

文章编号: 1673-9469(2024)06-0065-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.010

## 水-岩作用下砂岩力学特性及损伤特征研究

陈金宏<sup>1,2</sup>, 鲁鲲鹏<sup>3\*</sup>, 张合星<sup>3</sup>, 胡应全<sup>1</sup>

(1. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州煤设地质工程有限责任公司, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 为了研究不同含水量条件下岩石的力学性能, 以砂岩为研究对象, 开展单轴压缩试验, 分析了含水率对砂岩的力学性能及其宏观破坏形态特征的影响。基于三维激光技术和分形理论量化了砂岩宏观断裂面的结构特征, 确定了内部结构的劣化程度, 建立了宏观断裂面特征与力学参数的联系。结果表明: 砂岩的单轴抗压强度和弹性模量随含水率的增大呈现非线性减小的变化趋势, 水对砂岩结构劣化分为急剧增长阶段、稳定增长阶段、增长阶段; 砂岩的宏观破坏形态由单一的剪切破坏向轴向劈裂破坏转变; 宏观断裂面分形维数的变化特征可以用于定量评价砂岩内部的劣化程度和反映其力学性能。

**关键词:** 含水率; 力学特性; 破坏形态; 三维激光; 分形维数

**中图分类号:** TU452

**文献标识码:** A

## Study on Mechanical Properties and Damage Characteristics of Sandstone Under Water-Rock Interaction

CHEN Jinhong<sup>1,2</sup>, LU Kunpeng<sup>3\*</sup>, ZHANG Hexing<sup>3</sup>, HU Yingquan<sup>1</sup>

(1. Guizhou Coal Mine Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550025, China;  
2. Guizhou Coal Design Geological Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550025, China;  
3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** To study the mechanical properties of rocks under different water content conditions, sandstone was taken as the research object, and uniaxial compression tests were conducted to analyze the influence of water content on the mechanical properties and macroscopic failure characteristics of sandstone. Based on the 3D laser technology and fractal theory, the structural characteristics of macroscopic fracture surfaces in sandstone were quantified, the degree of deterioration of internal structure was determined, and the relationship between macroscopic fracture surface characteristics and mechanical parameters was established. The results show that the uniaxial compressive strength and elastic modulus of sandstone exhibit a non-linear decreasing trend with increasing the water content. The degradation of sandstone structures induced by water can be divided into three stages: intense growth stage, stable growth stage, and growth stage. It is found that the macroscopic failure mode of sandstone shifts from single shear failure to axial splitting failure. The fractal dimension variation characteristics of macroscopic fracture surfaces can be used to quantitatively evaluate the degree of deterioration inside sandstone and reflect its mechanical properties.

**Key words:** water content; mechanical characteristics; damage morphology; three-dimensional laser; fractal dimension

收稿日期: 2023-11-16

基金项目: 贵州省科技计划资助项目(黔科合支撑[2021]一般512); 贵州省煤矿安全高效开采技术支撑与服务人才基地基金项目(GMY-RD2022. KJ-009)

作者简介: 陈金宏(1986-), 男, 贵州毕节人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治相关研究。

\* 通信作者: 鲁鲲鹏(1985-), 男, 河南新密人, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学及支护结构可靠度研究。

随着我国国民经济的快速发展,岩土工程建设得到蓬勃发展,但是在工程建设活动大力开展的的同时各类工程灾害频繁发生,例如边坡失稳、坝基滑移、隧道围岩软化失效等<sup>[1-4]</sup>。工程岩体通常赋存于含水的地质环境中,而水-岩耦合作用往往是导致大多数工程灾害的重要原因。因此,研究不同含水条件下岩石力学特性和破坏机理对工程实践具有重要的指导意义。

20世纪50年代以来,对水-岩耦合作用下岩石损伤特征及劣化机理的研究一直是岩土工程领域的热点问题。Li等<sup>[5]</sup>对不同含水率的砂岩进行了单轴压缩试验,结果表明岩石的含水率与单轴抗压强度和弹性模量成反比,与峰值应变和能量耗散成正比。Kodama等<sup>[6]</sup>通过试验阐述了含水率、温度和加载速率对低温状态下岩石强度和破坏过程的影响,揭露了含水率和岩石结构强度及断裂起始应力的内在联系。Zhao等<sup>[7]</sup>通过单轴压缩试验研究了砂岩在不同饱水情况下的力学特性,最后利用二维颗粒流程序PFC(2D)模拟了红砂岩微裂纹和破坏模式的演化规律。其他学者还研究了浸泡时长、溶液的pH值、冻融循环次数、干湿循环次数等对岩石力学性能的影响<sup>[8-10]</sup>,结果表明,岩石的成分和内部结构特征决定了岩石对水分的敏感性。

