

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.03.038

岩石动态扰动伺服三轴试验系统的研制与应用

陈 旭¹, 张俊文²

(1. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 黑龙江科技大学 矿业工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘 要: 详细地介绍了自行研制的岩石动态扰动伺服三轴试验系统, 该试验系统具有在常规三轴试验的同时进行动态扰动的功能。试验系统主要由轴向加载系统、围压加载系统、动态扰动加载系统和数据采集系统构成, 试验系统能达到的最大轴向荷载为 2 000 kN, 最大围压为 70 MPa, 所能施加的最大扰动荷载为 300 kN, 扰动荷载的最高频率可达到 70 Hz。运用所研制的试验系统, 对大理岩进行了一组单轴压缩过程中的动态扰动试验。试验结果表明: 当扰动荷载频率相同时, 振幅越大, 扰动至岩样破坏时经历的时间越短; 反之, 振幅越小, 扰动至破坏时经历的时间越长。从破坏模式来看, 扰动力作用下大理岩破坏较为散碎, 扰动荷载振幅越小, 散碎程度越高。试验机系统稳定、可靠性较高, 该试验系统值得在进行深部岩石力学性质研究中推广应用。

关 键 词: 动态扰动; 伺服控制; 岩石三轴试验系统; Hoek 压力室

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)03-0918-07

Development of a servo-controlled rock triaxial test system with dynamic disturbance and its application

CHEN Xu¹, ZHANG Jun-wen²

(1. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

2. School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China)

Abstract: A self-developed servo-controlled rock triaxial test system with dynamic disturbance is introduced in detail. The test system can apply dynamic disturbance in the process of conventional triaxial compression. The test system consists of four parts: axial loading subsystem, confining pressure subsystem, dynamic disturbance loading subsystem and data collection subsystem. The maximum axial load and confining pressure of the test system can be 2 000 kN and 70 MPa, and the maximum dynamic disturbance load of the system can be 300 kN and the highest frequency of the dynamic disturbance load is 70 Hz. A set of experiments about dynamic disturbance in uniaxial compression is performed on marble with the developed test system. The experimental results indicate that: when the amplitudes of the dynamic disturbance are in the same frequency, the larger the amplitude of disturbance is, the shorter time is the disturbance to the rock failure, vice versa. It can be seen from the failure modes after experiments that the marble samples are fragmentized under the dynamic disturbance load. The lower the amplitude of the dynamic disturbance load is, the higher degree of fragmentation is. The servo-controlled rock triaxial test system is stable and reliable, thus it is worth generalizing the use of the testing system in other laboratories to explore mechanical properties of deep rocks.

Keywords: dynamic disturbance; servo control; rock triaxial test system; Hoek pressure chamber

1 引 言

在当前水电、交通工程快速发展, 以及浅部资源逐渐枯竭的时代背景下, 深部地下空间的利用、

深部矿产资源的开采逐渐进入常态。然而, 岩体深开挖力学环境具有与“常规加载”迥异的特征: 深部岩体所处的并非单调加载条件, 而是经历了临空面形成伴随的原岩高应力加、卸载, 以及循环多次

收稿日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51679093, No.51374112); 福建省高校新世纪优秀人才支持计划项目; 中国博士后科学基金资助项目 (No.2014M551290); 黑龙江省博士后科学基金资助项目 (No.LBH-Z13208)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51679093, 51374112), the Program for New Century Excellent Talents in Fujian Province University, China Postdoctoral Science Foundation (2014M551290) and the Postdoctoral Science Foundation of Heilongjiang Province (LBH-Z13208).

