DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.04.32

冻融循环作用下砂岩无损测试力学特性研究

刘 杰, 黎 照, 杨渝南, 唐洪宇, 高 进, 沈豪炜
(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 针对冻融循环作用下砂岩冻融损伤机理和物理力学参数之间相互关系的问题,利用5种可重复操作的无损检测法(电阻测试、声波测试、滴定测试、CT扫描、局部细观放大技术)对低应力循环荷载作用下冻融循环试验后的岩样进行检测,并对岩样的冻融劣化机理作出了分析,通过CT扫描得到岩样CT数值变化规律并发现冻融作用,找出了冻融后参数间的关系。结果表明:岩样物理参数和动力力学参数对冻融作用的敏感性排序为:阻尼比(λ) > 动泊松比(u_d) > 电阻率(ρ) > 阻尼系数(C) > 纵波波速(v) > 浸润面积(S) > 动弹性模量(E_d) > 质量(m),由此可在定量检测砂岩的冻融程度时,按参数对冻融作用的敏感性排序选择优先检测的参数种类,以减少检测的工作量;经过定量比较分析,提出了无损测试中各种参数间的关联性,得出了质量、阻尼比、动泊松比、阻尼系数、纵波波速、动弹性模量两两参数之间的定量关系,因此可通过一种参数的变化规律,预测另一种参数的变化趋势,在有限的试验条件、试验次数下,有效地精简所需试验的参数数目。

关键词: 砂岩; 冻融循环; 冻融损伤; 力学特性; 无损检测技术; CT扫描; 劣化度机理
中图分类号:TU45.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)04-0201-09

Study on the mechanical properties of sandstone nondestructive testing under the freeze-thaw cycle

LIU Jie, LI Zhao, YANG Yunan, TANG Hongyu, GAO Jin, SHEN Haowei
(*Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *China*)

Abstract: To understand the relationship between the damage mechanism and physical and mechanical parameters of sandstone under the freeze-thaw cycling,, five non-destructive testing methods (resistance test, acoustic test, titration test, CT scan and local microscopic magnification technology) were used to detect rock samples after freeze-thaw cycle test under low-stress cyclic load. According to the test results, the damage and degradation mode of sandstone under the action of freeze-thaw cycle is determined and the flow chart of its degradation mode was drawn. CT scanning was used to obtain the variation law of rock sample CT value, and freeze-thaw degradation and freeze-thaw binding were found. The sensitivity of rock samples´physical and dynamic mechanical parameters to freeze-thaw action is ranked as follows: damping ratio (λ) > dynamic poisson's ratio (u_d) > resistivity (ρ) > damping coefficient (C) > longitudinal wave velocity (v) > infiltration area (S) > dynamic mode (E_d) > mass (m); therefore, when the degree of freeze-thaw of sandstone can be quantitatively detected, the parameter types of priority detection can be selected according to the sensitivities of parameters to freeze-thaw action to reduce the workload of detection. Through the quantitative comparison and analysis, the correlations among various parameters in nondestructive testing were proposed, and the quantitative relationships among two parameters of following each other: mass, damping ratio, dynamic poisson ś ratio, damping coefficient, longitudinal wave velocity and dynamic mode. Therefore, the variation trend of

收稿日期:2018-09-27; **修回日期**:2019-04-17
基金项目:国家自然科学基金项目(51439003、51579138); 国家科技支撑计划项目(2015BAB07B08); 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLGP2016K023); 湖北省自然科学基金杰出青年人才计划项目(2018CFA065); 三峡大学拔尖人才计划项目(KJ2014H012); 三峡大学硕士学位论文培优基金项目(2019SSPY025)。
作者简介:刘 杰(1979-),男,云南昭通人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土边坡工程及卸荷岩体力学研究。
通讯作者:杨渝南(1979-),女,重庆人,硕士,讲师,主要从事环境岩土工程研究。

one parameter can be predicted through the variation law of another parameter, and the number of parameters needed can be effectively reduced when the test conditions and times are limited.

Key words: sandstone; freeze-thaw cycles; freeze-thaw injury; mechanical properties; noninvasive testing technology; CT scanning; inferiority mechanism

1 研究背景

随着我国社会经济的发展,许多地下资源开采和基础工程建设工作逐渐向西南、西北等寒区发展。这些地区冬季温度较低,春季气温变化快,造成岩石内的裂隙水冻融交替发生,使隧道围岩发生冻胀破坏等,严重威胁着工程的安全与正常交通运行。

近年来,国内外学者针对寒区冻结岩石工程问题,在冻岩的物理力学性质、损伤机理以及冻融损伤检测方法等多方面做了大量的研究,取得了丰硕的成果,为解决冻融岩石工程问题奠定了良好的基础。Fukuda[1]、徐光苗等[2]、Fahey[3]系统分析了岩石冻融破坏的机理,指出岩性、冻融循环次数、冻融最低温度及含水率为影响岩石冻融强度的几种主要因素;贾海梁等[4]基于疲劳损伤理论分析得出高周疲劳荷载作用在计算岩石冻融损伤时不可忽略,并且低、高周疲劳荷载的作用顺序对其影响较为显著;Nicholson 等[5]通过含有原生裂隙的沉积岩冻融循环试验,归类为4种冻融劣化模式。赖远明等[6]通过CT分析说明冻融对岩样的表面损伤较大,内部损伤较小。邓红卫等[7]指出岩体冻融损伤会更有利于岩体冻胀力的发育,从而导致岩体裂隙进一步扩张,这种恶性循环最终导致岩体的宏观破坏。张慧梅等[8-9]通过饱水状态下的冻融循环试验研究了红砂岩和页岩2种岩石的冻融损伤劣化及破坏行为。李宁等[10]研究发现砂岩的低周疲劳特性与冻结与否、有无裂隙等条件密切相关,同时,低周次循环加载作用下冻结对裂隙砂岩的疲劳特性影响较大。刘华等[11]发现随着冻融作用的进行,在不同区域内岩石纵横波速比值出现下降,冻融后孔隙率较大的安山岩质量变化率远远高于花岗岩。李杰林等[12]、许玉娟等[13]利用核磁共振技术研究了冻融损伤后岩石内部孔隙结构的变化情况,为研究冻融损伤提供了新的方法。Argandoña 等[14]对西班牙的 Laspra 白云岩进行了冻融循环试验,并利用CT技术对岩样进行扫描,分析岩样的孔隙结构在冻融条件下的演化过程。

本文将通过砂岩的冻融循环加卸载试验,利用电阻测试、声波测试、滴定测试、CT扫描、局部细观放大技术等5种可重复操作的无损检测法对冻融损伤岩样进行分析,进一步阐述砂岩冻融后各动力学、物理参数之间的变化规律及关联性。

