

新型多功能静载和冲击扰动岩石 试验系统及应用

樊宝杰^{1,2}, 赵伏军^{1*}, 刘永宏¹, 田芯宇¹, 陈品峯¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南省城市地质调查监测所, 湖南 长沙 410000)

摘要: 研制一种静态载荷、动态扰动载荷耦合加载的新型多功能静载和冲击扰动岩石试验系统, 实现对大尺寸岩石单轴和多轴的静态与动态扰动组合加载试验. 对大尺寸石膏试件开展多种加载方式的试验研究. 结果表明: 该试验系统操作简单, 参数调控良好, 试验数据真实可靠. 通过静载与扰动载荷组合加载试验得到: 试样的应变和破坏主要受上限应力的控制; 试样破坏时的循环次数随扰动均值或扰动幅值的增大变化明显.

关键词: 岩石; 大尺寸; 周期扰动载荷; 试验系统

中图分类号: TD421 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2022)04-0016-08

A New Multifunctional Testing System for Static and Impact Disturbance of Rock and Its Application

FAN Baojie^{1,2}, ZHAO Fujun¹, LIU Yonghong¹, TIAN Xinyu¹, CHEN Pinyin¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Institute of City Geological Survey and Monitoring, Changsha 410000, China)

Abstract: A new multifunctional testing system for impact disturbance of rock is designed, which realizes the static and periodic disturbance combined loading under uniaxial and multiaxial on large-scale rock. A variety of loading modes test verifications are carried out on large-scale gypsum specimens. Results show that the testing system is simple to operate, the parameters regulates well, and the testing data are true and reliable. Through the static and periodic disturbance combined with loading test, it is known that the strain and failure of specimens are mainly controlled by the upper limit stress. The cycle times change obviously with the increase of disturbance mean or disturbance amplitude.

Keywords: rock; large size; periodic disturbance load; testing system

地下工程中, 围岩因其他工程影响或机械设备的振动而常受到周期性的扰动载荷, 岩石在周期性扰动载荷作用下容易积累损伤变形, 导致各种地质灾害, 岩石的疲劳损伤破坏是岩石力学领域面临的最严峻问题之一^[1-7]. 刘伟等^[8]利用霍普金森冲击试验平台对弱风化花岗岩进行逐级循环冲击, 研究其受爆炸冲击影响下的力学特征和渗透系数的变化; 王俊光等^[9]在扰动蠕变实验台上开展片麻岩的分级加载试验, 得到片麻岩蠕变特性受扰动载荷影响的规律; 宫凤强等^[10]利用 MTS Landmark 电液伺服试验机对红砂岩进行“不同预静载+扰动载荷”的加载试验, 分析红砂岩在不同预静载和动态扰动载荷下的断裂韧度规律及断裂特征; Yang 等^[11]采用 RMT-150B 岩石力学测试系统对砂岩峰后循环加卸载的力学特性进行试验研

收稿日期: 2022-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674116; 51904101); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4311; 2020JJ5188)

* 通信作者, E-mail: zfjxxn@263.net

究,探讨深部巷道围岩经历多次峰后循环加卸载下的力学特征;王天佐等^[12]在 MTS815 上开展恒下限和变下限的力学试验,研究红砂岩的损伤演化规律;Liu 等^[13]利用 MTS-815 电液伺服岩石试验系统对白云岩进行循环扰动加载,揭示白云石在多级循环加载下疲劳行为的重要三相演化过程;戴国亮等^[14]通过分离式霍普金森压杆对钙质砂和石英砂进行反复冲击,研究冲击次数、含水率等因素对 2 种砂样力学特征的影响。目前,大多冲击扰动试验系统针对的试样对象多为小尺寸标准试件,且只能单轴加载周期循环载荷。为此,本团队自主研发可对大尺寸试件进行单轴、多轴,静载荷与动态扰动载荷随意组合加载的多功能静载和冲击扰动岩石试验系统,以便于进一步开展多参数,不同静动载荷耦合加载下岩石的疲劳损伤及破坏机理的研究。

