



## 岩石多尺度损伤研究进展

何风贞 李桂臣 阚甲广 许兴亮 冯晓巍 孙元田

### 引用本文:

何风贞, 李桂臣, 阚甲广, 等. 岩石多尺度损伤研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 33-53.

HE Fengzhen, LI Guichen, KAN Jianguang. Research progress on multi-scale damage of rock[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 33-53.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1033>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 考虑空隙影响的岩石统计损伤模型研究

Study on statistical damage model of rock considering void effect

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c4e2f8a1-b5e2-4c91-a92d-698468e32892>

#### 构造煤孔隙结构多尺度分形表征及影响因素研究

Research on multi-scale fractal characteristics of pore structure in tectonic coal and analysis of its influence factors

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 164-174 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f7106e8c-f30c-4839-b8b1-ccb21ec5ad>

#### 煤岩损伤研究的CT扫描技术发展现状及展望

CT Scanning Technology on coal-rock damage: a comprehensive review

煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/173f1c14-ca82-491c-a5d3-9e2d9879eeb6>

#### 超声振动在矿山煤岩致裂中的研究进展与展望

Research progress and prospects of ultrasonic vibration in coal rock fracturing

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 232-243 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-2121>

#### 中国煤层气储层地质与表征技术研究进展

Research progress on coalbed methane reservoir geology and characterization technology in China

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 196-203 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/cd3bec7c-01d5-46d1-a448-8eb611a7b817>

#### 基于原子力显微镜的煤岩微尺度力学性质研究

Study on micro-scale mechanical properties of coal rock based on atomic force microscopy

煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/55c82e10-b7a3-495a-80f6-37b491cc174d>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

何风贞, 李桂臣, 阚甲广, 等. 岩石多尺度损伤研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 33–53.

HE Fengzhen, LI Guichen, KAN Jianguang, *et al.* Research progress on multi-scale damage of rock[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 33–53.

## 岩石多尺度损伤研究进展

何风贞<sup>1</sup>, 李桂臣<sup>1</sup>, 阚甲广<sup>1</sup>, 许兴亮<sup>2</sup>, 冯晓巍<sup>1</sup>, 孙元田<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 岩石损伤破裂是一个从微观到细观到宏观的多尺度链动损伤破裂过程。明确岩石不同尺度损伤特征并建立多尺度损伤的定量化关系对复杂环境下岩石多尺度损伤劣化机理研究至关重要。近年来, 研究人员针对复杂环境下岩石多尺度损伤机理开展大量的研究工作, 并取得了一定的研究成果。本文从岩石多尺度损伤特征、不同尺度损伤识别与定量化表征、多尺度损伤量效关系 3 个方面系统评述了岩石多尺度损伤研究进展。首先, 总结了岩石微观、细观、宏观损伤特征, 分析了岩石多尺度累积损伤破裂过程; 其次, 基于岩石多尺度损伤特征, 系统评述岩石微观、细观和宏观损伤的识别方法以及不同尺度损伤的定量化表征方法, 分析了岩石微观-细观-宏观损伤量效关系确定方法; 最后, 从多尺度损伤识别、定量化表征、量效关系确定方面分析了岩石多尺度损伤研究中存在的不足, 提出了从: 开发适用于多场耦合环境的岩石微细观损伤实时识别设备, 建立岩石三维空间多尺度损伤协同智能化定量表征方法, 构建完善的岩石微-细-宏观多尺度损伤量效关系研究体系, 丰富创新岩石多尺度损伤理论几方面开展岩石多尺度损伤研究。

**关键词:** 岩石力学; 多尺度; 损伤识别; 定量化表征; 量效关系

中图分类号: TU45; TD313 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)10-0033-21

### Research progress on multi-scale damage of rock

HE Fengzhen<sup>1</sup>, LI Guichen<sup>1</sup>, KAN Jianguang<sup>1</sup>, XU Xingliang<sup>2</sup>, FENG Xiaowei<sup>1</sup>, SUN Yuantian<sup>1</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Rock damage and rupture is a multi-scale chain damage rupture process from microscopic to mesoscopic to macroscopic. It is essential to clarify the damage characteristics of rock at different scales and establish the quantitative relationships of multi-scale damage in complex environments. In recent years, researchers have carried out a lot of research work on the multi-scale damage mechanism of rock in complex environments, and achieving certain research results. This paper systematically reviews the research progress of multi-scale damage of rock from three aspects: the characteristics of multi-scale damage of rock, identification and quantitative characterization of damage at different scales, and the quantity-response relationship of multi-scale damage. Firstly, the microscopic, mesoscopic and macroscopic damage characteristics of rock were summarized, and the multi-scale cumulative damage fracture process of rock was analyzed. Secondly, based on the characteristics of multi-scale damage of rock, the identification methods of microscopic, mesoscopic and macroscopic damage of rock and the quantitative characterization methods of damage at different scales were systematically reviewed, and the methods for determining the quantity-response relationship between microscopic, mesoscopic and macroscopic damage of rock were analyzed. Finally, the deficiencies in the research of rock multi-scale damage were analyzed from the aspects of multi-scale damage identification, quantitative characterization, and determination of quantity-response relationship. Proposing to carry out the research on rock multi-scale damage from the following aspects: developing rock micro-meso damage identification equipment highly integrated with the environment, establishing a collaborative intelligent quantitative characterization method for multi-scale damage in the three-dimensional space

收稿日期: 2024-07-15 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2024-1033

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20165, 52174089); 中国博士后科学基金资助项目(2023M733759)

作者简介: 何风贞(1989—), 男, 河南平顶山人, 讲师, 博士。E-mail: fengzhenhe08@hotmail.com

通讯作者: 李桂臣(1980—), 男, 河北衡水人, 教授, 博士。E-mail: liguichen@126.com

of rock, constructing a complete quantity-response relationship for micro-meso-macro rock damage, and enriching and innovating the theory of multi-scale rock damage.

**Key words:** rock mechanics; multi-scale; damage identification; quantitative characterization; quantity-response relationship

## 0 引言

岩石在其形成及赋存过程中,内部形成众多的微细观缺陷<sup>[1-2]</sup>。荷载作用下,岩石原始微观缺陷周围产生应力集中,诱发微观裂纹扩展、贯通和融合,形成细观裂纹。随着损伤累积,岩石微细观结构承载能力劣化,岩石内部产生宏观裂纹引发岩石整体性破裂,最终造成岩体工程失稳破坏<sup>[3-6]</sup>。岩石损伤破裂是从微观到细观到宏观损伤的动态变化过程,其损伤失效具有明显的尺度效应。因此,研究岩石损伤破裂的多尺度特征,探究岩石微观、细观和宏观损伤的内在联系,揭示岩石多尺度损伤劣化机理对复杂环境下岩体工程稳定性控制至关重要。例如,从微观晶胞、细观矿物和宏观岩体多尺度层面研究富水环境下泥质岩体水化崩解过程,掌握泥岩的物理、化学、力学响应特性,为解决泥岩灾变防治和核废料封存工程难题提供理论基础<sup>[7]</sup>;根据岩石内部不同尺度原始缺陷,研究冻融环境下不同尺度缺陷萌发、扩展和融合过程,为高原冻土路基稳定性控制提供理论基础<sup>[2]</sup>。研究深部水力耦合环境下煤岩体多尺度损伤研究特征,能够为深部煤岩注水软化预防冲击地压措施提供理论依据<sup>[8]</sup>。

岩石损伤破裂是从微观到细观到宏观的多尺度损伤累积过程<sup>[9]</sup>。在微观层面上,岩石损伤主要表现为原子和分子尺度损伤,主要损伤形式为原子层间滑移,界面破裂、分子键断裂等<sup>[2,10]</sup>。岩石微观损伤研究主要采用分子动力学、量子力学、扫描电镜、冷冻电镜等对岩石微裂纹尖端在原子层面上的损伤进行识别分析,研究尺度在 $10^{-9} \sim 10^{-6}$  m。在细观层面上,岩石损伤主要是岩石微观损伤累积引发岩石细观裂纹萌发、粘结界面破裂等<sup>[11]</sup>。岩石细观损伤研究主要采用CT扫描、核磁共振、声发射、数值分析等方法对岩石细观裂纹扩展、胶结界面的破裂等进行探测与表征,研究尺度在 $10^{-6} \sim 10^{-3}$  m<sup>[5,12-13]</sup>。在宏观层面上,细观裂纹的扩展贯通在岩石内部形成宏观裂纹,宏观裂纹的快速扩展融合导致岩石发生宏观破裂。已有研究主要是采用CT、超声波、声发射、数字图像相关(DIC)等分析宏观裂纹的扩展,结合宏观力学性能变化对宏观损伤特征进行分析<sup>[14-15]</sup>。

目前,大量的学者对岩石损伤机制及宏观力学

行为进行了深入的研究,相关研究成果为阐明深部复杂应力环境下岩体损伤劣化机制提供了理论基础。但客观地讲,岩石多尺度损伤及链动传递机制仍然是一个黑盒子问题,还存着一些急需解决的问题。首先,岩石多尺度损伤劣化研究相对缺乏,岩石多尺度链动损伤机制不明。岩石多尺度链动损伤是岩石在外部荷载作用下内部损伤从微观到宏观不同尺度损伤相互关联、相关影响的过程。在外部荷载作用下,微观尺度损伤累积促进细观损伤的产生和发展;而细观损伤的累积又进一步影响宏观损伤的演化。岩石从微观到宏观的链动损伤效应使得岩石损伤失效过程具有高度的复杂性和不确定性。研究岩石多尺度链动损伤机制对于理解岩石的破坏过程、预测岩体稳定性以及指导工程实践具有重要意义。但现有研究主要针对某一空间尺度岩石损伤开展,缺少从微观到细观到宏观的系统化研究,岩石多尺度损伤演化过程及损伤传递机制不明确。其次,岩石多尺度损伤量效关系难以确定。岩石多尺度损伤量效关系是岩石从微观损伤转变为细观损伤、从细观损伤转变为宏观损伤的定量化关系,是岩石不同尺度损伤递进演变的定量化表征。明确不同尺度损伤量效关系是探究岩石多尺度损伤演化机制的基础<sup>[2]</sup>。现有研究关注于岩石单一尺度损伤探测与定量化表征,建立了单一尺度岩石损伤演化模型,为岩石损伤定量化分析提供了基础<sup>[16-17]</sup>。但总体上看,岩石多尺度损伤定量化演化关系研究鲜有涉及,多尺度损伤量效关系仍不明确,岩石多尺度损伤本构模型构建缺少理论基础。此外,复杂环境下岩石微细观损伤实时探测难以实现。岩石微细观损伤是荷载作用下岩石内部原生微观缺陷的扩展、融合、贯通,是一个三维动态发展过程,其损伤状态与裂纹尖端应力环境密切相关<sup>[18-19]</sup>。微细观裂纹在受载状态下处于张开状态,卸载后裂纹尖端应力集中程度降低,部分微细观裂纹由张开状态转变为闭合状态。对于岩石微细观损伤探测应以实时探测为主。但受限于探测技术,现有岩石微细观损伤探测主要以非实时观测为主,导致受载状态下岩石微细观损伤特征难以准确识别。

整体而言,现有研究多从单一尺度研究微细观损伤与宏观力学之间的内在联系,缺少从微观到细观到宏观的多尺度系统化研究。在岩石微细观损伤

的精准识别和定量化表征方面还存在一定的困难,多尺度损伤量效关系难以确定,岩石多尺度损伤劣化演化规律仍不明确。因此,为了科学全面揭示岩石多尺度损伤劣化机理,以岩石多尺度损伤精准识别与定量化表征和岩石多尺度损伤量效关系为两大关键科学问题,分析复杂环境下岩石宏观损伤特性,定量表征微细观损伤及其演化规律,确定微观、细观和宏观损伤之间的量效关系,构建包含微细观损伤特性的宏观力学损伤模型,探究岩石宏观力学和微细观损伤劣化特征,揭示复杂环境下岩石损伤劣化多尺度链动机制,为深部复杂环境下岩体稳定性控制及安全评价提供理论基础。

## 1 岩石多尺度损伤特征

工程应力扰动下岩石内部微观颗粒接触断裂,引发微细观裂纹的成核、扩展和融合贯通,最终在岩石内部形成宏观裂纹,导致岩体整体破裂失效<sup>[20-21]</sup>。岩石内部微细观损伤在宏观上表现为岩石不可逆变形累积和宏观力学性能劣化(图1)。从空间尺度上看,应力扰动下岩石的损伤涉及从微观到宏观的跨尺度损伤及不同尺度损伤的耦合,其损伤失效过程具有明显的多尺度特性(图2)。明确岩石微观、细观、宏观损伤特性是岩石多尺度损伤识别与定量化表征的基础。

### 1.1 岩石微观损伤特性

岩石的微观损伤是原子和分子层面损伤累积的外在表现。外部荷载作用下,岩石内部原始微观缺陷附近产生应力集中,引发原始微缺陷(微孔隙,微裂隙)附近原子化学键的断裂,原子产生涨落、滑移及接触面断裂<sup>[22-23]</sup>。随着原子滑移范围的扩展,原

始微缺陷周围矿物颗粒旋转脱落,产生微裂纹<sup>[24]</sup>。外部荷载持续作用下,微裂纹尖端持续扩展、融合、贯通,形成大量的微观裂隙。岩石微观损伤特性研究多采用 SEM 对岩石微观损伤进行定性描述,对岩石微观损伤的定量表征研究相对缺乏,难以对岩石微观损伤特性进行全面科学的分析。在微观力学损伤方面,借助量子力学,分子动力学及纳米压痕测试,一些学者对岩石卸载过程中的微观力学特性进行了探究<sup>[25-27]</sup>。在加载初期,原始微观缺陷周围应力集中程度低,矿物颗粒位置和颗粒黏结强度等保持相对稳定。随着荷载增加,原始微观缺陷周围应力集中程度增加,原子层面出现滑移,矿物颗粒黏结强度和微观弹性模量降低。从整体上看,在外部荷载作用下,原子滑移、涨落,导致矿物颗粒旋转移动,矿物颗粒黏结破坏,产生微裂纹,微观力学参数随着微观损伤累积产生明显的劣化(图3)。