2 试验方法及研究方案

试验岩样为某高寒山区边坡砂岩。依照《水利水电工程岩石试验规程》[15]及《工程岩体试验方法标准》[16]的相关规定,首先剔除表面存有明显裂纹、破损等缺陷的岩样,然后根据岩样的密度和纵波波速对岩样进行二次筛选,最终采用外观尺寸、密度、纵波波速均相近的岩样加工成标准试件,试件的高度及直径分别为100、50 mm;高度及直径的尺寸误差在0.3 mm内;两端面的不平行度在0.05 mm内,并且两端面应与岩样轴线垂直,最大偏差角度在0.25°以内。

参考《公路工程岩石试验规程》[17]中抗冻性试验的相关规定,本试验方案拟定冻融次数为40次,冻结和解冻时间均为4 h,解冻时水温为20℃左右。

具体试验方案流程见图1。

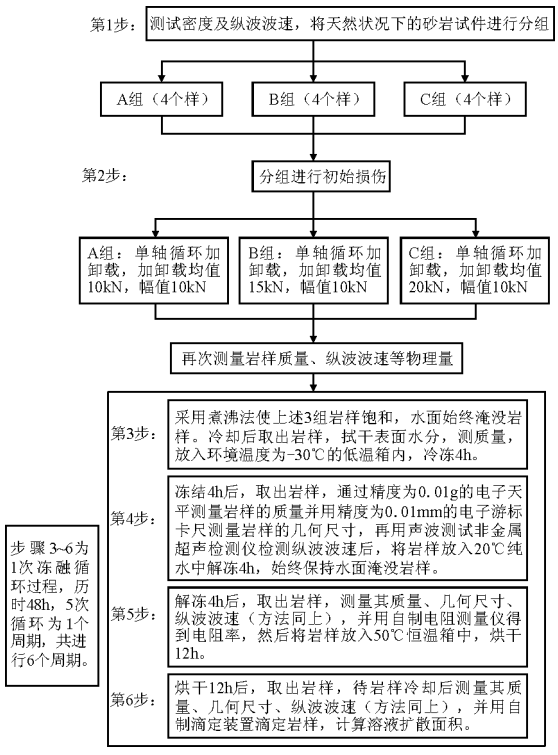
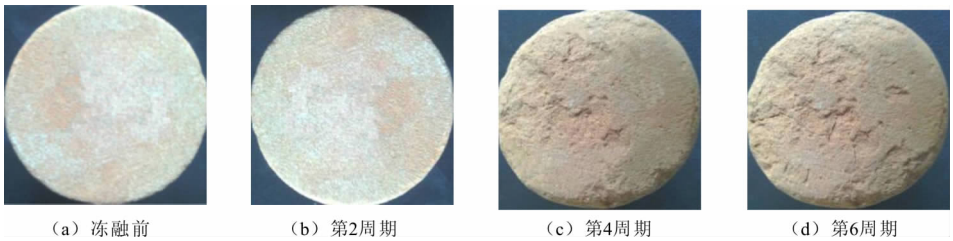


图1 试验方案流程图

3 试验结果与分析

3.1 宏观劣化损伤形态分析

(1)不同冻融周期下典型岩样端面劣化照片如图2所示。



（a）冻融前　（b）第2周期　（c）第4周期　（d）第6周期

图 2　A－4 组典型岩样不同冻融周期下端面劣化形态

由图 2 可知,随着冻融周期的增加,岩样主要劣化损伤区域的损伤程度加深、损伤面积增大。在第 2 周期的冻融循环后,岩样并未出现明显的劣化损伤区域;第 4 周期冻融循环后,岩样一侧端部出现大面积剥蚀,部分岩样表面出现小块岩石脱落。在冻融第 6 周期后,主要劣化损伤区域在冻融结束后劣化程度加剧明显,损伤面积更大,岩样表面的剥落情况也最为明显,岩样端部剥蚀程度加剧,且出现细小龟裂纹,所有岩样表面均有不同程度的孔洞产生。

(2)第 6 周期冻融循环后典型岩样侧面劣化照片如图 3 所示。

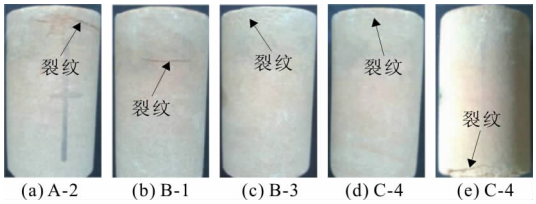
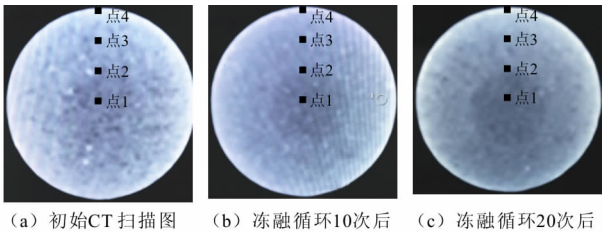


图 3　第 6 周期冻融后部分岩样表面裂纹扩展情况

由图 3 可知,第 6 期结束后,岩样表面的环向裂纹由尖锐变得圆钝,裂纹长度达到 1 ~ 3cm,宽度达 0 ~ 2mm,表明冻融循环作用加剧了裂纹的发展(A －2 表示 A 组第 2 个砂岩试样,以此类推)。

3.2　冻融循环作用后砂岩端面 CT 扫描结果

3.2.1　*试件外圈层致密性反常现象及机理*　对不同冻融循环周期同一截面的岩样标记位置后用 Prospeed F1 螺旋 CT 机(空间分辨率为 0.75mm)进行扫描,扫描出的 CT 图像如图 4 所示。



（a）初始CT 扫描图　（b）冻融循环10次后 CT扫描图　（c）冻融循环20次后 CT扫描图

图 4　A 组砂岩试样 1 不同冻融次数断面 CT 扫描图

分别从以下 3 个方面对 CT 扫描进行分析:

(1) CT 图像亮度分析。未冻融试件 CT 图像外表层均有一圈明亮的薄层区域,亮度向内层逐渐变暗,渐变范围为 1.0 ~ 1.5 cm。CT 图形区域越亮,则密度越大,表明该范围内试件密度由外向内渐变,且外表层密度最大。

