

干湿循环作用下膨胀岩崩解的粒度熵特征

张宗堂^{1,2}, 高文华², 唐晓宇², 张巨峰¹, 韩森¹

(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: 膨胀岩遇水崩解是引发工程灾害的重要原因,其在干湿循环作用下的崩解情况将更加明显。采用湖南株洲的膨胀岩样进行室内崩解试验,并基于粒度熵概念,对其在不同干燥温度、外界扰动、不同初始单块质量情况下的标准基础熵进行研究。结果表明:静态崩解方式下,相对于105、30℃而言,60℃干燥温度下的标准基础熵最小;而扰动崩解方式下,膨胀岩崩解的标准基础熵几乎不受干燥温度的影响。在干燥温度、初始单块质量等因素不变的情况下,外界扰动对膨胀岩崩解的标准基础熵存在显著影响。初始单块质量对膨胀岩崩解的标准基础熵存在一定的影响,初始单块质量越大,标准基础熵越小。试验研究表明,标准基础熵是评价岩石崩解性的一种重要指标。

关键词: 岩石崩解; 膨胀岩; 干湿循环; 粒度熵

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0218-07

Characteristics of grading entropy of disintegration of swelling rock under dry-wet cycles

ZHANG Zongtang^{1,2}, GAO Wenhua², TANG Xiaoyu², ZHANG Jufeng¹, HAN Sen¹

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The disintegration of swelling rock when contacting with water is an important cause of engineering disasters, which is more obvious under the dry-wet cycles. The indoor disintegration tests were conducted on the swelling rock collected from Zhuzhou City, Hunan Province. Based on the concept of grading entropy, the relative base entropy of different dry temperatures, external disturbances and different initial mass of each block were studied. The results showed that, in the mode of static disintegration, the standard base entropy is the minimum at the dry temperature of 60 °C relative to that of 105 °C and 30 °C. However, in the mode of disturbed disintegration, the standard base entropy of disintegration of swelling rock is almost unaffected by the drying temperature. Furthermore, in the case of constant temperature and initial mass of each block, the external disturbance has a significant effect on the standard base entropy of disintegration of swelling rock. The initial mass of each block has a certain influence on the standard base entropy of disintegration of the swelling rock, showing that the larger the initial mass of each block is, the smaller the standard base entropy will be. In addition, experimental studies have shown that the standard basic entropy is an important indicator to distinguish the strength of rock disintegration.

Key words: rock disintegration; swelling rock; drying and wetting cycle; grading entropy

1 研究背景

膨胀岩能在水环境下发生物理化学反应,从而

产生膨胀与崩解^[1-3]。且膨胀岩中含有一定的膨胀性黏土矿物,其崩解性比其他岩石更加明显。由于膨胀岩在我国分布广泛,所以被大量应用于工程建

收稿日期:2019-05-09; 修回日期:2019-06-17

基金项目:湖南省教育厅重点科研项目(16A073);湖南省研究生科研创新项目(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项目(E21807);甘肃省安全生产科研项目(GAJ00011)

作者简介:张宗堂(1991-),男,甘肃会宁人,博士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。

通讯作者:高文华(1962-),男,湖南宁乡人,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。

设当中,然而,随着工程建设的不断完善,膨胀岩在交通、水利、矿山等领域的遇水崩解问题日益突出^[2-3]。故对膨胀岩在干湿循环作用下崩解特性的研究具有重要的意义。

Clausius^[4]提出了“熵”的概念,并用“熵”来描述系统的混乱程度。Shannon^[5]将统计熵用于信息理论中,运用其描述系统信息的不确定性。Jaynes^[6]提出最大信息熵原理,用以确定各种系统随机变量的概率分布函数,使其在众多领域得到了广泛应用。Lörincz^[7]提出粒度熵,并采用基础熵和熵增量来量化岩土颗粒级配曲线特征的紊乱程度。田海等^[8]依据贝壳砂试样试验前后粒径分布资料,在统计熵概念基础上提出颗粒破碎粒度熵模型,认为贝壳砂颗粒破碎粒度熵参数能较好地描述其颗粒破碎行为。曾志雄等^[2]根据干湿循环后膨胀岩的粒径分布,引入标准基础熵来表征膨胀岩的崩解特性,指出可以将标准基础熵作为岩石崩解的量化指标,并通过与崩解比的对比分析验证了该方法的合理性。

