



基于 MTS 815 岩石力学试验机的直接 剪切测试夹具设计

刘 洋¹, 艾 婷¹, 张朝鹏¹, 覃 黎², 张 茹²

(1. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 成都 610225; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 深部岩石力学是深地工程实践的理论基础, 深部环境下岩石剪切强度测试是探索深部岩石力学行为的核心手段之一。该文设计了一套针对圆柱试样的直接剪切实验的新型夹具, 该夹具配合 MTS 815 岩石力学测试系统使用可实现深部岩石力学研究中的高温高压剪切试验、高温条件下的剪切流变测试以及岩石各向异性特征的剪切测试, 亦可应用于普通的压力实验机来开展普通直接剪切实验。该新型夹具的设计和使用拓展了大型精密设备的使用功能, 使设备资源得到充分利用。在科研层面上满足了深地科学的研究需要; 在实验教层面丰富了实践教学项目, 顺应了当下高校实践教学改革的需, 提高了学生创新思维能力、培养了学生以实践需求为导向的解决问题的能力, 并进一步推动了创新性实验设计。

关 键 词: 高温; 直接剪切测试; 夹具; 设计

中图分类号: TH136

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20190142](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20190142)

Design of Direct Shear Test Fixture Based on the MTS 815 Rock Mechanics Test System

LIU Yang¹, AI Ting¹, ZHANG Zhaopeng¹, QIN Li², ZHANG Ru²

(1. MOE Key Laboratory of Underground Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610225, China;

2. College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Deep rock mechanics is the theoretical basis of deep engineering practice, and implementing shear strength tests of rocks under the deep environment is critical for investigating deep rock mechanic behaviors. A set of fixture is designed for direct shear tests applying to cylindrical specimens. Together with MTS 815 rock mechanics test system, the fixture can realize a series of shear tests under high temperatures and pressures, i.e. shear tests, shear creep tests and shear tests on the anisotropy of rocks. The fixture can also be used in normal press machines to conduct conventional direct shear tests. The design and application of the fixture extends the function of large and sophisticated instruments to fully utilize experimental resources, and serves as an effective tool to study deep rock mechanics. Meanwhile, applying the new fixture in experiment teaching enriches experiment projects, which is in line with practical educational reforms in university. It also nurtures the students' creative thinking and their ability to solve practical problems, which further facilitates the development of innovative experiment design.

Key words: high temperature; direct shear test; fixtures; design

随着国家不断加大教育经费投入, 高校仪器设备固定资产金额得以成倍增加^[1]。大量大型精密贵重仪器设备的购置使用, 为高校科学研究、基础教学等提供了良好硬件支撑。与此同时, 越来越多的大型精密贵重仪器也对设备使用和管理提出了更高要求。如何管好、用好这些设备成了设

备管理者和使用者必须面对的问题; 如何创新改进、开发新功能, 进一步挖掘这些大型精密贵重仪器设备的潜在价值^[2]更是一个挑战。然而, 许多大型精密贵重仪器设备市场化和成品化程度较高, 功能设计基本固化, 其原有出厂功能难以适应不断变化的研究需求和非常规测试与教学要

收稿日期: 2019-04-04; 修回日期: 2019-12-25

基金项目: 四川省青年科技创新研究团队资助项目(2017TD0007); 四川大学“实验技术研究项目”(SCU201104)。

作者简介: 刘洋(1982-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事岩石力学方面的研究。

通信作者: 艾婷(1987-), 女, 博士, 实验师, 主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: aiting@scu.edu.cn

求；其次，大型精密仪器设备大多价值不菲，如果仅限于开展常规研究测试，将会造成对大型精密贵重仪器设备资源的浪费；最后，如果同类型设备有功能更先进的新型号出现，有些单位会提出购置新型的同类仪器设备，而旧设备的维护、改造工作就更少得到关注，甚至被使用单位认定为闲置旧设备进行报废处理，这种做法将会给国家财产造成极大浪费。

