

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.06.009

# 压缩荷载下泥岩裂缝演化规律的 CT 试验研究

王传洋<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 衡 帅<sup>1</sup>, 冒海军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;  
2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 裂缝的演化与空间展布规律是影响泥岩盖层密闭效果的关键因素。为研究泥岩失稳破坏过程中裂纹的萌生、扩展和汇集贯通等演化规律, 针对龙马溪组泥岩进行了单轴压缩下的同步 CT 扫描试验, 通过裂纹面积的变化特征及裂纹结构的分形特性, 探讨了不同加载水平下裂纹的演化规律, 从细观尺度揭示了泥岩裂纹演化与宏观变形特性的关系。研究表明: 泥岩 CT 图像灰度频率及裂纹面积的变化均可反映裂纹的演化特征。荷载水平 (即当前荷载与峰值荷载之比) 为 0~20% 时, 裂纹面积迅速增加, 裂纹开始萌生, 但由于受到闭合效应的抑制, 相对并不活跃; 荷载水平 (当前荷载与峰值荷载之比) 为 20%~65% 时, 裂纹面积变化不大, 裂纹萌生效应和闭合效应同时进行, 且作用大致相抵, 泥岩进入稳定承压阶段; 荷载水平为 65%~85% 时, 裂纹面积陡然增加, 裂纹进入扩展及汇集贯通阶段, 而荷载水平为 65% 时的突然跳跃, 表明裂纹从萌生闭合到扩展过渡具有突发性和瞬时性。随着荷载的继续增加, 泥岩内部结构呈复杂化、混乱化的变化趋势, 且裂纹从外向内逐渐贯通。裂纹分形维数呈现的增长 下降 再增长 再下降的波状变化规律, 是裂纹萌生、闭合、扩展和归并等相互转化的结果。

**关 键 词:** 泥岩; 裂缝演化; CT 扫描; 裂纹面积; 分形维数

**中图分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2015) 06 - 1591 - 08

## CT test for evolution of mudstone fractures under compressive load

WANG Chuan-yang<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>1,2</sup>, HENG Shuai<sup>1</sup>, MAO Hai-jun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The evolution and spatial distribution of fractures are key factors in the sealability of mudstone caprock. To investigate the evolution of crack initiation, propagation, coalescence during the process of deformation and failure for mudstone, uniaxial compression test and real-time CT scanning have been carried out for mudstone specimens of Longmaxi Formation. The crack evolution under different load levels is discussed; and the relationship between crack evolution and macroscopic deformation is revealed from the mesoscopic scale based on the variations of crack area and fractal characteristics of crack structure. The results show that: the evolution of mudstone cracks can be reflected with the changes of grey frequency and crack area. When the load applied on the specimen is at a level of 0-20%, even though crack area increases rapidly, crack initiation is not active due to the closing effect of cracks in compression process. When the load reaches a level of 20%-65%, crack area changes little owing to the generating effect and closing effect of cracks contributing equally; thus mudstone is in a stable stage. When the load is up to a level of 65%-85%, crack area increases sharply as the uniaxial effect of crack extension and coalescence speeds up. The sudden increase of crack area at the load level of 65% exhibits the burstiness and instantaneity of crack transformation from initiation, closing to extension. The complicated and disordered internal structures and cracks evolving from specimen surface to interior are clearly observed with the further increase of load. The curve of crack fractal dimension appears the "up down up down" trend, which shows the evolution of initiation, closure, extension and coalescence of cracks.

**Keywords:** mudstone; crack evolution; CT scanning; crack area; fractal dimension

## 1 引 言

在油气地质领域, 泥岩具有多重身份, 既可作

烃源岩, 又可充当储层, 还是主要的盖层之一。作为构成油气聚藏的重要条件, 具有低渗透性质的盖层能够阻止油气向上逸散, 有效盖层的存在也是天

收稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.51104144); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No.2010CB226701)。

第一作者简介: 王传洋, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事泥页岩盖层评价方面的研究工作。E-mail: wangchuanyangcumt@163.com

然气资源评价的重要依据之一。泥岩本身所具有的特殊性质,决定了其裂缝的形成与演化具有独有的特征和意义。而天然气的保存需要苛刻的封盖条件,随着其勘探开发步伐的不断加快,盖层密闭性越来越得到油气地质工作者的关注<sup>[1]</sup>。