近年来,研究人员采用扫描电镜、声发射、红外热成像和数字散斑等方法<sup>[11-15]</sup>探究岩石在应力作用下微观结构与各力学参数的联系,深化认识岩石损伤的演化过程。Ghamgosar等<sup>[16]</sup>通过试验研究了岩石在静态和各种循环载荷下的力学行为,利用CT扫描技术分析了岩石的微观断裂机制。Zhang等<sup>[17]</sup>利用关联维数研究了砂岩在加载过程中声发射信号的有序性,进而描述岩石破裂的发展情况。朱其志等<sup>[18]</sup>开展相同围压不同初始偏压条件下干燥与饱和砂岩的单级应力松弛试验及峰值应力循环松弛试验,探究水对岩石松弛特性的作用机理。

在前人研究的基础上,本文以贵州省赤水市某场地风化砂岩为研究对象,开展不同含水率下砂岩单轴压缩试验,系统分析了含水率对砂岩力学性能的影响,并采用三维激光扫描仪对岩石宏观断裂面形貌进行建模,基于分形理论定量表征岩石断裂面复杂程度,进一步探讨断裂面特征与力学参数的联系。研究成果可以丰富含水条件下砂岩损伤特性的研究内容,并为量化描述水-岩耦合作用机制提供新的视角和途径。

## 1 岩样制备与试验方案

### 1.1 岩样采集与加工

本次试验以红色砂岩为研究对象,岩石取自贵州省赤水市某采石场。取样点为白垩系嘉定群上段砂岩,该段砂岩呈巨厚块状。经鉴定,岩石主要矿物成分为石英,含少量的伊利石、绿泥石等黏土矿物,矿物成分见表1。

表1 砂岩矿物成分组成 (单位:%)

Tab. 1 Mineral composition of sandstone (unit:%)						
石英	斜长石	钾长石	方解石	伊利石	赤铁矿	绿泥石
84	8	3	2	1	1	1

将整块砂岩加工成为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱型试件,端面平行度控制在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 范围内;测试试件的质量和纵波波速,剔除离散性较大的岩样。本次试验设计采用先饱和再挥发的步骤控制含水率,岩样从干燥状态到饱和状态共设置了5种含水率(0%、1.16%、2.23%、3.11%、3.51%),其中3.11%为自然饱和状态下含水率,3.51%为强制饱和状态含水率。相应的岩样被分为5组,每组包含3块样品,总计15块样品。为保证数据的准确性,对单轴压缩测试结果偏差较大的样品进行剔除,并进行补充试验。

### 1.2 试验测试系统

试验测试系统如图1所示。

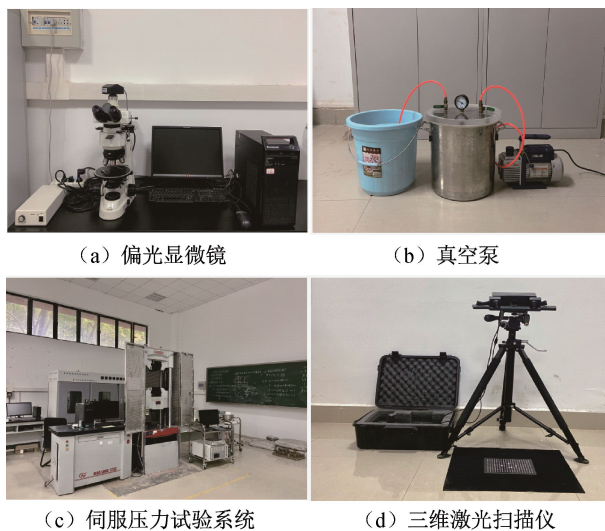


图1 试验测试系统

Fig. 1 Experimental test system

试验采用Imager型偏光显微镜对岩石薄片进

行鉴定;采用非金属超声波检测仪检测纵波波速;使用真空泵抽气进行岩样饱水试验;采用 WAW-1 000 伺服压力试验系统对岩样进行加载,加载速率为 0.05 mm/s;采用福建锐品科技公司生产的高精度三维激光扫描仪进行岩石断面扫描。

## 2 试验结果分析

### 2.1 岩石力学参数特征

对不同含水率下砂岩进行单轴压缩试验,得到应力-应变曲线,见图 2,岩样的单轴抗压强度  $\sigma$  和弹性模量  $E$  统计结果见表 2。

由表 2 和图 2 可知,水对砂岩的力学性能有显著影响,砂岩的含水量从 0% 增长到 3.51% 时,单轴抗压强度和弹性模量分别降低为 48.39 MPa 和 4.90 GPa。

为了量化砂岩力学参数的劣化规律,引入总劣化度  $S_N$  和阶段劣化度  $\Delta S_N$  进行分析。

$$S_N = \frac{T_0 - T_N}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta S_N = S_N - S_m \quad (2)$$

式中: $T_0$  为砂岩干燥状态的力学参数值; $T_N$  为砂岩不同含水率时的力学参数值; $S_m$  为当前阶段劣化度,%。

根据表 2 和式(1)(2)得到砂岩力学参数的阶段劣化度和总劣化度变化趋势,如图 3 所示。可以

表 2 砂岩单轴抗压强度和弹性模量统计表

Tab. 2 Statistics of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of sandstone

