

不同初始饱和度红砂岩冻融后物理力学性质研究

沈世伟, 吴飞*, 甘霖, 姜满

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 对不同初始饱和度红砂岩冻融循环前后进行物理及力学试验研究, 探讨初始饱和度对红砂岩冻融损伤的影响。本文设定红砂岩试样初始饱和度为20%、40%、60%、80%、100%, 冻融次数设定为20次, 对冻融前后试样分别测定质量、纵波波速以及进行单轴压缩试验。试验结果表明: (1) 冻融后不同初始饱和度红砂岩的物理性质发生变化, 纵波波速降低、质量损失率增大, 但变化程度不同; (2) 随饱和度的增大, 试样经冻融后峰值强度和弹性模量均呈降低趋势, 但只有饱和度>60%时, 降低趋势较明显; (3) 随饱和度增大, 试样冻融系数逐渐减小。本文研究为寒区边坡工程治理、地下工程建设以及岩土地质灾害监测与治理提供理论依据和试验基础。

关键词: 红砂岩; 初始饱和度; 冻融循环; 物理力学性质; 冻融损伤; 寒区边坡工程治理

中图分类号: P584; TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)01-0120-09

Study on physical and mechanical properties of red sandstone with different initial saturation after freeze-thaw

SHEN Shiwei, WU Fei*, GAN Lin, JIANG Man

(College of Construction Engineering, JiLin University, Changchun Jilin, 130026, China)

Abstract: The effects of initial saturation on freeze-thaw damage on red sandstone were studied by physical and mechanical experiments before and after freeze-thaw cycles. The initial saturation of the red sandstone samples was set as 20%, 40%, 60%, 80% and 100%, and the number of freeze-thaw cycles was set as 20. The mass and p-wave velocity were measured, and uniaxial compression tests were conducted of the sample before and after freeze-thaw respectively. The experimental results showed that: (1) After freeze-thaw, the physical properties of red sandstone with different initial saturation have changed with the p-wave velocity decreasing, and the mass loss rate increasing. (2) With the increase of saturation, the uniaxial compressive strength and elastic modulus of the sample tend to decrease after freeze-thaw, but only when the saturation is greater than 60%, the decreasing trend is more obvious. (3) With the increase of saturation, the freeze-thaw coefficient decreases gradually. The study can provide theoretical basis and experimental basis for construction of geotechnical works and monitoring and control of geo-hazards in the cold region.

Key words: red sandstone; initial saturation; freeze-thaw cycle; physical and mechanical properties; freeze-thaw damage; slope treatment at the cold region

0 引言

我国是世界上寒区范围分布最广的国家之一, 约占我国国土面积的70%。寒冷地区岩石易受到冻融损伤作用, 导致岩石强度弱化, 进而引发一系

列的工程地质问题^[1]。寒冷地区岩石冻融损伤与温度、岩石性质以及饱和度有关。考虑到自然界中地理位置、气候条件以及水文地质条件的多样性, 因此岩体饱和状态存在差异性, 岩体内部裂隙的情况

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-01 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.01.016

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目“爆生气体作用下岩石裂纹的力学行为及扩展模型研究”(编号: 41502270)

作者简介: 沈世伟, 男, 汉族, 1982年生, 博士, 副教授, 研究方向为隧道与地下工程, 吉林省长春市西民主大街938号, ssw2580@jlu.edu.cn。

通信作者: 吴飞, 男, 汉族, 1995年生, 硕士研究生, 研究方向为隧道与地下工程, 吉林省长春市西民主大街938号, 1262315977@qq.com。

引用格式: 沈世伟, 吴飞, 甘霖, 等. 不同初始饱和度红砂岩冻融后物理力学性质研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 120-128.

SHEN Shiwei, WU Fei, GAN Lin, et al. Study on physical and mechanical properties of red sandstone with different initial saturation after freeze-thaw[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 120-128.

以及含水量对岩体冻融损伤具有重要影响。因此研究不同初始饱和度岩石冻融损伤对寒冷地区岩体工程具有重要意义^[2]。近年来,国内外学者针对冻融循环条件下岩石强度的劣化规律进行了大量研究。研究表明:含水岩石的冻融破坏实质是温度的变化导致岩石内部孔隙中的水经历冻融循环,水在冻结过程中发生水-冰的相变。在冰晶形成过程中,水的体积膨胀9%,因而岩石局部会产生集中应力,若应力大于岩石的抗拉强度,就会导致岩石内部原有的裂隙继续生长或者产生新的裂隙,导致岩体内部各类矿物成分的胶结度降低,进而导致岩体峰值强度降低^[3-9]。在相关研究中,Bayram^[10]研究探讨一个统计模型确定石灰石冻融循环后单轴抗压强度损失率,Liu等^[11]改进了基于冻融循环前后岩石性质来确定其强度的经验公式。针对冻融循环对岩石静态峰值强度劣化的影响,李杰林等^[12]以花岗岩为研究对象,建立了冻融循环次数与抗压强度之间的模型;就目前研究而言,冻融循环作用下岩石强度的劣化规律得到广泛的研究,但从定性的角度来说,得到的结论基本一致,即冻融循环作用下岩石的强度出现不同程度的劣化^[13-17],但劣化程度存在较大差异。主要集中于冻融循环次数对岩石强度劣化规律的影响研究,并通过数学公式拟合来建立两者的关系,缺乏能够描述冻融循环作用下岩石强度劣化规律的统一模型。然而,由于岩性不同,岩石的抗冻性能存在较大差异,经历相同冻融循环次数后,岩石强度的劣化规律截然不同。研究发现,干燥状态和饱水状态的岩石受冻融循环影响差别巨大,而且干燥岩石几乎不受冻融循环的影响,而含水岩石受冻融循环影响,或多或少都出现了损伤,有的甚至出现了完全破坏^[18-21]。

