

深部岩体动态特性多功能试验系统的研制

王德荣, 陆渝生, 冯淑芳, 王明洋

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为探索深部岩体的动态力学特性, 研制深部岩体动态特性多功能试验系统。该系统主要由加载装置和量测系统组成, 其中加载装置包括延时控制系统和加载工作台, 量测系统由光纤位移计、加速度传感器、电荷放大器、高速数字采集处理系统和电脑组成。加载时通过合理选择锤重、锤高、摆长、摆角和作用时间间隔等试验参数, 利用电子和机械控制装置, 实现试验所需要的水平静载、水平冲击和垂直冲击等多种形式的荷载组合, 达到预设的冲击延时。进行块体间摩擦因数测量、摩擦减弱效应等试验, 其应用情况表明, 该系统结构新颖、指标先进、灵活方便、荷载可以任意调整, 为研究深部岩体如超低摩擦特性、准共振特性和摆型波等特殊力学现象, 提供方便、可靠的试验设备。

关键词: 岩石力学; 深部岩体; 动态特性; 试验系统

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)03 - 601 - 06

DEVELOPMENT OF MULTIPURPOSE TEST SYSTEM FOR DYNAMIC BEHAVIORS OF DEEP ROCK MASSES

WANG Derong, LU Yusheng, FENG Shufang, WANG Mingyang

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: In order to explore the dynamic mechanical behaviors of deep rock masses, multipurpose test system of deep rock mass for dynamic mechanical behaviors is developed. The system is composed of loading devices with time delay control system and measurement system, optical fiber displacement meter, acceleration transducer, charge amplifier, high speed data collection and data processing system and computer. When loading, many kinds of load combinations such as horizontal dead load, standard impact and perpendicular impact are realized. The advanced impact time is achieved by reasonably selecting test parameters such as the hammer weight, hammer height, pendulum length and pendulum angle, acting time, electronics and mechanical control devices. The practical application of these tests such as frictional coefficient measurement among rock blocks; and friction-weakening effect indicates that this system has particular structure, advanced indexes, convenient operation, in which the load can be chosen freely. This system can provide the convenience and the failure-safe test equipment to study the specific dynamic behaviors of the deep rock mass such as super-low friction, quasi-resonance specialty and pendulum mould wave.

Key words: rock mechanics; deep rock mass; dynamic behaviors; test system

1 引言

在岩石力学研究中, 由于深部岩体的结构特点、

变形特点、高应力状态的临界特点及其结构与介质的含能特点, 使其物理学特性与浅部岩体相比具有显著的不同, 具体表现为深部岩体结构的非均匀、非连续的块系特点, 这些力学现象用传统的连续介

收稿日期: 2007 - 09 - 01; **修回日期:** 2008 - 01 - 23

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490275); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目

作者简介: 王德荣(1968 -), 男, 硕士, 1990年毕业于工程兵工程学院野战工程专业, 现任讲师, 主要从事防护及岩土工程方面的教学与研究工作。

E-mail: wdrjb@163.com

质力学不能给出很好的解释^[1~6]。真实的深部岩石的性质非常复杂，它们取决于裂纹的存在及扩展、构造单元的位置、相互作用及其微观性质等多种因素。在宏观水平上，所有这些表现为黏结力、内摩擦、膨胀等岩石的典型特征，从而导致行为的非线性。国外在深部岩体动态特性方面开展了一些研究^[1~9]，但是由于对深部岩体的物理力学特性了解有限，以及建立数学模型的困难，使得在理论研究上进展不大。因此，通过试验手段来研究深部岩体的物理力学特性，就成为重要的研究途径，并取得了一系列的研究成果。M. B. Курленя等^[1~5]采用试验的方法，研究了深部岩体块状介质的一些特性。随着国内地下空间的开发不断地向深部发展，我国在这方面已开展了一些研究^[10~15]。但是由于起步较晚，涉及的试验研究很少，研究成果也不够深入，而相应的试验研究设备，更是欠缺。因此，研制深部岩体动态特性多功能试验系统，以满足国内在这方面研究的需要，已成为当务之急。为此，研制了一套深部岩体动态特性多功能试验系统，试验应用情况表明，该系统指标先进，性能优良，完全满足了预定的技术要求，是研究深部岩体如超低摩擦特性、准共振特性和摆型波等特殊力学现象方便、可靠的试验设备。