目前,已有不少对于岩石崩解特性的研究,其中,申培武等^[9]、曾志雄等^[2]、梁冰等^[10]、梁越等^[11]、赵吉霞等^[12]、田巍巍等^[13]均对岩石在干湿循环作用下的崩解情况展开研究,但是对于膨胀岩在不同干燥温度、外界扰动、不同初始单块质量情况下崩解特性的研究鲜见报道。因此,本文基于粒度熵的概念,对于干湿循环作用下膨胀岩在不同干燥温度、外界扰动、不同初始单块质量情况下崩解的粒度熵特征展开研究。

2 膨胀岩崩解的粒度熵表征

粒径级配曲线反映了固体颗粒的粒径分布状况,但由于其含有较多数据而缺少单一量化指标,故难以对不同曲线颗粒的粒度分布情况进行整体比较。因此,Imre等^[14]、Lörincz^[15]提出粒度熵用于量化颗粒级配曲线,表征岩土颗粒级配的紊乱程度。由此可见,可以采用粒度熵来描述岩石崩解后颗粒的粒径分布状况,并以此度量岩石的崩解破碎程度。

2.1 信息熵原理

对随机变量 $X, P\{X = x_i\} = p(x_i), (i = 1, 2, \dots, M)$, 其中 $p(x_i) \geq 0, \sum_{i=1}^M p(x_i) = 1$, 其信息熵为^[16]:

$$S(X) = - \sum_{i=1}^M [p(x_i) \log_2 p(x_i)] \quad (1)$$

2.2 粒度熵的概念

Lörincz定义了“截断”的概念^[2,14-15],第 i 个截断(即第 i 个粒组)的颗粒粒径 d 的范围:

$$R_{i-1} < d \leq R_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中: m 为截断数目,即粒组划分数量; i 为粒组划分的序号; R_i 为截断尺寸序列,即第 i 个筛孔的孔径,mm。

设在第 i 个粒组内的颗粒含量为 M_i ,则各粒组的颗粒含量之和满足:

$$\sum_{i=1}^m M_i = 1 \quad (3)$$

假设最小颗粒以最小筛孔直径 $d_{\min}$ 的长度在各粒组内均匀分布,则在第 i 个粒组内包含的最小颗粒的数量为:

$$C_i = \frac{R_i - R_{i-1}}{d_{\min}} = 2^{22} \Delta R_i \quad (4)$$

各粒组被划分成 j 份,每个 j 内的相对频度 p_j 均相等:

$$p_j = \frac{M_i}{C_i} \quad (5)$$

考虑到各粒组被划分为 j 份,且共划分了 m 个粒组,将公式(5)代入公式(1),计算可得粒度熵 S 为:

$$\begin{aligned} S &= - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{C_i} (p_j \log p_j) = - \sum_{i=1}^m (C_i \frac{M_i}{C_i} \log_2 \frac{M_i}{C_i}) \\ &= \sum_{i=1}^m (M_i \log_2 C_i) - \sum_{i=1}^m (M_i \log_2 M_i) \quad (6) \end{aligned}$$

