

文章编号: 1673-9469 (2017) 04-0042-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.010

## 冻融循环作用下砂岩力学特性与电镜扫描试验研究

方若进<sup>1,2</sup>, 朱珍德<sup>1,2</sup>, 色麦尔江·麦麦提玉苏普<sup>1,2</sup>, 曹松华<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 通过对取自新疆阿勒泰某隧道的砂岩开展冻融循环试验, 在  $-25^{\circ}\text{C}$  下冻结 9 h,  $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  下融解 5 h, 为一个冻融循环过程, 对岩样分别进行 0、5、10、20、30、40、50、60、80 次冻融循环。然后, 进行单轴压缩试验和电镜扫描试验, 得到经历不同次数冻融循环后的饱和砂岩破坏特征、应力-应变曲线、弹性模量、泊松比, 并分析该砂岩物理力学特性和破坏断口微裂纹演化与冻融条循环次数之间的关系。结果表明: 随着循环次数的增加, 该砂岩岩样弹性模量呈不同程度降低趋势, 峰值应变呈逐渐增大趋势, 而泊松比呈先增加后减小趋势, 微裂纹长度、宽度及面积不同程度呈增大趋势, 使砂岩损伤劣化不断加剧。

**关键词:** 砂岩; 冻融循环; 电镜扫描试验; 力学特性; 微裂隙

**中图分类号:** TU45

**文献标志码:** A

## Experimental study on mechanical properties and scanning electron microscopy of sandstone under freeze - thaw cycles

FANG Ruojin<sup>1,2</sup>, ZHU Zhende<sup>1,2</sup>, SEMERJAN Memetyusup<sup>1,2</sup>, CAO Songhua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, 210098, China)

**Abstract:** Freeze-thaw cycle test is carried out using sandstone taken from a tunnel in Altay. The sandstone specimen are frozen for 9 hours at minus 25 degrees, and melted for 5 hours at  $(20 \pm 2)$  degrees, which is the process of a freeze-thaw cycle. We take separately this kind of cycle for 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 times for the rock samples. Then by taking the uniaxial compression test and the scanning electron microscopy, we obtain saturated sandstone's failure character, stress-strain curve, elastic module, poisson ratio under different times of freeze-thaw cycle, and analyze the physical and mechanical properties, the relationship between the fracture micro crack evolution and the times of freeze-thaw cycle. It turns out that with the increasing time of the cycle, the elastic module of the sandstone samples decrease on different extends, the peak strain becomes increasingly large, while the Poisson ratio increases firstly and then decreases, the area, length and width of micro crack increase on different extends, and the damage and failure of sandstone is continuously accelerating.

**Key words:** sandstone; freeze-thaw cycle; uniaxial compression test; electron microscopy scanning test; mechanical properties; microfracture

我国的西北地区属于季节性冻土区, 地层中的岩石易受到冻融作用的影响。由于裂隙中含水的原因, 在热胀冷缩的作用下, 裂隙中水在冻结后, 体积增大, 产生冻胀力, 正是冻胀力作用在岩石内部,

岩石的裂隙得以不断扩展。随着冻融损伤的持续影响, 局部损伤中的裂隙贯通, 渐而形成连通的破坏性裂隙, 岩石发生破坏。在冻融方面, 目前 You-Liang Chen<sup>[1]</sup> 对花岗岩进行不同融化温度的冻融循

收稿日期: 2017-07-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51579081, 51379065); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51409122); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20161508)

作者简介: 方若进 (1992-), 男, 安徽枞阳人, 硕士, 主要从事岩石力学与地下工程方面的研究工作。

环试验,得到了不同的融化温度下花岗岩峰值应变、弹性模量及单轴抗压强度随着冻融次数的增加而减小的结论。张慧梅等<sup>[2-4]</sup>研究了冻融后岩石的损伤特性,并推导出了冻融损伤模型。朱珍德等<sup>[5-7]</sup>通过对损伤岩石进行电镜扫描试验,得到了损伤后岩样的裂隙发展情况。在以上的研究成果基础上,把寒区气候条件与工程实际紧密结合,针对新疆阿勒泰某隧道围岩的典型砂岩岩样开展冻融循环试验研究,对经历不同冻融循环次数后饱和砂岩进行岩样的室内单轴压缩试验和扫描电镜试验,得出其基本力学参数及岩石断口微裂纹信息,进一步对该砂岩主要物理力学特性及微裂纹演化随冻融循环的变化情况进行了分析。本文研究成果对该地区岩体工程在冻融循环条件下的稳定性分析及工程设计具有一定的参考价值。

