

DOI: 10.11779/CJGE2015S2018

# 物质组构特征对片岩冻融损伤劣化的影响

王章琼<sup>1</sup>, 晏鄂川<sup>2</sup>

(1. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430073; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 目前对于岩石冻融损伤影响因素的研究主要集中在外因, 而忽视了岩石物质组成、细观结构等内因。以鄂西北十房高速通省隧道武当群片岩为例, 通过室内冻融循环、单轴压缩、矿物成分分析、切片偏光显微镜测试等试验, 对比分析了物质组构特征(矿物成分及矿物颗粒排列情况)对片岩冻融损伤劣化特性的影响。结果表明, 物质组构特征的影响主要体现在两个方面: ①片理间充填矿物颗粒大小及其分布情况; ②云母定向排列程度。前者对冻融损伤的影响体现在: 当矿物颗粒粒径较大或分布较零散时, 对片理的变形具有较强的阻挡和约束作用; 反之, 对片理变形的阻挡和约束作用较弱。后者对冻融损伤的影响体现在: 云母定向排列程度越高, 冻融循环引起的损伤劣化效果越明显, 反之越不明显。研究结果对于从内因角度分析岩石冻融损伤劣化影响因素具有一定借鉴意义。

**关键词:** 物质组构; 细观结构; 冻融循环; 片岩; 损伤机理

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0086-05

作者简介: 王章琼(1984-), 男, 讲师, 主要从事岩土及地下工程等方面的教学和科研。E-mail: wzqcug@163.com。

## Influence of material composition and structural characteristics of rock on freeze-thaw damage and deterioration of schist

WANG Zhang-qiong<sup>1</sup>, YAN E-chuan<sup>2</sup>

(1. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Currently, the researches on influence factors of freeze-thaw damage of rock mainly focus on external cause, while ignoring the internal causes, such as material composition, microstructure, etc. Taking Wudang Group schist in Tongsheng tunnel, Shiyan-Fanging expressway, northwest of Hubei Province as an example, the influences of material composition and structural characteristics (mineralogy and arrangement of mineral particles) on freeze-thaw damage degradation characteristics of schist are compared and analyzed, through indoor tests such as freeze-thaw cycles, uniaxial compression, mineral composition analysis, sliced polarizing microscope tests. The results show that the influences of material composition and structural characteristics are mainly the following two aspects: (1) Particle size and distribution of mineral filled in foliation; (2) Situation of mica orientation. For the former aspect when the particle size of mineral is greater or its distribution is scattered, the particle mineral has strong blocking and binding effect on the deformation of foliation. On the contrary, the blocking and binding effect is weak. For the latter aspect, when the degree of orientation of mica arranged is high, the effect of damage caused by freeze-thaw cycles is more obvious. On the contrary, the effect is not obvious. The results have certain reference significance to the researches on influence factors of rock damage caused by freeze-thaw cycles from internal angle.

**Key words:** material composition and structure; microstructure; freeze-thaw cycle; schist; damage mechanism

## 0 引言

随着国家西部大开发及振兴东北老工业基地等战略计划的实施和开展, 目前在建和规划中的许多铁路、公路、水利等重大工程均面临岩土体的冻融损伤问题<sup>[1]</sup>。研究岩石冻融损伤劣化影响因素, 对于深入了解岩石冻融损伤劣化机理及寒区岩土体防护具有重要的指导意义。

岩石冻融损伤劣化的影响因素有很多<sup>[2]</sup>, 目前尚

未形成统一的认识<sup>[3]</sup>。如 Nicholson 等<sup>[4]</sup>研究了岩性对岩石冻融损伤劣化程度的影响; 徐光苗等<sup>[5]</sup>研究发现影响岩石冻融强度的最主要因素为岩性、冻融最低温度、冻融循环次数及含水状态等; 赵卫东等<sup>[6]</sup>、吴刚等<sup>[7]</sup>指出, 水分是引起岩石冻融损伤劣化的主要原因。

基金项目: 交通运输行业联合科技攻关项目(2010-353-342-260); 武汉工程大学科学基金项目(K201473)

收稿日期: 2015-03-26

可见, 岩石冻融损伤影响因素可以归纳为内因和外因两个方面, 内因主要包括岩石的地质特性, 外因主要包括岩石所处的温度场、应力场以及岩石含水状态、所含水分的化学成分等。

