

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1592

动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切 试验装置研制与应用研究

崔国建^{1,2}, 张传庆^{1,2}, 周 辉^{1,2}, 卢景景^{1,2}, 高 阳^{1,2},
胡明明^{1,2}, 胡大伟^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 动力扰动是导致岩石结构面滑动失稳进而触发地震、岩爆等强动力型地质灾害的重要诱因。为研究动力扰动作用下岩石结构面力学响应及其活化致灾机制, 自主研制了动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置。该装置主要包括用于施加准静态荷载、多种法向边界条件、复杂波形宽频率动力扰动荷载 (0.5~50 Hz) 及宽频剪切速率 (0.000 1~10 mm/s) 的法向和切向加载系统, 施加冲击动力扰动荷载的摆锤冲击系统, 开展循环往复剪切试验的剪切盒, 数据采集和控制系统。通过控制软件编程, 可开展不同剪切速率下恒定法向荷载、恒定法向刚度、卸法向荷载、变法向刚度和动态法向荷载条件下岩石结构面单调或循环剪切试验, 静载叠加动载剪切试验, 速率和应力阶跃试验和摆锤冲击剪切试验等。应用该装置开展了初步的试验研究, 验证了试验过程中该装置具有良好的稳定性和准确性。该装置的研发对认识动力扰动作用下岩石结构面的响应特征, 深入理解地震、岩爆等强动力型地质灾害的岩石结构面活化失稳触发效应及致灾机制具有重要的科学意义和工程价值。

关 键 词: 岩石结构面; 动力扰动; 阶跃试验; 地震监测预报

中图分类号: TU415

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 06-1727-11

Development and application of multifunctional shear test apparatus for rock discontinuity under dynamic disturbance loading

CUI Guo-jian^{1,2}, ZHANG Chuan-qing^{1,2}, ZHOU Hui^{1,2}, LU Jing-jing^{1,2},
GAO Yang^{1,2}, HU Ming-ming^{1,2}, HU Da-wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Dynamic disturbance is an important influence factor that causes the sliding instability of rock discontinuity and then triggers strong dynamic geological disasters, such as earthquake and rock burst. In order to study the mechanical response and disaster-causing mechanism of rock discontinuity under dynamic disturbance loading, a multifunctional shear test apparatus for rock discontinuity under dynamic disturbance loading (DDST-1800) is independently developed. The test apparatus is composed of normal and shear loading units with quasi-static loading, varied normal boundary conditions, dynamic disturbance loading with complex and wide-frequency waveform (0.5–50 Hz), and wide-range shear velocity loading (0.000 1–10 mm/s) functions, pendulum impact system, cyclic shear box unit, data acquisition and control units. The servo-controlled apparatus DDST-1800 can conduct the following typical tests by programmed operations: monotonic or cyclic direct shear test of rock discontinuity under constant normal load (CNL), constant normal stiffness (CNS), unloading normal load (UNL), variable normal stiffness (VNS), and dynamic normal load (DNL) boundary conditions with different shear velocities, superimposed dynamic disturbance shear test, velocity and stress step tests, and pendulum hammer-driven impact test of rock discontinuity under pre-set normal and shear stress conditions. Preliminary

收稿日期: 2021-09-18

修回日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No.U1865203, No.52109142, No.41941018); 中国科学院科技服务网络计划 (STS 计划) 项目 (No.KFJ-STQYD-174)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (U1865203, 52109142, 41941018) and the Science and Technology Service Network Initiative, CAS (KFJ-STQYD-174)。

第一作者简介: 崔国建, 男, 1992 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事深部工程断层活化致灾机制与灾害防控等方面的研究工作。

E-mail: gjcui@whrsm.ac.cn

通讯作者: 张传庆, 男, 1977 年生, 博士, 研究员, 主要从事深部岩石力学与深部灾害调控等方面的研究工作。E-mail: cqzhang@whrsm.ac.cn

experimental studies were carried out and the results verified the stability and accuracy of the new apparatus. The research and development of the new apparatus has important scientific significance and engineering value for clarifying the dynamic response characteristics of rock discontinuity under dynamic disturbance, and deeply understanding the triggering effect of activation instability of rock discontinuity and disaster-causing mechanism of geological disasters such as earthquake and rock burst.

Keywords: rock discontinuity; dynamic disturbance; velocity and stress step test; earthquake monitoring and prediction

1 引言

伴随着我国经济的高速发展,一大批重大地下基础设施建设项目和资源开发项目相继投产,地下资源的利用和地下空间的开发都不断趋向地球深部^[1]。深部工程赋存岩体结构复杂,常常会被不同发育程度的结构面切割,在深部高地应力环境下,天然结构面中积聚了大量的能量,洞室开挖后,结构面积聚能量进一步增加,结构面逐渐趋于亚稳定状态。深部工程全生命周期内,爆破扰动等强开采扰动和远场地震波等动力扰动常常会引起处于亚稳定状态的结构面应力状态和力学特性发生变化,进而可能诱发结构面动力失稳破坏,产生振动应力波并释放巨大的能量,造成严重的动力灾害,危及隧道(洞)、巷道、地下厂房等深部地下结构物安全,如锦屏“11·28”极强岩爆和千秋煤矿“11·3”冲击地压^[2-7]。因此,准确认识动力扰动作用下岩石结构面力学响应特征及其活化失稳机制对于深部工程安全性和稳定性至关重要。

剪切试验装置是实验室研究岩石结构面剪切力学特性,揭示结构面损伤破坏机制和失稳滑移机制的关键技术装备。限于对岩石结构面动力扰动效应认识的不足,并受到伺服控制技术以及试验装备能力的制约,早期的剪切试验装置^[8-13]主要用于研究恒定法向荷载边界下岩石结构面的准静态力学响应特征,比如武汉岩土所自主研发的 RMT 系列岩石力学试验系统,部分装置也可用于研究恒定法向刚

度边界下岩石结构面的准静态力学响应特征,如莫纳什大学研发的剪切装置。上述试验装置普遍存在加载能力低、试样尺寸小、刚度控制效果差且刚度不易于改变等缺点,且均无法开展动力扰动作用下岩石结构面剪切试验。

