

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0040

LU Yan, LI Xiping, 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.]

# 单轴压缩条件下裂隙岩样冻融损伤破坏模式分析

路亚妮<sup>1</sup>, 李新平<sup>2</sup>, 吴兴宏<sup>3\*</sup>

(1. 湖北工程学院 土木工程学院, 湖北 孝感 432000; 2. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 湖北工程学院 基本建设管理处, 湖北 孝感 432000)

**摘 要:**以寒区裂隙岩体为研究对象,采用水泥砂浆类岩石材料制作具有不同几何特征的裂隙岩样,对预制的不同裂隙岩样进行冻融循环试验和单轴压缩试验,研究裂隙长度、裂隙倾角、裂隙数目以及冻融循环次数对试件贯通模式的影响。试验表明:裂隙岩体的几何特征以及冻融循环作用对岩体损伤破坏模式有较大影响。随着冻融循环次数的增加,岩样破裂面的破裂程度越来越严重,破坏模式也越来越复杂;裂隙倾角为 30°的裂隙岩样,主要发生拉伸破坏,而裂隙倾角为 60°的裂隙岩样,则表现为拉剪贯通,且双裂隙岩样岩桥间多出现压剪裂纹,对于裂隙倾角为 90°的岩样,裂隙数目以及裂隙长度对其影响不大,均为劈裂破坏,且破坏面不一定为裂隙面;预制裂隙长度越大,越容易产生除了主拉裂纹以外的支裂纹(压裂纹)。研究结果可为寒区岩体工程建设及运营提供科学的参考。

**关键词:**冻融循环;单轴压缩;裂隙岩体;破坏模式;岩石力学

**中图分类号:** TU45      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2017)02-0351-07

## 0 引言

随着我国“一带一路”新战略<sup>[1]</sup>的提出,围绕陆上丝绸之路经济带建设,西北、东北地区作为两大桥头堡将发挥重要战略作用,与之相接壤的巴基斯坦、哈萨克斯坦、俄罗斯、阿富汗、蒙古等国多处于季节(多年)冻土区,随之而来的寒区岩土工程建设问题将明显增多,加之冻土区蕴藏着丰富的矿产资源,资源在开采的过程中,也不可避免的会面临着复杂的岩石冻融力学问题<sup>[2]</sup>。

岩体冻融损伤力学问题是寒区岩土工程中面临的重大难题。国内外学者对冻岩问题的研究主要集中在冻岩物理力学基础研究和冻融机理研究两个方面。Inada 等<sup>[3]</sup>针对花岗岩和安山岩在干燥与饱和状态下,进行了 1 次和 3 次冻融循环试验,研究两种岩石的抗拉强度和抗压强度;Aoki 等<sup>[4]</sup>对多种岩石在 -45 ~ 15 °C 的温度范围内进行了 300 次冻融循环试验,试验结果表明岩石在经历冻融循环以

后其有效孔隙率增加,纵波波速降低,抗拉强度下降约 10% ~ 20%; Yamabe 等<sup>[5]</sup>通过日本 Sirahama 砂岩在一次冻融循环(+20 °C→-20 °C→+20 °C)内的热膨胀变形测试,发现在一次冻融循环下,干燥岩样的轴向变形为弹性变形,而饱和岩样则发生了塑性变形。国内学者在冻岩物理力学性质研究方面也开展了大量卓有成效的工作<sup>[6-13]</sup>。西安科技大学杨更社等<sup>[8]</sup>及其研究团队在该方面的研究较早,该团队采用实验研究与损伤力学理论分析相结合的方法,系统分析了不同类型岩石在不同冻融循环条件下的强度与变形特性、应力-应变曲线及损伤扩展力学特性随冻融循环次数的变化规律,分析了岩石的冻融损伤劣化过程,探讨了低温及冻融循环条件下岩石的强度变形特性和损伤破坏机理、水热耦合迁移规律,水热耦合作用模型及相应的计算方法。中国科学院武汉岩土所的刘泉声等<sup>[9]</sup>、陈卫忠等<sup>[10]</sup>及其团队通过室内试验、理论分析和数值模拟等手段,将岩石在低温环境下的变形分解为热

收稿日期: 2016-12-25; 修订日期: 2017-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274157; 51204128); 湖北省自然科学基金项目(2014CFB575)资助

作者简介: 路亚妮(1979-),女,陕西西安人,副教授,2013年在武汉理工大学获博士学位,从事岩土工程方面的教学与研究工作。

E-mail: siyu-1979@126.com

\* 通讯作者: 吴兴宏, E-mail: lyn2016@hbeu.edu.cn.

