

# 花岗岩冲击剪切力学行为的试验及数值模拟研究

袁 伟<sup>1</sup>, 李建春<sup>1,2</sup>, 李 星<sup>1</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 东南大学 未来地下空间研究院, 江苏 南京 211189)

**摘 要:** 为探究动态剪切荷载作用下岩石的力学特性, 采用冲击直剪方法, 对立方体花岗岩试样进行了不同正应力和冲击速度条件下的动态剪切试验。分析了花岗岩的冲击剪切变形演化过程, 讨论了正应力和冲击速度对花岗岩剪切变形和破坏模式的影响。然后, 采用颗粒流程序模拟了花岗岩的冲击直剪试验, 从细观角度探讨了花岗岩剪切变形破坏的演化机制。结果表明, 冲击剪切荷载作用下, 试样剪切变形过程中正应力持续变化, 剪应力峰值对应的正应力可达到初始值的数倍。得到了回弹型和断裂型两类剪应力-剪切位移曲线, 随着初始正应力的增大, 峰值剪应力增大, 峰值剪切位移和最大剪切位移减小; 随着冲击速度的增大, 峰值剪应力和最大剪切位移均增大。花岗岩的断裂包含主断裂面和多条翼裂纹, 随正应力和冲击速度的增大, 花岗岩的轮廓由起伏变得平直, 断裂面由粗糙变得平坦, 这与断裂后的摩擦滑移有关。花岗岩试样的起裂源于内部, 并沿剪切方向扩展至试样边界, 起裂方向与剪切面的夹角与接触力集中区的倾角一致。该研究可为岩石的动态剪切力学参数测试提供新的方法参考, 也有助于揭示岩石冲击剪切断裂的动力诱灾机制。

**关 键 词:** 动态剪切; 花岗岩; 冲击直剪试验; 颗粒流; 剪切断裂

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2024)06-1675-11

## Experimental and numerical study on mechanical behaviors of granite subjected to impact shear force

YUAN Wei<sup>1</sup>, LI Jian-chun<sup>1,2</sup>, LI Xing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

2. Institute of Future Underground Space, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

**Abstract:** To investigate the mechanical properties of rocks under dynamic shear load, experiments were conducted on cubic granite specimens under different normal stresses and impact velocities using the impact-induced direct shear method. The dynamic shear deformation evolution process of granite was analyzed, and the effects of normal stress and impact velocity on shear deformation and failure patterns of granite were discussed. Subsequently, the impact-induced direct shear experiments of granite were simulated using particle flow code. The evolution mechanism of shear deformation and damage was further explored from a microscopic perspective. The results show that the normal stress varies continuously during the shear deformation of the specimen, and the normal stress corresponding to the peak shear stress can reach several times the initial value. Two types of shear stress-shear displacement curves, rebound-type and fracture-type, were obtained. With an increase in initial normal stress, the peak shear stress increases while the peak shear displacement and maximum shear displacement decrease; with an increase in impact velocity, both peak shear stress and maximum shear displacement increase. Fractures in granite specimens contain a main fracture and multiple wing cracks. As normal stress and impact velocity increase, the main fracture profile becomes flat from wavy, and the fracture surface becomes smooth from rough, possibly due to frictional slip. The initiation fracture of granite specimens originates from the interior and then extends to the boundary along the shear direction. The direction of fracture initiation is oblique to the shear direction, consistent with the inclination of the contact force concentration zone. The experimental method used in this study provides a reference for testing dynamic shear mechanical properties, and the findings can help reveal the mechanism of dynamic engineering disasters induced by shear fracture of rocks.

**Keywords:** dynamic shear; granite; impact-induced direct shear experiment; particle flow code; shear fracture

收稿日期: 2023-07-16

录用日期: 2023-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (No.42220104007, No.42377160); 江苏省“双创团队”项目 (JSSCTD202140)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42220104007, 42377160) and the Innovative and Entrepreneurial Team Program of Jiangsu Province, China (JSSCTD202140).

第一作者简介: 袁伟, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事岩石节理的动态力学特性研究。E-mail: yuanw\_c@seu.edu.cn

通讯作者: 李建春, 女, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石动力学和地下空间开发方面的研究。E-mail: jcli@seu.edu.cn

## 1 引言

动态扰动作用下的岩石剪切破裂是工程岩体中常见的破坏现象之一,特别是脆性显著的岩石,其剪切断裂伴随剧烈的能量释放,易诱发采矿、地质、隧道建设等工程中的安全灾害<sup>[1]</sup>。深入探究岩石的动态剪切力学行为对工程防灾减灾具有重要意义。

静态剪切条件下,国内外学者采用多种方法测试岩石的剪切强度和变形参数,如盒式直剪试验<sup>[2-4]</sup>(direct shear,简称DS)、变倾角压剪试验<sup>[5-7]</sup>、短柱压缩试验<sup>[8-9]</sup>(short core in compression,简称SCC)和冲剪试验<sup>[10-11]</sup>(punch shear,简称PS; punch through shear,简称PTS)等。其中,冲剪试验是国际岩石力学与工程学会建议的Ⅱ型断裂韧度测试方法<sup>[12]</sup>。动态范围内,冲剪试验较为常用<sup>[13-16]</sup>,Xu等<sup>[17]</sup>还利用斜柱形试样设计了动态压剪试验;Li等<sup>[18]</sup>基于双轴霍普金森压杆提出了冲击直剪方法,可在多种预应力条件下测试岩石及节理的动态剪切强度和变形参数,并可实时捕捉试样的剪切破裂状态;基于该方法,Yuan等<sup>[19]</sup>探究了节理剪切强度的速率相关性。基于现行方法,学者们通过试验探究了动态加载速率、围压、轴向预压对岩石剪切强度、Ⅱ型断裂韧度的影响。研究表明,岩石动态剪切强度、Ⅱ型断裂韧度均与动态加载率和围压正相关。但目前鲜有报道岩石动态剪切变形特征方面的研究。

数值模拟具备丰富的可视化功能,是辅助试验研究的有效方法。近年来,相较于有限元、有限差分等连续方法<sup>[20-22]</sup>,离散单元法在模拟岩石剪切试验中得到了更多的应用<sup>[23-30]</sup>,常用的程序包括通用离散元程序 UDEC 和颗粒流程序 PFC。基于离散单元法,可以较为真实地模拟岩石剪切破裂行为,还可以对材料破坏过程中的声发射现象进行模拟<sup>[31-32]</sup>。离散元模拟结果表明,直剪条件下,岩石宏观剪切带的形成源自于拉伸微裂纹的逐渐累积<sup>[23-28]</sup>。岩石剪切破裂的发育方向平行于最大主应力的方向<sup>[23]</sup>,破坏形态受到法向压力、岩石矿物颗粒强度、岩桥长度等因素的影响<sup>[24-28]</sup>。上述研究主要在准静态范围内开展,对动态剪切条件下的岩石破裂过程及其机制鲜有探讨。

为更加全面地了解岩石受到动态剪切荷载作用时的强度和变形特征,本研究采用一种冲击直剪测试方法,对花岗岩立方体试样开展动态剪切试验,讨论正应力和冲击速度对岩石动态剪切强度、变形

