

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103073

冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究

戚利荣¹, 王家鼎¹, 张登飞¹, 张永双², 李贞孝¹, 孙嘉兴¹, 马剑飞²

(1. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要: 岩石的冻融破坏是高原地区工程建设中不可忽视的自然灾害之一。冻融作用下岩石矿物的不均匀收缩和孔隙水冰相变导致岩石内部孔隙扩展造成的岩石损伤, 对工程稳定具有极大的威胁。为了研究冻融循环下花岗岩的损伤规律, 以川藏铁路沿线理塘县毛娅坝盆地乱石包高位远程滑坡为研究对象, 针对滑带上花岗岩, 通过冻融循环试验模拟高原寒冷的气候环境变化, 对冻融循环后的花岗岩进行单轴压缩、电阻率和电镜扫描(SEM)试验, 从宏微观多尺度综合探讨冻融循环作用对花岗岩损伤劣化的规律。从试验研究中发现: (1) 冻融循环过程中花岗岩质量变化呈先减小后增大再减小的趋势, 这与冻融循环引起试样表面颗粒掉落和内部裂隙扩展双重作用有关; (2) 随着冻融循环次数增大, 花岗岩的单轴抗压强度、弹性模量和黏聚力皆呈非线性衰减趋势, 而内摩擦角仅在平均值附近微小波动; (3) 当冻融循环次数增加时, 由宏微观试验所确定的冻融损伤因子和冻融荷载耦合作用下的总损伤因子都呈增长趋势, 说明冻融次数对于花岗岩的抗压强度影响较大。研究结果可为高原地区工程建设中衡量花岗岩冻融强度特性提供参考依据。

关键词: 冻融循环; 花岗岩; 电镜扫描; 电阻率; 分形维数; 损伤因子; 川藏铁路

中图分类号: TU458⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0065-09

A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles

QI Lirong¹, WANG Jiading¹, ZHANG Dengfei¹, ZHANG Yongshuang², LI Zhenxiao¹,
SUN Jiaking¹, MA Jianfei²

(1. Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: Freezing-thawing damage to rocks is one of the natural disasters that cannot be ignored in engineering construction in plateau regions. Under the action of freezing and thawing, uneven shrinkage of rock minerals and freezing of pore water lead to rock damage caused by pore expansion in rocks, which poses a great threat to engineering stability. In recent years, many researchers have conducted a lot of researches on rock properties under freezing-thawing conditions through theoretical and experimental methods. However, most of the previous studies focused mainly on sedimentary rocks such as sandstones, and very few studies were involved in freezing-thawing of granites in highland alpine regions. In this study, the granite on the landslide area was subjected to uniaxial compression, resistivity and electron microscope scanning (SEM) tests to discuss the damage of granite after

收稿日期: 2021-03-22; 修订日期: 2021-06-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504703); 国家自然科学基金项目(41907233); 中国地质调查局地质调查项目(20190505, DD20201123)

第一作者: 戚利荣(1995-), 男, 博士研究生, 研究方向为工程地质。E-mail: qlrwu@163.com

通讯作者: 王家鼎(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文地质与工程地质研究。E-mail: wangjd@nwu.edu.cn

multiple freezing-thawing cycles by simulating the cold climate changes on the plateau under freezing-thawing cycles. From the macro and micro multi-scale studies it can be found that: (1) the change of granite quality during freezing-thawing cycles tends to decrease, then increase and finally decrease, which is related to the dual effect of particle drop on the surface of the specimen and the expansion of internal fissures caused by freezing-thawing cycles. (2) As the freezing-thawing cycles increase, the uniaxial compressive strength, elastic modulus and cohesion of granite all show a non-linear decay, while the internal friction angle only fluctuates slightly around the mean value. (3) When the number of freezing-thawing cycles increases, both the freezing-thawing damage factor and the total damage factor under the coupling of freezing-thawing and load increase, which indicates that the number of freezing-thawing cycles has a greater influence on the strength of granite. The results of the study can provide a reference basis for measuring the freezing-thawing strength characteristics of granite in engineering construction in the plateau region.

Keywords: freezing-thawing cycles; granite; SEM; resistivity; fractal dimension; damage factor; Sichuan-Tibet Railway

川藏铁路对我国西部大开发战略和西藏经济社会发展具有重大战略意义。作为全球构造最活跃、气候变化最敏感、地表隆升最快和地形地貌差异最大的地区,川藏铁路的施工建设与长期运营面临许多重大科学与工程技术问题,其中高位远程滑坡及其灾害链对铁路工程的危害成为迫切需要解决的重大工程地质问题之一^[1]。高位远程滑坡作为极具破坏力的地质灾害之一,常表现出巨大的体积和能量、超常速度、超常滑距和异常高流动性等许多“令人惊异”和“迷惑不解”的现象^[2-3]。伴随着全球气候变暖,冰川退缩,导致极端天气等异常气候事件频繁出现,在高山峡谷区诱发了一些罕见的高位远程滑坡,如易贡、白格和乱石包巨型高位远程滑坡^[4-8],给跨江大桥和隧道进出口工程的建设及安全运营构成严重的威胁,迫切地需要开展高位远程滑坡的触发机理研究。其中冻融循环的风化作用引发温度场和力场耦合,易导致节理岩体物理力学性质发生显著变化,成为诱发高位远程滑坡不可忽视的重要因素,冻融循环作用下岩石的力学特性劣化机制研究急需开展。

