基于原位 CT 扫描的三峡花岗岩细观结构特征与破裂机制研究

朱泽奇[1, 2, 3]，田铠玮[1, 2]，李子硕[4]，盛 谦[1, 2]，陈 健[1, 2, 3]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室，湖北 武汉 430071；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心，湖北 武汉 430071；4. 中建三局基础设施建设投资有限公司，湖北 武汉 430064）

摘要：针对三峡地区中粗粒与中细粒两类典型花岗岩开展原位 CT 测试，并借助数字体积相关（DVC）技术实现岩石试样内部变形场的非侵入测量，研究花岗岩细观结构特征对花岗岩宏观力学性质和破坏模式的影响规律。结果表明：中粗粒与中细粒花岗岩的细观结构差异主要表现为云母定向排列的不同，云母矿物普遍呈现扁平的椭球状结构，且中粗粒花岗岩中的云母颗粒相较于中细粒形状更为扁平，其云母矿物具有更加显著的空间定向排列特征；中细粒花岗岩破裂网络呈各向同性分布，其破裂模式受应力控制，而中粗粒花岗岩破裂面方向与云母定向排列高度一致，表现为典型的结构控制破坏；等效应变较大的区域与岩石峰后破裂形态基本一致，说明等效应变能够有效预测峰后岩石的实际破裂形态，将中粗粒花岗岩等效应变＞0.4%的区域视为潜在破坏区域，则其分布形态与云母排列方向基本一致，揭示了花岗岩细观结构对其破裂过程的主导作用。

关键词：岩石力学；花岗岩；X 射线 CT 扫描；花岗岩细观结构；单轴强度；破裂模式

中图分类号：TU 45 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2025)11－2887－14

Meso-structural characteristics and fracture mechanism of Three Gorges granite based on in-situ CT scanning

ZHU Zeqi[1, 2, 3], TIAN Kaiwei[1, 2], LI Zishuo[4], SHENG Qian[1, 2], CHEN Jian[1, 2, 3]

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety*, *Institute of Rock and Soil Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Wuhan*, *Hubei* 430071, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*; 3. *National and Local Joint Engineering Research Center for Underwater Tunnel Technology*, *Wuhan*, *Hubei* 430071, *China*; 4. *CCTEB Infrastructure Construction Investment Co.*, *Ltd.*, *Wuhan*, *Hubei* 430064, *China*)

Abstract: In situ CT testing was conducted on two typical types of granite from the Three Gorges region, specifically medium coarse-grained and medium fine-grained granite. Non-invasive measurement of the internal deformation field of rock samples was achieved using digital volume correlation (DVC) technology. This study examined the influence of the microstructural characteristics of granite on its macroscopic mechanical properties and failure modes. The results indicate that the difference in microstructure between medium coarse-grained and medium fine-grained granites is primarily manifested in the directional arrangement of mica. Mica minerals

收稿日期：2025－04－29；**修回日期：**2025－07－04

基金项目：国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目（U21A20159）

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U21A20159)

作者简介：朱泽奇（1980－），男，博士，2002 年毕业于西安交通大学土木工程专业，现任副研究员，主要从事岩石力学特性方面的研究工作。E-mail：zqzhu@whrsm.ac.cn

DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0293

generally exhibit a flat ellipsoidal structure, and the mica particles in medium coarse-grained granites are flatter in shape compared to those in medium fine-grained granites, suggesting a more pronounced spatial directional arrangement of mica in the former. The fracture network of medium and fine-grained granite displays an isotropic distribution, with the fracture mode being stress-controlled. The orientation of the fracture surface in medium coarse-grained granite closely aligns with the orientation and arrangement of mica, demonstrating typical structural control failure. Areas exhibiting larger equivalent strain changes correlate well with the post-peak fracture morphology of the rocks, indicating that equivalent strain can effectively predict the actual fracture morphology of post-peak rocks. In medium coarse-grained granite, regions with equivalent strain changes exceeding 0.4% are identified as potential failure areas, with their distribution patterns aligning closely with the direction of mica arrangement, revealing the dominant role of the mesostructure of granite in its fracture process.

Key words: rock mechanics; granite; X-ray CT scanning; granite mesostructure; uniaxial strength; fracture mode

1 引 言

花岗岩作为大陆地壳广泛分布的侵入型岩浆岩，以其稳定的物理力学特性著称，被广泛应用于建筑、隧道、水利及核废料地下存储等领域[1-5]。因此，明确花岗岩在外荷载作用下的强度特性，对工程爆破、开挖及支护等活动的安全实施至关重要。

花岗岩主要由钾长石、斜长石、石英及云母等矿物构成。大量研究表明，其宏观力学行为受细观结构特征(如矿物粒径尺寸、矿物含量等)显著影响[6-18]。细观结构会影响花岗岩中微裂纹萌发、扩展、汇合这一破裂过程，从而导致不同细观结构的花岗岩呈现出不同的宏观力学表现。因此，探明花岗岩内部细观结构与破裂行为的关系一直是岩石力学研究的核心问题之一。为了观测花岗岩的破裂过程，常规的研究思路主要通过开展室内岩石力学试验并结合扫描电镜(SEM)、声发射监测、高清摄影等方法获取岩石破裂的相关信息。但是这些方法仅能获取岩石破坏过程中的部分信息：声发射法无法捕捉无震应变能释放(即不发射声波的破裂过程)并且对于破裂位置的定位存在不确定性，扫描电镜则仅能观测小尺度的局部破坏信息，而且是静态信息；高清摄影虽能获取岩石破裂全过程的动态信息，但是仅能获取试样表面信息，无法得到三维裂缝信息。

近年来，由于 X 射线计算机断层扫描(CT)技术具有非破坏性的特点，已成为观察和分析岩石材料破裂演化过程中细观结构变化最热门的方法之一[19-20]。例如，L. F. Fan 等[21]采用 CT 扫描研究花岗岩在多级循环加载下的细观结构形态，探讨了单级循环加载循环次数对花岗岩细观疲劳特性的影响，尤其是对面积孔隙率和体积孔隙率的影响。A. Cartwright-Taylor 等[22]进行了原位 CT 三轴压缩试验，比较了热处理和未处理 Ailsa Craig 花岗岩样本的裂纹模式差异，分析了材料初始异质性对裂缝网络演化和局部化的影响，表明材料初始异质性对岩石破坏模式具有重要影响。J. McBeck 等[23]基于一系列 CT 扫描试验，研究了 Westerly 花岗岩在不同围压下的变形特征。J. Gao 等[24]采用实时 CT 扫描技术，对热损伤花岗岩在压缩加载下的空间三维(3D)微裂纹和平面二维(2D)微裂纹的演变过程进行了观察。Q. Hu 等[25]通过对脆性完整花岗岩的原位 CT 单轴压缩测试的观察和定量分析，实时记录了花岗岩在不同加载阶段的裂纹发展情况。试验结果显示，孤立微裂纹的成核是失效前的主要损伤模式，损伤在中等载荷下逐渐积累，密度稳定增加，直到微裂纹不稳定聚合，最终导致宏观规模的失效。

尽管原位 CT 技术为观测岩石变形演化和破裂过程提供了强有力的工具，但其所能获取的信息仍然有限。由于该技术主要通过密度变化来检测内部结构的演化，能够直接从 CT 图像获取的信息非常有限，最关键的是研究人员无法定量评估岩石内部的应变和位移场。而且，由于各种脆性岩石(如砂岩、页岩、花岗岩等)在压缩过程中所产生的应变非常有限，尤其是在尚未出现明显破裂的情况下，无法有效捕捉其变形演化的趋势。为解决上述问题，数字体积相关(DVC)技术应运而生，它能够通过配对算法解析 CT 图像序列，从而精确地追踪和获取岩石内部的三维应变和位移场，弥补原位 CT 技术在变形过程量化分析方面的不足，能够更准确地揭示岩石在加载过程中的变形机制，深入理解岩石的破裂

和变形的时空演化过程[26-27]。

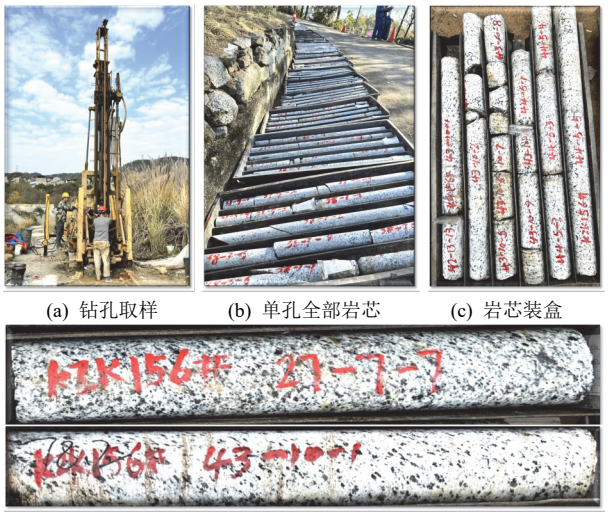
本研究以三峡地区中粗粒与中细粒两类典型花岗岩为研究对象，通过 CT 扫描技术对其细观结构特征进行定性分析；通过原位 CT 扫描技术分析岩石在单轴加载时的力学性质；借助 DVC 技术，实现岩石试样内部变形场的可视化及全场变形的非侵入测量，成功观测试样内部位移与破裂的演变情况。综合以上分析，精细定量地分析三峡花岗岩宏观力学行为与细观结构演化之间的内在联系。