在盖层中,作为没有明显位移的断裂、裂缝的存在破坏了地层的完整性,进而严重影响盖层的密闭性;而在储层中,裂缝既是油气储集空间,又是渗流通道。因此,对裂缝的研究一直是油气勘探开发中的一项重要内容<sup>[2]</sup>。早期对裂缝的研究中,众多学者<sup>[3-5]</sup>更倾向于从构造应力场的角度出发。20世纪80年代以来,CT技术在材料科学中的应用使得材料的内部结构和缺陷得以检测;Jia等<sup>[6]</sup>通过对火山岩水力压裂过程中裂纹扩展的工业CT扫描,探讨了水力压裂条件下裂缝扩展的方向性;Ko等<sup>[7]</sup>重点研究了亚临界裂纹对主裂纹扩展的影响;Braz等<sup>[8]</sup>通过沥青混合物压缩荷载下的CT扫描试验,从体积变化的角度研究了裂纹的扩展规律;Li等<sup>[9]</sup>通过含气煤体的工业CT扫描,得到了裂纹扩展速率与其强度、变形的内在联系;杨永明等<sup>[10]</sup>基于能量理论揭示不同三轴应力下岩石破坏时裂纹扩展的能量机制;王梦蔚等<sup>[11]</sup>针对混凝土试样开展CT扫描试验,并结合数字图像处理技术进行了宏观建模研究;刘慧<sup>[12]</sup>针对陕西红砂岩、灰砂岩试样进行了不同温度下的CT扫描试验,探讨了温度对冻结岩石裂纹扩展的影响;李磊<sup>[13]</sup>基于页岩CT图像的数字图像处理技术,结合流固耦合理论和损伤力学,研究了页岩的损伤演化规律;王彦琪等<sup>[14]</sup>基于图像检索技术对单轴压缩破坏过程中的CT图像进行了优化处理,得到了较好的效果;朱红光等<sup>[15]</sup>通过自制岩石模拟材料进行了荷载CT试验,从微观尺度探讨了微裂隙的演化规律;刘京红等<sup>[16]</sup>利用分形维数对裂纹扩展过程进行了分析,揭示了岩石材料从裂纹萌生、扩展到贯通的微观破坏机制;彭瑞东等<sup>[17]</sup>从能量耗散及释放角度探讨了层状盐岩破坏的微观机制。虽然国内外学者对不同岩石裂纹的演化过程及特征进行了一系列研究,但对CT实时扫描下泥页岩的裂纹演化规律的研究却较为少见。李建胜等<sup>[18]</sup>对煤系地层泥岩样进行了显微CT无损探测,研究了岩石孔隙结构的动态变化;彭瑞东等<sup>[19]</sup>通过对不同岩石的工业CT扫描,研究了岩石的孔隙结构特点,并讨论了孔隙率和分形维数间的关系。泥岩作为油气藏形成和保存的盖层,其物理和力学性质直接影响着气藏的密闭性和保存规模,是保存条件研究的核心内容。而泥岩裂缝的形成与

演化又是影响盖层密闭效果的重要因素,因此,在油气盖层评价中,泥岩裂缝的形成和演化规律的研究显得尤为必要。

本文针对龙马溪组泥岩,通过单轴压缩过程中的CT实时扫描,结合分级荷载下裂纹面积的变化特征及裂纹结构的分形特性,探讨了泥岩破坏过程中微裂隙的产生及演化规律,为泥页岩盖层的密闭性评价等提供了参考。

## 2 泥岩 CT 试验

本次试验所用试样均采自鄂西渝东地区志留系龙马溪组泥岩,其主要成分为伊利石、石英及钠长石等。圆柱形试样尺寸为 $\phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ,密度为 $2.42\text{ g/cm}^3$ ,平均含水率为3%,压汞试验测得其天然孔隙率为9.12%,通过肉眼和浸水未观察到明显裂缝。轴向加载速率为 $0.005\text{ mm/s}$ 时,测得该泥岩抗压强度为24 MPa。

本次试验采用中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室与美国BIR公司合作研发的ACTIS300-320/225CT/DR高分辨率工业CT实时成像系统(图2所示)。该系统可以快速扫描得到微米量级分辨率的像素大小为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 的16位灰度切片图像。试验过程中针对试样自上而下间隔 $50\ \mu\text{m}$ 依次扫描,共扫描1 000层,其初始扫描结果如图1所示。由图可知,该泥岩较为致密,均质性较好,且没有明显发育的裂纹。

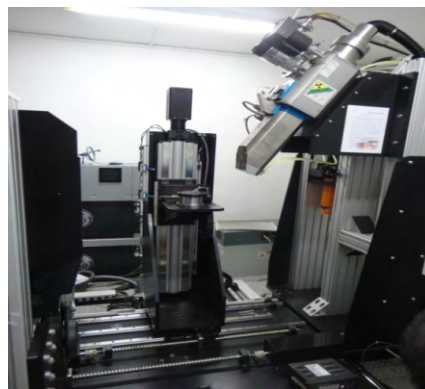


图1 CT扫描试验系统  
Fig.1 CT test system

泥岩试样内部矿物组成、致密性等不均一,各部位密度不同,在CT灰度图像中则表现为各部位灰度值不一。同时,加载过程中裂纹的萌生、扩展、归并及贯通等都直接影响着试样不同部位密度的大小。而由CT扫描原理可知,被扫描材料对X射线的吸收系数与材料密度成正比<sup>[20]</sup>,故正比于吸收系数的灰度图像可以表征材料内部的密度变化。因此,

