

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.019

巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究

申培武, 唐辉明, 汪丁建, 何 成, 张雅慧

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 红层泥岩受水的影响易诱发多种工程地质灾害, 开展红层泥岩干湿循环崩解性质的研究具有重要意义。选取三叠系巴东组(T_2b^4)紫红色泥岩开展室内干湿循环崩解试验, 每次干湿循环后筛分试样, 通过称量获得各组分质量, 并用图像处理技术提取每次筛分后岩石块体的形态特征参数。以此为基础用分形几何、灰色关联理论研究红层泥岩崩解过程中颗粒的分形与形态特征, 从而建立评价红层泥岩稳定程度的模型。研究结果表明: 巴东组紫红色泥岩室内干湿循环崩解试验中, 粒径大于 10 mm 的块体崩解剧烈, 且崩解过程主要集中在前 8 次循环, 经历 12 次循环后停止; 崩解过程中红层泥岩的分布分形维数在前 8 次循环中增加迅速, 与红层泥岩崩解程度的变化规律相对应, 随红层泥岩停止崩解而稳定在 2.20; 各粒组颗粒圆形度与覆盖盒维数的变化特征与红层泥岩崩解程度的变化规律也具有对应关系, 随其崩解的停止而逐渐趋于稳定; 灰色关联结果表明: 崩解过程中红层泥岩圆形度的变化特征能更好地反映其崩解的状态, 对工程建设中红层泥岩稳定程度的评价具有一定的指导意义。

关 键 词: 红层泥岩; 干湿循环; 崩解; 分形; 圆形度; 稳定性评价

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-1990-09

Disintegration characteristics of red-bed mudstone of Badong Formation under wet-dry cycles

SHEN Pei-wu, TANG Hui-ming, WANG Ding-jian, HE Cheng, ZHANG Ya-hui

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Since various water-induced geological disasters occur in the red-bed mudstone, it is important to study disintegrating states of red-bed mudstone under dry and wet cycles. A series of wet and dry cycle tests was conducted on mudstone samples from Triassic Badong Formation. After each cycle, every group of screened particles was weighed, and morphological parameters of rock sample were also obtained using an image processing technique. With the combination of the fractal geometry theory and the gray relational analysis, the fractal characteristics of size distribution and the morphological characteristics of rock particles were gained. Thus, a new model was established to evaluate the stability of the red-bed mudstone. The results show that rock particles with a size larger than 10 mm disintegrated dramatically, which mainly occurred in former eight times cycles and tended to stop after 12 times cycles. Corresponding to the evolution of disintegration process, the fractal dimension of size distribution rapidly increased and stabilized at around 2.20 by the end of disintegration. Meanwhile, both the circularity of rock particles and the dimension of covering boxes showed correlations with disintegrating degree and eventually stabilized when the disintegration ended. From the gray relational analysis, the variation characteristics of circularity of the red-bed mudstone well reflect its disintegrating state. Therefore, the stability evaluation of the red-bed mudstone has a significant guidance in engineering construction.

Keywords: red-bed mudstone; cyclic wetting and drying cyclic; disintegration; circularity; stability evaluation

1 引 言

红层泥岩广泛分布于我国南方地区, 其物理力学性质在很大程度上决定了该地区相关工程的建设

和地质灾害防治的实施。红层泥岩富含黏土矿物, 遇水极易膨胀软化, 因而, 水是影响红层泥岩物理力学性质的重要因素, 红层区斜坡、路基、坝基等失稳问题的发生大多与水的影响有关^[1-12]。

收稿日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 41230637); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No. 2011CB710606)。

Foundation item: Project supported by the Key Program of National Science Foundation of China (41230637) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2011CB710606).

第一作者简介: 申培武, 男, 1994 年生, 硕士, 主要从事工程地质和岩土工程方面的学习和研究工作。E-mail: pwshecug@126.com

通讯作者: 唐辉明, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质模拟和地质灾害防治研究工作。E-mail: tanghm@cug.edu.cn

水与红层泥岩相互作用的研究一直备受学者和工程人员的关注,相关研究主要集中在以下方面:

(1) 从宏观和微观层面研究红层泥岩遇水崩解机制,建立本构模型研究其变形破坏机制,如:苏天明等^[2]、吴道祥等^[3]在现场地质调查和室内试验的基础上指出,黏土矿物的含量是影响红层泥岩崩解的主要因素之一,红层泥岩内部结构的破坏是其崩解的基础;陈从新等^[4]、张家铭等^[5]给出了基于红层泥岩压缩破坏的本构模型,并指出其对工程建设的参考意义。(2) 从红层泥岩的崩解性与其不同含水状态的相互关系方面,研究水对红层泥岩崩解速率的影响,如:吴益平等^[6]、郭永春等^[7]、Zhang 等^[1]指出,水是影响红层泥岩崩解的重要因素,并且红层泥岩含水率越大,其崩解速率越快,崩解程度越高。(3) 从水岩相互作用方面研究水对红层泥岩强度的影响,并改良其力学性质,如:柴波等^[8]、Zhang 等^[9]通过对红层泥岩的研究指出,泥岩遇水易膨胀和软化是导致其强度降低的一个重要原因;祝艳波等^[10]、陈湘亮等^[11]则通过物理手段对红层泥岩的力学性质改良,来满足实际工程需求。尽管如此,针对红层泥岩的相关研究仍存在一些不完善之处,如:有关红层泥岩水理力学性质的研究缺少对其崩解过程中颗粒变化特征的考虑;有关红层泥岩崩解特性的研究往往以其崩解破坏结果为基础,缺少对其崩解过程的分析与评价;对评价影响红层泥岩稳定程度的因素未开展系统研究,缺少判断评价效果的相关理论。

