

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.002

平面爆炸波加载装置技术研究*

尹华伟^{1,2}, 张 料¹, 段金曦³, 刘利民⁴

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南湖大土木建筑工程检测有限公司, 长沙 410082;

3. 国防科技大学 军事基础教育学院, 长沙 410073; 4. 湖南泽天传感科技有限公司, 长沙 410073)

摘要: 工程材料的防撞抗冲击、抗爆吸能的试验中,随着加载速率的增加,爆炸荷载的加载速率、均匀程度、接触方式以及测试系统灵敏程度都会对实验结果产生很大影响。为研究工程材料在极端爆炸荷载作用下的动力响应,设计一套构造简单、实验便捷、数据精准的试验装置成为了一个亟待解决的问题。经研发的平面爆炸波加载装置采用串联雷管同步引爆网状导爆索,网状格栅滤波,导波光管多次反射最终形成一维平面冲击波。通过 coinV 数据采集仪、1861A 应变调理仪、桥式应变片及 DASP 软件平台组成测试系统,测得不同炸药当量加载下的压力时程曲线,并采用 LS-DYNA 对平面爆炸波加载装置进行仿真分析。结果表明:装置的优点在可以大幅度提高试验加载速率,并形成一维平面波对试件均匀加载;获得的实验数据与仿真分析数据吻合良好、真实可靠。

关键词: 加载装置; 平面爆炸波; 爆炸荷载; 应变率; 测试系统

中图分类号: TJ510.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0011-06

Research on Technology of Plane Explosive Wave Loading Device

YIN Hua-wei^{1,2}, ZHANG Liao¹, DUAN Jin-xi³, LIU Li-min⁴

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Civil Engineering Inspection and Test Limited Company of Hunan University,

Changsha 410082, China; 3. College of Military Basic Education, University of

National Defense Technology, Changsha 410073, China; 4. Hunan Zetian Sensor

Technology Co., Ltd., Changsha 410073, China)

Abstract: As the loading rate increases, the loading rate of explosion load, the degree of uniformity, the contact mode and the sensitivity of the test system will have a great influence on the experimental results of the anti-collision, anti-impact and anti-detonation energy absorption tests of engineering materials. In order to study the dynamic response of engineering materials under extreme explosion load, it has become an urgent problem to design a set of test equipment with simple structure, convenient experiment and accurate data. The plane explosive wave loading device developed by the series detonator synchronous detonating mesh detonating cord, mesh grid filtering, waveguide light tube multiple reflection finally formed a one-dimensional plane shock wave. The test system was composed of COINV data acquisition instrument, 1861A strain conditioning instrument, bridge strain gage and DASP software platform to measure the pressure time history curves under different explosive equivalent loading, and LS-DYNA was used to simulate and analyze the plane explosive wave loading device. The results show that the device can greatly increase the loading rate and form one-dimensional plane wave to load the specimen uniformly. The experimental data obtained are in good agreement with the simulation data, which is true and reliable.

Key words: loading device; planar explosive wave; explosion load; strain rate; the test system

爆炸荷载由于在极短时间内,产生的高温高压气体以极高的速度膨胀,释放出大量能量,产生的冲击波的传播速度极快,同时破坏性极强;汽车工程、建筑工程、国防军事等专业的专家学者都很重视材料在极端爆炸荷载加载下的防撞、抗爆、吸能等性能的材料研究,平面爆炸波加载装置能够将球面爆炸波经网状格栅滤波^[1],再经导波管多次反射,形成加载速率一致的平面爆炸波。

为了研究工程材料在低、中应变率加载下的材料冲击性能^[2,3],落锤试验和霍普金森实验等在中低速冲击实验中备受专家学者青睐,但是在极端爆炸荷载作用下,来测试材料的动态响应,因爆炸实验本身的可控难度大,反应时间极快,物质爆炸的燃烧速度为爆轰时能在爆轰点突然引起极高压力,并产生超音速的“冲击波”^[4-6]。在极短时间内发生的燃烧产物急速膨胀,像活塞一样挤压其周围气体,迅速传播并能远离爆轰的发源地而独立存在,为了更加精准可靠的测得有效实验数据,设计一套平面爆炸波加载装置,用于更好的分析动态荷载下的动态响应、应力波的传播规律、能量耗散分析及试件破坏的机理^[7-9]。