本文以红砂岩为研究对象,试样选自甘肃省兰州地区,选择该地区某边坡治理工程中顺层岩质边

坡表层滑体的红砂岩。该地区处于季冻区,昼夜温差 $>25\text{ }^{\circ}\text{C}$,考虑当地工程建设,尤其是边坡治理等工程,需要考虑岩石冻融作用的影响。本文设定不同初始饱和度,进行试样制备,在经历相同次数冻融循环条件下,研究其物理性质及力学性质的变化规律,分析不同饱和度红砂岩经冻融循环后的强度损伤劣化规律,为预测寒区岩体冻融破坏以及工程评价提供理论基础。

1 试验概况

1.1 试样制备

本文所选用试样质地均匀且无明显的裂隙。按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[22],将现场取回块状岩体加工成高度为100 mm、直径为50 mm的圆柱体标准试样,如图1所示。试样制备完成后,通过测定岩样的密度、波速,剔除差异较大的岩样,将剩余试样进行编号分为5组,每组6块试样,对试样进行烘干处理得到干质量 m_{dr} ,选用SHR型全自动智能真空饱水机进行饱水试验得到试样的饱和含水率,得到各试样物理参数如表1所示。



图1 筛选后试样

Fig.1 Selected samples

表1 红砂岩基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of red sandstone

干质量 m_{dr}/g	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	纵波波速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	饱和含水率 $W/\%$	孔隙率 $n/\%$
485.12~486.74	7.95~8.01	2338~2401	4.87~4.93	12.57~12.62

1.2 试验方案

1.2.1 不同初始饱和度红砂岩试样的制备

随机选取制备完毕的3块饱和试样用于研究不

同饱和度试样的制备,饱和度 c 根据试样的含水率^[17]计算,计算公式为:

$$W_a = m_a/m_{\text{dr}} \quad (1)$$

$$c = W_a / W \quad (2)$$

式中： W_a ——试样的含水率； W ——试样饱和含水率； m_a ——试样中水的质量； m_{dr} ——试验的烘干质量。

将选取的3块试样进行烘干处理,在整个烘干过程中每隔30 min将试样取出进行质量测定以确定试样的含水率。本文设定试验初始饱和度为20%、40%、60%、80%、100%，对应试样的含水率约为0.98%、1.95%、2.94%、3.93%、4.93%。由此确定对应饱和度试样的质量 m ,计算公式为：

$$m = c W m_{dr} \quad (3)$$

整个烘干过程中记录试样的质量变化规律,从而得到相应饱和度随烘干时间的变化规律如图2所示。

从图2可见,饱和试样在烘干过程中饱和度逐渐降低,在刚开始的3 h内饱和度变化相对较快。根据此试验可以确定相应饱和度试样的烘干时间约为1.5、3.5、7.5、12 h。将制作好的完全饱和试样

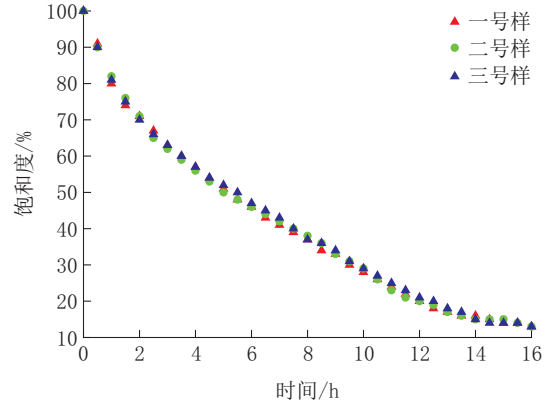


图2 试样饱和度随烘干时间关系曲线

Fig.2 Relation curve of sample saturation vs drying time

H1~H24,放入烘箱中,按照上述时间取出试样测定质量,得到不同饱和度试样,饱和度误差 $\geq 0.1\%$ 。制作好所有试样,重新测定其质量,利用RSM-SY6型基桩声波检测仪测定相应饱和度试样纵波波速并做好记录,如表2所示。

