

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0156

LÜ Dunbo, ZHANG Fan, ZHANG Yifeng, et al. Experimental study on three-point bending of granite after cryogenic freeze-thaw cycles at $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1796–1806. [吕敦波, 张帆, 张益峰, 等. $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冻融循环后花岗岩三点弯曲试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1796–1806.]

$-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冻融循环后花岗岩三点弯曲试验研究

吕敦波^{1,2}, 张帆¹, 张益峰¹, 杨科¹, 吕飞¹, 胡大伟³

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250100;

3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 为了研究超低温条件下冻融循环作用对花岗岩I型断裂韧度的影响, 本文采用半圆弯曲(semi-circular bending, SCB)试样, 选取不同的冻融次数(1、2和3次), 对天然状态下的花岗岩进行 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冻融循环处理, 并对冻融循环后的花岗岩进行三点弯曲试验, 分析了 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环对花岗岩I型裂缝尖端局部破坏特征、断裂韧度以及微观结构的影响。结果表明, 随着冻融循环次数的增加, 花岗岩I型裂缝尖端局部化损伤不断加剧, 断裂韧度不断降低, 岩石内部微裂纹和孔隙数目增多, 裂隙长度增加, 孔径增大。最后, 对比分析了低温与超低温条件下岩石冻胀力和断裂韧度的变化。与低温条件相比, 超低温冻融产生的冻胀力更大, 当断裂韧度下降幅度近似一致时, 岩石在低温下需要冻融循环的次数更多。研究结果可为超低温环境下液化天然气(LNG)的地下存储提供相应的理论参考。

关键词: 超低温; 断裂韧度; 冻融循环; 花岗岩; 三点弯曲

中图分类号: TU458⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1796-11

0 引言

国家的正常运转、战略储备、季节性调峰需求以及应对一些突发事件如自然灾害等, 均需要国家储备足够的石油、天然气等能源, 以此来保障我国政治和经济的稳定^[1]。液化天然气(liquefied natural gas, LNG)的地下存储已经成为关系到我国经济发展和战略安全的重要措施之一^[2]。由于液化天然气(LNG)在常压下需要在超低温($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下才能被液化存储, 因此, 超低温地下储气库中的岩石力学问题备受关注^[3]。花岗岩作为LNG地下储库中的主要岩石, 了解超低温条件下花岗岩物理力学性质的变化十分必要, 这对于超低温环境下液化天然气(LNG)的地下存储具有重要意义。

国内外学者就低温条件下冻融循环作用对岩石物理力学性质的影响开展了大量试验研究。王冲等^[4]通过巴西劈裂试验, 研究了不同温度($-10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)和不同含水率对砂岩抗拉强度的影响。诸多

研究者在 $-40\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内对冻融循环后的砂岩、花岗岩、英安岩以及玄武岩进行了单轴压缩试验, 研究了冻融循环作用对不同类型岩石抗压强度、弹性模量等物理力学参数的影响^[5-10]。杨秀荣等^[11]在 $-18\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环条件下, 对片麻岩进行了三轴蠕变试验, 分析了冻融循环作用对片麻岩蠕变特性的影响。刘杰等^[12]对 $-40\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环后的砂岩进行了不同循环幅度值的动力测试, 分析了岩石在不同上限应力循环作用下的动力响应变化规律。Tan^[13]、王劲翔等^[14]对 $-40\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环后的花岗岩和英安岩进行了三轴抗压强度试验, 研究表明岩石的强度、变形特征和弹性模量均发生显著变化, 其微观结构发生变化, 进而表现出宏观力学特性的变化。

与低温冻融循环相比, 超低温冻融循环在岩石内部产生的温度应力更大, 对内部结构造成的损伤更严重, 因此, 超低温冻融循环对岩石力学性质的

收稿日期: 2022-03-15; 修订日期: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979100); 山东省鲁南地质工程勘察院开放基金(LNY2020-Z08)资助

作者简介: 吕敦波, 硕士研究生, 主要从事岩石力学研究. E-mail: 925594095@qq.com

通信作者: 张帆, 教授, 主要从事岩石力学、岩土材料多场耦合研究. E-mail: fanzhang@hbut.edu.cn

影响更为显著。于恩毅等^[15]对-100 ℃冻融循环后的灰岩进行了单轴抗压强度试验,研究了超低温冻融循环条件下灰岩抗压强度的演化特征。Inada等^[16]通过单轴压缩和拉伸试验,研究了-160~20 ℃下花岗岩和安山岩在干燥和饱和状态下的抗压和抗拉强度。Aoki等^[17]通过单轴压缩试验和巴西劈裂试验,研究了-160~15 ℃下花岗岩、片岩和泥岩等不同类型岩石的力学性质。赵波等^[18]在25 ℃和液氮(-196 ℃)实时温度下对砂岩进行了单轴压缩和拉伸试验,研究了超低温作用对砂岩基本力学参数及其变化规律的影响。蔡承政等^[19]利用液氮(-196 ℃)超低温作用,对页岩进行了液氮压裂试验,研究了超低温作用对页岩破裂压力、裂缝形态以及破裂特征的影响。

上述研究主要集中在低温条件下冻融循环对岩石抗压和抗拉强度的影响,而对于-160~25 ℃超低温冻融循环后关于花岗岩断裂韧度的研究并不多见。为进一步探究超低温对岩石物理力学性质的影响,本文对天然状态下经不同次数超低温(-160 ℃)冻融循环后的花岗岩开展断裂韧度试验研究,分析了超低温冻融循环对花岗岩I型裂缝尖端局部破坏特征、断裂韧度以及微观结构的影响。研究结果可为超低温环境下液化天然气(LNG)的地下存储提供相应的理论参考。

1 试验准备及试验方法

1.1 试样制备

本试验所采用的花岗岩试样来自福建省南安市水头镇,该区域的花岗岩在常温下呈灰蓝色,结构致密低渗、无裂纹,与液化天然气(LNG)地下储库岩石的岩性相一致,可作为大型LNG储库地基持力层岩石。根据国际岩石力学学会(international society for rock mechanics, ISRM)规范要求^[20],将试样加工成直径 $D=76$ mm,半径 $R=38$ mm,厚度 $B=30$ mm,裂缝长度 $a=19$ mm,宽度小于2 mm的半圆弯曲(SCB)形状(图1),试样表面打磨至光滑平整。经测量,室温环境下花岗岩的天然密度约为 $2.785 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,天然含水率为0.13%,平均孔隙率为0.62%,饱和含水率为0.23%。采用X射线衍射试验获得花岗岩试样的主要矿物成分为钠长石(40%)、云母(31%)、石英(22%)和透闪石(7%)。

