

# 基于优化级配方程的红砂岩崩解特性及应用研究

张巨峰<sup>1,2</sup>, 杨峰峰<sup>1</sup>, 余岚<sup>1</sup>, 许泰<sup>1</sup>, 郑超<sup>1</sup>, 张宗堂<sup>2</sup>

(1. 陇东学院 能源工程学院, 甘肃 庆阳 745000; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 红砂岩被广泛用作各类工程填料, 在自然环境中反复干湿循环作用下易产生崩解, 从而引发大量工程问题。以湖南株洲地区的红砂岩为研究对象, 对干湿循环作用下岩石崩解后颗粒粒径的分布状况及颗粒级配的变化规律进行了深入研究。结果表明: 干湿循环作用下红砂岩崩解颗粒的级配曲线整体呈反 S 形。基于优化级配方程对红砂岩的崩解特性进行了研究, 分析了优化级配方程对崩解颗粒级配描述的适用性, 结合已有的崩解指标, 验证了级配参数作为崩解指标的可行性, 且指出了优点所在, 并对岩石崩解后颗粒级配的均匀程度进行了研究。

**关键词:** 岩石崩解; 红砂岩; 干湿循环; 颗粒级配; 优化级配方程

中图分类号: TV223.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0218-06

## Disintegration characteristic and application of red sandstone based on optimized gradation equation

ZHANG Jufeng<sup>1,2</sup>, YANG Fengfeng<sup>1</sup>, YU Lan<sup>1</sup>, XU Tai<sup>1</sup>, ZHENG Chao<sup>1</sup>, ZHANG Zongtang<sup>2</sup>

(1. School of Energy Engineering, Longdong University, Qingyang 745000, China;

2. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Red sandstone is widely used as a kind of engineering filler, and it is prone to disintegration under repeated dry and wet cycles in the natural environment, which causes a lot of engineering problems. The red sandstone in Zhuzhou area of Hunan Province was taken as the research object, the distribution of particle size and the variation of particle gradation after disintegration under dry and wet cycles were studied. The results showed that the gradation curve of red sandstone disintegration particles under the dry and wet cycle showed the anti-S-shaped. Disintegration characteristic of red sandstone was studied based on the optimized grading equation, and the applicability of the optimized grading equation to the grading description of disintegration particles was analyzed. The feasibility of the gradation parameters as a disintegration indicator was verified combined with the existing disintegration indicators, and the advantages were pointed out. The uniformity of particle grading after rock disintegration was also studied.

**Key words:** rock disintegration; red sandstone; dry-wet cycling; grain composition; optimized gradation equation

## 1 研究背景

红砂岩在我国西南、华南、华中、西北等地区广泛分布, 是我国工程建设中不可避免的岩土体。随着我国高速公路、铁路等各项工程建设的不断发展, 红砂岩被广泛的用作各类工程填料, 而其在自然环境中反复的干湿循环作用下易产生崩解, 从而引发大量的工程问题<sup>[1-2]</sup>。

对于岩石崩解特性的研究, 众多学者进行了大量的研究工作。吴道祥等<sup>[3]</sup>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。我国规范<sup>[4]</sup>中指出描述岩石崩解性的指标为耐崩解性指数。刘晓明等<sup>[5]</sup>、赵明华等<sup>[6]</sup>、苏永华等<sup>[7]</sup>通过室内崩解试验, 引入分形方法模拟了红层软岩崩解后的粒径随时间的长期变化规律, 建立了定量描述崩解过程的分形维数。曾志雄等<sup>[8]</sup>在粒度熵的基础

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-02-12

基金项目: 甘肃省青年科技计划项目(18JR3RM240); 甘肃省安全生产科技项目(GAJ00011、GAJ00017); 陇东学院青年科技创新项目(XYZK1610)

