

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.020

干燥及饱水状态下裂隙岩石冻融特征研究

裴向军¹, 蒙明辉², 袁进科¹, 王东坡¹

(1. 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, 四川 成都 610059; 2. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 610081)

摘 要: 岩体冻融风化作用主要受控于岩性、岩体结构、饱和状态及温变环境等因素。采取新疆寒区 4 种裂隙岩石进行温度变化下的冻融应变试验, 得到了裂隙岩石在饱水及干燥冻融状态下的应变过程, 即饱水状态下为 8 个阶段、干燥状态下为 5 个阶段; 针对饱水裂隙岩石提出了冻融作用的胀缩率 κ , 得到了不同岩性的 κ 与冻融循环次数的拟合关系表达式, 同时分析了在循环冻融过程中应变的变化规律, 即裂隙岩石的冻胀阶段的微应变最大值都随循环次数的增加而增大。此外, 通过在不同恒温下裂隙岩石冻融应变试验, 分析了应变的变化规律, 得到应变与不同恒温的拟合关系表达式; 试验结果表明: 裂隙岩石的 κ 都随冻融次数的增加而增大, 胀缩率的变化程度与不同岩样的孔隙率特征有关。饱水裂隙岩石在冻融过程中对温度具有较强的敏感性, 损伤表现在温度损伤和冻胀损伤。

关 键 词: 裂隙岩石; 冻融循环; 应变; 胀缩率 κ ; 温度损伤效应

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 07-1999-08

Freezing-thawing characteristics of fractured rockmass under dry and saturated conditions

PEI Xiang-jun¹, MENG Ming-hui², YUAN Jin-ke¹, WANG Dong-po¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Sichuan Huadi Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Freeze-thaw weathering of rock mass is mainly controlled by several factors, such as lithology, structure of rock mass, saturated water and temperature. In this study, the freezing and thawing strain tests were carried out on four kinds of fractured rock from the cold zone of Xinjiang. The strain processes of dry and saturated fractured rock were obtained under freezing and thawing conditions, respectively. It is found that the saturated fractured rock under eight strain stages, while the dry fractured rock experienced five strain stages. The swelling-shrinking ratio κ of saturated fractured rock was defined under the freezing and thawing action. Furthermore, the fitting relationships between the ratio κ of different lithology and freezing-thawing cycles were gained. At the same time, the variation law of strain in the process of cyclic freezing and thawing was analyzed, which revealed that the maximum micro-strain of fractured rock at the frost heave stage increased with the increase of the cycle number. Besides, the freeze-thaw strain tests on jointed rockmass were conducted under different constant temperatures, and the fitting relationships between strain and different constant temperatures were obtained as well. Testing results demonstrate that the ratio κ increased with increasing the freezing and thawing cycle. Moreover, the variation degree of swelling-shrinkage rate was related to rock porosity characteristics. In addition, saturated jointed rockmass was highly sensitive to the temperature during the freezing and thawing process, and the damage was reflected as the thermal and frost heaving damage.

Keywords: fractured rockmass; freezing-thawing cycle; strain; swelling shrinking ratio κ ; temperature damage effect

1 引 言

我国是世界上寒区分布最多的国家之一, 约占全部国土面积的 75%。随着高寒山区大规模工程建

设的开展, 越来越多的岩石冻融问题引起了人们的关注^[1-6]。因此, 研究高寒山区冻融作用对岩石的影响, 将对大量兴起的寒区工程建设具有重要的指导意义^[7]。

收稿日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金创新群体(No. 41521002); 四川省科技创新团队项目(No. 2011JTD012)。

This work was supported by the Program of National Natural Science Foundation of China (41521002) and the Science and Technology Innovation Team Project (2011JTD012).

第一作者简介: 裴向军, 男, 1970 年生, 博士, 现任教授, 主要从事地质灾害、工程边坡稳定性评价与工程治理方面的教学与研究工作。

E-mail: peixj0119@tom.com

近年来,国内外众多学者对冻融岩石开展了大量研究工作。Nicholson 等^[8]利用 10 种岩石的冻融循环试验,总结了岩性与冻融损伤劣化程度的关系。周科平等^[9]利用风化花岗岩做循环冻融试验,发现岩样的强度、弹性模量及抗冻系数随着冻融循环次数的增加而减小。母剑桥等^[10]对花岗岩、砂岩、千枚岩进行冻融循环试验,得到单轴抗压强度与冻融循环次数的拟合关系式,并提出了两种冻融劣化模式。吴刚等^[11]总结了大理岩在循环冻融条件下的主要的物理力学特性。Yamabe 等^[12]通过研究发现,冻融循环对干燥和饱水的岩石的影响巨大,在冻融温度范围较小的条件下,冻融循环对干燥状态岩石的影响微乎其微,而饱水状态的岩石均出现了不同程度的损伤,有的甚至完全破坏。Hori^[13]发现,当岩石等孔隙脆性介质冻结时,储存在孔隙内部的水发生冻结并产生约 9% 的体积膨胀率,直接导致内部产生较大的拉应力和微孔隙损伤;当孔隙水融化时,水会在其内部微孔隙中迁移,进而加剧这种损伤。刘成禹等^[14]通过试验研究发现,低温的循环冻融对花岗岩的质量影响并不明显,但对其强度、刚度及变形特性均有较大影响。何国梁等^[15]通过试验表明,冻融后岩样内部微裂隙和孔隙扩展,导致岩样超声纵波波速下降,密度下降,同时发现水是在冻融循环过程中加速岩样劣化的重要因素。

