

基于 ICP 技术的炸药冲击波压力测定^{*}

朱满林 石成英 蔡星会 王效廉

第二炮兵工程大学(陕西西安,710025)

[摘 要] 采用由 137 型传感器、VXI 数据采集和计算机数据处理系统等组成的测定炸药自由场冲击波压力的高速动态测量系统,测得了某传爆药柱在空中爆炸时产生的空气冲击波超压曲线,并通过计算和数据拟合方法,得到了超压曲线、超压随时间变化的关系式以及不同条件下的峰值超压、正压作用时间等参数。实验表明:随着测点爆心距的增大,峰值超压递减,且测点爆心距越大,超压衰减速率越小。当爆心距为 0.6 m 时,超压值为 0.1143 MPa,而当距离为 1.2 m 时,超压值则为 0.0323 MPa。

[关键词] 冲击波 峰值超压 ICP 技术 测定

[分类号] TQ560.72 TJ510.6

引言

炸药在空中爆炸时产生空气冲击波,其峰值超压、正压作用时间、比冲量是炸药能量特性的重要参数,它们表征了冲击波破坏作用的大小。因此,这些参数的准确测量可以为武器研制过程中的爆炸类型判别、威力对比、性能评价等提供重要依据。

1 基于 ICP 技术的炸药冲击波超压测试系统

基于 ICP 技术的炸药冲击波超压测试系统主要由 137 型压电式压力传感器、VXI 数据采集系统、计算机数据处理软件、信号适配仪及起爆仪等组成。

137 型空气冲击波压力传感器是美国压电有限公司研制的自由场冲击波压力传感器,它以石英为敏感元件,内嵌集成放大电路技术,使信号能够长距离传输且受温度影响较小^[1]。

VXI 数据采集系统是整个冲击波超压测试系统的核心,它由 VXI—1010B 主机箱和 VXI—1115S20 4 通道 20 M/s 14Bit 高速并行数据采集模块组成。VXI—1115S20 模块主要由 VXI 总线接口、高速 A/D 转换器、模拟通道变换器、缓冲存储器、供电系统和触发电路组成。总体框图如图 1 所示。

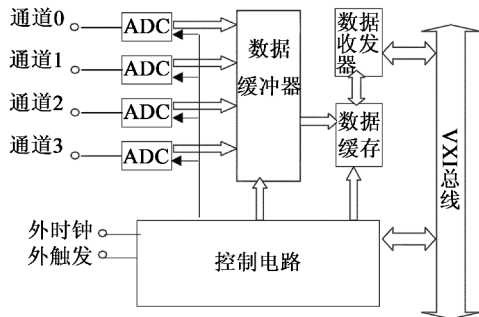


图 1 VXI—1115S20 总体结构框图

VIS 软件是将通用计算机与仪器硬件结合起来,在计算机上通过友好的图形界面来实现传统仪器的硬件功能与其软件功能的协调运作。VIS 可完成多种高级的信号分析和处理,包括:时域信号分析、信号脉冲参数分析、基于 FFT 的频域分析等,并可将采集到的原始数据存盘或从盘中读出分析。

482C50 型信号适配仪为标准的 ICP 型信号适配器,它提供适当的电流源以驱动 ICP 型压力传感器,包含 4 个独立采集通道,可控制 26V 直流电供给,以提供稳定的电流给每一个通道,并利用 BNC 连接器将输入与输出从仪器的背部连接起来^[2]。其主要作用是采集各通道相对应的初级爆炸信号,并将其放大,再经射频线将这些放大的信号送到各自相对应的 VXI—1115S20 模块中。

