



泥质岩在不同 pH 值溶液中的崩解特性试验研究

梁 冰, 谭晓引, 姜利国, 焦波波

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要:为了研究泥质岩在不同 pH 值溶液中的崩解特性,为酸雨地区泥质岩的利用提供理论依据和技术指导,选取阜新海州露天矿泥质岩为例,进行室内浸水崩解试验。对泥质岩在不同 pH 值溶液中的崩解现象、崩解物的颗粒含量和崩解比进行分析、利用 X 射线衍射(XRD)、荧光光谱分析,测试岩样矿物化学成分。试验得到以下结论:不同 pH 值溶液中崩解强度大小关系是:酸>碱>中性;随着循环的进行,泥质岩的崩解程度不断加深,崩解速度先增大后逐渐减小甚至消失;泥质岩中许多不能溶于水的矿物成分可以和酸发生化学反应生成可溶性盐类,是泥质岩在酸中崩解最剧烈的主要原因;考虑泥质岩所处环境 pH 值不同对工程建设有重要意义。

关键词:环境工程学;泥质岩;干湿循环;崩解性;pH;水-岩相互作用

中图分类号:TU458 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)02-0023-05

Experimental analysis of slaking characteristics of mudstone in different pH solutions

Liang Bing, Tan Xiaoyin, Jiang Ligu, Jiao Bobo

(College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technology University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

Abstract:In order to identify the slaking characteristics of mudstone in different pH solutions and provide some theoretical basis and technical guidance for utilization of mudstone in areas polluted by acid rain, some laboratory tests of slaking were performed on mudstone from the open-pit mine of Haizhou in Fuxin. The slaking phenomena in different pH solutions and changes in grain contents and slaking ratio of mudstone samples in slaking process were analyzed. Through X-ray diffractometer(XRD)and fluorescence spectrum analysis system, the mineral & chemical composition of mudstone were made clear. The test results showed that the rank of these samples as slaking degree was acid>alkali>neutral. With an increase in the number of cycles, the slaking degree decreased while the slaking rate increased at first two cycle, and then it gradually slowed down. The slaking of mudstone in the acid solutions was the most severe. The fundamental reason was that most of the mineral composition of mudstone could not dissolve in water but chemical reaction between it and acid solutions produced soluble salts. It was significant to take into account the acidity of mudstone's surroundings in engineering construction.

Key words:environmental engineering; mudstone; dry-wet cycle; slaking characteristics; pH; water-rock interaction

收稿日期:2014-09-05

基金项目:国家自然科学基金(51304113,51374124)

作者简介:梁 冰(1962-),女,教授,博士生导师,主要从事岩石力学和渗流力学研究,(E-mail)lbwqx@163.com。

Received:2014-09-05

Foundation item:National Natural Sciencal Foundation of China(No. 51304113, 51374124)

Author brief:Liang Bing(1962-), professor, doctoral tutor, main research interests: rock mechanics and seepage flow mechanics, (E-mail)lbwqx@163.com.

与其他岩性的岩石相比,易于风化崩解是泥质岩最为显著的特征之一。崩解作用对泥质岩物理力学性状最直接的影响是使其粒径在崩解前后发生明显改变,由崩解前粒径较大的块体变为崩解后粒径较小的颗粒。泥质岩不同程度的崩解不仅会使其自身性质由岩性向土性转变,而且由于崩解所造成的粒度变化会改变其周围区域内孔隙的充填及连通状况,给基坑开挖、隧道施工、坡面处理、地基稳定性等造成了诸多困扰^[1-4]。

如何才能有效地处理泥质岩的崩解性,学者们已开展了大量研究。在岩石崩解特性表征方法的研究方面,获取泥质岩崩解特性的定量化指标参数主要选用以下几种方法:1)采用由 Wood 等^[5]提出并经 Santi^[6]改进的静态崩解试验(Jar Slake Test)方法来定性描述泥质岩在蒸馏水中浸泡 30 min 和 48 h 时的崩解状态,依据崩解状态参照 Santi 所建立的划分依据来判定静态崩解指数(Jar Slake Index);2)采用 Deo^[7]崩解试验(Slake Test)测试其崩解指数(Slake Index);3)采用 Gamble^[8]所提出的耐崩解试验(Slake Durability Test)测试其耐崩解指数(Slake Durability Index)。其中,除 JSI 需要人工定性判断后选取之外,SI 和 SDI 均为定量化表征参数。中国《工程岩体试验方法标准》^[9](GB/T 50266—99)中对耐崩解试验及 SDI 的测试方法和技术标准提出了相关要求。