作者简介: 张巨峰(1983-), 男, 山西应县人, 博士研究生, 讲师, 主要从事煤矿灾害防治与岩石力学方面的研究。

上引入标准基础熵来表征膨胀岩的崩解特性,并验证了该方法的合理性。Erguler 等<sup>[9]</sup>在崩解颗粒粒径分布的基础上提出崩解比的概念,并通过试验研究验证了其对崩解特性描述的适用性。然而,由于岩石崩解机制的复杂性,至今仍未形成一致的认识,无法找到统一的定量描述标准<sup>[8]</sup>。

现有研究中,采用单一指标对岩石崩解特性的研究较为丰富,而对于岩石在干湿循环作用下崩解后颗粒级配的描述及级配演化情况的研究较少,且对于岩石崩解后颗粒级配均匀程度的研究鲜见报道。因此,本文在室内试验的基础上,以湖南株洲地区的红砂岩为研究对象,对干湿循环作用下岩石崩解后颗粒粒径的分布状况及颗粒级配的变化规律进

行了研究,分析了级配方程对于岩石崩解特性描述的适用性,对岩石崩解后颗粒级配的均匀程度进行了研究。

## 2 干湿循环作用下红砂岩崩解特性试验研究

### 2.1 试样与试验方法

红砂岩样采自湖南株洲地区,依据 DZ/T0276.9-2015 岩石物理力学性质试验规程<sup>[4]</sup>,其膨胀性及相关物理力学性质见表 1。对红砂岩进行 X 射线衍射试验,获取了其矿物成分(见表 2),图 1 为 XRD 衍射图谱,由表 2、图 1 可知,其主要矿物成分为石英,且含有一定的膨胀性黏土矿物<sup>[10-11]</sup>。

表 1 红砂岩试样基本物理力学性质

天然含水率/%	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	天然样 抗压强度/MPa	干燥样 抗压强度/MPa	饱和样 抗压强度/MPa	软化系数	轴向自由膨胀率/%	径向自由膨胀率/%	侧限膨胀应力/kPa	侧向约束无荷载轴向膨胀率/%
1.29	2.54	2.62	10.3	20.4	4.7	0.23	0.24	0.31	160.73	0.34

表 2 红砂岩试样矿物成分及含量

石英	方解石	长石	云母	高岭石	绿泥石	伊利石	绿脱石	蒙脱石	其他
40.85	20.47	12.84	8.41	6.96	5.24	2.52	1.16	0.81	0.74

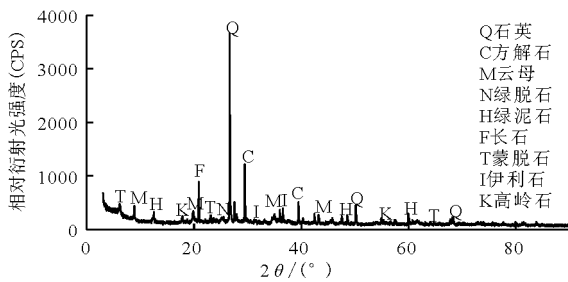


图 1 红砂岩试样 XRD 衍射图谱

试验方法参考《DZ/T0276.9-2015 岩石物理力学性质试验规程 第 9 部分:岩石耐崩解性试验》,采用静态浸水崩解试验<sup>[10-11]</sup>。

试验步骤为:(1)将制备好的试样置于 105℃ 的烘箱内干燥至恒重(不少于 24 h),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,注入自来水使试样完全浸入水中 24 h 以上;(3)取出试样置于 105℃ 的烘箱内干燥至恒重(不少于 24 h),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,其中对粒径小于 0.075 mm 的部分通过质量守恒求得。