鉴于此,本文首先开展了红层泥岩室内干湿循环崩解试验,分析了红层泥岩崩解过程中颗粒的级配特征。以此为基础,引入了分形理论和 MATLAB 数字图像处理方法,研究了红层泥岩崩解过程中颗粒的质量、粒径、形态分布特征,指出了其在评价红层泥岩稳定程度方面的指导意义。最后,引入灰色关联理论,研究了用分布分形维数、圆形度、覆盖盒维数模型评价红层泥岩崩解程度的效果。

2 红层泥岩干湿循环崩解试验

2.1 试验思路

试样取自三叠系巴东组第四段(T_2b^4)紫红色泥岩,颜色偏紫红,天然密度为 2.50 g/cm^3 ,天然含水率为 0.50%,黏土矿物成分以伊利石、高岭石及绿泥石为主,碎屑成分以石英为主,单轴抗压强度值约为 15 MPa。

本文试验思路如图 1 所示。利用制备好的巴东组红层泥岩块体试样,首先开展干湿循环试验,对

每次干湿循环后的试样筛分,通过称量获得各组分质量,并采用图像处理技术提取每次筛分后岩石块体的形态特征参数。以此为基础采用分形几何理论研究红层泥岩崩解过程中颗粒的质量、粒径分形和形态特征。最后,以红层泥岩干湿循环崩解试验过程作为一个评价系统,通过灰色关联理论建立颗粒质量、粒径、形态特征与红层泥岩稳定程度的定量关系。

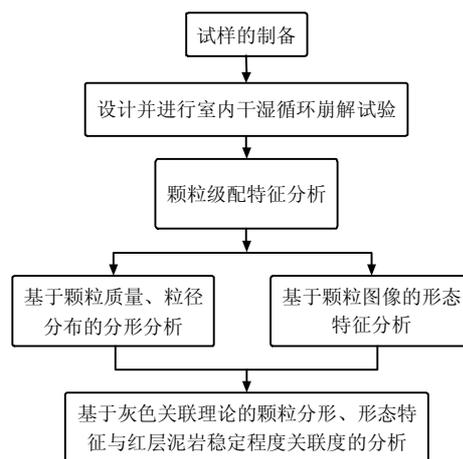


图 1 红层泥岩干湿循环试验思路

Fig.1 Flow chart of a cyclic wetting and drying test of red-bed mudstone

2.2 试验过程

试验过程中,取原岩室内烘干 24 h 去除水分,用保鲜膜密封。试验前制取块状岩样,单个岩样重 145 g 左右,再次烘干 24 h 至完全去除水分,以保鲜膜密封作为试样。试验过程中每隔 24 h 分别浸泡和烘干试样一次,每次烘干后均过网筛称量各组分质量,并拍摄各级配岩块图像,直到试样停止崩解(试验过程中试样主要状态见图 2)。具体试验步骤如下。

(1) 选取代表性原岩试样 6 块拍照,称取试样总质量并作记录,将试样置于透明水缸。

(2) 取质量为岩样总质量 3 倍的去钙镁离子水,沿缸壁缓慢倒入透明水缸,拍照并记录。

(3) 取保鲜膜密封水缸,于室内自然条件下静置。

(4) 记录浸泡 30 min 后试样的变化并拍照。

(5) 待试样浸泡 24 h,拍照并带水缓慢过 0.075 mm 筛,保存滤液。

(6) 将试样轻移于干净托盘,拍照后置于烘箱,设置温度为 $105 \text{ }^\circ\text{C}$,连续热烘 24 h。

(7) 充分烘干后,启动风箱保持试样干燥并冷

却至室温,拍照并称取质量,分别过 10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 mm 网筛,并做筛分记录。

(8) 随机选取筛分后的各粒组颗粒每组 20 粒,编号为 1~20[#](小于 20 颗的粒组颗粒全部编号,大于 20 颗的粒组颗粒随机挑选 20 颗编号),并分粒组拍照(拍照时保证相机位于颗粒正上方,即获得颗粒正投影)。

(9) 重复步骤(2)、(3)、(5)~(8),直至各粒组颗粒含量百分比保持不变,结束试验。

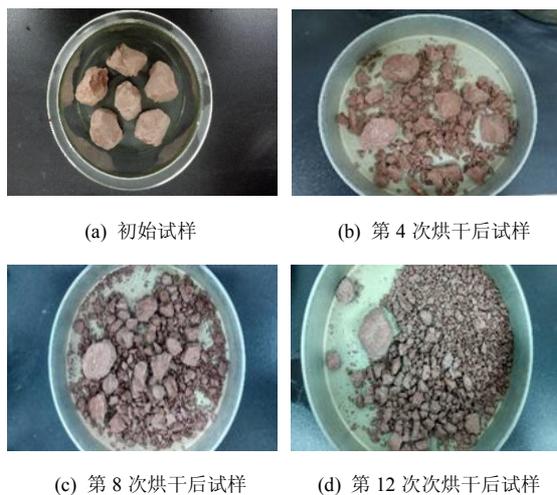


图2 试样主要崩解状态
Fig.2 Mainly disintegrated states of specimens

2.3 分析方法

本文用分形理论分析红层泥岩崩解过程中颗粒质量粒径的分布特征,同时,用 MATLAB 图像处理模块提取颗粒的形态特征,最后通过灰色关联理论研究上述特征值与红层泥岩稳定程度的关联程度。限于篇幅,下面简要介绍分形理论、MATLAB 数字图像处理方法和灰色关联理论的基本原理。