上述研究成果多是完整岩石循环冻融试验,对自然界的裂隙岩石冻融方面研究较少。笔者在开展新疆中巴(中国—巴基斯坦)公路奥依塔克—布伦口段边坡冻融风化调查发现,由于岩石裂隙中的水反复累进冻胀变形,裂隙岩石在寒区冻融风化作用下更易发生破坏。鉴于此,本文拟用裂隙岩石的应变试验,探讨经历不同循环次数及不同温度下裂隙岩石的冻融特征,分析裂隙岩石在冻融作用下的温度响应特征,为进一步提示冻融作用下岩质边坡破坏失稳研究提供参考。

2 试样制备及试验方案

2.1 试样制备

试验现场选取中巴公路 4 种具有代表性的岩石,分别是花岗岩,千枚岩,泥质砂岩和辉绿岩,岩体力学性质见表 1。

对于岩性尽量选取含有大小规模基本相同的裂隙,并且在制样过程中尽量保证每一个岩样的裂隙发育程度基本相同,裂隙的初始发育情况见表 2。岩样采用水钻法按照钻芯、切割、打磨等工序制成尺寸为 $\Phi 50 \times 100$ mm 的圆柱体。

加工后的岩样首先从视觉上进行筛选,将差别较大的岩样剔除,把筛选后的岩样放入温度为 105 ℃ 的烘箱中烘 48 h 至恒重,干燥岩样制备完成;利用真空抽气法取出需要进行饱水的岩样进行强制饱和,真空压力值为 100 kPa,抽气时间为 6 h,抽气完毕后浸泡 24 h。至此,饱水岩样制备完成。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rockmass

岩性	矿物成分	干密度 (g/cm ³)	孔隙率 /%	含水率 /%
花岗岩	以石英、长石等矿物为主,长石约 40%。	2.59	0.92	0.23
千枚岩	主要为石英,绢云母、长石,少量黑、白云母及绿泥石,	2.36	1.21	0.52
泥质砂岩	以长石、石英为主,细~粉粒变晶质结构,充填夹泥。	2.25	2.71	0.99
辉绿岩	由长石,辉石组成	2.52	0.70	0.17

表 2 试样初始裂隙发育情况

Table 2 Development of sample fracture

岩样	宽度/mm	长度/mm	贯穿高度/mm
花岗岩	0.12	19.5	7.8
泥质砂岩	0.13	20.0	7.5
千枚岩	0.17	20.5	8.0
辉绿岩	0.10	19.5	7.6

2.2 试验方案

参考我国相关行业现行规范,《水电水利工程岩石试验规程》据有较为广泛的代表性,故冻融循环试验方法采取该规范要求进行:将制备的饱水岩样放入可控温冰箱冻结 4 h,再放入常温浸满岩样的水中融化 4 h,构成一个冻融循环周期 8 h,如此反复。干燥条件下的冻融试验:将制备的干燥岩样放入冰箱中冻结 4 h,然后关闭冰箱电源开关,打开冰箱,岩样在常温下自然融化,如此反复。试验环境最低温度为 -40 ℃,可自动控制恒温,精度在 1 ℃ 范围之内。

试验时,饱水岩样各取 9 块,每 3 块岩样为 1 组,共 3 组。第 1 组岩样用于温度变化下一个冻融周期岩石冻融应变试验;第 2 组用于温度变化下岩石冻融循环应变试验,冻融循环次数分别为 1, 10, 20, 30, 40, 50 次;第 3 组用于恒温下岩石冻融应变试验。干燥岩样各取 3 块,共 1 组,用于温度变化下一个冻融周期岩石冻融应变试验。

3 温度变化下裂隙岩石冻融应变试验

3.1 试验步骤

将岩样表面擦干去污,用砂纸在岩样的裂隙分

布较集中的部位打磨，将应变片贴于打磨部位，纵、横各贴 1 个。然后将导线与应变片焊接，并用胶带将导线固定在岩样上，同时检查应变片的牢固性，是否有短路、断路问题，并在应变片上涂凡士林。按照 1/4 桥接法通过细导线连接应变片与 CM-1L-10 应变仪，岩样上的 2 块应变片分别与 1、2 测点相连（见图 1）。