第一作者简介: 陈旭, 男, 1988 年生, 博士生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: goodmanxc@sina.com

通讯作者: 张俊文, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。E-mail: zhangjunwen1977@163.com

的外界动力作用（放炮或机械凿岩震动，覆岩断裂冒落、岩爆、微震等）两者同步、混合的扰动过程^[1-4]。到目前为止，由于人们缺乏深部岩石工程经验，对上述扰动过程中深部岩体力学响应的研究与认识，难以有效预测和控制深部岩石工程可能出现的各种病害、事故甚至灾难^[5]，因此，研制相应的岩体动态扰动三轴试验系统，开展高围压及动力扰动条件下岩石的力学响应研究，进一步明确深部岩石的力学特性是十分必要的。

近几年学者们相继对动力扰动岩体的强度与变形性质^[6-7]、疲劳性能^[8-9]、破坏机制^[10]、滞后效应^[11]、阻尼和动力特性^[12]、辐射耗散能^[13]等开展了深入探索。除此之外，李夕兵等^[14]发现，深采时微动力扰动能使矿柱发生破坏而导致“多米诺骨牌”现象，指出当致密岩石处于较高静态应力水平时，微扰动就足以引起损伤，并通过试验提出波阻抗定义损伤变量的方法。左宇军等^[15]借助 INSTRON 材料试验机进行二维动、静组合加载试验，研究深部巷道围岩在不同静压和不同频率、幅值动力扰动时的损伤破坏特征，建立了动、静耦合非线性损伤模型。周子龙等^[16]通过高应力岩石扰动诱变试验和声发射监测，发现低静载时，动力扰动仅触发扰动近区局部剪切破坏，而高静载时，会在全域内触发大量拉伸裂纹。宫凤强等^[17]指出，当预静载为常规断裂载荷值的 90% 时，循环加、卸载会增加岩石断裂难度，高频扰动却利于岩石的断裂破坏。

前人在岩石动力扰动方面的研究均存在一个共同的问题：孤立地研究原岩高应力下岩石的力学性能或是只受扰动影响下岩石的损伤规律和机制，不顾及两者协同作用的影响，这无疑是不科学的。为此，针对深部岩石在高应力环境下受外界动力扰动的问题，笔者研制了 TFD-2000/D 型岩石动态扰动伺服三轴试验系统，可实现动力扰动（最高频率达 70 Hz）与围压的独立、同步控制。本文主要对所研制的动态扰动三轴试验系统的构成及主要性能进行说明，并通过一组大理岩单轴动态扰动试验验证了该系统的稳定性和可靠性。

2 动态扰动三轴试验系统的构成

TFD-2000/D 型动态扰动电液伺服岩石三轴试验系统是在原有的常规三轴试验系统基础上改造而成的，如图 1(a)所示，方框内的部分即为改造后添加在试验机导轨上的动态扰动三轴试验系统。改造后的整个试验机导轨上拥有两套独立的小车，这两

套小车共用底油缸和加载框架。通过移动小车，可实现两套试验系统的互换。在进行扰动三轴试验时，将用于常规三轴的围压筒卸下，将常规三轴小车推出，然后将动态扰动三轴试验系统的小车推入，紧固扰动试验用加载框架的螺栓。如果进行常规三轴试验，只需将动态扰动系统的加载框架螺栓卸下，然后将整套扰动装置置于带有金属框架的小车上并推出该小车，推入常规三轴试验小车并安装上围压筒的螺栓。图 1(b)给出了动态扰动三轴系统的主体结构示意图。