2　花岗岩细观结构测试与分析

2.1　三峡花岗岩样品

试验钻取了深度为 20～120 m 的岩芯，如图 1 所示。本次所取的岩石样本均为新鲜完整的花岗岩，风化程度低，为微新花岗岩。此类微新花岗岩孔隙率低，结构完整，无肉眼可见的裂隙与孔洞。所取花岗岩主体为中粗粒闪云斜长花岗岩，呈灰白至浅灰色，主要为中粗粒结构，局部为中细粒结构，如图 2 所示；此外，黑云母等暗色矿物略具定向排列，如图 3 所示。这一分析结果与汪在芹等[28]对三峡坝址花岗岩的研究一致。总之，三峡地区花岗岩具有 2 个显著特征：(1) 含有中粗粒与中细粒 2 种粒径的花岗岩；(2) 云母矿物沿特定方向排列。

开展试验的花岗岩试样为高 80 mm，直径为 36mm 的圆柱体试样，分别选取中粗粒与中细粒试样各 1 个进行对比分析，二者新鲜完整且无肉眼可观测到的原生裂隙。

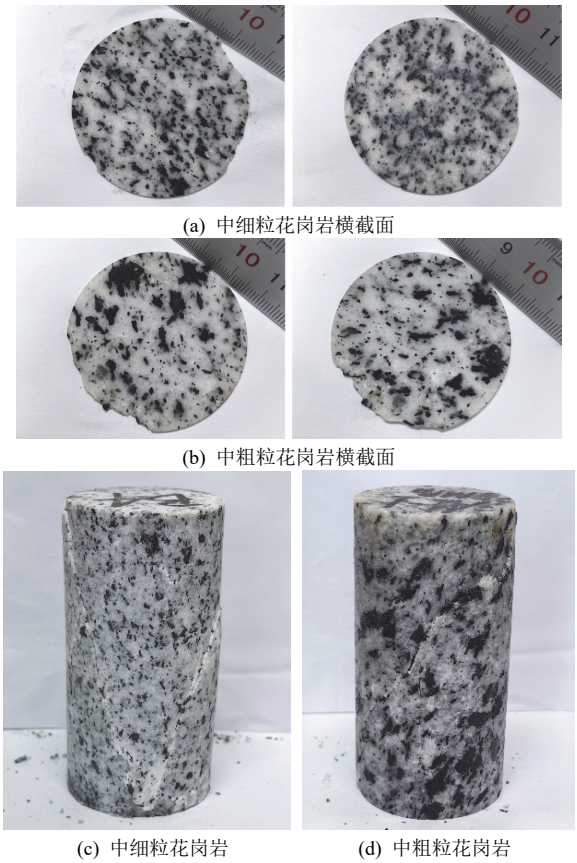


(a) 钻孔取样　(b) 单孔全部岩芯　(c) 岩芯装盒

(d) 完整岩芯

图 1　三峡花岗岩试样钻孔岩芯

Fig.1　Core sample from borehole drilled in Three Gorges granite



(a) 中细粒花岗岩横截面

(b) 中粗粒花岗岩横截面

(c) 中细粒花岗岩　(d) 中粗粒花岗岩

图 2　中细粒与中粗粒 2 种典型粒径的三峡花岗岩

Fig.2　Three Gorges granite with two typical grain sizes: medium-fine and medium-coarse



图 3　三峡花岗岩黑云母的定向排列特征

Fig.3　Oriented alignment characteristic of biotite in Three Gorges granite

X 射线衍射测试结果表明，三峡花岗岩主要由石英、长石、云母等矿物组成。中细粒花岗岩的主要矿物含量(质量分数)为：石英 37%、长石 49%、云母 5%、其他 9%；中粗粒花岗岩为：石英 32%、长石 41%、云母 17%、其他 10%。

通过对切割好的三峡花岗岩小块试样进行分析，使用 Quanta200 型扫描电子显微镜(SEM)观察，重点分析了试样表面石英、长石和云母的细观结构。结果显示：石英和长石矿物呈现完整的块状结构，而云母矿物则表现为疏松的片状结构，是花岗岩中的弱面，如图 4 所示。

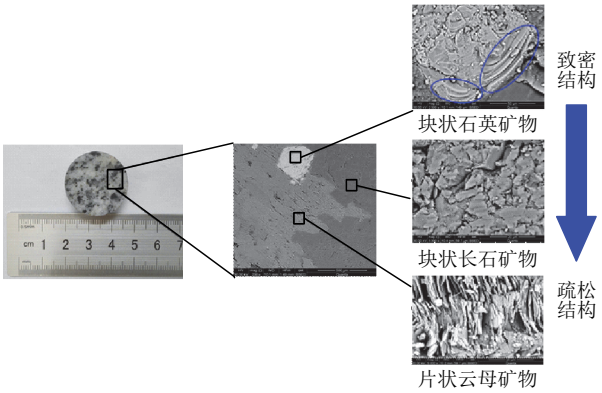


图 4　三峡花岗岩表面 SEM 扫描结果

Fig.4　SEM scanning results of the surface of Three Gorges granite

2.2　基于 CT 扫描的细观结构测试

CT 扫描能够重构材料的内部三维结构，是研究岩石细观结构的有效手段。为深入分析三峡花岗岩的细观结构，本研究从矿物含量、形态和分布特征等方面对其展开定量分析，以全面掌握花岗岩的细观组构信息。本文对三峡中粗粒与中细粒花岗岩进行了 CT 扫描测试，并运用图像处理和分析技术进行定量研究。选用中国科学院武汉岩土力学研究所的 GeoScan 200 全直径岩心 X 射线 CT 系统进行花岗岩的 CT 扫描试验，其扫描精度为 56 μm 。

考虑到花岗岩中的石英和长石矿物结构完整，力学性能稳定；而云母因其层状结构，力学性能相对较差。因此，本文将石英和长石视为岩石的基质，将云母视为岩石中的弱面，从而将三峡花岗岩视为由云母与岩石基质(石英、长石)组成的复合材料。

X 射线穿透材料的能力与其密度成反比，反映在 CT 灰度图像上(即 CT 值)，密度越大，图像越亮；密度越小，图像越暗。由于云母的密度通常低于石英和长石，其在 CT 图像上的灰度特征较为明显，易于区分。图 5 展示了三峡花岗岩 CT 值分布直方图，图中可见 2 个明显的波峰，右侧代表云母，左侧则为石英和长石组成的岩石基质。经过阈值分割、去噪和形态学操作后，最终获得了云母矿物的切片图像，如图 6 所示。

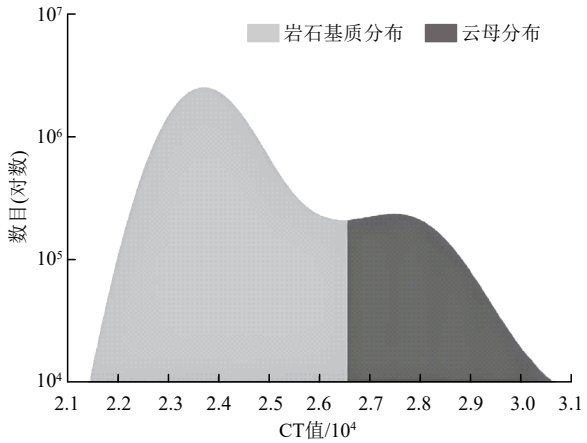


图 5　三峡花岗岩 CT 值分布直方图

Fig.5　Histogram of CT value distribution of Three Gorges granite

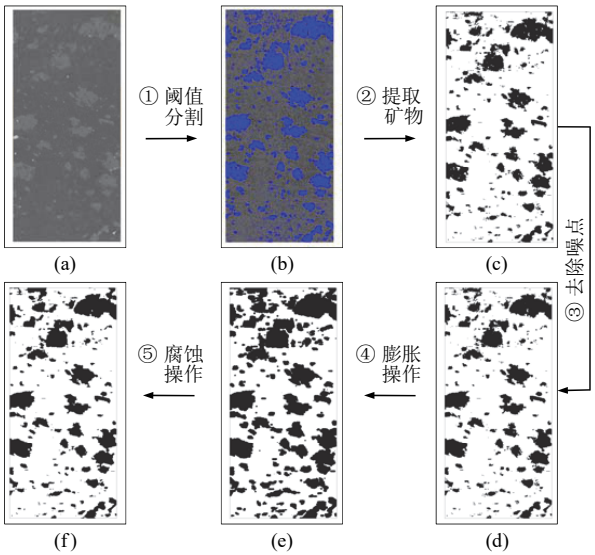


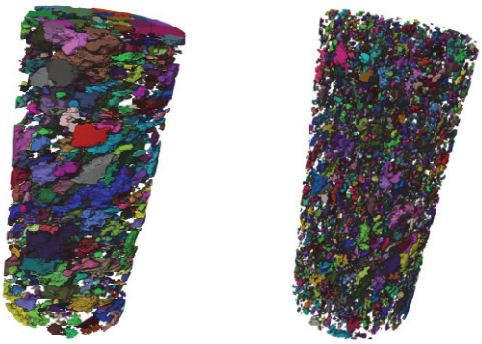
图 6　基于 CT 图像的形态学运算提取矿物

Fig.6　Extraction of minerals based on morphological operations in CT images

为了准确统计分析单个云母矿物的形态特征，首先需要分离黏连的矿物颗粒，否则可能导致显著的误差。本文使用分水岭算法分离云母颗粒。图 7 展示了分离出的中粗粒和中细粒花岗岩，二者在粒径上的差异显著，中细粒花岗岩中共含有 8 070 个云母颗粒，而中粗粒花岗岩中云母颗粒较少，仅为 1 684 个。图 8 展示了典型的云母颗粒形态，从正视图、侧视图和俯视图 3 个不同的视角观察，云母颗粒呈扁平椭球状。