1.2 试验设备

本文采用ETM305D微机控制电子万能试验

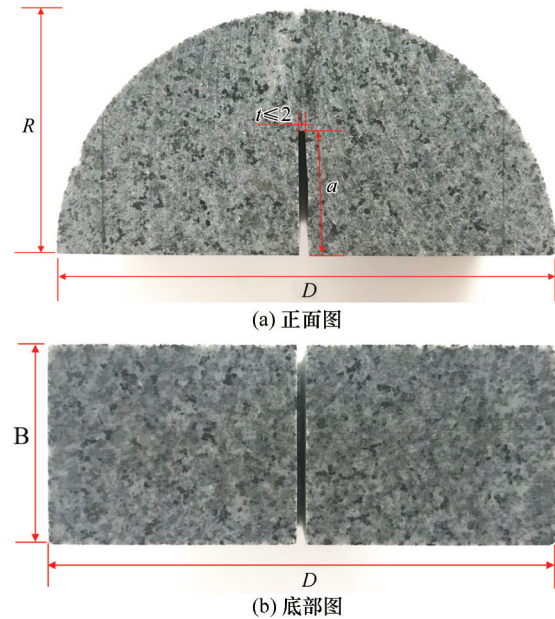


图1 试样尺寸示意图

Fig. 1 Sample size diagram

机,对天然状态下经超低温冻融循环处理后的花岗岩进行三点弯曲试验。该设备加载方式采用位移控制,最大加载力为300 kN,可用于岩石的拉伸、压缩、三点弯曲以及变角剪切等力学试验。试验机结构紧凑,关键受力部件采用高刚性合金钢制造,可确保试验机的整体刚度,能够实现力、变形和位移全数字三闭环精准控制。在试验过程中,试样断裂产生的裂纹左右偏转距离不超过 $0.05D$ ^[20]。本试验选取带有刻度的三点弯曲试验夹具,并预先在试样中轴线上绘制辅助线,便于准确放置试样,确保试样受拉劈裂破坏,获得正确的断裂韧度。

1.3 试验方法

本文采用GWX-300型深冷环境试验箱(图2)



图2 深冷环境试验箱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cryogenic environment test chamber

对天然状态下的花岗岩进行 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冻融循环处理。该设备内外主体结构均是由平整度较高的 SUS304 不锈钢钢板制造,内胆工作室采用 SUS304 加厚型不锈钢板制造,深冷环境试验箱的箱门(上开式)采用特殊耐低温密封装置,可将温度降至 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$,深冷环境试验箱内的温度控制精度为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,均匀性为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,显示精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。深冷环境试验箱内配有送风循环系统,能够精确保证工作室的温度要求。该设备是利用液氮作为冷却介质,通过智能仪表控制系统,实现对天然状态下花岗岩试样的超低温($-160\text{ }^{\circ}\text{C}$)冻结处理。

鉴于岩石材料低温($-40\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)冻融循环 3 次

后其抗压强度、弹性模量以及纵波波速均减小,冻胀力增加^[21-22],本文选取 3 组循环次数(1,2 和 3 次),对花岗岩进行 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冻融循环处理,并取未冻融试样(0 次)作为对照组,试样的冻融循环过程如图 3 所示。首先测量天然状态下的花岗岩试样的质量和体积,然后将试样放置在深冷环境试验箱中进行超低温冻结处理,花岗岩试样经过 4 h 由常温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)冷却至 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均冷却速率约为 $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,达到目标温度后恒温 2 h,然后将试样放置在常温环境下自然解冻 4 h,直至试样温度恢复至常温,记作一次冻融循环,并对冻融循环后花岗岩试样的质量和体积进行测量。

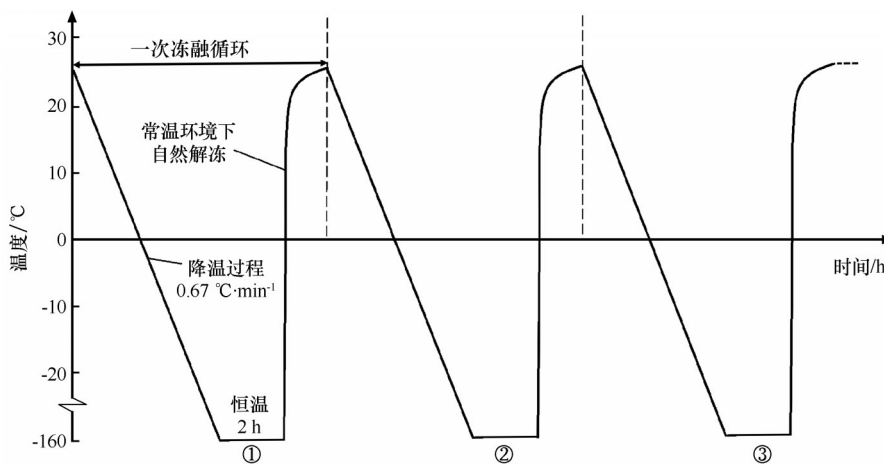


图 3 花岗岩冻融循环处理过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of freeze-thaw cycles treatment process of granite

图 4 为经 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冻融循环后花岗岩试样的外观颜色变化。从图中可以看出,经冻融循环后花岗岩试样表面光滑完整,无明显缺陷。常温环境下花岗岩的颜色为灰蓝色,随着冻融循环次数的增加,颜色逐渐加深。为了避免动态断裂效应,使预制裂缝尖端的断裂过程区得以充分发展^[23],三点弯曲试验设置 5 N 的初始入口力,花岗岩试样通过万能试验机以 $0.01\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的加载速率均匀加载至破坏,并记录其破坏荷载。本文所有试验均在常温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行,为了确保试验结果的准确性,每个工况均进行了 3 次重复性试验,并按 1、2、3 顺序编号。

