

岩石剪切裂缝扩展全场实时监测试验平台开发

张朝鹏¹, 刘洋^{1,*}

(1.四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 岩石裂缝扩展的试验研究是目前探索岩石破断过程的重要手段, 而剪切裂缝扩展是岩石破断过程中基本扩展模式之一, 对于探索工程岩体安全稳定及油气开采具有重要意义。针对传统剪切裂缝扩展试验监测手段过于单一, 捕获信息有限, 无法有效满足岩石剪切破断规律试验研究的现状, 论文对仪器设备升级改造, 系统搭建了一套岩石剪切裂缝扩展实时监测试验平台, 不仅实现对岩石剪切断裂内外演化过程的全场监测, 同时还提高了单个试样的利用效率, 降低了试验操作难度, 有效缩短试验准备时间, 该成果广泛应用于教学与科研实践中, 取得显著成效。

关键词: 岩石剪切裂缝扩展; 设备升级改造; 多监测手段融合; 全场监测; 广泛应用

中图分类号: TU45 **文献标识码:**

Development of a real-time monitoring experimental platform for rock shear crack propagation in the full field

ZHANG Zhaopeng¹, LIU Yang^{1,*}

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Experimental research on rock crack propagation is currently an important means of exploring the process of rock fracture, and shear crack propagation is one of the basic propagation modes in the rock fracture process, which is of great significance for exploring the safety and stability of engineering rock masses and oil and gas extraction. In response to the current situation that traditional monitoring methods for shear crack propagation experiments are too single and capture limited information, which cannot effectively meet the research of rock shear fracture laws. This paper upgraded and renovated the equipment, and established a real-time monitoring test platform for rock shear crack propagation. The development of test platform not only achieves full field monitoring of the internal and external evolution process of rock shear fracture, but also improves the utilization efficiency of individual samples. Moreover, it has reduced the difficulty

of experimental operations and effectively shortened the preparation time for experiments. This achievement has been widely applied in teaching and scientific research practice, achieving significant results.

Keywords: rock shear crack propagation; upgrading and renovation of equipment; integration of multiple monitoring methods; full field monitoring; wide application

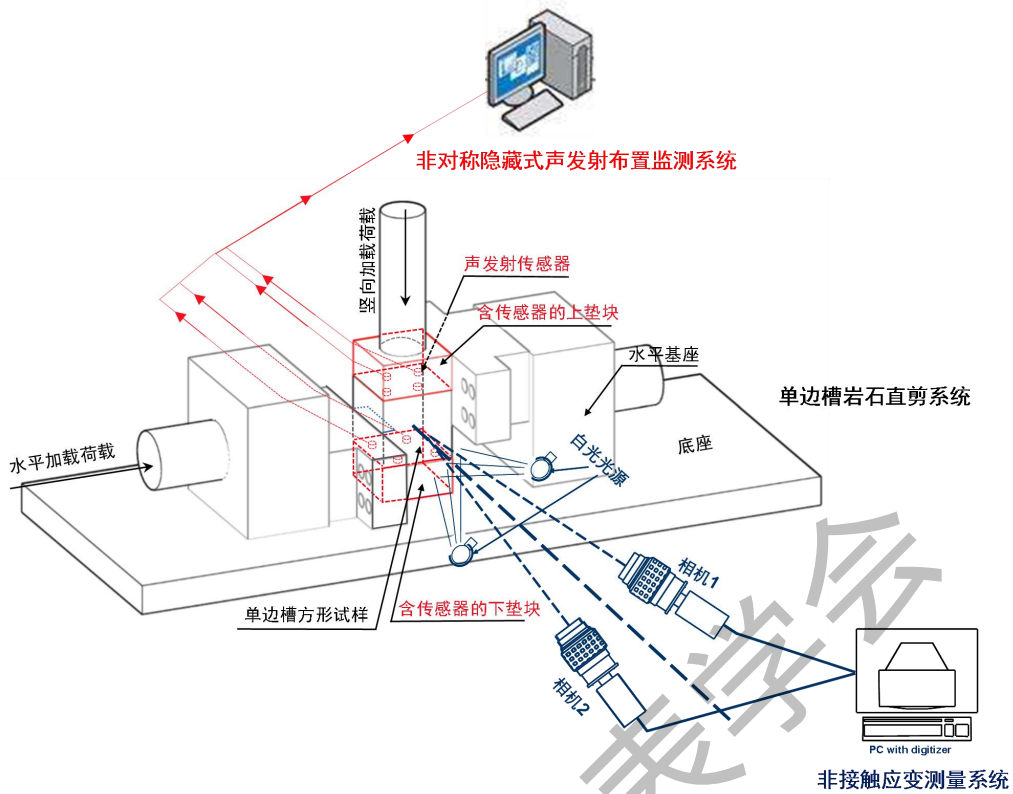
1 目的和意义

岩石裂缝起裂和扩展过程是岩石断裂力学的重要研究内容,其中剪切裂缝扩展是岩石破坏过程中基本扩展模式之一^[1],与工程岩体的安全稳定、非常规油气开发和采矿等众多岩土工程领域紧密相关。从试验中实时追踪监测岩石剪切裂缝的扩展过程是岩石断裂力学试验技术发展和应用的关键一环,也是开展岩石断裂力学理论和应用探索的重要途径。此外,诸多岩土工程现场采样十分困难,岩芯数量往往十分有限,单次试验尽可能多地获取裂缝扩展信息显得尤为重要。

