

# 不同块度煤系软岩崩解性室内试验研究<sup>\*</sup>

郑明新<sup>1,2</sup>, 张晗秋<sup>1,2</sup>, 舒明峰<sup>1,2</sup>, 范亚坤<sup>1,2</sup>, 杨继凯<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013; 2. 江西省岩土工程基础设施安全与控制  
重点实验室, 南昌 330013)

**摘 要:** 煤系软岩遇水易软化崩解, 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耐崩解性指数和崩解物粒径分布的变化规律, 并分析了产生崩解的原因。试验结果表明: (1) 随着干湿循环次数的增加, 煤系软岩耐崩解性指数呈指数关系降低, 且降幅主要发生于前3次循环, 并以第一次干湿循环所致降幅最大; (2) 不同块度煤系软岩的崩解物均可定名为级配不良砂, 其中0.5~5 mm粒径的颗粒含量能较为清楚地反映煤系软岩崩解进程, 故建议该粒径范围作为评定煤系软岩崩解稳定的标准之一。

**关键词:** 煤系软岩; 块度; 崩解性试验; 干湿循环

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1484-06

## Laboratory Experimental Study of Slaking Characteristics of Coal Measure Strata Soft Rock

Zheng Mingxin<sup>1,2</sup>, Zhang Hanqiu<sup>1,2</sup>, Shu Mingfeng<sup>1,2</sup>, Fan Yakun<sup>1,2</sup>, Yang Jikai<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P.R. China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering Infrastructure and Security Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P.R. China)

**Abstract:** Due to the coal measure strata soft rock is prone to softening and disintegrating, based on the test of collapsing in laboratory of different block of coal measure strata soft rock, the slaking durability index and the variation of shape and size of slaking pieces of soft rock under wet and dry cycles were discussed, and the reason of disintegration was analysed. The results are as follows: (1) the decrease of coal measure strata soft rock slaking durability index follows an exponent relationship with the increase of slaking cycle times. The index was mainly decreased in previous three cycles, the largest decline is caused by first circulation. (2) The slaking pieces of different block of coal measure strata soft rock can be named as bad graded sand. The grain contents between 0.5mm~5mm could reflect the rate and degree of slaking obviously, so the above particle size range is suggested to be an evaluate standard to the slaking stability of coal measure strata soft rock.

**Keywords:** coal measure strata soft rock; block; experiment of slaking characteristics; dry and wet cycle

## 0 引言

南昌(昌)-上栗(栗)高速公路分布大量煤系地层, 尤以萍乡市上栗县境内更为普遍。据勘察报

告, 沿线主要出露有石炭系—三迭系(C—P)煤系地层, 该套地层包括灰岩、页岩、砂岩、含炭粉砂质泥岩并夹有煤层、煤线, 成分复杂。经揭露后, 遇水易软化崩解, 可称其为煤系软岩。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-05-13(修改稿)

作者简介: 郑明新(1966-), 男, 陕西渭南人, 博士, 教授, 主要从事地质与岩土工程的教学、滑坡与路基病害防治方面的研究工作。E-mail: 492001473@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(51568022); 江西省高等学校科技落地计划项目(KJLD13036)

软岩遇水崩解是原有结构受到破坏与含水率循环变化致细观尺度上的岩体结构扰动和拉裂损伤的综合结果<sup>[1]</sup>。柴肇云等<sup>[2]</sup>采用耐崩解性试验仪对 4 组不同成煤期煤系地层泥岩进行室内崩解试验,发现泥岩矿物组成影响着崩解物形态特征及其崩解机理;曹运江等<sup>[3]</sup>采用自制崩解仪对 4 组典型软岩进行试验,得知其崩解度与泥质含量和崩解次数具有很好的相关性;吴道祥等<sup>[4]</sup>采用室内浸水崩解试验对红层软岩的崩解性进行探究,指出了影响其崩解性的主要内在因素并对其崩解机制进行了深入研究。赵明华等<sup>[5]</sup>、苏永华等<sup>[6-7]</sup>、张丹等<sup>[8]</sup>、罗根传等<sup>[9]</sup>对软岩崩解过程及其崩解物进行了重点研究,指出软岩的膨胀崩解是一个多重分形过程,并可用分数维定量表征软岩崩解机理及其过程。颜文等<sup>[10]</sup>、赵明华等<sup>[11]</sup>则对软岩的水理性进行了研究,指出软岩水理性强弱对其填筑路基稳定性具有重要影响。上述研究从软岩种类、试验方法、软岩崩解物及其崩解机理等方面进行了较多分析与探讨,试验对象均针对同一块度软岩,而对不同块度岩样的崩解试验研究则较少。