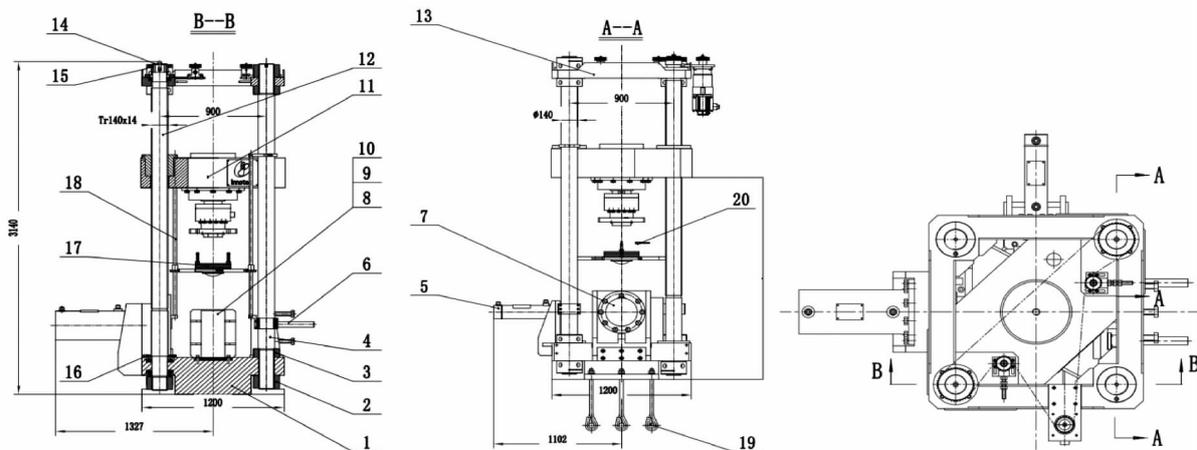
1 试验设备功能

该试验系统由液压站、伺服加载系统、冲击装置、数据采集系统、操作台等组成,如图 1 和图 2 所示。该试验系统可实现对 600 mm×600 mm×300 mm,600 mm×300 mm×200 mm,400 mm×300 mm×200 mm 等试件的试验,适用于各类煤、岩样和大尺寸相似材料试样进行冲击、静态加载、卸载、动态扰动等多种加载方式的试验。

传动电机(13)转动,链条回转带动螺纹立柱(12)的齿轮(15)转动进而驱动立柱转动,立柱利用柱身的螺纹控制 Z 轴移动平台的上升和下降。



图 1 静载和冲击扰动岩石试验系统



1-主机底座;2-螺母 M130×6;3-定位螺母;4-立柱;5-扰动油缸组件;6-反力架组件;7-预紧油缸组件;8-扰动反力架;9-扰动反力板;10-活动钢板;11-移动平台;12-螺纹立柱;13-机架及传动电机;14-链轮压垫;15-传动齿轮;16-轴承护盖;17-冲击组件;18-冲击导向组件;19-地脚螺栓 M30×600;20-保险插销

图 2 静载和冲击扰动岩石试验系统结构

1.1 静态加载模式

Z 轴施加静态载荷为 0~2 000 kN,X 轴施加静态载荷为 0~1 000 kN,Y 轴施加静态载荷范围为 0~100 kN,3 个轴可分别单独加载,也可双轴或者三轴组合加载.X 轴、Y 轴、Z 轴均可实现快速卸载,卸载时间 ≤ 0.1 s.X 轴、Y 轴配备弹簧位移计,Z 轴配置弹簧位移计和激光位移计。试验时可设置应力下降比设置为 0~70%,系统每秒记录 100 次应力值。

多轴加载时应先对加载参数进行设置。此处以三轴加载为例:将 X、Y、Z 这 3 个轴的加载方式选为静载;设定预压力、允许载荷最大值、下降比;设置目标载荷、加载速度、保持时间;若加载分为多个阶段,可增加测试步骤;点击“执行测试”,试验开始,试验数据自动记录。具体如图 3 所示。