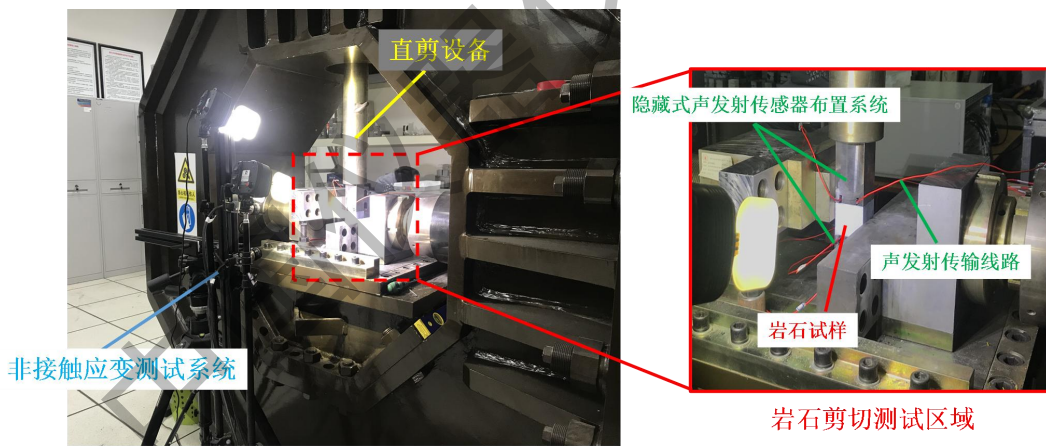
关于岩石剪切破坏的测试,现有的方法如反对称四点弯试验、紧凑拉剪试验、边裂纹试验、中心巴西盘试验和三点弯半圆盘试验等^[2-6],其中部分试验往往偏重于岩石剪切断裂韧度 K_{IIc} 的测定;另一部分试验的剪切裂缝扩展监测方式或手段则过于单一,捕获的裂纹扩展信息往往有限,无法有效满足岩石剪切破坏规律的试验研究,试验布置难度较高且结果易受其影响,尚缺乏一套高效系统的岩石剪切裂缝扩展实时监测试验平台。针对此,本文基于实验室现有的相关设备升级改造,系统搭建一套岩石剪切裂缝扩展实时监测试验平台,不仅实现对岩石剪切断裂内外演化过程的全场监测,同时还降低试验操作难度,有效缩短试验准备时间,具有较高的实用性和实践意义。

2 试验平台的搭建

针对岩石剪切裂缝扩展全场实时监测的目标,本文利用实验室现有的相关设备,如 TEST60 岩石直剪仪、PAC-II 声发射监测仪和 VIC3D 非接触应变测量仪,对其进行针对性的升级改造并整合,最终系统地搭建一套高效的岩石剪切裂缝扩展全场实时监测试验平台。试验平台由高精度岩石直剪系统、隐藏式声发射布置监测系统和 DIC 非接触应变测量系统构成(图 1(a)为试验平台设计图,图 1(b)为已搭建的试验平台)。岩石剪切裂缝扩展全场实时监测试验平台的搭建过程如下:



