DOI：10.16285/j.rsm.2017.0059

低温岩体裂隙冻胀力与冻胀扩展试验初探

黄诗冰[1,2]，刘泉声[2]，程爱平[1]，刘艳章[1]

（1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071）

摘 要：低温裂隙岩体冻融损伤与断裂破坏一直是寒区岩体工程建设中的关键科学问题。低温下含水裂隙的冻胀扩展演化过程受冻胀力量值的控制，然而裂隙中冻胀力的大小及其演化机制一直存在争议，尚缺乏有效的试验测试方法。通过在类岩石材料中预制不同长度和宽度的宏观裂隙，进行了低温下饱和裂隙的冻胀力测试试验；利用薄膜压力传感器和温度传感器分别对饱和裂隙在低温冻结过程中的冻胀力和冻结温度进行了实时连续的监测，获取了其时空演化曲线。试验结果表明：（1）在冻结过程中，岩体裂隙中冻胀力的萌生是一个突发的过程，其演化过程可分为孕育阶段、爆发阶段、跌落阶段以及平衡阶段；（2）冻结完成后，裂隙冰发生了明显的挤出且裂隙尖端产生了可见的冻胀裂纹；（3）融化过程中，冻胀力跌落较快，但存在滞后现象；（4）对于宽度在 2～5 mm 范围内的半开口裂隙，从裂隙开口端冻结时，最大冻胀力与裂隙宽度线性正相关；在宽度为 5 mm 的饱和裂隙中最大冻胀力达到了 7.2 MPa。研究成果可为认识裂隙中冻胀力的萌生演化机制以及进行裂隙冻胀扩展计算与分析提供借鉴。

关 键 词：低温裂隙岩体；裂隙冻胀力；冻胀试验；演化过程；冻胀扩展

中图分类号：TU 452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 01－0078－07

Preliminary experimental study of frost heaving pressure in crack and frost heaving propagation in rock mass under low temperature

HUANG Shi-bing[1, 2], LIU Quan-sheng[2], CHENG Ai-ping[1], LIU Yan-zhang[1]

（1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China）

Abstract: Freeze-thaw damage and rupture failure of fractured rock mass under low temperature are the key scientific problems for the construction of rock engineering in cold regions. Frost heaving pressure produced in saturated crack is a controlling factor that induces crack frost propagation. However, the magnitude and evolution law of frost heaving pressure are controversial due to the difficulty in conducting tests. By prefabricating macroscopic crack with different geometries in rock-like material, a laboratory test of frost heaving pressure in saturated cracks is conducted. A thin film pressure sensor is used to test the evolution process of frost heaving pressure in cracks and the temperature on the surface of rock is continuously monitored by several temperature sensors. Based on the results, the space-time evolution curves of frost heaving pressure in cracks are derived. The experimental results show that: 1) In freezing process, the initiation of frost heaving pressure in crack suddenly occurs, and the entire evolution process of this pressure can be divided into embryonic stage, outburst stage, falling stage and balance stage. 2) In frozen process, the ice in crack has been extruded and new visible propagation cracks are produced in tips of the cracks. 3) In melting process, the frost heaving pressure falls quickly but lags behind the freezing point. 4) For a half open fracture with a width ranging between 2–5 mm, when water starts freezing at the open end, the maximum frost heaving pressure linearly increases with the increasing of crack width. The pressure is more than 7.2 MPa in saturated crack with a width of 5 mm. Research results presented in this paper can provide reference for understanding the evolution mechanism of frost heaving pressure and studying the crack propagation caused by frost heave.

Keywords: fractured rock mass under low temperature; frost heaving pressure in crack; frost heaving experiment; evolution process; frost heaving propagation

收稿日期：2017-01-27
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目(No. 41702291，No. 51604195)；湖北省自然科学基金项目(No. 2015CFA142)。
This work was supported by the Young Foundation of the National Natural Science Foundation of China (41702291, 51604195) and the Natural Science Foundation of Hubei Province (2015CFA142).
第一作者简介：黄诗冰，男，1989 年生，博士，讲师，主要从事岩石力学与矿业工程方面的研究与教学工作。E-mail: huang1989.9@163.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引　言

