

# 砂岩与花岗岩在冻融循环和化学腐蚀下力学性能及断裂韧度变化的对比

印宇澄, 陈有亮, 孟祥瑞

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 为探究冻融循环-多种化学溶液溶蚀等因素耦合作用下岩石力学特性的变化规律,选取砂岩和花岗岩作为岩样开展了一系列岩石力学试验,借助智能显微镜观察比较了不同外部条件影响下岩石的表面微观结构,分析了岩石的溶液溶蚀机理和冻融损伤机理。试验结果表明岩石应力-应变关系、弹性模量、峰值应力、断裂韧度等力学特性受溶液溶质种类的影响较小,而受冻融循环温度影响显著,砂岩受冻融循环破坏程度大于花岗岩。两种岩石力学特性都随冻融循环温度的降低而减弱,I型断裂韧度与冻融循环温度之间呈二次函数关系。

**关键词:** 砂岩; 花岗岩; 冻融循环; 化学溶液溶蚀; 力学特性; 断裂韧度

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0217-08

## Comparison of mechanical properties and fracture toughness changes of sandstone and granite under freeze-thaw cycle and chemical corrosion

YIN Yucheng, CHEN Youliang, MENG Xiangrui

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A series of rock mechanics tests were carried out on sandstone and granite samples, to study the variation law of rock mechanical characteristics under the coupling effect of freeze-thaw cycling and multiple chemical solutions corrosion. The surface microstructures of rock under different external conditions were observed and compared via intelligent microscopy. The chemical corrosion and freeze-thaw damage mechanism were analyzed. The test results show that the mechanical properties of rock, such as stress-strain relationship, elastic modulus, peak stress and fracture toughness, are less affected by the type of chemical solutions, and are significantly affected by freeze-thaw cycling temperature. The damage degree of sandstone under freeze-thaw cycling is greater than that of granite. The mechanical properties of both rocks decrease with the decrease of freeze-thaw cycling temperature. The relationship between fracture toughness type I and freeze-thaw cycling temperature is quadratic function.

**Key words:** sandstone; granite; freeze-thaw cycling; chemical corrosion; mechanical property; fracture toughness

## 1 研究背景

随着寒冷地区基础设施建设的深入,岩石在实际工程中往往容易受到冻融循环、荷载作用等因素的影响,研究冻融循环作用下加载岩石的损伤力学性质对寒区工程建设具有重要意义。冻融循环系指材料遭到外界环境围绕冰点温度一次或多次因升降

而产生的内部冻结、融化交替现象,是寒区最为常见的现象,也严重影响着寒区工程安全与稳定性。另一方面由于城市较大的人口密度、发达的轻、重工业和水陆运输,且工业、民用燃料以石油、煤炭为主,造成大量化石燃料燃烧产生的废气被排入大气,给酸雨的产生奠定了物质基础<sup>[1]</sup>。因而对酸性溶液溶蚀及冻融循环作用下岩石的力学特性的认识和研

收稿日期:2019-01-30; 修回日期:2019-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(10872133); 创新型人才国际合作培养项目后续项目(2018年1月-2020年12月); 上海市软科学研究领域重点项目(18692106100); 上海理工大学教学成果奖培育项目(2018-08-28-09)

作者简介:印宇澄(1993-),男,江苏泰州人,在读硕士研究生,主要研究水化学和冻融循环下岩石的力学特性。

通讯作者:陈有亮(1966-),男,河北衡水人,博士,教授,博士生导师,主要研究工程地质与水文地质。

究,对于在酸雨影响下我国寒区的岩石、采矿和边坡等工程建设有着重要的理论和实用价值。

国内外学者对岩石的化学腐蚀及冻融损伤分别开展了细致的研究。Li等<sup>[2]</sup>利用核磁共振技术研究了矿山岩石冻融破坏机理和冻融破坏演变规律。揭示了岩石在冻融循环过程中的损伤特征,为冻融条件下岩石力学研究提供了新的思路;Nicholson等<sup>[3]</sup>绘制的图形详细记录了10种沉积岩在冻融作用后的弱化模式,表明了控制弱化模式的因素并不仅为岩石裂缝的存在与否,而在于内部裂纹、岩石强度和纹理特性的耦合作用;Muneo等<sup>[4]</sup>基于断裂力学理论,分析了单裂纹在冻融循环中的扩展机理,根据应力强度因子准则推导了裂隙扩展后长度的表达式,还根据裂纹密度与损伤因子的关系,整合出了非均质裂纹岩体冻融破坏的本构模型;然而,该模型是基于概率统计的,不符合微观条件下的能量守恒定律;徐光苗等<sup>[5]</sup>对经历不同冻融循环次数后的2种饱和岩石进行单轴压缩试验,拟合出岩石的单轴压缩强度、弹性模量分别与冻融循环次数的关系表达式,为今后研究岩石冻融损伤及断裂提供了可靠的依据;Yamabe等<sup>[6]</sup>在0℃以下测定了诸如低温抗压强度和杨氏模量的物理性质,从圆柱形岩石试块的冻融试验测定膨胀系数。