2.3.1 分形理论

分形理论主要用于描述物体局部与整体的非线性相似特征,一般以分形维数定量表示^[13-14]。研究表明,岩石的破碎规律为非线性问题^[15],破碎岩石颗粒的质量和粒径遵从 Weibull 分布^[16],变换可得颗粒质量随粒径分布的双对数函数。该双对数函数表示为

$$\lg \left[\frac{M_{(r<R)}}{M_0} \right] = \theta \lg \left(\frac{R}{R_0} \right) + b \quad (1)$$

式中: $M_{(r<R)}$ 为粒径小于 R 的颗粒总质量; M_0 为颗粒总质量; R 为某一指定粒径; b 、 θ 是不为 0 的常数,由颗粒粒径、数量、质量间的相互关系得

分布分形维数 D , 即

$$D = 3 - \theta \quad (2)$$

2.3.2 MATLAB 数字图像处理方法

目前,分析颗粒形状的方法基本有两种,分别为 Fourier 展开法和工程中常用的形状因子法^[17-18]。常用的形状评价参数包含圆形成度和实用球形度^[19-20],本文采用前者。

圆形成度 s 是颗粒投影等效面积的圆周长与投影轮廓实际周长的比值,即 $s = 2\sqrt{\pi A} / S$, 其中 A 为颗粒扫描投影面积, S 为颗粒扫描投影周长。

在 MATLAB 中可直接调用相关图像处理函数模块实现对颗粒 RGB 图像的处理。编写 MATLAB 代码并运行提取颗粒的形态特征几何参数,进而计算得到颗粒的形状评价参数。本文使用 MATLAB 来获得颗粒的圆形成度和覆盖盒维数^[13], 盒维数是一类基于形状覆盖的分形维数,有如下定义。

设 F 是域 R^n 上一个非空的有界子集, $N_\delta(F)$ 是特征长度最大为 δ , 且可以覆盖有界子集 F 的集的最少数, 则 F 的下、上盒维数分别定义为

$$\underline{\text{Dim}}(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (3)$$

$$\overline{\text{Dim}}(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (4)$$

如果下、上盒维数相等,那么将相等的这个值作为 F 的盒维数,记为

$$\text{Dim}(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (5)$$

2.3.3 灰色关联理论

灰色关联理论的核心是灰色关联度,灰色关联度 ρ_{0i} 用来比较各影响因素 i 在发展期间与主体 0 相关性的,以一种定量描述和比较的方法找出各因素与主体的主要关系,从而达到抓住事物主要特征的目的,运用较广泛的灰色关联理论为邓氏灰色关联理论^[21]。由邓氏灰色关联理论计算各序列的灰色关联系数 ξ , 其表达式为

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\text{Min}_i \text{Min}_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho A}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho A} \quad (6)$$

式中: $A = \text{Max}_i \text{Max}_k |X_0(k) - X_i(k)|$; $\xi_{0i}(k)$ 为比较序列 $X_i(k)$ 对参考序列 $X_0(k)$ 在点 k 处的关联系数; ρ 为分辨系数,范围为 $[0,1]$,一般取为 0.5; $k=1,2,\dots$ 。得到灰色关联系数 ξ 后,用下式计算系统中各比较序列对参考序列的灰色关联度 ρ , 即

$$g(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(k) \quad (7)$$

3 试验结果与分析

3.1 颗粒级配特征

试样在第 1 次干湿循环中浸泡 30 min 后吸水明显，产生较多气泡，浸泡液较浑浊。试样干湿循环 12 次后趋于稳定，循环至 13 次后结束本次试验。试样在第 1 次浸泡后尚未明显崩解，实际上试样表面仅有部分裂缝，且现象不明显，因此，未对第 1 次烘干后的试样作筛分处理。对第 2 次及其后烘干的试样作筛分处理并作颗分记录，得到各粒组颗粒含量百分比随干湿循环次数变化曲线（见图 3）。

同时，对每次筛分后粒径大于 1 mm 的粒组随机取样编号，本次试验所取粒组为 ≥50 mm、10~50 mm、5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm 5 组，限于篇幅仅给出第 2 次筛分后各粒组编号颗粒（见表 1）。

