

# 不同 pH 环境下黏土类岩崩解过程分形演化规律

邓 涛, 黄 明, 詹金武

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 基于分形的相似性原理和质量守恒定律, 分别探讨了岩石颗粒的细观分数倍崩解过程及粒组宏观分布模拟崩解方法, 得到了基于颗粒数量统计的岩石崩解分形描述的关联分维计算公式. 在此基础上, 以黏土类岩为研究对象, 分析了不同 pH 环境下岩石颗粒崩解过程的分形演化规律. 结果表明: 初次崩解时溶液 pH 值越小颗粒分形维数越大, pH 值越小分维数趋于稳定所需循环次数越少; 酸性溶液对颗粒崩解分维数的增长起到加速作用, 碱性溶液对颗粒崩解分维数的增加具有阻碍作用且循环多次后分维曲线才渐趋稳定, 但任何溶液条件下黏土类岩崩解的颗粒分形维数最终趋于相等.

**关键词:** 黏土类岩; pH 值; 循环崩解; 分形理论

**中图分类号:** TU458.2

**文献标志码:** A

## Fractal Evolution Law of Clay Rock Disintegration Under Different pH Conditions

DENG Tao, HUANG Ming, ZHAN Jinwu

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Based on the similarity principle and the conservation of mass, the microscopic fraction disintegration and macro distribution of rock particles are discussed separately, and the correlation fractal dimension calculation formula about rock disintegration is also presented. On this basis, the fractal evolution law of clay rock disintegration under different pH conditions is investigated. The results show that, the smaller the pH value, the greater the fractal dimensions in the preliminary stage and the fewer the cycle times to obtain the stable fractal dimension. In addition, the acid solution accelerates the growth of particle fractal dimension, but the alkaline solution plays a role of reverse. It needs more cycle times that the fractal dimension curves become stable in the alkaline conditions. However, the fractal dimension under different pH conditions should tend to be equal ultimately.

**Key words:** clay rock; pH value; cycle disintegration; fractal

theory

黏土类岩形成的物理-化学条件和形成后这些条件的变化对其结构构造都是很敏感的<sup>[1]</sup>. 由碱性介质过渡到酸性介质时, 常伴随出现黏粒的刚性偏极力偶, 导致体系结构的变化. 颗粒微观结构上的研究表明, 高岭石、水云母和蒙脱石颗粒分别在 pH 值等于 8.0、6.0 和 6.5 时会失去稳定, 故黏土类岩在崩解过程中与 pH 值的变化存在联系. 在碱性介质中, 颗粒缺少刚性的静电偶极, 而其表面的负电荷值却增大, 这有利于提高颗粒的稳定性, 并形成足够密实的胶结物. 介质 pH 值由碱性变为酸性将导致黏土矿物颗粒稳定性的急剧丧失, 因此理论上认为酸碱环境对颗粒的崩解过程将起到较大的影响.

由于岩石崩解是由大量的小破碎群体演化所致, 小破碎又由更微小的破裂演化集聚而成, 这种自相似行为必然导致岩石破碎后的破碎块度分布具有自相似分形特征<sup>[2-3]</sup>, 因此岩石的崩解过程具有分形特征<sup>[4-5]</sup>. 赵明华等<sup>[6-7]</sup>根据分形理论建立了模拟红层软岩崩解的数学模型, 结果与实测值基本相同, 进一步证明了软岩的崩解过程可以用分形理论来描述. 现阶段对岩石崩解特性的研究, 主要针对颗粒矿物成分不同或外部刺激环境的改变对岩石崩解特性的影响研究<sup>[5-11]</sup>, 普遍将颗粒质量百分含量分布与崩解次数联立来分析颗粒崩解的分形演化规律. 此外, 从多角度运用分形维数来研究岩石的崩解特性对岩石工程性质的影响也较为普遍, 但极少考虑酸碱环境作用下岩石崩解过程分维特性的差异, 且颗粒崩解分维数也基本是通过建立颗粒粒组质量百分含量与崩解次数的对数关系来确定的. 本文将通过对岩石颗粒崩解过程的模拟分析计算得到不同 pH 环境下不同粒组的颗粒数量, 然后分析颗粒数量分布与崩解循环次数间的响应关系并建立颗粒崩解分维数

