

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0011

LI Jinming, LI Guoyu, PENG Wanlin, et al. The strength and deformation characteristics of saturated weathered granite under different temperature conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):523-531. [李金明, 李国玉, 彭万林, 等. 不同温度条件下饱水风化花岗岩强度及变形特性分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):523-531.]

不同温度条件下饱水风化花岗岩强度 及变形特性分析

李金明^{1,2}, 李国玉¹, 彭万林³, 陈敦¹, 周宇^{1,2}, 刘存福⁴

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局 第三地质大队, 新疆库尔勒 841000; 4. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610051)

摘 要: 为研究温度和围压对风化花岗岩抗压强度、剪切强度参数及变形特性的影响规律, 以新疆天山某一矿区的风化花岗岩为研究对象, 对不同温度(15、-5、-15℃)、不同围压(0、4、7、10 MPa)条件下的饱水风化花岗岩进行单轴和三轴压缩试验。结果表明: 相同温度条件下, 围压在0~10 MPa变化时, 风化花岗岩三轴抗压强度随围压线性增大。在相同围压下, 抗压强度随温度的降低而明显提高, 风化花岗岩的黏聚力 c 随温度降低而增大, 内摩擦角 φ 随温度的降低呈增长趋势。弹性模量随围压的增大不断提高, 但随着温度的降低, 增长幅度逐渐减小。泊松比也随温度降低和围压的增加呈增大趋势。温度和围压对风化花岗岩试样的破坏形态影响机制不同。温度降低使矿物颗粒及内部的微裂纹和间隙收缩, 进而胶结强度增大; 荷载和围压的增大会使岩石内部形成微裂隙并逐渐贯通, 同时孔隙冰破碎裂隙充分接触, 进一步增加摩擦力提高岩石强度。

关键词: 岩石力学; 温度; 风化花岗岩; 强度; 力学特性

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0523-09

0 引言

近年来, 随着我国经济的快速发展, 以及“一带一路”倡议实施, 西北高寒地区矿产资源的开发规模和岩土工程建设不断增加^[1], 如露天矿山的开采、寒区隧道开挖以及川藏铁路的建设等。这些高寒地区的岩土体处于温度不断变化的环境中, 且大部分时间内处于冻结状态, 人类工程建设活动与冻土环境的密切结合会引起冻土环境的变化, 从而产生新的科学和工程问题。对于多年冻土区岩质边坡, 因气候变暖及人为活动导致的多年冻土退化会显著改变裂隙岩体中冰-岩的胶结强度, 边坡的安全系数会随着温度增加而不断降低, 从而诱发崩

塌、落石等地质灾害^[2]。同时, 由于正负温交替变化造成的强烈冻融风化及表生改造作用, 多数原有岩体边坡基本处于临界平衡状态, 在降雨、工程开挖和爆破卸荷等因素的共同作用下, 将加剧寒区岩质边坡崩塌、崩落等地质灾害的发生。因此, 研究温度对寒区工程岩体强度及变形特性的影响具有重要的工程实践意义。

目前国内外学者对岩石冻融损伤力学特性开展了大量研究并取得了丰硕的成果^[3-9], 得到温度对岩石力学性质有显著影响。Park等^[10]和Yamabe等^[11]对砂岩和花岗岩进行了不同温度下的热力学性质试验, 得到岩石的比热容和热膨胀系数随温度的降低而降低, 导热系数随温度变化不大的结论。

收稿日期: 2019-05-08; 修订日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1703244; 41672310; 41630636); 国家重点研发计划项目(2016YFC0802103); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20030201); 中科院国际合作局对外合作重点项目(131B62KYSB20170012); 冻土工程国家重点实验室自主研究项目(SKLFSE-ZY-16); 国家电网公司科技项目(SGQHDKYOSBJS201600077)资助

作者简介: 李金明(1994-), 男, 四川达州人, 2017年在四川师范大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事低温岩体损伤及矿山岩石力学方面研究. E-mail: lijinming194@163.com

通信作者: 李国玉, 研究员, 从事寒区工程与环境灾害研究. E-mail: guoyuli@lzb.ac.cn.