随着国内外深部岩体工程建设规模的迅猛发展、岩石力学试验技术的快速进步以及对岩石结构面力学特性及破坏机制认识的加深,近年来,岩石结构面剪切试验装置在复杂边界条件控制、多尺度剪切、往复剪切、拉伸剪切、剪切渗流和动态剪切等方面取得了大量的进展^[14-21]。Jiang 等^[14]率先采用电液伺服控制系统模拟法向弹簧,实现了高精度的法向刚度控制。江权等^[17]开发了一套具有高法向荷载、大剪切面积、多剪切模式、长剪切距离的岩石结构面剪切伺服试验系统。杜时贵等^[18]研发了多套岩体结构面抗剪强度尺寸效应联合试验系统,完成了系列尺寸岩体结构面(10 cm×10 cm~100 cm×100 cm)的抗剪强度测试。夏才初等^[20]研制了一套岩石节理全剪切-渗流耦合试验系统,为高渗透水压下的节理剪切-渗流耦合性质的基础研究提供了设备支撑。

随着深部岩体工程中动力扰动作用诱发的灾害问题不断显现,而相关科学问题的解决迫切需要开展动力扰动作用下岩石结构面剪切力学试验,这成为相关剪切试验装置发展的主要内驱力。表 1 汇总了国内外典型动力扰动剪切试验装置及其主要技术参数^[22-26]。其中, Konietzky 等^[24]开发了可同时

表 1 典型动力扰动剪切试验装置主要技术参数^[22-26]

Table 1 Main technical parameters of typical shear test apparatuses with dynamic disturbance loading function^[22-26]

研制单位	最大试样尺寸 (mm×mm)	法向、切向荷载 /kN	动力扰动	剪切速率 (mm·s ⁻¹)	最大剪切位移 /mm	边界条件
多伦多大学	200×200	250, 250	双向扰动(0~10 Hz)	0.05~200	100	恒定法向荷载
约瑟夫傅立叶大学	100×100	100, 100	切向扰动	0.000 8~500	—	恒定法向荷载、恒定法向刚度
弗莱贝格工业大学	400×200	1 000, -200~800	双向扰动(0~40 Hz)	10 ⁻⁷ ~70	50	恒定法向荷载、恒定法向刚度、动态法向荷载
中国地震局地质研究所	500×500	1 500, 1 500	双向扰动	最大为 0.7	20	恒定法向荷载
中国科学院地球物理研究所	1 000×250	500, 1 000	双向扰动(0~20 Hz)	0.001~1 000	400	恒定法向荷载、恒定法向刚度、动态法向荷载
中国科学院武汉岩土力学研究所(本设备)	300×150	1 800, -1 800~1 800	双向扰动(0~50 Hz)+ 摆锤冲击扰动	0.000 5~10	150	恒定法向荷载、恒定法向刚度、卸法向荷载、动态法向荷载、变法向刚度

叠加法向及切向扰动荷载的动态剪切试验装置, 动载频率最高可达 40 Hz。基于该试验装置, Dang 等^[27]开展了系统的法向动态循环荷载下光滑结构面剪切试验研究。Qi 等^[26]自主研发了一套模拟地震荷载作用下岩石结构面力学响应的试验装置 TFD-500/1000-JS, 剪切速率高达 1 m/s, 动载频率最高可达 20 Hz。

综上所述, 现有动力扰动剪切试验装置已能够较好地模拟工程中地震应力波的扰动作用, 然而不足以模拟爆破等高频扰动应力波作用(爆炸应力波频率可达 400 Hz), 且现有装置法向及切向加载能力偏低, 边界条件相对简单, 难以模拟工程扰动下深部岩石结构面初始高应力条件及其复杂边界条件演化特征。为此, 我们自主研发了一套动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置 DDST-1800, 主要用于研究地震应力波、爆炸应力波等动力扰动作用下深部工程岩石结构面动力学响应特征和失稳滑移机制。

2 主要功能及特色

2.1 主要技术参数及功能

动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置主要技术参数如表 2 所示。通过编程控制, 本套试验装置可开展以下类型试验:

(1) 不同剪切速率(0.000 1~10 mm/s)下恒定法向荷载、恒定法向刚度、卸法向荷载、变法向刚度和动态法向荷载(正弦波和三角波等动态荷载)边界条件下岩石结构面的单向或循环剪切试验。

(2) 岩石结构面的速率阶跃、应力阶跃和滑动-静止-滑动等摩擦学试验。

(3) 岩石结构面静载叠加法向及切向动力扰动试验。

2.2 试验装置技术关键点及特色

动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置主要技术创新和特色如下:

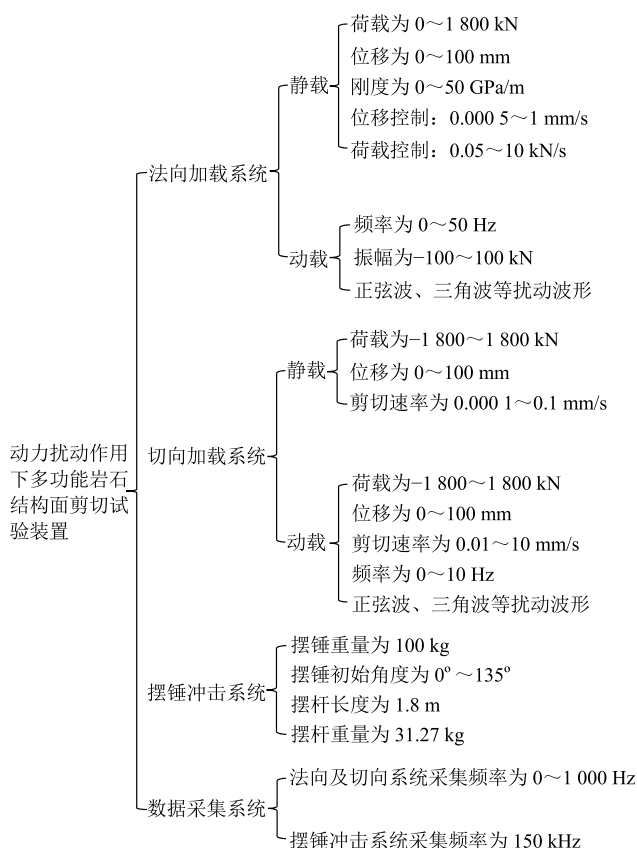
(1) 开发了长时高敏伺服系统控制技术, 形成了由内嵌式高精度变形传感器高敏采集→信号智能高速处理与指令精准指派→超高速伺服反馈的集成式闭环控制系统, 可实现恒定法向荷载、恒定法向刚度、卸法向荷载、变法向刚度和动态法向荷载等功能的无缝切换, 攻克了复杂边界条件的精准控制难题。

