

基于 Weibull 分布的红砂岩颗粒崩解破碎演化规律

张宗堂^{1,2}, 高文华², 张志敏², 唐晓宇², 邬俊²

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 红砂岩在我国分布广泛, 由于含水率的变化使其崩解破碎十分显著。采用湖南株洲地区的红砂岩样, 进行室内静态与扰动崩解试验。基于 Weibull 分布建立了红砂岩颗粒崩解破碎级配曲线演化模型, 分析了模型参数 λ 与 k 的意义。分析表明, Weibull 分布参数 λ 与 k 的大小及变化速率体现了红砂岩颗粒崩解破碎的演化过程。在建立模型的基础上, 求得了相对崩解比的计算公式, 并验证了计算公式的正确性。依据试验结果与模型计算值, 讨论了耐崩解性指数与崩解比的异同及所采用试验方法的不同对试验结果造成的影响。在已有成果的基础上, 验证了 Weibull 分布模型应用于岩石颗粒崩解破碎演化过程的可行性。

关 键 词: 红砂岩; 崩解; 破碎; Weibull 分布; 干湿循环

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 03-0877-09

Evolution of particle disintegration of red sandstone using Weibull distribution

ZHANG Zong-tang^{1,2}, GAO Wen-hua², ZHANG Zhi-min², TANG Xiao-yu², WU Jun²

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: Red sandstone is widely distributed in China, and its disintegration is very significant due to changes in water content. The red sandstone samples from Zhuzhou area of Hunan Province were used to conduct laboratory static and disturbed disintegration tests. Then, an evolution model of gradation curve of particle disintegration of red sandstone was established based on the Weibull distribution, and the model parameters λ and k were analyzed, the value and change rate of the two parameters reflect the evolutionary process of particle disintegration and breakage of red sandstone. Moreover, on the basis of established model, the calculation formula of the relative disintegration ratio was obtained, and the correctness of the formula was verified. Furthermore, according to the test results and the values of model calculation, the similarities and differences between the slaking durability index and the disintegration ratio, and the effects of different test methods on the test results were discussed. Finally, the feasibility of application of Weibull distribution model to the evolution of rock particle disintegration is verified based on the existing researches.

Keywords: red sandstone; disintegration; breakage; Weibull distribution; drying and wetting cycle

1 引 言

红砂岩是一种特殊的软岩, 其在干燥环境下具有优良的力学性能, 而在水的作用下则极易发生软化崩解, 从而丧失其结构的整体性成为松散细小的颗粒^[1]。这是引发地陷、滑坡、塌方等灾害的关键

因素, 所以, 在水环境下红砂岩崩解特性的研究一直是岩土工程中的热点问题^[2]。

现有的软岩崩解模型多基于统计学等理论的建立^[2]。邓涛^[3]、赵明华^[4]、Kincal^[5]、张宗堂^[6]等基于软岩崩解物数量、尺寸与质量关联的分形特征, 采用分形维数定量表征了软岩的崩解进程, 建立了

收稿日期: 2019-05-23

修回日期: 2019-07-31

基金项目: 湖南省自然科学基金 (No.2020JJ40176); 湖南省教育厅重点科研资助项目 (No.16A073); 湖南省研究生科研创新项目 (No.CX20190790); 湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室开放基金资助项目 (No.E21807)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ40176), the Key Scientific Research Projects of Hunan Provincial Department of Education (16A073), Hunan Provincial Innovation Foundation For Postgraduate (CX20190790) and the Open Research Fund Program of Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology (E21807).

第一作者简介: 张宗堂, 男, 1991 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: zongtangzhang@hust.edu.cn

通讯作者: 高文华, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程和地下结构工程的研究。E-mail: wenhuagao@163.com

软岩崩解过程的分形模型; Miklušová^[7]、刘晓明^[8]、黄明^[9]等分析了软岩崩解过程中能量的转换,研究了软岩崩解过程中表面能的变化规律,建立了软岩崩解过程的能量传递与耗散模型; Lőrincz^[10]提出粒度熵的概念; 曾志雄等^[11]利用粒度熵理论定量描述了软岩崩解过程中颗粒含量的变化规律,并引入标准基础熵表征了软岩的崩解特性。在软岩崩解粒径分布研究方面,郑明新等^[12]基于不同块度煤系软岩的崩解性室内试验,探讨了干湿循环作用下煤系软岩崩解物粒径分布的变化规律,指出 0.5~5.0 mm 粒径的颗粒含量能较为清楚地反映煤系软岩崩解进程。吴道祥等^[13]通过室内崩解试验,得到了干湿循环过程红层软岩崩解物颗粒含量的变化规律,认为细粒的剥离及胶结物的溶解是红层软岩崩解的主要原因。张巍等^[14]开展了膨胀岩崩解物粒径分布特征和崩解性与膨胀性之间关系的研究,认为膨胀岩膨胀性的强弱与其崩解物的最大含量粒组颗粒粒径、有效粒径和耐崩解性指数呈反相关关系。

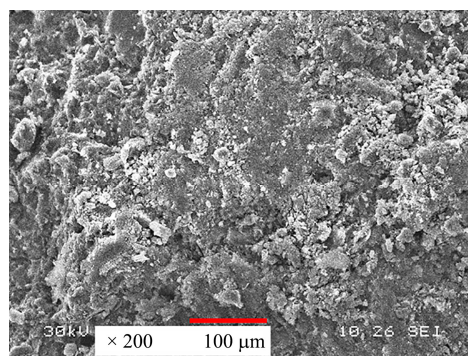
由上述分析可知,对于软岩崩解分析模型与定量表征研究大多基于统计学的理论建立,而对于软岩崩解粒径分布方面的研究,大多基于室内试验对软岩崩解产物各粒组的粒径分布状况进行定性分析,而对于软岩崩解破碎演化情况的研究较少。因此,本文基于 Weibull 分布,对红砂岩颗粒在干湿循环作用下崩解破碎的演化过程进行研究,依据室内试验结果与 Weibull 分布函数,求解相对崩解比的计算公式,并验证计算公式的正确性;分析耐崩解性指数与崩解比的异同,研究耐崩解性试验中所采用试验方法的不同对崩解试验的影响。