含水率/%	单轴抗压强度/MPa	平均值 /MPa	弹性模量/GPa	平均值 /GPa
0	109.23		10.23	
	105.04	103.07	9.82	9.80
	94.95		9.36	
1.16	83.61		8.76	
	70.43	76.64	7.31	8.15
	75.89		8.37	
2.23	60.25		6.07	
	58.08	58.06	7.19	6.91
	55.86		7.46	
3.11	55.72		6.19	
	53.93	54.32	6.31	6.09
	53.31		5.78	
3.51	51.94		4.56	
	51.14	48.39	5.25	4.90
	42.09		4.89	

看出,随着含水率的增加,砂岩单轴抗压强度和弹性模量逐渐减小,呈非线性关系。对应到图 3(a)(b)中,单轴抗压强度的阶段劣化度依次为 25.64%、18.03%、3.63%、5.75%;弹性模量的阶段劣化度依次为 16.83%、12.65%、8.27%、12.14%。单轴抗压强度和弹性模量的阶段劣化度均呈现先增大再减小最后增大的变化趋势。整体来看,砂

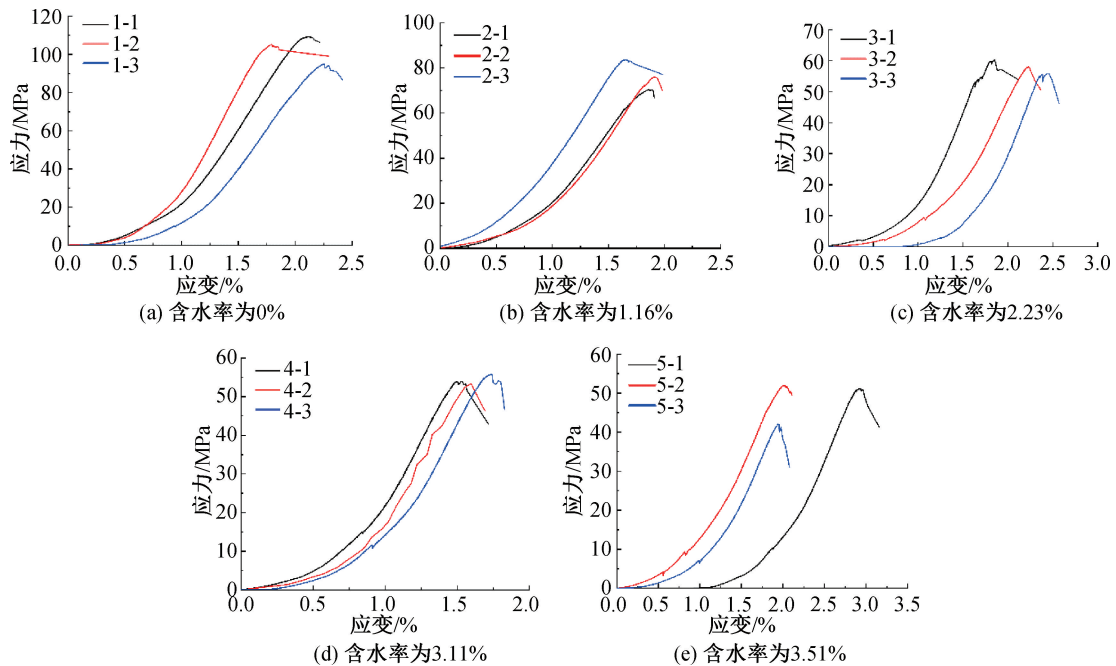


图 2 砂岩应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of sandstone

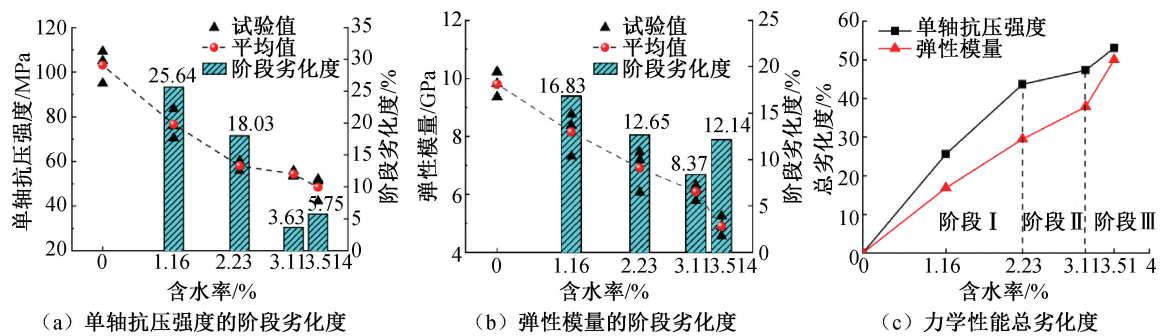


图3 砂岩的阶段劣化度与总劣化度图

Fig. 3 Stage deterioration and total deterioration of sandstone

岩含水率从0%增大到1.16%、2.23%时,阶段劣化度增长较快,其中含水率为1.16%时阶段劣化度达到峰值;含水率增大到3.11%时,阶段劣化度平缓增大;当含水率增大到3.51%时,阶段劣化度再次快速增长,弹性模量的增加更为明显。