的计算公式,从而进一步探讨不同 pH 环境下黏土类岩崩解过程的分形演化规律。

## 1 岩石颗粒循环崩解过程的分形描述

### 1.1 考虑颗粒的细观分数倍崩解过程模拟

对于“分形”的定义,曼德洛布罗特、富克勒等先后进行了描述,但目前仍没有严格和明确的定义,但有一点是公认的,即“系统在局部以某种方式与整体相似”是分形最基本的特征<sup>[12-13]</sup>。因此,根据分形的相似原理,可构造黏土类岩崩解的基本数学模型:1次循环作用下,粒径为  $r$  的颗粒总能崩解为自身大小  $[1/t_1, 1/t_2, \dots, 1/t_i]$  的小颗粒数量  $[a_1, a_2, \dots, a_i]$  个,假定后续崩解过程中存在相同的崩解规律,则第2次循环崩解后得到的粒径为  $[\frac{r}{t_1 t_1}, \frac{r}{t_1 t_2}, \dots, \frac{r}{t_1 t_i}, \frac{r}{t_2 t_1}, \dots, \frac{r}{t_2 t_i}, \dots, \frac{r}{t_i t_1}, \dots, \frac{r}{t_i t_i}]$  的颗粒数量按顺序崩解排列可表示为  $[a_1^2, a_1 a_2, \dots, a_1 a_i, a_2 a_1, \dots, a_2 a_i, \dots, a_i a_1, \dots, a_i^2]$ ;由此不断循环,则崩解  $n$  次后粒径分布为  $[\frac{r}{t_1^{n-1} t_1}, \frac{r}{t_1^{n-1} t_2}, \dots, \frac{r}{t_1^{n-1} t_i}, \frac{r}{t_1^{n-2} t_2 t_1}, \frac{r}{t_1^{n-2} t_2 t_2}, \dots, \frac{r}{t_1^{n-2} t_2 t_i}, \dots, \frac{r}{t_1^{n-2} t_i t_1}, \dots, \frac{r}{t_i^n}]$ 。因此,按任意顺序  $(1/t_1, 1/t_2, \dots, 1/t_n)$  ( $n < i$ ) 崩解后将存在  $n! \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n$  个粒径大小为  $\frac{r}{t_1 t_2 \dots t_n}$  的颗粒,对应质量为

$$m_n = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{n! \cdot (a_1 a_2 \dots a_n) \cdot r^3}{(t_1 t_2 \dots t_n)^3} \rho = \frac{n! \cdot (a_1 a_2 \dots a_n)}{(t_1 t_2 \dots t_n)^3} m \quad (1)$$

式中:  $m_n$  为按任意顺序  $(1/t_1, 1/t_2, \dots, 1/t_n)$  ( $n < i$ ) 崩解后颗粒的质量;  $\rho$  为颗粒密度;  $m$  为崩解前颗粒质量。

每一次循环崩解后将存在许多不同粒径的颗粒,将崩解物中粒径相近的颗粒归并成相同粒组,此时便可获得多个粒组。根据崩解前后质量不变的原理,假定颗粒密度均匀,且1至  $s$  个粒组中对应粒组颗粒数为  $N_1$  至  $N_s$ ,则崩解物粒径组和颗粒数量还应该满足如下质量守恒规律:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \left( \frac{N_1}{T_1^3} + \frac{N_2}{T_2^3} + \dots + \frac{N_s}{T_s^3} \right) = 1 \quad (2)$$

式中:  $s$  为崩解任意次后粒组的划分数量;  $T_s$  为崩解前原颗粒粒径与崩解后该粒组颗粒粒径的比值。但是,按照以上的崩解规律得到颗粒大小及数量极为