岩石是由多种矿物或类似矿物的物质胶结而成的固态集合体<sup>[8]</sup>, 矿物成分是构成岩石的物质基础, 矿物颗粒的排列是构成岩石细观构造的结构基础。诸多研究表明, 物质组构特征对岩石力学特性及其演化规律具有显著影响。如张晶瑶等<sup>[9]</sup>通过高温条件下磁铁石英岩和赤铁石英岩微结构变化规律发现, 矿石中矿物成分不同所引起的结构热应力, 是造成两种矿石微结构损伤的主要原因; 黄润秋等<sup>[10]</sup>从工程地质角度探讨了岩石的颗粒排列及颗粒的连接对岩爆烈度的影响; 马中高等<sup>[11]</sup>研究了成岩作用(胶结物)、岩石结构(分选性和黏土含量)对砂岩弹性速度的影响; 闫建平等<sup>[12]</sup>通过观察岩心、岩石薄片及成像测井图像的特征, 分析了岩石结构对沉积岩电阻率响应的影响; 闫长斌等<sup>[13]</sup>分析了南水北调西线工程中岩石石英含量与 TBM 施工掘进速度和施工速度之间的关系, 结果表明, 岩石中石英含量越高, 则岩石硬度和耐磨性越高。

过去对于冻融损伤劣化影响因素的研究, 主要侧重于岩性、岩石微裂隙及外部环境, 而忽视了岩石物质组构特征的影响。鉴于此, 本文以十(堰)房(县)高速通省隧道武当群片岩为研究对象, 从细观角度探讨物质组构对岩石冻融损伤特性的影响。

## 1 试验方案及试验仪器

### 1.1 试样制备

试验采用的岩石试样取自十房高速公路通省隧道十标右洞, 取样地点围岩片理面产状为:  $50^\circ \sim 60^\circ$   $\angle 45^\circ \sim 55^\circ$ , 倾角平均值约  $53^\circ$ , 加工试样时使试样片理面倾角与取样点保持一致, 即  $53^\circ$  (图 1)。

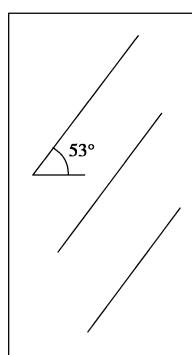


图 1 试样片理面倾角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foliation plane inclination of schist samples

### 1.2 X 射线衍射试验

试验中采用的试样由 5 个片岩岩块加工而成, 经肉眼观察, 发现这些岩块的矿物成分存在一定差异, 为了解 5 个岩块的矿物成分, 并分析矿物成分的差别对片岩冻融损伤劣化作用的影响, 将上述 5 个岩块分别编号为 1, 2, 3, 4, 5, 并取样进行 X 射线衍射试验。试验在中国地质大学(武汉)纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心完成。

### 1.3 冻融循环试验

#### (1) 冷冻

试验采用的制冷设备为长江科学院岩基所改进的制冷系统, 系统工作时内部温度保持在  $-20^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ 。冷冻前将试样进行抽气饱和, 冷冻时间为 4 h。

#### (2) 解冻

将冷冻的试样置于盛水容器内, 水温为常温, 要求试样全部淹没于水面以下。解冻时间视气温而定, 当容器内水温接近室温下水温时认为试样完全解冻, 一般情况下, 解冻时间不少于 4 h。按照上述方法, 将试样分为 3 组, 其中 1 组试样不进行冻融循环试验, 其余 2 组试样分别进行 8 次、16 次冻融循环试验。

### 1.4 单轴压缩试验

单轴试验在长江科学院岩基所 RMT 电液伺服岩石试验系统上完成, 均采用饱和试样。试验时加载方式采用位移控制, 加载速率为  $0.02 \text{ mm/s}$ , 为尽量减小加载速率对试验结果的影响, 试验时严格控制加载速率。

### 1.5 偏光显微镜试验

为分析片理矿物颗粒排列情况, 对初始状态(未经压缩试验)、初始状态+压缩试验后、冻融循环+压缩试验后的试样取切片, 切片方向与试样轴向平行, 与片理面正交(图 2)。偏光显微镜试验在中国地质大学(武汉)资源学院开放试验室完成。

