

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.021

# 化学溶蚀及冻融循环作用下砂岩的力学特性研究\*

廖浩浩, 陈有亮, 李诗铭, 印宇澄, 彭辰曦, 李哲

(上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 选取云南的砂岩作为试验岩样, 研究砂岩经过化学溶蚀及冻融循环作用下的力学特性。通过对砂岩在3种水化环境(PH=3的HCl溶液、PH=7的水溶液、PH=12的NaOH溶液)作用后分别进行循环冻融试验, 并在不同冻融循环温度(-20℃、-30℃、-40℃、-50℃)作用下对试样进行单轴压缩试验和三点弯曲试验。结果表明: 砂岩经过化学溶蚀和冻融循环作用下的劣化损伤模式主要受冻融循环温度及不同水溶液影响, 在不同的水溶液中, 单轴抗压强度、弹性模量、应力峰值和断裂韧度均随着冻融循环温度的降低而逐渐降低; HCl溶液浸泡后的砂岩损伤变量最大, 而在对砂岩有修补作用的NaOH溶液中出现了负损伤的变化。

**关键词:** 砂岩; 冻融循环; 化学溶蚀; 损伤机理; 力学特性

**中图分类号:** TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-1009-09

## Mechanical Properties of Sandstone under Freeze-thaw Cycling and Chemical Corrosion

LIAO Haohao, CHEN Youliang, LI Shiming, YIN Yucheng, PENG Chenxi, LI Zhe  
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In this paper, test specimens taken from Yunnan were selected to study the mechanical properties of sandstone after chemical corrosion. The uniaxial compression strength test and three-point bending test were carried out on sandstone in 3 hydrated environments (HCl solution of PH=3, aqueous solution of PH=7, NaOH solution of PH=12), and at different freeze-thaw cycling temperature (-20°C, -30°C, -40°C and -50°C). The test results show that the deterioration damage mode of the sandstone under freezing-thaw cycling and chemical corrosion is mainly affected by the freeze-thaw cycling temperature and its environment. In different solutions, the uniaxial compressive strength, modulus of elasticity, peak stress and fracture toughness gradually reduce with the decrease of freeze-thaw cycling temperature. The damage variable of the sandstone after immersed in HCl solution is the largest, while the sandstone is strengthened in the solution of NaOH, which repairs the sandstone.

**Keywords:** sandstone; freeze-thaw cycling; chemical corrosion; damage mechanism; mechanical properties

\* 收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-12-04

基金项目: 上海市软科学研究领域重点项目(18692106100)、国家外专局高端外专计划课题(GDT20183100437)、国家自然科学基金项目(10872133)资助

作者简介: 廖浩浩(1995-), 男, 硕士。主要从事隧道围岩工程特性方面的研究。Email: 535022023@qq.com

通讯作者: 陈有亮(1966-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程方面的研究。Email: chenyouliang2001@163.com

## 引言

据统计,中国目前季节性寒区面积占全国国土面积的四分之三,位列世界第三<sup>[1]</sup>。随着西部大开发战略的推行,国家越来越注重利用和开发寒区丰富的土地、矿产、森林、旅游等资源,这样就需要建设大量涉及寒区岩体的工程。寒区温度低且温差较大,岩体力学性能受冻融循环的影响比较明显。为了更好的进行寒区工程建设,研究不同温度冻融循环岩体的力学性能对解决寒区工程的安全问题有很重要的实际意义<sup>[2-6]</sup>。目前国内外对冻融循环作用下岩石的力学特性的研究已获得一定成果,H. Yavuz等<sup>[7]</sup>模拟了20个冻融循环,测定了三个系列岩石试样的纵波速度、单轴抗压强度和施密特硬度,建立了一种预测冻融作用下岩石力学性质的模型方程。张继周等<sup>[8]</sup>通过对三种不同岩石进行循环冻融试验,分析了岩石在冻融条件下相应的力学特性和损伤劣化机制,发现岩石冻融损伤劣化受冻融温度、岩石自身特性以及循环次数等多种因素的影响。X. Tan等<sup>[9]</sup>对经过不同冻融循环次数的花岗岩进行了单轴压缩和三轴压缩试验,发现随着冻融循环次数的增加花岗岩力学特性逐渐劣化。