## 1 单轴压缩试验

### 1.1 试验及试验方案

本试验选取新疆阿勒泰某隧道砂岩制取标准岩样。岩样呈灰白色,矿物成份主要由石英和长石组成,局部含有夹丝炭条带及泥质包体。岩样根据规范要求,统一制成为径为 50 mm,高为 100 mm 的标准圆柱形岩样。消除岩样宏观上明显的差异性,所有岩样制取完毕后,对岩样外观进行观察,筛选出外形完整,表面无明显节理及裂纹的 27 块岩样。

岩石单轴压缩试验使用 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机,其轴向最大荷载为 1 000 kN。

清理所有岩样表面后,根据岩性和循环次数,把 27 块岩样分成 9 组,每组 3 块岩样,并进行编号。冻融循环试验前将 27 块岩样置于温度为 105℃~110℃ 的烘干箱中进行烘干。要求烘干时间 48 h

以上,且达到恒重(两次的质量变化不超过 0.1%)。之后使所有岩样冷却至室温,然后统一饱和处理。将饱和后岩样在 -25℃ 下冻结 9 h, (20±2)℃ 下融解 5 h,为一个冻融循环过程,对 9 组岩样分别进行 0、5、10、20、30、40、50、60、80 次冻融循环。所有岩样在室温(20℃)条件下开展单轴压缩试验,采用轴向位移速率 0.001 mm/s 控制。试验结束后,记录好单轴抗压强度、峰值应变、弹性模量和泊松比。

### 1.2 岩样单轴荷载作用下破坏特征

单轴压缩曲线破坏后阶段岩石内部应力超过其单轴抗压强度,内部急速破坏。由于内部发育程度及存在的原生缺陷的不同,随着冻融次数增加,单轴压缩试验破坏形态宏观表现为四种破坏类型。分别是纵向劈裂破坏,斜剪破坏,楔形劈裂破坏,挤压脆性破坏。其中纵向劈裂破坏以张拉为主,破坏时除了产生平行于轴向方向的一条主裂纹以外,还存在少量竖向裂纹,如图 1(a);斜剪破坏时产生一条主滑动面贯穿整个岩样,由该滑动面上的剪切应力大于其极限值所致,如图 1(b);楔形劈裂破坏时出现楔形状裂纹,整个岩样瞬间被劈开发生脆性破坏,如图 1(c);发生挤压脆性破坏的岩样,在加载过程中出现应力突然下降,然后继续上升现象,破坏时平行于轴向的裂纹终止于岩样中部泥质包体即软弱夹层带,且岩样侧面被挤压粉粹,是以张拉为主的挤压破坏形式,如图 1(d)。

随着冻融循环次数的增加,前 30 次冻融循环过程中,试样的单轴压缩破坏形态表现出纵向劈裂破坏和斜剪破坏形式。第 30 次冻融循环以后,试样表面泥质包体及夹丝炭条带的软化影响单轴压缩破坏形态,表现出楔形劈裂破坏和挤压脆性破坏形式。