应变、冻胀应变和围压产生的弹塑性应变，建立岩石准蠕变冻胀本构模型，根据质量守恒定律、能量守恒定律及静力平衡原理，考虑岩体水冰相变的参与，推导出冻结条件下裂隙岩体的 THM 耦合控制方程。李新平等<sup>[12-13]</sup>通过在模型试件中预制裂隙的方法，对裂隙岩样开展了不同冻融循环次数的冻融试验，并对经过冻融的裂隙岩样进行单轴以及三轴压缩试验，探讨了裂隙岩样经不同冻融循环次数后的物理力学特性，以及冻融岩样强度及破坏形态的影响因素。

以上研究大多是基于完整岩石展开的，而针对自然界普遍存在的裂隙岩体，在冻融力学特性的研究方面的文献比较匮乏，特别是针对具有不同几何特征(裂隙长度、裂隙倾角以及裂隙数目)的裂隙岩体冻融损伤方面的研究甚少。本文采用水泥砂浆类岩石材料制作具有不同几何特征的裂隙岩样，对预制的不同裂隙岩样进行冻融循环试验和单轴压缩试验，研究冻融循环次数、裂隙倾角、裂隙长度和裂隙数目对岩样的损伤破坏模式的影响，为寒区岩体工程的设计、建设及安全运营提供理论参考依据。

1 试验概况

模型试验具有可控性强、周期短、费用低等优点，可以有效的避免现场采样时所面临的很多问题，如外因影响因素多、研究费用高、条件复杂以及采样的周期长等<sup>[16-17]</sup>。模型试验通过把岩体的结构特征和赋存环境，以及岩体的工程作用力学模型统一到室内的模拟试验中，模拟岩体的变形、破坏过程和机理，成为研究裂隙节理岩体的一种行之

有效的方法。

1.1 模型材料

根据相似理论和前人大量的实践经验<sup>[3-13]</sup>，本文选用与岩石具有类似结构和破坏特征的模型材料—水泥砂浆制作类岩石模型试样。经过多次试验对比，确定模型试验的配合比，水泥: 石英砂: 硅粉: 蒸馏水: 减水剂 = 20: 16: 2. 2: 5. 6: 0. 2。表 1 列出了模型材料及砂岩<sup>[14]</sup>的主要物理力学参数。

由表 1 可以看出，砂岩和模型材料的物理力学参数比较接近，且基本满足主要相似常数的关系<sup>[12]</sup>，因此，可将此模型材料归为类砂岩材料。

1.2 试样制作

选用  $\phi = 50\text{ mm}$  的 PVC 管材模具，切割成长度为 100 mm 的圆柱体，并按设计裂隙的长度以及角度，采用厚度为 0. 65 mm 的高速钢锯条切割成预定的裂缝；然后在制作好的裂缝中插入塑料薄纸片，并在 PVC 管外侧拉紧用胶带固定，最后在模具中浇筑预定配合比的水泥砂浆，振捣，脱模后放入 20 ℃ 的养护池中养护 28 d，形成具有一定倾角和长度的闭合裂隙岩样。表 2 给出了 10 类裂隙岩样的几何参数，图 1 为裂隙岩样示意图。

1.3 试验系统和加载过程

把经过筛选后的岩样，分为 4 组，每组 9 块岩样(每类试件各 3 块)，分别进行冻融循环次数为 0、20、40、60 次的冻融循环试验，冻融循环后首先对其进行质量、体积的测定，最后对经历不同冻融循环次数的试件进行单轴压缩试验。冻融循环温度范围为 -40 ~ +40 ℃，冻融循环周期为 12 h，其中冻 6 h，融 6 h。冻融循环试验设备为 KB-TH-S-

