

花岗岩超低温冻融循环后力学特性研究

张牡丹, 王苏然, 曾健霜, 徐超, 王玥晗

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 对花岗岩进行 -20 , -30 , -40 , -50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的冻融循环处理, 再进行单轴压缩试验, 观察花岗岩经历不同冻结温度的冻融循环后的破坏模式, 并分析弹性模量变化规律、应力应变曲线变化规律、单轴抗压强度和峰值应变变化规律以及冻融系数的变化. 根据冻融处理后花岗岩的损伤数据, 推广了花岗岩冻融循环后的总损伤变量的公式. 研究表明, 冻融循环后花岗岩的破坏模式主要为锥形破坏模式和柱状劈裂模式, 揭示了花岗岩冻融循环后的力学特性与冻结温度的关系. 根据总损伤变量与应变的关系可以预测, 随着冻结温度的下降, 应变存在一个临界值, 超过临界值时试块破坏.

关键词: 花岗岩; 冻融循环; 单轴压缩试验; 总损伤变量

中图分类号: TU 521.2 **文献标志码:** A

Mechanical Properties of Granite Under Ultra-low Temperature Freeze-Thaw Cycles

ZHANG Mudan, WANG Suran, ZENG Jianshuang, XU Chao, WANG Yuehan

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Freeze-thaw cycles tests on granite under different freezing temperatures were conducted, and then uniaxial compression tests were followed. The damage modes, stress-strain curves, uniaxial compressive strength, peak strain and freeze-thaw coefficients after different temperatures freeze-thaw cycles were analyzed. In addition, a total damage variable after freeze-thaw cycles was promoted. The results show that two kinds of damage modes of granite are found, including the columnar fracturing mode and the tapered damage mode. The relationship between the mechanical properties and freezing temperature under freeze-thaw cycles of granite was revealed. According to the relationship between the total damage variable and strain, it can be predicted that the strain has a limited value with the decrease of freezing temperature. Rock will break when the strain exceeds the limited value.

Keywords: granite; freeze-thaw cycle; uniaxial compression test; total damage variable

随着我国大力发展寒区经济, 寒区的土木工程建设也越来越多. 寒区的岩石由于经历低温冻

融循环, 岩石的稳定性与耐久性将会遭受很大影响, 从而严重影响了寒区的工程建设. 因此, 研究

岩石经历不同温度冻融循环后的力学特性具有重大的工程意义. 目前, 国内外学者对此问题的研究已经获得了一定的成果. Tan 等^[1]分析了花岗岩在不同冻融循环次数下的单轴和三轴力学性质, 发现抗压强度、围压和冻融循环次数间的关系可利用莫尔-库仑强度准则进行描述. 文献[2]对西班牙 Laspra 白云岩细观孔隙结构在不同冻融循环次数下的冻融破坏特征和细观缺陷演化机制进行了研究. Mutlutürk 等^[3]通过研究发现, 岩石在经过循环冻融后, 完整性大受影响, 不同的岩石类型, 岩石的受损速率不同, 提出了岩石经过冻融循环后的损伤数学模型. Pellet 等^[4]研究了时间效应对岩石蠕变损伤的影响, 通过对 P 波波速的测量来监测长期蠕变试验过程中岩石的损伤. Bayram^[5]对寒区自然岩石经历冻融循环后的强度损失进行了研究, 建立了适合特定石灰石冻融循环后单轴抗压强度的预测方程式. Huang 等^[6]通过卸荷试验指出, 卸荷过程中初始围压和卸荷速率会影响岩样的破坏和应变能转换模式. 周科平等^[7]研究岩石在冻融循环作用下微观结构的变化特征, 对冻融循环后的花岗岩进行核磁共振测量, 得到了不同冻融循环次数后岩样的横向弛豫时间 T_2 分布及核磁共振成像图像. 袁小清等^[8]通过对节理岩体的研究, 提出了冻融细观损伤、受荷细观损伤和节理宏观损伤的概念, 推导出了复合损伤变量, 并且用试验进行验证. 吴安杰等^[9]对饱水状态下的泥质白云岩进行了不同冻融循环条件下的单轴压缩试验, 建立了以冻融循环次数和应变为控制变量的本构模型. 吴刚等^[10]将大理岩分成饱水、干燥和对比组, 对其进行冻融循环处理后再进行单轴压缩试验, 归纳出冻融循环后大理岩的主要物理力学特性. 刘红岩等^[11]通过循环冻融和相似材料试验, 研究了节理岩体在冻融条件下的损伤破坏机制及其相应的力学特性. 徐光苗等^[12]对红砂岩和页岩进行了单轴和三轴压缩试验, 研究岩石力学特性与温度、岩石含水率的关系.