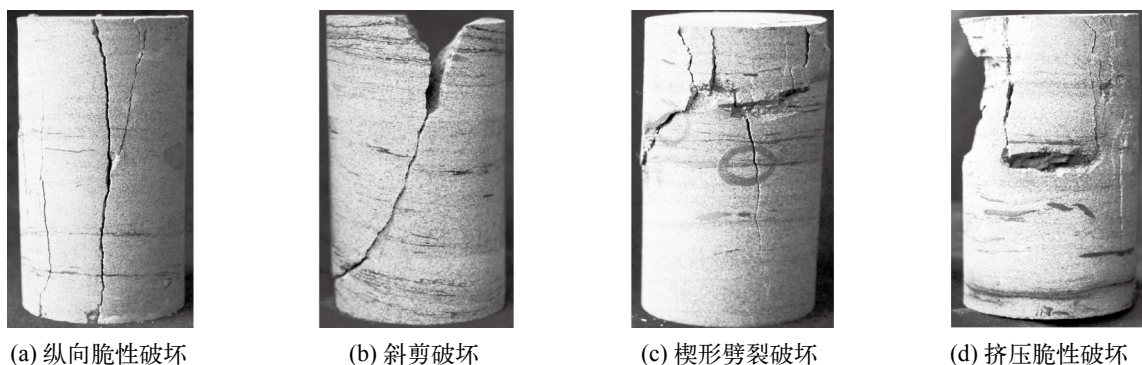


图 1 砂岩岩样单轴压缩试验破坏形态

Fig.1 Uniaxial compression test failure morphology of sandstone rock specimen

### 1.3 不同冻融次数下应力-应变曲线特性

不同冻融循环后的饱和砂岩典型应力-应变全曲线如图2所示。岩样从加载到完全变形破坏大致经历了裂隙孔隙压密、弹性变形、累积破坏及破裂后区等4个阶段。随着冻融循环次数的增加,峰值应力明显下降,曲线斜率逐渐减小,峰值应变除了第50次减小以外整体上增大。前10次冻融过程中岩石的峰值应力降幅较大,但从第10次冻融循环开始峰值应力降幅较小。该现象表明:前期冻融循环使该砂岩产生明显的损伤,后期冻融作用对岩样的损伤程度逐渐减弱,这与砂岩颗粒比较细,结构比较致密,冻融作用对岩石内部结构影响相对较小有关。随着冻融次数的增加,岩样整体上表现出脆性破坏特点,岩样破坏后区曲线由较陡直逐渐变缓,岩样应变逐渐变大,岩样最终破坏形式由以张拉为主

### 1.4 不同冻融次数下弹性模量的分析

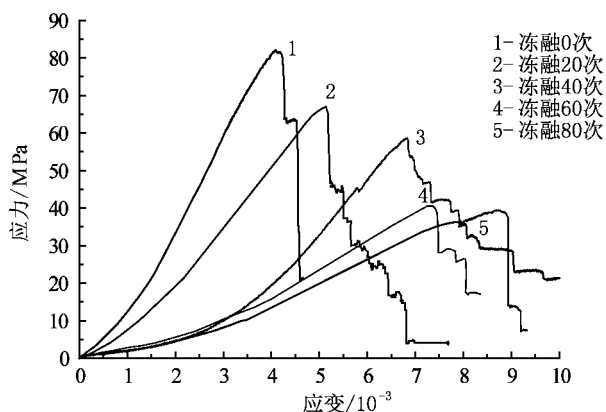


图2 冻融循环后的砂岩应力-应变曲线

Fig.2 Stress - strain curve of sandstone after circulation

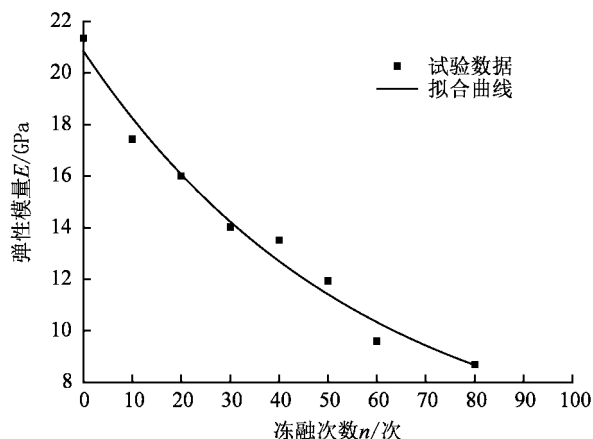


图3 弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig.3 Relationship between elastic modulus and freeze - thaw cycle

随着冻融次数增加,砂岩弹性模量的变化趋势如图3所示。由图3可知,随着冻融循环次数的增大,岩石的弹性模量逐渐降低;前10次冻融循环过程中弹性模量降幅大,降低了18.36%,后期弹性模量降速变慢,呈指数下降趋势。经历80次冻融循环时弹性模量损失了59.34%,表明冻融作用不仅对砂岩强度损伤大,对砂岩弹性模量的损伤也很大。由下式可知,弹性模量与冻融次数呈指数分布,验证了冻融后的岩样的变化速率变化规律。这是由于前期岩样受冻融损伤较大,后期的岩样裂隙在此冻融条件下已发展全,再继续冻融会对岩样的弹性模量影响较小。弹性模量与冻融循环次数的拟合关系如式(1),其相关系数  $R=0.972$ 。

$$E(n) = 16.129 \exp(-n/56.866) + 7.719$$

式中:  $E(n)$  为砂岩受  $n$  次冻融循环后的弹性模量。

### 1.5 不同冻融次数下泊松比的分析

由图4可知,泊松比随着冻融次数的增加整体上呈先增后减趋势。经历20次冻融循环后泊松比增大了47.62%,经历50次冻融循环后泊松比减小了61.91%,其为最小值。冻融次数的进一步增大出现泊松比值小范围上下波动。前期冻融作用对夹丝炭条带的损伤不是很明显,冻融损伤作用比较均匀,从而泊松比表现出增大趋势;随着冻融次数增大,水份向夹丝炭条带部位渗透,裂隙水冰相变体积膨胀产生冻胀,冻胀力作用导致环向夹丝炭条带孔隙变大,形成空洞,变松剥蚀,横向形成软弱带,软弱带在后期冻融循环过程中损伤大于岩样其他部位,进行单轴压缩试验时该软弱带的轴向应变增量远超过横向应变,泊松比出现减小趋势。

