

文章编号:0253-9993(2012)S1-0070-05

# 冻融循环对风化花岗岩物理特性影响的实验研究

周科平,许玉娟,李杰林,张亚民

(中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

**摘要:**在冻结温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,融化温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下对风化花岗岩进行0,10,20,30次冻融循环实验;并对岩样进行室温下岩芯核磁共振和常规单轴压缩实验,得到冻融循环后岩石的孔隙度、孔隙分布和单轴抗压强度,孔隙度与循环次数拟合多项式。实验结果表明:冻融循环后风化花岗岩饱和水状态下的质量均会增加;岩石内部的孔隙分布发生了明显变化;中小尺寸的孔隙数量增加且随循环次数增加而增长;花岗岩强度明显降低,冻融系数和单轴抗压强度随循环次数的增加而减小,弹性模量有所降低。最后利用损伤力学原理对岩样进行冻融损伤分析,得到有效应力与孔隙度表达式,为研究寒区岩体工程损伤破坏机理和稳定性评价提供参考数据。

**关键词:**风化花岗岩;冻融;核磁共振;单轴抗压试验;有效应力

**中图分类号:**TU458.2 **文献标志码:**A

## Experimental study of freezing and thawing cycle influence on physical characteristics of weathered granite

ZHOU Ke-ping, XU Yu-juan, LI Jie-lin, ZHANG Ya-min

(School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Freezing and thawing experiments on weathered granite with the cycle-index for 0, 10, 20, 30 times were conducted, during which the freezing temperature was  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  and thawing temperature was  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In order to get the porosity, pore distribution and uniaxial compression strength after freezing and thawing cycle, core nuclear magnetic resonance (NMR) experiment and conventional uniaxial compression experiment were adopted under room temperature. The results indicate that the quality of test pieces increase after freezing and thawing cycle, the inner pore distribution is changed, the amount of medium and small pore is increasing along with cycle times. In addition, freezing and thawing coefficient and uniaxial compression strength decrease with the increasing of cycle times. The freezing and thawing cycle not only lower the uniaxial compression strength, but also reduce elastic modulus of weathered granite sample. Finally, a damage analysis was conducted and the relationship between porosity and effective stress was obtained according to related damage mechanical theory. The experiment of measuring weathered rock mass's physical characteristics in the condition of freezing and thawing cycle would provide reliable experimental data for the failure mechanism research of rock engineering in cold regions.

**Key words:** weathered granite; freezing and thawing; nuclear magnetic resonance (NMR); uniaxial compression experiment; effective stress

自然界中岩石会在物理、化学、生物等多种因素的影响下发生风化,其中物理风化以温度变化为主,在寒区则主要表现为冻融破坏。冻融可以使土体发

生冻胀和融沉,岩质边坡在冻融破坏下产生变形、冻融剥蚀、滑塌以至滑坡,冻融破坏会给寒区的工程建设和安全运行带来巨大的安全隐患。因此,研究循环

收稿日期:2011-11-25 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51074178)

作者简介:周科平(1964—),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,博士。通讯作者:许玉娟(1989—),女,湖南怀化人,硕士研究生。E-mail: yujuan\_xu@163.com

冻融条件下岩体的物理力学特性,对寒区岩体工程的稳定性具有重要意义。

针对冻岩问题国内外学者已开展很多的研究,可以归结为 3 方面:一是岩石在冻结温度下的物理力学性质研究;二是岩石冻融损伤破坏机理研究;三是岩石材料冻融过程中的水热迁移试验研究<sup>[1]</sup>。Fahey (1983),Prick(1995)通过试验比较冻融循环和干湿循环对页岩的强度影响<sup>[2-3]</sup>;Matsuoka(1990)通过大量的室内试验,研究三大岩类(28 种沉积岩,8 种火成岩和 1 种变质岩)半浸水中的冻融破坏过程<sup>[4]</sup>;Park 通过试验研究韩国典型花岗岩与砂岩的热物理参数与温度的关系<sup>[5]</sup>。在国内,陈玉超、杨更社等<sup>[6]</sup>总结出砂岩和页岩冻融循环后的片落式和裂纹式破坏机理,将寒区边坡失稳类型分为正冻滑坡、正融滑坡和冻融滑坡 3 类;徐光苗、刘泉声<sup>[7]</sup>则对岩石冻融破坏机理及力学试验,指出岩石的破坏会受到岩性、孔隙率、含水量、饱和度、循环次数、温度范围等的影响;张继周等<sup>[8]</sup>将白云质灰岩和粉砂质泥岩经过 1% 硝酸溶液侵蚀后进行冻融循环,总结出软岩的颗粒损失模式;杨更社、蒲毅彬<sup>[9]</sup>借助于 CT 扫描研究岩石材料冻融循环后损伤扩展特性研究;刘成禹等<sup>[10]</sup>进行了 $-36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对花岗岩进行了 20 次冻融循环试验,得到其物理力学参数的破坏规律。