2 红砂岩崩解特性试验

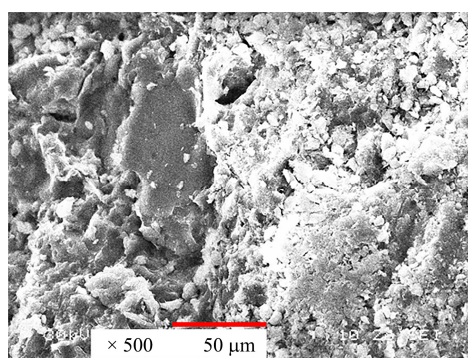
2.1 试样基本性质

红砂岩样采自湖南株洲地区,依据《岩石物理力学性质试验规程》(DZ/T 0276.9—2015)^[15],开展了红砂岩基本物理力学性质试验,获取相关参数如下:天然含水率为 1.29%、干密度为 2.54 g/cm³、饱和密度为 2.62 g/cm³、天然样单轴抗压强度为 10.30 MPa。对红砂岩样开展 X 射线衍射试验,获取其矿物成分为:石英 40.85%、方解石 20.47%、长石 12.84%、云母 8.41%、高岭石 6.96%、绿泥石 5.24%、伊利石 2.52%、绿脱石 1.16%、蒙脱石 0.81%、其他 0.74%。对红砂岩开展电镜扫描试验(SEM),图 1 为红砂岩 SEM 图。由图可知,红砂岩微观结构比较松散,主要由薄片状和块状组成,且微孔隙分布明显,这种相对松散的微观结构有利于水分子

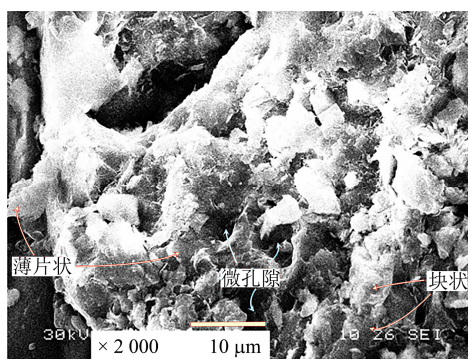
和空气进入^[16],从而导致其容易在干湿循环作用下发生崩解。



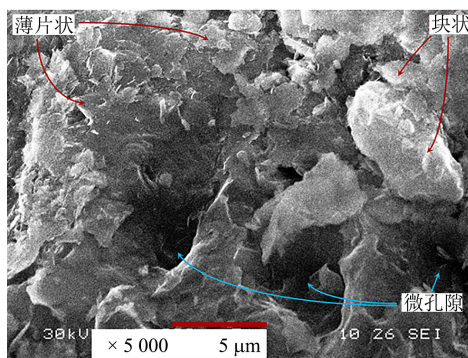
(a) × 200



(b) × 500



(c) × 2 000



(d) × 5 000

图 1 红砂岩 SEM 图

Fig.1 SEM images of red sandstone

2.2 试验方法

试验采用静态崩解与扰动崩解两种崩解方式, 依据试验规程^[15], 两种崩解方式下的红砂岩各由质量在 40~60 g 之间的 10 块浑圆状试样组成。

静态崩解试验步骤为: ①将制备好的试样(编号 SD01)置于 105 °C 的烘箱内干燥至恒重, 之后取出并在干燥器内冷却至室温; ②将试样置于敞口容器中(见图 2), 注入自来水使试样完全浸入水中 24 h 以上, 试验中保持液面高度相同; ③取出试样置于 105 °C 的烘箱内干燥至恒重, 之后取出并在干燥器内冷却至室温, 然后通过筛分试验采用孔径为 60、40、20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 mm 的标准筛过筛, 分别称量并做好记录, 其中粒径小于 0.075 mm 的部分通过质量守恒求得。完成上述 ②、③步骤即完成一次干湿循环, 将每次干湿循环后的残留样重复上述步骤②、③, 直至完成研究所需的 N 次干湿循环试验。



图2 静态崩解试验 (SD01)
Fig.2 Static disintegration test (SD01)

扰动崩解试验采用济南海威尔仪器有限责任公司生产的 HNB-1 岩石耐崩解试验仪(如图 3 所示), 试验步骤为将上述步骤②变为: 将试样(编号 DD01)置于耐崩解性试验仪的筛桶中, 在水槽中注入自来水至设计水位, 打开开关使筛筒以 20 r/min 的转速转动 10 min, 其余步骤与上述静态崩解试验完全相同。

2.3 耐崩解性指数

我国规范^[15]中指出评价岩石崩解性的指标为耐崩解性指数, 参考规范中耐崩解性指数的定义, 将干湿循环 N 次的耐崩解性指数定义为

$$I_{dN} = \frac{m_N}{m_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_{dN} 为岩石循环 N 次的耐崩解性指数 (%); m_d 为原试样烘干质量 (g); m_N 为第 N 次标准循环