岩石作为一种由矿物颗粒相互胶结在一起形成的结合体,由于受到复杂地质运动影响,岩体内部存在着不可避免的缺陷与裂纹,为地下水和各类水化学溶液提供了贮存和迁移的场所。实际工程中的岩体会处于各种不同的水类环境,当处于一定PH值的酸碱溶液中时,岩体的矿物成分和各种胶结物会与水化学溶液发生一定程度的化学反应,导致岩体内出现化学损伤,由此对岩体工程产生一定的安全隐患。关于化学溶液对岩石力学特性的影响,国内外学者取得了许多研究成果:X. T. Feng等<sup>[10]</sup>研究不同化学溶液对岩石力学特性的影响,发现了岩石破坏过程中声发射行为在化学溶液作用下具有时间上的分形特征。陈四利等<sup>[11]</sup>通过对化学腐蚀下的花岗岩进行单轴压缩试验,分析了不同PH值的化学溶液对花岗岩力学特性以及表观腐蚀的影响,得到了不同破坏特征的示意图以及荷载一位移变化曲线。丁梧秀等<sup>[12]</sup>进行了在不同时间和不同化学溶液溶蚀下灰岩的力学特性试验分析,发现化学溶液溶蚀下灰岩的各项力学性能都有所下降。

而在寒区的岩体工程中,冻融循环和化学溶蚀大多数情况下是共同作用的。虽然国内外已经有许多对冻融循环和化学溶蚀共同作用于混凝土的研究<sup>[13-17]</sup>。但由于岩体本身的复杂性,不能完全类比为混凝土,所以本文将不同溶液的不同PH值和不同冻融循环温度作为变量对砂岩的力学特性展开一系列的试验研究,为寒区的岩体工程建设提供重要的参考价值。

## 1 试验介绍

### 1.1 试样制作

选取云南砂岩作为本试验的岩样,试件的密度 $2.35\text{ g/cm}^3$ ,其主要成分包括石英、云母、长石、方解石、角闪石等。参照标准《水电水利工程岩石试验规程》<sup>[18]</sup>,用于单轴压缩的试样取为直径 $50\text{ mm}$ ×高度 $100\text{ mm}$ 的圆柱体;用于三点弯曲试验的试样为长 $250\text{ mm}$ ×宽 $50\text{ mm}$ ×高 $50\text{ mm}$ ,中间缺口深度 $25\text{ mm}$ 的长方体。

### 1.2 试验设备

冻融循环试验设备采用CABR-HDK9A型快速冻融试验机;单轴压缩试验设备采用微机控制刚性伺服三轴压力试验机,最大荷载为 $2\times 10^3\text{ kN}$ ;杨氏模量测量设备采用V-METER III型超声脉冲速测试仪;三点弯曲试验的设备是万能压力试验机。显微结构观察设备为SteREO Discovery.v8的研究级智能立体显微镜,最大放大倍数为120倍。

### 1.3 试验方法

以PH值、冻融温度为变量进行三组试验:首先,测量未经过任何处理的砂岩试件的弹性模量,进行单轴压缩试验、三点弯曲试验以及观察其表面微观结构。其次,将未经过任何处理的砂岩试件分别放入PH=3的HCl溶液、 $\text{H}_2\text{O}$ 溶液和PH=12的NaOH溶液中,浸泡3个月,期间每一周检测一次PH值,保持PH值不变。测量不同PH值水溶液处理后的砂岩试件弹性模量,进行单轴压缩试验、三点弯曲试验以及观察其表面微观结构。最后,将进行化学溶蚀后的砂岩试件分别进行 $20\sim -20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\sim -30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\sim -40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\sim -50\text{ }^\circ\text{C}$ 的冻融循环,循环次数为30次。测量化学溶蚀和冻融循环耦合作用下砂岩试件的弹性模量,进行单轴压缩试验、

三点弯曲试验以及观察其表面微观结构。

每种试验中试件的数量:测量弹性模量(每组5个试件),进行单轴压缩试验(每组5个试件)、三点弯曲试验(每组4个试件)以及观察其表面微观结构(每组3个试件)。

## 2 单轴压缩试验结果及分析

### 2.1 破坏模式

单轴压缩试验后,岩样主要发生了三种破坏情况:柱状劈裂破坏、单斜面剪切破坏和组合破坏,应力分布如图1所示。

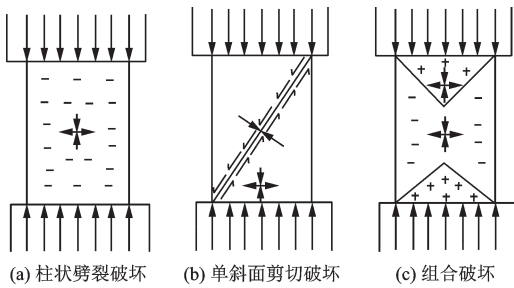


图1 不同破坏模式的应力分布

Fig.1 Stress distribution in different failure modes

分析破坏原因:柱状劈裂破坏是由于砂岩的抗拉强度远小于抗压强度,所产生的张拉破坏;单斜面剪切破坏是由于破坏面上的剪应力超过了其剪切强度,所产生的压剪破坏;组合破坏是由于试件两端与仪器压板之间存在摩擦力,造成由于端部效应所产生的破坏。