复杂,且得到崩解颗粒粒径后按照粒径范围需要重新分组,对于  $N_1$  至  $N_s$  的计算过程极为繁琐,对后续分析过程的开展极为不便,而且随着崩解次数的无限增大,理论上岩石颗粒的数量趋近于无穷大,而粒径趋近于零,这与岩石颗粒崩解最终趋于稳定的规律存在一定偏差。

### 1.2 考虑颗粒崩解的粒组宏观分布模拟

若结合试验结果直接从宏观上对大小相近粒径进行粒组划分,系统分析各个粒组质量百分数的变化规律,并结合密度均匀的假定,则可获得循环崩解过程中各粒组颗粒数量的变化规律。岩石崩解后粒径由大到小的粒组可划分为  $i$  个粒组,即  $(r_1 \sim r_2)$ ,  $(r_2 \sim r_3)$ ,  $\dots$ ,  $(r_{i-1} \sim r_i)$ ,  $(r_i \sim r_{i+1})$ , 且每个粒组包含的颗粒数量对应为  $(a_1, a_2, \dots, a_i)$ , 同一粒组对粒径取加权平均可得  $i$  个粒组的平均  $\bar{r}_{1,2}, \bar{r}_{2,3}, \dots, \bar{r}_{i-1,i}, \bar{r}_{i,i+1}$ , 若粒组划分足够合理,则根据质量守恒可知

$$M_{\text{sum}} = \frac{\pi}{6} \cdot \sum_{s=1}^i a_s (\bar{r}_{s,s+1})^3 \cdot \rho \approx \frac{\pi}{6} r_0^3 \cdot \rho \quad (3)$$

式中:  $M_{\text{sum}}$  为颗粒的总质量;  $\bar{r}_{s,s+1}$  为粒组  $r_s$  至  $r_{s+1}$  范围内粒径的平均值;  $a_s$  为该粒组的颗粒数量;  $r_0$  为颗粒崩解前的完整粒径;  $\rho$  为颗粒密度。因此,任一粒组的颗粒质量占总质量的百分数  $W_s$  可表示为

$$W_s = \frac{(\pi/6) \cdot a_s (\bar{r}_{s,s+1})^3 \cdot \rho}{(\pi/6) \cdot \sum_{s=1}^i a_s (\bar{r}_{s,s+1})^3 \cdot \rho} = \frac{a_s (\bar{r}_{s,s+1})^3}{r_0^3} \quad (4)$$

小于粒径  $r_k$  的颗粒质量占总质量的百分数  $W$  可表示为

$$W = \frac{\frac{\pi}{6} \cdot \sum_{s=k}^i a_s (\bar{r}_{s,s+1})^3 \cdot \rho}{\frac{\pi}{6} \cdot \sum_{s=1}^i a_s (\bar{r}_{s,s+1})^3 \cdot \rho} = \frac{\sum_{s=k}^i a_s (\bar{r}_{s,s+1})^3}{r_0^3} \quad (5)$$

由式(4)可知,若知道某一颗粒范围内颗粒质量的百分数,且考虑密度均匀、相等,则可反算得到该粒组颗粒的数量

$$a_s = \frac{W_s r_0^3}{(\bar{r}_{s,s+1})^3} \quad (6)$$

由式(6)可得小于粒径  $r_k$  的颗粒总数为

$$N(r) = \sum_{s=k}^i a_s = \sum_{s=k}^i \frac{W_s r_0^3}{(\bar{r}_{s,s+1})^3} \quad (7)$$

式中:  $N(r)$  为小于粒径  $r_k$  的颗粒数量;  $W_s$  为对应粒径范围  $r_s$  至  $r_{s+1}$  的颗粒质量百分含量;  $r_0$  为崩解前颗粒粒径大小;  $\bar{r}_{s,s+1}$  为粒组  $r_s$  至  $r_{s+1}$  范围内粒径的平均值。按照这种近似计算方法进行颗粒数量的计