寒区岩体工程建设、地下液化气低温储存以及古建筑文物保护等都涉及到岩体冻融损伤问题[1−2]。对于裂隙岩体而言，冻融循环下的温度应力与水−冰相变产生的冻胀力反复拉伸裂隙尖端，会引起裂隙扩展、贯通，从而引起围岩断裂，对低温地下工程的稳定性构成了极大威胁[3−4]。在冻融循环作用下，岩体中的含水裂隙会经历冻胀力的萌生、发展与消散，裂隙冻胀扩展与岩体冻融损伤程度也受到冻胀力的控制，对于饱和低渗透性岩体，裂隙中会产生较大的冻胀力[5]。然而到目前为止，国内外对低温岩体的研究还主要集中在完整岩石的冻融损伤模型和物理力学试验上[6−9]，对裂隙岩体的冻胀劣化机制以及裂隙冻胀扩展的核心驱动力——裂隙冻胀力的研究相对较少。

在国内，刘泉声等[10]对裂隙岩体冻融损伤涉及的关键科学问题以及研究思路进行了系统的归纳分析，明确指出裂隙岩体的冻融损伤应从冻融水分迁移机制入手，以探究裂隙中的冻胀力大小为目标，进而结合裂隙冻胀扩展准则对裂隙岩体冻融损伤进行评价。夏才初等[11]同样指出，在进行寒区隧道岩体冻胀率取值及冻胀敏感性分级时也应该考虑裂隙冻胀的影响。阎锡东等[12]考虑微裂隙中水−冰相变过程以及冻胀力对微裂隙冻胀扩展的影响，从理论上建立了岩石冻融损伤本构模型。申艳军等[13]对低温环境下硬岩表面含水裂隙中的冻胀荷载演化过程进行了理论与数值研究。李新平等[14]进行了无水裂隙岩样的冻融循环和力学试验研究。徐彬等[15]利用有限元软件模拟了冻结温度和冻结速率对液化石油气储库围岩中的干燥裂隙开裂过程的影响。归纳起来，国内对裂隙岩体冻融损伤的研究主要集中在以下 3 个方面：不含水裂隙岩体的冻融循环和力学强度试验研究，不含水和含水裂隙的冻胀扩展数值模拟研究，不含水和含水裂隙岩体的冻融损伤模型研究。

在国外，裂隙中的冻胀力与裂隙岩体的冻胀扩展研究相对较多，但也主要集中在理论探究上。Tharp[16]认为长宽比大于 0.01 的裂隙更容易发生冻胀扩展，并给出了冻胀裂隙扩展的应力强度因子计算式；Winkler[17]通过试验研究指出，不考虑孔隙体积膨胀，孔隙水在−5、−10、−20 °C 下冻结产生的冻胀压力理论上可以分别达到 61、133、211 MPa。Akagawa 等[18]采用分凝势原理并结合克拉贝隆公式，从理论上得到了冻胀力的经验计算公式。Davidson 等[19]利用光弹性试验测得透明材料中宽度为 1 mm 的饱和裂隙最大冰压力为 1.1 MPa；Arosio 等[20]利用薄膜压力传感器测得宽为 4 mm 的饱和裂隙中最大冻胀力达到了 5 MPa。可见，不同学者给出的冻胀力大小相差很远。探究其原因，主要是因为冻胀力的影响因素众多，与裂隙几何形态、未冻水含量、冻结速率、裂隙饱和度以及岩石自身的物理力学性质等因素有关[10]。

为探究裂隙冻胀力的萌生、发展与消散机制以及裂隙几何尺寸、冻结温度等因素对冻胀力的影响，本文通过预制不同裂隙的类岩石材料−水泥砂浆试样，利用薄膜压力传感器和温度传感器分别对类岩石材料裂隙中的冻胀力和冻结温度进行了实时监测，初步观测到了裂隙冻胀力随冻结温度和裂隙几何尺寸的演化规律，可为进一步研究裂隙岩体冻融损伤机制和裂隙网络冻胀扩展演化过程提供参考。

2 试验研究

2.1 模型材料

由于在完整岩石上预制裂隙十分困难，而且成本较高，所以国内外多是选用模型试验的形式考察裂隙对岩体物理力学性质的影响。通过参考相关学者的实践经验[21]，根据相似理论，本文同样选用类岩石材料−水泥砂浆进行制样，选用配比如下：水泥: 石英砂: 硅粉: 蒸馏水: 减水剂=10: 10:1.2:4.4:0.1。为了得到良好的配合比，并保证裂隙面光滑，石英砂粒径应控制在 0.5 mm 以下。