通过对三种主要破坏情况的定性分析,无论是以化学溶蚀为变量还是以冻融循环温度为变量,均无明显规律,所以砂岩的破坏情况与化学溶蚀和冻融循环作用并无明显关系。

### 2.2 弹性模量

将分别经过PH=3的HCl溶液、H<sub>2</sub>O溶液和PH=12的NaOH溶液浸泡后的试件取出来做自然干燥处理,和自然状态下的试件一起用超声波脉冲速度测试仪测量每组试件的弹性模量取平均值。化学溶液处理后砂岩弹性模量损失率见表1。

由表1可知:砂岩经过H<sub>2</sub>O溶液浸泡处理后弹性模量几乎没有变化,经过NaOH溶液浸泡处理后的砂岩弹性模量较自然状态增长了21.5%,说明NaOH溶液对砂岩的力学损伤具有一定的修补作

表1 化学溶液处理后砂岩弹性模量损失率

Table 1 Elastic modulus loss rate of sandstone after chemical solution

试件处理	自然状态	NaOH	H <sub>2</sub> O	HCl
弹性模量/GPa	19.8	24.7	21.1	15.4
较自然状态的变化率/%	—	21.5	5.7	-19.3

用,经过HCl溶液浸泡处理后的砂岩弹性模量较自然状态减少了19.3%,酸性溶液中的化学离子(尤其是H<sup>+</sup>)将会和岩内部的矿物质(主要是CaCO<sub>3</sub>)发生化学反应(CaCO<sub>3</sub>+2H<sup>+</sup>→Ca<sup>2+</sup>+H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>↑),导致岩石内部形成多个微小孔洞,从而造成弹性模量的损失。

经过不同化学溶液浸泡后的砂岩试件,其弹性模量与冻融循环温度的关系,如图2所示。

由图2可知,经过HCl溶液、纯水溶液和NaOH溶液浸泡后,随着冻融循环温度的降低,砂岩试件的弹性模量均逐渐减小。对弹性模量和冻融循环温度进行拟合,可以得到两者之间存在一定的函数关系式。

$$E = ke^{-an} \quad (1)$$

式中,参数k,a和R<sup>2</sup>的取值见表2。

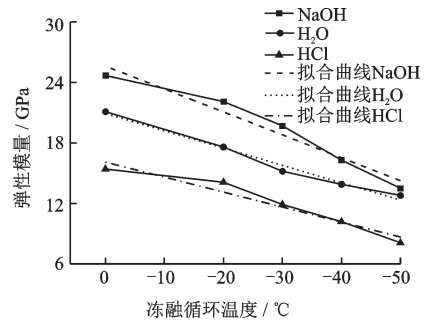


图2 不同化学溶液不同冻融循环温度与弹性模量关系

Fig.2 Relationship between freeze-thaw cycling temperatures and elastic modulus in different chemical solutions

表2 弹性模量与冻融循环温度关系

Table 2 Relationship between elastic modulus and freeze-thaw cycling temperature

参数	k	a	R <sup>2</sup>
NaOH	26.388	0.012	0.923 6
H <sub>2</sub> O	21.152	0.010	0.992 5
HCl	16.637	0.013	0.911 4

### 2.3 应力—应变关系

对经过不同化学溶液浸泡和不同温度冻融循环后的砂岩进行单轴压缩实验,得到应力—应变曲线如图3所示,其中应力是指轴向压应力,应变是指砂岩的轴向应变。

由图3可以看出,砂岩的应力—应变曲线随着冻融温度的降低,不断的向右下方移动,说明砂岩的应力随冻融循环温度的降低而减少,砂岩的应变随着冻融循环温度的降低而增大。砂岩的应力—应变曲线变化规律大致可以分为以下四个阶段:

第一阶段:应变随着应力非线性增长,曲线呈凹形的初始压密阶段。这一阶段是砂岩内部的微裂隙(天然存在以及化学溶液和冻融循环共同作用产生的)逐渐被外力压密直至闭合的过程,由图可以看出,砂岩的初始压密阶段基本上保持在应变小于 $5 \times 10^{-3}$  mm时,而且这一阶段砂岩应力增长的数值很小,但应变的增长很明显。