虽然国内外对于岩石冻融循环后的力学特性的研究已经取得了一定的成果, 但是, 总结前人的成果发现, 大部分学者研究时都将冻融循环的次数作为变量研究, 而忽视了 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下温度对岩石力学特性的影响. 本文将冻融循环的温度作为变量, 通过试验来研究随着温度降低花岗岩的力学特性的变化. 这一问题的研究成果对解决寒区岩石类材料损伤问题具有一定的指导意义.

1 试验概况

1.1 试样制作

花岗岩试块取自于福建宁德, 从现场取得一块完整的花岗岩大岩块, 然后将其加工成若干直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱形试块, 加工完以后先将表面有缺陷的试块剔除, 然后通过动弹模仪测出试块的波速, 选择波速相近的试块, 从而减小误差. 花岗岩的主要矿物质成分有石英、长石和云母, 测得其密度为 2.7 g/cm^3 .

1.2 试验方案

将花岗岩试块分为 5 组, 对应冻融循环最低温度为 -20 , -30 , -40 , $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和对照组各 5 块, 共 25 块. 试验前先测出弹性模量, 然后将除对照组以外的 4 组试块放入水中浸泡 48 h 以上, 浸泡完毕取出后开始进行冻融循环试验. 在高低温试验箱进行冻融循环试验, 设置程序, 最低温度分别为 -20 , -30 , -40 , $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻结 4 h, 融化 4 h, 循环 30 次, 待试验结束后取出试块, 测出试块的弹性模量, 然后再对所有试块进行单轴压缩试验.

1.3 试验仪器

试验采用的仪器分别为混凝土超声波测试仪、建恒仪器的高低温试验箱 WGD501 以及西安力创的液体伺服混凝土三轴流变试验机, 如图 1~3 所示.



图 1 混凝土超声波测试仪

Fig.1 Ultrasonic concrete tester



图 2 高低温试验箱

Fig.2 High-low temperature test chamber



图3 电液伺服混凝土三轴流变试验机

Fig.3 Electro-hydraulic servo concrete triaxial rheological testing machine

2 试验结果分析

2.1 破坏模式

冻融循环后的花岗岩经过单轴压缩试验后,主要的破坏模式有两种,分别为柱状劈裂模式和锥形破坏模式^[13],如图4和图5所示.经多个试块破坏模式的分析发现,不管花岗岩冻融循环的最低温度为多少,花岗岩单轴压缩破坏时柱状劈裂模式和锥形破坏模式都有可能出现,因此,本文认为花岗岩冻融循环后的单轴压缩破坏模式与温度无关.



图4 柱状劈裂模式

Fig.4 Columnar fracturing mode

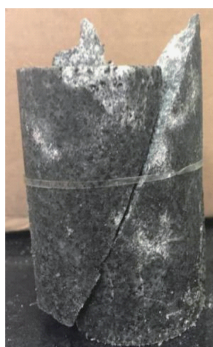


图5 锥形破坏模式

Fig.5 Tapered damage mode

2.2 弹性模量变化规律

通过对混凝土超声波测试仪测出的弹性模量数据的分析可得^[13],当冻结温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,弹性模量降低了 0.95 GPa ,相对弹性模量降低了 2.4% ;当冻结温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,弹性模量降低了 5.04 GPa ,相对弹性模量降低了 12.53% ;当冻结温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,弹性模量降低了 7.22 GPa ,相对弹性模量降低了 17.95% ;当冻结温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,弹性模量降低了 7.68 GPa ,相对弹性模量降低了 19.09% .由此分析可知,弹性模量随着冻结温度的降低而呈不同程度的降低,并且花岗岩弹性模量的劣化速度随着冻结温度的降低先快速降低而后逐渐缓慢降低.弹性模量降低值与温度的关系曲线如图6所示. ΔE 表示弹性模量降低值, T 表示冻结温度.