(2) 设计了嵌套式法向动静组合系统、两套剪切加载系统和摆锤冲击加载系统。其中嵌套式法向

动静组合系统由内部动态加载作动器(200 kN)和外部空心静态加载液压缸(1 800 kN)构成, 实现了静态荷载和动态荷载的独立控制, 解决了高初始法向应力下地震扰动荷载施加的难题; 两套剪切加载系统分别为用于开展准静态慢速剪切试验的静载加载系统和用于开展高加载速率及切向动力扰动作用下剪切试验的动态加载系统, 克服了单一剪切加载系统宽频速率范围(0.000 5~10 mm/s)控制难题; 摆锤冲击加载系统可施加高频切向扰动荷载^[28], 可用于模拟爆破扰动等对深部岩石结构面的影响效应, 解决了现有剪切试验装置难以模拟爆破等高频扰动下深部岩石结构面力学响应及其破坏机制的难题。

表 2 动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of multifunctional shear test apparatus for rock structural plane under dynamic disturbance loading



(3) 随动式剪切盒: 上剪切盒固定在反力杆两侧, 下剪切盒由 L 形剪切块、剪切侧板和 4 根高强螺栓组成。其中剪切侧板固定在切向加载油缸前端, L 形剪切块和剪切侧板通过螺栓连接锁紧, 通过上述设计可实现岩石结构面双向循环剪切, 有效消除

了传统循环剪切试验过程中剪切盒与加载系统间的间隙影响,提高了试验结果的准确性。

(4) 新研发的动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置功能齐全且技术参数范围广,可开展高应力、准静态、高加载速率、动力扰动、复杂边界等组合条件下岩石结构面单调或循环剪切试验。

3 试验系统

动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置主要由主体机械结构、伺服控制系统、液压油源及冷却系统、数据测量和采集系统组成。

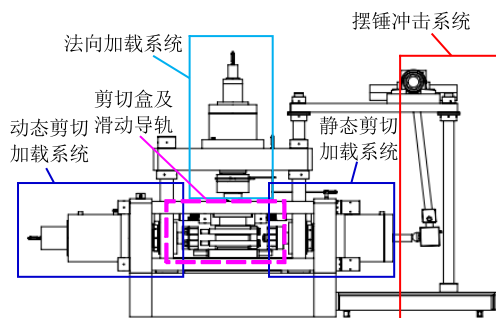
3.1 主体机械结构

图 1 为自主研发的动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置主体结构实物图及其示意图。试验机主体机械结构包括刚性反力框架、法向加载系统、静态切向加载系统、动态切向加载系统、摆锤冲击系统、剪切盒、滑动导轨和反力杆等。刚性反力框架由法向反力框架和切向反力框架两部分组成,法向反力框架布置在切向反力框架内部。法向反力框架由顶部横梁、底座和 4 根立柱组成,切向反力框架由左右横梁、底座和 4 根立柱通过高强度螺栓连接形成。通过有限元静力学分析获得刚性反力框架满负荷时最大变形量仅为 0.18 mm,满足试验刚度要求。法向加载系统固定在法向反力框架内部,切向加载系统、剪切盒、滑动导轨和反力杆等均布置在切向反力框架内部,摆锤冲击系统安装在切向加载系统静态加载油缸一侧。

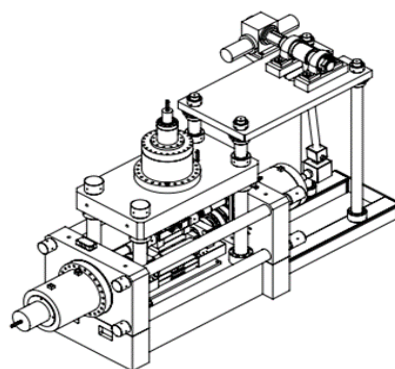
图 2 展示了装置法向加载系统、切向加载系统、剪切盒、滑动导轨和反力杆等结构基本组成及相对位置关系。法向加载系统由嵌套式动静组合油缸(内部动态加载作动器和外部空心静态加载液压缸)和球头球座组成,其中动态加载作动器用于施加法向动力扰动荷载。切向加载系统由静态加载空心液压缸和动态加载作动器组成,分别布置在切向反力框架左右横梁两端,其中静态加载液压缸用于开展准静态慢速剪切试验,动态加载作动器用于开展高加载速率及切向动力扰动作用下的剪切试验。摆锤冲击系统由框架、电机、摆杆、摆锤、冲击头和冲击杆组成(见图 3)。冲击杆放置在静态加载空心液压缸中心,冲击杆外径略小于液压缸空心部分直径,并在二者直接接触位置采取了减摩措施,有效降低了冲击过程中因冲击杆和液压缸间直接接触摩擦造成的冲击波能量损失。



(a) 主体结构实物图



(b) 主体结构正视图



(c) 主体结构斜视图

图 1 动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置
Fig.1 Multifunctional shear test apparatus for rock structural plane under dynamic disturbance loading

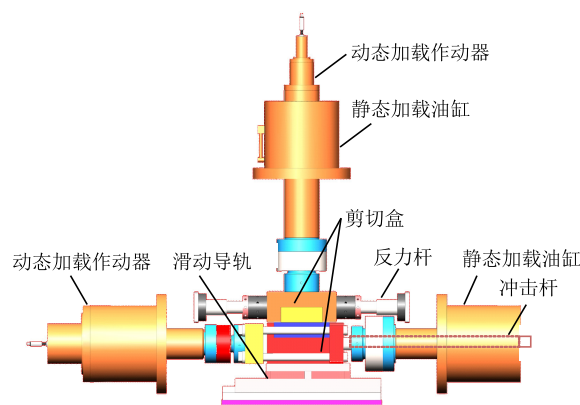


图 2 加载系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of loading system

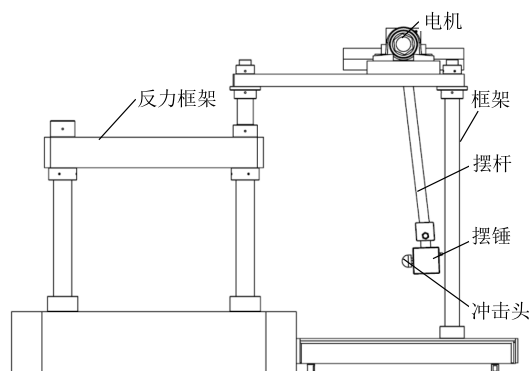


图3 摆锤冲击系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of pendulum hammer-driven impact system