2.3 粒度熵的标准化

为便于在同一标准下研究及消除最小筛孔直径的影响,采用文献[2]、[14-15]的计算方法将公式(6)写成基础熵(S_0)与熵增量(ΔS)并进行标准化,则:

$$S = S_0 + \Delta S \quad (7)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^m (M_i \log_2 C_i) \quad (8)$$

$$\Delta S = - \sum_{i=1}^m (M_i \log_2 M_i) \quad (9)$$

依据文献[2]定义第 i 个粒组的特征熵为:

$$S_{0i} = \log_2 C_i \quad (10)$$

标准基础熵为:

$$S_b = \frac{S_0 - S_{0\min}}{S_{0\max} - S_{0\min}} \quad (11)$$

由公式(4)、(10)、(11)可得:

$$S_b = \frac{\sum_{i=1}^m (M_i \log_2 (\Delta R_i / \Delta R_1))}{\log_2 (\Delta R_N / \Delta R_1)} \quad (12)$$

标准熵增量为:

$$\Delta S_b = - \sum_{i=1}^m M_i \log_2(M_i) / \log_2(m) \tag{13}$$

式中: ΔR_i 为第 i 个粒组的宽度,mm; ΔR_1 为粒组宽度最小值,mm; ΔR_N 为粒组宽度最大值,mm。

标准基础熵体现了粒组宽度差异的影响:大颗粒含量越多,其值越大,反之越小^[14-15]。由此可知,在岩石崩解过程中,其标准基础熵越小,则其崩解物的小颗粒含量越多,其崩解速率越快。

3 试样与试验方法

3.1 试样基本性质

试验样品为湖南省株洲地区的红砂岩,依据《岩石物理力学性质试验规程(DZ/T 0276.9-2015)》^[17],基本物理力学性质如表 1。对膨胀岩进行 X 射线衍射试验,获取了其矿物成分,其中,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%,图 1 为膨胀岩试样 XRD 衍射图谱,由此可知,其主要矿物成分为石英,且含有一定的膨胀性黏土矿物。依据朱训国等^[18]对膨胀岩的判别标准可知,该红砂岩为微膨胀岩。

表 1 膨胀岩试样基本物理力学性质

指标名称	指标值
含水率/%	1.29
密度/(g·cm ⁻³)	2.54
抗压强度/MPa	10.30
侧限膨胀应力/kPa	160.73

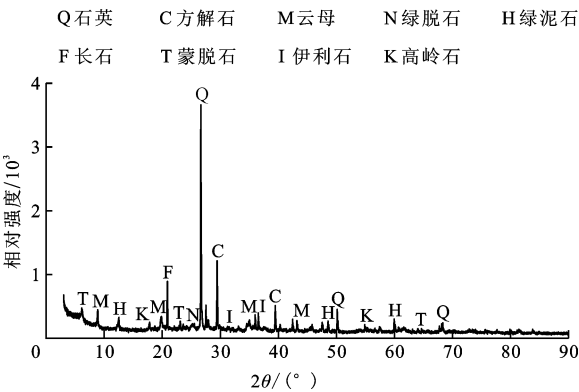


图 1 膨胀岩试样 XRD 衍射图谱

3.2 试验方法

崩解试验采用静态崩解与扰动崩解两种崩解方式,其中静态崩解试验流程如图 2 所示。

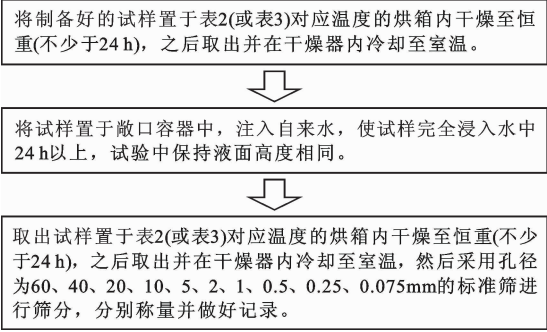


图 2 静态崩解试验流程图

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),试验步骤为:将图 2 中第 2 步变为:将试样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。