第二阶段:应变随着应力线性增长的弹性增长阶段,这一阶段的曲线斜率几乎保持不变,可以近似认为是砂岩试样的平均切线弹性模量。由图可以看出随着冻融温度的降低,这一阶段的曲线越来越平缓且越来越长,说明平均切线弹性模量随冻融循环温度的降低而减小。

第三阶段:应力增长速度变慢的塑性屈服阶段。这一阶段的应力超过峰值应力后迅速回落,曲线很短,曲线呈凸形。

第四阶段:应变随着应力迅速降低而急速增大的破坏后的阶段。由图可以看出,随着冻融循环温度的降低,砂岩破坏后的延性逐渐明显,且最终的变形也随之增加。

### 2.4 峰值应力

对自然状态和经过不同水化学溶液浸泡后的砂岩进行单轴压缩试验,得到砂岩试件的峰值应力 $\sigma$ 与PH值的关系,如图4所示。

由图4可见,与自然状态相比,在 $H_2O$ 溶液中浸泡过的砂岩峰值应力基本保持不变,而浸泡HCl溶液的砂岩的峰值应力减少了6%,在NaOH溶液中浸泡过的砂岩的峰值应力增加了4%。

由图5可见,HCl溶液中砂岩的冻融损伤程度大于 $H_2O$ 溶液和NaOH溶液中的劣化程度,对砂岩在不同溶液下的峰值应力 $\sigma_{max}$ 和冻融循环温度 $T$ 之

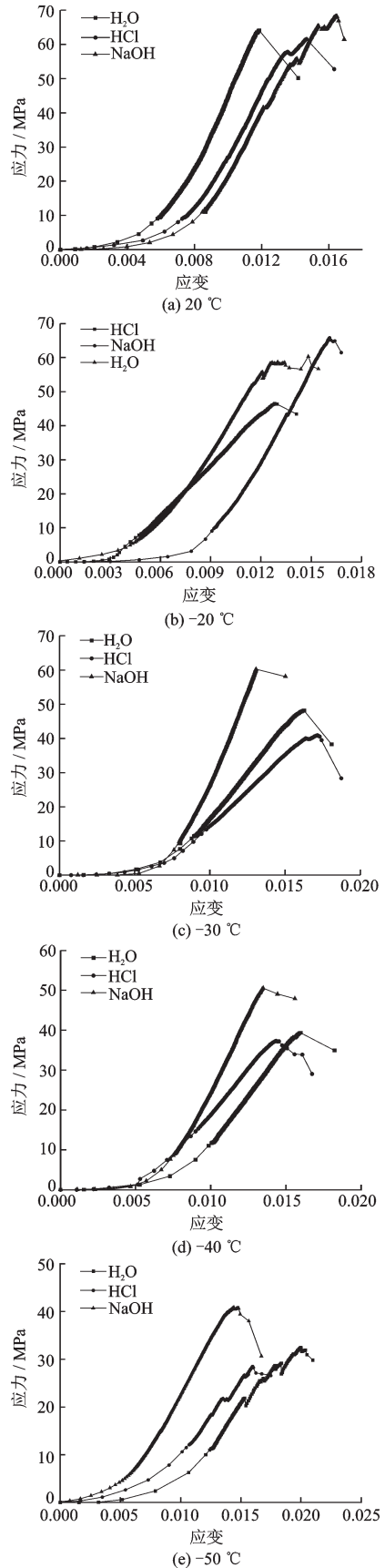


图3 不同化学溶液不同冻融循环温度下的应力—应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curves of different chemical solutions under different freeze-thaw cycling temperatures

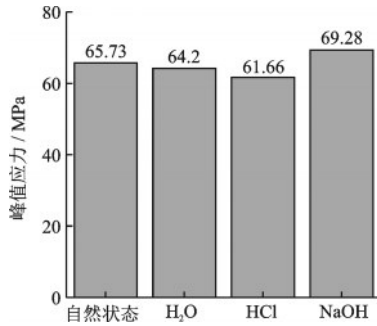


图4 峰值应力与PH值的关系

Fig.4 Relationship between peak stress and PH value

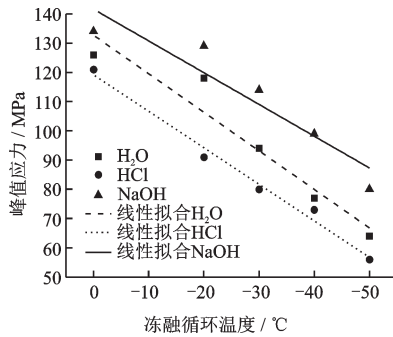


图5 不同化学溶液不同冻融循环温度下的峰值应力

Fig.5 Peak stress of sandstone in different chemical solutions with different freeze-thaw cycling temperatures