2 试验结果

2.1 质量和密度

本文对天然状态下的花岗岩试样进行超低温冻融循环处理,通过测量获得未冻融和冻融循环(1,2 和 3 次)前后花岗岩试样的质量和体积,通过计

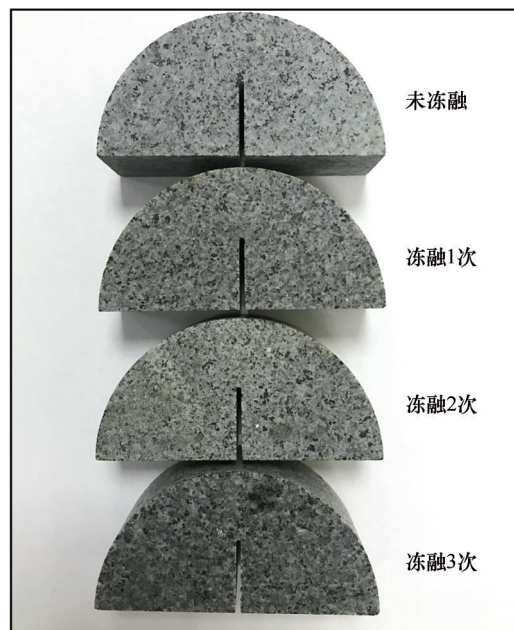


图 4 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环后花岗岩外观颜色变化

Fig. 4 Appearance and color change of granite after freeze-thaw cycle at $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$

算公式(1)和(2)获得冻融前后花岗岩试样的密度(表1)。

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(1)

式中: ρ 为岩石的天然密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; m 为岩石天然状态下的质量, g ; V 为岩石天然状态下的体积, cm^3 。

$$\rho_{f-t} = \frac{m_{f-t}}{V_{f-t}}$$

(2)

式中: ρ_{f-t} 为岩石冻融后的密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; m_{f-t} 为岩石冻融后的质量, g ; V_{f-t} 为岩石冻融后的体积, cm^3 。

结果显示,随着冻融循环次数的增加,试样的质量变化率(图6)和密度变化率(图7)先增大后降低。这主要是因为花岗岩在周期性的冻融循环过程中,孔隙中的水不断发生冰水相变^[11],在冻胀力的作用下,开孔孔隙的体积快速扩展增大,导致孔隙的容水能力增加。同时,在超低温冻结的过程中,由于花岗岩试样温度较低,空气中大量水汽会在其表面形成一层较厚的冰霜(图5),自然解冻时冰霜融化,试样开孔孔隙中的含水量进一步增加^[24],当孔隙水再次冻结成冰时,从而产生更大的冻胀力^[25]。因此,孔隙中含水量的增加是花岗岩试样质量随冻融循环次数增加而增大的主要原因^[26]。随着冻融次数的进一步增加,冻胀力作用于孔隙内壁的次数随之增多,使得孔隙内壁的岩石颗粒产生疲劳破坏,从而导致颗粒脱落,当孔隙水的增加量小于岩石颗粒脱落的质量时,在宏观上则表现为试样质量的降低^[26]。

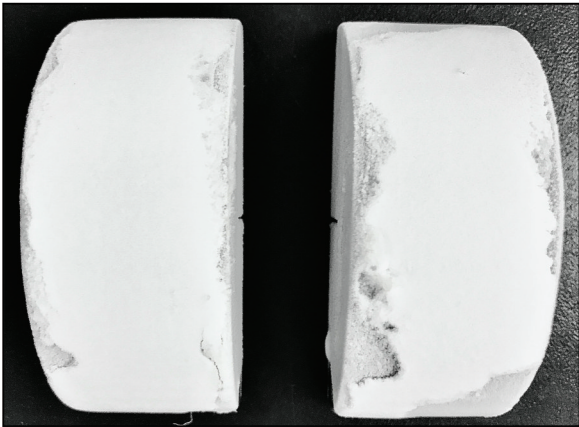


图5 -160 ℃超低温冻结后花岗岩试样外观形貌图
Fig. 5 Appearance of granite specimens after ultra-low temperature freezing at -160 ℃

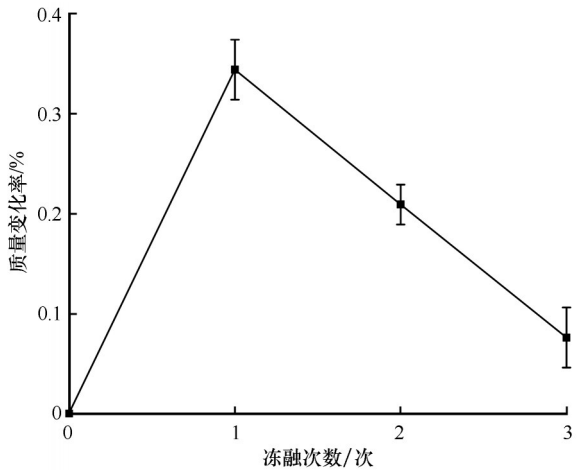


图6 质量变化率曲线
Fig. 6 Mass change rate curve

表1 不同冻融次数下花岗岩的质量、体积和密度
Table 1 Mass, volume and density of granite under different freeze-thaw times

循环次数/次	岩样编号	质量/g		体积/ cm^3		密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	
		冻融前	冻融后	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后
未冻融	F0-1	185.18	—	66.420	—	2.788	—
	F0-2	184.94	—	66.406	—	2.785	—
	F0-3	185.06	—	66.401	—	2.787	—
冻融1次	F1-1	183.97	184.28	66.296	66.383	2.775	2.776
	F1-2	184.01	184.26	66.382	66.400	2.772	2.775
	F1-3	185.44	186.79	66.394	66.426	2.793	2.812
冻融2次	F2-1	184.85	185.87	66.397	66.572	2.784	2.792
	F2-2	184.54	184.62	66.167	66.077	2.789	2.794
	F2-3	184.81	184.87	66.168	65.790	2.793	2.810
冻融3次	F3-1	185.15	185.29	66.007	66.009	2.805	2.807
	F3-2	184.89	185.09	66.008	66.009	2.801	2.804
	F3-3	185.11	185.19	66.016	65.998	2.804	2.806