从阶段劣化度的变化趋势可以看出,砂岩对水的敏感度分阶段性。结合图3(c)来看,单轴抗压强度和弹性模量的总劣化度变化随着含水率的增加而增大,这表明水-岩耦合作用下砂岩内部结构的劣化是逐渐积累的。图3(c)和图3(a)(b)的变化规律相对应,总劣化度呈现明显的阶段性规律,验证了水对砂岩结构的损伤分阶段性。阶段I,含水率从0%增大到2.23%时,单轴抗压强度和弹性模量大幅度减小,总劣化度分别从0增大到43.67%、29.49%;阶段II,含水率从2.23%增大到3.11%时,单轴抗压强度和弹性模量稳定减小,总劣化度分别增大到47.29%、37.86%;阶段III,含水率从3.11%增大到3.51%时,单轴抗压强度和弹性模量小范围减小,总劣化度分别增大到53.05%、50%。总的来说,水对砂岩结构损伤反应可分为急剧增长阶段、稳定增长阶段和增长阶段。

以上结果说明,砂岩单轴抗压强度和弹性模

量随含水率增大而减小,这与以往的研究结果是一致的。产生这个现象的原因是砂岩中伊利石、绿泥石等黏土矿物含量较高,当黏土矿物遇水软化膨胀产生体积应力进一步改变岩石结构,并且胶结物质遇水溶蚀后产生微裂纹。除此之外,水的润滑作用使砂岩内部胶结强度与颗粒间摩擦力严重弱化,导致岩石的力学强度大幅度下降。干燥砂岩内部胶结程度良好、颗粒间微裂隙相对较少,所以力学强度较含水状态砂岩高。这说明水的存在使砂岩内部结构产生劣化,进而导致力学性能降低。此外,含水率与劣化程度呈正相关关系,与力学性能呈负相关关系,表现为岩样的力学参数随含水率增大而减小。

## 2.2 岩石的宏观破坏形态特征

图4展示了不同含水率条件下砂岩的破坏形态。试验中,随着单轴压缩试验的开展,宏观裂纹先出现在岩样端部,随后在荷载作用下岩样内部裂隙扩展、搭接、贯通形成宏观主裂隙。

砂岩为干燥或者低含水率状态时,破坏形态以单斜面控制的剪切破坏为主。随着含水率的增加,岩样宏观主裂隙附近的细小裂隙和微裂纹增

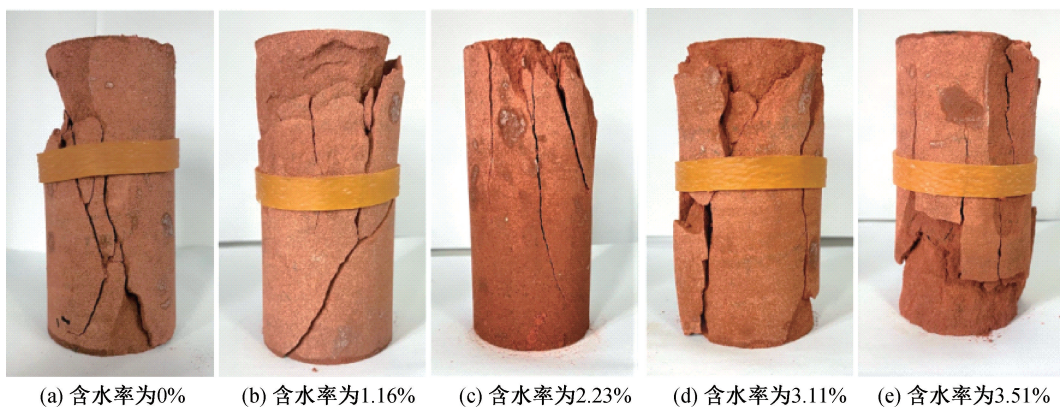


图4 砂岩破坏形态

Fig. 4 Failure mode of sandstone

多。高含水率和饱和状态的岩样由于孔隙率增大和裂纹发育出现表面剥落现象,随后产生较多的岩石碎屑,最后内部出现粗糙的破裂面。总的来说,随着含水率的增大,由水化作用产生的微裂纹、微孔隙相互扩展联通使得高含水率岩样破坏形态更加复杂。岩样的破坏形式由单一的剪切破坏向轴向劈裂破坏转变,这主要是因为水的存在使矿物颗粒间的胶结出现软化,进而导致摩擦力降低,岩石破坏的主控因素由粘聚力和摩擦力控制转变为粘聚力控制。另一方面,水的存在使岩样内部产生一定的孔隙压力,随着荷载的增大,裂隙面积不断增大,同时,有一部分水因为来不及排出去而在岩石内部产生孔隙水压力,从而导致裂隙的扩展。