为了研究干湿循环作用下干燥温度不同时膨胀岩崩解的粒度熵特征,开展了干燥温度不同情况下的静态与扰动崩解试验,试验方案见表 2。

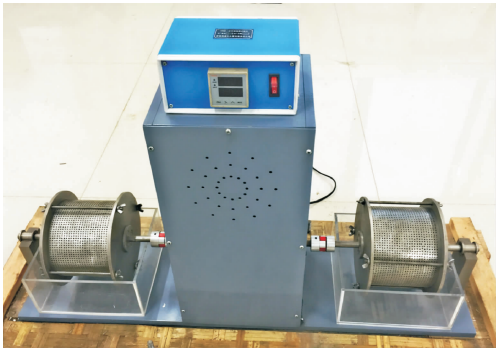


图 3 HNB-1 岩石耐崩解试验仪

表 2 静态与扰动崩解试验方案设计一览表

崩解方式	干燥温度/ ℃	循环 次数	试样 编号
静态浸水崩解	105	20	LW01
	60	20	LW02
	30	20	LW03
外界扰动崩解	105	20	LY01
	60	20	LY02
	30	20	LY03

实际环境中并非仅存在单一块度的岩石,而是由大小不等的多块度岩石组成的。为了研究干湿循环作用下初始单块质量不同时膨胀岩崩解的粒度熵特征,开展了初始单块质量不同情况下的静态崩解

试验,试验方案见表 3,干燥温度为 105℃。

表 3 不同初始单块岩石质量静态崩解试验方案设计一览表

崩解方式	干燥温度/℃	总质量/g	平均质量/g	单块质量范围/g	循环次数/次	试样编号
静态	105	403.26	26.88	20.47~37.02	20	LZ01
	105	557.46	79.64	73.39~85.73	20	LZ02
浸水	105	722.73	144.55	136.05~152.64	20	LZ03
崩解	105	907.04	453.52	450.93~456.11	20	LZ04
	105	1262.70	631.35	630.90~631.80	20	LZ05

4 试验结果与分析

4.1 干湿循环作用下膨胀岩崩解颗粒级配曲线分析

由于篇幅所限,此处仅取其中一组试验结果(LW02)进行颗粒级配分析。图 4 为膨胀岩崩解颗粒级配曲线,为便于识别干湿循环作用下膨胀岩崩解颗粒级配曲线的变化情况,图 4 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 4 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)各曲线逐渐靠近,最终趋于重合,这与崩解情况随着循环次数的增加逐渐趋于相对稳定是一致的;(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)崩解颗粒的级配曲线逐渐向粒径减小的方向移动。

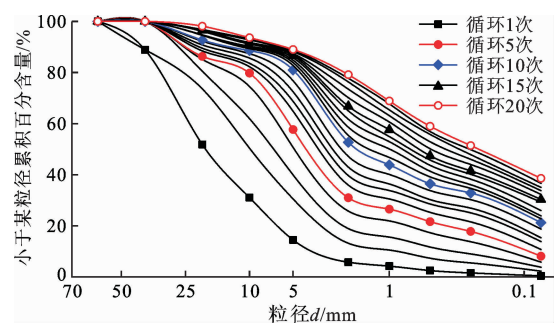


图 4 不同干湿循环次数膨胀岩试样(LW02)崩解颗粒级配曲线

4.2 干燥温度不同情况下膨胀岩崩解的粒度熵特征

为了研究干燥温度不同情况下膨胀岩崩解的粒度熵特征,采用 30℃ 模拟室温情况下膨胀岩的干燥温度,采用 60℃ 模拟室外高温情况下膨胀岩所能达到的干燥温度,105℃ 为试验规程^[17]所要求的干燥温度。图 5 为静态崩解情况下岩样首次浸水与 20 次循环后残留样图,图 6 为扰动崩解情况下岩样与 20 次循环后残留样图。

