

引用本文:张娜,赵伟征,罗水亮,等.基于单轴压缩与扫描电镜试验的冻融红砂岩损伤特性研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(4):153-162.

ZHANG Na,ZHAO Weizheng,LUO Shuiliang,et al. Research on damage characteristics of freeze-thawed red sandstone based on uniaxial compression and SEM experiments[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2023,40(4):153-162.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04082

基于单轴压缩与扫描电镜试验的冻融红砂岩损伤特性研究

张娜^{1,2},赵伟征^{1,2},罗水亮^{1,2},王帅栋^{1,2},王若晨^{1,2},李显亮²

(1. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:为研究冻融循环作用对岩石力学性能及微观结构的影响,以饱和红砂岩试样为研究对象,进行了不同冻融循环次数(0、5、10、15、20、30次)的冻融循环试验。通过单轴压缩试验,分析红砂岩试样在冻融循环作用下的力学性能变化规律;通过扫描电镜(SEM)试验,并借助 Image-Pro Plus 图像分析软件,定量地表征不同冻融循环次数下损伤岩石微观孔隙结构变化;最后基于岩石的损伤理论定量分析冻融循环红砂岩的损伤劣化特性。结果表明:在整个冻融循环过程中,红砂岩试样的质量变化率呈现出先增加后减小的趋势;随着冻融循环次数的增加,其单轴抗压强度、弹性模量和泊松比均逐渐降低;在冻融循环作用下,红砂岩试样表面颗粒剥落且胶结程度降低,颗粒间孔隙逐渐增大,微裂纹萌发、扩容、连通;随着冻融循环次数的增加,孔隙结构愈发均匀,表现为分形维数随冻融循环次数的增加逐渐减小;试验中的红砂岩抗冻性较差,其抗冻系数和冻融损伤程度随冻融循环次数变化较为明显,两者均可通过指数函数进行拟合;该研究对于寒区工程建设中衡量砂岩宏微观特性具有一定的参考价值。

关键词:红砂岩;冻融循环;力学性能;孔隙结构特征

中图分类号:TU458

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)04-0153-10

Research on damage characteristics of freeze-thawed red sandstone based on uniaxial compression and SEM experiments

ZHANG Na^{1,2}, ZHAO Weizheng^{1,2}, LUO Shuiliang^{1,2}, WANG Shuaidong^{1,2},
WANG Ruochen^{1,2}, LI Xianliang²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties and microstructure of rock, saturated red sandstone samples were taken as the research object, and freeze-thaw cycle experiments with different number of freeze-thaw cycles (0, 5, 10, 15, 20, 30)

收稿日期:2022-04-21

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41502264);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021YJSSB10);

中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(C202106013)

作者简介:张娜(1978-),女,工学博士,副研究员,博士生导师,E-mail:zhangn@cumtb.edu.cn。

were carried out. The variation of mechanical properties of red sandstone samples under freeze-thaw cycles was analyzed through uniaxial compression test. Through scanning electron microscopy (SEM) experiment, and with the help of Image-Pro Plus image analysis software, the changes of microscopic pore structure of damaged rock under different freezing and thawing cycles were quantitatively characterized. Finally, the damage degradation characteristics of freeze-thaw cycle red sandstone were quantitatively analyzed based on rock damage theory. The results show that the mass change rate of red sandstone samples increases first and then decreases during the whole freeze-thaw cycle. With the increase of freeze-thaw cycles, the uniaxial compressive strength, elastic modulus, and Poisson's ratio decrease gradually. Under the action of the freeze-thaw cycle, the particles on the surface of red sandstone sample are exfoliated and the degree of cementation is reduced. The pores between particles gradually increase, and the micro-cracks germinate, expand and connect. In addition, as the number of cycles increases, the pore structure becomes more uniform, showing that the fractal dimension decreases gradually with the increase of freeze-thaw cycles. The red sandstone in the test has poor frost resistance, and the frost resistance coefficient and freeze-thaw damage degree change significantly with the number of freeze-thaw cycles. Both can be fitted by the exponential function. This study has a certain reference value for measuring the macro and micro characteristics of sandstone in cold area engineering construction.

Key words: red sandstone; freeze-thaw cycle; mechanical property; pore structure characteristic

0 引言

中国寒区分布广泛,占疆土面积的六成以上^[1],冻融循环作用对寒区工程建设影响显著。在寒区工程建设及矿产开采进程中,冻融作用诱发工程灾害的事故频频发生。因此,系统研究冻融循环作用下的岩石力学性能及微观结构劣化规律,对于寒区工程的安全建设具有重要意义。