本文重点统计分析了云母颗粒的以下特征参数：等效直径 D_{eq}、长度 L_{3d}、宽度 B_{3d}、厚度 T_{3d}、形状因子 S_{VA} 及 Feret 形状因子 S_{Feret}：

$$D_{\mathrm{eq}}=\sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \tag{1}$$



(a) 中粗粒花岗岩　　(b) 中细粒花岗岩

图 7　中粗粒与中细粒花岗岩中的云母颗粒分离与标记

Fig.7　Separation and labeling of mica particles in medium-coarse and medium-fine granite

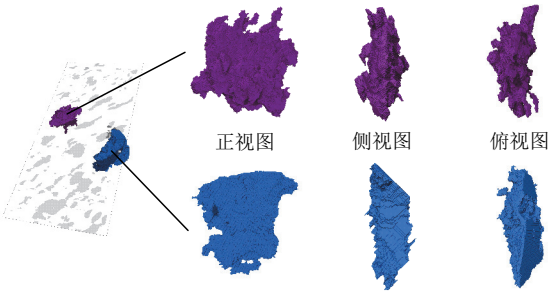


图 8　中粗粒花岗岩中典型云母颗粒形态

Fig.8　Typical mica particle morphology in medium-coarse granite

$$S_{\mathrm{VA}}=\frac{A_{3\mathrm{d}}^3}{36\pi V^2} \tag{2}$$

$$S_{\mathrm{Feret}}=\frac{L_{3\mathrm{d}}}{T_{3\mathrm{d}}} \tag{3}$$

式中：$A_{3\mathrm{d}}$ 为颗粒的表面积，V 为颗粒的体积。

图 9 给出了中粗粒花岗岩云母颗粒形状参数对数正态分布拟合。图 9 显示，矿物颗粒的长度、宽度、厚度、等效长度及形状因子均符合对数正态分布。整体来看，中粗粒花岗岩的粒径约为中细粒的 2 倍，且中粗粒中的云母颗粒相较于中细粒形状更为扁平。由于形状因子均值分布在 2.6～5.9 范围内，说明云母矿物的形状较扁平，因此采用等效直径作为粒径尺寸并不合适。因此，本文将云母颗粒等效为椭球，选择将长轴长度视为粒径尺寸参数。表 1 展示了中粗粒和中细粒花岗岩中黑云母矿物主要形状参数的统计结果。如表 1 所示，中粗粒的粒径尺寸为 3.01～3.94 mm，中细粒花岗岩的粒径尺寸为 0.88～1.33 mm。

如前所述，三峡花岗岩的一个显著特征是云母矿物的定向排列。基于 CT 扫描结果，本文对云母矿物的定向排列角度进行了定量分析。计算了不同方向(xy，yz，xz)切片上云母矿物的排列方向，如

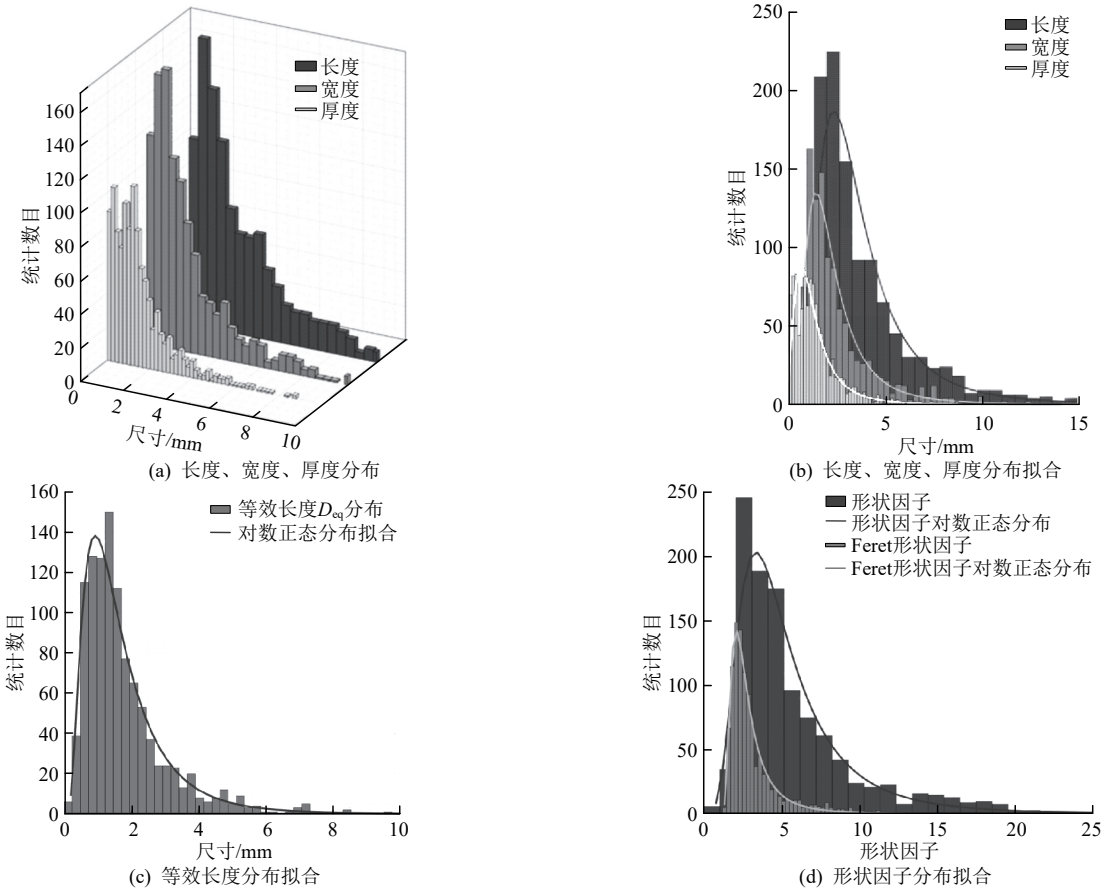


图 9　中粗粒花岗岩云母颗粒形状参数对数正态分布拟合

Fig.9　Log-normal distribution fitting of shape parameters of mica particles in medium-coarse granite

表 1　三峡花岗岩云母矿物形态参数统计结果

Table 1　Statistical results of morphological parameters of mica minerals of Three Gorges granite

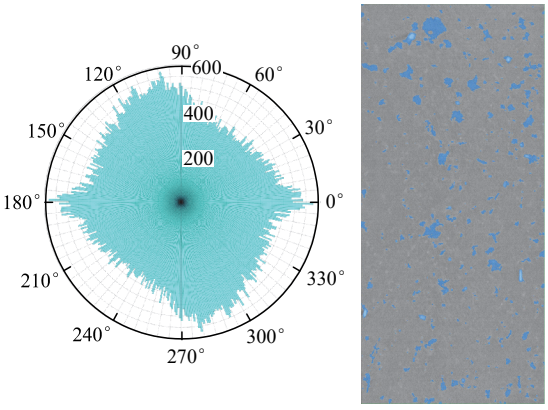
粒径类型	取值类型	D_{eq} /mm	L_{3d} /mm	B_{3d} /mm	T_{3d} /mm	S_{VA}	S_{Feret}
中粗粒(CG)	平均值	1.77	3.94	2.54	1.420	5.85	3.20
	中位数	1.44	3.01	1.93	1.150	4.47	2.58
	最大值	9.70	19.20	15.30	8.750	41.14	22.76
	最小值	0.49	1.47	0.58	0.068	1.67	1.21
中细粒(FG)	平均值	0.65	1.33	0.58	0.560	3.27	2.58
	中位数	0.49	0.88	0.59	0.430	2.31	2.25
	最大值	5.10	12.03	10.30	5.300	56.40	11.10
	最小值	0.20	0.38	0.18	0.066	1.04	1.17