岩石内部存在许多纵横交错、大小各异的节理面和裂隙面,其中可能存在水分。在低温冷冻过程中,孔隙内的水凝固后体积增大,从而对周围岩石产生挤压,进一步扩大裂纹。在融化过程中,孔隙内的冰会融化后渗入新产生的裂隙中。反复冻融循环后,最终给岩石带来严重的疲劳损伤<sup>[7]</sup>。

陈四利等<sup>[8]</sup>对砂岩在不同化学溶液腐蚀下的单轴压裂过程进行了观测,探讨了溶液浓度、pH值和溶质种类对岩石力学特性的影响,给出了部分砂岩荷载位移变化曲线;乔丽莘等<sup>[9]</sup>分析了不同砂岩孔隙率、pH值下微观层次砂岩的水物理化学损伤机制,发现在水流导致的岩石颗粒间胶结物与碎屑的运移和扩散,以及离子浓度、pH值等水环境变化此二者所诱发的次生空隙是水物理化学作用影响砂岩力学性质的主要原因;Li等<sup>[10]</sup>通过对砂岩试块进行化学模拟试验,研究了其中可溶性胶结材料的损耗和岩石力学性能退化的化学机理,提出了一种描述砂岩腐蚀过程、岩石变形和强度退化的化学损伤模型。

然而,化学浸泡与冻融循环耦合作用下岩石力学特性损伤的研究仍然有限。目前关于该方面的研究主要有以下一些成果:

陈有亮等<sup>[11]</sup>对不同种类化学溶液(水、NaOH和HNO<sub>3</sub>)处理后的花岗岩进行了冻融循环试验和单轴压缩试验,得到了花岗岩在化学腐蚀、冻融循环和应力耦合作用下的力学性能变化;张牡丹等<sup>[12]</sup>观察了不同冻融温度下花岗岩冻融循环后的破坏模式,研究发现,在冻融循环温度不断降低时,应变存在一个临界值,超过临界值时试块发生破坏;盛金昌等<sup>[13]</sup>在理论上描述岩体裂隙在渗流-应力-化学耦合作用下的渗透特性,进一步揭示了三者耦合作用机制;陈卫忠等<sup>[14]</sup>提出以现场监测、大量室内冻融试验和单轴、三轴压缩试验为手段,研究了通风条件下寒冷区隧道围岩冻胀破坏机理。同时开发了抗冻、抗裂、抗震且轻质、保温的泡沫混凝土,作为寒区工程中保温层和抗震层材料。

综上所述,在研究单纯冻融循环或化学腐蚀对岩石力学性能影响的领域,已经取得了一定的成果,而对冻融循环-化学溶蚀耦合作用下的探究较少。开展化学环境下岩石冻融损伤的研究有助于深化对多因素耦合作用下岩石力学特性和损伤演化机理的认识,从而更好地为复杂环境下寒区岩石工程的建设服务。

## 2 试验介绍

### 2.1 试样制作

砂岩试样取自贵州省安顺市产出的红砂岩,花岗岩试样取自山东省日照市。从现场取得岩块,加工制作成用于单轴压缩试验的直径50 mm高度100 mm的圆柱体试块和用于三点弯曲试验的长250 mm,宽50 mm,高50 mm的长方体试块,且带有长25 mm,宽3 mm的缺口(试样初始裂纹),加工完成的试样基本尺寸和精度符合《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266-2013)的标准:(1)试样两端面不平整度误差不得大于0.05 mm;(2)沿试样高度,直径的误差不得大于0.3 mm;(3)断面应垂直于试样轴线,最大偏差不得大于0.25°。

### 2.2 试验器材及仪器

选用V-Meter III型超声脉冲波速测试仪测量杨氏模量。冻融循环试验部分则采用WGD-501型立式空冷冻融试验机。在单轴压缩试验中,选用了最大载荷为2 000 kN的西安力创材料试验技术有限公司出品的刚性微机伺服三轴压力试验机。三点弯曲试验部分选用SANS公司的万能压力试验机。对岩石的微观结构,选用德国蔡司公司研发的SteREO系列Discovery-V8智能显微镜进行观察,

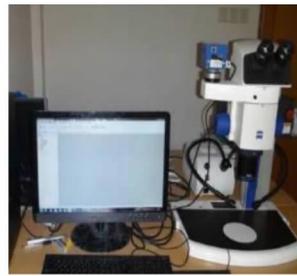
其拥有高达 120 倍的最大放大倍数。试验器材及仪器见图 1。



(a) 刚性伺服三轴压力试验机



(b) 立式空冷冻融试验机



(c) 智能显微镜



(d) 万能压力试验机

图 1 试验所用器材及仪器

### 2.3 试验方法

将红砂岩和花岗岩试块分组编号,分别放入 pH = 3 的 HCl 溶液中、pH = 12 的 NaOH 溶液中和 pH = 7 的水中,浸泡 90 d。每种溶液中取出两种岩石圆柱体试块各 5 件、长方体试块各 4 件,然后对其余试块进行冻融循环试验,每个冻融循环周期为 10 h<sup>[15]</sup>,每组试块均进行 30 次冻融循环,静置至室温后,对其弹性模量进行测试,并用智能显微镜对其表面微观结构进行观察对比,然后对岩石试块进行单轴压缩和三点弯曲试验。按冻结温度分为 -20℃、-30℃、-40℃、-50℃ 4 个组别,每个组别 15 个圆柱试块,12 个长方体试块,其中 3 种化学溶液下各有 5 个圆柱试块和 4 个长方体试块。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 弹性模量