和破坏特征的影响。进一步结合颗粒流数值模拟,从细观角度探究岩石动态剪切破坏演化过程及机制。

## 2 冲击直剪试验

### 2.1 试样制备

试样由取自福建省的细粒花岗岩制备,该岩石密度为  $2\,778\text{ kg/m}^3$ ,单轴抗压强度为  $174.5\text{ MPa}$ ,劈裂拉伸强度约为  $10.4\text{ MPa}$ ,弹性模量约为  $85\text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.186$ 。试样几何形状为立方体,如图 1 所示,尺寸为  $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ ,端面平行度满足国际岩石力学与工程学会建议方法的要求。

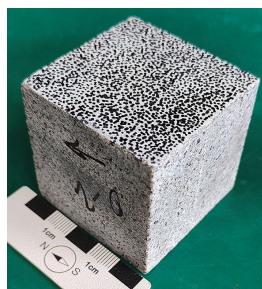


图 1 花岗岩立方体试样

Fig.1 Photo of the cubic granite specimen

### 2.2 加载设备

试验所使用的加载设备为双轴霍普金森压杆,如图 2 所示,图中  $X$  轴沿冲击剪切加载方向, $Y$  轴与  $X$  轴位于同一水平面内。该装置由动态加载单元和液压加载单元组成。动态加载单元包含发射管、冲头、入射杆、透射杆、 $Y$  轴压杆 1 和 2,其中发射管、冲头、入射杆和透射杆沿  $X$  轴方向。冲头和压杆均由  $60\text{Si}2\text{Mn}$  合金钢制成,弹性模量为  $200\text{ GPa}$ ,纵波波速约为  $5\,100\text{ m/s}$ 。冲头为圆柱形,长度为  $0.5\text{ m}$ ,直径为  $40\text{ mm}$ 。所有压杆的横截面尺寸相同,且为  $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 。入射杆长为  $2.5\text{ m}$ ,其余 3 根压杆长度均为  $2.0\text{ m}$ 。液压加载装置由两个液压缸、两个液压泵、反力框架和控制系统组成,加卸载过程可自动控制。利用液压加载装置可为试样施加初始正应力和初始剪应力。有关该设备更详细的介绍,可参阅文献<sup>[18]</sup>。

在试验中,试样的安放位置如图 2 所示,冲击直剪构型的实现借助于入射杆-试样和试样-透射杆之间的适配器。适配器的横截面尺寸为  $50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ ,等于试样横截面的  $1/2$ ,厚度为  $5\text{ mm}$ 。两块相同尺寸和材质的适配器以中心对称的方式,沿  $X$  轴布置在试样两侧,如图 2 所示,靠近入射杆一侧的适配器与图中压杆上半截面重合,靠近透射杆

一侧的适配器与图中压杆下半截面重合，以此方式确保试样的剪切方向与压杆轴线重合。

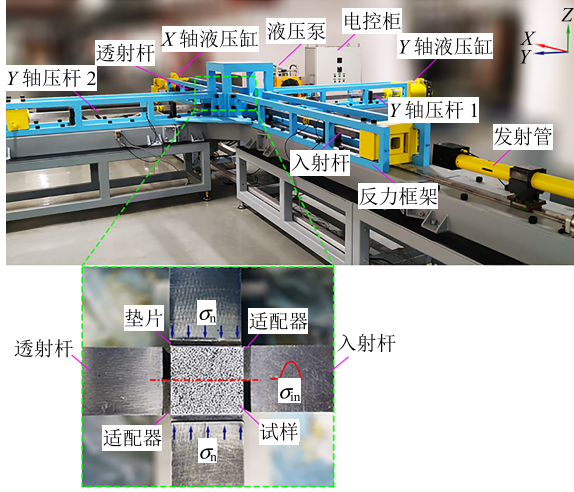


图 2 试验装置<sup>[18]</sup>

Fig.2 Experimental apparatus<sup>[18]</sup>

### 2.3 数据采集及处理

试验系统的数据采集单元如图 3 所示，包含应力波采集和动态位移测量两个模块。试样的动态剪应力和正应力由应力波采集模块获取。应力波由粘贴在 4 根压杆表面的应变片记录，经超动态应变仪放大，并由示波器显示和存储。试验中获得的典型应力波信号如图 3 所示，包括入射波、反射波、X 轴透射波和两个 Y 轴透射波。试样的动态剪应力由 X 轴透射波计算，即

$$\tau_d(t) = \frac{A_b E_b}{A_s} \varepsilon_{tr}(t) \quad (1)$$

式中： $\tau_d(t)$ 为试样剪切面的名义动态剪应力； $A_b$  和  $E_b$  分别为压杆的横截面积和弹性模量； $A_s$  为试样的剪切面积； $\varepsilon_{tr}(t)$ 为 X 轴透射波的应变。

试样的动态正应力取两个 Y 轴透射波的平均值，即

$$\sigma_{nd}(t) = \frac{A_b E_b}{A_s} [\varepsilon_{yout1}(t) + \varepsilon_{yout2}(t)] \quad (2)$$

式中： $\sigma_{nd}(t)$ 为试样剪切面的名义动态正应力； $\varepsilon_{yout1}(t)$  和  $\varepsilon_{yout2}(t)$  分别为 Y 轴压杆 1 和 2 上的透射波应变。

动态位移测量模块为基于二维数字图像相关（two-dimensional digital image correlation，简称 2D-DIC）技术的高速变形测量系统（见图 3），包含高速相机、高能 LED 补光灯和 Ncorr 软件，高速相机的图像采集由示波器发出的电信号触发。试样的被侧面喷涂散斑（见图 1），在整个测试过程中，使用高速相机实时捕捉散斑图像。本试验中，相机的图像分辨率设为 256 像素×256 像素，采样速率设为  $2 \times 10^5$  帧/s。测试完成后，基于拍摄的散斑图像，计算试样的动态剪切位移和法向位移，计算流程如图 3 所示。首先，使用 Ncorr 程序计算被测表面的位移场。然后，在位移场的计算结果中，提取目标监测点的计算结果。最后，基于虚拟引伸计原理<sup>[33]</sup>，由剪切面上、下两部分的位移差得到岩石试样的动态剪切位移  $u_s$  和动态法向位移  $\delta_n$ ：

$$u_s(t) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [u_{bi}(t) - u_{ti}(t)] \quad (3)$$

$$\delta_n(t) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [\delta_{bi}(t) - \delta_{ti}(t)] \quad (4)$$