(a) 设计图



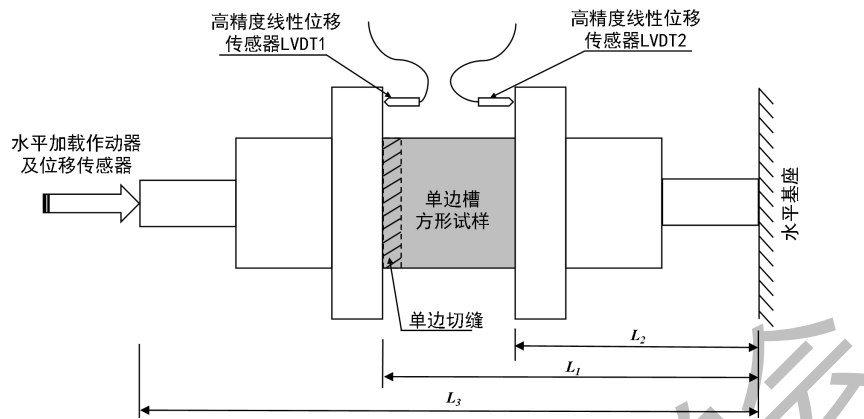
(b) 实物图

图1 岩石剪切裂缝扩展全场实时监测试验平台

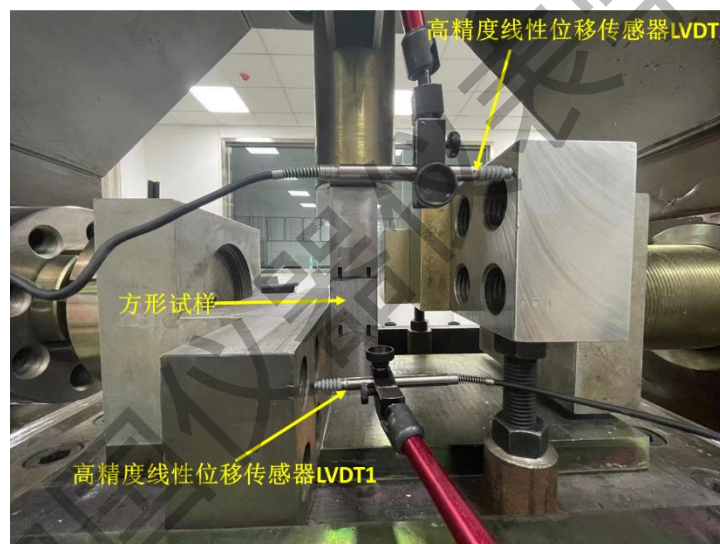
2.1 高精度岩石直剪系统（由 TEST60 岩石直剪仪的改进而来）

直剪仪自身的水平位移传感器实际上测量的是 L3 区间的变形（见图 2(a)），包含了试样剪切变形和刚性加载杆件的变形，无法精准测量岩石剪切变形，因此根据“真实值=测量值-误差值”的原理，提出一项剪切变形精准测量技术，在直剪仪指定部位布置一套双通道的水平位移测量部件（如图 2(b)所示），以高精度位移传感器 LVDT1 与 LVDT2 的测量差值作

为岩石剪切变形数据,即 LVDT1 测得的 L_1 区间变形与 LVDT2 测得的 L_2 区间变形的差值,实现了剪切裂缝滑移位移的精准测量。经过这些针对性的改进,从而形成高精度岩石直剪系统(如图 2 所示)。



(a)提升剪切变形测量精度设计图



(b)高精度测量剪切变形实物图

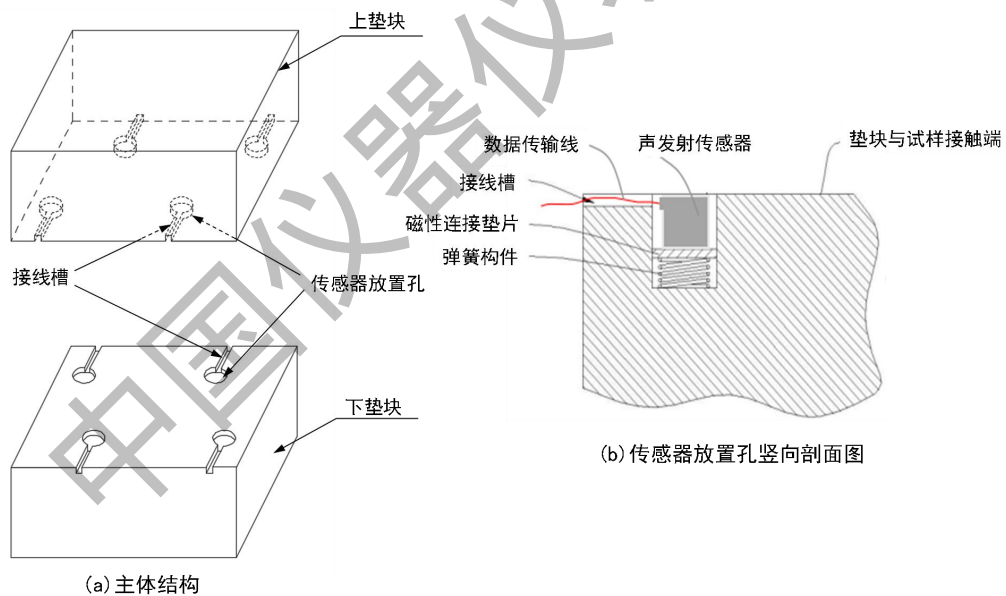
图 2 高精度岩石直剪系统

2.2 隐藏式声发射布置监测系统（基于 PAC-II 声发射监测仪改进研发而来）

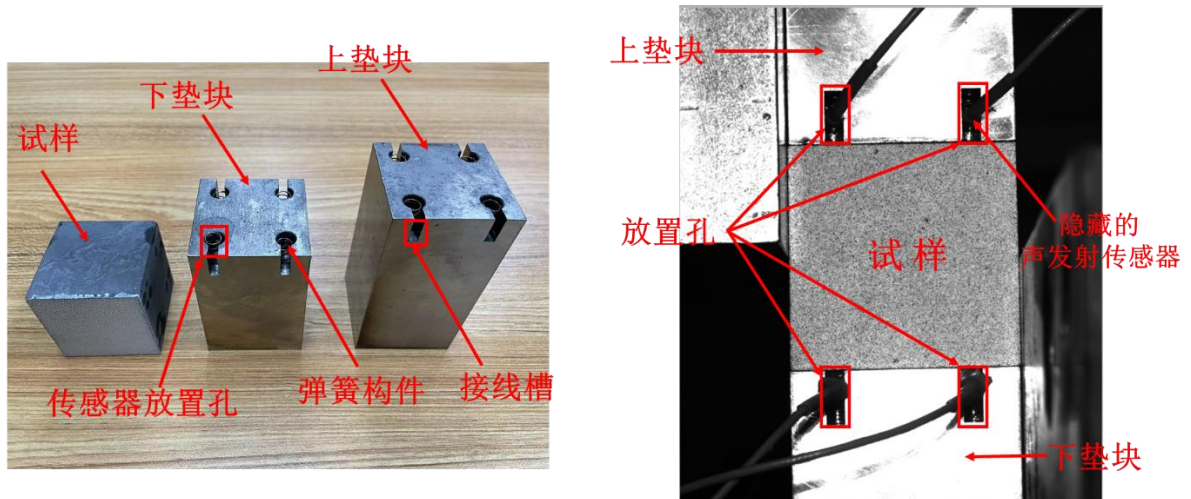
声发射监测仪一般包括若干数量的声发射传感器（本项目为 8 个）、相应数量的前置放大器（放大增益 40 dB）以及数据实时采集和显示系统，主要是通过贴合在试样表面的声发射传感器接收监测材料微弱的声发射信号,经放大器放大信号并传输给声发射采集卡进行实时采集和处理显示。因此,声发射传感器的安装布置对声发射信号的实时采集有极大的影响^[7]。对于声发射传感器的布置安装,目前均通过外部夹持装置将声发射传感器固定在试样表