取出 pH = 3 的 HCl 溶液、pH = 7 的水和 pH = 12 的 NaOH 溶液浸泡后的岩石试样进行干燥处理,用超声波脉冲速度测试仪测得岩石试样的弹性模量,并与自然状态下岩石试样的弹性模量进行比较,求出不同化学处理前后岩石试样的弹性模量损失率。弹性模量损失率 = (溶液溶蚀前岩石的弹性模量 - 溶液溶蚀后岩石的弹性模量) / 溶液溶蚀前岩石的弹性模量 × 100%,测试与计算结果见表 1。

表 1 化学溶液溶蚀后砂岩及花岗岩弹性模量损失率

处理情况	花岗岩		砂岩	
	弹性模量 E / GPa	损失率/ %	弹性模量 E / GPa	损失率/ %
未处理	55.8		22.9	
HCl 浸泡	52.5	5.9	14.6	36.2
水浸泡	55.3	0.9	22.5	1.7
NaOH 浸泡	53.7	3.8	20.7	9.6

由表 1 可看出,经 HCl 溶液浸泡后的试样弹性模量损失率最大,NaOH 溶液浸泡后的试样弹性模量损失率次之,而经水浸泡后的试样弹性模量损失微乎其微。说明酸性溶液中以氢离子为主的化学离子与花岗岩内部的矿物质发生化学反应,导致岩石内部的矿物质流失或减少,岩石内部形成较多微小孔洞,使结构造成了一定损伤,从而引起宏观上岩石试样的弹性模量的损失。

对完成化学溶液溶蚀试验和冻融循环试验的岩石试件进行弹性模量测量,得到了花岗岩和砂岩在不同冻融温度下弹性模量的损失率。其结果如表 2 所示。

表 2 不同冻融循环温度下岩石弹性模量损失率

冻结温度	花岗岩		砂岩	
	弹性模量 E / GPa	损失率/ %	弹性模量 E / GPa	损失率/ %
未冻融	55.8		22.9	
-20℃	46.6	16.5	13.6	40.6
-30℃	39.1	29.9	10.6	53.7
-40℃	30.2	45.9	9.1	60.3
-50℃	29.5	47.1	8.0	65.1

表 2 反映了岩石弹性模量的损失率随冻结温度的降低而逐渐增大,其中花岗岩的弹性模量损失率在 -20℃ ~ -40℃ 间随冻结温度的下降大体呈现均匀增大的趋势,而在 -40℃ 后以下基本趋于稳定;而砂岩的弹性模量损失率随冻结温度变化的幅度逐渐减小。表明冻融温度的变化对岩石物理性质有很大的影响。

### 3.2 峰值应力

对不同化学溶液浸泡后的岩石试样进行单轴压缩试验,记录下 HCl 溶液、NaOH 溶液和水浸泡后花岗岩和砂岩的峰值应力,并与未浸泡试样(自然状态)进行对比,结果见图 2。

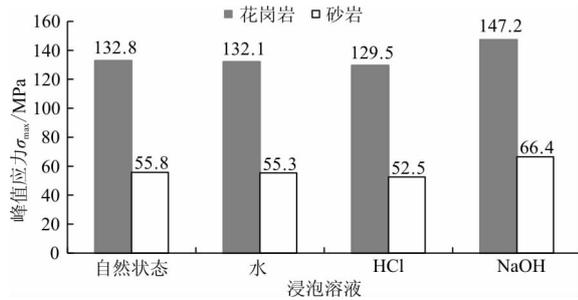


图2 峰值应力与浸泡溶液的关系

表3 化学溶液溶蚀及冻融循环后花岗岩及砂岩的峰值应力  $\sigma_{\max}$ 

MPa

处理情况	花岗岩			砂岩		
	HCl 浸泡	水浸泡	NaOH 浸泡	HCl 浸泡	水浸泡	NaOH 浸泡
未冻融	129.5	132.1	147.2	52.5	55.3	66.4
-20℃冻融循环	124.6	117.2	131.0	40.8	46.4	55.0
-30℃冻融循环	79.2	104.4	130.2	38.5	40.8	53.0
-40℃冻融循环	57.6	88.0	114.5	36.1	38.8	48.1
-50℃冻融循环	69.9	80.4	99.6	32.6	35.6	39.8

表3表明,岩石峰值应力的损失率随着冻融温度的降低逐渐增大,其中HCl溶液浸泡后的花岗岩试样的峰值应力随冻结温度的降低呈现大幅下降,而在-50℃冻融循环后出现回升,其他溶液浸泡后的岩石试样的峰值应力均随冻结温度的降低大体呈现较为均匀的下陷趋势。说明冻融目标温度的变化对岩石力学性能有很大影响。

### 3.3 冻融系数

引入冻融系数表征岩石抵抗冻融破坏的性能。依据《水利水电工程岩石试验规程》(SL264-2016),岩石冻融系数的表达式如下:

$$K'_f = \frac{R_f}{R_s} \quad (1)$$

式中:  $R_f$  为冻融循环后岩石试块单轴抗压强度的平均值,MPa;  $K'_f$  为冻融系数;  $R_s$  为未进行冻融循环的岩石试块单轴抗压强度平均值,MPa。根据公式(1),岩石的冻融系数计算结果如图3所示。