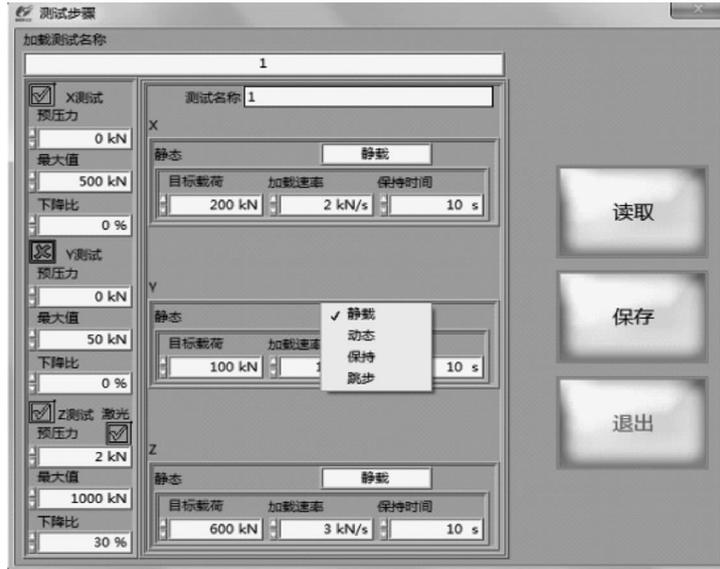


图3 三轴静态加载参数设置

1.2 动态扰动加载模式

试验前需先设置扰动均值、扰动幅值比例、扰动波形、扰动频率、扰动次数等参数.扰动应力幅值比例设置为0~30%,扰动波形有正弦波、矩形波、三角波、锯齿波可选,扰动频率为0~20 Hz,扰动次数为0~99 999次.X轴、Y轴、Z轴可分别单独施加扰动载荷,也可双轴、三轴随意组合施加动、静载荷.试验系统自动记录时间-应力,时间-应变,时间扰动次数,应力-应变等数据.

1.3 冲击模式

磁环通过螺杆固定在Z轴压板上,通过电磁阀开关控制落锤吸附或下落.落锤两侧有行程导轨,确保落锤只能垂直上升和下落.试验中,可单独操作Z轴进行落锤冲击,也可先控制Y轴、X轴对试样施加静态载荷,然后利用Z轴对试样开展落锤冲击.落锤冲击高度可在0~1 500 mm自由设定.落锤规格300 mm×300 mm,由多块铁板组成,总质量20~50 kg,每块铁板5 kg,落锤端部R为100 mm半球状冲击头.

调节落锤质量和冲击高度控制落锤的冲击能.根据牛顿第二定律、动量定理、热力学第一定律等计算落锤碰撞时间,落锤冲击能等.

2 设备功能测试

2.1 静态加载测试

试验对象均为铁块,600 mm×300 mm×200 mm.Z轴、X轴、Y轴组合加载,应力-时间关系曲线如图4所示.

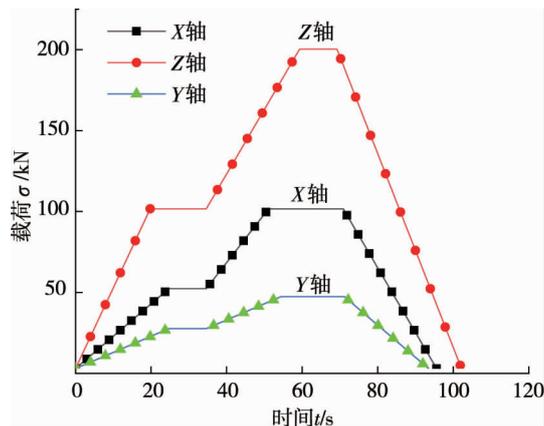


图4 多轴组合加载应力-时间关系曲线

2.2 动态扰动加载测试

1) 单轴扰动加载测试

Z 轴单轴动态扰动加载,扰动均值 110 kN,扰动赋值比例 7%,频率 2 Hz,扰动次数 80 次,应力-时间关系曲线见图 5.