2.2 裂隙及标准岩样的制作

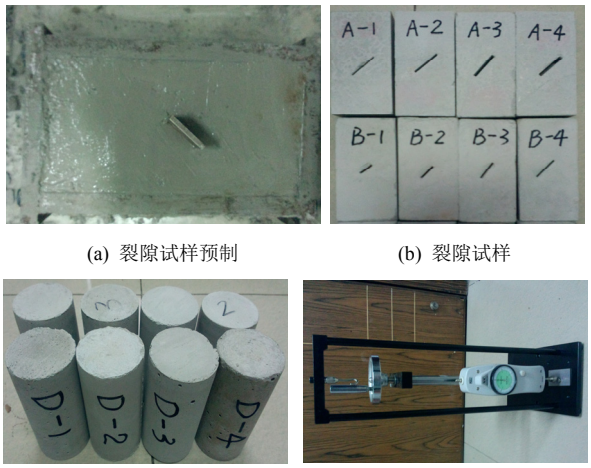
对于裂隙试样的制作，先制备长、宽、高分别为 160 mm×80 mm×40 mm 的钢制模具以及与裂隙尺寸相对应的不锈钢片；为便于脱模，试验前在模具以及钢片上涂上机油；接着按比例配置水泥砂浆试样并在搅拌器中搅拌均匀，在模具中浇入水泥砂浆并振捣直到无气泡溢出；立即插入与要预制的裂隙尺寸相应的钢片并固定，保证裂隙位于试样中心并呈 45 °，等待约 12 h 后试样完全凝固时拔出钢片并脱模；放入 20 °C 的养护池中养护 28 d，从而形成了不同长度和宽度裂隙的立方体试样，如图 1(a)和 1(b)所示。为了获取类岩石试样的物理力学参数，本次试验还制备了一组不含裂隙的标准试样，如图 1(c)所示。

2.3 基本物理力学参数测试

将所有裂隙试样在自然状态下进行称重后放入水池中浸泡一周，形成饱和试样，测量饱和岩样的质量和体积。标准试样在烘干后采用真空抽气法进

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

行强制饱和，将标准饱和试样进行波速测试，剔除质量和波速误差较大的试样，剩余试样在武汉大学自主研制的 RMT150C 岩石与混凝土试验机上进行单轴压缩试验，从而得到了类岩石材料的基本物理力学参数，如表 1 所示。



(a) 裂隙试样预制 (b) 裂隙试样

(c) 标准样 (d) 标定装置–推力计

图 1 标定装置与预制的类岩石试样

Fig.1 Calibration device and prefabricated rock-like samples

表 1 类岩石试样物理力学参数

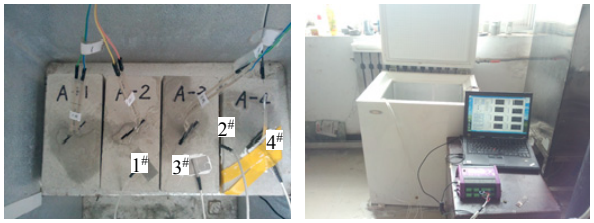
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock-like sample

密度 /(kg/m³)	单压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	纵波波速 /(m/s)	孔隙率 /%
1.99	37.6	5.8	0.2	2 818	5

2.4 冻胀力与温度监测方法

由于裂隙宽度较小，一般的压力传感器很难植入裂隙中，为了获取不同尺寸真实裂隙中冻胀力随冻结温度变化的一般规律，采用进口的薄膜压力传感器 Flexiforce A201 对冻胀力进行全程监测，传感器端部圆形感应区直径为9.53 mm、厚度为0.21 mm；测试软件选用苏州长显公司开发的实时自动采集力学软件系统。试验前必须对传感器进行标定，可采用相应尺寸和量程的推力计对其进行标定（如图 1(d)所示）；为了既不影响传感器的回收利用，又保证其能紧密粘贴在裂隙表面，在薄膜压力传感器测力区域用薄膜套住，将防水薄膜用防水胶粘贴于裂隙表面，以便薄膜传感器拔出和多次利用。岩样表面温度监测采用温度传感器 PT1000，并利用 Data Taker 编制相应程序实时采集温度数据，如图 2 所示。