### 1.2 岩石的细观损伤特性

岩石细观损伤是岩石微观损伤累积引发细观裂纹扩展、融合、贯通的过程。外部荷载作用下,细观裂纹尖端形成应力集中,驱使细观裂纹沿结构弱面持续扩展。细观裂纹融合贯通,在局部区域形成细观裂隙网络,导致岩石细观结构产生损伤劣化<sup>[29]</sup>。从细观损伤过程看,岩石细观损伤是从无序到有序的呈序级损伤演化过程<sup>[2,11]</sup>。细观裂纹形成初期,在外部荷载驱动下细观裂隙尖端沿着细观结构弱面扩展,是一种无序扩展形式。随着裂纹尖端扩展,细观裂纹贯通融合,形成区域优势细观裂纹,岩石细观裂纹扩展进入以优势裂纹扩展为主的有序扩展阶段。从损伤形式上看,岩石细观损伤以粘结界面断裂、弱胶结物破裂、孔(裂)隙融合贯通等为主。岩石细观

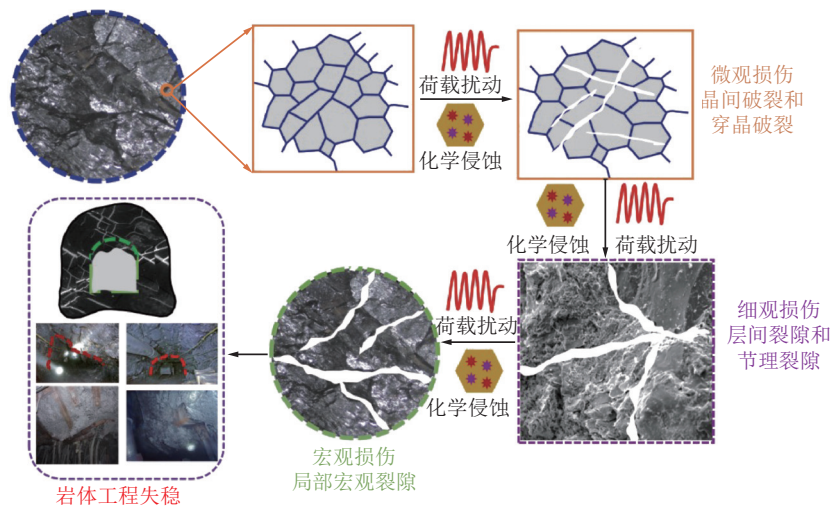
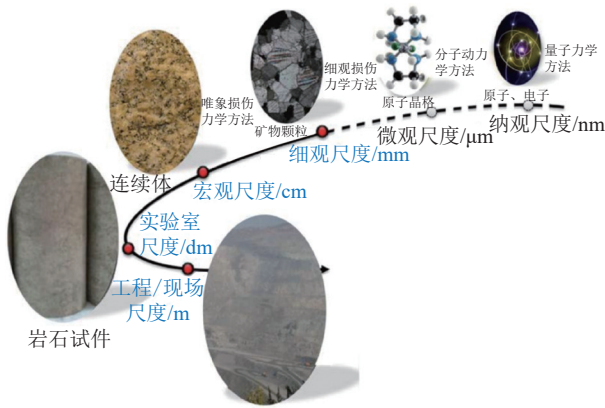
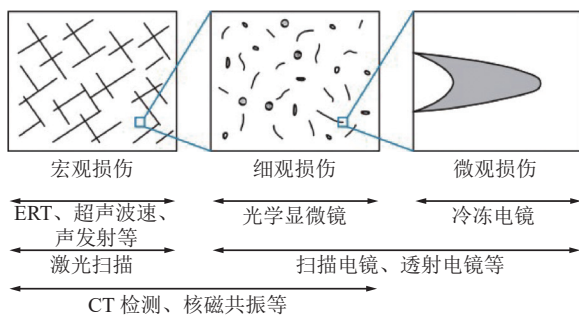


图1 岩石多尺度损伤示意

Fig.1 Schematic diagram of multi-scale damage of rock



(a) 岩石不同尺度和力学损伤研究方法



(b) 岩石多尺度损伤识别方法

图2 岩石不同尺度和力学损伤研究方法  
及多尺度损伤识别方法<sup>[9]</sup>

Fig.2 Different scales of rock and mechanical damage research methods and multi-scale damage identification methods<sup>[9]</sup>

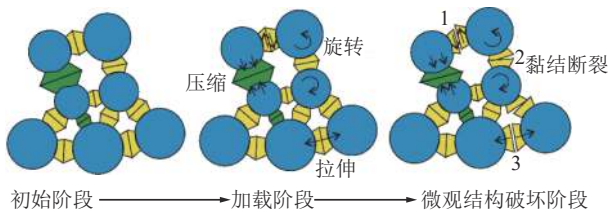


图3 荷载作用下岩石微观损伤示意<sup>[28]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of microscopic damage of rock under load<sup>[28]</sup>

损伤量化表征主要以岩石孔隙度、孔径分布、渗透率和细观力学参数为参量。

岩石细观力学损伤特性与岩性、微细观原始损伤有着密切关系<sup>[30]</sup>。对于坚硬岩石,岩石细观结构整体强度较高,加载初期,细观裂纹扩展速度慢,岩石细观力学损伤不明显。随着损伤累积,细观裂纹扩展速度增加,细观力学特性快速劣化。对于软弱岩石,岩石内部颗粒黏结强度低、原始缺陷较多,细观结构整体强度较低。在加载初期,细观裂纹沿弱胶结面、节理面等快速扩展贯通,岩石细观力学强度明显降低。岩石细观裂纹扩展状况对岩石宏观力学

性改变有着重要的影响。例如,细观裂纹密度变化是导致应力-应变曲线呈现显著非线性的主要原因<sup>[31]</sup>。

### 1.3 岩石的宏观损伤特性

岩石宏观损伤是岩石微细观损伤累积诱发岩石宏观唯象损伤破裂的过程<sup>[32]</sup>。宏观岩石损伤力学认为岩石宏观损伤是一种连续分布形损伤,其损伤特征研究以各种宏观损伤变量的量化分析为主。从宏观结构看,岩石的宏观损伤是岩石内部产生的结构破裂面在宏观层面上的表现。荷载作用下,岩石内部细观裂纹的贯通融合,突破岩石细观结构力限制,在岩石内部形成宏观裂纹,引发岩石整体性破裂<sup>[33]</sup>。岩石宏观损伤最直接的表现是岩石宏观力学的变化。例如岩石的应力-应变曲线由线性增长转变为非线性增长,岩石出现塑性变形等。岩石的宏观累积损伤对岩石物理特性产生显著的影响。例如,岩石的密度、电阻率、超声波波速等随着宏观损伤的产生而发生明显变化。

## 2 不同尺度岩石损伤识别与评价

岩石损伤识别与量化表征是岩石多尺度损伤评价的关键科学问题<sup>[2,34]</sup>。损伤识别方法与岩石损伤尺度匹配程度决定着岩石多尺度损伤识别的准确性,而恰当的岩石损伤量化表征方法是岩石多尺度损伤有效评价的基础<sup>[22]</sup>。因此根据岩石物理化学特性变化特点采用合适的损伤识别方法是岩石多尺度损伤识别的科学途径。岩石损伤量化表征与评价是在岩石损伤精准识别基础上,确定合适的损伤变量,借助统计分析,人工智能算法等手段构建岩石损伤模型,实现对不同尺度岩石损伤的量化表征与评价<sup>[35-36]</sup>。岩石损伤识别主要包含岩石结构损伤和力学损伤识别。岩石结构损伤识别主要借助于声、光、电等物理探测方法对岩石微观、细观和宏观结构损伤进行探测。岩石微细观力学损伤与宏观力学损伤在识别手段上存在明显的区别。岩石宏观力学损伤以连续损伤力学为基础,分析岩石宏观力学参数、应力-应变曲线等变化,研究荷载作用下岩石宏观力学损伤演化规律。岩石微细观力学损伤主要发生在原子、分子和矿物颗粒层面上,难以利用宏观力学研究手段识别岩石微细观力学损伤。因此岩石微细观力学损伤主要借助分子动力学、纳米压痕、微细观损伤力学等方法对岩石微观力学弹性模量、颗粒黏结强度等微细观力学特性进行研究。

### 2.1 岩石微观损伤识别与评价

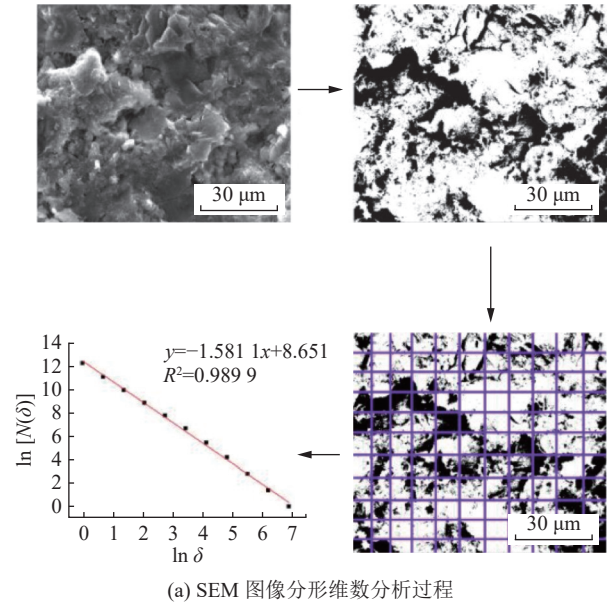
岩石微观损伤研究主要聚焦于岩石微观裂纹尖

端的扩展及其附近物理、化学变化引起的微观结构和力学损伤。例如裂纹尖端矿物颗粒的旋转移动、胶结界面的断裂、微观力学性能劣化<sup>[2,23]</sup>。

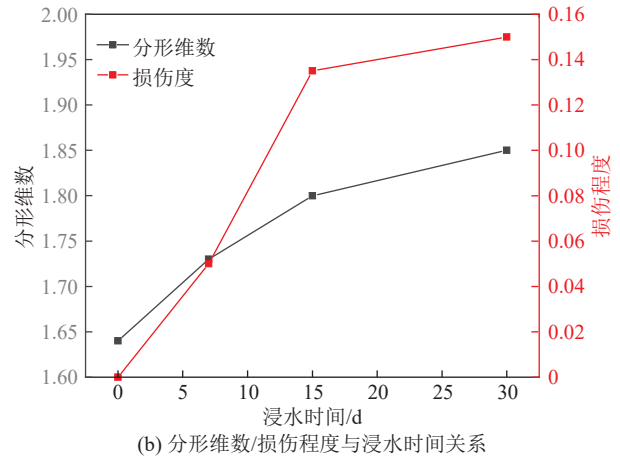
岩石微观结构损伤识别主要借助扫描电子显微镜(SEM)对岩石微观结构损伤进行探测与表征<sup>[37]</sup>。SEM通过聚集电子束对物体表面进行扫描,对同一位置原子尺度到微裂纹尺度损伤进行连续观测,获得其表面形貌的三维立体图像,实现对不同层级岩石微观损伤的探测。同时,SEM成像具有良好的立体效果,能够展现岩石微观断裂形貌、扩展形态等,对岩石微观裂纹扩展分析有着至关重要的作用。现有SEM探测设备能够对纳米级别及以上损伤裂纹进行有效识别,对岩石微观和细观损伤有着良好的探测能力。但是SEM试样制备较为复杂,需要对试样表面进行切割、抛光、喷金等处理。这些复杂处理操作会对岩石试样内部的原有损伤造成破坏,从而影响SEM探测的准确性。

借助SEM探测技术,复杂应力环境下岩石微观损伤演化机制研究取得了显著的成果。尚嘉兰等<sup>[38]</sup>利用SEM技术,分析单轴压缩过程中白岗岩微观裂纹萌生、扩展、融合贯通过程,研究了岩石微细观损伤与岩石宏观力学行为的关系,从微观损伤层面揭示了岩爆发生机理。GAUTAM<sup>[39]</sup>等利用SEM分析了高温影响下岩石内部微观裂纹的扩展形式,明确了温度场中沿晶裂纹和穿晶裂纹的扩展方向,获得高温下岩石微观裂纹扩展规律。以上研究主要基于SEM探测结果对岩石微观损伤进行定性分析,利用SEM对岩石微观损伤进行定量分析的研究相对缺乏。一些学者在SEM岩石微观损伤量化评价方面进行了有益尝试。贾海梁等<sup>[40]</sup>借助数字图像处理技术对冻融条件下砂岩SEM图像进行处理,分析了砂岩微观孔隙结构和微观损伤形式,并提出了以岩石微观结构损伤为变量的“特征损伤冻融单元”,实现了冻融环境下岩石微观损伤的量化分析。XU等<sup>[41]</sup>借助分形理论对不同含水状态石膏石微观结构进行分析,以分形维数为参量构建了石膏石微观损伤变量,实现了岩石微观损伤的量化分析(图4)。岩石微观损伤量化表征对探究复杂环境下岩石微观损伤劣化机制至关重要,是建立微-细观损伤量效关系的基础。但现有岩石微观损伤研究主要以定性描述为主,微观损伤的量化研究明显不足,实现从定性描述到定量分析的转变仍然任重道远。

岩石微观力学损伤评价以试验测试和数值分析为主。岩石微观力学损伤试验测试以纳米压痕和原



(a) SEM 图像分形维数分析过程



(b) 分形维数/损伤程度与浸水时间关系

图4 分形维数分析过程及分形维数/损伤程度与浸水时间的关系<sup>[41]</sup>

Fig.4 Analysis process of fractal dimension and relationship between fractal dimension/damage degree and immersion time<sup>[41]</sup>