间进行线性拟合,得到在不同水化学溶液和冻融循环共同作用后砂岩的峰值应力随冻融循环温度的变化规律函数:

$$\text{NaOH溶液: } \sigma = -1.0865T + 141.62 \quad (2)$$

$$\text{H}_2\text{O溶液: } \sigma = -1.3189T + 132.73 \quad (3)$$

$$\text{HCl溶液: } \sigma = -1.2486T + 119.16 \quad (4)$$

由图5可知,砂岩试样的峰值应力随着冻融循环温度的降低均呈线性函数劣化。其中在HCl溶液中砂岩试样产生的损伤劣化程度最大,说明HCl溶液加大了冻融循环对砂岩力学性能的劣化,而NaOH溶液却在一定程度上抑制了砂岩的冻融循环劣化。

### 3 三点弯曲试验结果及分析

岩石的抗拉强度即岩石抵抗裂纹发展的能力(即断裂韧度),是衡量岩石力学特性的重要指标。工程中普遍运用的测试方法有直接测量法和间接测量法。基于一致性原则,本文统一采用三点弯曲试验对这两个重要指标进行间接测量。

#### 3.1 抗拉强度

图6是三点弯曲砂岩试样的中心应力分布,假设压应力和拉应力沿中心线对称分布,则 $\sigma_t = -\sigma_c$ ,进而可得出下列公式:

$$\frac{F_{\max} S}{2} = \frac{\sigma_t}{2} \frac{h-a}{2} \frac{2(h-a)}{3} t \quad (5)$$

对上式整理简化可得:

$$\sigma_t = \frac{3F_{\max} S}{2t(h-a)^2} \quad (6)$$

将不同化学溶液和自然状态下的砂岩的抗拉强度绘制成柱状图(图7),由图7可见,相比于自然状态,在纯水溶液中浸泡过的砂岩的抗拉强度基本不变,在HCl溶液中浸泡过的砂岩抗拉强度减少了19.7%,而在NaOH溶液中浸泡过的砂岩抗拉强度增强了5.6%。

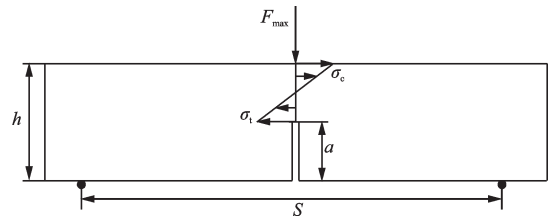


图6 带预制切口的试样应力分布示意

Fig.6 Sketch map of stress distribution in specimen with pre-fabricated incisions

注: $\sigma_c$ 为压应力, $\sigma_t$ 为拉应力, $S$ 为底部两支座之间的距离, $F_{\max}$ 为加载在岩石上的最大荷载, $h$ 为长方体试样的高度, $t$ 为长方体试样的厚度, $a$ 为预制裂缝长度

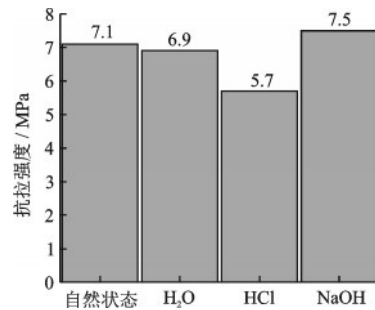


图7 砂岩抗拉强度与不同化学溶液关系

Fig.7 Relationship between tensile strength of sandstone and chemical solution type

由图8可见,砂岩的抗拉强度随着冻融循环温度的降低而线性减小。对砂岩抗拉强度的数据进行拟合,得到不同溶液浸泡后,砂岩抗拉强度 $\sigma$ 和冻融温度 $T$ 之间的函数关系为:

$$\text{NaOH溶液: } \sigma = -0.0372T + 6.9405 \quad (7)$$

$$\text{H}_2\text{O溶液: } \sigma = -0.0591T + 7.5135 \quad (8)$$

$$\text{HCl溶液: } \sigma = -0.0324T + 5.8081 \quad (9)$$

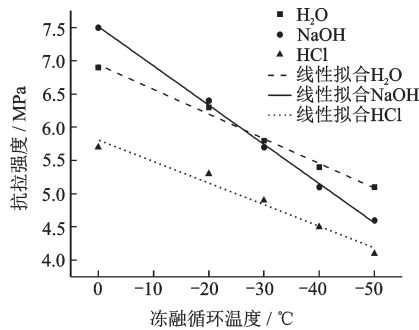


图8 砂岩抗压强度与冻融循环温度的关系

Fig.8 Relationship between compressive strength of sandstone and freeze-thaw cycling temperatures