岩体因存在天然缺陷易受到冻融环境影响而产生损伤,冻融损伤过程实质上为反复冻胀荷载作用于缺陷引起的疲劳演化过程。在冻融循环作用下,一方面岩石矿物胀缩不均匀性会导致其内部受力集中而产生裂隙^[9];另一方面岩石孔隙水冰的相变会导致其膨胀,使得岩石内部裂隙扩展和新的裂隙产生,当雨雪入渗裂隙后反复冻结会加剧裂隙的发育,二者共同影响最终导致岩石结构破坏。近年来,许多学者在冻融循环作用下岩石的宏观力学特性、微细观结构演化以及损伤力学特性多尺度研究方面已进行了较为深

入的研究,在宏观力学方面,重点关注了冻融循环条件对不同岩性、孔隙率、含水状下岩石力学参数(如抗压强度、变形模量、剪切强度、动态力学参数等)损伤演化的影响,探讨其内在损伤机制及评价模型^[10-14];在细观演化方面,建立了基于CT识别岩石细观损伤理论,定量分析了岩石细观结构损伤过程^[15-16];在微观结构演化方面,基于扫描电镜技术重点讨论冻融循环作用对岩石微裂纹(微孔隙)损伤特征的定性定量研究^[17]。总体而言,开展冻融环境下岩石损伤力学特性研究多针对砂岩等沉积岩,对于高原高寒地区的花岗岩冻融循环劣化机制的多尺度综合研究较少涉及。

本文以川藏铁路沿线理塘县毛娅坝盆地乱石包高位远程滑坡为对象,针对滑带上花岗岩通过冻融循环试验模拟高原寒冷的气候环境变化,对多次冻融循环后的花岗岩进行单轴压缩、电阻率和电镜扫描(SEM)试验,从宏微观多尺度综合探讨冻融循环作用对于花岗岩损伤劣化规律,为高原地区工程建设中衡量花岗岩冻融强度特性和下一步探究冻融作用对高位远程滑坡的影响提供参考依据。

1 研究方案

1.1 试样采集与制备

乱石包滑坡位于川藏铁路沿线理塘县毛娅坝盆地,滑坡体积大约为 $85.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 占地面积 4.25 km^2 , 滑坡后壁顶部高程为 $4\,931 \text{ m}$, 堆积区前缘的盆地高程为 $4\,111 \text{ m}$, 滑坡最大高差约 820 m , 滑体最大运动距离为 $3\,830 \text{ m}$, 主滑方向为 210° , 属于典型的高位、高速远程滑坡(图 1)^[18]。在滑带部位采取新鲜完整岩块,并平稳地运回实验室,以备开展室内试验。

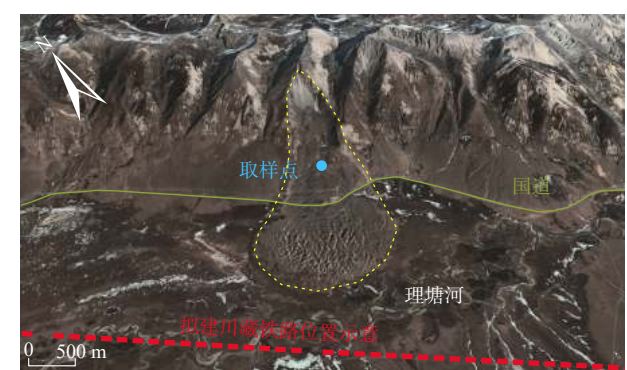


图 1 乱包石滑坡及取样点位置

Fig. 1 The Luanshibao landslide and the sampling site

根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013), 制备可供多次冻融循环与力学测试的标准圆柱体岩样, 直径为 50 mm, 高 100 mm, 误差不大于 0.3 mm。对加工后的岩样从外观上剔除差异较大的部分岩样, 并利用室内波速测试技术筛选出波速相近的花岗岩试样, 测定其物理性质指标。为了保证试验物理参数的可靠性, 通过 5 组平行试验, 获得花岗岩的基本物理性质指标的平均值, 见表 1。

表 1 花岗岩的物理力学性质

Table 1 Basic physical properties of the granite specimen					
岩性	干密度/ (g·m ⁻³)	饱和密度/ (g·m ⁻³)	孔隙率/%	吸水率/%	饱和吸水率/%
花岗岩	2.64	2.68	0.38	0.48	0.56

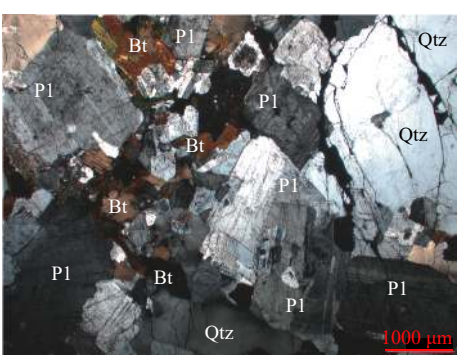
另外, 将所取花岗岩样品制薄片, 通过在偏光显微镜下观察样品的岩相特征, 获得其主要成分为石英 (Qtz)、斜长石 (Pl) 和黑云母 (Bt), 并含有少量角闪石 (Amp), 见图 2。