图 1 连接应变仪后的岩样
Fig.1 Samples connected with strain meter

将连接好应变片的岩样放入冰箱中，将所有测点上的应变片灵敏度系数 K 值修正为 2.000，然后检查线路无误后按“总清”组合键进行巡检清零。将温度调到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，由于温度不可能突然达到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，记录试验实际温度变化及此时测点上的微应变值，试验时间为 4 h 数据记录由 CM-1L-10 测量系统每一分钟记录一次。冰冻结束后，开始岩样的冰融应变试验。以上的试验过程即为一个冻融周期内所做的步骤。

3.2 温度补偿

由于在试验过程中温度变化可同时引起应变片光栅产生电阻变化，影响试验结果。

对于岩样微应变值的测定是通过粘贴在岩样表面的应变片来测定的，当温度变化时，应变片受到岩样的线膨胀发生应变，其应变值将通过应变仪显示出来。应变片的应变值是受到应变片阻值变化的影响，理想的应变片阻值应只随应变变化，不受其他因素的影响。但在实际试验中应变片会受到温度变化而引起应变片自身电阻的变化，从而给试验结果造成变形假象带来误差，其关系由下式表示：

$$\Delta R_{\alpha} = R_t - R_0 \quad (1)$$

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \Delta t) = R_0 + R_0 \alpha \Delta t \quad (2)$$

$$\text{所以 } \Delta R_{\alpha} = R_t - R_0 = R_0 \alpha \Delta t \quad (3)$$

式中： R_t 为温度为 t 时的电阻值； R_0 为温度为 t_0 时的电阻值； Δt 为温度变化值； ΔR_{α} 为温度变化 Δt 时的电阻变化； α 为应变片电阻敏感系数。

由于温度变化 Δt ，应变片的阻值 ΔR_{α} 与应变 ε_{α} 有以下关系：

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{R_0 \alpha \Delta t}{R_0 S} = \frac{\alpha \Delta t}{S} \quad (4)$$

式中： S 为应变片的灵敏度系数。

由上式可以看出，应变仪显示的应变除了岩样自身的应变值外，还有应变片由于温度的变化引起的自身附加应变。一般温度引起的附加应变与岩样试件的应变具有相同的数量级，所以实际试验中应变片受到温度变化而引起自身附加应变对试验结果将会带来显著误差。因此，本文对温度引起的应变误差进行电桥补偿，即补偿片法，通过安装一片相同的应变片组成平衡电桥，通过电桥的和差特性平衡应变片的温度阻值变化来进行温度补偿，见图 2。其中工作片 R_1 粘贴在被测工作的需要测量的部位，补偿片 R_B 粘贴在一块不受力的与被测试件的相同的材料上，这块材料可以自由地放在试件上或附近，其余电桥电阻按 $R_1 = R_B = R_3 = R_4$ 布置。

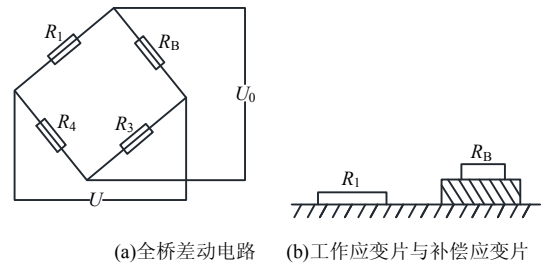


图 2 桥路补偿法
Fig.2 Bridge compensating method

当岩样不承受应变时， R_1 和 R_B 都处于同一温度环境 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度场中，调整电桥参数，此时电路达到平时，对电路的电压有：

$$U_0 = A(R_1 R_4 - R_B R_3) = 0 \quad (5)$$

式中： A 为由桥臂电阻和电源电压决定的常数。

此时应变片不产生应变，应变仪无影响。当温度变化 Δt 时，电桥由于两应变片的电阻变化量相等仍处于平衡状态，即

$$U_0 = A[(R_1 + \Delta R_1) R_4 - (R_B + \Delta R_B) R_3] = 0 \quad (6)$$

当岩样受冻融产生应变 ε 时，工作片电阻 R_1 产生新的电阻增量 $\Delta R_1 = R_1 S \varepsilon$ ，而补偿片因不承受应变，故不产生新的增加。结合式 (6) 此时电桥输出

电压为

$$U_0 = AR_1R_4S\varepsilon \quad (7)$$

由上式可知, 安装了补偿片的电桥电路输出的电压仅与岩样的应变 ε 有关, 而与环境温度无关, 说明工作应变片由于温度影响产生的自身电阻变化通过补偿片而被抵消掉, 此时应变仪通过电压信号显示的即是岩样的应变量。

3.3 试验结果分析

3.3.1 饱水裂隙岩石冻融应变过程分析

根据饱水岩样在温度变化下一个冻融周期内应变试验结果可知, 所测试岩样在试验过程中微应变存在相同的变化规律, 即冰冻阶段, 温度初始下降时, 岩石微应变随温度的降低开始减小收缩, 伴随温度的进一步降低, 微应变开始增大, 增大到一定程度后又开始减小; 而冰融阶段, 在温度刚开始上升时, 岩石微应变随温度的升高基本趋势不变, 相对稳定, 伴随温度的进一步升高, 微应变开始增大, 增大到一定程度后开始减小, 当减小到一定程度, 微应变又开始增大, 最后趋于稳定。