Kodama 等^[12]研究了含水量、温度和加载速率对冻结岩石的强度和变形破坏过程的影响,得出岩石强度随含水量和加载速率的增大而增大且这种效应在低温下进一步加剧。Dwivedi 等^[13]对 30 ~ -50 ℃ 温度下不同种类的岩石试样进行了断裂韧性测试,结果表明断裂韧性随温度的降低而增大,且岩石的断裂韧性在饱和状态下最高。Rathnaweera 等^[14]研究了极端温度下砂岩的力学行为,得到随着温度的增加其抗压强度、杨氏模量、裂纹萌生应力和裂纹损伤应力均呈增大趋势。杨更社等^[15-17]通过对不同温度条件下煤岩和砂岩的三轴压缩试验,得到了温度对岩石强度和变形特性的影响规律以及含温度因子的岩石非线性破坏准则。李宁等^[18]对裂隙岩体在不同含水率和饱和冻结状态下进行不同频率的动循环加载试验,发现裂隙岩体在饱和冻结时加载容易产生疲劳。张晋勋等^[19]通过平行裂隙类岩石试样的三轴压缩试验,分析了裂隙形态对岩体力学性质和破坏形态的影响。奚家米等^[20]对不同温度的砂岩和泥岩进行单轴压缩试验,得到岩石在冻结状态下强度提高,解冻后岩石塑性增强的结论。徐光苗等^[21]和唐明明等^[22]在不同温度和含水状态下通过岩石的三轴压缩试验,得出岩石在干燥和饱水状态下其抗压强度、弹性模量和剪切强度参数均随温度的降低而增大且抗压强度受含水量影响较大。单仁亮等^[23]在冻结状态下对不同节理面倾角的红砂岩进行三轴压缩和蠕变试验,得到冻结红砂岩蠕变特性和破坏形式受节理倾角影响显著。张欢等^[24]对饱和冻结砂岩进行不同加载速率的冲击压缩试验,得到动态弹性模量与应变率呈正相关且随温度降低而降低。王开林等^[25]在低温下对两种含水状态的凝灰岩进行不同应变速率的压缩试验,分析了应变速率对岩石强度、变形等力学参数的影响规律并推导了与应变速率相关的单轴抗压强度经验公式。王建国等^[26]分别对不同温度的饱水花岗岩试样施加高应变率的冲击荷载,分析了温度梯度对动力学参数的变化规律。单仁亮等^[27-28]通过红砂岩试样的系列低温三轴压缩试验,得到冻结条件下抗压强度和弹性模量与围压均呈线性关系,且温度降低能提高岩石抗压强度。

本文针对高寒地区露天矿山岩石边坡工程,以新疆天山某一矿区的风化花岗岩为研究对象,根据取样地点年最高气温 16 ℃,最低气温 -23 ℃ 及取样地点的地应力条件,开展不同温度 (15、-5、

-15 ℃)、不同围压 (0、4、7、10 MPa) 条件下饱水风化花岗岩的单轴及三轴压缩试验,分析岩石抗压强度随温度和围压的变化规律,揭示温度和围压对岩石试样破坏形态的影响机制,定量的描述剪切强度参数随温度的变化关系,为岩石边坡设计及其稳定性提供理论参考。

1 试验方案

1.1 试样制备

试样选取新疆天山某一矿区现场的完整岩石块,运到甘肃省煤田地质局,根据规范^[29]要求,对岩块进行切割、磨平后制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准试样,试样高径比为 2:1 左右且上下端面平整,满足试验精度要求。通过测试可得岩样为黑云母花岗岩,颗粒结构分布均匀,该岩石受冻融风化影响其强度低于未经风化的新鲜岩石块,为弱风化花岗岩。试验前先剔除有明显差异的岩样,再用非金属超声波测试仪 RSM-SY5(T) 逐一测量岩样的波速,最后选取波速满足试验要求的岩样进行试验,保证试验结果准确可靠。为了测量试样的干密度等物理参数,将岩样在 105 ℃ 恒温烘箱中烘干 48 h 直至质量不再发生变化,然后取出试样待冷却至室温后称重并进行记录。用真空抽气法对试样进行强制饱和,将烘干后的岩样放入抽真空容器中,打开排气阀抽气 4 h 后注入蒸馏水,并继续抽气 4 h,然后使岩样处于负压状态中饱水 24 h 以上,称取饱和后岩样的质量,由此得到岩样的物理参数见表 1 所示。

表 1 风化花岗岩的物理参数平均值

Table 1 Mean values of physical parameters for weathered granite

纵波波速 $V_p /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和吸水 率/%
5 687.5	2.46	2.47	0.33

1.2 试验仪器

试验仪器采用中国科学院冻土工程国家重点实验室的 GCTS-RTRX 低温岩石三轴仪,该试验机提供最大轴向荷载为 1 000 kN,最大围压为 140 MPa,温度控制范围为 -30 ~ 80 ℃。试验过程中荷载误差不超过 200 N,仅为最大轴向荷载的 0.02%。加载方式由计算机程序控制,自动采集试验数据。

1.3 试验过程

不同温度下饱和风化花岗岩三轴压缩试验过程如下: (1) 结合试验设备降温效果快的特点和已有研究成果, 在试验设定的控制温度下, 将饱和试样先放入低温控制箱中进行低温冻结 24 h 以上, 以保证岩石试样内部和外部都能达到试验设定的温度且均匀一致, 当岩样达到冻结时间要求后, 从低温控温箱中取出岩样并立即进行试样安装。(2) 首先给试样套上专用热缩软管, 然后加热热缩管使得试样两端和上下压头固定, 同时安装好应变装置且保证试样与试验机压头竖直对齐, 最后将压力室内充满硅油。通过低温控制系统对压力室进行降温, 达到试验设定温度后继续恒温 12 h 以上, 减小试样内部和外部之间的温度误差。(3) 建立三轴压缩试验程序, 对岩石试样进行三轴压缩

试验。按照试验指导书的要求同时施加围压和轴向荷载直至试验设定的围压值大小, 在试验过程中围压保持恒定不变, 然后施加 $0.5 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的轴压直至试样破坏。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

图 1 为不同温度下饱和风化花岗岩偏应力-应变曲线, 图中 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力, σ_1 为最大主应力, σ_3 为围压, ε_1 为轴向应变, ε_3 为径向应变。由图 1 可以看出, 试样压密阶段不明显, 应力应变曲线由线弹性发展到屈服破坏阶段后岩样强度急剧下降, 但是风化花岗岩整体表现为弹脆性破坏, 塑性屈服阶段不明显, 破坏前岩石的应变随围压增大而增加, 有向延性转化的趋势。

