

# 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展

杨更社<sup>1</sup>, 申艳军<sup>1</sup>, 贾海梁<sup>1</sup>, 魏尧<sup>1</sup>, 张慧梅<sup>2</sup>, 刘慧<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 岩体因天然缺陷存在易受到冻融环境影响而产生损伤, 冻融损伤过程实质上为反复冻胀荷载作用于缺陷引起的疲劳演化过程。但从冻融损伤存在显著的尺度效应, 缺陷的不同空间尺度往往决定了冻融损伤评价尺度, 如初始损伤以空洞、孔隙、微裂纹等为主的多孔岩石, 其冻融损伤多表现为孔隙或微裂隙萌发、扩展、连通等, 反映的是微、细观尺度范畴; 而初始损伤以节理、裂隙等为主的岩体, 其冻融损伤多体现沿宏观缺陷的局部化冻融损伤, 属于宏观损伤尺度范畴。着眼于岩石冻融损伤尺度及对应损伤识别尺度两大关键问题, 首先, 依据岩石天然缺陷空间尺度进行量化分级, 明确不同层级下的损伤特征及对应损伤识别方法; 而后系统归纳微、细、宏观尺度下岩石冻融损伤识别及评价方法, 明确不同尺度条件下冻融损伤识别手段及损伤力学机制。最后, 结合现今岩石冻融损伤研究现状, 提出岩体冻融多尺度损伤识别及评价机制发展方向, 并初步探讨冻融诱发岩体损伤的微-细-宏观的跨尺度认知思路, 有望对冻融诱发岩体损伤特性及对应性识别系统认知提供参考。

**关键词:** 岩石力学; 冻融循环; 天然缺陷; 多尺度; 损伤力学特性; 识别手段; 评价机制

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2018)03-0545-19

## Research progress and tendency in characteristics of multi-scale damage mechanics of rock under freezing-thawing

YANG Gengshe<sup>1</sup>, SHEN Yanjun<sup>1</sup>, JIA Hailiang<sup>1</sup>, WEI Yao<sup>1</sup>, ZHANG Huimei<sup>2</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** Due to the natural defects existing in rock mass, freezing-thawing damage is easier to occur around these defects. In fact, the freezing-thawing damage can be regarded as the fatigue process along the local area of the natural defects under the repeated frost loading. However, the significant scale effect exists in the freeze-thaw damage. The spatial scale of these defects always control the evaluation scale of freezing-thawing damage. For example, for the porous rocks with the defects such as cavity, porosity and micro-crack, their freezing-thawing damages commonly present the germination, extension and cutting-through of these porosities and micro-cracks, which can be classified in the microscopic scale. While for the fractured rocks with fault, joint or fracture, their damages show the typical localization characteristics along the tips of macro defects, which should be considered in the macroscopic scale. The scales of freezing-thawing damage and its corresponding damage recognitions are the focus of this work. Firstly, the quantitative grading are carried out according to the spatial sizes of these natural defects, and the damage characteristics and the corresponding recognition for different scales are also

**收稿日期:** 2017-10-07; **修回日期:** 2017-11-29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51774231, 41772333, 41702334)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51774231, 41772333 and 41702334)

**作者简介:** 杨更社(1962-), 男, 博士, 1984年毕业于西安矿业学院矿井建设工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事寒区岩石冻融损伤理论分析及工程应用方面的教学与研究工作。E-mail: yanggs@xust.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1295

discussed. Then, the recognition and evaluation methods of freezing-thawing damage in the micro-scale, meso-scale and macro-scale are concluded comprehensively. Finally, combing with the present works of the evaluation of freeze-thaw damage of rock mass, we attempt to present the viewpoints regarding the future development of recognition methods and damage evaluation mechanism, and to discuss briefly the cross-scale evolution paths from micro, meso to macro scale in the freezing-thawing damage of rock mass.

**Key words:** rock mechanics; freeze-thaw cycles; natural defects; multi-scale; damage mechanics characteristics; recognition methods; evaluation mechanism

## 1 引言

岩体历经漫长成岩周期,并赋存于一定地质环境,其内部必然存在各种类型缺陷,而这些缺陷往往成为限制岩石功用性与安全性发挥核心因素,诸如岩体结构控制论<sup>[1]</sup>、节理岩体力学<sup>[2]</sup>等提出,均强调缺陷对岩体力学特性的控制影响。而诸上缺陷因空间认知尺度的不同,指代对象上应存在明显差异。从宏观角度认知,缺陷包括裂隙、节理等,其是造成岩石各向异性特征的核心因素;从细观角度认知,缺陷往往是肉眼不可见的空洞、孔隙、颗粒界面、微裂纹等,其本质上影响岩石的整体物理力学性能;而从微观角度认知,缺陷指向矿物颗粒组层面存在的天然缺陷,如矿物结构组合缺陷、矿物颗粒胶结缺陷等。而不同的尺度范畴下对应研究方法也应明显不同。

寒区冻融环境下,特别是冻融循环作用对含缺陷岩体影响,实质上是反复冻胀荷载作用于缺陷引起的疲劳损伤演化过程<sup>[3]</sup>。若将岩体内各尺度对应的缺陷均视为其初始损伤,则初始损伤对冻融环境损伤的产生及演化具有重要影响。从某种意义上讲,初始损伤空间尺度将决定冻融损伤空间尺度<sup>[4]</sup>。如:初始损伤以空洞、孔隙、微裂纹等细观损伤为主的多孔岩石,如砂岩、页岩等,其孔隙率较高、孔隙连通性好,其冻融损伤多表现为孔隙或微裂隙萌发、扩展、连通等,属于细观层面范畴;而初始损伤以节理、裂隙等为主岩体,如花岗岩、大理岩等,其孔隙率相对低、孔隙连通性差,虽整体抗冻性强,但主要体现沿缺陷产生宏观冻融局部化损伤。因此,开展冻融损伤力学特性多尺度研究,分析不同空间尺度下含缺陷岩石冻融损伤识别及机制评价,对于全面了解冻融对含缺陷岩石的疲劳损伤演化将具有重要指导价值。

目前,着眼于寒区岩体冻融损伤多尺度评价系统化研究相关报道不多,现主要针对某一空间尺度下开展理论分析、室内试验及现场测试等,具体包

括:(1)微观尺度下的岩体微结构冻融损伤评价,如:基于SEM图像的岩体微结构冻融损伤演化解译<sup>[5-6]</sup>。(2)细观尺度下的多孔岩石冻融损伤评价,如:基于水冰相变体胀的冻胀演化模型<sup>[7-8]</sup>;基于水热迁移的冻胀演化模型<sup>[9-10]</sup>;基于孔隙水相变热力学平衡分析损伤理论<sup>[11]</sup>;基于孔隙结构控制的冻融损伤模型<sup>[12]</sup>。(3)宏观尺度下的裂隙岩体冻融损伤评价,如:宏观唯象冻融损伤等效模型<sup>[13]</sup>、冻融局部化损伤模型<sup>[3]</sup>;此外,尚存在跨尺度的岩石冻融损伤评价研究少量报道,如:基于微、细观测试手段进行冻融岩石损伤评价,并将细观损伤变量引入唯象宏观力学损伤模型以实现宏-细观结合分析<sup>[14-15]</sup>。总体而言,开展冻融环境下岩石损伤力学特性的多尺度综合研究工作任重而道远。

因此,站在对系统认知冻融环境下岩体损伤机制角度,需重点关注不同空间尺度下岩体损伤评价及对应的损伤识别问题,探讨不同层级下的冻融损伤力学特征、精确识别方法及评价机制,明确各尺度空间下冻融损伤演化特征及发展规律,为冻融环境下岩体损伤诱发灾变机制提供多尺度研究思路。基于以上考虑,探讨建立冻融诱发岩体微-细-宏观的多尺度损伤识别及机制评价,将是未来全面认知岩体冻融损伤问题的重要发展方向。

## 2 岩体天然损伤的层次性

岩体损伤力学中的2个关键问题是损伤“尺度”问题及其对应损伤识别“尺度”问题。

### 2.1 损伤的“尺度”问题

岩体内部存在着各种尺度的缺陷,其稳定性对内部缺陷的存在比较敏感,很大程度上受控于内部节理、裂隙和断层等软弱面发育状况<sup>[16]</sup>。

岩体内的缺陷具有从微观、细观到宏观的各种尺度。岩体中的各类缺陷都可认识是其初始损伤(或称天然损伤)具体表现,并可归结为以下3个层次,如图1所示。

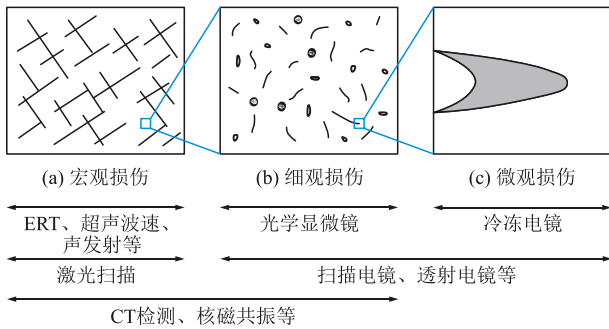


图 1 岩体尺度损伤示意及损伤识别手段适用范围

Fig.1 Sketch of damage scale of rock mass and application ranges of the corresponding damage recognition methods

### (1) 宏观损伤

实际工程中的岩体(空间尺度可界定为 $>10^{-3}$  m)往往存在大量的节理、裂隙(见图 1(a))。由于其随机发育程度高,将显著降低岩体力学性质,并呈现明显各向异性特征。目前节理岩体力学性质的研究主要包括 2 种方法:一是把节理岩体视作不连续介质,认为节理岩体由结构面和结构体组成,分别探讨岩石、节理面力学性质及两者共同作用时耦合原理<sup>[17]</sup>;二是把节理岩体视为宏观上连续整体,由此建立节理岩体等效本构关系<sup>[18]</sup>。但由于节理数量较多、分布随机性强,专门针对每一条节理或者每几条节理之间的相互作用对岩体力学性质的影响并不现实。并且对宏观岩体性质起到决定作用的往往并非某一条或某几条,而是所有节理、裂隙的存在及其相互作用产生的整体力学响应。因此,对于宏观岩体而言,将节理裂隙视为损伤,并从损伤力学观点研究其力学特性将更具现实意义。

### (2) 细观损伤

对不含宏观裂纹的岩石而言,内部主要是空洞、孔隙、颗粒界面和微裂纹等各种细观尺度缺陷(界定为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$  m 范围)(见图 1(b))。由于岩石内部细观缺陷的形态、大小、方向和分布均具有较强随机性,故考虑将其内部各种缺陷视为初始损伤,从损伤力学的角度出发探讨细观缺陷对总体力学性质的影响具有较强合理性。而岩石初始细观损伤通常包括:① 孔隙,在沉积岩中最为常见;② 颗粒边界及界面裂纹,在沉积岩和岩浆岩中均广泛存在;③ 微裂纹,实质上是细观裂纹,可在成岩过程中形成,也可在后期改造过程中产生;④ 解理面,如方解石中解理是大理岩重要细观损伤类型;⑤ 其他类型细观缺陷,如微层理、劈理面、软弱胶结物等。

### (3) 微观损伤

微观损伤层面而言,主要指分子、原子尺度上材料的各种缺陷。其关注对象应包括分子键的结合、原子的热涨落、扩散、位错、滑移、塑性流动等。对应的微观损伤研究方法多采用量子力学、统计力学等方法。对岩石微观损伤而言(见图 1(c)),应重点聚焦在微裂隙(一般应聚焦于 $10^{-9} \sim 10^{-6}$  m 空间尺度范围)尖端的物理、化学过程,如裂隙尖端水分子吸附、离子交换、分子键的断裂、矿物的水化等。

## 2.2 损伤识别的“尺度”问题

损伤力学中的核心问题是损伤变量(损伤张量)定义及相关基准量识别。

损伤基准量参数通常可分为 2 类:(1) 微细观的基准量;如空隙的数目、长度、面积,空隙的形状、配列等;(2) 宏观的基准量,如弹性常数、屈服应力、拉伸强度、密度、电阻率、超声波速等。其中,微细观基准量可直接反映损伤的扩展和演化,但不易直接与宏观的物理量建立联系;而宏观基准量的变化可直接与力学性质相关,便于工程应用,但很难反映损伤的具体机制。