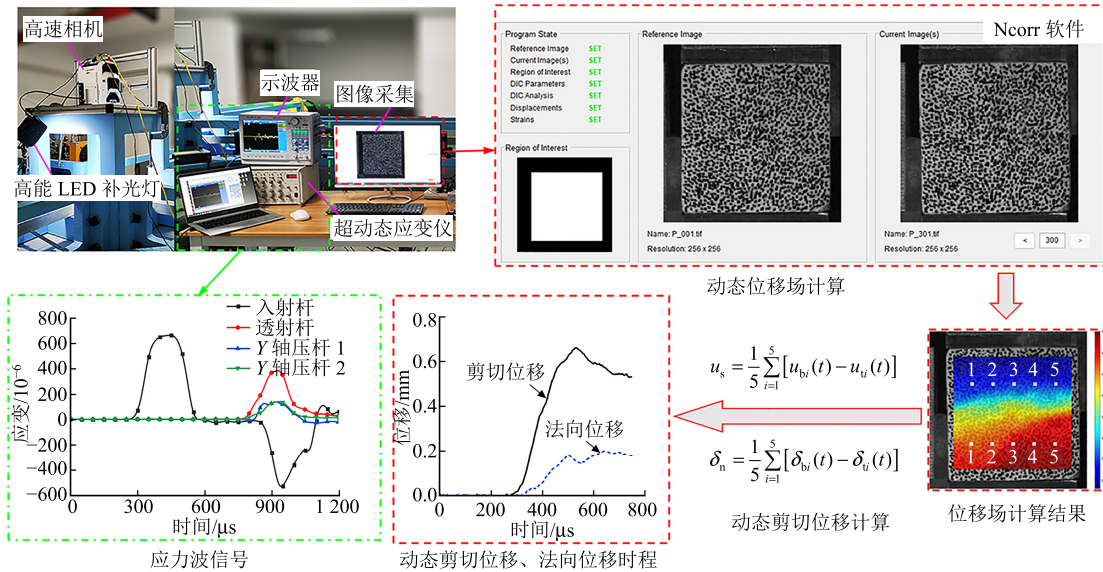


图 3 数据采集及处理流程

Fig.3 Diagram showing data acquisition and processing

式中:  $u_s$  和  $\delta_n$  分别为试样的剪切位移和法向位移;  $u_{bi}$  和  $\delta_{bi}$  分别为剪切面下方测点的切向位移和法向位移;  $u_{ti}$  和  $\delta_{ti}$  分别为剪切面上方测点的切向位移和法向位移;  $k$  为剪切面上、下方对称布置的监测点组数, 对于本试验,  $k = 5$ 。

图 3 中监测点的空间分布特征为: 剪切面以上和以下的监测点关于剪切面对称分布, 且剪切面同一侧的监测点沿剪切方向等距分布。

利用上述方法即可获得试样的动态剪应力、法向压力、剪切位移、法向位移时程。进一步地, 根据不同曲线间的时间同步关系, 即可以得到试样的动态剪应力-剪切位移曲线, 以分析岩石试样的动态剪切行为。同时, 根据法向位移曲线和法向压力曲线, 可得到由于剪切作用而引起的岩石剪胀变形, 以及由剪胀引起的法向压力变化, 而法向压力也会反过来影响岩石的剪切性能。

## 2.4 加载方案

在本试验中, 初始正应力  $\sigma_{n0}$  设定为 1、4、12 MPa。为了确保在  $X$  轴方向的入射杆、适配器、试样、适配器、透射杆之间紧密接触, 还加载了约 0.4 MPa 的初始剪应力。入射波的幅值由冲头撞击入射杆的速度 (即冲击速度  $v_{im}$ ) 决定, 当  $\sigma_{n0} = 12$  MPa 时, 冲击速度  $v_{im}$  分别为 9.6、10.8、13.4 m/s; 其余正应力条件下, 冲击速度为 9.6 m/s。为了获得平缓上升的入射波, 在入射杆的被撞击端粘贴了橡胶片作为波形整形器。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 动态力平衡检验

冲击加载过程中, 试样发生破坏前达到动态力平衡是保证试验有效性的前提之一, 为此, 首先对试样的动态力平衡效果进行检验。试样入射端面和透射端面的动态力分别为

$$F_{input}(t) = A_b E_b [\varepsilon_{in}(t) + \varepsilon_{re}(t)] \quad (5)$$

$$F_{output}(t) = A_b E_b \varepsilon_{tr}(t) \quad (6)$$

式中:  $F_{input}$  和  $F_{output}$  分别为试样入射端面和透射端面的动态力;  $\varepsilon_{in}(t)$  和  $\varepsilon_{re}(t)$  分别为入射波和反射波的应变。即通过对比“入射+反射”与“透射”的一致性可判断试样是否达到动态力平衡。

图 4 为试验得到的典型应力波。由图可以看出, 在透射波峰值之前, “入射+反射”与“透射”基本一致, 即达到了动态力平衡。此后, “入射+反射”与“透射”的差异逐渐显著, 力平衡无法维持。这是由于试样逐渐发生损伤甚至宏观断裂, 惯性力

逐渐增大。

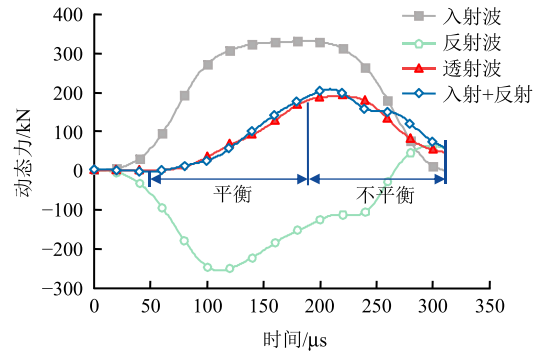


图 4 试样动态力平衡检验 ( $\sigma_{n0} = 1$  MPa,  $v_{im} = 9.6$  m/s)  
Fig.4 Examination of dynamic force equilibrium  
( $\sigma_{n0} = 1$  MPa,  $v_{im} = 9.6$  m/s)

当试样端面的动态力实现平衡时, 试样的动态剪应力可依据三波法计算; 而在动态力不平衡时, 三波法不再适用, 为有效排除惯性力的影响, 采用透射波计算动态剪应力更合适。因此, 为操作方便, 在本试验中, 直接采用透射波计算整个剪切过程中试样的动态剪应力。同理, 在动态力不平衡段, 试样的剪切变形也不能由三波法计算。因此, 本试验采用非接触式变形测量方法得到试样的动态变形。

### 3.2 花岗岩的冲击剪切变形特征

基于上述方法, 得到了不同条件下岩石的动态应力和位移时程。图 5 为不同冲击速度下典型的剪应力、正应力、剪切位移和法向位移时程曲线。从图中可以看出, 岩石动态剪切变形过程中, 一方面, 剪切位移增加; 另一方面, 也出现了剪胀变形, 正应力也处于动态变化之中。当冲击速度  $v_{im} = 9.6$  m/s 时, 如图 5(a)所示, 在剪应力峰值之前 ( $t_1$  时刻之前), 试样的剪切位移、法向位移和正应力均持续增大。表明试样的剪切变形引起了其剪胀变形, 正应力也随之增大, 在剪应力达到峰值时, 正应力增大了约 18 MPa。在剪应力峰值之后, 剪应力开始持续减小, 即进入卸载阶段, 剪切变形先保持了一段增长趋势 ( $t_1 \sim t_2$  时间段内), 随后开始减小 ( $t_2$  之后), 即出现了变形回弹。在此期间, 试样的法向位移与剪切位移同步增减, 正应力较法向位移提前开始减小。

当冲击速度为 13.4 m/s 时, 试样剪切变形的回弹几乎消失, 如图 5(b)所示, 这是因为试样出现了宏观剪切破裂。在剪应力峰值前 ( $t_1$  时刻之前), 试样的剪胀变形并不明显, 但正应力的变化较  $v_{im} = 9.6$  m/s 时更大, 在剪应力峰值处, 正应力增大了约 33 MPa, 约为  $v_{im} = 9.6$  m/s 时的 1.8 倍。经统计发