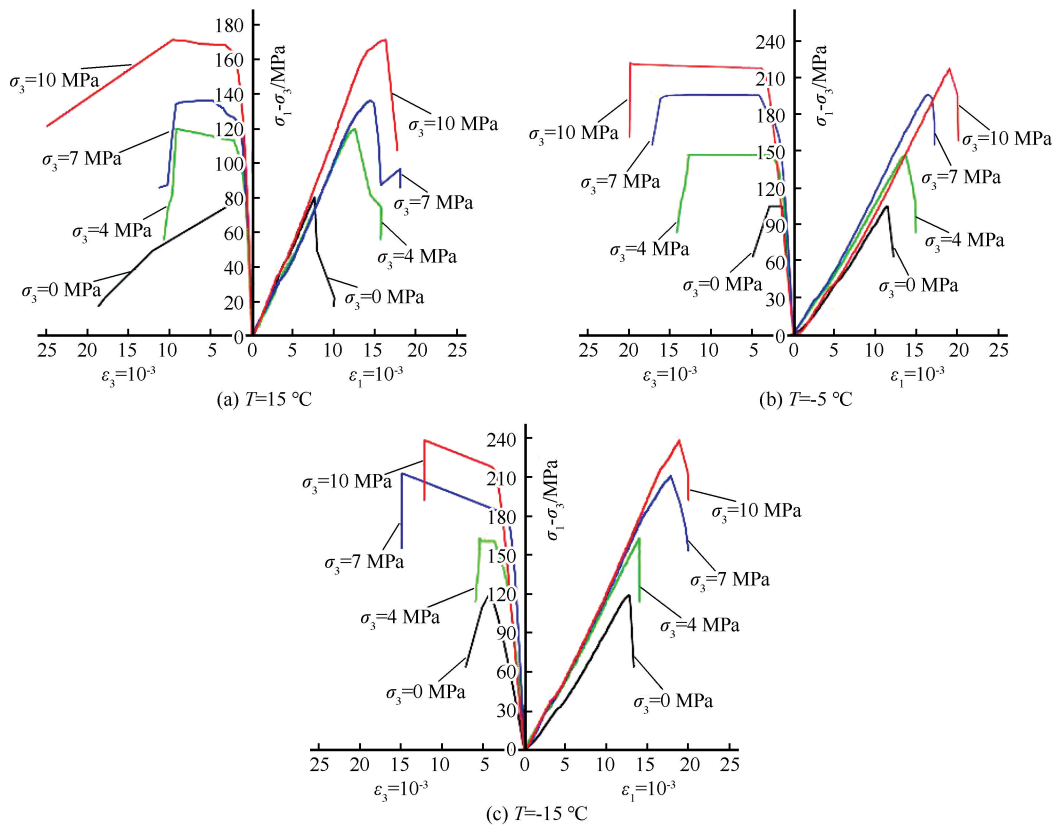


图 1 不同温度下饱和风化花岗岩偏应力-应变曲线

Fig. 1 Deviatoric stress - strain curves of saturated weathered granite under different temperatures

由图 2 不同围压下饱和风化花岗岩偏应力-应变曲线可得, 在相同围压条件下, 风化花岗岩抗压强度随温度降低而增大, 且岩石试样的应变随温度降低也略微增大。其原因当温度降低时, 矿物颗粒及内部的微裂纹和间隙收缩, 使得矿物颗粒之间

的胶结作用增强, 岩石强度提高, 应变增大。

根据不同温度下各围压所对应的最大主应力值, 绘制不同温度下饱和风化花岗岩三轴压缩应力摩尔圆如图 3 所示。在相同温度下, 摩尔圆半径随着围压的增大而增大, 随着温度降低, 强度包络线