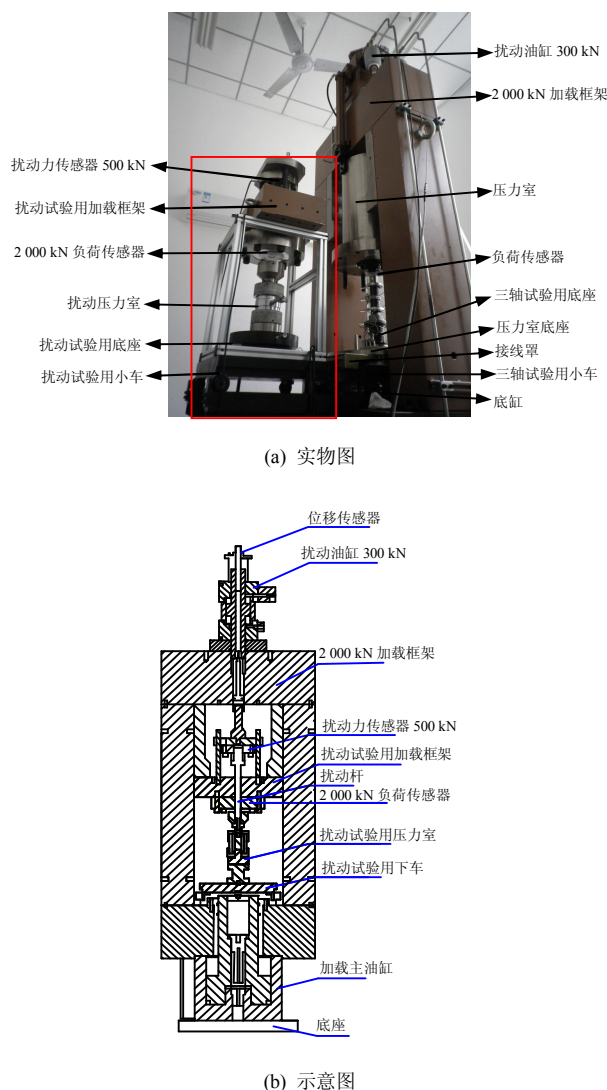


图1 TFD-2000/D 型动态扰动电液伺服岩石三轴试验系统
Fig.1 Picture and sketch of developed TFD-2000/D rock triaxial test system with dynamic disturbance

改造的动态扰动三轴试验系统主要由 4 个主要子系统构成：轴压加载系统、围压加载系统、动态扰动加载系统、数据采集系统。

2.1 轴压加载系统

轴压加载系统主要的功能是保证试验过程中能

够稳定地施加轴向荷载。该子系统与成熟的常规三轴试验系统中的轴向加载系统并无明显区别。轴向荷载由伺服油源向底部油缸提供一定的力或位移进行加载,施加的荷载大小依靠安装在试验机上压头处的负荷传感器反馈至计算机。试验系统允许加载到的最大轴向力为 2 000 kN。

2.2 围压加载系统

该动态扰动三轴试验系统中采用了腔体较小、构造简单、维护方便的 Hoek 三轴压力室^[18-19],能够较快速地实现围压加、卸载。图 2 给出了 Hoek 三轴压力室内部结构示意图,可以看出,动态扰动 Hoek 三轴压力室与文献[18-19]有所不同,它在上压头的中部增添设置了一根扰动杆,用于扰动力的加载,这一部件也是动态扰动三轴压力室研制与改造的关键部件之一。

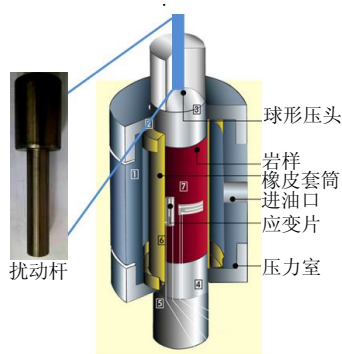


图 2 Hoek 三轴压力室

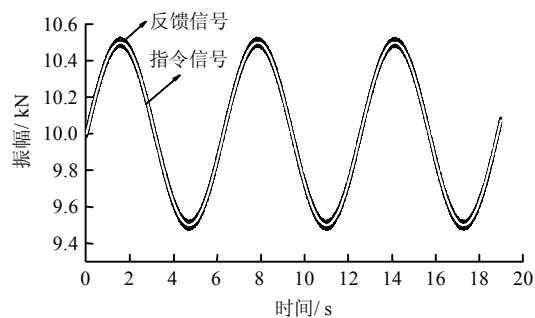
Fig.2 Hoek triaxial cell

围压加载系统用以保证试验中稳定地施加围压,它主要包括围压气驱泵、伺服油缸、充液油缸等部分。围压施加时,先用围压气驱泵将围压加载到略小于所设定的目标围压,再采用计算机控制伺服油缸将围压加载至目标值并保持相对恒定。围压加载系统可施加到的最大围压为 70 MPa,控制精度为 ± 0.01 MPa。