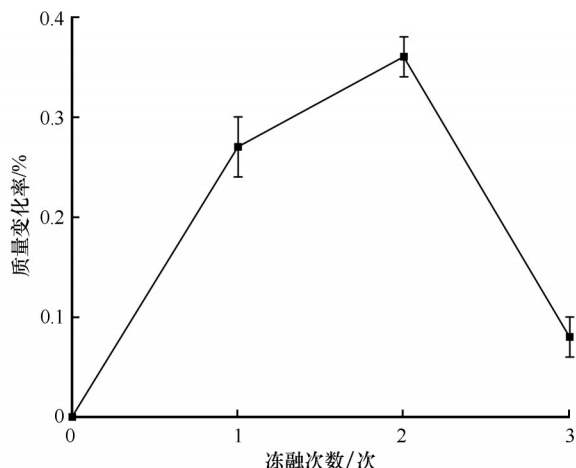


图7 密度变化率曲线

Fig. 7 Density change rate curve

2.2 裂纹扩展形态和断口形态

图8为经超低温冻融循环后,通过三点弯曲试验获得的花岗岩表面裂纹扩展形态和断口形态图。从图中可以看出,由I型裂缝尖端萌生的断裂裂纹会发生较小的横向偏移,这是因为在I型裂缝制造的过程中,会在缺口附近自然形成或诱发大量的微裂纹,这些裂纹会影响SCB试样裂缝尖端裂纹的扩展^[27]。虽然试样表面裂纹轮廓线稍显曲折,但裂纹整体趋势是沿着加载方向,向上扩展至荷载作用点,将试样破坏成两半,且扩展的轮廓线未偏离人工预制裂缝所在的垂面^[23],花岗岩的破坏形式为脆性拉伸断裂。

通过对天然状态下经-160℃冻融循环三点弯曲破坏后的花岗岩试样进行扫描电镜试验(图9),从微观角度对花岗岩断裂面进行了分析。从图中可以看出,超低温对花岗岩内部的矿物颗粒排列和微裂纹扩展具有显著影响。在未冻融条件下[图9(a)],花岗岩断裂面矿物颗粒排列紧密,表面平整,矿物颗粒间黏结紧实,孔隙较少,颗粒间仅有少许不连续的微裂纹和较短的穿晶裂纹。经历1~2次超低温冻融循环之后[图9(b)~9(c)],岩石内部发生冰水相变,矿物颗粒热胀冷缩,微裂纹在晶体胶结结构较弱的地方快速扩展,裂纹数目明显增多,分布范围更加广泛,微裂纹扩展形成晶体贯穿性裂隙,并有大量的矿物颗粒附着其上。经历3次超低温冻融循环后[图9(d)],在冻胀力作用下,微裂纹的长度和宽度进一步增加,形成相互连通的裂隙网络,晶体被穿晶裂纹分割成许多小块,晶体边缘表现为凹凸不平,矿物颗粒脱落现象明显增加^[26],试样内部结构损伤劣化严重。

2.3 断裂韧度

依据国际岩石力学学会I型断裂韧度的计算公式^[20]计算花岗岩的断裂韧度:

$$K_{IC} = \frac{P \sqrt{\pi a_{\max}}}{2RB} \quad (3)$$

$$Y' = -1.297 + 9.516(s/2R) - [0.47 + 16.457(s/2R)]\beta + [1.071 + 34.401(s/2R)]\beta^2 \quad (4)$$

式中: K_{IC} 为试样I型断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$; P_{\max} 为峰值荷载, kN; Y' 为无量纲应力强度因子, s 为支撑辊底部跨距, mm; $\beta = a/R$, 其他符号的意义同前。对于较硬花岗岩材料,使用支撑跨距和直径比值 $s/2R$ 取接近0.8的值,可使试样与支撑辊轴之间产生较小的摩擦^[20]。

图10为-160℃超低温冻融循环后花岗岩的断裂韧度曲线,从图中可以看出,超低温冻融循环作用对花岗岩断裂韧度的影响显著。随着冻融循环次数的增加,花岗岩的断裂韧度整体呈线性下降趋势。在未冻融条件下,花岗岩的断裂韧度为 $1.18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$,经冻融循环3次后,断裂韧度为 $1.01 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$,比未冻融条件下的断裂韧度值降低了15%。这主要是因为超低温冻融循环的过程中,岩石孔隙中的水不断发生冰水相变^[11],当孔隙中的水冻结成冰时,由于体积膨胀而产生的冻胀压力,导致裂隙不断扩展、延伸,形成裂隙网络,导致岩石劣化损伤^[21],并在外荷载作用下,I型裂缝尖端会因应力集中而产生明显的断裂裂纹,从而形成局部化断裂损伤。对于SCB花岗岩试样而言,I型裂缝的存在为花岗岩冻融局部化损伤效应的出现提供了基础条件,杨更社等^[28]研究表明,温度梯度是水分迁移的主要驱动力,温度梯度越大时,水分场越快达到重新分布状态。在-160~25℃较高温度梯度下,水分迁移的速度会增加,由于I型裂缝属于完全贯通,因此试样在冻结过程中,裂缝尖端的温度会更低,在冰分凝作用下,试样中的水分会逐渐向裂缝尖端迁移^[29],从而在冻融循环的过程中产生更大的冻胀力,导致裂缝尖端局部化损伤进一步加剧,最终导致试样断裂。

3 分析

本文中花岗岩的天然含水率为0.13%,饱和含水率为0.23%,在天然状态下,由于花岗岩致密、低渗的特点,岩石内部存在闭合和张开的微裂纹、孔隙[图11(a)]。花岗岩在-160℃的环境下,发生水冰相变,在冻胀力的作用下,被冻结的裂隙相对未

