其灰度值变化轨迹呈现出起伏曲线形态。设 z_{ij} 某一扫描层上不同荷载状况下第 j 次扫描图像上第 i 条位置线上的灰度值; z_{i1} 为未加载时第1次扫描图像上第 i 条位置线上的灰度值。

在不同荷载阶段,对应不同扫描次序下的 CT 图像,其同一位置线上的灰度变化序列 s_{ij} 可如下表示:

$$s_{ij} = z_{ij} - z_{i1} \quad , \quad (1)$$

s_{ij} 变化大代表着砂岩损伤程度大,也表明岩石内部密度变化大,反映在 CT 图像位置线上就是灰度值变化大,反之则相反。如图 8 所示。

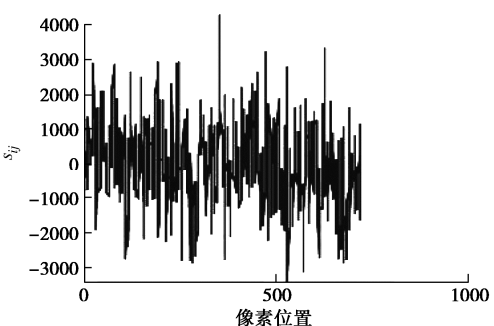


图 8 第 30 层第一次加载损伤后 s_{ij} 分布曲线

Fig. 8 Distribution of s_{ij} after first loading

图 8 中 s_{ij} 分布图形表现为一条起伏大、粗糙的曲线,利用分形理论能完整描述粗糙图形的整体特征^[14],本文引入分形 R_d 指标来描述 s_{ij} 分布曲线形貌中的多尺度变化及大尺度变化的作用, R_d 指标定义如下:

$R_d = 10^k AB$ 。(2)

式中 R_d 为粗糙描述参数, A 为计算分形维数时采用的相对量尺间距组成的向量 (其元素由小到大排列), B 为不同尺度下计算得到的不稳定分维值 D_{ni} 经过处理后组成的向量, 称为不稳定分维值向量, A 与 B 可由式 (3) 计算。

$$\left. \begin{aligned} A &= [a_1, a_2, \cdots a_i \cdots a_m], \\ B &= [b_1, b_2, \cdots b_i \cdots b_m]^T, \\ a_i &= r_i / R, \\ b_i &= \Delta D_{ni} = D_{ni} - D_T. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, r_i 为第 i 步量尺间距, R 为量测范围尺寸, 对曲线而言为曲线矩阵的最大长度, D_T 为所量测图形的拓扑维数, D_{ni} 为用第 i 个量尺间距 r_i 量测下计算获得的不稳定分维值, 10^k 为一个避免 R_d 参数值过小而设的放大系数, k 为大于 0 的正整数, 具体取值取决于 r_i/R 比值。

将参数都代入到式 (2) 中可得 R_d 指标最终表达式, 即

$$R_d = \frac{10^k}{R} [r_1 \cdot (D_{n1} - D_T) + r_2 \cdot (D_{n2} - D_T) + \cdots + r_m \cdot (D_{nm} - D_T)] \quad , \quad (4)$$

式中, R 取值 900, i 的范围为 $1 \sim 6$, $r_i = [32, 16, 8, 4, 2, 1]$, 放大系数 $k=10$ 。

选取第 20, 30 层典型扫描层图像, 对其在不同荷载水平 (外载与岩样峰值强度的比值) 下的图像 R_d 指标值进行计算, 结果如表 2, 3 所示。

表 2 第 20 扫描层各位置线上 R_d 值

Table 2 Values of R_d of different position lines

| 扫描 次序 | 荷载 轴向 | | R_d | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | 水平 | 应力 | 15° | 45° | 75° | 105° | 135° | 165° | 总和 |
| | /% | /MPa | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 94.05 | 98.36 | 100.15 | 94.77 | 94.19 | 95.25 | 576.77 |
| 2 | 0.15 | 5.82 | 90.10 | 94.52 | 93.78 | 93.20 | 93.03 | 90.20 | 554.83 |
| 3 | 0.33 | 12.72 | 85.34 | 95.27 | 90.81 | 86.61 | 92.91 | 89.70 | 540.64 |
| 4 | 0.64 | 24.54 | 85.97 | 98.44 | 91.60 | 87.90 | 93.43 | 89.29 | 546.63 |
| 5 | 0.84 | 32.14 | 81.45 | 85.23 | 89.90 | 85.99 | 84.26 | 84.48 | 511.31 |
| 6 | 1.00 | 38.24 | 86.65 | 88.37 | 91.69 | 84.99 | 90.73 | 93.89 | 536.32 |