以四川大学深地科学与工程教育部重点实验室的 MTS 815 岩石力学测试系统^[3]为例，该设备能实现传统的动静加载、单轴压缩、常规三轴、高温三轴等多种测试。特色功能是实现 THM(温度-渗流场-应力场)耦合实验以及实现不同渗透介质(液体/气体)的渗透测试。自 2015 年投入使用以来，该设备服务了大量科研项目、本科教学及本科创新实验项目，在高校人才培养、科学研究以及解决工程问题等方面做出了重要贡献，是实验室的核心设备之一。然而，原厂 MTS 815 岩石力学测试系统不具备开展岩石直接剪切实验的功能。虽然市场上有成品剪切试验机售卖，但是 MTS 815 岩石力学测试系统具有其他常规直剪仪不可替代的顶尖的伺服控制、传感器系统和可实现高温测试的能力。因此，如何充分利用 MTS 815 已具备的强大能力，进一步进行功能开发进而实现高温环境下的岩石剪切测试，对实现设备增值具有重要意义。目前，国内诸多学者已经在试验装置研制及功能开发方面进行了许多有益尝试^[4-5]，且装置改造的侧重点由于试验对象、条件和目的不同而产生差异。本文侧重于从试验夹具的改造着手，来实现 MTS 815 岩石力学测试系统高温剪切测试功能从而达到设备增值目的。目前这一块

的工作还较少人涉及。

1 设备改造背景

1.1 传统剪切测试方法及仪器介绍

一直以来，直接剪切试验被认为是测试岩石剪切强度最重要、最有效的方法^[6]。现有的直接剪切方法从测试原理角度主要分为单面直接剪切试验和双面直接剪切试验两大类。其中，单面直剪试验又可细分为有法向正应力的单面直剪试验^[7-8]和悬臂梁单面直剪试验^[9]，针对岩石、岩体节理和岩石混凝土胶结面剪切性质测试而言，前者是领域内最广为熟知和接受的试验方法；而在悬臂梁单面直剪试验中，由于没有侧向约束来平衡剪切方向压力导致的弯曲，试件表面将出现弯曲拉应力，而岩石抗拉强度远小于其剪切强度，因此，试件极易出现拉破坏。双面直接剪切试验主要分为四点剪切试验和对称双面直剪试验。四点剪切试验^[10]由于结构和载荷的对称性，难以开展压剪复合载荷作用下的岩石剪切强度测试，进而难以探索压应力对岩石剪切的影响规律这一重要课题。对称双面直剪试验^[11]由于产生双翼剪切带，对各向异性岩石^[12-14]而言效果不是很理想。

岩体结构面室内直剪试验仪是进行岩体结构面剪切行为测试的主要设备。直剪仪通常包括法向加载装置、水平加载装置、剪切盒、液压控制装置和数据采集处理装置等。目前国内外现有的剪切测试仪器技术参数如表 1 所示。由表 1 可知，目前国内外现有的剪切测试仪器大多针对立方体试样，鲜有针对圆柱试样。且表 1 中直剪仪只能用于常温剪切试验^[8]，无法实现高温测试。

表 1 直剪仪指标参数表^[15]

直剪仪所属机构	试样尺寸(长×宽)/mm ²	最大负荷/kN	剪切速率/(mm·s ⁻¹)
中国科学院武汉岩土力学研究所	150×150	法向：1000，水平：500	0.000 1~1
澳大利亚卧龙岗大学	250×75	法向：180，水平：120	0~20
德国弗莱贝格工业大学	400×200	法向：1000，水平：-700~1 300	0~70
加拿大多伦多大学	300×200	法向：250，水平：250	0.05~200
法国约瑟夫傅里叶大学	100×100	法向：100，水平：100	0.05~500

1.2 MTS 815 岩石力学测试系统简介

实验室购置的 MTS 815 岩石力学测试系统经过设备生产厂家多年的改进升级，测试精度较高，功能较为完善，通过更换不同的试验台、压

盘、夹具等，能实现多种力学测试。MTS 815 岩石力学测试系统包括总控系统、加载系统(轴压、渗透压力及围压)、高温控制系统、渗透系统、MTS 815 程控及采集系统。该系统指标为：最大

负荷为 4 600 kN; 轴向位移 ± 50 mm; 单轴纵、横向变形引伸计量程分别为 $-4.0 \sim 4.0$ mm、 $-2.5 \sim 2.5$ mm; 三轴纵、横向变形引伸计量程分别为 $-2.5 \sim 8.0$ mm; 最高温度为 200℃。总之,它具有常规直剪仪不可替代的顶尖的伺服控制、传感器系统和可实现高温测试的能力。