完成上述步骤(2)、(3)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。

### 2.2 红砂岩崩解颗粒级配曲线分析

将红砂岩样进行 20 次干湿循环试验,图 2 为红砂岩崩解颗粒级配曲线,为便于识别干湿循环作用下红砂岩崩解颗粒级配曲线的变化情况,图中仅标记出干湿循环 1、5、10、15、20 次的级配曲线,其余曲线随循环次数的增加依次分布在各标记曲线之间。由图 2 可知,级配曲线的形状整体呈反 S 形,且随着循环次数的增加:(1)崩解颗粒的级配曲线逐渐向粒径减小的方向移动;(2)级配曲线反 S 形上凸的部分愈加凸出,而下凹的部分逐渐减弱;(3)在粒径  $d > 2$  mm 时,各曲线的间距逐渐减小,最终几乎重合,这与崩解情况随着循环次数的增加逐渐趋于稳定是一致的;而在粒径  $d < 2$  mm 时,各曲线的间距变化较小。

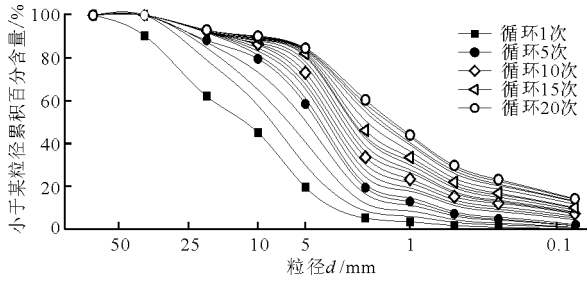


图2 红砂岩崩解颗粒级配曲线图

### 3 基于优化级配方程的红砂岩崩解特性试验研究

#### 3.1 优化级配方程对崩解颗粒级配描述的适用性研究

目前,完整准确表述颗粒级配的方法是采用级配曲线。本文参考 Zhu Jungao 等<sup>[12]</sup>、朱俊高等<sup>[13]</sup>、郭万里等<sup>[14]</sup>提出的描述连续土体颗粒级配的级配方程,进一步研究优化级配方程对红砂岩崩解颗粒描述的适用性。小于某粒径  $d$  累积百分含量  $p$  的优化级配方程为:

$$p = \frac{100}{(1-b)\left(\frac{d_{\max}}{d}\right)^m + b} \quad (1)$$

式中: $d_{\max}$ 为最大粒径,根据试验方法,本文取 $d_{\max} = 60 \text{ mm}$ ;  $m$ 与 $b$ 为拟合参数,本文称为级配参数。

级配参数  $m$  与  $b$  的求解方法众多,本文采用拟合函数进行求解的方法,依据上述试验结果,由公式(1)求解的级配参数见表3。选取干湿循环1、10、20次的试验数据,进一步验证优化级配方程对红砂岩崩解颗粒级配描述的适用性,图3为试验数据与拟合曲线的对比图,由表3中的相关系数及图3可知,采用优化级配方程可以准确描述红砂岩崩解颗粒的级配特征。