试验前对试验设备进行安装，薄膜压力传感器和温度传感器位置如图 2(a)所示，其中 1#传感器测量冻融试验箱中空气温度，2#安装在侧面，3#和 4# 温度传感器安装在岩样正面，分别监测岩样表面不同位置的温度变化。冻融试验在海尔低温数控冷柜中进行，冻结温度为–20 ℃，为保障裂隙开口端优先冻结，在裂隙试样底部设置一层保温隔水泡沫，冻结完成后采取在室温下自然升温进行解冻，其他试验设备见图 2(b)。



(a) 传感器安装位置 (b) 试验设备

图 2 试验设备与安装位置

Fig.2 Experimental equipment and location

采用控制变量法，将 8 个不同裂隙尺寸的饱和立方体试样分为 2 组：隙长为 40 mm，但隙宽不同的试样记为 A 组，用于研究冻胀力随裂隙宽度的变化规律；将隙宽为 3 mm 的不同隙长试样记为 B 组，研究冻胀力随裂隙宽度的变化规律（见表 2）。

表 2 裂隙试样尺寸及质量

Table 2 Fracture size and mass of fractured samples

编号	岩样尺寸			裂隙尺寸			自然质量 /g	饱水质量 /g
	长 /mm	宽 /mm	高 /mm	长 /mm	宽 /mm	高 /mm		
A1	160	80	39	40	2	34	1 014	1 022
A2	161	80	42	4	3	35	1 051	1 063
A3	161	80	42	40	4	38	1 081	1 090
A4	160	80	40	40	5	36	1 073	1 079
B1	160	81	40	20	3	36	1 066	1 077
B2	160	80	40	25	3	35	1 016	1 027
B3	161	80	40	30	3	35	1 046	1 056
B4	161	80	40	35	3	33	1 017	1 028

冻融试验过程可简单归纳为以下几步：①薄膜压力传感器和温度传感器安装，将裂隙中填充满纯净水；②将 1 组饱和试样放入数控冷柜中，设置冻结温度为–20 °C，同时开启数据采集装置，连续冻结时间为 2 h 左右；③冻结 2 h 后将试样取出，放入室温为 20 °C 的空调房中自然解冻，融化过程中保持数据采集装置处于开启状态。至此，一个冻融循环完成。需要说明的是，由于我们关注的是裂隙中的水–冰相变过程，通过试验观测发现降温 2 h 后裂隙水完全冻结成冰，而在 20 °C 室温下解冻 2 h 裂隙冻胀力完全消失，裂隙冰融化完成，说明选取冻结和融化时间分别为 2 h 是合理的。另外，由于 4#

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

传感器稳定性较差，本文进行了补充试验，图 3 中的 A4 试验曲线为补充试验后的测试结果。

3　试验结果与分析

3.1　试验结果

不同长度和不同宽度裂隙中冻胀力以及类岩石试样表面冻结温度随冻结时间的演化关系曲线分别如图 3 和图 4 所示。可以看出，冻胀力的萌生是一个突发的过程，且与冻结温度具有较强的对应关系。