1.2 试验方案及方法

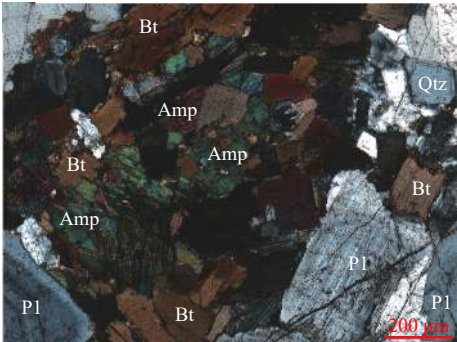
为开展冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究, 分别开展了冻融循环、电阻率、单轴抗压和电镜扫描试验。

(1) 冻融循环试验

为强制饱和岩石试样, 先采用煮沸法煮沸 6 h, 在容器中冷却至室温后, 再用真空抽气法进行强制饱和, 真空时压力值为 -0.1 MPa, 抽气时间为 3 h, 抽完进水浸泡 24 h, 待岩样饱和后进行冻融循环处理。根据当地历史平均气温变化, 预设循环温度分别为 -20 ~ 20 ℃; 基于申艳军等^[1]对岩石冻融循环试验的研究成果并结合《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013) 相关规定, 每个冻融循环周期预定为 8 h, 即利用低温箱降温至预设温度 -20 ℃, 保持 4 h 低温冰冻, 再在预设温度 20 ℃ 的保温水桶中保持 4 h 融化, 以保证试样完



(a) 放大12.5倍



(b) 放大50倍

图 2 偏光显微镜下花岗岩岩相特征

Fig. 2 Granite petrographic features under the polarized light microscope

全冻胀和融化。依次对不同组别试样分别进行 $N=0, 20, 40, 60, 80, 100, 120$ 次共 7 种次别的冻融循环处理。每次冻融循环结束后测定每个试样的质量, 以分析其质量变化规律。

(2) 电阻率试验

岩石的电阻率指标反映了岩石内部孔隙和裂隙发育程度以及岩石内部损伤。为表征冻融循环作用对岩石物质成分和孔隙结构的综合影响, 用自主研制的电阻率测试仪(图 3)对经历不同冻融循环次数的花岗岩岩样开展电阻率试验, 测定不同冻融循环作用下

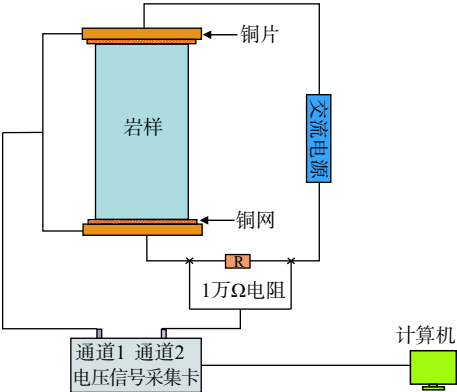


图 3 电阻率测试装置示意图

Fig. 3 Resistivity testing device

岩石电阻率参数的演化过程。进行试验时,将冻融循环后的试样擦干表面水分,再利用电阻率测试仪测试岩石电阻动态变化,利用式(1)即可得到电阻率变化;试验设置的电源频率为 20 Hz。

$$\rho = RS/L \quad (1)$$

式中: ρ ——样品电阻率/($\Omega \cdot m$);

R ——样品实测电阻值/ Ω ;

S ——样品底面积/ m^2 ;

L ——样品高度/ m 。

(3) 单轴压缩试验

为研究冻融循环对岩石宏观力学特性损伤演化的影响,对经历不同冻融循环次数的花岗岩岩样,用济南恒思盛大仪器公司的 YADW-1000 型微机控制单轴试验机进行单轴压缩试验,分析不同冻融循环次数下岩样的应力-应变特性、单轴抗压强度特性和弹性模量变化规律,探讨冻融循环因子与冻融循环次数之间的关联性。试验以位移控制进行加载,其速率为 0.5 mm/min,直至试样破坏。

(4) 电镜扫描试验

为研究冻融循环对岩石微观孔隙结构演化的影响,对经历不同冻融循环次数的花岗岩岩样,用 FEI 公司生产的 Quanta 450 FEG 型场发射环境扫描电子显微镜进行电镜扫描试验,分析冻融循环作用下岩石的微观特征,探讨其微观孔隙结构的特征参量(分形维数)变化规律,获取分形维数与冻融循环次数之间的关联性。试验所用圆柱样品直径 50 mm,高 50 mm,实验中放大倍数为 400 倍,每次扫描固定点图像。

2 试验结果与分析

2.1 冻融循环对试样质量变化与电阻率的影响

部分岩样样品经历冻融循环后的质量变化见表 2。考虑到不同岩样质量之间的差异性,采用冻融后质量与未冻融质量之比的质量变化率来表征冻融循环前后花岗岩质量变化,如图 4 所示。可见,经过 120 次冻融循环后,所有的花岗岩均没有出现肉眼可见的破碎裂纹和大碎块的剥落,仅有少量的颗粒掉落。岩石质量整体呈单调减少趋势(最多减少了 0.95 g),但其质量变化率呈先减小后增大再减小的趋势。冻融循环次数在 40~60 次阶段,出现了增长趋势,其质量增加量最大为 0.31 g。这可能与冻融循环引起试样表面颗粒掉落和内部裂隙扩展双重作用有关。一方面,冻融循环作用会引起岩样表明颗粒掉落,引起其质量减小;另一方面,由于冰的冻胀和融缩作用,造成岩石内