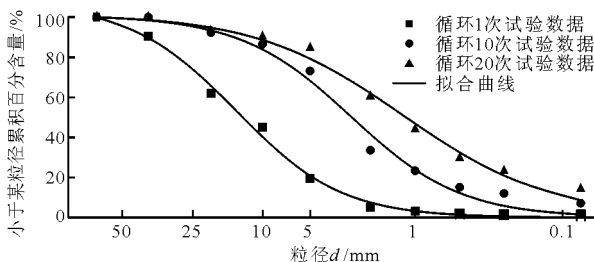


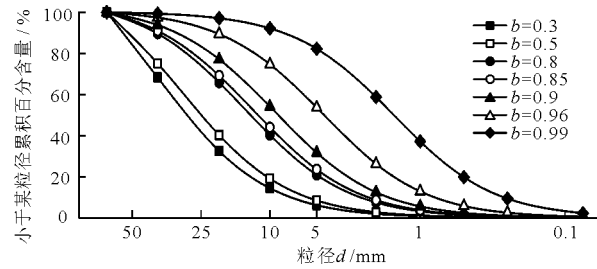
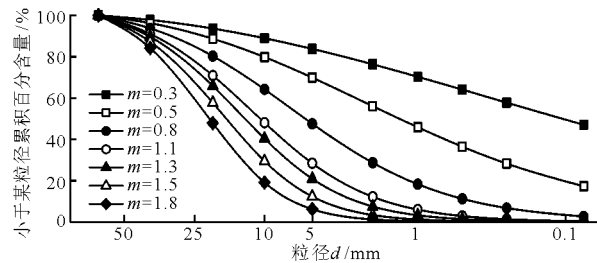
图3 试验数据与拟合曲线对比图

#### 3.2 级配参数物理意义分析

基于试验数据,进一步对级配参数  $m$  与  $b$  的物理意义进行分析。图4为  $m = 1.2542$  时级配曲线随

参数  $b$  值的变化图,由图4可知,当  $b < 0.8$  时,级配曲线呈双曲线形分布;而当  $b \geq 0.8$  时,曲线呈反 S 形分布,且随着参数  $b$  的增大,反 S 形曲线上凸的部分愈加凸出,而下凹的部分逐渐减弱。由此可知,级配参数  $b$  为反映红砂岩崩解颗粒级配曲线形态的参数。

图5为  $b = 0.8249$  时级配曲线随参数  $m$  的变化图,由图5可知,随着级配参数  $m$  的逐渐增大,曲线的倾斜程度逐渐增加。由此可知,级配参数  $m$  为反映红砂岩崩解颗粒级配曲线整体倾斜程度的参数。

图4 级配曲线随参数 b 的变化图( $m = 1.2542$ )图5 级配曲线随参数 m 的变化图( $b = 0.8249$ )

#### 3.3 级配参数作为崩解指标的可行性分析

由上述2.2节红砂岩崩解颗粒级配曲线随循环次数的变化情况及3.2节对级配参数  $m$ 、 $b$  的物理意义分析可知,级配参数  $m$  与  $b$  可作为红砂岩崩解特性的判别指标。即  $m$  反映了红砂岩崩解颗粒级配曲线的整体倾斜程度,其可以体现出红砂岩的崩解速率; $b$  反映了红砂岩崩解颗粒级配曲线的形态, $m$  与  $b$  的值可以体现出红砂岩崩解颗粒的粒径分布状况。下面结合已有研究中指出的崩解指标,包括:耐崩解性指数( $I_{dN}$ )、分形维数( $D$ )、标准基础熵( $S_b$ )及崩解比( $I_{RDN}$ ),对级配参数作为崩解指标的可行性进行分析。

参考文献[4]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:

$$I_{dN} = \frac{m_N}{m_d} \times 100\% \quad (2)$$

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  $N$  次标准循环后残

留试样的烘干质量, g。

根据文献[5,15 - 16]中岩石崩解分形维数的计算方法,得到基于粒径与质量关联的分形维数计算公式为:

$$p = \left(\frac{d}{\sigma}\right)^{3-D} \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为与平均尺寸相关的量,可通过函数拟合求得; $D$ 为分形维数。

参考文献[9,17 - 19]中粒度熵的计算过程,求解得到标准基础熵的计算公式为:

$$S_b = \frac{\sum_{i=1}^m [M_i \log_2(\Delta R_i / \Delta R_1)]}{\log_2(\Delta R_N / \Delta R_1)} \quad (4)$$

式中: $M_i$ 为第*i*个粒组内的颗粒含量,% ,相邻两筛盘的筛孔直径为该粒组区间; $\Delta R_i$ 为第*i*个粒组的宽度,mm; $\Delta R_1$ 为粒组宽度最小值,mm; $\Delta R_N$ 为粒组宽度最大值,mm。

参考 Erguler 等<sup>[9]</sup>提出的崩解比,得到基于大于某粒径累积百分含量与粒径曲线的崩解比为:

$$I_{RdN} = \frac{A_C}{A_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $A_T$ 为曲线中横坐标与纵坐标围成矩形的面积; $A_C$ 为曲线下方与矩形所围成图形的面积。