分析前人的研究成果,更多是考虑新鲜岩石,对风化岩样则考虑较少。风化岩石和新鲜岩石在物质成分、结构、状态、应力、应变状态和强度等方面都会有较大的区别,特别是当岩石的风化程度很高时,岩石的力学性质会明显的下降。因此,研究风化岩石的物理力学特性是十分必要的。此外,此前大多数冻融试验的冻结温度一般在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,极少数达到 $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>,与工程所处的高寒地区实际气候条件不符。因此,以实际气候条件研究冻融环境下风化岩石的物理力学性质对工程实际有重要的现实意义。本文在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结温度条件下开展了不同循环次数的风化花岗岩冻融损伤试验,通过核磁共振检测内部孔隙构造的变化来研究冻融对岩石内部的影响。

## 1 冻融循环破坏实验

### 1.1 试件制备

试验用风化花岗岩取自黑龙江省黑河市某矿山,岩样为中粗粒碱长花岗岩,肉红色,块状构造,中粗粒花岗岩结构。碱长石由微斜长石、正长石组成,他形粒状,粒度 $0.2\sim 7.0\text{ mm}$ ,卡式双晶发育,弱绢云母化、泥化,含量 $46\%\sim 56\%$ 。根据《水利水电工程岩石试验规程》(SL 264—2001),将岩石制成直径 $(50\pm$

$2)\text{ mm}$ ,高 $100\text{ mm}$ 的标准圆柱体试样。试样分为两批:一批用于单轴压缩实验,一批用于核磁共振实验。两批样品在相同条件下同步进行冻融循环实验,达到设计循环次数后分别进行单轴压缩和核磁共振实验。用于单周压缩试验的样品分为 4 组,循环次数分别为第 1 组 0 次,第 2 组 10 次,第 3 组 20 次,第 4 组 30 次。用于核磁共振试验的样品共分为 4 组,其循环次数与单轴压缩实验样品相对应。

### 1.2 实验仪器

冻融循环使用 TDS-300 型冻融试验机,该设备可自动控制循环时间和冻结、融化温度;核磁共振实验采用上海纽迈科技有限公司生产的真空饱和装置和 MiniMR-60 核磁共振分析系统进行核磁共振弛豫测量,主磁场 $0.51\text{ Tesla}$ ,H 质子共振频率 $21.7\text{ MHz}$ ,射频脉冲频率为 $1\sim 49.9\text{ MHz}$ ,磁体控温 $25\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,磁体均匀度为 $12.0\times 10^{-6}$ ,射频功率 $300\text{ W}$ ;单轴压缩实验采用中南大学 SHT4206 电液伺服万能试验机。

### 1.3 实验方法

(1)将岩样浸入水中饱和 48 h 后取出,擦干表面水分,称重,测量尺寸。

(2)将岩样置于冻融机中进行冻融循环,冻融循环方法为:在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下冻结 4 h 后放入 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水中融化 4 h,即循环周期为 8 h,每 10 次循环后取出相应岩样称重,循环次数完毕后即进行核磁共振实验和单轴压缩实验。

(3)使用 SHT4206 电液伺服万能试验机进行单轴压缩实验,采用轴向位移速率控制,位移速率为 $0.001\text{ mm/s}$ 。

(4)核磁共振实验先将岩样置于真空饱和装置中抽气 4 h 后,在水中浸泡 24 h,即可在 MiniMR-60 核磁共振分析仪上进行核磁共振实验。

## 2 实验结果分析

### 2.1 冻融循环实验

冻融循环后岩样质量变化见表 1,试样质量均有所增加,最大可增加 $8.270\text{ g}$ ,质量增加百分比为 $1.8\%$ ;最少的增加 $0.690\text{ g}$ ,质量增加百分比为 $0.149\%$ 。每一组试样中质量增加幅度有很大差别;增长幅度不会因为循环次数的增加而变大,即质量增长幅度与循环次数无相关性;在实验过程中会发现经过冻融循环后岩样表面会有固体颗粒的析出或片落,故而增长的质量实际上是孔隙水和结晶水质量之和减去析出颗粒质量后得到的差值。