(2) CT 值分析。如图 5 所示。

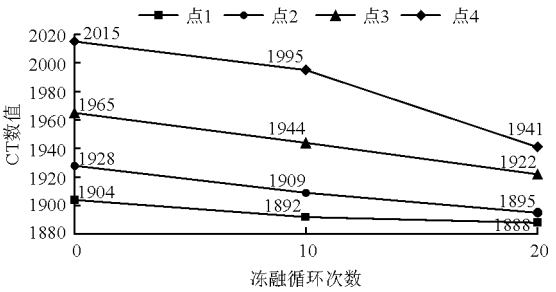


图 5　A 组砂岩试样 1 断面上不同位置 CT 扫描数平均值

由图 5 分析可知,随着冻融循环次数的增加,CT 数值成递减趋势,且岩样外部 CT 数值比内部下降更为明显,说明岩样密度随着冻融循环次数的增加而逐渐减小,且在循环次数相同时,试样由内到外密度逐渐增大,与 CT 图像亮度现象反映的机理相呼应。

(3) 致密性反常现象及机理分析。分析认为,由于试验中所用的岩样试件为钻样机所制,在钻样机钻头扭转钻进、岩样取出的过程中,对岩样外层存在多种作用:①钻头钻进对岩样外层的挤密作用作用后密度值为 ϕ ; ②外层胶结物被破坏并且孔隙结构塌陷,摩擦损伤劣化,劣化后密度值为 φ_1 ; ③岩样钻进取出时应力卸除劣化作用,劣化后密度值为 φ_2 ,因此岩样外层一定范围内的密度值 γ 有:

$$\gamma = \phi - \varphi_1 - \varphi_2 \tag{1}$$

若 $\gamma > 0$,则说明对该种岩样来说,挤密作用大于劣化作用;若 $\gamma < 0$,则说明对该种岩样来说,劣化作用大于挤密作用;若 $\gamma = 0$,则说明对该种岩样来说,两者作用效果相同。

本试验中所用的砂岩岩样外层密度 $\gamma > 0$,即钻头的挤密作用大于岩样外层的劣化作用。

3.2.2　*砂岩试件外圈层的冻裂模式及其机理分析*

图 6 为砂岩试样不同位置 CT 值的平均值增长幅

度,其能更直观地表现出砂岩在冻融循环作用后有明显的劣化效应。

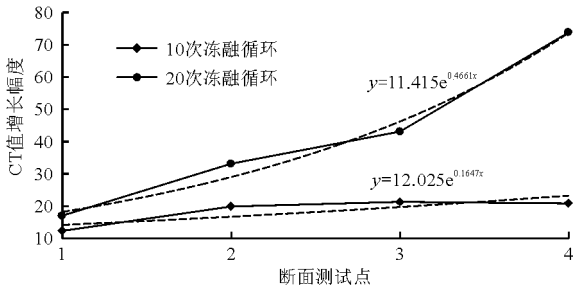


图6 A组砂岩试样1冻融后断面CT值增长幅度

(1)冻融循环后CT增幅值分析。CT值显示砂岩在冻融循环作用后有明显的劣化效应。结合表5和图6中可以看出:①随着冻融循环次数的增加,在任一冻融周期时有岩样外圈的CT数降低的幅度大于其内圈,表明冻融作用对岩样的外圈影响程度更大;②冻融次数由10次增加到20次时,外圈的冻融劣化明显加剧,内圈的冻融劣化作用减缓。

(2)冻融劣化和冻胀束缚作用的提出。分析认为:砂岩岩样的冻融作用β分为两部分,一部分为冻融劣化作用β_L,一部分为冻胀束缚作用β_S,即有:

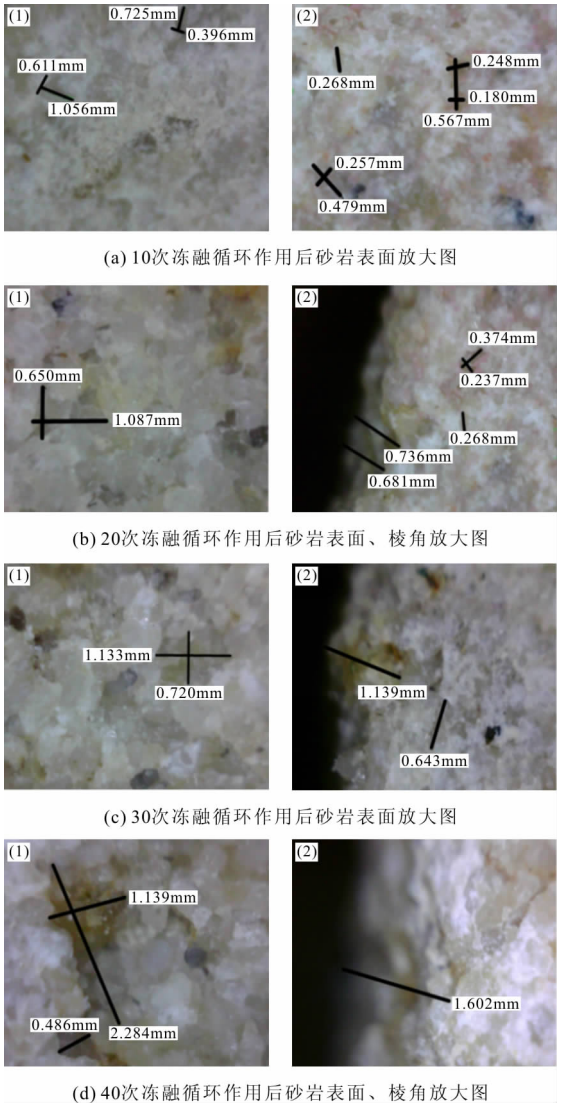
$$\beta = \beta_L - \beta_S \tag{2}$$

在冻融循环10次时,对于岩石外圈,此时劣化作用还不太明显,外圈较致密,因此有β_{S1}较小,β_{L1}较大;对于岩石的内圈,有β_{L2}较大,但外圈里渗入的少量水的冻胀作用对内圈有压密束缚作用,因此有β_{L2}较大,故有:$\beta_{L1}-\beta_{S1} > \beta_{L2}-\beta_{S2}$,即岩样外圈的冻融劣化程度大于内圈,这种现象在一定范围内随着冻融循环次数更为明显。

当冻融循环次数增加到20次时,岩石外圈有劣化程度大、孔隙增多,因此外圈内的束缚力减弱,有β_{S3}小接近于0,β_{L3}较大;对于岩石的内圈,由于外圈孔隙增多,因此外圈的渗水量大、进水多,冻胀作用较冻融循环10次时作用效果更强,束缚力越大,因此有β_{S4}大,β_{L4}较大,由于冻融劣化作用β_L对于同一岩样在不同冻融周期时区别不大,故有:$\beta_{L3}-\beta_{S3} > \beta_{L1}-\beta_{S1}$、$B_{L2}-B_{S2} > \beta_{L4}-\beta_{S4}$,即冻融次数由10次增加到20次时,外圈的冻融劣化作用加剧,内圈的冻融劣化作用减缓。