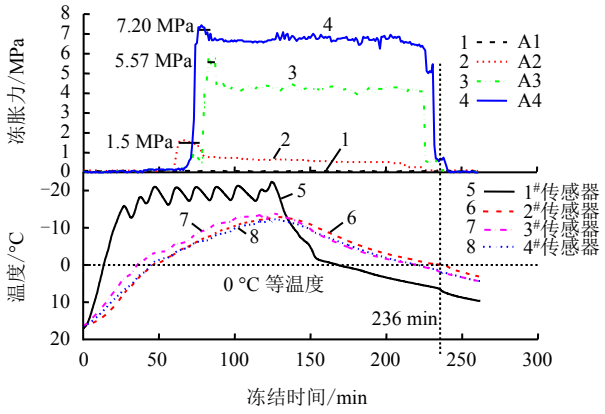


图 3　不同宽度裂隙中冻胀力历时曲线

Fig.3　Duration curves of frost heaving pressure in cracks with different widths

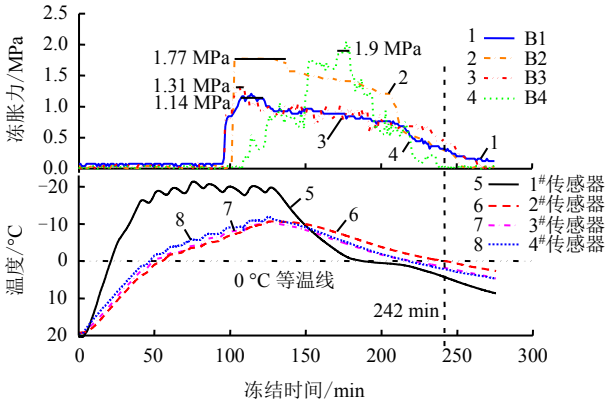


图 4　不同长度裂隙中冻胀力历时曲线

Fig.4　Duration curves of frost heaving pressure in cracks with different lengths

3.2　冻胀力历时演化规律分析

从图 3 可以看出，在冻结初期，岩样表面冻结温度虽然降低到体积水冻结点以下，但是裂隙中还并没有形成冻胀力，经观察此时裂隙中的水分仍保持为液态。但随着岩体表面冻结温度的进一步降低，大约在−5 ℃左右，宽度较小的岩样 A2 由于含裂隙水较少首先冻结，裂隙中冻胀力迅速增大，且此时裂隙冰在裂隙开口处形成了密封塞，裂隙内部的未冻水在冻结过程中已经无法向裂隙开口处挤出，冰塞效应形成。随着水冰相变的快速进行，裂隙中下部的未冻水中形成了冻胀水压力，裂隙中的最大冻胀力达到了 1.5 MPa。从图 4 中可看出，不同长度裂隙冻结过程中冻胀力演化规律与上述一致。

随着时间的推移和冻结温度的进一步降低，冻胀力没有上升，反而表现为先突然跌落，随后进一步缓慢降低。分析其原因，冻胀力的突然跌落主要是随着裂隙水的进一步冻结，在冻胀力作用下裂隙发生断裂扩展引起部分冻胀力释放造成的。从图 5 中可以看到，试样表面出现了清晰的新生冻胀裂纹；而在冻结后期随着冻结温度的降低，冻胀力都有一个缓慢降低过程（在 B 组试样中表现较为明显），主要是由于裂隙水已完全冻结，而岩石基质和裂隙冰将随着温度的降低而收缩，总体表现为裂隙在低温下被拉开而裂隙冰发生了收缩，因此冻胀力缓慢降低，最终冻胀力、温度场以及裂隙应变场会维持在一个相对平衡的状态。因此，冻胀力在低温冻结阶段随时间的演化过程可分为以下几步（见图 6）：

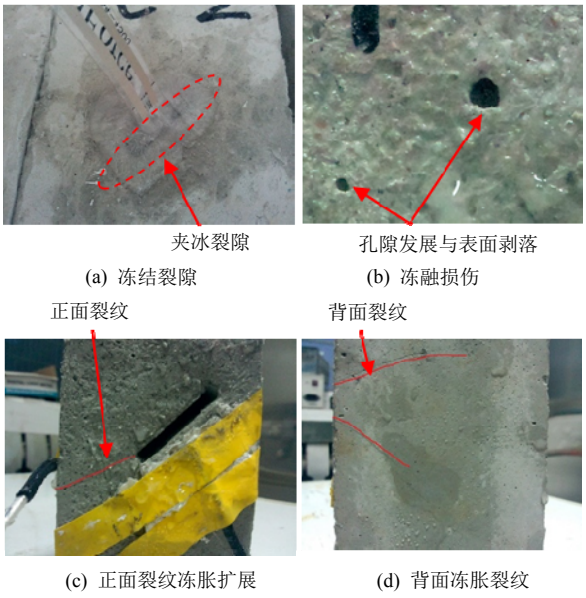


图 5　夹冰裂隙与岩体冻融劣化

Fig.5　Crack filled with ice and freeze-thaw deterioration of rock mass

（1）孕育阶段　裂隙中的温度尚未达到裂隙水冻结点，但随着冻结温度的进一步降低，裂隙水贮存的潜热释放，此时冻胀力还未形成，对应于图 6 中的阶段①。

（2）爆发阶段　随着裂隙开口处的水分先冻结，裂隙开口处会形成密封冰塞，冰塞效应一旦发生，冻胀力开始萌生并迅速增加。爆发阶段结束前裂隙

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

冻胀变形与冻胀力即将达到最大值，此时裂纹扩展一触即发，对应于图 6 中的阶段②。

（3）跌落阶段 由于冻胀力的迅速增加，当冻胀力达到了裂隙扩展的驱动力，裂隙会发生断裂，裂隙水进入裂隙尖端，冻胀力得到释放，从而表现为冻胀力的突然跌落。该阶段裂纹发生了冻胀扩展，冻胀力有一个突然跌落的过程，因该过程时间短，没有在冻胀力发展图中予以反映。