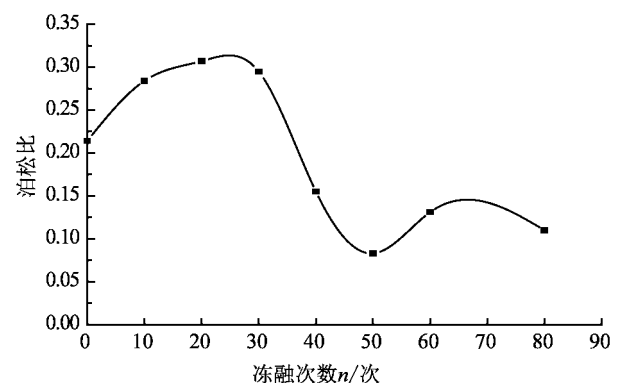


图4 泊松比与冻融循环次数的关系(试验数据)

Fig.4 The relationship between Poisson's ratio and the number of freeze - thaw cycles

## 2 电镜扫描试验

### 2.1 试验方案

选取砂岩破坏断口三个不同典型部位制取切片进行电镜扫描。试样采用 Quante-250 型扫描电子显微镜的高真空模式进行试验,需要在试验前对试件进行清洗、干燥和镀金。结合砂岩细观结构特征,SEM 图像放大率采用 1 000、2 000 倍为主,采用区域分割算法提取不同放大倍数的 SEM 图像中存在的微裂纹信息,步骤如下:输入图像标尺信息;基于空间域增强方法图像增强;基于区域生长法图像分割;微裂隙信息获取(长、宽、面积)。下面从图像中选出具有代表性,不同冻融次数的图像,见图 5。

### 2.2 砂岩断口微裂纹演化分析

由图 5 可知,冻融 0、10、20、30 次岩样的断口主要是平面滑移,试样主要是劈裂和斜剪破坏。冻融 40、50、60、80 次岩样的断口主要是贝纹状滑移面,主要破坏形式是楔形劈裂和挤压脆性破坏。根据不同岩样断口观察分析可知,随着冻融次数的增加,岩样的断裂方式由穿晶断裂为主发展为穿晶和沿晶擦断为主。岩样的细观花样也由根状台阶状发展为蜂窝状,说明了破坏形式的发生了变化。

这是由于不断的冻融循环,使得岩样中的裂隙不断张开和闭合,这就引起了裂隙两边不断摩擦,导致岩样变脆。由于冻融循环时间较长,岩样矿物颗粒有足够时间调整到合适位置,所以碎屑的楔

入很连贯,裂隙发展越来越长,这与图 5 相吻合。

### 2.3 砂岩断口微裂纹演化规律

通过 SEM 试验扫描冻融 0、10、20、30、40、50、60、80 次的单轴压缩破坏断口,并选取具有代表性的 SEM 图片,其断口形貌特征如图 5 所示。随着冻融循环次数的增大,微裂纹的长、宽、面积发生显著的变化。

通过基于区域分割算法提取单轴压缩破坏断口岩石微裂纹的信息,并利用统计学原理对得到的砂岩微裂隙长度、宽度、面积等信息进行统计和分析,得到平均参数随着冻融次数的变化关系如图 6—图 9 所示。冻融初期出现微裂纹长度、宽度、面积小幅突增,随着冻融循环次数的进一步增大,整体上呈增加趋势。由图 9 可知,微裂隙面积比随着冻融次数的增大,而呈指数增加趋势,表明随着冻融次数增加,微裂隙面积占岩样切片面积的比例增大,使岩石的损伤逐渐加剧。冻融循环初始阶段,产生大量的长度较小的微裂纹,微裂纹的数目增加,随着冻融次数进一步增加,水冰相的膨胀力作用在裂隙壁导致微裂纹沿长度和宽度两个方向增大,冻融后期冻融循环对岩石裂隙的作用进一步加剧,导致了微裂纹长度的迅速增加,微裂纹的平均宽度缓慢增加,裂纹面积逐渐增大。这里除了有冻融循环的作用,在试验过程中还有竖向荷载的作用,竖向荷载加剧部分裂隙的张开和部分裂隙的闭合,产生荷载和冻融作用的耦合效应,导致微裂纹长度、宽度及面积与冻融作用,外荷载作用及

