

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1147

LU Yani, LI Xinping, HAN Yanhua. Mechanical characteristics of anisotropic sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):889–898. [路亚妮, 李新平, 韩燕华. 各向异性砂岩冻融力学特性研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):889–898.]

## 各向异性砂岩冻融力学特性研究

路亚妮<sup>1</sup>, 李新平<sup>2</sup>, 韩燕华<sup>1</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湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**针对新疆天山公路岩质边坡的砂岩,开展了单/三轴压缩试验和不同次数的冻融循环试验,探讨了岩样强度和变形参数的各向异性随围压和冻融循环次数的变化规律,分析了层理角度及冻融作用对岩样破坏模式的影响。结果表明:岩样的弹性模量、黏聚力、内摩擦角和峰值强度均随着层理角度的增加呈现先减小后增加的U型发展态势,在60°时达到最小值,在0°或90°时其值最大;岩样的强度以及变形参数随着冻融循环次数的增加逐渐减小,随着围压的增加而增大;不同层理角度岩样强度及力学参数的差异性随着围压的增加逐渐减小,相应的岩样各向异性特性逐渐减弱;随着冻融循环次数的增加,岩样内部的裂纹不断扩展导致岩样各向异性程度逐渐增强;不同层理角度岩样的破坏模式可归纳为穿越基质和层理面的竖向劈裂张拉破坏、穿越基质和层理弱面的剪切破坏、拉-剪混合破坏、沿层理弱面的剪切滑移破坏、沿层理弱面的竖向劈裂破坏等5种模式。研究成果可为寒区岩体工程相关研究提供参考和依据。

**关键词:**砂岩;冻融循环;各向异性;力学特性;破坏模式

**中图分类号:** S152; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0889-10

### 0 引言

我国西部地区由于季节温差和昼夜温差较大,基础工程建设和矿产资源开发等岩土工程都面临着复杂的冻融岩石力学问题<sup>[1-2]</sup>。反复的冻融会诱发或加速岩石内部裂纹的扩展,微裂隙、微孔洞等缺陷的存在使岩体在力学特性及变形特征等方面表现出明显的各向异性<sup>[3-4]</sup>。

冻融岩石的物理力学性质是岩石力学的重要组成部分,是进行水-冰相变、多场耦合以及损伤模型等机理研究的基础。国内外学者针对冻融岩石的物理力学性质开展了大量的研究工作。通过制备不同类型(砂岩<sup>[5]</sup>、安山岩<sup>[6]</sup>、花岗岩<sup>[7]</sup>等)的完整和裂隙岩样<sup>[8-10]</sup>,设计不同含水量、不同冻融循环次数以及冻融循环温度的试验方案<sup>[11-12]</sup>,对岩样在冻融循环作用下物理力学参数的演化特性<sup>[13-15]</sup>进行研究,

进而探讨了冻融岩石的损伤劣化机理<sup>[16]</sup>,推导出不同岩体的损伤本构模型<sup>[17-18]</sup>,研究成果对于指导寒区岩体工程具有重要指导意义。

反复的冻融导致岩体中微裂纹、微孔洞不断增多,在强度和变形上表现出明显的各向异性特征。各向异性是岩体的一个重要性质,随着岩体力学的不断深入研究和岩土工程的快速发展,已成为国内外研究的重点和热点之一。Nasser等<sup>[19]</sup>针对页岩开展了三轴压缩试验,对其破坏模式进行了研究,认为加载方向(页岩层理面和最大主应力夹角)和围压是影响页岩破坏形式的主要因素;Cho等<sup>[20]</sup>通过单轴压缩和巴西劈裂试验,对不同角度下片麻岩、页岩和片岩的弹性参数及强度的各向异性进行了研究;国内多位学者也对不同类型岩样的各向异性特征进行了研究<sup>[21-27]</sup>。

在冻融岩石物理力学性质和岩石的各向异性

收稿日期: 2018-09-13; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907259; 51378500); 湖北省自然科学基金项目(2014CFB575); 湖北省教育厅科学技术研究项目(B2018162)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,从事岩土工程防灾减灾研究。

E-mail: siyu-1979@126.com.

方面,傅鹤林等<sup>[28]</sup>针对不同层理角度的板岩,通过冻融循环试验和单轴压缩试验,揭示了含不同层理倾角的板岩在冻融循环作用下的弹性参数及单轴抗压强度特征;王乐华等<sup>[29]</sup>针对寒区冻融岩体开挖卸荷这一特定工程环境,对不同含水状态、不同冻融循环次数下的层理砂岩进行三轴卸荷试验,研究了砂岩在不同冻融循环次数及不同含水状态下的卸荷力学特性。

虽然上述学者在冻融岩石物理力学性质方面以及岩石的各向异性方面开展了大量研究,但是针对层理岩体在冻融循环以及三轴压缩作用下的物理力学性质研究报道不多。针对具有单一天然弱面的砂岩,本文开展了不同循环次数的冻融试验,并对经历不同冻融循环次数的岩样进行单/三轴压缩试验,随后探讨在不同围压和冻融循环次数下岩样的各向异性特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 岩样制备

随着高寒地区岩土工程的不断开展,涌现出越来越多的岩石冻融问题。加之大量岩体层理发育明显,其力学性质差异显著,在反复冻融环境下,层理岩体的物理力学性质更为复杂。鉴于此,本文针对节理岩体,开展经历不同冻融循环次数后的单/三轴压缩试验,进一步探究冻融条件下节理岩体的物理力学特性。

试验所用砂岩取自新疆天山公路岩质边坡,深度约2.2 m(位于当地冻结线以下<sup>[30]</sup>)处的岩块,为一灰色厚层状至块状中粒长石石英砂岩,微风化,含有肉眼可见的单一天然弱面。对含有单一天然弱面的砂岩试样加工比较困难,为了得到不同弱面倾角的试样,根据试块弱面延伸方向,调整钻取方向,从含有明显弱面砂岩岩块中钻取0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°等7种层理角度的试样(图1),制备成直径50 mm、高100 mm的标准圆柱形岩样。对制作好的试件,首先从视觉上剔除表面不平整、孔隙较大的岩样,然后通过超声波波速检测去除差异性比较大的试件,选取波速集中的岩样作为试验岩样。岩样的端面平整度、倾斜度等严格按照规范要求控制<sup>[31]</sup>。试验所用岩样的基本物理性质指标见表1。