图 10，11 所示。对比发现，图 11 中的玫瑰图更为狭长，说明中粗粒花岗岩中的云母矿物排列方向更加集中，而中细粒花岗岩中的云母排列方向则在更大的角度范围内变化。

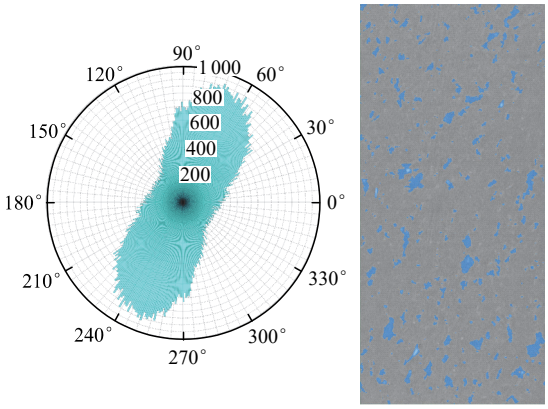
3　花岗岩原位 CT 测试与分析

3.1　基于 CT 扫描的花岗岩破裂形态分析

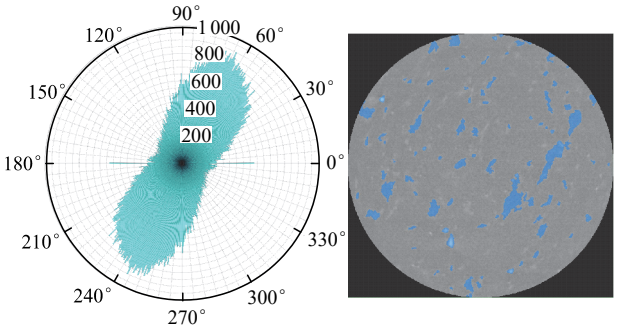
原位 CT 技术可以无损观测岩石试样在外荷载作用下岩石内部破裂损伤的动态演化过程，精细化



(a) *yz* 方向切片分析(单位：条)



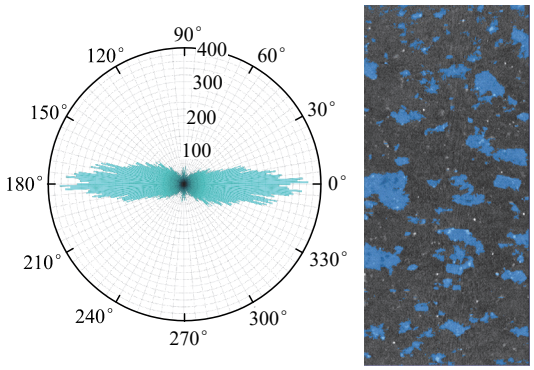
(b) *xz* 方向切片分析(单位：条)



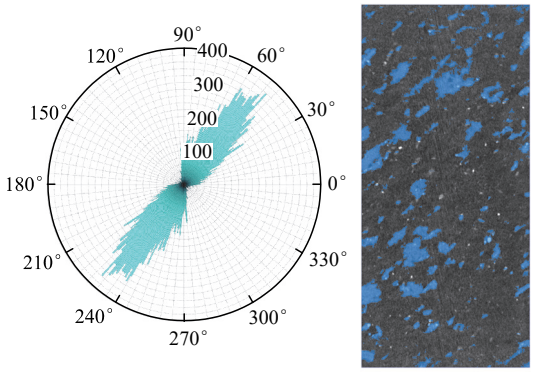
(c) *xy* 方向切片分析(单位：条)

图 10　中细粒云母矿物定向排列方向二维切片分析

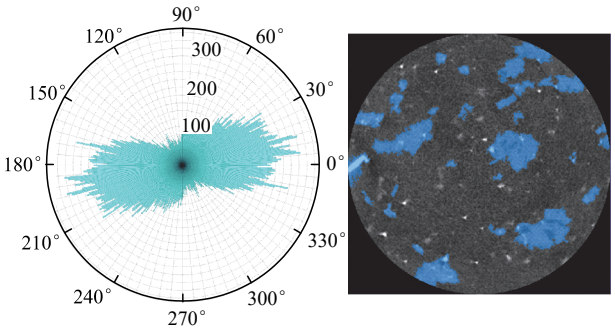
Fig.10　2D slice analysis of mica mineral orientation in medium-fine granite



(a) *yz* 方向切片分析(单位：条)



(b) *xz* 方向切片分析(单位：条)



(c) *xy* 方向切片分析(单位：条)

图 11　中粗粒云母矿物定向排列方向二维切片分析

Fig.11　2D slice analysis of mica mineral orientation in medium-coarse granite

定量化地分析岩石的破裂形态与特征，获知岩石内部的破裂演进过程，试验装置如图 12 所示。采用原位 CT 加载装置对试样进行单轴压缩测试，采用应力控制模式，施加载荷速率为 0.002 kN/s。

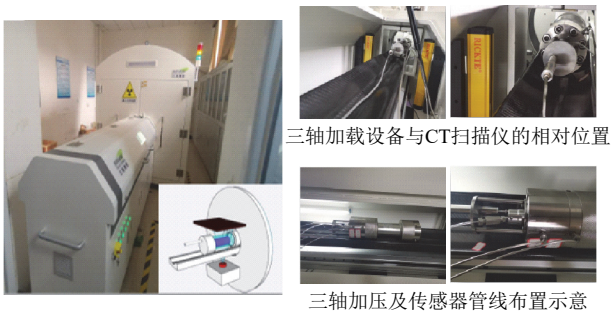


图 12　花岗岩原位 CT 测试系统

Fig.12　In-situ CT testing system for granite

图 13 展示了测试结果，基于原位加载测量的荷载－位移数据，计算得到 2 组试样的应力－应变曲线。2 组试样分别进行了 9 个扫描点的 CT 扫描，中细粒试样的扫描点为 *N*1～*N*9，中粗粒试样的扫描点为 *P*1～*P*9。中细粒试样 FG 的强度为 122 MPa，高于中粗粒试样 CG 的 100.5 MPa。

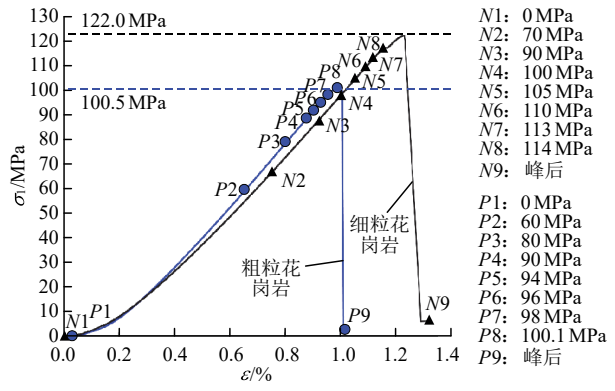
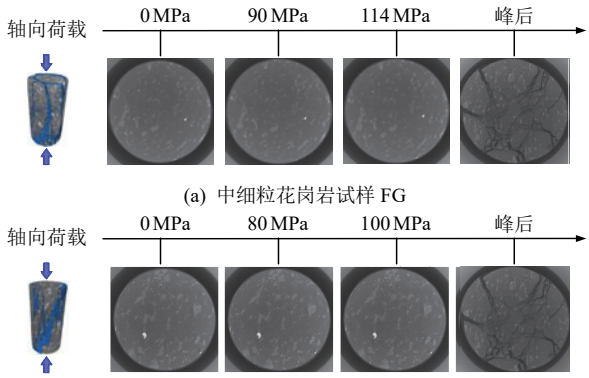


图 13　2 种花岗岩样品的扫描次数及对应的扫描点

Fig.13　The scanning times and corresponding scanning points for two types of granite samples

对 CT 数据进行分析，获得了不同加载阶段的典型 *xy* 切片 CT 扫描结果，如图 14 所示。在峰值应力之前，2 个试样均为完整岩石，在 56 μm 的 CT 扫描分辨率下未发现可观测裂缝，表明花岗岩试样致密完整，破坏形式为脆性突然破裂，未表现出渐进破坏特征。即使在峰前多次进行原位 CT 扫描，仍未观察到裂缝，这与页岩、煤岩、砂岩等岩石的原位 CT 试验结果有所不同[26-27, 29]，但是与 L. F. Fan 等[21,23,25]针对花岗岩的原位 CT 试验结果是一致的。