表 1 材料物理力学参数  
Table 1 Physico-mechaical parameters of rock materials

材料	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比/ $\mu$	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
模型	1. 93	11. 2	0. 12	38	8. 45	11. 4	36
砂岩	2. 2 ~ 2. 7	3 ~ 35	0. 02 ~ 0. 2	10 ~ 150	2 ~ 15	8 ~ 50	35 ~ 50

表 2 物理模型试验方案参数  
Table 2 Parameters of physical model tests

试件编号	裂隙倾角/(°)	裂隙长度/mm	试件编号	裂隙倾角/(°)	裂隙长度/mm
W	0	0	A5	60	30
A1	30	15	A6	90	30
A2	60	15	B1	30	12
A3	90	15	B2	60	12
A4	30	30	B3	90	12

注：试件编号 W 为完整试件，A 为单裂隙试件，B 为双裂隙试件，双裂隙试件均为共面裂隙，岩桥长度均为 20 mm

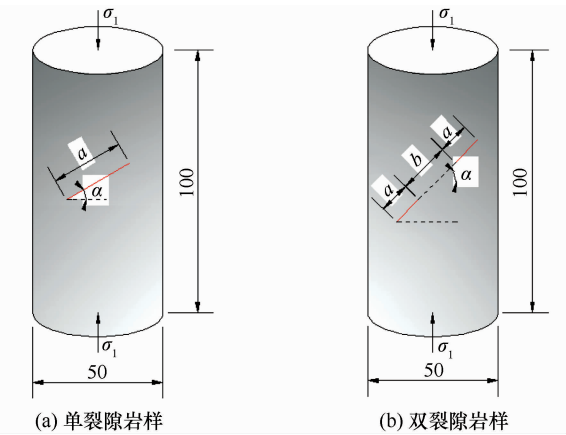


图 1 预制的裂隙岩样  
Fig. 1 Specimens with pre-cracks

150Z 程式恒温恒湿试验箱，单轴压缩试验设备为中国科学院武汉岩土所研发的 RMT-201 岩石与混凝土力学试验机，试验采用轴向位移控制，位移速率为  $0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2 冻融裂隙岩体宏观贯通模式

为了研究冻融循环作用对具有不同几何特征的裂隙岩样宏观贯通模式的影响，对分别经历 0、20、40、60 次冻融循环的岩样进行单轴压缩试验，各类试样经过单轴压缩试验后的破坏形式如图 2 ~ 7 所示。图中的裂纹表示经历冻融循环以及外荷载作用后岩样所产生的裂纹，预制裂隙表示为了模拟节理岩体而在模型试样制作过程中预埋的裂纹。

2.1 冻融次数对岩样贯通模式的影响

试件的破坏模式同时受原生(预制)裂隙以及冻融作用产生的裂纹的影响。图 2 和图 3 分别为裂隙长度  $a = 30\text{ mm}$ ，倾角  $\alpha = 30^\circ$  的单裂隙试件与裂隙长度  $a = 12\text{ mm}$ ，倾角  $\alpha = 30^\circ$  的双裂隙试件在经历不同冻融循环后的破坏模式。由图 2 和图 3 可知，随着冻融次数的增加，同一类岩样破坏面的破裂程度越来越严重，即从单一的破坏面逐渐发展为多个破坏面，破坏模式变得越来越复杂。破坏时裂纹的长度和宽度都随着冻融循环次数的增加而增加。再者，特别是在岩样的顶部和底部，随着冻融次数的增加，裂纹逐步发展汇合贯通导致试件出现明显的剥落现象。未经冻融的裂隙岩样，贯通模式和冻融岩样有所不同，其破坏模式以拉贯通为主，而随着冻融循环次数的增加，贯通模式越来越复杂，出现拉-剪-压混合贯通。从破坏模式来看，主要表现在以下几个方面：其一是未经冻融的裂隙岩样表面的裂纹数目相对较少，裂纹主要是起裂于预