由公式(12)求得上述 6 组试样的标准基础熵,图 7 为静态崩解的 $S_b - N$ 关系曲线,图 8 为扰动崩

解的 $S_b - N$ 关系曲线。由图 7 可知,当干燥温度不同时,静态崩解情况下的各标准基础熵差距明显;在循环次数相同条件下,60℃ 干燥温度下得到的标准基础熵最小。由此可知,静态崩解情况下,干燥温度对膨胀岩崩解的标准基础熵影响很大,相对于 105℃、30℃ 的干燥温度,60℃ 干燥温度下的标准基础熵最小,最有利于膨胀岩的崩解,且循环次数越多。由图 8 可知,扰动崩解情况下对应曲线之间的间距非常小,标准基础熵非常接近,故与静态崩解情况下膨胀岩崩解的标准基础熵相比,其崩解情况几乎不受干燥温度的影响。

产生上述现象的原因是,静态崩解情况下,残留样中的水分在 30℃ 的干燥温度下只有重力水流失,其余的大部分滞留于试样内部无法逸出,在干湿循环作用下,滞留于试样内部的水分变化很小,故其对岩样造成的影响较小;残留样中的全部水分能够在 105℃ 的干燥温度下迅速汽化为水蒸气而散失,水热共同作用于试样的时间最短,每次循环过程中水分的置换最彻底;在 60℃ 的干燥温度下,岩样中非自由水只能失去一部分而无法全部失去,在干湿循环过程中,水分的置换比较明显,且试样在水热共同作用下的时间较长,对试样孔裂隙的扩展影响较大,故 60℃ 的干燥温度对试样崩解的标准基础熵影响最大。由此可见,水热共同作用对膨胀岩崩解标准基础熵的影响大于仅有水或热单独存在的情况。扰动崩解情况下,外界扰动对膨胀岩崩解标准基础熵的影响远大于干燥温度的影响。采用崩解破碎后的膨胀岩作为工程填料时,可以选择在夏季高温季节对膨胀岩进行反复的浸水处理,因为在夏季高温季节岩体的温度可能达到 60℃,而此温度下更有利于膨胀岩的崩解破碎,能以比较经济的手段使得膨胀岩较快速的崩解破碎至工程需要的程度。

4.3 外界扰动情况下膨胀岩崩解的粒度熵特征

为了研究外界扰动情况下膨胀岩崩解的粒度熵特征,将上述 4.2 节中静态与扰动崩解情况下的标准基础熵绘制到同一幅图中,图 9 为静态(LW01~LW03)与扰动(LY01~LY03)崩解的标准基础熵与循环次数的关系曲线,由图 9 可知,扰动情况下膨胀岩崩解的标准基础熵明显小于静态崩解情况下,则扰动崩解的速率明显快于静态崩解;而当循环次数较多时,60℃ 干燥温度下静态崩解的标准基础熵与扰动崩解比较接近,则 60℃ 干燥温度下的静态崩解速率接近扰动崩解。