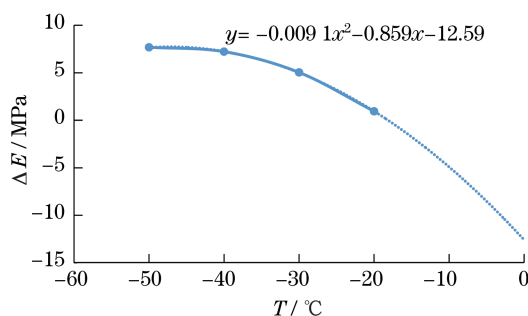


图6 弹性模量降低值与温度的关系曲线图

Fig.6 Curve of the reduced value of elastic modulus versus the temperature

2.3 应力应变曲线变化规律

冻融循环后花岗岩的单轴压缩应力应变曲线大致可以分为3个阶段^[14]:a.孔隙裂隙压密阶段,岩石中的微裂隙逐渐被压密,形成非线性变形;b.弹性变形阶段,应力应变曲线大致呈直线型,为弹性变形,并且该阶段曲线的末端为峰值应力,即该岩石的单轴抗压强度;c.破坏阶段,岩石达到破坏荷载后,内部结构完全破坏,应变也迅速增长.

如图7所示, σ 表示应力, ϵ 表示应变,由此应力应变曲线图分析可知:a.冻融循环后花岗岩的单轴压缩应力应变曲线形状比较类似,都为脆性材料应力应变曲线,而且随着冻融循环温度的降低,花岗岩的单轴压缩应力应变曲线趋于平缓,这是由于在相同的循环次数下,冻结温度越低,花岗岩的内部裂隙越多,所以,压密阶段越长.b.峰值应力和峰值应变分别随着冻结温度的降低而呈线性下降趋势.

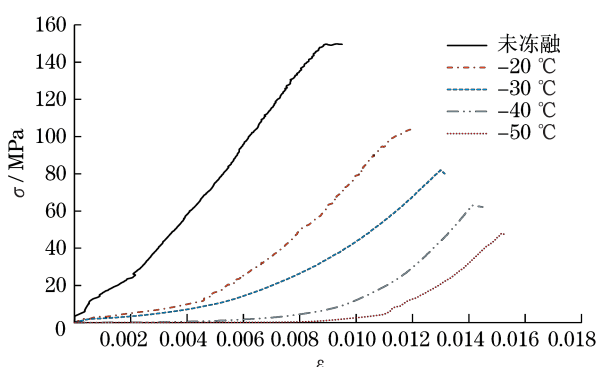


图7 冻融循环后花岗岩的单轴应力应变曲线图

Fig.7 Uniaxial stress-strain curves of granite after freeze-thaw cycles

2.4 单轴抗压强度变化规律

在表1中, σ_c 表示单轴抗压强度, ϵ 表示峰值应变. 由表1可知, 当冻结温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 花岗岩单轴抗压强度降低了 46.2 MPa , 相对峰值应力降低了 30.8% ; 当冻结温度为 $-30, -40, -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时花岗岩单轴抗压强度分别降低了 $68.1, 86.8, 102\text{ MPa}$, 相对峰值应力分别降低了 $45.4\%, 57.7\%, 68\%$.

表1 冻融循环后花岗岩的单轴抗压强度及峰值应变

Tab.1 Uniaxial compressive strength and peak strain of granite after freeze-thaw cycles

$T/^{\circ}\text{C}$	未冻融	-20	-30	-40	-50
σ_c/MPa	150	103.8	81.9	63.2	48.0
ϵ	0.009 28	0.011 96	0.013 006	0.014 12	0.015 17

经分析可知, 冻结温度越低, 花岗岩的单轴抗压强度降低得越多, 并且大致呈现线性关系, 与文献[12]中饱和红砂岩单轴抗压强度和温度的关系类似. 花岗岩的单轴抗压强度与冻结温度的拟合曲线关系如图8所示, 对拟合曲线作趋势预测, 大致可以预测, 当冻结温度为 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的单轴抗压强度约为 25 MPa .

2.5 峰值应变变化规律

经分析发现, 花岗岩的冻结温度越低, 单轴压缩峰值应变越大, 并且也是大致呈线性关系, 花岗岩的单轴压缩峰值应变与冻结温度的拟合曲线关系如图9所示, 对冻结温度为 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的峰值应变作了预测, 大约为 0.017 .

2.6 冻融系数

为了研究花岗岩的抗冻性, 本文根据文献[15]中给出的岩石冻融系数的公式进行计算.