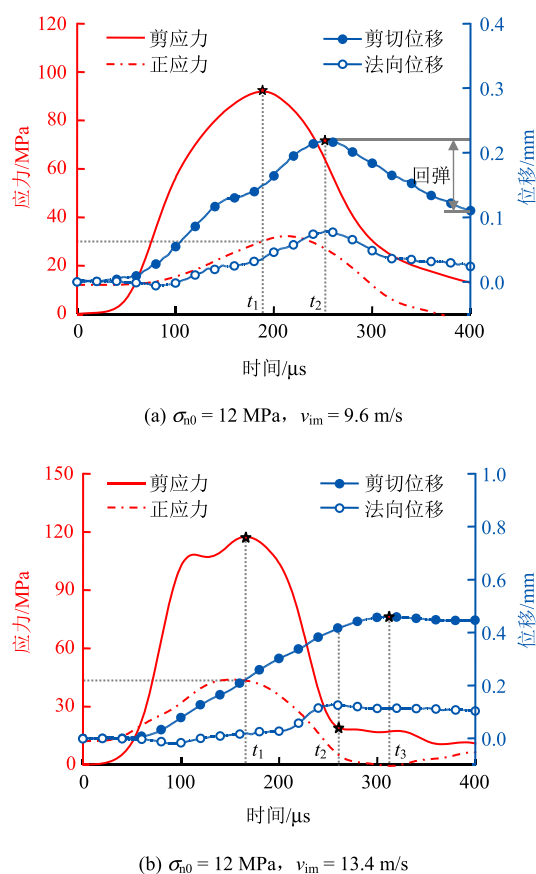


图5 典型动态应力和位移历程

Fig.5 Typical histories of dynamic stresses and displacements

现, 相同冲击速度下,  $\sigma_{n0} = 1$  MPa 和  $\sigma_{n0} = 4$  MPa 时, 剪应力峰值处对应的正应力约为初始值的 26 倍和 5.8 倍。正应力是岩石剪切强度的决定因素之一, 冲击速度的增大引起更大的正应力增量, 这也是导致剪应力峰值增大的原因之一。在剪应力峰值之后,  $t_1 \sim t_2$  时间段内, 剪应力迅速降低, 正应力也持续减小, 但法向位移逐渐开始了较为明显的增加;  $t_2 \sim t_3$  时间段内, 剪应力稳定, 法向位移略微降低, 具有摩擦滑移特征。

基于上述动态剪应力和剪切位移测量结果, 进一步得到了岩石动态剪应力-剪切位移曲线, 如图 6 所示。不同初始正应力下, 曲线形态具有不同特征, 如图 6(a) 所示。随初始正应力的增大, 剪应力峰值增大, 最大剪切位移减小; 峰前剪应力随剪切位移的变化率增大, 剪应力峰值对应的剪切位移减小, 体现了正应力对岩石剪切变形的约束作用。在剪应力峰值之后, 当  $\sigma_{n0} = 1$  MPa 时, 由于岩石发生宏观断裂, 剪应力快速降低, 曲线呈陡降特征; 当  $\sigma_{n0} = 4$  MPa 和 12 MPa 时, 岩石未出现宏观断裂, 曲线具有回弹特征; 且可以看出, 当  $\sigma_{n0} = 4$  MPa 时, 曲线的回弹明显晚于  $\sigma_{n0} = 12$  MPa 条件。将具有回弹

特征的岩石剪应力-剪切位移曲线称为回弹型曲线, 无回弹特征的则称为断裂型曲线。

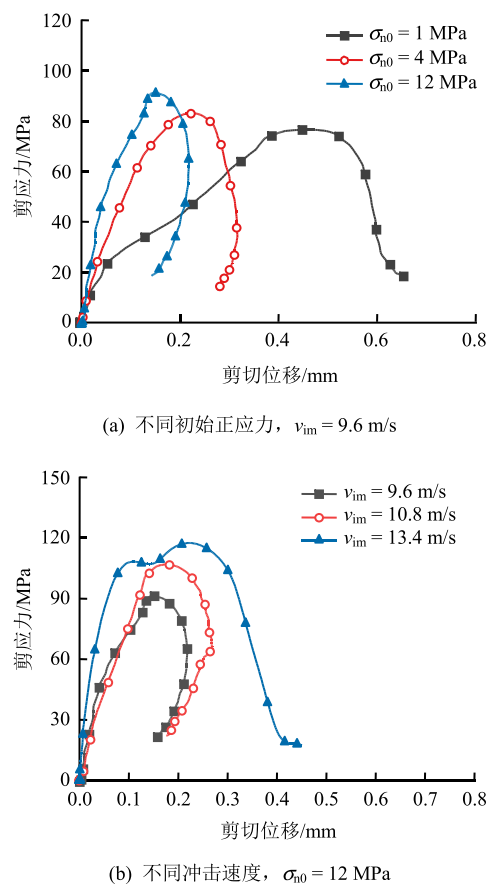


图6 花岗岩的典型动态剪应力-剪切位移曲线

Fig.6 Typical curves of dynamic shear stress vs. shear displacement of granite

在不同的冲击速度条件下, 如图 6(b) 所示, 岩石动态剪应力-剪切位移曲线也出现回弹型和断裂型两类。随着冲击速度的增大, 岩石的剪切变形和剪应力峰值增大, 当  $v_{im} = 13.4$  m/s 时, 岩石发生宏观断裂。根据图 5(b) 可知, 花岗岩试样剪切断裂后, 还可能发生了摩擦滑移。

### 3.3 花岗岩的动态剪切破坏形态

冲击剪切条件下, 花岗岩的破坏形态如图 7 所示。当  $\sigma_{n0} = 1$  MPa,  $v_{im} = 9.6$  m/s 时, 从试样的正面和背面看, 花岗岩试样的断裂轮廓有一定起伏; 从断裂面来看, 形貌较为粗糙, 且无明显摩擦滑动痕迹, 如图 7(a) 所示。当  $\sigma_{n0} = 12$  MPa,  $v_{im} = 13.4$  m/s 时, 花岗岩试样的断裂轮廓更为平直, 断裂面更为平坦, 且摩擦滑动痕迹显著, 如图 7(b) 所示。结合图 6 可知, 正应力和冲击速度的增大会导致花岗岩在较小的剪切变形下即发生断裂, 因此能够发生剪切滑移。由于剪切滑移和较大正应力的共同作用, 进一步将断裂面磨平。

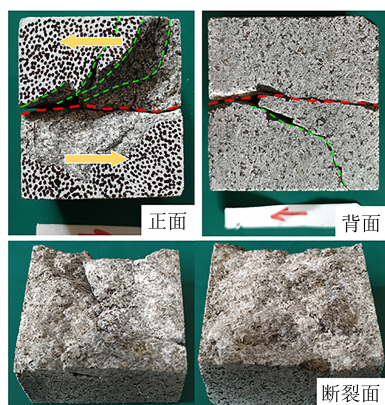
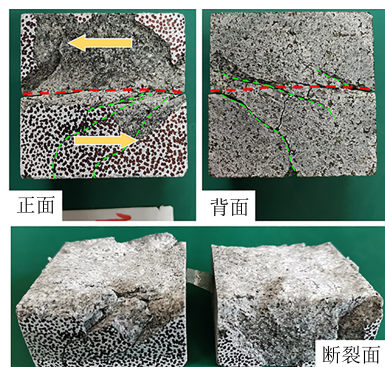
(a)  $\sigma_{n0} = 1 \text{ MPa}$ ,  $v_{im} = 9.6 \text{ m/s}$ (b)  $\sigma_{n0} = 12 \text{ MPa}$ ,  $v_{im} = 13.4 \text{ m/s}$ 