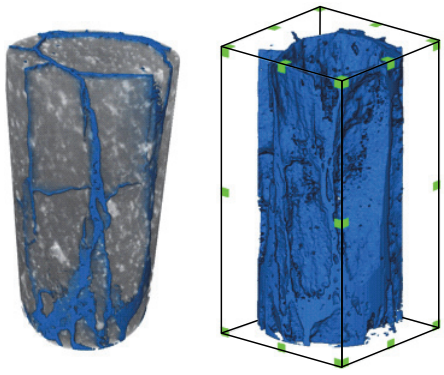
(a) 中细粒花岗岩试样 FG

(b) 中粗粒花岗岩试样 CG

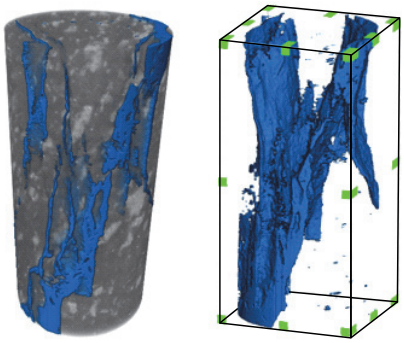
图 14　不同加载阶段 2 种花岗岩试样 CT 图像

Fig.14　CT images of two types of granite specimens at different loading stages

对峰后花岗岩破裂面进行三维重构，图 15 展示了 2 类试样的破裂形态，图像中蓝色部分为破裂面，灰色部分为花岗岩。2 类试样整体展示出不同的几何形态特征：中细粒花岗岩(见图 15(a))的破裂面在空间上呈均匀分布，接近各向同性，裂纹扩展没有优先方向，岩石试样在各个方向上受到了均匀的应力作用，属于应力控制型破坏。即使中细粒内部存在一些原生裂隙，但它们并没有主导裂纹扩展的方向，而是由应力集中区域决定了裂纹的产生和扩展过程。相比之下，中粗粒花岗岩(见图 15(b))显示出一条倾斜的主剪切破裂面与竖直的次张拉破裂



(a) 试样 FG



(b) 试样 CG

图 15　2 种花岗岩试样的三维破裂面形态

Fig.15　3D fracture surface morphologies of two types of granite specimens

面，主破裂面沿云母矿物的排列方向扩展，说明破裂过程受到矿物结构控制，云母的层状解理为裂纹扩展提供了天然的弱面，裂纹沿着这些弱面优先扩展，体现了粒径较大的矿物对破裂方向的主导作用。这种现象表明中粗粒花岗岩内部的矿物学特性在控制裂纹扩展方向上起到了关键作用，而不仅仅是外部应力的作用。

表 2 给出了中粗粒花岗岩与中细粒花岗岩试样在不同高度处的 CT 值、裂缝面积和分形维数的计算结果。这些关键参数展示了两类试样在应力作用下的破裂行为及其内部结构的异质性。CT 值的变化反映了岩石密度分布的差异，裂缝面积量化了裂缝发育的程度，而分形维数则描述了裂缝网络的复杂性和几何特征。中细粒花岗岩的 CT 值较低，对应着更高的裂缝面积与体积分数，更高的分形维数说明破裂面构成的裂纹网络较为复杂。相反，中粗粒花岗岩的 CT 值较高，破裂面积和体积分数较低，更低的分形维数说明岩石内部相对简单的裂纹网络。

表 2　2 种花岗岩试样 CT 扫描结果对比分析

Table 2　Comparative analysis of CT scanning results of two types of granite specimens

编号	CT 值均值	2D 面积分数均值/%	3D 体积分数/%	2D 分形维数均值	3D 分形维数
FG	19 719	18.30	18.3	1.36	2.37
CG	21 746	10.87	10.9	1.25	2.29

为进一步探讨中粗粒花岗岩中破裂面方向与云母定向排列之间的关系，聚焦于云母矿物结构特征对破裂面扩展的影响，通过对云母排列方向与破裂面方向之间的关联分析，旨在揭示岩石内部细观结构对其破裂模式的控制作用。

图 16 展示了 2 种花岗岩试样破裂面的排列方向，图 17 展示了 2 种花岗岩试样云母矿物的排列

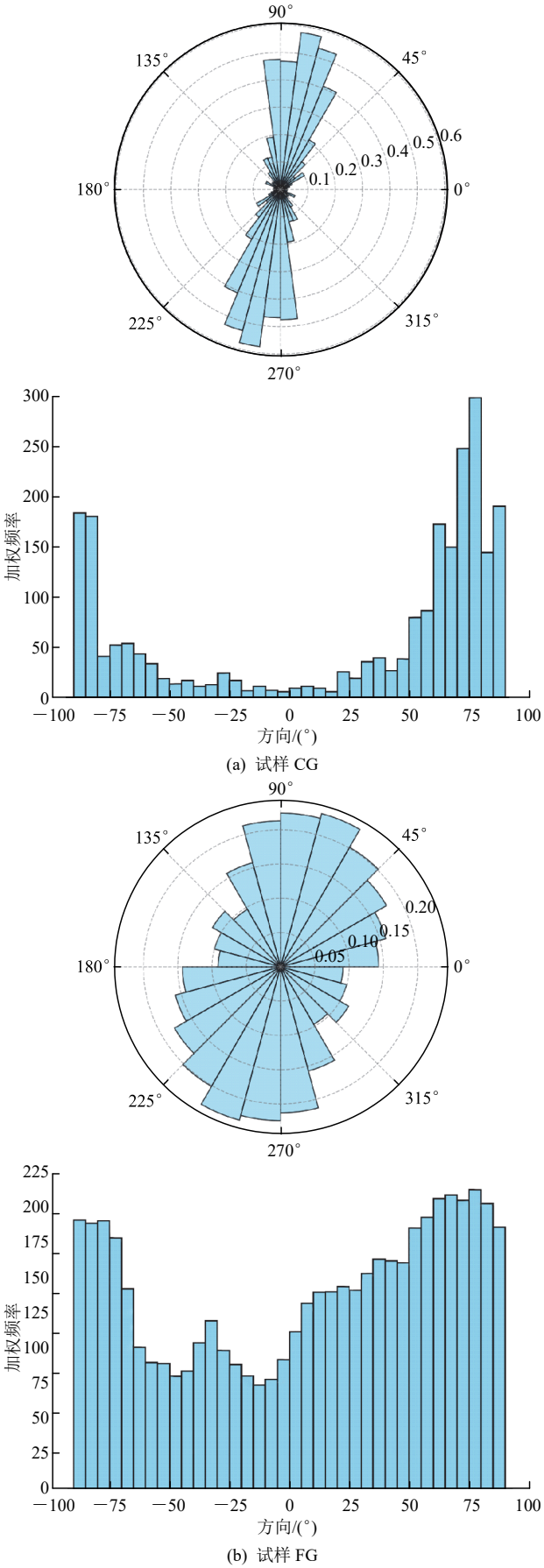
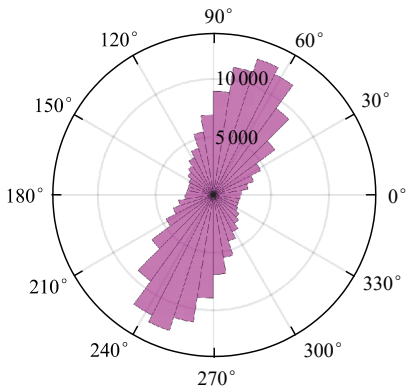
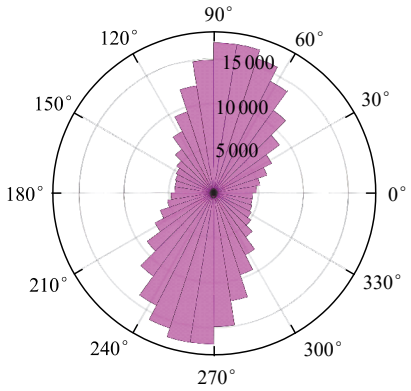


图 16　2 种花岗岩试样破裂面方向统计分析

Fig.16　Statistical analysis of fracture orientation of two types of granite specimens



(a) 试样 CG(单位：条)



(b) 试样 FG(单位：条)

图 17　2 种花岗岩试样云母定向排列方向统计分析

Fig.17　Statistical analysis of mica orientation of two types of granite specimens

方向。为减少微小破裂对统计结果的干扰，采用加权频率密度法，使用破裂面积作为权重对破裂面排列方向进行统计分析：

$$d_i = \frac{\sum_j w_j I_j}{w \sum w_j} \tag{4}$$

式中：d_i 为第 i 个方向箱的密度；w_j 为第 j 条破裂面的面积；I_j 为指示函数，当第 j 条破裂面的方向落入第 i 个方向箱时取值为 1，否则为 0；w 为方向箱的宽度。

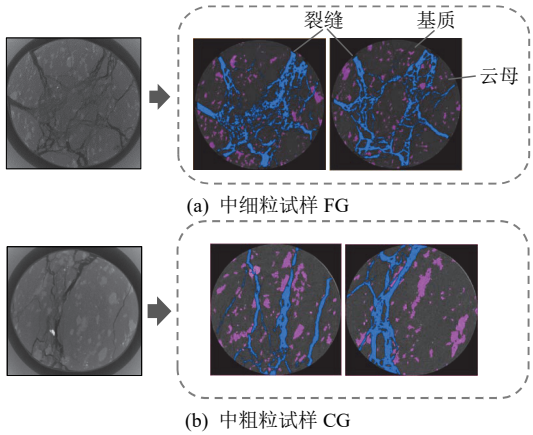
由图 16，17 可见，中粗粒与中细粒试样在破裂面形成和扩展特征上存在以下差异：