因煤系软岩遇水极易软化崩解,致使 K207+613 处高边坡因降雨多次发生表层溜塌破坏。鉴于此,本文选取该工点不同块度的煤系软岩,结合 X 射线衍射和电镜扫描对其展开室内崩解试验研究,以期获取不同块度和循环次数对其崩解性的影响,并为评定煤系软岩崩解稳定的标准提供参考。

1 煤系软岩工程地质特征

1.1 地层岩性

K207+613 处地层岩性为三叠系上统安源组(T<sub>3</sub>a),为一套含煤灰黑至黑色薄至中厚层炭质页岩、黑色厚层状含炭粉砂质泥岩、灰紫色中至厚层含砾石英砂岩。该地层呈北东向条带状分布,岩层产状受慈化-宜丰断裂影响,岩体破碎,路基边坡稳定性极差。

1.2 岩样矿物组成

对试样进行 X 射线衍射(XRD)分析,如图 1 所示。可知该岩样由石英、白云母、高岭石等组成,其中粘土矿物高岭石含量约为 18%。

1.3 岩样表面微观特征

对试样进行扫描电镜试验(SEM),取岩样放

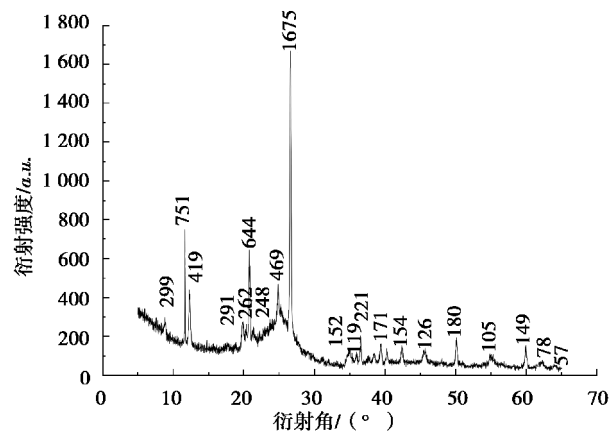


图 1 试样 X 射线衍射曲线

Fig.1 X ray diffraction curve of test sample

大 200 倍后其表面微观特征图片,如图 2。

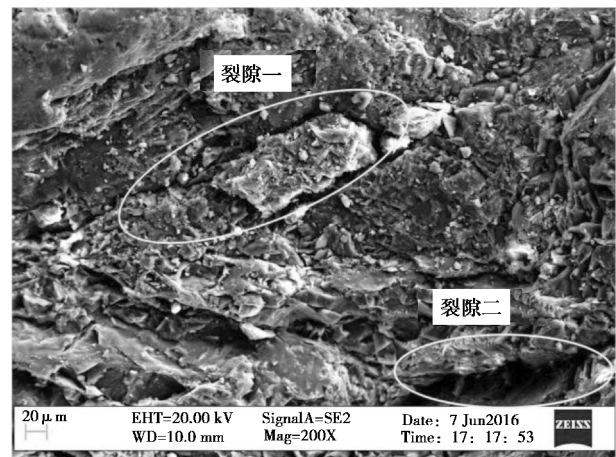


图 2 放大 200 倍的岩样 SEM 照片

Fig.2 SEM image at a magnification of 200

由图 2 可知:

- (1)岩样表面凹凸不平并存在较多粒径为 5 μm 左右的单粒体,部分碎屑嵌入在岩块之中;
- (2)岩样表面存在 2 条宽度分别为 10 μm 和 40 μm 的连续裂隙,且裂隙面较光滑。