有关岩石冻融扩展损伤理论,大多数是在冻土研究成果上继承并发展。国外学者首先研究分析了冻融岩石的物理力学性质,但理论尚不完善。张慧梅等^[2-5]研究了不同类型冻融岩石在不同温度、不同围压等条件下的强度、应力-应变曲线等力学特性。为进一步探究冻融岩样物理量之间的关系,Yamabe等^[6]、吴刚等^[7]通过对冻融岩样开展试验研究发现冻融岩石的物理力学性质与不同温度、冻融时长及含水率之间的关系。Ni等^[8]、Tan等^[9]、郭长宝等^[10]、闻磊等^[11]分别设置不同循环次数、溶液酸碱性和冻融温度,观察并分析在化学场和温度场中冻融荷载花岗岩的单轴抗压强度等力学性能参数的变化规律。阎锡东^[12]从弹塑性力学理论出发,研究分析了岩石在冻融循环作用下的水冰相变损伤扩展演化机制,并建立了冻胀力与裂纹发育衍生特征之间的关系。

在岩石微观损伤检测技术方面,目前主要采用CT扫描技术^[13]、扫描电镜(SEM)技术^[14-15]、核磁共振技术^[16]、声发射技术^[17-18]以及数字图像处理技术^[19]等方法。王俐等^[20]利用CT扫描设备,对不同初始饱水状态下冻融岩石损伤劣化过程进行研究,并分析初始饱和条件与冻融损伤的相关性。为研究砂岩细观结构在冻融循环作用下的损伤演化特性,Li等^[21]利用核磁共振技术对冻融循环砂岩进行分析,研究表明岩石的质量和孔隙度随冻融循环次数的增加而增大,且在一定范围内砂岩孔隙结构具有分形特征。王劲翔等^[22]通过对饱和英安岩冻融压缩后的扫描电镜试验发现,岩石内部裂纹在冻融作用下产生和扩展,其劣化程度明显弱于颗粒的沉淀,最终趋于一定值。此外,为进一步研究冻融作用下岩石的力学损伤演化机理,黄路云^[23]开展冻融前后样品XRD、SEM和CT扫描等微观结构的分析,建立岩石在冻融作用下的损伤演化方程。

目前的研究主要是分析单一的宏观力学性能或微观结构的劣化规律,宏观与微观结合的研究还尚少。本文以四川某山区红砂岩为研究背景,对研究区域红砂岩试样进行冻融循环试验、单轴压缩试验,并结合X射线衍射、扫描电子显微镜等技术,综合分析岩石冻融损伤强度变化规律以及在整个冻融循环期间岩石微观孔隙结构演化机制,为该地区岩土

工程建设提供理论指导。

1 材料与试验

1.1 岩石样品

试验选用的红砂岩均取自四川某山区高速公路路基开挖段处新鲜无风化的大岩块。当地平均昼夜温差可达到 16℃ 以上,具有明显的高寒和大温差特点,冬季气候寒冷,时有寒潮和强冷空气活动,高寒冻融为危岩发育提供条件。

红砂岩试样制备场地是在中国矿业大学(北京)国家重点实验室进行,采用室内自动取芯从不规则的大岩块中,沿层理方向钻取出标准岩芯,岩芯直径 50 mm,高 100 mm。利用切割机切割试件并使用双面磨平机打磨,最终制备成所需的岩样,加工后的红砂岩试样如图 1 所示。根据循环试验次数和单轴压缩试验要求对试样进行编号。



图 1 加工后的红砂岩试样

Fig. 1 Processed red sandstone samples

1.2 X 射线衍射试验与扫描电镜试验

利用 XRD 试验仪对红砂岩试样进行试验,获取全岩矿物及黏土矿物成分,并利用 VP435 型电子显微镜对红砂岩试样进行扫描电镜试验,观察和分析冻融循环前后试样微观结构变化特征。借助 Image-Pro Plus 软件,计算出不同 SEM 图像中的孔隙直径、周长、表面积等孔隙结构参数,定量表征红砂岩试样吸附孔和渗流孔孔隙结构的非均质性。

1.3 冻融循环试验与单轴压缩试验

采用 AB-1000 型全自动冻融试验机对饱和红砂岩试样进行冻融循环试验,试验设备如图 2 所示。此次冻融试验研究设定冷冻温度为 -20℃,常温水解冻。根据冻融循环试验操作要求,设定一次循环冻融周期为 8 h(冷冻 4 h+常温融化 4 h),基于试验规范和研究区气候条件,将冻融循环次数设定为 0、5、10、15、20、30 次。

试验开始前,在常温下测定红砂岩试样的初始物理性质;将试验试样置于 105℃ 的干燥箱中干燥



图 2 冻融试验机

Fig. 2 Freeze-thaw testing machine

24 h,直到质量变化小于 0.1%,随即放入容器内冷却至室温,并测量记录质量;随后将红砂岩试样放入真空抽气缸内加水浸泡并加压饱和 4 h 后取出,用毛巾擦干表面水分,测量并记录质量;接着将饱和红砂岩试样放入冻融试验机箱内冷冻 4 h 后取出,放入恒温水箱中融解 4 h,即完成一次冻融循环,按照试验设定的循环次数,继续按上述步骤完成剩余冻融循环试验。冻融循环试验结束后,擦干试样表面水分,以备后续试验使用。