表2 不同饱和度试样基本物理指标

Table 2 Basic physical indexes of the samples with different saturation

编号	饱和度 $c/\%$	平均纵波波速 $v/(m \cdot s^{-1})$	平均质量 m/g	含水率 $W_a/\%$
1、2、3、4、5、6	20	1981	489.14	0.97~0.98
7、8、9、10、11、12	40	2122	494.12	1.93~1.95
13、14、15、16、17、18	60	2239	498.24	2.94~2.96
19、20、21、22、23、24	80	2308	504.18	3.91~3.93
25、26、27、28、29、30	100	2398	508.35	4.91~4.93

RSM-SY6型基桩声波检测仪检测的原理是穿透不同介质时纵波波速不一样,穿透速度:固体 $>$ 液体 $>$ 空气。随饱和度增大,试样内部裂隙中含水量越大,声波在试样内部传播时速度越快,因此纵波波速逐渐增大。

1.2.2 冻融循环试验

参照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)中岩石冻融试验操作规程,设置冻融参数:其中冻结温度为 $-20\text{ }^\circ\text{C}$,溶解温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,冻结和融化时间为4 h,根据岩样性质,设置最大冻融次数20次。试样每3块为1组,共5组。冻融后测定试样的质量以及纵波波速。冻融循环过程中温度变化曲线如图3所示。

1.2.3 单轴压缩试验

将制备好的不同饱和度红砂岩试样,每组3块

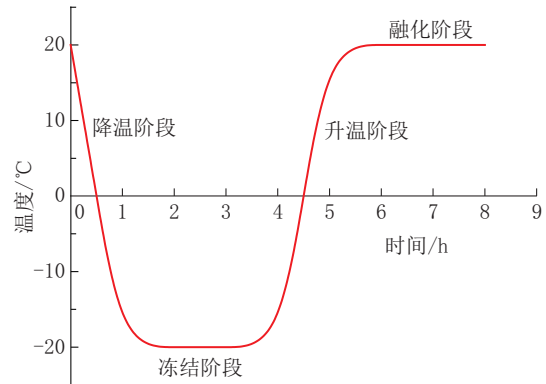


图3 温度变化曲线

Fig.3 Temperature change curve

直接进行单轴压缩试验。试验过程如下:将应变片呈“T”字形粘贴于试样中间部位,外接静态应变电阻仪采集压缩过程中应变数据,压缩试验设定加载

速率为 0.5 kN/s,记录所得数据。

2 试验结果分析

2.1 不同饱和度试样冻融前后物理性质分析

本文分别制备饱和度为 20%、40%、60%、80%、100% 的红砂岩试样,每组 3 块共计 15 块试样,将不同饱和度试样进行 20 次冻融循环。完成设定冻融循环周期后进行物理试验,通过测定每组试样平均质量得到试样质量损失率以及纵波波速,分析质量损失率及纵波波速的变化规律与饱和度之间的关系,如图 4 和图 5 所示。冻融后记录试样的形态变化(以饱和度 100% 试样为例)如图 6 所示。



图 6 经 20 次冻融循环后饱和度 100% 红砂岩试样
Fig.6 Red sandstone sample with 100% saturation after 20 freeze-thaw cycles