(1) 中粗粒试样 CG：玫瑰图和直方图显示，破裂面方向集中在 60°～80° 范围内，几乎所有破裂面均分布在该角度范围。这一集中排列方向与云母矿物的排列方向高度一致，表明云母解理面形成的弱面控制了破裂面的扩展方向，破裂面主要沿着这些弱面进行扩展。

(2) 中细粒试样：破裂面方向较为分散，虽然在 0°～130° 范围内破裂面分布较为均匀，但并未表现出明显的方向集中，130°～180° 范围内的破裂面较少。尽管破裂面方向与云母矿物的排列方向有一定的一致性，但其集中程度远低于中粗粒试样，这说明云母矿物的影响较弱。中细粒花岗岩的破裂面形成和扩展主要由外部应力控制，显示出应力控制破裂的特征，这可能与其均质性较高、云母矿物颗粒小且排列方向相对分散有关。

为了更直观地展示破裂面方向与云母定向排列之间的关系，并进一步验证上述结论，本研究对不同方向上的花岗岩试样进行了典型切片分析。通过分水岭、阈值分割与 Top-hat 算法分离破裂面与云母矿物，图中蓝色代表破裂面，灰色代表岩石基质，紫色代表云母矿物。

图 18 展示了 2 类花岗岩在 *xy* 方向的典型切片，揭示了细观结构与宏观破裂行为之间的关系：在中粗粒试样中，破裂面沿着水平线逆时针约 80° 排列，清晰显示出破裂面沿着云母矿物的排列方向扩展；而在中细粒试样中，裂纹网络则呈现复杂、多向的各向同性特征，均匀分布，且与云母的排列方向无显著关联。图 19 中的 *xz* 与 *yz* 方向切片也展现了相似的规律：中粗粒试样 CG 的主破裂面沿着云母排

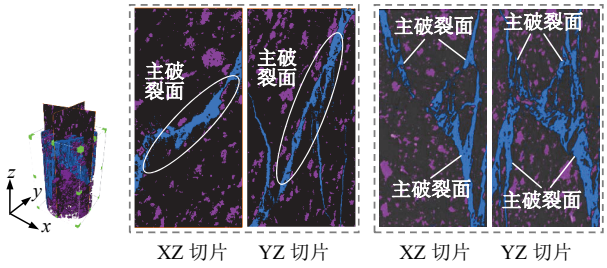


(a) 中细粒试样 FG

(b) 中粗粒试样 CG

图 18　2 种花岗岩试样 *xy* 切片破裂面形态与云母排列方向对比

Fig.18　Comparison of fracture surface morphology and mica orientation in *xy* slices of two types of granite specimens



(a) 试样 FG　　(b) 试样 CG

图 19　2 种花岗岩试样 *xz* 与 *yz* 切片破裂面形态与云母排列方向对比

Fig.19　Comparison of fracture surface morphology and mica orientation in *xz* and *yz* slices of two types of granite specimens

列方向发育，而中细粒试样 FG 则表现出“Y”和“X”形的共轭剪切破坏。这种差异导致中粗粒花岗岩的破裂强度低于中细粒花岗岩，因为破裂面沿弱面扩展所需能量较小，导致岩石更容易发生破坏。

上述 CT 扫描结果表明，中细粒花岗岩发生应力控制型破坏，而中粗粒花岗岩发生结构控制型破坏。两者的破裂模式反映了岩石内部细观结构对其力学行为的主导作用：中细粒花岗岩因其均匀的细观结构，破坏主要受应力控制，呈现出各向同性的破裂特征；而中粗粒花岗岩则因云母矿物的定向排列，裂纹沿解理面扩展，形成主破裂面，表现出结构控制型破坏。

3.2　基于 DVC 的花岗岩内部变形演化分析

DVC 计算本质上是基于岩石内部各种矿物颗粒、孔隙裂缝及原生缺陷等细观结构所具有的密度分布差异所造成的 CT 图像灰度差异，即不同成分的差异分布形成散斑，将其视为承载岩石试样变形信息的载体。通过跟踪变形前后散斑的位置，应用特征灰度匹配算法计算内部位移场，再经过微分运算得到应变场。基于三维扫描 CT 图像并结合 DVC 技术，能够实现对岩石内部变形的无损、精细的全场测量。

首先，需要进行技术适用性验证，以确认花岗岩 CT 图像的散斑效果，并测试 DVC 技术对应变观测的准确性。本文提出了一种简单有效的测试方法：将花岗岩的 CT 图像沿 z 轴压缩至原来的 α 倍(即预制应变为 α)，然后将原始图像与压缩后的图像分别作为参考图像和变形图像，进行 DVC 计算，并对比预制应变 α 与 DVC 测量出的应变。图 20 展示了预制应变与 DVC 测试应变的对比结果，表明两者高度一致，证明了中粗粒和中细粒花岗岩的散斑质量均达标，DVC 技术在花岗岩变形分析中的适用性得到验证。

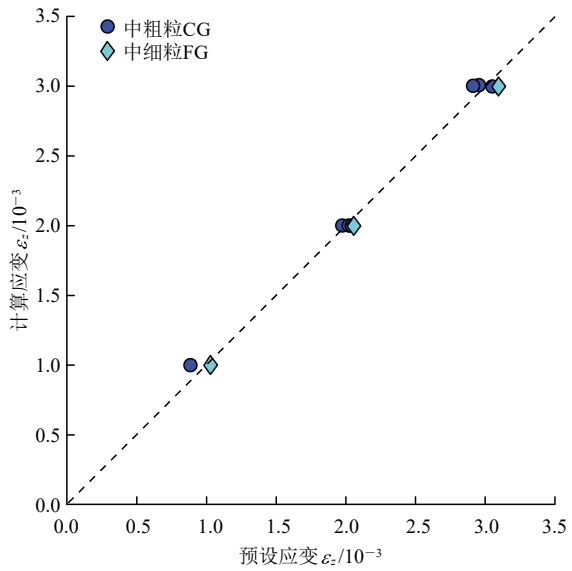


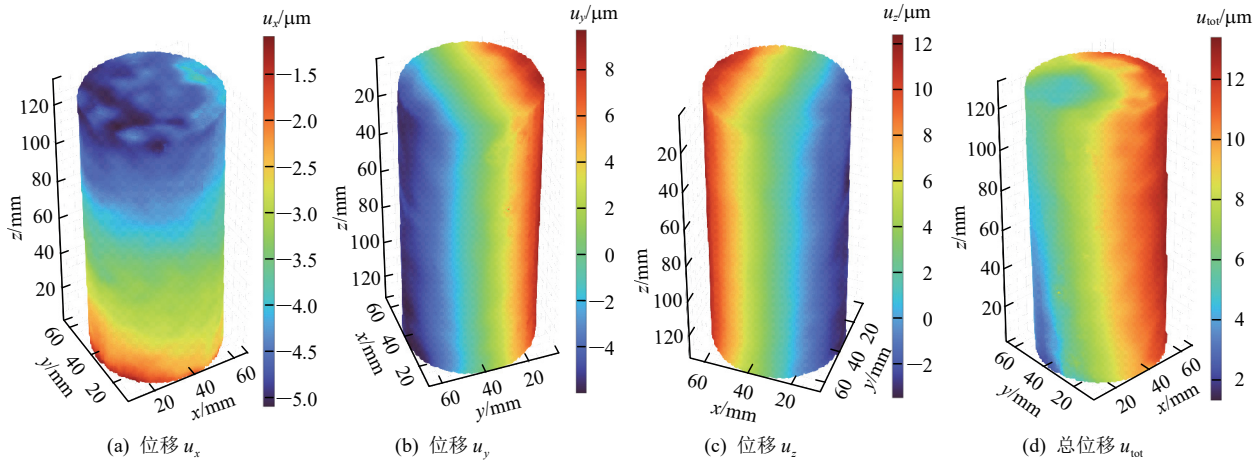
图 20　2 种花岗岩试样预制应变与 DVC 测试应变的对比图

Fig.20　Comparison between pre-set strain and DVC measured strain of two types of granite specimens

因为位移场能够反映岩石内部在加载过程中的整体位移分布及其变形特征，首先利用 DVC 计算试样的位移场，包括 x，y，z 三个方向上的位移场，即 u_x，u_y，u_z，以及总体位移场 u_{tot}。总体位移场 u_{tot} 定义如下：

$$u_{\text{tot}}=\sqrt{u_x^2+u_y^2+u_z^2} \tag{5}$$

图 21 展示了中细粒花岗岩的位移场云图。为便于计算，位移量值采用像素表示，经过简单换算后即可得到微米量纲。从图中可以看出，位移场分布均匀，未出现明显的噪点干扰。3 个主方向的位移场(u_x，u_y，u_z)均呈现出正负分界，并且分界面