2 室内崩解试验

软岩崩解性是指软弱岩体经干燥与湿润循环后,抵抗软化及崩解的能力,可采用耐崩解性指数和崩解物颗粒含量变化规律对崩解性进行评价。软岩耐崩解性指数(I<sub>d</sub>)为岩样经干燥和浸润标准循环后,残留质量与原质量的百分比,可由耐崩解性试验仪测得;而崩解物颗粒含量变化规律可由静水崩解试验获得。本文试验用样为含煤炭质页岩、粉砂质泥岩、含砾石英砂岩的混合物。

2.1 耐崩解性试验

该试验参照《工程岩体试验方法标准》<sup>[12]</sup> (GB/T 50266—2013)操作。考虑到实际工程中水环境反复变化,仅 2 个标准循环确定岩石耐崩解性指数并不符合实际。为获得煤系软岩崩解规律,在此将试验次数扩展至耐崩解性指数趋于稳定为止。

2.2 静水崩解试验

选取天然状态下不同块度的岩样,自左至右依次编号为试样 1~4,如图 3。仅用毛刷清除岩样表面杂物,而后称重并放入透明敞口盒中,注水直至浸没岩样。浸泡 12 h 后,倾去容器中水,将崩解物移入铁质托盘,放入烘箱(105~110 ℃)烘干,时间不少于 12 h。烘干后将其取出并置于干燥器中冷却至室温后,分别用 60、40、20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 标准筛对崩解物进行筛分试验,完成一次循环。如此往复,直至崩解物颗粒含量变化规律趋于稳定为止。



图 3 静水崩解试验岩样

Fig.3 Hydrostatic slaking test sample

3 煤系软岩崩解特性分析

3.1 耐崩解性指数分析

图 4 为岩样耐崩解性指数与循环次数的关系曲线。从图 4 可知,煤系软岩经首次干湿循环后,残余颗粒质量为 205.145 g,耐崩解性指数降至 0.435,而后随循环次数的增加残留岩样质量和耐崩解性指数逐渐降低直至趋于稳定。自循环开始至结束,煤系软岩耐崩解性指数降幅达 78.3%,并集中于前 3 次循环,其中首次循环所致降幅最大,达 56.5%;后续 9 次循环所致降幅仅为 21.8%。耐崩解性指数随崩解循环次数的变化规律可用式(1)拟合:

$$I_d = Ae^{-Bn} \tag{1}$$

式中: $I_d$  为耐崩解性指数, $n$  为干湿循环次数, $A$ 、 $B$  为拟合参数。

经拟合,当参数  $A=0.435\ 9$ 、 $B=0.310\ 94$ ,其相

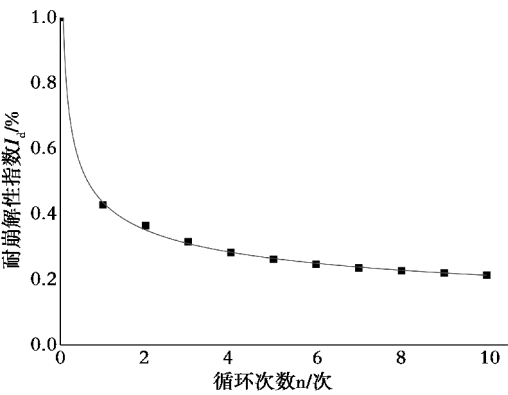


图 4 耐崩解性指数与循环次数关系曲线

Fig.4 Relation curves between slake durability index and cycle times

关系数  $R^2=0.992\ 4$ ,可见该煤系软岩耐崩解性指数与循环次数显著相关。

3.2 崩解物颗粒含量变化规律分析

通过对 4 组不同块度煤系软岩进行静水崩解试验,并对其崩解物进行筛分试验,全程共耗时 40 余天,结果见表 1~4。

表 1 试样 1 崩解颗粒含量变化

Table 1 Grain contents in slaking process of sample 1

| 循环次数<br>/次 | 颗粒含量/% |       |       |           |        |
|------------|--------|-------|-------|-----------|--------|
|            | >60    | 5~60  | 0.5~5 | 0.075~0.5 | <0.075 |
| 0          | 100    | 0     | 0     | 0         | 0      |
| 1          | 62.3   | 18.68 | 15.86 | 3.04      | 0.11   |
| 2          | 47.52  | 17.01 | 31.19 | 4.11      | 0.17   |
| 3          | 14.31  | 39.09 | 41.12 | 5.24      | 0.23   |
| 4          | 7.61   | 36.18 | 44.53 | 11.11     | 0.56   |
| 5          | 0      | 41.16 | 45.27 | 12.8      | 0.79   |
| 10         | 0      | 31.31 | 50.65 | 16.81     | 1.24   |
| 15         | 0      | 25.22 | 52.83 | 20.48     | 1.47   |
| 20         | 0      | 20.53 | 53.66 | 24.17     | 1.64   |
| 25         | 0      | 18.82 | 53.71 | 25.72     | 1.75   |

表 2 试样 2 崩解颗粒含量变化

Table 2 Grain contents in slaking process of sample 2

| 循环次数<br>/次 | 颗粒含量/% |       |       |           |        |
|------------|--------|-------|-------|-----------|--------|
|            | >60    | 5~60  | 0.5~5 | 0.075~0.5 | <0.075 |
| 0          | 100    | 0     | 0     | 0         | 0      |
| 1          | 37.06  | 10.2  | 44.13 | 8.46      | 0.15   |
| 2          | 33.48  | 10.44 | 43.37 | 12.2      | 0.5    |

续表2

| 循环次数<br>/次 | 颗粒含量/% |       |       |           |        |
|------------|--------|-------|-------|-----------|--------|
|            | >60    | 5~60  | 0.5~5 | 0.075~0.5 | <0.075 |
| 3          | 25.25  | 11.69 | 49.19 | 13.36     | 0.5    |
| 4          | 7.44   | 22.62 | 42.94 | 25.7      | 1.32   |
| 5          | 7.19   | 20.85 | 41.95 | 28.34     | 1.67   |
| 10         | 3.68   | 16.04 | 44.64 | 33.5      | 2.15   |
| 15         | 0      | 14.55 | 45.22 | 37.48     | 2.76   |
| 20         | 0      | 12.06 | 44.56 | 40.35     | 3.03   |

表 3 试样 3 崩解颗粒含量变化

Table 3 Grain contents in slaking process of sample 3

| 循环次数<br>/次 | 颗粒含量/% |       |       |           |        |
|------------|--------|-------|-------|-----------|--------|
|            | >60    | 5~60  | 0.5~5 | 0.075~0.5 | <0.075 |
| 0          | 100    | 0     | 0     | 0         | 0      |
| 1          | 31.65  | 22.61 | 30.14 | 15.13     | 0.46   |
| 2          | 21.91  | 21.74 | 30.61 | 24.64     | 1.10   |
| 3          | 13.62  | 26.5  | 32.17 | 26.37     | 1.33   |
| 4          | 13.16  | 24.52 | 33.04 | 27.94     | 1.33   |
| 5          | 10.32  | 27.43 | 32.52 | 28.12     | 1.62   |
| 10         | 0      | 26.2  | 34.9  | 34.15     | 3.63   |
| 15         | 0      | 19.63 | 38.16 | 38.33     | 3.87   |
| 20         | 0      | 16.62 | 38.88 | 40.52     | 3.99   |

表 4 试样 4 崩解颗粒含量变化

Table 4 Grain contents in slaking process of sample 4

| 循环次数<br>/次 | 颗粒含量/% |       |       |           |        |
|------------|--------|-------|-------|-----------|--------|
|            | >60    | 5~60  | 0.5~5 | 0.075~0.5 | <0.075 |
| 0          | 12.3   | 87.7  | 0     | 0         | 0      |
| 1          | 0      | 33.58 | 49.41 | 16.29     | 0.73   |
| 2          | 0      | 27.15 | 47.29 | 24.27     | 1.32   |
| 3          | 0      | 24.49 | 49.24 | 24.29     | 1.99   |
| 4          | 0      | 22.09 | 49.61 | 25.66     | 2.65   |
| 5          | 0      | 20.46 | 42.05 | 33.58     | 3.91   |
| 10         | 0      | 13.68 | 42.7  | 39.44     | 4.18   |