（4）平衡阶段 随着冻结温度的进一步降低，裂隙被拉开，而裂隙冰在低温下会发生收缩变形；此外，在冻胀力的作用下裂隙冰还会发生蠕变，总体上表现为冻胀力的缓慢降低，但冻胀力会维持在一个相对平衡的状态，变化较小。此时裂纹冻胀扩展完成，对应于图 6 中的阶段③。

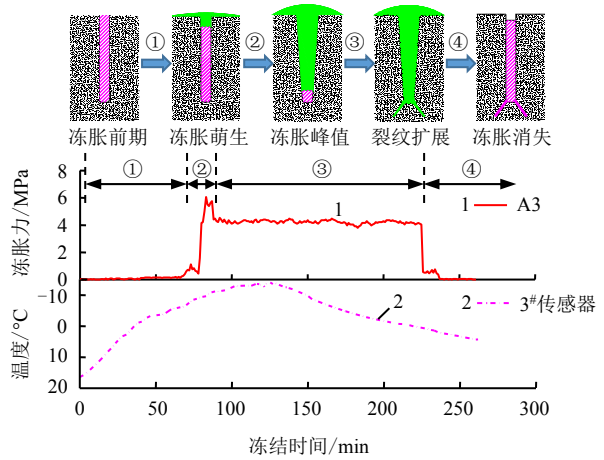


图 6 裂隙冻胀扩展过程示意图

Fig.6 A sketch map of crack propagation caused by frost heaving pressure

（5）消散阶段 在裂隙岩体融化阶段，冻胀力的演化过程相对简单，对应于图 6 中的阶段④。在裂隙冰冻结点以上，冻胀力维持在一个稳定状态，但到达冻结点以后（图 3 中岩体表面温度在 0 ℃ 附近），冻胀力有一个迅速的跌落过程，主要原因是由于裂隙开口处的冰体先融化，裂隙冰发生挤出，冻胀力得到了释放；随着冻结温度的进一步上升，裂隙冰冻胀力逐渐消失，说明裂隙冰已完全融化。

对于 A4 岩样，经过 3 次冻融循环后裂隙周围发生了明显的冻胀扩展现象，岩体表面孔隙生长且发生了部分脱落，如图 5 所示。

3.3 冻胀力随裂隙几何尺寸变化规律分析

3.3.1 冻胀力随裂隙宽度变化

冻胀力的最大值取实时测量过程中冻胀力波峰处的平均值（见图 3 和图 4 中的横线标注范围），最大冻胀力测试结果如图 7 所示。通过拟合可得冻胀力 P_f 与裂隙宽度 b 间的函数关系式为

$$P_f = 2.54b - 5.29 \quad (1)$$

由式（1）可知，对于长度、深度分别为 40、35 mm，宽度在 2～7 mm 范围内的半开口裂隙，从裂隙开口端冻结时，产生的最大裂隙冻胀力与裂隙宽度近似成线性关系，并随裂隙宽度的增加而增大。

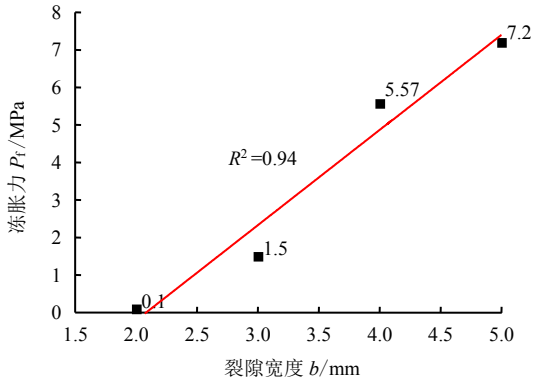


图 7 冻胀力与裂隙宽度关系

Fig.7 Relationship between frost heaving pressure and crack width

3.3.2 冻胀力随裂隙长度变化

根据图 4 可得到裂隙中最大冻胀力与裂隙长度的关系（如图 8 所示），可见冻胀力与该区间段的裂隙长度没有表现出明显的相关性，其函数关系还需进一步研究。但值得指出的是，根据断裂力学理论，对于二维平面裂纹而言，裂隙尖端应力强度因子的平方与裂隙长度呈正比，所以裂隙长度对于裂隙岩体冻胀扩展和劣化的影响同样重要。