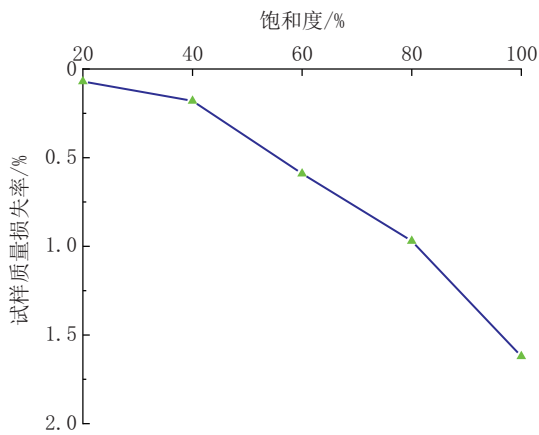


图 4 冻融后试样质量损失率

Fig.4 Quality loss rate of the samples after freeze-thaw

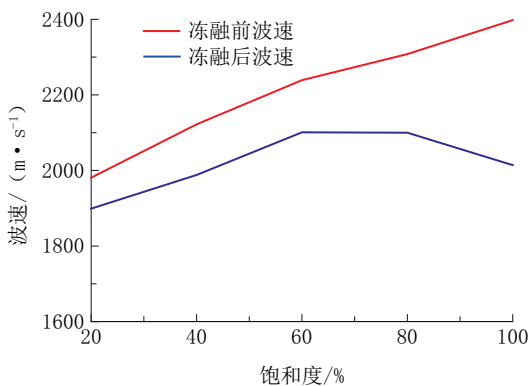


图 5 冻融前后试样波速变化

Fig.5 Change of sample wave velocity before and after freeze-thaw

由图 4 可得,不同初始饱和度红砂岩试样经历 20 次冻融循环后质量损失率呈不同趋势的变化。从饱和度 20% 至 100%,冻融循环后质量损失率损

失依次为 0.07%、0.19%、0.62%、1.08%、1.68%。饱和度 100% 试样,在经历 20 次冻融循环后表面出现裂纹以及剥落现象(如图 6 所示)。饱和度 100% 试样,岩体内部裂隙中充满水,如文献[23]提及冻融过程是由外及里进行,试样表层先受冻,与试样内部存在一定的温度梯度,而此时试样表层孔隙中的水分会发生水-冰的相变,从而会造成表层岩面会发生体积收缩。由于温度梯度的存在,试样内部会产生变形不协调的现象,进而造成对岩石表面产生一定拉应力,随冻融循环次数的增加,拉应力愈发增大,当集中拉应力大于岩石的抗拉强度时,试样则表现为表面产生裂隙,甚至是表层剥落的现象^[23]。

由图 5 可得,不同饱和度试样冻融后波速呈减小趋势,当试样饱和度为 80% 时波速开始出现明显的降低趋势,这是因为试样由外及里进行冻融循环,在整个冻融循环过程中,在冻结过程中水分受冻成冰,水的冻胀作用会对岩石孔隙壁产生一种张力,使原有的裂隙发展、孔隙裂纹增大,融化过程水分会渗透到新产生的裂隙中,周而复始,导致岩体内部裂隙更为发育^[24]。根据 RSM-SY6 型基桩声波检测仪检测原理,内部裂隙发育,试样的纵波波速降低。由于初始饱和度不同,试样内部裂隙中充水的情况不同,在经历相同冻融循环后,不同饱和度试样内部裂隙的扩展也不同,因此波速变化程度不同。根据试验可得,当试样饱和度 > 60% 时,试样纵波波速变化较明显,饱和度为 20%、40% 的试样,经冻融后纵波波速降低相对较小。因为饱和度较

低时,孔隙中未充满水分,试样经历冻融循环过程中冻胀破坏程度较小。

2.2 不同饱和度试样冻融前后应力-应变试验研究

对未经冻融以及经20次冻融循环后的试样进行单轴压缩试验,研究初始饱和度对冻融损伤的影响。所有试样压缩试验均在室内常温下进行,如图7所示。得到冻融前后不同饱和度红砂岩峰值强度、弹性模量基本数值如表3所示。根据试验结果绘制冻融前不同饱和度红砂岩试样单轴压缩应力-应变曲线如图8所示,冻融前后不同饱和度红砂岩试样单轴压缩应力-应变曲线如图9所示。



图7 单轴压缩试验

Fig.7 Uniaxial compression test

由试验可得,不同饱和度试样在经历20次冻融循环后抗压峰值强度以及弹性模量均有不同程度的降低。随着试样饱和度增大,单轴抗压峰值强度降低率越大,当试样初始饱和度为20%、40%时,冻融循环后抗压峰值强度降低率分别为6.67%、10.79%,初始饱和度为60%、80%、100%时,试样的峰值强度降低率达到30.61%、39.14%、50.15%。

表3 不同饱和度试样冻融前后峰值强度、弹性模量变化

Table 3 Changes in the peak strength and elastic modulus of the samples with different saturation before and after freeze-thaw

试样饱和度 c/%	冻融前平均峰值 强度 σ_t /MPa	冻融后平均峰值 强度 σ_t /MPa	峰值强度损失 率 $\Delta\sigma_p$ /%	冻融前平均弹性 模量 E_t /GPa	冻融后平均弹性 模量 E_t /GPa	弹性模量损失率 ΔE_p /%
20	37.88	35.35	6.67	3.21	3.15	1.81
40	32.89	29.34	10.79	2.99	2.79	6.69
60	29.26	20.28	30.61	2.45	1.92	21.63
80	23.04	14.02	39.14	2.02	1.41	28.22
100	16.17	7.84	50.15	1.78	0.94	47.21

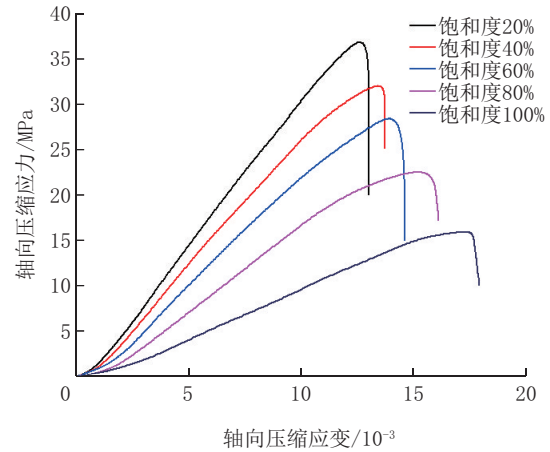


图8 冻融前不同饱和度试样应力-应变曲线

Fig.8 Stress vs strain curves of the samples with different saturation before freeze-thaw