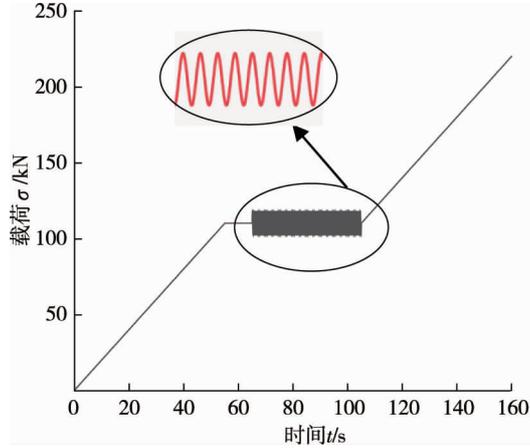


图 5 Z 轴应力-时间关系曲线

2) 多轴动态扰动加载及扰动载荷波形测试

X 轴, Y 轴, Z 轴组合扰动加载: X 轴, Y 轴, Z 轴组合扰动加载的应力-时间关系曲线见图 6. 图 6 中块状阴影为扰动载荷.

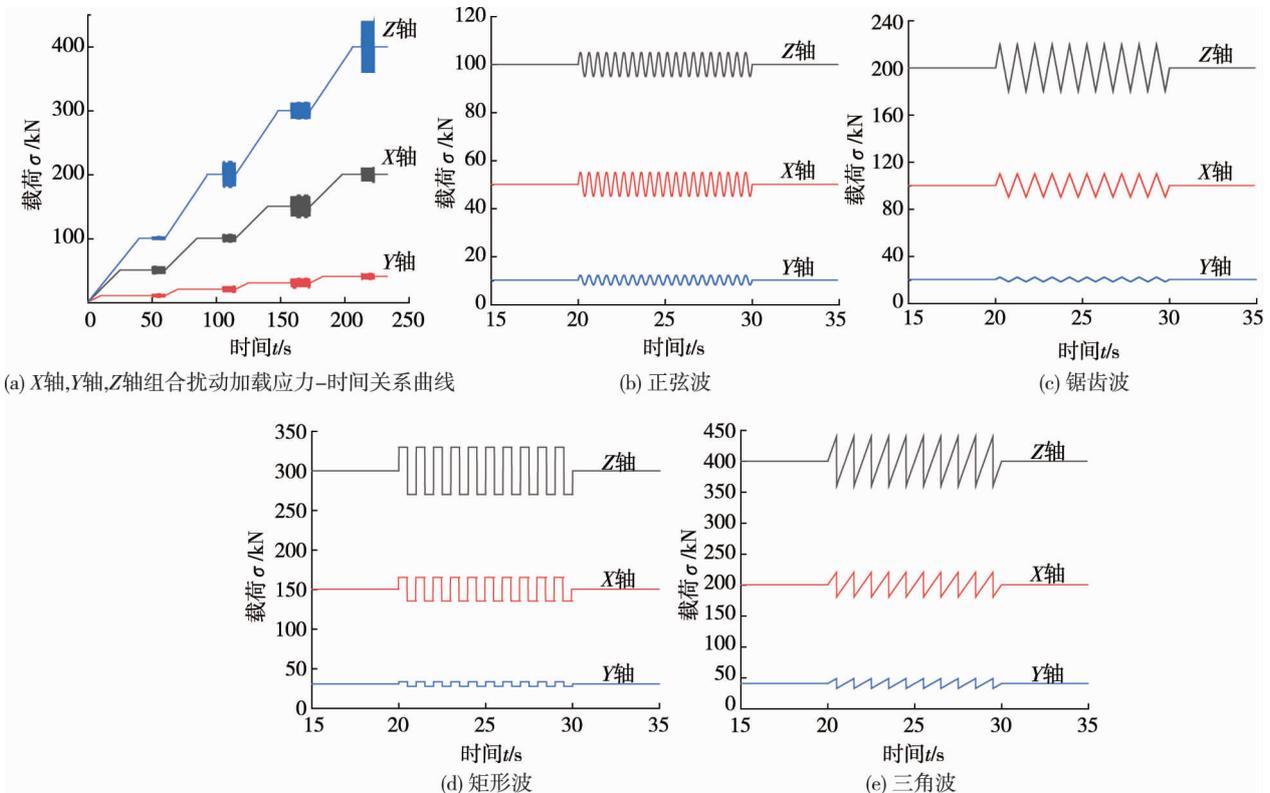


图 6 X 轴, Y 轴, Z 轴组合扰动加载应力-时间关系曲线

2.3 冲击测试

落锤冲击试验时,先将磁环用螺杆固定在 Z 轴的压板上,接上电磁阀控制线.把落锤放在 Z 轴压板正下方,并用行程导向架固定.控制移动平台下降,点击吸附按钮使电磁阀通电,磁环吸附落锤;控制移动平台上升,落锤随平台一起上升.平台移动至合适高度,点击释放按钮,电磁阀断电,落锤与磁环分离,落锤靠

重力自由落体冲击试件,具体见图1.本次选取落锤质量50 kg,冲击高度500 mm进行试验,落锤冲击加速度-时间关系曲线如图7所示.

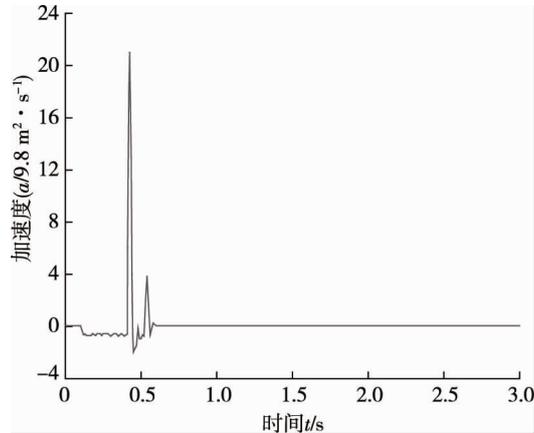


图7 落锤冲击加速度-时间关系曲线

设备可以捕捉到碰撞瞬间试样对落锤的反作用力 F 引起的加速度 a , 试验系统可直接显示落锤与试样碰撞瞬间的冲击力 F 、碰撞时间 t , 落锤的冲击能 E_p .