算,不仅直观方便,而且完全符合颗粒崩解到达一定阶段便趋于稳定的基本特征。

### 1.3 基于颗粒数量与粒径关联的分维计算方法

基于自相似性原理,分形曲线的标量  $G$  与所用尺码  $\epsilon$  之间的关系为

$$G(\epsilon) = G_0 \epsilon^{n-D} \quad (8)$$

式中:  $G_0$  为常数;  $D$  为分形曲线的分维数;  $n$  为对应维数,当  $n=3$  时  $G$  和  $\epsilon$  对应于体积. 若假定颗粒密度均匀,则可将筛分法测得的小于某一粒径的颗粒数量作为标量,粒径  $r$  为尺码,研究其崩解过程颗粒的分布规律,并采用颗粒数量来表征  $n=3$  时的分形曲线关系

$$N(r) = N_0 r^{n-D} \quad (9)$$

式中  $N_0$  为常数. 对于颗粒数量的计算可通过细观分数倍崩解法和宏观颗粒粒组分布法两种思路求算,但考虑到前者较为繁琐复杂,下面将采用后一种方法,即通过公式(6)计算得到某一粒径范围内颗粒数量,并结合式(7)和式(8)建立小于某一粒径的颗粒数量  $N(r)$  与对应粒径  $r$  之间的关系式,由此可得基于颗粒数量统计的岩石崩解分形描述的关联分维数计算式

$$D = 3 - \frac{\ln N(r) - N_0}{\ln r} \quad (10)$$

式中:  $N_0$  为常数;  $r$  为颗粒粒径(同一粒组取平均

值);  $N(r)$  为小于该颗粒粒径的颗粒数量;  $D$  为研究对象的分维值. 因此对于颗粒分形分维数的确定可通过作图法,首先在  $\ln N(r) - \ln r$  坐标轴上拟合一次线性关系的斜率  $l$ , 然后得到  $D = 3 - l$ . 分形维数越大,说明颗粒越破碎,理论上当分维数达到 3 的时候,此时  $\ln N(r) - \ln r$  曲线的斜率等于零,说明颗粒已经达到崩解极限,此时细观颗粒极为稳定不能继续崩解。

## 2 不同 pH 环境下黏土类岩崩解分形演化规律

### 2.1 试验过程与结果分析

#### 2.1.1 试验材料的选取

泥质页岩作为一种典型的黏土类岩石材料,在自然环境中极易崩解. 图 1 为赣南地区泥质页岩露天开挖一年后的崩解状况,采用 X 射线衍射试验得到岩样矿物成分质量分数中: 石英 33%, 方解石 9%, 伊利石 38%, 赤铁矿 1%, 镍铝蛇纹石 3%, 钠长石 15%, 羟锰矿 1%. 赣南地区分布的新鲜泥质页岩强度较高,表面均匀完整,工程特性较好,开挖过程极为困难,但由于该地区湿热多雨,季节循环非常显著,泥质页岩在干湿循环作用下通常短期内便崩解成碎块状,给工程建设带来极大危害。



图 1 野外泥质页岩的崩解现象

Fig.1 Disintegration phenomenon of argillaceous shale in the field

#### 2.1.2 试验过程及结果

将整块的微风化泥质页岩岩块切割成若干小块,并将小块处理成浑圆状的试样(如图 2 所示),每块重 40~60 g. 试验过程分成 5 组进行,每组各 5 块,并确保每一组岩块自然含水状态下质量相等. 静态循环崩解过程中首先将 5 组岩样分别放入 pH 值对应为 12 和 10(氢氧化钠配制),7(水),5 和 2(盐酸配制)的溶液中浸泡. 并观察其 10 min 和 30 min 后的崩解现象,将浸泡后的崩解物在 105 °C 下烘干 12 h 以上,直至崩解物达到恒重并冷却至室温,并分别用 5, 2, 0.5 和 0.25 mm 的标准筛对崩解物进行筛