制裂隙尖端，并沿着最大主应力方向扩展；其二是未经冻融的裂隙岩样裂纹向岩样顶部延伸的程度较低，有部分裂纹未延伸到岩样的端部；其三未经冻融的裂隙岩样不会出现片落或碎落现象，而冻融次数较多的岩样会有此类现象发生。例如经历 40 次冻融循环的双裂隙岩样 B1-4，以及经历 60 次冻融循环的双裂隙岩样 B1-3 等表面都出现不同程度的片落，这是由于冻融过程已经产生损伤，在加载作用下表现出来。

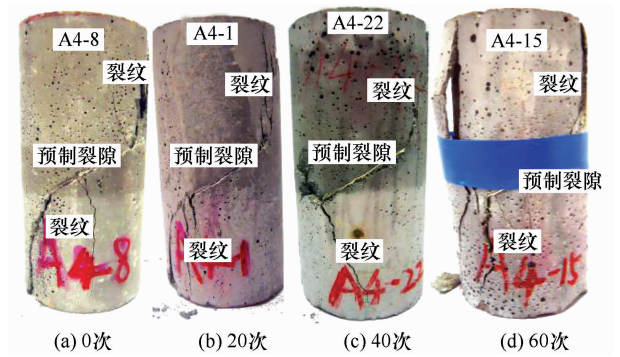


图 2 不同冻融循环次数后单裂隙试件破坏模式  
Fig. 2 Failure modes of single fractured specimens under different freeze-thaw cycles

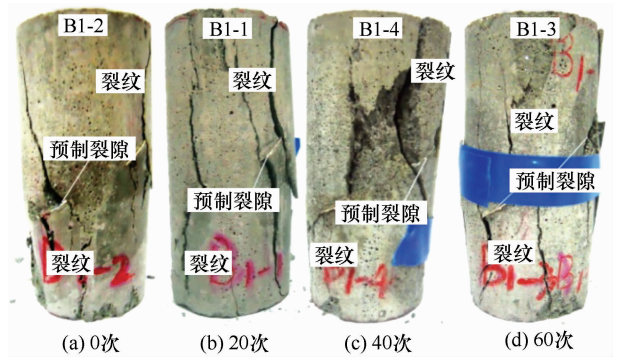


图 3 不同冻融循环次数后双裂隙试件破坏模式  
Fig. 3 Failure modes of double fractured specimens under different freeze-thaw cycles

2.2 裂隙倾角对岩样贯通模式的影响

图 4 和图 5 分别为经历相同冻融循环后完整以及不同裂隙倾角的单裂隙以及双裂隙岩样的破坏模式。

在单裂隙岩体中(图 4)，对预制裂隙倾角较小( $30^\circ$ )的 A4 岩样，主拉裂纹起裂位置为预制裂纹尖端，并逐渐沿着外加载方向向岩样端部扩展和延伸，同时，在几乎和预制裂隙垂直的方向还会产生次生裂纹，沿着最大主应力方向逐渐扩展；对于倾角为  $60^\circ$  的 A5 类试件为沿着预制裂隙方向的拉剪贯通模式，预制裂隙下端部附近还会出现一条或多