冻融温度对岩石冻融系数影响明显,随着冻融循环温度的降低,岩石冻融系数逐渐减小,归纳发现岩石的冻融系数随着冻融目标温度的降低而减小。

### 3.4 应力-应变关系

将化学溶液溶蚀及冻融循环作用后的岩石试样在单轴压缩试验下的应力-应变数据绘制成图4、5和6中的曲线。

观察分析图4~6中的曲线,化学溶液溶蚀及冻融循环作用下岩石的应力-应变曲线大致呈现为4

个具有显著特征的阶段:分析图2中试验数据可以归纳出岩石试样在不同化学溶液中浸泡后的峰值应力与自然状态相比有不同的趋势,其中中性溶液浸泡后出现微小幅度降低、酸性溶液浸泡后峰值应力显著降低、碱性溶液浸泡后出现了提升。

对经溶液溶蚀试验和冻融循环试验后的花岗岩和砂岩试件进行单轴压缩试验,可得不同岩石试件的峰值应力,详见表3。

个具有显著特征的阶段:

第1阶段,岩石的压密阶段。此阶段曲线形状较短,呈现上凹形状,随着应力变大,应变迅速增加,岩石变形较大,但是试验过程中此阶段时间较短。这一阶段存在的原因主要是砂岩和花岗岩自身天然存在的微小裂缝以及化学溶液溶蚀和冻融耦合作用造成的裂缝,因外力作用而引起闭合,增强了岩石强度,导致此阶段曲线的产生。除去岩石本身离散性的影响,一般酸性溶液浸泡后,冻融循环温度越低,砂岩和花岗岩压密阶段的曲线也就越明显。这一现象表明随着冻融循环温度的降低,冻融试验给岩石试样带来的初始损伤越严重,原因是增加了岩石内部的微裂缝。HCl溶液浸泡后的砂岩和花岗岩试样的该阶段曲线均出现增长,砂岩所受影响更为显著;而水浸泡后的砂岩和花岗岩试样的该阶段曲线均出现缩短,砂岩所受影响更为明显。同时该段曲线长度还随冻结温度的降低而增长,NaOH溶液浸泡后的花岗岩试样所受影响最为显著。

第2阶段,岩石的弹性阶段。此阶段曲线长度较长,大致呈直线状,该段曲线斜率几乎不变,应变随应力的增长呈线性规律。近似认为此段曲线的斜率是岩石试样的平均切线弹性模量。由图4~6可见,在化学溶液浸泡下,随着冻融循环温度的降低,此段曲线斜率(即平均切线弹性模量)呈现逐渐减小的趋势。这说明了化学溶液和冻融循环的耦合作用对砂岩和花岗岩的弹性阶段产生了影响。NaOH溶液浸泡后的砂岩和花

岗岩试样的该阶段曲线均出现增长,同时较自然状态而言变得更陡,反映为 NaOH 溶液对岩石弹性模量和峰值应力的修复作用,而效果随着冻结温度的降低逐渐减弱;而 HCl 浸泡后的砂岩和花岗岩试样的该阶段曲线均出现缩短,同时该段曲线长度还随冻结温度的降低而增长,其中砂岩试样受影响更为显著。