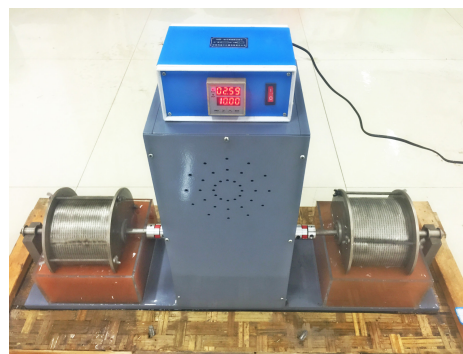


图3 扰动崩解试验 (DD01)
Fig.3 Disturbed disintegration test (DD01)

后残留试样的烘干质量, 即粒径大于 2 mm 残留样的质量 (g)。

耐崩解性指数体现了粒径大于 2 mm 颗粒抵抗软化的能力, 对于干湿循环次数相同的试样, 其值越小表示大于 2 mm 颗粒的耐崩解性能越差, 则其崩解速率越快。

由式(1)求得试样的耐崩解性指数, 图 4 为 2 组试样耐崩解性指数 I_{dN} 与循环次数的关系曲线。本次共开展 20 次干湿循环试验。由图可知, 随着循环次数的增加, 静态崩解情况下的 I_{dN} 近似直线下降; 而扰动崩解情况下, 当 $N \leq 10$ 次时, I_{dN} 迅速下降, 当 $N > 10$ 次时, I_{dN} 缓慢下降, 并趋于相对稳定。静态崩解的耐崩解性指数总是大于扰动崩解, 且静态崩解的耐崩解性指数是扰动崩解的 1.08 倍~5.34 倍, 反映出扰动崩解方式下红砂岩的崩解破碎程度更大。

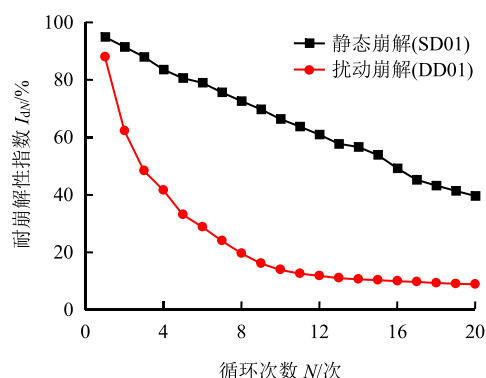


图4 耐崩解性指数与循环次数的关系曲线
Fig.4 Relationships between slaking durability index and cycle number

3 基于 Weibull 分布的红砂岩颗粒崩解破碎演化过程

3.1 基于 Weibull 分布的崩解物级配分析

1939 年瑞典工程师 Weibull 提出 Weibull 分布

函数, 由于该函数能以小样本进行准确可靠地预测而被各界广泛使用^[17]。对于红砂岩颗粒 (其粒组大小为 $d_i - d_{i-1}$, 其中 d_i 为筛孔的孔径, d_{i-1} 为与 d_i 相邻的下一个孔径) 在干湿循环作用下发生崩解时, 将崩解破碎至较小的粒组 $d_j - d_{j-1}$ ($j = 1, 2, \dots, i-1$), 令

$$x_i = d_i / d_{\max} \quad (2)$$

式中: $d_{\max}$ 为最大粒径, 本研究取 $d_{\max} = 60 \text{ mm}$ 。

对小于粒径 d_i 的颗粒累计质量百分比 P_i 与 x_i , 假设其服从两参数 Weibull 分布函数:

$$P_i = 1 - e^{-(x_i/\lambda)^k} \quad (3)$$

式中: λ 、 k 为 Weibull 分布函数的参数; $0 < x_i \leq 1$, $0 < P_i \leq 1$ 。

基于上述试验结果, 采用最小二乘法确定式 (3) 中的参数。最小二乘法的基本原理是令所拟合的函数值与试验测量误差的平方和最小^[18], 即

$$\sum_{i=1}^n [P_i - (1 - e^{-(x_i/\lambda)^k})]^2 = \min_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^n [P_i - (1 - e^{-(x_i/\lambda)^k})]^2 \right\} \quad (4)$$

由式 (3)、(4) 求得各参数值见表 1。分别绘制 2 组试样不同干湿循环次数下崩解物的颗粒级配曲线, 并与式 (3) 的模型计算结果进行对比分析 (见图 5), 为便于识别不同循环次数下级配曲线的变化情况, 图中仅绘出偶数倍循环次数下崩解物的级配曲线。由表 1 及图 5 可知: ①无论是静态崩解还是扰动崩解, 小于粒径 d_i 的颗粒累计质量百分比 P_i 与 x_i 之间均满足两参数 Weibull 分布函数, 故红砂岩崩解物的级配曲线可以采用 Weibull 分布函数进行描述。②随着循环次数的增加, λ 和 k 值的大小及其变化速率均逐渐减小, 崩解物级配曲线向粒径减小的方向移动。③随着循环次数的增加, 曲线之间的间距逐渐减小, 最后将稳定在某一位置, 反映出当循环次数足够大时, 基于 Weibull 分布的崩解物级配曲线将趋于重合, 岩石的崩解将达到相对稳定的状态^[4]。由此说明 Weibull 分布函数参数值大小及其变化速率对应着红砂岩颗粒崩解物级配的变化情况, 从而实现描述红砂岩颗粒崩解破碎演化的中间过程。