部微孔隙不断增大以及在岩样内部产生了新的微孔隙,从而使得水分向岩石内部迁移,导致质量增大。最终岩样质量变化率呈现出何种现象,取决于这两方面所占的比重,若颗粒脱落占主导,则岩样质量变化率最终表现为减小趋势;若裂隙扩展占主导,则岩样质量变化率最终表现为增加趋势。

表 2 花岗岩质量测试结果
Table 2 Quality changes of marble specimen after freezing-thawing

样品编号	试样质量 N/g						
	0	20	40	60	80	100	120
1	534.80	534.46	534.40	534.53	534.31	534.04	534.15
2	528.12	527.82	527.72	528.03	527.96	527.62	527.57
3	522.56	522.21	522.10	522.18	522.01	521.74	521.71
4	530.61	530.09	530.08	530.12	529.98	529.77	529.66
5	520.29	519.93	519.80	519.97	519.81	519.50	519.47

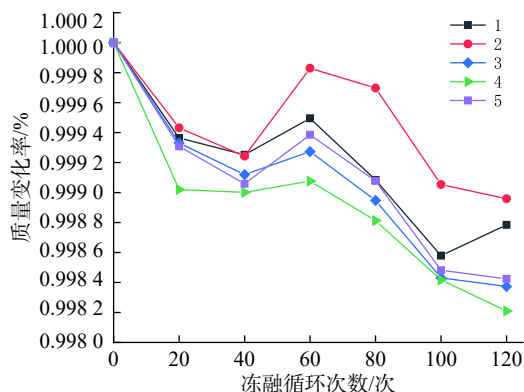


图 4 冻融循环后岩石质量变化率
Fig. 4 Quality changes of marble specimen after freezing-thawing

基于试验测定的岩石电阻,得到不同冻融循环后试样的电阻率变化(图 5)。可见,花岗岩的电阻率随着冻融次数增加呈非线性单调减小趋势;当 $N \leq 40$ 次时,岩石电阻率呈陡变降低趋势,当 $N > 40$ 次时,其变化速率明显减小,呈缓变减小趋势。这一变化反映了冻胀力致使岩石内部产生损伤,孔隙与裂隙增多,水分沿着裂隙进入岩石内部充填,导致岩石电阻率不断减小,在冻融循环达 40 次时,影响最为凸显; $N > 40$ 时虽然再次冻融循环,但对岩石内部裂隙扩展的影响程度在逐渐降低。

2.2 冻融循环对试样微观结构的影响

不同冻融循环次数下花岗岩的电镜扫描(SEM)图像如图 6(a) 所示;将 SEM 图像进行二值化处理,并利用 MATLAB 的 Bwlabel 命令去除噪声,得到二值化后

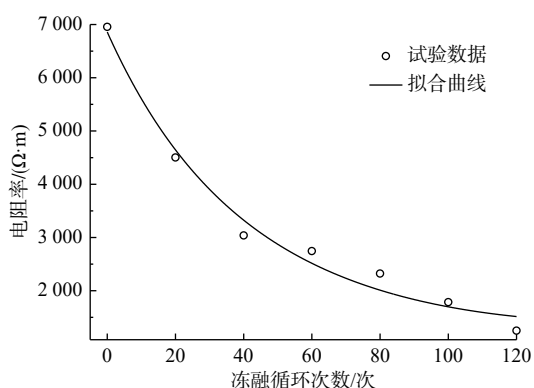
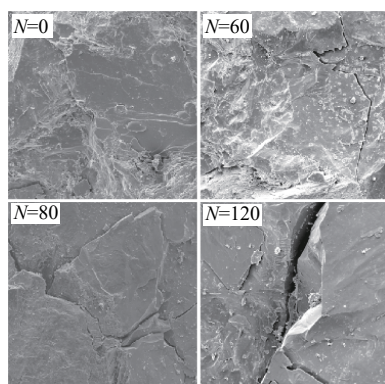
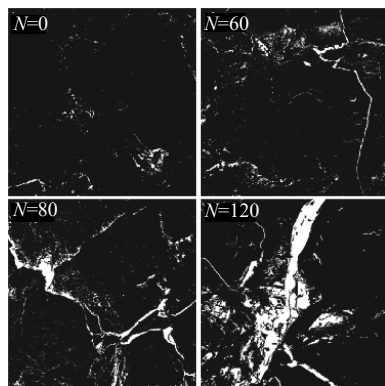


图5 冻融循环后花岗岩电阻率变化

Fig. 5 Changes in granite resistivity after freezing-thawing cycles



(a) 原始图像



(b) 二值化后图像

图6 冻融循环花岗岩的SEM图像(放大400倍)

Fig. 6 SEM images of freezing-thawing granite (magnification is 400)

的图像,如图6(b)所示。可见,未冻融时,岩石表面矿物颗粒明显,碎屑完整;N=60次时,岩石颗粒间裂隙增大,局部碎裂程度开始加剧,孔隙发育明显;随着冻融循环次数进一步增加,花岗岩的表面颗粒开始脱落,孔隙和裂隙不断扩展、融合,最终形成更大的裂隙或者破坏面。产生这一变化的原因主要是岩石与冰具有不同热物理性质。当温度降到0℃的过程中,

岩石内部产生温度损伤,裂隙岩石产生收缩变形;随着温度持续降低,岩石中水结冰膨胀而产生冻胀力,引起冻胀损伤造成裂隙扩展;当冰冻结束,温度升高,冰开始融化成水,冻胀力消失,水沿着孔隙或者毛细孔通道向岩石内部渗透,为后续冰冻时刻提供水分,同时温度的升高会出现温度损伤,引起岩石内部骨架颗粒产生体积膨胀。如此反复造成的损伤愈大,当各种损伤贯通,裂缝就会出现,岩石破裂。对于具有初始裂隙的岩石,循环冻融作用下更易产生严重的风化破坏,导致岩石失稳^[19]。