2 设计原理

在研究深部岩体块体构造的力学特性时，必须获得块体在冲击扰动作用下的运动情况，其中包括冲击能和由块体振动引起的位移、加速度等力学参数。由于块体的位移量非常小(往往只有几个微米)，信号很弱，难以测量，因此必须采取降低噪声的有效措施。同时，由于块体振动信号波形的复杂性和频域范围的宽广性，使得测量块体振动并进行分析也很困难。另外，为了模拟微地震的荷载作用，还必须使块体双向冲击的作用时间有一个适当的延时，这就需要研制一套高精度的电子延时控制系统和可调节落锤、摆锤的启动装置，以达到精确控制 2 个方向上冲击荷载的作用时间。根据这些苛刻的条件，设计了 3 个独立的系统：延时控制系统、加载工作台和测量系统，以满足试验的技术要求。

图 1 为延时控制系统的原理框图。它主要由 1 个延时器和 2 个定时器组成。延时器的作用是控制 2 个不同方向上冲击荷载的相对延时，采用了 SIDXAC0.5 型延时器，其延时范围为 0~500 ms。

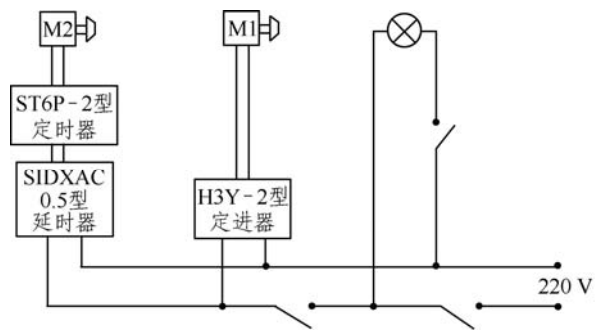


图 1 延时控制系统的原理框图

Fig.1 Principle diagram of the time-lapse system

定时装置采用了 ST6P-2 和 H3Y-2 型定时器，其作用是控制电磁铁 M1, M2 的作用时间。

图 2, 3 分别给出了试验模型 1, 2 的工作原理图。图 2 中 1~5 为 5 个尺寸相同的块体，组成试验模型 1。其中块 3 为工作块，水平静力作用在点 b，它是通过钢丝和滑轮与加载桶连接，在桶中加入砝码和干砂来施加水平荷载的，其加载精确度可达 1 g。滑轮的固定架上有 2 只限位螺钉，限制块 2, 4 的右向水平运动。垂直冲击作用由钢球实现。钢球是从不同高度落下，通过加载头在点 a 把不同的冲击能传递给块体 1。