由图 3 知，各粒组颗粒含量在前 8 次干湿循环中变化显著，在第 8 次到第 12 次干湿循环中有小幅度的变化，之后各粒组质量趋于稳定，说明试样的崩解趋于停止。

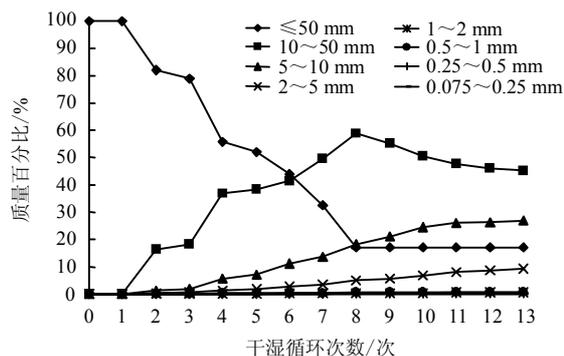
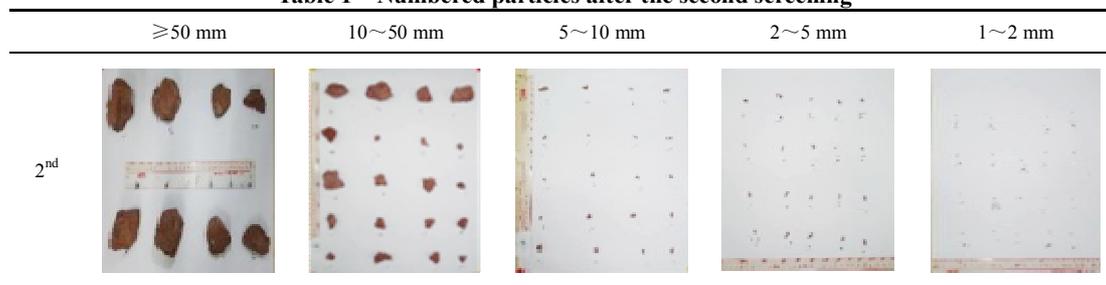


图 3 各粒组颗粒含量百分比变化曲线
Fig.3 Percentage curves of each particle content

大于 50 mm 粒组颗粒含量曲线在第 1 次干湿循环中并无明显变化，在第 2 至第 8 次干湿循环中变化明显，主要原因是试样的黏土矿物含量较高，极易吸水膨胀。在第 1 次循环时，浸泡液沿试样表层裂隙进入，裂隙通道上易溶矿物被带走，黏土矿物吸水膨胀，烘干条件下失水收缩，产生新的裂隙，试样处于裂隙扩张阶段；在第 2 次至第 8 次干湿循环中，浸泡液不断浸入试样裂隙，新的裂隙不断产生，导致试样裂隙的不断扩张，当试样内部与外部裂隙扩展至贯通时，便有颗粒从试样表层脱落或试样部分崩解。

表 1 第 2 次筛分后编号颗粒
Table 1 Numbered particles after the second screening



10~50 mm 粒组颗粒含量变化曲线在前 4 次循环中增长较明显，该阶段试样快速崩解，并以大粒径颗粒脱落为主；在第 4 次至第 8 次循环过程中增加趋势减缓，该阶段大于 50 mm 颗粒虽处于快速崩解阶段，10~50 mm 颗粒在循环过程中也由于裂隙扩展和烘干过程中裂隙的膨胀而发生崩解，破碎成更小粒径的颗粒，导致增加趋势减缓；在第 8 次循环后，大于 50 mm 颗粒基本上处于停止崩解状态，而更小粒组颗粒的形成主要依赖于 10~50 mm 颗粒的崩解破碎，因此，该粒组颗粒含量呈现略微降低的趋势。从各粒组颗粒含量的变化趋势中可以看出，随着崩解级数的增加，较小粒径颗粒的崩解越

来越困难，这主要是由于在崩解过程中，裂隙不断扩展和贯通，从而可贯通裂隙不断减少，较小粒径颗粒由于裂隙较小且少而不易发生崩解，因此，其余各粒组颗粒以接收较大粒组颗粒的崩解补给为主，变化曲线处于缓慢增加状态。

3.2 颗粒质量粒径分布分形特征

取筛网孔径作为颗粒粒径，由试验颗分结果，按式 (1) 拟合红层泥岩崩解过程中颗粒质量-粒径分布双对数曲线（见图 4）。

由拟合结果知，随着红层泥岩颗粒粒径分布的逐渐稳定，曲线趋于重合。结合式 (2) 计算得到红层泥岩崩解过程中的分布分形维数（见表 2，循环

次数采用缩写形式，如第2次为2nd，下同)。绘制红层泥岩分布分形维数随干湿循环次数的变化曲线（见图5）。可知，分形维数在前10次循环中呈现增长趋势，之后趋于稳定，这与试样的崩解程度变化特征相对应。分布分形维数的变化趋势也反映出试样崩解的速率，一般情况下，分布分形维数增加地越快，表明红层泥岩破碎地越厉害，反之，表明红层泥岩越趋于稳定，且分形维数越大，表明粗颗粒越少，而细颗粒越多。因而，根据红层泥岩崩解过程中泥岩颗粒的分布分形维数来判断红层泥岩的崩解程度，从而进行下一步的工程活动是有意义的。

3.3 颗粒形态特征

获取颗粒形状几何参数的方法较多，本文使用MATLAB 数字图像处理模块来处理试验过程中红层泥岩崩解所得颗粒的 RGB 图像，并编写代码获得颗粒的几何形状参数和覆盖盒维数，进而计算得到红层泥岩的形状评价参数。