第 3 阶段,岩石塑性屈服阶段。此阶段曲线长

度最短,不明显可见,呈凸起状,应力 - 应变曲线从由快变慢的增长转为减小,在应力到达峰值后迅速下落,应变增加较快出现少量塑性变形。

第 4 阶段,岩石破坏后阶段。岩石内部应力到达峰值后,应变急速增大,应力迅速降低,原因是内部裂纹的迅速扩展贯通,对结构造成严重破坏,导致试样迅速炸裂开来。

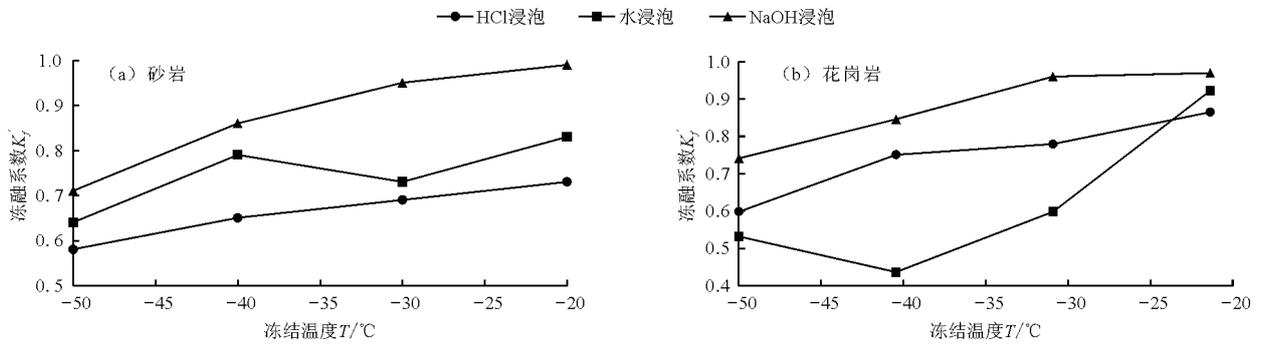


图 3 不同化学溶液浸泡后岩样的冻融系数与冻融温度之间的关系

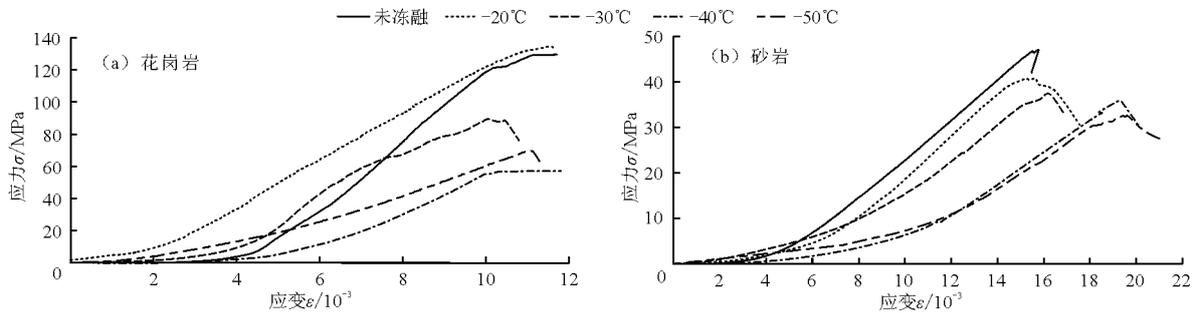


图 4 酸性溶液(HCL)浸泡下砂岩和花岗岩不同冻结温度冻融循环后应力 - 应变曲线

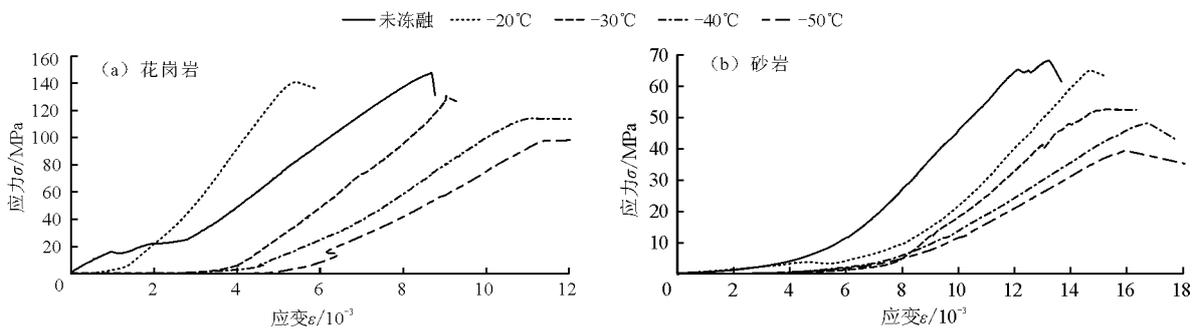


图 5 碱性溶液(NaOH)浸泡下砂岩和花岗岩不同冻结温度冻融循环后应力 - 应变曲线

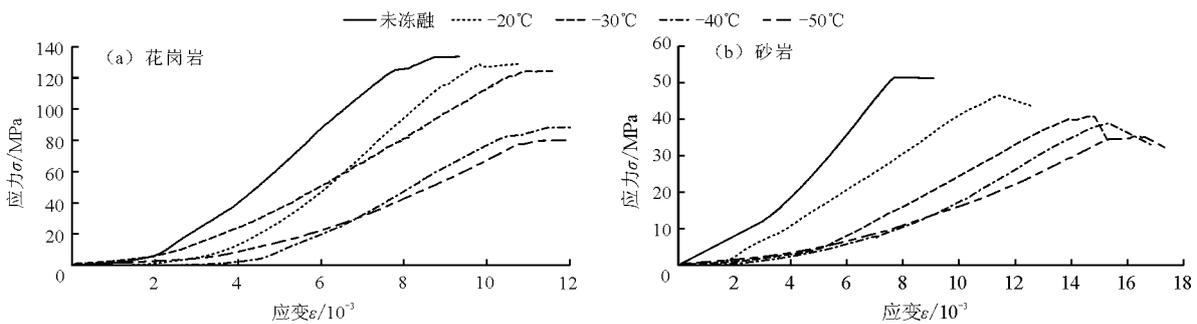


图 6 水浸泡下砂岩和花岗岩不同冻结温度冻融循环后应力 - 应变曲线

