

引用格式: 侯圣山, 何箫, 孟宪森, 等. 2024. 基于岩石 CT 扫描的冻融作用对花岗岩细观结构及力学强度影响研究 [J]. 地质力学学报, 30 (3): 462-472. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022126

Citation: HOU S S, HE X, MENG X S, et al., 2024. Mesostructure and strength characteristics of granite under freeze-thaw cycles based on CT scanning [J]. Journal of Geomechanics, 30 (3): 462-472. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022126

基于岩石 CT 扫描的冻融作用对花岗岩细观结构及力学强度影响研究

侯圣山^{1,2,3}, 何箫^{1,4}, 孟宪森^{1,4}, 陈亮^{1,2,3}, 冯振^{1,2,3}, 刘明学^{1,2,3},
李昂^{1,2,3}, 郭长宝⁵, 吉锋⁴

HOU Shengshan^{1,2,3}, HE Xiao^{1,4}, MENG Xiansen^{1,4}, CHEN Liang^{1,2,3}, FENG Zhen^{1,2,3}, LIU Mingxue^{1,2,3},
LI Ang^{1,2,3}, GUO Changbao⁵, JI Feng⁴

1. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
2. 自然资源部四川雅安地质灾害野外科学观测研究站, 四川 雅安 625099;
3. 自然资源部地质灾害智能监测与风险预警工程技术创新中心, 北京 100081;
4. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
5. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. *Chinese Institute of Geological and Environmental Monitoring, Beijing 100081, China;*
2. *Observation and Research Station of Geological Hazard in Ya'an, Sichuan, Ministry of Natural Resources, Ya'an 625099, Sichuan, China;*
3. *Technology Innovation Center for Geohazard Monitoring and Risk Early Warning, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu 610059, Sichuan, China;*
5. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

Mesostructure and strength characteristics of granite under freeze-thaw cycles based on CT scanning

Abstract: [Objective] With the rapid increase in construction projects in the western regions in recent years, the impact of seasonal freeze-thaw cycles in the high-altitude areas of western China has become more pronounced. Conducting research on the microscopic characteristics and strength degradation properties of rocks under freeze-thaw cycles is crucial for guiding engineering construction in these cold, high-altitude regions. [Methods] To study the influence of freeze-thaw cycles on rock structure and mechanical properties, we collected diorite samples from a tunnel in the Kangding area and examined the effects of freeze-thaw cycles on their microstructure and mechanical characteristics. Firstly, thin rock sections were observed under a polarizing microscope to obtain mineral compositions and microstructures. Then, CT scanning technology was used to scan the granite samples after freeze-thaw cycles, and the scanned layers were binarized using threshold segmentation. The scanning images of different layers were binarized using threshold segmentation, and high-resolution 3D data and images of the internal and external structures of the samples were obtained by stacking the binary image layers. Fractal theory was applied to calculate the box-counting dimension of the images and quantitatively assess their complexity. This analysis allowed us to examine the evolution and distribution characteristics of the internal structure of granite under freeze-thaw cycles. [Results] Under a polarizing microscope, the rock exhibits a block-like structure with a

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3000505, 2021YFB2301304); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221748)

This research is financially supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFC3000505 and 2021YFB2301304) and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20221748).

第一作者: 侯圣山 (1977-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害调查监测研究。Email: 26198334@qq.com

收稿日期: 2022-11-04; 修回日期: 2023-10-11; 录用日期: 2023-10-16; 网络出版日期: 2023-11-07; 责任编辑: 吴芳

patchy, coarse-grained, and unequal-grained granite texture, with locally visible metasomatic worm structures. The main phenocryst minerals are alkaline feldspar. Other minerals range in size from 0.25 to 4.0 mm and primarily include quartz, plagioclase, and alkaline feldspar. Secondary minerals include biotite and epidote, while accessory minerals comprise apatite, zircon, and pyrite. Microscopically, the rock is identified as porphyritic, coarse-grained, and unequal-grained biotite diorite granite. Freeze-thaw cycles were applied to the granite samples in the laboratory to study the strength evolution and explore the relationship between structural evolution and strength. The results indicate that the freeze-thaw cycle effect leads to an overall increase in the internal porosity of the granite's microstructure, though the rock's permeability changes minimally, with an increase of only $0.003 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The internal pore development is uneven, primarily due to the emergence of new micropores, causing changes in the overall structure of the sample. After freeze-thaw cycles, the complexity of the internal structure of the rock decreases, but the overall integrity remains good, with the fractal dimension staying at a high level. Fractal analysis shows that 20 freeze-thaw cycles do not cause significant changes in the structural complexity of granite. However, the overall mechanical properties of the sample decline, viscosity increases, and long-term strength shows significant attenuation, raising the strain threshold for entering the creep test stage. **[Conclusion]** When evaluating the safety of rocks with dense primary structures, considering only their structure may lead to deviations from the actual situation. It is essential to combine necessary strength indicators for a comprehensive evaluation. After undergoing freeze-thaw cycles, rocks tend to exhibit more significant deformation while maintaining lower strength. Therefore, appropriate treatments are required for construction in high-altitude areas. **[Significance]** This study provides a reference for applying fractal theory to the evolution of rock microstructure and the relationship between rock microstructure and strength evolution. It also offers valuable guidance for engineering construction in high-altitude and cold regions.

Keywords: freeze-thaw cycle; threshold segmentation; CT model; fractal dimension; structural evolution; long-term strength

摘要: 近年来随着西部地区的基础工程建设数量及规模不断增加, 西部高原地区的季节性冻融循环效应的影响也随之增强, 开展冻融循环作用下岩石细观特性及强度劣化性质研究对指导西部寒区基础工程建设至关重要。首先在偏光显微镜下对岩石薄片进行观察, 获取岩石的矿物成分和微结构; 接着利用 CT 扫描技术, 对冻融后的花岗岩进行扫描, 对扫描图层利用阈值分割进行二值化处理, 堆叠得到样品内外结构的高分辨 3D 数据及影像; 结合分形理论计算图像计盒维数并由此对图像复杂度做出量化判断, 由此对冻融循环对花岗岩内部结构演化分布特点进行分析; 进而揭示其强度演化规律, 探究结构演化与强度之间的关系。偏光显微镜下, 岩石呈块状构造, 具有似斑状粗粒不等粒花岗结构, 局部见交代蠕虫结构。似斑晶矿物主要为碱性长石; 其他矿物粒径 0.25~4.0 mm 为主, 矿物成分主要为石英、斜长石、碱性长石, 次要矿物为黑云母、绿帘石, 副矿物有磷灰石、锆石、黄铁矿等, 镜下鉴定为似斑状粗粒不等粒黑云二长花岗岩。CT 扫描显示, 冻融循环效应在影响花岗岩细观结构时, 会导致花岗岩内部孔隙率的整体上升, 但岩石渗透性变化不大, 岩石渗透率仅上升 $0.003 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 内部孔隙发育不均匀, 试样整体结构改变以萌生较多新的微孔隙为主。冻融循环后岩石内部结构复杂度有所下降, 但岩石整体完整性仍然较好, 分形维数仍保持在较高水平。分形研究显示, 20 次冻融循环并未导致花岗岩的结构复杂度发生较大变化, 同时试样整体力学特性出现下降, 黏性增加以及长期强度出现较大幅度的衰减, 进入蠕变试验阶段的应变阈值提高。在评价此类原生结构较致密的岩石的安全性时, 仅从结构上进行考量与实际情况往往会出现偏差, 应结合必要的强度指标综合评估。岩石在经历冻融循环后, 在强度更低的同时会发生更大的变形。该研究可为分形理论在岩石细观结构演化方面的应用及岩石细观结构与强度演化相关研究提供借鉴, 并对高寒地区工程施工有指导意义。