CT 灰度图像中灰度值的变化规律可以反映压缩过程中泥岩裂纹的产生与演化特征。

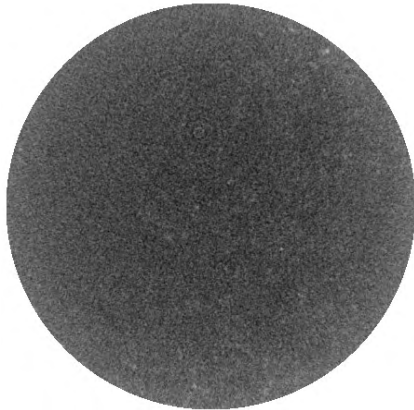


图 2 典型泥岩试样初始扫描图

Fig.2 Original scanned image of typical mudstone sample

在整个试验过程中共进行 8 次扫描，如图 3 所示。扫描时荷载水平依次为 0% (初始扫描)、25%、50%、55%、65%、75%、85%、100% (峰值荷载) (荷载水平即扫描荷载下试件内部平均应力与峰值应力之比)。考虑到试样切片数据的统计性及加载过程中端部效应的影响，选取扫描层级 200 ~ 800 层 (自下而上)，即试样高度 10 ~ 40 mm 处作为统计区域，并对扫描层图像进行裁剪，只对岩芯柱中央的矩形区域进行统计分析。为增加对比度而便于观察分析，预先将所有 CT 图像灰度值线性放大 5 倍，并在求取不同扫描层对应像素点的平均灰度值后绘制频率直方图。

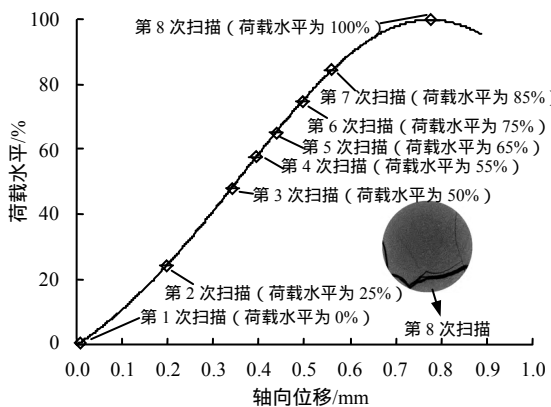
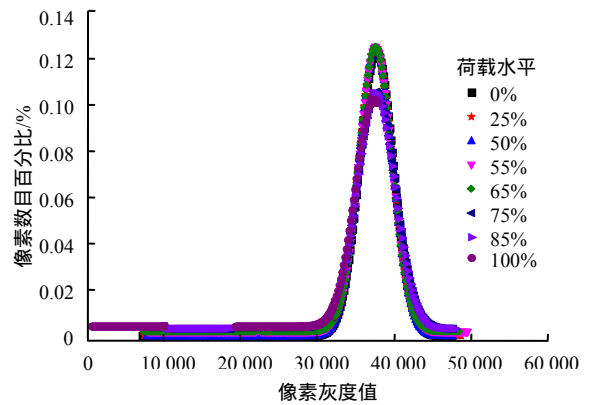


图 3 加载、位移及扫描次数示意图

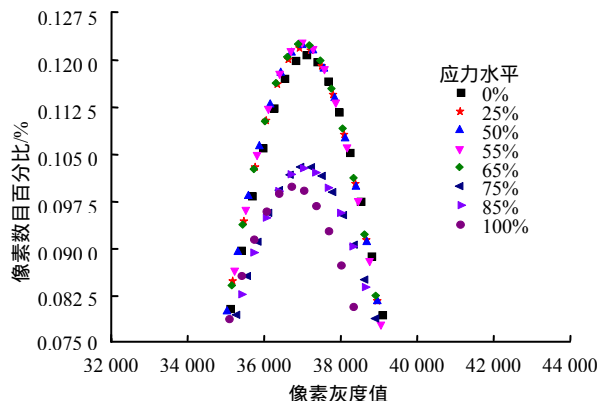
Fig.3 Curve of loading, displacement and scanning times

图 4 为加载过程中各级荷载下典型的灰度频率直方图，为便于分析，对图像局部进行了放大处理。直观上看，曲线呈单峰状，整体形状符合正态分布，这与岩石多组分及大量孔隙、微裂隙的随机分布相符。荷载水平为 0 ~ 65% 时，波形基本一致，无明

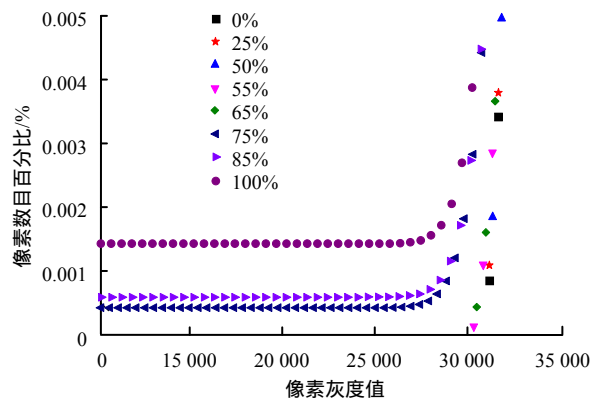
显变化，说明此阶段微裂纹萌生并不活跃，且由于与同期发生的裂纹压缩闭合效应大致相抵，灰度分布变化并不明显；荷载水平为 65% ~ 85% 时，波峰位置下降，波形有变“胖”趋势，且小灰度 CT 数从无到有，这表明此阶段裂纹活动发生突变，扩展、汇集效应占据主导地位，且灰度值的突然变化说明裂纹的扩展、汇集具有突发性和瞬时性；达到峰值时，波峰位置降至最低，小灰度值 CT 数显著增多，说明达到峰值强度时，裂纹扩展较活跃，并迅速汇集贯通导致试样破坏。



(a) 灰度频率直方图 (全)



(b) 灰度频率直方图 (局部)



(c) 灰度频率直方图 (局部)