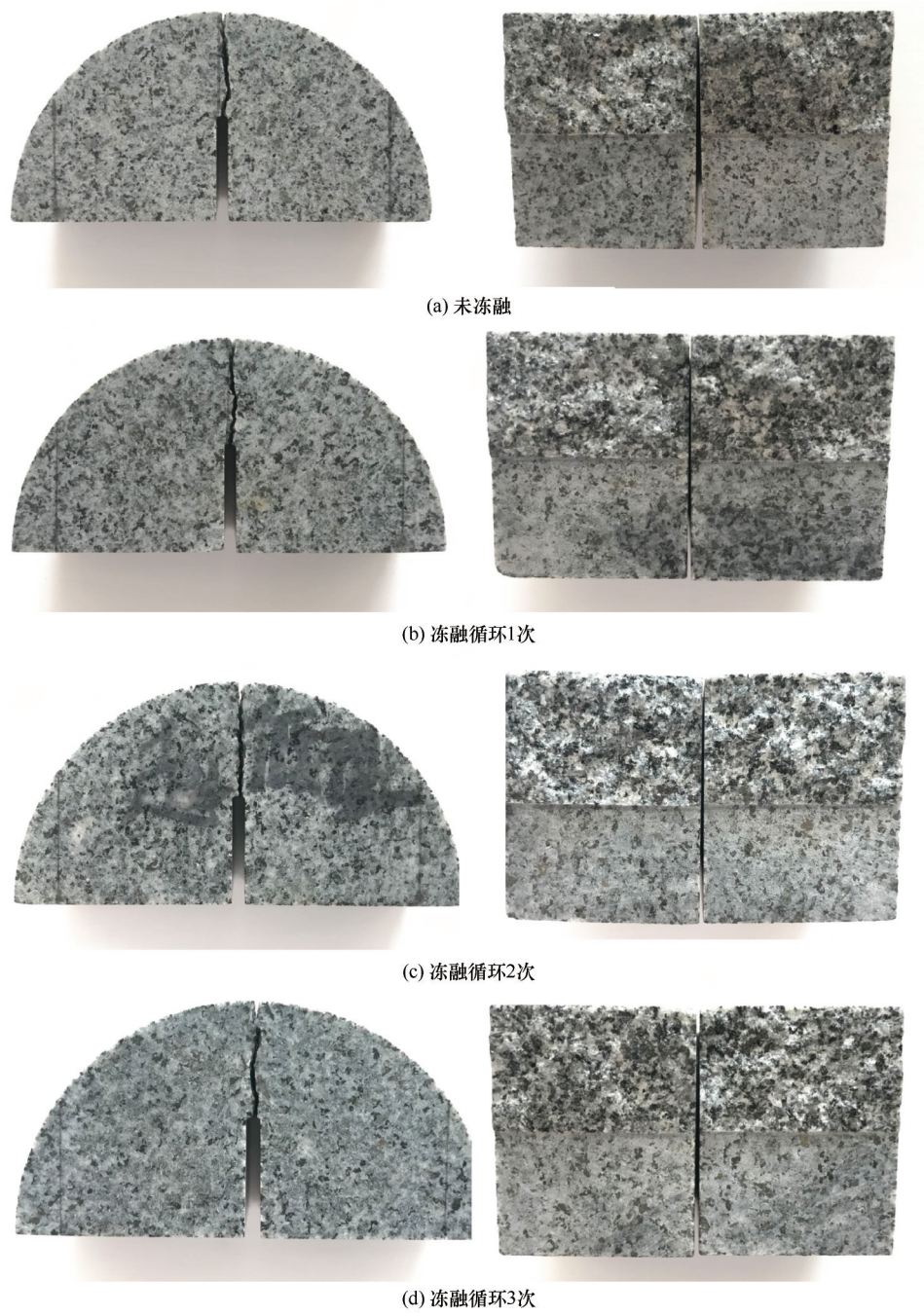


图8 花岗岩表面裂纹扩展形态和断口形态图

Fig. 8 Graph of crack propagation and fracture morphology of granite surface

冻结裂隙发生体积膨胀(膨胀量约为9%^[30]),从而导致裂隙快速扩展、贯通,并产生次生裂隙,岩石出现冻胀损伤。当温度升高时,孔隙中的冰水融化,水分迁移,导致更多的水渗入到岩石内开孔孔隙和次生裂隙中,从而在冻融循环的过程中产生更大的冻胀力,进一步加剧岩石的冻胀损伤^[11]。因此,在冻胀力的反复作用下,岩石内部形成裂隙网络,破坏了矿物颗粒间的胶结结构,最终导致岩石出现冻融损伤。

值得注意的是,水分结冰的冰点与孔径大小有关,通常孔径越小,内部毛细水的表面张力越大,其冰点越低^[31]。随着冻融循环温度的降低,毛细水结冰的冰点按照孔隙直径由大到小的顺序逐渐降低^[32]。因此,与低温冻融相比,超低温会引发更大孔径范围内的毛细水结冰膨胀,从而产生更大的冻胀应力[图 11(c)],造成的内部损伤就越大。因此,对于结构致密的花岗岩而言,超低温冻融循环对其产生的劣化损伤程度更为显著。