起爆仪用于起爆雷管。雷管被起爆后,引爆后续爆炸装置,以实现不同的爆破目的。

2 自由场爆炸冲击波重要参数的计算

2.1 峰值超压计算

峰值超压指波阵面压力或冲击波的峰值压力。目前已有不少学者对于 TNT 装药爆轰冲击波近场超压和传播规律及其经验公式进行了研究^[3-7],在此引用国家国防工程设计规范(草案)中提供的裸露 TNT 球形装药在空中爆炸时的经验公式^[8],即:

$$\Delta p = 0.082 (W^{1/3}/R) + 0.265 (W^{1/3}/R)^2 + 0.686 (W^{1/3}/R)^3 \quad (1 \leq R/W^{1/3} \leq 15) \quad (1)$$

式中: W 为炸药的质量,即炸药装药的 TNT 当量, kg; R 为测点距装药中心的距离, m。

^{*} 收稿日期:2011-12-27

作者简介:朱满林(1962~),男,硕士,高级实验师,主要从事战斗部工程技术研究。E-mail:zhml_stl@sina.com

适用范围： $H/W^{1/3} \geq 0.35$ ，其中 H 为装药爆炸时的高度 (m)。符合该条件的爆炸可以近似地认为是在无限空间中的爆炸。

2.2 正压区作用时间 τ_+ 的计算

正压区作用时间也称为冲击波正压持续时间，以 τ_+ 来表示，单位为 s，常用大量实验得到的经验公式^[9]计算：

$$\tau_+ = 1.5 \times 10^{-3} \sqrt{R} \cdot \sqrt[6]{W} \quad (R > 12R_0) \quad (2)$$

式中： R_0 为装药半径，m。

2.3 等效的 TNT 当量计算公式^[10]

$$W_T = W_i \frac{Q_i}{Q_T} \quad (3)$$

式中： W_i 为炸药的质量； W_T 为 W_i 折算的 TNT 当量； Q_i 为炸药的爆热； Q_T 为 TNT 的爆热。

3 测试原理

炸药爆炸时，冲击波强度很强，压力非常高，通常有几万个大气压，有些高能猛炸药甚至能达到几十万个大气压，一般只能通过转换测量目标来测得压力，即把压力信号转换成可供测量的其它信号。实验的冲击波超压测试系统原理如图 2 所示。炸药药柱被引爆后，放置在药柱附近的各传感器受到冲击波强大的压力冲击作用后会产生一系列压力信号，当该冲击波信号掠过敏感元件的工作面时，其装在传感器中的敏感元件石英晶体在压力作用下发生形变，内部产生“极化现象”，在垂直于电轴的表面产生电荷，再经内嵌于传感器中的集成放大电路放大而形成能被精确测量的电信号^[11]，这些电信号又被与传感器连接的 482C05 型信号适配器获得，再经 482C05 型信号适配器中的放大电路放大后，通过射频线进入 VXI—1010B 数据采集系统，该系统将这一系列电压模拟信号经过数据采集后，通过 IEEE1394 串行总线输送到装有 VIS 数据采集软件的外部计算机进行处理，VIS 数据采集软件获得以电压为信号的波形图，通过软件可以读取不同时刻的电压值，再由传感器的灵敏度系数可计算出自由场某一位置处的峰值超压以及其它时刻的超压。

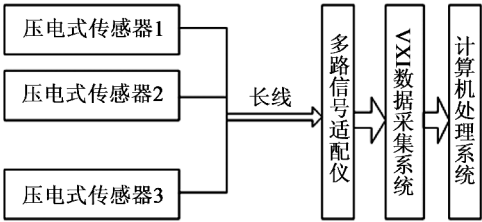


图 2 冲击波超压测试系统结构示意图

4 自由场冲击波参数的实验值处理

在外界信号的干扰下，原本平滑的压力—时间

曲线上会出现许多毛刺，为此可采用曲线拟合的方法，得出光滑的曲线以及曲线的函数关系式，这样就可以准确地求取峰值超压、正压作用时间和比冲量。

用拟合的方法处理曲线的过程如下：在波形窗口中选取适当的波形，保证图形中包含有超压峰值第一次衰减到零点之间的所有点，然后点击面板中的波形文件保存波形数据；再用 Excel 处理数据，使时间和电压的数据分离开；最后用 MATLAB 进行曲线拟合，由于曲线走势与指数函数走势相似，所以可选取指数拟合，在这里选用带修正因子的指数方程，形式如式(4)^[12]：