子力显微镜测试为主。纳米压痕技术是1968年G. N. Kalei提出的一种能够对材料微观力学性能进行探测的一种技术<sup>[42]</sup>。借助纳米压痕技术能够获得岩石的微观弹性模量、断裂能、硬度等微观物理力学参数,为岩石微观力学损伤演化规律研究提供支持。LIU等<sup>[43]</sup>借助纳米压痕技术对不同荷载下页岩微观弹性模量、硬度和断裂能进行探测,分析了微观力学参数的演化规律,获得了页岩微观力学损伤与蠕变特性的关系。SUN等<sup>[44]</sup>利用纳米压痕技术,分析了纳米压痕流变过程中瞬时弹性变形、蠕变和弹性后效等微观力学特性,从微观力学角度揭示煤、页岩、泥岩流变特性(图5)。BANDINI等<sup>[45]</sup>采用纳米压痕获取大理石微观力学弹性模量、接触刚度、硬度等,分析穿晶裂纹与岩石微观力学损伤关系,揭示微观结

构损伤与微观力学损伤的内在联系。纳米压痕技术为从原子和矿物颗粒层面上分析岩石微观力学损伤,揭示岩石微观损伤劣化本质提供技术支持,为后续岩石多尺度损伤演化分析提供理论基础。纳米压痕是微米级的,在具体的测试中探针压痕可能在一个晶粒内,也可能在晶界上,并受其晶粒大小和取向的影响。因此压痕区域的选择对实验结果有较大的影响。

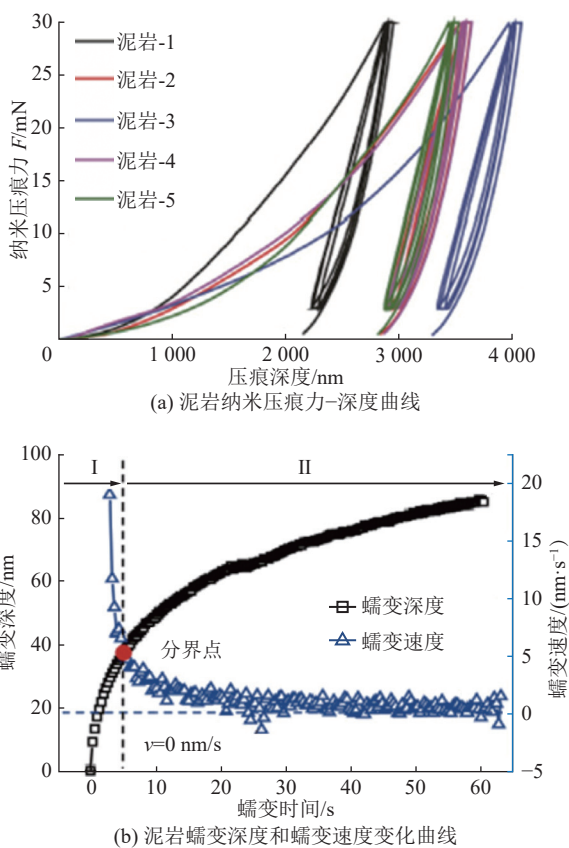


图5 泥岩纳米压痕蠕变特性<sup>[44]</sup>

Fig.5 Creep characteristics of mudstone based on nanoindentation<sup>[44]</sup>

原子力显微镜作为具有纳米级探测能力的试验设备,其在岩石微观结构和力学性能探测方面有着独特的优势。原子力显微镜能够对岩石纳米级孔隙结构进行二维和三维成像,借助数字图像处理技术获取岩石微观结构形态,实现对岩石微观结构损伤的量化表征。借助原子力显微镜能够对岩石的微观弹性模量、颗粒黏附力等微观力学参数损伤进行探测。杨江浩等<sup>[46]</sup>利用原子力显微镜力学性能模块探测了煤岩表面不同位置的微观弹性模量和黏附力,借助数字图像处理软件获取了煤岩表面形貌图、变形图、弹性模量图和黏附力图,分析了煤岩表面微观力学损伤的关键影响因素。张妹妹等<sup>[47]</sup>借助原子力显微镜,结合SEM、能谱分析和X射线衍射,分析了

板岩微观结构和矿物构像,获取了岩石微观弹性模量空间分布特征(图6),基于Mori-Tanaka模型对弹性模量进行尺度升级,建立了弹性模量宏微观跨尺度表征方法。

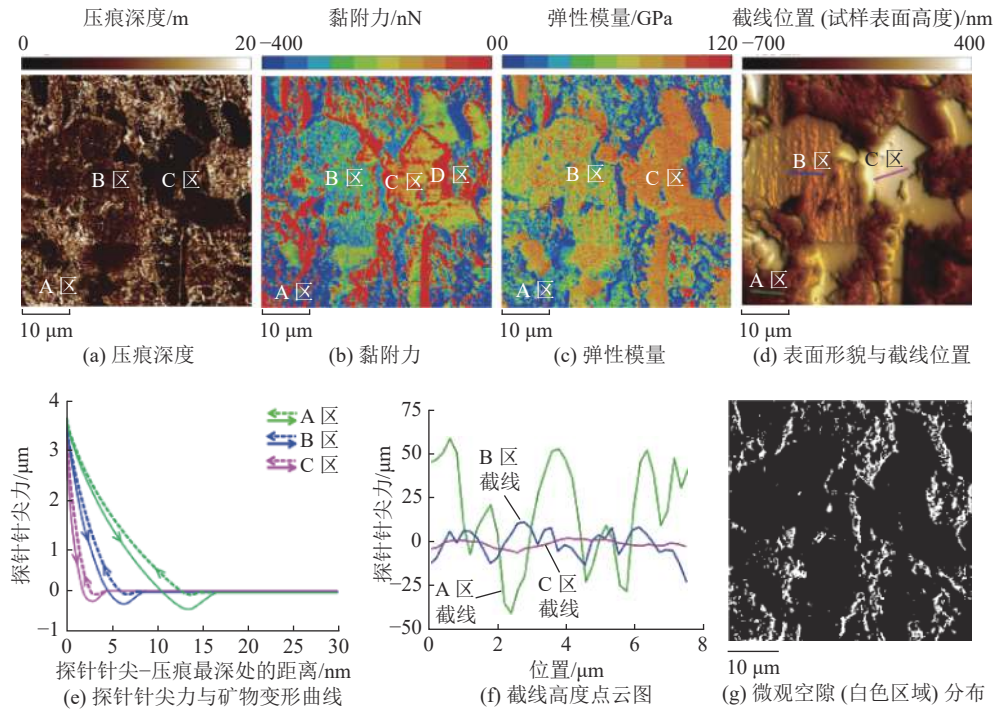
原子力显微镜的扫描区域相对较小,一次扫描通常只能覆盖几十到几百微米的区域,因此原子力显微镜只能在较小的范围内对岩石试样进行分析。同时,在具体的测试中探针与样品之间的相互作用力需要精确控制,并且扫描过程中需要多次采集数据,因此原子力显微镜的成像速度相对较慢。这可能导致在动态变化较快的样品表面成像时,图像产生热漂移等问题。

岩石微观力学损伤数值分析主要有计算微观力学和分子动力学两种方法。计算微观力学基于材料微观结构特性建立能够反映材料微观结构特征的微观有限元分析模型<sup>[48]</sup>,实现对不同工况下岩石微观力学响应问题的分析。分子动力学是以牛顿力学为基础,分析分子运动轨迹和速度,获取粒子运动过程微观特征,实现对物体在复杂环境中微观力学特性的分析<sup>[49]</sup>。从总体上看,分子动力学在岩石微观力学损伤中应用较少,但其在分析某些关键矿物的力学行为和部分微小缺陷的分子级机制时具有明显优势。例如,利用分子动力学分析岩石主要矿物成分的弹性模量、断裂韧性、抗压强度等微观力学性质。借助分子动力学模拟,分析裂纹尖端应力集中和裂纹扩展过程,掌握裂纹尖端力学行为。随着计算能力的提升和人工智能算法的进步,分子动力学在岩石微观力学损伤研究中的应用范围将进一步扩大。

## 2.2 岩石细观损伤识别及评价

岩石细观损伤是岩石在细观结构(细观节理面、颗粒接触面、胶结界面)上细观裂纹的形成与扩展的过程<sup>[50]</sup>。岩石细观结构损伤识别主要探测岩石细观裂纹、孔隙结构等特征,对特征变量的量化表征,实现对岩石细观结构损伤的评价。岩石细观力学损伤识别主要借助细观损伤力学和数值模拟对岩石细观力学特性及其变化规律进行研究。

现有岩石细观损伤识别方法以计算机断层扫描(CT)、核磁共振(NMR)、声发射(AE)和数字图像相关(DIC)技术为主。CT扫描技术是基于X射线透照岩石后发生衰减而获取岩石内部信息的探测技术。CT扫描技术具有非破坏性、高分辨率和快速成像等优势。现有主要岩石CT扫描设备的分辨率在微米级别,实际分辨率与仪器设备和试样尺寸有关。对于2 mm以上的岩石试样,高分辨率CT扫描可以对

图6 板岩样品某位置  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  范围内 AFM 试验结果<sup>[47]</sup>Fig.6 AFM test results within a range of  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  at a certain position of the slate sample<sup>[47]</sup>

岩石内部亚微米级别损伤进行有效探测。对于标准岩心试样(直径为  $25.4\ \text{mm}$ ),分辨率可以达到  $10\ \mu\text{m}$ 。而对于大尺寸岩石试样,其分辨率在  $30 \sim 160\ \mu\text{m}$ 。从整体看,主流岩石 CT 扫描设备的分辨率在微米级别。CT 技术在岩石细观损伤识别中有着广泛的应用,在岩石细观损伤识别中有着独特的优势<sup>[2]</sup>。首先,CT 扫描可以实现岩石细观结构损伤的无损探测。CT 扫描沿着试样的不同位置生成一系列的切片图像,从而在不破坏岩石情况下获取岩石内部损伤特征。其次,CT 扫描能够实现对岩石任意位置细观损伤的探测。通过调整岩样与 CT 扫描射线源和探测器的相对位置,能够获取岩石任意截面扫描图像,实现对细观损伤的精准探测<sup>[51]</sup>。同时,CT 扫描能够同时识别岩石细观和宏观损伤,有助于建立岩石细观与宏观损伤的内在联系。随着数字图像处理技术的进步,利用 CT 二维扫描图像进行岩石三维孔(裂)隙结构重构,实现了岩石细观裂纹三维空间扩展过程的精确分析。

借助 CT 扫描技术,国内外学者对岩石细观损伤进行了深入研究。GHAMGOSAR 等<sup>[52]</sup>利用 CT 扫描技术,分析了不同荷载作用下四种岩石细观裂纹扩展形式、密度和扩展区扩展规律,通过量化表征岩石裂纹密度,获得了岩石断裂强度。WANG 等<sup>[53]</sup>对单轴压缩下泥质岩石试样进行 CT 扫描,通过分析 CT 数变化,获取了泥质岩体损伤破裂参数,定量

表征了岩体损伤劣化特征。LIU 等<sup>[54]</sup>利用 CT 扫描和声发射对水力压裂过程中砾岩内部细观裂纹扩展过程进行探测,获取了试样尺寸、注入压力等对细观裂纹扩展形态的影响。许江等<sup>[51]</sup>利用 CT 专用加载试验设备,开展两级循环荷载作用下岩石疲劳损伤演化实时 CT 扫描,分析不同循环级别下 CT 数变化规律,获得了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律。任建喜<sup>[55]</sup>和杨更社<sup>[56]</sup>等对负温度场下节理岩石开展 CT 扫描试验,研究了冻融循环次数、冻结速度对岩石细观损伤演化过程的影响,获取了冻融环境下岩石细观损伤破坏模式。

低场核磁共振(NMR)技术是利用原子核在外加磁场作用下共振吸收射频辐射进行物质检测,具有无损检测特征。在岩石损伤探测中,通过对岩石中氢原子核弛豫时间监测实现对岩石细观损伤探测。岩石细观裂纹和孔隙改变会显著影响岩石中水分子的运动和分布,引起 NMR 信号的改变<sup>[57]</sup>。NMR 岩石损伤识别分辨率在微米到毫米之间。利用 NMR 可以探测岩石孔隙度、孔隙结构、渗透率等变化,获取不同环境下岩石宏细观损伤程度。NMR 能够在不破坏试样情况下,对岩石内部的多个参数进行高精度快速探测,实现对相关特征的量化分析<sup>[12]</sup>。国内外学者利用 NMR 技术对不同环境下岩石细观损伤进行研究。BI 等<sup>[58]</sup>借助 NMR,分析了低围压三轴压缩下砂岩试样内部微细观小孔和大孔面积随

轴向荷载变化规律并建立了岩石损伤模型,获取了不同荷载下岩石损伤演化过程。CHENG等<sup>[59]</sup>利用NMR分析了砂岩蠕变阶段小(微)孔、中(细)孔和大(宏观)孔的变化过程,确定了砂岩内部微细观孔隙与岩石宏观蠕变的关系。ZHOU等<sup>[60]</sup>利用NMR研究了围压卸载下岩石内部微细观孔隙结构的变化,获取了围压卸载对花岗岩细观损伤演化过程的影响(图7a)。刘汉香等<sup>[50]</sup>借助低场核磁共振和SEM对循环加卸载下灰岩内部微细观孔隙生成、扩展和贯通过程进行分析,获取了循环荷载下岩石微细观损伤与循环加载参数的对应关系(图7b),图中UCS为单轴抗压强度。