### 3.2 I型断裂韧度

岩石的断裂韧度通常以岩石的应力场强度因子的临界值来衡量。

把砂岩试件的预制缺口看作初始裂纹,进行三点弯曲试验后裂纹会沿着初始缺口继续发展,缺口处的拉应力近似于垂直裂纹面,可以按照张开型即I型断裂考虑。采用岩石断裂韧度的计算公式ASTM公式:

$$K_{IC} = \frac{F_{max}S}{th^{1.5}} \left[ 2.9 \left( \frac{a}{h} \right)^{0.5} - 4.6 \left( \frac{a}{h} \right)^{1.5} + 21.8 \left( \frac{a}{h} \right)^{2.5} - 37.6 \left( \frac{a}{h} \right)^{3.5} + 38.7 \left( \frac{a}{h} \right)^{4.5} \right] \quad (10)$$

式中,  $K_{IC}$  为花岗岩试样的断裂韧度 ( $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ )。

将每组砂岩试件的最大荷载  $F_{max}$ 、试块厚度  $t$ 、试块高度  $h$ 、两支座之间的距离  $S$  和预制裂缝长度  $a$  代入ASTM公式算出砂岩的断裂韧度,每组数据取平均值(表3)。

由表3可见,不同溶液中砂岩断裂韧度较自然状态下的变化情况差别较大,其中,在纯水溶液中浸泡过的砂岩的断裂韧度基本不变,在HCl溶液中浸泡过的砂岩的断裂韧度减小了15.9%,而在NaOH溶液中浸泡过的砂岩的断裂韧度增大了7%。这表明:酸性溶液使砂岩的断裂韧度劣化了,但碱性溶液相反却增强了砂岩的断裂韧度

图9为经过不同化学溶液和不同冻融温度作用后砂岩断裂韧度的变化曲线。该图表明:三种溶液

表3 不同化学溶液砂岩断裂韧度

Table 3 Fracture toughness of sandstone in different chemical solutions

	不同溶液处理			
	自然状态	H <sub>2</sub> O	HCl	NaOH
断裂韧度	20.1	19.7	16.9	21.5
变化率/%	0	-1.4	-15.9	7.0

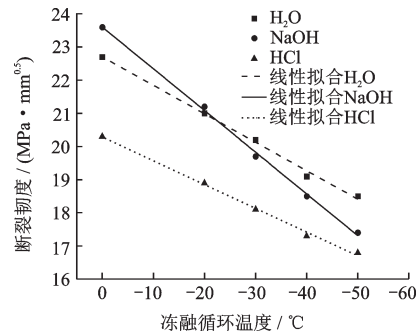


图9 冻融循环温度与断裂韧度的关系

Fig.9 Relationship between freeze-thaw cycling temperatures and fracture toughness

中砂岩的断裂韧度都随着冻融温度的降低而线性减小,相比于H<sub>2</sub>O溶液,NaOH溶液中的砂岩断裂韧度刚开始是增强的,到-30 °C则开始低于H<sub>2</sub>O溶液中砂岩的断裂韧度,说明此时冻融温度对砂岩断裂韧度的影响大于NaOH溶液对砂岩断裂韧度的增强作用。而HCl溶液中的砂岩断裂韧度一直低于H<sub>2</sub>O溶液中的砂岩断裂韧度,说明酸性溶液对砂岩的断裂韧度存在明显的劣化作用。

## 4 冻融循环系数

冻融系数用以描述砂岩试样抵抗冻融破坏的性能。参照《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[18]</sup>,岩石冻融系数的公式为:

$$K_f' = \frac{R_f}{R_s} \quad (11)$$

式中,  $K_f'$  为冻融系数;  $R_f$  为冻融试验后岩石的单轴抗压强度平均值,MPa;  $R_s$  为冻融试验前岩石的单轴抗压强度平均值,MPa。

砂岩的冻融系数计算结果见表4。由表4可知,砂岩的冻融循环系数随着冻融循环温度的降低而逐渐减小,且砂岩的冻融循环系数受冻融循环温度的影响较明显,呈线性关系。

表4 砂岩的冻融系数

Table 4 Freeze-thaw coefficient of sandstone

	冻融循环温度/℃				
	常温	-20	-30	-40	-50
冻融前	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8
冻融后	19.8	18.2	16.9	15.4	14.5
冻融系数	1.0	0.92	0.85	0.78	0.73