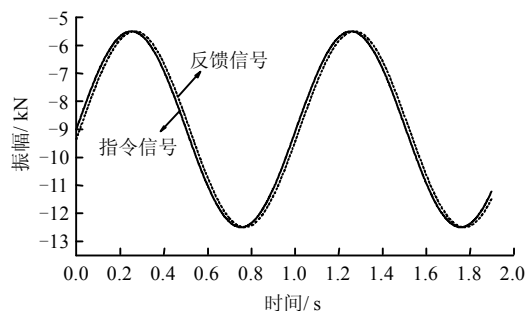
2.3 动态扰动加载系统

动态扰动加载系统用以施加轴向的点扰动荷载,扰动荷载主要依靠安装在试验机顶部的扰动油缸来施加,扰动荷载通过扰动杆(如图 2 所示)作用于岩石上端面,扰动油缸所能施加的最大荷载为 300 kN,扰动荷载的最高频率可达到 70 Hz。扰动荷载的波形有多种形式:余弦波、三角波、方波等,所施加扰动力的振幅分为位移和荷载两种,图 3 示出了几种可施加的扰动曲线。作用在岩样上的扰动力通过扰动力传感器反馈至电子计算机。扰动荷载

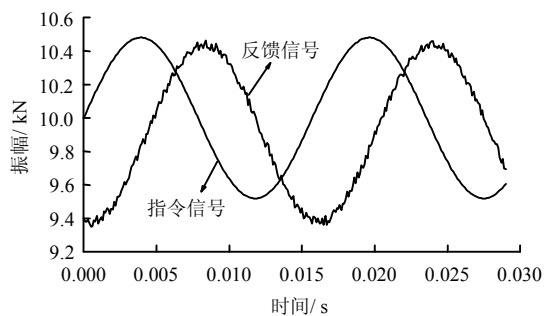
的控制采用德国 Doli 公司生产的 EDC580 型全数字桌面式伺服控制器(如图 4 所示),该控制器测控精度处于世界领先水平,它可以进行荷载、变形、位移等多个通道的测量与控制,并且具有自我保护程序以防止试验中的传感器损坏。动态扰动系统的设置、扰动力的控制与测量是本次三轴试验系统改造的关键性技术,已有文献尚无类似带有动态扰动功能的岩石三轴试验仪的记载。



(a) 频率 0.1 Hz 振幅 0.5 kN 的荷载扰动余弦曲线



(b) 频率 1 Hz 振幅 3.5 kN 的位移扰动余弦曲线



(c) 频率 70 Hz 振幅 0.5 kN 的荷载扰动余弦曲线

图 3 几种可施加的扰动曲线

Fig.3 Several kinds of dynamic disturbance curves

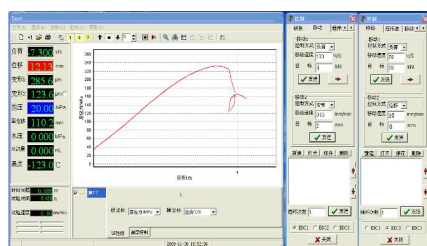


图 4 EDC580 型全数字伺服控制器

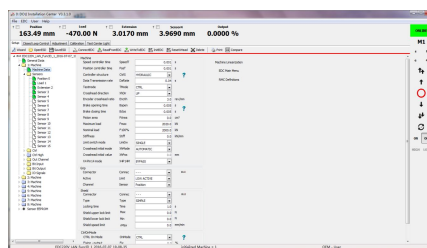
Fig.4 EDC580 all-digital servo controller

2.4 数据采集记录系统

动态扰动三轴试验仪的数据采集记录系统主要由贴于岩样表面的应变片、负荷传感器、电子计算机、数据采集软件及数据传输导线等构成。由应变片及负荷传感器采集到的变形、荷载、位移等数据通过数据传输导线传输至电子计算机,并被安装在计算机上的 TEST 软件和 Doli 软件记录。TEST 软件和 Doli 软件界面如图 5 所示,软件具有菜单式试验参数设置、故障自诊断、自动清零、自我软保护等功能。