对试验中不同岩性的饱水岩石冻融应变曲线进行分析, 发现这4种岩样应变都基本经历了以下8个阶段(见图3):

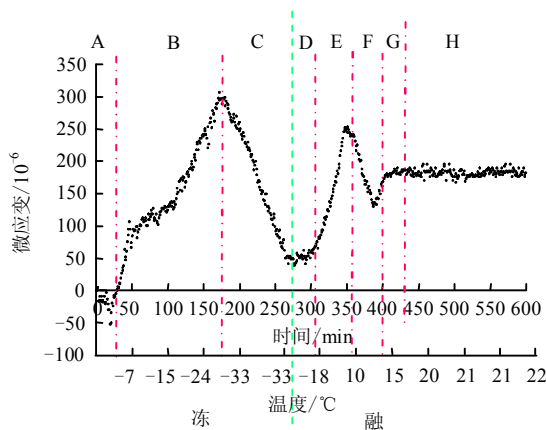


图3 一个冻融周期饱水裂隙岩石冻融应变曲线

Fig.3 Strain curve of saturated fractured rock in one freezing-thawing cycle

(1) 冷缩阶段(A): 在该阶段, 岩石在骤然遇冷时发生冷缩变形, 此阶段一般时间很短, 相对而言, 泥质砂岩的冷缩时间较长, 这与岩石的孔隙率有关。

(2) 冻胀阶段(B): 在岩石冷缩变形完成后, 岩石裂隙中的水开始结冰膨胀, 出现冻胀变形, 且不同岩性的岩石冻胀量各异。通过试验发现, 这与各裂隙岩石的裂隙储水量有关, 裂隙发育, 储水多

的岩石冻胀量越大。

(3) 冻缩阶段(C): 在该阶段, 岩石裂隙中的水完全结冰后与岩石结为一体, 温度也相同, 在温度极低的情况下, 裂隙中的冰和岩石再次冻缩变形。

(4) 升温迟滞阶段(D): 这个阶段温度由低向高转变, 升温过程中岩石应变还来不及反应, 微应变基本维持不变, 出现一定的迟滞。

(5) 热胀阶段(E): 该阶段, 温度升高到0℃上, 岩石遇热开始膨胀, 出现热胀变形, 此阶段一般时间短且变形量大, 说明岩石在极寒天气突遇升温变形较为敏感。

(6) 融缩阶段(F): 伴随温度进一步升高, 岩石裂隙中的冰开始融化, 裂隙体积随之减小, 出现收缩变形。并且随着冰的融化要吸收热量, 岩石的温度开始下降。

(7) 融缩回弹阶段(G): 随着温度的进一步升高, 前一阶段降低的岩石温度开始回弹, 温度升高, 岩石又开始膨胀, 是融缩阶段的后效应。

(8) 融缩趋稳阶段(H): 该阶段, 温度不再升高, 环境温度基本保持不变, 岩石变形也在经过前几个阶段的变形过后稳定在一定范围内, 基本保持不变。

3.3.2 干燥裂隙岩石冻融应变过程分析

同样, 根据干燥岩样在温度变化下一个冻融周期内应变试验结果表明, 岩样的微应变过程主要是受裂隙的冻融变化影响。在温度刚开始下降的时间内, 岩石的微应变随温度的降低开始减小收缩, 然后随着温度的进一步降低, 微应变开始维持在一定范围内, 达到一个趋于稳定的态势。当结束冻胀阶段, 刚开始温度从低向高时, 微应变反应迟滞, 基本不变。随着温度进一步升高, 微应变开始快速增大, 而后又保持一个稳定趋势, 极其靠近横坐标轴。

对所有不同岩性的干燥裂隙岩石冻融应变曲线进行分析, 发现这4种岩样应变都基本经历了以下5个阶段(见图4):