本文设计了一套能精准测量在爆炸荷载作用下有效动态响应数据的平面爆炸波加载装置,并通过LS-DYNA进行数值模拟对比分析^[10],本装置能提供的爆炸荷载加载速率高、构造简单、实验便捷等性能多目标的优化了实验装置,供给各界工程技术、军事技术和科学研究的专家学者可靠的实验数据^[11-14]。

1 实验原理及装置

1.1 实验原理

结构物在爆炸荷载下的动态响应与静态响应实际上包含了介质质点的惯性效应(波传播)和材料本构关系的应变率效应。就研究材料的动态力学性能而言,研究的目的是研究材料的应变率效应。在应力波的传播分析中,材料动态本构方程(材料动态力学行为)是建立整个问题基本控制方程组所不可缺少的组成部分;换言之,波传播的研究是以材料动态本构关系已知为前提的;而另一方面,在进行材料高应变率下动态本构关系试验研究时,一般又必须考虑试验装置和试件中的应力波传播及相互作用,换言之,在材料动态响应研究中又要依靠所试验材料中应力波传播的知识来分析。

平面爆炸波实验装置结构由能量释放(引爆)装置、平面应力波传递装置(导波管)、数据采集系统及能量耗损装置(试件安装节段)四部分组成(实验装置见图1),当炸药一经引爆极速产生高压应力波,经网状格栅滤波、导波管的多次反射,形成一维的平面应力波;迅速推动带有电阻应变计的钢垫块,将应力波传递给材料试件,由于试件材料和钢垫块的惯性效应,整个试件将被压缩。冲击波作用在贴有电阻应变的钢垫块上,冲击波将被数据采集系统以数据的形式被保存,从而测得材料的变形和破坏情况,获得材料的动态力学性能数据。

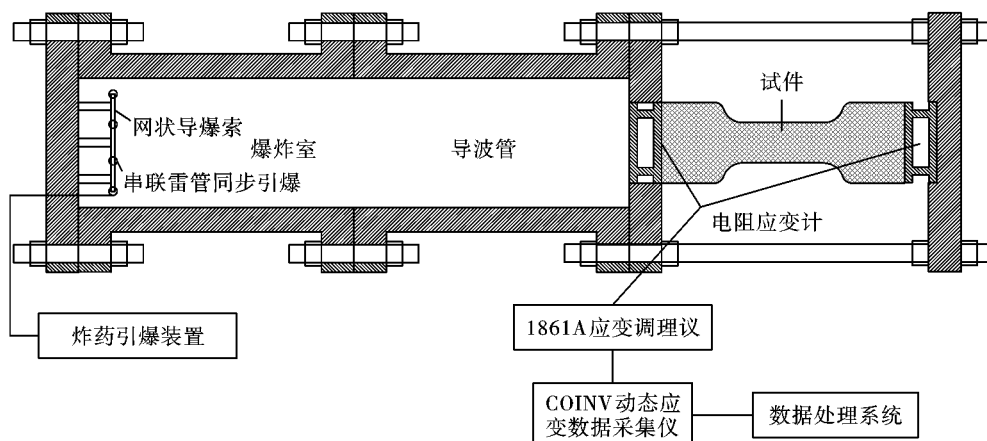


图1 平面爆炸波加载装置

Fig. 1 Planar explosive wave loading device

收稿日期:2021-06-21

作者简介:尹华伟(1972-),男,副教授、博士,主要从事爆破与冲击动力学研究,(E-mail) yhwzzy@163.com。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0701405)