1.3 设备改造考虑的因素

深部资源开采和深地空间利用是实验室的两大特色方向,研究核心就是深部岩石力学。国内页岩气开采已突破 3 500 m 埋深^[6],地热开采达 4 387 m 埋深^[7]。随着工程实践深度不断增加,温度的影响必须考虑。一般而言,每往地下延伸 100 m 环境温度会增加 3℃。因此,实现不同温度环境下的岩石力学测试,是推动深部岩石力学理论发展的关键。如上所述,传统的剪切测试方法及仪器鲜有能开展高温流变/高温高压直接剪切测试,因此现有技术和设备已无法满足相关课题研究需要,必须探索适合深部岩石力学研究的岩石直接剪切测试技术。首先,实现深部岩石高温环境的模拟是要考虑的首要因素,而充分利用 MTS 815 岩石力学测试系统本身顶尖的伺服控制、传感器系统和可实现高温测试的能力即可使高温模拟的问题迎刃而解。MTS 815 岩石力学测试的加载系统和温度控制系统可以在实验过程中对试样施加不同温度,真实模拟深部岩石的赋存环境。

此外,在试样构形方面,现有剪切测试仪器大多针对立方体试样,鲜有针对圆柱试样。在实际工程钻勘取样过程中,随着埋深增加岩芯直径减小,因此取得的深部岩芯受其尺寸影响难以加工成标准的正方体试样,但可以考虑将其制成圆柱试样。并且,在开展岩石的各向异性研究时,现有的岩石剪切试验一般通过对不同软弱结构面角度的试样进行试验来达到实验目的,然而由于深部岩芯尺寸较小,制得不同软弱结构面角度的试样存在较大难度,因此,如何打破岩芯尺寸对岩石各向异性研究的限制、实现不同软弱结构面角度的剪切测试,是对剪切测试试验设备进行改造时考虑的另一个重要因素。

基于以上考虑,设计了一套针对圆柱试样直接剪切试验夹具,与 MTS 815 岩石力学测试系统配合使用时结合其优势可以实现高温环境下的剪切测试,同时通过调整内侧夹板的角度,可以实现岩石各向异性的研究。该夹具同时也可用于实

验室普通的压力试验机,从而实现开展普通直接剪切试验的需求。

2 新型直接剪切夹具设计

2.1 新型夹具设计要求

实现岩石直接剪切测试要求设备能够提供垂直于潜在剪切面的正压力以及顺剪切面方向的剪切推力,而 MTS 815 岩石力学实验系统仅提供一个方向的推力,因此,设计的夹具应当能够将设备的单方向推力分解为两个方向的推力。此外,要实现高温剪切测试,须将该夹具放置于 MTS 815 岩石力学实验系统三轴室内、并通过加热三轴室内的硅油来实现高温测试。此外,新型夹具与设备原有配件能够配合使用。设备原厂配备的标准试样压盘夹具主要有单轴圆柱压盘、渗透实验夹具以及单轴和三轴球形压盘等,如图 1 所示。

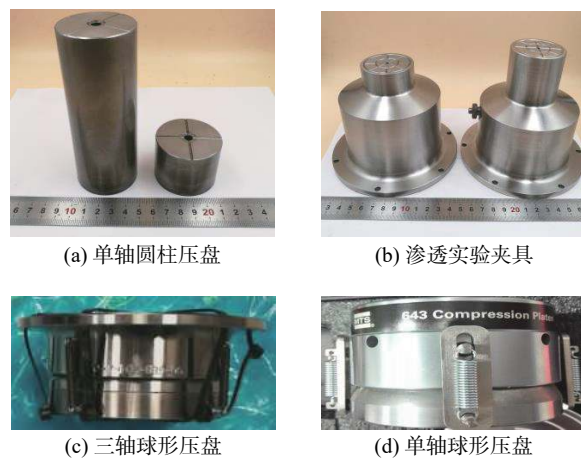


图1 MTS 815 岩石力学测试系统原厂夹具

因此,新型剪切试验夹具总体设计要求如下:

- 1) 夹具和设备作动器的原厂压盘采用相同的连接尺寸;
- 2) 夹具和设备作动器的原厂压盘采用“中心孔+对中销”的连接方式,以保证夹具对对中要求的适应性,并可使夹具平稳以防止其在试件破坏时歪斜倾倒;
- 3) 夹具可开展常温直接剪切试验,且易于使用热缩膜封装,以便实现高温高压/高温流变剪切试验;
- 4) 夹具可实现试样不同角度的加载;
- 5) 夹具在满足以上条件的情况下,尽可能做到结构简单,使用方便,节约成本。