### 1.2 试验方案

试验所用砂岩取自新疆天山公路岩质边坡,该

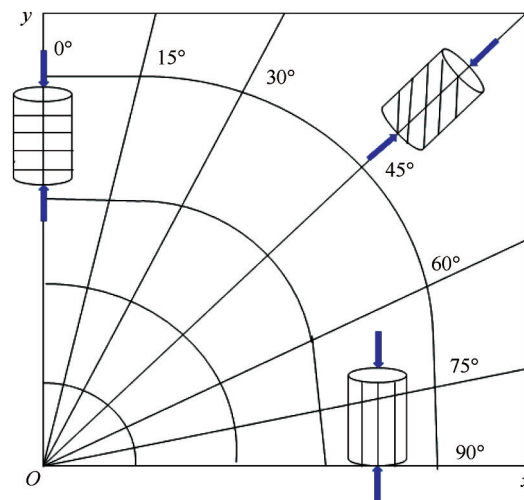


图1 岩芯取样示意图

Fig. 1 Coring diagram of the rock sample

表1 岩样的物理参数

Table 1 Physical parameters of the rock samples

岩样倾角/(°)	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%
0	2.02	2.16	4.63
15	2.00	2.09	4.76
30	2.01	2.10	5.78
45	2.06	2.17	5.11
60	1.93	2.03	5.49
75	1.94	2.04	5.46
90	1.99	2.08	4.79

地区属于典型的高寒内陆山区,季节温差和昼夜温差较大,夏季最高气温可高达30℃以上,冬季最低气温在-30℃左右。为了便于控制温度,本文考虑了最不利温度条件,将冻融循环温度界定为-40~40℃。另外,在最不利条件下,冻融循环的时间大约为2个月,因此冻融循环次数设置为0、20、40和60次(一个冻融周期24 h,其中冻12 h,融12 h)。寒区岩体工程冻融范围一般在岩体表面一定深度内,围压不会很高,根据当地实际工程环境,选取围压为0、2、4和6 MPa。

标准岩样制备完成后,采用KB-TH-S-150Z程式恒温恒湿试验箱,对制备好的7种不同层理角度的岩样分别进行冻融循环试验,然后对经历不同冻融循环次数的试件进行单/三轴压缩试验。压缩试验设备为中国科学院武汉岩土力学研究所研发的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 mm·s<sup>-1</sup>。

## 2 砂岩冻融力学特性分析

对具有不同层理角度岩样的弹性模量、黏聚力、内摩擦角以及峰值抗压强度进行统计分析, 研究层理角度、围压和冻融循环次数对岩样强度与变形参数的影响规律。

### 2.1 层理角度的影响

大量的试验结果表明<sup>[23,29]</sup>, 岩样经过不同冻融循环次数和不同围压的冻融循环试验和单/三轴压缩试验后, 其弹性模量、峰值强度以及变形参数(黏聚力和内摩擦角)随层理角度的变化情况均呈现相同的变化趋势, 因此本文仅选取冻融循环0次时不同围压下的峰值强度(图2)和围压0 MPa时不同冻融循环次数的弹性模量(图3)和峰值强度(图4)的试验结果作为代表。图5是在围压0 MPa、冻融循环20次时的黏聚力和内摩擦角随层理角度的变化情况。

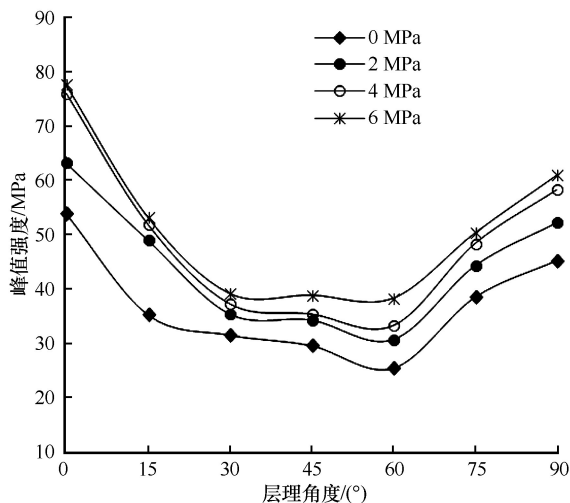


图2 不同围压下峰值强度随层理角度的变化(冻融循环次数 $n=0$ )

Fig. 2 Variation of peak strength with orientation angle under different confining pressures (number of freeze-thaw cycles  $n=0$ )

由图2~5可以看出:

(1) 岩样的弹性模量和峰值抗压强度均随着层理角度的增加呈现先减小后增大的U型发展趋势, 其最小值出现在层理角度为60°的岩样附近, 最大值出现在层理角度为0°或者90°的岩样附近。层理角度在0°~30°之间, 岩样的弹性模量、黏聚力及内摩擦角下降较为迅速; 在30°~45°之间, 各量下降缓慢; 在60°时, 各量达到最低点, 随后上升; 在60°~75°之间, 各量上升较大; 在75°~90°之间, 各量增加幅度降低。这与文献[21-23]的结论较为一致。

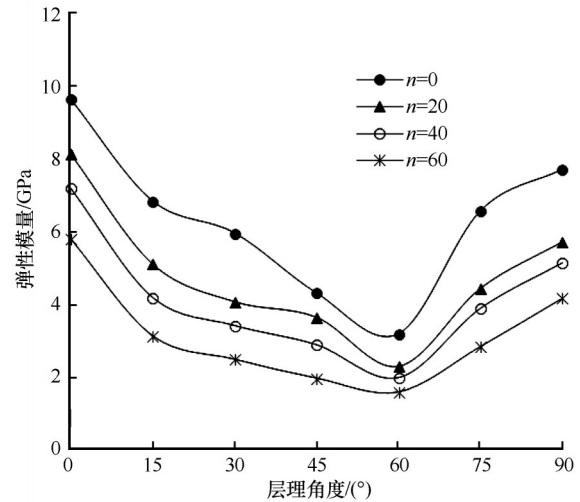


图3 不同冻融循环次数下弹性模量随层理角度的变化( $\sigma_3=0$  MPa)