注:表中颗粒单位为 mm。

表 1~4 为各试样分别经 25、20、20、10 次干湿循环后崩解物颗粒含量变化结果。结合各岩样崩解过程中的物理现象,可总结得出:

(1) 试样 1 崩解最为剧烈,主要表现为岩样表

面有连续气泡冒出,岩样周边出现大量宽度为 2~3 mm 的裂缝,崩解物以砾状-片状为主,其中粒径>2 mm 的颗粒含量始终大于 50%且具玻璃光泽。试样 2 崩解较为剧烈,主要表现为岩样表面有连续小气泡冒出,岩样临空面出现大量裂缝,崩解物以砾状为主,其中含 5%左右的铁质浸染岩样,虽较难崩解,但随循环次数增加,仍发生部分崩解。试样 3、4 崩解较为剧烈,主要表现为岩样表面有间断气泡冒出,呈颗粒流状崩解,水质浑浊,以中至细砂混合物为主。

(2) 不同块度的试样 1~4,其崩解物颗粒级配趋于稳定所需的时间不一。试样 1~4 块度分别为 230 mm、160 mm、120 mm、60 mm,其崩解物颗粒级配达到稳定分别需耗时 25 d、20 d、20 d、10 d。

(3) 结合各试样崩解过程及其崩解物筛分结果,可知煤系软岩崩解性较强。若按文献[6]提出的崩解物形态进行分类,可将试样 1、2 归为Ⅲ类崩解(崩解特征:浸入水中呈块状崩解、塌落或片状开裂,崩解物为碎岩片或碎岩块);试样 3、4 归为Ⅱ类崩解(崩解特征:浸入水中呈粉末状崩落,崩解物为粒状、片状碎屑)。

上述现象可从以下两方面进行解释。一方面由于煤系软岩初始块度越大,其先存裂隙越丰富<sup>[13]</sup>。当岩样遇水后,具有较大表面自由能的孔隙与水接触后将强烈吸附水分子,形成表面吸附层。由于水分子的吸附而减少的表面自由能一部分以湿润热的形式逸散,另一部分则转化为促使岩石孔隙相界面增大的力学破坏能,这种力学破坏能将作为一种表面压力(楔裂压力)而作用,使得岩样发生变形和破坏<sup>[2]</sup>。另一方面由于煤系软岩主要由石英、白云母和高岭石等组成,高岭石颗粒较小,亲水性强<sup>[14-15]</sup>。当被水浸润时,细小岩粒的吸附水膜便会增厚,引起岩石体积的膨胀。因不均匀的体积膨胀,岩石内部会产生不均匀应力,同时部分胶结物会被稀释、软化或溶解,从而导致岩石颗粒的碎裂解体。但煤系软岩中亲水性矿物高岭石含量较低,故其引起的不均匀体积膨胀对软岩的碎裂解体影响有限。而反复干湿循环使先存裂隙不断扩大并增生,造成岩样循环崩解为碎块乃至碎屑,当裂隙不再产生,则崩解结束。与文献[2]结论较为一致,即当软岩组成矿物中不含强亲水性矿



物蒙脱石时的,其崩解主要由岩样内部裂隙扩容引起。故该煤系软岩的先存裂隙是其发生崩解的主要原因。

#### 4 煤系软岩崩解稳定评定标准

试验所得各试样不同粒径颗粒含量随干湿循环次数的变化曲线如图5。在前5次循环过程中,试样因先存裂隙逐渐扩大,主体出现开裂甚至崩落现象(如试样1),崩解物为20~60 mm的碎块以及5 mm以下的碎片和碎屑。同时主体和已崩解的碎