面，这样声发射传感器及其夹持装置就会在视野可见的试样表面，挤占了部分测试空间，导致无法同时开展非接触应变测量，无法满足岩石剪切裂缝扩展全场实时监测的需求。

因此，亟需基于 PAC-II 声发射监测仪设计研发一套满足试验要求的声发射传感器布置系统，作为隐藏式声发射布置监测系统的关键组成部分。最终设计完成的声发射传感器布置系统^[8]如图 3 所示，主体结构是位于试样上下端传递法向荷载的一对高刚度长方体金属垫块，每个垫块的试样接触端均设有 4 个圆柱形声发射传感器放置孔，所述 8 个传感器放置孔内均设有与孔底固定相连的弹簧构件和磁性连接垫片，磁性连接垫片用于快速吸附住声发射传感器，确保传感器在安装布置过程中不易脱落，方便操作安装，弹簧构件则可确保声发射传感器与被测试样表面紧密接触，贴合稳定性高。每个传感器放置孔旁均设有一个连通外部的接线槽，用于安置传感器端的数据传输线，确保传感器监测信号安全输出至前置放大器。该声发射传感器布置系统将简化安装过程，提高传感器的贴合稳定性和监测效率，更为重要的是，将隐藏声发射传感器及其他部件，在狭小的试样布置测试区腾出宝贵的空间，为后续岩石剪切裂缝表面扩展的监测提供条件。



(a)隐藏式声发射传感器布置设计图



(b)隐藏式声发射传感器布置实物图

图3 隐藏式声发射传感器布置系统

在上述试验条件下，可将实验室现有的 VIC3D 非接触应变测量系统直接引入到该实验平台中，需在试样观测表面制作散斑，用白光光源补光，两个相机实时捕捉散斑点像素的运动，并将实时采集的数据信息传输至系统，该系统采用 3D 数字图像相关性运算法则，可为岩石剪切破断试验提供全观测面三维的裂缝扩展数据测量。

3 试验平台的测试

3.1 测试过程

基于搭建的这套岩石剪切裂缝扩展全场实时监测试验平台，同时结合力学系本科生研究方向，在本科生课程《复杂环境岩石力学测试与应用》《工程断裂力学》的试验应用教学过程中，充分利用了这套试验平台开展试验教学工作，保障了试验教学和实验研究的顺利开展，也提高了学生的试验理解能力和试验执行效率。利用这套试验平台开展了砂岩剪切变形全场实时监测的测试（如图 4 所示），测试过程如下：

1) 试验准备过程中，方形砂岩试样（采自四川省内江威远，材料均匀，各向同性）观测面提前制好散斑，然后平整地置于带有声发射传感器的上下垫块之间，且声发射传感器与试样接触面涂抹适量凡士林以保证贴合效果，整体放置于测试平台正中央，中间剪切面与水平加载端的压头端面对齐，手动控制仪器使试样在水平和竖直方向都有一定初始荷载，将从垫块展布出的声发射传输线与前置放大器相连，采集系统中设置好参数，保证声发射信号传输的通畅，做好声发射监测的准备。同时在试样观测面前方一定距离内布置好光源并架设调

试好相机，设置好采集软件参数，做好非接触应变测量的准备。试验准备好后，该试验平台各系统同时开始运行工作。

2) 高精度岩石直剪加载系统根据试验要求分别增加法向荷载至某一恒定值（5、15、25MPa）保持稳定，然后以机器水平位移控制方式（0.1 mm/min）进行水平剪切加载，直至试样剪切裂缝完全贯穿破坏，整个过程中系统实时采集和显示剪切荷载及裂缝错动位移的变化。

3) 隐藏式声发射布置监测系统实时采集并显示岩石剪切破断过程中裂缝扩展的声发射信号，包括声发射主要的时间序列参数（如声发射事件数、振铃计数、能量计数，幅值）和声发射三维空间的定位，实现岩石内部剪切裂缝扩展的实时监测。

4) 非接触应变测量系统则实时采集记录试样观测表面全场的应变位移等图像及数据，直观地展示岩石剪切裂缝表面扩展的过程。



图4 利用该试验平台开展测试过程

3.2 数据处理分析

对获得的测试数据进行处理分析，分别获得砂岩在三个法向应力（5、15、25 MPa）下剪应力-剪切变形曲线、砂岩抗剪强度参数（粘聚力 c 和内摩擦角 φ ）、砂岩剪切过程中声发射参数时空分布和砂岩剪切全过程全场变形。

1) 力学参数的处理分析

砂岩在法向应力（5、15、25 MPa）下剪应力-剪切变形曲线如图 5 所示。由图可知，随着法向应力的增加，砂岩剪切强度和剪切变形逐渐增大，砂岩抗剪强度分别为 14.8 MPa、30.6 MPa 和 42.0 MPa，砂岩剪切破坏变形分别为 0.78 mm、0.92 mm 和 1.05 mm。