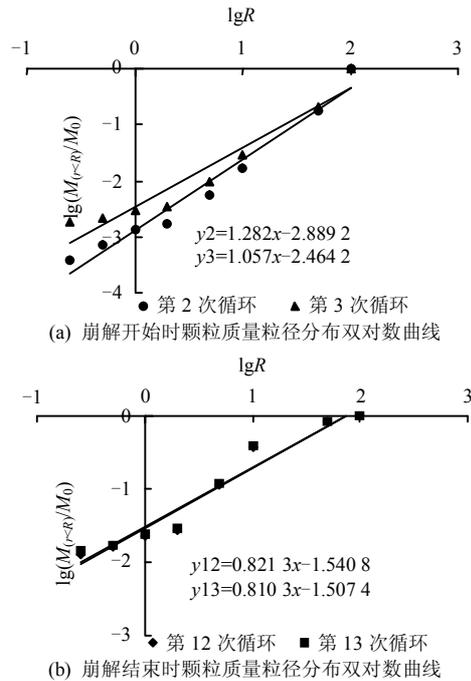


图4 第2次至第13次干湿循环后颗粒质量粒径分布双对数曲线

Fig.4 Distributed double logarithmic curves of the mass and sizes of particles between the 2nd and 13th cycles

表2 各次干湿循环后试样的分形维数

Table 2 Fractal dimensions of samples after cyclic wetting and drying

循环次数	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th	10 th	11 th	12 th	13 th
分形维数	1.72	1.94	1.99	2.00	2.04	2.06	2.09	2.11	2.15	2.17	2.18	2.19

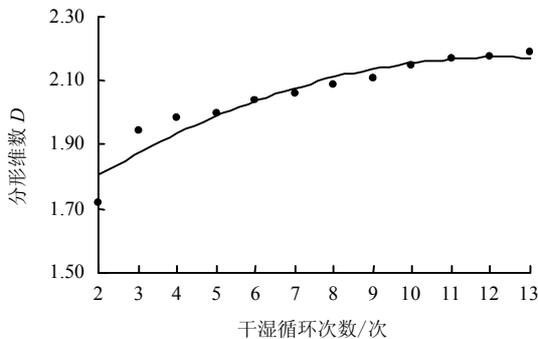


图5 试样分形维数变化曲线

Fig.5 Curve of fractal dimensions of samples

本文对试验过程中颗粒图像的处理包括图像的获取、读取、灰度处理、降噪处理、二值化处理、优化处理、标记、边缘提取、特征值的获取几个部分^[22-23]（主要处理结果如图6所示）。首先，验证覆盖盒维数计算代码的准确性，验证对象为二维正方形。结果显示，本文代码计算正方形得到的双对数曲线斜率为-1.9576，截距为11.8446，面积为9409（像素单位），周长为388（像素单位），即盒维数约为1.96，圆形度为0.89，与其覆盖盒维数理

论值2相差2%，与其圆形度理论值一致，因此，认为本文的计算方法是合理的。

用MATLAB 数字图像处理模块对试验中编号为527的颗粒处理，得到各颗粒的形态特征几何参数后，计算得到各颗粒的圆形度和覆盖盒维数。为减小分析误差，同一粒组颗粒的评价参数在同一次筛分中取平均值。得到各粒组颗粒圆形度和覆盖盒维数随干湿循环次数变化的曲线（见图7、8）。需要指出的是，圆形度是指颗粒形状与标准圆的相似程度，其值小于等于1，且与1的绝对差值越小，表明颗粒的形状与标准圆越相近。由图7知，各粒组颗粒的圆形度初始值均在0.80~0.90之间，在前12次循环中有一定的增长过程，之后便趋于稳定，各粒组颗粒的圆形度最终稳定在0.90左右。

显然，各粒组颗粒圆形度的变化趋势与分布分形维数的变化趋势相近，由崩解过程中各粒组颗粒含量变化曲线能得到较好的解释。但也存在明显差异，如粒径1~2mm颗粒的圆形度在循环过程中一直较高，这与其形成过程密切相关，该粒组颗粒粒径较小，基本上由较大粒径颗粒在摩擦过程中形成，