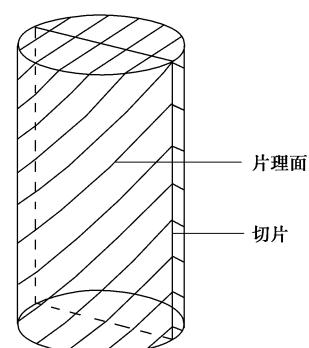


图 2 切片示意图

Fig. 2 Schematic diagram of section

## 2 试验结果分析

### 2.1 矿物成分

通过X射线衍射试验的能谱分析,得到各岩块矿物成分及其百分含量,见表1。

表1 片岩矿物成分及含量

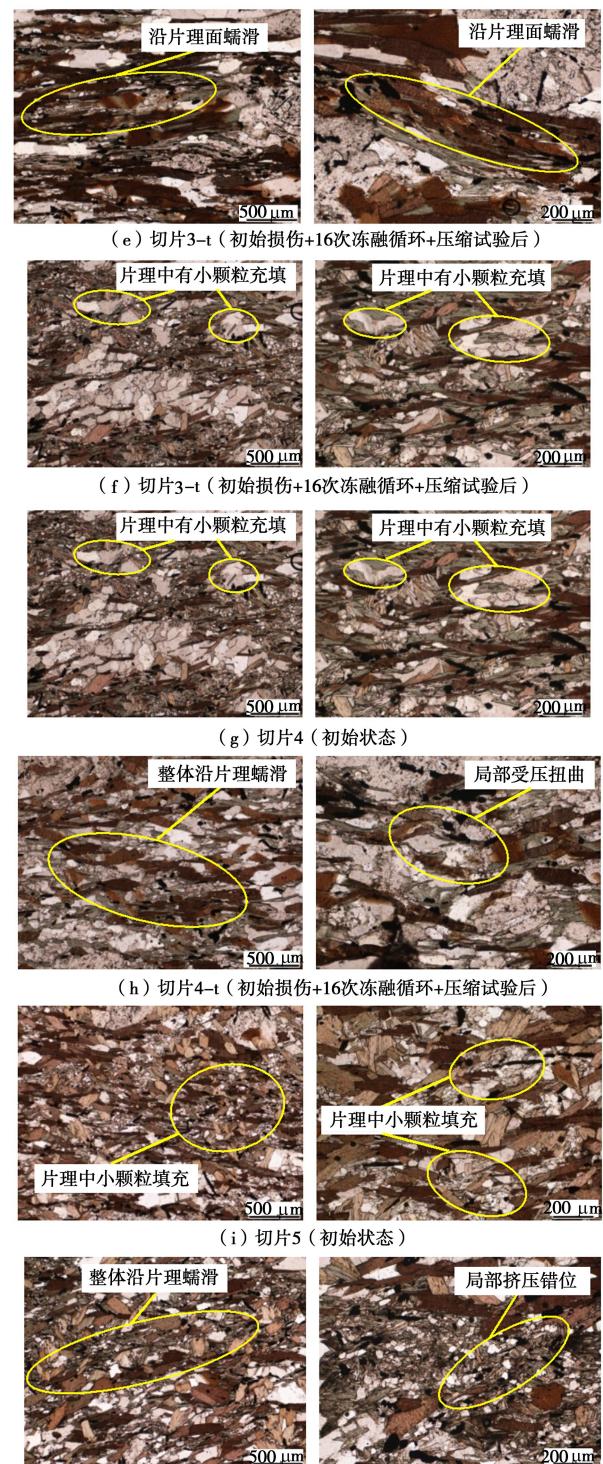
Table 1 Mineral composition and content of schist (%)

样品编号	云母	绿泥石	石英	钠长石	方解石
1	42.24	41.70	7.76	5.40	2.90
2	43.92	41.18	2.43	9.77	2.70
3	26.53	53.47	2.21	11.33	6.46
4	41.88	47.17	1.74	6.87	2.33
5	66.70	13.11	2.83	14.32	3.04

由表1可知,该片岩主要造岩矿物为云母和绿泥石,云母含量约27%~67%,绿泥石含量约13%~55%,其他成分有石英、长石和方解石,不同岩块之间矿物成分的百分含量有一定差别。

### 2.2 偏光显微镜试验结果

对初始状态(未经压缩试验)、初始状态+压缩试验后、冻融循环+压缩试验后的片岩试样进行切片偏光显微镜分析(图3)。



注:图中编号为1、2、3、4、5的切片均为初始状态,分别对应表1中编号为1、2、3、4、5的岩块;编号为1-1、2-1、3-1、4-1、5-21的切片均取自试验后的试样,分别对应表1中编号为1、2、3、4、5的岩块。