(1) 冷缩阶段(A): 该阶段, 岩石在骤然遇冷时发生冷缩变形, 同样与岩石的孔隙率有关。

(2) 冷缩趋稳阶段(B): 温度进一步降低, 但岩石冷缩变形已到极限, 微应变不再进一步减小, 而是维持一个相对稳定的态势。

(3) 升温迟滞阶段(C): 该阶段温度由低向高转变, 这个升温过程中岩石应变反应滞缓, 微应变基本维持不变, 出现一定的延迟现象。

(4) 热胀阶段(D): 该阶段, 温度升高到0℃上, 岩石遇热开始膨胀, 出现热胀变形, 此阶段一

般时间短且变形量大,说明岩石在极寒天气突遇升温变形较为敏感。

(5) 热胀趋稳阶段(E):该阶段温度不再升高,环境温度基本保持不变,岩石变形也在经过前几个阶段的变形后稳定在一定范围内,基本保持不变。

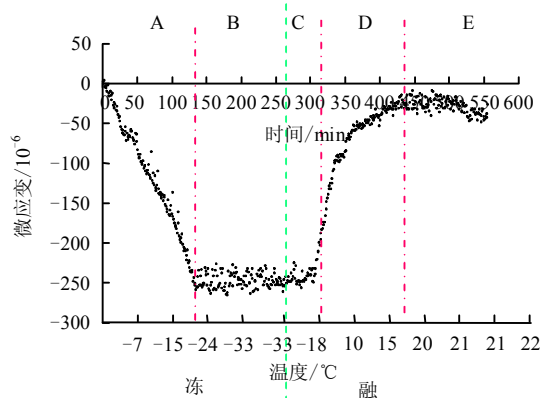


图 4 一个冻融周期干燥裂隙岩冻融应变曲线
Fig.4 Strain curve of dry rock in one freezing-thawing cycle

从图 3、4 两类曲线对比分析可以看出,饱水状态下的裂隙岩石的应变总体是胀,而干燥状态下的应变总体是缩。而且,一个冻融循环变形趋稳后,饱和岩石仍保持较大的不可逆变形,这就很好地解释了水参与下岩石冻胀劈裂的破坏效应。

3.3.3 饱水裂隙岩石循环冻融应变规律

为进一步研究饱水状态下循环冻融作用下的岩石应变规律,试验进行到直至饱水裂隙岩石出现明显掉块破裂时,记录每一次冻融循环的微应变值,每一种岩样做 3 次试验,取其冻胀阶段的最大微应变的平均值,试验结果见表 3。

表 3 不同循环次数下岩石的最大微应变均值
Table 3 The maximum microstrain of rock after different cycles

冻融次数	辉绿岩应变值 /10 ⁻⁶	花岗岩应变值 /10 ⁻⁶	千枚岩应变值 /10 ⁻⁶	泥质砂岩应变值 /10 ⁻⁶
1	441.0	310.7	191.3	115.0
10	473.7	319.6	212.0	167.3
20	485.0	394.3	238.7	197.7
30	495.7	421.7	264.0	223.0
40	507.3	435.0	351.0	248.7
50	557.0	440.3	357.7	338.3
应变值差	116.0	129.6	166.4	223.3

注:表中 4 种岩石的孔隙率分别为 0.70%、0.92%、1.21%、2.71%。

为更加直观地反应岩石在不同冻融次数下冻胀的最大微应变值的变化规律,将其变化曲线绘于图 5。

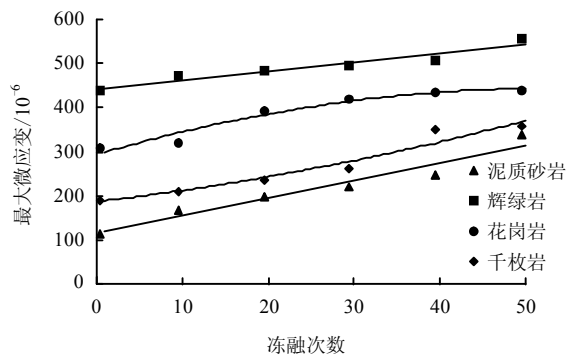


图 5 不同冻融次数下岩石冻胀最大微应变均值曲线
Fig.5 Average value curves of the maximum microstrain of rocks after different cycles

由图可以看出,无论是哪一种岩性的裂隙岩石,其冻胀阶段的微应变最大值均随循环次数的增加而增大。从表 3 中可以看出,初始(指第 1 次冻融结束后)应变值与岩石的孔隙率有关,而 50 次冻融循环后,辉绿岩最大微应变则由 441 $\mu\epsilon$ 增大到 557 $\mu\epsilon$ 。花岗岩从 1 次到 50 次冻胀其最大微应变由 310.7 $\mu\epsilon$ 增大到 440.3 $\mu\epsilon$, 千枚岩的最大微应变由 191.3 $\mu\epsilon$ 增大到 357.7 $\mu\epsilon$, 泥质砂岩的最大微应变由 115 $\mu\epsilon$ 增大到 338.3 $\mu\epsilon$ 。

综上所述,不同岩性的岩石的冻胀最大微应变增大的幅度和速度各异。引起以上现象的原因可以解释为:裂隙岩石在每一次的冻胀过程中的冻胀力使岩石内部胶结程度较弱的矿物颗粒剥落析出,致使岩石内部结构出现孔隙,岩石在每一次冻融前结冰的水储存就更多,微应变也就随之而增大。并且,从图 5 中可以看出,泥质砂岩的增幅最大,究其原因,泥质砂岩属于软岩,孔隙率最大(达到 2.71%),其内部的孔隙及微裂缝分布最多,所以泥质砂岩的微应变增幅最大。而辉绿岩属于坚硬岩,孔隙率只有 0.70%,其微应变的增幅最小。根据花岗岩和千枚岩的孔隙率特征,千枚岩的微应变增幅比花岗岩的要大。同时,泥质砂岩及辉绿岩的最大微应变随冻融次数的增加呈线性增大,泥质砂岩增大的速率明显大于辉绿岩;而花岗岩及千枚岩的最大微应变随冻融次数的增加呈二项式增大,花岗岩的增大速率逐渐减缓。从以前分析看出,不同岩样的微应变增幅主要与岩样的强度、孔隙率特征相关。