### 3.5 岩石表面显微结构

为了展开对不同化学溶液溶蚀和不同冻融温度处理后的岩石试样表面微观结构的观察,从而更细致地从微观角度分析化学溶液溶蚀机理和冻融损伤

机理,采用智能立体显微镜观察化学溶液溶蚀和冻融循环耦合作用后的岩石试样表面。调试好显微镜放大倍数(30倍)等参数后,拍摄岩石试件表面的放大照片,如图7、8所示。

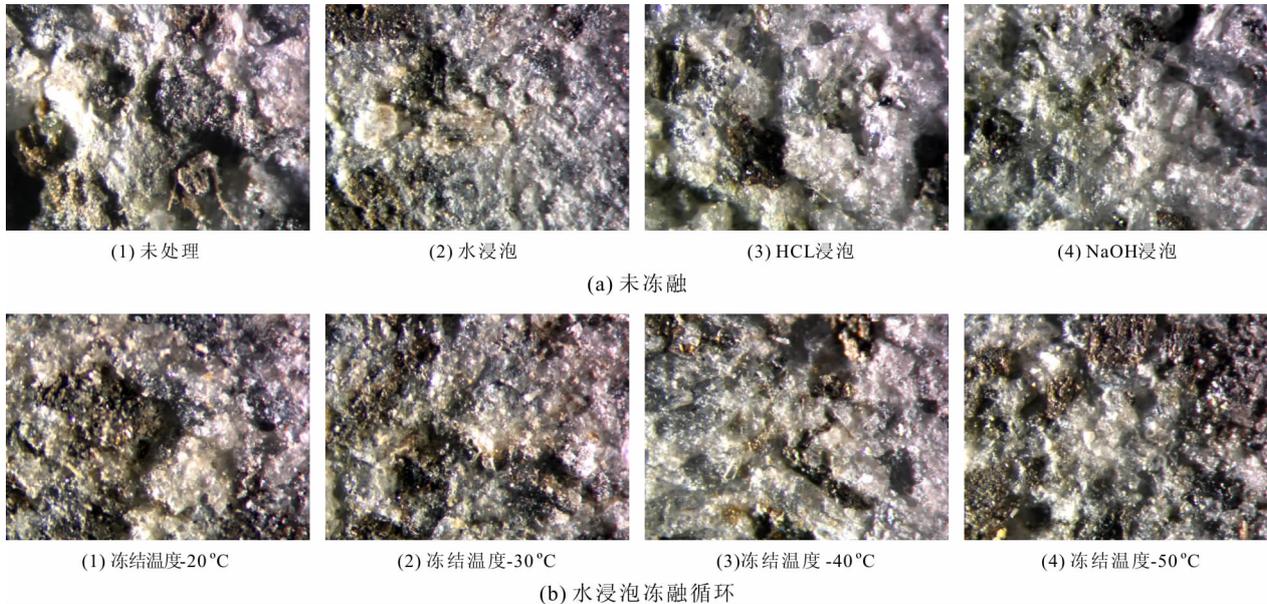


图7 不同化学溶液浸泡及不同冻融温度循环后花岗岩表面显微结构

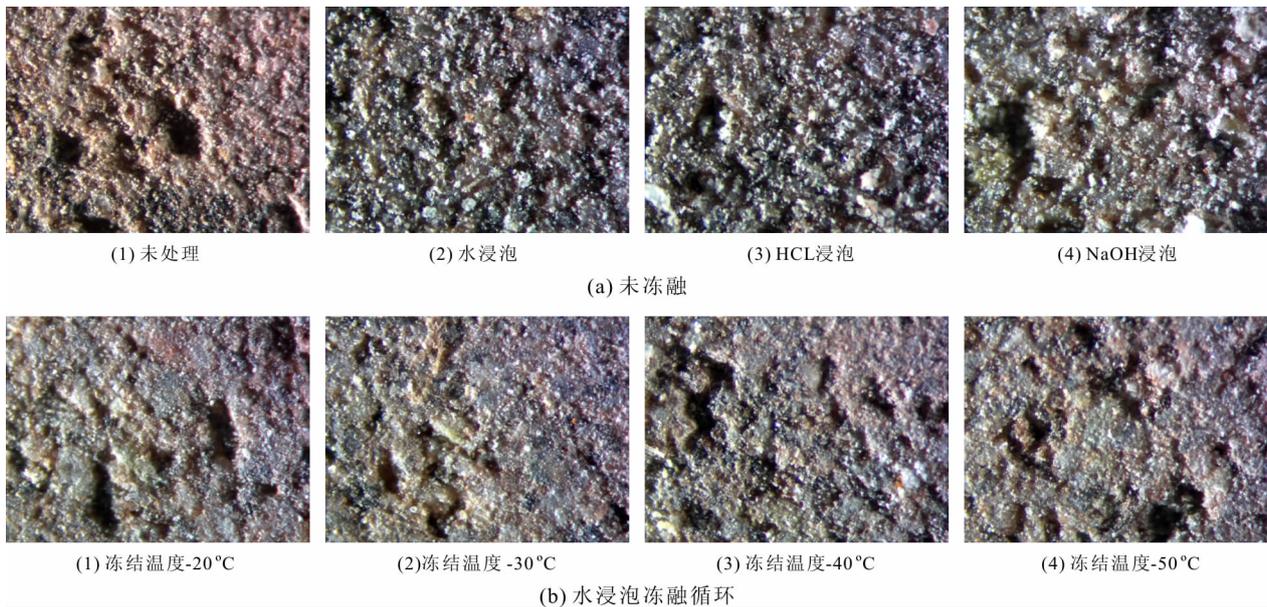


图8 不同化学溶液浸泡及不同冻融温度循环后砂岩表面显微结构

图7、8表明,经不同化学溶液浸泡后,岩石试样表面都出现了不同程度的孔洞式损伤。在常温状态下,岩石试样表面只有较少的孔洞,即岩石初始损伤很小;在蒸馏水中浸泡60 d后的岩石试样表面较未经过浸泡的岩石试样的孔洞有少量增加,即水浸泡对岩石试样造成的损伤较小;而经过酸性溶液浸泡后的岩石试样,其表面的孔洞明显增多、变大,且随

