

DOI: 10.11779/CJGE201604015

冻-融及干-湿循环对泥质岩崩解特性影响的试验研究

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: 为研究中国东北地区典型气候条件对泥质岩崩解特性的影响, 以阜新海州露天矿泥质岩为研究对象, 探讨了干-湿循环和冻-融循环作用对泥质岩崩解特性的影响。对不同试验条件下泥质岩浸泡液的 pH 值、TDS 进行了测试; 分析了泥质岩的崩解比、空隙率和吸水率变化情况; 利用 X 射线衍射 (XRD)、荧光光谱分析, 测试岩样矿物化学成分。结果表明, 相对于干-湿循环作用而言, 冻-融循环作用会对泥质岩崩解性产生明显影响; 空隙率及吸水率均对泥质岩的崩解有重要作用; 冻-融循环对泥质岩可溶性盐类的溶解影响不大; 考虑冻-融循环对泥质岩崩解特性的影响对东北地区工程建设有重要意义。

关键词: 环境工程学; 泥质岩; 崩解性; 冻-融循环; 干-湿循环; 水-岩相互作用

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)04-0705-07

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等方面的教学和科研。E-mail: lbwqx@163.com。

Effects of freeze-thaw and drying-wetting cycles on slaking characteristics of mudstone

LIANG Bing, TAN Xiao-yin, JIANG Li-guo, JIAO Bo-bo

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

Abstract: To study the influences of the specific climate in the northeast areas of China on the slaking characteristics of mudstone, the effects of freeze-thaw and drying-wetting cycles on the slaking characteristics of mudstone are analyzed based on a case study of Haizhou open pit mine in Fuxin, Liaoning. A series of experiments are carried out under the freeze-thaw and drying-wetting cycles, and the effects of the natural environmental factors on the change of the mudstone are discussed. The electrical conductivity and pH of the soak solution are recorded, and the changes of slaking ratio, porosity and water absorption rate of mudstone samples in slaking process are analyzed as well. Through analysis of the X-ray diffractometer (XRD) and fluorescence spectrum system, the mineral & chemical composition of mudstone is made clear. The test results show that, compared with the drying-wetting effects made in the natural condition, the freeze-thaw cycles can make noticeable effects on the mudstone which are mainly caused by the porosity and water absorption, rather than the dissolution of soluble salt. It is of great significance to take into account the effects of freeze-thaw cycles on the slaking characteristics of mudstone in the engineering construction in the northeast area of China.

Key words: environmental engineering; mudstone; slaking characteristics; freeze-thaw cycle; drying-wetting cycle; water-rock interaction

0 引言

温度和水分的变化是造成泥质岩风化崩解的重要原因, 为探究东北地区典型气候条件对泥质岩崩解特性的影响, 本文选取辽宁省阜新市海州露天矿泥质岩为研究对象。研究区位于辽宁省西北部, 气候属于北温带大陆季风气候区, 四季分明, 雨热同季, 光照充足; 冬季最低气温可达 -30°C , 夏季平均气温高于 20°C , 季节、昼夜温差大。夏季的高温多雨及冬季的低温严寒会对研究区内的泥质岩形成明显的干-湿循环

及冻-融循环作用。在此气候条件下, 岩体承受的循环冻融和循环干湿引起的物理崩解作用较为严重。而泥质岩的崩解与许多工程的变形破坏和地质灾害事故的发生密切相关, 如崩塌、滑坡、泥石流等^[1-4]。因此, 研究冻-融循环和干-湿循环条件下泥质岩的崩解特性, 对于东北地区泥质岩的利用和工程建设具有重要

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51374124, 51304113)