图 4 不同应力水平下灰度频率直方图

Fig.4 Gray frequencies at different stress levels

### 3 基于裂纹面积变化的裂纹演化规律分析

通过压汞试验测得的该泥岩试样孔隙率约为 9.12%，这无疑会对微裂纹面积的识别造成一定影响，且单纯依靠肉眼很难识别加载初期裂纹扩展的变化，必须对扫描图像做进一步分析处理才能对裂纹的细观变化作出正确判断。图像的阈值分割及二值化可以定量地提取细观层面岩石的内部结构。而本文采用的是单阈值分割法，即

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, f(x, y) \geq T \\ 0, f(x, y) < T \end{cases} \quad (1)$$

即将灰度值小于某一阈值  $T$  的像素值降为 0，对应像素点为黑色，表征孔隙和裂纹；而灰度值大于该阈值的像素值升为 1，对应像素点为白色，表征岩样较完整，没有孔隙、裂纹或裂隙。二值化处理后的图像只有两个灰度级，故称为二值图像。

计算发现：当阈值  $T=26\ 500$  时，基于初始扫描的 CT 二值图像求算的岩石孔隙率与压汞试验的结果相近，约为 9%，因此，将灰度阈值 26 500 作为不同荷载水平下灰度图像二值化过程的基准阈值。通过统计二值图像中黑色像素点的个数，进而求算初始孔隙与裂纹所占面积的百分比，并与初始扫描图层（未加载状态）作差，可追踪裂纹面积的变化规律。考虑到 CT 图像数据的统计特征，针对不同荷载水平下的 CT 扫描图像，同样选取扫描层级 200~800 层岩芯柱中央的矩形区域进行统计分析。得出不同荷载水平下裂纹面积的平均值后绘制裂纹面积-荷载水平关系示意图。

以初次加载时（即第 2 次扫描）各扫描层裂纹面积求算为例，第  $n$  次扫描层裂纹面积为

$$S_n = \frac{l_n - l_0}{N} \times A \quad (2)$$

式中： $S_n$  为裂纹面积； $l_n$  为第  $n$  层二值图中黑色像素点数； $l_0$  为未加载时相应扫描层二值图中黑色像素点数； $N$  为扫描层圆形统计区域内像素点总数； $A$  扫描层圆形统计区域的面积。

图 5 给出了不同荷载水平下裂纹面积的变化规律。由图可以看出，在荷载水平为 0~25% 时，裂纹面积迅速增加，但增幅有限，说明此阶段裂纹的萌生已开始进行，但由于受到同期压缩荷载下的裂纹闭合效应的抑制，裂纹活动相对并不活跃；在荷载水平为 25%~65% 时，裂纹面积有所增减，总体变化不大，说明此阶段裂纹萌生效应和闭合效应同时进行，且大致相抵，岩石处于稳定承压阶段；荷

载水平为 65%~85% 时，裂纹面积陡然增加，裂纹的扩展、汇集贯通效应已占据主导地位；其中，荷载水平为 65% 时，裂纹面积迅速增加，为裂纹演化过程的跳跃点，表明从裂纹的萌生、闭合到扩展、汇集的过渡具有突发性和瞬时性，这与灰度频率直方图的结果相吻合。在荷载水平 85% 到试验破坏时，裂纹面积继续增加，这与加载后期裂纹的扩展、汇集效应显著增强有较大关系。

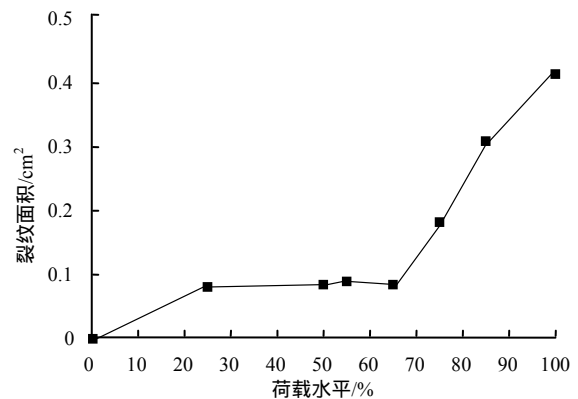


图 5 裂纹面积-荷载水平关系

Fig.5 Crack area vs. stress level

### 4 裂纹演化的分形描述

谢和平<sup>[21]</sup>研究表明，岩石裂纹结构具有分形特征，且表现出一定的自相似性。几何意义上，分形维数  $D$  表征了岩石裂纹形态的复杂程度。 $D$  越大，裂纹图形越弯折，分叉越多，且呈现混乱无序状态； $D$  越小，裂纹图形越光滑，越趋于规则有序排列，即分形维数  $D$  能定量表征裂纹的复杂程度与不规则性<sup>[11]</sup>。

计盒维数在数学计算上较为简单，且物理含义也较直观，因此，本文采用计盒维数对二值化后的 CT 图像进行分维计算。计盒维数定义：设  $F$  是  $R^n$  的非空有界子集， $N_\delta(F)$  是覆盖  $F$  的边长至多为  $\delta$  的盒子数， $F$  的上、下盒维数分别定义为

$$\overline{\dim}_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \frac{\ln N_\delta(F)}{-\ln \delta} \quad (3)$$

$$\underline{\dim}_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0^-} \frac{\ln N_\delta(F)}{-\ln \delta} \quad (4)$$