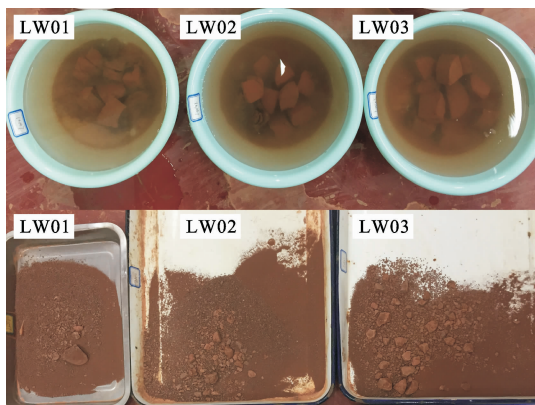


图5 静态崩解情况下岩样首次浸水与20次循环后残留样图

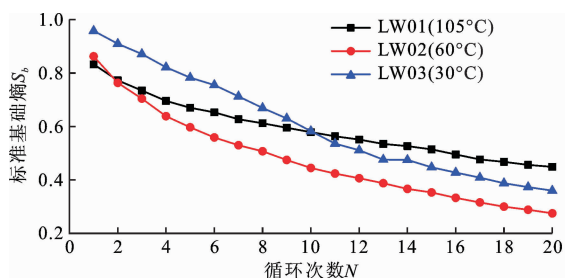
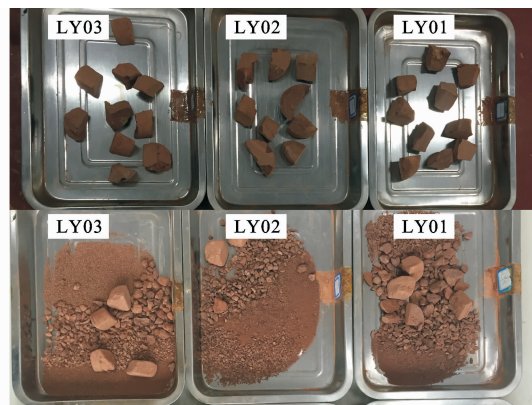
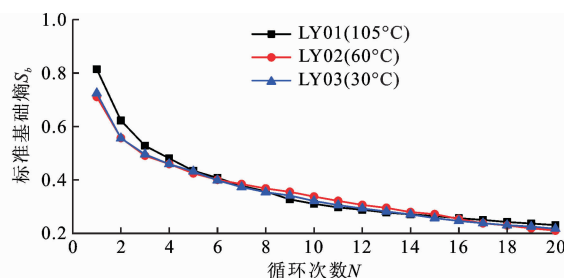
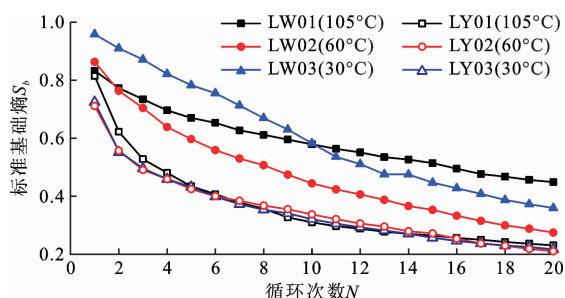
图7 静态崩解的 $S_b - N$ 曲线

图6 扰动崩解情况下岩样与20次循环后残留样图

图8 扰动崩解的 $S_b - N$ 曲线

产生这种现象的原因主要为:(1)外界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膨胀岩的崩解;(2)相对的动水作用加速了膨胀岩中部分黏土矿物与水的化学反应,且相对的动水作用使得膨胀岩颗粒间的黏结物在溶于水的瞬间被水带走,导致膨胀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膨胀岩的崩解。

图9 试样静态与扰动崩解的 $S_b - N$ 对比图

此研究对于工程应用具有一定的实际意义:在需要膨胀岩快速崩解为工程所需粒径的情况下,或者外界干燥温度没有接近 60°C 时,可以选择适当施加一定的外力扰动使干湿循环作用下的膨胀岩快速崩解。静态崩解情况下,干燥温度为 60°C 左右时,

只要干湿循环次数足够多,其崩解程度不亚于外界扰动崩解,但其需要的时间较长;而外界扰动情况下,崩解程度几乎不受干燥温度的影响,可以在不同季节选择施工,其崩解速率亦比静态崩解情况下迅速,但其需要施加外力扰动,则需要额外施加一定的机械能,没有静态浸水情况下经济。

4.4 初始单块质量不同时膨胀岩崩解的粒度熵特征

试验方法采用静态崩解试验,试验方案见表3。为避免含水率不同对膨胀岩崩解的影响,本试验采用 105°C 的干燥温度。图10为岩样首次浸水图,图11为岩样干湿循环20次后残留样图。由公式(12)求得各组试样的标准基础熵,图12为初始单块质量不同情况下 $S_b - N$ 关系曲线,由图12可知,初始单块质量不同对膨胀岩崩解的标准基础熵存在一定的影响:初始单块质量越大,其标准基础熵越小(LZ01除外);且随着循环次数的增加,其标准基础熵不断减小。