单轴压缩试验选用中国矿业大学(北京)国家重点实验室全自动液压伺服刚性 2 000 kN 三轴试验机,如图 3 所示。



图 3 2 000 kN 三轴试验机

Fig. 3 2 000 kN triaxial testing machine

2 试验结果

2.1 矿物成分分析

XRD 衍射矿物分析技术可以定性定量地分析晶体类矿物成分,可精确地得到岩土工程中沉积岩等全岩矿物和黏土矿物的百分含量(表 1、2)。从表

表 1 X 射线衍射全岩矿物成分分析结果

Table 1 X-ray diffraction whole rock mineral composition analysis results

样品岩性	矿物含量/%						
红砂岩	石 英	钾长石	斜长石	方解石	赤铁矿	浊沸石	黏土矿物
	24.7	3.6	38.6	7.9	1.9	15.9	7.4

表 2 黏土矿物 X-射线衍射分析结果

Table 2 X-ray diffraction analysis results of clay minerals

样品岩性	黏土矿物相对含量/%					混层比/%		
红砂岩	蒙皂石类	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	绿蒙混层	伊蒙混层	绿蒙混层
			17		3	80	50	

1、2 可以看出:原生矿物中主要为非黏土矿物的斜长石和石英,同时含有少量钾长石和黏土矿物,而黏土矿物属于次生矿物,多由原生矿物经风化、蚀变和沉积形成。在该试验测得的黏土矿物含量中,尤以绿蒙混层占比最多,伊利石相对较少。

2.2 质量变化

依照试验预先设定的环境,分别对不同冻融循环次数 n 下的饱和红砂岩试样进行质量测量,其中试样编号分别为 B-1、B-2、B-3。具体测量结果如表 3 所示,将测量的数据绘制在红砂岩试样冻融前后质量变化率曲线中,如图 4 所示。

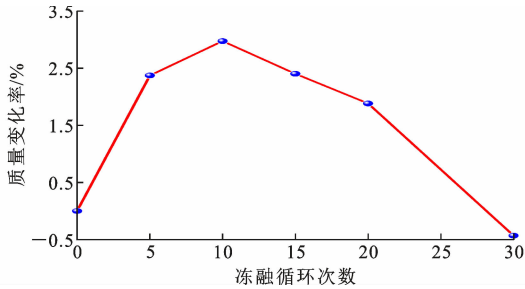


图 4 不同冻融循环次数下的饱和红砂岩试样质量变化率

Fig. 4 Mass change rate of saturated red sandstone samples under different freeze-thaw cycles

在整个冻融循环过程中红砂岩试样的质量变化率呈现出先增加后减小的趋势,前 10 次冻融循环作用下,试样质量逐渐增加,这主要是由于在前 10 次冻融循环过程中,试样表面开始出现游离颗粒、结冰并逐渐开始冻胀融缩,进而引起红砂岩试样内部裂

隙扩容贯通,水分渗入岩石内部造成质量增加,增幅可达 2.97%;10 次冻融循环之后,随着作用次数的增加,红砂岩试样表面颗粒片状剥落,水分难以进入试样内部,质量逐渐减小;30 次冻融循环时,红砂岩试样总质量减少 0.43%。整个冻融过程中红砂岩试样整体质量下降,主要原因是:在冻融循环期间,温度交替变化,试样内部的水分发生了冻结与融解,由此产生的冻胀力致使试样孔隙损伤,颗粒剥落,其中颗粒剥落的质量大于水分的质量;此外岩石在多次冻融循环之后,内部孔隙发育变缓,裂隙受到挤压,外界水分难以进入岩石内部,故 30 次冻融循环后红砂岩试样的质量表现为下降。

2.3 SEM 微观结构形态分析

为研究红砂岩的微观结构(颗粒间胶结物特征及孔隙类型变化),对经历不同冻融循环次数的单轴压缩后红砂岩试样进行扫描电镜试验,得到 SEM 图像,如图 5 所示。可以看出,原状红砂岩试样初始颗粒排列紧密,孔隙较小,微裂隙紧闭且表面平整。随着冻融循环次数的增加,红砂岩试样微观孔隙结构越来越疏松、颗粒间孔隙逐渐增大、微裂隙逐渐扩展、局部颗粒间胶结物被破坏并发生挤压及相对滑动。此外,在其表面附着的粉状物增多,在部分冻融后的红砂岩试样区域出现成簇的微裂隙,各裂隙之间相互贯通。冻融循环后的红砂岩试样产生了划痕位移,随着孔隙的不断增大,水分逐渐侵入岩石体内部,使红砂岩试样的微观孔隙结构愈来愈疏松。

表 3 不同冻融循环次数下的饱和红砂岩试样质量

Table 3 Mass of saturated red sandstone samples under different freeze-thaw cycles

试样编号	不同冻融循环次数下的红砂岩试样质量/g					
	$n=0$	$n=5$	$n=10$	$n=15$	$n=20$	$n=30$
B-1	480.56	492.69	495.78	493.62	491.92	481.51
B-2	479.68	492.84	496.78	493.28	489.92	478.15
B-3	481.35	490.26	491.82	489.32	486.83	475.76
平均值	480.53	491.93	494.79	492.07	489.56	478.47
质量变化率/%	0	2.37	2.97	2.4	1.88	-0.43