基于干湿循环作用下红砂岩的崩解特性试验,由公式(2) ~ (4)求解得到的各参数值见表3。

由上述分析可知,级配参数  $m$  可以体现出红砂岩的崩解速率,根据文献[4]中定义耐崩解性指数由干湿循环第2次计算,分别建立首次干湿循环之后各崩解指标(耐崩解性指数  $I_{dN}$ 、分形维数  $D$ 、标准基础熵  $S_b$ 、崩解比  $I_{RdN}$ )与级配参数  $m$  的线性回归关系,可得:

$$I_{dN} = 71.506m - 18.324, R^2 = 0.9746 \quad (6)$$

$$D = -0.6516m + 3.2818, R^2 = 0.8949 \quad (7)$$

$$S_b = 0.4129m + 0.1015, R^2 = 0.9448 \quad (8)$$

$$I_{RdN} = 13.709m - 6.012, R^2 = 0.7449 \quad (9)$$

由公式(6) ~ (9)可知,耐崩解性指数  $I_{dN}$ 、分形维数  $D$ 、标准基础熵  $S_b$ 、崩解比  $I_{RdN}$  均与级配参数  $m$  具有良好的线性相关性,而已有各指标的物理意义明确,从而可知将级配参数作为崩解指标是可行的。

相对于已有的崩解指标,级配参数作为崩解指标具有以下优点:(1)能在体现崩解颗粒较多粒组变化情况的同时,级配参数  $b$  与  $m$  可以准确地反映出崩解颗粒的级配状况,进而得出崩解颗粒是否可以作为路基填料;(2)通过拟合函数求解级配参数的相关系数高于已有需要通过拟合求解的指标。

表 3 不同干湿循环次数的计算参数值

$N$	$m$	$b$	$R^2$	$I_{dN}$	$D$	$R^2$	$S_b$	$I_{RdN}$	$C_u$	$C_c$
1	1.2542	0.8249	0.9964	94.91	1.7600	0.8771	0.8325	29.5542	6.72	1.18
2	1.5075	0.9450	0.9973	91.47	2.1989	0.9793	0.7727	19.6425	5.35	1.09
3	1.4293	0.9554	0.9976	87.99	2.2454	0.9691	0.7345	16.4339	5.92	1.09
4	1.3885	0.9658	0.9964	83.57	2.3358	0.9640	0.6960	14.0560	6.30	1.09
5	1.4339	0.9768	0.9945	80.64	2.3528	0.9532	0.6700	12.4341	6.01	1.08
6	1.4551	0.9806	0.9942	78.99	2.3907	0.9527	0.6531	10.9460	5.87	1.08
7	1.3387	0.9774	0.9896	75.63	2.4858	0.9549	0.6271	10.2623	6.83	1.09
8	1.2801	0.9759	0.9888	72.59	2.5123	0.9536	0.6120	9.8696	7.45	1.09
9	1.2211	0.9745	0.9872	69.71	2.5381	0.9516	0.5954	9.3238	8.19	1.10
10	1.1638	0.9727	0.9856	66.41	2.5666	0.9499	0.5789	8.9803	9.07	1.11
11	1.1123	0.9714	0.9844	63.77	2.5803	0.9462	0.5635	8.6267	10.02	1.11
12	1.1039	0.9730	0.9847	60.95	2.5903	0.9424	0.5511	8.2575	10.22	1.11
13	1.0566	0.9716	0.9838	57.69	2.6107	0.9395	0.5348	7.9499	11.32	1.12
14	1.0139	0.9687	0.9826	56.63	2.6250	0.9395	0.5265	7.7550	12.49	1.13
15	0.9913	0.9686	0.9841	53.88	2.6348	0.9363	0.5143	7.5026	13.23	1.13
16	0.9312	0.9651	0.9863	49.19	2.6584	0.934	0.4953	7.2886	15.55	1.14
17	0.8904	0.9636	0.9879	45.21	2.6767	0.9299	0.4768	7.0354	17.60	1.15
18	0.8843	0.9646	0.9891	43.17	2.6823	0.9266	0.4677	6.7297	17.98	1.15
19	0.8567	0.9633	0.9898	41.38	2.6941	0.9236	0.4565	6.5825	19.69	1.16
20	0.8508	0.9641	0.9903	39.60	2.6996	0.9202	0.4488	6.4537	20.13	1.16