产生这种现象的原因主要为:膨胀岩初始单块质量越大,则其由自然环境导致的内部缺陷越多,崩解后得到的标准基础熵越小。

4.5 标准基础熵与规程方法对比分析

依据《岩石物理力学性质试验规程 DZ/T0276.9-2015》,求解得到各组试样的耐崩解性指数 I_{dn} ,建立耐崩解性指数与标准基础熵的回归分析,由于

篇幅所限,此处仅给出 LW02 试样的回归分析过程,如图 13 所示。由图 13 可知,标准基础熵度量崩解的方法与规程要求的方法具有较好的相关性,从而验证了该方法的可行性。

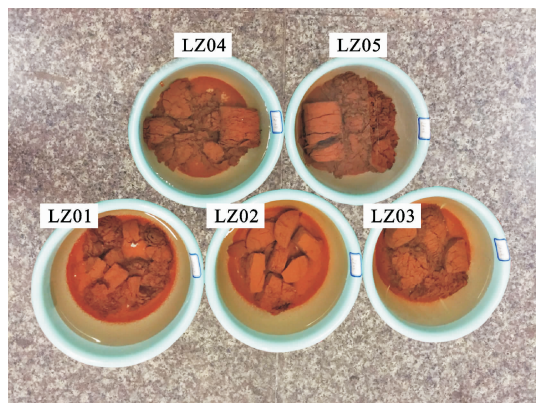


图 10 岩样首次浸水图

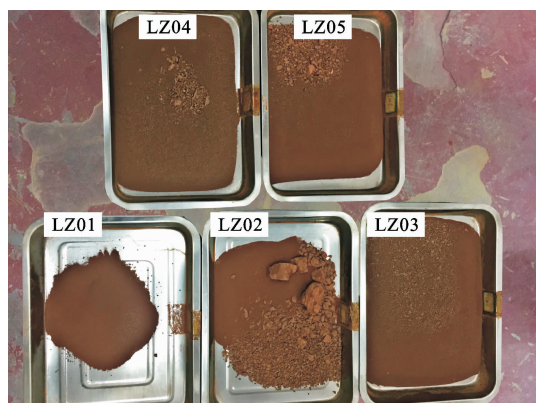


图 11 岩样干湿循环 20 次后残留样图

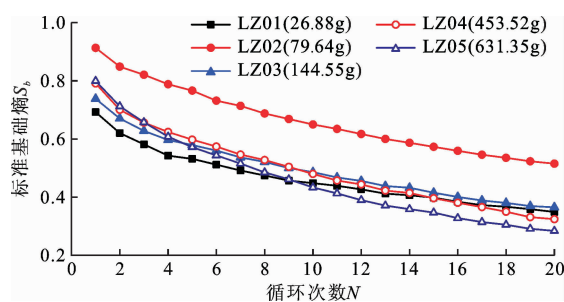


图 12 不同初始单块岩样质量的 $S_b - N$ 曲线

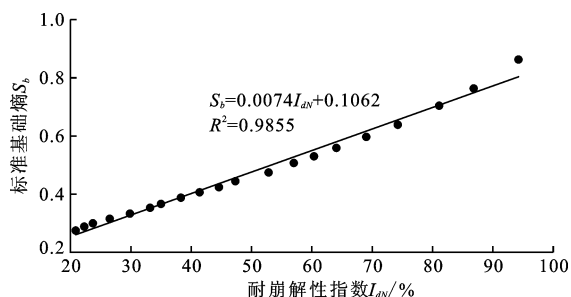


图 13 标准基础熵与规程方法对比 (LW02)