Fig. 3 Variations of elastic modulus with orientation angle under different numbers of freeze-thaw cycles ( $\sigma_3=0$  MPa)

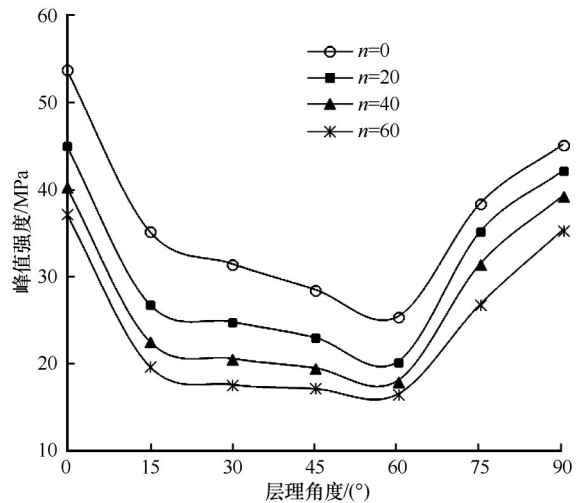


图4 不同冻融循环次数下峰值强度随层理角度的变化( $\sigma_3=0$  MPa)

Fig. 4 Variations of peak strength with orientation angle under different numbers of freeze-thaw cycles ( $\sigma_3=0$  MPa)

(2) 随着层理角度的增大, 岩样的黏聚力和内摩擦角呈现出与峰值强度相似的变化规律。这主要与岩样的破坏形态关系密切, 后文岩样破坏模式各向异性分析表明, 岩样的层理角度在30°~75°时, 主要发生剪切破坏, 可根据Mohr-Coulomb强度准则计算出图5中的黏聚力和内摩擦角。当层理角度在45°~60°时, 与Mohr-Coulomb强度准则计算出的岩样破裂角( $45^\circ + \varphi/2 = 51.5^\circ$ )很接近, 说明岩样主要沿岩石的某一截面发生破坏, 因此抗剪强度较低。而在其他层理角度情况下, 岩样主要发生穿越基质和层理弱面的复合剪切破坏, 宏观上为岩



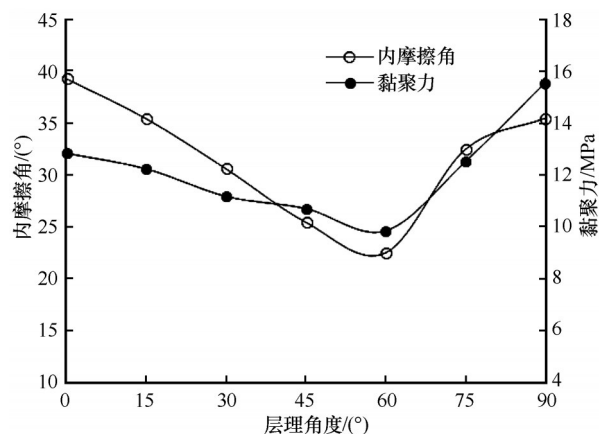


图5 黏聚力和内摩擦角随层理角度的变化( $\sigma_3=0$  MPa,  $n=20$ )  
Fig. 5 Variations of cohesion and internal friction angle with orientation angle ( $\sigma_3=0$  MPa,  $n=20$ )

样基质和层理弱面的等效或者综合抗剪强度,其数值自然较大。

(3)围压作用对岩石材料的各向异性具有明显的退化效应。从图2可以看出,不同层理角度砂岩试样的三轴抗压强度随着围压的增加也相应增大;在单轴压缩以及较小围压(2 MPa)下,U型曲线底部凹陷明显,而随着围压的不断增大,U型曲线的变化趋于平缓;峰值强度在 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 时出现了应力平台,下降极为缓慢,两种角度下的峰值强度非常接近。

## 2.2 冻融循环的影响

在不同围压下,不同层理角度岩样的弹性模量和峰值强度随冻融循环次数的变化趋势大致相同,本文以围压 $\sigma_3=0$  MPa时的弹性模量(图6)和峰值强

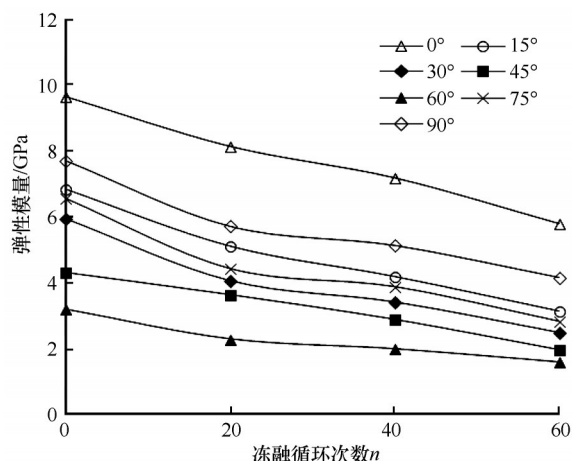


图6 不同层理角度下弹性模量随冻融循环次数的变化( $\sigma_3=0$  MPa)  
Fig. 6 Variations of elastic modulus with number of freeze-thaw cycles under different orientation angles ( $\sigma_3=0$  MPa)