### 2.2 岩石核磁共振实验特性分析

核磁共振检测岩芯孔隙度和孔隙分布利用 H 核

与磁场相互作用的特性进行,实验检测到的信号幅度是一个无量纲,其大小与H核的数量成正比。 $T_2$ 弛豫时间既与原子核本身特性相关,也会受到孔隙体积和表面积的影响。一般来说孔隙尺寸越小弛豫时间越短,故而观测得到的 $T_2$ 谱分布经过合理的刻度即可代表岩样孔隙尺寸分布,而曲线下方的面积即可代表孔隙所占百分比<sup>[11]</sup>。

表1 冻融前后风化花岗岩岩样质量变化

Table 1 Quality variation of weathered granite before and after freeze-thaw cycle

循环次数	试样编号	质量增加量/g	质量增加百分比/%
10	U-10-1	5.060	1.106
	U-10-2	3.340	0.713
	U-10-3	1.828	0.386
	U-10-4	3.200	0.702
	U-10-5	1.390	0.300
	U-10-6	1.230	0.266
20	U-20-1	4.090	0.899
	U-20-2	6.290	1.343
	U-20-3	1.720	0.366
	U-20-4	4.500	0.972
	U-20-5	4.240	0.916
30	U-30-1	8.270	1.800
	U-30-2	5.990	1.292
	U-30-3	1.970	0.410
	U-30-4	4.560	0.985
	U-30-5	4.330	0.939
	U-30-6	0.690	0.149

表2为经历不同循环次数后岩石的孔隙度均值。从中可以看出,冻融循环后风化花岗岩的孔隙度均增长,且随循环次数的增大而增大,当循环次数达到30次时增长百分比达到65.68%。

表2 风化花岗岩冻融循环后核磁共振孔隙度均值

Table 2 Average NMR porosity of weathered granite after freeze-thaw cycle

循环次数	孔隙度/%	增长百分比/%
0	1.897	
10	2.413	27.20
20	2.650	39.69
30	3.143	65.68

对循环次数和孔隙度进行多项式拟合, $R^2 = 0.9822$ ,结果见式(1)。

$$y = -6 \times 10^{-7} n^2 + 0.0004n + 0.0192 \quad (1)$$

其中, $y$ 为孔隙度; $n$ 为循环次数。拟合曲线如图1所示。

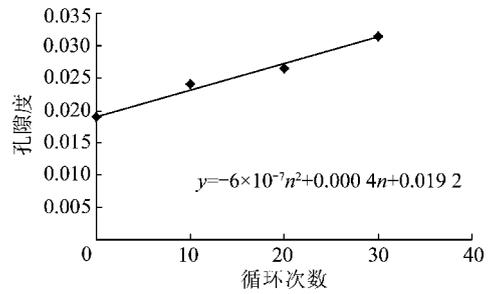


图1 孔隙度与循环次数拟合曲线

Fig. 1 Fitting curve of porosity vs. cycle index

核磁共振岩芯试验的 $T_2$ 分布结果如图2所示。由图2可以看出:风化花岗岩的 $T_2$ 分布主要表现为3峰图,随着冻融次数的增加, $T_2$ 谱形态上第1个峰发生了左移,即向小孔隙的 $T_2$ 方向偏移,小孔隙 $T_2$ 谱的核磁共振信号强度增加。这也说明在冰的冻胀和融缩作用下,岩石内部产生了新的微孔隙。第2个峰则发生了右移,说明大尺寸(相对)孔隙数量增加。

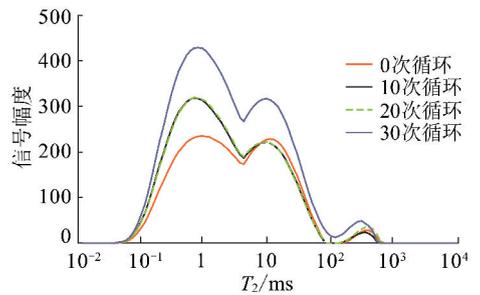


图2 风化花岗岩核磁共振 $T_2$ 分布

Fig. 2 NMR  $T_2$  distribution of weathered granite

随着冻融次数的增大,第1个峰和第2个峰的幅度均明显增大,而大尺寸孔隙信号变化则出现了个体差异,有的样品变化较小有的则发生了很大的变化。说明经过冻融循环破坏后岩样内部的中小尺寸孔隙的数量明显增加,且循环次数越多信号强度增长越大。出现此种情况有以下3种原因:

(1)岩石作为一种致密材料,由多种矿物胶结构成,其内部本身就存在大小形态不一的孔隙,在冻融循环过程中矿物颗粒热胀冷缩,其所含矿物的膨胀系数不一致,其因温度产生的变形各不相同,经过一定的循环次数后使原有裂纹发生扩展并产生新的裂纹。