### 2.3 宏观断裂面分形计算分析

由图4可以看出,不同含水率岩样的破坏形态

并不完全相同。为了研究岩样断裂面的结构特征,采用三维激光扫描仪对岩样主断裂面进行多次、多角度的扫描,对扫描采集的点云数据进行快速删除和多次拼装,得到岩样宏观断裂面形貌点云图,如图5所示。

根据图5,对不同含水率砂岩断裂面形貌特征可进行定性描述。大量的研究表明<sup>[8-12]</sup>岩石的破坏特征具有一定程度的自相似性,这种特性与岩石的结构特征和矿物成分密切相关,因此,可根据断裂面特征研究岩体在应力作用下的力学特性和破坏机理。分形理论可以将岩石断裂面不规则、支离破碎的复杂特征从定性描述转为定量表征,所以,本文引入分形理论开展岩石断裂面特征的研究。目前分形维数的计算方法主要有小岛法、灰度插值法、分规法、盒维数法和改进的盒维数法

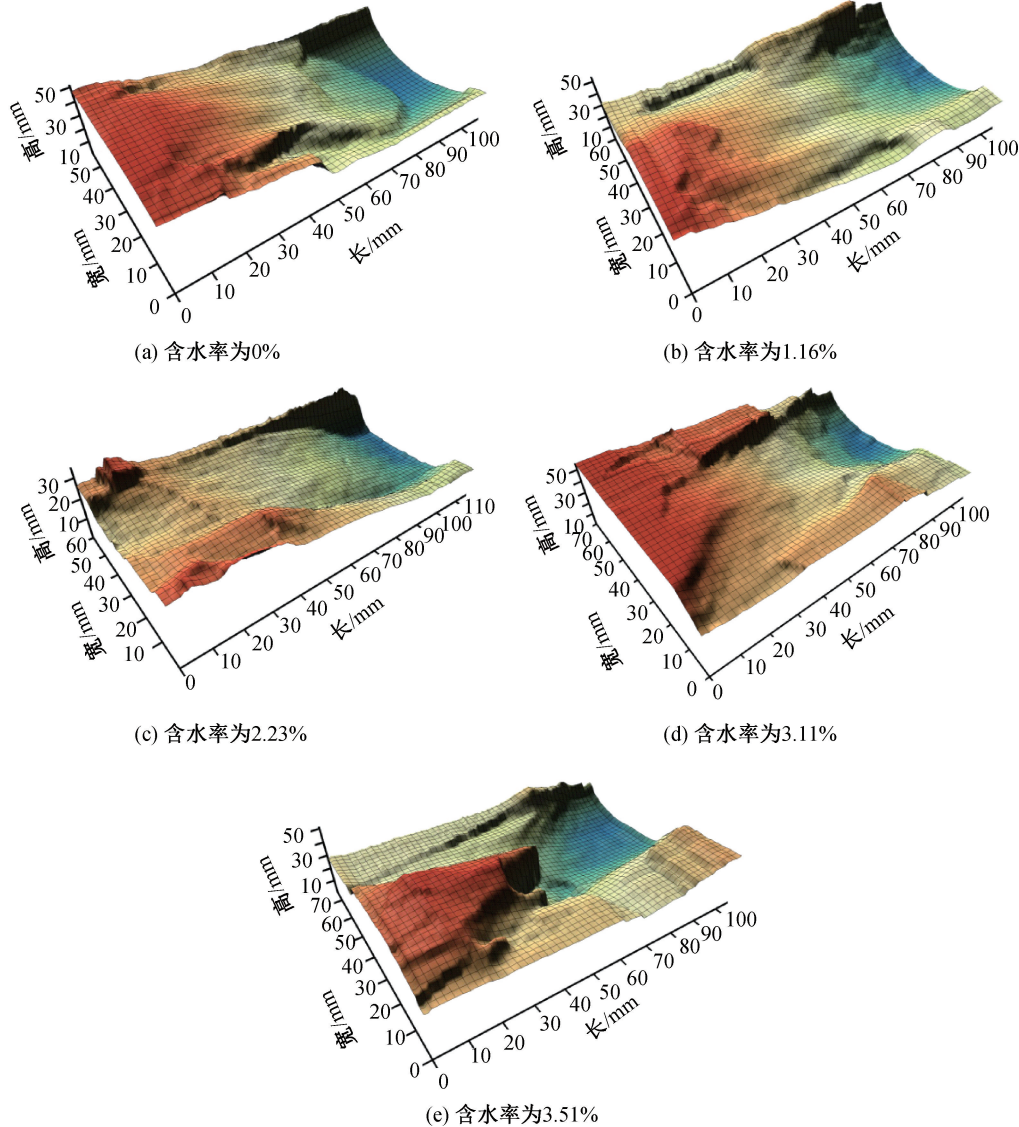


图5 砂岩断裂面三维形貌图

Fig. 5 Three-dimensional morphology of the sandstone fracture surface

等<sup>[19-22]</sup>。其中改进的盒维数法作为盒维数法的三维拓展,可更好地对岩石断裂面形貌进行分析,故本文采用此法对岩石断裂面特征作进一步研究。

改进的盒维数法的操作过程如下:假设空间平面  $xoy$  上存在由无数边长为  $\delta$  小正方形网格组成的大正方形网格。小正方形网格的四个角点对应断裂面四个测量点的高度分别为  $h(i, j)$ 、 $h(i, j+1)$ 、 $h(i+1, j)$ 、 $h(i+1, j+1)$  ( $1 \leq i, j \leq n-1$ ,  $n$  为每条边上的量测点数)。然后用边长为  $\delta$  的网格覆盖岩石宏观断裂面,覆盖断裂面需要的立方体个数  $N_{i,j}$  为

$$N_{i,j} = \text{INT}\{\delta^{-1}[\max(h(i, j), h(i, j+1), h(i+1, j), h(i+1, j+1))] + 1\} - \text{INT}\{\delta^{-1}[\min(h(i, j), h(i, j+1), h(i+1, j), h(i+1, j+1))] + 1\} \quad (3)$$