若它们是相等的，称其公共值为  $F$  的盒维数，则盒维数为

$$\dim_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_\delta(F)}{-\ln \delta} \quad (5)$$

采用实数域上计算盒子覆盖数的分形维数估计方法把数字图像看成是三维空间中的曲面  $Z = f(x, y)$ ，

( $x, y$ ) 为像素点的位置坐标,  $Z$  代表对应点的像素值(二值化后像素值仅可能在 0 和 1 两者之间取值), 图像大小为  $M \times M$  ( $M$  即二维数字图像边长像素值), 用  $\delta \times \delta$  ( $\delta$  为方形格子边长) 的格子去覆盖图像中黑色像素点(像素值为 0) 的集合。统计盒子, 由盒维数定义可知,  $\lg N_\delta$  与  $\lg \delta$  呈线性关系, 且斜率的负数就是图像曲面的分形维数, 对于得到的一组点的  $\lg N_\delta$  与  $\lg \delta$ , ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 利用最小二乘拟合方法得到直线的斜率, 再取负号即为图像曲面的估计分形维数。

图 6 和图 7 ( $\lg N_\delta$ 、 $\lg \delta$  分别对应盒子数  $N_\delta$  和格子边长  $\delta$  的对数) 即分别给出了加载过程中典型扫描层的二值图像和分形维数变化特征。表 1 则给出了图 6、7 中相应的荷载水平为 65%~100% 区间内主裂纹、长度、宽度测量数据(其中裂纹宽度取主裂纹宽度最大值)。从图 6(a) 可以看出, 黑色像素点呈现随机分布, 这与天然岩样孔隙的随机分布一致。

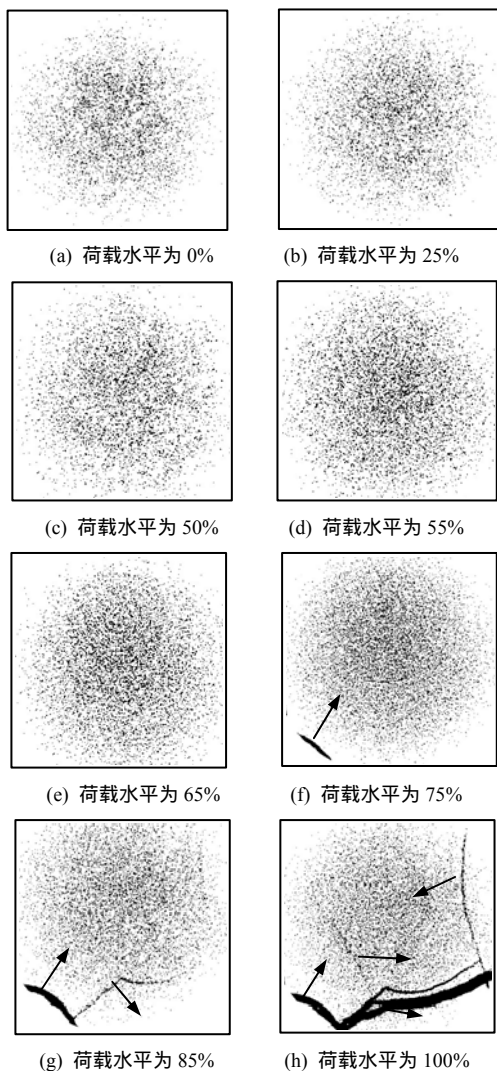


图 6 典型扫描层二值图像  
Fig.6 Typical scanning layer binary images

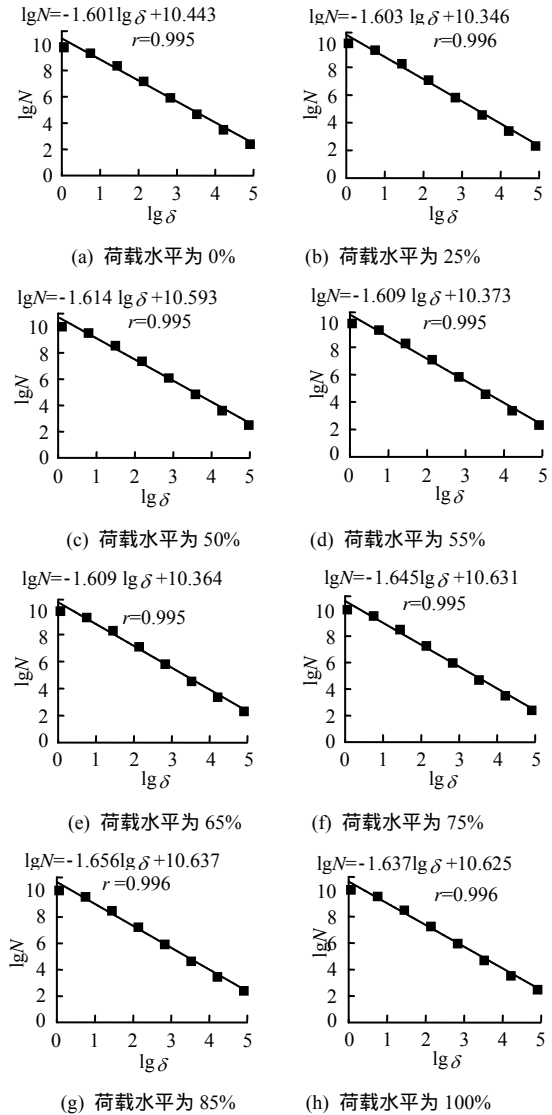


图 7 典型扫描层分形维数特征  
Fig.7 Fractal dimension features of typical scanning layers

表 1 典型扫描层裂纹长度、宽度测量数据  
Table 1 Crack length, width in typical scanning layers

主裂纹编号	荷载水平/%	长度/mm	宽度/mm
	65	0	0
	65	0	0
	75	2.454	0.230
	75	0	0
	85	4.860	0.444
	85	8.903	0.110
	100	4.875	0.611
	100	12.851	0.611