收稿日期: 2015-03-10

意义。

在环境因素对岩石崩解特性影响的研究方面，国内外学者围绕岩石所处环境中水分变化、温度变化而引起的干-湿循环、冷-热循环、冻-融循环以及环境酸碱度对岩石崩解性能的影响开展了大量的研究。Huseyin 考虑了风化作用过程中的冻-融循环及热冲击作用，对位于土耳其境内的安山岩的耐崩解性进行了测试分析^[5]。Zhang 等通过实验室试验的方法研究了水-热耦合作用对中国云南省内紫色泥岩崩解特性的影响^[6]。邓华锋等对三峡库区典型库岸边坡砂岩进行了饱水-风干循环作用试验，探讨了孔隙水压力的升降对岩样影响^[7]。Gökçeoğlu 等探讨了干-湿循环次数、黏土岩矿物组分对于黏土岩耐久性的影响^[8]。Gupta 等对不同矿物含量的岩石在不同酸、碱环境下的崩解特性进行了研究^[9]。Singh 等指出岩石的强度特征会随着酸性的增强而降低，与碱性环境相比，在酸性环境下其强度特征值减小的程度较大^[10-11]。Sunil 等研究了不同 pH 溶液作用下土壤的工程特性及化学特性的变化规律^[12]。Ghobadi 等对于砂岩在酸性和碱性溶液条件下的耐崩解特性进行了试验测试^[13]。宋玲玲等对用不同浓度 NaOH 溶液处理前后褐煤的崩解特性进行了研究^[14]。

上述研究大都集中在干-湿循环或冻-融循环单一因素对泥质岩崩解特性的影响，而综合考虑冻融、温差、干湿等多因素综合作用对泥质岩崩解特性所进行的研究还很薄弱。因此，很有必要研究冻-融循环及干-湿循环对泥质岩崩解特性的影响，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 试验材料与方法

试验选取阜新海州露天矿开采剥离的新鲜岩石，岩样取出后用保鲜膜包裹运回实验室。取样工作依据国标（SL264—2001）及（JTG E42—2005）中相关规定进行^[15-16]。将取回的岩石加工成 26.5 mm 以下的小块，从中挑选无裂纹、材质均匀的岩块作为试验对象。试验岩样的基本物理指标测试分析结果如表 1；使用 X 射线衍射仪分析岩样的矿物成分，使用荧光光谱法分析岩样的化学成分。

崩解试验共设计 4 组，其中冻-融循环试验 2 组，编号为 A1，A2；干-湿循环试验 2 组，编号为 B1，B2，每组设置 3 个平行试验。其中 A1，B1 用于测试岩样的吸水率、崩解比、表观密度及浸泡液的水质，每个样品总质量在 1.5~1.6 kg 范围内；A2，B2 用于测试岩样的堆积密度，每个样品总质量 40 kg。试验过程采用的浸泡液为蒸馏水，其 pH 值为 7.02，TDS 值为 69.5 mg/L。干-湿循环试验方法为：将岩样置于 25℃

的蒸馏水中浸泡 24 h，然后放入 105℃ 的烘箱中烘干 12 h，再放入干燥器内冷却至室温后进行筛分，结合粗筛分要求和本试验样品特点，选择粒径级配为 20，10，5，2，1 mm 的分样筛进行筛分。每个循环周期为 36 h，如此反复。冻-融循环试验方法为：将岩样置于 25℃ 的蒸馏水中浸泡 24 h，再放入 -30℃ 的低温试验箱中冻结 12 h，取出后转入 25℃ 的恒温箱中融化 12 h，再放入 105℃ 的烘箱中烘干 12 h，同干-湿循环试验，将烘干后的岩样冷却后进行筛分。每个循环周期为 60 h，如此反复。

表 1 泥岩物理性质指标

Table 1 Basic physical indices of mudstone						
指标	比重	空隙率 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	自然含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	饱和含水率 /%
μ	2.66	5.20	2.83	1.52	2.60	3.81
σ	0.18	0.23	0.17	0.09	0.13	0.10

注：μ 为平均数，σ 为标准差。

2 试验结果与分析

2.1 崩解现象分析

在粒径大于 2 mm 的颗粒崩解稳定后，可得到一些始终无法崩解的物质，其大多为云母、细小的砾石等^[17]。因此，崩解率（disintegration rate，DRE）可采用如下公式计算：

DRE = S₁ / S₂ , (1)