3.3.4 饱和岩石冻融胀缩效应

根据岩样在温度变化下冻融应变试验结果分析可知,干燥岩石基本未产生残余变形;而饱水裂隙岩石在冻融过程中会产生明显的残余变形和冷缩变形,以上的这两种变形特点,基本上反应了裂隙岩

石在饱水冻融过程中的冻缩规律,因此,选取在冻融应变试验中便于测量的微应变值来反应裂隙岩石在饱水冻融过程中的冻缩规律,裂隙岩石饱水冻融引起胀缩率 κ 可定义为

$$\kappa = \frac{\eta_{\text{ave}}}{|\eta_{\text{min}}|} \quad (8)$$

式中: η_{ave} 为融缩趋稳阶段的微应变均值($\mu\epsilon$); $|\eta_{\text{min}}|$ 为冷缩阶段的最小微应变绝对值($\mu\epsilon$)。

由式(1)及冻融应变试验结果,可以得知,试验中的4种饱水裂隙岩石在循环冻融过程中的胀缩率 κ 如下表4所示。

表4 不同循环次数下岩石的胀缩率 κ
Table 4 Swelling-shrinking ratio κ of rocks after different cycles

冻融次数	胀缩率 κ			
	花岗岩	泥质砂岩	千枚岩	辉绿岩
1	2.29	0.33	0.64	2.10
10	2.57	0.98	1.03	2.46
20	2.74	1.86	1.95	2.98
30	3.08	2.94	2.46	3.31
40	3.16	3.89	2.97	3.59
50	3.48	4.37	3.48	3.67
差值	1.19	4.04	2.84	1.57

根据表4试验结果,绘制4种岩石胀缩率 κ 与冻融循环次数的关系曲线,见图6。

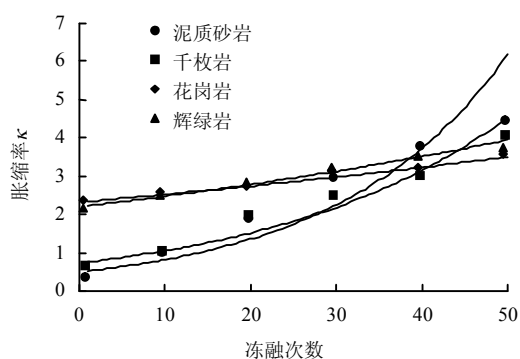


图6 不同冻融次数下岩石胀缩率 κ 拟合曲线
Fig.6 Fitting curves of swelling-shrinking ratio κ of rocks after different cycles

无论是哪一种岩性的裂隙岩石,其胀缩率 κ 都随冻融次数的增加而增大。花岗岩从1次到50次时, κ 由2.29增大到3.48,千枚岩的 κ 由0.64增大到4.05,泥质砂岩的 κ 由0.33增大到4.37,辉绿岩的 κ 则由2.1增大到3.67。泥质砂岩和千枚岩的胀缩率

变化幅度比花岗岩和辉绿岩的要大,是因为泥质砂岩和千枚岩的孔隙率较大,其孔隙和微裂隙较发育,所以在冻胀冷缩阶段的回弹空间较大。回弹性越好,其胀缩率的变化幅度就大。同时泥质砂岩和千枚岩的矿物颗粒剥落程度比花岗岩和辉绿岩的矿物颗粒剥落程度大得多,所以其 κ 的变化速率极快。根据试验得到不同岩性的裂隙岩石的 κ 随冻融次数的增加都呈指数增大,但随着冻融次数的增加,胀缩率变化程度也不同,这主要也与不同岩样的孔隙率特征有关。

4 恒定温度下裂隙岩石冻融应变试验

该试验是在试验前将冰箱温度设定到不同的恒定温度下进行的。其试验步骤与上一个试验类似,主要测定在不同的恒定温度下,岩石在冻胀阶段的最大微应变值,每1种岩样做3次试验,取其平均值,试验结果如表5所示。

表5 不同恒定温度下裂隙岩石的最大微应变均值
Table 5 The maximum microstrain of fractured rock at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大微应变/ 10^{-6}			
	辉绿岩	花岗岩	千枚岩	泥质砂岩
-5	51	37	32	14
-10	75	51	50	20
-15	94	82	73	31
-20	186	161	96	44
-25	237	224	164	87
-30	441	310	191	115
应变差值	390	263	159	101