块发生循环崩解,>5 mm的颗粒在崩解过程中由大到小发生转移,故使5~60 mm粒径的颗粒含量变化较为剧烈;而0.5~5 mm粒径的颗粒含量迅速增长并接近峰值,在该过程中占据主导地位,而后随循环次数增加而趋于稳定。由此可见,0.5~5 mm粒径的颗粒含量能较为清楚地反映煤系软岩崩解速度的快慢及崩解性的强弱,故建议选择该粒径范围为评定煤系软岩崩解稳定的标准之一。同时,通过对试样1~4最终崩解物的筛分试验可知,各试样均可定名为级配不良砂。

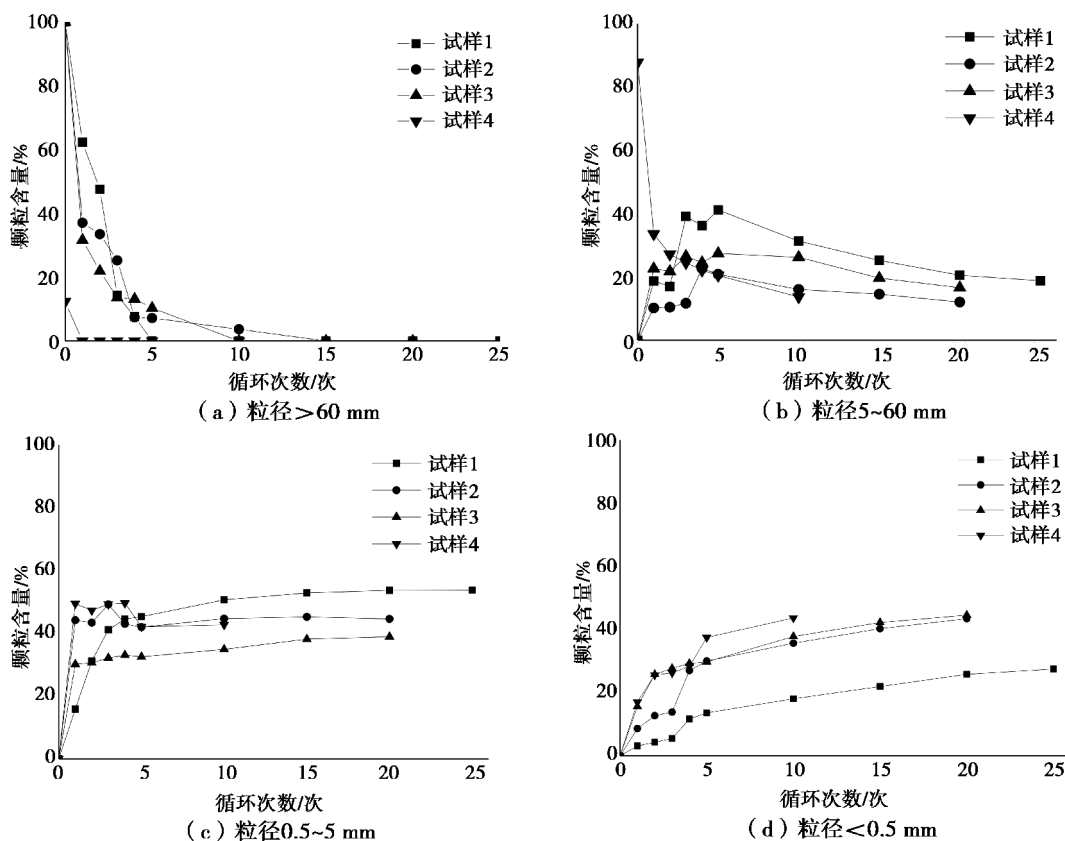


图5 各粒径颗粒含量与循环次数关系曲线

Fig.5 Relation curves between various grain contents and cycle times

#### 5 结论

(1)随着耐崩解试验循环次数的增加,软岩的耐崩解性指数呈指数关系降低,降幅主要发生于前3次循环,并以第一次干湿循环所致降幅最大,其关系可由  $I_d = Ae^{-Bn}$  表达。