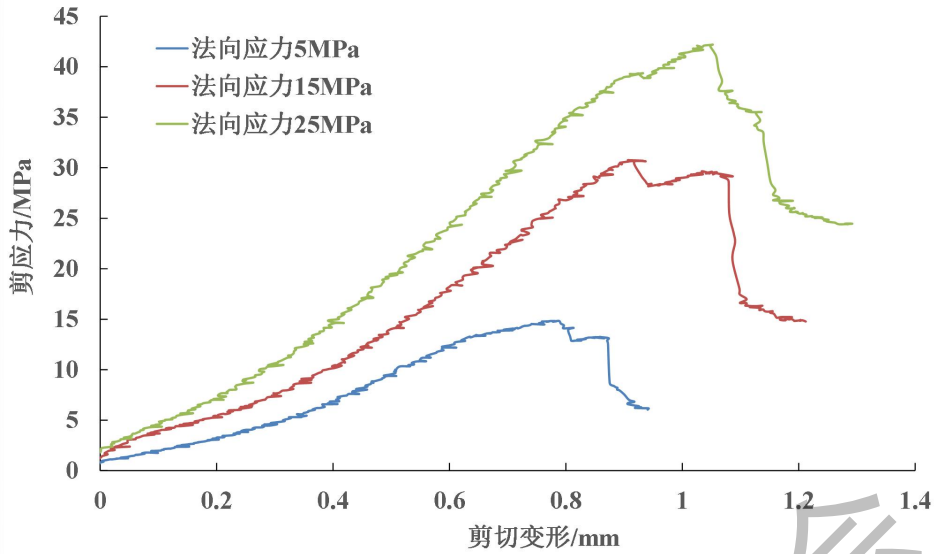


图5 砂岩在法向应力（5、15、25MPa）下剪应力-剪切变形曲线

基于 MC 强度准则和抗剪强度参数计算规范，获得砂岩抗剪强度随法向应力变化图，并将此抗剪强度曲线简化为直线（如图 6 所示），简化后可用公式（1）表示：

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

式中： τ 为岩石在相应法向应力下的抗剪强度（MPa）； c 为岩石粘聚力（MPa）； φ 为岩石内摩擦角（°）。因此基于公式（1）算得的砂岩粘聚力 c 为 8.73MPa，砂岩内摩擦角 φ 为 53.7°。

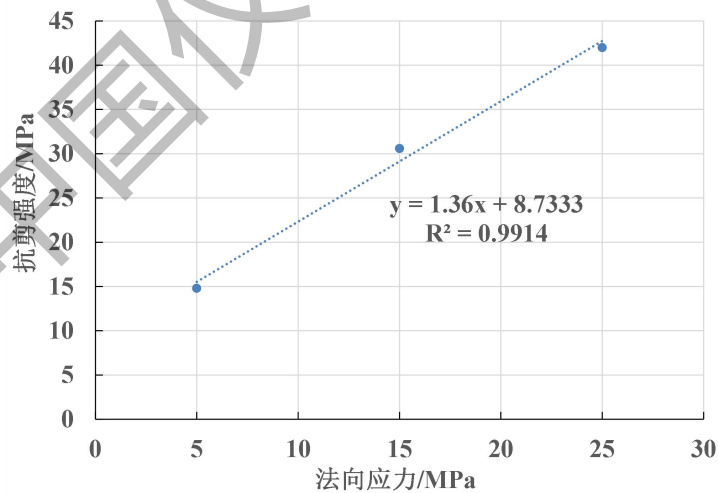


图6 砂岩抗剪强度曲线及其线性拟合

2) 声发射参数的处理分析

基于砂岩剪切过程中的声发射数据，可获得砂岩剪切受力过程中声发射空间演化，如图 7 所示。随着剪应力的不断施加，砂岩内部声发射首先在试样中部水平剪切面附近逐渐产生，

最终在剪切面附近大量聚集，表明砂岩剪切面在剪切荷载作用下发生大量微破裂、裂纹的产生和扩展，最终形成中部水平的剪切破坏面，与实际剪切试验现象相吻合，表明砂岩剪切过程中的声发射监测是有效的，且直观展示了砂岩剪切受力过程中裂纹面的产生、扩展和贯通全过程。