根据表5试验结果,绘制4种岩石最大微应变均值与不同恒定温度的关系曲线,见图7。

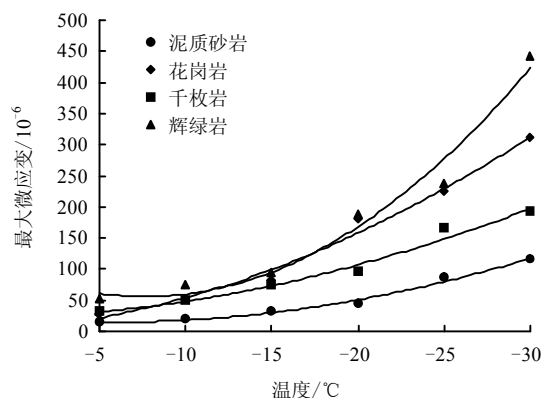


图7 不同恒定温度下岩石冻胀最大微应变均值拟合曲线
Fig.7 Fitting curves of the maximum microstrain of rocks at different temperatures

从图可以看出,不同岩性的裂隙岩石的最大微应变随恒定温度的减小都呈二项式增大,且增大速率各异。花岗岩从 -5°C 到 -30°C 时其冻胀最大微应变由 $27\text{ }\mu\epsilon$ 增大到 $310\text{ }\mu\epsilon$,千枚岩的最大微应变由 $32\text{ }\mu\epsilon$ 增大到 $191\text{ }\mu\epsilon$,泥质砂岩的最大微应变由 $14\text{ }\mu\epsilon$ 增大到 $115\text{ }\mu\epsilon$,辉绿岩最大微应变则由 $51\text{ }\mu\epsilon$ 增大到 $441\text{ }\mu\epsilon$ 。不同岩性的岩石的冻胀最大微应变增大的幅度和速度各异。

根据试验可知,随着温度的降低,其增幅更大。这是因为它们的组成矿物主要以石英、长石等矿物为主,其内部结构是以硅酸盐矿物等晶体组成的架状结构,在低温下由于水的冻胀作用易使内部的架状结构发生变形,所以花岗岩和辉绿岩在冻融作用下的变形量更大,更易发生破坏。以上试验结果在现场调查时得到了证实,笔者在对天山公路沿线崩塌调查时发现,发育在花岗岩和辉绿岩等硬岩中的崩塌数量更多(见图8)。

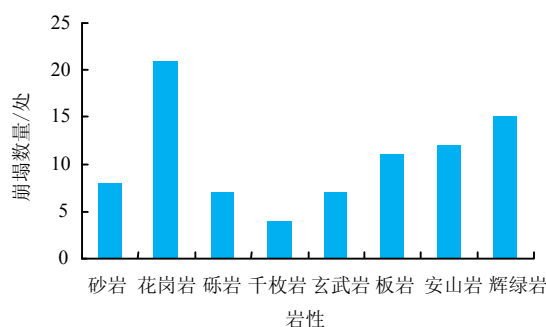


图8 天山公路沿线崩塌发育与岩性的关系

Fig.8 Relationship between the number of collapses and lithology along the Tianshan road

5 冻融作用下裂隙岩石的温度损伤特征

由上述的饱水冻融循环应变试验可知,试验中得到的微应变能较好地反映在冻融作用下裂隙岩石对环境温度的响应(见图9)。温度刚开始从正温降到 0°C 的过程中,由试验可知,裂隙岩石的微应变减小为负,说明裂隙岩石在收缩变形,主要是由于岩石内部的骨架颗粒遇冷冷缩造成的,此时会在岩石内部产生温度损伤;随着温度进一步降低,岩石中的水会结冰膨胀,产生冻胀力,引起冻胀损伤;而当冰冻结束,温度升高,冰开始融化成水,冻胀力消失,同时水沿着孔隙或者毛细孔通道向岩石内部渗透,为下一个冰冻时刻提供水分,并且,温度进一步升高,岩石内部骨架颗粒会产生体积膨胀,同样出现温度损伤,且损伤程度更大。如此反复冰冻和冰融,使造成的损伤越来越大,当各种损伤贯

通,裂缝就会出现,岩石破裂。因此,在循环冻融作用下,裂隙岩石更容易产生严重的风化破坏,导致岩石失稳。

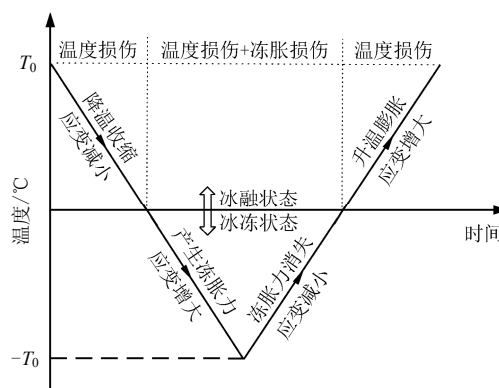


图9 一次冻融循环过程经历的温度损伤示意图

Fig.9 Schematic of damage during one freezing-thawing cycle

6 结 论

(1) 不同岩性的岩石在干湿两个环境条件下的冻融应变过程不同。饱水岩样的冻融应变过程分为8个阶段:冷缩阶段、冻胀阶段、冻缩阶段、升温迟滞阶段、热胀阶段、融缩阶段、融缩回弹阶段、融缩趋稳阶段;而干燥岩样的冻融应变过程可分为5个阶段:冷缩阶段、冷缩趋稳阶段、升温迟滞阶段、热胀阶段及热胀趋稳阶段。