平面爆炸波试验加载装置采用串联雷管同步引爆网状导爆索,并经导波管调节获得平面爆炸波对混凝土试件进行均匀加载。已有研究表明采用网状

格栅滤波,经一定距离后通过冲击板对试件进行加载,能达到均匀加载效果。本试验装置采用多点同步起爆和上球铰支座对试件进行冲击加载。平面爆炸波加载试验可获得与爆炸试验一致的加载速率,可用来研究试件在很高应变率加载时的性能。依据一维应力波理论,就可以方便地得到材料的应力-应变数据。但是要得到有效并精准的数据,下列平面应力波的假设需满足:

1) 爆炸波经网状格栅滤波及导播管多次反射最终作用在试件上的应力波是一维的,因为压力传感器应变片所测得的应变通常代表横截面的轴向应变。

2) 试件中的应力应变处于均匀状态。

1.2 数据采集系统

本装置采用压电式传感器计安装于轴向爆炸室底盖上,结合 INV3062T2 动态应变数据采集仪、INV1861A 应变调理仪及 COINV DASP V11 软件系统组成。爆炸/冲击荷载以载荷作用的短历时为其特征,在以毫秒(ms)、微秒(μs)甚至纳秒(ns)计的短暂时间尺度上发生了运动参量(位移、速度、加速度)的显著变化。在这样的动载荷条件,介质的微元体处于随时间迅速变化着的动态过程中,本数据采集系统能^[15,16]。

INV3062T2 适合分布式、多测点、远距离或无线传输的振动、噪声、冲击、应变、压力、电压等各种物理量信号采集,其采集频率可达 51.2 kHz;与 DASP 软件相连形成具有一百余项先进技术的高性能数据采集和信号处理系统。

INV1861A 便携式 8 通道应变调理器,机内含电源转换、桥压供给、信号放大、低通滤波、预平衡、程序控制、电压输出等单元,可以将微弱的应变信号进行放大、处理后为后续分析、记录设备提供合格的电压信号。可广泛应用于铁路公路桥梁检测、地基沉降、土压测量及大型工程结构的应力、应变、载荷、位移等测量。

DASP 平台软件是由动态测试和信号分析软件组成的,其中包括信号示波和采集、信号发生和 DA 输出、基本信号分析等方面的几十个测试分析模块,不同的平台软件包含不同的模块组合,在采样过程中主要分为三种方式:示波,超大容量连续采样,三思维采样(可一边采样、一边示波、一边进行频谱分析,示波采样分析同时进行)。

为验证研究平面爆炸波一维平面效果,本实验采用压电式传感器分别测量分布在爆炸室底盖上圆心、半径为 100 mm、及半径为 150 mm 处的爆炸冲击波压力,其测点布置如图 2。

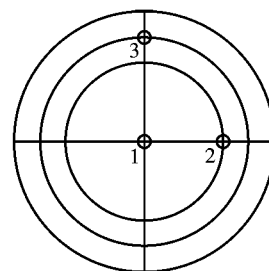


图 2 爆炸冲击波测点布置

Fig. 2 Arrangement of blast shock wave measuring points

2 实验研究及结果

实验采用平面爆炸波加载装置,测试分别在不同炸药当量(15.99 g、23.99 g、31.99 g)加载下产生的冲击波压力(实验现场图片见图 3),经数据采集系统采集、动态测试和信号分析软件分析,得到实验数据,在不同炸药当量下的爆炸冲击波压力时程曲线如图 4。