3 试验系统可行性验证

3.1 单轴动静态加载试验方案

为验证试验系统的可行性,本节利用自制大尺寸石膏试样(150 mm×150 mm×300 mm)进行单轴动态扰动试验.试样如图8所示.



图8 大尺寸石膏试样

第一组:进行单轴压缩,得到其单轴抗压强度 σ_c 等基本力学参数.

第二组:以 1 kN/s 的加载速率将试件分别加载至 $0.8\sigma_c$, $0.85\sigma_c$, $0.9\sigma_c$, 然后施加 $0.25\sigma_c$ 为周期载荷幅值,直至试件破坏.扰动载荷波形为正弦波,频率 2 Hz.

第三组:以 1 kN/s 的加载速率将试件加载至 $0.9\sigma_c$, 然后分别施加 $0.15\sigma_c$, $0.2\sigma_c$, $0.25\sigma_c$ 为周期载荷幅值的扰动载荷,直至试件破坏.扰动载荷波形为正弦波,频率 2 Hz.

3.2 试验结果及分析

大尺寸石膏试件单轴压缩应力-应变曲线如图9所示.

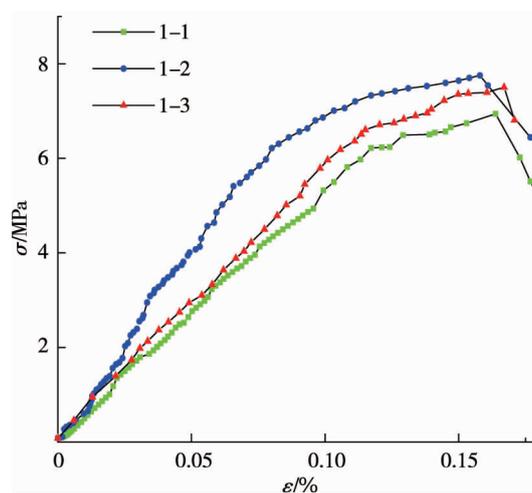


图9 大尺寸类岩石试件单轴压缩应力-应变曲线

由图 9 可知,大尺寸石膏试件单轴抗压强度 σ_c 均值 7.38MPa,破坏时的应变均在 0.16%~0.17%.