2.2 新型夹具结构与特征

设计的新型剪切试验夹具结构如图 2 所示,

主要组成模块包括上、下外侧夹板，上、下内侧夹板，上、下垫块。

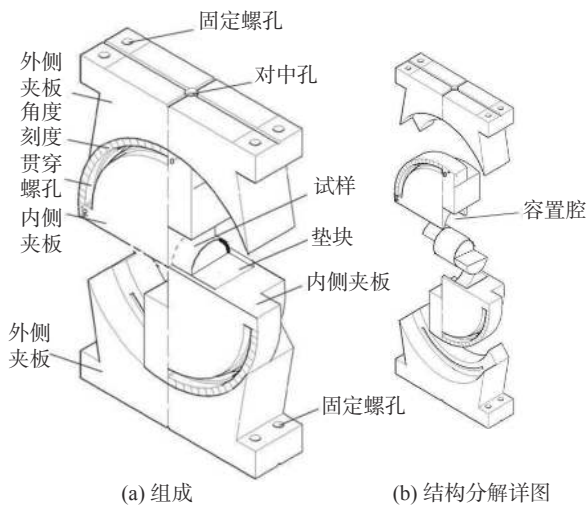


图 2 夹具结构图

为了适用于普通直接剪切、高温高压剪切以及高温流变剪切试验。该夹具具体特征如下。

1) 尺寸特征：夹具总高度 360 mm，外侧夹板固定面长 225 mm，宽 60 mm，固定螺孔直径 6 mm。适用的圆柱试样尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (高温高压剪切以及高温流变剪切试验) 和 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (普通直接剪切) 两种。

2) 针对高温高压剪切以及高温流变剪切试验，需将试样置于上、下垫块之间进行夹持，形成热缩膜整体包裹上垫块-试样-下垫块的“三明治”结构。两垫块外观均为半圆柱，直径与标准圆柱体试样直径保持一致为 50 mm，垫块厚度为 25 mm。实验时将上、下垫块和圆柱试样三者一起封装于耐高温高压的热缩膜内以隔绝硅油，并将其放入夹具容置腔固定。而针对普通直接剪切试验，只需将 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱试样直接安装于夹具容置腔内固定即可。

3) 上、下内侧夹板内边侧有一圆弧凹槽形成放置圆柱试样的容置腔，既能起到在实验中固定试样位置的作用使之不会移动，又能确保直剪过程试样均匀受力。利用圆弧凹槽可以把圆柱试样和垫块固定在内夹板之间。上、下内夹板采用错开设计以免在试样破坏时发生碰撞。

4) 内侧夹板的外边侧为弧形，外侧夹板的内边也为弧形且与内侧夹板外侧相贴合；内侧夹板的外边侧设置有台阶状凹槽，外侧夹板内边侧上

也相应设置有凸起，两者匹配呈咬合状。因此，内侧夹板能够在外侧夹板内侧旋转，实现内侧夹板与外侧夹板相对位置的改变。

5) 外侧夹板内边侧凸起的侧壁设置有贯穿螺孔，与螺孔相适配的螺栓穿过螺孔与内侧夹板外边侧凸起相接触，可根据测试需求实现外侧夹板与内侧夹板以一定角度相互固定。

6) 内侧夹板外边侧上绘制有刻度，范围为 $0 \sim 90^\circ$ ，外侧夹板内边侧中心有一基准线，可准确调节试样破坏面与施加应力的夹角在 $0 \sim 90^\circ$ 之间变化以开展不同正向压力下的岩石剪切测试。旋转角度的设计可以根据试验要求方便地调整试样的放置角度，从而系统地获得不同角度下的试验数据，便于后续剪切强度参数的计算。

7) 两外侧夹板设计可合并成中空的六棱柱，外围边侧在垂直方向的投影形成正六边形，六边形与水平线平行的两条边所在的平面分别作为与 MTS 815 岩石力学测试系统上下压头的接触面，正六边形有多条对称轴，稳定性良好。外侧夹板、内侧夹板和垫块分别以试样中心为中心呈中心对称分布。对称分布可使得试样受力均匀，避免应力集中。

可见，利用上述夹具，试样轴向力分量用于施加法向正应力，横截面方向的分量用于施加剪切推力，试样剪切破坏面为中部横截面。通过改变放置角度，可实现不同正压力岩石剪切破坏测试；通过热缩膜整体包裹上垫块-试样-下垫块的“三明治”结构，加热硅油，可实现不同温度下的剪切实验；对于剪切流变测试，只需要保持竖向载荷恒定即可。