关键词: 冻融循环; 阈值分割; CT 模型; 分形维数; 结构演化; 长期强度

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 03-0462-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022126

0 引言

近年来随着西部地区的基础工程建设数量及规模不断增加,西部高原地区的季节性冻融循环效应的影响也随之增强,这对工程建设,尤其是隧道围岩稳定性提出了更高的要求。因此,开展冻融循环作用下花岗岩的细观特性及强度劣化性质研究对指导西部寒区基础工程建设至关重要。

岩石在冻融循环效应的作用下,细观结构会发生一系列变化,而在寒区工程建设中,细观结构对于岩体强度有着极大的影响。高精度CT扫描作为一种获取试样内部细观结构的基本技术手段,得到了广泛的应用,但在实际研究当中,仅从CT扫描结果无法直观地获得研究结论,往往需要与其他技术手段相结合进行多维度的分析论证。针对此问题,国内外学者对于岩石细观结构的演化规律以及相关的分析方法进行了诸多研究(Tian and Han, 2017; 延恺等, 2018; Xia et al., 2019; 刘惠民等, 2020; 戚利荣等, 2021; 张艳博等, 2021; 朱楚雄等, 2021; Shan et al., 2022; 戴俊等, 2022; 张慧梅等, 2022; 张慧梅和王云飞, 2022; 张光明, 2023),研究构建出以高精度CT扫描为主要技术手段,以CT扫描为基础,与神经网络、数值分析、3D打印、分形理论等技术手段结合,探讨岩石在各物理场、化学场拟合条件下的细观结构演化规律的方法体系。

岩石的强度降低与结构变化存在着明确的联系。张超等(2023)、郝志远(2022)在室内试验基础上,结合统计损伤理论,建立了一套岩石脆延转化统计损伤本构模型,以优化损伤变量参数的形式将微观结构的变化与岩石力学强度结合。在物理场耦合条件下岩石的微观结构的损伤研究方向上,于洪雯等(2021)、缪澄宇等(2021)分别从微波辐射、含水率等耦合方向对岩石结构与强度之间的关系做出了研究(蔡沛辰等, 2021)。杨鸿锐(2022)指出岩石冻融劣化的主要原因是未冻水迁移、积聚,水分结晶膨胀导致岩石孔隙扩展、联通,提出温度区间是影响冻融损伤的关键性因素。

以上研究大多是在常规条件下针对岩石结构或者力学性质展开探讨,分布在高寒地带的花岗岩存在普遍的冻融循环劣化效应,近年来花岗岩等岩石对于冻融循环效应敏感性的研究需求逐步体现,花岗岩具有原始结构致密,岩石强度较高等特点,

而现有对于冻融循环条件下岩石力学特性的研究多以砂岩等冻融循环敏感性较高的岩石种类为主,针对高寒地区的花岗岩缺乏针对性较强的冻融循环力学特性研究及微观特征分析,其冻融条件下结构演化与强度之间的关系还不够明确。

因此,文章以川西地区某隧道花岗岩为研究对象,利用CT扫描技术,对冻融后的花岗岩进行扫描,对扫描图层利用阈值分割进行二值化处理,堆叠得到样品内外结构的高分辨3D数据及影像。结合分形理论计算图像计盒维数并由此对图像复杂度做出量化判断,由此对冻融循环对花岗岩内部结构演化分布特点进行分析。在此基础上,结合传统力学试验,揭示其强度演化规律,探究结构演化与强度之间的关系。

1 测试仪器及试验方案

在青藏高原地区,随着海拔的攀升,季节交替导致的冻融循环效应十分显著。考虑到研究对象在冻融环境下的代表性,在康定地区某隧道采集了二长花岗岩样品,研究冻融循环对细观结构和力学特征的影响,样品取自隧道施工开挖出的新鲜岩块,整体结构致密,完整性较好,风化程度低,原始结构面不发育。

依照《水利水电工程岩石试验规程(SL/T264-2020)》,岩样加工为50 mm×100 mm标准圆柱试样。

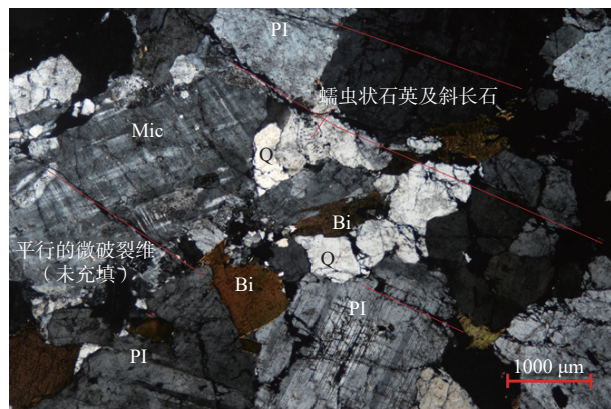
1.1 岩石薄片鉴定

参照《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130.9—2006),选用现场新鲜岩样切割制成薄片,通过偏光显微镜,鉴定岩石样本矿物的组成及其特征,显微照片和鉴定结果如图1所示。