扰动载荷幅值为 $0.25\sigma_c$,扰动载荷均值为 $0.8\sigma_c, 0.85\sigma_c, 0.9\sigma_c$ 的大尺寸石膏试件应力-应变曲线如图 10 所示.

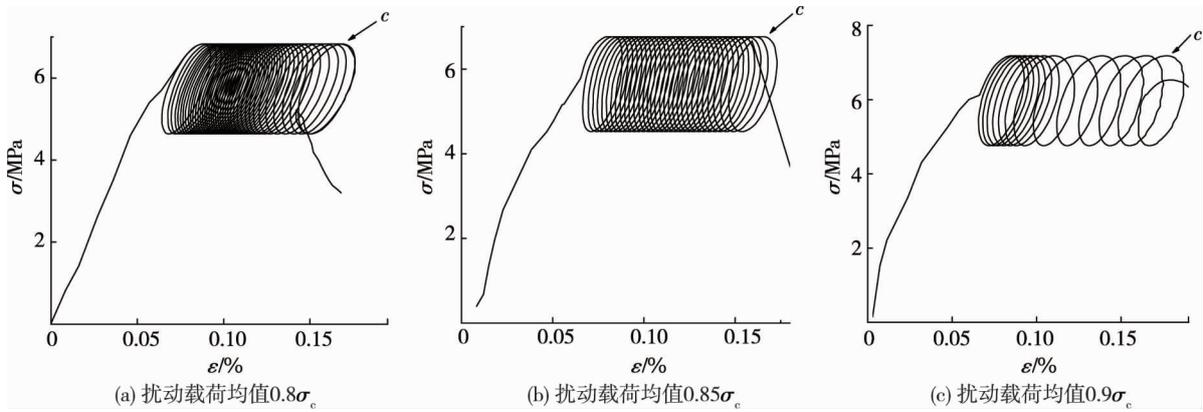


图 10 扰动载荷幅值为 $0.25\sigma_c$,不同扰动载荷均值下试件的应力-应变曲线

由图 10 可知,试样破坏时的应变分别为 0.158%,0.162%,0.168%.

扰动载荷均值为 $0.9\sigma_c$,扰动载荷幅值为 $0.15\sigma_c, 0.2\sigma_c, 0.25\sigma_c$ 的大尺寸石膏试件应力-应变曲线如图 11 所示.

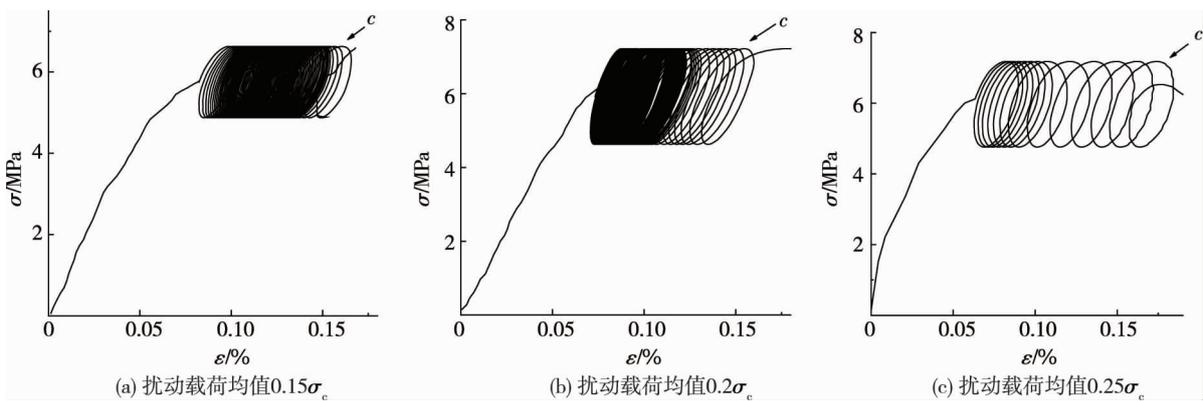


图 11 扰动载荷均值为 $0.9\sigma_c$,不同扰动载荷幅值下试件的应力-应变曲线

由图 11 可知,试样破坏时的应变分别为 0.155%,0.163%,0.168%.对比图 8~图 10 发现,试样破坏主要受应变影响,应变积累到一定程度,试样破坏.扰动加载时,试样破坏时 c 点的应力应变刚好对应单轴压缩的应力-应变曲线,说明扰动加载时试样的破坏受单轴压缩全应力-应变曲线的控制.这与葛修润等^[15]的研究成果相似.