(2)岩石在饱和情况下其内部孔隙被水充满,当温度降低到 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 时液态水变为固态冰,在正常大气压下会发生9%的体积膨胀,而孔隙空间有限,冰的体积膨胀受到限制,有研究表明在此情况下岩石膨胀力最大可达 $700\text{ MPa}$ <sup>[12]</sup>。当膨胀力超过岩石的承受限度便会产生新的裂纹,融解过程是浸泡在水中进行的,新产生的裂纹又会被水充填,在下一轮低温冻结时冰的体积会增大,产生更大的膨胀力,岩石便如此

反复承受水的相变对其造成的破坏,孔隙度逐渐变大。

(3)当温度降低,水变成冰并在孔隙或原生缺陷中发生膨胀时,过冷水便会被冰体从孔隙中驱散,造成孔隙水在岩石内部产生一定孔隙水压力。

### 2.3 岩石应力应变特性

根据单轴压缩实验得到了不同冻融循环次数后的风化花岗岩单轴抗压强度和应力应变曲线,并计算出了冻融循环对岩石的风化程度。仅从中挑选出具有代表性的一组数据,见表 3,应力-应变曲线如图 3 所示。

表 3 风化花岗岩冻融循环试验抗压强度

Table 3 Uniaxial compression strength of weathered granite after freeze-thaw cycle

循环次数	单轴抗压强度/MPa	冻融系数 $K_f$
0	48.3	
10	41.0	0.85
20	24.0	0.50
30	18.5	0.37

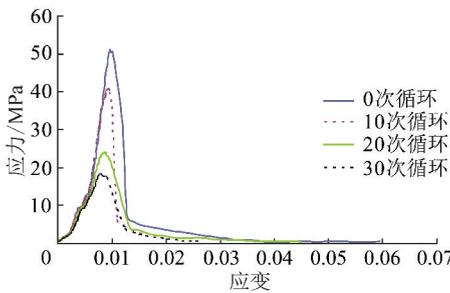


图 3 不同冻融循环次数后风化花岗岩单轴应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of typical granite samples subjected to different cycles of freezing and thawing

由式(1)计算得到冻融系数  $K_f$  [13] 来衡量冻融循环对花岗岩的破坏程度。

$$K_f = \frac{\bar{R}_f}{R_s} \quad (2)$$

式中,  $\bar{R}_f$  为冻融后岩石单轴抗压强度均值, MPa;  $R_s$  为冻融前岩石单轴抗压强度均值, MPa。

经过冻融循环破坏后风化花岗岩的单轴抗压强度明显下降,且随冻融循环次数的增加抗压强度下降幅度越大,冻融系数也随着循环次数的增加呈减小趋势。可见风化花岗岩的抗压强度受到冻融循环破坏十分明显,虽然表面未出现明显裂纹,但抗压强度已明显下降,冻融加速了花岗岩的风化。同时由核磁共振试验得知冻融循环破坏使岩石孔隙度增大,内部中小尺寸的孔隙数量增加,与未冻岩石相比变得更为疏

松,这也是单轴抗压强度降低的原因之一。

从图 3 可以看出,岩样的应力-应变曲线形态相似,可以将其分为压密、弹性变形、裂纹扩展和破坏 4 个阶段,压密阶段的曲线几乎重合,冻融循环缩短了岩样的弹性变形和裂纹扩展阶段。由图 3 可观察到冻融循环次数越多的岩样更早的发生脆性破坏,破坏时的应变也小于比起循环次数少得岩样;而曲线的斜率也随循环次数的增加而减小,说明冻融使弹性模量降低。

### 2.4 风化花岗岩冻融损伤分析

固体材料的损伤破坏可以理解为连续性降低的过程, Kachanov L M (1958) [14] 在研究单轴拉伸蠕变的脆性断裂时引入无量纲变量——连续性  $\psi$  表征材料劣化的综合作用,无损情况下  $\psi = 1$ ,  $d\psi < 0$  表示材料连续性降低,当  $\psi = 0$  时材料完全破坏。Rabotnov Y N (1969) 提出了连续性的相补参量损伤度  $w$ ,  $w = 1 - \psi$ 。通过 NMR 技术可以得到岩样的孔隙度,假设:

- (1) 冻融实验前岩样是无损的,即  $\psi = 1, w = 0$ ;
- (2) 冻融循环后岩样的尺寸未发生变化。

基于以上假设,以冻融循环前的岩样为初始状态,循环后的为损伤状态。冻融循环后孔隙数量的增加使得岩样的连续性降低,认为岩样固体颗粒体积减小,则得到连续性  $\psi$  的表达式。

$$\psi = \frac{\tilde{V}}{V} \quad (3)$$

其中,  $V$  为初始状态岩样体积;  $\tilde{V}$  为冻融循环后损伤状态下岩样的体积,可由式(4)求出。

$$\tilde{V} = V(1 - \varphi) \quad (4)$$

式中,  $\varphi$  为岩样孔隙度。

根据 Lemaitre 提出的应变等效原理 [15], 损伤材料在有效应力的作用下产生的应变与同种材料无损时发生的应变等效,故而受损材料的应力应变曲线可以用虚拟的无损状态下的应力应变关系替代,只需把其真实应力换成有效应力。受损材料在外荷载作用下的有效应力  $\tilde{\sigma} = \sigma/\psi$ ,  $\sigma$  为材料的真实应力,可以得到花岗岩 NMR 孔隙度与有效应力表达式为

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - \varphi} \quad (5)$$

由此可以将岩石的有效应力应变曲线和真实应力应变曲线进行对比。

由式(5)可知岩样的有效应力要大于真实应力,那么岩石的抗压强度会低于实验得到的值。有效应力与孔隙度成正比,孔隙度会随着冻融循环次数的增加而变大,故而循环次数越大,有效应力与真实应力

的增幅就会越大,对岩体工程稳定性影响就越强。

### 3 结 论

(1) 经过冻融循环后由于孔隙水和结晶水的增加,岩样质量有所增加,但这种质量的增加与循环次数没有明显的相关性。

(2) 冻融循环加速了岩样的风化,其内部产生了更多的中小尺寸的孔隙,一部分由岩石矿物本身热胀冷缩造成的;另一部分孔隙水发生相变时产生的膨胀力造成。孔隙的增加使岩石变的更为疏松,这也是花岗岩抗压强度降低的原因之一。

(3) 风化花岗岩经冻融循环后,其单轴抗压强度明显降低,且循环次数越多,降低幅度越大;抗冻系数也随循环次数的增加而减小;冻融循环降低了岩样的弹性模量,使脆性破坏提前发生。

(4) 根据损伤力学原理得到有效应力与孔隙度和循环次数的关系,为岩体工程稳定性评价提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 杨更社. 冻融岩石力学的研究现状与展望分析[J]. 力学与实践,2009,31(6):9-16.  
Yang Gengshe. A review on frozen rock mechanics[J]. Mechanic and Engineering,2009,31(6):9-16.
- [2] Prick A. Dilatometrical behavior of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles[J]. Catena,1995,25:7-20.
- [3] Fahey B D. Frost action and hydration as rock weathering mechanisms on schist;a laboratory study[J]. Earth Surface Processes and Landforms,1983,8(6):535-545.
- [4] Matsuoka K. A laboratory simulation of rock breakdown due to freeze-thaw in a Maritime Antarctic environment[J]. Earth Surface Processes and Landforms,1988,13:369-382.
- [5] Park C, Synn J H, Shin D S. Experiment study on the thermal characteristic of rock at low temperatures[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science,2004,41(S):81-86.
- [6] 陈玉超,杨更社,范建兵. 寒区边坡冻融灾害及其分类探讨[J]. 山西建筑,2006,32(14):82-83.

- Chen Yuchao, Yang Gengshe, Fan Jianbing. The discussion of freezing-thawing disaster and classification in permafrost slope [J]. Shanxi Architecture, 2006, 32(14): 82-83.
- [7] 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.  
Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3076-3082.
- [8] 张继周,缪林昌,杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1688-1894.  
Zhang Jizhou, Miao Linchang, Yang Zhenfeng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1688-1894.
- [9] 杨更社,蒲毅彬. 冻融循环条件下岩石损伤扩展研究初探[J]. 煤炭学报,2002,27(4):357-360.  
Yang Gengshe, Pu Yibin. Initial discussion on the damage propagation of rock under the frost and thaw condition[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 357-360.
- [10] 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 Chengyu, He Manchao, Wang Shuren, 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.
- [11] 肖立志, Manfred Prammer. 核磁共振测井原理与应用[M]. 孟繁莹,译. 北京:石油工业出版社,2008:3-8.
- [12] 徐光苗. 寒区岩体低温、冻融损伤力学特性及多场耦合研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2006.  
Xu Guangmiao. Study on the mechanical characteristics of rock at low temperature, damage due to freezing and thawing and multi-physical coupling problems of rock in cold region[D]. Wuhan: Institution of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2006.
- [13] SL 264-2001, 水利水电工程岩石试验规程[S].
- [14] 沈 为. 损伤力学[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1995:5-10.
- [15] Lemaitre J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Energy and Design, 1984, 80(2): 233-245.