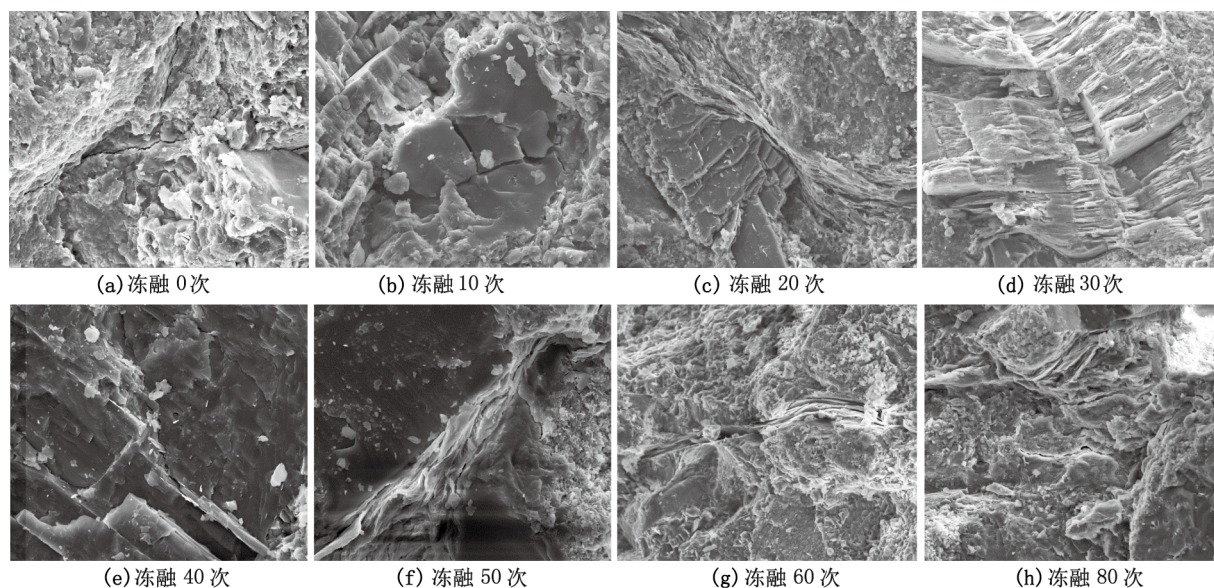


图 5 不同冻融循环次数对应的岩样断口形貌特征

Fig.5 Morphological characteristics of rock fractures corresponding to the number of freeze - thaw cycles

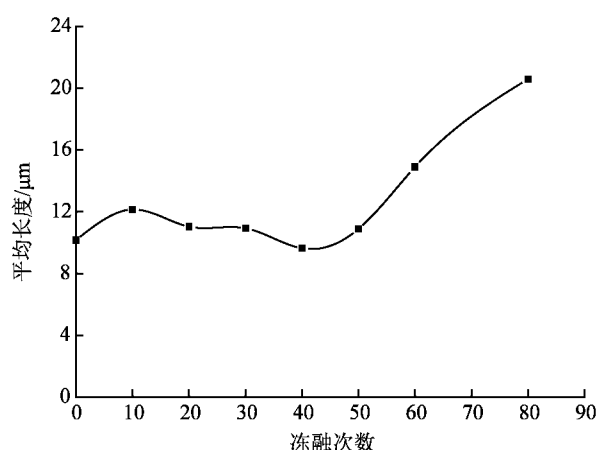


图6 微裂纹平均长度与冻融次数关系(试验曲线)  
Fig.6 The relationship between the average length of microcracks and the number of freeze - thaw cycles