式中，S₁ 为粒径小于 2 mm 的岩样质量，S₂ 为岩样总质量。

所得岩样崩解率变化曲线见图 2。根据曲线走势，本试验干-湿循环和冻-融循环分别进行了 15 次。干-湿循环和冻-融循环过程中试样的崩解形态如图 1 所示。

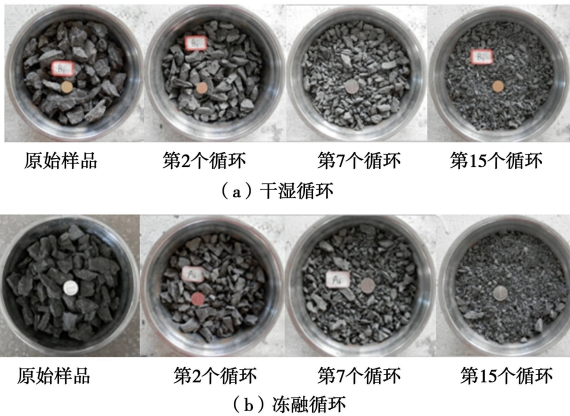


图 1 泥质岩崩解情况

Fig. 1 Disintegration process of mudstone

由图 1 可见，随着循环次数的增加，两组泥质岩

颗粒均不断趋于细化。结合图2可知,与干-湿循环作用相比,泥质岩试样在冻-融循环作用下崩解程度较为明显。第2个循环之后,两组样品均发生强烈崩解,主体由大块崩解成粒径为10~20 mm左右的小块。两组岩样的崩解率明显上升,干湿组由0.17%上升至1.13%,冻融组由0.22%上升至1.46%。第7个循环后,冻融循环组的岩样出现大量粒径为2~5 mm的颗粒状崩解物,而干湿组的崩解物以5~10 mm的细碎块为主,崩解程度明显低于冻融组。观察图2,此时冻融组的崩解率即将趋于稳定,而干湿组仍处于上升阶段。到第15个循环时,干湿组和冻融组的崩解物均以2~5 mm的颗粒状为主,并含有大量粒径<2 mm的泥状崩解物。但仍可以发现,冻融组的泥质岩仍略细于干湿组,其崩解率(9.25%)也大于干湿组(8.36%)。结合张继周等提出的裂纹模式^[18],以上试验现象可以说明泥质岩的崩解过程:原生缺陷的存在→水分渗入这些缺陷→收缩不一产生的拉应力及膨胀产生的张应力作用于原生缺陷→裂纹的产生→水岩接触面积增大,水岩相互作用增强→裂纹扩张、贯通,主体崩解成块状→水岩持续作用,损伤向各处扩展→泥质岩不断崩解成更小块、颗粒状→及至崩解为泥状,崩解完成。第2个循环时,冻融组比干湿的岩样产生更多裂纹,说明冻-融循环产生的冻胀力促进泥质岩裂纹的产生,从加速了泥质岩的崩解。

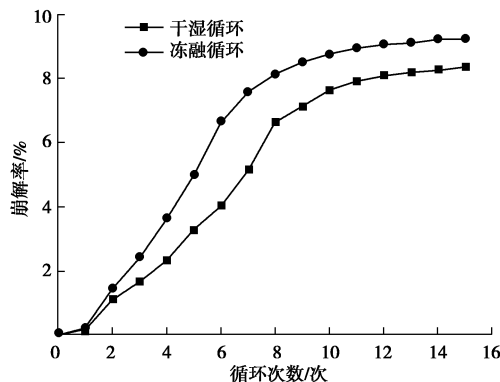


图2 泥质岩 DRE 与循环次数的变化关系

Fig. 2 Variation of DRE with increase of cycles for mudstone

Erguler 等通过综合研究,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^[19-20]。崩解比的计算方法如下:

(1) 绘制样品粒径变化曲线图,横坐标为粒径大小,纵坐标为大于该粒径大小的颗粒百分含量。

(2) DR 采用如下计算公式:

$$Dr_n = S_n / S \times 100\% \quad (2)$$

式中, Dr_n 为样品第 n 次筛分崩解比(%), S_n 为第 n

次筛分粒径变化曲线下方面积, S 为整体面积。

根据式(2)计算干-湿循环和冻-融循环过程中试样的崩解比结果如图3所示。

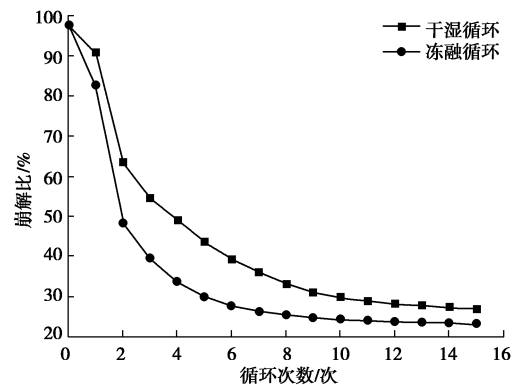


图3 泥质岩 DR 与循环次数的变化关系

Fig. 3 Variation of DR with increase of cycles for mudstone

观察图3可发现,随着循环次数的增加,干湿组和冻融组的崩解比都不断减小,表明崩解程度不断加深,泥质岩的耐崩解性逐渐降低。和图1观察的崩解现象一致,干湿组和冻融组样品的崩解比均在第2个循环变化最快,分别下降了27.2%和34.4%。前4个循环冻融组与干湿组崩解比差值越来越大,第1个循环相差0.3%,到第4个循环增至15.56%。之后随着循环的进行,二者之间的差距渐渐减少,最终差值稳定在4%左右。说明冻-融循环在水岩相互作用的初期极大促进泥质岩的崩解,越是完整的泥质岩其作用效果越明显。干湿组的泥质岩在第10个循环后崩解基本达到稳定,之后崩解比下降速度缓慢,最后崩解比稳定在27%左右;冻融组的泥质岩在第7个循环崩解就达到稳定,最后崩解比稳定在23%左右,冻-融循环明显缩短了泥质岩崩解的周期。冻融组的崩解比低于干湿组的崩解比,表明冻-融循环对泥质岩的崩解特性影响较大,能在一定程度上降低泥质岩的耐崩解性。中国东北地区冰冻期长,对泥质岩的耐崩解性影响很大,在治理泥质岩的崩解引起的工程地质问题时,要充分考虑到东北地区的气候条件。

国内外学者一般采用 Id_2 (第二个循环岩样的耐崩解指数) 来表征岩石的耐崩解性,由本文试验可以看出,岩样在第2个循环崩解最为迅速,其崩解性变化确实最为明显。但从图2可以发现,本文采用的岩样在后续循环崩解率上升速度仍然很快,用第2个循环来预测泥质岩的崩解性并不全面。为了更准确地预测泥质岩崩解性的变化,本文对冻融组和干湿组泥质岩崩解比随干-湿循环变化情况进行函数拟合(图4,5),结果发现指数函数拟合效果最好。干湿组拟合函数为 $y = 74.769 \times e^{\frac{-x}{3.428}} + 25.980$, $R^2 = 0.982$; 冻融组拟合

函数为 $y = 78.221 \times e^{\frac{-x}{2.115}} + 23.159$ ， $R^2 = 0.974$ 。相关系数均很大，相关性好，能很好地拟合并预测崩解比的变化情况。

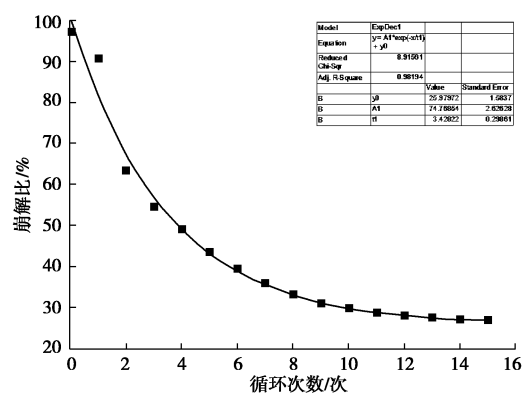


图 4 干湿循环条件下 DR 的变化情况
Fig. 4 Variation of DR with wetting and drying cycles for mudstone

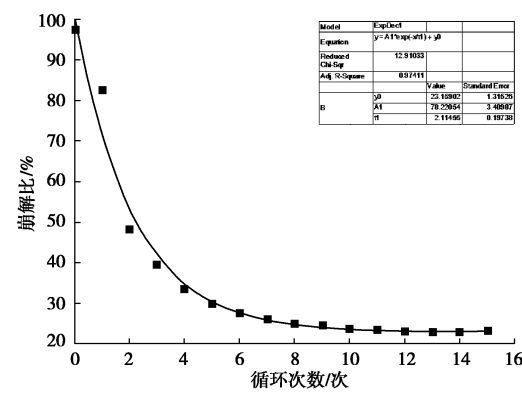


图 5 冻融循环条件下 DR 的变化情况
Fig. 5 Variation of DR with freeze and thaw cycles for mudstone