图 6(a)~6(d) 中, 黑色像素点数量平稳增长, 且黑色像素点的分布呈现汇聚“抱团”趋势, 说明应力状态的改变刺激了裂纹的发育, 且随着压力的增加, 原有平衡系统被打破, 内部结构重新排布, 微裂纹开始发育, 但微裂纹并没有显示出特定的方向性和区域性, 而是呈现一种随机的展布形态, 这进一步提升了试样内部结构的混乱程度。从图 6(e)、6(f) 可以看出, 荷载水平为 65%~75% 时, 主裂纹从



无到有,且发育部位并非黑色像素点聚集区域,而是黑色像素点相对稀疏的区域;为进一步证明这种现象并非偶然因素导致,特地选取任意扫描层进行对比分析,如图8所示。从图8(a)、8(b)也可以看出,在主裂纹从无到有的变化中,裂纹发育部位同样没有位于黑色像素点聚集区域,而是黑色像素点相对稀疏区域,这说明主裂纹的产生并不是已有微裂纹的汇集、贯通,而是重新经历了起裂与扩展过程,也进一步说明了裂纹扩展的突发性和瞬时性。与图6(e)相比,图6(f)的右下部分区域黑色点数目减少,而中上部区域中黑色像素点增多,说明此阶段仍伴随着微裂纹的萌生与压缩闭合。图6(f)、6(g)中,主裂纹长度和宽度继续增加,主裂纹出现(图6(g))并与之相交,两者夹角近 $90^\circ$ ,相比较图6(f)黑色像素点有减少趋势,这是由于主裂纹的扩展作用以及压缩荷载的制约,一些微裂纹在萌生、闭合效应的相互转换下或消失,或向主裂纹汇集,从而导致整体内部结构仍处于一种动态的重分布状态。图6(g)、6(h)中,主裂纹和长度、宽度进一步增加,且裂纹有分叉现象,这可能是由峰值荷载下弹性能的急剧释放而造成的部分岩块破碎剥落引起的;次生裂纹和相继发育,与裂纹也近呈 $90^\circ$ 相交,同时,各条主裂纹的扩展也刺激了微裂纹的汇集效应的进一步发育,使得图6(h)中黑色像素点分布的杂乱程度得到一定的缓解,这也是图7(h)较图7(g)分维数有所降低的原因。总体来看,随着荷载水平的提高,岩石内部结构呈现出复杂化、混乱化的演化趋势,且裂纹具有从外部向内部逐渐扩展贯通的演化趋向。至于裂纹、和相互间均近似呈 $90^\circ$ 相交的现象,是偶然还是有其必然原因,还需进一步深入的理论分析和试验验证。

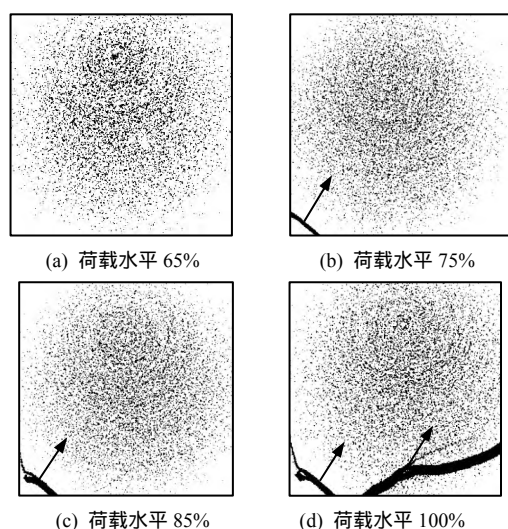


图8 任选扫描层二值图像变化特征  
Fig.8 Optional scanning layers images

考虑到CT图像数据的统计特征,针对不同荷载水平下的CT扫描图,选取第200~800层共计600层扫描图像,通过Matlab批处理得到不同荷载水平下分形维数的平均值,如图9所示。

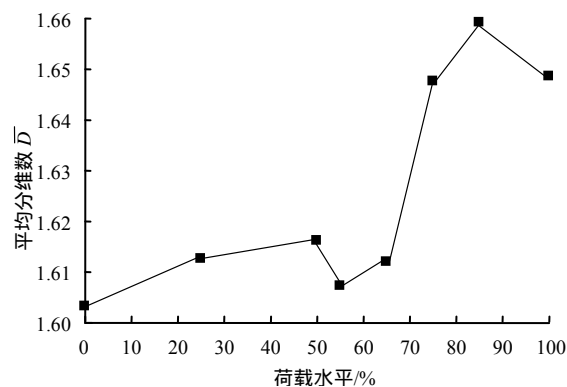


图9 平均分维数  $\bar{D}$ -荷载水平关系曲线  
Fig.9 Average fractal index  $\bar{D}$  vs. stress level