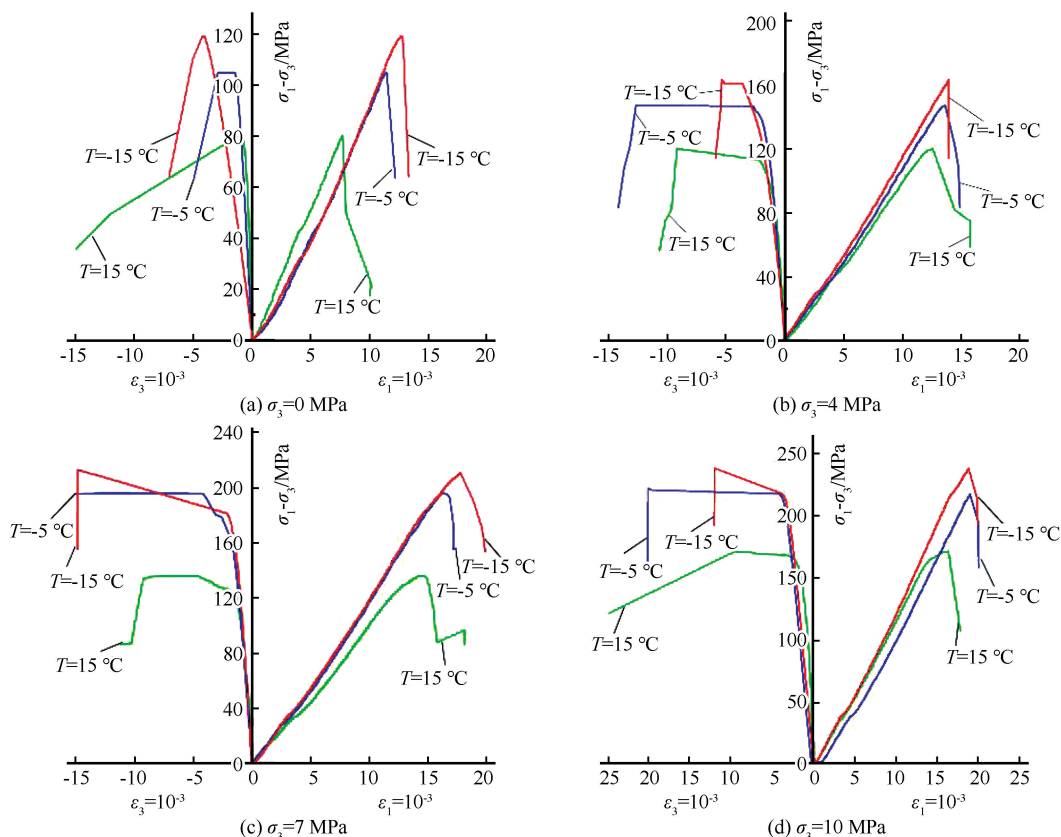


图2 不同围压下饱和风化花岗岩偏应力-应变曲线

Fig. 2 Deviatoric stress-strain curves of saturated weathered granite under different confining stresses

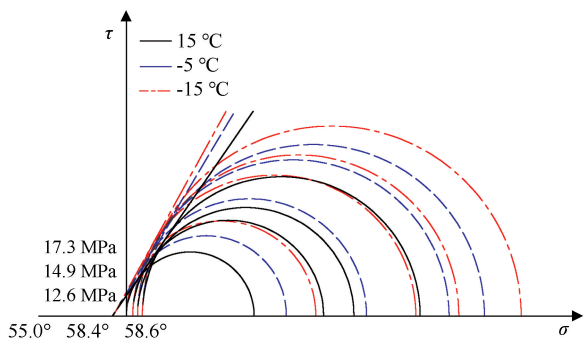


图3 不同温度下饱和风化花岗岩三轴压缩摩尔应力圆

Fig. 3 Mohr circles of saturated weathered granite under triaxial compression under different temperatures

的斜率及其与纵轴截距均增大,由摩尔圆得到的风化花岗岩强度参数如表2所示。

由风化花岗岩偏应力-应变曲线图可知,在不考虑初始压密阶段的非线性变形时,偏应力与轴向应变成线性关系,并且花岗岩试样在接近破坏时仍具有良好的线性变形特征,根据规范^[30]中计算切线弹性模量和泊松比的方法,则不同温度和围压下饱和风化花岗岩的弹性模量 E ,泊松比 μ 计算式为:

$$E = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量,MPa; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}$ 为花岗岩偏应力-应变曲线上最大抗压强度一半时所对应的应力值,MPa; $\varepsilon_{0.5}$ 为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}$ 所对应的轴向应变值, ε_3 、 ε_1 分别为径向应变和轴向应变的绝对值,则不同温度和围压条件下风化花岗岩的弹性模量和泊松比如表3所示。

2.2 温度和围压对风化花岗岩强度特性的影响

为了单独研究温度和围压对风化花岗岩强度特性的影响,采取控制变量法。由图1、表2可以看出,当温度一定时,风化花岗岩的三轴抗压强度均随围压增大而增大,在控制温度为15 °C时,围压从0 ~ 10 MPa最大主应力最大增长了129.9%;温度为-5 °C时,从0 ~ 10 MPa最大主应力最大增长了114.8%;温度为-15 °C时,最大主应力最大增长了108.3%,可得围压的增大对岩体强度有明显提高作用。由表2数据则可知不同温度下风化花岗岩的抗压强度-围压的关系曲线,如图4所示。

表2 不同温度条件下风化花岗岩强度参数

Table 2 Parameters of weathered granite strength under different temperatures

温度/℃	σ_1/MPa				黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
	$\sigma_3=0 \text{ MPa}$	$\sigma_3=4 \text{ MPa}$	$\sigma_3=7 \text{ MPa}$	$\sigma_3=10 \text{ MPa}$		
15	80.3	123.9	143.0	184.6	12.6	55.0
-5	104.7	150.9	202.8	225.0	14.9	58.4
-15	119.1	182.0	208.9	248.1	17.3	58.6

表3 不同温度和围压条件下风化花岗岩的弹性模量和泊松比

Table 3 Elastic modulus and Poisson's ratio of weathered granite under different temperatures and confining stresses

温度/℃	弹性模量 E/GPa				泊松比 μ			
	$\sigma_3=0 \text{ MPa}$	$\sigma_3=4 \text{ MPa}$	$\sigma_3=7 \text{ MPa}$	$\sigma_3=10 \text{ MPa}$	$\sigma_3=0 \text{ MPa}$	$\sigma_3=4 \text{ MPa}$	$\sigma_3=7 \text{ MPa}$	$\sigma_3=10 \text{ MPa}$
15	10.22	10.62	11.44	12.20	0.107	0.112	0.134	0.155
-5	10.89	11.26	12.09	12.79	0.111	0.122	0.143	0.163
-15	11.98	12.24	13.43	13.66	0.128	0.136	0.168	0.185