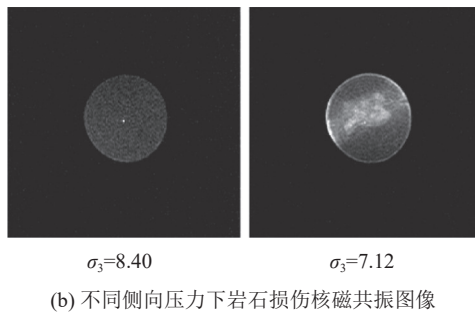
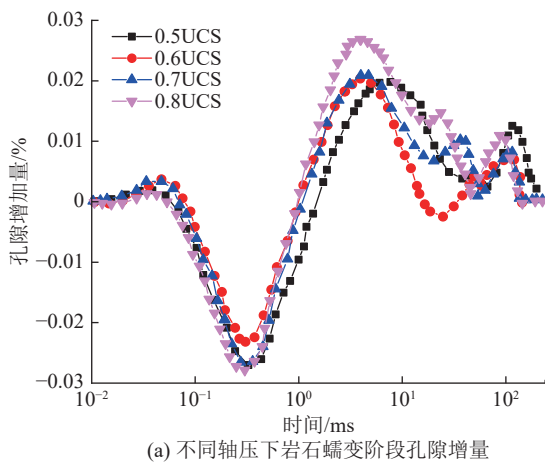


图7 不同轴压下岩石蠕变阶段孔隙增量及不同侧向压力下岩石损伤核磁共振图像<sup>[50,60]</sup>

Fig.7 Pore increment during rock creep stage under different axial pressures and NMR image of rock damage under different lateral pressures<sup>[50,60]</sup>

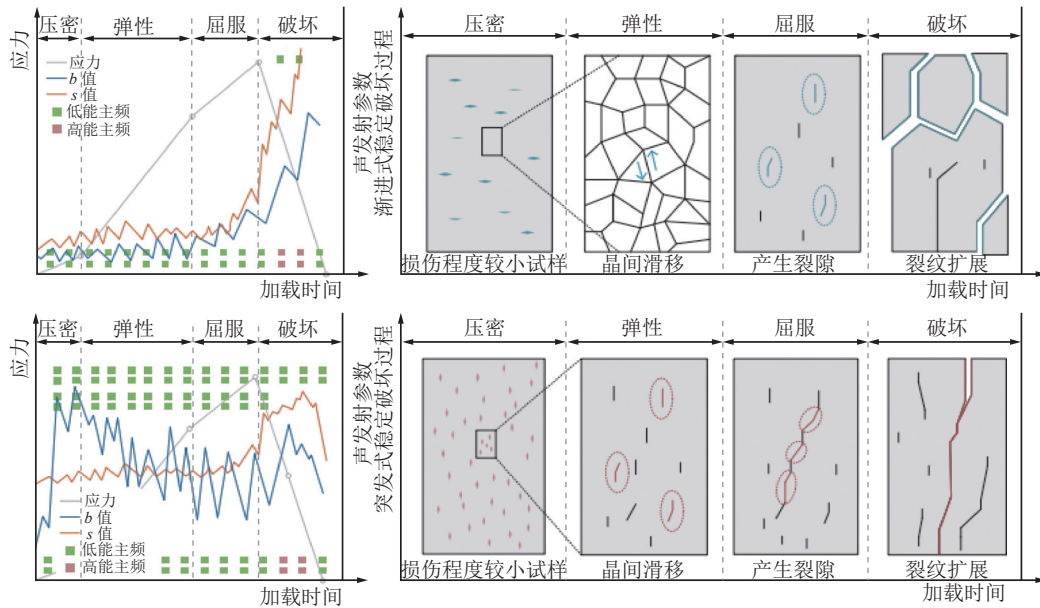
NMR技术能够快速获取岩石内部孔隙结构变化,进而对岩石内部不同尺度损伤进行定量化表征。但是NMR难以获取岩石内部微细观损伤的空间分布信息,不适应于岩石细观损伤三维空间特征分析。

声发射岩石损伤探测技术是利用岩石破坏过程中产生的声发射信号来监测和评估岩石内部损伤。岩石内部微破裂萌生和扩展产生瞬态应力波,通过

将应力波信号转变为电压信号并对其进行分析和解释,最终获取岩石损伤破裂信息。利用声发射技术能够对荷载作用下岩石内部细观和宏观裂纹扩展、塑性变形等宏观损伤进行探测。相比于CT扫描和NMR,声发射岩石损伤识别精度相对较低。对于标准岩石试样,声发射损伤识别的空间分辨率在毫米级别。在具体的测试中,声发射岩石损伤识别精度与传感器类型、传感器布置位置、数据处理技术和试验环境条件等有着直接的关系。通过分析声发射信号相关参数,对岩石宏观损伤进行定性描述和定量化表征,能够获取岩石内部宏观损伤演化特征<sup>[61-62]</sup>。研究表明声发射事件计数、能量、振幅、频率、波形特征、速率等对分析岩石损伤类型、损伤剧烈程度等有着重要的作用。例如,根据声发射能量大小可以判断裂纹扩展的规模和损伤程度。高能量事件通常与较大的裂纹扩展或岩石断裂相关。岩石声发射频率可以为岩石损伤机制分析提供参考。高频率可能与岩石内部微观裂纹的扩展有关,而低频率可能与岩石宏观裂纹扩展有关。但声发射技术只能对岩石损伤破裂位置进行实时定位,不能确定岩石内部损伤裂纹的具体形态信息,难以获取岩石裂纹扩展的状态信息。

研究人员借助声发射技术对岩石细观损伤进行了深入的研究。张凯等<sup>[61]</sup>研究不同损伤程度砂岩在单轴压缩荷载下的声发射特征,探究了细观裂纹扩展和宏观裂纹形成的声发射特性(图8),揭示了不同损伤程度岩石破裂声发射响应机制。杨圣奇等<sup>[15]</sup>开展不同围压下的分级应力扰动室内试验,借助声发射探测,获取岩石不同损伤阶段声发射信息,分析了岩石力学特性和损伤程度演化特征,确定分级应力扰动下岩石力学特性损伤劣化规律及细观裂纹发育特征,明确了岩石损伤状态—细观裂纹发育特征—损伤评价指标三者之间的内在联系。ZAFAR等<sup>[63]</sup>开展单轴压缩下花岗岩声发射探测试验,分析声发射信号与岩石细观损伤对应关系,明确了岩石细观损伤不同阶段特征。李炜强等<sup>[64]</sup>通过对比分析单轴压缩岩石变形各阶段声发射演化特征以及微破裂强度与破裂尺度时空演化特征,借助矩阵反演方法,研究了岩石微破裂产生类型和发展趋势,确定了岩石发生失稳破裂的前兆信息。

数字图像相关技术(DIC)是一种无损非接触式光学测量技术,通过监测和量化表征物体表面的变形实现对岩石表面宏观裂纹形成过程的监测<sup>[65]</sup>。DIC的分辨率与所采用的图像采集设备、散斑喷射

图8 不同损伤尺度岩石声发射响应机制<sup>[61]</sup>Fig.8 Acoustic emission response mechanism of rocks with different damage scales<sup>[61]</sup>

质量、研究区域等有着直接的关系。对于标准岩石试样, DIC 可以探测岩石表面微米到毫米级别损伤。与 CT 扫描和声发射技术相比, DIC 仅能获取岩石表面变形和应变,无法对岩石内部损伤进行探测。因此 DIC 常与声发射等配合使用,实现对岩石宏观裂纹扩展过程的监测分析。吴秋红等<sup>[66]</sup>利用 DIC 对冷热循环条件下花岗岩 I 型断裂过程中细观裂纹扩展过程、范围、速度进行分析,明确了冷热循环对花岗岩细观损伤的影响规律。杨仁树等<sup>[67]</sup>利用超高速数字图像相关试验系统对冲击荷载下岩石表面应变和动态拉伸破坏过程进行观测,获取了 3 种岩石的拉伸应变场和剪切应变场的动态演化规律,明确了岩石宏观损伤演化过程。NGUYEN 等<sup>[68]</sup>对预制裂纹软岩试样开展单轴压缩试验,借助 DIC 技术分析了预制裂纹软岩细观裂扩展融合和宏观裂纹贯通过程。SHARAFISAFI 等<sup>[69]</sup>利用 DIC 技术对冲击荷载下冰晶石破裂过程进行监测,分析冲击速度、晶体大小对冲击荷载下岩石宏观损伤范围及裂纹扩展规律的影响,确定了晶体大小为冲击荷载下岩石损伤形式的主要影响因素。

岩石细观力学损伤是岩石微细观结构损伤在力学行为上的外在表现。岩石细观力学损伤分析是在岩石细观力学基础上提出考虑各向异性的自由比能函数、损伤势等函数,构建不同应力状态下岩石细观力学损伤本构模型,分析岩石细观力学损伤演化规律。张力民等<sup>[70]</sup>基于 Lemaitre 等效应变假设推导了考虑宏观细观缺陷的复合损伤变量,并建立了基于岩石细观动态损伤特征的动态损伤本构模型。朱其志

等<sup>[71]</sup>基于均匀化理论构建了细观力学损伤模型的热动力学框架,提出运用 Eshelby 夹杂问题解的岩石损伤摩擦耦合模型,该模型考虑岩石在外力作用下的主要力学行为,如非线性应力-应变关系、材料损伤的各向异性、裂纹面内损伤和滑移的耦合、体积膨胀以及裂纹闭合效应等。张志镇等<sup>[72]</sup>在多尺度岩石损伤力学框架内,分析了局部应力角对屈服函数的影响规律并将局部摩尔库伦塑性屈服函数引入其中,建立了岩石非线性细观损伤-塑性耦合本构模型。MENG 等<sup>[73]</sup>根据冻融循环作用下岩石损伤范围变化规律,建立了基于岩石损伤区域的损伤变量,构建了考虑微细观损伤的岩石冻融循环损伤本构模型。LI 等<sup>[74]</sup>分析岩石不同损伤破裂阶段的应力阈值,确定了岩石细观单元损伤与岩石破裂应力阈值的相关性,建立了岩石损伤演化方程并构建了包含岩石细观损伤特性的应变软化的统计损伤本构模型。WANG 等<sup>[75]</sup>基于损伤力学和非线性动力学确定了单轴压缩岩石细观损伤变量,借助声发射、微单元强度理论确定了岩石破裂阶段细观损伤变量,结合岩石宏观力学损伤特性,构建了单轴压缩岩石损伤的宏-细观耦合方程和裂隙砂岩损伤本构模型。

数值模拟在岩石细观力学损伤分析中具有重要的作用。借助数值模拟能够对复杂环境中岩石细观力学损伤进行定性和定量分析。刘武等<sup>[76]</sup>从细观力学损伤角度出发,根据水-力耦合环境下岩石细观损伤特征并结合热力学理论,建立了基于 TOUGHREACT 的水-力耦合条件下岩石细观力学损伤数值模型,研究了岩石细观力学损伤对岩石宏观力学与渗透性的

影响。王中文等<sup>[77]</sup>借助PFC软件,利用水颗粒体积膨胀产生的膨胀力模拟岩石冻融循环中产生的冻胀力,分析了冻融循环作用下颗粒接触力、位移等细观力学损伤特性(图9)。NEAUPANE等<sup>[78]</sup>提出了一种适应线性应力-应变本构关系的理论公式,并基于温度-力-流体的有限元方法进行二维(平面应力)数值建模,分析了冻融循环下岩石微细观力学损伤演化过程。SAKSALA<sup>[79]</sup>利用多重嵌入不连续有限元速率相关细观力学模型,对不同应变速率下粗粒砂岩细观结构和力学损伤进行分析,明确了应变速率、岩石细观力学损伤与抗拉强度的关系。XU等<sup>[80]</sup>基于试验测试数据提出了一种二维细观弹塑性损伤模型并模拟循环加载岩石的疲劳行为,确定了最大应力和应力幅与单轴抗压强度的比值是影响砂岩疲劳寿命的关键因素。

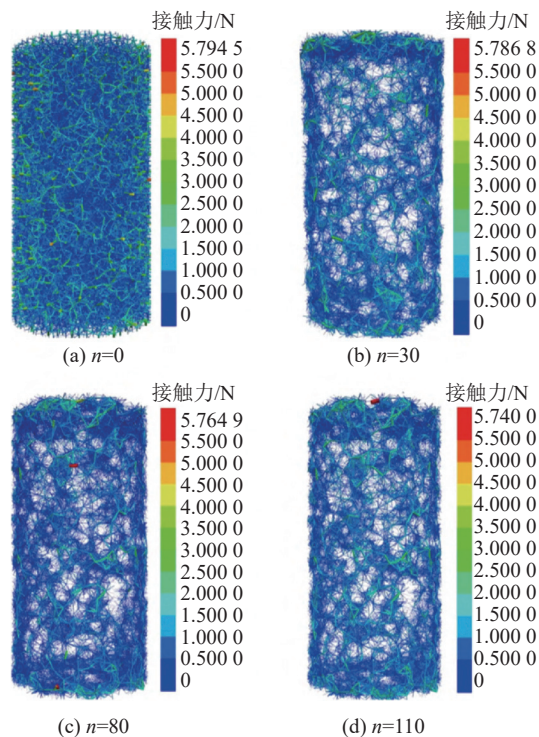


图9 不同冻融循环次数颗粒间的接触力<sup>[77]</sup>

Fig.9 Contact force between particles with different freeze-thaw cycles<sup>[77]</sup>