但是,由于在标准试验中考虑的环境条件较为单一,而实际上泥质岩所处的环境相对于试验室条件又比较复杂。由于研究所涉及的问题是多学科交叉点,加之问题的复杂性,所以,大多研究集中在温度、水流或化学等因素对泥质岩崩解特性的影响方面^[10-13],而针对泥质岩所处环境的酸碱性,对泥质岩崩解特性所进行的研究还很薄弱。因此,对泥质岩不同 pH 值环境下的崩解特性的研究,可为与之密切相关的环境地质问题提供理论依据及技术支持。

1 试验设计

试验选取阜新海州露天矿采出的新鲜岩石,岩样取出后用保鲜膜包裹运回试验室。将取回的岩石加工成 50 g 左右的小块,并从中挑选无裂纹、材质均匀的岩块。本次试验总共设计了 7 组,每一组的 pH 值分别为 4、5、6、7、8、9、10(每组均可在±0.5 浮动),每组设计了 3 个平行样,每个样品由 5 到 6 小块组成,总共需要 105~126 块,遂选取 120 块。将这 120 块泥岩分成 21 份,每份质量在 250 g 左右,称量后分别装入密封袋中,准备用于后续试验。试验全程控制环境温度及 pH,主要步骤为:

1)取部分岩屑烘干粉碎至 100 目以下,用 X 射线衍射仪分析矿物成分,使用荧光光谱法分析化学成分。

2)另取部分岩样进行物理性质试验,得到岩样基本物理指标见表 1。

3)利用硫酸和氢氧化钠配置好相应酸碱度的溶液,密封保存。

4)将泥样称重后放入透明容器中,注入事先配置好的浸泡液至浸没岩样,标上相应 pH 值。将泥样连同容器放入恒温箱中,恒温箱设置为 25 ℃。试验中使用酸碱滴定仪保持浸泡液在相应 pH 上下 0.5 浮动。

5)浸泡至 24 h,将容器上清液倒掉,再把余下的液体连同样品一同转入事先已经进行标号的钢盆。

6)将钢盆放入烘箱,在 105 ℃下烘干至恒重,烘干时间不少于 8 h。

7)烘干后将样品取出置于干燥器内冷却至室温,结合粗筛分要求和本试验样品特点,选择粒径级配为 10、5、2、1 mm 的分样筛进行筛分。

8)把每个样品筛上的样品汇总,密封,进入下一个循环。根据崩解情况,试验总共进行了 5 个循环。

表 1 泥岩物理性质指标
Table 1 basic physical index of mudstone

比重	容重/ (g·cm ⁻³)	干密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙 率/%	自然含 水率/%	饱和含 水率/%
2.66	2.83	2.60	5.20	1.52	3.81

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

因岩样组数及循环太多,列出部分崩解现象汇总如表 2,其中 pH 为 6 的样品浸泡中及烘干后的变化情况如图 1。

表 2 泥岩崩解现象
Table 2 Disintegration phenomenon of mudstone

pH	第 1 次循环	第 3 次循环	第 5 次循环
4	主体未坍塌,有明显大裂缝	崩解物以颗粒为主,含少量细碎块	崩解物主要为泥状,含少量颗粒状
5	主体未崩解,产生少量裂纹	崩解物以颗粒状、细碎块混合	细颗粒状与泥状崩解物均匀混合
6	未崩解,整体无裂纹	崩解物以细碎块为主,含少量中等碎块	崩解物以颗粒状为主,含少量泥状
7	未崩解,整体无裂纹	仍以碎块为主,但整体有变细的趋势	崩解物颗粒状为主
8	未崩解,整体无裂纹	细碎块和中等碎块共存	崩解物以颗粒状为主,含少量泥状
9	未崩解,整体无裂纹	崩解物以细碎块为主	崩解物以颗粒状为主,含少量泥状
10	未崩解,产生少量裂纹	崩解物以颗粒状、细碎块混合	崩解物以细颗粒状为主,泥状次之

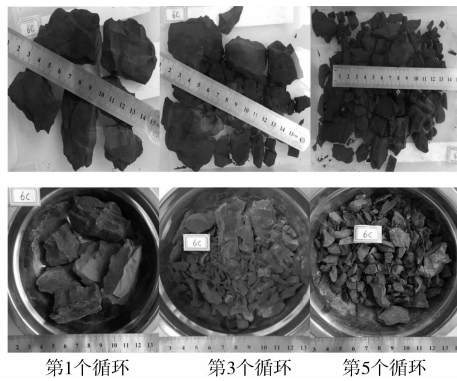


图 1 pH=6 的样品变化情况

Fig. 1 Changes of sample of pH=6

参照 Wood 等^[5]所建立的判定静态崩解指数的划分依据,吴道祥等人依据崩解状态,将泥岩崩解的强弱程度定性地分为强崩解、中崩解、弱崩解、不崩解 4 个等级^[14]。试验所选的各组泥样浸水 24 h 内均不崩解,仅有一些小裂纹,水中有少量细渣和泥质沉淀,经过一次干湿循环后才呈块状崩解,属于上述当中的弱崩解。