度(图7)随冻融循环次数的变化为例,研究不同围压下峰值强度随冻融次数的变化。

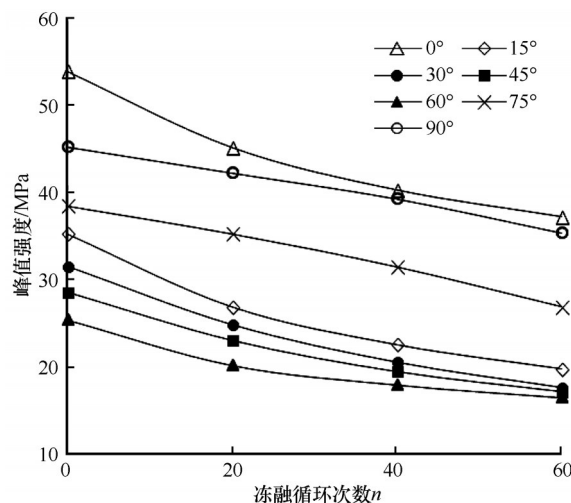


图7 不同层理角度下峰值强度随冻融循环次数的变化( $\sigma_3=0$  MPa)  
Fig. 7 Variations of peak strength with number of freeze-thaw cycles under different orientation angles ( $\sigma_3=0$  MPa)

由图6~7可知:

(1)随着冻融循环次数的增加,同一层理角度岩样的弹性模量和峰值强度均呈现降低的趋势。在冻融初期,弹性模量和峰值强度的下降较为明显,如在20次冻融循环时,层理角度为 $0^{\circ}$ 的岩样的弹性模量和峰值强度下降幅度分别为16%和20%;在后期,其弹性模量和峰值强度的下降趋于平缓,在冻融循环次数从40次到60次的过程中,二者的下降幅度分别为10%和12%。这是因为在冻融初期岩体内部晶粒结构损伤较大,而在冻融后期,由于反复的冻融,岩体架构已经基本稳定。

(2)随着冻融循环次数的增加,弹性模量与峰值强度的差异性逐渐减小。表现在图6上就是当冻融循环为0次时,数据点较为分散,随着冻融循环次数的增加,数据点逐渐聚拢,而当冻融循环次数为60次时,层理岩样数据点彼此较为接近。

## 2.3 围压的影响

图8~9为未冻融的岩样在不同围压下的弹性模量和峰值强度变化曲线。

由图8~9可知:

(1)随着围压的增大,同一层理角度砂岩的弹性模量、峰值强度也随之增大,但其增大的幅度越来越小。表现在曲线的斜率上,在围压增加的前期,曲线的斜率较大,随后曲线的斜率逐渐减小,

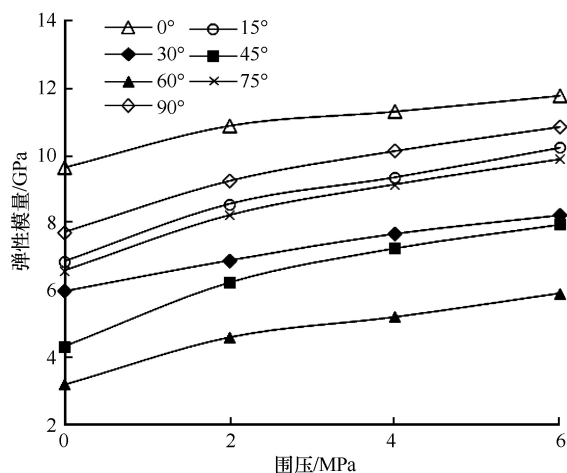


图8 不同层理角度下弹性模量随围压的变化(冻融循环次数 $n=0$ )

Fig. 8 Variations of elastic modulus with confining pressure under different orientation angles (number of freeze-thaw cycles  $n=0$ )

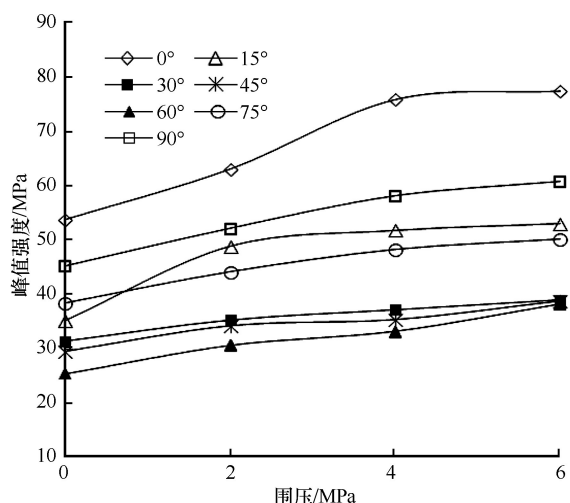


图9 不同层理角度下峰值强度随围压的变化(冻融循环次数 $n=0$ )

Fig. 9 Variation of peak strength with confining pressure under different orientation angles (number of freeze-thaw cycles  $n=0$ )

趋于平缓。如在围压为2 MPa时,层理角度为90°的岩样弹性模量上升了13.77%;而在围压为6 MPa时,其弹性模量仅上升了4.46%,其主要原因是围压对层理弱面的孔隙、裂隙具有较好的压密作用。

(2)层理角度为0°的岩样的峰值强度随围压的增加变化明显,这是由围压对层理面间的孔隙和微裂隙的压密作用而抑制侧向变形引起的。在围压为2 MPa时,层理角度为90°的岩样的弹性模量上升了15.43%;而在围压为6 MPa时,其弹性模量仅上升了6.56%。同一层理角度岩样的各向异性减

小,是由围压抑制层理面开裂后破坏机制的改变引起的。

## 2.4 砂岩各向异性分析

岩体在成岩过程及后期构造作用下,会形成软弱结构面,导致其变形破坏模式及强度表现出显著的各向异性。国内外学者对岩体的各向异性进行了大量的研究。其中Ramamurthy<sup>[32]</sup>根据不同层理角度情况下岩石单轴抗压强度的变化特征,对岩石强度各向异性进行了定义,用各向异性度 $R_c$ 来衡量。

$$R_c = \frac{\sigma_{c, \max}}{\sigma_{c, \min}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{c, \max}$ 为裂隙角度为0°或90°时抗压强度的最大值; $\sigma_{c, \min}$ 为裂隙角度在0°~90°之间时抗压强度的最小值。