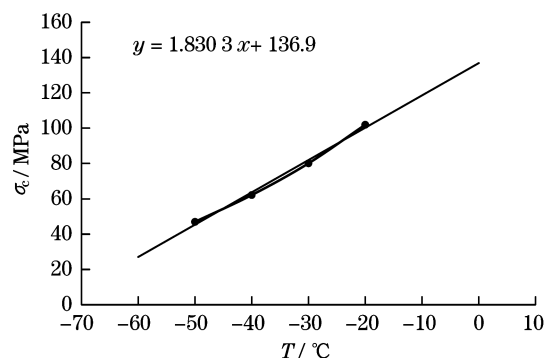


图8 花岗岩单轴抗压强度与冻结温度的关系曲线

Fig.8 Curve of the uniaxial compressive strength versus the freezing temperature of granite

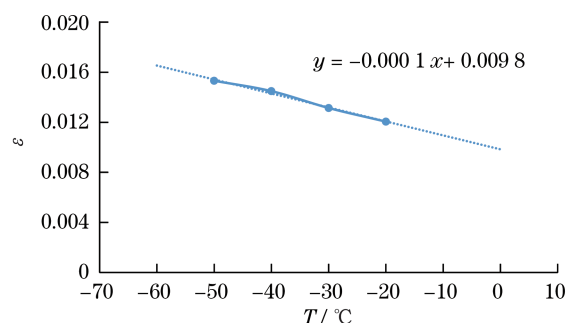


图9 花岗岩峰值应变与冻结温度的关系曲线

Fig.9 Curve of the peak strain versus the freezing temperature of granite

$$K_f = \frac{\overline{R_f}}{\overline{R_s}} \quad (1)$$

式中: K_f 为岩石的冻融系数; $\overline{R_f}$ 为冻融循环后的岩石单轴抗压强度平均值, MPa ; $\overline{R_s}$ 为冻融循环前的岩石单轴抗压强度平均值, MPa .

由式(1)计算出花岗岩的冻融系数, 如表2所示.

由表2的数据分析可知, 花岗岩的抗冻性随着冻结温度的降低而降低, 且花岗岩的冻融系数受冻融循环冻结温度的影响, 呈线性逐渐降低.

表2 不同冻结温度的花岗岩的冻融系数

Tab.2 Freezing and thawing coefficient of granite at different freezing temperatures

$T/^{\circ}\text{C}$	未冻融	-20	-30	-40	-50
K_f	1	0.692	0.546	0.421	0.320

2.7 冻融受荷后的损伤扩展力学特性分析

张慧梅等^[16]提出了冻融损伤、受荷损伤以及总损伤的概念, 并且推导出岩石冻融受荷后的损伤演化方程为

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} e^{-\frac{1}{m} \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^m}$$

$$m = \frac{1}{\ln \left(\frac{E_0 \epsilon_f}{\sigma_f} \right)} \quad (2)$$

式中: D_m 为岩石冻融受荷总损伤变量; E_0 为基准损伤状态; E_n 为以冻融循环次数为变量的冻融损伤状态的弹性模量; ϵ_f, σ_f 分别为应力峰值和所对应的应变; m 为表征材料损伤演化特征的材料参数。

在文献[16]中,是以冻融循环的次数为变量,而本文是以冻结温度为变量,因此,可将式(2)推广为

$$D_m = 1 - \frac{E_t}{E_0} e^{-\frac{1}{m} \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^m} \quad (3)$$

式中, E_t 为以冻结温度为变量的冻融损伤状态的弹性模量。

将本文试验所得到的数据代入推广的式(3)中,再将结果绘制成曲线图,如图10所示。

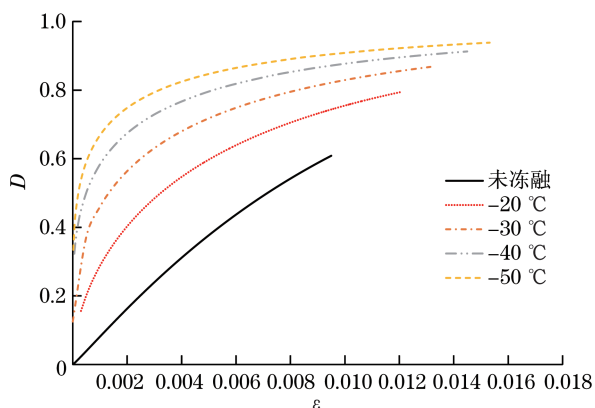


图10 损伤变量与应变的关系曲线

Fig.10 Curves of the damage variables versus the strain

由图10可知,在相同的应变情况下,花岗岩的总损伤变量随着冻结温度的降低而增大,当冻结温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,峰值应变值大约是0.015,总损伤变量约为0.95,接近于1,表明花岗岩受冻融循环损伤的影响比较大,特别是冻结温度的影响;花岗岩的总损伤变量随着应变的增大而增大,并且呈现先快速增大而后趋于平缓的趋势。可以预测,即使温度再低,峰值应变也不会超过0.017,而且花岗岩将直接破坏。