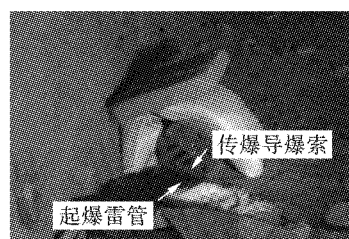


图 3 实验现场

Fig. 3 Experimental site under different explosive equivalents

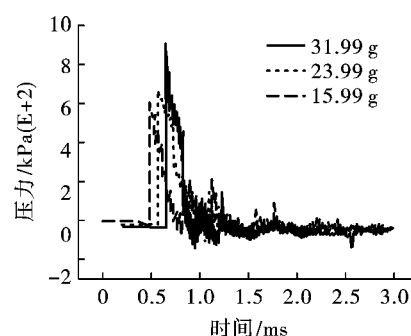


图 4 不同炸药当量下爆炸冲击波实验压力时程曲线

Fig. 4 Time history curve of experimental pressure of blast wave

3 LS-DYNA 数值分析

LS-DYNA 是众所周知进行显示动力分析的有限元程序,可以准确可靠地进行爆炸分析、碰撞分析等高度非线性问题^[17];在离散单元的方法上针对连续介质单元发展了有限单元法、有限体积法、有限差分法,在针对工程中的混凝土、裂缝岩石等非连续介

质的时候发展了离散元方法、有限块体法、数值流形法来研究此类问题,在采用坐标系统分析的现阶段主要是任意拉格朗日法、欧拉方法(ALE)和耦合拉格朗日、欧拉方法(CLE)以及近年来在爆炸分析领域应用广泛的光滑质点动力学法(SPH)^[18-22],可以更简单实现复杂的本构行为,更精准地分析材料在爆炸荷载作用下的材料破坏计算。

本实验数值模拟分析使用 ANSYS 前处理器前进行指定单元属性、实常数、定义材料模型、建立几何模型、划分网格、生成 PART、定义接触、施加荷载与边界条件等前处理;修改关键字文件并将其递交 LS-DYNA 求解器中求解,在求解完成后,LS-DYNA 会输出 D3PLOT 以及 D3THTD 两种文件结果分析文件,最后应用 LS-PREPOST 后处理器进行结果分析。

3.1 几何模型

研究建立平面爆炸波实验的 1/4 计算模型如图 5 所示,平面爆炸波加载装置几何模型如图 6 所示,采用关键(* BOUNDARY_SPC_SET)在模型对称面上施加面约束,采用 SOLID164 实体单元对钢性垫板、SFRC 纺锤体试件进行单元离散,尺寸为 2 mm,采用单点高斯积分拉格朗日算法,单点积分的显示单元能很好地应用于爆炸事件引起的大变形、材料失效和接触等高精度非线性问题^[23,24]。

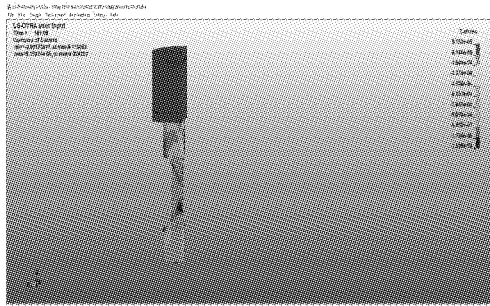


图 5 1/4 LS-DYNA 计算模型

Fig. 5 1/4 LS-DYNA calculation model

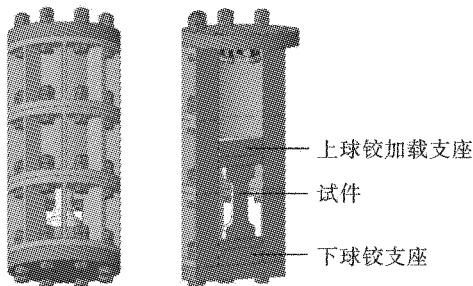


图 6 平面爆炸波加载装置几何模型

Fig. 6 Geometric model of plane explosive wave loading device

3.2 LS-DYNA 算法介绍

LS-DYNA 是众所周知进行显示动力分析的有限元程序,可以准确可靠地进行爆炸分析、碰撞分析等高度非线性问题;在离散单元的方法上针对连续介质单元发展了有限单元法、有限体积法、有限差分法,在针对工程中的混凝土、裂缝岩石等非连续介质的时候发展了离散元方法、有限块体法、数值流形法来研究此类问题,在采用坐标系统分析的现阶段主要是任意拉格朗日法、欧拉方法(ALE)和耦合拉格朗日、欧拉方法(CLE)、以及近年来在爆炸分析领域应用广泛的光滑质点动力学法(SPH),可以更简单实现复杂的本构行为,更精准地分析材料在爆炸荷载作用下的材料破坏计算^[25,26]。