3 新型直接剪切夹具试验方法

该夹具制作方便，成本低，结构稳定不易变形，易安装；测试方法简单易操作。按照设计思路加工出的实物如图 3 所示。借助 MTS 815 岩石力学测试系统，该夹具针对圆柱试样可实现以下 3 种类型的剪切实验：高温高压剪切试验；高温条件下的剪切流变测试；普通直接剪切实验。此外，还可实现各向异性岩石不同角度层理的剪切试验。

3.1 高温高压/高温流变剪切测试

利用上述夹具进行圆柱试样高温高压剪切测试，包括以下 4 个步骤。



图3 夹具实物

1) 准备阶段

在圆柱试样上下两个端面各放置一个半圆柱垫块,用热缩膜包裹垫块和试样,形成热缩膜内上垫块-试样-下垫块的“三明治”结构;将其整体放入容置腔内,用两块内侧夹板将包裹好后的垫块和试样夹紧,在内侧夹板外侧安装外侧夹板,二者以一定夹角拧紧螺丝螺母进行固定;将安装好的夹具及试样整体放入MTS 815岩石力学测试系统三轴室中,锁紧三轴室,设定温度及加载速率。

2) 实验阶段

实验所需温度通过三轴腔中硅油提供。实验中,记录试样与竖直方向的角度 θ 和温度 T ,然后不断增加轴压,直至试样破坏,记录此时的轴压值 F ;取下破坏后的试样。

3) 数据处理

将记录的数据依次代入以下公式进行数据处理。

$$\text{滑动力: } T = F \cos \theta \quad (1)$$

$$\text{压力: } N = F \sin \theta \quad (2)$$

$$\text{正应力: } \sigma = N/S \quad (3)$$

$$\text{剪应力: } \tau = T/S \quad (4)$$

式中, S 为试样横截面积。

4) 调节固定螺栓,改变内侧夹板与外侧夹板的相对位置,即改变试样与竖直方向的夹角 θ 后,再拧紧螺母对内侧夹板与外侧夹板的相对位置进行固定,改变温度 T ,重复步骤1)~步骤3),记录不同试样与竖直方向的夹角 θ 、温度 T 和的条件下的轴压值 F 及破坏面面积 S 。

5) 以正应力值为横坐标轴,剪应力值为纵坐标轴,绘制二者之间的关系图,线性拟合测试数据,即可获得强度参数为:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

式中, c 为粘聚力(其数值等于线性拟合所得的截距), φ 为内摩擦角(其数值等于拟合直线斜率的反正切值)。

对于剪切流变测试,只需在整个实验过程中保持竖向载荷恒定,其余试验步骤与高温高压剪切测试类似。

3.2 普通直接剪切测试

当不考虑岩石温度和赋存应力环境的影响时,上述高温高压/高温流变剪切测试可简化为普通直接剪切测试,主要包括以下3个步骤。

1) 准备阶段

将圆柱试样放入夹具容置腔,用两块内侧夹板将试样夹紧,在内侧夹板外侧安装外侧夹板,二者以一定夹角拧紧螺丝螺母进行固定;将安装好的夹具及试样整体放入MTS 815岩石力学测试系统中,选用单轴加载模式并设定加载速率。

2) 试验阶段

记录试样与竖直方向的角度 θ ;然后不断增加轴压,直至破坏试样,记录此时的轴压值 F ;取下破坏后的试样。

3) 数据处理

原理与步骤与高温高压/高温流变剪切测试一致,最终得到法向应力 σ 与破坏剪应力 τ 的关系图。

3.3 各向异性岩石不同角度层理的剪切试验

由于设计时新型夹具内侧夹板和外侧夹板的相对角度可调节,通过调整内侧夹板的角度,可以实现岩石各向异性的研究。因此,可进一步根据课题需要开展高温下横观各向同性岩石不同角度层理的剪切试验,为实验室研究温度、层理对岩石剪切强度的影响提供切实可行的解决方案。

4 实验教学实践受益

4.1 充分利用实践教学资源,提高教师教学改革能力

值得一提的是,在保留夹具原本的设计结构、改变其尺寸的条件下,该新型夹具也可应用于基础力学实验中心及土木类专业型实验室常见的单轴压力试验机,只需改变尺寸与试验机相适配,来开展普通直接剪切测试,使得其适用性更广。据悉,很多教学用单轴压力试验机在购置时功能以压为主,并未考虑剪切试验的功能,而岩石、混凝土等材料的剪切实验也是教学实验中的常见实验类型,因此,通过较小的成本不仅使得

MTS815 得到充分利用, 也可使本学院现有的其他教学设备得到充分利用, 其意义不言而喻。此外, 其他实验室老师可以根据试验机特点, 对夹具结构进行改进, 开发各类新型的实验教学项目, 有助于提高其实践教学改革能力。