式中:INT 表示对数据进行取整。

覆盖整个断裂面的立方体总数  $N(\delta)$  为

$$N(\delta) = \sum_{i,j=1}^{n-1} N_{i,j} \quad (4)$$

通过改变小正方形边长  $\delta$  的尺寸对断裂面进行多次覆盖,得到不同测量条件下所需的立方体网格个数。若断裂面具有自相似性,则立方体网格的总数  $N(\delta)$  与其边长  $\delta$  之间的对应关系见公式(5)。

$$N(\delta) \sim \delta^{-D} \quad (5)$$

式中: $D$  为断裂面的分形维数。对式(5)两边取对数计算得:

$$\log N(\delta) \sim -D \log \delta \quad (6)$$

式中:对  $\log N(\delta)$  与  $\log \delta$  采用拟合回归方程的方式得到断裂面曲线规律,其斜率负值即为分形维数,该值可通过 MATLAB 编写程序计算得出。根据计算结果可知,断裂面表面越复杂,起伏程度越大,覆盖断裂面需要的立方体网格数就越多,分形维数就越大。不同含水率砂岩断裂面分形维数的拟合结果见图 6,可以看出同组试验断裂面的分形维数分布一致,分形维数平均值变化趋势如图 7 所示。

从图 6 可以看出,各图像的拟合效果较好,相关系数  $R^2$  均为 0.99 以上,说明利用改进盒维数法定量分析断裂面粗糙度是可行的,能够反映断裂面三维形貌图的非线性程度。从图 7 可以看出,砂岩断裂面的分形维数随含水率的增大而增大,说明岩石含水率越大,断裂面形状越不规则,表面粗糙程度越大。除此之外,分形维数呈阶段性的变化趋势,当  $0\% \leq$  含水率  $\leq 2.23\%$  时,分形维数急剧增长,此时岩石在水的作用下刚度下降,断裂面结构不规则现象增加,自相似性下降;当  $2.23\% \leq$  含水率  $\leq 3.11\%$  时,分形维数变化缓慢,随着含水率的增加,砂岩由脆性逐渐向延性转变,内部颗粒和