3.3 砂岩孔隙局部细观放大图像分析

图7为CT扫描试验组饱水砂岩的冻融循环作用后对外层损伤区域运用局部细观放大技术得到的岩样表层冻融后的放大效果图。



(a) 10次冻融循环作用后砂岩表面放大图

(b) 20次冻融循环作用后砂岩表面、棱角放大图

(c) 30次冻融循环作用后砂岩表面放大图

(d) 40次冻融循环作用后砂岩表面、棱角放大图

图7 多次冻融循环作用下砂岩表面、棱角放大图

对图7的分析对比结果见表1。

表1 冻融循环作用次数对砂岩的影响程度

冻融循环次数	砂岩端面及侧面	棱角有无冻融损伤剥落现象	棱角剥落损伤长度/mm	岩样表面孔洞和孔隙发育情况	孔隙发育长度/mm
10	较平整	无		较少的浅孔隙	0.2~0.5
20	较平整	局部轻微剥落	0.6~0.8	向内发育的孔洞和裂隙	0.2~1.0
30	局部轻微剥落	较明显剥落	0.6~1.1	①发育形成大裂隙,②局部出现镂空	0.5~1.2
40	大范围剥落	明显剥落	0.6~1.6	①发育形成大裂隙,②孔隙及裂隙贯通呈现镂空	0.5~2.3

取表 1 中不同循环次数棱角剥落损伤长度与岩样表面空隙发育长度的较大值中不同循环次数,对比结果如图 8 所示。

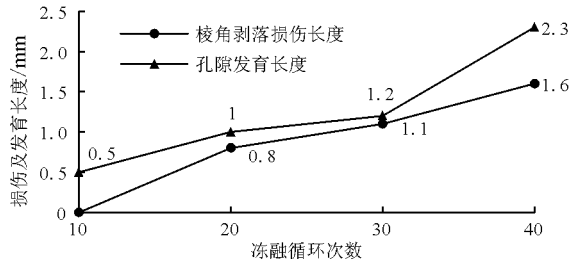


图 8　冻融循环次数对岩石的损伤程度对比图

通过上述分析可知,随着冻融循环次数的增加,砂岩表面劣化程度成递增趋势,孔隙发育长度逐渐增大,说明冻融劣化损伤对岩石的危害性较大。

4　冻融循环作用后岩样参数敏感性排序及劣化机理分析

4.1　岩样物理参数、动力力学参数对冻融作用的敏感性排序

冻融试验完成后,得到岩样物理参数、动力力学参数的变化规律。为研究其对冻融作用的敏感性,定义岩样在冻融循环过程中,物理参数及动力学参数的增长值为增长度,降低值为劣化度,则在各冻融阶段相对于初始值时的总增长度 G_j 或总劣化度 S_j 分别用公式(3)和(4)表示:

$$G_j = \frac{a_j - a_0}{a_0} \times 100\% \tag{3}$$

$$S_j = \frac{a_0 - a_j}{a_0} \times 100\% \tag{4}$$

式中:a_0 为初始参数值;a_j 为冻融循环第 j 周期的参数值。

不同冻融循环周期时这 3 组岩样物理参数、动力学参数劣化度或增长度如图 9 ~ 16 所示。

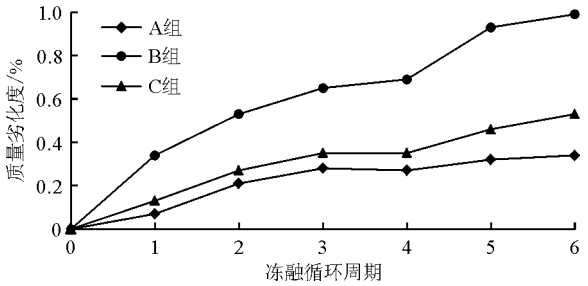


图 9　不同周期下各组岩样质量劣化度

图 9 ~ 16 中质量 m、波速 v、浸润面积 s、阻尼比 λ、动泊松比 u_d、阻尼系数 C、动弹模 E_d 均为干燥状态下测得,电阻率 ρ 为解冻状态下测得。

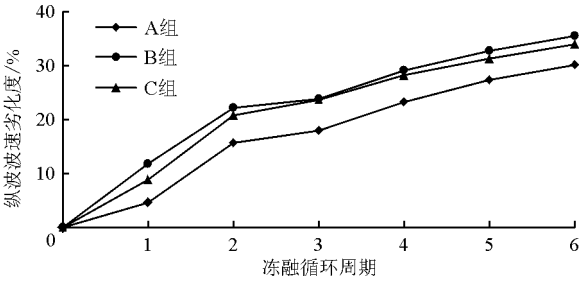


图 10　不同周期下各组岩样波速劣化度

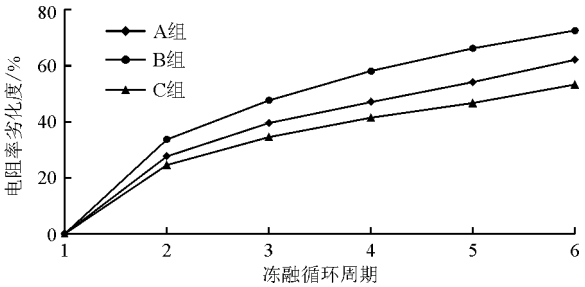


图 11　不同周期下各组岩样电阻率劣化度

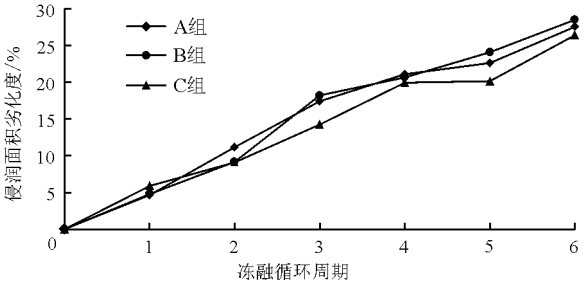


图 12　不同周期下各组岩样侵润面积劣化度

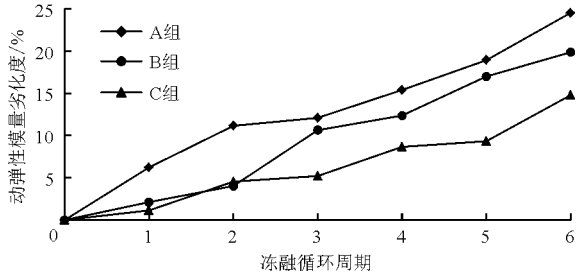


图 13　不同周期下各组岩样动弹性模量劣化度

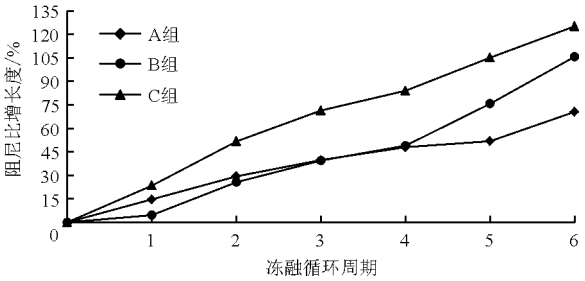


图 14　不同周期下各组岩样阻尼比增长度

从图 9 ~ 16 可以看出,在冻融作用下,各组岩样的阻尼比、阻尼系数和动泊松比随冻融循环周期的增加而增大,质量、纵波波速、电阻率、浸润面积及动

弹性模量随冻融循环周期的增加而减小,且在冻融循环前期,各参数的变化速度较快,冻融循环中后期,变化速度相对变慢。表2为各组岩样参数在6个冻融周期后对冻融作用的敏感性比较,6个冻融周期后3组岩样各参数劣化度(增长度)平均值比较见图17。