## 4 基于优化级配方程的红砂岩崩解颗粒工程应用研究

岩石破碎之后的颗粒常被用作路基填料<sup>[20-21]</sup>。而岩石在干湿循环作用下的崩解破碎能够在自然条件下完成,方法简便且节省费用。红砂岩的崩解颗粒若要在工程中使用,则必须满足级配良好的条件,即不均匀系数  $C_u \geq 5$ ,且曲率系数  $1 \leq C_c \leq 3$ ,其中  $C_u$  与  $C_c$  的计算公式为:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (10)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60}d_{10}} \quad (11)$$

若用  $d_x$  表示小于某种粒径颗粒质量占总颗粒质量的百分含量为  $p_x$ ,由公式(1)可得:

$$d_x = d_{\max} \left[ \frac{p_x(1-b)}{100-p_x b} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (12)$$

由公式(10)~(12)可得基于优化级配方程的  $C_u$  与  $C_c$  计算公式为:

$$C_u = \left[ \frac{6(10-b)}{10-6b} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

$$C_c = \left[ \frac{3(10-6b)(10-b)}{2(10-3b)^2} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (14)$$

由公式(13)、(14)并结合级配参数  $m$ 、 $b$  即可求得  $C_u$  与  $C_c$  (见表3)。图6为不均匀系数  $C_u$  随循环次数的变化关系曲线;图7为曲率系数  $C_c$  随循环次数的变化关系曲线。由  $C_u$  与  $C_c$  的变化情况可知,红砂岩的崩解颗粒可作为路基填料在工程中使用。

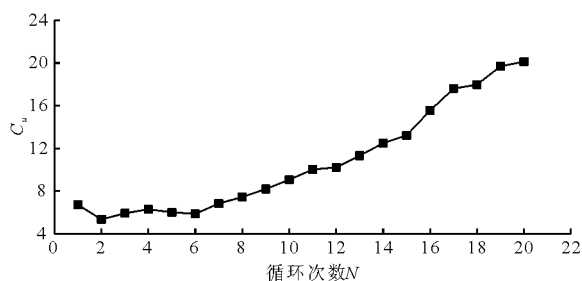


图6 不均匀系数  $C_u$  随循环次数的变化关系

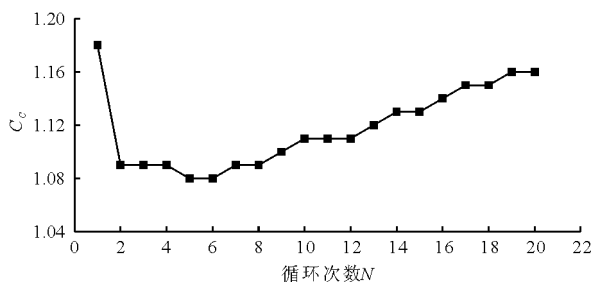


图7 曲率系数  $C_c$  随循环次数的变化关系

在工程中,可以通过公式(13)、(14)计算直接得到  $C_u$  与  $C_c$ ,而不必在单对数坐标纸上绘图读取数值,且公式(13)、(14)还可以为路基填料级配设计计算提供参考。