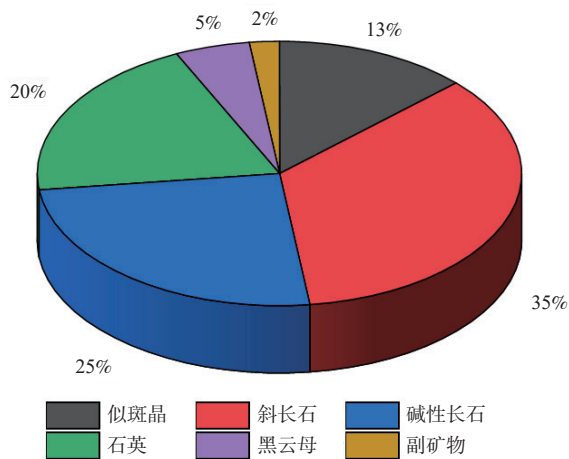
由图1可知,岩石呈块状构造,具有似斑状粗粒不等粒花岗结构,局部见交代蠕虫结构。似斑晶矿物主要为碱性长石;其他矿物粒径0.25~4.0 mm为主,矿物成分主要为石英、斜长石、碱性长石(微斜长石、条纹长石),次要矿物为黑云母、绿帘石,副矿物有磷灰石、锆石、黄铁矿。岩石总体较为完整,但可见有一组平行发育的微裂隙,为岩石中的劈理面,基本未充填;定性为:似斑状粗粒不等粒黑云二长花岗岩。

1.2 冻融循环试验方案

依据《工程岩体试验方法标准》(GBT 50266—2013),试样冻融前,先在真空条件下对试样进行48小时的强制饱水。饱水后,利用DBD-5型全自动



(a) 岩石薄片图像



(b) 岩石中矿物成分比例饼图

Q—石英; PI—斜长石; Bi—黑云母; Mic—微斜长石

图 1 花岗岩薄片及矿物组成

Fig. 1 Thin section and mineral composition of the granite sample (a) Microscopic image of thin section; (b) Pie chart of mineral composition

Q—quartz; PI—plagioclase; Bi—biotite; Mic—microcline

冻融循环机进行冻融循环试验(图 2), 冻融循环次数设定为 20 次。冻融循环过程中, 试样处于无约束状态。样品采集地的年最低气温能达到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最高温度可达到 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此, 在确定温度区间时, 为保证试验效果且能达到研究区温度要求, 初步设定冻融循环温度区间为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 每次循环 9 小时, 降温 0.5 小时, 保持 4 小时, 接着升温 0.5 小时, 保持 4 小时, 达到循环次数后, 机器回到常温, 试验结束, 循环路径如图 3 所示。

从宏观上看, 对比未进行冻融的花岗岩试样, 20 次冻融的花岗岩试样整体形态上无太大变化, 试样整体完好, 表面无裂痕产生, 仅存在极少许片状剥落。

1.3 计算机层析扫描 (CT) 试验

CT 扫描实验采用 nanoVoxel-4000 系列微纳米



图 2 全自动冻融循环机

Fig. 2 Automatic freeze-thaw cycling machine

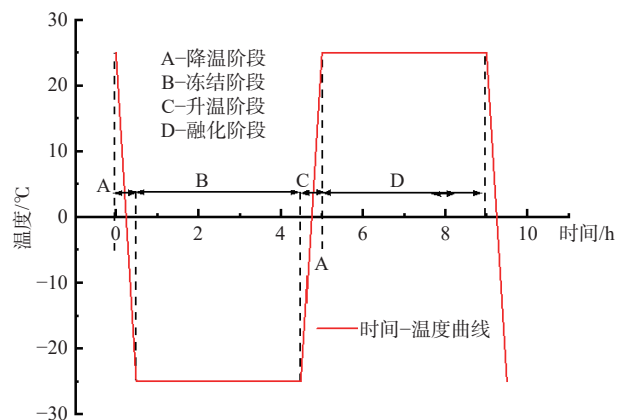


图 3 冻融循环路径

Fig. 3 Freeze-thaw cycle path

高分辨 CT 扫描仪, 结构如图 4 所示, 其最高分辨率可达到 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。为了对试样微观结构进行详细的观察, 此次扫描试验预设层数为 2500 层。试样分层如图 5, 底层编号为 0, 顶部编号为 2500。

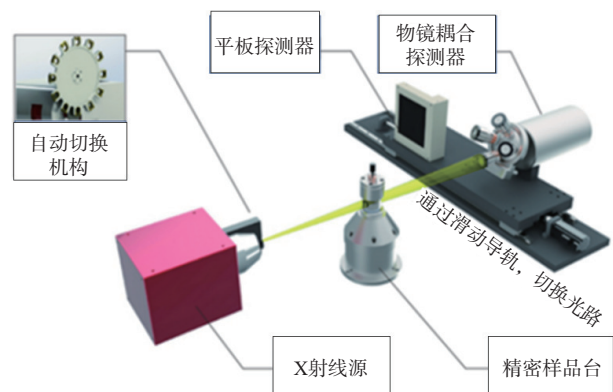


图 4 CT 扫描仪内部结构

Fig. 4 Internal structure of CT scanner

CT 扫描试验中, 样品内部结构的相对密度与 CT 图像的灰度成正相关, 扫描后得到试样的灰度

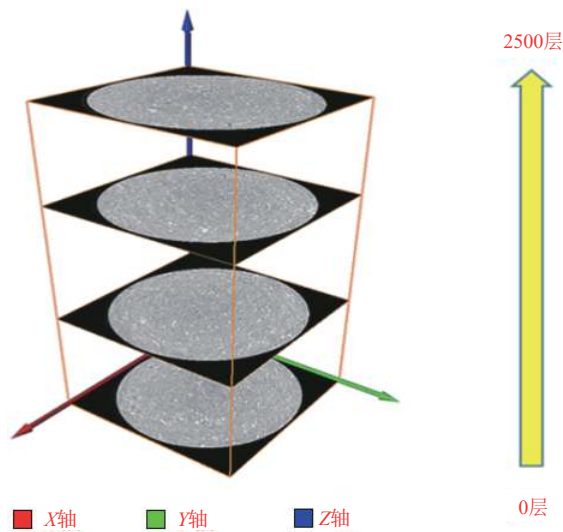


图5 花岗岩试样扫描分层

Fig. 5 Scanning stratification of granite samples

四视图,通过灰度能直观地观察样品内部孔隙及颗粒分布特征,密度大的岩石颗粒以亮点显示,密度较小的孔隙结构则由暗点显示,由于肉眼无法准确察觉灰度图像中的微小变化,因此对得到的灰度图像进行RGB通道渲染处理,使得深色部分更为突出,得到处理后的图像如图6所示。