经历了较长的圆化过程，因此，其圆形度普遍高于其他粒组颗粒。



图 6 MATLAB 分步处理颗粒图像结果
Fig.6 Images process results by MATLAB

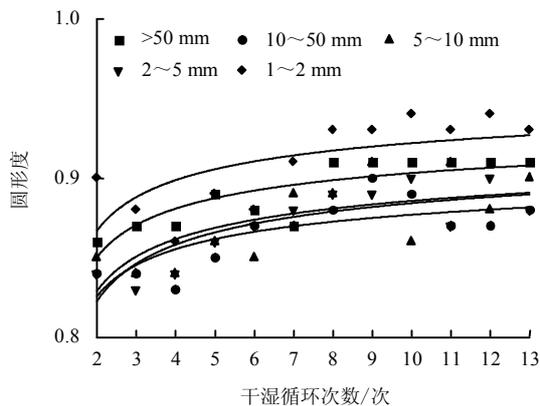


图 7 各粒组颗粒圆形度变化曲线
Fig.7 Variation curves of roundness of particles

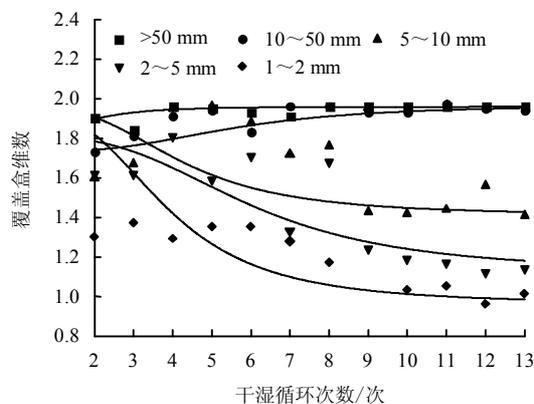


图 8 各粒组颗粒覆盖盒维数变化曲线
Fig.8 Box-dimension curves of particles

由覆盖盒维数计算结果得到同一粒组颗粒圆形度与覆盖盒维数的变化趋势相对应的结论，实际上圆形度越大的颗粒，其轮廓越光滑，覆盖颗粒轮廓所需“盒子”越少，因而，覆盖盒维数越小。因此，用红层泥岩崩解过程中颗粒的圆形度和覆盖盒

维数来评价其稳定程度也是有意义的。

3.4 评价参数灰色关联分析

前述分析表明了以分布分形维数、圆形度与覆盖盒维数评价红层泥岩稳定程度的可行性，而实际工程建设中往往需要一种高效快捷的评价方式，从而优选红层泥岩崩解程度评价参数，对工程建设提出合理的建议。

本文对巴东组红层泥岩崩解过程中颗粒的质量、粒径及形态分布特征与其稳定程度的相互关联进行研究。因此，可将本文红层泥岩的崩解过程作为一个系统，以稳定程度为主体，其崩解过程中颗粒的质量、粒径及形态分布特征为比较因素。将系统量化以便进行灰色关联分析。岩石的耐崩解性指岩石在干湿条件下抵抗软化剥落的性质，参考耐崩解试验规范的相关定义^[24]，取第 2 次至第 13 次每次循环后粒径大于 2 mm 的颗粒总质量与上一次循环粒径大于 2 mm 的颗粒总质量的比值作为红层泥岩的稳定度 DS (degree of stability)，即

$$DS_{(i,i+1)} = \frac{M_{i+1}(R \geq 2)}{M_i(R \geq 2)} \quad i=1,2,\dots \quad (8)$$

按式 (8) 计算得到每次循环后红层泥岩相对于前一次的稳定度(见表 3)。大于 50 mm 与 1~2 mm 颗粒的圆形度随干湿循环变化较大，取此两个粒组作为圆形度比较因素。同理，将 5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm 3 个粒组作为覆盖盒维数比较因素。得到该系统的参考序列(稳定度)、分布分形维数比较序列、圆形度比较序列 (≥ 50 mm, 1~2 mm 各粒组颗粒)和覆盖盒维数比较序列(5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm 各粒组颗粒)。

表 3 各次干湿循环下试样的稳定度

Table 3 Stability of samples after cyclic wetting and drying

循环次数	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th	10 th	11 th	12 th	13 th
$DS_{(i,i+1)}$	0.992	0.998	0.997	0.998	0.998	0.999	0.997	0.996	0.995	0.997	0.998	0.998

参考序列和比较序列元素均为无量纲元素,且数量级相差不大(最大相差小于两个数量级),可直接进行灰色关联分析。计算得到各比较序列相对于参考序列的关联度大小为

$$\begin{aligned} g_{0,2(1-2\text{ mm})} > g_{0,2(\geq 50\text{ mm})} > g_{0,3(1-2\text{ mm})} > \\ g_{0,3(2-5\text{ mm})} > g_{0,3(5-10\text{ mm})} > g_{0,1} \end{aligned}$$

在这些评价红层泥岩稳定度的序列中,圆形成度与红层泥岩稳定度的关联度最高,大于等于 0.887,评价效果较好;其次为盒维数,关联度大于等于 0.509,与关联度最高者相差 44.67%,评价效果弱于前者;与红层泥岩稳定度关联程度最低者为基于颗粒质量粒径分布的分形维数,关联度为 0.384,与关联度最高者相差 58.26%。

由圆形成度变化曲线(见图 7)可知,红层泥岩的磨圆越好,其崩解程度越小,原因在于:磨圆越好的颗粒再次被挤磨的概率小,且磨圆度越高的颗粒形成过程越久,红层泥岩也越趋于稳定。随着红层泥岩稳定度的增加,覆盖盒维数有整体下降的趋势,实际上,对于越规则的形状,覆盖所使用的“盒子”数目越少,导致盒维数越小,这也体现出规则形状颗粒有利于红层泥岩稳定的事实。因此,覆盖盒维数由于可表征形状特性而与红层泥岩有较高的关联度,由于表征形状更倾向于二维正方形,使其与红层泥岩稳定度的关联度低于圆形成度。由分布分形维数变化曲线(见图 8)知,至红层泥岩崩解趋于稳定时,其分形维数增长 21.46%,且随循环次数的增加整体上表现缓慢增加的态势。小粒径颗粒质量越大,所得分形维数越高,而小粒径颗粒质量的增加,可等同为小颗粒数量的增加,因此,可将本文中影响红层泥岩稳定度的因素分为两类:一类为红层泥岩颗粒的形态,磨圆越好越有利于红层泥岩的稳定,且用其变化特征来评价红层泥岩稳定度的效果较好;另一类为红层泥岩的颗粒级配,分布分形维数的增加,即小颗粒质量和数量的增加,有利于红层泥岩稳定度的提高,但用其变化特征来评价红层泥岩稳定度的效果弱于前一类。