着冻融温度的降低,孔洞的数量和尺寸都在增大。这说明酸性溶液溶蚀和冻融循环的耦合作用对岩石试样造成的损伤很明显,且冻融温度越低,岩石试样产生的损伤也越大。这一试验结果与之前所述酸性溶液溶蚀对岩石宏观力学特性的影响规律符合。同时,随着冻融循环温度的降低,岩石表面孔洞的数量变多、尺寸变大,这说明冻融循环温度越低,造成的

冻融损伤越严重。

### 3.6 岩石 I 型断裂韧度分析

岩石的断裂韧度作为衡量岩石抵抗其自身裂纹发展的能力的重要力学指标之一,对岩体工程和边坡工程的稳定性而言至关重要。对于含裂纹的材料,其应力强度因子的临界值即为材料的断裂韧度。在特定的温度环境和加载速率下,断裂韧度可视为材料的一项固有性质。

本文采用三点弯曲法测量岩石的断裂韧度,制作砂岩和花岗岩试样时预留缺口作为初始裂纹,三点弯曲试验时,该处产生的拉应力垂直于裂纹面,所以将其近似按照 I 型裂纹考虑,三点弯曲断裂韧度按 ASTM 公式计算:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} d}{bh^{3/2}} \left[ 2.9 \left( \frac{a}{h} \right)^{1/2} - 4.6 \left( \frac{a}{h} \right)^{3/2} + 21.8 \left( \frac{a}{h} \right)^{5/2} - 37.6 \left( \frac{a}{h} \right)^{7/2} + 38.7 \left( \frac{a}{h} \right)^{9/2} \right] \quad (2)$$

式中: $K_{IC}$  为岩石试样的断裂韧度,  $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ ,  $P_{\max}$  为加载在岩石上的最大荷载, N;  $d$  为底部两支座之间的距离, 即试样的跨度, mm;  $b$  为长方体试样的厚度, mm;  $h$  为长方体试样的高度, mm;  $a$  为预制裂缝长度, mm。

将三点弯曲试验直接测得的加载在岩石试样上的最大荷载  $P_{\max}$  以及砂岩和花岗岩试样的尺寸参数  $d$ 、 $h$ 、 $a$ 、 $b$  一同代入公式(4)中, 计算出不同冻融循环温度下砂岩和花岗岩试样的 I 型断裂韧度, 计算结果见图 9。

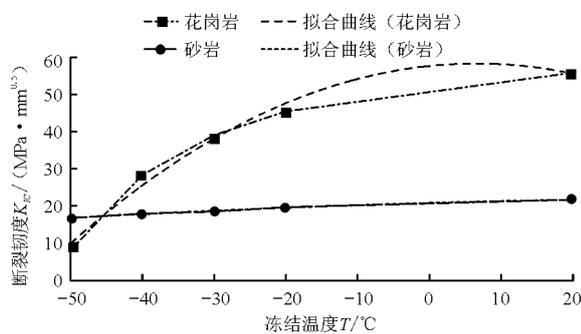


图9 断裂韧度与冻结温度之间的关系

计算结果表明,砂岩和花岗岩的断裂韧度损失率均随着冻融循环温度的降低而加大,即对岩石造成的损伤越严重。根据图 9 中的计算结果进行拟合,得出砂岩和花岗岩的断裂韧度与冻融循环温度之间呈现二次函数的关系。

花岗岩断裂韧度  $K_{IC}$  ( $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ ) 与冻结温度

$T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 的拟合关系式为:

$$K_{IC} = -0.0158T^2 + 0.2066T + 60.076 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.987$$

砂岩断裂韧度  $K_{IC}$  ( $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ ) 与冻结温度  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 的拟合关系式为:

$$K_{IC} = -0.0006T^2 + 0.0562T + 21.721 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9944$$

## 4 化学溶蚀及冻融损伤机理分析

观察试验结果不难看出,砂岩和花岗岩的弹性模量和峰值应力因为化学溶液浸泡和冻融循环耦合作用受到了影响。岩石本身含有的大量矿物成分可以和化学溶液中的溶质发生反应,产物易溶于溶液的物质,使岩石矿物流失,导致岩石内部出现孔隙和损伤。在不同溶液中岩石的化学反应程度不尽相同。岩石内部主要矿物成分与水发生反应的机理如下:石英与水反应生成少量  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , 同时少量金属离子流失,反映在图 2 中为砂岩和花岗岩峰值应力的小幅度降低;浸泡在 HCl 溶液中的岩石,一方面会与大量  $\text{H}^+$  反应,产物包含金属阳离子,例如红砂岩含有较多的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 和  $\text{H}^+$  反应生成  $\text{Fe}^{3+}$ , 其大量进入溶液,破坏了岩石的力学性能,是弹性模量和峰值应力降低的主要原因;另一方面 HCl 溶液与砂岩和花岗岩化学反应的产物多以离子的状态存在于溶液中,岩石内部矿物质流失,孔隙增多,裂纹加大,导致岩石结构疏松,最终在宏观上表现为图 2 和表 1 中砂岩和花岗岩峰值应力和弹性模量较自然状态下有显著降低。而浸泡在 NaOH 溶液中的砂岩与花岗岩由于和碱性溶液反应产生一定量的硅酸盐,填补进岩石本身的裂隙和天然裂缝,形成了一定的补强加固作用,从而在宏观上表现为本试验图 2 中砂岩和花岗岩峰值应力的增大。