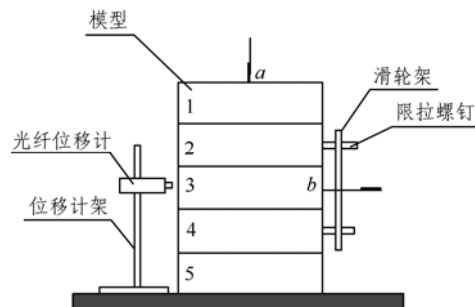


图 2 试验模型 1 的工作原理图

Fig.2 Work principle of testing model 1

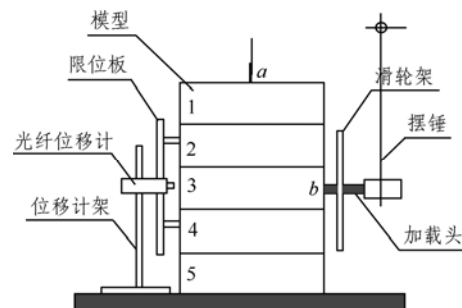


图 3 试验模型 2 的工作原理图

Fig.3 Work principle of testing model 2

图 3 是研究在水平冲击(代替了图 2 中的静态水平力)和垂直冲击共同作用下块 3 水平冲击响应的装置图。对块 3 的垂直扰动与图 2 一样, 由钢球的下落实现, 水平扰动是由摆锤的下摆实现。摆锤的上端固定在横梁上, 且可沿水平向移动, 以保证摆锤能垂直冲击块 3。改变摆锤的摆长和倾斜角度, 就能得到不同能量的水平冲击扰动, 水平冲击扰动也是通过加载头作用到块 3 的点 *b* 上。2 套电磁铁把钢球和摆锤保持在初始状态, 并由电子延时控制系统和可调节的启动装置来控制钢球和摆锤的启动, 实现钢球的垂直冲击和摆锤水平冲击之间有一个时间延迟 Δt 。为排除工作台和地面振动的影响, 模型底部加有隔振垫, 水平安置在工作台的底座上。

块 3 的绝对位移是由光纤位移计来测量的。位移计单独固定在位移计架上, 位移计架通过隔振垫固定在地面上, 以排除地面振动的影响, 这样测量到的将是被测物体的绝对位移。位移计的工作光源为激光。为了得到良好的反射信号, 在块 3 上固定一块薄镜片, 将传感器探头发射出的激光通过镜片反射返回探头, 测量入射光和反射光之间的相位差, 得到被测物体的绝对位移。

3 试验系统

图 4 所示为试验系统的照片。试验系统主要由加载装置和量测系统组成。



图 4 试验系统的照片
Fig.4 Photo of the test system

加载装置由延时控制系统和加载工作台组成。加载工作台包含了加载装置、立柱、底座和照明灯。加载装置分垂直冲击锤(见图 5)、水平冲击锤和施加水平静载 3 个部分, 垂直和水平冲击锤的启动由延时控制系统控制, 垂直冲击锤有 90 和 297 g 两种质量, 水平冲击锤有 206 和 297 g 两种质量, 可根据不同的试验要求进行选择。垂直冲击锤高度可在 0~1 500 mm 调节; 水平冲击摆锤的摆角可在 0°~90° 调节, 摆长可在 30~600 mm 调节; 垂直与水平冲击载的作用时间间隔, 通过延时控制系统和机械调节装置, 可在±0~500 ms 任意调节。



图 5 垂直加载装置及延时器
Fig.5 Vertical impact apparatus and chronotron

量测系统由光纤位移计、加速度传感器、电荷放大器、高速数字采集处理系统和电脑组成。光纤位移计采用了美国 PHILTEC 公司的 RC - 62 型光纤位移计。光纤位移计的测量灵敏度为 0.9 $\mu\text{m}/\text{mV}$, 量程为 2 mm, 频响为 20 kHz; 为了宏观监测被测工作块的位移和工作块的复位, 除光纤位移计外, 还安装了百分表(见图 6)。



图 6 光纤位移计和百分表
Fig.6 Optical fiber displacement meter and dial indicator

加速度传感器(见图 7): 采用联能公司的三向加速度计, 能同时测量同一点的 x , y , z 三个方向上的加速度。其测量灵敏度为 0.1 g/PC , 量程为 $10\,000 \text{ g}$, 频响为 5 kHz 。

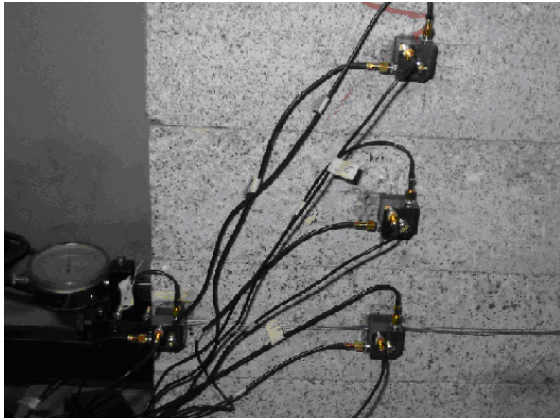


图 7 三向加速度传感器

Fig.7 Three-direction acceleration transducer

电荷放大器和高速数据采集处理系统分别采用东华公司的 DH - 5863A 和 DH - 5939N 型, 数据采集处理系统可对测量结果进行处理分析(包括频谱分析)。电荷放大器的频响为 500 kHz , 高速数据采集处理系统(见图 8)的最高采样速率为 3 MHz 。