扰动加载时,试样破坏时的循环次数如表 1 和表 2 所示.

表 1 第二组试件加载参数与循环次数关系

影响因素	试件编号	扰动载荷均值/MPa	扰动载荷幅值/MPa	上限应力/MPa	下限应力/MPa	循环数/次
扰动均值	2-1	5.90	1.85(0.25 σ_c)	7.75	4.05	1 244
	2-2	(0.8 σ_c)		(1.05 σ_c)	(0.55 σ_c)	1 182
	2-3					1 478
	2-4	6.27		8.12	4.42	689
	2-5	(0.85 σ_c)		(1.1 σ_c)	(0.6 σ_c)	616
	2-6					648
	2-7	6.64		8.49	4.80	14
	2-8	(0.9 σ_c)		(1.15 σ_c)	(0.65 σ_c)	12
	2-9					19

表2 第三组试件加载参数与循环次数关系

影响因素	试件编号	扰动载荷均值/MPa	扰动载荷幅值/MPa	上限应力/MPa	下限应力/MPa	循环数/次
扰动均值	3-1	6.64 (0.9 σ_c)	1.11(0.15 σ_c)	7.75 (1.05 σ_c)	5.54 (0.75 σ_c)	274
	3-2					326
	3-3					303
	3-4	1.48(0.2 σ_c)	8.12 (1.1 σ_c)	5.17 (0.7 σ_c)	182	
	3-5				147	
	3-6				169	
	2-7	1.85(0.25 σ_c)	8.49 (1.15 σ_c)	4.80 (0.65 σ_c)	14	
	2-8				12	
	2-9				19	

由表1和表2可知,动态扰动加载时,随扰动载荷均值或扰动载荷幅值的增加,试样破坏时的循环数呈非线性显著降低.应力上限为 $1.1\sigma_c$ 时,扰动均值 $0.9\sigma_c$ 、扰动幅值 $0.2\sigma_c$,试验破坏时的循环次数为182,147,169;扰动均值 $0.85\sigma_c$ 、扰动幅值 $0.25\sigma_c$,试验破坏时的循环次数为689,616,648.应力上限为 $1.05\sigma_c$ 时,扰动均值 $0.9\sigma_c$ 、扰动幅值 $0.15\sigma_c$,试验破坏时的循环次数为274,326,303;扰动均值 $0.8\sigma_c$ 、扰动幅值 $0.25\sigma_c$,试验破坏时的循环次数为1244,1182,1478.应力上限相同,扰动载荷均值、幅值不同时,高扰动载荷均值下试件破坏时的循环数更少,说明动态扰动加载时,上限应力确定的情况下,试样破坏对扰动载荷均值的敏感度高于扰动载荷幅值.这与唐礼忠等^[16]的研究成果具有相似性.

3.3 三轴加载试验

试验对象为混凝土试块,400 mm × 400 mm × 400 mm.X轴,Y轴,Z轴组合加载:X轴,Y轴,Z轴组合加载应力-时间关系曲线见图12.