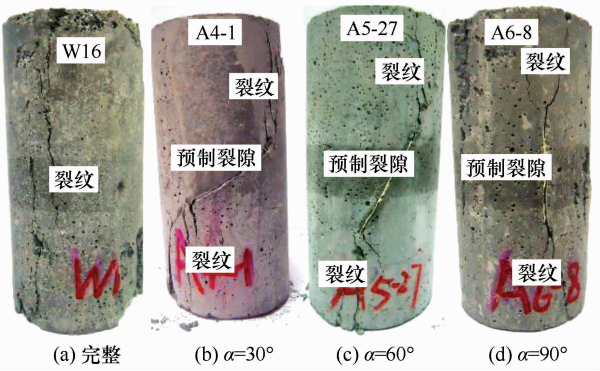


图4 不同倾角单裂隙试件破坏模式

Fig. 4 Failure modes of different crack dip angle in single fractured specimens

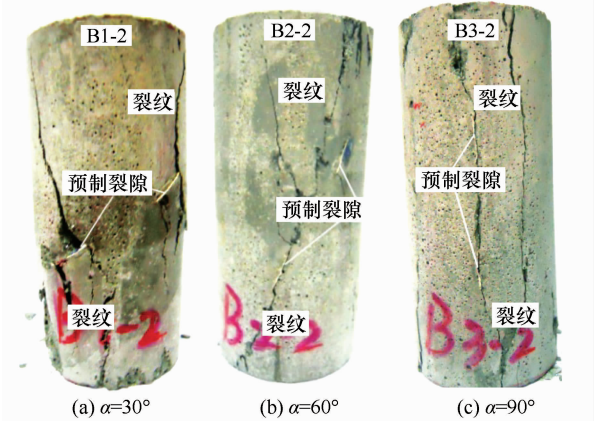


图5 不同倾角双裂隙试件破坏模式

Fig. 5 Failure modes of different crack dip angle in double fractured specimens

条支裂纹。裂隙倾角为 90° 的岩样，破坏模式和完整岩样类似，均为张拉破坏，破裂面沿着最大主应力方向延伸。

双裂隙试验的宏观贯通模式(图 5)主要为拉伸破坏和拉剪破坏两种，对于裂隙和岩桥倾角为 30° 的 B1 和 90° 的 B3 岩样，主要发生拉伸破坏，对于裂隙和岩桥倾角为 60° 的裂隙岩样，破坏模式为拉剪破坏。对于岩桥以及裂隙倾角为 30° 的岩样，裂纹首先萌生于预制裂隙尖端，起裂角大致与预制裂隙垂直，并沿着外荷载的方向向岩样端部扩展和延伸，两条预制裂隙之间没有出现裂纹的扩展，即岩桥没有发生破坏；而对于裂隙倾角为 60° 的共面裂隙岩样，破坏形式呈现为拉剪贯通模式，裂纹萌生于预制裂隙内部尖端，裂纹的扩展顺序是沿着岩桥方向的剪裂纹，和沿着预制裂隙方向的拉裂纹同时发生，接着在两条预制裂隙之间出现一些次拉裂纹。

当裂隙试件的角度为 90° 的岩样，在单轴压缩

条件下的破坏形态主要表现为劈裂破坏，具有较好的脆性特征，且主裂纹在扩展过程中伴有晶体崩落现象。不管是单裂隙还是双裂隙，试件破坏模式都表现为张拉破坏，况且主要破坏面不一定为裂隙面。

2.3 裂隙长度对试样宏观贯通模式影响

图 6 为经历相同冻融循环次数，且裂隙倾角都为 30° 的单裂隙岩体。试件破坏模式主要呈现为拉贯通，裂隙长度较小的 A1-1 试件，裂纹萌生于预制裂隙的上下尖端，起裂方向基本与预制裂隙平行，并沿着最大主应力方向向着顶部和底部延伸，直至裂纹贯通；而对于预制裂隙较长的 A4-8 试件，除了上述裂纹以外，还有产生于预制裂隙尖端，起裂角大致与预制裂隙垂直的支裂纹，此裂纹也沿着外荷载的方向逐渐向试件的顶部和底部延伸。

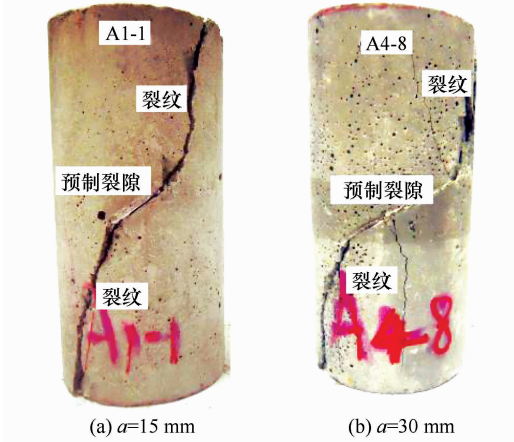


图6 不同长度单裂隙试件破坏模式

Fig. 6 Failure modes of different length in single fractured specimens

2.4 裂隙数目对试样宏观贯通模式影响

裂隙数目对试样宏观贯通模式的影响如图 7 所示。完整岩样的破坏模式为典型的张拉破坏，裂纹主要为沿着主压应力方向的拉伸裂纹，并在岩样的端部由于冻融作用而出现碎落现象。