图 7 花岗岩的冲击剪切破坏形态

Fig.7 Failure patterns of granite subjected to impact shear load

文献[4]对花岗岩岩桥进行了剪切速率为  $10^{-3} \sim 10^1 \text{ mm/s}$  的直剪试验, 观测结果表明, 随着剪切速率的增大, 岩桥断裂面也由起伏趋于平坦。本试验的剪切速率已超过  $1 \text{ m/s}$ , 且冲击速度越大, 剪切速率越高, 因此, 本研究的结果与文献[4]的结果具有相似性。

此外, 试样发生宏观断裂时, 不仅形成沿剪切方向的主断裂面, 在主断裂面的两侧也出现了多条翼裂纹, 并且散斑面出现表面剥落。在动态 PTS 试验中, 试样的断裂形态也分为主裂纹和翼裂纹<sup>[16]</sup>, 其中翼裂纹主要自缺口处向岩石内部延伸。与动态 PTS 试验相比, 本试验中使用的试样尺寸更大, 且试样无缺口, 因此, 出现了更多翼裂纹。

## 4 颗粒流数值模拟

### 4.1 数值模型的建立

本研究采用颗粒流程序 PFC<sup>2D</sup> 模拟花岗岩的冲击直剪试验。在 PFC<sup>2D</sup> 中, 材料由颗粒和颗粒间的接触组成, 颗粒不可变形, 材料破坏通过颗粒间接触的断裂来模拟。本研究建立了如图 8 所示的数值模型, 其建模过程主要包括如下 6 个步骤:

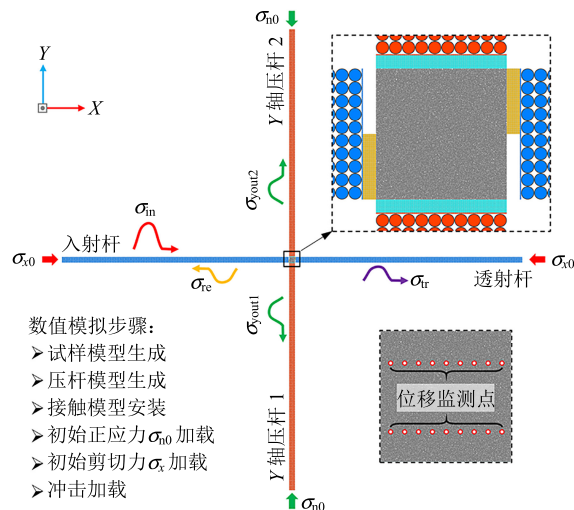


图 8 花岗岩冲击直剪试验数值模型

Fig.8 Numerical model of impact-induced direct shear experiment for granite specimen

(1) 试样模型生成: 试样尺寸为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , 组成试样的颗粒在空间上随机分布, 颗粒的属性参数如表 1 所示。颗粒生成后在无摩擦条件下进行应力平衡计算, 使其快速达到一种均匀应力状态。

表 1 花岗岩试样颗粒属性参数

Table 1 Particle properties of numerical granite specimen

| 最小半径<br>/mm | 最大半径<br>/mm | 密度<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 摩擦系数 | 法向切向<br>刚度比 |
|-------------|-------------|-------------------------------------------|------|-------------|
| 0.2         | 0.3         | 2 778                                     | 0.62 | 2.5         |

(2) 压杆模型生成: 数值模型中 4 根压杆的长度均为  $2.0 \text{ m}$ , 以保证初始剪切力加载过程中试样入射端和透射端的同步性。压杆模型的颗粒在空间上规则排列, 颗粒半径为  $2.5 \text{ mm}$ 。垫片与适配器模型的颗粒规则排列, 半径均为  $0.25 \text{ mm}$ 。为保证压杆与垫片、适配器边界的应力均匀传递, 在压杆边界设置一层半径为  $0.25 \text{ mm}$  的颗粒, 如图 8 所示。

(3) 接触模型定义: 压杆、垫片和适配器的颗粒间接触被赋予线性接触黏结模型, 接触量为  $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ , 接触强度为  $1 \times 10^{100} \text{ Pa}$ 。试样的颗粒间接触采用平行黏结模型模拟, 以室内冲击剪切试验得到的花岗岩剪应力-剪切位移曲线为基础, 通过试错法, 确定模型细观接触参数。经过大量的数值计算, 最终得到如表 2 所示的平行黏结接触参数。

表 2 花岗岩试样细观接触模型参数

Table 2 Parameters of contact model installed in numerical granite specimen

| 接触量/GPa | 拉伸强度/MPa | 剪切强度/MPa | 法向切向刚度比 |
|---------|----------|----------|---------|
| 100     | 130±30   | 216±50   | 2.5     |

(4) 初始正应力加载：在  $Y$  轴压杆 1 的下边界和  $Y$  轴压杆 2 的上边界，赋予颗粒一定的运动速度，使其沿靠近试样的方向运动，从而对试样形成挤压。在试样内布置测量圆以监测其内部  $Y$  轴应力。当达到目标初始正应力时，将上述边界颗粒的运动速度设为 0，继续迭代一定次数，以消耗模型的多余动能。

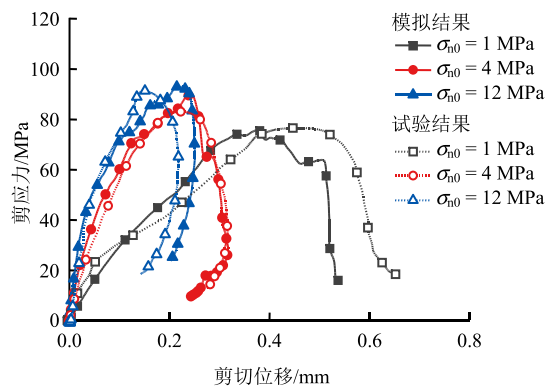
(5) 初始剪切力加载：初始剪切加载的原理与初始正应力加载相同，为简洁起见，此处不再赘述。

(6) 冲击加载：与物理试验的冲头撞击入射杆不同，数值模拟中采用直接输入应力波的方式进行冲击加载。在入射杆的左边界，赋予颗粒运动速度，输入速度值由物理试验中获得的入射波计算。冲击加载过程中，入射杆、透射杆的  $Y$  轴自由度和  $Y$  轴压杆的  $X$  轴自由度被约束。

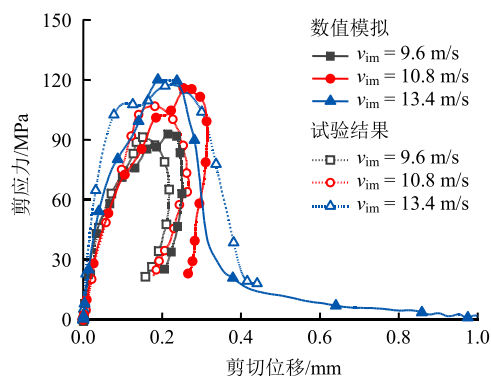
模型的变量监测采用与物理试验相同的方式，即在压杆的对应位置建立测量圆，监测记录测量圆内颗粒的平均应力、应变，以得到压杆内传播的入射波、反射波、 $X$  轴透射波和  $Y$  轴透射波。在试样内沿剪切面对称设置 9 对位移监测点，如图 8 所示。最后，根据式 (1) ~ (4) 即可计算得到岩石试样的动态剪应力、正应力、剪切位移和法向位移。