(a) TEST 软件



(b) Doli 软件

图5 数据采集记录软件

Fig.5 Data collection and recording software

3 试验应用

3.1 岩样及试验步骤

为了验证所研制的三轴试验系统的稳定性和可靠性,笔者进行了一组动态扰动试验,岩样如图 6 所示,岩石试样为大理岩,取自福建省南安市水头镇某采石场,经过钻心、切割、打磨等步骤后岩样被加工为标准尺寸(直径为 50 mm、高度为 100 mm,



图6 制备完成的大理岩试样

Fig.6 Marble samples achieved in laboratory

上下端面不平整度小于 0.05 mm) 的圆柱体,挑出表面无明显裂纹、色泽均匀、表观密度、波速、孔隙度等接近于平均值的试样进行动态扰动试验。经测定该岩样的单轴抗压强度约为 49.3 MPa。

动态扰动三轴试验前,首先进行试样安装。在岩样表面贴上用于测量轴向变形和周向变形的应变片,并将岩样放入橡皮套筒内,然后将橡皮套筒置于压力室内,装入压头并拧紧上下密封盖。最后将安装好的 Hoek 三轴压力室放置于试验台扰动小车底座上,使底座上的插销与下压头小孔对正,将扰动杆插入上压头的孔中,推入小车,连接数据线及油管,即完成试样安装。试样安装完成后的 Hoek 三轴压力室如图 7 所示。

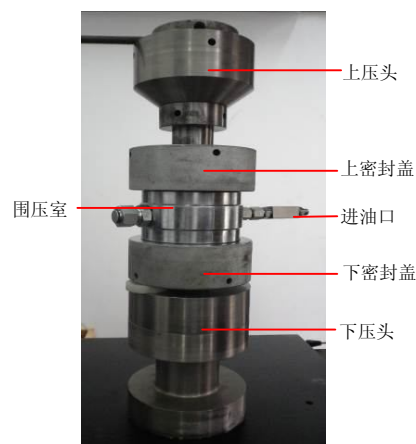


图7 试样安装

Fig.7 Rock sample assembly

试验时,首先将压力室内充满油,然后用 TEST 软件控制加载围压至设定值,接着开始加载轴向荷载并记录数据,加载到目标轴向荷载时,用 Doli 软件控制加载扰动荷载。根据试验的需求,在一定的轴向应力和径向应力水平上,可以施加一定幅度和频率的扰动荷载将试样加载至破坏,研究加载过程中动态扰动作用对岩石力学性质的影响。也可以在施加扰动荷载时逐渐卸除轴向荷载或者围压,观察动态扰动与卸荷协同作用时岩石的力学性质。当然,在进行动态扰动时也可以在不同时间段施加不同频率和振幅的扰动荷载,研究岩石在多种扰动作用后的力学性能。

3.2 试验结果(部分数据)

本次试验主要考虑扰动荷载的振幅对大理岩力学性能的影响,首先将岩样单轴压缩至 50 kN (约为 25 MPa, 约为单轴抗压强度的 50%), 然后施加

相同频率 (5 Hz), 但振幅不同的扰动荷载直至岩样破坏。也就是主要考虑在 5 Hz 的频率下, 不同振幅的扰动力对大理岩试样单轴压缩力学性能的影响。

图 8 给出了扰动力频率为 5 Hz, 振幅分别为 1.2、5.5、12 kN 的荷载-时间曲线。从中可以看出, 当扰动荷载频率相同时, 振幅越大, 扰动至岩样破坏时经历的时间越短; 反之, 振幅越小, 扰动至破坏时经历的时间越长。也就是说, 在岩石处于相同应力状态时, 岩石受循环多次的外界动态扰动作用而破坏过程中, 当扰动频率相同时, 所经历的扰动

次数随着振幅的增大而减小。可以断定, 岩样在动态扰动直至破坏的过程是一个累积损伤的过程, 扰动过程中的变形主要是由轴向荷载的施加引起的变形, 随着扰动时间增加的蠕变变形以及动态扰动造成的累积损伤引起的变形。可以看出, 在这个过程中应力并没有达到破坏时的应力, 故动态扰动过程采用传统的由应力状态决定的破坏准则也不再适用, 动态扰动下的新的破坏准则的建立也将是该试验机研制成功后的的重要研究课题之一。