相对应的常用基准值识别方法包括 2 类:(1) 直接测试法;如扫描电镜、光学显微镜、CT 技术、核磁共振等,用于微、细观损伤基准量识别;(2) 间接测试法;如超声波、声振、声发射、力学测试、电阻测试等,用于宏观损伤基准量识别。

考虑岩体损伤现象涉及到从微观到宏观各尺度的损伤过程和各层级之间的耦合作用,因此若能实现同一对象跨尺度的损伤识别,不仅对认识岩体损伤机制大有裨益,且将为后期多尺度损伤模型的构建提供了重要基础条件。因此,关注现有损伤识别方法,探讨扫描电镜、CT 技术、核磁共振成像、声发射、超声波测试、电阻率测试等多元、多层次损伤识别手段存在优劣性,以微、细、宏观损伤跨尺度识别。

## 3 冻融环境下岩石微观损伤识别及评价

扫描电子显微镜(SEM)技术应用于岩石细、微观损伤的探测具有显著的优势,主要体现在:可以聚焦同一位置,连续观测细观尺度到微观尺度的岩石损伤(放大倍数 $20 \sim 100\ 000\times$ ,分辨率可达纳米级别);此外,还具有成像直观、景深长、立体感好、样品制备简单等特点<sup>[19]</sup>,目前广泛地应用于岩体微观损伤观测。

采用扫描电镜技术探测岩石的微观损伤,经历了从定性描述到定量分析的发展过程<sup>[20]</sup>。定性分析主要根据 SEM 图像对微裂纹(微孔隙)形态、组合形式、扩展方向、扩展过程、断口形态及类别等信息进行描述<sup>[21]</sup>。随着图像处理技术发展及对应新理论引入,基于 SEM 图像对岩石微观损伤特征分析逐渐向定量发展<sup>[22]</sup>。此外,基于扫描电镜技术开展岩石损伤裂纹扩展过程的实时探测,是 SEM 技术在岩石微观损伤分析的另一重要发展趋势<sup>[23]</sup>。

### 3.1 冻融环境下 SEM 技术岩石微观损伤识别

SEM 技术在岩石微观冻融损伤的识别中已得到较为广泛采用。如: J. S. Wright<sup>[24]</sup>利用该技术开展冻融条件下石英砂岩损伤劣化过程及机制研究; C. Thomachot 和 D. Thomachot<sup>[25]</sup>利用 SEM 技术观察两类 Alsatian 砂岩在经历不同冻融次数前、后微观孔隙结构差异; J. Martínez-Martínez 等<sup>[26]</sup>观察了碳酸盐岩在经历了 48 个冻融循环后,矿物颗粒间、颗粒内微裂隙扩展情况。国内学者方面,刘成禹等<sup>[27]</sup>利用扫描电镜对花岗岩试样冻融循环前后同一位置进行观测;张继周等<sup>[28]</sup>应用扫描电镜技术研究了不同水化环境对岩石微结构影响;项伟等<sup>[29]</sup>利用 SEM 技术研究冻融循环条件下岩石-喷射混凝土结构胶结面微裂纹发育过程;黄勇<sup>[30]</sup>应用 SEM 技术对冻融-大温差耦合条件下花岗岩、砂岩、千枚岩的微观结构变化进行分析;方云等<sup>[31]</sup>对冻融循环条件下云冈石窟砂岩微观结构变化进行研究。

总体而言,现阶段利用 SEM 技术对岩石微观冻融损伤的研究多采用定性描述,定量分析相关研究尚不充分,而将定量分析结果用于冻融损伤演化过程的研究更为缺乏。

### 3.2 基于 SEM 技术岩石冻融损伤跨尺度机制探讨

贾海梁等<sup>[32-33]</sup>在此方面进行了初步有益尝试,其对冻融循环条件下砂岩孔隙结构进行了 SEM 背散射观测,发现砂岩在微观尺度下冻融损伤类型主要有裂隙扩展、颗粒脱落以及颗粒旋转 3 类(见图 2)。并基于砂岩细观结构观察结果,提出了“特征冻融损伤单元”的概念,据此实现砂岩冻融损伤微观机制深入分析。

基于 SEM 扫描结果建立宏-细观跨尺度冻融损伤理论思路如下:首先,根据 SEM 图像获取砂岩的面孔隙率等信息,并观测冻融循环作用下孔隙率的变化规律;之后,基于 Kachanov 经典损伤理论定义以面孔隙率为基准量的损伤因子;并在讨论

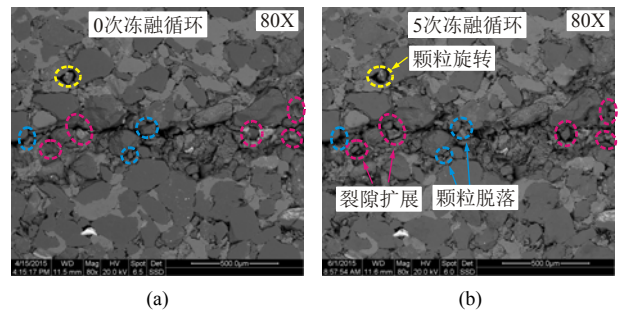


图 2 砂岩细微观冻融损伤类型 SEM 背散射结果  
Fig.2 Classification of the meso-scale frost damage of sandstone according to EBSD tests

了面孔隙率和体积孔隙率相关性基础上,将上述损伤因子扩展为基于体积孔隙率形式<sup>[34]</sup>表示,即

$$D^j = k(\chi^j - \chi^0) \quad (1)$$

式中:  $D^j$  为经历  $j$  次冻融循环后的损伤;  $k$  为材料面孔隙率与体孔隙率的转换参数;  $\chi^j$ ,  $\chi^0$  分别为岩石经历  $j$  次和 0 次冻融循环后的体孔隙率。 $\chi$  与面孔隙率  $\varrho$  之间存在如下转换关系:  $\varrho = k\chi$ 。

据此,便可根据岩石微观结构 SEM 图像的定量分析结果来定量化表示冻融损伤。此外,通过讨论还发现,利用孔隙率定义损伤变量与利用累积塑性应变定义的损伤变量在本质上是一致的。并基于不可逆热力学原理,以累积塑性应变定义损伤变量,建立了岩石冻融疲劳损伤累积模型<sup>[35]</sup>:

$$D^j = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{j}{N} \right)^{1-M} \right]^{\frac{1}{F+1}} \quad (2)$$

式中:  $N$  为砂岩在冻融作用下最终破坏时的循环次数,即疲劳寿命;  $M$ ,  $F$  为材料参数。通过上述分析过程,实现了以孔隙率为媒介建立了冻融微观损伤与宏观损伤的跨尺度联系。

但需要指出的是,现阶段扫描电镜技术在岩石冻融损伤探测的应用中尚存在较大的发展空间,同时基于 SEM 技术开展冻融损伤检测识别及机制认知也存在诸多短板,主要体现在:(1) SEM 对岩石微观结构观察一般是在冻融过程结束前后进行,对冻融过程中岩石微结构变化实时观测尚存在难度;(2) 目前 SEM 技术只能观测岩石样品表面损伤,对其内部损伤尚无法进行全面探测;(3) 样品准制备过程中会破坏其原有结构,甚至会引入人为损伤,准确识别冻融微观损伤存在挑战;(4) 限于样品尺寸,存在观测结果代表性不足可能。

需肯定的是,SEM 技术为系统认知冻融微观损

伤提供了好的途径。因此, 发展 SEM 冻融损伤实时检测及识别剔选技术以及开展基于 SEM 技术的岩石冻融损伤跨尺度机制分析, 是其未来发展的 2 个重要方向。

## 4 冻融环境下岩石细观损伤力学特性 CT 识别及评价

### 4.1 CT 技术在岩石细观损伤识别中的应用

CT(computerized tomography)技术广泛用于岩石细观损伤特性及扩展过程的识别, 相较于其他损伤识别技术而言, 该技术具有诸多优势, 主要体现在: (1) 可实现细观损伤的快速无损识别; (2) 识别范围涵盖了细观尺度至宏观尺度内的损伤, 并可实现同步识别; (3) 可实现岩石内部任意断面处的损伤探测; (4) 可获得识别断面损伤特征的定量化分析结果及高分辨率数字图像, 结合图像处理技术可进行更为系统的定量分析; (5) 根据 CT 图像可对岩石孔隙(裂隙)结构进行三维重构, 从而建立细观损伤与宏观性质之间的联系。

自 1989 年 Teda 创造性用 X 射线 CT 装置进行了岩石损伤断裂的探测<sup>[36]</sup>, CT 技术已广泛的用于岩石细观损伤特性及扩展过程识别。H. Kawakata 等<sup>[37]</sup>利用 CT 扫描数据重建了岩石三维结构图像, 对内部裂纹的形态和空间分布及其在荷载作用下的扩展过程进行了研究; V. G. Ruiz de Argandoñad 等<sup>[38]</sup>采用 CT 识别技术对冻融循环条件下白云岩孔隙结构的变化特征进行了研究, 根据孔隙结构的持续裂化过程探测了岩石的损伤深度, 并对岩石的耐久性进行了评价; T. Ohtnai 等<sup>[39]</sup>用 CT 技术探测了花岗岩中晶洞的三维空间分布特征, 并探讨了 CT 技术在地热研究中的重要性; A. K. Goodwin 等<sup>[40]</sup>应用 CT 技术研究了矿山回填材料在长期蠕变条件下和短期压缩条件下, 其内颗粒间的相互作用及发展模式。

国内方面, 杨更社和谢定义<sup>[41]</sup>首次将 CT 技术用于岩石(岩体)损伤识别中, 并系统建立了基于 CT 识别岩石细观损伤理论<sup>[42]</sup>。主要成果包括:

(1) 分析了 CT 数所表征的损伤本质, 对不同类型岩石(煤岩、页岩、石灰岩、砂岩等)的初始细观损伤进行了识别<sup>[43]</sup>。

(2) 总结了各类岩石细观损伤 CT 数分布的特性规律, 提出了多峰型、两峰型、单峰型等多种分

布模式, 并建立了基于 CT 数分布规律表征的岩石细观损伤数学模型<sup>[44]</sup>。

(3) 基于岩石细观损伤 CT 数定义了损伤变量, 如下:

$$D = \frac{1}{m_0^2} \left( \frac{H_0 - E(H)}{1000 + H_0} \right) \quad (3)$$

式中:  $D$  为岩石损伤变量,  $m_0$  为 CT 设备的分辨率系数,  $H_0$  为无损材料的 CT 数均值,  $E(H)$  为被检测岩石的 CT 数均值。讨论式(3)与经典损伤变量公式(Bellonoi 公式、Lemaitre 公式)之间的相关性<sup>[45]</sup>, 并发现 CT 数数学建模求得损伤变量有 2 个独特优点: 一是 CT 识别解决了损伤识别的“尺度”效应问题, CT 的分辨率系数  $m_0$  充分体现了这一点; 二是 CT 识别能够识别复杂的多种类型的损伤。基于上述 2 个优点, 基于 CT 数的损伤变量公式相较于 Bellonoi 公式和 Lemaitre 公式更加合理、适用范围更广泛。

(4) 对不同荷载条件下岩石细观损伤扩展过程进行了 CT 识别, 提出了相应条件下岩石损伤扩展本构关系<sup>[45]</sup>。

(5) 基于 CT 图像处理技术(灰度直方图技术、伪彩色增强、三值分割技术、边缘检测技术等), 提出了一种定量分析岩石损伤演化的方法<sup>[46]</sup>。上述研究为岩石细观损伤的识别提供了系统的方法和理论, 为细观损伤与宏观破坏现象之间建立了桥梁。