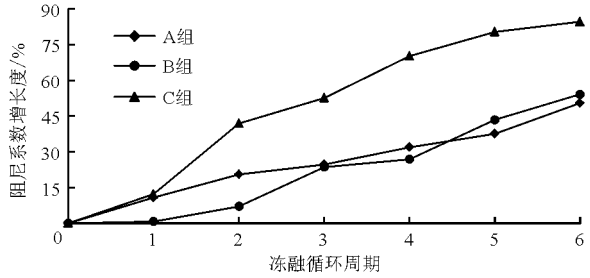


图15 不同周期下各组岩样阻尼系数增长度

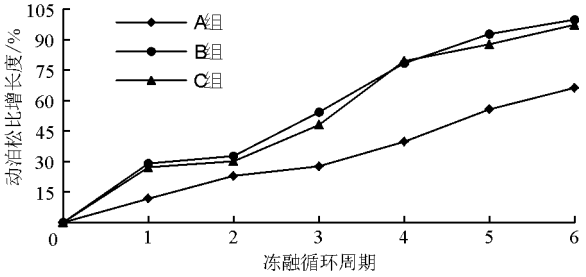


图16 不同周期下各组岩样动泊松比增长度

表2 各物理、动力力学参数6次冻融循环后最终劣化度(增长度) %

岩样组号	质量 m	波速 v	电阻率 ρ	浸润面积 S	阻尼比 λ	阻尼系数 C	动泊松比 u_d	动弹模 E_d
A	0.3	30.1	62.1	27.6	70.5	50.5	66.3	24.5
B	1.0	35.5	72.6	28.5	105.8	54.2	99.8	19.9
C	0.5	33.9	53.3	26.4	125.1	84.6	97.3	14.8
平均值	0.6	33.2	69.3	27.5	100.5	63.1	87.8	19.7

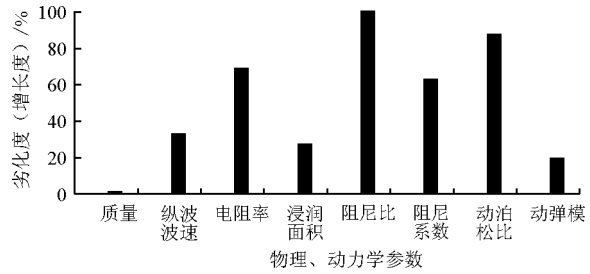


图17 各物理、动力力学参数6次冻融循环后最终劣化度(增长度)比较

冻融循环作用下,岩样表面空隙及细微裂隙出现不同程度的扩张,表明岩样受到不同程度的冻融损伤,岩样性质逐渐弱化,且损伤是由表及里逐渐产生侵蚀。由此可知,冻融循环作用下,岩样质量、纵波波速、电阻率随冻融周期增大而减小;试样在融化状态时的导电性增加;干燥时定量溶液在岩样表面沿深度方向扩散的部分逐渐变多,扩散面积减小;岩样一旦出现孔隙和裂纹的开裂贯通,纵波波速和电阻率就出现变化,而浸润面积和质量的变化是裂纹不断累积并达到一定程度后产生的,因此前两种参数较后两种参数对冻融劣化作用更敏感。

从图17和表2可以看出,随着冻融循环次数增加,阻尼比 λ 的变化最大,质量变化最小,考虑到岩石样本数量较少,且3组岩样的加载幅值较接近,可认为冻融循环作用对这3组岩样物理及动力学参数的影响次序一致,因此各参数对冻融循环作用的敏感性排序如下:阻尼比 λ > 动泊松比 u_d > 电阻率 ρ > 阻尼系数 C > 纵波波速 v > 浸润面积 S > 动弹性模量 E_d > 质量 m。

4.2 参数之间变化关系及机理分析

4.2.1 质量与其他参数的变化规律 3组试样的质量与冻融循环周期的关系见图18;质量与其他参数的关系见图19~22。

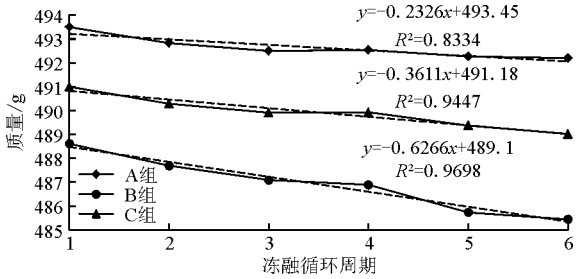


图18 不同周期下各组岩样质量变化曲线

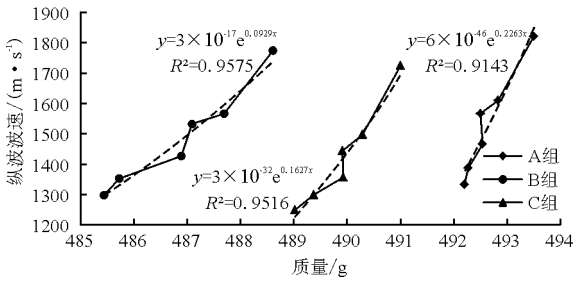


图19 质量与纵波波速关系图

由图18可知,随着冻融周期的增加,在水化、物理及力学共同作用下,岩样的质量 m 与冻融周期呈线性减小关系,岩样内部的孔隙、微裂隙在循环作用

下不断扩张,岩样内部孔隙率增多,渗水通道增加,岩样表面固体颗粒脱落程度增大,个别岩样出现断裂、剥落,因而岩样质量减小。而通常情况下,当介质密度越小、均一性越差时,超声波的传播速度就越慢,反之则越快,冻融循环作用后岩样内孔隙率增大,岩体内声波由“固 - 固”传播变为“固 - 气 - 固”传播,因而纵波波速 v 减小,由图 19 可以看出,纵波波速与质量呈指数关系减少,纵波波速减少幅度大于质量的减少幅度。