单裂隙岩体，试件破坏模式主要呈现为拉贯通和拉压贯通模式。对于拉贯通，裂纹首先在预制裂隙尖端附近的拉伸应力区萌生，然后沿着最大主应力方向向顶部和底部延伸，随后出现一些次生的支裂纹；对于拉压贯通，在出现萌生于预制裂隙尖端的翼裂纹后，在预制裂隙的下尖端几乎与翼裂纹垂直方向会产生压裂纹，继而也是朝着外荷载方向不断向底部延伸。

双裂隙试件的破坏模式为裂纹模式与片落模式

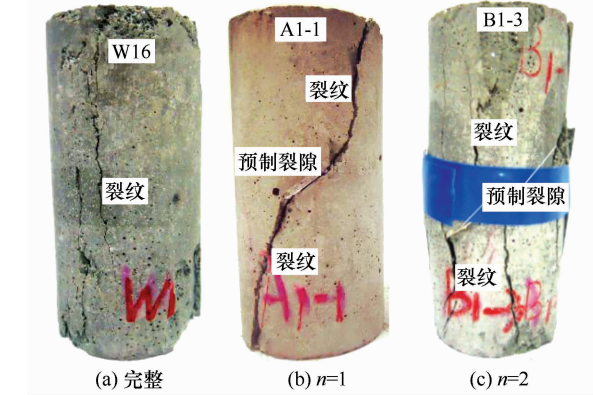


图 7 不同数目裂隙试件破坏模式

Fig. 7 Failure modes of different number of cracked specimens

共存的形式。对于裂隙倾角为 30° 和 60° 的岩样，在两条预制裂隙的上下尖端都会出现拉伸裂纹（翼裂纹与反翼裂纹），随着冻融循环次数的增加，如图 3 中的 B1-4 两条预制裂隙之间出现了大面积的片落现象，B1-3 岩样在上部顶端出现了片落现象；对于裂隙倾角为 60° 的双裂隙岩样，除了会出现张拉裂纹之外，在两条预制裂隙之间还会出现相互连通的压裂纹。

3 冻融裂隙试样裂纹演化特征

冻融循环作用、预制裂隙以及单轴压缩作用都会影响试件的破坏模式。在冻融与外荷载共同作用下，预制裂隙岩体裂纹的演化模式见图 8 和 9。

对于预制单裂隙岩样，裂纹的演化类型主要有拉伸裂纹与支裂纹，见图 8。拉伸裂纹 I 和 III 通常是最先从预制裂隙内部尖端产生的裂纹，而对于拉伸 II 型支裂纹一般出现的较晚，出现位置是在预制裂隙下尖端，且总是伴随着 I 和 III 的萌生和扩展后而朝着最大主应力方向延伸的裂纹。