### 2.3 岩石宏观损伤识别及评价

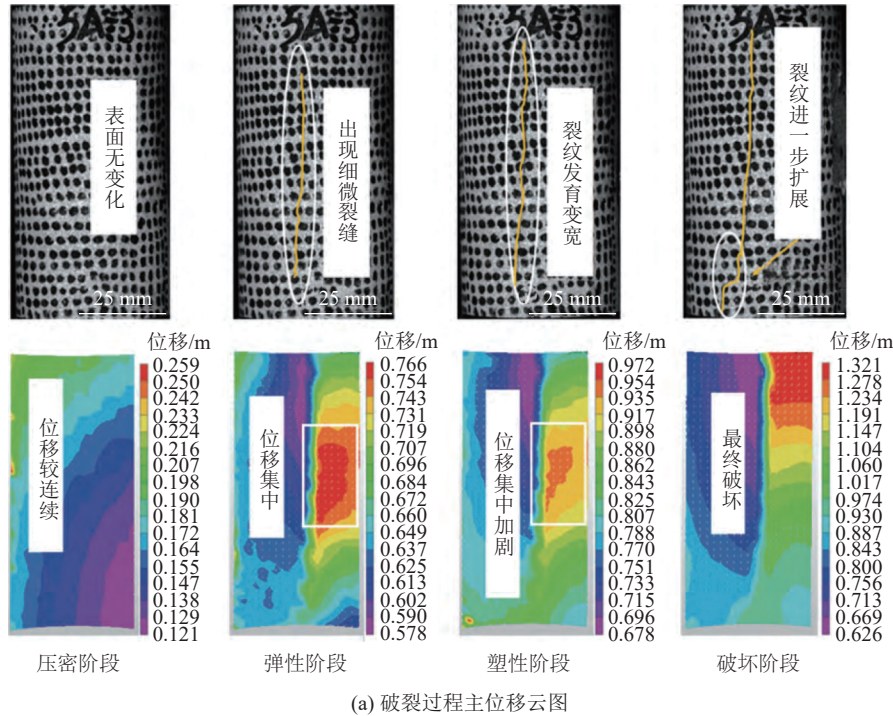
岩石宏观损伤研究是在弹塑性力学和热力学等基础上对岩石的宏观损伤进行唯像分析,通过定义宏观损伤变量,建立反映宏观损伤特性演化规律的岩石宏观力学损伤本构方程。因此,岩石宏观损伤评价的基础是宏观损伤相变场的精准描述和量化表征。

岩石宏观力学损伤识别主要是对外部荷载作用

下岩石应力-应变等力学响应进行探测,分析荷载作用下岩石弹性模量、屈服强度、抗压强度、剪切强度等宏观力学参量变化规律,以宏观力学参量为变量构建岩石宏观力学损伤本构模型。岩石宏观结构损伤识别主要以岩石物理化学性质作为识别参量,例如超声波探测、声发射探测、红外热辐射探测、电阻率探测等<sup>[2]</sup>。以岩石物理化学特性定义岩石宏观结构损伤变量,结合岩石宏观力学特性演化规律,建立岩石宏观损伤本构方程。

岩石宏观力学损伤研究主要对荷载作用下岩石宏观力学特征变化过程进行分析,获取复杂应力环境中岩石宏观力学损伤演化规律,进而建立岩石宏观力学损伤本构关系。单仁亮等<sup>[81]</sup>通过对花岗岩开展不同速度冲击试验,分析冲击荷载下岩石应力-应变曲线和弹性模量变化规律,将统计损伤模型和粘弹性模型结合构建了冲击荷载岩石破坏时效损伤模型,该模型能够较好反映不同冲击荷载下岩石宏观力学响应。唐春安<sup>[82]</sup>、FRANTZISKONIS<sup>[83]</sup>、杨圣奇等<sup>[84]</sup>在岩石宏观力学损伤特性基础上,借助统计损伤理论,建立反映岩石应变软化特征的统计损伤模型,该统计损伤模型能够较好反映岩石在外部荷载作用下的应变软化力学行为。曹文贵等<sup>[85]</sup>将岩石损伤阈值引入到岩石宏观统计损伤模型中,建立能够反映岩石变形全过程特征的统计损伤演化模型并将其与岩石损伤模型结合,重新构建了岩石损伤统计本构模型。

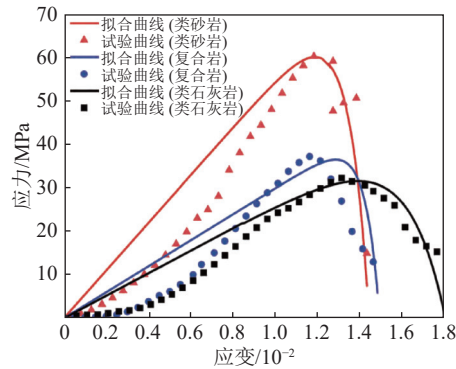
岩石宏观结构损伤主要表现为岩石物理化学性质改变。岩石宏观结构损伤研究主要是对岩石宏观结构损伤引发的物理化学性质改变进行监测,分析其变化规律,建立基于物理化学特性的宏观损伤变量,结合岩石宏观力学响应,构建岩石宏观损伤本构方程。杨永杰<sup>[86]</sup>、RODRÍGUEZ<sup>[87]</sup>、朱权洁<sup>[17]</sup>等对岩石受载过程中的声发射信号进行监测,分析岩石宏观损伤破裂过程中的声发射信号变化规律,以声发射信号参量(振铃计数、能量、事件数等)为变量建立岩石宏观损伤变量,分析宏观损伤特性与岩石损伤变量的量化关系,构建了以声发射信号为变量的岩石宏观损伤本构方程。朱珍德<sup>[88]</sup>、孙文进<sup>[89]</sup>、Zeinab Aliabadian<sup>[90]</sup>、亓宪寅等<sup>[91]</sup>利用数字图像相关技术获取外部荷载作用下岩石局部应变,分析岩石表面局部应变与岩石宏观损伤关系,建立以岩石表面应变为参量的损伤程度因子,结合岩石宏观力学损伤演化规律,构建了以岩石表面应变为参量的岩石宏观力学损伤本构(图10)。



(a) 破裂过程主位移云图

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon < \varepsilon_1 \\ E\varepsilon \left\{ 1 - \frac{1}{\varepsilon_{\max}} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_x)_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_x)_i \right] \right\} & \varepsilon \geq \varepsilon_1 \end{cases}$$

(b) 基于表面应变的损伤本构模型



(c) 理论应力-应变曲线和实验数据对比

图 10 基于数字图像相关技术的类砂岩损伤过程<sup>[91]</sup>

Fig.10 Sandstone-like damage process based on digital image correlation technology<sup>[91]</sup>

李德春<sup>[92]</sup>、李术才<sup>[93]</sup>、纪洪广<sup>[94]</sup>、Chen<sup>[95]</sup>等对受载岩石电阻率进行探测,分析岩石宏观破裂过程中电阻率变化规律,探究岩石电阻率变化与岩石宏观力学参数的定量化关系(图 11),建立岩石电阻率与宏观力学参数的数学模型,推导基于电阻率的岩石损伤变量解析表达,构建了以电阻率为变量的岩石损伤演化本构方程,并提出了基于岩石电阻率的宏观损伤破裂判据。

王恩元<sup>[96]</sup>、李忠辉<sup>[97]</sup>、CARPINTERI<sup>[98]</sup>、FUKUI<sup>[99]</sup>、李夕兵<sup>[100]</sup>等探测岩石破裂过程中的电磁辐射信号,分析岩石不同破裂阶段电磁辐射信号强度、频率等特征参量的变化规律,研究岩石破裂过程宏观力学特性与岩石电磁辐射信号特征的对应关系,建立了基于岩石电磁辐射特征的损伤变量,构建了岩石宏观损伤破裂预测模型。

### 3 岩石多尺度损伤量效关系

荷载作用下岩石损伤破裂是一种多尺度累积损伤过程,微-细-宏观损伤既是递进演化又是相互耦合。从岩石损伤内在驱动因素上看,岩石的宏观损伤破裂是岩石微细观损伤累积演化的宏观表现,微细观损伤是岩石宏观损伤的内在驱动。从岩石损伤发展过程上看,岩石的损伤演化过程是小尺度损伤累积诱发大尺度损伤扩展的一个递进式演化过程,同时又是多尺度损伤耦合作用的动态演化过程。从岩石损伤机制与工程应用角度看,岩石微细观损伤研究能够从岩石微细观结构和力学损伤角度揭示岩石损伤演化,但微细观损伤往往难以与岩石的宏观特性建立有效联系,不利于指导工程实践。而岩石宏观损伤研究能够直观获取岩石宏观力学特性及结

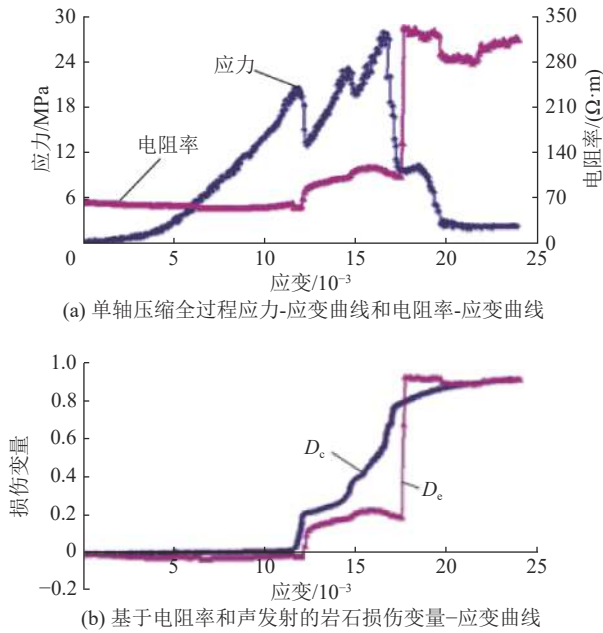


图11 岩石单轴压缩应力、应变、电阻率和损伤关系<sup>[93]</sup>

Fig.11 Relationship between rock uniaxial compressive stress, strain, resistivity and damage<sup>[93]</sup>

构损伤特征,从而对现场工程进行有效指导,但难以从本质上对工程问题进行有效解释。为更好地研究岩石损伤失效过程与损伤演化机理,不仅要针对不同尺度岩石损伤演化过程进行分析,而且要明确岩石不同尺度损伤的内在联系,建立岩石多尺度损伤的量效关系。

岩石多尺度损伤量效关系确定基本原则是以岩石微细观损伤为变量,利用统计分析、分形维数、机器学习等手段建立岩石微-细-宏观损伤的定量化关系,从而建立岩石多尺度损伤量效关系。邓乃夫等<sup>[101]</sup>利用唯象理论将岩石分为开口裂隙微元体、闭合裂隙微元体和完整微元体,借助微生物群落生长逻辑构建了岩石裂隙演化微分动力学方程并求解受压岩石闭合裂隙和开口裂隙的演化表达式,量化分析不同阶段岩石微元体之间的转化关系,利用岩石裂隙演化解析表达式定义压缩荷载下岩石破裂全局损伤变量,建立了基于多尺度损伤的岩石单轴压缩损伤本构模型。杨圣奇等<sup>[15]</sup>借助声发射定位技术,对不同应力扰动下岩石力学特性和损伤评价指标演化特征进行分析,明确了不同应力状态下岩石细观裂纹扩展特性与岩石宏观损伤过程,建立了岩石损伤宏观损伤状态、微细观裂纹发育特征和岩石损伤评价指标三者之间的内在联系。吕思清等<sup>[102]</sup>以开口裂隙体积为变量,借助称重法提出了开口裂隙岩体宏观损伤变量的计算方法,结合岩体物理力学性

质变化规律,对岩石张开孔隙率之差进行合理修正,确定了冻融循环作用下岩石细观损伤变量。根据荷载作用下岩石孔隙裂隙的变化特点,基于统计损伤力学理论,建立了细观损伤变量计算模型,利用Lemaitre应变等效假设的宏观总损伤计算方法,获得了岩石宏观耦合总损伤,构建考虑岩体细观损伤的岩体总损伤本构模型,确定了岩石细观损伤与宏观损伤量效关系。杨更社等<sup>[103]</sup>在Lemaitre应变等效假设的基础上,研究了岩石细观损伤与宏观损伤特性,推导了岩石宏观复合损伤变量,实现了岩石细观损伤和宏观损伤的耦合。张慧梅<sup>[104]</sup>、杨更社<sup>[105-106]</sup>等对冻融循环红砂岩进行CT扫描,借助数字图像处理技术和遗传算法对CT扫描图像进行去噪、增强和分割,建立了冻融损伤岩石三维重构模型(图12)。基于三维重构模型对不同尺度损伤进行分析,建立以细观损伤变量为损伤参数的岩石弹性模量劣化预测公式(式1),确定了冻融环境下岩石细观结构损伤演化与宏观力学损伤的关系,从岩石细观结构的损伤本质解释了岩石冻融宏观力学损伤机制。同时基于岩石CT扫描图像,以CT扫描图像CT数为参量,建立了基于CT数分布规律的岩石损伤数学模型,实现了基于岩石细观损伤为参量的岩石宏观损伤模型的构建。

$$\begin{cases} D_{Bn} = \left( \frac{A^*}{A} \right)_n \left[ -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon} \right]_n \\ E_N = (1 - D_{Bn}) E \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $D_{Bn}$  为修正后的冻融岩石细观损伤变量;  $A$  为岩石名义承载体积;  $A^*$  为岩石内部失效体积;  $\epsilon$  为网格边长;  $N(\epsilon)$  为统计网格中含有孔隙的数目;  $E_N$  为冻融损伤岩石弹性模量预测值;  $E$  为岩石初始弹性模量。

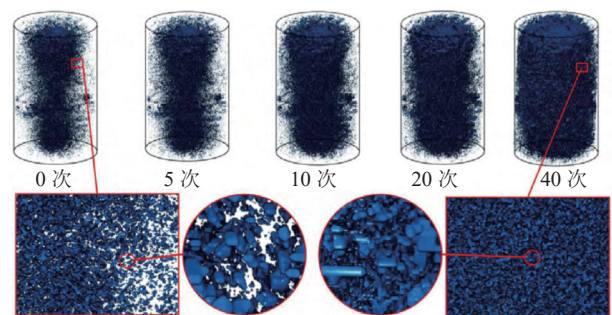


图12 不同冻融循环次数下岩石三维孔隙结构重构模型<sup>[104]</sup>

Fig.12 Three-dimensional pore structure reconstruction model of rock under different freeze-thaw cycles<sup>[104]</sup>