(a) 位移 u_x　(b) 位移 u_y　(c) 位移 u_z　(d) 总位移 u_{tot}

图 21　中细粒花岗岩位移计算结果

Fig.21　DVC calculation results of displacement in medium-fine granite

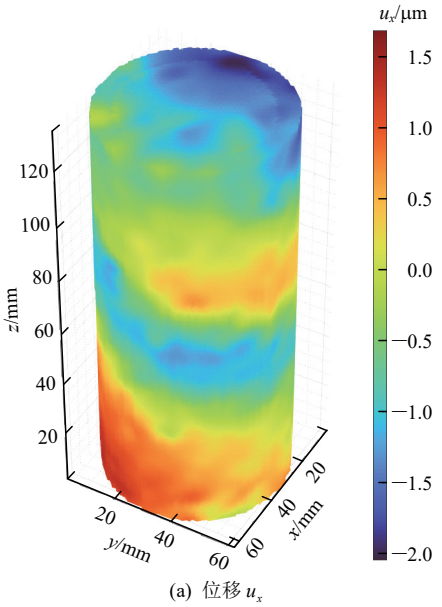
清晰，位移过渡自然，表明试样沿 3 个主方向发生了均匀变形，处于侧向膨胀状态。根据总体位移 u_{tot} 的计算结果，图中试样外部的红色区域显示出较大的位移，推测此时试样已显现出劈裂破坏的趋势。

图 22 展示了中粗粒花岗岩的位移结果，位移场呈现出明显的非均匀分布，尤其是位移 u_z 表现出明显的条状分布，反映了试样内部存在显著的细观结构，导致了非均匀变形。这与中细粒花岗岩的均匀变形特征截然不同。

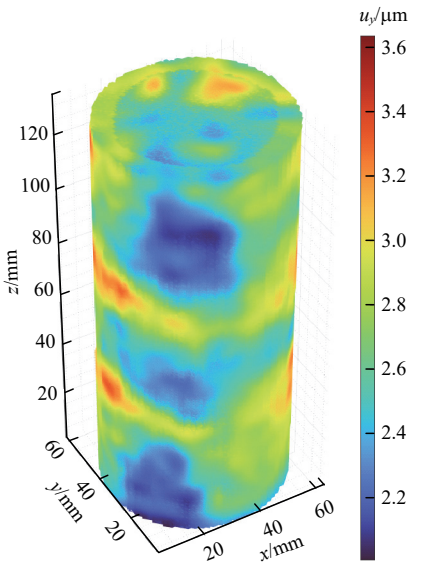
为更全面地表征岩石内部的整体变形特征，采用等效应变 ε_{eq} 来综合评价岩石内部的变形：

$$\varepsilon_{eq}=\{(2/9)[(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2+(\varepsilon_y-\varepsilon_z)^2+(\varepsilon_z-\varepsilon_x)^2+6(\varepsilon_{xy}^2+\varepsilon_{yz}^2+\varepsilon_{zx}^2)]\}^{1/2} \tag{6}$$

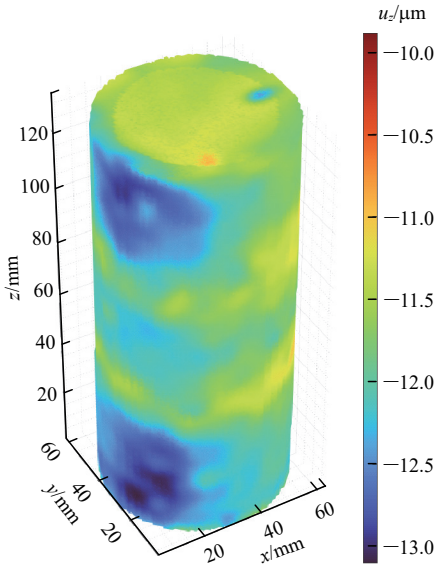
式中：ε_x，ε_y，ε_z，ε_{xy}，ε_{yz}，ε_{zx} 为 6 个应变分量。



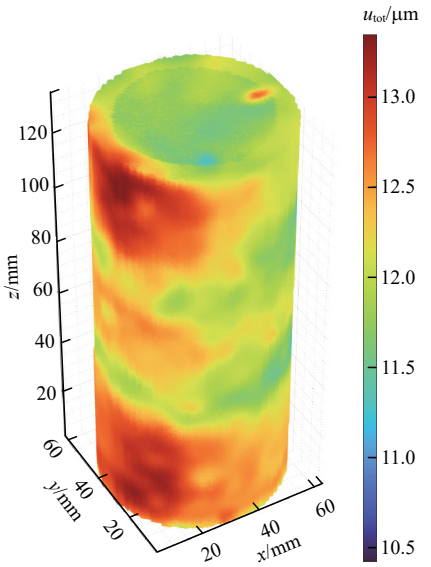
(a) 位移 u_x



(b) 位移 u_y



(c) 位移 u_z

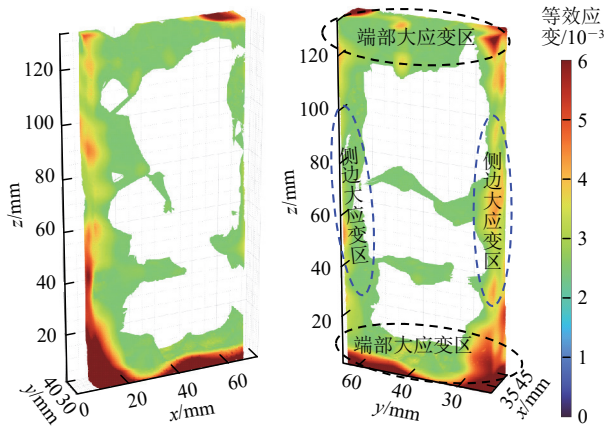


(d) 总位移 u_{tot}

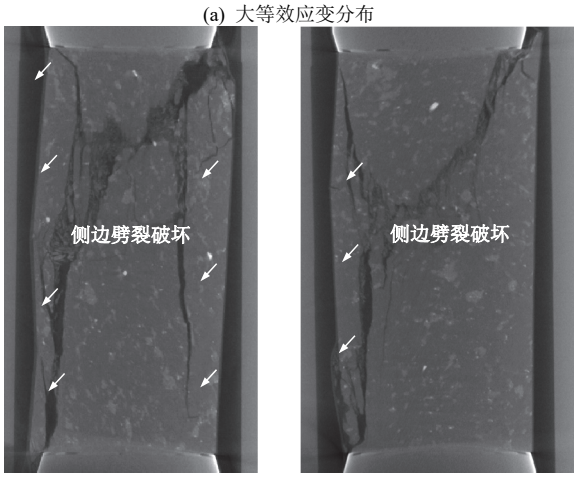
图 22　中粗粒花岗岩位移计算结果

Fig.22　DVC calculation results of displacement in medium-coarse granite

为了更直观地展示 DVC 计算出的等效应变 ε_{eq} 在岩石破坏预测中的作用，本文对比了计算出的等效应变结果与峰后岩石的破裂形态。首先提取等效应变较大的区域作为潜在破裂区，并与相应区域的峰后实际破裂形态进行对比。图 23 展示了中细粒试样在 *xz* 和 *yz* 平面上的切片对比结果，清晰展示了试样顶部和底部均存在大应变区域，而侧边出现竖直条带状的大应变区，表明试样侧边有发生竖直破裂的趋势。图 23(b)中的峰后 CT 扫描结果证实了侧边确实发生了明显的劈裂破坏，与等效应变计算区域的预测一致。此外，等效应变结果还显示试样内部的应变较小，仅在中部观察到少量沿水平方向



(a) 大等效应变分布



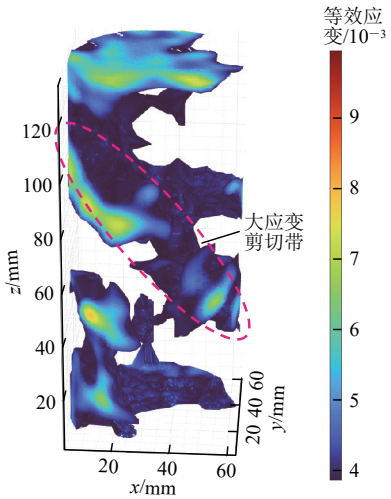
(b) 对应位置的峰后破裂形态

图 23　中细粒花岗岩 *xz* 与 *yz* 纵剖面大应变分布及峰后破裂形态

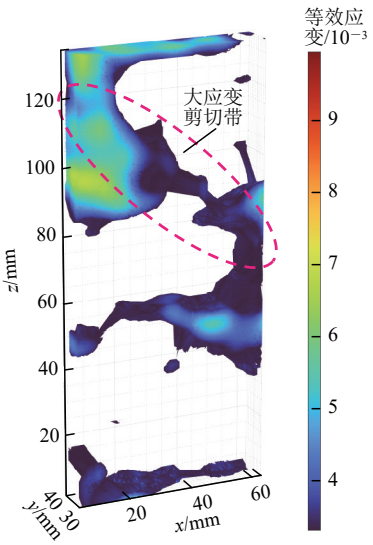
Fig.23　Large strain distribution and post-peak fracture morphology of *xz* and *yz* longitudinal profiles of medium-fine grained granite