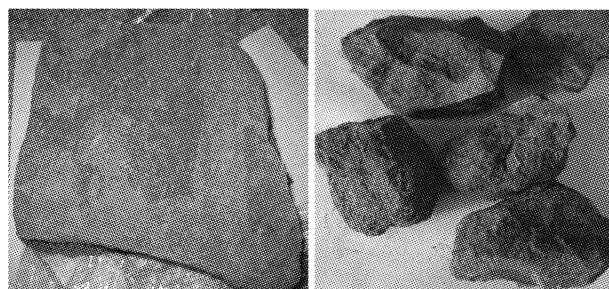


图 2 泥质页岩室内试验样品

Fig.2 The sample of argillaceous shale

分,统计每一粒组的质量百分含量,由此完成一次循

环.之后每隔不少于 1 d 的时间重复上述步骤.每次循环后将所有粒径范围大于 0.25 mm 的崩解物再次浸泡,直到不同粒组的颗粒质量百分含量基本达到稳定为止.

通过观察试验过程发现,试验刚开始岩样的崩解速度普遍较快,崩解不仅会出现开裂且易崩塌.说明泥质页岩的崩解性较强,但首次浸泡 30 min 后,粒径大于 5 mm 的较大岩块仍然存在.随着干湿循环次数的增加,崩解产物的颗粒级配亦随之不断变化,岩块部分崩解成碎块状脱落,到后期大颗粒物逐渐消失,小颗粒物含量增大.最后可得到一些崩解较为困难的物质,其中大多数为极小的石英、云母及细粒砾石等.

基于试验结果得到不同粒组的颗粒百分含量,并结合式(5)和式(6)计算得到平均每一岩块不同 pH 值溶液环境下不同粒径范围中颗粒数量的分布情况,如表 1~5 所示.通过对计算结果的分析表明,粒径较大的颗粒数量随着崩解循环次数的增加逐渐减小,而粒径较小的数量增加速率较大,特别是  $\leq 0.25$  mm 的颗粒增加速率最大,而中间粒组(如  $>0.50\sim 2.00$  mm 和  $>0.25\sim 0.50$  mm 范围)呈现先增大后减小的趋势.通过比较不同 pH 环境下颗粒的数量发现,酸性溶液中大颗粒崩解极为迅速,小颗粒数量增加较快,并能在循环次数较少的情况下趋于稳定,最终 pH 值等于 2 和 5 时粒径小于 0.25 mm 的颗粒数量较为接近,分别达到 1 391 309 个和 1 380 243 个;而 pH 值等于 12 时为 1 149 447 个;pH 值分别为 10 和 7 时颗粒数量也相当,分别为 1 167 395 个和 1 232 295 个,总体上差别不大,均在一个数量级上.但其他多个粒组颗粒数量多少不一,随 pH 值变化没有较为显著的表征关系.

表 1 pH=12 环境下颗粒各循环崩解阶段的数量分布

Tab.1 Quantitative distribution in different stages of circulation, pH=12

循环次数/次	不同粒径范围颗粒数量分布/个				
	$> 5.00$ mm	$>2.00\sim 5.00$ mm	$>0.50\sim 2.00$ mm	$>0.25\sim 0.50$ mm	$\leq 0.25$ mm
1	60	130	3 082	101 404	65 188
2	25	148	3 357	124 320	186 070
3	7	137	3 324	132 854	337 175
4	2	106	3 038	130 125	502 090
5	1	88	2 654	117 320	656 685
6	0	62	2 527	103 117	796 467
7	0	28	2 339	98 203	927 869
8	0	20	1 985	84 303	1044 166
9	0	19	1 457	71 967	1149 447