此外, 葛修润等<sup>[47-50]</sup>通过与 CT 配套的三轴加载设备, 对煤岩、砂岩及含裂隙砂岩等材料在单轴压缩、三轴加卸载、疲劳荷载等条件下裂隙的扩展过程进行了实时观测, 并探讨了不同荷载条件下损伤的演化过程; 仵彦卿和丁卫华<sup>[51]</sup>采用 CT 设备与其配套的三轴压力仪, 对压缩条件下岩石细观损伤过程进行了动态观测, 并以 CT 数为基础定义了岩石密度损伤增量, 提出了 CT 数与岩石密度损伤增量的关系式, 定量地分析了峰值强度前的裂纹萌生、扩展、连通过程; 赵阳升等<sup>[52]</sup>研发了高精度显微 CT 试验系统, 利用该系统对花岗岩在常温到 500 °C 高温过程中的三维细观破裂过程进行了观测; 王家禄等<sup>[53]</sup>应用 CT 扫描系统对 13 个岩芯连续进行扫描, 并应用三维重建技术得到岩芯的三维孔隙变化, 在“孔群级”尺度上清楚地观察到岩芯内部的孔隙变化和非均质特征。

可见, CT 扫描技术用于岩石细观损伤的探测经历了, 以断面 CT 数为主要分析指标 → 以二维

CT 图像处理结果为重要分析指标→以 CT 图像对岩石孔隙(裂隙)结构进行三维重构等阶段。此外, CT 扫描设备本身也经历了从与加载设备分离到与加载或环境系统配套使用的发展过程。两者配套使用可避免样品卸载后由于加载所产生的微裂隙闭合的问题, 以及样品多次测量过程中定位偏差的问题<sup>[54]</sup>。

### 4.2 基于 CT 扫描技术岩石冻融细观损伤特性分析

CT 技术在岩石细观冻融损伤的识别中也有较为广泛的应用, 有力的促进了岩石细观冻融损伤的研究。杨更社和张长庆<sup>[55]</sup>率先将 CT 扫描技术用于岩石细观冻融损伤识别, 随后其团队采用该技术对岩石细观冻融损伤特性进行系统研究。主要研究成果包括:

(1) 研究了不同冻结条件对岩石冻融损伤的影响, 所考虑的冻结条件包括冻结速率、冻结温度、冻融循环次数等。结果表明, 初始损伤状态即岩石的孔隙大小、孔隙结构, 以及初始含水量大小决定着岩石冻融损伤的程度和扩展过程。具体来讲, 冻结速度对于孔隙率小、孔隙连通性差的硬岩损伤程度影响最大; 冻结温度对孔隙率较大、孔隙连通性

较好的软岩损伤程度影响最大; 冻融循环次数对孔隙率较大、孔隙连通性较好的软岩损伤扩展有较明显的影响(见图 3(a)), 而对于比较坚硬、低含水量的岩石材料, 冻融循环次数对其损伤扩展在初期有一定的影响, 但后期影响不大(见图 3(b))<sup>[55]</sup>。

(2) 冻结过程岩石细观结构变化的定量分析<sup>[56]</sup>。依据体视学原理对 CT 图像进行处理, 可得到细观裂隙(孔隙)的长度、宽度、面积、圆形度等定量参数。图 4 所示为 2 个含隐伏裂隙的砂岩样品, 分别选取一个典型截面, 分析代表性裂隙 A 和 B 的几何参数随冻结过程的变化, 如图 5 所示。裂隙 A, B 的长度和面积(见图 5(a))以及宽度和圆形度(见图 5(b))的变化均对温度十分敏感, 呈现出典型的阶段性特征。

(3) 采用 CT 图像处理技术研究了岩石细观冻结过程<sup>[57]</sup>。根据 CT 图像三值化分割技术给出了未冻水含量随冻结温度的变化。图 6 为岩样 R1 第 5 层截面裂隙(孔隙)水的冻结过程, 综合考虑同一位置裂隙在冻结过程中的几何形态的变化, 可以看出, 裂隙(孔隙)水的冻结过程受裂隙(孔隙)尺寸的控制, 且具有先后顺序。

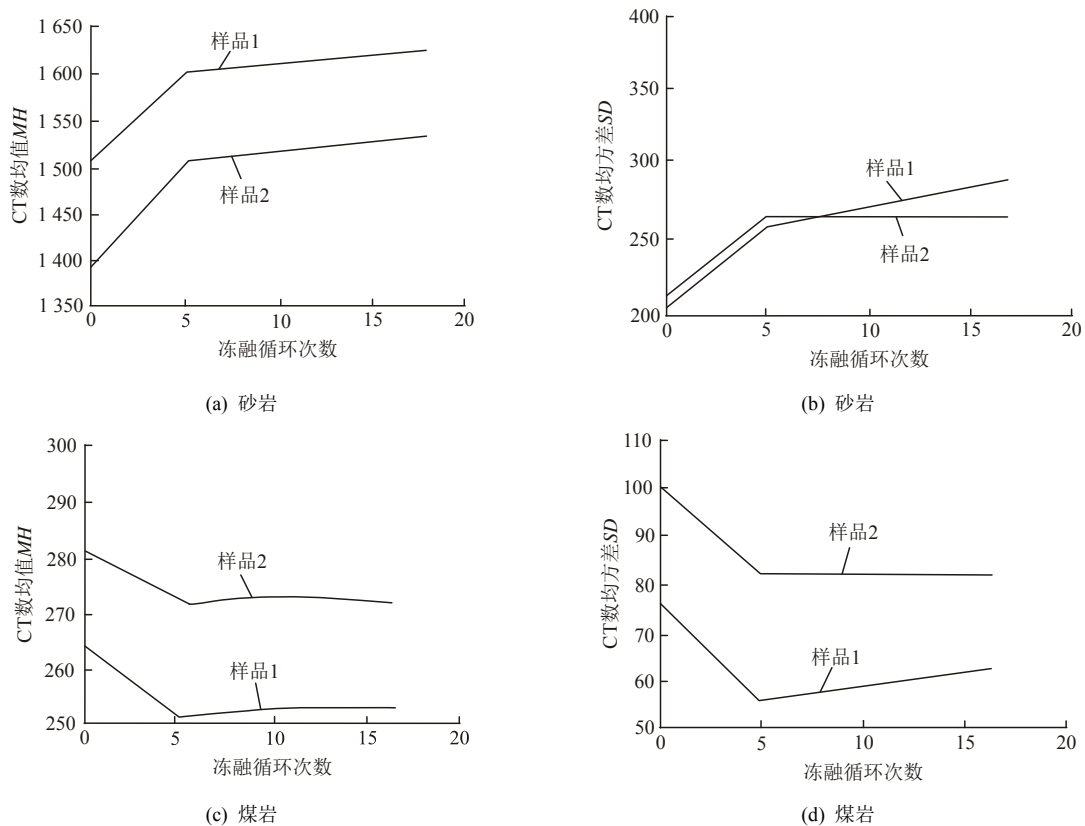


图3 砂岩和煤岩 CT 数均值(MH)和方差(SD)随冻融循环次数的变化

Fig.3 Variation of the mean value(MH) and variance(SD) of CT numbers of both sandstone and coal with the increase of freeze-thaw cycles

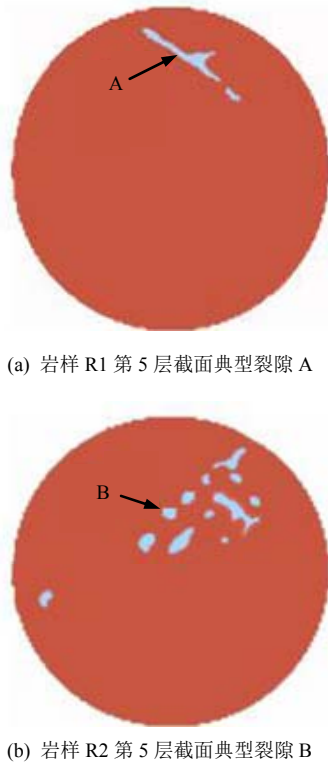


图 4 裂隙的位置及编号

Fig.4 Position and number of cracks and pore

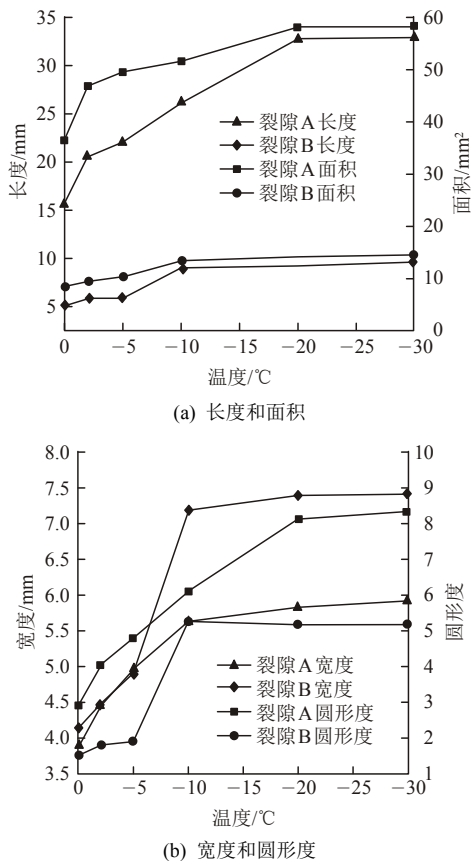


图 5 R1 第 5 层裂隙 A 和 R2 第 5 层裂隙 B 的长度和面积  
Fig.5 The variation of length and the area of the crack A in the 5th slice of R1 and crack B in the 5th slice of R2 with the temperature

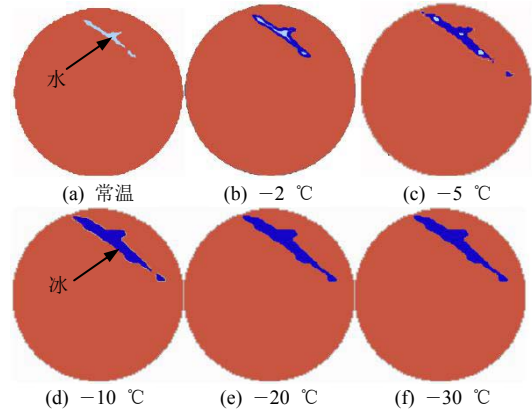


图 6 不同冻结温度下岩样 R1 第 5 层裂隙水冻结过程  
Fig.6 Freezing process of crack (pore) water at the 5th layer of sample R1

国内外其他学者也采用 CT 扫描技术研究了岩石的冻融损伤特性：赖远明等<sup>[58]</sup>利用 CT 扫描技术进行了大坂山隧道围岩的冻融损伤试验，结果表明，冻融损伤使增加了试样物理性质的各向异性。任建喜<sup>[59]</sup>采用自制的岩石力学三轴 CT 加载系统，对具有单一裂纹裂隙岩石在负温条件下的加卸载损伤破坏过程进行了实时识别。张淑娟等<sup>[60]</sup>借助与程控加载装置配套的 CT 技术，研究了风火山隧道拱顶和侧拱处的砂质泥岩在冻融循环条件下的损伤扩展特性。国外方面，如 J. Park 等<sup>[61]</sup>利用显微 CT 研究了 3 种火成岩(闪长岩、玄武岩、凝灰岩)在冻融循环作用下微结构的损伤及微裂隙的扩展过程，发现在 50 个冻融循环后玄武岩出现了微裂隙的扩展，而凝灰岩内部微裂隙已扩展连接为宏观裂隙。T. De Kock 等<sup>[62]</sup>采用显微 CT 技术研究了灰岩样品的毛细吸水过程、冻融循环条件下裂隙的扩展过程，结果表明在第 2 个冻融循环中微裂隙已经发生了扩展，在第 6 个冻融循环后扩展为宏观裂隙。

### 4.3 基于 CT 扫描技术岩石冻融细观损伤理论模型

杨更社及其团队基于 CT 扫描识别岩石细观冻融损伤的成果，提出了较为系统岩石冻融损伤理论模型，取得的主要成果如下：

(1) 基于岩石细观冻融损伤 CT 数定义了损伤变量(式(3))，此后对式(3)进行改进<sup>[63]</sup>如下：

$$D = \frac{\beta}{m_0^2} \left[ \frac{H_0 - E(H)}{1000 + H_0} \right] \quad (4)$$