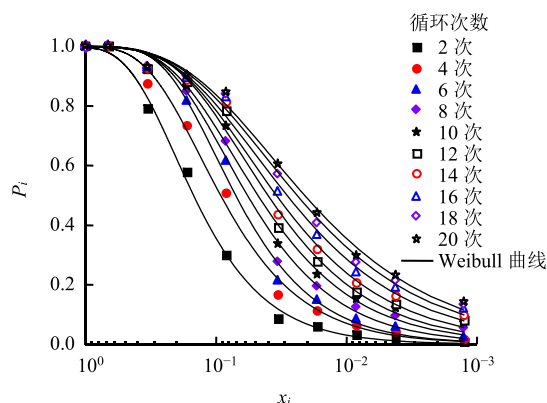
为了进一步分析两种崩解方式下崩解物颗粒级配的变化情况, 绘制了两种崩解方式下红砂岩崩解物级配曲线, 如图 6 所示, 为便于清晰识别曲线的变化趋势, 图中仅绘出干湿循环 2、10、20 次时

表 1 参数值

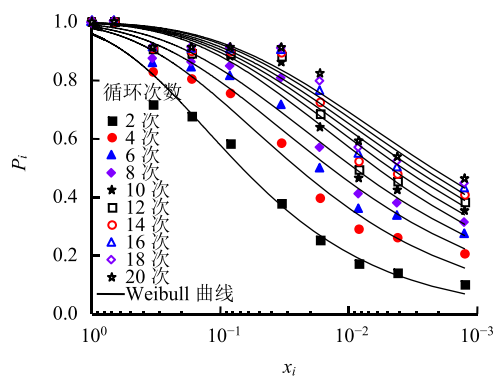
Table 1 Parameter values

循环次数	λ (SD01)	k (SD01)	R^2	λ (DD01)	k (DD01)	R^2
1	0.310 1	1.110 3	0.994 7	0.331 7	1.121 5	0.963 9
2	0.205 6	1.142 2	0.997 2	0.129 4	0.567 4	0.976 7
3	0.165 9	1.066 1	0.997 1	0.074 0	0.499 7	0.981 5
4	0.132 9	1.011 8	0.994 6	0.055 0	0.466 7	0.976 0
5	0.109 8	1.028 3	0.991 1	0.040 2	0.441 3	0.970 9
6	0.100 6	1.043 3	0.993 3	0.033 2	0.419 6	0.962 8
7	0.091 3	0.964 9	0.990 8	0.026 4	0.401 4	0.954 3
8	0.085 3	0.930 7	0.990 7	0.022 4	0.402 9	0.944 9
9	0.079 1	0.893 1	0.990 1	0.017 3	0.396 2	0.943 4
10	0.073 6	0.849 2	0.989 1	0.015 0	0.403 0	0.942 1
11	0.067 8	0.817 7	0.988 0	0.013 2	0.391 7	0.938 2
12	0.063 1	0.810 1	0.988 4	0.012 1	0.387 6	0.935 3
13	0.058 3	0.776 2	0.987 9	0.010 9	0.382 4	0.933 4
14	0.056 4	0.748 3	0.987 3	0.010 1	0.375 1	0.931 6
15	0.053 0	0.730 2	0.988 8	0.009 4	0.372 4	0.929 4
16	0.048 9	0.683 8	0.990 6	0.008 6	0.367 2	0.928 3
17	0.044 6	0.651 6	0.991 8	0.007 9	0.356 7	0.930 2
18	0.042 4	0.644 6	0.992 9	0.007 3	0.363 5	0.923 2
19	0.039 9	0.623 0	0.993 3	0.006 8	0.356 5	0.924 6
20	0.038 0	0.616 6	0.993 5	0.006 3	0.354 6	0.917 8

注: R^2 为相关系数。



(a) SD01



(b) DD01

图 5 级配曲线与模型计算对比图
Fig.5 Comparison of gradation curves and model calculation results

两种崩解方式下的级配曲线。由图可知, 相同循环次数下扰动崩解的级配曲线位于静态崩解的上方, 表明扰动崩解情况下的细颗粒含量多于静态崩解。

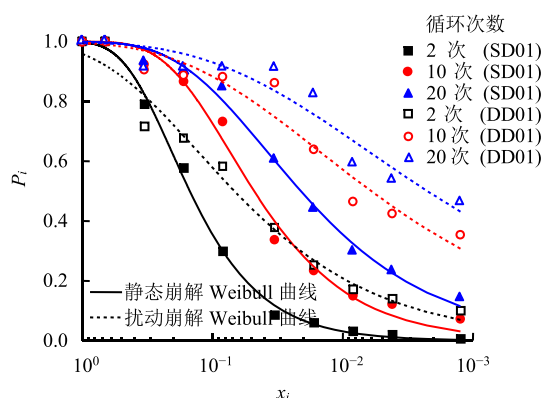


图6 两种崩解方式下红砂岩崩解物级配曲线
Fig.6 Gradation curves of red sandstone disintegration in two modes

图7为两种崩解方式下红砂岩颗粒干湿循环20次后的残留样图。由图可知, 不同的崩解方式会对红砂岩的崩解破坏特征产生较大的影响。静态崩解



(a) SD01



(b) DD01

图7 两种崩解方式下红砂岩干湿循环20次后残留样图
Fig.7 Residual samples of red sandstone after 20 drying-wetting cycles in two modes

情况下, 水分缓慢渗入, 崩解物的形态以粒状颗粒为主, 颗粒无尖角、棱角较为圆滑, 且粒组的分布比较均匀; 而扰动崩解情况下, 由于试验设备的扰动, 使得崩解物的形态以薄片状为主, 颗粒棱角尖锐。由图6可知, 干湿循环20次后, 静态崩解方式下, 有近15%的崩解物已随着水的分离而流失; 而扰动崩解方式下, 有近50%的崩解物已随着水的分离而流失。因此, 图7(b)中残留的大颗粒较多。