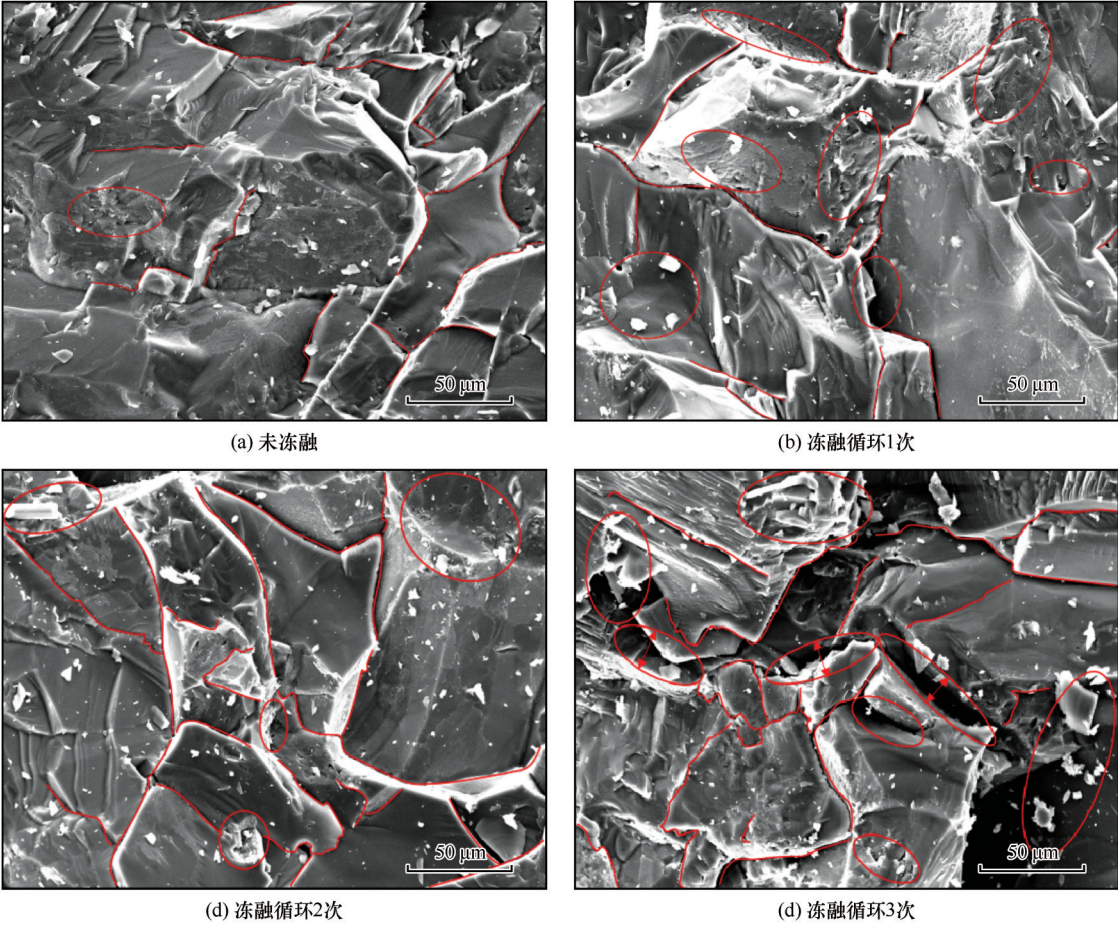


图9 不同冻融循环次数下花岗岩断裂面微观结构
Fig. 9 Microstructure of granite fracture surface under different freeze-thaw cycles

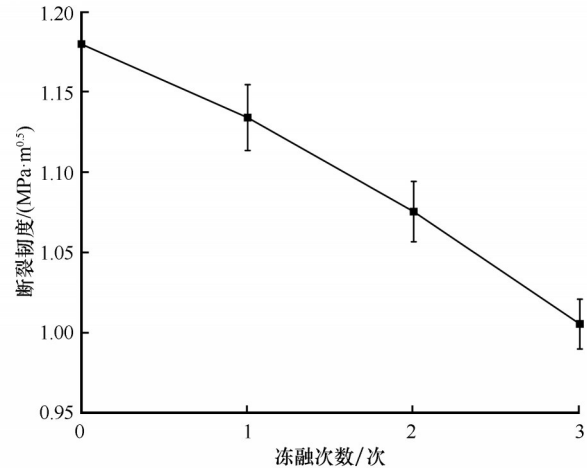


图10 -160℃超低温冻融循环后花岗岩断裂韧度曲线
Fig. 10 Fracture toughness curve of granite after ultra-low temperature freeze-thaw cycle at -160 °C

在-160~25℃下,经过反复的冰水相变,导致开孔隙中的含水量不断增加,花岗岩试样的质量和密度随之变化,在冻胀力的循环作用下,花岗岩内部微观结构随着冻融次数的增加而不断劣化,对应

于岩石的断裂韧度不断降低。根据 Whittaker 等^[33]的研究,岩石I型断裂韧度与抗拉强度之间的关系可以表示为:

$$\sigma_t = 9.35K_{IC} - 2.53 \quad (R^2 = 0.62) \quad (5)$$

式中: σ_t 为试样抗拉强度,MPa; K_{IC} 为试样I型断裂韧度,MPa·m^{0.5};决定系数 R^2 为线性曲线拟合程度统计指标,不为公式中的参数。

本文通过公式(5)对 Momeni 等^[10]在-30~40℃冻融循环后 Monzogranite 的抗拉强度进行计算,获得其断裂韧度,并与韩铁林等^[34]在-20~20℃冻融循环后砂岩的断裂韧度结果进行比较。图12为不同冻融次数后花岗岩、砂岩以及 Monzogranite 断裂韧度对比曲线。从图中可以看出,砂岩在-20~20℃下经过25次冻融循环后,断裂韧度下降15.4%,Monzogranite在-30~40℃下经过50次冻融循环后,断裂韧度下降15.8%,本文花岗岩在-160~25℃下经过3次冻融循环后,断裂韧度降低15.3%。断裂韧度下降幅度近似一致,而 Monzogranite 和砂岩需要的冻融循环次数更多。这是因为花岗岩经过-160℃超

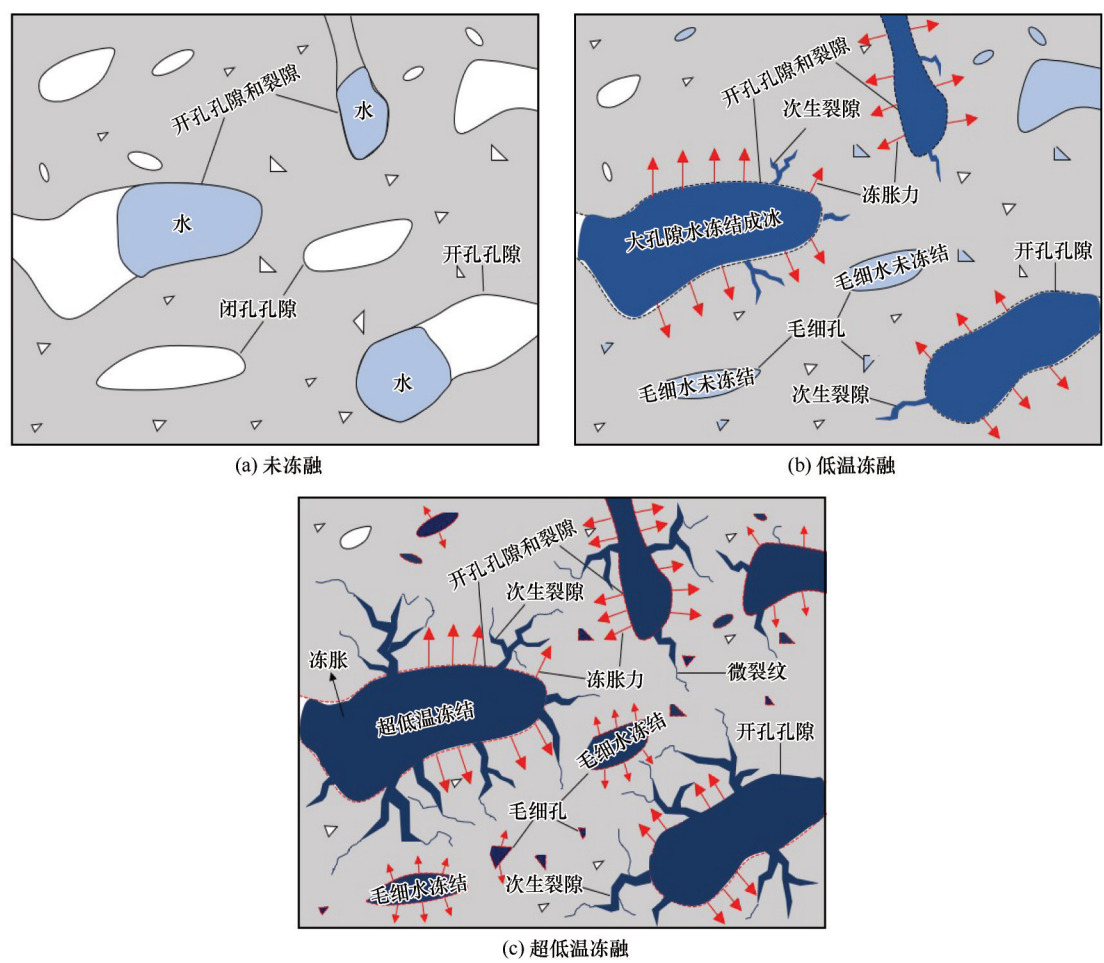


图 11 花岗岩冻融过程中断裂机理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the fracture mechanism of granite during freezing and thawing