式中： $\beta$ 为小于 1 的数，用于对压密阶段损伤变量进行修正。

(2) 基于细观力学推导冻结岩石等效弹性参数以及本构方程。依据细观力学理论中的混合律，饱

和冻结岩石等效弹性参数可用下式计算<sup>[64]</sup>:

$$E = \{[\varphi_r E_r (1 - 2\nu_i) + \varphi_i E_i (1 - 2\nu_r)] [\varphi_r E_r (1 + \nu_i) + \varphi_i E_i (1 + \nu_r)]\} / [\varphi_r E_r (1 + \nu_i) (1 - 2\nu_i) + \varphi_i E_i (1 + \nu_r) (1 - 2\nu_r)] \quad (5a)$$

$$\nu = \frac{\varphi_r E_r \nu_r (1 + \nu_i) (1 - 2\nu_i) + \varphi_i E_i \nu_i (1 + \nu_r) (1 - 2\nu_r)}{\varphi_r E_r (1 + \nu_i) (1 - 2\nu_i) + \varphi_i E_i (1 + \nu_r) (1 - 2\nu_r)} \quad (5b)$$

式中:  $E$  为冻结岩石的等效弹性模量;  $E_r$ ,  $E_i$  分别为岩石骨架和冰的弹性模量;  $\nu$  为冻结岩石的等效泊松比;  $\nu_r$ ,  $\nu_i$  分别为岩石和冰的泊松比;  $\varphi_r$ ,  $\varphi_i$  分别为岩石和冰的体积分, 可根据 CT 图像处理结果得到。冻结岩石本构方程可表示为

$$\sigma_{ij} = \frac{E_v}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_{ij} \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (6)$$

### 5 冻融环境下岩石细观损伤力学特性的核磁共振识别及评价

核磁共振技术(nuclear magnetic resonance, 简称: NMR)近年来逐渐被用于岩石细观结构、损伤特性识别。目前来言, 岩石样品检测一般使用低场核磁共振设备(磁场强度小于 0.5 T)<sup>[65]</sup>。

由于 NMR 技术只对孔隙流体(含 H 流体)反应敏感, 相较于其他损伤识别技术, 其在岩石损伤识别, 尤其是冻融损伤识别中有独特优势。其主要体现在: (1) 可系统获得与流体赋存和运移相关参数, 如孔隙度、含水量、孔径分布、渗透率、流体性质等, 而诸上参数对岩石冻融损伤过程认知尤为重要; (2) 具有无损检测、一机多参数、一样多参数的优势, 避免了不同测试手段造成的参数不匹配问题<sup>[66]</sup>; (3) 可实现细观 - 宏观损伤的多尺度同步识别; (4) 损伤识别结果具有定量化特点; (5) 可用于检测孔隙流体的动态运移过程。

NMR 技术在岩石冻融损伤的识别中主要有 3 个方面应用: (1) 对岩石初始孔隙结构特征测量, 包括孔隙率、孔径分布、渗透率等; (2) 对岩石冻融损伤演化的识别; (3) 对岩石冻结和融化物理过程的观测, 包括未冻水含量变化、未冻水的迁移等。

目前, 国内利用 NMR 技术在岩石细观冻融损伤的识别主要集中在中南大学周科平团队, 其工作主要集中于以上提及的前 2 个方面。如: 周科平等<sup>[67]</sup>研究了冻融循环条件下花岗岩 NMR 对应的  $T_2$  谱分布特性, 发现: 花岗岩的 3 峰型  $T_2$  谱分布的左边两

峰面积之和占总面积的 98%以上, 认为花岗岩中微孔隙占绝大多数; 并通过对经历 10, 20, 30, 40 次冻融作用对比发现, 孔隙率分别增大了 14.0%, 0.9%, 16.2%和 1.6%。此外, NMR 图像也可较好反映冻融循环后岩样孔隙结构的内部变化, 如: 李杰林等<sup>[68]</sup>基于 NMR 技术对花岗岩孔隙结构冻融损伤进行了试验研究, 发现: 随着冻融循环次数增多, 岩石的孔隙度和  $T_2$  谱面积均增大; 通过 NMR 图像可动态显示同一块岩样在不同冻融循环次数后的内部微观结构分布及损伤过程。周科平等<sup>[69]</sup>利用 NMR 技术分析了冻融花岗岩细观损伤演化, 获得试样在不同冻融阶段的试件表面形貌、质量变化、 $T_2$  谱、孔隙度变化等。李杰林等<sup>[70]</sup>探讨了花岗岩细观冻融损伤与宏观力学强度关系, 通过运用 NMR 技术研究冻融后花岗岩孔隙发育特征, 并测定对应阶段试样单轴抗压强度。

利用 NMR 技术对岩石冻结和融化过程中物理过程进行观测, 有利于对岩石细观冻融损伤机制的理解。笔者所在团队自主设计与 NMR 配套的环境控制系统, 其可实现冻融过程中  $T_2$  谱等参数实时检测。图 7, 8 分别展示了利用该系统对饱水粉砂岩冻结和融化过程中的未冻水含量、 $T_2$  谱的变化规律; 基于过程化孔隙水物理变化过程分析, 得到一系列有意义的研究结论: (1) 孔隙水的冻结和融化并不是一个完全可逆的过程;  $T_2$  谱随温度的变化则反映了孔隙水的冻结顺序: (2) 冻结初期(0 °C ~ -4 °C)未冻水含量快速降低, 此时对应着  $T_2$  谱中右侧两个峰面积的降低, 即大孔隙中的自由水和部分毛细孔中的毛细水结冰; (3) 冻结中段(-4 °C ~ -10 °C)未冻水含量持续降低, 但速率比初期缓, 此时  $T_2$  谱中右侧 2 个峰面积基本不再变化, 而左边第一个的峰的面积开始减小, 即毛细孔中的水大部分已经冻结,

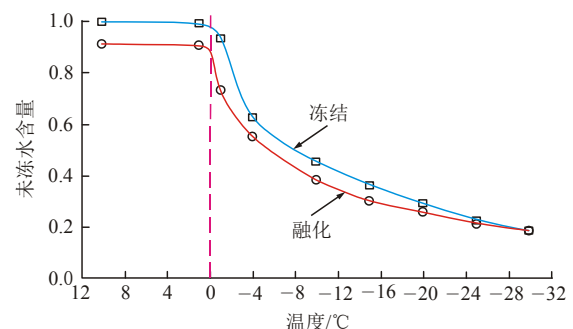
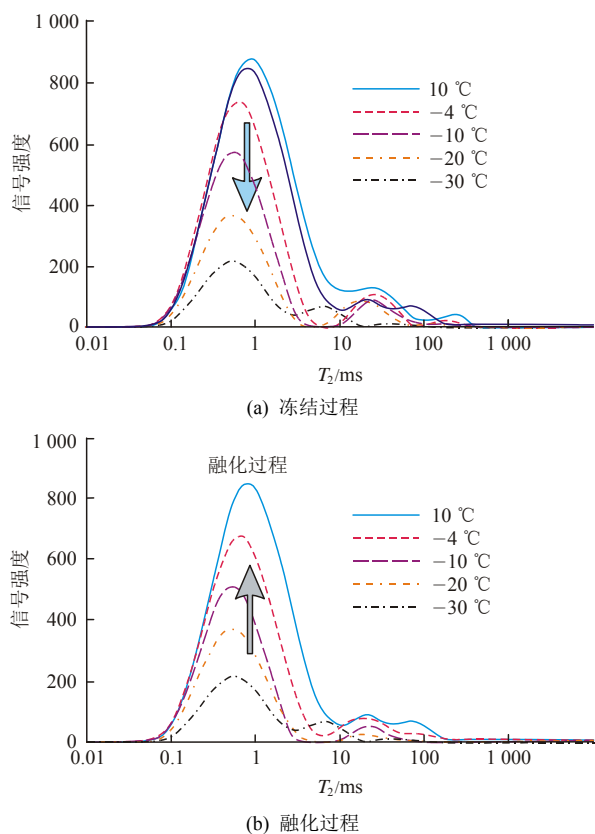


图 7 饱水砂岩冻结和融化过程中未冻水含量变化  
Fig.7 Unfrozen water content of saturated sandstone varies during freezing and thawing



图 8 饱水砂岩冻结和融化过程中  $T_2$  谱的变化Fig.8 Variation of the  $T_2$  spectrum of saturated sandstone during freezing and thawing

微孔隙中的水开始冻结；(4) 冻结末段( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )，未冻水含量降低速率逐渐变小，在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仍有约 20%的孔隙水未冻结，此阶段  $T_2$  谱中左侧第一个峰的面积持续减小，即微孔隙中水的冻结阶段。融化过程则与冻结过程相反。以上初步研究结论为深入认知岩石冻融过程中孔隙水迁移规律具有一定参考价值。

基于以上研究进展综述，NMR 技术在岩石微观冻融损伤的识别中优势明显，特别是在孔隙水冻结融化过程、未冻水迁移及损伤演化方面；但现阶段基于 NMR 技术的岩石冻融损伤特性研究尚没有形成系统理论，而这正是后期开展岩石微观冻融损伤特性的发展方向。

## 6 冻融环境下岩体宏观损伤识别及评价

宏观损伤力学认为损伤在宏观层面上属于连续分布，并基于宏观损伤变量形式唯象表征岩石损伤特征<sup>[71]</sup>。其实现损伤评价核心要素在于确定描述损伤状态的场变量(即：损伤变量)，目前，国内外基

于宏观损伤理论的研究多集中在对损伤变量的选择与识别上。

目前，损伤变量选择多采用宏观基准量，如弹性常数、屈服应力、拉伸强度、密度、电阻率、超声波速等。并对应各自宏观损伤识别方法，包括破坏性测试<sup>[72-73]</sup>、无损检测<sup>[74-76]</sup>两类；从识别原理来分，包括力学性质测试(应力-应变测试)<sup>[72-73]</sup>和物理性质测试(声发射测试、红外辐射探测、超声波测试、电阻率测试等)<sup>[74-77]</sup>两类。针对岩体冻融损伤宏观识别而言，笔者建议关注电阻率成像技术(ERT)<sup>[77-78]</sup>在岩体原位损伤识别中未来应用。

### 6.1 岩石冻融宏观力学损伤特性及理论模型

关于完整岩块冻融宏观力学损伤特征研究，目前主要关注不同冻融循环条件下对不同岩性、孔隙率、含水状况下力学参数(如抗压强度、变形模量、剪切强度、动态力学参数等)损伤演化分析。分析手段包括采用室内试验、原位测试、统计归纳等方法，藉此探讨其对应的内在损伤机制及评价模型。

E. M. Winkler<sup>[79]</sup>曾开展岩石内部水冰相变膨胀压力测试发现，若假定孔隙冰体积不变，则孔隙冰在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应产生的膨胀压力分别可达 61，113，211.5 MPa，其必然引起岩石的破裂；H. Yavuz 等<sup>[80]</sup>对 12 种碳酸盐岩开展力学特性冻融损伤演化试验，观察不同岩性对冻融循环作用的敏感程度；F. Bayram<sup>[81]</sup>则开展土耳其境内 9 个区域石灰岩在经历不同冻融循环次数后的单轴压缩强度演化规律进行了系统试验分析；G. Khanlari 等<sup>[82]</sup>针对伊朗中部典型红砂岩开展室内、现场冻融循环下物理力学性质影响特征分析。国内方面，张慧梅和杨更社<sup>[83]</sup>对砂岩、页岩 2 种岩石进行开放饱水状态下的冻融循环试验，并分析经历不同冻融次数后的岩样进行单向受力状态下的力学特性，并关注岩石冻融损伤劣化过程。唐江涛等<sup>[84]</sup>开展冻融循环下砂岩、花岗岩、千枚岩的质量、波速、强度等变化，得到相关物理力学参数随冻融次数的内在关系；类似地，刘成禹等<sup>[85]</sup>、吴安杰等<sup>[86]</sup>、张慧梅等<sup>[87]</sup>分别开展花岗岩、泥质白云岩、红砂岩等在不同孔隙率、含水状况下受冻融循环影响导致力学性质劣化试验分析。申艳军等<sup>[88]</sup>通过设计室内岩石冻融循环试验，探讨冻融循环温度、冻融时长、循环次数对花岗岩、2 种砂岩力学参数差异性影响规律，进而提出针对不同岩性、孔隙率所对应的建议性试验方案。总体而言，因岩性、内部结构形态、含水状况差异，导致的冻融宏观损伤特