滑动导轨固定在底座上,下剪切盒(400 mm×150 mm×100 mm)安装在导轨上,未开展试验时上剪切盒(300 mm×150 mm×100 mm)通过螺栓固定在法向动静组合油缸上,上、下剪切盒尺寸差异能够确保剪切过程中剪切面积始终保持恒定,同时可以降低剪切过程中上部试样的倾斜效应。上剪切盒左右两侧均为可调节式反力杆,其由支撑杆和前后调节螺母组成,如图2所示。以上结构确保了剪切试验过程中下剪切盒仅能沿水平方向移动,而上剪切盒仅能沿垂直方向移动。

为开展往复循环剪切试验,本设备对下剪切盒进行了专门设计。下剪切盒由L形剪切块、剪切侧板和4根高强螺栓组成,其中剪切侧板直接固定在静态加载空心液压缸或动态加载作动器前端。试验时只需将试样放置在L形剪切块并用螺栓连接剪切侧板和在L形剪切块从而锁紧下剪切盒即可进行循环剪切试验。

3.2 测控系统

测控系统包括数据测量、采集和伺服控制系统。数据测量和采集系统由控制器RMC200、数据采集卡、荷载传感器、位移传感器、冲击力传感器和加速度传感器等组成。荷载传感器均安装在油缸加载端,量程为2 000 kN,测量精度为0.05% F.S,位移传感器布置在油缸侧面,量程均为200 mm,测量精度为0.01% F.S,冲击力及加速度传感器安装在摆锤和冲击头之间。试验全程实时采集各类数据,其中法向和切向荷载、位移等数据采样频率可在0~1 000 Hz范围内变化,冲击力及加速度采样频率为150 kHz。

伺服控制系统由工控机、操作软件、控制器RMC200、伺服阀、传感器、油缸、液压油源等组成。通过伺服控制系统,试验装置能够实现恒定法

向荷载、恒定法向刚度、变法向刚度、复杂波形动态荷载等功能的闭环控制。伺服系统闭环控制的流程图如图4所示。在任意一个闭环过程中,操作软件首先通过以太网向控制器RMC200下发指令,结合RMC200实时记录的荷载和位移数据,对比目标值和实际值之差计算相应的PID输出参数,随后RMC200将确定的PID参数转化为电信号作用在伺服阀上控制油缸流量,从而实现一个闭环过程的精确控制。

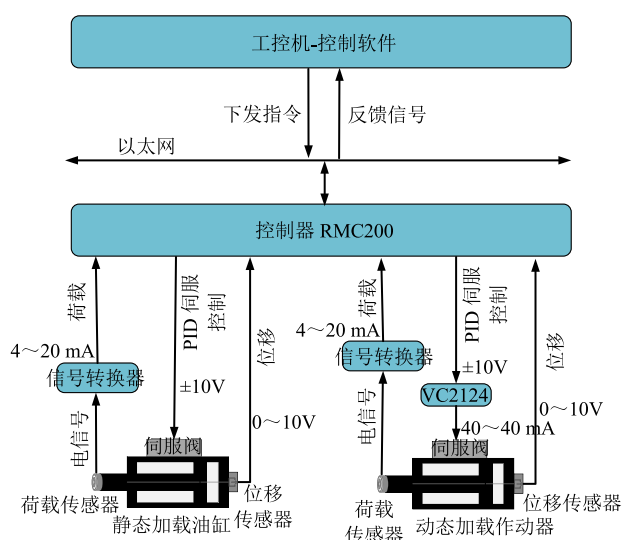


图4 伺服系统闭环控制示意图

Fig.4 Schematic diagram of closed-loop motion control of servo-controlled system

3.3 液压油源及冷却系统

由于静态加载油缸和动态加载作动器执行过程中对液压油流量和工作压力要求不同,为了精准控制油缸,静态加载油缸和动态加载作动器分别采用不同的电机和液压泵驱动。对于静态加载油缸,使用1台11 kW电机以及1台液压流量为6 L/min、工作压力为13 MPa的液压泵驱动。对于动态加载作动器,使用3台15 kW电机以及1台液压流量为66 L/min、工作压力为21 MPa的液压泵驱动。液压油箱的容积为900 L。在7 MPa工作压差下,动态伺服阀的液压流量为63 L/min。为提升动态加载作动器瞬时流量,还在设备上安装了多个液压蓄能器。快速及动力扰动剪切过程中,液压油迅速升温,影响设备正常运行,为保障系统正常运行,试验装置还配备了一套风冷式冷抽机组。

4 初步试验结果

为了验证新开发的动力扰动作用下多功能岩石

结构面剪切试验装置 DDST-1800 控制、监测精度及功能可靠性,开展了一系列典型试验条件下花岗岩剪切试验,包括速率和应力阶跃剪切试验、静载叠加高频动力扰动剪切试验以及摆锤冲击型动力扰动剪切试验,本节展示了初步的试验结果。花岗岩取自湖北麻城,通过岩石专用切磨设备将花岗岩块加工成 $300\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的长方体上盘试样和 $400\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的长方体下盘试样用于开展各类剪切试验(见图 5),同时制备了标准圆柱体试样用于开展单轴及巴西劈裂试验。试验确定的花岗岩平均单轴抗压强度为 225.13 MPa、弹性模量为 53.47 GPa、泊松比为 0.2、抗拉强度为 12.6 MPa。