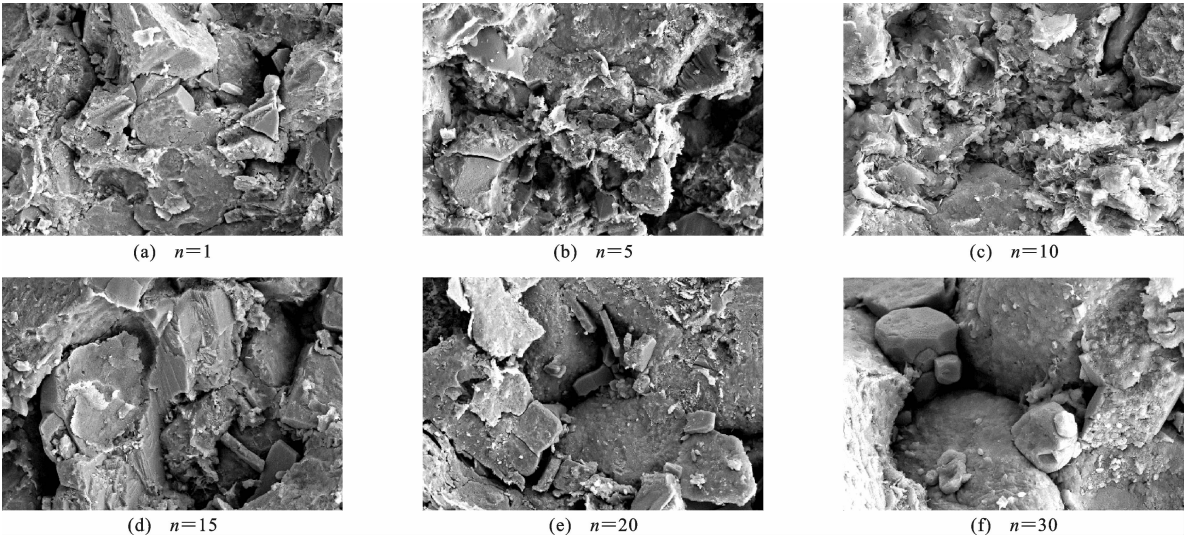


图 5 不同冻融循环次数下红砂岩试样 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of red sandstone samples under different freeze-thaw cycles

2.4 应力-应变及变形参数分析

不同冻融循环次数下的红砂岩试样应力-应变曲线如图 6 所示。由图 6 可知,各冻融循环次数下红砂岩试样应力-应变曲线变化趋势一致,主要包括压密阶段、弹性阶段、塑性阶段。在压密阶段,随着冻融循环次数的增加,试样轴向应变变化范围逐渐增大;在弹性阶段,随着冻融循环次数的增多,在曲线上表现为越来越短;在塑性阶段,冻融初期时岩石脆性较大,随着冻融循环次数的增加,岩石的脆性降低。

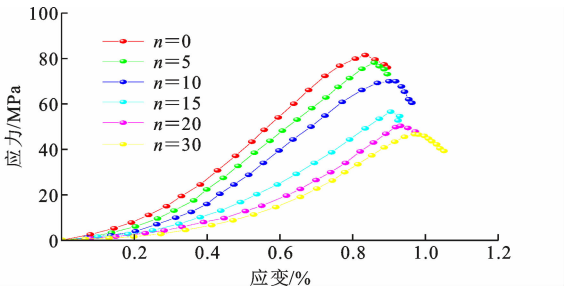


图 6 不同冻融循环次数下红砂岩应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of red sandstone under different freeze-thaw cycles

以冻融轴向荷载红砂岩试样全应力-应变关系曲线为基础,经计算分析得到不同冻融循环次数下试样的弹性模量 E 和泊松比 μ ,如表 4 所示。岩石的弹性模量是衡量岩石变形的一个重要指标,表示试样在单轴压缩试验中会表现出弹性的特征^[24]。试验中的弹性模量随着冻融循环次数的增加逐渐降低,从 13.629 GPa 降低至 6.687 GPa,降低了 50.94%。

随着冻融持续进行,岩石原生裂隙扩展且萌生新裂隙,孔隙加大引起水分渗入,继而岩石变形加

表 4 不同冻融循环次数下红砂岩试样弹性模量和泊松比

Table 4 Elastic modulus and Poisson's ratio of red sandstone samples under different freeze-thaw cycles

冻融循环次数	0	5	10	15	20	30
弹性模量 E/GPa	13.629	12.289	11.339	10.107	8.884	8.390
泊松比 μ	0.225	0.214	0.203	0.197	0.190	0.186

大。泊松比也从 0.225 降低至 0.186,降低了 17.3%。初期冻融循环作用对岩石影响较大,到后期随着作用次数增加,岩石冻融损伤破坏逐渐累积,红砂岩试样内部裂隙扩展,并形成网状结构,此时冻融损伤累积到一定程度,其承载力迅速降低,直至红砂岩试样被破坏,失去承载能力。