为定量描述冻融花岗岩的表面特征,采用盒维数法构建岩石的分形结构,利用分形维数表征岩石内部的孔隙与裂隙特征,即取边长为 n 的正方形划分二值化降噪后的图像矩阵,将黑色或者白色区域记作 $M(n)$,得到盒子数 $M(1), M(2), \dots, M(n)$,其中 n 取2的整数次幂, n 趋于0时,即可得到分形维数 D ,其表达式为:

$$D = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{\lg M(n)}{\lg n} \quad (2)$$

分形维数越大,说明岩石内部不同孔径的孔隙数越多并共存,反之,则说明孔隙结构单一,大孔隙数增多^[20]。由此,对图6(b)采用双对数坐标对盒子个数与尺寸进行线性回归,即可得到不同冻融循环次数下花岗岩的分维数(直线斜率),绘出分形维数与冻融循环次数之间关系(图7)。可见,随着冻融次数的增加,花岗岩的分形维数呈现出阶段性增长的趋势。 $N \leq 20$ 次时, D 随着 N 的增加呈微增长阶段,即岩样的孔隙与裂隙受冻融循环次数的影响较小; $20 < N \leq 80$ 次时, D 随着 N 的增加呈陡增阶段,即冻融循环次数在该范围内,岩样的孔隙与裂隙更为复杂,呈现加速扩展趋

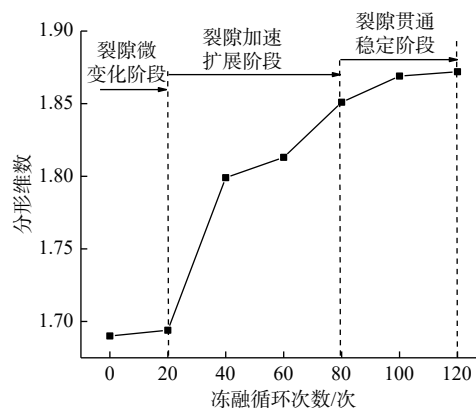


图7 花岗岩的分形维数与冻融次数关系

Fig. 7 Fractal dimension of granite in relation to the number of freezing-thawing

势; $80 < N \leq 120$ 次时, D 随着 N 的增加呈缓慢增长趋于稳定趋势, 说明岩样的孔隙与裂隙逐渐贯通而形成主裂隙, 冻融循环的影响程度随之降低。这与冻融循环下岩石的宏观电阻率变化规律基本一致。

2.3 冻融循环对试样宏观力学特性的影响

不同冻融循环次数下花岗岩的单轴压缩全过程应力-应变曲线如图 8 所示。可见, 不同冻融循环次数下, 所研究的花岗岩应力-应变关系皆呈现典型的裂隙效应, 即初始加载时岩石中的裂隙被压密闭合, 由弹性变形逐渐向塑性变形过渡; 继续加载, 变形相较于应力增速更为凸显, 呈现出典型的“屈服平台”, 表明此阶段处于塑性屈服阶段; 再继续加载, 应力相较于应变增速更快, 应力-应变曲线有塑形屈服阶段转向强化阶段, 主要以局部破损上升变形为主, 并且逐渐扩大连接, 形成滑动剪切面, 此时强度达到峰值, 即岩石的单轴抗压强度 σ_{cf} ; 过了峰值后, 花岗岩迅速破坏, 强度迅速降低, 轴向应变变化较小, 横向应变继续增加, 表现出应变软化现象。

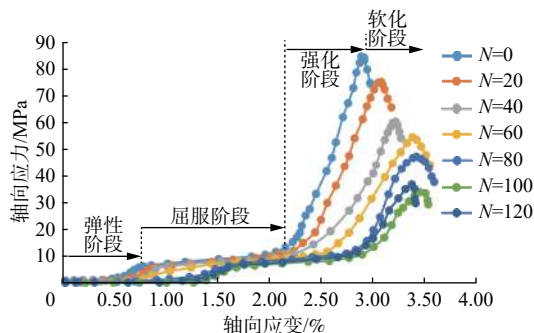


图 8 冻融花岗岩单轴压缩全过程应力-应变曲线

Fig. 8 Uniaxial compressive stress-strain curve of freezing-thawing granite

冻融循环作用对花岗岩力学特性影响显著, 随着冻融循环次数的增加, 岩石的应力-应变曲线呈现向右向下移动趋势, 即冻融循环次数愈大, 屈服的初始与终止阶段所对应的轴向应变愈大, 抗压强度愈小。说明在冻融循环过程中, 岩石内部裂隙与孔隙逐渐变大, 使得岩石内部的孔隙率逐渐增大。因此, 压密与屈服阶段逐渐变长。

由图 8 整理得到岩石的单轴抗压强度 σ_{cf} 和弹性模量 E 与冻融循环次数 N 的关系, 如图 9 所示。可见, 随着冻融循环次数增大时, 花岗岩的单轴抗压强度和弹性模量皆呈非线性衰减趋势, 例如经历 40, 80, 120 次冻融循环后, 其单轴抗压强度损失分别为 28.7%、44.3%、60%, 弹性模量分别降低了 39.3%、45.7%、