由此可见,饱和度对冻融红砂岩强度影响较大。

从单轴压缩试验结果来看,未经冻融循环的不同饱和度试样的抗压峰值强度、弹性模量均随着饱和度的增大而呈降低趋势。当试样初始饱和度较低时,抗压峰值强度和弹性模量降低率相对较小,饱和度越高,峰值强度以及弹性模量降低率越显著。从微观角度进行分析,红砂岩中含有大量的粘土性矿物,这些矿物大多具有可溶性和膨胀性^[25]。由于这些矿物具有亲水特性,水分子易进入岩体内部进行渗透作用,导致矿物之间的胶结度和联结力降低,最终导致岩石强度降低。从宏观角度分析,水分在岩石内部迁移的过程中,大量具有可溶性的矿物及其它组分随着水分一起迁移、溶解,使得岩体内部形成更多的微小裂隙,这些微裂隙继续发展,使得岩石强度弱化^[26]。

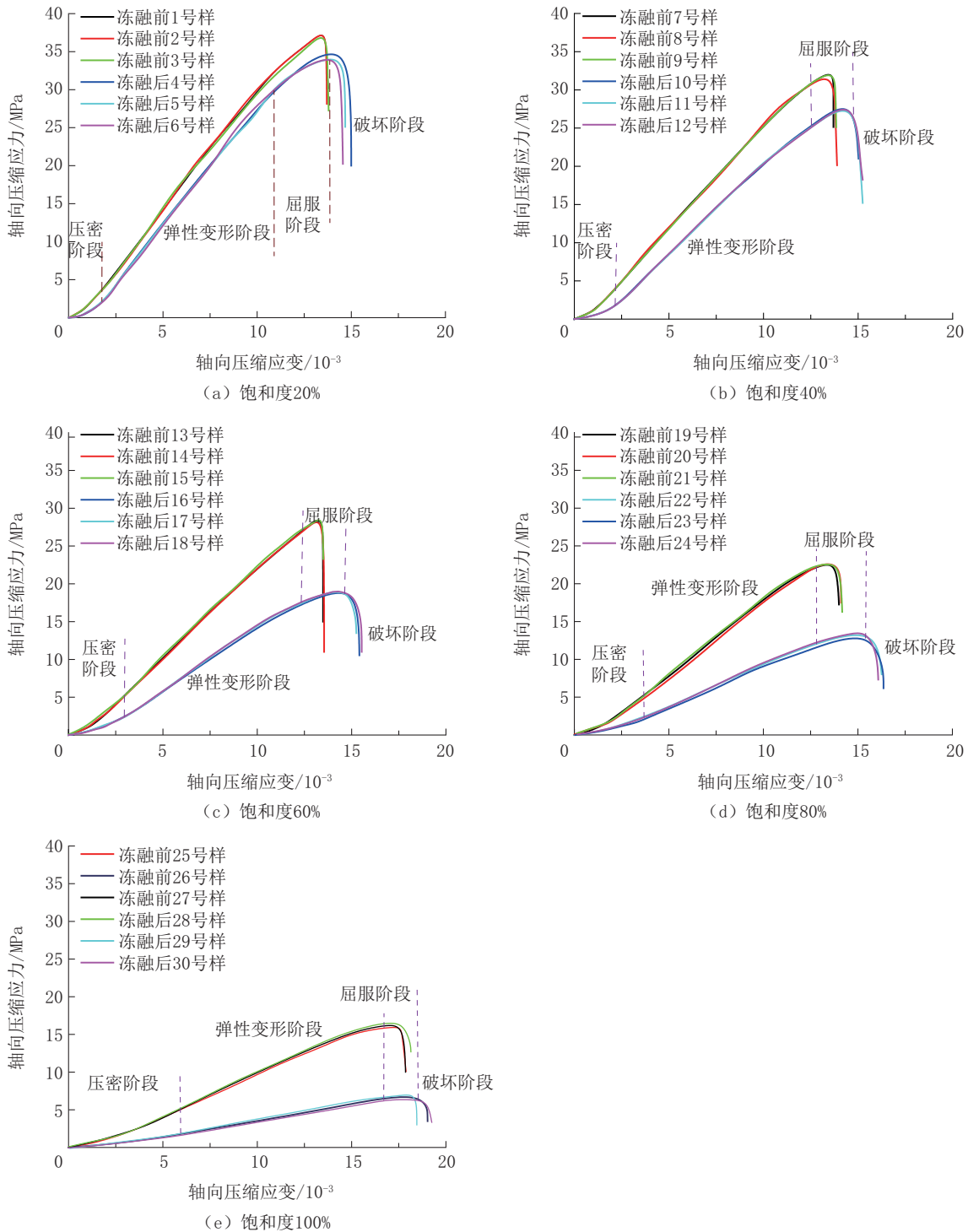


图 9 不同饱和度试样冻融前后应力-应变曲线

Fig.9 Stress vs strain curves of the samples with different saturation before and after freeze-thaw