征及力学参数劣化规律存在显著差异。

基于均布多孔岩石宏观冻融损伤特征，结合相关室内、原位测试试验，提出岩石冻融宏观损伤力学评价模型。代表性研究成果包括：刘泉声等<sup>[89]</sup>以孔隙率、纵波波速为参变量推导统一损伤变量表达形式，进而建立了三向等效拉应力表征的岩石冻融疲劳损伤模型；贾海梁等<sup>[4]</sup>分别将昼夜循环和年度循环划分并等效为高周或低周疲劳荷载，并利用岩石孔隙率变化建立冻融作用下砂岩高周、低周疲劳损伤模型；张慧梅等<sup>[90]</sup>将损伤力学和细观统计方法相结合，根据红砂岩变形破坏曲线几何条件，考虑围压作用影响，建立了三向应力状态下冻融岩石损伤本构模型。其有效扩展了冻融-荷载作用下岩石损伤模型表征范围，得到的冻融受荷岩石损伤本构模型如下：

$$\sigma_i = E_n \varepsilon_i \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] + \nu (\sigma_j + \sigma_k) \quad (7)$$

式中： $i, j, k = 1, 2, 3$ ； $\nu$ 为泊松比； $\sigma_{i, j, k}$ 和 $\varepsilon_{i, j, k}$ 分别为第1, 2, 3主应力和主应变； $m, F_0$ 参数用于反映应变、围压及冻融循环的演化特征行为。由此可得到常规三向应力状态下冻融岩石损伤本构模型。经与经历过40次冻融后不同围压(0, 2, 4, 6 MPa)下应力-应变曲线结果对照发现，所建立的砂岩损伤本构模型理论曲线与试验数据吻合较好，可较好地反映各种围压及冻融次数下岩石的力学损伤行为。图9展示了在单轴、围压为6 MPa下应力状态下冻融岩石损伤理论模型与试验的对照结果，可见本模型整体与试验结果吻合性较强。

总体而言，针对均布多孔岩石的冻融损伤模型主要关注孔隙率变化特征，并以此为重要参量，并充分考虑其他因素影响(围压、荷载形式、加卸载频率等)建立损伤评价模型。而该思路实际上对孔隙岩石冻融损伤模型指明了方向，即通过微观参量的数学表征反馈宏观力学损伤特征，通过宏-细观跨尺度结合实现冻融宏观损伤评价。

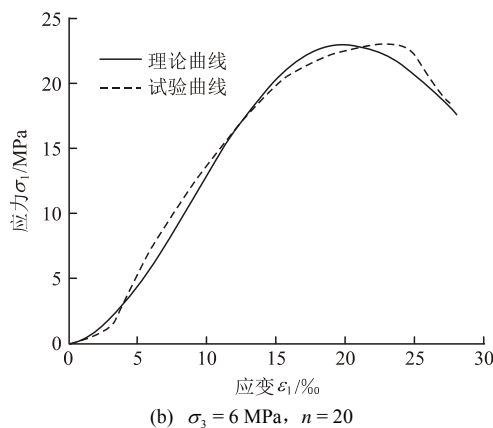
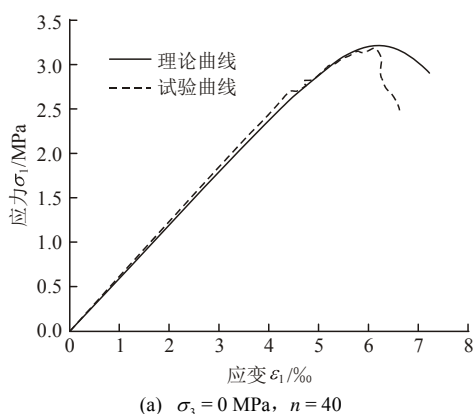


图9 红砂岩本构模型理论曲线与试验曲线比较  
Fig.9 Comparison between experimental and theoretical curves of damage constitutive model for sandstone

### 6.2 裂隙岩体冻融宏观力学特性损伤及理论模型

产生冻融损伤的前提需同时满足：(1) 足够的水分参与及较畅通补给通道；(2) 一定约束条件下的储水空间。因岩体内宏观裂隙的存在，可较好满足以上2个核心条件，故往往就成为裂隙岩体冻融损伤影响最为显著区域，呈现典型的局部化特征。正如刘泉声等<sup>[91]</sup>所言：“岩体冻融损伤涉及低温环境下复杂的 THM 多场耦合问题中，裂隙中水冰相变是冻岩损伤的主导因素”。故越来越多学者开始聚集冻融对饱水裂隙本身损伤效应，并通过室内试验、评价模型开展裂隙岩体冻融损伤特性及理论分析。

N. Matsuoka 和 J. Murton<sup>[92]</sup>开展寒区岩石冻融风化作用机理综合分析，明确裂隙内冰分凝过程是引起岩体产生扩展、断裂的核心因素；D. Nakamura 等<sup>[93]</sup>重点关注裂隙岩体冻胀扩展与内部温度关系，通过广义 Clausius-Clapeyron 方程分析冻胀力与冻结温度的内在关系；国内方面，李 宁等<sup>[94]</sup>通过在砂岩中预制裂隙来模拟裂隙岩体，研究其在饱水冻结情况下岩体低周疲劳损伤特性；刘泉声等<sup>[95]</sup>重点关注冻融岩体裂隙的损伤效应，建立单裂隙冻胀热-力耦合模型；李新平等<sup>[96]</sup>提出了冻融-荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤扩展模型；刘 波等<sup>[97]</sup>研究了含冰软弱面的冻结裂隙红砂岩强度随着裂隙倾角演化规律；申艳军等<sup>[98]</sup>探讨随着冻结深入含表面裂隙硬岩内部温度场及冻胀荷载演化过程。徐拴海等<sup>[99]</sup>则重点关注消融过程中含冰裂隙冻岩对岩体强度特性显著影响效应。

事实上，因裂隙岩体存在的天然初始缺陷，冻融作用易沿裂隙端部的窄条带定向损伤，其损伤现象呈现典型局部化特征<sup>[3]</sup>。即其冻融损伤、断裂破坏往往发生在裂隙端部局部小区域内，并伴随着冻融疲劳荷载作用，局部化损伤过程不断扩展，导致岩体定向断裂(见图 10<sup>[3]</sup>)。因此，针对裂隙岩体冻融宏观

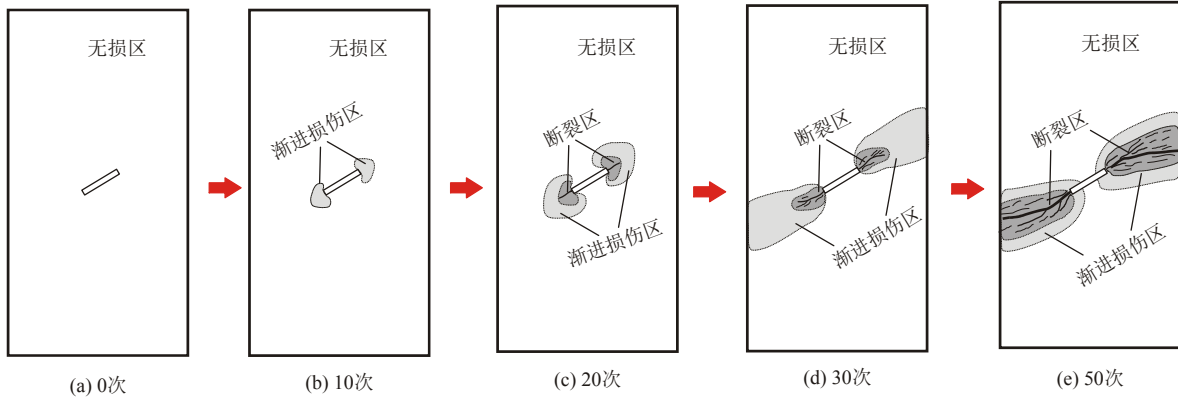


图 10 随着冻融次数增加裂隙岩体呈现局部化损伤效应<sup>[3]</sup>

Fig.10 Processes of the localized damage effects of fractured rock mass following the increasing numbers of freeze-thaw cycles<sup>[3]</sup>

损伤评价应重点关注裂隙内部冻融局部化损伤问题，而其显著区别与均布多孔岩石评价思路。

申艳军等<sup>[3]</sup>曾系统开展了 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 的单裂隙类砂岩标准圆柱试样在 10, 20, 30, 50 次冻融循环试验，重点观测裂隙端部区域在不同裂隙倾角、冻融循环次数下局部化损伤效应差异规律。结果表明：冻融循环作用下单裂隙岩体存在局部化损伤效应，且冻融局部化损伤效应与裂隙倾角存在密切关联，对应的端部断裂特征存在显著差异。据此，结合断裂力学应力叠加理论，验证了因冻融局部化损伤造成的端部断裂特性及扩展路径演化规律。

其得到的主要研究结论为：

(1) 初始裂隙冻融循环过程可认为是纯 I 型裂纹断裂过程，其初始扩展方向与裂隙走向应近似一致，扩展长度与岩石断裂韧度、抗拉强度有关，在达到其临界状态时，裂隙发生断裂，渐进损伤区转化为断裂区；其对应的端部塑性区极坐标表达形式为

$$r_{\theta y} = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_y^2} \left[ \frac{3}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + (1-2\nu)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (8)$$

式中： $K_I$  为 I 型裂纹应力强度因子， $r$  为极坐标半径， $\theta$  为极坐标角度， $\sigma_y$  为沿裂隙走向端部冻胀荷载(MPa)。

(2) 冻融循环作用下不同倾角裂隙端部在远场扩展路径存在显著差异，可通过断裂力学应力叠加原理开展合理解释，并建立裂隙岩体在冻融循环条件下裂隙倾角  $\alpha$  与裂纹扩展角  $\theta$  的关系式：

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \sin \alpha \cos \alpha}{\Delta \sigma_f + \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha} = \frac{\sin \theta}{1 - 3 \cos \theta} \quad (9)$$

式中： $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  分别为裂隙岩体远场双轴向冻胀拉伸

应力； $\Delta \sigma_f$  为裂隙内有效冻胀应力。通过式(9)可知，随着裂隙倾角  $\alpha$  的增大，裂纹扩展角  $\theta$  整体逐渐减小，即认为随着裂隙倾角增加，裂纹扩展角逐渐趋于与初始裂隙走向一致；反之缓倾角裂隙对应的远场裂纹扩展角往往较大，其扩展角  $\theta$  趋于与整个岩体最大拉伸应力方向垂直。利用式(9)可较好地解释裂隙端部在冻融作用下的远场断裂扩展路径问题。

通过以上研究可知，裂隙岩体冻融宏观损伤存在明显局部化损伤效应，且与裂隙发育形态存在密切关系。关注裂隙岩体冻融宏观损伤需着眼于裂隙本身，考虑其与冻融密切相关的储水空间状况、补水通道、温度影响位置等核心因素。

## 7 岩体冻融损伤多尺度发展方向及研究思路

损伤识别方法和技术的发展与损伤理论的发展为相辅相成的关系。近年来，岩体损伤理论的研究热点逐渐由宏观“连续介质损伤力学”向“细观损伤力学”过渡<sup>[100]</sup>，这对损伤识别方法和技术提出了全新的挑战。

而对于岩体冻融损伤问题，其存在其特殊性：一是冻融损伤过程具有多场耦合特征(温度场、渗流场、应力场、化学场)；二是冻融损伤具有多尺度特征(初始损伤的多尺度、损伤扩展的多尺度)。岩体冻融的多场耦合过程实际上决定了冻融损伤的产生机制，以及冻融损伤扩展的多尺度特征；而多场耦合过程又受到多尺度初始损伤的控制。因此，对岩体冻融损伤进行识别和评价需要考虑上述 2 个特性。