3 讨论与分析

3.1 抗压强度

冻融红砂岩试样的峰值抗压强度是表征岩石抵抗冻融劣化程度的一项重要力学性质指标,其随冻融循环次数的变化趋势见图 7。

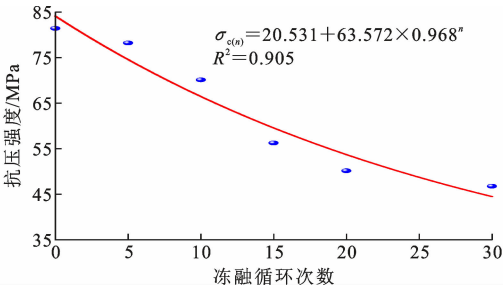


图 7 红砂岩试样抗压强度随冻融循环次数的变化趋势

Fig. 7 Variation trend of compressive strength of red sandstone samples with freeze-thaw cycles

通过对红砂岩试样的抗压强度与循环次数进行拟合,得到函数关系式为

$$\sigma_{c(n)} = 20.531 + 63.572 \times 0.968^n \quad R^2 = 0.905 \quad (1)$$

式中: $\sigma_{c(n)}$ 为红砂岩试样经历 n 次循环作用后的单轴抗压强度; R^2 为判定系数。

由图 7 可知,红砂岩试样的抗压强度随冻融循环次数增加逐渐降低。在经历了 5、10、15、20、25 次冻融循环后,岩样的抗压强度分别降低了 3.94%、13.88%、30.88%、38.38%、42.55%,表明冻融循环对岩样单轴抗压强度具有一定的劣化作用。由红砂岩试样抗压强度和冻融循环次数拟合的关系式可知,指数部分底数为 0.968,表明试样轴向抗压强度与冻融循环次数之间呈负相关关系,随作用次数的增大,强度逐渐减小。分析其原因主要在于冻融循

环试验中的低温冻结作用对红砂岩试样的结构造成不可逆转的损伤,冻结岩石在解冻后,红砂岩试样孔隙中的冰解冻为水,此时基本上是由试样自身承受来自外界的压力。随着冻融循环次数不断叠加,岩石的累积损伤逐渐变大,抵抗外界破坏的能力逐渐变弱,故冻融循环后的红砂岩试样的抗压强度低于初始强度。

3.2 分形维数

为进一步分析冻融循环红砂岩试样的孔裂隙区域分布变化,将得到的 SEM 图像导入 Image-Pro Plus 软件中,先对图像进行预处理,之后通过 Threshold 功能阈值分割得到二值化图像。以 5 次冻融循环和 20 次冻融循环图像为例,具体分析过程如图 8 所示。

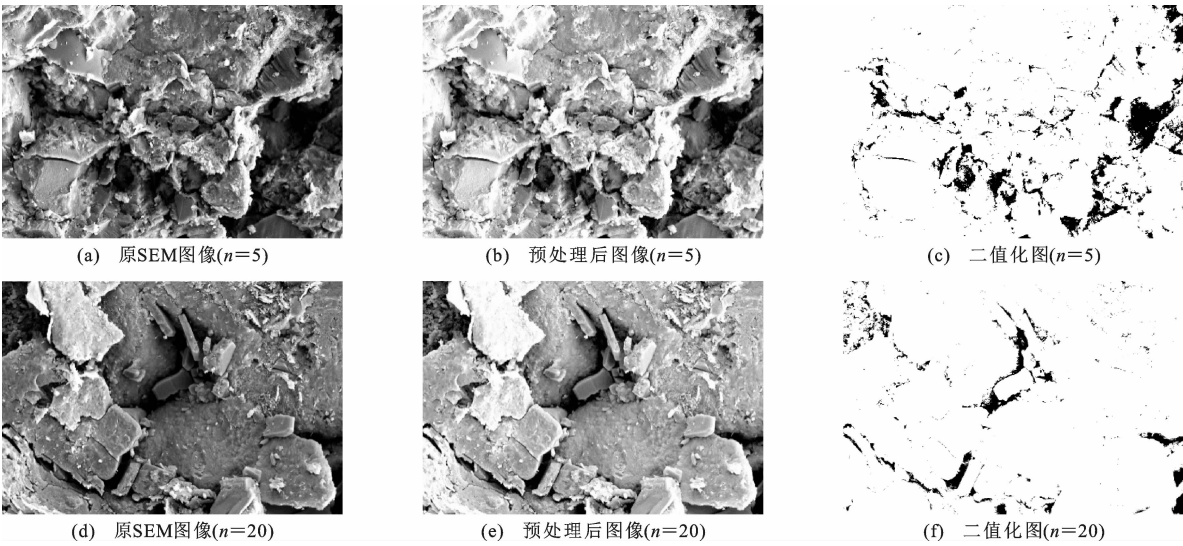


图 8 冻融循环 5 次和 20 次的红砂岩试样 SEM 图像处理过程

Fig. 8 SEM image processing of red sandstone samples after 5 and 20 freeze-thaw cycles