67.7%。充分说明随着冻融次数的增加, 岩石内部产生的损伤程度加剧, 劣化了岩石的宏观力学性能。

对于上述 $\sigma_{cf}-N$ 和 $E-N$ 关系用指数函数描述, 其表达式为:

$$\sigma_{cf} = \sigma_{cf,0} \exp(-k_1 N) \quad (3)$$

$$E = E_0 \exp(-k_2 N) \quad (4)$$

式中: σ_{cf} ——岩石的单轴抗压强度/MPa;

E ——岩石的弹性模量/GPa。

$\sigma_{cf,0}$ 和 E_0 表示 $N=0$ 时的单轴抗压强度和弹性模量, 其值分别为 84.04 MPa 和 10.42 GPa; k_1 和 k_2 为岩性参数, 反映单轴抗压强度与弹性模量随冻融循环次数衰减速率, 其值分别为 0.008 和 0.009, 二者数值近似相等。

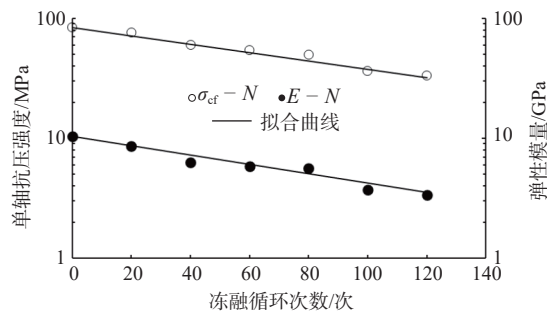


图 9 单轴抗压强度和弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig. 9 Uniaxial compressive strength and elasticity modulus as a function of number of freezing-thawing cycles

不同冻融循环次数下花岗岩单轴压缩破坏如图 10 所示。可见, 随着冻融循环次数的增加, 其破坏模式逐渐由剪切破坏向柱状劈裂模式和锥形压碎破坏模式转变, 对应的破裂角 β 呈现交替变化趋势, 即 $N=0, 20, 40, 60, 80, 100, 120$, β 分别为 24.8° 、 27.2° 、 17.7° 、 24.1° 、 29.1° 、 20.4° , 二者相关性不显著。可能的原因是花岗岩单轴压缩破坏形式及破裂面不仅受冻融循环次数的影响, 还与岩石的天然裂隙密切相关, 二者因素共同决定了最终破坏形态与破裂面角度。

假定冻融循环作用下花岗岩抗剪强度服从莫尔-库伦强度准则, 由此基于单轴抗压试验应力状态和破坏后的破裂角, 即可求得岩石抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 即

$$c = \sigma_{cf} \tan \beta \quad (5)$$

$$\varphi = 90 - 2\beta \quad (6)$$

由此基于图 9 与图 10 试验数据, 即可整理得到岩石抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与冻融循环次数 N 之间关系, 如图 11 所示。可见, 除冻融循环次数

$N=60$ 和 100 次情况外, 随着冻融循环次数的增加, 黏聚力 c 整体呈与之负相关性; 内摩擦角 φ 随之波动, 但整体上在其平均值附近上下微小波动, 可近似认为冻

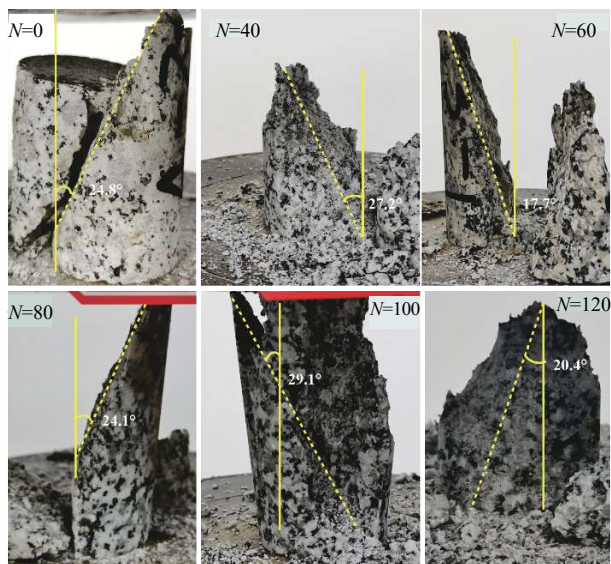
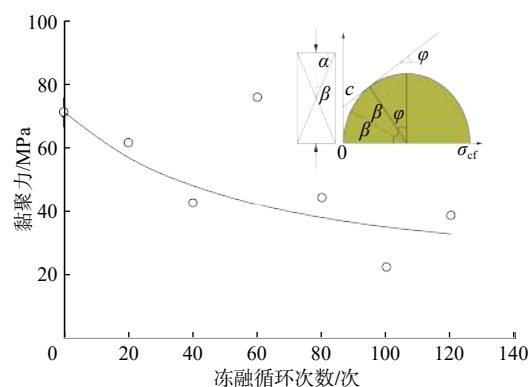
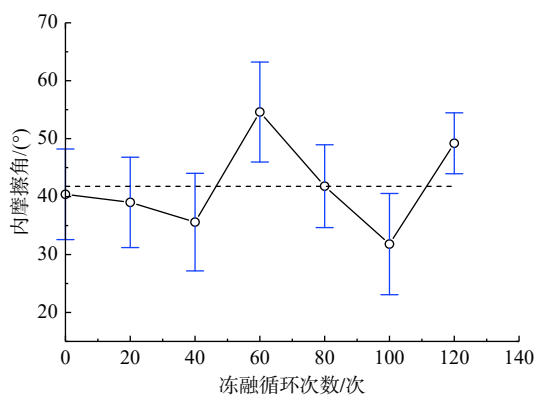