$$p(t) = a(1 - t/\tau_+)e^{-ct/\tau} \quad (4)$$

式中： $p(t)$ 为某一时刻冲击波波后压力值； t 为时间； a 为峰值超压修正系数； c 为衰减指数； τ 为超压时域脉冲宽。经 MATLAB 指数拟合后得到如图 3 所示的冲击波波后压力—时间曲线。

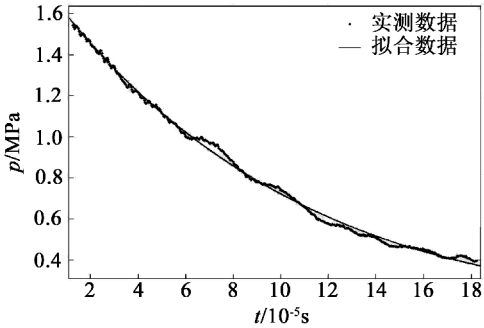


图 3 拟合后的冲击波超压衰减曲线

其函数关系式为：

$$p(t) = 1.58026(1 - 0.00252768t)e^{-0.2028t} \quad (5)$$

式中： a 、 c 、 τ 由 MATLAB 计算给出。由式(5)得某一测点压力随时间变化的关系式：

$$p(t) = a(1 - t/\tau_+)e^{-ct/\tau/k} \quad (6)$$

$$p(t) = 0.11518(1 - 0.00252768t)e^{0.2028t} \quad (7)$$

令(7)式中 $p = 0$ ，可以得到 $t = 395.62 \times 10^{-5}$ s 时，冲击波波后压力为零。

5 不同的条件下，峰值超压、正压作用时间的理论值和实验值

实验对象是对以太安为主要成分，加有少量钝感剂，直径 20mm，高度 20mm 的某专用传爆药柱。

相同条件下，在相同测点爆心距（测试取值为 0.6 m）、相同爆高（测试取值为 1.3 m）的传爆药柱上测得的超压、正压作用时间的实验值与计算值，列入表 1。由数据可以看出，自由场中测点的超压峰值测量误差很小，由实验拟合后的函数关系式计算出的正压作用时间 τ 与经验计算基本相符，说明该系统所测的超压值数据比较可靠。

表 1 相同条件相同测点爆心距测得的
峰值超压 Δp 、正压区作用时间 τ_+

W_i/g	W_{TNT}/g	$\Delta p/MPa$		τ_+/ms	
		计算值	实验值	计算值	实验值
9.11	13.00	0.1141	0.1143	0.5634	0.5834
9.11	13.00	0.1141	0.1152	0.5634	0.5439
9.13	13.03	0.1143	0.1128	0.5636	0.5975
9.10	12.99	0.1140	0.1139	0.5633	0.5230
9.11	13.00	0.1141	0.1145	0.5634	0.5567
9.12	13.01	0.1142	0.1134	0.5635	0.6120
9.13	13.00	0.1141	0.1125	0.5634	0.4938
—	—	$\Delta \bar{p} = 0.1138$		$\bar{\tau}_+ = 0.05586$	
—	—	$S_p = 0.0010$		$S_{\tau_+} = 0.0421$	

相同条件下,爆高均为 1.3 m 时,传爆药柱在不同测点爆心距上峰值超压的实验值和计算值见表 2。

表 2 相同药量下不同测点爆心距的峰值超压

W_i/g	R/m	W_{TNT}/g	$\sqrt[3]{W_{TNT}}/R$	$\Delta p/MPa$	
				计算值	实验值
9.11	0.55	13.00	0.4275	0.1371	0.1342
9.11	0.60	13.00	0.3919	0.1141	0.1143
9.13	0.90	13.03	0.2615	0.0518	0.0498
9.10	1.00	12.99	0.2350	0.0428	0.0431
9.11	1.20	13.00	0.1959	0.0314	0.0323
9.12	1.30	13.01	0.1809	0.0276	0.0263
9.13	1.50	13.03	0.1569	0.0220	0.0213