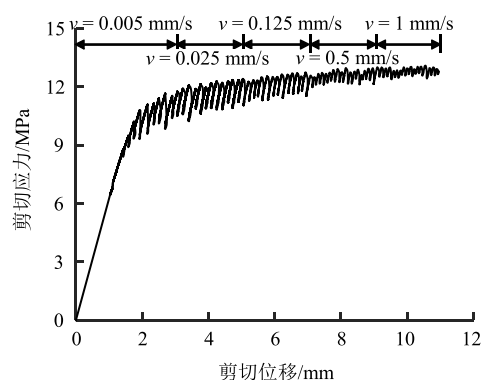


图 5 平直花岗岩试样
Fig.5 Planar granite samples

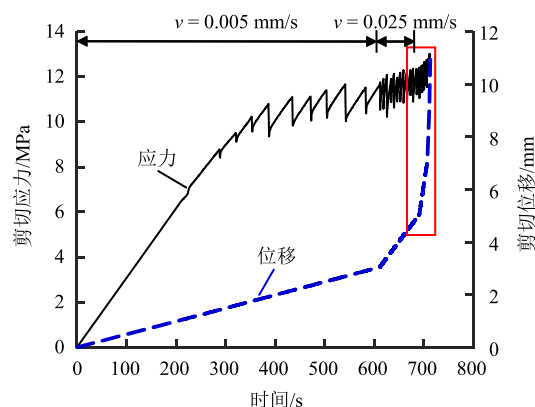
4.1 速率和应力阶跃剪切试验结果

速率阶跃试验中,剪切速率采用 $0.005\text{ mm/s}\rightarrow 0.025\text{ mm/s}\rightarrow 0.125\text{ mm/s}\rightarrow 0.5\text{ mm/s}\rightarrow 1\text{ mm/s}$ 的加载路径,在第 1 级剪切速率下剪应力曲线进入稳定的峰后阶段后开始第 2 级加载,随后各级加载速率下剪切位移均为 2 mm。图 6 为 20 MPa 法向应力下平直花岗岩速率阶跃试验结果。由图可知,剪切试验过程中剪切速率加载稳定性好,对比实际输出剪切速率(即为剪切位移-时间曲线斜率)和输入剪切速率证实了伺服控制系统的准确性。以 0.5 mm/s 的输入剪切速率为例,拟合得到的实际输出剪切速率为 0.499 mm/s ,剪切速率误差低于 0.5%。

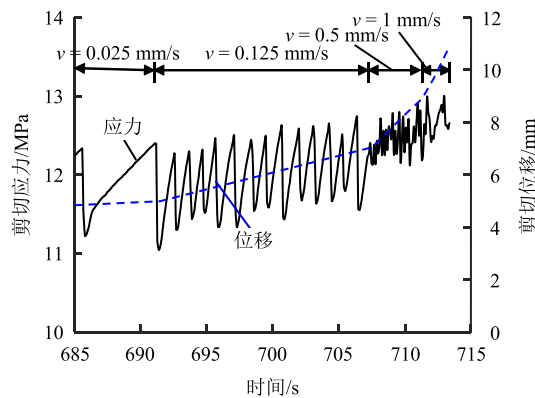
与已有研究类似,平直花岗岩剪应力曲线由峰前弹性阶段和峰后不稳定摩擦滑动阶段组成,在摩擦滑动阶段,各级剪切速率下剪应力曲线均展现了应变硬化和周期性的黏滑特征,与 Karner 等^[29]通过双剪试验在较小的速率范围内($0.01\sim 0.3\text{ mm/s}$)获得的结果基本一致。黏滑事件具有显著的剪切速率依赖特征,随着剪切速率增加,黏滑事件的应力降和黏滑周期逐渐减小。剪切速率为 0.005 mm/s 时,



(a) 剪切应力-剪切位移曲线



(b) 剪切应力(剪切位移)-时间曲线

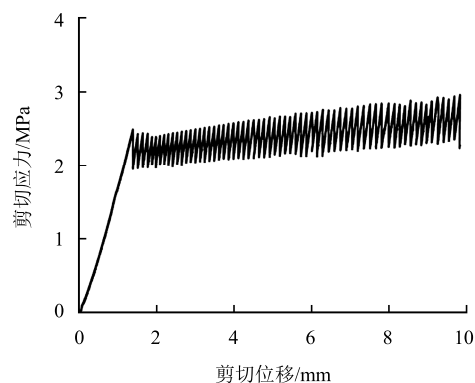


(c) 图 6(b)中矩形部分放大图

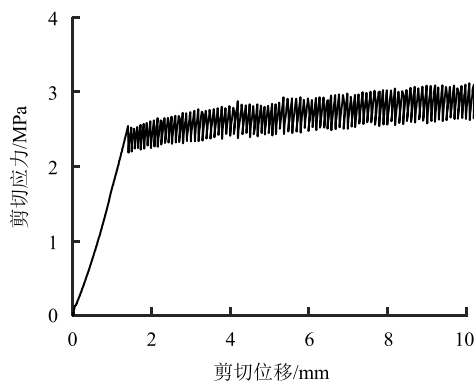
图 6 速率阶跃试验结果
Fig.6 Results of velocity step test

平均应力降和黏滑周期分别为 1.39 MPa 和 39.22 s,而剪切速率为 1 mm/s 时,平均应力降和黏滑周期分别为 0.40 MPa 和 0.11 s。Meng 等^[30]在粗糙花岗岩剪切试验中观察到了类似的结果。此外,随着剪切速率增大,剪切强度呈增大趋势。法向应力为 5 MPa 以及不同剪切速率下的剪切试验结果(见图 7)进一步证实了上述结论。由图 7(c)可知,在 10 mm/s 剪切速率下平直花岗岩展现出了稳定滑动特征,结果表明平直花岗岩滑动模式同样具有剪切速率依赖

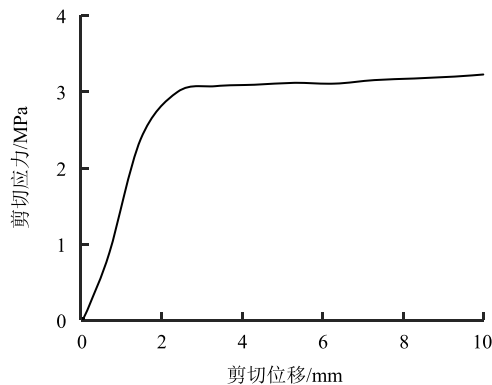
性,随着剪切速率增加滑动模式由黏滑逐渐向稳滑过渡。



(a) 剪切速率为 0.0001 mm/s



(b) 剪切速率为 0.1 mm/s



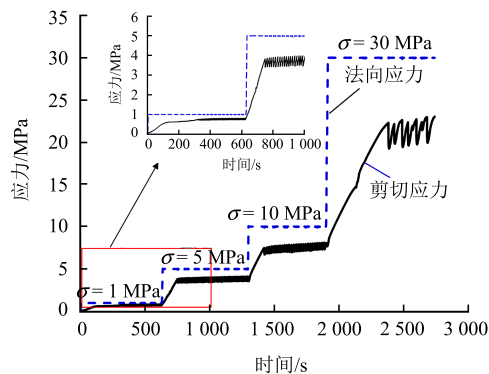
(c) 剪切速率为 10 mm/s

图7 5 MPa 法向应力以及不同剪切速率下的试验结果

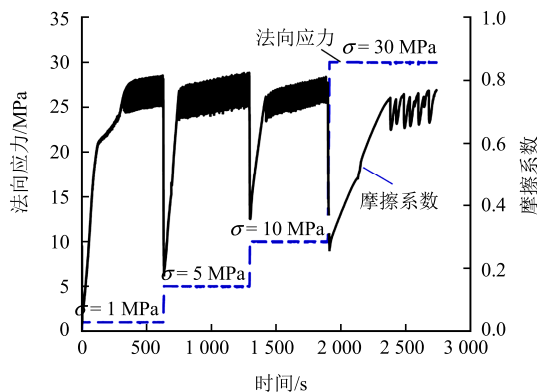
Fig.7 Results of stress test under different shear velocities and 5 MPa normal stress