图 8 电荷放大器和数据采集处理系统

Fig.8 Charge amplifier and data collecting and data processing system

4 试验应用

深部岩体动态特性多功能试验系统可单独施加水平静载、垂直和水平冲击载; 也可组合施加垂直冲击载与水平静载或垂直和水平冲击载。应用多功能动态特性试验系统已完成了花岗岩静摩擦因数的

测定、垂直冲击荷载作用下岩块间摩擦力减弱效应研究、水平冲击荷载作用下岩块动态响应特性研究、垂直和水平冲击荷载作用下岩块动态响应特性研究等多项试验研究。初步应用情况表明, 系统指标先进, 性能优良, 达到了设计和试验的要求, 可以进行研究深部岩体力学特性的超低摩擦特性、摆型波和准共振特性等各项试验。例如, 为了测定花岗岩静摩擦因数, 必须测定最大静摩擦力。而最大静摩擦力是一种临界力, 是物体相对平面即将滑动时的摩擦力。如何界定这种临界状态成为测定的关键。应用多功能动态特性试验系统, 成功地测定了花岗岩的最大静摩擦力。在试验中发现, 当荷载非常缓慢地增大至最大摩擦力时, 块体间会出现极其微小的位移(其大小在几十微米以内), 此时停止加载并保持荷载不变, 有时块体还会返回原位, 充分表现出临界状态的特点。图 9 给出了测量最大静摩擦力时位移响应曲线的局部图, 从图中可以看出, 在出现临界状态时, 块体发生了 $20.8 \mu\text{m}$ 的位移, 停止加载后, 块体返回了原位。试验中还分别测量了花岗岩模型在垂直冲击载作用、垂直冲击载和水平静载共同作用以及垂直和水平冲击载共同作用时的动态位移响应及加速度响应(见图 10~12)。由此可见, 系统的噪声很小, 动态位移测量的精确度达到了微米级。

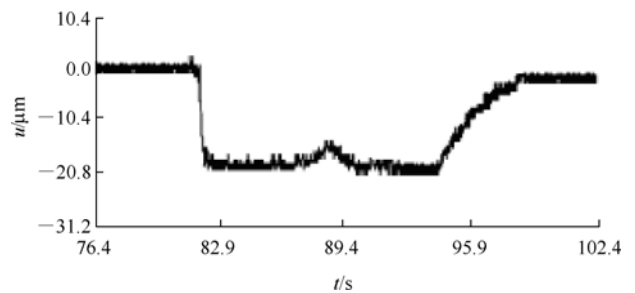


图 9 测量最大静摩擦力时位移响应曲线的局部图

Fig.9 Local diagram of displacement response curve of maximum static friction

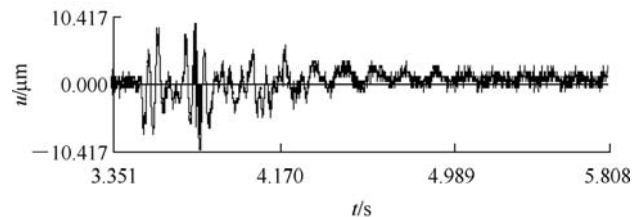


图 10 垂直冲击载作用时的动态位移响应

Fig.10 Dynamic displacement response under vertical impact loading

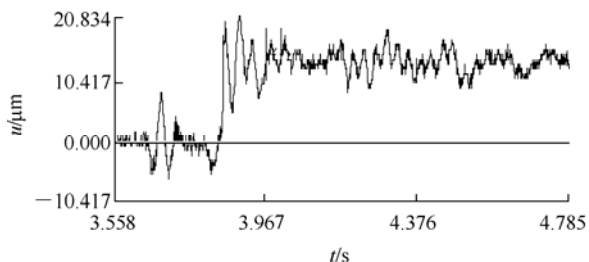


图 11 垂直冲击载和水平静载作用时的动态位移响应
Fig.11 Dynamic displacement response under vertical and horizontal impact loading