表 3 第 30 扫描层各位置线上 R_d 值

Table 3 Value of R_d of different position lines

| 扫描 次序 | 荷载 轴向 | | R_d | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|
| | 水平 | 应力 | 15° | 45° | 75° | 105° | 135° | 165° | 总和 |
| | /% | /MPa | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 98.26 | 105.05 | 99.05 | 100.75 | 99.77 | 99.39 | 602.27 |
| 2 | 0.15 | 5.82 | 93.52 | 98.68 | 94.29 | 95.20 | 91.28 | 98.03 | 571.00 |
| 3 | 0.33 | 12.72 | 95.07 | 85.71 | 90.34 | 94.70 | 88.61 | 96.91 | 551.34 |
| 4 | 0.64 | 24.54 | 95.27 | 96.50 | 90.87 | 94.29 | 91.21 | 94.02 | 562.16 |
| 5 | 0.84 | 32.14 | 85.23 | 81.14 | 86.35 | 88.48 | 89.80 | 85.26 | 516.26 |
| 6 | 1.00 | 38.24 | 88.18 | 82.67 | 73.86 | 78.20 | 90.21 | 87.12 | 500.24 |

岩石微裂隙的闭合、扩展及新裂隙萌生发展都会造成其周边一定区域灰度值发生变化。如图 9, 10 所示。

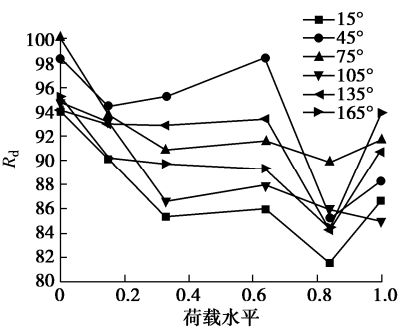


图 9 第 20 层 R_d 指标随荷载变化关系

Fig. 9 Relationship between R_d and load

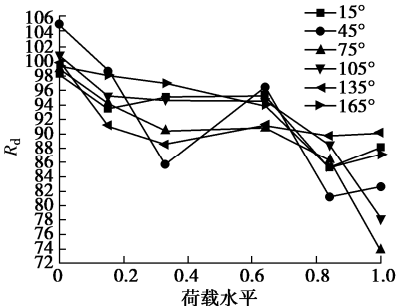


图 10 第 30 层 R_d 指标随荷载变化关系

Fig. 10 Relationship between R_d and load

所有位置线的 R_d 指标总体的变化趋势是随着轴向应力的增加而减少。 R_d 的变化趋势会受 s_{ij} 分布曲线的起伏程度的影响, s_{ij} 分布曲线的起伏程度变缓, 则 R_d 指标发生变小的趋势。 s_{ij} 分布曲线本质是反映 CT 图像灰度值变化剧烈程度, 也反映岩石内部密度的变化情况。当图像中位置线上灰度值变化剧烈, 则 s_{ij} 分布曲线的起伏程度较大, 导致 R_d 指标会变大。这些灰度值的变化强弱就是岩石内部损伤活动的强弱, 因此损伤活动的强弱程度决定了 R_d 指标的高低。

定义荷载水平为当前加载点轴向应力与峰值应力的比值, 加载过程中 R_d 指标值的变化可主要分为以下 3 个阶段:

(1) 从加载开始到荷载水平为 0.15 时, 全部位置线的 R_d 值下降的趋势较快, 表明在加载初期, 岩石内部萌生了大量的微裂隙, 随着加载压力不断增强, 岩石内部闭合裂隙作用增强, 因此微裂隙的萌生作用被减缓, R_d 值大幅度降低。

(2) 从荷载水平 0.15 到 0.33 时, 部分 R_d 值缓慢下降, 其它位置仍下降较快, 说明在岩石内部的薄弱位置的微裂隙发育强度增强, 其他位置的微裂隙发育强度较弱, 但此时主要作用仍然是压缩闭合作用。

(3) 从荷载水平 0.33 到 0.84 时, 图中各位置线的 R_d 值出现上下波动规律, 表明随着轴向压力不断增

加, 微裂纹的发育作用和压缩闭合作用都在增强, 且共同作用。

(4) 荷载水平在 0.84 左右时, R_d 值波动大, 损伤程度增大, 这表明损伤进入了加速发展阶段, 且 45° 位置线的 R_d 值波动较大, 对应该位置处微裂隙活动最剧烈, 岩石处于损坏破坏的临界状态。