借助SEM探究岩石微细观损伤与岩石宏观损伤联系是岩石多尺度损伤量效关系研究的一种重要

方法。首先,利用 SEM 扫描图像获取岩石面孔隙率等信息,分析不同荷载作用下岩石孔隙率变化规律。其次,借助 Kachanov 等经典损伤理论建立以岩石面孔隙率为参量的岩石损伤因子,分析岩石面孔隙率与体积孔隙率、岩石塑性变形的关系,最终建立以岩石微细观损伤为变量的岩石宏观损伤模型,确定微观损伤与宏观损伤的跨尺度联系。贾海梁等<sup>[107]</sup>借助 SEM 扫描技术,获取冻融循环作用下岩石孔隙率变化规律,建立基于岩石孔隙率的岩石损伤模型,分析了冻融循环微观损伤对岩石宏观损伤量化关系。刘汉香等<sup>[50]</sup>对循环加载岩石开展 SEM 扫描测试,借助数字图像处理软件计算 SEM 扫描图像中的微裂隙的面积,确定了以岩石微裂隙面积为参量的损伤变量,分析循环荷载作用下岩石宏观力学损伤与微细观损伤变量关系,明确了循环荷载下岩石微观损伤与宏观力学性质的对应关系。

借助 SEM 图像中微细观裂隙分形维数对岩石微细观损伤进行定量分析并建立以分形维数为变量的岩石损伤模型是岩石多尺度损伤量效关系研究的另一种有效方法。樊水龙<sup>[108]</sup>对干湿循环作用下花岗岩进行 SEM 扫描试验,采用盒维数法分析不同干湿循环次数下岩石 SEM 图像分形维数,建立基于岩石分形维数的微细观损伤演化方程,通过分析岩石宏观力学特性与岩石分形维数的定量关系,获得了岩石微细观损伤与宏观力学的量效关系。褚怀保等<sup>[109]</sup>采用 SEM 扫描获取冲击荷载下岩石断口微观结构形貌,分析不同饱水和冲击荷载下岩石微观断口分形维数变化规律,揭示了冲击荷载作用下饱水花岗岩的微观致裂机理。LAI 等<sup>[110]</sup>开展不同加载速率的单轴压缩试验,对岩石破裂界面进行 SEM 扫描,获取岩石破裂面的微观结构形貌和分形维数,分析不同荷载速度下岩石宏观裂纹分形维数和岩石微观破裂面分形维数关系,从而建立了不同加载速率下岩石微观到宏观损伤破裂机制。

数值模拟是研究复杂应力环境下岩石多尺度损伤量效关系的一种有效方法。数值模拟方法能够模拟实验室难以实现的复杂的应力环境场,实现对重点研究区域不同尺度损伤演化过程的定性和定量分析。MOURLAS 等<sup>[111]</sup>将细观结构特征嵌入到宏观模型基本单元当中,构建了一个具有有限元分辨率和均匀性的双尺度模型。利用该模型分析了非均质岩石的细观结构特征和颗粒性质对宏观力学行为的影响规律,实现了基于细观损伤的岩石宏观力学损伤分析。LI 等<sup>[112]</sup>利用颗粒离散元方法(GB-DEM)

构建了包含岩石微观结构特征和矿物颗粒的数值模型,分析了荷载速率对裂纹初始应力阈值和裂纹扩展应力阈值的影响。SUN 等<sup>[113]</sup>提出了描述高温下岩石材料微观裂纹扩展和宏观损伤演化特征的多尺度热损伤框架。在此框架下,借助量纲分析方法,推导了微裂纹扩展演化方程,建立了宏观尺度损伤与微观尺度裂纹成核和扩展之间的关系。

明确岩石不同尺度损伤间的量效关系是复杂环境下岩石多尺度损伤研究的基础。在岩石力学、损伤力学等基础上借助统计分析、人工智能算法和数值模拟等手段对岩石微观、细观和宏观结构和力学损伤进行分析,明确岩石微观、细观和宏观损伤量效关系,揭示岩石多尺度损伤劣化机制,是岩石多尺度损伤劣化研究的主要思路。从现有研究看,岩石微-细-宏观多尺度损伤量效关系研究不足,多尺度量效关系未完全建立。现有研究主要从宏观和细观损伤两个尺度开展损伤量效关系研究,岩石微观损伤和细观损伤量效关系研究缺乏,微观-细观-宏观多尺度链式损伤量效关系鲜有涉及。岩石多尺度损伤量效关系研究是岩石多尺度链动损伤研究的关键科学问题,需要进行更加深入的研究,为揭示复杂环境下岩石多尺度损伤劣化机理提供基础。

## 4 岩石多尺度损伤研究发展方向

岩石多尺度损伤研究涉及岩石不同尺度损伤精准识别、量化表征和损伤量效关系确定。岩石不同尺度损伤的精准识别与量化表征是岩石多尺度研究的基础,不同尺度损伤量效关系是建立岩石多尺度损伤机制的关键。因此,岩石多尺度损伤研究应重点关注于岩石损伤精准识别、量化表征和多尺度量效关系构建。

### 4.1 岩石多尺度损伤精准识别研究发展方向

岩石损伤识别精准度取决于所采用损伤识别方法与岩石损伤特性的匹配程度。岩石宏观损伤主要借助声发射、电阻率、超声波、数字图像相关等技术对岩石的宏观损伤进行识别;岩石细观损伤主要通过核磁共振、CT 扫描等技术对岩石细观结构损伤进行探测;而岩石微观损伤主要利用 SEM 扫描、纳米压痕等技术对微观结构和微观力学损伤进行探测识别。以上技术对岩石多尺度损伤识别提供了重要技术支持,提升了岩石多尺度损伤识别的准确性。但客观地讲,岩石多尺度损伤识别技术手段依然存在着一些不足,尚不能与岩石多尺度损伤研究进展相适应。首先,复杂环境下岩石微细观损伤实时识别

难以实现。岩石微细观损伤形成和扩展是一个动态发展的过程,其损伤程度和范围与外部荷载、环境等有着直接的关系。因此,对复杂环境下岩石微细观损伤开展实时探测对岩石微细观损伤识别至关重要。但现有岩石微细观损伤研究多采用分离式探测,难以开展岩石微细观损伤实时观测。例如岩石 SEM 探测是在岩石加卸载后对岩石试样进行切片扫描。非实时损伤识别方法能够对岩石部分微观损伤进行识别,但难以对加载过程中岩石微观裂纹形成、扩展和贯通融合过程进行探测,难以揭示岩石微观损伤动态演化机制。其次,复杂环境下岩石微细观实时损伤状态获取困难。深部岩体损伤是应力场、化学场、温度场等多场耦合引发的岩体损伤破裂。对于深部岩体损伤来讲,岩石多尺度损伤精准识别对复杂环境下岩石损伤机制研究有着重要的意义。目前复杂环境下岩石多尺度损伤识别尚缺乏有效手段,多场耦合环境下实时损伤识别设备缺乏,无法对多场耦合环境下岩石多尺度损伤破裂过程进行实时探测。从岩石多尺度损伤精准化识别的角度讲,开发适用多场耦合环境的岩石微细观损伤实时识别设备是今后岩石多尺度损伤研究需要关注的一个方向。

#### 4.2 岩石多尺度损伤定量化表征研究发展方向

岩石不同尺度损伤的定量化表征是损伤本构建立的前提。岩石损伤量表征的有效性取决于岩石不同尺度损伤识别信息量化分析的可靠性。根据岩石多尺度损伤识别信息类型,岩石多尺度损伤识别信息分为图像型和数值型两类<sup>[2]</sup>。数值型信息主要包含岩石力学特性、岩石电阻率、超声波波速等。基于数值型数据能够对岩石不同尺度损伤进行准确的定量化表征。岩石图像型数据,如 SEM 图像、CT 扫描图像、核磁共振图像、高速摄像机图像,包含着岩石微细观损伤的多种图像信息。利用图像处理技术对图像信息进行数字化处理,获取岩石图像中包含的损伤信息,借助统计分析、机器学习等方法对损伤信息进行定量分析,从而实现对不同尺度损伤的定量化表征。基于岩石图像信息的岩石多尺度损伤定量化表征的关键是图像处理技术和定量化表征理论。随着图像处理技术和定量化表征理论的发展,基于图像信息的岩石多尺度定量表征技术有了较大的进步,岩石多尺度损伤定量化表征准确性有了较大的提升。但从总体上看,基于图像信息的岩石多尺度损伤定量化表征在三维损伤定量化表征、多重损伤信息协同定量化表征、智能化定量化表征等方面还存在一定的不足。为提升岩石多尺度损伤定量化表

征质量,需要从以下几个方面提升岩石多尺度损伤量表征质量。首先,将数字图像处理技术和三维重建建模技术结合,构建岩石损伤三维模型,实现对岩石三维空间损伤的定量化表征。其次,利用统计分析理论、多元异构数据融合算法等对复杂环境下多种图像数据信息进行融合处理,建立基于多种图像数据信息的岩石多尺度损伤协同定量表征方法。同时,借助人工智算法、深度学习等手段,建立岩石图像信息智能识别方法,实现基于图像信息的岩石多尺度损伤信息的智能化分析。

#### 4.3 岩石多尺度损伤量效关系研究发展方向

岩石多尺度损伤量效关系是岩石多尺度损伤本构关系构建的关键。岩石宏观损伤破裂是微细观损伤累积的必然结果,也是岩石微细观损伤在宏观尺度上的唯像表现。岩石微细观损伤是岩石宏观损伤产生的内在动力,也是岩石多尺度链式损伤演化机制研究的关键。厘清岩石不同尺度损伤之间的量效关系,明确岩石多尺度损伤的链式传动机制,建立反映岩石多尺度损伤特性的本构模型是岩石多尺度损伤研究关键。因此,在岩石精准识别和定量化表征基础上对岩石多尺度损伤量效关系开展研究对揭示岩石多尺度损伤劣化机制至关重要。国内外学者在此方面进行了有益尝试并取得了一定的研究成果。杨更社<sup>[2,56]</sup>、张慧梅<sup>[104]</sup>等借助 CT 数对循环冻融环境下岩石细观损伤和宏观损伤量效关系进行研究,建立了以 CT 数为损伤变量的岩石宏细观损伤本构模型,揭示了冻融环境下岩石多尺度损伤劣化机制。谢和平等<sup>[114-115]</sup>借助分形理论,分析不同尺度损伤破裂面的分形维数,以岩石破断面分形维数为参量建立岩石损伤变量,根据岩石宏观损伤特性构建了以分形维数为损伤变量的岩石损伤本构关系。郑哲元<sup>[116]</sup>、李兆霞<sup>[117]</sup>等通过改进变尺度域有限数值分析方法,改变接触方式,建立了剪切增强型模型,借助材料微极理论研究了准脆性材料不同尺度损伤的定量化关系。

以上研究成果为岩石多尺度损伤量效关系研究奠定了坚实的基础。但从整体上看,现有岩石多尺度损伤量效关系研究还存在以下几方面的不足。首先,岩石多尺度损伤量效关系研究缺乏完善的理论支持。岩石多尺度损伤理论是岩石量效关系研究的基础。根据岩石多尺度损伤特性选取与之相适应的岩石损伤理论才能提升岩石多尺度损伤量效关系的准确性。现有岩石多尺度损伤量效关系确定理论或方法,如分形理论、CT 数理论、灰度关联理论等,在

岩石多尺度损伤量效关系确定研究中发挥了重要作用,但依然难以满足岩石多尺度损伤量效关系研究需要。后续研究需要根据岩石多尺度损伤特点,将相应的损伤理论和定量化研究方法引入到岩石多尺度损伤研究中,丰富岩石多尺度损伤量效关系研究的理论基础。其次,岩石多尺度损伤量效关系系统化研究不足。岩石多尺度损伤量效关系研究是以细观损伤为中介研究岩石微观、细观和宏观的链动损伤量效关系。现有研究多针对岩石细观损伤和宏观损伤之间的量效关系开展,岩石微观和细观损伤量效关系研究缺乏,岩石微-细-宏观损伤量效关系研究体系未真正建立。在今后的研究中需要借助人工智能算法、深度机器学习、统计分析等多种手段对岩石微观损伤与细观损伤的量效关系进行研究,构建完善的岩石微-细-宏观损伤量效关系体系。

## 5 结 论

1) 荷载作用下岩石损伤失效是一个从微观到细观到宏观的多尺度链动损伤过程。明确岩石不同尺度损伤特征,建立岩石不同尺度损伤的量效关系,构建岩石多尺度损伤本构方程是揭示复杂环境岩石多尺度损伤机理的主要研究思路。

2) 岩石损伤精准识别与定量化表征是岩石多尺度损伤评价的关键科学问题。在岩石微观损伤方面,借助 SEM 扫描获取岩石微观结构损伤,利用数字图像处理等手段对岩石微观结构损伤进行定量化表征。计算微观力学、分子动力学、纳米压痕是岩石微观力学损伤研究的重要方法。CT 扫描、NMR、声发射和 DIC 技术对岩石细观结构损伤识别与定量化表征有着重要的作用。数值模拟在岩石细观力学损伤研究方面有着独特优势,是复杂应力环境下岩石微细观力学损伤的重要方法。岩石宏观损伤识别与定量化表征主要通过分析岩石宏观力学特性,利用岩石宏观力学特性定义宏观损伤变量,实现岩石宏观损伤进行定量化表征。

3) 开发适用于多场耦合环境的岩石微细观损伤实时识别设备,建立具备岩石三维空间损伤定量化表征与多信息融合定量化表征的岩石损伤智能化表征体系是今后岩石多尺度损伤识别与定量化表征的重要发展方向。

4) 岩石多尺度损伤量效关系是岩石多尺度损伤本构模型建立的关键。现有研究主要针对两个尺度间的量效关系进行研究,在岩石微-细-宏观多尺度量效关系系统化研究方面相对缺乏。