2.2 颗粒含量分析

第 1 次循环之后崩解量小于试样总重量的 1%,故可认为这次循环没有崩解,不需要做颗粒分析。随着循环次数的增加,崩解物的粒径级配在不断变化。当进行到第 5 个循环,大粒径颗粒崩解稳定,即大于 5 mm 的颗粒含量趋于不变,得到一些始终不能崩解的物质,多为云母、细小的砾石等。因此,可以认为崩解基本已达到最大限度,没必要进行接下去的循环,本试验总共进行了 5 次干湿循环,4 次筛分。试验所得不同粒径颗粒含量随干湿循环次数的变化曲线见图 2。

分析图 2 并结合泥质岩的崩解现象可以得到以下结论:

1) 由图 2(a)、(b) 可以发现,岩样第 1 个循环 > 5 mm 的颗粒百分含量为 100%,几乎未发生崩解;第 2 个循环为 87.38%~91.64%,崩解速度较快;第 3 个循环百分含量则降为 54.83%~73.08%,泥质岩发生剧烈崩解。泥质岩中含有可膨胀性的粘土矿物,黏土矿物吸水体积膨胀变形、崩解解体,导致岩石崩解。当岩石经历失水后再遇水这样的过程时,这种现象更明显。本次试验样品在第 1 循环时崩解量少,第 2、3 个循环却迅速崩解间接证明了这一结论。

2) 第 3 个循环时,pH 为 4 的样品颗粒百分含量 (>5 mm) 下降 32.55%,崩解速度最快,而处于蒸馏水中的样品下降 18.56%,崩解速度最慢。

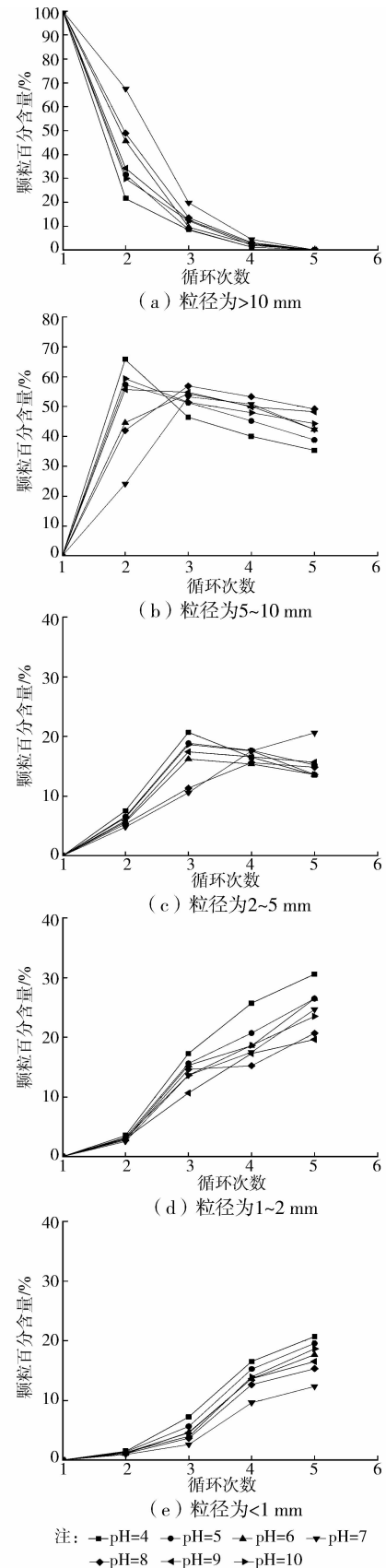


图 2 不同粒径颗粒含量变化曲线

Fig. 2 Change curves of content of grain with different sizes

3) 随着循环的进行,>10 mm 的颗粒含量逐渐减少

至零,而 5~10 mm 的颗粒含量趋于稳定,到第 5 个循环时,各种级别的颗粒含量和第 4 个循环的结果变化较小,崩解达到最大限度,可认为没有必要进行接下去的循环。