通过观察图6,在试样经历20次冻融循环试验

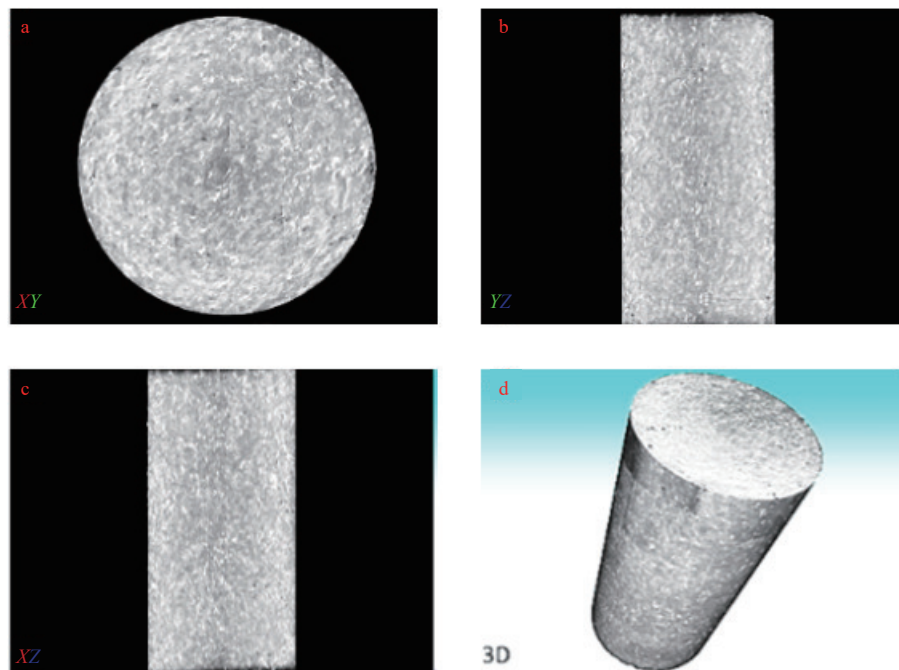
后,试样有一定程度的孔隙分布,在XY平面,孔隙分布较为均匀,整个圆形面上皆有分布,孔隙直径0.1~0.6 mm。相对较大的孔隙主要分布于图像XY面中上部。从YZ以及XZ平面中,也存在少许孔隙分布,花岗岩在冻融循环过程中出现小规模表面剥落以及颗粒脱落现象。

1.4 岩石力学试验

张尧等(2008)认为岩石蠕变是围岩变形失稳的重要原因之一,室内蠕变试验具有能够长期观测、较严格控制试验条件、重复次数多等优点。

对冻融前后的花岗岩试样分别进行了单轴压缩试验,三轴压缩试验以及基于三轴抗压强度进行的卸荷蠕变试验以探究冻融循环对花岗岩力学性质的影响。试验平台为成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研发的YSJ-01-00型岩石三轴蠕变试验机(图7),其轴向荷载范围0~600 kN,围压范围0~30 MPa,满足此次试验的需求。

结合单轴压缩试验结果得到花岗岩冻融前后基本力学参数(表1)。可以看出,在经历20次冻融循环后,花岗岩的各物理参数均存在一定程度的降低,单轴抗压强度降幅为16.9%。



a—俯视图; b—正视图; c—左侧视图; d—立体图

图6 试样灰度四视图

Fig. 6 Four-view grayscale of the sample

(a) Top view; (b) Front view; (c) Left view; (d) 3D stereogram



图 7 力学试验加载平台
Fig. 7 Mechanical test loading platform

表 1 花岗岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of granite

冻融循环次数	泊松比	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa
0	0.19	11.2	106
20	0.22	10.4	88

2 基于 CT 图像的岩石细观及孔隙特征分析

2.1 CT 图像二值化图像处理

为了能够对试样内部孔隙与岩石颗粒的分布特点进行定量分析,参考现有研究成果(王慧琴, 2021; 刘天舒等, 2022; 李茂民和邹臣嵩, 2022),采用阈值分割法对 CT 扫描模型进行二值化处理。其原理为: 设定灰度值阈值 α , 若图像中某像素点的灰度值小于该阈值, 则将该像素灰度值设置为 0 或 225, 否则设置为 225 或 0。二值化处理函数表达式如式 1。

$$f(X, Y) = \begin{cases} 0 & X < \alpha \\ 225 & X > \alpha \end{cases} \quad (1)$$

对每一层 CT 层面利用阈值分割方法进行二值化处理, 再按照层面编号由下至上堆叠, 便得到二值化处理后的 CT 扫描模型, 对模型中孔隙部分进行染色, 得到图 8 冻融循环 20 次后试样二值化处理后的 CT 立体模型, 蓝色部分对应模型中的孔隙。

通过二值化 CT 模型, 可以看出试样内部整体孔隙分布较为广泛, 孔隙直径处于较低水平, 孔隙在试样内部集中度高于试样外围, 试样内部分布较多微孔隙。考虑到试样由整体均一性较好的岩块切割而成, 该现象的出现只与后续试验相关, 因此, 该现象与冻融循环效应有着紧密联系。

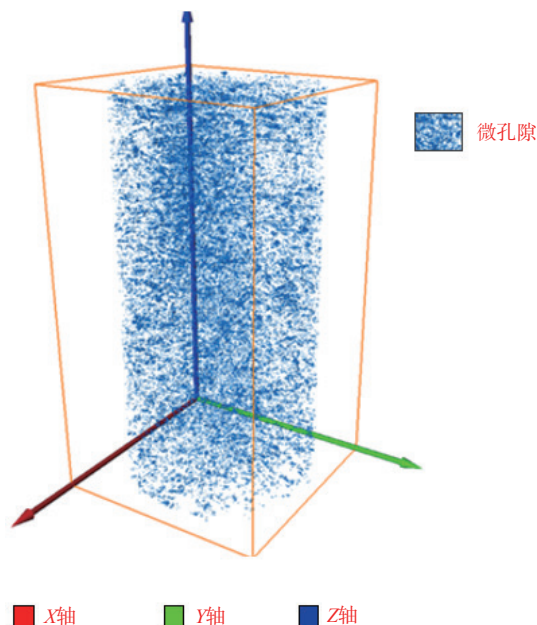


图 8 二值化处理后的 CT 立体模型
Fig. 8 CT stereo model after binarization processing

2.2 基于 CT 图像的岩石孔隙率分析

基于图 8 的立体模型, 利用计算机进行计算得到试样逐层孔隙率, 冻融循环 20 次后的花岗岩试样中, 孔隙占试样的总体积为 0.134%。整体孔隙率处于较低水平, 且从 CT 立体模型来看, 几乎不存在孔隙的贯通。为了进一步分析 Z 轴方向孔隙的分布规律, 对每一 CT 扫描层进行孔隙率统计, 得到 Z 方向逐层面孔隙率, 示于图 9。