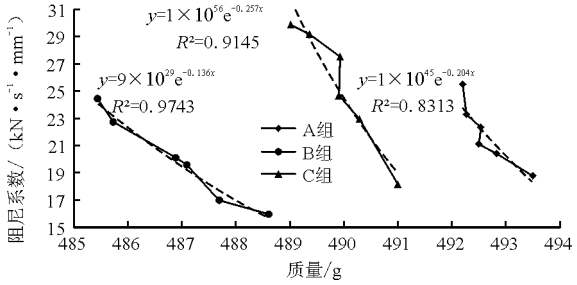


图 20　质量与阻尼系数关系图

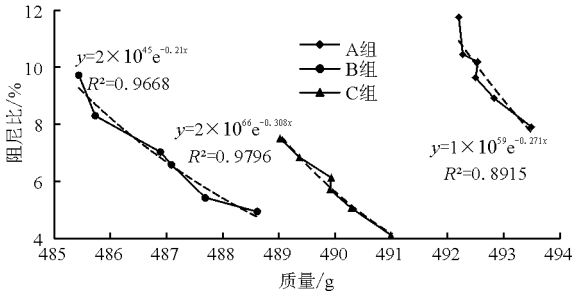


图 21　质量与阻尼比关系图

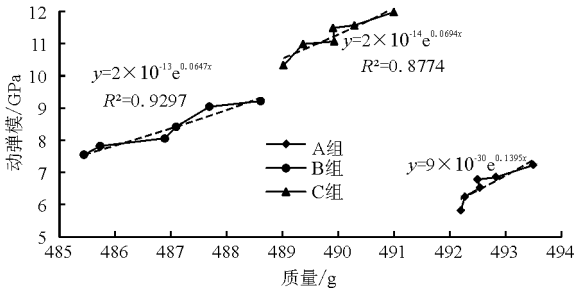


图 22　质量与动弹模关系图

由图 20 ~ 22 可知,随着冻融周期的增加,质量与阻尼系数 C、阻尼比 λ、动弹模 E_d 均呈指数关系,即 $x = ke^{a_m}$,(其中 $x = C$、λ、E_d;k、a_m 为任意不为 0 的常数)但质量与动弹模呈指数关系递减,质量与阻尼系数、阻尼比呈指数关系递增。经分析后发现,岩石的动弹性模量 E_d、阻尼比 λ、阻尼系数 C 的关系图见图 23,三者及相关参数的表达式见公式(5) ~ (8)。

$$E_d = \frac{\sigma_{d\max}}{\varepsilon_{d\max}} \tag{5}$$

$$\lambda = \frac{C}{2\omega m} = \frac{A}{4\pi A_s} \tag{6}$$

$$C = \frac{A}{2\pi^2 X^2 \omega} \tag{7}$$

$$\mu_d = \frac{\varepsilon_{l\max} - \varepsilon_{l\min}}{\varepsilon_{d\max} - \varepsilon_{d\min}} \tag{8}$$

式中:E_d 为动弹性模量,GPa;$\sigma_{d\max}$ 为滞回环的最大动应力,MPa;$\varepsilon_{d\max}$、$\varepsilon_{d\min}$ 分别为滞回曲线最大、最小动应变;$\varepsilon_{l\max}$ 为 $\varepsilon_{d\max}$ 对应的横向应变,$\varepsilon_{l\min}$ 为 $\varepsilon_{d\min}$ 对应的横向应变;λ 为阻尼比;C 为阻尼系数,kN/(mm/s);A 为图 23 中滞回环(ABCDA)面积,mm^2;A_s 为图中阴影部分三角形(AOE)面积,mm^2;X 为滞回环对应的纵向振动振幅;m 为岩样的质量,g;ω 为固有频率,Hz。因此可以得到冻融循环作用后,裂隙和空隙增多,在应力一定时,纵向应变增大,因此动弹性模量 E_d 减小;裂隙越多,相同幅值下岩样吸收的能量,即为图 23 中的滞回环面积越大,岩样总的吸收的能量中转化为塑性能的部分也将增大,因此阻尼系数 C 将增大,阻尼比 λ 也增大。

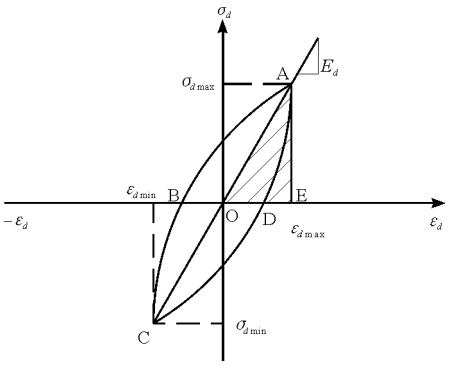


图 23　动应力 - 动应变滞回环

4.2.2　波速与其他参数的变化规律　3 组岩样的纵波波速与其他参数之间的关系见图 24 ~ 26。

由图 24 ~ 26 可知,岩样的纵波波速 v 与阻尼系数 C、动泊松比 u_d、阻尼比 λ 均采用幂函数关系拟合,拟合度较好,相关系数 R^2 均在 0.897 ~ 0.99 之间,其拟合表达式为:

$$X = kv^a \tag{9}$$

式中:$X = C$、u_d、λ;k、a 为任意不为 0 的常数。

由此可知,阻尼系数 C、动泊松比 u_d、阻尼比 λ 均与纵波波速 v 呈乘幂关系增大,因此,可根据此规律预测后续岩样在冻融循环作用下参数的变化趋势,也可以根据这几种参数的某一种参数的变化趋势,预测其他参数的变化趋势。上述规律在冻融循环周期 40 次以下时适用,循环次数增加后的规律有待进一步的研究。