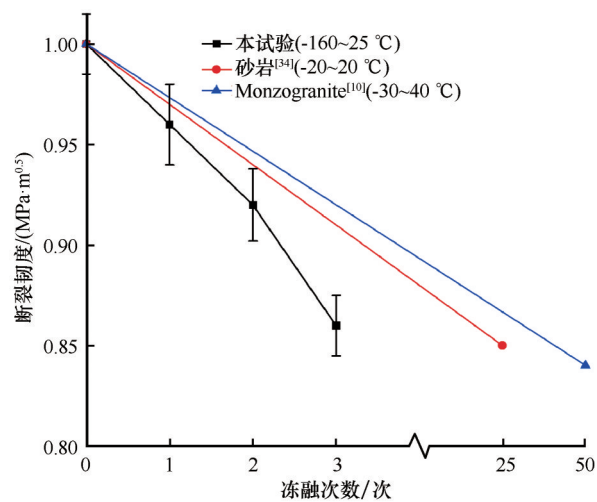


图 12 不同冻融次数后岩石断裂韧度对比曲线

Fig. 12 Comparison curves of rock fracture toughness after different freezing and thawing times

低温冻融循环后,在冻胀力的作用下,内部裂隙快速扩展,从而导致花岗岩的断裂韧度不断降低。因此,与低温冻融相比,超低温冻融循环对花岗岩断

裂韧度的降韧效果更为显著。

4 结论

本文对天然状态下-160 ℃超低温冻融循环(1、2和3次)后的花岗岩开展了三点弯曲试验,研究了超低温冻融循环作用对花岗岩I型裂缝尖端局部破坏特征、断裂韧度以及微观结构的影响。研究结果表明:

(1)随着冻融循环次数的增加,花岗岩试样的质量和密度变化率先增大后减小。这主要是由于花岗岩在冻融循环的过程中,由于冻胀力作用,岩石内部的开孔孔隙和微裂纹不断扩展,从而导致孔隙中的含水量增加,试样质量增大,当孔隙水的增加量小于岩石颗粒脱落的质量时,试样质量降低。

(2)在-160~25 ℃高温度梯度下,冰分凝作用会导致I型裂缝尖端发生局部化损伤,并随着冻融循环次数的增加而不断加剧,断裂韧度快速下降。当断裂韧度的下降幅度近似一致时,与超低温条件相

比,岩石在低温条件下需要冻融循环的次数更多,超低温冻融循环作用对花岗岩的断裂韧度具有明显的降韧效果。

(3)对于微观结构,超低温作用会引发更大孔径范围内的毛细水结冰膨胀,从而产生更大的冻胀力,导致更多次生裂隙产生,并扩展形成裂隙网络,矿物颗粒间胶结结构的破坏程度更严重,花岗岩的冻融损伤程度更显著。

参考文献(References):

- [1] Xu Bin, Li Ning, Li Zhongkui, et al. Low-temperature LPG and LNG storage Caverns and related research review of rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Suppl 2): 2977-2993. [徐彬, 李宁, 李仲奎, 等. 低温液化石油气和液化天然气储库及相关岩石力学研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 2977-2993.]
- [2] Pan Jiahua. The energy policies and strategic petroleum reserve [R]. Beijing: China Petroleum University, 2004. [潘家华. 我国能源对策和国家石油储备[R]. 北京: 中国石油大学, 2004.]
- [3] 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.]
- [4] Wang Chong, Lai Yuanming, You Zheming, et al. Experimental study of the effect of temperature and moisture state on rock Brazilian splitting strength[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1317-1324. [王冲, 赖远明, 尤哲敏, 等. 温度和含水状态对岩石劈裂强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1317-1324.]
- [5] Eslami J, et al. Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 420-429.
- [6] 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.]
- [7] 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.]
- [8] Wen Lei, Shen Jianlin, Mei Songhua, et al. Study on quality evaluation method of freeze-thaw damaged rock mass[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(12): 57-63. [闻磊, 沈建琳, 梅松华, 等. 冻融损伤岩体质量评价方法研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 57-63.]
- [9] Li Jieli, Zhou Keping, Zhang Yamin, et al. Experiment study on physical characteristics in weathered granite under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(3): 798-802. [李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 冻融循环条件下风化花岗岩物理特性的实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 798-802.]
- [10] Momeni A, Abdilor Y, Khanlari G R, et al. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(4): 1649-1656.
- [11] Yang Xiurong, Jiang Annan, Wang Shanyong, et al. Experimental study on creep characteristics of gneiss under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4331-4340. [杨秀荣, 姜谔男, 王善勇, 等. 冻融循环条件下片麻岩蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4331-4340.]
- [12] Liu Jie, Lei Lan, Wang Ruihong, et al. Dynamic characteristics of sandstone under low-stress level conditions in freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2539-2550. [刘杰, 雷岚, 王瑞红, 等. 冻融循环中低应力水平加卸载作用下砂岩动力特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2539-2550.]
- [13] Tan Xianjun. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(3): 130-138.
- [14] 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. [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.]
- [15] Yu Enyi, Jin Aibing, Sun Hao, et al. Evolution characteristics and attenuation model of limestone compressive strength and porosity under ultra-low temperature freeze-thaw cycles[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(10): 55-60. [于恩毅, 金爱兵, 孙浩, 等. 超低温冻融循环下灰岩抗压强度与孔隙率的演化特征及衰减模型[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(10): 55-60.]
- [16] Inada Y, Yokota K. Some studies of low temperature rock strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1984, 21(3): 145-153.
- [17] Aoki K, Hibiya K, Yoshida T. Storage of refrigerated liquefied gases in rock Caverns: characteristics of rock under very low temperatures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5(4): 319-325.
- [18] Zhao Bo. Research and application of pore-related mechanical properties of tight rocks at ultra-low temperature[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019. [赵波. 超低温环境下致密岩石孔隙力学特性研究及应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.]
- [19] Cai Chengzheng, Ren Keda, Yang Yugui, et al. Experimental research on shale cracking characteristics due to liquid nitrogen fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2183-2203. [蔡承政, 任科达, 杨玉贵, 等. 液氮压裂作用下页岩破裂特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2183-2203.]
- [20] Kuruppu M D, Obara Y, Ayatollahi M R, et al. ISRM-Suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(1): 267-274.
- [21] Liu Hao, Wang Yu, Wang Huajian, et al. Experimental study on frost heaving pressure evolution of rock ice cracks under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(4): 1122-1131. [刘昊, 王宇, 王华建, 等. 冻融循