现阶段，国内外学者对岩体冻融损伤的研究更多的关注于损伤的识别、损伤的扩展以及损伤对力

学性质的劣化等方面,而对造成损伤的多场耦合过程关注不够。笔者认为,以下几个方面应是未来研究的重点:(1) 孔隙(裂隙)水的相变过程,包括孔隙(裂隙)水相变过程中岩石(岩体)温度场的变化、孔隙(裂隙)中水冰含量的相对变化等;(2) 岩石(岩体)冻结过程中未冻水的迁移规律分析;(3) 孔隙(裂隙)水相变过程冻胀力的产生及发展过程;(4) 力学与化学耦合过程,即所谓的应力腐蚀效应。

岩体冻融损伤力学特性多尺度研究的基础为损伤的多尺度识别,而各尺度损伤之间的耦合问题则是多尺度研究的内禀性质。

### 7.1 冻融环境下岩体多尺度损伤识别发展方向

冻融环境下岩体多尺度损伤识别具有两个重要的意义:一是直观的揭示损伤的扩展过程;二是服务于损伤变量的定义。如前文所述,各个尺度下冻融损伤应采用不同的识别方法和手段。岩石微观的冻融损伤多采用扫描电镜(SEM)进行识别;细观的冻融损伤多采用CT或核磁共振进行识别;而宏观的冻融损伤则采用诸如力学性质测试、声发射、超声、电阻率等手段进行识别。

上述技术方法的测试结果可以分为两类:一类为数据型结果,如CT数、核磁信号量、力学强度参数、声发射数、超声波速等;另一类为图像型结果,如SEM图像、CT图像、核磁共振图像、电阻率等值线图。数据型结果往往是样品整体或平均性质的体现,不能对局部的损伤进行有效的识别,但便于进行定量分析;图像型结果一般为针对某个界面或截面的二维图像,携带了更多与损伤的空间信息,也更为直观,但量化分析较为困难。

笔者认为,现有技术手段尚不能完全胜任冻融环境下岩体多尺度损伤的识别工作,未来的发展方向在于对识别结果的深度挖掘和处理,以及对现有技术设备的改造等方面。

对损伤识别结果的深度挖掘和再处理可着眼于以下3个方面开展进一步研究:

(1) 图像型结果的量化分析——SEM图像、CT图像、核磁共振图像等携带了大量的微、细观损伤的信息,若能充分的挖掘进行量化的分析,则对揭示岩体微、细观冻融损伤的扩展过程具有重要意义。图像型结果量化分析的关键在于先进图像处理技术或理论的引入。如此,不仅可以提高损伤识别的精度,获得空间上量化的分析结果,如谢和平等<sup>[22, 101]</sup>则通过将分形理论用于岩石断口形态分析,给出了基于分形维数定量表达的断口损伤

模型;还可以获取其他相关物理量的变化过程,如刘慧等<sup>[56]</sup>根据CT图像三值化分割技术给出了未冻水含量随冻结温度的变化,并分析了孔隙水结冰过程。

(2) 二维图像的三维重构——岩体的裂隙(孔隙)结构既是水的赋存空间,也是冻融损伤的载体,因此,岩体三维裂隙(孔隙)网络的重构对岩体多尺度冻融损伤的研究具有重要意义。主要体现在:有助于揭示水、冰的赋存状态;可直接用于冻融损伤状态的评价;借助一定的均匀化算法,可建立微、细观尺度冻融损伤与宏观冻融损伤的关联,实现多尺度损伤的重构;此外,基于重构的三维裂隙(孔隙)网络,结合数值模拟方法可重现当前损伤过程或对之后的损伤状态进行预测。

在此方面CT具有一定的独特优势,国内已有学者进行了相关的尝试,如李建胜等<sup>[102]</sup>和黄家国等<sup>[103]</sup>分别利用显微CT技术对泥岩和页岩的三微孔隙结构进行了重构。但与岩体冻融损伤相关的研究尚不够充分。

(3) 损伤识别的智能化——随着损伤识别计算的发展,如CT, SEM等技术可获取同一样品的大量图像数据。仅靠肉眼对损伤进行识别不仅效率低下,且准确率不高。随着大数据时代的到来,计算机运算能力大幅提高,以深度学习为代表的模型开始已被应用工程领域中的图像识别方向。如黄宏伟等<sup>[104]</sup>利用深度学习理论对盾构隧道渗漏水病害图像进行了识别;程国建和刘丽婷<sup>[105]</sup>提出将深度学习算法用于岩石SEM图像处理。

对现有技术设备的改造应着眼于以下2个方面:

① 损伤识别设备与环境系统的集成——现有损伤识别设备多独立于环境系统,即无法实现岩体冻融过程中损伤状态的实时识别。这不仅限制了现有技术设备的应用,且无法保证损伤识别的精度。② 多方法综合应用——岩体冻融损伤过程同时具有多场耦合和多空间尺度的特征,因此想要更为深入的了解损伤的产生过程、损伤状态的演化过程,需要针对多物理量、多尺度进行损伤的识别。前文已总结了常用损伤识别手段的优缺点及适用范围,在发挥各种手段技术优势的前提下实现多方法的综合应用是,可为冻融环境下岩体损伤力学特性的多尺度研究提供坚实的实验基础。

### 7.2 冻融环境下岩体损伤特性多尺度研究思路

基于以上综述研究可知,针对岩体的冻融损伤

评价, 不同尺度空间对应的研究方法及其评价机制存在显著不同, 从跨尺度角度出发建立微观-细观-宏观岩体冻融损伤内在关联, 必须寻求贯穿岩体本质特征的主线。基于岩体结构内在特征, 并充分考虑冻融因素与之关联的水、热等环境因素, 应是进行多尺度关联研究的基础构想。

因此, 本文尝试提出 2 条岩体冻融损伤多尺度研究主线: (1) 基于“冻融环境-岩体结构控制”的岩体冻融损伤多尺度表征思路; (2) 基于岩体冻融损伤识别的多尺度研究思路。详述如下:

主线 1 认为: 岩体冻融损伤过程受冻融环境和岩体结构的双重控制。冻融环境包括 2 个主要因素, 一是液态水的赋存和运移条件; 二是温度的变化条件。岩体结构由宏观的节理、裂隙、结构面等, 细观的孔隙、微裂隙等, 以及微观的微缺陷等组成, 包含微观、细观和宏观初始损伤。

冻融环境决定了冻融损伤发生位置和深度, 造成了冻融损伤在空间上的局部化特征。液态水在岩体内部往往不是均匀分布, 其运移受岩体结构面网络连通性的控制, 其赋存状态还受结构面空间封闭性的影响。冻融损伤只可能发生于含水的结构面中。温度的影响范围则决定了冻融作用发生的深度。在冻融影响深度内的含水节理或裂隙可作为研究岩体冻融损伤的控制性结构面。因此, 考虑冻融环境的控制作用可将冻融损伤的研究范围限定于控制性结构面, 即实现了宏观冻融损伤的局部化。

在上述基础上, 岩体的结构则控制了细、微观的冻融损伤过程。在控制性结构面端部, 冻融损伤的研究应着眼于微观过程, 如裂隙尖端水分子的吸附、离子交换、分子键的断裂、矿物的水化等。裂隙端部的微观冻融损伤导致了裂隙的扩展, 进而改变了宏观的裂隙结构。在控制性结构面周边的岩块即为多孔岩石, 含有大量的细观初始损伤。多孔岩石的冻融损伤受其细观结构的控制。在冻融作用下孔隙和微裂隙等细观结构扩展、连通为宏观裂隙, 同样会改造宏观的裂隙结构。综上所述, 冻融环境决定了岩体冻融损伤在宏观上的局部化, 而岩体结构则进一步决定了细、微观的冻融损伤过程。

主线 2 认为: 冻融损伤评价核心在于对于冻融损伤状况的精细化识别及定量表征, 构建一套标准化多尺度损伤识别体系。其通过明确不同尺度下冻融损伤识别方法及对应评价标准, 将是认知岩体冻融损伤的重要路径。

据此, 笔者建议宏观尺度冻融损伤的识别应以

原位测试为主, 推荐考虑采用电阻率层析成像技术 (ERT) 对岩体未冻水含量的精确判定, 其基于电阻率对液态水的强敏感特征, 可有效识别含水裂隙分布位置及冻胀演化特征, 继而较好判定岩体内对冻融效果反馈明确的控制性裂隙; 而局部性冻融宏观损伤、细观冻融损伤识别推荐以 CT 技术为主, 辅之以核磁共振技术, 其可有效实现岩体结构与含水状态的双重识别, 通过二者的互相印证与方法补充, 明确冻融过程中损伤在孔隙、微裂纹中的演化规律。此外, 对 CT、核磁共振图像中水、冰、岩的准确识别及量化表征也是后期必须重点关注的方向; 而微观冻融损伤识别推荐以扫描电镜技术为主, 以核磁共振技术为辅。其核心在于分析冻融过程中岩体微结构损伤特征及演化规律, 通过关注冻融诱发岩体内晶格错位、开裂、延展破坏, 实现对微观尺度下冻融损伤类型鉴别、损伤演化过程实时观测, 为冻融损伤宏观特征对比提供对照。基于以上系统化多尺度识别思路, 实现对岩石冻融损伤机制的全方位揭示。

## 8 结 论

(1) 损伤尺度及损伤识别尺度问题是研究岩体冻融多尺度损伤的两大关键问题; 本文定量界定岩体微观、细观、宏观尺度及其对应尺度下的损伤典型特征, 并明确了各自对应的损伤识别基准量及对应识别手段。

(2) 冻融微观损伤识别主要基于扫描电镜技术开展, 但目前多采用定性描述, 而将定量分析结果用于冻融损伤演化过程研究尚不充分。而发展扫描电镜冻融损伤实时检测及识别剔选技术, 是开展岩石冻融损伤微、细观跨尺度机制分析的重要发展方向。

(3) CT 技术用于岩石(岩体)细观损伤无损识别已取得显著进展, 笔者团队曾尝试建立基于 CT 识别的岩石冻融细观损伤评价方法及理论模型, 从 CT 识别技术对冻融损伤识别发展而言, 针对 CT 图像结果定量化识别应是未来发展重点。

(4) NMR 技术近年在岩石细、宏观冻融损伤的识别中的优势已初现端倪, 其对岩石初始孔隙结构特征测量、冻融损伤演化过程分析具有显著优势。基于 NMR 技术的岩石冻融损伤特性及系统化理论建立是后期本领域应重点的关注方向。

(5) 冻融宏观损伤现多基于宏观唯象损伤理论表征, 其核心在于采用何种基准量定义损伤变量。

对应宏观损伤识别方法包括破坏性测试和无损识别两类；岩石冻融宏观力学损伤特性及理论模型研究方兴未艾，但对存在宏观缺陷的裂隙岩体，核心在于关注裂隙本身，考虑与冻融密切相关的储水空间状况、补水通道、温度影响位置等因素。

(6) 岩体冻融损伤问题实质上兼具多场耦合与多尺度特征，关注岩体冻融损伤识别、评价需要关注以上双重特性。冻融环境下岩体多尺度损伤识别核心在于实现：直观揭示损伤的扩展过程、损伤变量准确定义。图像型结果定量化分析、二维图像的三维重构、损伤识别的智能化应是本领域研究的三大重要发展方向。

(7) 从跨尺度角度出发建立微观 - 细观 - 宏观岩体冻融损伤内在关联，须寻求贯穿岩体本质特征的主线。现尝试提出：① 基于“冻融环境 - 岩体结构控制”的岩体冻融损伤多尺度表征思路；② 基于岩体冻融损伤识别的多尺度研究思路。