根据各向异性度,将岩石的各向异性分为5个等级,详情见表2。

表2 岩石的各向异性等级

Table 2 Anisotropy degrees of rocks

$R_c$	各向异性等级
$>1 \sim 1.1$	各向同性
$>1.1 \sim 2$	低各向异性
$>2 \sim 4$	中各向异性
$>4 \sim 6$	强各向异性
$>6$	极强各向异性

采用类似思路,弹性模量的各向异性度 $R_E$ 可表示为

$$R_E = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \quad (2)$$

式中: $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ 为裂隙角度在0°~90°之间时对应的弹性模量的最大值和最小值。

根据式(1)和(2)计算得到岩样抗压强度的各向异性度 $R_c$ 和弹性模量的各向异性度 $R_E$ ,具体结果见表3。

由表2和表3可知,岩样抗压强度和弹性模量的各向异性度无论是从围压还是冻融循环次数分析,总体均属于中等各向异性。从表3可以看出,抗压强度以及弹性模量的各向异性度随着围压的增加而减小,单轴压缩( $\sigma_3=0$  MPa)条件下抗压强度和弹性模量的各向异性度分别为2.12和3.02,围压为6 MPa时,抗压强度和弹性模量的各向异性度分别为2.03和2.00,分别下降了4.25%和33.77%。低围压时,岩石的各向异性度下降明显,高围压

表3 岩样的各向异性度

Table 3 Anisotropy degrees of the rock samples

围压/ MPa	各向异性度		冻融循环 次数	各向异性度	
	抗压强度	弹性模量		抗压强度	弹性模量
	$R_C$	$R_E$		$R_C$	$R_E$
0	2.12	3.02	0	2.12	3.02
2	2.06	2.37	20	2.23	3.54
4	2.04	2.18	40	2.24	3.60
6	2.03	2.00	60	2.25	3.64

注：表中不同冻融循环次数下的各向异性度是在围压 $\sigma_3=0$  MPa的条件下计算的，不同围压下的各向异性度是在未冻融的条件下计算的。

时，趋于平稳。这说明岩石内部薄弱面对岩样抗压强度和弹性模量各向异性的影响逐渐降低，主要原因是围压对薄弱面具有较好的压密作用，同时围压的侧向约束作用较好地限制了岩样薄弱面的剪切变形，从而抑制了薄弱面的易开裂性。

随着冻融循环次数的增加，峰值强度以及弹性模量的各向异性度逐渐增大。在冻融初期，各向异性度的增加较为显著；在冻融后期，各向异性度的增加程度与之前相比较为缓慢。例如，在前20次冻融时，抗压强度和弹性模量的各向异性度增加幅度分别为5.19%和17.20%，而冻融循环次数从40次到60次的变化过程中，增加幅度分别为0.45%和1.11%。这主要是由于随着冻融循环次数的增加，岩样内部的微裂隙出现了不同程度的扩展，在初期冻融作用对岩样造成了较大的损伤，而后期冻融作用对岩样造成的损伤相对减缓。冻融循环次数的不断增加导致岩体内部损伤不断积累，反复的冻融过程使岩样内部微裂隙逐步扩展。而微裂隙的不断扩展总是伴随着岩石孔隙的产生，往往具有一定的方向性，这些特征增强了岩石的各向异性。

3 砂岩破坏模式分析

砂岩的峰值抗压强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角的各向异性与岩样的破坏模式密切相关<sup>[33-34]</sup>。其破坏模式受层理弱面、围压和冻融循环次数的影响，在不同围压下，岩样随冻融循环次数的破坏模式大致相同。本文仅选取围压为2 MPa，经历不同冻融循环次数的7种层理角度岩样的破坏模式(图10，从左到右冻融循环次数依次为0、20、40和60)，来探讨砂岩破坏模式的各向异性。

由图10可知：

(1) 层理角度为0°的岩样，岩样的破坏模式为

穿越基质的竖向劈裂张拉破坏，有的还存在张拉分叉现象。裂纹起始于层理面中部，并沿着最大主应力方向延伸和扩展。随着冻融循环次数的增加，破裂面的条数及裂缝的宽度也随之增加。

(2) 层理角度为15°的岩样，破裂模式为穿越基质的劈裂破坏和沿层理弱面的剪切破坏。在冻融循环0次和20次时，发生穿越基质的劈裂破坏，裂纹起始于层理面中部，与层理角度为0°的岩样破坏模式相似；而冻融循环40次和60次时，岩样发生沿着层理面的剪切破坏，裂纹起始于层理面尖端，并逐渐向端部延伸，在此裂纹扩展的同时，岩样中部也出现一些张拉裂纹。

(3) 层理角度为30°的岩样，破裂模式为沿层理弱面的剪切破坏，首先沿着层理角度尖端出现翼裂纹，并沿着最大主应力方向朝两端延伸，破裂面呈多段折线型发展，开展方向和层理弱面的方向大体一致，说明层理弱面对破裂面的形成有明显的控制作用。

(4) 层理角度为45°和60°的岩样，破裂模式为沿层理弱面的剪切滑移破坏，剪切面即为层理面。首先出现沿着层理角度的翼裂纹，与此同时，在层理角度尖端还出现环向裂纹，并伴随着一些细小的竖向裂纹。其主要原因是岩石中矿物晶粒和微缺陷的随机分布，在外荷载作用下，不同组成成分本身的变形和对力传递速率的差异，引起了岩石内部应力场的不均匀分布，岩样在层理弱面出现主拉裂纹。此后，随着轴向变形的增加，主生拉裂纹将会近似沿最大主应力延伸，整个岩样上、下两端完全脱离，最终表现为剪切贯通模式。

(5) 层理角度为75°的岩样，其破坏模式既有拉伸破坏，又有沿着层理方向的剪切破坏，呈现拉-剪复合破坏模式。试样破坏时主破裂面为剪切破坏，剪切面与层理角度面大致平行，有一定微小程度的弯曲，破裂面与层理面斜交，属于典型的剪切破坏模式。随着冻融循环次数的增加，岩石的孔隙率逐步增加，导致试样中部受到较大的张应力，出现拉裂缝。由于砂岩晶粒尺度较大以及材料组成成分对力的传递速率和自身变形的不同，使得裂纹扩展线路呈曲折发展，再者层理面对砂岩的抗压强度具有“弱化效应”，层理面附近会产生沿层理方向的剪切型裂纹，从而导致岩样在层理弱面的某一位置发生复合拉剪破坏。