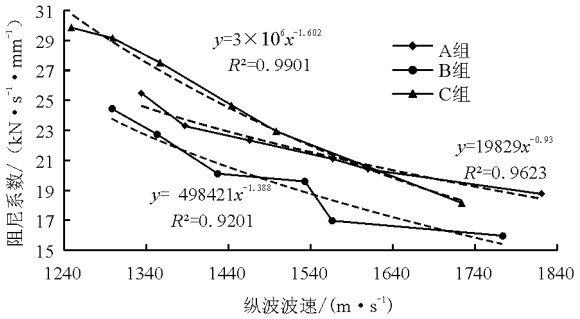


图 24 波速与阻尼系数关系图

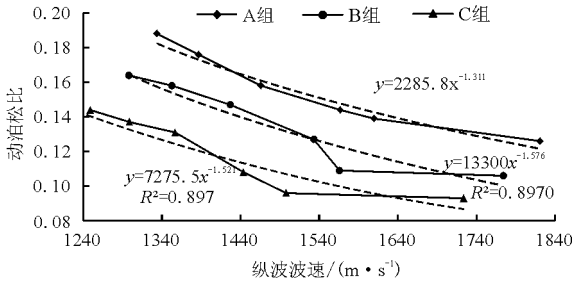


图 25 波速与动泊松比关系

进一步分析 3 组岩样的纵波波速与冻融循环周期及动弹性模量的关系，结果见图 27 ~ 28。

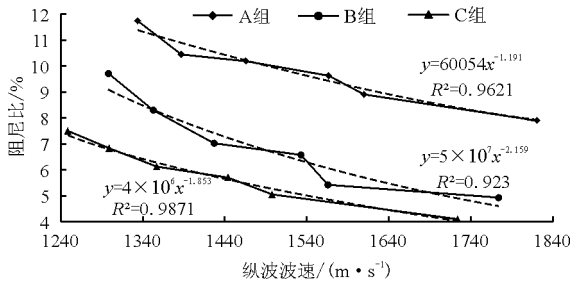


图 26 波速与阻尼比关系图

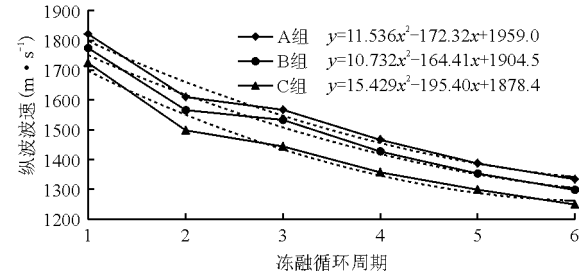


图 27 不同周期下各组岩样纵波波速变化曲线

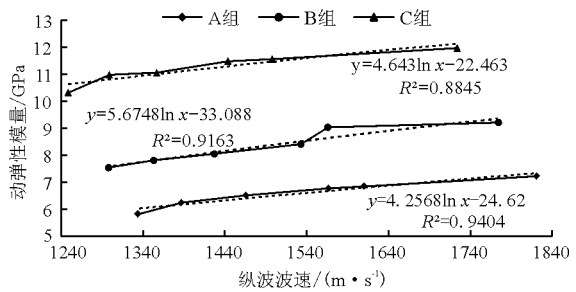


图 28 纵波波速与动弹模关系图

由图 27 ~ 28 可知，对动弹性模量 E_d 与纵波波速 v 进行拟合发现，采用对数函数拟合得到的相关系数较高，其对数拟合表达式为：

$$E_d = k\ln(v) - a \quad (\text{其中 } k、a > 0) \tag{9}$$

经分析可知，随着冻融周期增大，3 种加载方式下岩样的纵波波速均呈降低趋势，说明岩样经过冻融循环作用后，岩样内部孔隙体积增大，导致 3 种加载方式下岩样内部应变均增大，岩样产生一定程度的劣化，动弹模 E_d 减小。

4.2.3 *动泊松比与其他参数的变化规律* 3 组岩样的动泊松比与其他参数的变化关系见图 29 ~ 31。

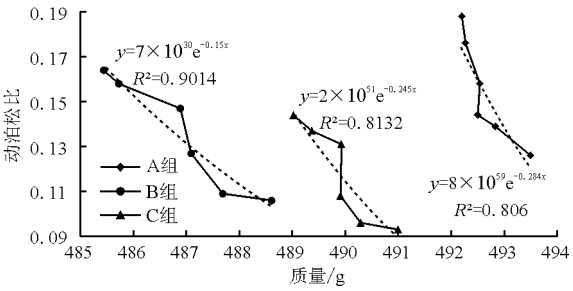


图 29 动泊松比与质量关系图

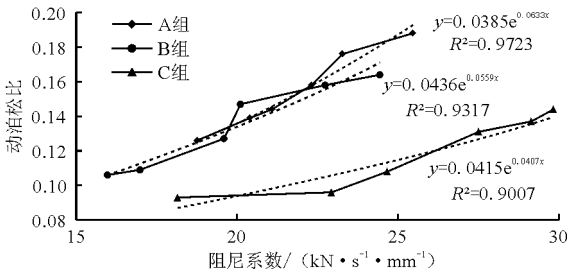


图 30 动泊松比与阻尼系数关系图

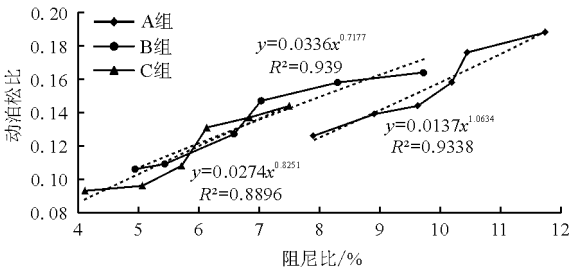


图 31 动泊松比与阻尼比关系图

从图 29 ~ 31 中可以看出，随着冻融周期的增加，动泊松比 u_d 与岩样质量呈指数关系递减，即 $u_d = ke^{a_m}$（其中 $k > 0, a_m < 0$）；动泊松比与阻尼系数 C 呈指数关系递增，即 $u_d = ke^{a_c}$（其中 $k、a_c > 0$）；动泊松比与阻尼比 λ 呈幂函数关系增大，即 $u_d = k\lambda^a$（其中 $k、a > 0$）。在材料的比例极限内，由均匀分布的纵向应力所引起的横向应变与相应的纵向应变之比的

绝对值即为动泊松比 u_d,因此当岩样的孔隙增大时动泊松比 u_d 增大。

4.2.4　动弹性模量与其他参数的变化规律　3 组岩样的动弹性模量与阻尼比及阻尼系数的变化关系分别见图 32 和 33。阻尼比的变化反映了岩样在冻融循环过程中能量消耗的变化。由图 32、33 分析可知,随着动弹性模量的增大,试验岩样的阻尼系数、阻尼比均呈线性递减趋势;随着加载值的增大,阻尼系数逐渐减小,且在加载值较小时,阻尼比的下降速率较大,随着加载值的增大,阻尼比的下降速率有所减缓;说明岩样在同一循环周期下,当加载应力值增大时,一定程度上岩样的密实度相应增加,刚度同时增大,相应地应力 - 应变滞回环面积减小,即在同一循环周期下岩样消耗的能量减小,因此,阻尼比也相应减小,动弹模则相应增大。