图8为平直花岗岩应力阶跃试验结果,试验中剪切速率为 0.005 mm/s,法向应力采用 1 MPa→5 MPa→10 MPa→30 MPa 的加载路径,前3级荷载剪切位移均为 3 mm,第4级荷载剪切位移为 5 mm。随着法向应力增大,峰值剪应力增大,而峰值摩擦系数降低,这与高法向应力下花岗岩表面微观凸起被剪断产生岩粉相关。各级法向应力下剪应力曲线

均展现出应变硬化-黏滑特征。法向应力为 1 MPa 时,花岗岩首先稳定滑动,随着剪切位移增大,逐渐向黏滑过渡,而在法向应力 ≥ 5 MPa 时,花岗岩仅发生黏滑滑动。黏滑事件具有显著的法向应力依赖特征,黏滑事件的应力降和黏滑周期均随法向应力的增加而增加(见表3)。



(a) 剪切(法向)应力-时间曲线



(b) 法向应力(摩擦系数)-时间曲线

图8 应力阶跃试验结果

Fig.8 Results of stress step test

表3 不同法向应力下黏滑事件应力降及周期

Table 3 Stress drop and period of stick-slip events under different normal stresses

法向应力/MPa	黏滑应力降/MPa	黏滑周期/s
1	0.09	4.93
5	0.53	13.75
10	0.83	18.52
30	2.81	63.36

4.2 静载叠加高频动力扰动剪切试验结果

正弦波和三角波实现过程如下:编程生成正弦波和三角波信号发生器(荷载(位移)-时间曲线),可设置幅值和频率,根据信号发生器设定的目标值进行闭环控制实现预设波形。对于三角波,需要在拐点处增加加速度,从而保证三角波尖角效果,以荷载控制三角波形为例,试验过程中通过伺服控制

系统实现荷载在波峰波谷间匀速加卸载获得预设波形。图 9 为不同频率和振幅下法向正弦波和三角波动力扰动测试结果。由图可知, 实际输出的动力扰动波形与输入波形完全一致, 输出频率和振幅等参数也基本等于输入值, 证实了新研发的试验设备能够稳定地施加不同频率和振幅的正弦波和三角波动力扰动。在此基础上, 对于更为复杂的天然地震波波形, 可参考 Qi 等^[26]提出的地震波形分解方法获得, 本文不再赘述。

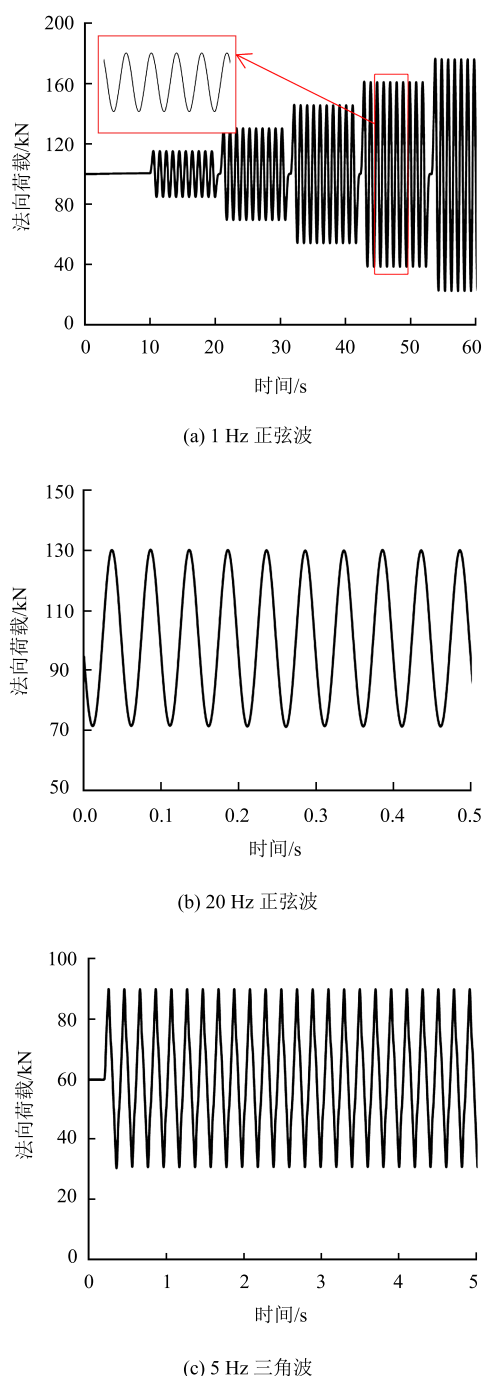


图 9 法向静载叠加正弦波和三角波动力扰动测试结果
Fig.9 Results of static normal load superimposed sine wave and triangular wave dynamic disturbance

图 10 为静载叠加法向动态正弦波扰动下平直花岗岩剪切试验结果, 其中初始法向应力为 2 MPa, 初始剪切应力为 1 MPa, 叠加的正弦波频率为 10 Hz, 振幅分别为 0.67、1、1.33 MPa, 加载周期为 50 次。由图 10(a)可知, 法向正弦扰动荷载导致剪切应力和摩擦系数产生类似的正弦波形变化, 这与岩石材料本身的泊松效应相关。法向动力扰动荷载影响结构面稳定性, 随着正弦波振幅增加, 初始处于稳定状态的岩石结构面逐渐产生滑动。由图 10(b)可知, 当法向正弦波振幅为 0.67 MPa 时, 扰动过程中平直花岗岩界面仍处于稳定状态, 随着法向正弦波振幅增加至 1 MPa 和 1.33 MPa, 扰动作用下平直花岗岩界面出现滑移, 且滑移速度和滑移量随振幅的增大而增大。