3.2.1 TNT 炸药材料模型

TNT 炸药采用高能炸药材料模型(* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN),并联合 * EOS_JWL 状态方程。炸药材料参数见表 1。

表 1 炸药材料参数

Table 1 Explosive material parameters

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$V_D/(\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa
1.63	0.693	27

表中: ρ 为质量密度, V_D 为爆炸速度, P_{CJ} 为 Chapman-Jouget 压力。

JWL 状态方程定义压力为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

TNT 炸药的状态方程参数取值见表 2。

表 2 TNT 炸药状态方程参数

Table 2 Equation of state parameters of TNT explosive

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa	V_0
374	3.23	4.15	0.95	0.30	7	1.0

3.2.2 空气材料模型

模拟中导波管内爆炸室空气域材料模型采用 * MAT_NULL,耦合 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程,该状态方程用来定义空气等流体材料模型,需要输入得参数包括:密度、弹性模量、泊松比、压力截断值(小于 0.0)、动力粘性系数、扩张侵蚀过程得相对体积(取 0 表示忽略)、压缩侵蚀过程得相对体积(取 0 表示忽略)状态方程的系数 C_0 到 C_6 、初始内部能量及初始相对体积;空气材料模型参数见表 3。

3.3 LS-DYNA 模拟结果

本实验模拟采用 LS-DYNA 数值分析软件模拟平面爆炸波加载装置,研究在不同炸药当量

(15.99 g、23.99 g、31.99 g)加载下产生的冲击波压力,经 LS-DYNA 求解器中求解,在求解完成后,LS-DYNA 会输出 D3PLOT 以及 D3THTD 两种文件结果

分析文件,最后应用 LS-PREPOST 后处理器进行结果分析;在不同炸药当量下的爆炸冲击波模拟压力时程曲线如图 7。

表 3 空气材料模型参数

Table 3 Air material model parameters

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	C_0/MPa	C_1/GPa	C_2/GPa	C_3/GPa	C_4/GPa	C_5/GPa	C_6/GPa	V_0
1.29×10^{-6}	-0.1	0	0	0	40	40	0	1.0

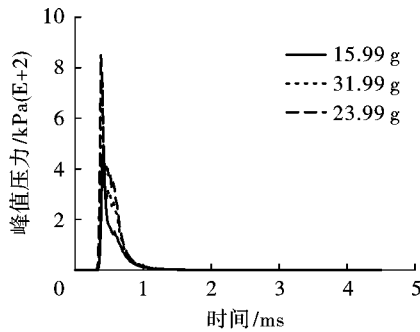


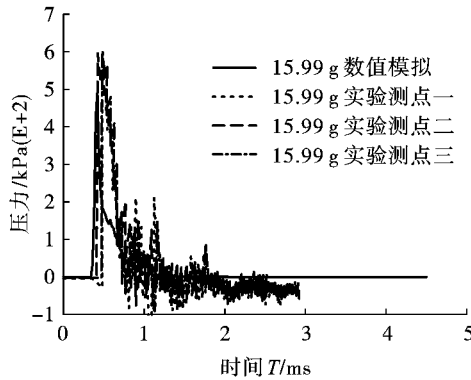
图 7 不同炸药当量下爆炸冲击波模拟压力时程曲线
Fig. 7 Time history curve of simulated blast wave pressure under different explosive equivalents

3.4 模拟、实验结果对比分析

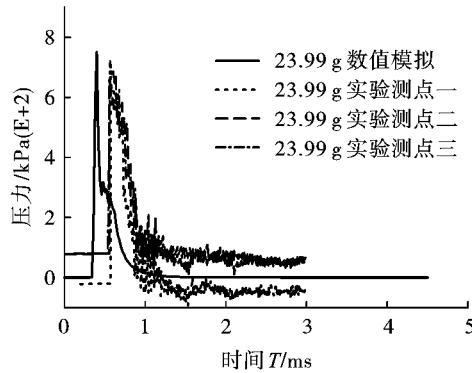
通过平面爆炸波加载实验以及利用 LS-DYNA 对平面爆炸波数值模拟分析,分别在不同的炸药当量下进行对比分析,对比结果如图 8。