由2.1节可知, 本研究的红砂岩含有一定的膨胀性黏土矿物, 特别是蒙脱石、伊利石、高岭石。膨胀性黏土矿物晶层 O^{2-} 与 O^{2-} 、 O^{2-} 与 OH^{-} 之间的键力极弱, 水环境下含 O^{2-} 的强极化 H_2O 分子极易楔入, 从而使其破裂; 再者, 其结构单元中的 Al^{3+} 易被 Mg^{2+} 等低价阳离子置换, 导致出现多余的负电荷来吸附水中的阳离子, 从而使水中的 H_3O^{+} 进入其结构单元层与水化膜之间, 致使层间间距与水化膜增厚产生不均匀膨胀而破裂; 此外, 胶结物的软化、溶解也使得颗粒发生解体^[13]。岩石经历多次的干湿循环作用, 在不断“浸水-失水”的过程中使其发生反复的胀缩变化, 其崩解则愈加迅速。在扰动崩解方式下, 岩石除了承受上述作用之外, 还要受到筛筒旋转所引起的相对冲刷与碰撞, 从而使得扰动崩解的速率大于静态崩解。

3.2 Weibull 参数分析

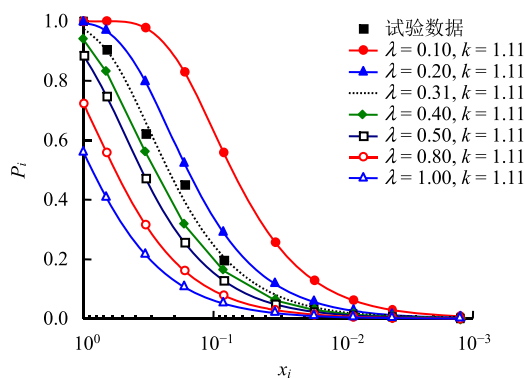
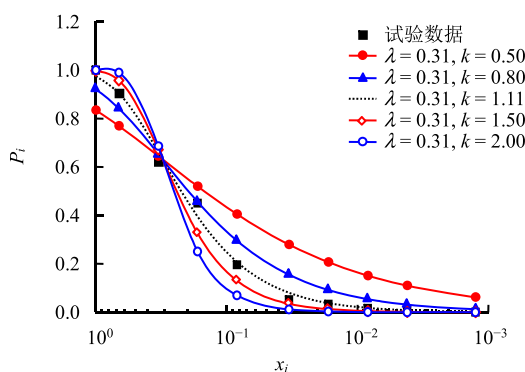
为进一步分析 Weibull 参数 λ 、 k 的意义, 对式(3)取两次对数, 可得:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-P_i} \right) \right] = k \ln x_i - k \ln \lambda \quad (5)$$

由式(5)可知, $\ln \left\{ \ln \left[1/(1-P_i) \right] \right\}$ 与 $\ln x_i$ 是线性关系, 在 $\ln \left\{ \ln \left[1/(1-P_i) \right] \right\}$ 与 $\ln x_i$ 的线性关系曲线中, k 为斜率, 而 λ 决定了该线性关系的截距。

以 SD01 试样干湿循环1次时的级配特征为基础, 研究 P_i 随着 λ 、 k 改变时级配曲线的变化情况(见图8), 由图8(a)可知, 当 k 为定值时, 随着 λ 的逐渐增加, 级配曲线主体部分的斜率几乎不发生变化, 而级配曲线的截距逐渐减小; 由图8(b)可知, 当 λ 为定值时, 随着 k 的逐渐增加, 级配曲线主体部分的斜率不断增加。因此, k 反映了崩解物级配曲线主体部分的斜率, 其决定了红砂岩颗粒崩解的进程; 而 λ 体现了崩解物级配曲线的截距, λ 与 k 共同决定了崩解的速率。

由图5、8及表1可知, λ 与 k 的变化都会引起红砂岩颗粒崩解物的级配曲线发生变化, 从而体现红砂岩颗粒崩解破碎的发展过程。当 k (或 λ) 为定

(a) P_i 随 λ 的变化(b) P_i 随 k 的变化图 8 P_i 随 λ 、 k 变化图Fig.8 Relation curves of P_i vs. λ and k

值时, λ (或 k) 的减小速率体现了红砂岩颗粒崩解破碎的程度, 即 λ (或 k) 迅速减小, 体现了红砂岩颗粒崩解破碎的速率较大; λ (或 k) 缓慢减小, 体现了红砂岩颗粒崩解破碎的速率较小; 而 λ (或 k) 趋于稳定时, 红砂岩颗粒崩解破碎的速率亦趋于稳定。故采用 Weibull 分布函数, 通过其参数的变化情况可以描述红砂岩颗粒的崩解破碎演化过程。

3.3 基于 Weibull 分布的崩解比计算

Erguler 等^[19]提出崩解比的概念, 计算公式为

$$D_R = \frac{A_C}{A_T} \quad (6)$$

式中: D_R 为崩解比; A_C 为崩解颗粒级配上方的面积; A_T 为崩解颗粒级配曲线坐标轴的面积。

SD01 试样干湿循环 1 次时崩解比计算示意图见图 9, 即

$$D_R = \frac{\text{Area}(bcd)}{\text{Area}(abcd)} \quad (7)$$

式中: $\text{Area}(bcd)$ 、 $\text{Area}(abcd)$ 分别为 bcd 、 $abcd$ 面积。

同理, 采用上述方法, 通过 MATLAB 求解曲

线包络面积的方法, 可求得干湿循环作用下红砂岩颗粒崩解破碎的崩解比。

由上述计算可知, 式 (6) 可写为

$$D_R = \frac{\int_0^{d_m} [100 - f(d_i)] dd_i}{\int_0^{d_m} 100 dd_i} \quad (8)$$