对于双裂隙岩样在预制裂隙尖端裂纹的萌生类型有拉伸裂纹和剪切裂纹，从图 9 可以看出，I 型

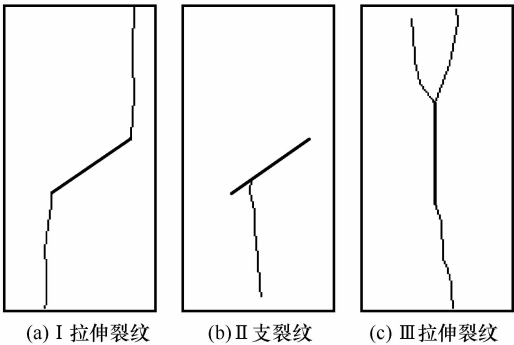


图 8 单裂隙岩样裂纹类型

Fig. 8 Crack types of single fractured specimens

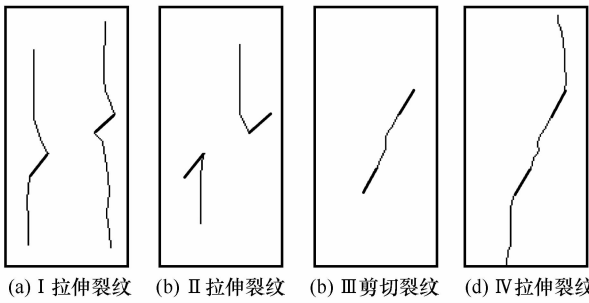


图 9 双裂隙岩样裂纹类型

Fig. 9 Crack types of double fractured specimens

拉伸裂纹为翼裂纹，它是最早萌生于预制裂纹尖端的裂纹，并沿着最大主应力方向扩展延伸，此种裂纹形式只是在预制裂隙和岩样倾角为 30° 的 B1 试件中能够观察到；II 型裂纹为反翼裂纹，也是起裂于预制裂隙尖端，进而沿着和翼裂纹相反的方向扩展；III 型裂纹为萌生于预制裂隙尖端且沿着岩桥方向贯通的剪切裂纹，此种裂纹仅仅发生在裂隙及岩桥倾角为 60° 的 B2 类岩样中；IV 型裂纹为共面裂纹，从预制裂隙尖端起裂，并沿着预制裂隙方向扩展。

从力学角度分析，岩石的冻融损伤劣化过程与温度的变化密切相关<sup>[18]</sup>：一方面，当温度降低时，岩石内部的孔隙水发生 9% 体积膨胀，产生冻胀力，造成岩石内部微裂隙扩展，导致岩体劣化。另一方面通过实验还发现冻胀力会使得岩体内部某些胶结程度较弱的矿物颗粒剥落析出，使得岩体内部结构“架空”从而导致岩体劣化；当环境温度升高时，岩石内部的水发生融解，冻胀力得到释放，孔隙水在微孔隙中继续迁移；随着冻融次数的增加，微裂隙受冻胀力的影响逐步扩展最终形成贯通裂缝，以及岩体内部矿物颗粒持续的析出破坏，致使岩石力学特性衰减，从而影响其在工程方面的应用。

经过冻融后的岩体，表面会出现不同程度的损伤，在外荷载作用下，这种损伤加剧，内部微缺陷不断变化，部分区域出现贯通，最终形成宏观裂缝导致岩石破坏。

4 结论

本文基于冻融循环试验和单轴压缩试验，将岩石冻融与力学研究进行结合，针对裂隙岩石试件的损伤破坏模式进行研究，分析了裂隙岩体在冻融与荷载耦合作用下破坏模式的影响因素，获得的主要结论如下：

(1) 随着冻融循环次数的增加，裂隙岩样破裂

程度越来越严重, 破裂面的条数较多, 破裂模式也越来越复杂, 由单一的破坏面逐渐发展为多个破裂面; 其次, 在外荷载作用下, 冻融次数越多越容易产生片落现象。

(2) 裂隙倾角会对试件的破坏模式产生影响, 对于裂隙倾角较小的岩样, 主要为拉伸破坏, 且主拉裂纹起裂于预制裂隙尖端, 起裂角大致与预制裂隙方向平行, 并逐渐沿着外加载方向向岩样的顶部和底部延伸; 对于试件倾角为  $90^\circ$  的岩样, 破裂形式为劈裂破坏, 且劈裂面不一定为裂隙面。

(3) 裂隙长度比较小的试件容易发生拉贯通, 而对于裂隙长度较大的试件, 往往在发生主拉裂纹后, 伴随有支裂纹的出现。

(4) 对于单裂隙岩体, 试件的破坏模式主要呈现为拉贯通和拉压贯通, 对于双裂隙试件的破坏模式为裂纹模式与片落模式共存的形式, 且除了张拉裂纹以外, 在两条预制裂隙之间还会出现相互贯通的压裂纹。