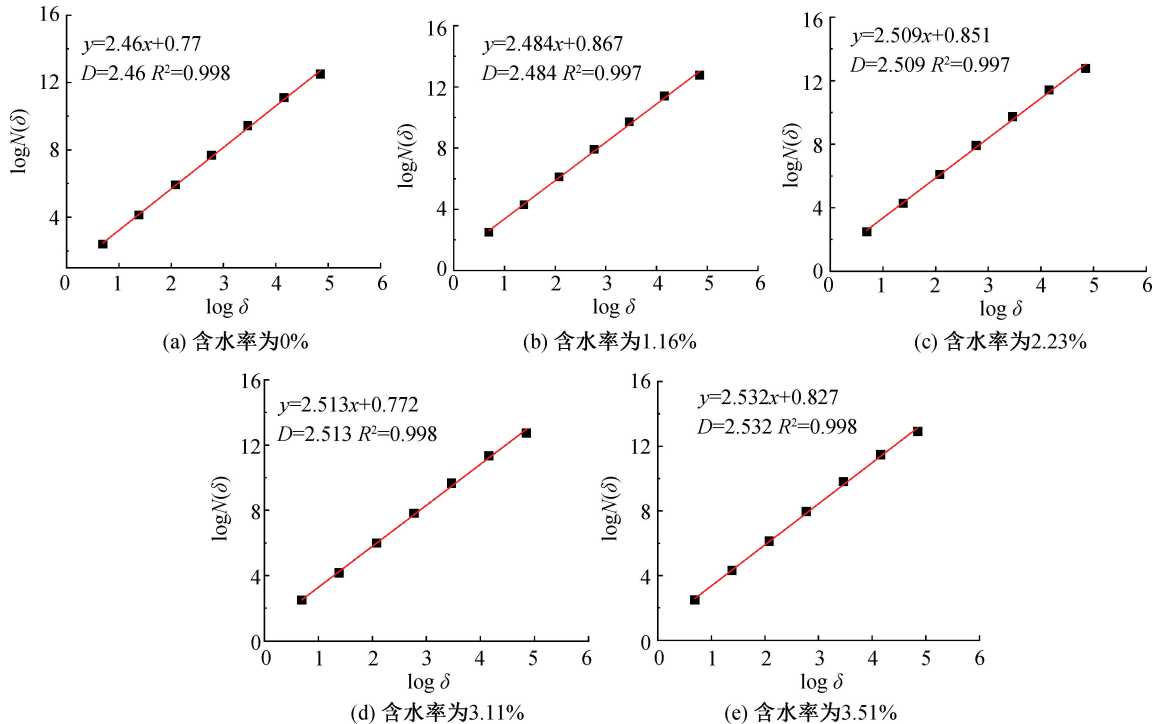


图 6 断裂面形貌分形维数

Fig. 6 Fractal dimension of fracture surface morphology

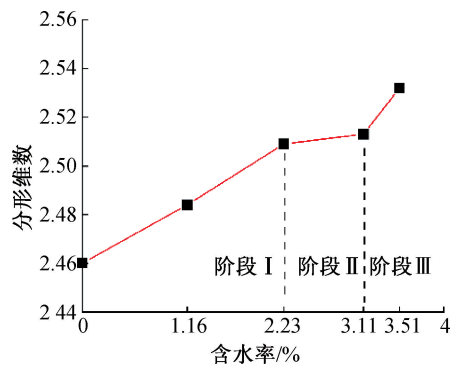


图7 分形维数的变化趋势

Fig. 7 Variation trend of fractal dimension

胶结带在水的软化作用下塑性增大,断裂面复杂程度增加;当 $3.11\% \leq \text{含水率} \leq 3.51\%$ 时,分形维数稳定增长,此时砂岩结构对水的敏感性再次进入活跃期,可塑性缓慢增大,断裂面不规则性增加,分形维数相应增大。

#### 2.4 力学参数与分形维数的关系

基于2.3节分析,利用分形理论将砂岩断裂面的结构特征进行量化,通过分析断裂面分形维数与力学参数的关系,可以进一步帮助理解岩石的劣化机制,这是认识岩石损伤演化过程的一个重要方法。砂岩断裂面分形维数与力学参数的关系如图8所示。

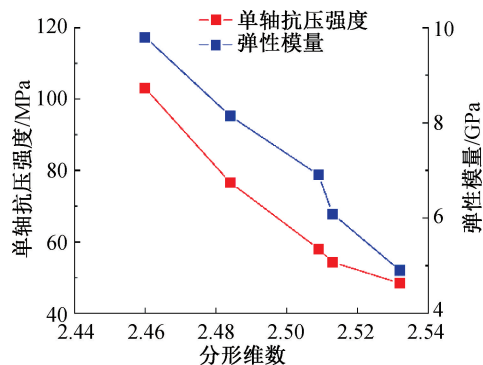


图8 分形维数与力学参数的关联图

Fig. 8 Correlation diagram between fractal dimension and mechanical parameters

由图8可知,砂岩的单轴抗压强度和弹性模量的变化与分形维数的趋势表现出良好的一致性,即单轴抗压强度和弹性模量随着分形维数的增大而减小。结合前文分析,分形维数越大,断裂面特征越复杂,力学强度越低。由岩石矿物成分分析可知,砂岩中伊利石、绿泥石等黏土矿物在水的作用下产生体积应力,胶结填充物不断溶蚀、破坏,最后导致骨架颗粒间接触状态趋于松散。同时水

分子更容易进入细小的孔隙导致微裂隙增加,使砂岩内部结构体系进一步发生破坏。两者共同作用下,砂岩力学强度大幅下降。另一方面,水软化了砂岩内部颗粒的胶结程度,随着轴向应力的加载,骨架颗粒间产生摩擦滑动,在宏观主裂隙和次生裂隙的共同作用下,砂岩断裂面的局部坡度和起伏度明显增大,表现为分形维数随含水率增大而增大。图8展现了砂岩断裂面分形维数与力学参数存在良好的对应关系,这也说明,水的存在直接改变了砂岩内部结构的微观破坏机制,对应到宏观维度上表现为断裂面形态的复杂多变,力学性能表现为单轴抗压强度和弹性模量降低。