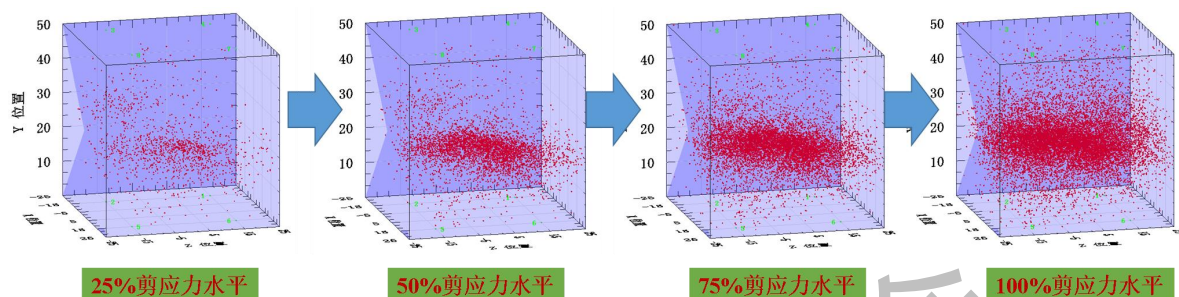


图7 砂岩剪切受力过程中声发射空间演化

3)全场变形的处理分析

基于非接触应变测试系统测试图像数据，对砂岩剪切受力过程中全场变形开展分析，获得主要变形方向上变形演化，即砂岩水平应变全场分布演化图（见图8）和剪应变全场分布演化图（见图9）。可直观且定量的了解砂岩直剪过程中整个观测面的变形分布及其随剪切荷载的演化过程，受力初期在砂岩中部区域出现水平和剪切应变场，随后量值较大的水平和剪切应变场逐渐向中部聚集，且逐渐形成一条水平和剪切变形带，最终剪切破裂带逐渐由两端向中部扩展，最后破裂带在砂岩中间偏右部分贯通，剪切承载力丧失，试样剪切破坏。非接触应变全场测量结果与实际观测及声发射结果相吻合，表明砂岩剪切受力过程中非接触应变全场测量是有效的，且与传统的岩石剪切荷载变形监测及声发射测量共同形成一套完善的岩石剪切变形破坏的多维度测量监测手段。