## 5 表面微观结构

利用智能立体显微镜30倍的放大倍数,观察不同化学溶液和不同温度冻融循环处理后的砂岩表面微观结构,可以很直观的从微观角度分析化学溶液和冻融循环对砂岩的损伤机理。图10为不同化学溶液、不同冻融温度下砂岩的表面微观结构。

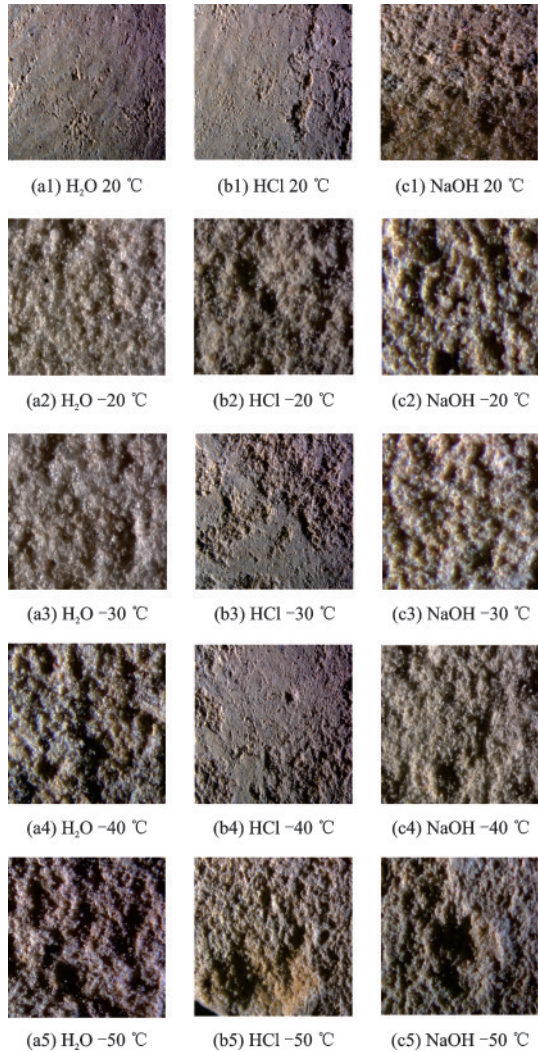


图10 不同化学溶液不同冻融温度下砂岩的表面微观结构  
Fig.10 Surface microstructure in different chemical solutions under different freeze-thaw temperatures

由图10可见,当冻融循环温度一定时,HCl溶液中的砂岩表面孔洞的数量最多并且尺寸最大,这说明:三种化学溶液中,HCl溶液对砂岩的损伤程度最大。其原因有二:(1)酸性溶液中的化学离子(尤其是H<sup>+</sup>)会和岩内部的矿物质(主要是CaCO<sub>3</sub>)发生化学反应(CaCO<sub>3</sub>+2H<sup>+</sup>→Ca<sup>2+</sup>+H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>↑),消耗了砂岩中的一部分成分,导致产生较多且较大的孔洞,而水溶液和NaOH溶液对砂岩表面微观结构的损伤比较小且程度差不多。(2)当化学溶液一定时,随着冻融温度的降低,岩石孔隙内部的水结成冰,体积瞬间扩大;而矿物颗粒的体积却发生收缩,由于矿物颗粒的热胀缩性能不同以及岩石内部矿物颗粒在各方向上的热弹性性能的不同,最终导致跨颗粒边界的胀缩不协调,在矿物颗粒和孔隙之间产生了巨大的内应力,即冻胀力。这种由于冻融循环造成的内应力对某些胶结强度较低的岩石矿物颗粒而言具有破坏作用,从而造成岩石内部出现局部损伤。因此冻融温度越低,砂岩的力学损伤程度越大。

## 6 化学作用下砂岩的损伤定量

本文将砂岩的弹性模量作为损伤变量,以宏观损伤力学理论为基础,得出化学作用下砂岩的损伤量公式为:

$$D = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (12)$$

式中, $D$ 为岩石的冻融受荷总损伤变量; $E_0$ 为砂岩的基准损伤状态; $E_n$ 为砂岩冻融损伤状态的弹性模量。

将经过不同化学溶液浸泡过的砂岩的弹性模量代入上式,每组数据取平均值,可以得到砂岩在不同化学溶液中浸泡后的损伤变量见表5。

由表5可见,HCl溶液浸泡后的砂岩损伤变量最大,说明酸性溶液对砂岩的损伤最明显,在H<sub>2</sub>O溶液中浸泡过的砂岩的损伤变量基本上没有变化,

表5 砂岩损伤变量

Table 5 Damage variable of sandstone

状态	$E_n$	$E_n/E_0$	$D$
自然状态	19.8	—	—
H <sub>2</sub> O	21.1	1.066	-0.066
HCl	15.4	0.758	0.242
NaOH	24.7	1.212	-0.212