(6) 层理角度为90°的岩样，在层理面附近(0、



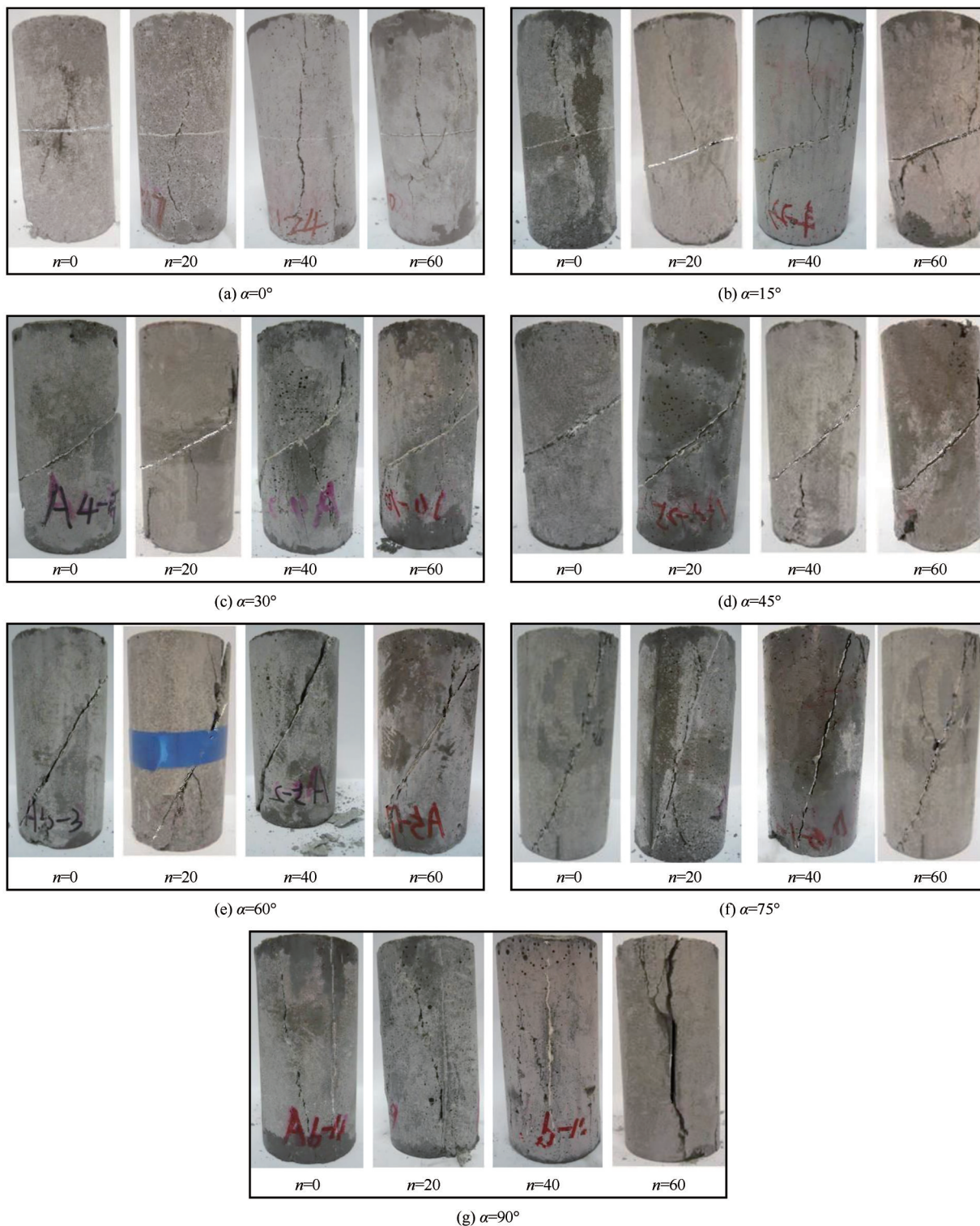


图 10 三轴压缩试验后岩样的典型破坏模式

Fig. 10 Typical failure modes of the rock samples after triaxial compression test

20、40次冻融循环)或沿着层理弱面(60次冻融循环)的竖向劈裂破坏,裂纹萌生于岩样中部,以一定角度发展,并逐渐沿着最大主应力方向延伸,形成平行于轴向应力方向的张拉裂隙,最终形成宏观的贯通裂纹。

## 4 讨论

### 4.1 砂岩强度特性

峰值强度随冻融循环次数的变化规律基本一致,均随冻融循环次数的增加而减少。这是因为在

冻融过程中,温度降低时,裂隙水冻结成冰,岩石所含矿物颗粒及岩石内部微裂纹和微孔洞收缩,裂隙冰与岩石骨架间的胶结作用使得岩样强度增强;而当温度升高时,岩体裂隙中的冰消融,冰体消融又会引起冰冻层与岩体骨架接触面的丧失,从而导致岩样强度的降低。冰消融导致岩体结构强度的降低远大于水冻结成冰引起的岩体强度的增大<sup>[35]</sup>,因此反复的冻融作用最终导致岩体强度的逐渐降低。在冻融前期,峰值强度的变化较大,随着冻融次数进一步增多,峰值强度降低程度逐渐变小。其原因是在冻融初期水分渗入岩石内部,水-冰相变对岩石影响程度较大,但随着冻融次数的继续增加,水-冰相变机制基本趋于稳定,累积损伤变化继续增大,但是破坏速率逐渐降低。

随着围压的增加,岩样的弹性模量和峰值强度不断增大。其原因是裂隙冰在荷载作用下破碎后裂隙接触更为充分,垂直于接触面的正压力随着围压的增加进一步增大,相应的摩擦力增大会使得砂岩岩样峰值强度明显提高。