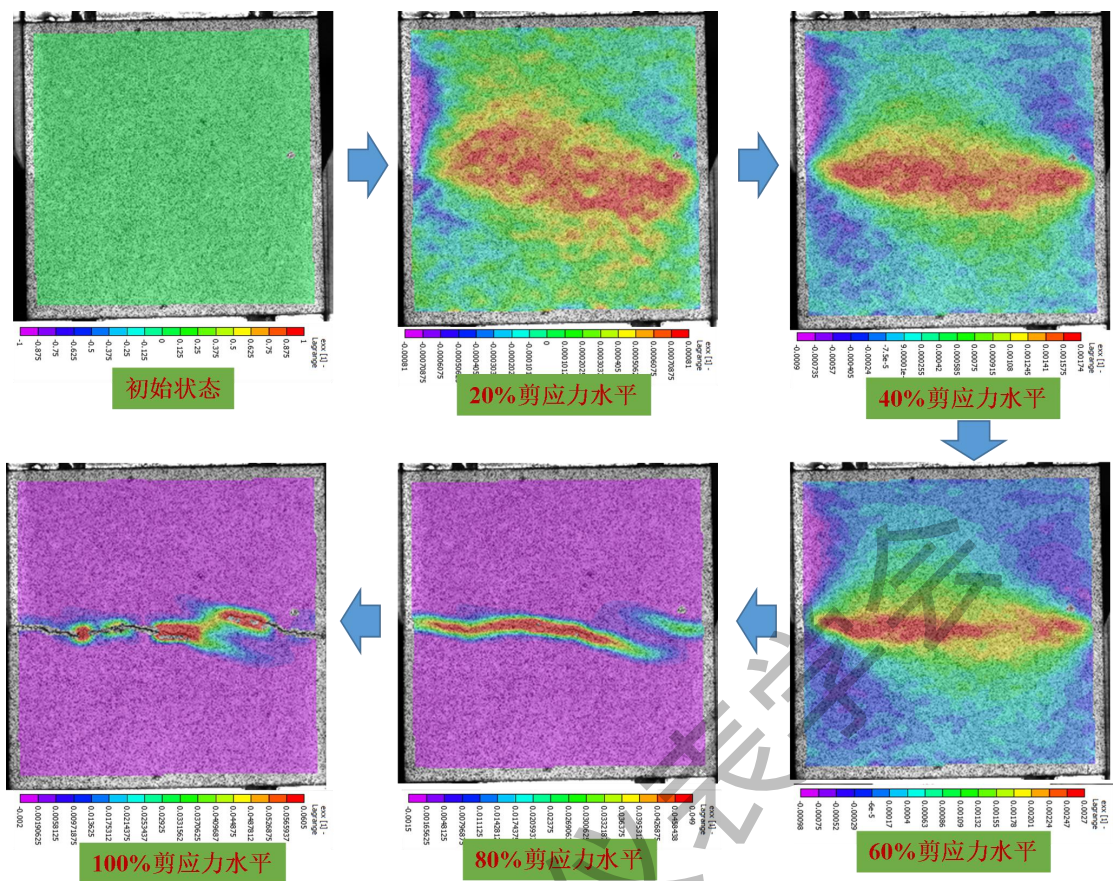


图8 砂岩剪切受力过程中水平应变全场分布演化

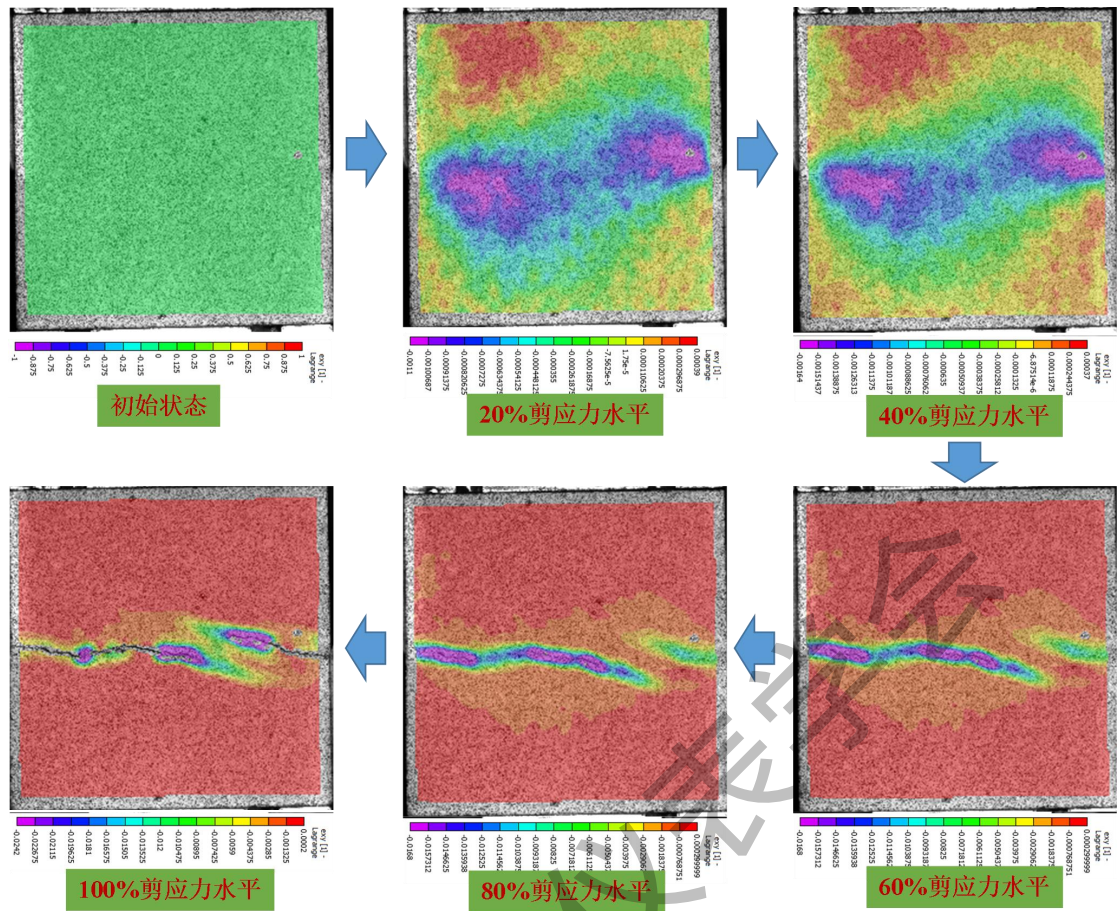


图9 砂岩剪切受力过程中剪切应变全场分布演化

综上所述，通过对该试验平台的使用及其测试数据的处理分析，证实了这套岩石剪切裂缝扩展全场实时监测试验平台是有效的，且兼容了多种监测手段，解决了各类监测手段相互干扰的问题，满足了“单次测试尽可能多的获取测试信息”这一要求，是一套高效的测试平台，具有较高的实用价值和实践意义。

4 特色与创新点

该设备的升级改造基于实验室现有的相关设备，克服了设备间难以同时兼容的难题，系统搭建了一套高效的岩石剪切裂缝扩展全场实时监测试验平台，相比现有测试设备具有如下特点和优势：

1) 改进后的高精度岩石直剪系统，确保岩石加载过程中产生严格意义上的剪切裂缝扩展，并提出一项剪切变形精准测量技术，实现岩石剪切裂缝滑移位移的精准测量；

2) 通过设计的声发射传感器布置系统，实现声发射传感器隐藏式布置，简化安装过程，有效缩短试验准备时间，提高传感器的贴合稳定性和监测效率，并且为狭小的试样布置测试区腾出宝贵的空间，为同时开展的其他监测手段提供条件；

3) 该试验平台融合了多种测试手段, 实现岩石剪切裂缝扩展的全场实时监测, 单次测试能获得更丰富的岩石裂缝扩展信息, 另外也更节省试样;

4) 还可用于岩石、混凝土及结构面的剪切变形破坏的全场实时监测试验。

5 显著成效

对实验室现有相关设备进行有机整合, 形成一套高效系统的岩石剪切裂缝扩展实时监测试验平台, 为本科生和研究生试验教学的顺利开展提供了硬件基础, 还可作为一项单独的实验研究, 为本科生的创新试验及研究生科研提供平台。该设备的升级改造(设备总价值约为450万元)目前已被多个单位使用, 提供了显著的教学和科研价值。

1) 四川大学使用情况: 升级改造后的设备运用于本科生课程《工程断裂力学》《复杂环境岩石力学测试与应用》及博士生课程《损伤力学》的岩石力学试验项目。其中, 利用这套试验平台, 2020-2022年已完成《工程断裂力学》配套试验课程人数约60人, 试验名称为岩石非对称三点弯曲测试, 主要面向工程力学专业的本科生, 学生现场试验情况与实验报告如图10所示。利用这套试验平台, 2021-2022年完成了《复杂环境岩石力学测试与应用》试验课程人数约40人, 主要面向工程力学专业的本科生, 学生现场试验情况如图11所示。利用这套试验平台, 累计完成了5-6项科研试验任务, 运行机时超过1200小时。因此, 自完成这套试验平台以来, 在教学和科研中被高效率使用, 项目成效显著。