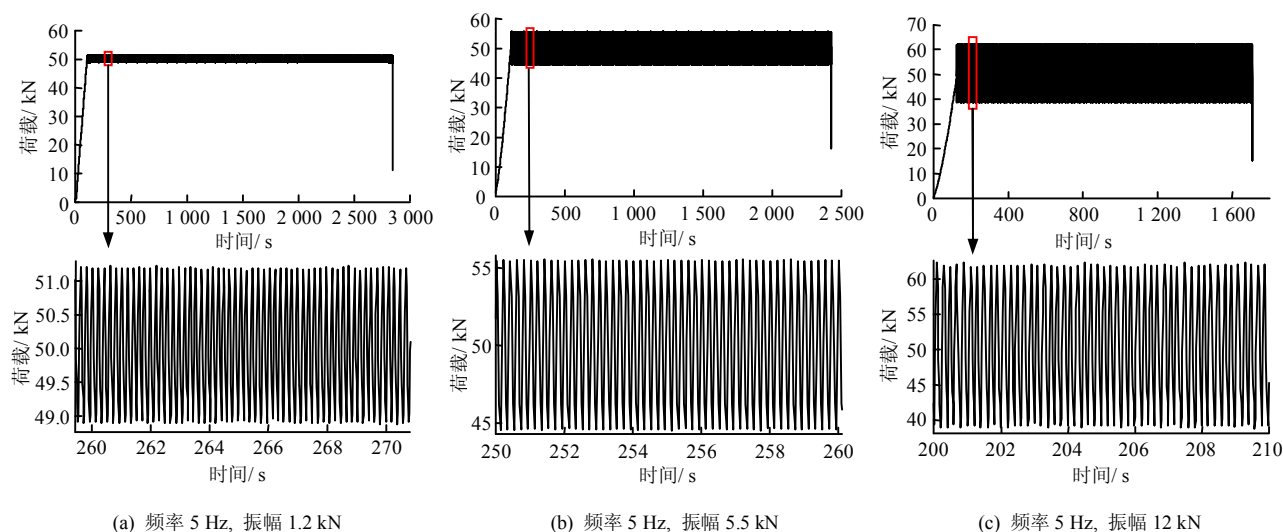


图 8 相同频率不同振幅扰动力下的荷载-时间曲线

Fig.8 Load-time curves under the condition of disturbance load with a same frequency but different amplitudes

图 9 展示了大理岩试样在单轴压缩 (不进行扰动) 以及在 5 Hz 频率、3 种振幅的扰动荷载下的破坏模式照片。从照片中可以看出, 在单轴压缩 (不扰动下) 岩样呈现常见的劈裂破坏模式, 而在有扰动力作用下大理岩破坏较为散碎, 扰动荷载振幅越小, 散碎程度越高。

此外, 值得注意的是动态扰动过程与传统的疲劳损伤过程有较大区别:

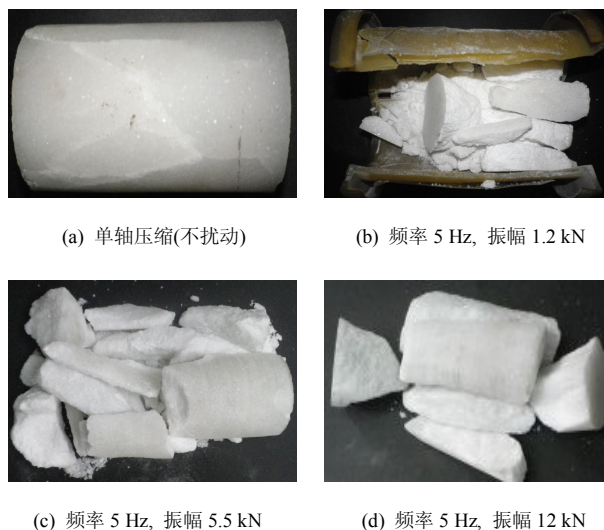
(1) 传统的岩石的疲劳损伤研究通常建立在循环加、卸载试验之上, 循环加、卸载试验是应力-应变曲线上的循环, 与该试验机所进行的应力-时间上的扰动力循环不同;