上述分析结果表明,崩解过程中红层泥岩圆形成度的变化能更好地反映其崩解的状态,这对工程建设具有指导意义。实际工程中,在可能影响工程建设的红层泥岩区现场取样,分析并得到样本的相关特征值,与室内试验结论相比较,若样本相关特征值偏小,说明红层泥岩未停止崩解,此时需要采取一定的工艺来促进或者抑制红层泥岩区泥岩的崩解,建议采用前者以进一步取样得到相关特征值,

重复与试验值对比直到接近,从而最大程度上消除红层泥岩的崩解性。

4 讨 论

本文研究成果以红层泥岩室内干湿循环崩解试验为基础得到,尚有以下几点需做进一步讨论。

(1) 试验结束后,仍有较大粒径的块状试样未发生崩解,说明即使是同一区域的岩样,性质也不尽相同。较大粒径(大于 10 mm)颗粒的崩解自由性强,崩解速率的变化规律不如小颗粒明显,这与较大颗粒内部结构复杂和矿物成分含量高而对崩解有较大的敏感性相关。

(2) 不同粒组颗粒的圆形成度和覆盖盒维数变化曲线差异性较大,这与获得颗粒 RGB 图像时颗粒的摆放角度有很大的关联。因而在实际工程应用中应根据试验结果综合选取评价参考曲线。

(3) 灰色关联结果表明,对同一评价参数,较小粒组颗粒与试样稳定度的关联度大于较大粒组颗粒,因而,在工程应用中选择较小粒组的颗粒进行稳定度评价效果更好,但不宜过小以免增加实施难度。

(4) 自然条件下红层泥岩的崩解条件更为复杂,并且颗粒的形态具有各向异性,因此,笔者在后期红层泥岩的研究中会注重完善试验条件,获得颗粒的多角度形态。

5 结 论

(1) 巴东组紫红色泥岩(T²b⁴)室内干湿循环崩解试验过程中,粒径大于 10 mm 的试样崩解剧烈,且崩解过程主要集中在前 8 次循环中,试样经历 12 次循环后基本停止崩解。

(2) 红层泥岩的崩解具有分形特征,崩解过程中红层泥岩的分布分形维数在前 8 次循环中增加快速,与红层泥岩崩解程度的变化特征相对应,随红层泥岩崩解的停止而稳定在 2.20 左右。

(3) 红层泥岩崩解过程中,各粒组颗粒的圆形成度在前 8 次干湿循环中增加迅速,之后逐渐趋于稳定,这与颗粒的盒维数变化规律相对应,后者在前 8 次干湿循环中迅速减小,之后趋于稳定。两者变化规律与红层泥岩的崩解程度也相对应,均随红层泥岩崩解的停止而逐渐趋于稳定。

(4) 灰色关联的结果表明,在红层泥岩干湿循环崩解的过程中,泥岩颗粒的圆形成度变化特征和覆盖盒维数变化特征与红层泥岩稳定度的关联程度较高,用来作为评价红层泥岩稳定度的指标更合适,

泥岩颗粒的分布分形维数变化特征与红层泥岩稳定度的关联程度较低,可协助评价红层泥岩的稳定度。通过现场分析红层泥岩圆形度、覆盖盒维数、分布分形维数的变化特征来评价红层泥岩的稳定程度对工程决策有一定的指导意义。

参考文献

- [1] ZHANG Dan, CHEN An-qiang, LIU Gang-cai. Laboratory investigation of disintegration characteristics of purple mudstone under different hydrothermal conditions[J]. **Journal of Mountain Science**, 2012, 9(1): 127—136.
- [2] 苏天明, 张艳鸽. 红层泥质岩崩解破坏现象与机理[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2): 9—14.
SU Tian-ming, ZHANG Yan-ge. Phenomenon and mechanism of red bed mudstone disintegration[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2014, 31(2): 9—14.
- [3] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 4173—4180.
WU Dao-xiang, LIU Hong-jie, WANG Guo-qiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 4173—4180.
- [4] 陈从新, 卢海峰, 袁从华, 等. 红层软岩变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 261—271.
CHEN Cong-xin, LU Hai-feng, YUAN Cong-hua, et al. Experimental research on deformation properties of red-bed soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 261—271.
- [5] 张家铭, 刘宇航, 罗昌宏, 等. 巴东组紫红色泥岩三轴压缩试验及本构模型研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 139—143.
ZHANG Jia-ming, LIU Yu-hang, LUO Chang-hong, et al. Triaxial compression test and constitutive model for red Mudstone of Badong formation[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2013, 21(1): 139—143.
- [6] 吴益平, 余宏明, 胡艳新. 巴东新城区紫红色泥岩工程地质性质研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1201—1208.
WU Yi-ping, YU Hong-ming, HU Yan-xin. Research on engineering geological characters of aubergine mudstone of Badong new city zone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1201—1208.
- [7] 郭永春, 谢强, 文江泉. 水热交替对红层泥岩崩解的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 69—74.
GUO Yong-chun, XIE Qiang, WEN Jiang-quan. Effect of the alternation of heat and water on the slaking phenomenon of redbeds[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2012, 39(5): 69—74.
- [8] 柴波, 殷坤龙, 简文星, 等. 红层水岩作用特征及库岸失稳过程分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1092—1099.
CHAI Bo, YIN Kun-long, JIAN Wen-xing, et al. Analysis of water-rock interaction characteristics and bank slope failure process of red-bed[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2009, 40(4): 1092—1099.
- [9] ZHANG Shuai, XU Qiang, HU Ze-ming. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China[J]. **Engineering Geology**, 2016, 204: 1—13.
- [10] 祝艳波, 余宏明, 杨艳霞, 等. 红层泥岩改良土特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 425—433.
ZHU Yan-bo, YU Hong-ming, YANG Yan-xia, et al. Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(2): 425—433.
- [11] 陈湘亮, 王永和, 王灿辉. 泥质粉砂岩改良土路基填料适宜性试验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4287—4294.
CHEN Xiang-liang, WANG Yong-he, WANG Can-hui. Experimental study of suitability of argillaceous siltstone improved soil as filling for subgrade[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2013, 44(10): 4287—4294.
- [12] 张永安, 李峰, 陈军. 红层泥岩水岩作用特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 22—27.
ZHANG Yong-an, LI Feng, CHEN Jun. Analysis of the Interaction between mudstone and water[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2008, 16(1): 22—27.
- [13] 李后强. 分形理论及其在分子科学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
LI Hou-qiang. Fractal theory and its application in molecule science[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [14] 张丹, 陈安强, 刘刚才. 紫色泥岩水热条件下崩解过程的分维特性[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1341—1347.
ZHANG Dan, CHEN An-qiang, LIU Gang-cai. Disintegration characteristics of purple mudstone based on fractal dimension under hydrothermal condition[J].

- Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1341—1347.
- [15] 刘晓明, 赵明华, 苏永华. 软岩崩解分形机制的数学模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2043—2048.
LIU Xiao-ming, ZHAO Ming-hua, SU Yong-hua. Mathematical simulation of fractal mechanism for slaking of soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2043—2048.
- [16] OAKLAND M W, LOVELL C W. Standardized tests for compacted shale highway embankments[R]. Washington D.C: National Research Council, 1982: 15—21.
- [17] 张家发, 叶加兵, 陈劲松, 等. 碎石颗粒形状测量与评定的初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 343—350.
ZHANG Jia-fa, YE Jia-bing, CHEN Jing-song, et al. A preliminary study of measurement and evaluation of break-stone grain shape[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 343—350.
- [18] 王为, 许刘兵, 刘志鹏, 等. 三种碎屑颗粒形态定量分析方法的比较及应用[J]. 地质评论, 2013, 59(3): 553—562.
WANG Wei, XU Liu-bing, LIU Zhi-peng, et al. Comparison and application of three quantitative methods to describe sedimentary particle Shapes[J]. **Geological Review**, 2013, 59(3): 553—562.
- [19] 叶润青, 牛瑞卿, 张良培. 基于多尺度分割的岩石图像矿物特征提取及分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(4): 1253—1262.
YE Run-qing, NIU Rui-qing, ZHANG Liang-pei. Mineral features extraction and analysis based on multiresolution segmentation of petrographic images[J]. **Journal of Jilin University (Earth Science Edition)**, 2011, 41(4): 1253—1262.
- [20] 童枯篙. 粒度与比表面积测量原理[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
TONG Ku-gao. The measurement principle of granularity and specific surface area[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1989.
- [21] 鲁峰, 黄金泉. 基于灰色关联聚类的特征提取算法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(4): 872—877.
LU Feng, HUANG Jin-quan. Feature extraction algorithm of clustering based on grey relational theory[J]. **Systems Engineering-Theory & Practice**.
- [22] 张德丰. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
ZHANG De-feng. Digital image processing based on MATLAB[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.
- [23] 杨书申, 邵龙义. MATLAB 环境下图像分形维数的计算[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 478—452.
YANG Shu-shen, SHAO Long-yi. Estimation of fractal dimensions of images based on matlab[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(4): 478—452.
- [24] 谢松林, 陈友治, 汪继泉. JTE E41—2005 公路工程岩石试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
XIE Song-lin, CHEN You-zhi, WANG Ji-quan. JTE E41—2005 Test methods of rock for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.

上接第 1982 页

- [22] 杨松林, 徐卫亚, 朱焕春. 锚杆在节理中的加固作用[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 604—607.
YANG Song-lin, XU Wei-ya, ZHU Huan-chun. Reinforcement of bolt in joints[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 604—607.
- [23] 朱训国. 地下工程中注浆岩石锚杆锚固机制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
ZHU Xun-guo. The reinforcement mechanics of fully grouted rock bolt in underground engineering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [24] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1976—1985.
YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Analysis of interfacial slip mesomechanics in anchorage section of prestressed anchor cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(10): 1976—1985.
- [25] 张伟, 刘泉声. 基于剪切试验的预应力锚杆变形性能分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2231—2240.
ZHANG Wei, LIU Quan-sheng. Analysis of deformation characteristics of prestressed anchor bolt based on shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2231—2240.
- [26] 鲜学福. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
XIAN Xue-fu. Failure mechanism of layered rock mass[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989.
- [27] JALALIFAR H, AZIZ N. Experimental and 3D numerical simulation of reinforced shear joints[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43(1): 95—103.
- [28] GRASSELLI G. 3D behaviour of bolted rock joints: Experimental and numerical study[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(1): 13—24.