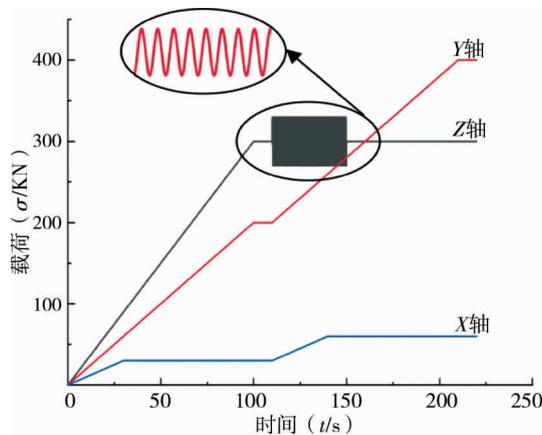


图12 X轴,Y轴,Z轴轴组合加载应力-时间关系曲线

4 结论

1) 新型多功能静载和冲击扰动岩石试验系统是根据静载加载和动态扰动加载相互组合的原理设计与研制的.该设备主要由操作台、液压站、伺服加载系统、数据采集系统、落锤冲击装置等组成.

2) 该试验系统功能多样化,可实现单轴、多轴的静态载荷和动态扰动载荷任意组合加载试验.利用伺服加载系统和落锤冲击装置可实现围压下的落锤冲击试验.

3) 单轴周期扰动加载时试样的破坏受单轴压缩全应力-应变曲线的控制.当上限应力确定后,试样破坏受扰动载荷均值的影响大于扰动载荷幅值.该试验系统操作简单,可调控变量多,试验数据真实可靠.

参考文献:

- [1] 刘新锋,赵英群,王晓睿,等.岩石疲劳损伤及破坏前兆研究现状与展望[J].地球科学,2022,47(6):2190-2197.
- [2] 张劲泉,宋紫薇,韩冰,等.车辆荷载作用下公路混凝土桥梁疲劳问题研究进展[J/OL].土木工程学报:1-17[2022-6-20].
- [3] 赵博,徐涛,杨圣奇,等.循环荷载作用下高应力岩石疲劳损伤破坏数值模拟与试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2725-2735.
- [4] ZHANG C, WANG Y, RUAN H, et al. The strain characteristics and corresponding model of rock materials under uniaxial cyclic load/unload compression and their deformation and fatigue damage analysis [J]. Archive of Applied Mechanics, 2021, 91(6):2481-2496.
- [5] ZHU L, CUI S, PEI X, et al. Experimental Investigation of the Fatigue Damage and Strength Characteristics of Heterogeneous Rock Mass under Cyclic Loading [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022,26(6):3007-3018.
- [6] HAGHGOUEI H, BAGHBANAN A, HASHEMOLHOSSEINI H, et al. Variable Amplitude Fatigue Life Prediction of Rock Samples Under Completely Reversed Loading [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021,39(3):1951-1962.
- [7] GISCHIG V, PREISIG G, EBERHARDT E. Numerical Investigation of Seismically Induced Rock Mass Fatigue as a Mechanism Contributing to the Progressive Failure of Deep-Seated Landslides [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(6):2457-2478.
- [8] 刘伟,曾鹏,闫雷,等.循环冲击下弱风化岩石力学特性与渗透率演化[J].煤炭学报,2021,46(6):1855-1863.
- [9] 王俊光,梁冰,杨鹏锦.动静荷载作用下片麻岩蠕变实验及非线性扰动蠕变模型[J].煤炭学报,2019,44(1):192-198.
- [10] 宫凤强,张乐,李夕兵,等.不同预静载硬岩在动力扰动下断裂特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(8):1841-1854.
- [11] YANG D, ZHANG D, NIU S, et al. Experiment and Study on Mechanical Property of Sandstone Post-peak Under the Cyclic Loading and Unloading [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018,36(3):1609-1620.
- [12] 王天佐,王春力,薛飞,等.不同循环加卸载路径下红砂岩声发射与应变场演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(s1):2881-2891.
- [13] LIU H, GAO K, ZHU X. Experimental study on dynamic fatigue properties of dolomite samples under triaxial multilevel cyclic loading [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021,80(1):551-565.
- [14] 戴国亮,欧阳浩然,秦伟,等.反复一维冲击下钙质砂动力特性 SHPB 试验研究[J].振动与冲击,2022,41(14):264-270.
- [15] 葛修润,蒋宇,卢允德,等.周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究 [J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1581-1585.
- [16] 唐礼忠,武建力,刘涛,等.大理岩在高应力状态下受小幅循环动力扰动的力学试验[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(12):4300-4307.