## 5 结论

(1)干湿循环作用下红砂岩崩解颗粒的级配曲线整体呈反S形,且随着循环次数的增加:级配曲线逐渐向粒径减小的方向移动;级配曲线反S形上凸的部分愈加凸出,而下凹的部分逐渐减弱;当粒径  $d > 2$  mm 时,各曲线的间距逐渐减小,最终几乎重合,而当粒径  $d < 2$  mm 时,各曲线的间距变化较小。

(2)基于优化级配方程对红砂岩的崩解特性进行了研究,分析了优化级配方程对崩解颗粒级配描述的适用性,解释了级配参数  $m$  与  $b$  的物理意义,并结合已有的崩解指标,验证了级配参数作为崩解指标的可行性,且指出了相对于已有指标的优点所在。

(3)基于优化级配方程研究了红砂岩崩解颗粒的工程应用,结合工程中级配良好的条件,得出了红砂岩的崩解颗粒可作为路基填料在工程中使用,且推导了含有级配参数的不均匀系数与曲率系数的求解公式,该公式可对路基填料的级配设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 67-71.
- [2] 熊力. 红层软岩崩解机理研究及工程应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [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(S2): 4173-4179.
- [4] 中华人民共和国国土资源部. 岩石物理力学性质试验规程: DZ/T 0276.10-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] 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): 2043-2046.
- [6] 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.
- [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): 728-732.
- [8] 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.
- [9] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Relative contribution of va-

- rious climatic processes in disintegration of clay - bearing rocks[J]. *Engineering Geology*, 2009,108(1-2):36-42.
- [10] 张宗堂,高文华,张志敏,等. 干旱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.
- [11] 张宗堂. 干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性试验研究[D]. 湘潭:湖南科技大学, 2018.
- [12] ZHU Jungao, GUO Wanli, WEN Yanfeng, et al. New gradation equation and applicability for particle-size distributions of various soils[J]. (*ASCE*) *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(2):040171551-040171558.
- [13] 朱俊高,郭万里,王元龙,等. 连续级配土的级配方程及其适用性研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(10):1931-1936.
- [14] 郭万里,朱俊高,余挺,等. 土的连续级配方程在粗颗粒中的应用研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(10):3661-3667.
- [15] 张季如,胡泳,张弼文,等. 石英砂砾破碎过程中粒径分布的分形行为研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(5):784-791.
- [16] Ruiz - Carulla R, Corominas J, Mavrouli O. A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits[J]. *Landslides*, 2015, 12(4):815-825.
- [17] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(4):379-423, 623-56.
- [18] IMRE E, LÖRINCZ J, RÓZSA P. Characterization of some sand mixtures[C]//The Proceeding. of the 12th International. Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, IAC-MAG. 2008;2064-2075.
- [19] LÖRINCZ J, IMRE E, GÁLOS M, et al. Grading entropy variation due to soil crushing[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2005, 5(4):311-319.
- [20] 冷伍明,周文权,聂如松,等. 重载铁路粗粒土填料动力特性及累积变形分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3):728-736.
- [21] 冷伍明,刘文劼,赵春彦,等. 重载铁路路基压实粗粒土填料动力破坏规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3):640-646.

(上接第217页)

- [23] LI Hang, WU Laosheng. A generalized linear equation for non-linear diffusion in external fields and non-ideal systems[J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(10):357-373.
- [24] 李以圭,陆九芳. 电解质溶液理论[M], 北京:清华大学出版社, 2005.
- [25] XI Yonghui, REN Jie, HU Zhongxiang. Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants in clay soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(3):397-402.
- [26] 张文杰,黄依艺,张改革. 填埋场污染物在有限厚度土层中一维对流-扩散-吸附解析解[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(7):1197-1201.
- [27] SHACKELFORD CD, DANIEL DE. Diffusion in saturated soil I: Background[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(3):467-484.
- [28] 王平,胡伏生,韩占涛,等. 咸水通过黏性土层的弥散作用试验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(1):101-104.