图3 不同损伤阶段片岩细观结构特征

Fig. 3 Microstructural characteristics of schist at different damage stages

可以看出,片岩主要岩石矿物为云母、绿泥石,粒状鳞片变晶结构,云母呈细小鳞片状定向排列构成片理,绿泥石充填于裂隙中。石英、钠长石和方解石呈粒状,石英粒径范围约为0.05~0.15 mm,长石粒径范围约为0.1~0.5 mm,方解石粒径范围约0.1~0.3

mm, 石英与钠长石、方解石成共生关系。

整体而言, 所有切片的细观结构、构造大体相同, 但对比不同损伤状态、不同细观物质组构的切片后发现, 片理间充填矿物颗粒大小及云母的定向排列程度对片岩冻融损伤特性均有影响, 主要体现在以下两个方面:

(1) 片理间充填矿物颗粒大小及其分布情况对冻融损伤的影响

由云母定向排列形成的片理面构成软弱结构面, 当轴向荷载与片理面小角度相交时, 片岩易沿片理面发生剪切破坏, 因而云母定向排列程度直接影响片岩冻融损伤后的力学特性。

图 3 (a) 显示, 切片 1 的片理中充填有粒径约 0.2 mm 的石英、方解石, 将片理分隔成网状, 削弱了片理的连续性和整体性; 因此, 压缩试验后, 云母并未直接沿片理方向发生剪切滑移, 而是发生扭曲变形(图 3 (b))。图 3 (c) 显示, 切片 2 的片理中充填有较大的长石颗粒, 粒径约 0.5 mm; 因此, 压缩试验后, 片理发生挤压错位(图 3 (d))。上述情况表明: 矿物颗粒(石英、长石、方解石)的大小和分布情况影响片岩变形破坏形式。

图 3 (e) 显示, 切片 3 的片理整体上连续性较好, 仅有少量粒径较小的石英、云母等矿物颗粒充填, 但局部存在扭曲现象, 可能系在成岩或变质过程中因构造挤压而成。因此, 经过 16 次冻融循环, 压缩试验后切片 3-t 沿片理方向发生了蠕滑变形(图 3 (f))。图 3 (g)、3 (i) 显示, 切片 4、5 的片理中有少量小颗粒石英、方解石、长石充填。因此, 切片 4-t、5-21 经过 16 次冻融循环, 压缩试验后云母整体发生蠕滑变形, 而局部发生扭曲、错位(图 3 (h)、3 (j))。上述差异表明: 石英、长石、方解石等矿物颗粒对片理裂隙的充填情况影响片理变形破坏形式: 充填矿物较少且粒径较小时, 云母发生沿片理方向的蠕滑变形; 充填矿物较多且粒径较大时, 云母整体发生沿片理方向的蠕滑变形, 局部则出现扭曲变形或挤压错位。

(2) 云母定向排列程度对冻融损伤的影响

图 3 (g)、3 (i) 显示, 切片 4、5 中云母定向排列程度较高; 因此, 冻融及压缩试验后, 片岩整体沿片理面发生蠕滑变形, 局部因挤压形成扭曲、错位(图 3 (h)、3 (j))。图 3 (e) 显示, 切片 3 中云母整体上具有定向排列特征, 但局部出现明显扭曲; 因此, 切片 3-t 在冻融及压缩试验后, 云母沿片理方向发生蠕滑变形(图 3 (f))。

导致上述差异的原因可能是: 云母定向排列程度较高且其他矿物颗粒填充较少时, 冻融循环作用下云母内部裂隙易于扩展、贯通, 导致片理力学性质大幅

降低, 压缩试验时云母发生沿片理方向的蠕滑变形; 而当片理被硬度相对较高的石英、长石等矿物颗粒充填时, 片理连续性较差, 导致在冻融循环作用下微裂隙难以沿片理方向贯通, 试样轴向压缩时云母发生沿片理方向的整体蠕滑变形, 但局部受其他矿物颗粒的“阻挡”作用而发生扭曲或错位。

### 3 物质组构特征对片岩冻融损伤影响分析

对比不同损伤状态、不同细观物质组构的切片后发现, 片理中充填岩石矿物的颗粒大小及云母的定向排列情况影响片岩冻融损伤特性。片理中充填有石英、长石、方解石等矿物颗粒, 这些矿物颗粒粒径越大、数量越多, 则对压缩试验时云母沿片理方向的蠕滑变形约束作用越明显。

当云母排列密集、连续性好且几乎无其他矿物颗粒填充时, 冻融循环过程中片理内部裂隙易于扩展、贯通, 导致片理力学性质大幅降低, 因而轴向荷载作用下云母易发生沿片理方向的蠕滑变形; 当片理中空隙较多, 且被硬度相对较高的石英、长石等矿物颗粒充填时, 片理连续性较差, 在冻融循环作用下微裂隙难以沿片理方向贯通, 因而轴向荷载作用下云母整体发生沿片理方向的蠕滑变形, 但局部受其他矿物颗粒的“阻挡”作用而发生扭曲或错位。