的应变带，这些应变带与 CT 扫描图像中的水平裂缝相吻合。

中粗粒花岗岩中等效应变＞0.4%区域被视为潜在破坏区域，分析其空间分布特征与形态，并与中粗粒花岗岩峰后破裂面进行对比，如图 24 所示。



(a) 试样整体



(b) 试样中部 *xz* 切片



(c) 对应位置的峰后破裂形态

图 24　中粗粒花岗岩等效应变分布及峰后破裂形态

Fig.24　Equivalent strain distribution and post-peak fracture morphology of medium-coarse granite

图 24(a)显示潜在破裂区主要集中在 3 个部位：顶部、底部及中部的倾斜剪切带。中部的剪切带从左上延伸至右下，图 24(b)展示了 *xz* 切片中剪切带的形态图 24(c)中峰后剪切破裂面的位置和形态高度一致。注意到云母矿物排列方向也从左上至右下，剪切带与云母排列方向一致，表明云母的定向排列形成了解理弱面，诱导剪切破裂沿解理面发展，最终形成剪切破裂面。此破坏机制与中细粒花岗岩的破裂模式截然不同，说明中粗粒花岗岩的破坏受矿物结构影响，不能简单视为均质岩石。

上述对比分析表明，通过 DVC 计算出的等效应变 ε_{eq} 能够准确反映岩石内部峰值前的变形特征

与损伤状态，等效应变较大的区域即为即将发生破坏的破裂带，且与岩石峰后破裂形态基本一致，说明等效应变能够有效预测峰后岩石的实际破裂形态，采用等效应变判定潜在破裂区具有合理性。

4 结 论

通过对三峡地区中粗粒与中细粒 2 类典型花岗岩开展原位 CT 测试，研究了花岗岩细观结构特征对花岗岩宏观力学性质和破坏模式的影响规律，得到的主要研究结论如下：

(1) CT 扫描结果表明，三峡地区中粗粒与中细粒花岗岩的细观结构差异主要表现为云母定向排列的不同。云母矿物普遍呈现扁平的椭球状结构，且中粗粒花岗岩中的云母颗粒相较于中细粒花岗岩形状更为扁平。云母矿物的长轴与竖直方向夹角多呈 60°，这一固定排列模式揭示了云母矿物具有显著的空间定向排列特征，且在中粗粒花岗岩中更加明显。

(2) 原位 CT 加载测试表明，中粗粒与中细粒花岗岩试样致密完整，破坏形式均为脆性破裂。对花岗岩峰后破裂面进行三维重构，结果显示中细粒花岗岩破裂网络呈各向同性分布，破裂受应力控制，而中粗粒花岗岩破裂面沿着云母定向排列形成，表现为典型的结构控制破坏。

(3) DVC 计算结果表明，等效应变 ε_{eq} 能够准确反映岩石内部峰值前的变形特征与损伤状态，等效应变较大的区域即为即将发生破坏的破裂带，且与岩石峰后破裂形态基本一致，说明等效应变能够有效预测峰后岩石的实际破裂形态。将中粗粒花岗岩等效应变＞0.4%的区域视为潜在破坏区域，则其分布形态与云母排列方向高度一致，揭示了矿物结构对岩石破裂过程的主导作用。

参考文献(References)：

[1] YILMAZ N G，GOKTAN R M，KIBICI Y. Relations between some quantitative petrographic characteristics and mechanical strength properties of granitic building stones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2011，48(3)：506－513.

[2] SHENG Q，YUE Z Q，LEE C F，et al. Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project，China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2002，39(2)：165－184.

[3] WANG J，CHEN L，SU R，et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China：planning，site selection，site characterization and in situ tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2018，10(3)：411－435.

[4] KOYAMA T，CHIJIMATSU M，SHIMIZU H，et al. Numerical modeling for the coupled thermo-mechanical processes and spalling phenomena in Äspö pillar stability experiment(APSE)[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2013，5(1)：58－72.

[5] ZHAO Y，FENG Z，XI B，et al. Prospect of HDR geothermal energy exploitation in Yangbajing，Xizang，China，and experimental investigation of granite under high temperature and high pressure[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2011，3(3)：260－269.

[6] EBERHARDT E，STIMPSON B，STEAD D. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，1999，32：81－99.

[7] PŘIKRYL R. Some microstructural aspects of strength variation in rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2001，38(5)：671－682.

[8] PŘIKRYL R. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients：limitations and possible source of misinterpretations[J]. Engineering Geology，2006，87(3/4)：149－162.

[9] ÅKESSON U，LINDQVIST J，GÖRANSSON M，et al. Relationship between texture and mechanical properties of granites，central Sweden，by use of image-analyzing techniques[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2001，60：277－284.

[10] ÅKESSON U，STIGH J，LINDQVIST J E，et al. The influence of foliation on the fragility of granitic rocks，image analysis and quantitative microscopy[J]. Engineering Geology，2003，68(3/4)：275－288.

[11] LINDQVIST JE，ÅKESSON U，MALAGA K. Microstructure and functional properties of rock materials[J]. Materials Characterization，2007，58(11/12)：1 183－1 188.

[12] VASCONCELOS G，LOURENÇO P B，ALVES CAS，et al. Experimental characterization of the tensile behaviour of granites[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2008，45(2)：268－277.

[13] SEO Y S，JEONG G C，KIM J S，et al. Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression[J]. Engineering Geology，2002，63(3/4)：259－275.

[14] SOUSA L M，DEL RÍO LMS，CALLEJA L，et al. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites[J]. Engineering Geology，2005，77(1/2)：153－168.

[15] TUĞRUL A. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey[J]. Engineering Geology，2004，75(3/4)：215－227.

[16] KEIKHA T，KEYKHA H A. Correlation between mineralogical characteristics and engineering properties of granitic rocks[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering，2013，18(5)：4 055－4 065.

[17] COWIE S，WALTON G. The effect of mineralogical parameters on the mechanical properties of granitic rocks[J]. Engineering Geology，2018，240：204－225.

[18] HE C，MISHRA B，SHI Q，et al. Correlations between mineral composition and mechanical properties of granite using digital image processing and discrete element method[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2023，33(8)：949－962.

[19] RENARD F，MCBECK J，CORDONNIER B，et al. Dynamic in situ three-dimensional imaging and digital volume correlation analysis to quantify strain localization and fracture coalescence in sandstone[J]. Pure and Applied Geophysics，2019，176：1 083－1 115.

[20] RENARD F，WEISS J，MATHIESEN J，et al. Critical evolution of damage toward system-size failure in crystalline rock[J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，2018，123(2)：1 969－1 986.

[21] FAN L F，QIU B，GAO J W，et al. A real-time visual investigation on microscopic progressive fatigue deterioration of granite under cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2023，56(7)：5 133－5 147.

[22] CARTWRIGHT-TAYLOR A，MAIN I G，BUTLER I B，et al. Catastrophic failure：how and when? Insights from 4-D in situ X-ray microtomography[J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，2020，125(8)：e2020JB019642.

[23] MCBECK J，CORDONNIER B，BEN-ZION Y，et al. The influence of confining pressure and preexisting damage on strain localization in fluid-saturated crystalline rocks in the upper crust[J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，2023，128(8)：e2023JB026987.

[24] GAO J，XI Y，FAN L，et al. Real-time visual analysis of the microcracking behavior of thermally damaged granite under uniaxial loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2021，54：6 549－6 564.

[25] HU Q，YANG S，XI X，et al. In-situ X-ray micro-CT quantitative analysis and modelling the damage evolution in granite rock[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2024，133：104589.

[26] MAO L，LIU H，LEI Y，et al. Evaluation of global and local digital volume correlation for measuring 3D deformation in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2021，54(9)：4 949－4 964.

[27] 毛灵涛，袁则循，连秀云，等. 基于 CT 数字体相关法测量红砂岩单轴压缩内部三维应变场[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(1)：21－30.(MAO Lingtao，YUAN Zexun，LIAN Xiuyun，et al. Measurement of 3D strain field in red stone sample under uniaxial compression with computer tomography and digital volume correlation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2015，34(1)：21－30.(in Chinese))

[28] 汪在芹，李 珍，文梓芸，等. 三峡工程坝区花岗岩微结构和石英位错特征[J]. 长江科学院院报，2005，22(1)：42－45.(WANG Zaiqin，LI Zhen，WEN Ziyun，et al. Microstructure of granite in Three Gorges Project Area and dislocation characteristic of quartz[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2005，22(1)：42－45.(in Chinese))

[29] YU Y，QIU Z，CHENG W，et al. Fracture and porosity evolution of coal under uniaxial compression：An in-situ X-ray tomography study[J]. Geomechanics for Energy and the Environment，2023，36，100499.