在图 8 的二化值图中,白色部分为基质,黑色部分为孔裂隙。参考 Dathe 等^[25]关于二维平面图像计算分形维数的公式,借助 Image-Pro Plus 图像处理软件测量孔隙周长和表面积,并将测量结果在双对数坐标系中建立对应关系(图 9),其表达式为

$$\lg(C) = \frac{D_i}{2} \lg(S) + C_i \quad (2)$$

式中: C 为孔隙周长; D_i 为第 i 种孔隙的分形维数; C_i 为系数; S 为孔隙的表面积。

由公式(2)可知,周长的对数与孔隙面积的对数呈线性关系,斜率的 2 倍即为分形维数的大小。

由表 5 可知,此次冻融循环试验中,分形维数的变化范围为 1.670~1.885,均值大小为 1.73(小于 2)。为进一步探究冻融红砂岩试样分形维数与冻融循环次数的相关性,运用 ORIGIN 2021 软件对表 5

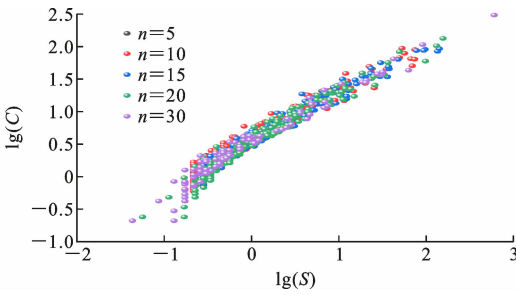


图 9 不同冻融循环次数下红砂岩试样分形维数处理过程

Fig. 9 Fractal dimension processing of red sandstone samples under different freeze-thaw cycles

中的分形维数与循环次数进行回归拟合,结果如图 10 所示。

经计算分析可知,冻融循环次数不断增加,红砂岩试样的分形维数逐渐减小,两者呈负相关关系,此

表 5 基于 SEM 图像的分形维数

Table 5 Fractal dimension based on SEM images

冻融循环次数	拟合公式	判定系数	分形维数
0	$y=0.942x+0.552$	0.947	1.885
5	$y=0.884x+0.522$	0.915	1.767
10	$y=0.882x+0.523$	0.957	1.764
15	$y=0.876x+0.460$	0.956	1.752
20	$y=0.870x+0.460$	0.956	1.739
30	$y=0.835x+0.460$	0.964	1.670

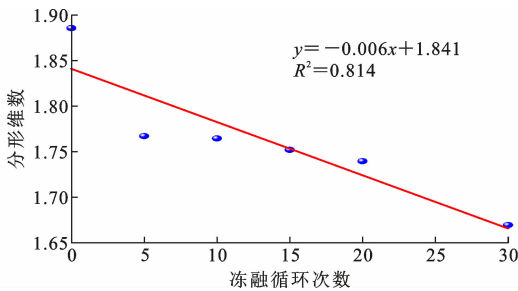


图 10 冻融红砂岩试样分形维数随冻融循环次数的变化趋势

Fig. 10 Variation trend of fractal dimension of red sandstone samples with freeze-thaw cycles

消彼长,判定系数为 0.814。由于在冻融循环过程中,低温环境中水产生的冻胀力致使红砂岩试样孔隙扩展贯通,而在融化时岩石中的孔隙水沿孔隙裂缝流动。多次循环往复水冰相交的过程使得岩石中的大孔隙逐渐增多,孔隙内壁被消磨得更平整、光滑,其内部结构复杂程度减小,岩石孔隙结构尺寸分布逐渐均匀,故分形维数降低。

3.3 抗冻系数

为了进一步量化分析岩石抵抗冻融破坏的能力,根据 JTG E41—2005^[26]引入另一个物理量——抗冻系数,可定量描述不同冻融循环次数下岩石抵抗冻融破坏的能力。抗冻系数是指各冻融循环次数作用后岩样的抗压强度与未冻融时水饱和岩样的抗压强度之比,即

$$K_f = \frac{R_f}{R_s} \quad (3)$$

式中: R_f 为冻融作用后红砂岩试样的抗压强度值; R_s 为冻融作用前红砂岩试样的抗压强度值; K_f 为抗冻系数,取值在 0~1 之间, K_f 越大,岩石抗冻破坏能力越强。

结合式(1)和式(3)可得出不同冻融循环次数下红砂岩试样抗冻系数的变化特征曲线,如图 11 所示。对图 11 中的曲线按指数函数进行拟合可得

$$y=0.718\exp\left(-\frac{n}{12.629}\right)+0.492 \quad R^2=0.939 \quad (4)$$

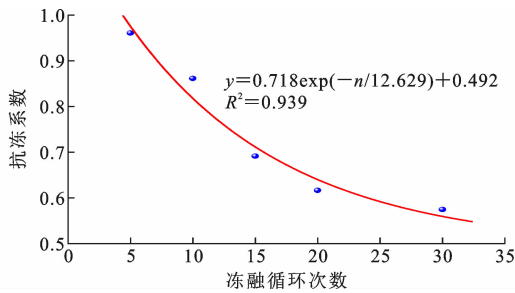


图 11 抗冻系数与冻融循环次数的拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of antifreeze coefficient and freeze-thaw cycles