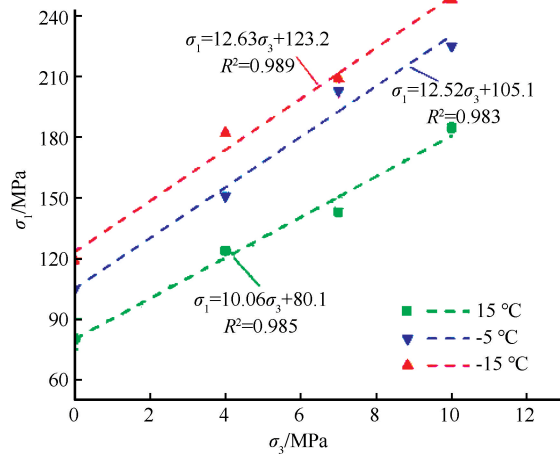


图4 围压对饱和风化花岗岩抗压强度的影响曲线

Fig. 4 Influence curves of confining pressure on the compressive strength of saturated weathered granite

从图4中可以看出,随着围压的增大岩石的抗压强度增加,对图4中的各点进行线性拟合,则可以得到围压与最大主应力的拟合函数关系式为

$$\begin{cases} \sigma_1 = 10.06\sigma_3 + 80.1 & (T = 15\text{ }^\circ\text{C}) \\ \sigma_1 = 12.52\sigma_3 + 105.1 & (T = -5\text{ }^\circ\text{C}) \\ \sigma_1 = 12.63\sigma_3 + 123.2 & (T = -15\text{ }^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (3)$$

由库伦准则的不变量关系可以得到最大主应力与围压之间的关系为:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

根据式(4)知,由最大主应力与最小主应力的拟合函数得到的不同温度下风化花岗岩的黏聚力和内摩擦角与应力摩尔圆得到的值近似相等,说明式(3)的拟合结果准确可靠。

当围压一定时,风化花岗岩的抗压强度随温度

降低而增大,在单轴压缩状态下,温度从15 °C降到-15 °C最大主应力最多增长了48.3%;当围压为4、7、10 MPa时,从15 °C降到-15 °C最大主应力分别提高了46.8%、46.1%、34.4%,可见温度对风化花岗岩强度影响显著。

风化花岗岩的内摩擦角 φ 由正温降低到负温时略有增大,温度由-5 °C降到-15 °C,内摩擦角则基本保持不变,主要原因是由正温到负温,饱和风化花岗岩微裂纹和孔隙中的水冻结成冰,会增大孔隙和微裂纹的表面摩擦力,从而使内摩擦角增大。黏聚力 c 则会随温度的降低而增大,其主要原因可以分为两个方面,一方面当温度降低时,花岗岩试样中矿物颗粒及内部的微裂纹和间隙收缩,使矿物颗粒之间的胶结作用增强,黏聚力增大;另一方面,在冻结温度下,饱和试样内部的孔隙水凝结成冰,也会使岩石内部微裂纹之间的黏结作用增强,从而提高了岩石强度。综上所述,围压的增加和温度的降低,使得风化花岗岩的最大主应力不断提高;其黏聚力增加的同时内摩擦角 φ 随温度降低呈增长趋势;温度和围压是影响风化花岗岩强度特性的两个重要因素。

2.3 温度和围压对风化花岗岩变形特性的影响

岩石的变形特性通常用弹性模量、变形模量和泊松比等指标来表征^[31],在线弹性材料中,变形模量等于弹性模量。由表3可知,在不同温度条件下,风化花岗岩的弹性模量均随围压增大呈增大趋势,同时在各围压条件下,弹性模量随温度降低也略微增大。当温度为15 °C时,弹性模量从围压为0 MPa时的10.22 GPa,增长到围压为10 MPa时的

12.20 GPa, 增长了 19.4%; 当温度为 -5°C 时, 弹性模量增长了 17.4%; 温度为 -15°C 时, 增长了 14.0%。弹性模量随围压增大不断提高, 而温度降低使得增长幅度逐渐减小。泊松比也随温度降低而增大, 随围压升高呈增大趋势, 变化趋势与弹性模量类似, 这里不再赘述。从图 5 和图 6 拟合曲线可以看出温度和围压与弹性模量均有很好的线性相关性。