4.2 丰富本科实践教学环节, 提高学生创新思维能力

该夹具设计、改造和制造过程中, 开展相关研究的学生自愿参与进来, 结合自己的研究内容和测试需求, 在新型夹具的结构和设计细节方面提出了许多有价值的想法和意见。通过新型夹具设计这类改造, 使参与学生对设备的组成、工作原理以及性能参数有了进一步了解; 在培养学生创新思维、动手能力和试验技能的同时, 提高了学生针对实际问题, 克服难点、提出解决方案、解决问题的能力^[18]。此外, 这种深度参与的设备改造, 极大地激发了学生自主学习探索求新的欲望、发现问题的热情, 提高了学生的试验兴趣。

基于该新型夹具, 可开展高温高压剪切测试、高温流变剪切测试、普通直接剪切测试等实验项目, 可服务于本学院的多门实验课程, 如岩石力学、复杂环境岩石力学测试与应用, 大大丰富了本科实践教学环节, 每年受益学生人数达数百人。面向本科生增加高温高压剪切测试和高温流变剪切测试项目有助于学生了解科研前沿动态、拓宽科研视野。

5 结束语

结合实验室研究方向和实验测试需求, 设计了一套新型岩石剪切测试夹具, 不仅可以应用于 MTS 815 岩石力学测试系统, 实现深部岩石力学研究中的高温高压剪切试验、高温条件下的剪切流变测试、不同温度环境下和各向异性特征的岩石剪切破坏试验, 还可以应用于普通压力试验机开展普通直接剪切实验。不仅满足了开展深地科学相关研究的迫切需要, 还使得实践教学深度受益。

参考文献

- [1] 国家统计局. 全国科研经费投入统计公报[EB/OL]. (2016-11-11)[2017-08-08]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201611/t20161111_1427139.html.
- [2] 刘嘉滨, 沈学浩, 王晓玲. 真空镀膜机控制系统的温控改造[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(12): 49-53.
- [3] 徐慧宁, 刘建锋, 任浩楠, 等. 大理岩裂隙岩体流变特性试验研究[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(2): 18-24.
- [4] 程远贵, 余徽, 蒋寺蓉. 传热实验装置的研制和教学实践[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(5): 1-5.
- [5] 耿铁锁, 谭岩斌, 张哲, 等. 一种简易拉索疲劳试验装置的试制与应用[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(5): 116-119.
- [6] LIU Y X, XU J, YIN G Z, et al. Development of a new direct shear testing device for investigating rock failure[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(3): 647-651.
- [7] 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(S2): 1-9.
- [8] 刘伟, 曾亚武, 夏磊, 等. 正反向直剪下层状岩体强度和破坏特征模型试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 52(7): 600-609.
- [9] YIN A, YANG X, ZENG G, et al. Experimental and numerical investigation of fracture behavior of asphalt mixture under direct shear loading[J]. Construction and Building Materials, 2015, 86: 21-32.
- [10] WANG W, KOU S, XING F. Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 187-193.
- [11] 许江, 刘义鑫, 刘婧, 等. 双面剪切荷载作用下岩石断裂过程声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2659-2664.
- [12] 陈勉, 葛洪魁, 赵金洲, 等. 页岩油气高效开发的关键基础理论与挑战[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 7-14.
- [13] ILDIKO B, NIKOLETTA R B, AKOS T. The angle between the sample surface and the shear plane; Its influence on the direct shear strength of jointed granitic rocks and opalinus claystone[J]. Procedia Engineering, 2017, 191: 1008-1014.
- [14] WANG P T, REN F H, MIAO S J, et al. Evaluation of the anisotropy and directionality of a jointed rock mass under numerical direct shear tests[J]. Engineering Geology, 2017, 225: 29-41.
- [15] 郑博文, 祁生文. 岩体结构面动态剪切试验研究现状评述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1971-1980.
- [16] JIANG F J, PANG X Q, ONYANG X C, et al. The main progress and problems of shale gas study and the potential prediction of shale gas exploration[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19: 198-211.
- [17] 中国矿业报. 琼北干热岩参数井圆满完钻意义非凡[DB/OL]. [2018-05-08]. http://www.zgkyb.com/youqing/20180508_49823.htm.
- [18] 李伟光, 栗桂娇, 王鸿海, 等. 小型不锈钢水蒸气蒸馏装置的研制及应用[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(6): 247-249.

编辑 钟晓