2.2 矿物与化学成分分析

泥质岩的崩解与泥质岩中含有的膨胀性黏土矿物有密切关系^[17]。当岩石浸水后，水渗入泥岩的孔隙、裂隙当中，细小岩粒的吸附水膜便会增厚，从而引起岩石颗粒的崩裂解体和体积膨胀变形，导致岩石崩解。由 X 射线衍射图谱可见（图 6），阜新海州露天矿泥质岩属于天然岩石，物相较多，其主要成分是石英（43.47%）、钠长石（19.42%）、微斜长石（15.07%），主要黏土矿物为伊利石（14.00%）、高岭石（6.31%）、蒙脱石（1.73%）。石英化学性质稳定，具有较强的抗水性与抗风化能力，亲水性极弱。钠长石和微斜长石分别为钠钾性铝硅酸盐。高岭石、伊利石等黏土矿物具有较强亲水性，高岭石与水反应过程为： $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + nH_2O \rightarrow Al_4Si_4O_{10}(OH)_{8+n} \cdot nH_2O$ ，伊利石与水反应过程为： $K_{0.9}Al_{2.9}Si_{3.1}O_{10}(OH)_2 + nH_2O \rightarrow K_{0.9}Al_{2.9}Si_{3.1}O_{10}(OH)_{2+n} \cdot nH_2O$ 。

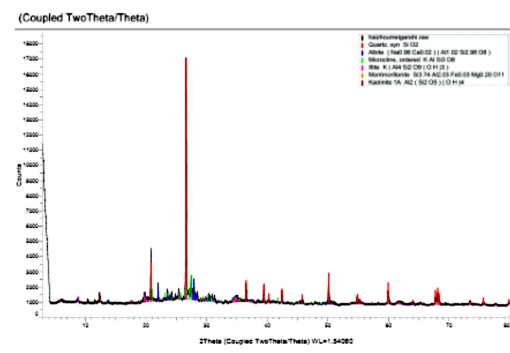


图 6 泥质岩 X 射线衍射图谱
Fig. 6 X-ray diffraction spectra of mudstone

膨胀性黏土矿物吸水膨胀、失水收缩，经过反复胀缩变形，干缩裂隙发育，导致浸水承载力衰减，其力学特性一般使用膨胀潜势和膨胀力这两个参数来进行衡量。膨胀力主要和岩石的干重度有关，对于同一岩石来说，膨胀力是一常数。而膨胀潜势主要与含水率的大小及变化有关，如果含水率保持不变则不会有体积变化，进而不会产生膨胀潜势。换言之，当黏土的含水率发生变化则会产生垂直和水平两个方向的体积膨胀。含水率的轻微变化仅 1%~2% 的量值就足以引起有害的膨胀^[21]。因此，很有必要测试泥质岩吸水率的变化。

由图 7 所示，本试验中泥质岩的吸水率随着循环的进行而不断增大，最终保持在 4.25 左右不变。对于同一种岩石，吸水率主要和岩石的孔隙率有关。随着循环的进行，泥质从产生裂纹到崩解成颗粒状及泥状，其孔隙率不断增加，导致泥质岩的吸水率不断增加，使得膨胀性黏土矿物的膨胀潜势不断增加，进而促使岩石不断地发生崩解。冻融组和干湿组的吸水率分别在第 7、第 10 个循环之后增长速度急剧减慢。由崩解比变化情况可知，此时泥质岩的崩解基本完成，导致泥质岩孔隙率的变化极小，从而使得吸水率的变化趋于稳定。冻-融循环所需周期短于干-湿循环，这是由于相比干-湿循环，冻融条件下会产生冻胀力，促使裂纹的产生、贯通更为迅速，导致孔隙的增长更快，增强了黏土矿物的吸水能力，加速了泥质岩的崩解，所以可以看到冻融条件下泥质岩的崩解明显快于干-湿循环。

2.3 浸泡液水质变化

每次循环之后浸泡液的 pH 值和 TDS（溶解性固体总量）测试结果如图 8 所示。pH 值的大小反应了溶液中 H⁺或 OH⁻浓度大小，TDS 用来衡量水中所有离子的总含量。由图可见，岩样浸泡液 pH 值均大于 7.02，呈碱性，说明水岩相互作用后，泥质岩中可溶性盐类溶于水并电离出一些碱性离子，导致浸泡液呈碱性。