根据以上分析, 在岩石宏观破裂之前, 可以依据 R_d 值的变化规律来识别岩石损伤破坏的信息。 R_d 值波动大的位置线表明该区域微裂隙活动剧烈、损伤加剧, R_d 值波动大的位置线区域将会形成贯通的主裂纹, 因此 R_d 值发生大的波动可以作为岩石损伤破坏识别的信息。

3 砂岩损伤变量表征与损伤程度

把包含众多离散的微裂隙区假定为局部均匀场, 在均匀场中要充分考虑微裂隙的整体效应, 通过定义一个表征损伤的合适状态变量来描述均匀场的损伤状态, 这个状态变量就是损伤变量。损伤变量的形式依据研究问题的类型和相应的损伤机制可以有多种形式, 选择合适的损伤变量是损伤分析的重要前提条件。

每幅图像所有位置线 R_d 值的总和表示了该图像整体灰度变化情况。图 3 中第 j 幅图像上的绝对损伤 d_j 用该幅图像所有位置线的 R_d 值的总和表示

$$d_j = \sum_{i=1}^6 R_{dij} \quad , \quad (5)$$

式中, R_{dij} 表示第 j 幅图像中 i 位置线的 R_d 值。

岩石内部微裂隙的活动表现出累积效果, 使用 CT 扫描过程中相邻图像的 R_d 值总和值的差值表征损伤变量 D , 即

$$D = \frac{\sum_{i=1}^j (d_i - d_{i-1})}{\sum_{i=1}^6 (d_i - d_{i-1})} \quad (j=1,2,3,4,5,6) \quad , \quad (6)$$

式中, d_i 为初始图像的绝对损伤。各扫描层的损伤变量值如表 4。

表 4 第 20、30 扫描层的损伤变量值

Table 4 Values of damage variables for 20th and 30th scanning layers

| 扫描次序 | 荷载水平 /% | 损伤变量 D | | d_j | |
|-------|------------|----------|--------|--------|--------|
| | | 第 20 层 | 第 30 层 | 第 20 层 | 第 30 层 |
| 第 1 次 | 0 | 0 | 0 | 576.77 | 602.27 |
| 第 2 次 | 0.15 | 0.23 | 0.27 | 554.83 | 571.00 |
| 第 3 次 | 0.33 | 0.38 | 0.49 | 540.64 | 551.34 |
| 第 4 次 | 0.64 | 0.40 | 0.52 | 546.63 | 562.16 |
| 第 5 次 | 0.84 | 0.84 | 0.86 | 511.31 | 516.26 |
| 第 6 次 | 1.00 | 1 | 1 | 536.32 | 500.24 |

损伤变量可以定量地描述岩石的损伤程度, 当 $D=0$ 表明试样没有初始损伤, $D=1$ 表明试样中贯通了宏观裂纹, 岩石发生宏观破坏。图 11, 12 分别显示了第 20, 30 扫描层的损伤变量 D 和 d_j 的变化规律。