表 2 pH=10 环境下颗粒各循环崩解阶段的数量分布

Tab.2 Quantitative distribution in different stages of circulation, pH=10

循环次数/次	不同粒径范围颗粒数量分布/个				
	$> 5.00$ mm	$>2.00\sim 5.00$ mm	$>0.50\sim 2.00$ mm	$>0.25\sim 0.50$ mm	$\leq 0.25$ mm
1	132	97	1 673	23 516	21 675
2	72	150	3 130	52 700	71 463
3	43	178	3 364	71 495	133 601
4	22	191	3 544	83 548	206 620
5	10	179	3 780	88 918	288 799
6	5	132	3 725	94 227	442 925
7	4	114	3 354	83 842	583 852
8	2	70	2 992	94 978	725 925
9	1	50	2 735	84 048	856 508
10	1	33	2 319	79 985	973 250
11	1	26	1 978	68 168	1 075 543
12	0	21	1 626	59 047	1 167 395

表 3 pH=7 环境下颗粒各循环崩解阶段的数量分布

Tab.3 Quantitative distribution in different stages of circulation, pH=7

循环次数/次	不同粒径范围颗粒数量分布/个				
	$> 5.00$ mm	$>2.00\sim 5.00$ mm	$>0.50\sim 2.00$ mm	$>0.25\sim 0.50$ mm	$\leq 0.25$ mm
1	92	134	1 529	47 177	180 408
2	19	196	2 753	55 297	410 830
3	4	147	2 643	60 472	658 024
4	2	99	2 273	50 746	886 225
5	1	59	1 944	40 369	1 081 596
6	0	34	1 581	31 572	1 232 295

表 4 pH=5 环境下颗粒各循环崩解阶段的数量分布

Tab.4 Quantitative distribution in different stages of circulation, pH=5

循环次数/次	不同粒径范围颗粒数量分布/个				
	$> 5.00$ mm	$>2.00\sim 5.00$ mm	$>0.50\sim 2.00$ mm	$>0.25\sim 0.50$ mm	$\leq 0.25$ mm
1	103	137	1 738	32 980	100 553
2	44	134	3 010	41 981	392 867
3	3	142	3 363	34 681	677 221
4	1	87	2 885	29 144	924 880
5	0	55	2 247	26 518	1 108 145
6	0	28	1 783	17 702	1 268 998
7	0	18	1 175	15 906	1 380 243

表 5 pH=2 环境下颗粒各循环崩解阶段的数量分布

Tab.5 Quantitative distribution in different stages of circulation, pH=2

循环次数/次	不同粒径范围颗粒数量分布/个				
	$> 5.00$ mm	$>2.00\sim 5.00$ mm	$>0.50\sim 2.00$ mm	$>0.25\sim 0.50$ mm	$\leq 0.25$ mm
1	77	117	1 842	52 054	284 709
2	5	137	2 499	69 759	663 760
3	0	90	1 850	48 324	989 332
4	0	49	1 245	33 019	1 228 222
5	0	11	960	25 887	1 391 309

## 2.2 颗粒的分形演化特征比较

不同 pH 下大颗粒及中间颗粒数量随崩解过程的变化规律极为复杂,寻找之间的影响规律存在较大困难,而比较单一粒径含量的变化也容易以偏概全,对反映黏土类岩的整个崩解过程不够客观.因此结合前文的分析思路充分利用分形理论的优点,尝试全面探析 pH 值变化对黏土类岩崩解的影响规律.结合表 1~5 的计算结果,可得到小于某一粒径的崩解颗粒数量  $N(r)$ ,然后通过式(10)计算得到不同 pH 值环境下泥质页岩崩解分形描述的关联分维数及其增量与崩解循环次数的关系,如图 3 和图 4 所示.由图可知,5 种溶液环境下颗粒的分形分维数均随崩解次数的增加而增大,崩解后期关系曲线逐渐趋于平稳,且关联分维数基本相等,理论上最终都等于 3.通常情况下,认为当  $0 < D \leq 2$  时,大粒径颗粒所占质量份额较大<sup>[14-15]</sup>,崩解颗粒以大粒径为主;