#### 4.2 模型参数的标定

从图 9 可以看出，在表 2 所示的细观接触模型参数设定下，数值模拟结果与试验结果的趋势基本一致，但也存在一定的差别。表 3 中列出了模拟和试验获得的剪应力峰值、峰值剪切位移和最大剪切位移的对比情况。从表中可以看出，峰值剪应力的误差均低于 10%，而峰值剪切位移和最大剪切位移的误差相较于峰值剪应力更大。这说明模型对岩石剪切变形的重现效果略低，这一不足也是颗粒流模拟中普遍存在的问题，即峰值应力与峰值位移难以匹配，主要是因为接触模型的线性力学行为，这与岩石存在非线性力学表现存在一定差异。也正是由于这一原因，最大剪切位移的模拟值与试验值也存在一定差异。



(a) 不同初始正应力



(b) 不同冲击速度

图 9 模拟结果与试验结果的对比

Fig.9 Comparison between numerical and experimental results

特别地，当  $v_{im} = 13.4$  m/s 时，模拟显示岩石发生剪切断裂后继续出现了约 0.5 mm 的滑动位移，而在试验中试样的散斑面出现了严重破损，导致后续的位移场无法有效计算，因此，无法获知试验中断裂后的岩石发生了多大的滑动位移，这也是导致在此条件下最大剪切位移的模拟值与试验值误差显著的原因之一。

#### 4.3 冲击剪切断裂过程与演化机制

为深入认识冲击剪切过程中花岗岩的剪切断裂过程与演化机制，基于数值模拟结果分析动态剪应力、剪切位移与试样微裂纹的同步演化过程，如图 10 所示。根据微裂纹的发展过程，将岩石冲击剪切变形过程进一步分为如下 4 个阶段：

表 3 模拟值与试验值的误差  
Table 3 Errors between numerical and test values

| $\sigma_{n0}$ /MPa | $v_{im}/(m \cdot s^{-1})$ | 峰值剪应力   |         |      | 峰值剪切位移 |        |      | 最大剪切位移 |        |      |
|--------------------|---------------------------|---------|---------|------|--------|--------|------|--------|--------|------|
|                    |                           | 模拟值/MPa | 试验值/MPa | 误差/% | 模拟值/mm | 试验值/mm | 误差/% | 模拟值/mm | 试验值/mm | 误差/% |
| 1                  | 9.6                       | 75.8    | 76.5    | 0.9  | 0.377  | 0.460  | 18.1 | 0.541  | 0.656  | 17.6 |
| 4                  | 9.6                       | 90.1    | 83.1    | 8.5  | 0.243  | 0.225  | 8.0  | 0.317  | 0.317  | 0.1  |
| 12                 | 9.6                       | 93.0    | 91.3    | 1.9  | 0.227  | 0.150  | 50.7 | 0.251  | 0.218  | 14.8 |
| 12                 | 10.8                      | 116.9   | 106.9   | 9.4  | 0.264  | 0.177  | 49.6 | 0.314  | 0.269  | 16.8 |
| 12                 | 13.4                      | 120.1   | 117.5   | 2.2  | 0.234  | 0.222  | 5.4  | 1.109  | 0.631  | 75.8 |

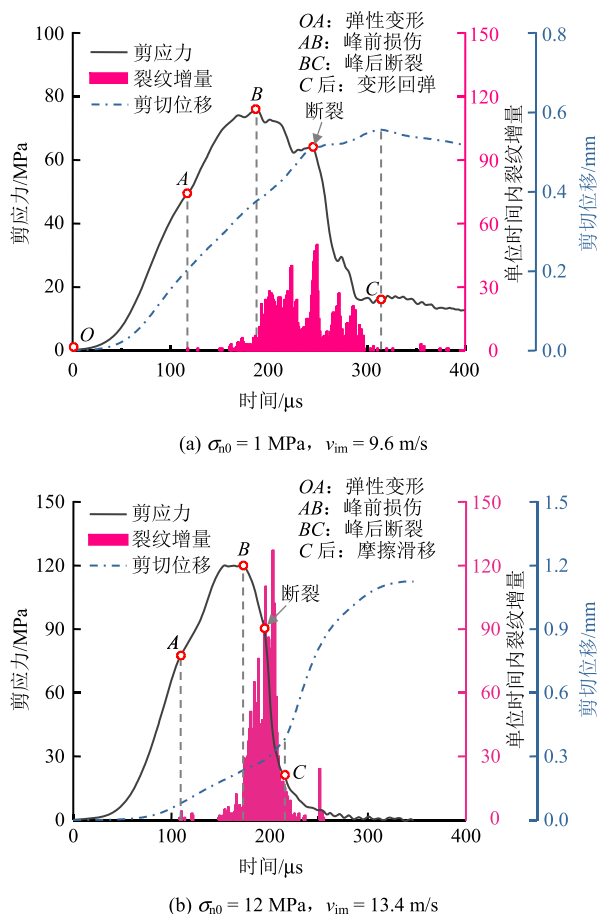


图 10 动态剪应力、剪切位移与微裂纹的同步演化过程  
Fig.10 Simultaneous evolutions of dynamic shear stress, shear displacement and micro crack

弹性变形阶段 ( $OA$  段): 此阶段内, 尚无微裂纹产生, 剪应力和剪切位移的增速由慢变快, 并逐渐达到稳定。

峰前损伤阶段 ( $AB$  段): 岩石内部开始出现微裂纹, 但裂纹的发展并不活跃, 直至达到剪应力峰值。在此期间, 剪切位移近似线性增大。

峰后断裂阶段 ( $BC$  段): 此阶段的微裂纹发展最为活跃, 且经历由活跃到平静的变化过程。由于断裂的出现, 剪应力急剧降低。

变形回弹或摩擦滑移阶段 ( $C$  后): 断裂发生后, 岩石的变形可能出现两种情况: ①变形回弹 (见图 10(a)); ②摩擦滑移 (见图 10(b))。这取决于岩石的断裂程度和断裂发生的时间, 断裂程度越大, 断裂发生的时间越早, 摩擦滑移发生的可能性越大。此阶段内, 微裂纹的发展逐渐趋于平静。

对比可以发现, 当  $\sigma_0 = 12 \text{ MPa}$ ,  $v_{im} = 13.4 \text{ m/s}$  时, 岩石峰后断裂阶段持续时间更短, 裂纹发展更为活跃; 岩石断裂导致的剪应力降低更大, 断裂后岩块的摩擦滑移距离更远。而摩擦滑移导致断裂更加平坦, 因此, 剪应力更小, 甚至接近于 0。可以推知, 正应力越大, 岩石的剪切断裂越突然, 能量释放更为剧烈。