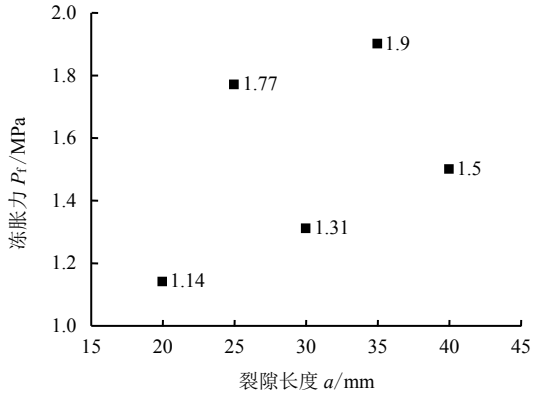


图 8 冻胀力与裂隙长度关系

Fig.8 Relationship between frost heaving pressure and crack length

3.4 裂隙岩体冻胀劣化机制分析

裂隙岩体的冻融损伤与断裂是低温岩体研究中的一个难点也是重点，但由于受数值模拟技术的限

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

制，现有的研究往往从完整岩石入手，而避开裂隙中的低温水冰相变与冻胀扩展问题。但从以上试验可知，裂隙中冻胀力高达 7.2 MPa（见图 7），并且在冻结过程中裂隙尖端发生了明显的破裂现象（见图 5），说明岩体中的裂隙水冰相变不可忽略。考虑裂隙水冻结过程，结合本试验可归纳出裂隙岩体冻胀劣化的一般机制：在冻结初期，以低温温度应力和冻胀水压力为主，且冻胀水压力是驱动裂隙扩展的主要动力；随着裂隙水的进一步冻结，裂隙开口段形成冰塞效应产生密闭空间是产生冻胀力的必要条件，冻胀水压力的迅速上升又会引起裂隙周围的渗流场和应力场发生改变。当冻胀水压力超过裂隙扩展阈值时裂隙开始断裂扩展；裂隙扩展将导致裂隙容积进一步增加，从而引起冻胀水压力降低，所以冻胀力与裂隙约束力一直处于动态平衡之中；当裂隙水完全冻结，冻胀力表现为冻胀冰压力，冻胀冰压力与裂隙应变场以及周围渗流场维持平衡而不发生改变，裂隙冻胀扩展停止。所以裂隙岩体冻胀劣化主要是由于裂隙中水冰相变、体积膨胀萌生较大的冻胀力驱动裂隙扩展演化的结果。

4　结　论

利用薄膜压力传感器和温度传感器对裂隙水冰相变过程中的冻胀力和岩体温度进行了全面的监测，初步得到了裂隙中冻胀力的演化规律与冻胀劣化机制，基于本文对裂隙冻胀力及裂隙冻胀扩展试验的研究，可以得出如下几点结论：

（1）低温饱和裂隙冻结过程中会产生较大的冻胀力，冻胀力的萌生具有突发性，其演化过程可分为以下 4 个阶段：孕育阶段、爆发阶段、跌落阶段和平衡阶段。

（2）冻胀力的大小与裂隙几何尺寸有关，随着裂隙宽度的增加而增大，对于长度为 40 mm、深度为 35 mm、宽度在 2～7 mm 范围内的半开口裂隙，从裂隙开口端冻结时，产生的最大裂隙冻胀力与裂隙宽度成线性正相关，最大裂隙冻胀力高达 7.2 MPa。

（3）裂隙水冻结可驱动裂隙冻胀扩展，裂隙岩体冻融劣化也主要是由于裂隙中水冰相变产生较大的冻胀力驱动裂隙冻胀扩展演化的结果。

参 考 文 献

[1] JUNG Y B, PARK E S, CHUNG S K, et al. Coupled hydro-thermal modeling of ice ring formation around a pilot LNG cavern in rock[J]. **Engineering Geology**, 2011, 118(3): 122－133.