而在NaOH溶液中砂岩出现了负损伤的变化,是由于碱性溶液对砂岩的损伤具有修补作用。

## 7 结 论

(1)砂岩的破坏情况与化学溶蚀和冻融循环作用并无明显关系。

(2)在冻融循环温度相同时,不同水化学溶液中砂岩试件的弹性模量关系为: $E_{\text{HCl}} < E_{\text{H}_2\text{O}} < E_{\text{NaOH}}$ 。在不同水溶液浸泡后,砂岩试件的弹性模量随着冻融循环温度的降低而减小。

(3)砂岩的峰值应力随着冻融循环温度的降低均呈线性函数劣化。HCl溶液加大了冻融循环对砂岩力学性能的劣化,而NaOH溶液却在一定程度上抑制了砂岩试样的冻融循环劣化。

(4)水环境中,砂岩的抗拉强度基本不变,在HCl溶液中浸泡过的砂岩抗拉强度减少了19.7%,而在NaOH溶液中浸泡过的砂岩抗拉强度增强了5.6%。砂岩的抗拉强度随着冻融循环温度的降低而减小。

(5)-30℃时冻融温度对砂岩断裂韧度的劣化作用大于NaOH溶液对砂岩断裂韧度的增强作用。酸性溶液对砂岩的断裂韧度存在明显的劣化作用。

### 参考文献:

[1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.  
Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. Chinese frozen soil [m]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)

[2] 吴安杰,邓建华,顾 乡,等.冻融循环作用下泥质白云岩力学特性及损伤演化规律研究[J].岩土力学,2014,35(11):3 065-3 072.  
Wu A J, Deng J H, Gu X, et al. Study on mechanical properties and damage evolution of argillaceous dolomite under freeze-thaw cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (11): 3 065-3 072. (in Chinese)

[3] 俞 缙,傅国锋,陈 旭,等.冻融循环后砂岩三轴卸围压力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):2 001-2 009.  
Yu J, Fu G F, Chen X, et al. Experimental study on triaxial unloading pressure characteristics of sandstone after freeze-thaw cycle [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (10): 2 001-2 009. (in Chinese)

[4] 袁小清,刘红岩,刘京平.冻融荷载耦合作用下节理岩体损伤本构模型[J].岩石力学与工程学报,2015,34(8):1 602-1 611.  
Yuan X Q, Liu H Y, Liu J P. Damage constitutive model of jointed rock mass under coupled freeze-thaw loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (8): 1 602-1 611. (in Chinese)

[5] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等.岩体冻融疲劳损伤模型与评价指标研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(6):1 116-1 127.  
Liu Q Sh, Huang Sh B, Kang Y Sh, et al. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (6): 1 116-1 127. (in Chinese)

[6] 阎锡东,刘红岩,邢闯锋,等.冻融循环条件下岩石弹性模量变化规律研究[J].岩土力学,2015,36(8):2 315-2 322.  
Yan X D, Liu H Y, Xing Ch F, et al. Study on the law of elastic modulus of rock under freeze-thaw cycling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (8): 2 315-2 322. (in Chinese)

[7] Yavuz H, Altindag R, Sarac S, et al. Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(5): 767-775.

[8] 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):1 687-1 694.  
Zhang J Zh, Miao L Ch, Yang Zh F. Rock damage degradation mechanism and mechanical properties under freeze-thaw conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (8): 1 687-1 694. (in Chinese)

[9] Tan X, Chen W, Yang J, et al. Laboratory investigations on themechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(3): 130-138.

[10] Feng X T, Seto M. A new method of modeling the rock-microfracturing process in double torsion experiments using neural networks [J]. International Journal of Analytic and Numerical Methods in Geomechanics, 1999(23): 905-923.

[11] 陈四利,冯夏庭,李邵军.化学腐蚀下三峡花岗岩的破裂特征[J].岩土力学,2005,24(5):817-822.  
Chen S L, Feng X T, Li Sh J. Fracture characteristics of Three gorges granite under chemical corrosion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 24 (5): 817-822. (in Chinese)