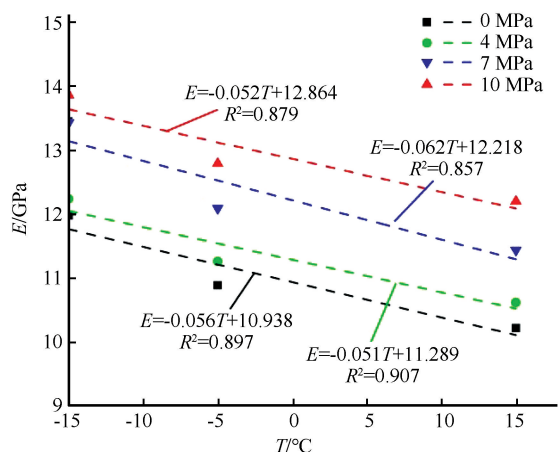


图 5 温度对弹性模量的影响曲线

Fig. 5 Influence curves of temperature on elastic modulus

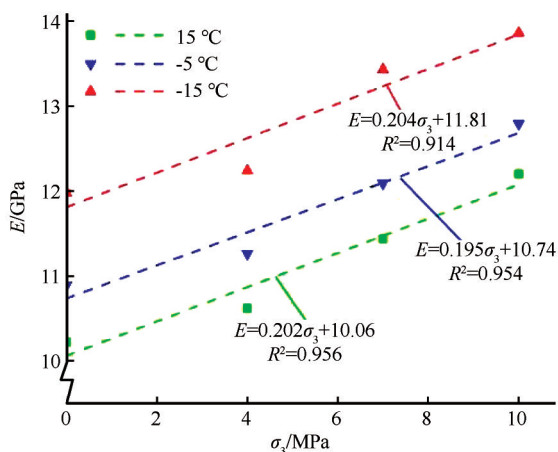


图 6 围压对弹性模量的影响曲线

Fig. 6 Influence curves of confining pressure on elastic modulus

弹性模量和泊松比受温度和围压的影响, 实质上是因为风化花岗岩内部存在微裂纹和孔隙, 在温度从 15°C 降到 -15°C 时, 饱水状态下风化花岗岩内部孔隙和微裂纹基本被冰填充, 增大了孔隙、裂纹与颗粒之间的接触面积。在荷载作用下, 冰破碎后接触表面积进一步增大, 在围压的作用下, 使垂直于接触面的正压力进一步增大, 故摩擦力增大会使

得岩石强度明显提高, 宏观表现为弹性模量增大^[22]。由前面分析当温度降低时, 矿物颗粒之间的胶结作用增强, 岩石强度提高, 应变增大, 泊松比也略微提高。这一结论与文献 [32] 的研究成果一致。

图 7 为风化花岗岩 15°C 和 -15°C 单轴和三轴压缩后的破坏形态。从不同温度和围压分析其破坏形式, 可得: (1) 当温度为 15°C , 围压为 0 MPa 时, 岩石试样发生劈裂破坏, 局部发生剪切破坏, 表面可见多条近乎垂直方向的裂纹; 围压为 4 MPa 时, 岩石试样从劈裂破坏向剪切破坏过渡, 仅见单条裂纹且与最大主应力方向成一定夹角; 围压为 7 MPa 时, 试样以剪切破坏为主, 试样的破裂面延伸至两侧; 围压为 10 MPa 时, 试样仍然以剪切破坏为主, 只有一个明显的主破裂面, 且破裂面延伸至试样两端。(2) 当温度为 -15°C 时, 试样表面仅见单条清晰裂纹, 主破裂面与最大主应力方向近似平行, 破坏形态与 15°C 条件相似; 围压为 4 MPa 时, 岩石试样发生剪切破坏, 试样中部发生劈裂破坏, 破裂面延伸至侧面。围压为 7 MPa 时, 试样以剪切破坏为主, 局部发生劈裂破坏, 破裂面延伸至试样侧面及端部; 围压为 10 MPa 时, 岩石试样发生明显的剪切破坏。

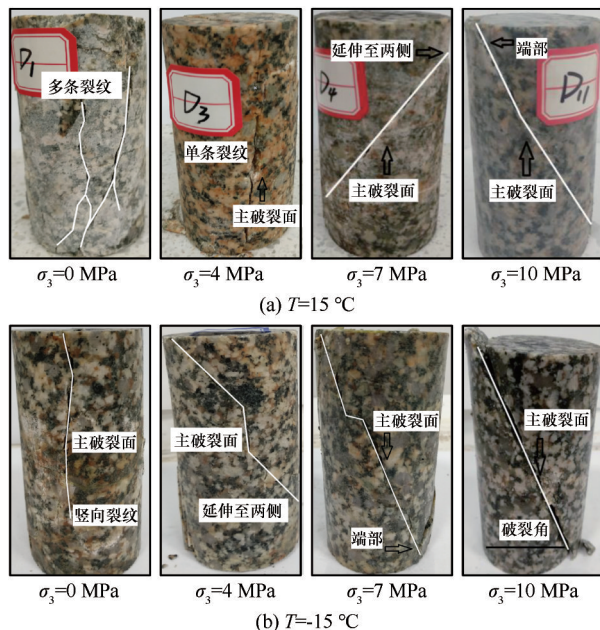


图 7 不同温度下饱和风化花岗岩破坏形态

Fig. 7 Failure modes of saturated weathered granite under different temperatures

胶结作用增强, 黏聚力提高, 岩石试样强度增强。围压增加导致岩石试件经历以劈裂破坏为主再逐渐到斜面剪切破坏, 与温度降低导致的破坏机制不同。在荷载作用下, 孔隙冰破碎后裂隙接触充分, 施加围压使垂直于接触面的正压力进一步增大, 故摩擦力增大会使得岩石强度明显提高。

3 结论

本文从新疆天山某一矿区的岩石边坡现场采取花岗岩试样, 分别对不同温度(15、-5、-15 °C)和不同围压(0、4、7、10 MPa)条件下的饱水风化花岗岩进行单轴及三轴压缩试验, 分析了温度和围压对风化花岗岩的强度与变形影响规律。主要结论如下:

(1)在温度一定时, 岩石抗压强度随着围压的增大线性增加, 而在相同围压下, 随着温度的降低抗压强度明显提高。同时, 风化花岗岩的黏聚力 c 随温度降低而增大, 内摩擦角 φ 随温度降低呈增长趋势, 温度和围压是影响风化花岗岩强度特性的两个重要因素。

(2)风化花岗岩试样的变形特性指标也受温度和围压的影响, 当温度一定时, 弹性模量随围压的增大不断提高, 但随着温度的降低, 增长的幅度会逐渐减小。泊松比也随温度降低而增大, 随围压升高呈增大趋势。

(3)温度和围压对风化花岗岩试样的破坏形态影响机制不同, 温度降低使矿物颗粒及内部的微裂纹和间隙收缩, 进而胶结强度增大。围压增大导致岩石内部形成微裂隙并逐渐贯通, 同时在荷载作用下, 孔隙冰破碎后裂隙接触充分, 施加围压使接触面上垂直于接触面的正压力进一步增大, 故摩擦力增大会使得岩石强度提高。

参考文献(References):

- [1] Kong Xiangzhi, Hu Yingchun. Advantages, emphases and countermeasures on the development of mineral resources in China's western region[J]. Journal of China University of Geosciences(Social Sciences Edition), 2003, 3(6): 7-11. [孔祥智, 胡迎春. 西部地区矿业发展的现状及对策[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2003, 3(6): 7-11.]
- [2] Gruber S, Hoelzle M, Haeblerli W. Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(13): 5-8.
- [3] Ito Y, Kusakabe Y, Anan S. Experimental study on rock deterioration by repetition of freezing and thawing, and by repetition of dry and wet in cold region[J]. Engineering Geology for Society and Territory, 2014, 8(5): 1293-1297.
- [4] Mu Jianqiao, Pei Xiangjun, Huang Runqiu, et al. Degradation characteristics of shear strength of joints in three rock types due to cyclic freezing and thawing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 5(138): 91-97.
- [5] Zhou Keping, Zhang Yamin, Li Jieli, et al. Granite micro-structure deterioration characteristic under condition of freezing-thawing based on NMR technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3384-3389. [周科平, 张亚民, 李杰林, 等. 冻融花岗岩微观损伤演化的核磁共振[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3384-3389.]
- [6] Wang Lehua, Jiang Zhaorong, Li Jianlin, et al. The bedding sandstone unloading mechanical properties experimental study in the freeze-thaw cycle conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1052-1058. [王乐华, 姜照容, 李建林, 等. 冻融循环条件下层理砂岩卸荷力学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1052-1058.]
- [7] Chen Zhaojun, Wang Lehua, Wang Simin, et al. Loading and unloading mechanical characteristics of rock under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(1): 98-103. [陈招军, 王乐华, 王思敏, 等. 冻融循环条件下岩石加卸荷力学特性研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1): 98-103.]
- [8] 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. [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.]
- [9] Lu Yani, Li Xinping, Wu Xinghong. Failure modes of fractured rock masses under freeze-thaw action and load[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 351-357. [路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 单轴压缩条件下裂隙岩样冻融损伤破坏模式分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 351-357.]
- [10] Park C, Synn J H, Shin H S, et al. An experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(3): 367-368.
- [11] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(7): 1029-1034.
- [12] Kodama J, Goto T, Fujii Y, et al. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 62(2): 1-13.
- [13] Dwivedi R D, Soni A K. Fracture roughness of rocks under sub-zero temperature conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(8): 1267-1275.
- [14] Rathnaweera T D, Ranjith P G, Gu X, et al. Experimental investigation of thermomechanical behaviour of clay-rich sandstone at extreme temperatures followed by cooling treatments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 7(107): 208-223.
- [15] Yang Gengshe, Xi Jiami, Shao Xuemin, et al. Experimental study on rock strength properties under freezing conditions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(1): 14-18. [杨更社, 奚家米, 邵学敏, 等. 冻结条件下岩石强度特性的试验[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(1): 14-18.]
- [16] Yang Gengshe, Xi Jiami, Li Huijun, et al. Experimental study of rock mechanical properties under triaxial compressive and