4)崩解越剧烈,各种粒径的崩解物含量变化就越剧烈,变化曲线越陡,达到峰值或谷底所需干湿循环的次数越少,并且达到渐进线所需的循环次数也越少。图 2(c)中 2~5 mm 的颗粒含量在第 3 个循环出现峰值,且斜率大、曲线陡;由图 2(d)、(e)同样可发现,第 3 个循环的曲线最陡,第 3 个循环之后所有曲线渐渐趋于平缓,崩解速度减慢。同时,随着循环的进行,图 2(d)、(e)均呈上升趋势,泥质岩的崩解物不断细化,崩解程度不断加深,崩解速度先增加后逐渐减小。

2.3 崩解比分析

2.3.1 崩解比分析 Erguler、Walsri 等^[15-16]通过综合研究,提出用崩解比(Disintegration Ratio, DR)这一定量化参数对泥质岩的崩解特性进行综合评价。本文引用此研究成果,崩解比的计算方法如下:

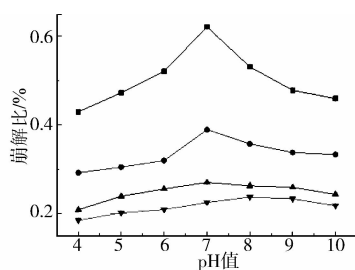
1)绘制样品粒度变化曲线图,横坐标为粒径大小,纵坐标为小于该粒径大小的颗粒百分含量。

2)崩解比采用计算公式

$$Dr_n = S_n / s \times 100$$

式中: Dr 为样品第 n 次筛分崩解比,%; S_n 为第 n 次筛分曲线下方面积; S 为整体面积。

通过上述方法计算崩解比,其崩解比变化情况如图 3、图 4。



注: — 第1次筛分 — 第2次筛分 — 第3次筛分 — 第4次筛分

图 3 崩解比曲线图(横向比较)

Fig. 3 The curve of disintegration ratio (horizontal comparison)

观察图 3 可发现以下 3 点:1)第 1 次筛分曲线明显上凸,蒸馏水中样品的崩解比远远高于酸碱环境中的崩解比,表明第 1 次筛分时,酸碱环境下泥质岩的崩解强度远远大于中性;2)随着循环的进行,尤其第 3 次和第 4 次筛分时,崩解比曲线趋于平缓,但依然有轻微上凸,说明随着循环的进行,酸、碱和中性的崩解比越来越接近,崩解程度越来越接近,但酸

碱依然略强;3)第 1、2 次筛分,崩解比曲线间隔比较大,说明泥质岩在第 2 次筛分时发生剧烈崩解;而第 3、4 次筛分时,曲线间隔明显减小,崩解速度减慢。从图 4 可以看出,整体上酸性环境下的崩解比曲线在下方,曲线较陡,碱性环境在中间,中性环境在下方,曲线相对比较平缓。表明不同酸碱度环境中的泥岩崩解强度大小关系是:酸>碱>中性。

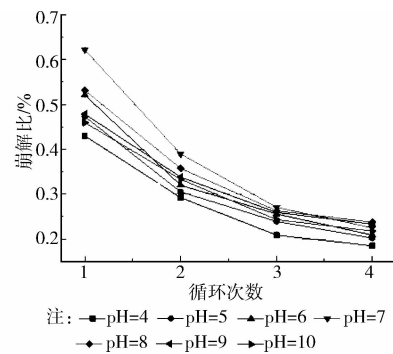


图 4 崩解比曲线图(纵向比较)

Fig. 4 The curve of disintegration ratio (longitudinal comparison)

2.3.2 矿物与化学成分分析 使用荧光光谱法对岩石化学成分进行分析,结果如表 3 所示。

表 3 岩石化学成分 %

Table 3 Statistics chemistry component date of mudstone

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	Total
63.82	19.83	6.26	0.66	1.52	5.26	1.07	0.06	98.48

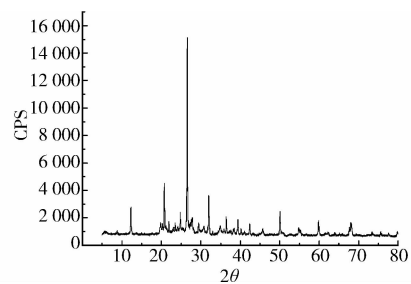
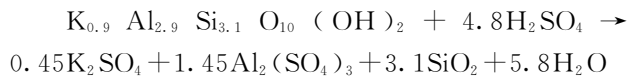