## 参考文献 (References):

- [1] Liu Weidong. Scientific understanding of the Belt and road initiative of China and related research themes[J]. Progress in Geography, 2015, 34(5): 538–544. [刘卫东. “一带一路”战略的科学内涵与科学问题[J]. 地理科学进展, 2015, 34(5): 538–544.]
- [2] Deng Hongwei, Tian Weigang, Zhou Keping, et al. Progress in freezing-thawing rock mechanics during the period of 2001 to 2012[J]. Science and Technology Review, 2013, 31(24): 74–79. [邓红卫, 田维刚, 周科平, 等. 2001–2012 年岩石冻融力学研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(24): 74–79.]
- [3] Inada Y, Yokota K. Some studies of low temperature rock strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1984, 21(3): 145–153.
- [4] 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.
- [5] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1029–1034.
- [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] Zhou Zhidong, Liu Wu. Analysis of the influences of freezing-thawing action on rock slope stability of water conservancy engineering in high cold areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1268–1274. [周志东, 刘武. 高原寒区冻融作用对水利工程基岩边坡稳定性影响分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1268–1274.]
- [8] 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.]
- [9] Liu Quansheng, Huang Shibing, Kang Yongshui, et al. Advance and review on freezing-thawing damage of fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 452–471. [刘泉声, 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.]
- [10] Chen Weizhong, Li Shucui, Qiu Xiangbo, et al. Experimental and numerical research on crack propagation in rock under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 18–23. [陈卫忠, 李术才, 邱祥波, 等. 岩石裂纹扩展的实验与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 18–23.]
- [11] Xu Shuanhai, Li Ning, Yuan Kekuo, et al. Strength behavior of frozen fractured ice-filled rock mass and research status of slope instability during thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1106–1120. [徐拴海, 李宁, 袁克阔, 等. 融化作用下含冰裂隙冻岩强度特性及寒区边坡失稳研究现状[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1106–1120.]
- [12] Li Xinping, Lu Yani, Wang Yangjun. 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(11): 2307–2315. [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(11): 2307–2315.]
- [13] Lu Yani, Li Xinping, Wu Xinghong. Fracture coalescence mechanism of single flaw rock specimen due to freeze-thaw under tri-axial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 609–615. [路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 三轴压缩条件下冻融单裂隙岩样裂缝贯通机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 609–615.]
- [14] Farmer I W, Engineering properties of rocks[M]. 2nd Ed. London: Chapman & hall, 1983.
- [15] Liu Hua, Niu Fujun, Xu Zhiying, et al. Acoustic experimental study of two types of rock from the tibetan plateau under the condition of freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 557–563. [刘华, 牛富俊, 徐志英, 等. 循环冻融条件下安山岩和花岗岩的物理力学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 557–563.]
- [16] Wen Lei, Li Xibing, Yin Yanbo, et al. Study of physico-mechanical properties of granite porphyry and limestone in slopes of open-pit metal mine under freezing-thawing cycles and their application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 632–639. [闻磊, 李夕兵, 尹彦波, 等. 冻融循环作用下花岗岩斑岩和灰岩物理力学性质对比分析及应用研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 632–639.]
- [17] Liu Hongyan, Liu Ye, Xing Chuangfeng, et al. Test study of damage failure of jointed rock mass under freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1547–1554. [刘红岩, 刘冶, 邢闯峰, 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.]
- [18] Hori M. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials[J]. International

Failure modes of fractured rock masses under freeze-thaw  
action and load

LU Yani<sup>1</sup>, LI Xinpeng<sup>2</sup>, WU Xinghong<sup>3</sup>

( 1. School of Civil Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Construction Management Office, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, Hubei, China )

**Abstract:** Taking fractured rock masses as the research object, using rock-like materials produced rock specimens with different geometric characteristics, freeze-thaw experiments and uniaxial compression tests of fractured rock samples have been carried out to investigate the influence of different crack dip angle, crack length, crack number and freezing-thawing cycles on the damage failure modes. The results of the experiments demonstrated that the existence of joint and freezing-thawing cycles have much effect on the damage failure modes. Rock rupture degree becomes more and more serious, and failure modes are becoming more and more complicated with the increase of freeze-thaw cycles; Failure modes of the fractured rock masses are different between single crack and double cracks. Tensile fracture modes often appear when the fissure angle is 30 degrees, mixed modes (shear and compression) take on when the fissure angle is 60 degrees, failure modes present splitting failure when the fissure angle is 90 degrees. The surface of specimens makes more compression cracks besides principal tensile crack with increasing crack length. The above research conclusions can provide valuable references to the constructions and safety operation.

**Key words:** freezing-thawing cycles; uniaxial compression test; jointed rock masses; failure mode; rock mechanic

( 本文编辑：周成林 )