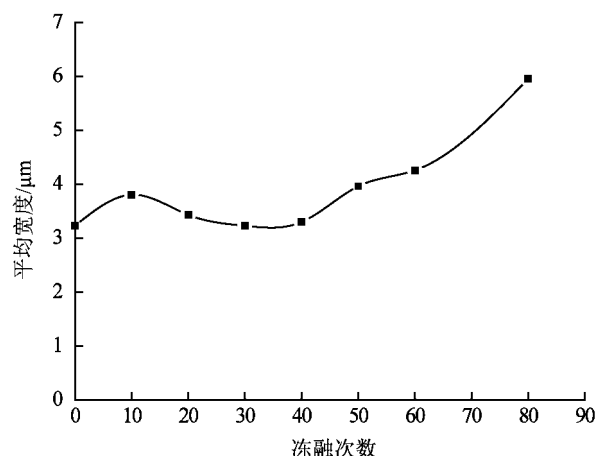


图7 微裂纹平均宽度与冻融次数关系(试验曲线)  
Fig.7 The relationship between the average width of microcrack and the number of freeze - thaw cycles

冻融荷载耦合之间的复杂关系。

### 3 结论

1) 岩随着冻融次数增加,单轴压缩试验破坏形态宏观表现为四种破坏类型。分别是纵向劈裂破坏,斜剪破坏,楔形劈裂破坏,挤压脆性破坏。

2) 砂岩在不同冻融次数下的应力-应变曲线不重合,随着冻融次数的增加,砂岩的峰值应力也逐渐减小。砂岩的弹性模量随着冻融次数增加呈降低趋势,而泊松比随冻融次数开始增加,随后减少,呈M状。

3) 砂岩的电镜扫描可知,裂隙的长度、宽度、面积、面积比都随着冻融次数的增加而逐渐增加。

#### 参考文献:

[1]CHEN Y, NI J, JIANG L, et al.Experimental study on mechanical properties of granite after freeze-thaw

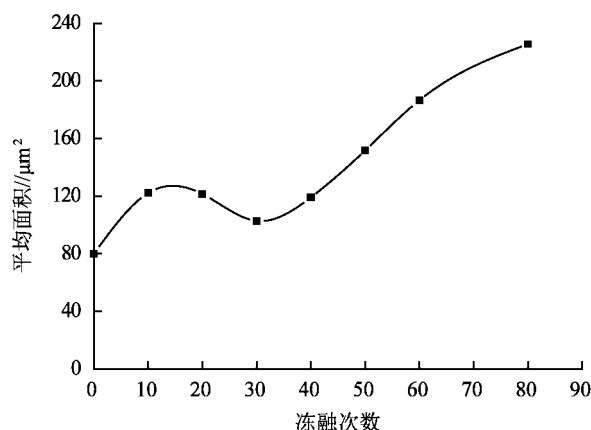


图8 微裂纹平均面积与冻融次数关系(试验曲线)  
Fig.8 Relationship between average area of microcracks and freeze - thaw times

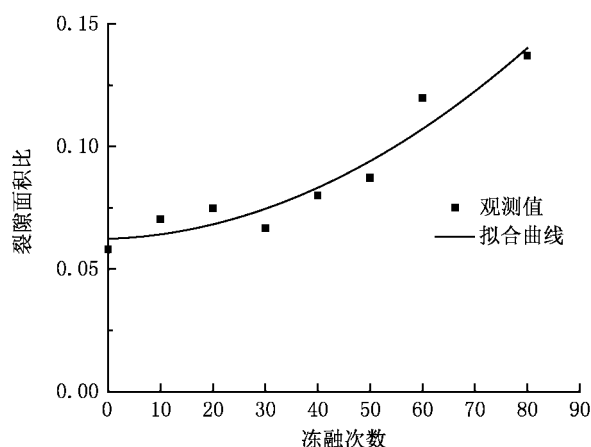


图9 微裂纹面积比与冻融次数关系  
Fig.9 Relationship between micro - crack s area ratio and freeze - thaw time

cycling[J].Environmental Earth Sciences, 2014, 71(8): 3349-3354.

- [2] 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(3): 471-476.
- [3] 张慧梅, 谢祥妙, 彭川, 等. 三向应力状态下冻融岩石损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2017(8): 1-9.
- [4] 张慧梅, 杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. 中国矿业大学学报, 2011(1): 140-151.
- [5] 倪晓慧, 李晓娟, 朱珍德. 不同频率循环荷载作用下花岗岩微观疲劳损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(1): 164-169.
- [6] 色麦尔江·麦麦提玉苏普, 朱珍德, 倪晓慧, 等. 缺氧条件下砂岩变形破坏特性试验研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(3): 14-18.
- [7] 朱珍德, 孙林柱, 王明洋. 不同频率循环荷载作用下岩石阻尼比试验与变形破坏机制细观分析[J]. 岩土力学, 2010(Z1): 8-12.