4 结论

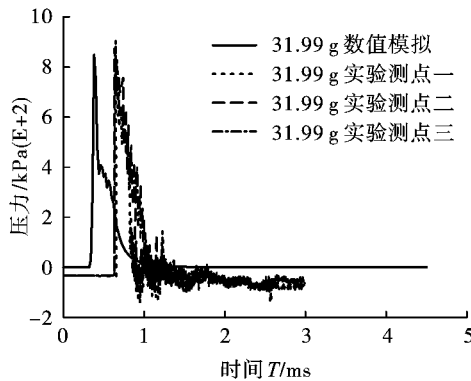
本文采用平面爆炸波加载装置,对爆炸冲击波进行了实验研究和数值模拟分析。本设计装置可以用来进行材料在极端爆炸荷载下材料的抗爆吸能性能测试,能够提供高应变率荷载加载的各项实验测试,将实验装置优化得更为便捷,高效,精准。



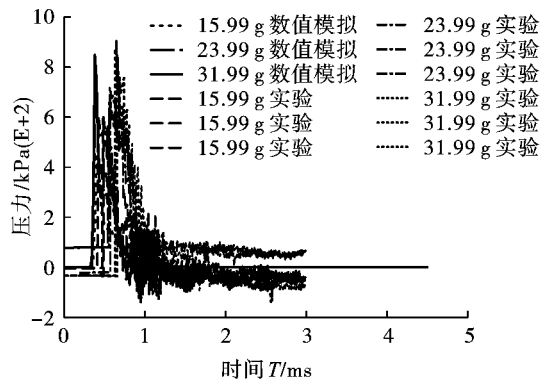
(a) 炸药当量: 15.99 g
(a) Charge yield: 15.99 g



(b) 炸药当量: 23.99 g
(b) Charge yield: 23.99 g



(c) 炸药当量: 31.99 g
(c) Charge yield: 31.99 g



(d) 炸药当量: 15.99 g、23.99 g、31.99 g
(d) Charge yield: 15.99 g、23.99 g、31.99 g

图 8 不同炸药当量下爆炸冲击波实验与模拟压力时程曲线对比分析

Fig. 8 Comparison and analysis of experimental and simulated pressure time history curves of blast wave under different explosive equivalents

结果表明:平面爆炸波加载装置在不同应变率(不同炸药当量)加载下的实验数据与数值模拟分析数据吻合良好,灵敏度高;平面爆炸波加载装置具有以下优点:

(1)平面爆炸波加载装置结构简单,模块化设计方便安装,实用性强;

(2)采用炸药直接作为加载材料,提供更加真实,极端的高应变率加载环境;

此外,可应用于爆炸冲击的传播、衰减等分析,及建筑工程材料的抗爆、吸能性能以及军事防御工程中的材料性能研究。

参考文献(References)