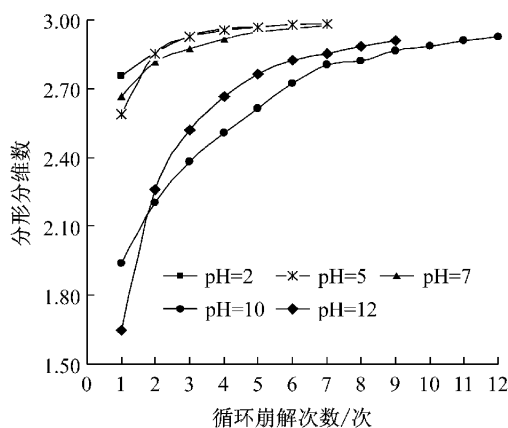


图3 颗粒崩解分维数与崩解次数的变化关系

Fig.3 Relationship between fractal dimension and cycle times of granule disintegration

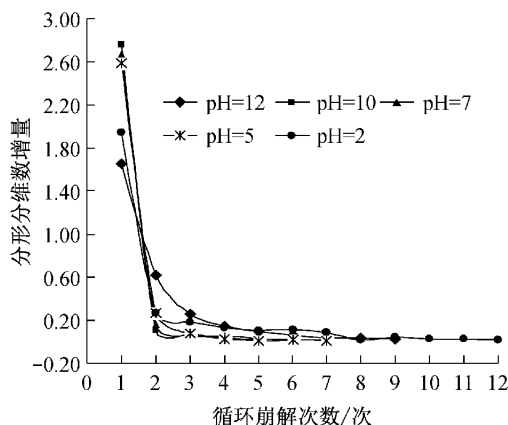


图4 颗粒分维数的增量与崩解次数的变化关系

Fig.4 Relationship between fractal dimension augments and cycle times of granule disintegration

而当  $2 < D \leq 3$  时,小粒径颗粒所占质量份额较大,崩解颗粒以小粒径为主.由此可知,本次崩解试验基本上是从第 1 次崩解开始即进入小颗粒阶段,崩解进行到第 3 次时颗粒分维数单次增加已不明显.

不同 pH 溶液对黏土类岩颗粒的崩解速率存在较大差异,酸性溶液下的崩解过程相对较为迅速.如第一次崩解后 pH 值分别为 2,5,7,10 和 12 的环境下颗粒分维数分别为 2.76,2.59,2.67,1.94 和 1.65.总体表现为溶液 pH 值越小颗粒分形分维数越大,酸性溶液加速了颗粒崩解分维数的增加,此后酸性溶液环境下颗粒分维数的增量迅速减小,关系曲线趋缓;而碱性溶液下(pH=12 和 10)曲线仍然处于陡倾状态,直到崩解进行到第 5 次时曲线才渐趋缓和.5 种溶液环境下颗粒崩解稳定后的分维数分别为 2.97,2.98,2.98,2.93 和 2.91,均接近于 3.说明无论是何种溶液条件,黏土类岩崩解的颗粒分形分维数最终基本相等,只是酸性溶液环境下崩解分维数趋于稳定所需要的循环次数较少,而碱性溶液对颗粒崩解分形分维数的增加却有阻碍作用.因此,实际工程中为了使黏土类岩的崩解速率能够降低,应尽量避免酸性降雨的危害,必要时可在降雨后在岩石表面喷洒一定剂量的碱性溶液而起到保护作用.

## 3 结论

(1)基于分形相似性原理及质量守恒定律,分别进行了岩石颗粒的细观分数倍崩解过程模拟和粒组宏观分布模拟,并结合密度均匀的假定,得到了循环崩解过程中各粒组颗粒数量的变化规律,认为考虑颗粒粒组宏观分布的模拟方法更直观有效,且与实际更为吻合.由此推导得到了小于某一粒径的颗粒数量与对应粒径之间的关系式,建立了基于颗粒数量统计的岩石崩解分形描述的关联分维数计算公式,并给出了详细的求解方法.

(2)通过对基于试验的计算结果分析表明,粒径较大的颗粒数量随着崩解循环次数的增加逐渐减小,而小粒径的颗粒数量增加速率较大,中间粒组的颗粒数量呈现先增大后减小的趋势.通过比较不同 pH 环境下不同粒组颗粒的数量表明,酸性溶液中大颗粒崩解极为迅速,小颗粒数量增加相对较快,并能在循环次数较少的情况下达到稳定.