#### 4.2 砂岩破坏机制

结构面倾角、冻融与围压都会对节理岩样在单/三轴压缩时的破坏模式产生影响,从而导致砂岩力学特性及变形特性的各向异性。根据上述的破坏特征,可将7种不同结构面岩样的破坏模式分为张拉破坏、剪切破坏和拉-剪复合破坏。随着裂隙倾角的增加,岩样的破坏模式由穿越基质的竖向劈裂张拉破坏( $0^\circ$ ),到穿越基质的劈裂破坏和沿层理弱面的剪切破坏( $15^\circ$ ),再到沿层理弱面的剪切破坏( $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $60^\circ$ ),逐步发展为拉-剪复合破坏模式( $75^\circ$ ),然后又发展为劈裂张拉破坏( $90^\circ$ )。

在冻融循环作用下,岩样的破坏面由单一破坏面逐渐转化为多个破坏面,破坏模式也从单一的剪切破坏转变为复合拉剪破坏,且主裂纹在破坏过程中有晶体崩落现象。其主要原因是反复的冻融作用使岩石孔隙增加,使得破裂面变得越来越复杂。随着冻融循环次数的增加,岩样表面有冻酥的迹象,裂缝宽度也比少次冻融循环时的值小,且主控破裂面的破坏迹线随着冻融循环次数的增加而增长。

### 5 结论

本文对含不同层理角度的砂岩进行了冻融循环试验和三轴压缩试验,并对砂岩的各向异性进行

分析,得到以下结论:

(1) 砂岩岩样的弹性模量、峰值强度、黏聚力和内摩擦角均随着层理角度的变化呈现先减小后增大的U型发展趋势。在层理角度为 $60^\circ$ 附近时,其值最小,最大值出现在层理角度为 $0^\circ$ 或 $90^\circ$ 附近,此变化规律与岩样的破坏模式关系密切。层理角度为 $60^\circ$ 时岩样发生沿层理面的剪切滑动破坏,其值较低;而在层理角度为 $0^\circ$ 或 $90^\circ$ ,破坏模式为穿越基质和层理面的劈裂破坏,其值较高。

(2) 随着冻融循环次数的增加,砂岩的弹性模量、峰值强度均随之减小。在冻融初期,减小幅度较大;在冻融后期,逐渐趋于平稳。砂岩的各向异性度随着冻融循环次数的增加而增加,原因在于反复冻融循环加速了岩样内部裂隙的扩展。

(3) 随着围压的增大,对于相同层理角度的砂岩,其弹性模量和峰值强度呈现增加的态势。围压较小时,曲线较陡,增加的幅度较大;围压较大时,曲线趋于平缓,增加的幅度较小。这说明围压对岩石材料的各向异性具有明显的退化效应。

(4) 砂岩的破坏模式和层理角度密切相关。层理角度为 $0^\circ$ 的岩样,岩样的破坏模式为穿越基质和层理面的竖向劈裂张拉破坏;层理角度为 $15^\circ$ 的岩样,破裂模式为穿越基质的劈裂破坏(0、20次冻融循环)和沿层理弱面的剪切破坏(40、60次冻融循环);层理角度为 $30^\circ$ 的岩样,破裂模式为沿层理弱面的剪切破坏;层理角度为和 $45^\circ$ 和 $60^\circ$ 的岩样,破裂模式为沿层理弱面的剪切滑动破坏;层理角度为 $75^\circ$ 的岩样,呈现拉-剪复合破坏;层理角度为 $90^\circ$ 的岩样,破坏模式为沿着层理弱面的竖向劈裂破坏。

#### 参考文献(References):

- [1] Huang Shibing, Liu Quansheng, Cheng Aiping, et al. Preliminary experimental study of frost heaving pressure in crack and frost heaving propagation in rock mass under low temperature [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 78 - 84. [黄诗冰, 刘泉声, 程爱平, 等. 低温岩体裂隙冻胀力与冻胀扩展试验初探[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 78 - 84.]
- [2] Shen Yanjun, Yang Gengshe, Wang Ming, et al. Experiments on the damage characteristics and fracture process of single-joint quasi-sandstone under the cyclic freezing-thawing and cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 709 - 717. [申艳军, 杨更社, 王铭, 等. 冻融-周期荷载下单裂隙类砂岩损伤及断裂演化试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 709 - 717.]
- [3] Liu Haining, Wang Junmei, Wang Sijing. Experimental research of columnar jointed basalt with true triaxial apparatus at