(2) 不同岩样的微应变增幅程度主要与岩样的孔隙率相关。裂隙岩石的冻胀阶段的微应变最大值都随循环次数的增加而增大。泥质砂岩及辉绿岩的最大微应变随冻融次数的增加呈线性增大,而花岗岩及千枚岩的最大微应变随冻融次数的增加呈二项式增大。

(3) 干燥岩石基本未产生残余变形,而饱水裂隙岩石在冻融过程中会产生明显的残余变形。引入胀缩率 κ ,试验结果表明,裂隙岩石的 κ 都随冻融次数的增加而增大。胀缩率的变化程度与不同岩样的孔隙率特征有关。

(4) 温度对饱水岩石的冻融应变有很大的影响。不同岩性的裂隙岩石的最大微应变随恒定温度的减小都呈二项式增大,且增大速率各异,这主要是与不同岩样的内部组成结构有关。

(5) 饱水裂隙岩石在冻融过程中对温度的响应很敏感,其损伤主要有温度损伤和冻胀损伤,且两种损伤反复交替,裂隙岩石更容易产生严重的风化破坏,导致失稳。

参考文献

- [1] 徐数祖. 中国冻胀研究进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9(5): 13—19.
XU Xiao-zu. Progress of frost heave research in China[J]. **Advance in Earth Sciences**, 1994, 9(5): 13—19.
- [2] 赖远明, 张明义, 李双洋. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, LI Shuang-yang. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 吴紫汪, 刘永智. 冻土地基与工程建筑[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
WU Zi-wang, LIU Yong-zhi. Frozen soil foundation and architectural projects[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005.
- [4] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing, et al. Permafrost in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] 李宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 268—272.
LI Ning, CHENG Guo-dong, XIE Ding-yi. Geomechanics development in civil construction in Western China[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(3): 268—272.
- [6] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133—143.
QI Ji-lin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 133—143.
- [7] 李杰林. 基于核磁共振技术的寒区岩石冻融损伤机理实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
LI Jie-lin. Experiment study on deterioration mechanism of rock under the conditions of freezing-thawing cycles in cold regions based on NMR technology[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [8] NICHOLSON H, WN 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.
- [9] 周科平, 许玉娟, 李杰林, 等. 冻融循环对风化花岗岩物理特性影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊 1): 70—74.
ZHOU Ke-ping, XU Yu-juan, LI Jie-lin, et al. Experimental study of freezing and thawing cycle influence on physical characteristics of weathered granite[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(Supp.1): 70—74.
- [10] 母剑桥, 裴向军, 黄勇, 等. 冻融岩石力学特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 103—108.
MU Jian-qiao, PEI Xiang-jun, HUANG Yong, et al. Experimental research on mechanical characteristics of rock with cycles of freezing-thawing acting[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2013, 21(1): 103—108.
- [11] 吴刚, 何国梁, 张磊, 等. 大理岩循环冻融试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2930—2938.
WU Gang, HE Guo-liang, ZHANG Lei, et al. Experimental study on cycles of freezing-thawing marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp. 1): 2930—2938.
- [12] YAMABE T, NEAUPANE K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(7): 1029—1034.
- [13] HORI M. Micromechanical analysis of deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials[J]. **International Journal of Engineering Science**, 1998, 36(4): 511—522.
- [14] 刘成禹, 何满潮, 王树仁, 等. 花岗岩低温冻融损伤特性的实验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(1): 37—40.
LIU Cheng-yu, HE Man-chao, WANG Shu-ren, et al. Experimental investigation freeze-thawing damage characteristics of granite at low temperature[J]. **Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)**, 2005, 20(1): 37—40.
- [15] 何国梁, 张磊, 吴刚. 循环冻融条件下岩石物理特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 52—56.
HE Guo-liang, ZHANG Lei, WU Gang. Test study on physical characteristics of rock under freezing-thawing cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.2): 52—56.
- [16] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙冻胀压力及对岩体造成的劣化机制初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1530—1542.
LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Preliminary study of frost heave pressure and its influence on crack and deterioration mechanisms of rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1530—1542.
- [17] 王铁行, 杨涛, 鲁洁. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 72—78.
WANG Tie-xing, YANG Tao, LU Jie. Influence of dry density and freezing-thawing cycles on anisotropic permeability of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.1): 72—78.