从图8可以发现, 各组岩样的pH值、TDS均随着循环的进行而逐渐降低。pH值由最初9.6降至7.8左右, 略高于蒸馏水的pH值; 而TDS最终稳定在72.8 mg/L左右。这是由于随着循环的进行可溶于水的离子数量在不断减少, 导致pH值和TDS均呈下降趋势。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, 促进水岩相互作用, 进而加速岩石崩解^[22]。

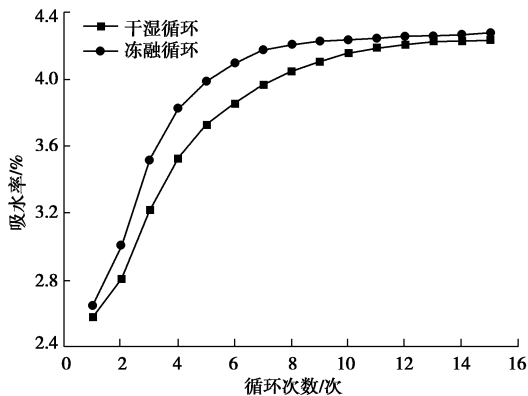


图7 泥质岩吸水率随循环次数增长的变化

Fig. 7 Variation of water absorption rate with increase of cycles for mudstone

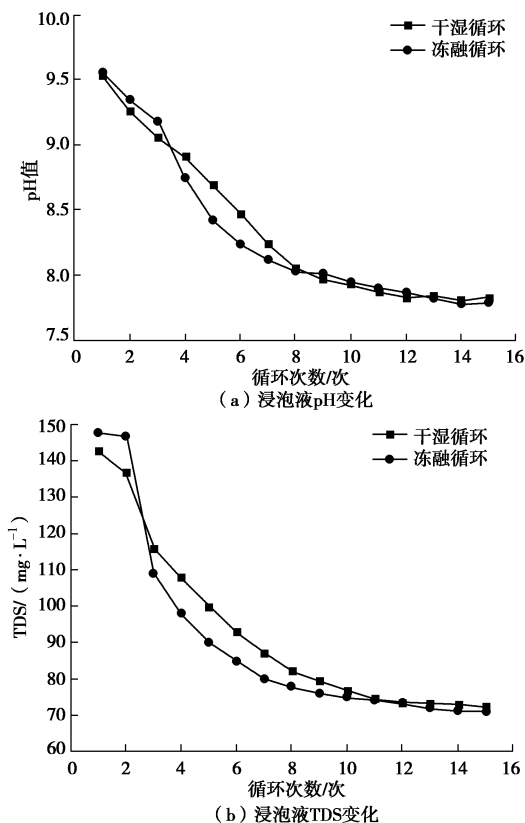


图8 浸泡液水质特征演化规律

Fig. 8 Fluctuation of soak solution quality during experiments

比较干湿组和冻融组的变化曲线(图8), 无论pH值还是TDS, 开始均为冻融组的数值略大于干湿组。

第3个循环之后, 干湿组的数值渐渐超过冻融组。由崩解比变化曲线可知, 冻融组的崩解比一直低于干湿组, 其崩解更为剧烈, 更利于可溶离子的浸出。由于岩样中总离子数有限, 使得后续循环干湿组的离子浓度渐渐高于冻融组。由于第2个循环岩样主体破裂, 可溶离子极大浸出, 使得第3个循环浸泡液的TDS发生了陡降。到第九个循环之后, 冻融组和干湿组的变化曲线几乎重合, 说明试验后期冻-融循环和干-湿循环条件下, 泥质岩中可溶性胶结物的溶解情况基本一致。可溶性胶结物及离子的溶解, 主要和温度及溶液中同离子浓度有关。对于同一种岩样, 岩样中的同离子浓度可认为基本一致。大多数可溶离子化合物随温度升高, 溶解度增大, 溶解速度加快。因此, 冻融过程的低温处理并未能促进泥质岩中可溶性盐类的溶解, 才会出现后面两组曲线几乎重合这一试验现象。冻融过程产生的冻胀力加速泥质岩裂纹的产生, 从而促进水岩接触, 进而加速可溶性胶结物的溶解。

2.4 空隙率演化规律

为研究泥质岩空隙结构的变化, 本试验参照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)^[16]中相关规定测试空隙率。本文采用的岩样最大颗粒为26.5 mm, 属于粗集料试验, 具体操作方法如下:

(1) 参照 T 0304—2005 粗集料密度及吸水率试验(网篮法)测表观密度 ρ_a (kg/m^3)。

(2) 参照 T 0309—2005 粗集料堆积密度及空隙率试验测堆积密度 ρ (kg/m^3)。

(3) 空隙率 V_c 采用如下公式计算:

$$V_c = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_a}\right) \times 100 \quad (3)$$

试验发现(图9), 空隙率的变化情况与崩解比的变化情况基本一致。两组岩样的空隙率均随着循环的进行而减小, 经过15次循环之后, 干湿组的空隙率由55.11%下降为47.57%, 下降7.54%; 而冻融组则由55.84%下降为47.16%, 下降8.68%。同时, 冻融组和干湿组的岩样均在第2个循环变化最快, 分别下降1.71%和1.24%, 但冻融组的空隙率下降速度更快, 且第2个循环之后其空隙率大小渐渐低于干湿组。散体空隙率主要由散体的粗细程度决定, 随着循环的进行, 泥质岩不断发生崩解, 崩解物的颗粒不断趋于细化, 导致空隙率不断降低。因此, 崩解比的变化影响了空隙率的变化。同时, 空隙率的降低, 减少了泥质岩堆体的储水, 水岩相互作用减少, 导致崩解速度减慢。所以, 随着空隙率的降低, 崩解速度减慢, 使得泥质岩崩解比变化曲线逐渐减缓, 并且前3个循环冻融组崩解比下降更快, 之后干湿组下降更快, 这与二者空隙率的大小关系也是对应的。

空隙率越大的泥质岩,受冻-融循环影响越显著,本试验选用的泥质岩散体空隙率为 55.84%,空隙率大,泥样较容易受冻融作用影响。本试验冻融组岩样的崩解速度明显快于干湿组,进一步验证了这个结论。因此,散体堆体的空隙率越大,一方面其结构的稳定性越差,抗拉、抗压强度差;另一方面其储水能力越强,水岩接触面积越大,泥质岩崩解速度越快。在工程实际中,可以采取压实等方法减少泥质岩堆体中的空隙率,从而减少泥质岩的崩解,进而减轻或避免由此造成的工程地质危害。

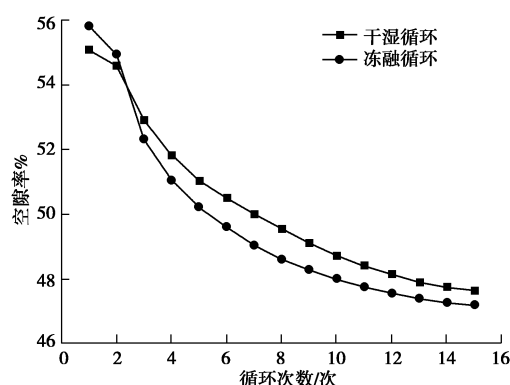


图9 泥质岩空隙率随循环次数增长的变化

Fig. 9 Variation of porosity with increase of cycles for mudstone

3 结 论

本文以阜新海州露天矿泥质岩为研究材料,通过在实验室内设置的冻-融及干-湿循环条件,对泥质岩开展了室内浸水崩解试验,分析并探讨了中国东北地区气候环境特点对泥质岩崩解特性的影响,并得到以下结论:

(1) 随着循环的进行,冻融组和干湿组的崩解比均不断减小,第2个循环崩解比下降最快,分别为 27.2%和 34.4%,泥质岩第二个循环破坏程度最大。

(2) 相对于干-湿循环作用而言,冻-融循环作用会对泥质岩崩解性产生明显影响,将泥质岩的崩解周期由 10 个缩短至 7 个循环,很大程度降低了泥质岩的耐崩解性。因此,在治理由泥质岩的崩解引起的工程地质问题时,要充分考虑到东北地区冰冻期长的气候条件。