- 环作用下岩石含冰裂隙冻胀力演化试验研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1122-1131.]
- [22] Peng Cheng, Tu Fuhao, Fan Junwei. Study on mechanical properties and damage mechanism of mudstone under freezing-thawing cycle[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2021, 35(3): 44-50. [彭成, 涂福豪, 樊军伟. 冻融循环作用下泥岩的力学特性及损伤机理研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2021, 35(3): 44-50.]
- [23] Zhao Zijiang, Liu Daan, Cui Zhendong, et al. Experimental study of determining fracture toughness K_{IC} of shale by semi-disk three-point bending[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Suppl 1): 258-266. [赵子江, 刘大安, 崔振东, 等. 半圆盘三点弯曲法测定页岩断裂韧性(K_{IC})的实验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊1): 258-266.]
- [24] Zhang Liang, Niu Fujun, Liu Minghao, et al. Effects of freeze-thaw damage and confining pressure on anisotropy strength of bedded rock [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2): 366-375. [张亮, 牛富俊, 刘明浩, 等. 冻融损伤与围压对层状岩石强度各向异性的影响[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 366-375.]
- [25] Ju Shupeng, Jia Bin, Yang Baocun, et al. Experimental study on compressive strength of basalt fiber soil-cement under freeze-thaw cycles[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021 (28): 113-115. [巨澍朋, 贾斌, 杨保存, 等. 冻融循环条件下玄武岩纤维水泥土抗压强度试验研究[J]. 科学技术创新, 2021(28): 113-115.]
- [26] Wang Xin, Zheng Da, Wu Xinlong, et al. Mechanical mechanism of dacite damage deterioration under freeze-thaw cycles [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (24): 10421-10429. [汪鑫, 郑达, 吴鑫龙, 等. 冻融循环条件下英安岩损伤劣化力学机理研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (24): 10421-10429.]
- [27] Wong L N Y, Guo Tian yang, Lam W K, et al. Experimental study of cracking characteristics of Kowloon granite based on three mode I fracture toughness methods [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4217-4235.
- [28] Yang Gengshe, Zhou Chunhua, Tian Yingguo, et al. Primary experimental study on moisture and heat transfer of soft rock material during its freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (9): 1765-1770. [杨更社, 周春华, 田应国, 等. 软岩类材料冻融过程水热迁移的实验研究初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1765-1770.]
- [29] Shen Yanjun, Yang Gengshe, Rong Tenglong, et al. Localized damage effects of quasi-sandstone with single fracture and fracture behaviors of joint end under cyclic freezing and thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 562-570. [申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 冻融循环作用下单裂隙类砂岩局部化损伤效应及端部断裂特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 562-570.]
- [30] Xu Yajuan, Zhou Keping, Li Jieli, et al. Study of rock NMR experiment and damage mechanism analysis under freeze-thaw condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3001-3005, 3102. [许玉娟, 周科平, 李杰林, 等. 冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33 (10): 3001-3005, 3102.]
- [31] Xie Jian, Cui Ning, Jiang Xiaofeng. Mechanism and improvement of freeze-thaw deterioration of concrete under ultra-low temperature [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(8): 2367-2371, 2377. [谢剑, 崔宁, 姜晓峰. 混凝土超低温冻融循环损伤机理及控制措施[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2367-2371, 2377.]
- [32] 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.]
- [33] Whittaker B N, Singh R, Sun Gexin. Rock fracture mechanics: principles, design and applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 1992.
- [34] Han Tielin, Shi Junping, Chen Hengchen. Experimental study on fracture toughness and its correlation with strength characteristics of sandstone under freeze-thaw cycles and dry-wet cycles [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2016, 37(4): 348-359. [韩铁林, 师俊平, 陈蕴生. 冻融循环和干湿循环作用下砂岩断裂韧性及其与强度特征相关性的试验研究[J]. 固体力学学报, 2016, 37(4): 348-359.]

Experimental study on three-point bending of granite after cryogenic freeze-thaw cycles at $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$

LÜ Dunbo^{1,2}, ZHANG Fan¹, ZHANG Yifeng¹, YANG Ke¹, LÜ Fei¹, HU Dawei³

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. The First Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Jinan 250100,

China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to study the effect of freeze-thaw cycles on the type I fracture toughness of granite under ultra-low temperature conditions, semi-circular bending (SCB) specimens were used in this study, and different freeze-thaw times (1, 2 and 3 times) were selected. The granite in the natural state was treated with $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ultra-low temperature freeze-thaw cycles, and the three-point bending test was carried out on the granite after the freeze-thaw cycle. and microstructure effects. The results show that with the increase of freeze-thaw cycles, the localized damage of I-type crack tip of granite is intensified, the fracture toughness is decreased, the number of microcracks and pores in the rock is increased, the length of cracks is increased, and the pore size is increased. Finally, the changes of rock frost heaving force and fracture toughness under low temperature and ultra-low temperature conditions are compared and analyzed. Compared with low temperature conditions, the frost heaving force produced by ultra-low temperature freezing and thawing is larger. When fracture toughness decreases by approximately the same amplitude, rocks need more cycles of freezing and thawing at low temperature. The research results can provide theoretical reference for underground storage of liquefied natural gas (LNG) in ultra-low temperature environment.

Key words: ultra-low temperature; fracture toughness; freeze-thaw cycle; granite; three-point bending

(责任编辑: 张明义)