基于上述分析,砂岩断裂面复杂程度与内部结构劣化程度直接相关,可以通过分形维数的变化趋势反映内部结构的劣化情况。此外,通过砂岩断裂面分形维数建立其宏观断裂面特征与力学参数的联系,可以作为评价砂岩力学性能的一种方法。

### 3 结论

1)随着含水率的增加,砂岩单轴抗压强度和弹性模量呈非线性降低的规律。水对砂岩结构劣化可分为急剧增长阶段、稳定增长阶段、增长阶段,含水率为1.12%时,单轴抗压强度和弹性模量劣化度均达到峰值。

2)随着含水率的增加,砂岩的宏观破坏形态由单一的剪切破坏向轴向劈裂破坏变化。

3)通过分形维数量化宏观断裂面的复杂程度,进而从微观尺度定量描述了砂岩的劣化程度,即分形维数与劣化程度呈正相关关系,因此,可以通过分形维数的变化趋势侧面反映砂岩的力学性能。

#### 参考文献:

- [1] OGILA W A M. Analysis and assessment of slope instability along international mountainous road in North Africa [J]. *Natural Hazards*. 2021, 106(3): 2479-2517.
- [2] LI Q, WANG Y M, ZHANG K B, et al. Field investigation and numerical study of a siltstone slope instability induced by excavation and rainfall [J]. *Landslides*. 2020, 17(6): 1485-1499.
- [3] ZHANG X, WANG X, XU Y. Groundwater environment and related potential engineering disasters of deep underground space in Shanghai [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022, 81(5): 203.

- [4] XU Z, LIN P, XING H, et al. Hydro-mechanical coupling response behaviors in tunnel subjected to a water-filled karst cave[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, 54(8): 3737-3756.
- [5] LI H, QIAO Y, SHEN R, et al. Effect of water on mechanical behavior and acoustic emission response of sandstone during loading process: Phenomenon and mechanism[J]. *Engineering Geology*. 2021, 294: 106386.
- [6] KODAMA J, GOTO T, FUJII Y, et al. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, 62: 1-13.
- [7] ZHAO K, YANG D, ZENG P, et al. Effect of water content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, 142: 104709.
- [8] SHAO J, KANG Y, YOU L, et al. Effect of dry-wet alternations on the mechanical strength of deep tight sandstone[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021, 204: 108750.
- [9] ZHAO J, LU C, DENG L, et al. Impacts of simulated acid solution on the disintegration and cation release of purple rock (mudstone) in Southwest China[J]. *Geomorphology*. 2018, 316: 35-43.
- [10] SONG Z, YANG Z, SONG F, et al. Mechanical responses of freeze-thaw treated natural stone masonry subject to compressive variable amplitude fatigue loading: Insights from stiffness loss and constitutive characterization[J]. *Construction and Building Materials*. 2022, 350: 128908.
- [11] ZHANG Y, ZHAO G, LI Q. Acoustic emission uncovers thermal damage evolution of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, 132: 104388.
- [12] KENETI A, SAINSBURY B. Characterization of strain-burst rock fragments under a scanning electron microscope-An illustrative study[J]. *Engineering Geology*. 2018, 246: 12-18.
- [13] XIE F, XING H, WANG M. Evaluation of processing parameters in high-speed digital image correlation for strain measurement in rock testing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, 55(4): 2205-2220.
- [14] HUANG F, WU C, NI P, et al. Experimental analysis of progressive failure behavior of rock tunnel with a fault zone using non-contact DIC technique[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, 132: 104355.
- [15] YANG J, MU Z, YANG S. Experimental study of acoustic emission multi-parameter information characterizing rock crack development[J]. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020, 232: 107045.
- [16] GHAMGOSAR M, ERARSLAN N. Experimental and numerical studies on development of fracture process zone (FPZ) in rocks under cyclic and static loadings[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016, 49(3): 893-908.
- [17] ZHANG H, LU K, ZHANG W, et al. Quantification and acoustic emission characteristics of sandstone damage evolution under dry-wet cycles[J]. *Journal of Building Engineering*. 2022: 103996.
- [18] 朱其志, 陈毓栋, 余健, 等. 不同状态灰砂岩应力松弛特性试验及本构模型研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(1): 38-45.
- [19] YANG H, LOURENCO S D N, BAUDET B A, et al. 3D Analysis of gravel surface texture[J]. *Powder Technology*. 2019, 346: 414-424.
- [20] MACEK W, BRANCO R, KORPYS M, et al. Fractal dimension for bending-torsion fatigue fracture characterisation[J]. *Measurement*. 2021, 184: 109910.
- [21] LU Q, QIU Q, ZHENG J, et al. Fractal dimension of concrete incorporating silica fume and its correlations to pore structure, strength and permeability[J]. *Construction and Building Materials*. 2019, 228: 116986.
- [22] PANIGRAH C, SEAL A, MAHATO N K. Quantitative texture measurement of gray-scale images: Fractal dimension using an improved differential box counting method[J]. *Measurement*. 2019, 147: 106859.

(责任编辑 张爱丽)