由图9可知,荷载水平为0~25%时,平均分维数 $\bar{D}$ 略有增长,表明裂纹开始萌生,且分布呈现混乱无序状态;荷载水平为25%~50%时,平均分维数 $\bar{D}$ 继续平稳增长,结合前述分析可知,此阶段虽然裂纹的闭合效应与萌生效应同期发展,但两者作用的结果却使得微裂隙的分布状态继续向混乱无序状态发展;荷载水平为50%~65%时,平均分维数 $\bar{D}$ 略有下降,说明裂纹萌生效应受到抑制,而压缩闭合效应得到进一步发展,占据主导地位,岩石处于稳定承压阶段;荷载水平为65%~85%时,平均分维数 $\bar{D}$ 陡然增加,裂纹迅速扩展、汇集,进一步说明该荷载水平(65%)为裂纹扩展演化的跳跃点,裂纹的扩展具有突发性和瞬态性,且裂纹的扩展使内部结构复杂程度迅速增加,整个体系迅速进入无序不稳定状态;荷载水平为85%以后,平均分维数 $\bar{D}$ 却开始下降,这与裂纹扩展到一定程度后的相互汇集、贯通,使裂纹的复杂无序状态有所降低有较大关系。

## 5 结 论

通过单轴压缩下泥岩的CT实时扫描试验,并结合分级荷载下裂纹面积的变化特征及裂纹结构的分形特性,探讨了不同荷载水平下泥岩裂纹的发展演化特征,初步得出的结论如下:

(1) 不同加载水平下CT图像灰度频率变化可反映岩石各部位密度的变化,进而可以识别不同加载阶段的裂纹演化特征。

(2) 通过追踪不同荷载水平下裂纹面积的变化特征,发现在荷载水平为0~20%时,裂纹面积迅

速增加但增幅有限,说明裂纹的萌生活动开始发育,但由于受到同期压缩荷载下的裂纹闭合效应的抑制,裂纹活动相对并不活跃;在荷载水平为 20%~65%时,裂纹面积变化不大,此阶段裂纹萌生效应和闭合效应同时进行,且大致相抵,岩石处于稳定承压阶段;荷载水平为 65%~85%时,裂纹面积陡然增加,裂纹演化已经进入扩展及汇集贯穿阶段;其中,荷载水平为 65%裂纹演化的跳跃点,表明从裂纹的萌生、闭合到扩展、汇集的过渡具有突发性和瞬时性。

(3) 随着荷载水平的提高,岩石内部结构呈现出复杂化、混乱化的变化趋势,且裂纹从外部向内部逐渐贯通。裂纹分形维数呈现增长下降再增长再下降的波状变化规律,这是裂纹萌生、闭合、扩展和归并效应等相互转化的结果。

(4) 荷载水平为 20%~65%时,岩石处于稳定承压阶段,此时裂纹的萌生效应和压缩闭合效应大致相抵。综合全文,65%为荷载水平的一个特殊点,对应于岩石裂纹的急剧扩展,且主裂纹的产生并不是已有微裂纹的汇集、贯通,而是重新经历了起裂与扩展的发展过程,这也进一步说明了裂纹扩展的突发性和瞬时性。

### 参 考 文 献

- [1] BOULT P, KALDI J. Evaluating fault and cap rock seals (AAPG Hedberg Series)[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2005: 1 - 64.
- [2] KOESTLER A G. Hydrocarbon seal quantification[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2002: 1 - 50.
- [3] BOULT P, KALDI J. Evaluating fault and cap rock seals (AAPG Hedberg Series)[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2005: 1 - 268 .
- [4] LASH G G. Top seal development in the shale - dominated upper devonian catskill delta complex, western New York State[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2006, 23(3): 317 - 335.
- [5] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. **SPE Journal**, 1963, 3(3): 245 - 255.
- [6] JIA L, CHEN M, SUN L, et al. Experimental study on propagation of hydraulic fracture in volcanic rocks using industrial CT technology [J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2013, 40(3): 405 - 408.
- [7] KO T Y, KEMENY J. Determination of the subcritical crack growth parameters in rocks using the constant stress-rate test[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 59: 166 - 178.
- [8] BRAZ D, BARROSO R C, LOPES R T, et al. Crack detection in asphaltic mixtures by computed tomography[J]. **NDT & E International**, 2011, 44(2): 195 - 201.
- [9] LI X, WANG C, ZHAO C, et al. The propagation speed of the cracks in coal body containing gas[J]. **Safety Science**, 2012, 50(4): 914 - 917.
- [10] 杨永明, 鞠杨, 陈佳亮. 三轴应力下致密砂岩的裂纹发育特征与能量机制[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(4):692 - 698  
YANG Yong-ming, JU Yang, CHEN Jia-liang. Cracks development features and energy mechanism of dense sandstone subjected to triaxial stress [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(4):692 - 698
- [11] 王梦蔚, 卢梦达. 基于 CT 扫描试验及数字图像处理的混凝土宏细观建模研究 [J].**混凝土**, 2014, (11): 10.  
WANG Meng-wei, LU Meng-da. CT-scan-based digital image processing technology and macro/mesoscopic modeling for concrete [J]. **Concrete**, 2014, (11): 10.
- [12] 刘慧. 基于 CT 图像处理的冻结岩石微观结构及损伤力学特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [13] 李磊. 基于页岩损伤 CT 图像处理的裂缝扩展研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014
- [14] 王彦琪, 冯增朝, 郭红强, 等. 基于图像检索技术的岩石单轴压缩破坏过程 CT 描述[J]. **岩土力学**, 2013, 34(9): 2535 - 2540.  
WANG Yan-qi, FENG Zeng-chao. CT description of rock failure process under uniaxial compression loading based on image retrieval technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2535 - 2540.
- [15] 朱红光, 谢和平, 易成. 岩石材料微裂隙演进的 CT 识别[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(6): 1231 - 1238.  
ZHU Hong-guang, XIE He-ping, YI Cheng. CT identification of microcracks evolution for rock materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1231 - 1238.
- [16] 刘京红, 姜耀东, 赵毅鑫. 基于 CT 图像的岩石破裂过程裂纹分形特征分析[J]. **河北农业大学学报**, 2011, 34(4): 104 - 107.  
LIU Jing-hong, JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin. Fractal characteristic analysis of rock breakage process based on CT test images[J]. **Journal of Agricultural University of Hebei**, 2011,34(4): 104 - 107.