### 参考文献(References):

- [1] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993, 1(1): 14 - 18.(SUN Guangzhong. On the theory of structure-controlled rockmass[J]. Journal of Engineering Geology, 1993, 1(1): 14 - 18.(in Chinese))
- [2] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 1 - 3.(ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: Hydraulic and Water Power Press, 1990: 1 - 3.(in Chinese))
- [3] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 冻融循环作用下单裂隙类砂岩局部化损伤效应及端部断裂特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 562 - 570.(SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Localized damage effects of quasi-sandstone with single fracture and fracture behaviors of joint end under cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 562 - 570.(in Chinese))
- [4] 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2): 3 049 - 3 055.(JIA Hailiang, LIU Qingbing, 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): 3 049 - 3 055.(in Chinese))
- [5] 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): 3 489 - 3 499.(YAN Xidong, LIU Hongyan, XING Chuangfeng, et al. Constitutive model research on freezing-thawing damage of rock based on deformation and propagation of micro-cracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3 489 - 3 499.(in Chinese))
- [6] RODRÍGUEZ P, ARAB P B, CELESTINO T B. Characterization of rock cracking patterns in diametral compression tests by acoustic emission and petrographic analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 83(3): 73 - 85.
- [7] WALDER J, HALLET B. A theoretical model of the fracture of rock during freezing[J]. Geological Society of America Bulletin, 1985, 96(3): 336 - 346.
- [8] WALDER J S, HALLET B. The physical basis of frost weathering: toward a more fundamental and unified perspective[J]. Arctic and Alpine Research, 1986, 18(1): 27 - 32.
- [9] GILPIN R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. Water Resources Research, 1980, 16(5): 918 - 930.
- [10] MURTON J B, COUTARD J P, LAUTRIDOU J P, et al. Physical modelling of bedrock brecciation by ice segregation in permafrost[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2001, 12(3): 255 - 266.
- [11] VLAHOU I, WORSTER M G. Ice growth in a spherical cavity of a porous medium[J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(196): 271 - 277.
- [12] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Transactions of the Faraday society, 1961, 57(5): 1 541 - 1 551.
- [13] 赵明阶. 裂隙岩体在受荷条件下的声学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 238.(ZHAO Mingjie. A study on ultrasonic properties of crack rockmass under loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 238.(in Chinese))
- [14] 李杰, 王明洋, 张宁, 等. 裂隙岩体动态损伤演化与体积扩容方程[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1 532 - 1 541.(LI Jie, WANG Mingyang, ZHANG Ning, et al. An equation for damage development and volumetric dilation of cracked rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1 532 - 1 541.(in Chinese))
- [15] 任建喜. 冻结裂隙岩石加卸载破坏机理 CT 实时试验[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 641 - 644.(REN Jianxi. Real-time CT test of damage failure mechanism of frozen cracked rock in loading and unloading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 641 - 644.(in Chinese))
- [16] 孙广忠. 岩体结构力学[J]. 地球科学进展, 1992, 7(1): 87 - 89.(SUN Guangzhong. Rock mass structural mechanics[J]. Advance in Earth Sciences, 1992, 7(1): 87 - 89.(in Chinese))
- [17] GOODMAN R E, SHI G. Block theory and its application to rock engineering[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985: 2 - 4.
- [18] HORII H, NEMAT-NASSER S. Overall moduli of solids with microcracks: load-induced anisotropy[J]. Journal of the Mechanics and

- Physics of Solids, 1983, 31(2): 155 - 171.
- [19] 陈 莉, 徐 军, 陈 晶. 扫描电子显微镜显微分析技术在地球科学中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(9): 1 347 - 1 358. (CHEN Li, XU Jun, CHEN Jing. Applications of scanning electron microscopy in earth sciences[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(9): 1 347 - 1 358.(in Chinese))
- [20] 杨更社. 岩石损伤检测技术及其进展[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(6): 47 - 55.(YANG Gengshe. Advances and development of damage measurement technique of rock[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2003, 23(6): 47 - 55.(in Chinese))
- [21] 李先炜, 兰勇瑞, 邹俊兴. 岩石断口分析[J]. 中国矿业学院学报, 1983, 12(1): 15 - 21.(LI Xianwei, LAN Yongrui, ZOU Junxing. A study of rock fractures[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1983, 12(1): 15 - 21.(in Chinese))
- [22] 谢和平. 大理岩微观断裂的分形(fractal)模型研究[J]. 科学通报, 1989, 34(5): 365 - 368.(XIE Heping. Study on the fractal model of marble meso-fracture[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(5): 365 - 368.(in Chinese))
- [23] 左建平, 周宏伟, 谢和平, 等. 温度和应力耦合作用下砂岩破坏的细观试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1 477 - 1 482.(ZUO Jianping, ZHOU Hongwei, XIE Heping, et al. Meso-experimental research on sandstone failure behavior under thermal-mechanical coupling effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1 477 - 1 482. (in Chinese))
- [24] WRIGHT J S. The spalling of overgrowths during experimental freeze-thaw of a quartz sandstone as a mechanism of quartz silt production[J]. Micron, 2000, 31(6): 631 - 638.
- [25] THOMACHOT C, JEANNETTE D. Evolution of the petrophysical properties of two types of Alsatian sandstone subjected to simulated freeze-thaw conditions[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2002, 205(1): 19 - 32.
- [26] MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J, BENAVENTE D, GOMEZ-HERAS M, et al. Non-linear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38(1): 443 - 454.
- [27] 刘成禹, 何满潮, 王树仁, 等. 花岗岩低温冻融损伤特性的实验研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2005, 20(1): 37 - 40.(LIU Chengyu, HE Manchao, WANG Shuren, et al. Experimental investigation freeze-thawing damage characteristics of granite at low temperature[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science, 2005, 20(1): 37 - 40.(in Chinese))
- [28] 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): 1 688 - 1 694. (ZHANG Jizhou, MIAO Linchang, YANG Zhenfeng. 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): 1 688 - 1 694.(in Chinese))
- [29] 项 伟, 王 琰, 贾海梁, 等. 冻融循环条件下岩体 - 喷层结构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1 819 - 1 826. (XIANG Wei, WANG Yan, JIA Hailiang, et al. Model test study of rock-shotcrete layer structure under freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1 819 - 1 826.(in Chinese))
- [30] 黄 勇. 高寒山区岩体冻融力学行为及崩塌机制研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2012.(HUANG Yong. Research on freeze-thaw mechanical behavior of rock mass and collapse formation mechanism along the highway located in alpine and strong earthquake regions[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.(in Chinese))
- [31] 方 云, 乔 梁, 陈 星, 等. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2 433 - 2 442.(FANG Yun, QIAO Liang, CHEN Xing, et al. Experimental study of freezing-thawing cycles on sandstone in Yungang grottos[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2 433 - 2 442.(in Chinese))
- [32] 贾海梁, 项 伟, 谭 龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 879 - 895.(JIA Hailiang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 879 - 895.(in Chinese))
- [33] JIA H L, XIANG W. Direct observation of the pore structure of sandstone after repeated frost action[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20(20): 11 611 - 11 624.
- [34] 贾海梁, 项 伟, 申艳军, 等. 冻融循环作用下岩石疲劳损伤计算中关键问题的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 335 - 346. (JIA Hailiang, XIANG Wei, SHEN Yanjun, et al. Discussion of the key issues within calculation of the fatigue damage of rocks subjected to freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2): 335 - 346.(in Chinese))
- [35] JIA H, XIANG W, KRAUTBLATTER M. Quantifying rock fatigue and decreasing compressive and tensile strength after repeated freeze-thaw cycles[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, 26(4): 368 - 377.
- [36] 黄树华. 岩石力学研究中 AE 和 CT 装置的应用——介绍日本京都大学岩石力学研究近况[J]. 岩土力学, 1989, 10(1): 83 - 86.(HUANG Shuhua. The research of rock mechanics with apparatuses of acoustic emission and computer tomography[J]. Rock and Soil Mechanics,

- 1989, 10(1): 83 - 86.(in Chinese))
- [37] KAWAKATA H, CHO A, YANAGIDANI T, et al. The observations of faulting in Westerly granite under triaxial compression by X-ray CT scan[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 151.e1 - 151.e12.
- [38] RUIZ DE ARGANDOÑA V G, RODRIGUEZ REY A, CELORIO C, et al. Characterization by computed X-ray tomography of the evolution of the pore structure of a dolomite rock during freeze-thaw cyclic tests[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 1999, 24(7): 633 - 637.
- [39] OHTANI T, NAKASHIMA Y, MURAOKA H. Three-dimensional miarolitic cavity distribution in the Kakkonda granite from borehole WD-1a using X-ray computerized tomography[J]. Engineering Geology, 2000, 56(1): 1 - 9.
- [40] GOODWIN A K, O'NEILL M A, ANDERSON W F. The use of X-ray computer tomography to investigate particulate interactions within opencast coal mine backfills[J]. Engineering Geology, 2003, 70(3): 331 - 341.
- [41] 杨更社, 谢定义. 煤岩体损伤特性的 CT 检测[J]. 力学与实践, 1996, 18(2): 19 - 20.(YANG Gengshe, XIE Dingyi. CT test of damage characteristics of coal rock[J]. Mechanical and Practice, 1996, 18(2): 19 - 20.(in Chinese))
- [42] 杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测[J]. 西安: 陕西科学出版社, 1998: 1 - 90.(YANG Gengshe, ZHANG Changqing. Rock mass damage and its test[J]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998: 1 - 90.(in Chinese))
- [43] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤特性的 CT 识别[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(01): 48 - 54.(YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing, et al. CT identification of rock damage properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(01): 48 - 54.(in Chinese))
- [44] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279 - 285.(YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing. The quantitative analysis of distribution regulation of CT values of rock damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 279 - 285.(in Chinese))
- [45] 杨更社, 谢定义. 岩石单轴受力 CT 识别损伤本构关系的探讨[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 29 - 34.(YANG Gengshe, XIE Dingyi, The discussion about damage constitutive relation of rock under uniaxial stress identified by CT[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2): 29 - 34.(in Chinese))
- [46] 杨更社, 刘 慧. 基于 CT 图像处理技术的岩石损伤特性研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 463 - 468.(YANG Gengshe, LIU Hui. Study on the rock damage characteristics based on the technique of CT in age processing[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 463 - 468.(in Chinese))
- [47] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin. A real-in-time ct triaxial testing study of meso-damage evolution law of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [48] 任建喜, 葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425 - 431.(REN Jianxi, GE Xiurun. Study of rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 425 - 431.(in Chinese))
- [49] 陈蕴生, 李 宁, 李爱国, 等. 非贯通节理介质细观损伤演化的 CT 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 702 - 706.(CHEN Yunsheng, LI Ning, LI Aiguo, et al. Analysis on meso-damage process of non-interpenetraed jointed media by using CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 702 - 706.(in Chinese))
- [50] 简 浩, 朱维申. 类节理岩体单轴压缩损伤演化的 CT 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 1): 2 115 - 2 120.(JIAN Hao, ZHU Weishen. Real-time ct testing on damage propagation law of jointed rock-like material under uniaxial compact[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.1): 2 115 - 2 120.(in Chinese))
- [51] 作彦卿, 丁卫华. 压缩条件下岩石密度损伤增量的 CT 动态观测[J]. 自然科学进展, 2000, 10(9): 830 - 835.(WU Yanqing, DING Weihua, PU Yibin. CT dynamic observation of rock density damage increment under compress[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(9): 830 - 835.(in Chinese))
- [52] 赵阳升, 孟巧荣, 康天合, 等. 显微 CT 试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 28 - 34.(ZHAO Yangsheng, MENG Qiaorong, KANG Tianhe, et al. Micro-CT experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and engineering, 2008, 27(1): 28 - 34.(in Chinese))
- [53] 王家禄, 高 建, 刘 莉. 应用 CT 技术研究岩石孔隙变化特征[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 887 - 893, 897.(WANG Jialu, GAO Jian, LIU Li. Porosity characteristics of sandstone by X-ray CT scanning system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 887 - 893, 897.(in Chinese))
- [54] 张全胜, 杨更社, 高广运, 等. X 射线 CT 技术在岩石损伤检测中的应用研究[J]. 力学与实践, 2005, 27(6): 11 - 19.(ZHANG