- Baihetan Hydropower Station[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Suppl 1): 163–171. [刘海宁, 王俊梅, 王思敬. 白鹤滩柱状节理岩体真三轴模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增刊1): 163–171.]
- [4] Li Dan, Xia Binwei, Chen Hao, et al. Research on stability of tunnel in anisotropic layered rockmass with low inclination angle bedding by model test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 1933–1938. [李丹, 夏彬伟, 陈浩, 等. 缓倾角层理各向异性岩体隧道稳定性的物理模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(7): 1933–1938.]
- [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] Yavuz H. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70(2): 187–192.
- [7] Wen Lei, Li Xibing, Yin Yanbo, et al. Comparative analysis of physical and mechanical properties of granite porphyry and lime-stone under freezing and 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.]
- [8] 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.]
- [9] Lu Yani, Li Xinping, Xiao Jiashuang. Experimental analysis on mechanical characteristic of single cracked rock mass under freeze-thaw condition [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(3): 593–598. [路亚妮, 李新平, 肖家双. 单裂隙岩体冻融力学特性试验分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(3): 593–598.]
- [10] 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.]
- [11] Shen Yanjun, Yang Gengshe, Rong Tenglong, et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1775–1782. [申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1775–1782.]
- [12] Wang Yongyan, Liu Xueqing, Su Chuanqi, et al. Experimental study on the effects of freeze-thaw cycles on similar materials with different porosity [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 102–109. [王永岩, 柳雪庆, 苏传奇, 等. 冻融循环对不同孔隙率页岩相似材料影响的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 102–109.]
- [13] Yan Xidong, Liu Hongyan, Xing Chuangfeng, et al. Study on variation law of rock elastic modulus under freezing and thawing cycles [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2015, 36(8): 2315–2322. [阎锡东, 刘红岩, 邢闯锋, 等. 冻融循环条件下岩石弹性模量变化规律研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(8): 2315–2322.]
- [14] Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3076–3082. [徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3076–3082.]
- [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]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2012, 4(1): 21–27.
- [16] Zhang Huimei, Peng Chuan, Yang Gengshe, et al. Study on strength criterion of freezing-thawing damage rock [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(2): 154–158. [张慧梅, 彭川, 杨更社, 等. 冻融损伤岩石的强度准则研究[J]. *西安科技大学学报*, 2017, 37(2): 154–158.]
- [17] Tan Xianjun, Chen Weizhong, Liu Hongyuan, et al. A unified model for frost heave pressure in the rock with a penny-shaped fracture during freezing [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 153: 1–9.
- [18] Huang Shibing, Liu Quansheng, Cheng Aiping, et al. A statistical damage constitutive model under freeze-thaw and loading for rock and its engineering application [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 145: 142–150.
- [19] Nasser M H, Rao K S, Ramamurthy T. Failure mechanism in schistose rocks [J/OL]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4) [2018-12-12]. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00099-3).
- [20] Cho J W, Kim H, Jeon S, et al. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 50: 158–169.
- [21] Peng Jianwen, Zeng Feitao, Li Changhong, et al. Experimental study of anisotropy and mechanical property of quartz sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Suppl 1): 103–112. [彭剑文, 曾飞涛, 李长洪, 等. 石英砂岩力学特性及各向异性试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(增刊1): 103–112.]
- [22] Shi Hao, Fu Yukai, Zhou Bo, et al. Experimental study of sandy mudstone anisotropic properties [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(4): 472–478. [石昊, 付昱凯, 周波, 等. 砂质泥岩各向异性特征试验研究[J]. *实验力学*, 2017, 32(4): 472–478.]
- [23] Deng Huafeng, Wang Wei, Li Jianlin, et al. Experimental study on anisotropic characteristics of bedded sandstone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 112–120. [邓华锋, 王伟, 李建林, 等. 层状砂岩各向异性力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 112–120.]
- [24] Gao Chunyu, Xu Jin, Li Zhonghong, et al. Experimental study of anisotropically mechanical characteristics of sandy slate in Xuefeng Mountain tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1360–1364. [高春玉, 徐进, 李忠洪, 等. 雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1360–1364.]
- [25] Liu Shengli, Chen Shanxiong, Yu Fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12): 3616–3623. [刘胜利, 陈善雄, 余飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(12): 3616–3623.]
- [26] Hou Zhenkun, Yang Chunhe, Guo Yintong, et al. Experimental study on anisotropic properties of Longmaxi formation shale under uniaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*,

- 2015, 36(9): 2541–2550. [侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2541–2550.]
- [27] Heng Shuai, Yang Chunhe, Zeng Yijin, et al. Anisotropy of shear strength of shale based on direct shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 874–883. [衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 基于直剪试验的页岩强度各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 874–883.]
- [28] Fu Helin, Zhang Jiabing, Huang Zhen, et al. Experimental study on elastic parameters and uniaxial compressive strength of slate under freeze-thaw cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2203–2212. [傅鹤林, 张加兵, 黄震, 等. 冻融循环作用下板岩弹性参数及单轴抗压强度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2203–2212.]
- [29] 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.]
- [30] Yang Xiaoli, Wang Jinsong. The change characteristics of maximum frozen depth of seasonal frozen soil in Northwest China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2): 238–243. [杨小利, 王劲松. 西北地区季节性最大冻土深度的分布和变化特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 238–243.]
- [31] Changjiang Water Resources Commission. Changjiang River Scientific Research Institute. Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering: SL264–2001 [S]. Beijing: China Water and Power Press, 2001. [长江水利委员会长江科学院. 水利水电工程岩石试验规程: SL264–2001[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.]
- [32] Ramamurthy T. Strength and modulus responses of anisotropic sedimentary rocks, comprehensive rock engineering [M]. Oxford, UK: Pergamon Press, 1993.
- [33] Li Shugang, Cheng Xiaoyu, Liu Chao. Mechanics and crack evolution characteristics of rock-like material under compression failure [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(6): 771–778. [李树刚, 成小雨, 刘超. 类岩石材料压缩破坏力学特性及裂纹演化特征[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(6): 771–778.]
- [34] Yang Shengqi, Dai Yonghao, Han Lijun, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2391–2404. [杨圣奇, 戴永浩, 韩立军, 等. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2391–2404.]
- [35] 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.]

## Mechanical characteristics of anisotropic sandstone under freeze-thaw cycles

LU Yani<sup>1</sup>, LI Xinping<sup>2</sup>, HAN Yanhua<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In order to study anisotropic properties of sandstone in Tianshan Highway, Xinjiang, freeze-thaw cycle test, uniaxial/triaxial compressive tests were carried out. Strength and deformation parameters under different confining pressure and numbers of freeze-thaw cycles were discussed, the impact of bedding angle and failure modes was analyzed. The results show that elastic modulus, inner friction angle and cohesion of samples increase at first and then decrease with the increase of angle, and reach the minimum when the angle is 60°, reach the maximum at the angle of 0° or 90°; strength and deformation parameter decreases with numbers of freeze-thaw cycles, however, these parameters increase with the increase of confining pressure; with the increase of confining pressure, anisotropy of samples is decreasing; with numbers of freeze-thaw cycles, anisotropy of samples is increasing; the failure modes of sandstone can be summarized as splitting failure cross weak bedding face, shear failure cross weak bedding face, tension-shear failure, shearing slip damage along the weak bedding face, and splitting failure along weak bedding face. These results could be useful for engineering construction in cold regions.

**Key words:** sandstone; freeze-thaw cycle; anisotropy; mechanical characteristics; failure modes

(责任编辑: 周成林; 编辑: 武俊杰)