(3) 空隙率越大的泥质岩堆体,其储水能力越强,导致水岩相互作用增强。因此,工程实际中,可考虑采取压实等方法减少泥质岩的崩解。

(4) 冻融条件下产生的冻胀力作用于泥质岩,加速泥质岩裂纹的产生,从而导致孔隙率增加,进而促使吸水率增加,崩解加快。

(5) 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实验室条件比较复杂,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,考虑冻-融循环对泥质岩崩解特性的影响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(增刊): 1 - 5. (ZHANG Zhi-pei, PENG Hui, DUAN Li-li. Studying on the softening characteristics of mudstone along mian-ning freeway[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(S0): 1 - 5. (in Chinese))
- [2] 杨建林, 王来贵, 李喜林, 等. 露天矿泥岩路基双重改性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1469 - 1477. (YANG Jian-lin, WANG Lai-gui, LI Xi-lin, et al. Research on the double modification for mudstone roadbed of open pit mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1469 - 1477. (in Chinese))
- [3] 车 平, 宋翔东, 等. 巢湖地区坟头组泥岩遇水软化特性与机理试验研究[J]. 同济大学学报, 2012, 40(3): 396 - 401. (CHE Ping, SONG Xiang-dong, et al. 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))
- [4] 何满潮, 袁 越, 王晓雷, 等. 新疆中生代复合型软岩大变形控制技术及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 433 - 441. (HE Man-chao, YUAN Yue, WANG Xiao-lei, et al. Control technology for large deformation of mesozoic compound soft rock in Xinjiang and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 433 - 441. (in Chinese))
- [5] HUSEYIN Y. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone[J]. Bull Eng Geo Environ, 2011, 70(2): 187 - 192.
- [6] ZHANG Dan, CHEN An-qiang, LIU Gang-cai. Laboratory investigation of disintegration characteristics of purple mudstone under different hydrothermal condition[J]. J Mt Sci, 2012, 9(1): 127 - 136.
- [7] 邓华锋, 李建林, 朱 敏, 等. 饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3306 - 3312. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, ZHU Min, et al. Research on saturation test and softening critical phenomena of soft rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11):

- 3306 - 3312. (in Chinese))
- [8] GÖKÇEOĞLU C, ULUSAY U, SÖNMEZ H. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles[J]. *Engineering Geology*, 2000, **57**(3): 215 - 237.
- [9] GUPTA V, AHMED I. The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India[J]. *Engineering Geology*, 2007, **95**(3/4): 79 - 87.
- [10] SINGH T N, VERMA A K, SINGH V, et al. Slake durability study of shaly rock and its predictions[J]. *Environmental Geology*, 2005, **47**(2): 246 - 253.
- [11] SINGH T N, SHARMA P K, KHANDELWAL M. Effect of pH on the physico-mechanical properties of marble[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, **66**(1): 81 - 87.
- [12] SUNIL B M, NAYAK S, SHRIHARI S. Effect of pH on the geotechnical properties of laterite[J]. *Engineering Geology*, 2006, **85**: 197 - 203.
- [13] GHOBADI M H, MOUSAVI S. The effect of pH and salty solutions on durability of sandstones of the Aghajari Formation in Khuzestan province, southwest of Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, **7**(2): 641 - 653.
- [14] 宋玲玲, 冯 莉, 刘炯天, 等. 碱液处理对褐煤孔隙结构的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, **41**(4): 629 - 634. (SONG Ling-ling, FENG Li, LIU Jiong-tian, et al. Effect of alkali treatment on the pore structure of lignite[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, **41**(4): 629 - 634. (in Chinese))
- [15] SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [16] JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005. (JTG E42—2005 Testing methods of aggregate for highway engineering[S]. Beijing: China communication press, 2005. (in Chinese))
- [17] 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**(S2): 4173 - 4179. (in Chinese))
- [18] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(8): 1688 - 1694. (ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang, YANG Zhen-feng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(8): 1688 - 1694. (in Chinese))
- [19] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks[J]. *Engineering Geology*, 2009(108): 36 - 42.
- [20] CHAOWARIN W, TANAPHOL S, DECHO P, et al. Simulation of sandstone degradation using large-scale slake durability index testing device[J]. *Songklanakarin J Sci Technol*, 2012, **34**(5): 587 - 596.
- [21] 赵文良. 简析膨胀土地基性质及处理方法[J]. *黑龙江科技信息*, 2009(9): 268. (ZHAO Wen-liang. A brief analysis of the nature and treatment method of expansive soil foundation[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2009(9): 268. (in Chinese))
- [22] 梁 冰, 谭晓引, 姜利国, 等. 泥质岩在不同 pH 值溶液中崩解特性的试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015, **37**(2): 23 - 27. (LIANG Bing, TAN Xiao-yin, JIANG Li-guo, et al. Experiments on slaking characteristics of mudstone in different pH solutions[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2015, **37**(2): 23 - 27. (in Chinese))