(2)不同块度煤系软岩崩解稳定所需时间不一,随块度减小而缩短,其崩解物均为级配不良砂;其中0.5~5 mm粒径的颗粒含量能较为清楚地反映煤系软岩崩解进程,故建议该粒径范围作为评定

煤系软岩崩解稳定的标准之一。

(3)通过耐崩解性试验与静水崩解试验可确定煤系软岩的崩解性较强,且主要受先存裂隙影响。

#### 参考文献(References)

- [1] 谭罗荣. 关于粘土岩崩解、泥化机理的讨论[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 1-4. (Tan Luorong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics,

- 2001, 22(1): 1-4. (in Chinese))
- [2] 柴肇云, 张亚涛, 张学尧. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1188-1193. (Chai Zhaoyun, Zhang Yatao, Zhang Xuexiao. Experimental investigations on correlation with slake durability and mineral composition of mudstone [J]. Chinese Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1188-1193. (in Chinese))
- [3] 曹运江, 黄润秋, 郑海君, 等. 岷江上游某水电站工程边坡软岩的崩解特性研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 35-40. (Cao Yunjiang, Huang Runqiu, Zheng Haijun, et al. Slaking characteristics of soft rock of The engineering slope in a hydroelectric station in the southwest of China[J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2006, 14(1): 35-40. (in Chinese))
- [4] 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): 4173-4179; (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(Supp.2): 4173-4179. (in Chinese))
- [5] 赵明华, 苏永华, 刘晓明. 湘南红砂岩崩解机理研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 16-19. (Zhao Minghua, Su Yonghua, Liu Xiaoming. Research on the mechanics of the swelling and collapse of the red stratum rock mass in south hunan [J]. Chinese Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2006, 33(1): 16-19. (in Chinese))
- [6] 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. (Su Yonghua, Zhao Minghua, Liu Xiaoming. Research of Fractal Mechanism for Swelling and Collapse of Soft Rock [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 728-734. (in Chinese))
- [7] 苏永华, 刘晓明, 赵明华. 软岩膨胀物颗粒分布特征研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 102-106. (Su Yonghua, Liu Xiaoming, Zhao Minghua. Research on the grading of soft rock crumbling pellets [J]. Chinese Journal of Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 102-106. (in Chinese))
- [8] 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): 1341-1346. (Zhang Dan, Chen Anqiang, Liu Gangcai. Disintegration characteristics of purple mudstone based on fractal dimension under hydrothermal condition [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 1341-1346. (in Chinese))
- [9] 罗根传, 付宏渊, 贺炜. 炭质页岩崩解特性的试验研究[J]. 中外公路, 2012, 32(6): 309-311. (Luo Gengchuan, Fu Hongyuan, He Wei. Slaking characteristics of carbonaceous shale [J]. Chinese Journal of China and Foreign Highway, 2012, 32(6): 309-311. (in Chinese))
- [10] 颜文, 周丰峻, 郑明新. 长衡段软岩水理特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(2): 15-18. (Yan Wen, Zhao Fengjun, Zhen Mingxin. Study on hydrolytic weakening properties of changheng soft rocks [J]. Chinese Journal of East China Jiaotong University, 2005, 22(2): 15-18. (in Chinese))
- [11] 赵明华, 邓艷宇, 曹文贵. 红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 1-4; (Zhao Minghua, Deng Jinyu, Cao Wengui. Study of the disintegration character of red sandstone and the construction techniques of red sandstone embankment [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 1-4. (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体试验方法标准(GB/T50266-2013)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Standard for tests method of engineering rock masses (GB/T50266-99) [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [13] 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): 907-911. (Kang Tianhe, Chai Zhaoyun, Wang Dong, et al. Experimental study on block disintegration difference of physicochemical soft rock [J]. Chinese Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 907-911. (in Chinese))
- [14] 孔德坊. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社. 1991. (Kong Defang. Science of engineering rock and soil [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [15] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 28-31. (Liu Changwu, Lu Shiliang. Research on mechanism of mud-stone slaking and softening in water [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2000, 2(1): 28-31. (in Chinese))