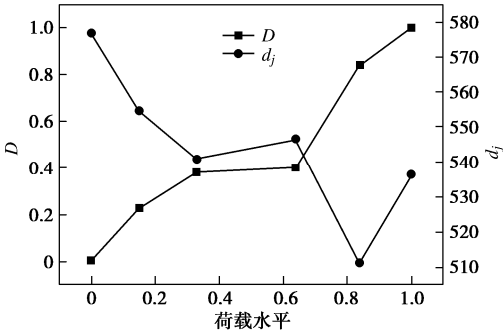


图 11 第 20 扫描层 D 和 d_j 的变化规律

Fig. 11 Relationship among D , d_j and load

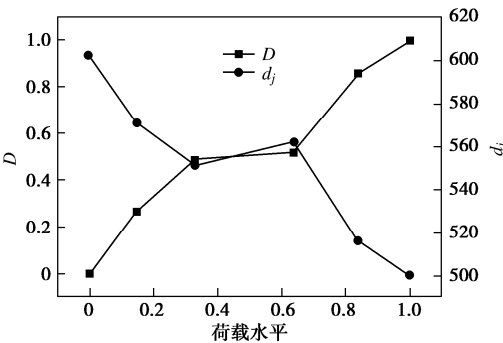


图 12 第 30 扫描层 D 和 d_j 的变化规律

Fig. 12 Relationship among D , d_j and load

根据图 11, 12 中的数据变化, 损伤变量 D 随荷载水平增大呈现二次递增规律, 岩石损伤程度随着荷载水平的增加而加剧, 在 CT 图像上相应位置线的 R_d 总值出现较大波动时, 岩石内部微裂隙活动剧烈, 当荷载水平达到 0.84 左右, 损伤变量的增长速率加快。随着损伤的逐渐积累, 损伤在加载后期会加速发展, 宏观裂纹出现在 CT 图像上, 岩石的破坏过程是损伤诱发的一种突变过程。在 CT 图像上位置线的 R_d 总值出现较大波动时, 损伤变量的增长速率加快, 表明损伤进入了加速发展阶段, 可以将此时特征作为识别岩石即将临界损伤破坏的信息。

4 结 论

(1) 砂岩出现宏观破坏裂纹之前, 其 CT 图像和 CT 值没有明显的变化, 达到峰值时 CT 图像上才出现明显宏观破坏裂纹且 CT 数显著减小, 因此峰值前仅通过 CT 数和 SD 值的变化难以准确分析其损伤破坏信息。

(2) 加载初期 R_d 值基本呈现下降趋势, 说明岩

石内部闭合裂隙作用增强,微裂隙的萌生作用被减缓,但 CT 图像上不同位置线上 R_d 值下降速率不同。从荷载水平 0.84 到峰值应力处, R_d 值出现上下波动规律,但是 45° 位置线的 R_d 值波动较大,微裂隙活动最剧烈。在岩石出现宏观之前,可以依据 R_d 值的变化规律来识别岩石损伤破坏的信息, R_d 值波动大的位置线区域基本上会形成最终的贯通主裂纹。

(3) 损伤变量 D 随荷载水平增大呈现二次递增规律。随着损伤的逐渐积累,当荷载水平达到 0.84 左右时,损伤变量的增长速率加快,损伤变量能反映出损伤累积过程中不同加载阶段灰度的变化情况。可以将此特征作为识别岩石即将临界损伤破坏的信息。

(4) 岩石 CT 图像扫描层局部区域中所蕴含的损伤信息量不同,因此径向线的位置变化对计算结果有一定的影响,由区域数量及选取计算位置引起的计算结果差异需在此基础上做进一步地研究。

参考文献:

- [1] 李树刚, 陈高峰, 双海清, 等. 加载速率和初始损伤对砂岩能量演化影响的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, **36**(2): 373 - 380. (LI Shu-gang, CHEN Gao-feng, SHANG Hai-qing, et al. Experimental study on effect of loading rate and initial damage on energy evolution of sandstone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, **36**(2): 373 - 380. (in Chinese))
- [2] MEES F, SWENNEN R, VAN Geet M, et al. Applications of X-ray computed tomography in the geosciences[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, **215**(1): 1 - 6.
- [3] MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J, FUSI N, GALIANA-MERINO J J, et al. Ultrasonic and X-ray computed tomography characterization of progressive fracture damage in low-porous carbonate rocks[J]. Engineering Geology, 2016, **200**: 47 - 57.
- [4] 杨更社, 刘 慧. 基于 CT 图像处理技术的岩石损伤特性研究[J]. 煤炭学报, 2007, **32**(5): 463 - 468. (YANG Geng-she, LIU Hui. Study on the rock damage characteristics based on the technique of CT image processing[J]. Journal of China Coal Society, 2007, **32**(5): 463 - 468. (in Chinese))
- [5] 杨更社, 孙 钧, 谢定义. 岩石材料损伤变量与 CT 数间的关系分析[J]. 力学与实践, 1998, **20**(4): 47 - 49. (YANG Geng-she, SUN Jun, XIE Ding-yi. Analysis of the relation between damage variable and CT value of rock material[J]. Mechanics in Engineering, 1998, **20**(4): 47 - 49. (in Chinese))
- [6] 张国凯, 李海波, 王明洋, 等. 岩石单轴压缩下损伤表征及演化规律对比研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 1074 - 1082. (ZHANG Guo-kai, LI Hai-bo, WANG Ming-yang, et al. Comparative study on damage characterization and damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 1074 - 1082. (in Chinese))
- [7] 任建喜, 惠兴田. 裂隙岩石单轴压缩损伤扩展细观机理 CT 分析初探[J]. 岩土力学, 2005, **26**(增刊 1): 18 - 23. (REN Jian-xi, HUI Xing-tian. Primary study on meso-damage propagation mechanism of cracked-sandstone using computerized tomography under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(S1): 18 - 23. (in Chinese))
- [8] REN J X, LUO Y, LIU W G. Application of computerized topography testing technology on studying rock failure mechanism under loading and unloading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(5): 672 - 675.
- [9] YU Q, YANG S, RANJITH P G, et al. Numerical modeling of jointed rock under compressive loading using X-ray computerized tomography[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, **49**(3): 877 - 891.
- [10] 曹文贵, 林星涛, 张 超, 等. 基于非线性动态强度准则的岩石动态变形过程统计损伤模拟方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(4): 794 - 802. (CAO Wen-gui, LIN Xing-tao, ZHANG Chao, et al. A statistical damage simulation method of dynamic deformation process for rocks based on nonlinear dynamic strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(4): 794 - 802. (in Chinese))
- [11] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬. 受力岩石密度损伤增量及其数字图像[J]. 西安理工大学学报, 2000, **16**(1): 61 - 64. (DING Wei-hua, WU Yan-qing, PU Yi-bin. The density damage increment and its digital image of rock in compression[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, **16**(1): 61 - 64. (in Chinese))
- [12] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬. 低应变率下岩石内部裂纹演化的 X 射线 CT 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(11): 1793 - 1797. (DING Wei-hua, WU Yan-qing, PU Yi-bin. X-ray CT approach on rock-interior crack evolution under low strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1793 - 1797. (in Chinese))
- [13] 党发宁, 方建银, 丁卫华. 基于 CT 的混凝土试样静动力单轴拉伸破坏裂纹分形特征比较研究[J]. 岩石力学与工程