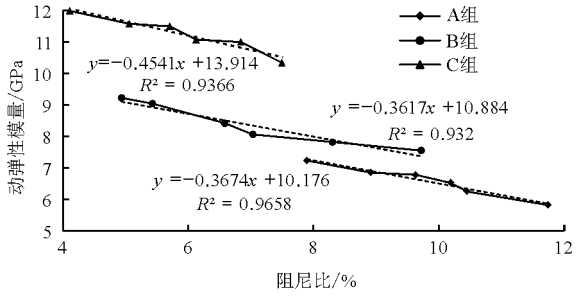


图 32　动弹性模量与阻尼比关系图

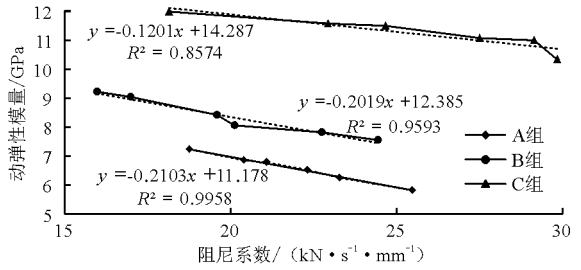


图 33　动弹模与阻尼系数关系图

5　结　论

(1)根据冻融循环试验后的岩样的端面、侧立面及局部细小处的劣化形态,采用无损 CT 扫描技术手段、岩样表面局部细观放大图作为佐证,确定了冻融循环作用下的砂岩劣化模式,分析了岩样致密性反常现象,得出冻融循环次数与 CT 数值、岩样密度之间呈反比的关系。

(2)冻融中的砂岩试样经过 CT 扫描后发现存在有两种冻融规律:①任一冻融周期时岩样的外圈层劣化效应比内圈层大;②当冻融次数由 10 次增加到 20 次时,外圈层的冻融劣化作用明显加剧,内圈层的冻融劣化作用减缓。根据此规律,首次提出砂岩岩样的冻融劣化作用 (β) 应分为两部分,即冻融劣化作用(β_L) 和冻胀束缚作用(β_S),且冻融劣化作用 为两者的差值,根据此结论合理地解释了这两种规律产生的原因。

(3)随着冻融次数的增加,各个物理、动力学参数对冻融循环作用的敏感性排序为阻尼比 > 动泊松比 > 电阻率 > 阻尼系数 > 纵波波速 > 浸润面积 > 动弹性模量 > 质量,根据这一结论可以仅按次序检测岩样中区分度大的参数,即可快速区分同种岩石的冻融程度,以减少检测的工作量。

(4)在冻融过程中岩样各参数与损伤形态有着直接联系,损伤范围的扩展是物理力学参数劣化的最直观的表现形式,而各个参数的劣化是损伤扩展的根本因素,这三者的变化表明在冻融作用下岩样的性质不断发生弱化。

参考文献:

[1] FUKUDA M. Rock weathering by freeze - thaw cycles[J]. Low Temp. Sci. Series A. Phys. Sci,1974,32(1):243 - 249.

[2] 徐光苗,刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(17):3076 - 3082.

[3] FAHEY B D. Frostaction and hydration as rock weathering mechanisms on schist:a laboratory study[J]. Earth Surface Processed and Landforms,1983, 8(6):535 - 545.

[4] 贾海梁,项 伟,申艳军,等. 冻融循环作用下岩石疲劳损伤计算中关键问题的讨论[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(2):335 - 346.

[5] NICHOLSON D T,NICHOLSON F H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected toexperimental freeze - thaw weathering[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000,25:1295 - 1307.

[6] 赖远明,吴紫汪,朱元林,等. 大坂山隧道围岩冻融损伤的 CT 分析[J]. 冰川冻土,2000,22(3):206 - 210.

[7] 邓红卫,田维刚,周科平,等. 2001 - 2012 年岩石冻融力学研究进展[J]. 科技导报,2013,31(24):74 - 79.

[8] 张慧梅,杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(1):140 - 145.

[9] 张慧梅,杨更社. 岩石冻融循环及抗拉特性试验研究[J]. 西安科技大学学报,2012,32(6):691 - 695.

[10] 李 宁,张 平,程国栋. 冻结裂隙砂岩低周循环动力特性试验研究[J]. 自然科学进展,2001,11(11):1175 - 1180.

(下转第 216 页)

blended cement[J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2018, 11(6):611 - 616.
[9] 周海龙. 脱硫石膏 - 粉煤灰复合水泥土耐久性能与固化机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
[10] JONGPRADIST P, JUMLONGRACH N, YOUWAI S, et al. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement - admixed clay at high water content [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1):49 - 58.
[11] 蒙 强,邵 俐,施倩芸. 粉煤灰水泥土力学特性试验研究[J]. 上海理工大学学报,2017,39(5):490 - 496.
[12] 崔永成,崔自治,周 健,等. 银川地区粉煤灰水泥土的力学特性试验研究[J]. 工业建筑,2012,42(7):105 - 109 + 151.
[13] 阮 庆,阮 波,曾 元,等. 洞庭湖区淤泥质黏土水泥土力学性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2014,11(5):106 - 111.
[14] 陈启宏,何 杰,吴有平. 洞庭湖区淤泥质土水泥土强度变化规律试验研究[J]. 山西建筑,2016,42(2):46 - 47.
[15] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
[16] 中华人民共和国住房与城乡建设部. 水泥土配合比设计规程:JGJ/T 233 - 2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
[17] 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123 - 1999 [S]. 北京:中国计划出版社,1999.
[18] 刘 钰,黄耀英,唐腾飞,等. 大坝混凝土分数阶徐变模型探讨[J]. 长江科学院院报,2018,35(6):107 - 110.
[19] 龚 纯,王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京:电子工业出版社,2011.

(上接第 209 页)

[11] 刘 华,牛富俊,徐志英,等. 循环冻融条件下安山岩和花岗岩的物理力学特性试验研究[J]. 冰川冻土,2011,33(3):557 - 563.
[12] 李杰林,周科平,张亚民,等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1208 - 1214.
[13] 许玉娟,周科平,李杰林,等. 冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J]. 岩土力学 , 2012, 33(10):3001 - 3006.
[14] ARGANDOÑA V G R D, REY A R, CLORIO C, et al. Characterization by computed X - Ray tomography of the evolution of the pore structure of a dolomite rock during freeze - thaw cyclic tests[J]. Physics and Chemistry of the Earth,1999,24(7):633 - 637.
[15] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程:SL 264 - 2001[S]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体试验方法标准:GB/T 50266 - 2013[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
[17] 中华人民共和国交通部. 公路工程岩石试验规程:JTG E41 - 2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
[18] 贺晶晶,师俊平. 冻融循环作用下砂岩三点弯曲断裂性能试验及其破坏形态研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(12):2917 - 2925.
[19] 徐拴海,李 宁,王晓东,等. 露天煤矿冻岩边坡饱和砂岩冻融损伤试验与劣化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(12):2561 - 2571.