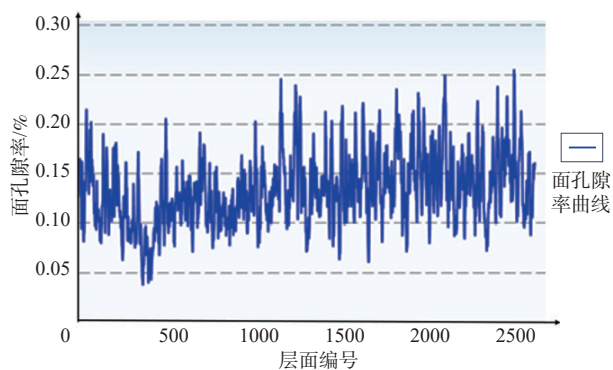


图 9 试样 Z 方向逐层面孔隙率
Fig. 9 Surface porosity of each layer in Z direction of the sample

冻融循环后试样渗透率为 $0.023 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 岩石渗透水平小幅增加但仍处于较低水平, 因此在 0 至 20 次冻融循环期间岩石内部孔隙贯通程度较低, 同时冻融循环后试样内部孔隙平均孔喉半径为 $0.015 \mu\text{m}$, 最大孔喉半径为 $0.053 \mu\text{m}$, 与 CT 模型显示的孔隙以微小孔隙的结论一致。为了进一步分析 Z 轴方

向孔隙的分布规律,对每一 CT 扫描层进行孔隙率统计,得到 Z 方向逐层面孔隙率,示于图 9。

分析图 9 数据,逐层孔隙率随着层面编号的增加,整体呈现出逐渐上升的趋势,这与 CT 立体模型中蓝色标记密集度分布规律保持较好的一致性。试样孔隙率最高层出现在 2436 层,达到 0.254%。此外,曲线走势在 24 层、1223 层、2436 层出现三次峰值。据此,结合图 7、图 8、表 1 可以推断,冻融循环效应在影响花岗岩微观结构时,会导致花岗岩内部孔隙率的整体上升,与此同时,在花岗岩原始孔隙或者结构面相对密集的部位,冻融循环效应的影响更为显著。随着冻融循环次数的增加,最有可能于孔隙率较高的部位率先形成贯通的结构面(田彦德, 2019),在此次试验中体现于试样底部,以及中上部最可能率先发生结构面的贯通。

2.3 基于分形理论的岩石微观结构分析

2.3.1 岩石计盒维数的计算

分形理论运用连续维度的思路对物体属性及状态进行描述,分形维数已发展成为描述物体复杂度的重要参数,而分形维数又可分 Hausdorff 维数 DH 、相似维数 DS 、信息维数 Di 等(李后强和汪富泉, 1992; 乔力江汉和何克焜, 2021; 张子涵等, 2022)。此次研究使用的计盒维数为 Hausdorff 维数的等价位数。

计盒维数的计算思路为选取半径为 D 的盒子将图像中的非孔隙部分全部覆盖,所需要的最小盒子数量为 N_d ,对二者进行公式拟合,使其满足如下关系(张慧梅等, 2022)。

$$N_d = A \times D^B \quad (2)$$

其中, A 、 B 为参数。

对式(2)进行变形,得到

$$B = -\frac{\ln N_d}{\ln D} + \frac{\ln A}{\ln D} \quad (3)$$

其中, $\frac{\ln N_d}{\ln D}$ 以及 $\frac{\ln A}{\ln D}$ 即为计盒维数。

2.3.2 分形维数分析

参考 Matlab 图形处理领域相关研究成果(郝凯越等, 2020),进行 Matlab 程序编程,利用程序提取图像二值化后的二维矩阵数据,利用 fraclab 插件进行不同半径 D 下的盒数 N_d 的数目统计,根据 D 值的不同,可以得到多个不同的 N_d 数目,然后在双对数坐标系下画出数据对,利用最小二乘法对数据进行拟合,得到一元一次函数的斜率 k ,其相反数即为图

像的计盒维数。利用 fraclab 拟合得到的 20 次冻融循环花岗岩试样的 N_d - D 曲线如图 10 所示。

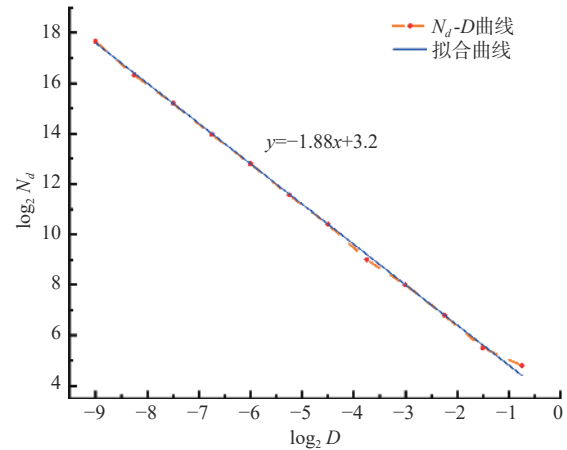


图 10 20 次冻融循环花岗岩试样的 N_d - D 曲线

Fig. 10 N_d - D curve of granite samples after 20 freeze-thaw cycles

在图 10 中的红色曲线为二分法拟合的一次函数,其斜率的相反数为 1.88,两条曲线拟合度较高,说明花岗岩表面均具有典型的分形特征,该冻融试样图像的计盒维数为 1.88。横向对比现有对花岗岩的分形研究(谢韬, 2013; 李德建, 2010; 樊水龙, 2020),完整度较好的花岗岩计盒维数一般处于 1.85~1.95 之间。此次试验冻融循环 20 次的花岗岩试样,其内部结构有轻微劣化,复杂度出现小幅降低,但试样整体完整度仍然较好。CT 图像表明冻融过后,试样内部新萌生较多微孔隙,但岩石分形维数虽出现小幅降低但仍保持在较高水平,说明微孔隙的萌生,对岩石结构复杂度的影响较小。由此推断,低次数冻融循环会使得花岗岩类致密岩石内部萌生微小孔隙,但对整体结构复杂度影响较小,随着冻融循环的继续进行,出现微孔隙不断聚集连通现象时,试样内部复杂度可能会出现较大幅度的下降。