由不同初始饱和度试样单轴压缩应力-应变可以看出,冻融试样从加载到变形破坏可划分为 4 个阶段,每个阶段都有不同的发展过程:(1)压密阶段,此阶段主要是岩石试样内部的孔隙被压缩,孔

隙率减小,曲线呈上凹型;(2)弹性变形阶段,随着荷载的增加,试样微裂隙进一步闭合,但此时仍属于弹性状态,曲线基本呈直线型;(3)屈服阶段,随着荷载的进一步增加,试样内部裂隙逐渐劈裂、扩

展,岩石矿物颗粒此时发生相对位移,此时曲线呈下凹型;(4)破坏阶段,此时试样表面产生裂纹,微裂隙扩展至表面,岩石破坏。

不同饱和度试样经冻融后峰值应力和应变发生变化,峰值强度降低,峰值应变增大。这是因为试样冻融过程本质是试样内部孔隙中的水分发生固液两相交替变化,此过程岩体内部的矿物颗粒会对应收缩膨胀,且这种变化是不均匀的、具损伤性的,具体表现在岩体内部的微裂隙逐渐延展、贯通直至损伤破坏。饱和度为20%、40%时,试样内部的孔隙仅存在少量水分,在经历冻融循环过程岩体内部水结冰时,冰晶的形成沿着裂隙中无水的方向扩展,对孔隙壁的张力较小,内部裂隙仅有小程度的发展,达不到贯通程度。当饱和度>60%时,内部裂隙中半充满或充满水,经历冻融循环过程,冰晶形成时会产生集中应力,作用于岩体内部使原有的裂隙扩展,岩体塑性增加,强度降低。

2.3 不同饱和度红砂岩冻融强度劣化研究

对经冻融循环后的试样进行单轴压缩试验,绘制不同饱和度红砂岩经冻融后峰值强度以及弹性模量的变化率如图10和图11所示。

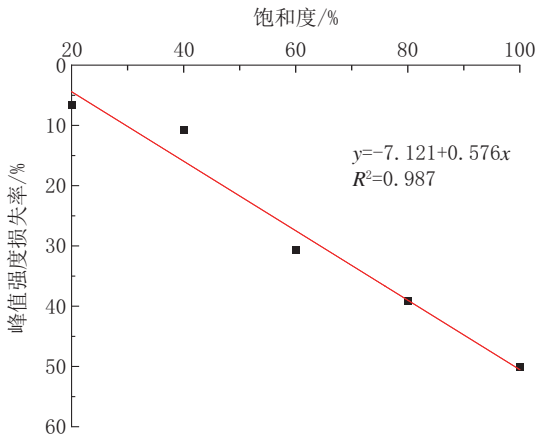


图10 不同饱和度试样冻融后峰值强度损失率

Fig.10 Loss rate of peak strength of the samples with different saturation after freeze-thaw

由图10~11可知,不同饱和度红砂岩经冻融循环后力学特性有不同程度的变化,当饱和度>60%时峰值强度和弹性模量降低率显著增加,且降低率与饱和度之间呈线性关系。

根据文献[24]给出的冻融系数公式:

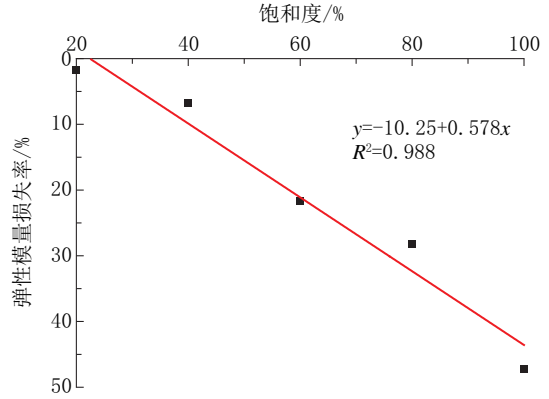


图11 不同饱和度试样冻融后弹性模量损失率

Fig.11 Loss rate of elastic modulus of the samples with different saturation after freeze-thaw

$$K_{fm} = \frac{\bar{\sigma}_f}{\sigma_f} \tag{4}$$

式中: K_{fm} ——试样的冻融系数; $\bar{\sigma}_f$ ——冻融后试样平均抗压强度; σ_f ——冻融前试样平均抗压强度。

由公式(4)计算出不同初始饱和度试验的冻融系数如表4所示。

表4 不同初始饱和度试样冻融系数

Table 4 Freeze-thaw coefficients of the samples with different initial saturation