式中: $f(d_i)$ 为崩解物级配曲线的表达式; d_m 为级配曲线上粒径的最大值 (mm)。

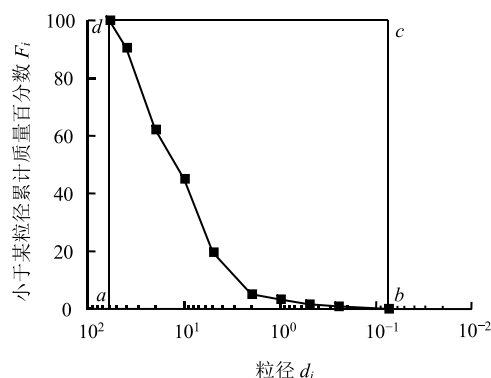


图 9 崩解比计算示意图

Fig.9 Schematic diagram of calculation of disintegration ratio

由 3.1 节可知, 红砂岩颗粒崩解物的级配曲线可以采用 Weibull 分布函数进行描述, 将 F_i 与 d_i 坐标系下的级配曲线转化为相对坐标系 P_i 与 x_i 下的关系曲线, 则由式 (8) 可得相对坐标系下的相对崩解比 D_{R0} 为

$$D_{R0} = \frac{\int_{0.075/d_{\max}}^{60/d_{\max}} (1 - P_i) dx_i}{\int_{0.075/d_{\max}}^{60/d_{\max}} dx_i} = \frac{\int_{0.075/d_{\max}}^{60/d_{\max}} (e^{-(x_i/\lambda)^k}) dx_i}{\int_{0.075/d_{\max}}^{60/d_{\max}} dx_i} \quad (9)$$

求解上式, 得

$$D_{R0} = \frac{\lambda}{k} \left[\left(e^{-\frac{0.00125}{\lambda}} \right)^k - \left(e^{-\frac{1}{\lambda}} \right)^k \right] \quad (10)$$

将通过式 (6) 采用 MATLAB 求解得到的崩解比 D_R 与采用式 (10) 得到的相对崩解比 D_{R0} 进行对比分析 (见图 10), 由图可知, 两组试样的 D_R 散点与 D_{R0} 曲线非常接近, 故基于 Weibull 分布参数, 采用式 (10) 求解相对崩解比 D_{R0} 可实现对干湿循环作用下红砂岩崩解程度的度量。

由图 10 可知, 随着循环次数的增加, 红砂岩颗粒的崩解比 D_R 与相对崩解比 D_{R0} 均逐渐减小; 在干湿循环前期, 曲线减小的速率较大, 减幅较大, 而随着循环次数的不断增加, 曲线的减幅逐渐减小,

最终达到相对稳定阶段；在第2次干湿循环之后，扰动崩解情况下的崩解比 D_R 与相对崩解比 D_{R0} 均小于静态崩解，且静态崩解的 D_R 与 D_{R0} 是扰动崩解的1.29~2.32倍。因此，红砂岩在干湿循环作用下发生崩解破碎的过程中，当循环次数较少时，其崩解破碎的速率较大，而随着循环次数的增加，其崩解破碎的速率将逐渐减小并最终趋于相对稳定；且扰动崩解情况下红砂岩的崩解破碎程度大于静态崩解。

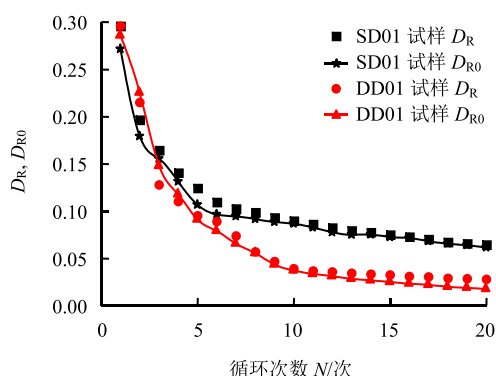


图10 D_R 与 D_{R0} 对比图

Fig.10 Comparison of D_R and D_{R0}

3.4 两崩解指标不同之处的讨论

由图4与图10可知，采用耐崩解性指数与崩解比（或相对崩解比）对干湿循环作用下红砂岩颗粒崩解破碎描述的变化规律基本相同，但也存在不同之处。

两种指标定义的角度不同是造成这种现象的主要原因，耐崩解性指数体现了粒径大于2 mm颗粒抵抗软化的能力，而崩解比（或相对崩解比）体现了试验中划分所有粒组颗粒抵抗软化的能力。因此，相对于耐崩解性指数，崩解比（或相对崩解比）对红砂岩颗粒崩解特性的描述更为全面。

3.5 试验方法不同对岩石崩解影响的讨论

由图4与图10可知，不管采用何种崩解指标，均可以体现出扰动情况下的崩解速率大于静态崩解。因此，在岩石的耐崩解性试验中，所采用试验方法的不同会对试验结果造成较大影响。

产生这种现象的原因主要为：①仪器扰动情况下岩样的崩解试验采用HNB-1岩石耐崩解试验仪进行，位于转动筛桶中的岩样会受到水槽中静态水的相对冲刷作用，水的相对动力冲刷加速了红砂岩颗粒的崩解；②相对的动力作用加速了红砂岩颗粒中部分黏土矿物与水的化学反应，且相对的动力作用使得红砂岩颗粒间的黏结物在溶于水的瞬间被水