- 学报, 2015(增刊 1): 2922 - 2928. (DANG Fa-ning, FANG Jian-yin, DING Wei-hua. Fractal comparison research of fracture of concrete samples under static and dynamic uniaxial tensile using CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(S1): 2922 - 2928. (in Chinese))
- [14] 易 成, 张 亮, 陈忠辉, 等. 一种新的描述粗糙表面形貌尺度分维参数的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 75 - 80. (YI Cheng, ZHANG Liang, CHEN Zhong-hui, et al. A novel description of roughness surface with a modified fractal index R_d [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(1): 75 - 80. (in Chinese))
- [15] 李夕兵, 翁 磊, 谢晓锋, 等. 动静载荷作用下含孔洞硬岩损伤演化的核磁共振特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 1985 - 1993. (LI Xi-bing, WENG Lei, XIE Xiao-feng, et al. Study on the degradation of hard rock with a pre-existing opening under static-dynamic loadings using nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 1985 - 1993. (in Chinese))
- [16] 曾 鹏, 刘阳军, 纪洪广, 等. 单轴压缩下粗砂岩临界破坏的多频段声发射耦合判据和前兆识别特征[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 509 - 517. (ZENG Peng, LIU Yang-jun, JI Hong-guang, et al. Coupling criteria and precursor identification characteristics of multi-band acoustic emission of gritstone fracture under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 509 - 517. (in Chinese))
- [17] HOUNSFIELD G N. Computerized transverse axial scanning (tomography) part 1: description of system[J]. The British Journal of Radiology, 1973, 46(552): 1016 - 1022.

《岩土工程学报》入围世界土木工程类期刊 Q1 区

据最新发布的“世界期刊影响力指数 (WJCI) 报告 (2020 科技版)”,《岩土工程学报》在全世界最重要的 147 种土木工程类期刊中位居第 30 位,入围全世界土木工程类期刊 Q1 区,成为世界土木工程类期刊 Q1 区唯一中文期刊,也是世界土木工程类期刊 Q1 区仅有的两种中国期刊之一,另一本为同济大学主办的英文期刊 *UNDERGROUND SPACE*, 位居第 35 位。“世界期刊影响力指数 (WJCI) 报告 (2020 科技版)”收录了国际上最重要、最具代表性的科技期刊 14287 中,其中纯英文期刊 11276 种,非纯英文期刊 3011 种,期刊涵盖了 5

个一级学科,45 个二级学科和 279 个三级学科。中国大陆有 1426 种期刊入选为统计源期刊,其中属于 Q1 区的期刊为 172 种,占世界 Q1 区期刊总数的 4.6%,属于 Q2 区的期刊为 345 种,占世界 Q2 区期刊总数的 8.1%。

2020 年,《岩土工程学报》还入选了国家科技部中国科学技术信息研究所最新评出的“百种中国杰出学术期刊”和“第五届中国精品科技期刊”,并获得了“中国最具国际影响力学术期刊”荣誉,这也是本刊第八次获此殊荣。

(本刊编辑部)