图 10 单轴压缩下花岗岩的破坏模式

Fig. 10 Failure modes of granite under uniaxial compression



(a) 黏聚力与冻融循环次数



(b) 内摩擦角与冻融循环次数

图 11 黏聚力和内摩擦角与冻融循环次数的关系

Fig. 11 Cohesion and internal friction angle as a function of number of freezing-thawing cycles

融循环次数的影响不大。

2.4 冻融循环作用下花岗岩的宏观损伤特性

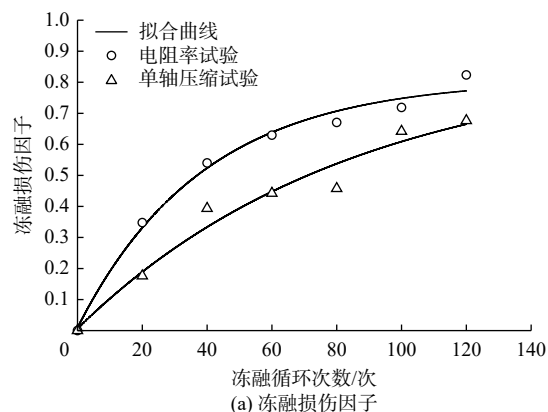
在冻融与荷载共同作用下, 岩石的总损伤既包括冻融导致具有初始裂隙的岩石扩展而出现局部损伤 (冻融损伤), 又包括冻融受荷致使岩石裂隙进一步压密、扩展和贯通的受荷损伤。借鉴张慧梅等^[10]思路, 基于宏观的电阻率和单轴压缩试验结果, 岩石的冻融损伤因子 D_{n0} 定义为:

$$D_{n0} = 1 - X_n/X_0 \quad (7)$$

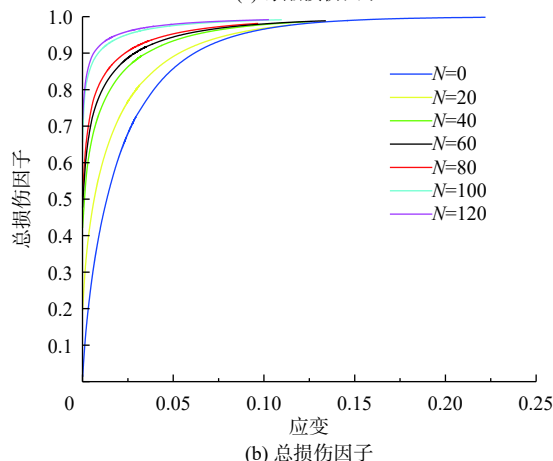
式中: X ——可分别选取宏观试验参数电阻率 ρ 或弹性模量 E ;

$n, 0$ ——分别表示冻融循环次数 N 和 0 次。

由此, 绘出花岗岩的冻融损伤因子 D_{n0} 随冻融循环次数 N 的变化趋势, 如图 12(a) 所示。可见, 随着冻融循环次数的增加, 由宏观试验确定的冻融损伤因子皆呈非线性增长趋势; 采用宏观的电阻率和弹性模量所确定的损伤因子程度接近, 即当冻融循环 120 次后造成岩石局部损伤程度约为 30%。



(a) 冻融损伤因子



(b) 总损伤因子

图 12 损伤因子与冻融次数关系

Fig. 12 Various damage parameters with the number of freezing-thawing cycles

对 D_{n0} - N 变化规律采用双曲线型拟合, 其表达式为:

$$D_{n0} = 1 - N/(a + bN) \quad (8)$$

其中, a 反映了冻融损伤因子随冻融循环次数的初始变化速率, b 反映了最大的冻融损伤程度。对于电阻率和单轴压缩试验, 本文所研究的花岗岩, a 值皆等于 0.746, 而 b 值分别为 55.2 和 85.3。说明采用宏观试验所揭示的冻融损伤因子初始变化速率相同, 而损伤程度有较为明显的差异。

基于岩石内部细观结构的非均质性和组成材料的各基本单元的力学性质分布是概率性的认识, 张慧梅等^[10]提出了在冻融与加荷作用岩石的总损伤演化方程:

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} e^{-\frac{1}{m} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{cf}} \right)^m} \quad (9)$$

式中: D_n ——总损伤因子;

m ——为材料损伤演化特征材料参数,

$$m = 1 / \ln \left(\frac{E_0 \varepsilon_n}{\sigma_{cf}} \right);$$

σ_{cf} ——峰值应力。

由图 8 试验结果可确定当 $N=0, 20, 40, 60, 80, 100, 120$ 时, 参数 m 值分别为 0.786, 0.683, 0.583, 0.532, 0.487, 0.423, 0.401。由此, 绘出花岗岩在加载与冻融共同作用下总损伤因子随应变与冻融循环次数变化规律, 如图 12(b) 所示。可见, 冻融损伤与加荷损伤存在耦合效应。相同损伤程度时, 随着冻融循环次数的增加, 岩石的应变值减小; 不同冻融次数条件下, 当损伤量 D 趋于 1 时, 其花岗岩的应变值相差较大, 说明冻融次数对花岗岩的抗压强度影响较大。相同应变值时, 随着冻融循环次数的增加, 总损伤量增大, 但增加的程度与应变值密切相关。