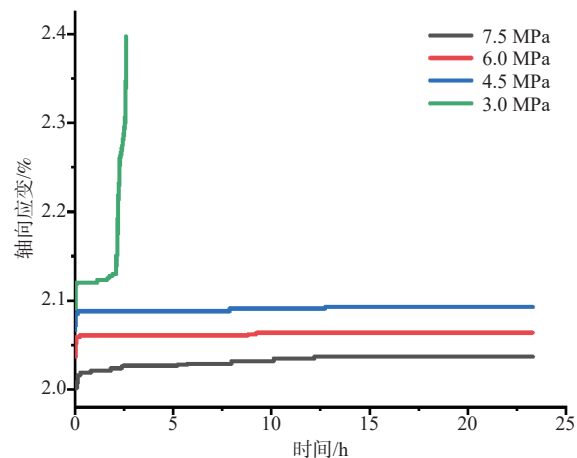
3 冻融循环作用下强度特征演化

3.1 花岗岩卸荷蠕变特征

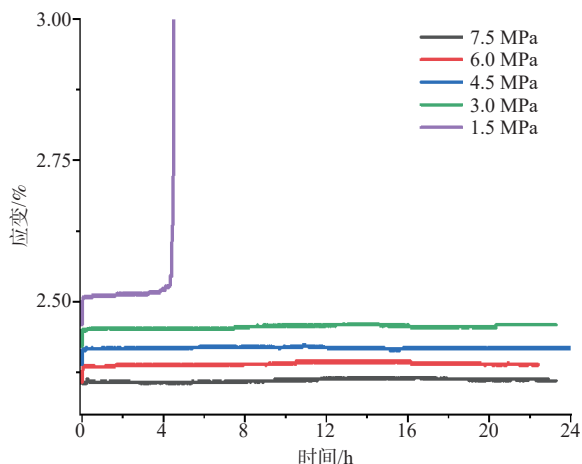
赵娜等(2023)认为岩石蠕变破裂是由岩石内部围观破裂逐渐向宏观发展的过程。因此,为了探究研究区花岗岩结构演化与强度变化的特点,开展花岗岩卸荷蠕变试验。

在常规三轴试验的基础上,取三轴抗压强度的 75% 作为固定轴向荷载开展卸荷蠕变试验,以契合边坡及隧道的卸荷工况,为保证试样能在 3~5 级荷

载时破坏,且围压卸荷梯度有一定幅度,确定试验初始围压为 7.5 MPa,围压卸荷梯度为 $\Delta\sigma=1.5$ MPa,每级荷载保持 24 h,直到试样发生破坏。得到 20 次冻融前后花岗岩试样卸荷蠕变曲线如图 11 所示。



(a) 冻融前



(b) 20次冻融循环后

图 11 冻融前后花岗岩卸荷蠕变时间-应变曲线
Fig. 11 Time-strain curves of unloading creep of granite before and after freeze-thawing
(a) Before freeze-thawing; (b) After 20 freeze-thaw cycles

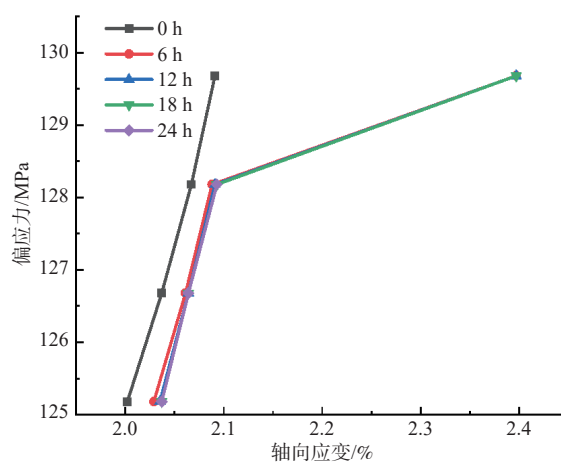
对比冻融前后的花岗岩卸荷蠕变曲线,冻融前试样在第四级荷载发生破坏,冻融后则是在第五级荷载下发生破坏。冻融前试样在轴向应变为 2.12% 时进入加速蠕变,而冻融后试样则是在轴向应变达到 2.52% 时才进入加速蠕变。冻融后的岩石 CT 模型显示,试样在经历冻融循环作用后,内部微孔隙发育较多,使试样在压缩过程具有更大的位移空间,表现为黏性增加,因此进入加速蠕变阶段时相对于冻融前的试样具有较大的应变阈值。

3.2 长期强度分析

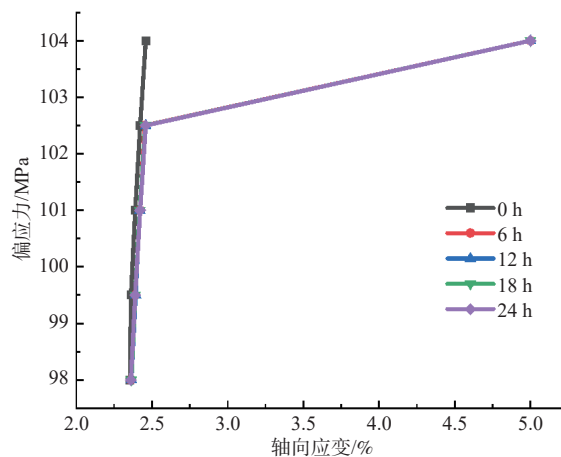
长期强度常作为衡量工程是否长期稳定的重

要指标,对于边坡及隧洞施工有着重大的意义。在蠕变试验中,当附加应力水平大于或等于某一定值时,试样的蠕变变形会随时间逐渐增大,且岩石的蠕变速率会在某一阶段迅速增加,试样最终发生破坏。这个应力水平的临界值就认为是岩石的长期强度 (Innocente et al., 2021; Liu et al., 2022; 唐志强等, 2022)。

结合岩石蠕变试验数据,利用 Boltzmann 线性叠加的方式确定冻融前后花岗岩的长期强度,得到冻融前后花岗岩偏应力-应变曲线如图 12 所示。



(a) 冻融前



(b) 20次冻融循环后

a—冻融前; b—20次冻融循环后
图 12 冻融前后花岗岩偏应力-应变曲线
Fig. 12 Deviatoric stress-strain curve of granite before and after freeze-thawing
(a) Before freeze-thawing; (b) After 20 freeze-thaw cycles

通过观察图 12,可以看出图像走势可分为两部分,一部分是图像左侧斜率较大的部分,另一部分是右侧斜率较小的部分。取曲线走势转折点对应的偏应力水平即为该条件下花岗岩的长期强

度。因此,得到冻融前花岗岩的长期强度分别为 128.21 MPa,冻融后为 102.50 MPa。由此经过 20 次冻融循环后的花岗岩的长期强度会出现一定幅度的衰减,衰减幅度为 20%。

从孔隙率上看,20 次冻融循环后,花岗岩孔隙率虽有小幅上升,但分形维数显示岩石整体完整性仍较好,结构复杂度变化不大。结合岩石 CT 模型中的微孔隙发育特征可以推断,在经历过 20 次冻融循环后,花岗岩内部结构的变化以微小孔隙的发育为主,不伴随大规模的贯通,因此岩石整体孔隙率小幅上升但复杂度不发生较大变化。与此同时,岩石长期强度有着较大幅度的变化,说明微孔隙的产生对花岗岩的力学性质有着较大的影响。