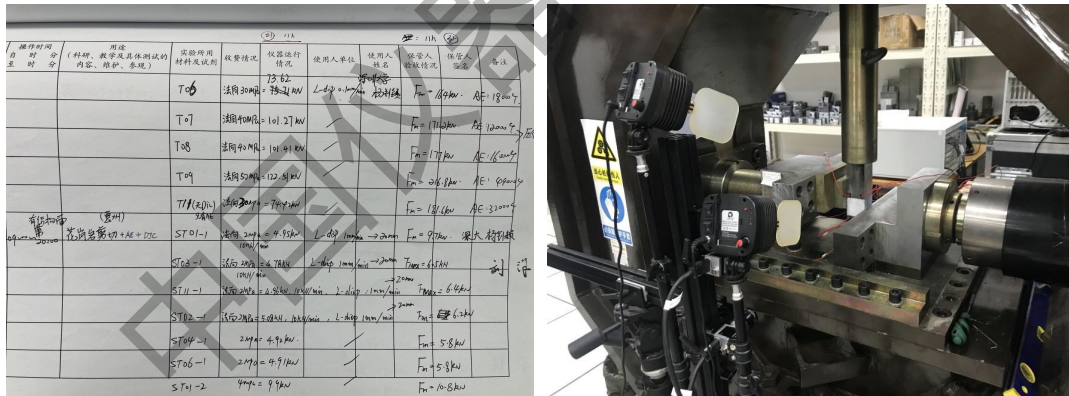


图10 《工程断裂力学》配套试验课程上学生测试情况及实验报告



图 11 《复杂环境岩石力学测试与应用》配套试验课程上学生测试情况

2) 深圳大学深地科学与绿色能源研究院使用情况：本设备改造开发同时积极对外开放使用，深圳大学深地科学与绿色能源研究院基于项目研究需求，派遣研究生团队（研究生杨钊颖等）使用该升级改造后的设备，现场使用情况如图 12 所示。



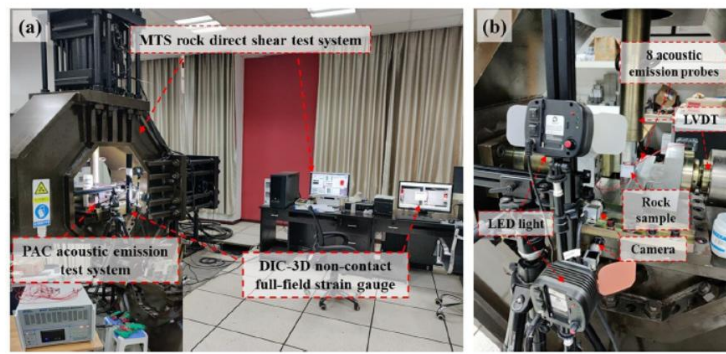
(a) 使用记录（部分）

(b) 设备运行情况

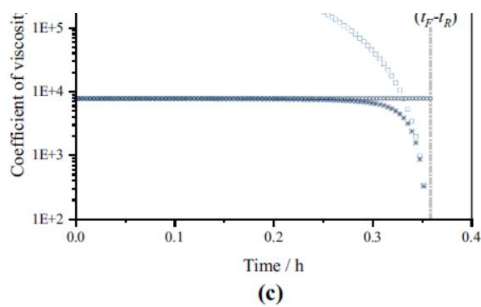
图 12 设备的使用情况

3) 重庆大学使用情况：重庆大学基于研究需要，派遣研究生叶春烽等使用改造后的该设备开展科学实验，满足了其科学研究需求，并发表了相关论文“Ye C, Xie H, Wu F, et al. Study on the nonlinear time-dependent deformation characteristics and viscoelastic-plastic model of shale under direct shear loading path[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2023, 82: 189”，且在论文中提及该升级改造的设备并致谢，如图 13 所示。

Fig. 2 a Direct shearing apparatus and related auxiliary devices; b real-time DIC apparatus



Springer



model considering the time-scale effect and cohesion loss is proposed. It can simultaneously describe the initial creep, steady-state creep, and accelerated creep under the direct shear. The evolution of the creep model parameters reveal the internal mechanism that the hardening effect and the damage effect coexist and compete with each other in the shear creep process of shale.

Acknowledgements The authors would like to thank Dr. Yang Liu and Dr. Zhaopeng Zhang from the Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering (Ministry of Education) at Sichuan University for their useful discussions and experiment assistance in this work.

图 13 设备使用成效

参考文献

- [1] 陆超,何佳文,董伟. 四点剪切条件下岩石-混凝土界面裂缝扩展过程研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 83-89.
- [2] 李家驹. 反对称四点弯曲剪切实验方法的研究[J]. 力学与实践, 1986(05): 36-40.
- [3] 李守定,李晓,郭静芸,等. 岩石拉伸剪切破裂试验研究[J]. 工程地质学, 2014(4): 655-666.
- [4] 张财贵,周妍,杨井瑞,等. 用边裂纹平台圆环试样测试岩石的I型动态断裂韧度[J]. 水利学报, 2014,45(06): 691-700.
- [5] 邹洋. 岩石动静组合加载巴西盘劈裂试验研究[D]. 湖南:中南大学, 2011: 61-65.
- [6] 王都,张华礼,彭钧亮,等. 基于三点弯曲半圆盘法测定页岩断裂韧性的标准化[J]. 天然气工业, 2022, 42(S01): 77-81.
- [7] 杨景. 岩样声发射传感器优化布置及表征裂隙发育的多参量信息耦合规律研究[D]. 中国矿业大学, 2019: 6-13.

- [8] 张朝鹏,吴世勇,李小鹏,等. 声发射探头定位系统、该系统用的试块及该系统的应用:
CN201910533629.5[P]. 2019-06-19.

中国仪器仪表学会