5) 以岩石微细观损伤为变量,借助统计分析、形理论、人工智能算法等手段分析岩石不同尺度损伤量效关系,以细观损伤为中间桥梁,建立岩石微-细-宏观多尺度损伤量效关系是岩石多尺度损伤研究的主要技术路线。丰富岩石多尺度损伤量效关系研究理论基础,建立岩石微-细-宏观损伤量效关系系统化研究体系是岩石多尺度损伤量效关系研究的发展方向。

6) 岩石多尺度损伤本构模型是岩石多尺度损伤理论研究的基础。根据岩石不同尺度损伤变量,结合岩石多尺度损伤量效关系,在岩石力学、损伤力学、统计分析等基础上,构建包含岩石微细观损伤变量的岩石宏观损伤本构模型是岩石多尺度损伤本构模型研究发展方向。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平,彭瑞东,周宏伟,等.基于断裂力学与损伤力学的岩石强度理论研究进展[J].自然科学进展,2004,14(10):1086-1092.  
XIE Heping, PENG Ruidong, ZHOU Hongwei, *et al.* Research progress of rock strength theory based on fracture mechanics and damage mechanics[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(10): 1086-1092.
- [2] 杨更社,申艳军,贾海梁,等.冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3):545-563.  
YANG Gengshe, SHEN Yanjun, JIA Hailiang, *et al.* Research progress and tendency in characteristics of multi-scale damage mechanics of rock under freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 545-563.
- [3] 左建平,孙运江,刘海雁,等.采矿岩石多尺度破坏力学[J].矿业科学学报,2021,6(5):509-523.  
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, LIU Haiyan, *et al.* Multi-scale failure mechanics of rock in mining engineering[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(5): 509-523.
- [4] 朱其志.多尺度岩石损伤力学[M].北京:科学出版社,2019.
- [5] 赵伦洋,赖远明,牛富俊,等.硬脆性岩石多尺度损伤蠕变模型及长期强度研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(8):3071-3080.  
ZHAO Lunyang, LAI Yuanming, NIU Fujun, *et al.* Multi-scale damage creep model and long-term strength for hard brittle rocks[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3071-3080.
- [6] 陆银龙,王连国.基于微裂纹演化的煤层底板损伤破裂与渗流演化过程数值模拟[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):889-897.  
LU Yinlong, WANG Lianguo. Numerical modeling of mining-induced fracturing and flow evolution in coal seam floor based on micro-crack growth[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 889-897.

- [7] 李桂臣, 李菁华, 孙元田, 等. 泥岩多尺度模型与水岩作用特性研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1138-1154.  
LI Guichen, LI Jinghua, SUN Yuantian, *et al.* Advance of multi-scale study on both analytic models and water-rock interaction characteristics of mudstone[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1138-1154.
- [8] 来兴平, 张帅, 代晶晶, 等. 水力耦合作用下煤岩多尺度损伤演化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3217-3228.  
LAI Xingping, ZHANG Shuai, DAI Jingjing, *et al.* Multi-scale damage evolution characteristics of coal and rock under hydraulic coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3217-3228.
- [9] 张凌凡. 脆性岩石细观破裂与宏观变形局部化规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.  
ZHANG Lingfan. Study on the law of meso-fracture and macro-deformation localization of brittle rocks[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2022.
- [10] TANG H D. Multi-scale crack propagation and damage acceleration during uniaxial compression of marble[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 131: 104330.
- [11] 刘慧, 杨更社, 申艳军, 等. 冻融-受荷协同作用下砂岩细观损伤演化 CT 可视化定量表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1136-1149.  
LIU Hui, YANG Gengshe, SHEN Yanjun, *et al.* CT visual quantitative characterization of meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw-loading synergistic effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1136-1149.
- [12] 秦庆词, 李克钢, 李明亮, 等. 基于核磁共振技术的白云岩微观损伤致劣机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2944-2954.  
QIN Qingci, LI Kegang, LI Mingliang, *et al.* Study on the deterioration mechanism of dolomite microscopic damage based on NMR technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2944-2954.
- [13] HU Jianhua, YANG Dongjie. Meso-damage evolution and mechanical characteristics of low-porosity sedimentary rocks under uniaxial compression[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(4): 1071-1077.
- [14] 戴永浩, 陈卫忠, 王者超, 等. 非饱和板岩裂隙扩展机制 CT 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2537-2545.  
DAI Yonghao, CHEN Weizhong, WANG Zhechao, *et al.* Study on crack propagation of unsaturated slate by ct tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2537-2545.
- [15] 杨圣奇, 杨景, 孙博文, 等. 基于围压因素的分级应力扰动下砂岩损伤破裂特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 542-555.  
YANG Shengqi, YANG Jing, SUN Bowen, *et al.* Experimental study on damage and fracture characteristics of sandstone under graded stress disturbance based on confining pressure factor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 542-555.
- [16] 张国凯, 李海波, 王明洋, 等. 岩石单轴压缩下损伤表征及演化规律对比研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1074-1082.  
ZHANG Guokai, LI Haibo, WANG Mingyang, *et al.* Comparative study on damage characterization and damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1074-1082.
- [17] 朱权洁, 张尔辉, 李青松, 等. 岩石破坏失稳的声发射响应与损伤定量表征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(1): 92-98.  
ZHU Quanjie, ZHANG Erhui, LI Qingsong, *et al.* Study on acoustic emission response and damage quantitative characterization of rock destruction and instability[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(1): 92-98.
- [18] HOAGLAND R G, HAHN G T, ROSENFELD A R. Influence of microstructure on fracture propagation in rock[J]. *Rock Mechanics*, 1973, 5(2): 77-106.
- [19] ÜNDÜL Ö, AMANN F, AYSAL N, *et al.* Micro-textural effects on crack initiation and crack propagation of andesitic rocks[J]. *Engineering Geology*, 2015, 193: 267-275.
- [20] MOORE D E, LOCKNER D A. The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite[J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17(1): 95-114.
- [21] 宋战平, 程昀, 杨腾添, 等. 循环荷载下硬质层理砂岩疲劳损伤机制试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(3): 490-499.  
SONG Zhanping, CHENG Yun, YANG Tengtian, *et al.* Experimental study on fatigue damage evolution mechanism of hard layered sandstone under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(3): 490-499.
- [22] WANG Y M, PENG J, WANG L F, *et al.* Micro-macro evolution of mechanical behaviors of thermally damaged rock: a state-of-the-art review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(7): 2833-2853.
- [23] LI H, ZHONG Z L, LIU X R, *et al.* Micro-damage evolution and macro-mechanical property degradation of limestone due to chemical effects[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 110: 257-265.
- [24] COSMI F, BERNASCONI A. Micro-CT investigation on fatigue damage evolution in short fibre reinforced polymers[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 79: 70-76.
- [25] 解馨慧, 邓虎成, 胡蓝霄, 等. 基于纳米压痕和 FE-SEM 技术探究页岩页理结构对其微: 宏观力学行为的影响[J]. 地质论评, 2024, 70(S1): 319-322.  
XIE Xinhui, DENG Hucheng, HU Lanxiao, *et al.* Investigation of the influence of shale bedding structure on its micro-macro mechanical behavior using nanoindentation and FE-SEM technology[J]. Geological Review, 2024, 70(S1): 319-322.
- [26] 孙长伦, 李桂臣, 许嘉徽, 等. 砂岩矿物组分流变特性纳米压痕实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 77-87.  
SUN Changlun, LI Guichen, XU Jiahui, *et al.* Rheological characteristics of mineral components in sandstone based on nanoindentation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 77-87.

- [27] 戴彩丽, 曹梦娇, 吴一宁, 等. 微纳孔隙油-水-岩石微观界面相互作用研究进展[J]. 深圳大学学报(理工版), 2021, 38(6): 551-562.  
DAI Caili, CAO Mengjiao, WU Yining, *et al.* Research progress on oil-water-rock interface interaction in micro-nano porous medium[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2021, 38(6): 551-562.
- [28] XIA C, LIU Z, ZHOU C Y, *et al.* A meso/macroscale theoretical model for investigating the large deformation of soft rock tunnels considering creep and anisotropic effects[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(7): 4901-4922.
- [29] 李盛南, 肖俊, 李玉, 等. 基于细观裂纹扩展演化的岩石损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 640-648.  
LI Shengnan, XIAO Jun, LI Yu, *et al.* A new damage constitutive model of rock considering microscopic crack growth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 640-648.
- [30] 杨永杰, 王德超, 王凯, 等. 煤岩强度及变形特征的微细观损伤机理[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6): 653-657.  
YANG Yongjie, WANG Dechao, WANG Kai, *et al.* Micro and meso-damage mechanism of coal's strength and deformation characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 653-657.
- [31] 赵亚永, 魏凯, 周佳庆, 等. 三类岩石热损伤力学特性的试验研究与细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 142-151.  
ZHAO Yayong, WEI Kai, ZHOU Jiaqing, *et al.* Laboratory study and micromechanical analysis of mechanical behaviors of three thermally damaged rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 142-151.
- [32] 姜小春, 谢和平, 周宏伟. 拉伸载荷下准脆性材料微裂纹损伤宏细观损伤变量关系初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2648-2653.  
JIANG Xiaochun, XIE Heping, ZHOU Hongwei. Analysis of relationship between macroscopic damage and mesoscopic damage variables for micro-crack damage of quasi-brittle materials under tension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2648-2653.
- [33] 袁小清, 刘红岩, 刘京平. 基于宏细观损伤耦合的非贯通裂隙岩体本构模型[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2804-2814.  
YUAN Xiaoqing, LIU Hongyan, LIU Jingping. Constitutive model of rock mass with non-persistent joints based on coupling macroscopic and mesoscopic damages[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2804-2814.
- [34] SHIROLE D, WALTON G, HEDAYAT A. Experimental investigation of multi-scale strain-field heterogeneity in rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 127: 104212.
- [35] DUBEY V, ABEDI S, NOSHADRAVAN A. A multiscale modeling of damage accumulation and permeability variation in shale rocks under mechanical loading[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 198: 108123.
- [36] LIU H Z, MAO L T, CHANG X Y, *et al.* Multiscale damage analyses of red sandstone in uniaxial compression based on advanced digital volume correlation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(12): 8623-8641.
- [37] 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): 1347-1358.  
CHEN Li, XU Jun, CHEN Jing. Applications of scanning electron microscopy in earth sciences[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2015, 45(9): 1347-1358.
- [38] 尚嘉兰, 孔常静, 李廷芥, 等. 岩石细观损伤破坏的观测研究[J]. 实验力学, 1999, 14(3): 373-383.  
SHANG Jialan, KONG Changjing, LI Tingjie, *et al.* Observation and study on meso damage and fracture of rock[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1999, 14(3): 373-383.
- [39] GAUTAM P K, VERMA A K, JHA M K, *et al.* Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 159: 460-474.
- [40] 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.
- [41] XU X D, ZHOU Y J, CHEN W Q, *et al.* Macro-microscopic deterioration behavior of gypsum rock after wetting and its constitutive model based on acoustic emission[J]. *Minerals*, 2022, 12(9): 1168.
- [42] 孙长伦, 李桂臣, GOMAH Mohamed Elgharib, 等. 基于纳米压痕技术的破碎煤样力学特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 682-691.  
SUN Changlun, LI Guichen, ELGHARIB GOMAH Mohamed, *et al.* Experimental investigation on the mechanical properties of crushed coal samples based on the nanoindentation technique[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 682-691.
- [43] LIU K Q, OSTADHASSAN M, BUBACH B. Application of nanoindentation to characterize creep behavior of oil shales[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 167: 729-736.
- [44] SUN C L, LI G C, GOMAH M E, *et al.* Creep characteristics of coal and rock investigated by nanoindentation[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(6): 769-776.
- [45] BANDINI A, BERRY P, BEMPORAD E, *et al.* Effects of intracrystalline microcracks on the mechanical behavior of a marble under indentation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 54: 47-55.
- [46] 杨江浩, 李勇, 吴翔, 等. 基于原子力显微镜的煤岩微尺度力学性质研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 144-151.  
YANG Jianghao, LI Yong, WU Xiang, *et al.* Study on micro-scale mechanical properties of coal rock based on atomic force microscopy[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 144-151.
- [47] 张妹珠, 许婧璟, 江权, 等. 基于原子力显微镜的板岩杨氏模量