饱和度/%	20	40	60	80	100
冻融系数	0.93	0.89	0.69	0.61	0.48

由表4可知,红砂岩冻融损伤与试样初始饱和度相关,在相同冻融循环次数条件下,随饱和度增大,冻融系数降低,当饱和度>60%时,出现明显的降低趋势,完全饱和试样冻融系数仅为0.48。

不同初始饱和度红砂岩试样经冻融后内部裂隙扩展,造成岩体内部损伤;而受荷时,加剧了内部裂隙的扩展、贯通最终破坏。在冻融荷载作用下岩石的损伤过程文献[26]给出具体的分析,并详细推导了冻融岩石受荷损伤本构关系。定义 D_m 为冻融受荷总损伤变量,则推导总损伤演化方程为:

$$D_m = 1 - \frac{E_1}{E_f} e^{-\frac{1}{m} (\frac{\epsilon}{\epsilon_n})^m} \tag{5}$$

式中: ϵ_n ——峰值应力对应的应变; m ——材料损伤

演化特征参数, $m = \frac{1}{\ln(\frac{E_f \epsilon_n}{\sigma_n})}$ 。

根据式(5)及冻融前后不同饱和度试样单轴压缩应力-应变数据计算得到的总损伤演化曲线如图12所示。定义 $\epsilon=0$ 时所对应的损伤值即为冻融总损伤值。

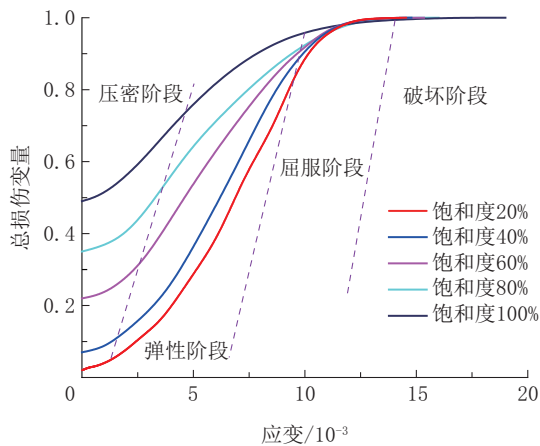


图12 不同饱和度试样冻融后总损伤演化曲线

Fig.12 Total damage evolution curves of the samples with different saturation after freeze-thaw

从图12可以看出,砂岩的冻融损伤变量随着饱和度的增大而增大,在此以饱和度为20%的试样为基准状态,随饱和度的增大冻融损伤变量依次为0.022、0.074、0.227、0.378、0.495。由图12可得,当试样饱和度为60%时冻融损伤加剧,随饱和度增大,总损伤变量增大最高达到49.5%。从图12看出,在压密阶段,试样总损伤变量的增幅较小,在弹性变形阶段时,总损伤变量快速增大,在屈服阶段时,总损伤变量增幅较小且逐渐趋向于1。

3 结论

(1)20次冻融循环后,不同饱和度红砂岩试样物理性质均发生变化,质量减小,纵波波速降低;饱和度 $>60\%$ 时,试样质量损失量开始变大,当饱和度 $>80\%$ 时,纵波波速降低开始出现明显变化趋势。

(2)初始饱和度不同,岩体内部裂隙充水情况不同,在经历冻融循环过程,水分在岩体内部的冻胀作用使原有的裂隙扩展,贯通产生不可逆损伤,且岩体内部损伤随饱和度增大而增大。冻融后试样的峰值强度降低率以及弹性模量降低率逐渐增大,当试样饱和度 $>60\%$ 时,峰值强度和弹性模量降低率开始出现明显降低趋势。

(3)在相同冻融循环条件下,初始饱和度 $>60\%$ 时,试样的总损伤远大于饱和度40%以下试样,在冻融与荷载共同作用下,饱和度20%试样总损伤变量为0.022,完全饱和试样总损伤变量达到0.495。可得,初始饱和度对红砂岩冻融损伤有加较大的影响,初始饱和度60%作为临界点,试样饱和度 $>60\%$ 时其力学性质表现出更为明显的劣化。

参考文献(References):