- [1] 尹华伟,段金曦,蒋 轲,等.平面爆炸波加载试验装置.中国,实用新型专利:201921355667.8[P].2020-4-10.
- [1] YIN Hua-wei,DUAN Jin-xi,JIANG Ke,et al.Planar explosive wave loading test device.China,Utility Model Patent:201921355667.8[P].2020-4-10.(in Chinese)
- [2] 庞伟宾,何 翔,李茂生,等.空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究[J].爆炸与冲击,2003,23(6):573-576.
- [2] PANG Wei-bin,HE Xiang,LI Mao-sheng,et al.The formula for airblast time of arrival in tunnel[J].Explosion and Shock Waves,2003,23(6):573-576.(in Chinese)
- [3] 刘晶波,闫秋实,伍 俊.坑道内爆炸冲击波传播规律的研究[J].振动与冲击,2009,28(6):8-12.
- [3] LIU Jing-bo,YAN Qiu-shi,WU Jun.Analysis of blast wave propagation inside tunnels[J].Journal of Vibration and Shock,2009,28(6):8-12.(in Chinese)
- [4] 贾云飞,张春棋,康 金.爆炸冲击波信号测试与小波分析[J].火箭与制导学报,2014,34(5):86-89.
- [4] JIA Yun-fei,ZHANG Chun-qi,KANG Jin.Shock wave signal test and wavelet analysis[J].Journal of Projectiles,Rockets,Missiles and Guidance,2014,34(5):86-89.(in Chinese)
- [5] 邱艳宇,卢红标,蔡立良.爆炸冲击波信号处理方法比较[J].爆破,2010,27(1):92-95.
- [5] QIU Yan-yu,LU Hong-biao,CAI Li-gen.Comparative research in signal processing of blasting shock wave[J].Blasting,2010,27(1):92-95.(in Chinese)
- [6] 贾 虎,沈兆武.纤维爆炸索水下爆炸声信号特征的小波分析[J].振动与冲击,2011,30(9):243-247.
- [6] JIA Hu,SHENG Zhao-wu.Characteristics of underwater detonation acoustic signals of fiber-based detonating cord based on wavelet analysis and power spectrum[J].Journal of Vibration and Shock,2011,30(9):243-247.(in Chinese)
- [7] 杨 鑫,石少卿,程鹏飞.空气中TNT爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J].爆破,2008,25(1):15-18.
- [7] YANG Xin,SHI Shao-qing,CHENG Peng-fei.Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the Air[J].Blasting,2008,25(1):15-18.(in Chinese)
- [8] 张衍芳,杜红棉,祖 静.冲击波信号后期处理方法研究[J].工程与实验,2010,50(4):15-18.
- [8] ZHANG Yan-fang,DU Hong-mian,ZU Jing.Research on post treatment method for shock wave signals[J].Engineering & Test,2010,50(4):15-18.(in Chinese)
- [9] CHARLES R W.In-tunnel air blast engineering model for internal and external detonations[C]//Proceeding of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures.Mclean Virginia,1997:195-208.
- [10] Ls-Dyna.LS-DYNA keyword user's manual.version 971[M].Livermore:Livermore Software Technology Corporation,2010.
- [11] 陈 攀,刘志忠.舱室内爆炸冲击波载荷特性及影响因素分析[J].舰船科学技术,2016,38(3):43-48.
- [11] CHEN Pan,LIU Zhi-zhong.Research on loading of explosive and influencing factors inside closed cabin[J].Ship Science and Technology,2016,38(3):43-48.(in Chinese)
- [12] LIN Liao,JIANG Zhao,FAN Zhang.Experimental study on compressive properties of SFRC under high different fiber content and aspect ratio[J].Construction and Building Materials,2020,261:119906.
- [13] RIEDEL W,THOMA K,HIERMAIER S,et al.Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500,numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes[C]//SKA(ed),Proceedings of the 9th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures,Berlin:1999:315-322.
- [14] SUKONTASUKKUL P,NIMITYONGSKUL P,MINDESS S.Effect of loading rate on damage of concrete[J].Cement and Concrete Research,2004,34:2127-2134.
- [15] TAI Y S.Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target[J].Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2009,51(2):117-128.
- [16] Euro-International du Béton,CEB-FIP Model Code 1990:Design Code[S].London:Thomas Telford Limited,1993.
- [17] 董振英,李庆斌,王光纶,等.钢纤维混凝土轴拉应力-应变特性的试验研究[J].水利学报,2002(5):47-50.
- [17] DONG Zhen-ying,LI Qing-bin,WANG Guang-lun,et al.Experimental study on stress-strain characteristics of steel fiber reinforced concrete under axial tension[J].Journal of Hydraulic Engineering,2002(5):47-50.(in Chinese)