综合上述分析,经历 20 次冻融循环后,岩石试样在更低的偏应力水平下即进入加速蠕变阶段,与此同时,在进入加速蠕变时具有更大的变形量,应变阈值提升 19.3%,即在强度更低的同时会发生更大的变形。而在自然条件下,冻融循环往往是长时间、多次数的,结合 CT 试验,冻融循环后,花岗岩内部会萌生较多对强度影响较大的微小孔隙,因此在几十次甚至上百次的冻融循环条件下,花岗岩的力学性质必然会出现较大幅度的折减,其加速蠕变偏应力阈值会出现较大幅度下降且变形量会明显增大,体现在边坡上即应该警惕冻融循环效应引起的滑坡及危岩体灾害的发生;体现在围岩上,应警惕围岩大变形甚至结构失稳的发生。在冻融循环前期,由于微孔隙的萌生在结构复杂度上未产生宏观影响,但强度会发生劣化,此类边坡及围岩应从岩体结构及强度两方面做好监测工作,预防加速蠕变阶段产生的安全隐患。

4 结论

对采集自川西地区典型地段的花岗岩进行了 20 次冻融循环,利用岩石 CT 层析扫描技术对每次试样分 2500 层进行了层析扫描,利用阈值分割方法对扫描的图像进行二值化处理后,由下到上进行堆叠,建立了精度 0.3 μm 的岩石 CT 扫描三维模型,为研究冻融循环对岩石微观结构的影响提供了基础,主要取得了以下认识。

(1)通过分析 CT 模型内部孔隙分布特征及压汞试验结果,发现冻融循环效应在影响花岗岩微观结构时,会导致花岗岩内部孔隙率的整体上升,但

岩石渗透性变化不大,岩石渗透率仅上升 $0.003 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。内部孔隙发育不均匀,试样整体结构改变以萌生较多新的微孔隙为主。

(2)冻融循环后岩石图像分形计算所得的计盒维数为 1.88,内部结构复杂度有所下降,但岩石整体完整性仍然较好,分形维数仍保持在较高水平。微孔隙的萌生,对岩石结构复杂度的影响较小。对于低次数短时冻融岩石内部结构的分析有一定指导意义。

(3)分形研究显示,20 次冻融循环并未导致花岗岩的结构复杂度发生较大变化,同时试样整体力学特性出现下降,黏性增加以及长期强度出现较大幅度的衰减,进入蠕变试验阶段的应变阈值提高。因此,在评价此类原生结构较致密的岩石的安全性时,仅从结构上进行考量与实际情况往往会出现偏差,应结合必要的强度指标综合评估。

(4)此次研究对象二长花岗岩在经历冻融循环后,在强度更低的同时会发生更大的变形,施工方应从岩体结构及强度两方面做好监测工作,预防加速蠕变阶段可能出现的安全隐患。

References

- CAI P C, QUE Y, LI X, 2021. Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(6): 54-63. (in Chinese with English abstract)
- DAI J, ZHANG M, YANG F, et al, 2022. Study on the mechanical properties of microwave irradiation granite[J]. *Research & Application of Building Materials*(2): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- FAN S L, 2020. Evolution of fractal and mechanical properties of cyclic dry-wet altered granite based on SEM[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 37(3): 102-107. (in Chinese with English abstract)
- HAI W G, 2021. Primary study on stress field characteristics and genetic mechanism of Xianshuihe tectonic belt in western Sichuan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- HAO K Y, LI Y W, ZHANG N, et al, 2020. Application of fractal dimension in SEM image of activated sludge under MATLAB environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 43(7): 22-27. (in Chinese with English abstract)
- HAO Z Y, 2022. Study on mechanical properties of fractured rock considering mesoscopic structure[J]. *Anhui Architecture*, 29(4): 135-136. (in Chinese)
- INNOCENTE J C, PARASKEVOPOULOU C, DIEDERICHS M S, 2021. Estimating the long-term strength and time-to-failure of brittle rocks from laboratory testing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147: 104900.

- JIA H L, XIANG W, SHEN Y J, et al, 2017. 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*, 36(2): 335-346. (in Chinese with English abstract)
- LI D J, JIA X N, MIAO J L, et al, 2010. Analysis of fractal characteristics of fragment from rockburst test of granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(S1): 3280-3289. (in Chinese with English abstract)
- LI H Q, WANG F Q, 1992. Fractal theory and its development[J]. *Studies in Dialectics of Nature*(11): 20-23. (in Chinese)
- LI M M, ZOU C S, 2022. Research on threshold image segmentation method based on improved genetic algorithm[J]. *Software Engineering*, 25(1): 37-40. (in Chinese with English abstract)
- LIU H M, WANG X J, DU Z J, et al, 2020. Study on pore structure characteristics of tight sandstone in Block 4 of the central Junggar Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(1): 96-105. (in Chinese with English abstract)
- LIU H T, QIN J K, ZHOU B, et al, 2022. Effects of curing pressure on the long-term strength retrogression of oil well cement cured under 200°C[J]. *Energies*, 15(16): 6071.
- LIU T S, FANG J D, ZHAO Y D, 2022. Comparative research on image segmentation based target detection method[J]. *Computer Era*(1): 14-18. (in Chinese with English abstract)
- MIAO C Y, YANG L, XU Y Z, et al, 2021. Experimental study on strength softening behaviors and micro-mechanisms of sandstone based on nuclear magnetic resonance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(11): 2189-2198. (in Chinese with English abstract)
- QI L R, WANG J D, ZHANG D F, et al, 2021. A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(5): 65-73. (in Chinese with English abstract)
- QIAO L J H, HE K H, 2021. Research on coal gangue recognition based on fractal dimension and microscopic pore structure[J]. *China Mining Magazine*, 30(9): 120-125. (in Chinese with English abstract)
- QIN Z M, LEI R D, 2023. Characterization of mesoscopic deterioration of sandstone exposed to freeze-thaw cycles[J]. *Mining Research and Development*, 43(8): 132-138. (in Chinese with English abstract)
- SHAN L Q, LIU C Q, LIU Y C, et al, 2022. Rock CT image super-resolution using residual dual-channel attention generative adversarial network[J]. *Energies*, 15(14): 5115.
- TANG Z Q, JI F, XU H H, et al, 2022. Creep characteristics and nonlinear creep damage model of Yanshanian granite in southern Henan[J]. *Science Technology and Engineering*, 22(16): 6421-6429. (in Chinese with English abstract)
- TIAN W, HAN N, 2017. Preliminary research on mechanical properties of 3D printed rock structures[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 40(3): 483-493.
- TIAN Y D, 2019. Triaxial compression strength and fracture development of shale with different initial porosity[J]. *Mineral Engineering Research*, 34(4): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- WANG H Q, 2021. Analysis of image segmentation algorithm based on MATLAB[J]. *New Technology & New Products of China*(19): 1-3. (in Chinese)
- XIA Y X, CAI J C, PERFECT E, et al, 2019. Fractal dimension, lacunarity and succolarity analyses on CT images of reservoir rocks for permeability prediction[J]. *Journal of Hydrology*, 579: 124198.
- XIE T, LI Y G, 2013. Rock surface fractal dimension analysis based on digital camera measurement technology[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 46(3): 345-348, 370. (in Chinese with English abstract)
- YAN K, GU T F, WANG J D, et al, 2018. A study of the micro-configuration of loess based on micro-CT images[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 45(3): 71-77. (in Chinese with English abstract)
- YANG H R, 2022. Study on damage mechanism of glutenite microstructure under freeze-thaw cycles[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 50(7): 22-29. (in Chinese with English abstract)
- YU H W, AN L, LI Y H, et al, 2021. Effect of microwave radiation on pore structure and tensile strength of metagranulite[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 42(10): 1451-1458. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C, YU J, BAI Y, et al, 2023. Statistical damage constitutive model of rock brittle-ductile transition based on strength theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(2): 307-316. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G M, 2023. Research on the stratigraphic characteristics of archean ductile shear zone in Wutai Mountain area[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 49(1): 47-52. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H M, WANG Y F, 2022. Multi-scale analysis of damage evolution of freezing-thawing red sandstones[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 43(8): 2103-2114. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H M, YUAN C, MU N N, et al, 2022. CT image processing and mesoscopic characteristics analysis of freeze-thaw rock[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 42(2): 219-226. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, XIONG L X, 2008. Rock rheological mechanics: present state of research and its direction of development[J]. *Journal of Geomechanics*, 14(3): 274-285. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y B, XU Y D, LIU X X, et al, 2021. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 42(10): 2659-2671. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z H, WEI W, ZHANG J, et al, 2022. Determining method of multiscale fractal dimension of red bed sandstone pores based on CT scanning[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(3): 254-263. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO N, ZHANG Y B, WANG L G, 2023. Experimental study on multi-scale creep rupture evolution of sandstone[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 40(1): 87-95. (in Chinese with English abstract)
- ZHU C X, XU J M, ZHONG C J, 2021. Distributions of various compositions in granite specimen using fully convolutional network[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(1): 127-134. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 蔡沛辰, 阙云, 李显, 2021. 非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 48(6): 54-63.