- 连理工大学, 2007.
- [6] REYES D, MAREK RODRIGUEZ, LIZCANO A. A hypoplastic model for site response analysis[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, 29(1): 173–184.
- [7] TASAN H, RACKWITZ F, SAVIDIS S. Pore water pressure accumulation due to cyclic horizontally loaded monopiles with large diameters[J]. **Bautechnik**, 2010, 87(8): 449–461.
- [8] TEJCHMAN J, BAUER E. Effect of cyclic shearing on shear localization in granular bodies[J]. **Granular Matter**, 2004, 5(4): 201–212.
- [9] TEJCHMAN J, BAUER E. Modeling of a cyclic plane strain compression-extension test in granular bodies within a polar hypoplasticity[J]. **Granular Matter**, 2005, 7(4): 227–242.
- [10] TEJCHMAN J, BAUER E. FE-modeling of shear resistance degradation in granular materials during cyclic shearing under CNS condition[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(1–2): 249–263.
- [11] SALCIARINI, TAMAGNINI C. A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads[J]. **Acta Geotechnica**, 2009, 3(4): 163–176.
- [12] 陈龙, 楚锡华, 张明龙, 等. 基于 CLoE 与 Gudehus-Bauer 亚塑性模型的颗粒材料应变局部化对比研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(11): 3306–3314.
- CHEN Long, CHU Xi-hua, ZHANG Ming-long, et al. A comparison analysis of strain localization of granular materials based on CLoE and Gudehus-Bauer hypoplastic model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(11): 3306–3314.
- [13] 刘松玉, 童立元, 邱钰, 等. 煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J]. **岩土工程学报**, 2005, 27(5): 505–510.
- LIU Song-yu, TONG Li-yuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(5): 505–510.
- [14] 黄文竞. 高应力条件下天然石英砂的颗粒破碎机理[J]. **中国水运(学术版)**, 2007, 7(5): 28–30.
- HUANG Wen-jing. Under high stress condition natural quartz sand pellet kill mechanism[J]. **China Water Transport (Academic Version)**, 2007, 7(5): 28–29.
- [15] 张家铭, 汪稔, 石祥锋, 等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(18): 3327–3331.
- ZHANG Jia-ming, WANG Ren, SHI Xiang-feng, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3327–3331.
- [16] 楚锡华, 徐远杰, 张明龙, 等. 基于 ABAQUS 的颗粒材料亚塑性模型的数值实现及探讨[J]. **岩土力学**, 2009, 30(增刊 1): 215–224.
- CHU Xi-hua, XU Yuan-jie, ZHANG Ming-long, et al. Numerical implementations and discussion on hypoplastic model for granular materials based on ABAQUS[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.1): 215–224.
- [17] LEONI M. Implementation and use of constitutive models in geomechanics: Analysis of shallow footings on sand[D]. Parma, Italy: University of Parma, 2005.
- [18] 彭瑞东, 武志德, 周宏伟. 层状盐岩中裂纹扩展规律的细观实验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(增刊): 3953–3959.
- PENG Rui-dong, WU Zhi-de, ZHOU Hong-wei. Meso-experimental investigation on crack evolution in bedded salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.): 3953–3959.
- [19] 彭瑞东, 杨彦从, 鞠杨. 基于灰度 CT 图像的岩石孔隙分形维数计算[J]. **科学通报** 2011, 56 (26): 2256–2266.
- PENG Run-dong, YANG Yan-cong, JU Yang. Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2011, 56 (26): 2256–2266.
- [20] SONG Y Q, RYU S, SEN P N. Determining multiple length scales in rocks[J]. **Nature**, 2000, 406(6792): 178–181.
- [21] 谢和平. 岩土介质分形孔隙和分形粒子[J]. **力学进展**, 1993, 23(2): 145–164.
- XIE He-ping. Fractal pores and fractal particles of rock and soil materials[J]. **Advances in Mechanics**, 1993, 23(2): 145–164.

---

上接第 1597 页