进一步地, 探究了花岗岩试样内部微裂纹和颗粒接触力分布及其演化规律, 如图 11 所示。其中,

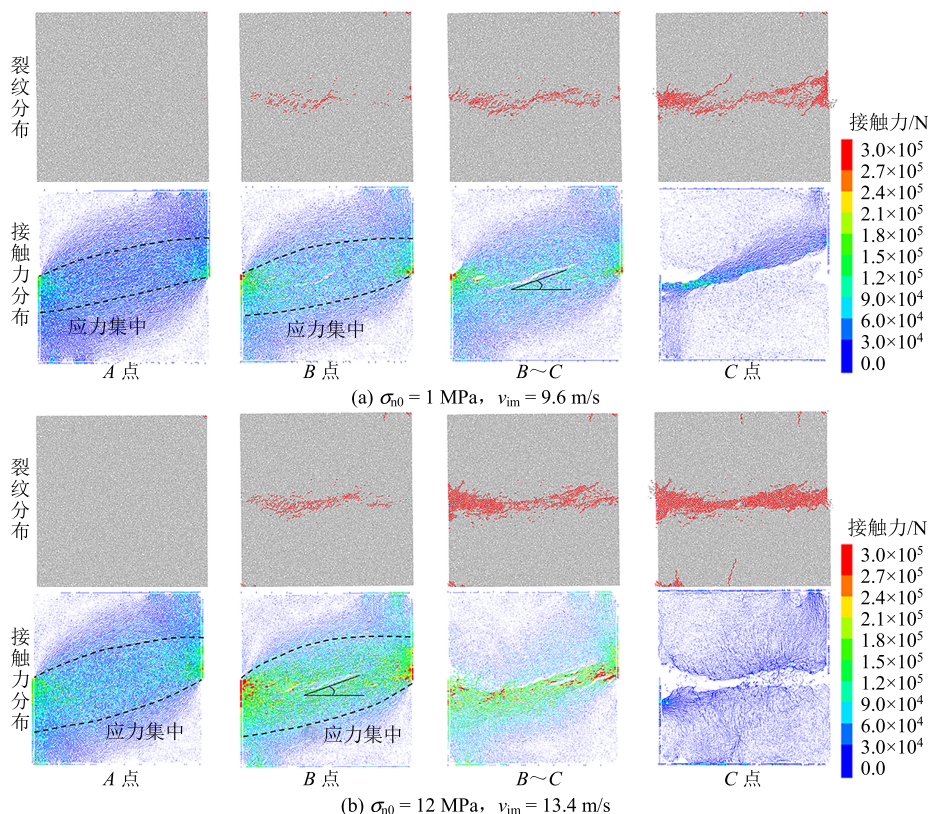


图 11 冲击直剪过程中岩石内部裂纹和接触力分布特征

Fig.11 Distribution of micro crack and contact force in the specimen during impact-induced shear deformation process

A、B、C点与图10中对应, B~C代表介于B点和C点之间的某一时刻。从裂纹的发展过程来看, 裂纹总是从岩石内部向边界扩展, 并最终形成宏观断裂。从接触力分布来看, 在岩石断裂之前, 边界处的接触力集中现象显著; 在距离剪切面一定范围内, 接触力较大, 而远离剪切面的区域, 接触力较小。因此, 裂纹分布在剪切面附近一定区域, 而远离剪切面的区域无裂纹产生。此外, 根据图11, 起裂方向与剪切面具有一定夹角, 与接触力集中区的倾角一致。在试样的左上角和右下角接触力为0, 因此, 在这些区域一般不会出现岩石的表面剥落(见图7)。

当 $\sigma_{n0} = 1 \text{ MPa}$ ,  $v_{im} = 9.6 \text{ m/s}$ 时, 岩石虽发生宏观断裂, 但在断裂区内仍存在部分接触力集中区(见图11(a)), 因此, 岩石仍具有一定的抗剪能力(见图10(a))。当 $\sigma_{n0} = 12 \text{ MPa}$ ,  $v_{im} = 13.4 \text{ m/s}$ 时, 岩石发生宏观断裂后, 断裂区域内几乎不再有有效接触力(见图11(b)), 因此, 岩石失去抗剪能力(见图10(b))。文献[4]的结果也表明, 随着剪切速率的增大, 岩桥的残余剪切强度逐渐减小。

## 5 结 论

为探究岩石的动态剪切力学行为, 采用冲击直剪方法, 开展了花岗岩的冲击直剪试验, 从宏观角度分析了花岗岩的冲击剪切变形过程和破坏特征, 并利用颗粒流软件PFC<sup>2D</sup>进行了数值模拟, 从细观角度探究了其断裂演化过程和机制。得到的主要结论如下:

(1) 冲击直剪条件下, 岩石剪切面的正应力随剪切变形的增加而变化, 剪应力峰值对应的正应力相较于初始正应力增加可达数倍。初始正应力相同时, 冲击速度越大, 正应力变化越大。

(2) 得到了回弹型和断裂型两类剪应力-剪切位移曲线, 发现恒定冲击速度条件下, 随着正应力的增大, 峰值剪应力增大, 剪切变形减小; 恒定正应力条件下, 随着冲击速度的增大, 峰值剪应力增大, 剪切变形增大。在较大正应力和较小冲击速度条件下, 花岗岩剪切变形出现回弹。

(3) 花岗岩试样发生宏观断裂时, 不仅形成沿剪切方向的主断裂面, 在主断裂面的两侧也出现了多条翼裂纹。随着正应力和冲击速度的增大, 花岗岩断裂轮廓由起伏变得平直, 断裂面由粗糙变得平坦。因此, 在较大正应力和冲击速度下, 花岗岩断裂后的抗剪能力更小。

(4) 花岗岩的冲击剪切变形过程分为弹性变形、

峰前损伤、峰后断裂和摩擦滑移(或变形回弹)4个阶段。峰后断裂阶段裂纹发展最为活跃, 断裂起始于试样内部, 沿剪切方向逐渐向边界扩展, 最终形成宏观断裂。由于接触力集中分布在剪切面上下一定范围内, 因此, 断裂面具有一定宽度。正应力和冲击速度增大, 断裂演化过程更短暂, 摩擦滑移阶段更长。

## 参 考 文 献

- [1] HE M C, CHENG T, QIAO Y F, et al. A review of rockburst: experiments, theories, and simulations[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2023, 15(5): 1312-1353.
- [2] 周辉, 陈珺, 卢景景, 等. 岩石多功能剪切试验测试系统研制[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1115-1122, 1136.  
ZHOU Hui, CHEN Jun, LU Jing-jing, et al. Development of a multi-functional shear test system for rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(3): 1115-1122, 1136.
- [3] 王刚, 宋磊博, 刘夕奇, 等. 非贯通节理花岗岩剪切断裂力学特性及声发射特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1533-1545.  
WANG Gang, SONG Lei-bo, LIU Xi-qi, et al. Shear fracture mechanical properties and acoustic emission characteristics of discontinuous jointed granite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(6): 1533-1545.
- [4] LUO G M, QI S W, ZHENG B W. Rate effect on the direct shear behavior of granite rock bridges at low to subseismic shear rates[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2022, 127(11): 024348.
- [5] 谢海峰, 饶秋华, 王志. 反平面剪切(III型)加载下脆性岩石的断口分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1832-1839.  
XIE Hai-feng, RAO Qiu-hua, WANG Zhi. Fracture morphology analysis of brittle rock under anti-plane shear (mode III) loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1832-1839.
- [6] GONG F Q, LUO S, LIN G, et al. Evaluation of shear strength parameters of rocks by preset angle shear, direct shear and triaxial compression tests[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53: 2505-2519.
- [7] 王磊, 张睿, 杨栋, 等. 实时高温富有机质页岩变角剪切力学特性及应变场演化研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2579-2592.  
WANG Lei, ZHANG Rui, YANG Dong, et al. Study on mechanical properties and strain field evolution of