- 戴俊, 张敏, 杨凡, 等, 2022. 微波照射花岗岩力学性能试验研究[J]. 建材技术与应用(2): 1-6.
- 樊水龙, 2020. 基于SEM的干湿循环蚀变花岗岩分形特征与力学特性演化规律[J]. 长江科学院院报, 37(3): 102-107.
- 郝凯越, 李远威, 张宁, 等, 2020. MATLAB环境下分形维数在活性污泥SEM图像中的应用[J]. 环境科学与技术, 43(7): 22-27.
- 郝志远, 2022. 考虑细观结构的裂隙岩石力学性质研究[J]. 安徽建筑, 29(4): 135-136.
- 李德建, 贾雪娜, 苗金丽, 等, 2010. 花岗岩岩爆试验碎屑分形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 29(S1): 3280-3289.
- 李后强, 汪富泉, 1992. 分形理论及其发展历程[J]. 自然辩证法研究(11): 20-23.
- 李茂民, 邹臣嵩, 2022. 基于改进遗传算法的阈值图像分割方法[J]. 软件工程, 25(1): 37-40.
- 刘惠民, 王学军, 杜振京, 等, 2020. 准中4区块致密砂岩孔隙结构特征研究[J]. 地质力学学报, 26(1): 96-105.
- 刘天舒, 房建东, 赵于东, 2022. 基于图像分割的目标检测方法对比研究[J]. 计算机时代(1): 14-18.
- 缪澄宇, 杨柳, 许永震, 等, 2021. 基于核磁共振监测的砂岩强度软化实验及微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 40(11): 2189-2198.
- 戚利荣, 王家鼎, 张登飞, 等, 2021. 冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究[J]. 水文地质工程地质, 48(5): 65-73.
- 乔力江汉, 何克焱, 2021. 基于分形维数及细观孔隙结构特征的煤矸石识别研究[J]. 中国矿业, 30(9): 120-125.
- 唐志强, 吉锋, 许汉华, 等, 2022. 豫南燕山期花岗岩蠕变特性及非线性蠕变损伤模型[J]. 科学技术与工程, 22(16): 6421-6429.
- 田彦德, 2019. 不同初始孔隙度页岩的三轴压缩强度及裂隙发育规律[J]. 矿业工程研究, 34(4): 40-43.
- 王慧琴, 2021. 基于MATLAB的图像分割算法分析[J]. 中国新技术新产品(19): 1-3.
- 谢韬, 李亚阁, 2013. 基于数字摄影测量技术的岩石表面分形维数研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 46(3): 345-348, 370.
- 延恺, 谷天峰, 王家鼎, 等, 2018. 基于显微CT图像的黄土微结构研究[J]. 水文地质工程地质, 45(3): 71-77.
- 杨鸿锐, 2022. 冻融循环作用下砂砾岩微观结构损伤机制研究[J]. 工程勘察, 50(7): 22-29.
- 于洪雯, 安龙, 李元辉, 等, 2021. 微波辐射对变粒岩孔隙结构及抗拉强度的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 42(10): 1451-1458.
- 张超, 俞缙, 白允, 等, 2023. 基于强度理论的岩石脆延转化统计损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 42(2): 307-316.
- 张光明, 2023. 五台山地区太古界韧性剪切带地层特征研究[J]. 铁道勘察, 49(1): 47-52.
- 张慧梅, 王云飞, 2022. 冻融红砂岩损伤演化多尺度分析[J]. 岩土力学, 43(8): 2103-2114.
- 张慧梅, 袁超, 慕娜娜, 等, 2022. 冻融岩石CT图像处理及细观特征分析[J]. 西安科技大学学报, 42(2): 219-226.
- 张艳博, 徐跃东, 刘祥鑫, 等, 2021. 基于CT的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究[J]. 岩土力学, 42(10): 2659-2671.
- 张尧, 熊良宵, 2008. 岩石流变力学的研究现状及其发展方向[J]. 地质力学学报, 14(3): 274-285.
- 张子涵, 魏文, 张杰, 等, 2022. 基于CT扫描红层砂岩孔隙多尺度分形维数的确定方法[J]. 地质科技通报, 41(3): 254-263.
- 赵娜, 张怡斌, 王来贵, 2023. 砂岩蠕变破裂多尺度演化试验研究[J]. 应用力学学报, 40(1): 87-95.
- 朱楚雄, 徐金明, 钟传江, 2021. 基于全卷积神经网络的花岗岩中不同组分分布特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 32(1): 127-134.