同时,岩石的力学性质也受离子迁移的影响,岩石中含有石英、非黏土矿物和黏土矿物等酸不溶物,碱溶液中的  $\text{OH}^-$  离子优先通过酸不溶物较富集的部分进入岩石内部,因为酸不溶物分布的连续性有利于  $\text{OH}^-$  离子的迁移<sup>[16]</sup>。岩石的粒径通常远大于酸不溶物的粒径,由于矿物粒径越小,越容易在孔隙中产生更强的毛细孔作用,从而导致溶液中的离子在岩石孔隙中迁移速度的加快<sup>[17]</sup>。岩石浸泡溶液中的离子迁移保证和促进了化学反应的发生,从而导致岩石内部矿物成分逐渐溶解于化学溶液,进而导致岩石内部孔隙和裂纹的增多和扩大,在宏观上则表现为本实验表 1 和图 2 中砂岩和花岗岩峰值应

力和弹性模量等力学性能不同程度的降低。

岩石材料是由多相介质构成的,由于其内部多相介质具有不同的热物理性能,所以冻融循环作用给岩石带来了损伤,而此时化学溶液的参与会进一步影响岩石的力学性能。岩石内部某些胶结强度较低的矿物颗粒会在冻胀力的作用下发生显著的破坏,最终导致岩石内部局部损伤的出现,而在融蚀的过程中,化学溶液会随着温度的提升更容易地渗入岩石的内部,与矿物充分发生化学反应,同时也促进了化学溶液溶蚀过程中的离子迁移作用,随着这种冻融循环过程的往复进行,岩石内部的结构不断受到化学溶液和冻融循环共同作用的影响,这种影响加重了岩石的冻融损伤,宏观上表现为砂岩和花岗岩的抗压强度的降低和力学特性的削弱。

## 5 结 论

(1)经化学溶液浸泡后,砂岩和花岗岩两种岩石试样的受影响程度不同,冻融循环后岩石试样的弹性模量出现不同程度的降低,其中砂岩受冻结温度的影响相较花岗岩而言更显著。

(2)岩样的应力—应变曲线的压密阶段长度随着冻结温度的降低而增长,冻融循环后的花岗岩和砂岩的单轴抗压强度随着冻融循环温度的降低而降低。花岗岩和砂岩的冻融系数随着冻结温度的降低而降低。

(3)化学溶蚀和冻融循环的耦合作用会使得岩石的力学特性发生显著变化,HCl在冻融循环中促进两种岩石的损伤,而NaOH溶液对两种岩石造成的损伤有一定程度的抑制作用,两种岩石的断裂韧度与冻融循环温度之间呈现二次函数的关系。

(4)经不同化学溶液溶蚀后,砂岩和花岗岩试件表面均出现了不同程度的孔洞,并且随着冻融循环温度的降低,岩石表面孔洞的尺寸变大、数量增多。

### 参考文献:

- [1] 于长毅. 酸雨的形成、危害及防治[J]. 环境保护与循环经济,2017,37(9):42-44+47.
- [2] LI J,ZHOU K,LIU W, et al. NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze - thaw cycles [J]. Transactions of Nonferrous Metal Society of China,2016,26(11):2997-3003.
- [3] NICHOLSON H,DAWN T,NICHOLSON F. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freezing - thawing weathering [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2000,25(12):1295-1308.
- [4] MUNEO H,HIDENORI M. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials [J]. International Journal of Engineering Science, 1998,36(4):511-522.
- [5] 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.
- [6] YAMABE T,NEAUPANE K M. Determination of some thermo - mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2001,38(7):1029-1034.
- [7] 李新平,路亚妮,王仰君等. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(11):2307-2315.
- [8] 陈四利,冯夏庭,李邵军. 化学腐蚀对黄河小浪底砂岩力学特性的影响 [J]. 岩土力学,2002,23(3):284-287.
- [9] 乔丽苹,刘建,冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):2117-2124.
- [10] LI N,ZHU Y,SU B, et al. A chemical damage model of sandstone in acid solution [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2003,40(2):243-249.
- [11] 陈有亮,王朋,张学伟,等. 花岗岩在化学溶蚀和冻融循环后的力学性能试验研究 [J]. 岩土工程学报,2014,36(12):2226-2235.
- [12] 张牡丹,王苏然,曾健霜,等. 花岗岩超低温冻融循环后力学特性研究 [J]. 上海理工大学学报,2017,39(5):484-489.
- [13] 盛金昌,李凤滨,姚德生,等. 渗流 - 应力 - 化学耦合作用下岩石裂隙渗透特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(5):1016-1025.
- [14] 陈卫忠,谭贤君,于洪丹,等. 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性研究进展与思考 [J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1318-1336.
- [15] 申艳军,杨更社,荣腾龙,等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨 [J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1775-1782.
- [16] 王朋. 化学 - 温度 - 应力耦合作用对岩石力学性能的影响 [D]. 上海:上海理工大学,2014.
- [17] 曹沁智,邓敏,黄蓓,等. 白云质岩石中酸不溶物对碱白云石反应的影响 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2018,40(1):89-94.