由拟合曲线及拟合公式分析可知,不同冻融循环次数下的红砂岩试样抗冻系数存在差异,表明红砂岩在不同循环次数下所受的冻融损伤程度不同。试验中抗冻系数随作用次数的增加逐渐减小,在前 20 次冻融循环,抗冻系数急剧降低,之后逐渐趋于稳定,在达到 20 次冻融循环时,抗冻系数降为 0.62,表明环境的冻融作用对红砂岩的冻融损伤影响显著。

3.4 冻融损伤变量分析

随着冻融循环次数的增加,岩石中的水分在冻融环境中不断冻结融解并不断出现新的裂缝和破坏,新的裂缝在不断扩大,同时破坏在不断加深,最终可能导致岩石损伤破裂。张全胜等^[27-29]根据 Lemaitre 应变等价原理,将冻融岩石损伤状态定义为冻融损伤,即由作用在矿物颗粒及岩石微孔隙间的冻胀力与渗透力所引起的冻融损伤变量 D_n 表示,其计算公式为

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (5)$$

式中: E_0 为初始弹性模量; E_n 为 n 次冻融循环的弹性模量。

结合上述公式(5)及不同冻融条件下红砂岩试样的基本力学参数,绘制红砂岩试样在冻融作用下的损伤变量与冻融循环次数之间的变化关系,如图 12 所示。冻融作用对红砂岩试样的影响与冻融循环次数的变化关系经拟合后为

$$y=0.849(1-0.968^n) \quad R^2=0.979 \quad (6)$$

损伤变量与冻融循环次数呈现较好的正相关关系,判定系数为 0.979,表明该损伤变量可较好地表征冻融损伤程度。

在冻融循环作用下,红砂岩的损伤程度逐渐增大,在达到 30 次冻融循环时,由冻融产生的损伤程度已达到 50% 以上,按照式(6)的拟合关系推算,在 30 次作用之后红砂岩试样的损伤程度仍将逐渐增

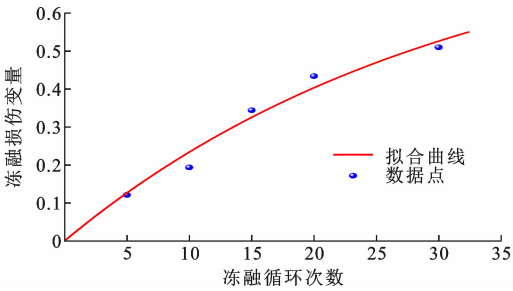


图 12 冻融损伤变量与冻融循环次数的关系
Fig. 12 Relationship between freeze-thaw damage variables and freeze-thaw cycles

加,但在此演化过程中,损伤变量的变化趋势有可能较缓于前 20 次冻融循环。

4 结 语

(1)随着冻融循环的进行,冻融红砂岩试样的质量呈现先增大后减小的趋势,而泊松比和弹性模量逐渐降低。

(2)随着冻融循环次数不断增大,红砂岩试样的塑性逐渐增大,而脆性逐渐降低,微裂纹发展迅速直至试样崩落破坏。此外,试样的抗压强度随着冻融循环次数的增加逐渐减小。

(3)未冻融红砂岩试样颗粒排列紧密,孔隙较小,微裂隙紧闭。随着冻融循环次数的增加,试样内部复杂程度降低,表现为分形维数逐渐降低,颗粒间孔隙不断增大,微裂隙扩展。

(4)随着冻融循环次数的增大,红砂岩试样在冻融循环作用下的抗冻系数逐渐递减,其损伤变量逐渐增加;两者与循环次数之间存在较好的相关性,均可与循环次数进行指数函数拟合。

参考文献:

References:

[1] 崔振伟. 季节性冻土隧道洞口段防冻保温技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2017.
CUI Zhenwei. Research on technique of antifreeze and preservation for tunnel portal in seasonal frozen regions[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.

[2] 张慧梅,夏浩峻,杨更社,等. 冻融循环和围压对岩石物理力学性质影响的试验研究[J]. 煤炭学报,2018, 43(2):441-448.
ZHANG Huimei, XIA Haojun, YANG Gengshe, et al. Experimental research of influences of freeze-thaw cycles and confining pressure on physical-mechanical characteristics of rocks[J]. Journal of China

Coal Society,2018,43(2):441-448.

[3] 杨更社,奚家米,李慧军,等. 三向受力条件下冻结岩石力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(3):459-464.
YANG Gengshe, XI Jiami, LI Huijun, et al. Experimental study of rock mechanical properties under tri-axial compressive and frozen conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3):459-464.

[4] 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.

[5] 杨更社,张全胜,蒲毅彬. 冻融条件下岩石损伤扩展特性研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(6):838-842.
YANG Gengshe, ZHANG Quansheng, PU Yibin. A study on the damage propagation characteristics of rock under the frost and thaw condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 838-842.

[6] YAMABE T,NEAUPANE K. 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.