- organic-rich shale with variable angle shear at rea-time high-temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(9): 2579-2592.
- [8] JUNG Y, PARK E, KIM H. Determination of mode II toughness of granite by using SCC test[C]//Proceedings of the ISRM International Symposium-EUROCK 2016. Oxford: Taylor & Francis Group, 2016.
- [9] XU Y, YAO W, ZHAO G. Evaluation of the short core in compression (SCC) method for measuring mode II fracture toughness of rocks[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2020, 224: 106747.
- [10] WATKINS J. Fracture toughness test for soil-cement samples in mode II[J]. **International Journal of Fracture**, 1983, 23: 135-138.
- [11] BACKERS T, STEPHANSSON O, RYBACKI E. Rock fracture toughness testing in mode II—punch-through shear test[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39: 755-769.
- [12] BACKERS T, STEPHANSSON O. ISRM suggested method for the determination of mode II fracture toughness[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(6): 1011-1022.
- [13] HUANG S, FENG X T, XIA K. A dynamic punch method to quantify the dynamic shear strength of brittle solids[J]. **The Review of Scientific Instruments**, 2011, 82: 053901.
- [14] FORQUIN P, SALLIER L. A testing technique to characterise the shear behaviour of concrete at high strain-rates[J]. **Dynamic Behavior of Materials**, 2013, 1: 531-536.
- [15] LUKIĆ B, FORQUIN P. Experimental characterization of the punch through shear strength of an ultra-high performance concrete[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2016, 91: 34-45.
- [16] YAO W, XU Y, YU C, et al. A dynamic punch-through shear method for determining dynamic mode II fracture toughness of rocks[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2017, 176: 161-177.
- [17] XU Y, DAI F. Dynamic response and failure mechanism of brittle rocks under combined compression-shear loading experiments[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 51: 747-764.
- [18] LI J C, YUAN W, LI H B, et al. Study on dynamic shear deformation behaviors and test methodology of sawtooth-shaped rock joints under impact load[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2022, 158: 105210.
- [19] YUAN W, LI J C, ZHENG Y L, et al. Experimental study on shear characteristics of a rock joint subjected to dynamic shear load[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2023, 57(4): 2483-2500.
- [20] 郑安兴. 扩展有限元法及其在岩体裂隙扩展模拟中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- ZHENG An-xing. Research on extend finite element method and its application in simulation of fracture propagation of rock mass[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [21] ZHANG K, CHEN Y, FAN W, et al. Influence of intermittent artificial crack density on shear fracturing and fractal behavior of rock bridges: experimental and numerical studies[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 53: 553-568.
- [22] 赵延林, 彭青阳, 万文, 等. 直剪作用下不共面断续节理岩桥破断试验与数值研究[J]. **土木建筑与环境工程**, 2014, 36(1): 59-67.
- ZHAO Yan-lin, PENG Qing-yang, WAN Wen, et al. Experimental and numerical analysis on rupture of rock bridge with non-coplanar intermittent joints under direct shear[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, 2014, 36(1): 59-67.
- [23] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. Development of a shear zone in brittle rock subjected to direct shear[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45: 1335-1346.
- [24] GHAZVINIAN A, SARFARAZI V, SCHUBERT W, et al. A study of the failure mechanism of planar non-persistent open joints using PFC2D[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45: 677-693.
- [25] BEWICK R P, KAISER P K, BAWDEN W F, et al. DEM simulation of direct shear: 1. rupture under constant normal stress boundary conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47: 1647-1671.
- [26] BEWICK R P, KAISER P K, BAWDEN W F. DEM simulation of direct shear: 2. grain boundary and mineral grain strength component influence on shear rupture[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47: 1673-1692.
- [27] YANG X X, QIAO W G. Numerical investigation of the shear behavior of granite materials containing discontinuous

- joints by utilizing the flat-joint model[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 104: 69-80.
- [28] BU F, XUE L, ZHAI M, et al. Numerical investigation of the scale effects of rock bridges[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2022, 55: 5671-5685.
- [29] 袁伟, 李建春. 剪切速率对平直节理摩擦行为的影响及其机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊2): 3241-3252.
- YUAN Wei, LI Jian-chun. Study on the effects and its mechanism of shear rate on friction of planar joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(Suppl.2): 3241-3252.
- [30] CAO R H, YAO R, LIN H, et al. Shear behaviour of 3D nonpersistent jointed rock-like specimens: experiment and numerical simulation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2022, 148: 104858.
- [31] 周喻, 吴顺川, 许学良, 等. 岩石破裂过程中声发射特性的颗粒流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 951-959.
- ZHOU Yu, WU Shun-chuan, XU Xue-liang, et al. Particle flow analysis of acoustic emission characteristics during rock failure process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(5): 951-959.
- [32] HU W R, LIU K, POTYONDY D O, et al. 3D continuum-discrete coupled modelling of triaxial Hopkinson bar tests on rock under multiaxial static-dynamic loads[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2020, 134: 104448.
- [33] 郭文婧, 马少鹏, 康永军, 等. 基于数字散斑相关方法的虚拟引伸计及其在岩石裂纹动态观测中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3196-3200.
- GUO Wen-jing, MA Shao-peng, KANG Yong-jun, et al. Virtual extensometer based on digital speckle correlation method and its application to deformation field evolution of rock specimen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3196-3200.
- 
- 上接第 1674 页
- [30] EVANS T M, ZHANG N. Three-dimensional simulations of plate anchor pullout in granular materials[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2019, 19(4): 4019004.
- [31] 宋修广, 杨鹤, 陈晓燕, 等. 砂土中浅埋竖向锚定板极限承载力[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(1): 24-31, 38.
- SONG Xiu-guang, YANG He, CHEN Xiao-yan, et al. Ultimate uplift capacity of shallow vertical plate anchors in sand[J]. **Journal of Shandong University (Engineering Science)**, 2021, 51(1): 24-31, 38.
- [32] 王国粹, 杨敏. 砂土中水平受荷桩非线性分析[J]. 岩土学, 2011, 32(增刊2): 261-267.
- WANG Guo-cui, YANG Min. Nonlinear analysis of laterally loaded piles in sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Suppl.2): 261-267.
- [33] 中华人民共和国交通运输部. JTS 167—4—2012 港口工程桩基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTS 167—4—2012 Code for pile foundation of harbor engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [34] 王杰, 杜秋男, 孙海峰, 等. 砂土中螺旋锚极限抗拔承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(1): 66-70.
- WANG Jie, DU Qiu-nan, SUN Hai-feng, et al. Study on the ultimate up-lift bearing capacity of screw anchor[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2009, 25(1): 66-70.
- [35] 张亚军. 螺旋桩基础在斜向荷载作用下的力学特性与承载机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- ZHANG Ya-jun. Study of mechanics character and load-bearing mechanism on screw pile foundation under inclined loading[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.