(2) 循环加、卸载是轴向荷载直接进行施加和卸荷, 而该试验机是轴向荷载保持一定水平, 利用扰动杆对岩样进行轴向的扰动;

(3) 疲劳试验时, 通常轴向荷载的循环加、卸载频率较低, 而该动态扰动试验机可以施加较高频率的扰动荷载。

总之, 从上述的试验结果来看, 试验机系统稳

定、可靠性较高, 该试验系统值得在进行深部岩石力学性质研究推广应用。另外, 该试验机可辅以声发射等设备来观察研究动态扰动荷载作用下的声发射特性以及累积损伤的演化过程, 这将是未来该试验机的运用方向之一。



(a) 单轴压缩(不扰动)

(b) 频率 5 Hz, 振幅 1.2 kN

(c) 频率 5 Hz, 振幅 5.5 kN

(d) 频率 5 Hz, 振幅 12 kN

图9 试样破坏模式

Fig.9 Failure modes of rock samples

4 结 论

(1) 介绍了一种自行研发的 TFD-2000/D 型岩石动态扰动伺服三轴试验系统。该系统能够在传统的常规三轴试验过程中同步施加不同频率的动态扰动轴向荷载, 且具有荷载伺服控制、数据自动采集等特点, 可用于深部岩石在高压应力加、卸载与循环多次的外界动力荷载协同作用时的力学性质研究。

(2) 新系统设备的关键技术改进是在常规三轴压力室基础上增设了一套 Hoek 三轴压力室、扰动油缸、扰动轮辐传感器, 并在 Hoek 三轴压力室的压头内部设置了一根扰动杆, 从而实现常规三轴压力与轴向动态扰动力的同步加载。

(3) 采用岩石动态扰动伺服三轴试验系统进行了一组大理岩单轴压缩状态下的同步动态扰动力学试验。试验过程中设备的稳定性、可靠性及可操作性均较好。

(4) 大理岩动态扰动试验结果表明: 当扰动荷载频率相同时, 扰动荷载振幅越大, 扰动至大理岩岩样破坏时经历的时间越短; 反之, 扰动荷载振幅越小, 扰动至大理岩岩样破坏时经历的时间越长。破坏模式显示, 扰动力作用下大理岩破坏较为散碎, 且扰动荷载振幅越小, 散碎程度越高。

参 考 文 献

- [1] 赵振国, 严鹏, 卢文波, 等. 地应力瞬态卸载诱发振动的能量分布特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 32—39.
ZHAO Zhen-guo, YAN Peng, LU Wen-bo, et al. Energy distribution of vibration induced by transient unloading of in-situ stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(1): 32—39.
- [2] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275—283.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, ZENG Xiong-hui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 275—283.
- [3] 马念杰, 赵希栋, 赵志强, 等. 深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2287—2295.
MA Nian-jie, ZHAO Xi-dong, ZHAO Zhi-qiang, et al. Stability analysis and control technology of mine roadway roof in deep mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(10): 2287—2295.
- [4] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 1—6.
QIAN Qi-hu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 1—6.
- [5] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91—99.
ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, ZUO Jian-ping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. **Advances in Mechanics**, 2005, 35(1): 91—99.
- [6] MA L J, LIU X Y, WANG M Y, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 62: 34—41.
- [7] FUENKAJORN K, PHUEAKPHUM D. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt[J]. **Engineering Geology**, 2010, 112: 43—52.
- [8] XIAO J Q, DING D X, JIANG F L, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47: 461—468.
- [9] ERARSLAN N, WILLIAMS D J. The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 56: 15—26.
- [10] 朱珍德, 孙林柱, 王明洋. 不同频率循环荷载作用下岩石阻尼比试验与变形破坏机制细观分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 8—12.
ZHU Zhen-de, SUN Lin-zhu, WANG Ming-yang. Damping ratio experiment and mesomechanical analysis of deformation failure mechanism on rock under different frequency cyclic loadings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 8—12.
- [11] 邓华锋, 胡亚运, 李建林, 等. 考虑滞后效应的岩石加载卸载响应比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2915—2921.
DENG Hua-feng, HU Ya-yun, LI Jian-lin, et al. Experimental research on load/unload response ratio considering hysteresis effect of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.1): 2915—2921.
- [12] 刘建锋, 徐进, 李青松, 等. 循环荷载作用下岩石阻尼参数测试的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1036—1041.
LIU Jian-feng, XU Jin, LI Qing-song, et al. Experimental research on damping parameters of rock under cyclic

- loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 1036—1041.
- [13] SONG D Z, WANG E Y, LIU J. Relationship between EMR and dissipated energy of coal rock mass during cyclic loading process[J]. **Safety Science**, 2012, 50: 751—760.
- [14] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 922—929.
LI Xi-bing, LI Di-yuan, GUO Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 922—929.
- [15] 左宇军, 李夕兵, 唐春安, 等. 二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1809—1809.
ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, TANG Chun'an, et al. Experimental investigation on failure of rock subjected to 2D dynamic-static coupling loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1809—1809.
- [16] 周子龙, 李国楠, 宁树理, 等. 侧向扰动下高应力岩石的声发射特性与破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1720—1728.
ZHOU Zi-long, LI Guo-nan, NING Shu-li, et al. Acoustic emission characteristics and failure mechanism of high-stressed rocks under lateral disturbance[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(8): 1720—1728.
- [17] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 动力扰动下预静载硬岩断裂的增韧和减韧效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1905—1915.
GONG Feng-qiang, LU Dao-hui, LI Xi-bing, et al. Toughness increasing or decreasing effect of hard rock fracture with pre-static loading under dynamic disturbance[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1905—1915.
- [18] HOEK E. Simple triaxial cell for field or laboratory testing of rock[J]. **Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy**, 1968, 77, A22-26.
- [19] FRANKLIN J A, HOECK E. Developments in triaxial testing technique[J]. **Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique Des Roches**, 1970, 2(4): 223—228.
- 上接第 917 页
- [11] 朱国甫, 李光煜. 确定桩侧摩阻力曲线的约束样条拟合方法[J]. 岩土力学, 1994, (3): 1—8.
ZHU Guo-fu, LI Guang-yu. Determination of pile friction curves by SP line fitting method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, (3): 1—8.
- [12] 岳建平, 席广永, 黎昵. 基于多小波的分布式光纤温度传感监测数据处理[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 675—678.
YUE Jian-ping, XI Guang-yong, LI Ni. Processing of monitoring data from distributed optical fiber temperature sensor based on multi-wavelet[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2008, 36(5): 675—678.
- [13] 朱友群, 朱鸿鹄, 孙义杰, 等. FBG-BOTDA 联合感测管桩击入土层模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 695—702.
ZHU You-qun, ZHU Hong-hu, SUN Yi-jie, et al. Model experiment study of pipe pile driving into soil using FBG-BOTDA sensing monitoring technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Sup.2): 695—702.
- [14] 王遇国, 梅志荣, 张季超. 单桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, (1): 7—11.
WANG Yu-guo, MEI Zhi-rong, ZHANG Ji-chao. Experimental researches on bearing characteristics of a single pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, (1): 7—11.
- [15] FRIEDEN B R. Least-squares curve fitting—Regression analysis[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1991: 327—349.
- [16] SMITH S W. The scientist and engineer's guide to digital signal processing[M]. [S. l.]: California Technical Publishing, 1997.
- [17] 中华人民共和国建设部. JGJ 106-2003 建筑基桩检测技术规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ 106-2003 Criterion of piles foundation testing technologies[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.
- [18] 张忠苗, 吴庆勇, 张广兴. 抗拔桩和抗压桩受力形状异同性研究[J]. 工程勘察, 2006, (6): 4—9.
ZHANG Zhong-miao, WU Qing-yong, ZHANG Guang-xing. Study on behaviors of stresses for uplift piles and

compressive piles[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2006, (6): 4—9.