标准基础熵为反映崩解物级配曲线的量化指标,能够考虑到岩石崩解之后各粒组岩石颗粒的整体分布状况,而耐崩解性指数仅反映出岩石崩解之后两个粒组(大于 2 mm 与小于 2 mm)的分布状况。因此,相对于耐崩解性指数,标准基础熵更适用于评价岩石的崩解情况。

5 结 论

(1)干燥温度对膨胀岩崩解的标准基础熵存在一定的影响。在静态崩解方式下,相对于 105、30℃ 干燥温度而言,60℃ 干燥温度下的标准基础熵最小,表明 60℃ 的干燥温度更有利于膨胀岩的崩解。而在外界扰动崩解方式下,膨胀岩的崩解程度几乎不受干燥温度的影响。

(2)外界扰动对膨胀岩崩解的标准基础熵存在显著影响。在干燥温度、初始单块质量等因素不变的情况下,外界扰动情况下膨胀岩的标准基础熵均小于静态崩解情况下的各参数值。

(3)初始单块质量不同对膨胀岩崩解的标准基础熵存在一定的影响。初始单块质量越大,其标准基础熵越小,崩解速率越快;且随着循环次数的不断增加,其标准基础熵不断减小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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): 1984-1989.
- [3] 张宗堂,高文华,黄建平,等. 干湿循环作用下红砂岩侧限膨胀率时程模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2019,16(7):1673-1680.
- [4] CLAUSIUS R. On the second fundamental theorem of the mechanical theory of heat[J]. Philosophical Magazine and Journal of Science, 1867, 35(239): 405-419.
- [5] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27: 379-423, 623-656.
- [6] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics[J]. Physical Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [7] LÖRINCZ J. Grading entropy of soils[D]. Budapest: University of Budapest, 1986.
- [8] 田海,孔令伟,赵翀. 基于粒度熵概念的贝壳砂颗粒破碎特性描述[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6):1152-1159.

- [9] 申培武, 唐辉明, 汪丁建, 等. 巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1990 – 1998.
- [10] 梁冰, 曹强, 王俊光, 等. 弱崩解性软岩干-湿循环条件下崩解特性试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(8): 91 – 96.
- [11] 梁越, 孙志伟, 袁野, 等. 干湿循环作用下泥岩颗粒料崩解试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 911 – 917.
- [12] 赵吉霞, 陆传豪, 刘刚才. 紫色母岩在不同酸环境中的崩解分维特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 127 – 133.
- [13] 田巍巍. 干湿循环下不同风化程度泥质粉砂岩崩解特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 223 – 226.
- [14] IMRE E, LÖRINCZ J, RÓZSA P. Characterization of some sand mixtures[C]//Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, India: 2008:2064 – 2075.
- [15] LÖRINCZ J, IMRE E, GÖLOS M, et al. Grading entropy variation due to soil crushing[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(4): 311 – 319.
- [16] 王富强, 赵乃立, 袁建平, 等. 基于信息熵原理的东北地区参考作物蒸散量时空特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(4): 6 – 12.
- [17] 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. 9 – 2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] 朱训国, 杨庆. 膨胀岩的判别与分类标准[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 174 – 177.

(上接第 217 页)

- [19] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [20] NEWMAN J, THOMAS – ALYEA K E. Electrochemical systems[M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [21] MUNIRUZZAMAN M, HABERER C, GRATHWOHL P, et al. Coulombic effects and multicomponent ionic dispersion during transport of electrolytes in porous media[C]// EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.
- [22] BOUDREAU B P, MEYSMAN F J R, MIDDELBURG J J. Multicomponent ionic diffusion in porewaters: Coulombic effects revisited[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 222(2): 653 – 666.
- [23] JUNGNICHEL C, FITYUS S, SMITH D. Coupled multi-ion electro-diffusion analysis for clay soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 287 – 298.
- [24] 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.
- [25] SHACKELFORD C D, DANIEL D E. Diffusion in saturated soil. I: Background[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(3): 467 – 484.
- [26] 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.