3 结 论

a. 冻融循环后的花岗岩经过单轴压缩试验后,主要的破坏模式有两种,分别为柱状劈裂模式和锥形破坏模式,随着花岗岩冻结温度的降低,花岗岩单

轴压缩的破坏模式不会改变。

b. 冻融循环后花岗岩的单轴压缩应力应变曲线形状比较类似,都为脆性材料应力应变曲线,而且随着冻融循环冻结温度的降低,花岗岩的单轴压缩应力应变曲线也趋于平缓。

c. 冻融循环冻结温度越低,花岗岩的单轴抗压强度降低得越多,单轴压缩峰值应变越大。

d. 花岗岩的抗冻性随着冻融循环冻结温度的降低而降低,并且花岗岩的冻融系数受冻融循环冻结温度的影响,呈线性逐渐降低。

e. 根据总损伤变量公式得出花岗岩的冻融受荷损伤演化模型,即损伤变量与应变关系曲线。分析得出,当应变相同时,花岗岩总损伤变量随着冻结温度的降低而不断增大,可以预测,即使冻结温度不断下降,应变都存在一个临界值,一旦超过临界值,试块将破坏。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] DE ARGANDOÑA V G R, REY A R, CELORIO C, et al. Characterization by computed X-ray tomography of the evolution of the pore structure of a dolomite rock during freeze-thaw cyclic tests[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 1999, 24(7): 633 - 637.
- [3] MUTLUTÜRK M, ALTINDAG R, TÜRK G. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 237 - 244.
- [4] PELLET F L, FABRE G. Damage evaluation with P-wave velocity measurements during uniaxial compression tests on argillaceous rocks[J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 7(6): 431 - 436.
- [5] BAYRAM F. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83 - 84: 98 - 102.
- [6] HUANG D, LI Y R. Conversion of strain energy in Triaxial Unloading Tests on marble[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 66: 160 - 168.

- [7] 周科平,李杰林,许玉娟,等.冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):731-737.
- [8] 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.
- [9] 吴安杰,邓建华,顾乡,等.冻融循环作用下泥质白云岩力学特性及损伤演化规律研究[J].岩土力学,2014,35(11):3065-3072.
- [10] 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(S1):2930-2938.
- [11] 刘红岩,刘治,邢闯锋,等.循环冻融条件下节理岩体损伤破坏试验研究[J].岩土力学,2014,35(6):1547-1554.
- [12] 徐光苗,刘泉声,彭万巍,等.低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2502-2508.
- [13] 蒋立浩,陈有亮,刘明亮.高低温冻融循环条件下花岗岩力学性能试验研究[J].岩土力学,2011,32(S2):319-323.
- [14] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].北京:中国地质大学出版社,1999:43-44.
- [15] 长江水利委员会.SL 264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [16] 张慧梅,杨更社.冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):471-476.

(编辑:石 瑛)

(上接第 483 页)

- [91] WU W G, ZHENG Q X, GUO X D, et al. The controlled-releasing drug implant based on the three dimensional printing technology: fabrication and properties of drug releasing *in vivo* [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2009, 24(6): 977-981.
- [92] ZHU M, LI K, ZHU Y F, et al. 3D-printed hierarchical scaffold for localized isoniazid/rifampin drug delivery and osteoarticular tuberculosis therapy [J]. Acta Biomaterialia, 2015, 16: 145-155.
- [93] ZHAO S C, ZHU M, ZHANG J H, et al. Three dimensionally printed mesoporous bioactive glass and poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) composite scaffolds for bone regeneration[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2014, 2(36): 6106-6118.
- [94] ZHANG J H, ZHAO S C, ZHU M, et al. 3D-printed magnetic Fe_3O_4 /MBG/PCL composite scaffolds with multifunctionality of bone regeneration, local anticancer drug delivery and hyperthermia[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2014, 2(43): 7583-7595.
- [95] CHO H S, MASON K, RAMYAR K X, et al. Structure of the extracellular region of HER2 alone and in complex with the Herceptin Fab[J]. Nature, 2003, 421(6924): 756-760.
- [96] ZHAO Y, YAO R, OUYANG L L, et al. Three-dimensional printing of Hela cells for cervical tumor model *in vitro* [J]. Biofabrication, 2014, 6(3): 035001.
- [97] HUANG T Q, QU X, LIU J, et al. 3D printing of biomimetic microstructures for cancer cell migration [J]. Biomedical Microdevices, 2014, 16(1): 127-132.
- [98] GOU M L, QU X, ZHU W, et al. Bio-inspired detoxification using 3D-printed hydrogel nanocomposites [J]. Nature Communications, 2014, 5: 3774.

(编辑:丁红艺)