[7] 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 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(S1):2930-2938.

[8] NI J,CHEN Y L,WANG P,et al. Effect of chemical erosion and freeze-thaw cycling on the physical and mechanical characteristics of granites[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(1):169-179.

[9] TAN X J,CHEN W Z,YANG J P,et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology,2011,68(3):130-138.

[10] 郭长宝,周家作,刘筱怡,等. 青藏高原东部冻融作用下花岗岩力学性质弱化机理研究[J]. 现代地质, 2017,31(5):943-955.
GUO Changbao,ZHOU Jiazuo,LIU Xiaoyi,et al. Research on the weakening mechanism of the mechanical

- behavior for the granite in the eastern Qinghai-Tibet Plateau under the condition of freezing-thawing cycles[J]. *Geoscience*, 2017, 31(5): 943-955.
- [11] 闻磊,李夕兵,唐海燕,等. 变温度区间冻融作用下岩石物理力学性质研究及工程应用[J]. *工程力学*, 2017, 34(5): 247-256.
- WEN Lei, LI Xibing, TANG Haiyan, et al. Study on physico-mechanical characteristics of rock under different frozen-thawed circle temperature range and its engineering application[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(5): 247-256.
- [12] 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): 2315-2322.
- YAN Xidong, LIU Hongyan, XING Chuangfeng, et al. Variability of elastic modulus in rock under freezing-thawing cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2315-2322.
- [13] ABDOLGHANIZADEH K, HOSSEINI M, SAGHAFYAZDI M. Effect of freezing temperature and number of freeze-thaw cycles on mode I and mode II fracture toughness of sandstone[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 105: 102428.
- [14] BERDNIKOV N V, KONOVALOVA N S, ZAZULINA V Y. Investigation of precious metal inclusions in highly carbonaceous rocks by the SEM and X-Ray spectrum analysis methods[J]. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2010, 4(2): 164-170.
- [15] WU X Y, BAUD P, WONG T F. Micromechanics of compressive failure and spatial evolution of anisotropic damage in Darley Dale sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(1/2): 143-160.
- [16] 赵杰,姜亦忠,王伟男,等. 用核磁共振技术确定岩石孔隙结构的实验研究[J]. *测井技术*, 2003, 27(3): 185-188.
- ZHAO Jie, JIANG Yizhong, WANG Weinan, et al. Investigation of rock pore structure using NMR technology[J]. *Well Logging Technology*, 2003, 27(3): 185-188.
- [17] 蒋宇,葛修润,任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(11): 1810-1814.
- JIANG Yu, GE Xiurun, REN Jianxi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(11): 1810-1814.
- [18] 张晖辉,颜玉定,余怀忠,等. 循环载荷下大试件岩石破坏声发射试验——岩石破坏前兆的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3621-3628.
- ZHANG Huihui, YAN Yuding, YU Huaizhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycling load — fracture precursor of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3621-3628.
- [19] 朱万成,康玉梅,杨天鸿,等. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术在流固耦合分析中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(12): 2087-2091.
- ZHU Wancheng, KANG Yumei, YANG Tianhong, et al. Application of digital image-based heterogeneity characterization in coupled hydromechanics of rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2087-2091.
- [20] 王俐,杨春和. 不同初始饱水状态红砂岩冻融损伤差异性研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(10): 1772-1776.
- WANG Li, YANG Chunhe. Studies on different initial water-saturated red sandstones' different damaged extension under condition of frost and thaw[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(10): 1772-1776.
- [21] LI J L, ZHOU K P, LIU W J, et al. NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze-thaw cycles[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(11): 2997-3003.
- [22] 王劲翔,丁军浩,邓辉,等. 冻融循环条件下英安岩的物理力学特性试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(17): 304-309.
- WANG Jinxiang, DING Junhao, DENG Hui, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of rock under the condition of freeze-thaw cycles[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(17): 304-309.
- [23] 黄路云. 低温循环冷冻作用下岩石损伤试验与机理研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2020.
- HUANG Luyun. Rock damage test and mechanism research under low temperature cyclic freezing[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.
- [24] 谌彪. 冻融循环作用下花岗岩损伤特性的试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2020.
- CHEN Biao. Experimental study on the damage characteristics of granite under the effect of freezing and thawing cycles[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [25] DATHE A, EINS S, NIEMEYER J, et al. The surface fractal dimension of the soil-pore interface as measured by image analysis[J]. *Geoderma*, 2001, 103(1/

2);203-229.

[26] 公路工程岩石试验规程:JTG E41—2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.

Test methods of rock for highway engineering:JTG E41—2005[S]. Beijing:China Communications Press, 2005.

[27] 张全胜,杨更社,任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(1):30-34.

ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(1):30-34.

[28] 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):1602-1611.

YUAN Xiaoqing, LIU Hongyan, LIU Jingping. A damaging model of jointed rock under coupled action of freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(8):1602-1611.

[29] 徐卫亚,韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(6):787-791.

XU Weiya, WEI Lide. Study on statistical damage constitutive model of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(6):787-791.