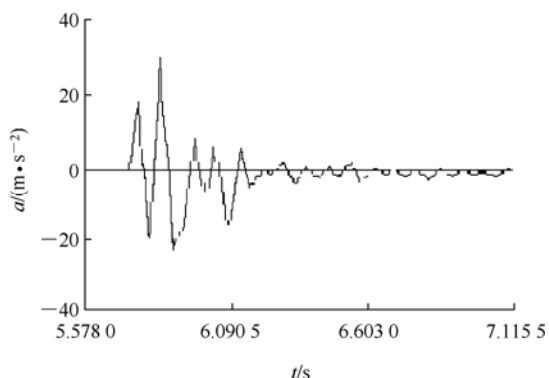


图 12 垂直冲击载和水平冲击载作用时水平方向的加速度
Fig.12 Horizontal acceleration curves under vertical and horizontal impact loadings

在垂直冲击和水平静力共同作用时, 得到了垂直冲击能 W_z 和 F_{x0} 的关系曲线(见图 13)、垂直冲击能 W_z 和摩擦减弱系数 K 的关系曲线(见图 14), 通过这 2 个曲线分析可以看出, 有 2 个特征值对应着摩擦力减弱的 2 个阶段: 一方面, 垂直冲击能 W_z 不变, 水平静力 F_x 增大到特征摩擦力 F_{x0} (第一特征值)时, 块体之间开始出现摩擦力减弱现象; 另一方

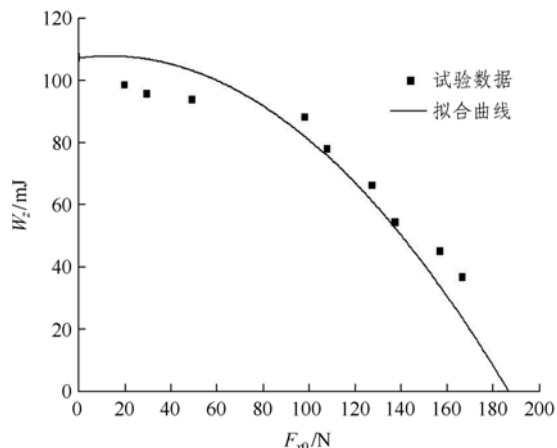


图 13 垂直冲击能 W_z 和 F_{x0} 的关系曲线
Fig.13 Relation curve between vertical impact energy W_z and F_{x0}

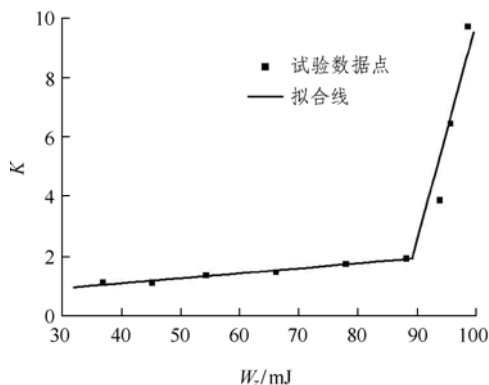


图 14 垂直冲击能 W_z 和摩擦减弱系数 K 的关系曲线
Fig.14 Relationship curves between vertical impact energy W_z and friction-weakening coefficient K

面, 摩擦减弱系数 K 也有一个特征值 k_1 , 当 k 达到和超过该点后, 块体之间的摩擦力将急剧减弱, 出现超低摩擦现象, k_1 为第二特征值。这 2 个特征值的现实意义, 不仅验证了关于超低摩擦的研究结论, 并给理论研究提出了新的课题, 而且也有重要的工程意义即对于深部岩体来讲, 由于岩块处在高能、高压、高地应力状态之中, 如果在某一方向施加一定的冲击能量, 都可能出现摩擦减弱现象, 引起岩块体的移动, 从而可能诱发岩爆或地震等灾难性的后果。

5 结 论

深部岩体动态特性多功能试验系统的研制和系统的试验应用情况表明:

- (1) 系统设计理念先进, 结构合理简洁, 试验操作方便, 制造成本较低。
- (2) 系统功能齐全, 既可单独施加水平静载、垂直冲击载和水平冲击载; 也可组合成垂直冲击载与水平静载、垂直和水平冲击载的组合荷载。水平静载和冲击能可在额定的范围内任意调节。
- (3) 研制的延时控制系统和机械调节装置, 可在 $\pm 0 \sim 500$ ms 任意调节垂直和水平冲击载之间的延时。
- (4) 采用了高精度、高频响的光纤位移计、电荷放大器和数据采集处理系统和隔振措施, 测量数据噪声小, 精确度高。
- (5) 系统技术指标先进, 完全可以满足进行深部岩体的超低摩擦特性、摆型波和准共振特性等各

项动态特性试验研究的要求。

参考文献(References):

- [1] КУРЛЕНЯ М В, ОПАРИН В Н, ВОСТРИКОВ В И. Волны маятникового Тепа. Ч I [J]. ФТПРПИ, 1996, (3): 3 - 8.
- [2] КУРЛЕНЯ М В, ОПАРИН В Н, ВОСТРИКОВ В И. Волны маятникового Тепа. Ч II [J]. ФТПРПИ, 1996, (4): 3 - 39.
- [3] КУРЛЕНЯ М В, ОПАРИН В Н, ВОСТРИКОВ В И. Волны маятникового Тепа. Ч III [J]. ФТПРПИ, 1996, (5): 3 - 27.
- [4] КУРЛЕНЯ М В, ОПАРИН В Н, ВОСТРИКОВ В И. Об Э эффект Аномально Низкого Трение в Блочных Средах[J]. ФТПРПИ, 1997, (1): 3 - 16.
- [5] КУРЛЕНЯ М В, ОПАРИН В Н, БАЛМАШИНОВА Е Г, д. т. О динамическом поведении напряженных блочных сред ч. II. [J]. ФТПРПИ, 2001, (5): 12 - 18.
- [6] SADOVSKY M A. On natural lumpiness of rocks[J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1979, 247(4): 1 135 - 1 142.
- [7] OPARIN V N, YUSHKIN V F, AKININ A A, et al. On a new scale of structural-hierarchical conceptions as a certificate characteristic of geomedium[J]. Fiz.-Tekh. Probl. Objects. Razrab. Polezn. Iskop., 1998, (5): 578 - 580.
- [8] KURLENYA M V, OPARIN V N, YERYOMENKO A A. On the ratio of the linear dimensions of rock blocks to the magnitudes of crack opening in the structural hierarchy of a mass[J]. Fiz.-Tekh. Probl. Razrab. Polezn. Iskop., 1993, (2): 6 - 33.
- [9] REVUZHENKO P. Mechanics of elastoplastic media and nonstandard analysis[M]. Novosibirsk: Izd NGU, 2000.
- [10] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题[C]// 第230次香山科学会议. 北京: [s. n.], 2004: 6 - 28.(QIAN Qihu. Key science problems for deep underground space excavation[C]// The 230th Xiangshan Science Conferences. Beijing: [s. n.], 2004: 6 - 28.(in Chinese))
- [11] 王明洋, 戚承志, 钱七虎. 深部岩体块系介质变形与运动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 825 - 2 830.(WANG Mingyang, QI Chengzhi, QIAN Qihu. Study on deformation and motion characteristics of blocks in deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 825 - 2 830.(in Chinese))
- [12] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 448 - 455.(WANG Mingyang, ZHOU Zeping, QIAN Qihu. Tectonic deformation and failure problems of deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 448 - 455.(in Chinese))
- [13] 于永江, 王来贵, 何峰, 等. 岩石试件在不同圆柱荷载作用下的破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1 025 - 1 028.(YU Yongjiang, WANG Laigui, HE Feng, et al. Broken characters of rock under different cylindrical loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1 025 - 1 028.(in Chinese))
- [14] 徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 503 - 2 508.(XU Guangmiao, LIU Quansheng, PENG Wanwei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 503 - 2 508.(in Chinese))
- [15] 翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩和混凝土在单轴冲击压缩荷载下的动态性能比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 762 - 768.(ZHAI Yue, MA Guowei, ZHAO Junhai, et al. Comparison of dynamic capabilities of granite and concrete under uniaxial impact compressive loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 762 - 768.(in Chinese))