[2] FENER M, INCE I. Effects of the freeze–thaw (F–T) cycle on the andesitic rocks (Sille－Konya/Turkey) used in construction building[J]. **Journal of African Earth Sciences**, 2015, 109: 96－106.

[3] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙冻胀压力及对岩体造成的劣化机制初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1530－1541.
LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Preliminary study of frost heave pressure and its influence on crack and deterioration mechanisms of rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1530－1541.

[4] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温冻结岩体单裂隙冻胀力与数值计算研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1572－1580.
LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Numerical and theoretical studies on frost heaving pressure in a single fracture of frozen rock mass under low temperature[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(9): 1572－1580.

[5] MATSUOKA N. The rate of bedrock weathering by frost action：field measurements and a predictive model[J]. **Earth Surface Processes and Landforms**, 1990, 15(1): 73－90.

[6] 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.
ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 471－476.

[7] 贾海梁, 刘清秉, 项伟, 等. 冻融循环作用下饱和砂岩损伤扩展模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3049－3055.
JIA Hai-liang, LIU Qing-bing, XIANG Wei, et al. Damage evolution model of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp. 2): 3049－3055.

[8] 李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1208－1214.
LI Jie-lin, ZHOU Ke-ping, ZHANG Ya-min, et al. Experimental study of rock porous structure damage

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(6): 1208－1214.

[9] 奚家米, 杨更社, 庞磊, 等. 低温冻结作用下砂质泥岩基本力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1208－1214.
XI Jia-mi, YANG Geng-she, PANG Lei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of sandy mudstone under low freezing temperature[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(7): 1208－1214.

[10] Tec, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 452－471.
LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Advance and review on damage of fractured rock mass under freeze-thaw[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**,, 2015, 34(3): 452－471.

[11] 夏才初, 黄继辉, 韩常领, 等. 寒区隧道岩体冻胀率的取值方法和冻胀敏感性分级[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1876－1885.
XIA Cai-chu, HUANG Ji-hui, HAN Chang-ling, et al. Methods of frost-heave ratio evaluation and classification of frost-heave susceptibility of tunnel surrounding rock in cold regions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1876－1885.

[12] 阎锡东, 刘红岩, 邢闯锋, 等. 基于微裂隙变形与扩展的岩石冻融损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3489－3499.
YAN Xi-dong, LIU Hong-yan, XING Chuang-feng, et al. Constitutive model research on freezing-thawing damage of rock based on deformation and propagation of microcracks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3489－3499.

[13] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 低温环境下含表面裂隙硬岩温度场及冻胀演化过程分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 521－529.
SHEN Yan-jun, YANG Geng-she, RONG Teng-long, et al. Analysis of evolution of temperature field and frost heaving in hard rock with surface cracks under low temperature environment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp. 1): 521－529.

[14] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2307－2315.
LI Xin-ping, LU Ya-ni, WANG Yang-jun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(11): 2307－2315.

[15] 徐彬, 闫娜, 李宁, 等. 温降对液化石油气储库围岩裂隙开裂影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 718－726.
XU Bin, YAN Na, LI Ning, et al. Numerical analysis of effect of temperature decreasing on crack of chilled LPG unlined storage cavern[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 718－726.

[16] THARP T M. Conditions for crack propagation by frost wedging[J]. **Geological Society of America Bulletin**, 1987, 99(1): 94－102.

[17] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. **Engineering Geology**, 1968, 2(5): 315－323.

[18] AKAGAWA S, FUKUDA M. Frost heave mechanism in welded tuff[J]. **Permafrost and Periglacial Processes**, 1991, 2(4): 301－309.

[19] DAVIDSON G P, NYE J F. A photoelastic study of ice pressure in rock cracks[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 1985, 11(2): 141－153.

[20] AROSIO D, LONGONI L, MAZZA F, et al. Freeze-thaw cycle and rockfall monitoring[M]//Landslide Science and Practice. Berlin: Springer Verlag, 2013: 385－390.

[21] 路亚妮. 裂隙岩体冻融损伤力学特性试验及破坏机制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
LU Ya-ni. Study on mechanics characteristic of damage due to freeze-thaw action in fractured rock masses and failure mechanism[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net