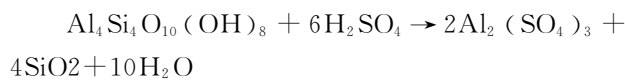
图 5 泥岩 X 射线衍射图谱

Fig. 5 mudstone X-ray diffraction spectrum

由 X 射线衍射图谱可见(图 5),阜新海州露天矿泥质岩属于天然岩石,物相较多,其主要成分是高岭石、石英,含有少量伊利石、绿泥石、方解石和白云石。石英化学性质稳定,具较强的抗水性与抗风化能力,亲水性极弱。方解石和白云石的主要成分是碳酸钙,碳酸钙遇酸极易发生反应: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 。高岭石等粘土矿物具有亲水性,并能与硫酸发生化学反应,生成可溶性盐类。伊利石与硫酸化学反应方程式为



高岭石与硫酸化学反应化学方程式为



粘土矿物与硫酸发生化学反应,生成可溶性盐类溶于水,一方面破坏了原来岩石的内部结构体系,使得岩石出现泥化现象;另一方面形成岩石内部连通的“空间”,使得水分子与黏土矿物充分接触而加速岩石崩解,导致泥质岩在酸中崩解最快。碳酸钙在碱性浸泡液中更加稳定,本文泥质岩碳酸钙含量少,碳酸钙的碱溶液稳定性在崩解过程中表现不明显。最终导致泥质岩在不同pH值溶液中崩解强度大小关系为:酸>碱>中性。

3 结论

以阜新海州露天矿泥质岩为研究材料,进行不同酸碱度下泥质岩静态崩解试验,观察泥岩的崩解现象,计算崩解物的颗粒含量、崩解比,并得到以下结论:

1)随着干湿循环的进行,泥质岩的崩解程度不断加深,崩解速度先增大后逐渐减小甚至消失,第2、3个循环崩解速度最快。

2)不同pH值溶液中的泥岩崩解强度大小关系是:酸>碱>中性,其中酸性比碱性略强,二者远远大于中性。泥质岩对所处环境的酸碱性比较敏感,酸雨能造成泥质岩耐崩解能力很大程度降低。将酸雨地区泥质岩用于工程建设时,应当检测所处环境的酸碱性,并减少该地SO₂等酸性气体排放量,减少造成泥质岩崩解的环境因素。

3)泥质岩中不溶于水的矿物成分,可以和酸发生化学反应生成可溶性盐类,破坏了原来岩石的内部结构体系,形成岩石内部连通的“空间”,是泥质岩在酸中崩解最剧烈的主要原因。

4)泥质岩的崩解特性受多重因素影响,实际中泥质岩所处的环境相对于试验室条件比较复杂,本文通过对比发现,单一水化环境条件下的干湿循环不足以反应工程实际情况,考虑泥质岩所处环境pH值的不同对工程建设有重要意义。

参考文献:

[1] 张志沛,彭惠,段立莉. 勉宁高速公路沿线泥岩遇水崩解特征的研究[J]. 工程地质学报,2010,18(Sup):1-5.
Zhang Z P, Peng H, Duan L L. Studying on the softening characteristics of mudstone along mianning

freeway [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (Sup):1-5. (in Chinese)

[2] 邓涛,詹金武. 酸碱环境下红层软岩—泥质页岩的崩解特性试验研究[J]. 工程地质学报,2014,22(2):238-243.

Deng T, Zhan J W. Distinggration characteristics test of red-bed soft rock argillaceous shale in acid and alkali environment [J]. Joernal of Engineering Geology, 2014, 22(2):238-243. (in Chinese)

[3] 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 C W, Lu S L. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1):28-31. (in Chinese)

[4] 车平,宋翔东. 巢湖地区坟头组泥岩遇水软化特性与机理试验研究[J]. 同济大学报,2012,40(3):396-401.

Che P, Song X D. Experiment study on softening characteristics and mechanism of soaking mudstone from Fentou formation in Chaohu area [J]. Journal of Tongji University, 2012, 40(3):396-401. (in Chinese)

[5] Wood L E, Deo P. A suggested system for classifying shales materials for embankments [J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1975, 12(1):39-55. (in Chinese)

[6] Santi P M. Improving the jar slake, slake index, and slake durability tests for shales [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 1998, IV(3):385-396.

[7] Deo P. Shales as embankment materials [D]. Purdue University, West Lafayette, 1972.

[8] Gamble J C. Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks [D]. University of Illinois, Urbana-Champaign, 1971.

[9] 中华人民共和国电力工业部. GB/T 50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999.

[10] Ghobadi M H, Mousavi S. The effect of pH and salty solutions on durability of sandstones of the Aghajari Formation in Khouzestan province, southwest of Iran [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(2):641-653.

[11] 黄宏伟,车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(6):1-5.

Huang H W, Che P. Research on micromechanism of softening and argillitization of mudstone [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(6):1-5. (in Chinese)

[12] 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):1-5.