带走，导致红砂岩内部的孔裂隙加速发育；③转动筛桶与颗粒间以及不同颗粒间的机械碰撞加速了红砂岩颗粒的崩解。

4 模型应用

4.1 参数确定

基于已有的成果，对Weibull分布函数描述岩石颗粒崩解破碎演化过程的可行性进行分析，试验数据选取吴道祥^[13]、刘晓明^[8]等的试验数据。根据选取的试验成果，采用式（3）、（4）求得模型各参数值见表2。

表2 模型参数值
Table 2 Parameter values of model

试验数据	循环次数（或崩解级数）	λ	k	R^2
吴道祥等 ^[13] 试验	1	0.293 20	1.190 13	0.968 11
	2	0.133 83	1.002 85	0.996 28
	3	0.075 64	1.080 49	0.991 11
	4	0.055 29	0.937 98	0.994 06
	5	0.047 63	0.870 81	0.993 83
	6	0.042 26	0.823 04	0.994 00
	7	0.032 90	0.930 64	0.999 99
	8	0.028 91	0.918 77	0.999 99
	9	0.026 00	0.912 41	0.999 96
	10	0.023 22	1.046 84	0.999 87
刘晓明等 ^[8] 试验	1	0.475 02	1.392 84	0.966 56
	2	0.119 88	0.990 99	0.978 42
	3	0.028 31	0.800 12	0.988 35
	4	0.010 16	1.403 15	0.998 22
	5	0.005 76	1.569 36	0.998 89
	6	0.005 28	1.520 57	0.998 16
	7	0.004 97	1.392 88	0.998 69
	8	0.004 82	1.378 78	0.998 52
	9	0.004 74	1.363 06	0.998 20
	10	0.004 62	1.354 32	0.998 04

4.2 基于Weibull分布的岩石颗粒崩解破碎演化过程

图11为吴道祥等^[13]成果中表5的试验数据通过Weibull分布重演的岩石颗粒崩解破碎演化过程，图12为刘晓明等^[8]成果中表2的试验数据通过Weibull分布重演的岩石颗粒崩解破碎演化过程，由表2、图11、12可知，采用本文提出的Weibull分布模型，通过参数 λ 、 k 的变化，可以实现采用Weibull分布描述红砂岩颗粒崩解破碎演化的中间过程，从而再次验证了本模型的正确性。

采用式（10）求得图11、12中岩石在干湿循环作用下的相对崩解比，如图13所示。由图可知，随着循环次数的增加，两组试验的相对崩解比先迅速

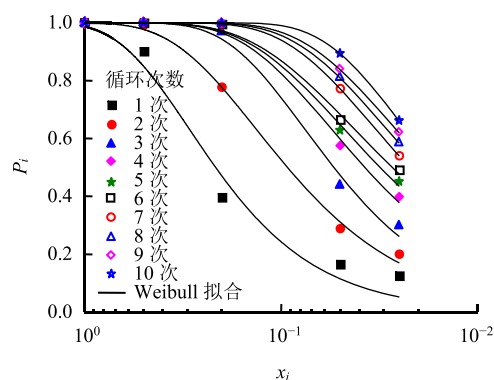
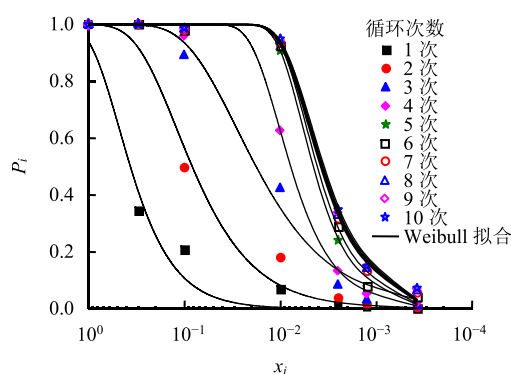
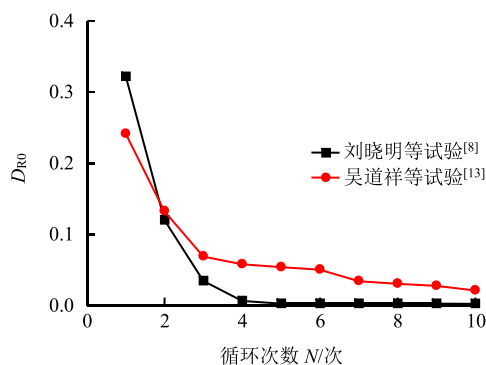
图 11 吴道祥等试验^[13]Fig.11 Test results from Wu Daoxiang^[13]图 12 刘晓明等试验^[8]Fig.12 Test results from Liu Xiaoming^[8]

图 13 相对崩解比

Fig.13 Relative disintegration ratio

减小,而后减速放缓,最后达到相对稳定的状态,其岩石崩解破碎随循环次数的变化情况与上述 3.3 节分析的结果相同。

5 结 论

(1) 红砂岩颗粒崩解物的级配曲线可以采用 Weibull 分布模型进行描述, Weibull 分布参数的变化对应着崩解物级配的变化情况,从而实现描述红砂岩颗粒崩解破碎演化的中间过程。

(2) 采用 Weibull 分布模型,通过其参数的变化可以描述红砂岩颗粒的崩解破碎演化过程。 λ (或 k) 的减小速率体现了红砂岩颗粒崩解破碎的程度: λ (或 k) 迅速减小,体现了红砂岩颗粒崩解破碎的速率较大; λ (或 k) 缓慢减小,体现了红砂岩颗粒崩解破碎的速率较小;而 λ (或 k) 趋于稳定时,红砂岩颗粒崩解破碎的速率亦趋于稳定。