- 宏观跨尺度表征方法研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 245-257.
- ZHANG Meizhu, XU Jingjing, JIANG Quan, *et al.* Cross-scale characterization of the Young's modulus of slate using atomic force microscopy[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S1): 245-257.
- [48] YANG S Y, ZHANG Q J, ZHAI P C. Computational micromechanics analysis of the functionally graded materials under thermal shock loading[J]. *Materials Science Forum*, 2003, 423-425: 687-692.
- [49] EBRAHIMI D, PELLENQ R J M, WHITTLE A J. Mesoscale simulation of clay aggregate formation and mechanical properties[J]. *Granular Matter*, 2016, 18(3): 49.
- [50] 刘汉香, 叶刁瑜, 别鹏飞, 等. 循环卸载过程中灰岩微观损伤特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 685-696.
- LIU Hanxiang, YE Diaoyu, BIE Pengfei, *et al.* Experimental study of microscopic and mesoscopic damage features of limestone under cyclic loading and unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(3): 685-696.
- [51] 李树春, 许江, 杨春和, 等. 循环荷载下岩石损伤的 CT 细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1604-1609.
- LI Shuchun, XU Jiang, YANG Chunhe, *et al.* Study of ct meso-experiment of rock damage under cyclic load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1604-1609.
- [52] GHAMGOSAR M, BAHAAADDINI M, ERARSLAN N, *et al.* A new experimental approach to quantify microfractures in the Fracture Process Zone (FPZ) under various loading conditions[J]. *Engineering Geology*, 2021, 283: 106024.
- [53] WANG Y, LI X, ZHANG B, *et al.* Meso-damage cracking characteristics analysis for rock and soil aggregate with CT test[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(7): 1361-1371.
- [54] LIU N Z, ZOU Y S, MA X F, *et al.* Study of hydraulic fracture growth behavior in heterogeneous tight sandstone formations using CT scanning and acoustic emission monitoring[J]. *Petroleum Science*, 2019, 16(2): 396-408.
- [55] 任建喜. 冻结裂隙砂岩单轴压缩损伤特性 CT 试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 24(S1): 4670-4673.
- REN Jianxi. Real time Ct testing on damage evolution characteristics of frozen cracked-sandstone under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 24(S1): 4670-4673.
- [56] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度影响下岩石细观损伤演化 CT 扫描[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 40-42, 46.
- YANG Gengshe, ZHANG Quansheng, PU Yibin. CT scanning test of meso-damage propagation of rock under different freezing temperature[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2004, 24(6): 40-42, 46.
- [57] 张彦. MRIL-P 核磁共振成像测井技术及其应用[J]. 石油仪器, 2009(2): 22-24, 28, 74.
- ZHANG Yan. Magnetic resonance image logging and its application[J]. *Petroleum Instruments*, 2009(2): 22-24, 28, 74.
- [58] BI J, NING L, ZHAO Y, *et al.* Analysis of the microscopic evolution of rock damage based on real-time nuclear magnetic resonance[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(5): 3399-3411.
- [59] CHENG H, ZHOU X P, PAN X K, *et al.* Damage analysis of sandstone during the creep stage under the different levels of uniaxial stress using NMR measurements[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, 44(3): 719-732.
- [60] ZHOU K P, LIU T Y, HU Z X. Exploration of damage evolution in marble due to lateral unloading using nuclear magnetic resonance[J]. *Engineering Geology*, 2018, 244: 75-85.
- [61] 张凯, 张东晓, 赵勇强, 等. 损伤岩石声发射演化特征及响应机制试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 96-106.
- ZHANG Kai, ZHANG Dongxiao, ZHAO Yongqiang, *et al.* Experimental study on acoustic emission evolution characteristics and response mechanism of damaged rocks[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(3): 96-106.
- [62] 张泽坤, 宋战平, 程昀, 等. 加载速率影响下类硬岩声发射及破裂响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(2): 115-124.
- ZHANG Zekun, SONG Zhanping, CHENG Yun, *et al.* Acoustic emission characteristics and fracture response behavior of hard rock-like material under influence of loading rate[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 115-124.
- [63] ZAFAR S, HEDAYAT A, MORADIAN O. Evaluation of crack initiation and damage in intact barre granite rocks using acoustic emission[C]//Geo-Congress 2020. Minneapolis, Minnesota. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020.
- [64] 李炜强, 许沁舒, 成功, 等. 单轴压缩下砂岩微破裂演化力学行为研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 60-67.
- LI Weiqiang, XU Qinshu, CHENG Gong, *et al.* Study on mechanical behavior of sandstone micro-fracture evolution under uniaxial compression test[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(11): 60-67.
- [65] 赵永红, 梁海华, 熊春阳, 等. 用数字图像相关技术进行岩石损伤的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 73-76.
- ZHAO Yonghong, LIANG Haihua, XIONG Chunyang, *et al.* Deformation measurement of rock damage by digital image correlation method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(1): 73-76.
- [66] 吴秋红, 夏宇浩, 赵延林, 等. 基于 DIC 及 CPG 技术的热冷循环后花岗岩 I 型断裂特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3102-3117.
- WU Qiuhong, XIA Yuhao, ZHAO Yanlin, *et al.* An integrated DIC and CPG investigation of the model- I fracture features for granites after cyclic heating-cooling treatments[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(7): 3102-3117.
- [67] 杨仁树, 李炜煜, 李永亮, 等. 3 种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3107-3118.
- YANG Renshu, LI Weiyu, LI Yongliang, *et al.* Comparative analysis on dynamic tensile mechanical properties of three kinds of rocks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9):

- 3107–3118.
- [68] NGUYEN T L, HALL S A, VACHER P, *et al.* Fracture mechanisms in soft rock; identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation[J]. *Tectonophysics*, 2011, 503(1-2): 117–128.
- [69] SHARAFISAF A M, ALIABADIAN Z, SHEN L M. Crack initiation and failure development in bimrocks using digital image correlation under dynamic load[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 109: 102688.
- [70] 张力民, 吕淑然, 刘红岩. 综合考虑宏细观缺陷的岩体动态损伤本构模型[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(3): 428–436.
- ZHANG Limin, LÜ Shuran, LIU Hongyan. A dynamic damage constitutive model of rock mass by comprehensively considering macroscopic and mesoscopic flaws[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 428–436.
- [71] 朱其志, 胡大伟, 周辉, 等. 基于均匀化理论的岩石细观力学损伤模型及其应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2): 266–272.
- ZHU Qizhi, HU Dawei, ZHOU Hui, *et al.* Research on homogenization-based mesomechanical damage model and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 266–272.
- [72] 张志镇, 滕业奇, 周睿, 等. 岩石非线性细观损伤-塑性耦合本构模型及其数值实现[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(6): 1425–1442.
- ZHANG Zhizhen, TENG Yeqi, ZHOU Rui, *et al.* Nonlinear mesoscale damage-plasticity coupled constitutive model for rocks and its numerical implementation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(6): 1425–1442.
- [73] MENG X Z, ZHANG H M, YUAN C, *et al.* Damage constitutive prediction model for rock under freeze-thaw cycles based on mesoscopic damage definition[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 293: 109685.
- [74] LI X, CAO W G, SU Y H. A statistical damage constitutive model for softening behavior of rocks[J]. *Engineering Geology*, 2012, 143: 1–17.
- [75] WANG R Q, WANG G L, ZHANG L, *et al.* Coupled macro-meso damage constitutive model for fractured rocks based on logistic growth theory[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 281: 109132.
- [76] 刘武, 过申磊, 陆倩, 等. 基于 TOUGHREACT 的岩石水力损伤耦合数值模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(7): 1306–1314, 1380.
- LIU Wu, GUO Shenlei, LU Qian, *et al.* Numerical model for hydro-mechanical-damage coupling of rocks based on TOUGHREACT[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(7): 1306–1314, 1380.
- [77] 王中文, 徐颖, 谢守冬, 等. 岩石冻融损伤细观特征数值模拟研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(11): 143–149.
- [78] NEAUPANE K M, YAMABE T, YOSHINAKA R. Simulation of a fully coupled thermo-hydro-mechanical system in freezing and thawing rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(5): 563–580.
- [79] SAKSALA T. On the strain rate sensitivity of coarse-grained rock: a mesoscopic numerical study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(9): 3229–3240.
- [80] XU T, FU M, YANG S Q, *et al.* A numerical meso-scale elastoplastic damage model for modeling the deformation and fracturing of sandstone under cyclic loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(9): 4569–4591.
- [81] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1771–1776.
- SHAN Renliang, XUE Yousong, ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1771–1776.
- [82] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [83] FRANTZISKONIS G, DESAI C S. Constitutive model with strain softening[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1987, 23(6): 733–750.
- [84] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(24): 4484–4490.
- YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on statistical damage constitutive model of rock considering scale effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4484–4490.
- [85] 曹文贵, 赵衡, 李翔, 等. 基于残余强度变形阶段特征的岩石变形全过程统计损伤模拟方法[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(6): 139–145.
- CAO Wengui, ZHAO Heng, LI Xiang, *et al.* A statistical damage simulation method for rock full deformation process with consideration of the deformation characteristics of residual strength phase[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(6): 139–145.
- [86] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 98–104.
- YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, *et al.* Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 98–104.
- [87] RODRÍGUEZ P, CELESTINO T B. Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 210: 54–69.
- [88] 朱珍德, 张勇, 李术才, 等. 用数字图像相关技术进行红砂岩细观裂纹损伤特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(7): 1123–1128.
- ZHU Zhende, ZHANG Yong, LI Shucai, *et al.* Studies on microcosmic crack damage properties of a red sandstone with digital image technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1123–1128.
- [89] 孙文进, 金爱兵, 王树亮, 等. 基于 DIC 的高温砂岩劈裂力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 511–518.

- [90] Aliabadian Zeinab, Zhao Gao-Feng, Russell Adrian R. Failure, crack initiation and the tensile strength of transversely isotropic rock using the Brazilian test[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 122: 104073.
- [91] 亓宪寅, 王胜伟, 杨振, 等. 基于数字图像的复合岩石试验与损伤模型研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(30): 13450–13459.  
QI Xianyin, WANG Shengwei, YANG Zhen, *et al.* Composite rock test and damage model based on digital image[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(30): 13450–13459.
- [92] 李德春, 葛宝堂, 舒继森. 岩体破坏过程中的电阻率变化试验[J]. *中国矿业大学学报*, 1999, 28(5): 80–82.  
LI Dechun, GE Baotang, SHU Jisen. Experiment of resistivity variation of rocks in failure process[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 28(5): 80–82.
- [93] 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.
- [94] 纪洪广, 向鹏, 张磊, 等. 开采扰动岩体力学性质变异试验研究与探测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(11): 2352–2359.  
JI Hongguang, XIANG Peng, ZHANG Lei, *et al.* Experimental study and detection analysis of mechanical properties variability of rock mass in excavation disturbance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(11): 2352–2359.
- [95] CHEN G Y, LIN Y M. Stress-strain-electrical resistance effects and associated state equations for uniaxial rock compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 223–236.
- [96] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(10): 1473–1477.  
WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, *et al.* Study on electromagnetic emission characteristics of loaded rock and its applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10): 1473–1477.
- [97] 李忠辉, 王恩元, 何学秋, 等. 含水量对煤岩电磁辐射特征的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(3): 362–366.  
LI Zhonghui, WANG Enyuan, HE Xueqiu, *et al.* Effect of moisture content on electromagnetic radiation characteristic of coal or rock[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(3): 362–366.
- [98] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, MANUELLO A, *et al.* Mechanical and electromagnetic emissions related to stress-induced cracks[J]. *Experimental Techniques*, 2012, 36(3): 53–64.
- [99] FUKUI K, OKUBO S, TERASHIMA T. Electromagnetic radiation from rock during uniaxial compression testing: the effects of rock characteristics and test conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, 38(5): 411–423.
- [100] 李夕兵, 万国香, 周子龙. 岩石破裂电磁辐射频率与岩石属性参数的关系[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(1): 253–259.  
LI Xibing, WAN Guoxiang, ZHOU Zilong. The relation between the frequency of electromagnetic radiation (EMR) induced by rock fracture and attribute parameters of rock masses[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 253–259.
- [101] 邓乃夫, 乔兰, 刘建, 等. 基于裂隙演化微分动力学机制的岩石损伤本构模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(2): 677–689.  
DENG Naifu, QIAO Lan, LIU Jian, *et al.* A damage constitutive model of rock based on differential kinetic mechanism of fracture evolution[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2024, 55(2): 677–689.
- [102] 吕思清, 朱杰兵, 汪斌, 等. 冻融荷载耦合作用下含开口裂隙砂岩宏细观损伤模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(5): 1124–1135.  
LV Siqing, ZHU Jiebing, WANG Bin, *et al.* Study on macro-meso damage model of sandstone with open cracks under the coupling action of freeze-thaw and load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(5): 1124–1135.
- [103] 杨更社, 谢定义. 岩体宏观细观损伤的耦合计算分析 [C]//第六次全国岩石力学与工程学术大会, 第六次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 武汉: 2000.
- [104] 张慧梅, 王云飞. 冻融红砂岩损伤演化多尺度分析[J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2103–2114.  
ZHANG Huimei, WANG Yunfei. Multi-scale analysis of damage evolution of freezing-thawing red sandstones[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2103–2114.
- [105] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 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, ZHANG Changqing, *et al.* The discussion about damage constitutive relation of rock under uniaxial stress identified by CT[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997, 18(2): 29–34.
- [106] 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): 279–280, 289–285.  
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): 279–280, 289–285.
- [107] 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.
- [108] 樊水龙. 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*, 2020, 37(3): 102–107.  
FAN Shuilong. Evolution of fractal and mechanical properties of cyclic dry-wet altered granite based on SEM[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(3):

- 102–107.
- [ 109 ] 褚怀保, 陈璐阳, 杨小林, 等. 含初始损伤饱水花岗岩的冲击破坏规律[J]. *爆炸与冲击*, 2024: 1–16.
- [ 110 ] LAI Y M, ZHAO K, HE Z W, *et al.* Fractal characteristics of rocks and mesoscopic fractures at different loading rates[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 33: 100431.
- [ 111 ] MOURLAS C, PARDOEN B, BÉSUELLE P. Large-scale failure prediction of clay rock from small-scale damage mechanisms of the rock medium using multiscale modelling[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2023, 47(7): 1254–1288.
- [ 112 ] LI X F, ZHANG Q B, LI H B, *et al.* Grain-based discrete element method (GB-DEM) modelling of multi-scale fracturing in rocks under dynamic loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(12): 3785–3817.
- [ 113 ] SUN B, GUO T. A dimensional analysis based multi-scale thermal damage framework of brittle materials at elevated temperatures[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 127: 104089.
- [ 114 ] 李业学, 谢和平, 刘建峰. RGB 图像分形维数计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(S1): 2779–2784.
- LI Yexue, XIE Heping, LIU Jianfeng. Research on calculation method of fractal dimension of RGB image[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S1): 2779–2784.
- [ 115 ] XIE Heping. *Fractals in rock mechanics*[M]. CRC Press, 2020.
- [ 116 ] 郑哲远. 损伤跨尺度演化分析的变尺度域有限元理论及其算法[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- ZHENG Zheyuan. Variable scale domain finite element theory and its algorithm for damage cross-scale evolution analysis[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [ 117 ] 李兆霞, 王滢, 吴佰建, 等. 桥梁结构劣化与损伤过程的多尺度分析方法及其应用[J]. *固体力学学报*, 2010, 31(6): 731–756.
- LI Zhaoxia, WANG Ying, WU Baijian, *et al.* Multi-scale modeling and analyses on structural deterioration and damage in long-span bridges and its application[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2010, 31(6): 731–756.