- [1] 宋勇军,张磊涛,任建喜,等.冻融后循环荷载作用下红砂岩力学特性试验研究[J].煤炭工程,2019,51(2):112-117.
SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, et al. Experimental study on mechanical properties of red sandstone under cyclic loading after freezing-thawing cycles[J]. Coal Engineering, 2019, 51(2):112-117.
- [2] 王俐.不同初始含水率红砂岩冻融损伤的试验研究及其机理分析[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2006.
WANG Li. Experiment studies and mechanism analysis on different initial water-saturated red sandstones under condition of frost and thaw[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [3] 郭海桥,程伟,尚志,等.水分和冻融循环对严寒矿区煤矸石风化崩解速率影响的定量研究[J].煤炭学报,2019,44(12):3859-3864.
GUO Haiqiao, CHENG Wei, SHANG Zhi, et al. Quantitative determination of the effect of moisture and freeze/thaw cycles on coal gauge decay rate in severe cold mining areas[J]. Coal Engineering, 2019, 44(12):3859-3864.
- [4] 孟祥振,张慧梅,康晓革.含孔隙冻融岩石的损伤本构模型[J].西安科技大学学报,2019,39(4):688-692.
MENG Xiangzhen, ZHANG Huimei, KANG Xiaoge. Damage constitutive model of porous rock under freeze-thaw[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(4):688-692.
- [5] 高峰,曹善鹏,熊信,等.冻融循环作用下受荷青砂岩的脆性演化特征[J].岩土力学,2020,41(2):445-452.
GAO Feng, CAO Shanpeng, XIONG Xin, et al. Brittleness evolution characteristics of cyan sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2):445-452.
- [6] 郑广辉,许金余,王鹏,等.冻融循环作用下层理砂岩物理特性及劣化模型[J].岩土力学,2019,40(2):632-641.
ZHENG Guanghui, XU Jinyu, WANG Peng, et al. Physical characteristics and degradation model of stratified sandstone under freeze-thaw cycling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2):632-641.
- [7] 刘艳章,郭赞林,黄诗冰,等.冻融作用下裂隙类砂岩断裂特征与强度损失研究[J].岩土力学,2018,39(S2):62-71.

- LIUYanzhang, GUO Yunlin, HUANG Shibing, et al. Study of fracture characteristics and strength loss of crack quasi-sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2):62-71.
- [8] 张二锋, 杨更社, 刘慧. 冻融循环作用下砂岩细观损伤演化规律试验研究[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(10):50-55.
ZHANG Erfeng, YANG Gengshe, LIU Hui. Experimental study on meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(10):50-55.
- [9] 高峰, 熊信, 周科平, 等. 冻融循环作用下饱水砂岩的强度劣化模型[J]. *岩土力学*, 2019, 40(3):926-932.
GAO Feng, XIONG Xin, ZHOU Keping, et al. Strength deterioration model of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(3):926-932.
- [10] Bayram F. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2012(83-84):98-102.
- [11] Liu Q., Huang S., Kang Y., et al. A prediction model for uni-axial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze-thaw [J]. *Cold Regions Sci. Technol.*, 2015 (120) : 96-107.
- [12] 李杰林, 朱龙胤, 周科平, 等. 冻融作用下砂岩孔隙结构损伤特征研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(9):3524-3532.
LI Jielin, ZHU Longyin, ZHOU Keping, et al. Damage characteristics of sandstone pore structure under freeze-thaw cycles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9):3524-3532.
- [13] Jamshidi A., Nikudel M.R., Khamehchiyan M. Predicting the long-term durability of building stones against freeze-thaw using a decay function model[J]. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2013 (92):29-36.
- [14] 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.
- [15] 金佳旭, 宋晨光, 陈亿军, 等. 冻融循环次数和含水率对尾细砂力学性质的影响研究[J]. *实验力学*, 2017, 32(3):431-438.
JIN Jiayu, SONG Chenguang, CHEN Yijun, et al. On the influence of freeze-thaw cycles and moisture content on the mechanical properties of tailings fine sand[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(3):431-438.
- [16] 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.
- [17] Chen T.C., Yeung M.R., Mori N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action [J]. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2004, 38(2):127-136.
- [18] Zhang S J, Lai Y M, Zhang X F, et al. Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(3):295-302.
- [19] Hori M. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials[J]. *Int. J. Eng. Sci.*, 1998, 36(4):511-522.
- [20] Park C, Synn J H, Shin H S. Experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2004, 41(3):81-86.
- [21] Zhang X F, Lai Y M, Yu W B. Forecast analysis of the re-freezing of Kunlun mountain permafrost tunnel on Qinghai-Tibet railway in China [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 39(1):19-31.
- [22] GB/T 50266-2013, 工程岩体试验方法标准[S].
GB/T 50266-2013, Standard for test methods of engineering rock mass[S].
- [23] 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.
- [24] A. Momeni, Y. Abdilor, G. R. Khanlar, et al. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks[J]. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016(75):1649-1656.
- [25] 胡鹏飞, 骆行文, 卢正, 等. 不同初始含水率砂质泥岩膨胀特性试验研究[J]. *公路*, 2020, 65(7):256-261.
HU Pengfei, LUO Xingwen, LU Zheng, et al. Experimental research on swelling characteristics of sandy mudstone with different initial water content [J]. *Highway*, 2020, 65(7):256-261.
- [26] 张艺鑫. 兰州地区红砂岩物理力学性能及渗透性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
ZHANG Yixin. Research on the physical and mechanical properties and permeability of red sandstone in Lanzhou region[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [27] 张慧梅, 杨更社. 冻融荷载耦合作用下岩石损伤力学特性[J]. *工程力学*, 2011, 28(5):161-165.
ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Damage mechanical characteristics of rock under freeze-thaw and load coupling[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5):161-165.

(编辑 周红军)