- Quansheng, YANG Gengshe, GAO Guangyun, et al. Review on application of X-RAY computerized tomography(CT) to rock damage measurement[J]. *Mechanics in Engineering*, 2005, 27(6): 11 - 19.(in Chinese)
- [55] 杨更社, 张长庆. 冻融循环条件下岩石损伤扩展研究初探[J]. *西安矿业学院学报*, 1999, 19(2): 97 - 100.(YANG Gengshe, ZHANG Changqing. Initial discussion on the damage propagation of rock under the frost and thaw condition[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, 1991, 19(2): 97 - 100.(in Chinese))
- [56] 刘 慧, 杨更社, 贾海梁, 等. 裂隙(孔隙)水冻结过程中岩石微观结构变化的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2 516 - 2 524.(LIU Hui, YANG Gengshe, JIA Hailiang, et al. Experimental study on meso-structure of rock in the process of crack(pore) water freezing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2 516 - 2 524.(in Chinese))
- [57] 刘 慧, 杨更社, 叶万军, 等. 基于 CT 图像的冻结岩石冰含量及损伤特性分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(4): 912 - 919.(LIU Hui, YANG Gengshe, YE Wanjun, et al. Analysis of ice content and damage characteristics of frozen rock based on pseudo-color enhanced CT image[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4): 912 - 919.(in Chinese))
- [58] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 大坂山隧道围岩冻融损伤的 CT 分析[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 206 - 210.(LAI Yuanming, WU Ziwang, ZHU Yuanlin, et al. CT analysis of frost damage of the surrounding rocks of a tunnel in the Daban mountain[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 206 - 210.(in Chinese))
- [59] 任建喜. 冻结裂隙岩石加卸载破坏机理 CT 实时试验[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(5): 641 - 644.(REN Jianxi. Real-time CT test of damage failure mechanism of frozen cracked rock in loading and unloading condition[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(5): 641 - 644.(in Chinese))
- [60] 张淑娟, 赖远明, 苏新民, 等. 风火山隧道冻融循环条件下岩石损伤扩展室内模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(24): 4 105 - 4 111.(ZHANG Shujuan, LAI Yuanming, SU Xinming, et al. A laboratory study on the damage propagation of rocks under freeze-thaw cycle condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(24): 4 105 - 4 111.(in Chinese))
- [61] PARK J, HYUN C U, PARK H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(2): 555 - 565.
- [62] DE KOCK T, BOONE M A, DE SCHRUYVER T, et al. A pore-scale study of fracture dynamics in rock using X-ray micro-CT under ambient freeze-thaw cycling[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(5): 2 867 - 2 874.
- [63] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(1): 30 - 34.(ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 30 - 34.(in Chinese))
- [64] 杨更社, 刘 慧. 基于 CT 图像处理的冻结岩石微观结构及损伤力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 234 - 236.(YANG Gengshe, LIU Hui. Microstructure and damage mechanical characteristics of frozen rock based on CT image processing[M]. Beijing: Science Press, 2016: 234 - 236.(in Chinese))
- [65] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1 - 3.(XIAO Lizhi. NMR technology logging and its application on rock engineering[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1 - 3.(in Chinese))
- [66] 李杰林. 基于核磁共振技术的寒区岩石冻融损伤机理试验研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2012.(LI Jielin. Experiment study on deterioration mechanism of rock under the conditions of freezing-thawing cycles in cold regions based on NMR technology[PhD Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2012.(in Chinese))
- [67] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 731 - 737.(ZHOU Keping, LI Jielin, XU Yujuan, et al. Experimental study of NMR characteristics in rock under freezing and thawing cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 731 - 737.(in Chinese))
- [68] 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): 1 208 - 1 214.(LI Jielin, ZHOU Keping, ZHANG Yamin, et al. Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1 208 - 1 214.(in Chinese))
- [69] 周科平, 张亚民, 李杰林, 等. 冻融花岗岩微观损伤演化的核磁共振[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(8): 3 384 - 3 389.(ZHOU Keping, ZHANG Yamin, LI Jielin, et al. Granite microstructure deterioration characteristic under condition of freezing-thawing based on NMR technology[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(8): 3 384 - 3 389.(in Chinese))
- [70] 李杰林, 周科平, 柯 波. 冻融后花岗岩孔隙发育特征与单轴抗压强度的关联分析[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1 783 - 1 789.(LI Jielin, ZHOU Keping, KE Bo. Association analysis of pore development characteristics and uniaxial compressive strength property of granite

- under freezing-thawing cycles[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1 783 - 1 789.(in Chinese))
- [71] KACHANOV L M. Time of the rupture process under creep conditions[M]. [S. l.]: Isv. Akad. Nauk SSR, 1958: 26 - 31.
- [72] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 565 - 3 570.(XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 565 - 3 570.(in Chinese))
- [73] 谢和平, 董毓利. 经典损伤定义中的“弹性模量法”探讨[J]. 力学与实践, 1997, 19(2): 1 - 5.(XIE Heping, DONG Yuli. Research on plastic modulus method for classical damage mechanical definition[J]. Mechanical and Practice, 1997, 19(2): 1 - 5.(in Chinese))
- [74] 唐春安, 徐小荷. 缺陷的演化繁衍与 Kaiser 效应函数[J]. 地震研究, 1990, 13(2): 203 - 213.(TANG Chunan, XU Xiaohe. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect function[J]. Journal of Seismological Research, 1990, 13(2): 203 - 213.(in Chinese))
- [75] 赵明阶, 徐 蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 720 - 722.(ZHAO Mingjie, XU Rong. The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 720 - 722.(in Chinese))
- [76] AMITRANO D, GRUBER S, GIRARD L. Evidence of frost-cracking inferred from acoustic emissions in a high-alpine rock-wall[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 341 - 344: 86 - 93.
- [77] 李术才, 许新骥, 刘征宇, 等. 单轴压缩条件下砂岩破坏全过程电阻率与声发射响应特征及损伤演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 14 - 23.(LI Shucai, XU Xinji, LIU Zhengyu, et al. Electrical resistivity and acoustic emission response characteristics and damage evolution of sandstone during whole process of uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 14 - 23.(in Chinese))
- [78] 金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 循环冲击下波阻抗定义岩石损伤变量的研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1 385 - 1 393.(JIN Jiefang, LI Xibing, YIN Zhiqiang, et al. A method for defining rock damage variable by wave impedance under cyclic impact loadings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1 385 - 1 393.(in Chinese))
- [79] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. Engineering Geology, 1968, 2(5): 315 - 323.
- [80] YAVUZ H, ALTINDAG R, SARAC S, et al. Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(5): 767 - 775.
- [81] BAYRAM F. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83(12): 98 - 102.
- [82] KHANLARI G, SAHAMIEH R Z, ABDILOR Y. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of Upper Red Formation sandstones, central part of Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 75(4): 1 - 13.
- [83] 张慧梅, 杨更社. 冻融岩石损伤劣化及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1 756 - 1 762.(ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Experimental study of damage deterioration and mechanical properties for freezing hawing rock[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1 756 - 1 762.(in Chinese))
- [84] 唐江涛, 裴向军, 裴 钻, 等. 冻融循环作用下岩石的损伤研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 101 - 105.(TANG Jiangtao, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. Study on rock injured in freeze thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(27): 101 - 105.(in Chinese))
- [85] 刘成禹, 何满潮, 王树仁, 等. 花岗岩低温冻融损伤特性的实验研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2005, (1): 37 - 40.(LIU Chengyu, HE Manchao, WANG Shuren, et al. Experimental investigation freeze thawing damage characteristics of granite at low temperature[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science, 2005, (1): 37 - 40.(in Chinese))
- [86] 吴安杰, 邓建华, 顾 乡, 等. 冻融循环作用下泥质白云岩力学特性及损伤演化规律研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3 065 - 3 072.(WU Anjie, DENG Jianhua, GU Xiang, et al. Research on mechanical properties and damage evolution law of argillaceous dolomite under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3 065 - 3 072.(in Chinese))
- [87] 张慧梅, 张蒙军, 谢祥妙, 等. 冻融循环条件下红砂岩物理力学特性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(1): 69 - 74.(ZHANG Huimei, ZHANG Mengjun, XIE Xiangmiao, et al. The experimental study on the physical and mechanical properties of red sandstone under the action of freeze-thaw cycles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(1): 69 - 74.(in Chinese))
- [88] 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): 1 775 - 1 782.(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): 1 775 - 1 782.(in Chinese))
- [89] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 岩体冻融疲劳损伤模型与评价指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1 116 - 1 127.(LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Fatigue damage model and evaluation index of rock mass under freezing-thawing cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,

- 34(6): 1 116 - 1 127.(in Chinese))
- [90] 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, 39(8): 1 444 - 1 452.(ZHANG Huimei, XIE Xiangmiao, PENG Chuan, et al. Constitutive model for damage of freeze-thaw rock under three-dimensional stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1 444 - 1 452.(in Chinese))
- [91] 刘泉声, 康永水, 黄兴, 等. 裂隙岩体冻融损伤关键问题及研究状况[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 971 - 978.(LIU Quansheng, Kang Yongshui, Huang Xing, et al. Critical problems of freeze-thaw damage in fractured rock and their research status[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 971 - 978.(in Chinese))
- [92] MATSUOKA N, MURTON J. Frost Weathering: Recent advances and future directions[J]. Permafrost and Periglac. Process, 2008, 19(1): 195 - 210.
- [93] NAKAMURA D, GOTO T, SUZUKI T, ITO Y. Basic Study on the frost heave pressure of rocks-dependence of the location of frost heave on the strength of the rock[C]// Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment, ASCE, 2012: 124 - 133.
- [94] 李宁, 张平, 段庆伟, 等. 裂隙岩体的细观动力损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 579 - 1 584.(LI Ning, ZHANG Ping, DUAN Qingwei, et al. Dynamic meso-damage model of jointed rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1 579 - 1 584.(in Chinese))
- [95] 刘泉声, 康永水, 刘小燕. 冻结岩体单裂隙应力场分析及热-力耦合模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 217 - 223.(LIU Quansheng, KANG Yongshui, LIU Xiaoyan, Analysis of stress field and coupled thermo-mechanical simulation of single-fracture frozen rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 217 - 223.(in Chinese))
- [96] 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): 2 307 - 2 315.(LI Xinping, LU Yani, WENG 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, 32(11): 2 307 - 2 315.(in Chinese))
- [97] 刘波, 刘念, 李东阳, 等. 含冰软弱面的冻结裂隙红砂岩的强度试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 843 - 849.(LIU Bo, LIU Nian, LI Dongyang, et al. Strength test on frozen cracked red sandstone combined with ice[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 843 - 849.(in Chinese))
- [98] 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, 32(增 1): 521 - 529.(SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, 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, 32(Supp.1): 521 - 529.(in Chinese))
- [99] 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): 1 106 - 1 120.(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): 1 106 - 1 120.(in Chinese))
- [100] 杨卫. 细观力学和细观损伤力学[J]. 力学进展, 1992, 22(1): 1 - 9.(YANG Wei. Meso-mechanics and meso-damage mechanics[J]. Advances in Mechanics, 1992, 22(1): 1 - 9.(in Chinese))
- [101] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4): 1 - 9.(XIE Heping, GAO Feng, ZHOU Hongwei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(4): 1 - 9.(in Chinese))
- [102] 李建胜, 王东, 康天合. 基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构算法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1 703 - 1 708.(LI Jiansheng, WANG Dong, KANG Tianhe. Algorithmic study on rock pore structure based on micro-CT experiment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1 703 - 1 708.(in Chinese))
- [103] 黄家国, 许开明, 郭少斌, 等. 基于 SEM、NMR 和 X-CT 的页岩储层孔隙结构综合研究[J]. 现代地质, 2015, (1): 198 - 205.(HUANG Jianguo, XU Kaiming, GUO Shaobin, et al. Comprehensive Study on Pore Structures of Shale Reservoirs Based on SEM, NMR and X-CT[J]. Geoscience, 2015, (1): 198 - 205.(in Chinese))
- [104] 黄宏伟, 李庆桐. 基于深度学习的盾构隧道渗漏水病害图像识别[J]. 岩石力学与工程学报, DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0552.(HUANG Hongwei, LI Qingtong. Water leakage image recognition of shield tunnel by deep learning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0552.(in Chinese))
- [105] 程国建, 刘丽婷. 深度学习算法应用于岩石图像处理的可行性研究[J]. 软件导刊, 2016, 15(9): 163 - 166.(CHEN Guojian, LIU Liting. Feasibility study of the application of deep learning method in processing of rock images[J]. Software Guide, 2016, 15(9): 163 - 166.(in Chinese))