- frozen conditions[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 459 – 464. [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.]
- [17] Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. Preliminary study of meso-damage propagation characteristics of rock under condition of freezing temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1409 – 1412. [杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度对岩石细观损伤扩展特性影响研究初探[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1409 – 1412.]
- [18] Li Ning, Zhang Ping, Cheng Guodong. Short cycling dynamic testing study of fracturing sandstone at frozen temperature[J]. Progress of Natural Science, 2001, 11(11): 1175 – 1180. [李宁, 张平, 程国栋. 冻结裂隙砂岩低周循环动力特性试验研究[J]. 自然科学进展, 2001, 11(11): 1175 – 1180.]
- [19] Zhang Jinxun, Yang Hao, Shan Renliang, et al. Experimental study on mechanical characteristics of two parallel fractured rock under frozen condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3573 – 3581. [张晋勋, 杨昊, 单仁亮, 等. 冻结条件下平行双裂隙岩体力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3573 – 3581.]
- [20] Xi Jiami, Fu Lei, Jia Xiaofeng, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of Cretaceous rock under freezing-thawing action[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 253 – 259. [奚家米, 付垒, 贾晓峰, 等. 不同冻融状态下白垩系常见岩层物理力学特性对比分析[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 253 – 259.]
- [21] Xu Guangmiao, Liu Quansheng, Peng Wanwei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2286 – 2289. [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): 2286 – 2289.]
- [22] Tang Mingming, Wang Zhiyin, Sun Yili, et al. Experimental study of mechanical properties of granite under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 787 – 794. [唐明明, 王芝银, 孙毅力, 等. 低温条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 787 – 794.]
- [23] Shan Renliang, Bai Yao, Sun Pengfei, et al. Study of triaxial creep mechanical properties and constitutive model of frozen stratified red sandstone[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 12 – 22. [单仁亮, 白瑶, 孙鹏飞, 等. 冻结层状红砂岩三轴蠕变特性及本构模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 12 – 22.]
- [24] Zhang Huan, Ping Qi, Wu Mingjing. Experimental study on dynamic compressive mechanical properties of sandstone with low temperature and natural water content[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 79 – 85. [张欢, 平琦, 吴明静. 低温含水砂岩动态压缩力学性能试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 79 – 85.]
- [25] Wang Kailin, Yang Shengqi, Su Chengdong. Test study on the mechanical property of tuff at different strain rates in freezing condition[C]//Essays on Academic Conference of the 2006 National Mine Construction: vol II. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology Press, 2006: 330 – 334. [王开林, 杨圣奇, 苏承东. 冻结状态多级应变速率下凝灰岩力学特性的试验研究[C]//2006 全国矿山建设学术会议文集: 下册. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 330 – 334.]
- [26] Wang Jianguo, Lei Zhen, Yang Yang, et al. Strain rate effect of dynamic mechanical characteristics of saturated freezing granite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1292 – 1297. [王建国, 雷振, 杨阳, 等. 饱水冻结花岗岩动态力学性状的应变率效应[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1292 – 1297.]
- [27] Shan Renliang, Song Liwei, Li Dongyang, et al. Study on the strength characteristics and deformation rule of red sandstone in Meilinmiao mine under negative temperature[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(2): 299 – 303. [单仁亮, 宋立伟, 李东阳, 等. 负温条件下梅林庙矿红砂岩强度特性及变形规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 299 – 303.]
- [28] Shan Renliang, Yang Hao, Guo Zhiming, et al. Experimental study of strength characters of saturated red sandstone on negative temperature under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Suppl 2): 3657 – 3664. [单仁亮, 杨昊, 郭志明, 等. 负温饱水红砂岩三轴压缩强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3657 – 3664.]
- [29] The professional standards compilation group of People's Republic of China. Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering: SL 264 – 2001[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2001: 30–31. [中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程: SL 264 – 2001[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 30 – 31.]
- [30] Ministry of geology and mineral resources of the People's Republic of China. Test procedures for physical and mechanical properties of rocks[S]. Beijing: geological press, 1995: 80 – 81. [中华人民共和国地质矿产部. 岩石物理力学性质试验规程[S]. 北京: 地质出版社, 1995: 80 – 81.]
- [31] Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 104 – 108. [蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 104 – 108.]
- [32] Li Yunpeng, Wang Zhiyin. Uniaxial compressive mechanical properties of rock at low temperature[J]. Chinese Journal of Engineering, 2011, 33(6): 671 – 675. [李云鹏, 王芝银. 岩石低温单轴压缩力学特性[J]. 工程科学学报, 2011, 33(6): 671 – 675.]

The strength and deformation characteristics of saturated weathered granite under different temperature conditions

LI Jinming^{1,2}, LI Guoyu¹, PENG Wanlin³, CHEN Dun¹, ZHOU Yu^{1,2}, LIU Cunfu⁴

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. No. 3

Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang, Korla 841000, Xinjiang, China;

4. Yalong River Hydropower Development Company, LTD, Chengdu 610051, China)

Abstract: To investigate the influence of confining pressure and temperature on strength of rock, a series of uni-axial and triaxial compression tests were conducted on weathered granite at different temperatures (15, -5, -15 °C) and confining pressures (0, 4, 7, 10 MPa). Results show that: (1) When the confining pressures range from 0 to 10 MPa, the triaxial compressive strength of weathered granite increased linearly under the same temperature. Under the same confining pressure, the compressive strength of weathered granite increased obviously as the temperature decreases. Meanwhile, the cohesion increased with the temperature decreasing, the internal friction angle also increased with the temperature decreasing. (2) The modulus of elasticity increased with the increase of confining pressure. However, with the decrease of temperature, the increasing range decreases gradually. Poisson's ratio increased with the decrease of temperature and the increase of confining pressure. (3) Temperature and confining pressure are important factors affecting failure modes of weathered granite samples. The shrinkage of microcracks and interstices in mineral particles leads to the increase of cementation strength when the temperature decreases. With the increase of confining pressure and loading, micro-cracks developed and penetrated gradually. At the same time, pore ice fractured cracks were fully contacted, the friction force was further increased and the rock strength was improved.

Key words: rock mechanics; temperature; weathered granite; strength; mechanical properties

(责编委: 周成林; 编辑: 庞瑜, 周成林)