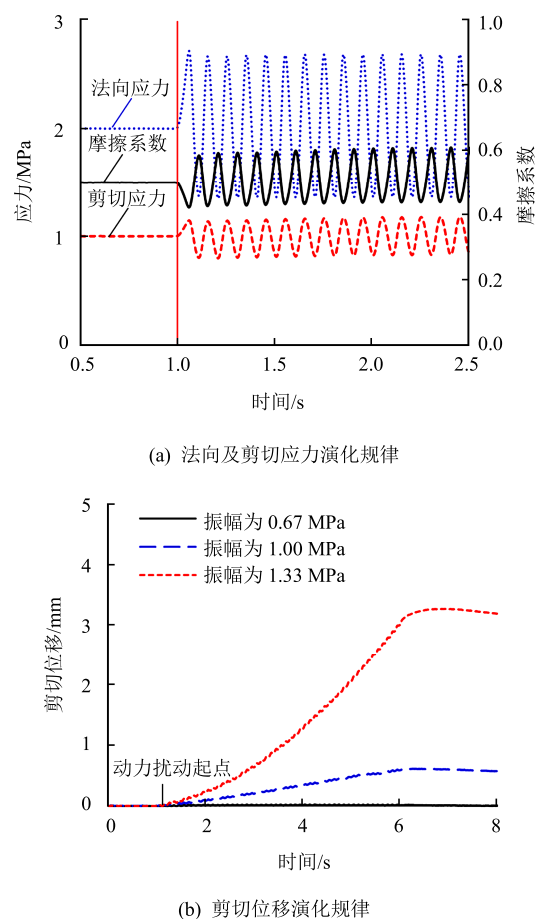


图 10 法向静载叠加正弦波动力扰动作用下平直花岗岩剪切试验结果

Fig.10 Results of dynamic shear test results of planar granite under static normal load superimposed sine wave dynamic disturbance

4.3 摆锤冲击扰动剪切试验结果

图 11 为平直花岗岩摆锤冲击剪切试验结果, 摆锤冲击前结构面初始法向应力为 2 MPa, 初始剪切

应力为 1 MPa, 初始摆角为 15° 和 30°。由图可见, 切向冲击荷载作用可导致稳定结构面快速滑动, 剪切位移逐渐增加, 直至摆锤能量耗散, 结构面达到稳定滑动量, 整个滑动周期约为 300 μ s。随着摆角增大, 冲击波输入的能量增加, 从而导致滑动位移量和滑动速率均增大。冲击荷载作用下岩石结构面剪切位移演化规律与 Yao 等^[21]的试验结果一致。

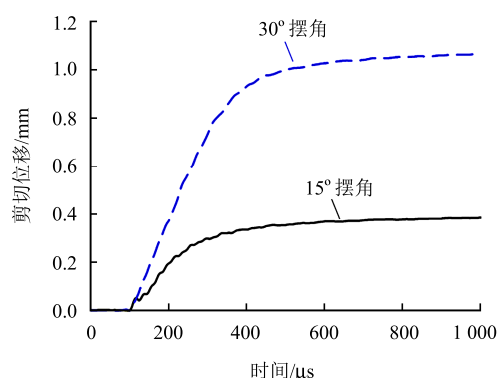


图 11 15° 和 30° 摆角冲击下花岗岩界面剪切位移演化规律
Fig.11 Evolution of shear displacement of granite interface subjected to pendulum hammer-driven impact shear tests with pendulum angles of 15° and 30°

受试验设备制约, 以往研究中主要关注岩石结构面静态剪切破坏问题, 较少考虑岩石结构面剪切过程中动力扰动效应。而工程实践认识表明, 结构面型岩爆、断层滑移型冲击地压等动力灾害很多情况下是爆破、开挖强卸荷等动力扰动诱发的结构面失稳引起的, 本文法向正弦应力波扰动及切向摆锤冲击扰动下结构面剪切试验结果证实了上述观点。因此, 此类新型试验装备的研发可为开展动力扰动作用下岩石结构面动力响应特征及其活化致灾机制的研究提供重要平台。

5 结 论

本文详细介绍了自主研发的动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置, 并采用该装置开展了初步的试验研究, 验证了系统的可靠性和稳定性, 主要结论如下:

(1) 通过技术创新, 采用两套不同的动力扰动系统, 成功研发了一套动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置, 可模拟不同频率范围扰动应力波, 剪切速率可达 10 mm/s, 法向和切向荷载高达 1 800 kN, 试验装置的成功研制解决了国内外缺乏动力扰动作用下高应力剪切试验设备的难题, 为明晰岩石结构面的动力响应特征和深入理解地震、

岩爆等强动力型地质灾害的岩石结构面活化失稳触发效应及机制提供了关键技术支持。

(2) 进行了平直花岗岩的速率和应力阶跃试验, 揭示了黏滑事件的速率和应力依赖性, 随着剪切速率增加, 黏滑事件的应力降和黏滑周期逐渐减小, 而随法向应力增加, 黏滑事件的应力降和黏滑周期逐渐增加。

(3) 法向正弦应力波扰动及切向摆锤冲击扰动下结构面剪切试验结果表明, 动力扰动是诱发岩石结构面失稳滑动的一个关键因素。

参 考 文 献

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377-2389.
PENG Jian-bing, CUI Peng, ZHUANG Jian-qi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377-2389.
- [3] 丛利, 曹安业, 周远宏, 等. 基于动静载冲击地压危险叠加的综合预警方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 767-776.
CONG Li, CAO An-ye, ZHOU Yuan-hong, et al. The comprehensive pre-warning method of rock burst hazard based on theory of dynamic and static combined loading[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(4): 767-776.
- [4] 傅洪贤, 赵勇, 谢晋水, 等. 爆破施工隧道围岩稳定性研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 67-70.
FU Hong-xian, ZHAO Yong, XIE Jin-shui, et al. Study on the stability of the surrounding rock of blasting construction tunnel[J]. *China Railway Science*, 2011, 32(2): 67-70.
- [5] 焦建康. 动载扰动下巷道锚固承载结构冲击破坏机制及控制技术[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.
JIAO Jian-kang. Burst failure mechanism and control technology of roadway anchorage bearing structure under dynamic load disturbance[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.
- [6] 李夕兵, 姚金蕊, 宫凤强. 硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2551-