(3) 基于红砂岩颗粒崩解破碎演化规律,求得了关于 Weibull 分布模型参数的相对崩解比计算公式,分析了耐崩解性指数与崩解比的异同,并研究了所采用耐崩解试验仪对试验结果的影响,认为在岩石的耐崩解性试验中,所采用试验方法的不同会对试验结果造成较大影响。

(4) 在已有成果的基础上,验证了 Weibull 分布模型应用于岩石颗粒崩解破碎演化过程的可行性,从而再次证明了本模型的正确性。

参 考 文 献

- [1] 周翠英, 朱凤贤, 张磊. 软岩饱水试验与软化临界现象研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1709-1715.
ZHOU Cui-ying, ZHU Feng-xian, ZHANG Lei. Research on saturation test and softening critical phenomena of soft rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6): 1709-1715.
- [2] 潘艺, 刘镇, 周翠英. 红层软岩遇水崩解特性试验及其界面模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3231-3239.
PAN Yi, LIU Zhen, ZHOU Cui-ying. Experimental study of disintegration characteristics of red-bed soft rock within water and its interface model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3231-3239.
- [3] 邓涛, 黄明, 詹金武. 不同 pH 环境下黏土类岩崩解过程分形演化规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 1480-1485.
DENG Tao, HUANG Ming, ZHAN Jin-wu. Fractal evolution law of clay rock disintegration under different pH conditions[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(10): 1480-1485.
- [4] 赵明华, 陈炳初, 苏永华. 红层软岩崩解破碎过程的分形分析及数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 351-356.
ZHAO Ming-hua, CHEN Bing-chu, SU Yong-hua. Fractal analysis and numerical modeling disintegrate process of red-bed soft rock[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2007, 38(2): 2351-2356.

- [5] KINCAL C, KOCA M Y, OZDEN G. Fractal parameter approach on weathering grade determination of Çeşme (Izmir, Turkey) tuffs[J]. **Bulletin of Engineering Geology & the Environment**, 2010, 69(5): 617-629.
- [6] 张宗堂, 高文华, 张志敏, 等. 干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性及分形特征[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(4): 930-937.
ZHANG Zong-tang, GAO Wen-hua, ZHANG Zhi-min, et al. Disintegration characteristics and fractal features of swelling rock during dry-wet cycles[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2019, 16(4): 2930-2937.
- [7] MIKLÚŠOVÁ V, LUCIA I. Energetic approach to the evaluation of rock disintegration process[J]. **Acta Montanistica Slovaca**, 2008, 13(1): 17-24.
- [8] 刘晓明, 熊力, 刘建华, 等. 基于能量耗散原理的红砂岩崩解机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3143-3149.
LIU Xiao-ming, XIONG Li, LIU Jian-hua, et al. Slacking mechanism of red sandstone based on energy dissipation principle[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2011, 42(10): 3143-3149.
- [9] 黄明, 詹金武. 酸碱溶液环境中软岩的崩解试验及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2607-2623.
HUANG Ming, ZHANG Jin-wu. Disintegration tests and energy dissipation characteristics of soft rock in acid and alkali solution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2607-2623.
- [10] LÖRINCZ J. Grading entropy of soils[D]. Budapest: University of Budapest, 1986.
- [11] 曾志雄, 孔令伟, 田海, 等. 膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1983-1989.
ZENG Zhi-xiong, KONG Ling-wei, TIAN Hai, et al. Effect of drying and wetting cycles on disintegration behavior of swelling mudstone and its grading entropy characterization[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 1983-1989.
- [12] 郑明新, 张晗秋, 舒明峰, 等. 不同块度煤系软岩崩解性室内试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1484-1489.
ZHENG Ming-xin, ZHANG Han-qiu, SHU Ming-feng, et al. Laboratory experimental study of slaking characteristics of coal measure strata soft rock[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2018, 14(6): 1484-1489.
- [13] 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(增刊 2): 4173-4179.
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(Suppl.2): 4173-4179.
- [14] 张巍, 尚彦军, 曲永新, 等. 泥质膨胀岩崩解物粒径分布与膨胀性关系试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 66-72.
ZHANG Wei, SHANG Yan-jun, QU Yong-xin, et al. Grain size distribution of collapsed scraps of argillaceous rock and its relationship with expansibility: an experimental study[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 2066-2072.
- [15] 中华人民共和国地质矿业行业标准. DZ/T 0276—2015 岩石物理力学性质试验规程[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2015.
Professional Standard of Geological and Mining Industry of the People's Republic of China. DZ/T 0276—2015 Regulation for testing the physical and mechanical properties of rock[S]. Beijing: Ministry of Nature Resources of the People's Republic of China, 2015.
- [16] CHEN X, ZHANG J, LI Z. Shear behaviour of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale triaxial tests[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2014, 42(4): 312-328.
- [17] 乔宏霞, 郭向柯, 朱彬荣. 三参数 Weibull 分布的多因素作用下混凝土加速寿命试验[J]. 材料导报, 2019, 33(4): 639-643.
QIAO Hong-xia, GUO Xiang-ke, ZHU Bin-rong. Accelerated life test of concrete under multiple factors based on three-parameter Weibull distribution[J]. **Materials Science**, 2019, 33(4): 2639-2643.
- [18] 李倩倩, 黄栋, 乔建平, 等. 岩体抗剪强度参数的线性优化方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 156-161.
LI Qian-qia, HUANG Dong, QIAO Jian-ping, et al. Linear optimization method for shear strength parameters of rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl.2): 2156-2161.
- [19] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks[J]. **Engineering Geology**, 2009, 108(1): 36-42.