由表 2 中数据可知,随着测点爆心距的增大,峰值超压递减,且测点爆心距越大,超压衰减速率越小。这是由于冲击波球形波阵面传播时球面上的能量密度不断减小和波阵面不断对外做功以及不可逆的能量损失等因素造成的。

6 结论

由实验数据可以看出:随着测点爆心距的增大,峰值超压递减,且测点爆心距越大,超压衰减速率越小;对于相同条件下相同药量、相同测点爆心距而言,由实验拟合后的函数关系式计算出的正压作用

时间与经验计算基本相符,且实验数据的方差较小,说明该系统所测的超压值数据比较可靠。

由于常规的超压测试系统的响应速度太慢,对邻近炸药装药表面超压的准确测定很难实现。该测试系统由于采用了目前最先进的基于 ICP 技术压力传感器及其配套系统,对比较准确测量邻近炸药装药表面的超压会有一定的效果。

参 考 文 献

[1] PCB Piezotronics Inc. ICP Dynamic Pressure Sensor Installation and Operating Manual[M]. USA: 1998.

[2] PCB Piezotronics Inc. Manual 482C05 Series Installation and Operating Manual[M]. USA: 2002.

[3] Wu C. , Hao H. Modeling of Simultaneous Ground Shock and Air Blast Pressure on Nearby Structures from Surface Explosions[J]. Int. J Impact Eng. , 2005, 31 (6) : 699-717.

[4] Bulson P. S. Explosive Loading of Engineering Structures [M]. Abingdon :Spon,1997.

[5] 杨鑫,石少鑫,程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及其数值模拟[J]. 爆破,2008,25(1):15-19.

[6] 成凤生,宋浦,顾晓辉,等. TNT 装药爆炸波在刚性平面上方传播反射的数值研究[J]. 爆破器材,2011,40(4):1-4.

[7] 解立峰,韩志伟,王海洋,等. 民用炸药敏感度试验方法的研究与探讨[J]. 爆破器材,2011,40(2):8-10.

[8] 宁建国,王成,马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2010:113-115.

[9] 姚熊亮,刘向东,庞福振,等. 球面加载法在航船舱室爆炸破坏环境中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报,2006,27(5):693-697.

[10] 张挺. 爆炸冲击波测量技术[M]. 北京:国防工业出版社,1984:5-13.

[11] 孔惠萍. 压电式传感器、VXI 总线采集系统测试爆炸物冲击波研究[J]. 传感器世界,2005,11(5):14-16.

[12] 程祥,杨明,郭亚丽,等. 修正的 Friedlander 方程指数衰减因子[J]. 爆炸与冲击. 2009(4):425-428.

Shock Wave Pressure Measurement of Explosive Based on ICP Technology

ZHU Manlin, SHI Chengying, CAI Xinghui, WANG Xiaolian

The Second Artillery Engineering University (Shaanxi Xi'an, 710025)

[ABSTRACT] This article introduced a high speed dynamic system composed of a type 137 sensors, a VXI data acquisition and a computer data processing, which could be used to measure explosive shock wave in the free field. With calculation and the data fitting method, the super pressure curve, the relationships about overpressure changing with the time, and parameters of the peak overpressure duration and specific impulse in different conditions could be obtained. The experimental results indicate that the peak overpressure is reduced with the increase of distance between measuring point and exploding point, and the further the distance, the less the decay rate of overpressure. The overpressures are 0.1143 and 0.0323 MPa when the distances are 0.6 and 1.2 m, respectively.

[KEY WORDS] shock wave, peak overpressure, ICP technology, measurement