- 2563.
- LI Xi-bing, YAO Jin-rui, GONG Feng-qiang. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2011, 21(10): 2551-2563.
- [7] ZHANG C, FENG X, ZHOU H, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(3): 275-288.
- [8] 葛修润, 周百海. 岩石力学室内试验装置的新进展——RMT-64 岩石力学试验系统[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 50-56.
- GE Xiu-run, ZHOU Bai-hai. The new progress of the rock mechanics laboratory test device: the test system RMT-64 of rock mechanics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(1): 50-56.
- [9] 许江, 彭守建, 尹光志, 等. 含瓦斯煤岩细观剪切试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 677-685.
- XU Jiang, PENG Shou-jian, YIN Guang-zhi, et al. Development of meso-shear test equipment for coal rock containing gas and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 677-685.
- [10] 崔国建, 张传庆, 韩华超, 等. CNL 及 CNS 条件下结构面剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3384-3392.
- CUI Guo-jian, ZHANG Chuan-qing, HAN Hua-chao, et al. Experiment study on shear behavior of artificial joint under CNL and CNS boundary conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl.2): 3384-3392.
- [11] AHOLA M P, HSIUNG S M, KANA D D. Experimental study on dynamic behavior of rock joints[J]. **Developments in Geotechnical Engineering**, 1996, 79: 467-494.
- [12] JOHNSTON I W, LAM T S K, WILIAMS A F. Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock[J]. **Geotechnique**, 1987, 37(1): 83-89.
- [13] INDRARATNA B, HAQUE A, AZIZ N. Laboratory modelling of shear behaviour of soft joints under constant normal stiffness conditions[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 1998, 16: 17-44.
- [14] JIANG Y, XIAO J, TANABASHI Y, et al. Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(2): 275-286.
- [15] SHRIVASTAVA A K, RAO K S. Physical modeling of shear behavior of infilled rock joints under CNL and CNS boundary conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(1): 101-118.
- [16] CUI Z, SHENG Q, ZHANG M, et al. A new direct shear apparatus for rock joints specialized in cyclic loading[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54(8): 4321-4327.
- [17] 江权, 李力夫, 冯夏庭, 等. 大型多功能高压岩石结构面剪切伺服试验系统及功能测试分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3159-3169.
- JIANG Quan, LI Li-fu, FENG Xia-ting, et al. High pressure shearing servo test system for rock joint with multi modes and corresponding function test analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 3159-3169.
- [18] 杜时贵, 吕原君, 罗战友, 等. 岩体结构面抗剪强度尺寸效应联合试验系统及初级应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1337-1349.
- DU Shi-gui, LÜ Yuan-jun, LUO Zhan-you, et al. Combined test system for size effect of rock joint shear strength and its primary application research[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(7): 1337-1349.
- [19] CHEN J, ZHOU H, ZENG Z, et al. Macro- and microstructural characteristics of the tension-shear and compression-shear fracture of granite[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53: 201-209.
- [20] 夏才初, 钱鑫, 桂洋, 等. 多功能岩石节理全剪切-渗流耦合试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2219-2231.
- XIA Cai-chu, QIAN Xin, GUI Yang, et al. A novel multi-functional shear-flow coupled test system for rock joints and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(10): 2219-2231.
- [21] YAO W, WANG C, XIA K, et al. An experimental system to evaluate impact shear failure of rock discontinuities[J]. **Review of Scientific Instruments**, 2021, 92: 034501.
- [22] CRAWFORD A M, CURRAN J H. The influence of shear velocity on the frictional resistance of rock discontinuities[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1981, 18(6): 505-515.
- [23] HANS J, BOULON M. A new device for investigating

- the hydro-mechanical properties of rock joints[J]. **International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics**, 2003, 27(6): 513-548.
- [24] KONIETZKY H, FRÜHWIRT T, LUGE H. A new large dynamic rockmechanical direct shear box device[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(3): 427-432.
- [25] 郭玲莉, 刘力强, 马瑾. 黏滑实验的震级评估和应力降分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(3): 867-876.
- GUO Ling-li, LIU Li-qiang, MA Jin. The magnitude estimation in stick-slip experiments and analysis of stress drop[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2014, 57(3): 867-876.
- [26] QI S, ZHENG B, WU F, et al. A new dynamic direct shear testing device on rock joints[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(10): 4787-4798.
- [27] DANG W, KONIETZKY H, FRÜHWIRT T. Direct shear behavior of a plane joint under dynamic normal load (DNL) conditions[J]. **Engineering Geology**, 2016, 213: 133-141.
- [28] 张明波. 摆锤式冲击试验平台及冲击响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- ZHANG Ming-bo. Research on pendulum impact test platform and its impact response[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [29] KARNER S L, MARONE C. Effects of loading rate and normal stress on stress drop and stick-slip recurrence interval[J]. **Geocomplexity and the Physics of Earthquakes**, 2000, 120(40): 25226-25233.
- [30] MENG F Z, WONG L N Y, ZHOU H, et al. Shear rate effects on the post-peak shear behaviour and acoustic emission characteristics of artificially split granite joints[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(7): 2155-2174.

(上接第 1704 页)

《岩土力学》2021 年第 9 期被 EI 收录论文 (27 篇, 收录率 100%) (2)

序号	论文题名	作者	页码
18	砂土液化与水泥粉煤灰碎石桩施工参数关系的试验研究	尹小卡, 杜思义, 王涛涛	2518—2524
19	岩土工程相似模拟试验观测的可靠子区数字图像相关方法	董 伟, 王学滨	2525—2534
20	油气钻井中的分离式冲击-切削复合破岩机制研究	蔡 灿, 张 沛, 孙明光, 等	2535—2544
21	压实度对宽级配土水力特性的影响研究	刘 丽, 吴 羊, 李 旭, 等	2545—2555
22	高应力下柱状节理玄武岩应力-结构型塌方机制分析	张建聪, 江 权, 郝宪杰, 等	2556—2568
23	堆石体现场振动压实试验研究与应用	朱 晟, 卢知是, 刘 纯, 等	2569—2577
24	洞室块体危险性分析的突变级数评价法研究	杜 崧, 肖 明, 陈俊涛	2578—2588
25	基于结构面参数概率分布更新的节理岩质边坡可靠性分析	蒋水华, 欧阳苏, 冯泽文, 等	2589—2599
26	陡倾角断层下地下洞室地震破坏特性数值分析	陈世杰, 肖 明, 王小威, 等	2600—2610
27	原状黄土-古土壤中水分入渗过程研究	赵志强, 戴福初, 闵 弘, 等	2611—2622