3 结论

(1) 120 次冻融循环后的花岗岩均没有肉眼可见裂纹出现, 岩石质量变化整体呈先减少后增大再减少趋势。

(2) 冻融循环后花岗岩的电阻率呈非线性减小趋势, 在冻融循环达 40 次时, 冻融影响最为凸显; 当大于 40 次时冻融循环对岩石变化的影响程度逐渐降低;

(3) 对冻融花岗岩的 SEM 图像进行二值化处理后发现: 冻融会导致岩石中孔隙和裂隙不断扩展融合而造成内部损伤, 数值上表现为分形维数的增大;

(4) 冻融循环导致花岗岩的单轴抗压强度、弹性模量和黏聚力减少, 但对内摩擦角影响不大;

(5) 冻融花岗岩的单轴破坏模式由剪切破坏向柱

状劈裂模式和锥形压碎破坏模式转变, 对应的破裂角呈现交替变化趋势;

(6) 随着冻融循环次数的增加, 由宏观试验确定的冻融损伤因子皆呈非线性增长趋势, 120 次冻融循环后造成岩石局部损伤程度约为 30%。

参考文献 (References):

- [1] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377 - 2389. [PENG Jianbing, CUI Peng, ZHUANG Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2377 - 2389. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 72 - 84. [CHENG Qiangong, ZHANG Zhuoyuan, HUANG Runqiu. Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(1): 72 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 边江豪, 李秀珍, 徐瑞池, 等. 基于贡献率权重模型的川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 84 - 93. [BIAN Jianghao, LI Xiuzhen, XU Ruichi, et al. Hazard zonation of large-scale landslides along Sichuan-Tibet Railway based on contributing weights model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 84 - 93. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 8 - 11. [YIN Yueping. Study on the characteristics and disaster mitigation of the giant landslide at BomiYigong Expressway in Tibet[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 27(4): 8 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡概况[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(2): 103. [YIN Yueping. Overview of the giant landslide of the Yigong Expressway, Bomi, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(2): 103. (in Chinese)]
- [6] 刘伟. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(3): 9 - 18. [LIU Wei. Study on the characteristic of huge scale-super highspeed-long distance landslide chain in Yigong, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(3): 9 - 18. (in Chinese with English abstract)]

- [7] GUO C B, ZHANG Y S, DAVID & R, et al. How unusual is the long-runout of the earthquake-triggered giant Luanshibao landslide, Tibetan Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2016, 259: 145 – 154.
- [8] 刘铮, 李滨, 贺凯, 等. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(4): 471 – 480. [LIU Zheng, LI Bin, HE Kai, et al. An analysis of dynamic response characteristics of the Yigong Landslide in Tibet under strong earthquake[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 471 – 480. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨更社, 申艳军, 贾海梁, 等. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 545 – 563. [YANG Gengshe, SHEN Yanjun, JIA Hailiang, et al. Research progress and tendency in characteristics of multi-scale damage mechanics of rock under freezing-thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 545 – 563. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张慧梅, 杨更社. 冻融岩石损伤劣化及力学特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(10): 1756 – 1762. [ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Experimental study of damage deterioration and mechanical properties for freezing-thawing rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(10): 1756 – 1762. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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. [SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1775 – 1782. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 吕文韬, 杨龙, 魏云杰, 等. 新疆塔县地区片麻岩冻融劣化机理与规律试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 95 – 100. [LYU Wentao, YANG Long, WEI Yunjie, et al. Research on mechanism of freezing-thawing deterioration of gneisses in the Taxian area of Xinjiang[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 95 – 100. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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 Guoliang, ZHANG Lei, et al. Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Sup 1): 2930 – 2938. (in Chinese with English abstract)]
- [14] NICHOLSON D T, NICHOLSON F H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(12): 1295 – 1307.
- [15] 杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测[J]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998. [YANG Gengshe, ZHANG Changqing. Rock damage and detection [J]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998. (in Chinese)]
- [16] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤扩展力学特性的 CT 分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(3): 250 – 254. [YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing, et al. CT analysis on mechanic characteristics of damage propagation of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(3): 250 – 254. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 贾海梁, 项伟, 谭龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(5): 879 – 895. [JIA Hailiang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 879 – 895. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 郭长宝, 杜宇本, 佟元清, 等. 青藏高原东缘理塘乱石包高速远程滑坡发育特征与形成机理[J]. *地质通报*, 2016, 35(8): 1332 – 1345. [GUO Changbao, DU Yuben, TONG Yuanqing, et al. Huge long-runout landslide characteristics and formation mechanism: A case study of the Luanshibao landslide, Litang County, Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(8): 1332 – 1345. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 裴向军, 蒙明辉, 袁进科, 等. 干燥及饱水状态下裂隙岩石冻融特征研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(7): 1999 – 2006. [PEI Xiangjun, MENG Minghui, YUAN Jinke, et al. Freezing-thawing characteristics of fractured rockmass under dry and saturated conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 1999 – 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 田威, 韩女, 张鹏坤. 基于 CT 技术的混凝土孔隙结构冻融损伤试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(11): 3069 – 3075. [TIAN Wei, HAN Nü, ZHANG Pengkun. Experiments on the freeze-thaw damage of concrete porous structure based on CT technique[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2017, 48(11): 3069 – 3075. (in Chinese with English abstract)]