(3)不同 pH 溶液下黏土类岩的崩解速率存在较大差异,其中酸性溶液下的崩解过程相对较为迅速,总体表现为溶液 pH 值越小岩石初次崩解颗粒

分形维数越大,酸性溶液加速了颗粒崩解分维数的增长;碱性溶液下分维曲线长期处于陡倾状态,直到崩解进行到第5次时曲线才渐趋缓和,说明碱性溶液对颗粒崩解分形维数的增加具有阻碍作用.5种溶液环境下颗粒崩解稳定后的分维数均接近于3,说明黏土类岩崩解的颗粒分形维数最终都趋于相等,只是pH值越小颗粒崩解分维数趋于稳定所需要的循环次数越少.

### 参考文献:

- [1] [苏]奥西波夫.黏土类土和岩石的强度与变形性能的本质[M].李生林,译.北京:地质出版社,1985.  
Osipov. Essence of the strength and deformation properties of clayey soils and rocks[M]. Translated by LI Shenglin. Beijing: The Geological Publishing House, 1985.
- [2] Turcotte D J. Fractal and fragmentation [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2): 1921.
- [3] 高峰,谢和平,赵鹏.岩石块度分布的分形性质细观结构效应[J].岩石力学与工程学报,1994,13(3): 240.  
GAO Feng, XIE Heping, ZHAO Peng. Fractal properties of size-frequency distribution of rock fragments and influences of meso-structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(3): 240.
- [4] 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.  
WU Yiping, YU Hongming, HU Yanxin. Research on engineering geological characters of aubergine mudstone of Badong new city zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1201.
- [5] 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.  
ZHANG Dan, CHEN Anqiang, LIU Gangcai. Disintegration characteristics of purple mudstone based on fractal dimension under hydrothermal condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1341.
- [6] 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.  
LIU Xiaoming, ZHAO Minghua, SU Yonghua. Mathematical simulation of fractal mechanism for slaking of soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2043.
- [7] 苏永华,赵明华,刘晓明.软岩膨胀崩解试验及分形机理[J].岩土力学,2005,26(5): 728.  
SU Yonghua, ZHAO Minghua, LIU Xiaoming. Research of fractal mechanism for swelling & collapse of soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 728.
- [8] 何满潮,景海河,孙晓明.软岩工程力学[M].北京:科学出版社,2004.  
HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Soft rock engineering mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [9] 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(增2): 4173.  
WU Daoxiang, LIU Hongjie, WANG Guoqiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4173.
- [10] 黄宏伟,车平.泥岩遇水微观机理研究[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(7): 866.  
HUANG Hongwei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(7): 866.
- [11] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅,等.特殊软岩软化的微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3): 3993.  
ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 3993.
- [12] Wilson-Fahmy R F, Koerner R M. Finite element analysis of stability of cover soil on geomembrane lined slopes [C]//Proceedings of Conference on Geosynthetics. Toronto: [s. n.], 1993:1425-1437.
- [13] Gilbert R B, Long J H, Daly J J. Structural integrity of composite geosynthetic lining and cover systems [C]//Proceedings of Conference on Geosynthetics. Toronto: [s. n.], 1993:1389-1401.
- [14] 康天合,柴肇云,王栋,等.物化型软岩块体崩解特性差异的试验研究[J].煤炭学报,2009,34(7): 907.  
KANG Tianhe, CHAI Zhaoyun, WANG Dong, et al. Experimental study on block disintegration difference of physicochemical soft rock[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 907.
- [15] 夏德宏,张省现,吴祥宇.煤粉碎粒度分布的分形模型[J].矿业,2005,14(1): 36.  
XIA Dehong, ZHANG Shengxian, WU Xiangyu. Fractal model of particle-size distribution for coal fragmentation[J]. Mining & Metallurgy, 2005, 14(1): 36.