片岩物质组构特征对其力学特性的冻融损伤劣化具有上述影响的主要原因在于, 片理面的存在导致片岩力学特性具有典型的横观各向同性特性。轴向压缩条件下, 当荷载与片理面斜交时, 片理面力学特性对片岩的力学特性起控制性作用。而冻融循环主要导致片理的损伤劣化, 因而片理物质组构特征对片岩冻融损伤劣化特性影响显著。

### 4 结 论

通过 X 射线衍射、冻融循环、偏光显微镜及单轴压缩等试验, 从细观角度探讨了物质组构特征对武当群片岩冻融损伤特性的影响, 主要取得以下结论:

(1) 对初始状态下片岩矿物成分分析及切片的偏光显微镜分析, 发现不同岩块的矿物成分及矿物颗粒排列情况存在明显差异。

(2) 片理间充填矿物颗粒大小及云母的定向排列情况影响片岩冻融损伤特性, 主要体现在两个方面: 片理间充填矿物颗粒大小及其分布情况、云母定向排列程度。

(3) 片理间充填矿物颗粒大小及其分布情况对冻融损伤的影响体现在: 当矿物颗粒粒径较大或分布较

零散时, 对片理的变形具有较强的阻挡和约束作用; 反之, 对片理变形的阻挡和约束作用较弱。冻融循环对片理的损伤劣化作用更为明显。

(4) 云母定向排列程度对冻融损伤的影响体现在: 定向排列程度越高, 冻融循环引起的损伤劣化效果越明显, 反之越不明显。

### 参考文献:

- [1] 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 ration evaluation and classification of frost-heave susceptibility of tunnel surrounding rocks in cold regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1876 - 1885. (in Chinese))
- [2] HORI M. Micromechanical analysis of deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials[J]. International Journal of Engineering Science, 1998, 36(4): 511 - 522.
- [3] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1688 - 1694. (ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang, YANG Zhen-feng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1688 - 1694. (in Chinese))
- [4] NICHOLSON D T, NICHOLSON F H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(12): 1295 - 1307.
- [5] 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. (XU Guang-miao, LIU Quan-sheng. 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. (in Chinese))
- [6] 赵卫东, 杜文斌. 冻结融解条件下抛石材料劣化机制研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 663 - 666. (ZHAO Wei-dong, DU Wen-bin. Study on deteriorating mechanism of riprap material under freezing and thawing condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 663 - 666. (in Chinese))
- [7] 吴刚, 何国梁, 张磊, 等. 大理岩循环冻融试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 2930 - 2938. (WU Gang, HE Guo-liang, ZHANG Lei, et al. Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2930 - 2938. (in Chinese))
- [8] 路凤香, 桑隆康. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2002. (LU Feng-xiang, SANG Long-kang. Petrology[M]. Beijing: Geological Press, 2002. (in Chinese))
- [9] 张晶瑶, 马万昌, 张凤鹏, 等. 高温条件下岩石结构特征的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1996, 17(1): 5 - 9. (ZHANG Jing-yao, MA Wan-chang, ZHANG Feng-peng, et al. Research on rock structure character under high temperature[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1996, 17(1): 5 - 9. (in Chinese))
- [10] 黄润秋, 王贤能. 岩石结构特征对岩爆的影响研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(2): 15 - 20. (HUANG Run-qiu, WANG Xian-neng. Influence of the structure character of rock on rockburst intensity[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(2): 15 - 20. (in Chinese))
- [11] 马中高. 成岩作用和岩石结构对砂岩弹性速度的影响[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 58 - 63. (MA Zhong-gao. Effects of diagenesis and rock texture on elastic velocity of sandstones[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 58 - 63. (in Chinese))
- [12] 闫建平, 蔡进功, 赵铭海, 等. 考虑岩石结构的砂砾岩有效储层测井判识方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 1365 - 1372. (YAN Jian-ping, CAI Jin-gong, ZHAO Ming-hai, et al. Identification method of effective reservoir for glutinite body using well loggong based on rock texture[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(9): 1365 - 1372. (in Chinese))
- [13] 闫长斌, 闫思泉, 刘振红. 南水北调西线工程岩石中石英含量变化及其对TBM施工的影响[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 657 - 663. (YAN Chang-bin, YAN Si-quan, LIU Zhen-hong. Quartz content variety and its influence on TBM construction in west north water transfer project[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 657 - 663. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)