

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.06.012

# 炸药爆速的连续测量技术研究\*

王宇新 李晓杰 闫鸿浩 王小红

大连理工大学工程力学系(辽宁大连,116024)

**[摘 要]** 爆速是研究炸药性能的重要指标,虽然传统的爆速测量方法操作简单,但是由于测量点少、精度低,经常无法采集到有效的数据,而且也很难反映出炸药在整个爆轰过程中爆速的变化。为了弥补目前炸药爆速测量的缺陷,提出一种爆速的连续测量技术,采用高速数据采集与连续电阻丝探针相结合的方法来测试水下爆炸、工程爆破、爆炸焊接等工况下的各种炸药爆速,爆轰行程每米测量点数为2.5万,测量范围从50 m/s到10 000 m/s,测量精度可以控制在小于1.0%,通过数学拟合算法和编制程序对测量数据信号进行图形可视化分析,并绘制出连续行程-爆速分析曲线,可以满足不同形式炸药爆速测量的试验研究。

**[关键词]** 炸药爆轰;爆速;信号处理;连续电阻丝法

**[分类号]** O384

## Study on Continuous Testing Technology of Detonation Velocity of Explosives

WANG Yuxin, LI Xiaojie, YAN Honghao, WANG Xiaohong

Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology (Liaoning Dalian, 116024)

**[ABSTRACT]** Detonation velocity is an important parameter to study the performance of an explosive. Although traditional testing methods and instruments for detonation velocity are very simple to operate, the valid data could hardly be collected because of few data acquisition points and low testing precision. They are difficult to describe the change of detonation velocity for whole sliding detonation process. To compensate for defects of the previous measurement methods, continuous testing technology of detonation velocity was proposed by using of high-speed data acquisition and continuous resistance wire. The testing technology could be applied to test the underwater explosion, rock blasting, explosive welding and other detonation projects. The new method has measuring points as high as 25 thousand per meter, detonation velocity measurement range of from 50 m/s to 10 000 m/s, and controlled test accuracy within 1.0%. Visual analysis on the measurement data signal was reached by data fitting and computer program, and curve of detonation velocity was presented. It could satisfy the experimental research on detonation velocity measurement of different kinds of explosive.

**[KEYWORDS]** detonation of explosives; detonation velocity; signal processing; continuous resistance method

## 引言

在工程爆破和爆炸加工领域中,炸药作为含能材料被广泛地应用于矿山开采、隧道开掘、岩石破碎、爆炸焊接、爆炸成型等。在所有炸药性能参数中,爆轰速度是评估炸药性能的重要指标之一。除了不同的炸药种类和化学成分外,爆炸作业环境的温度与湿度、装药密度、装药直径、炸药混合组分以及布置炸药形式等都会直接影响炸药爆速,准确地

测量炸药爆速对工程施工和工业生产具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。目前,大多数企业仍然使用单段或多段爆速仪对标准直径炸药柱的爆速进行测量标定<sup>[4-6]</sup>,只能获得探针两点之间的爆速,而且经常出现测试数据不准确或者无法采集到数据的现象。在岩土工程爆破作业中,随着炮孔装药直径的变化,爆速也会有所变动。在大面积金属板材爆炸焊接生产中,炸药的装药厚度、装药密度以及处于板面不同位置时,爆速会存在着比较大的差别。如何获得连续多点爆速或者在爆轰行程长度内的连续爆速,这是采用传统爆

\* 收稿日期:2017-06-09  
基金项目:国家自然科学基金资金资助(11672067)  
作者简介:王宇新(1972-),男,副教授,博士,从事爆炸冲击动力学研究。E-mail:wyxphd@dlut.edu.cn  
通信作者:李晓杰(1963-),男,教授,博士,从事爆炸冲击动力学研究。E-mail:dalian03@qq.com

速测量方法难以解决的问题。

笔者提出了一种连续电阻丝与高速数据采集器相结合的爆速测量方法,并研制开发了 DVP-I 型爆速连续测量仪,该爆速测量仪适用于工程爆破的炮孔装药以及爆炸焊接和爆炸成形的大平面装药形式,工程技术人员可以有效地开展炸药多点爆速连续测试的研究,对于炸药行程长度 10 m 的连续多点爆速,采集记录爆速数据点数可高达 25 万,与目前双探针和多段爆速测量仪相比,具有抗干扰性强、数据采集精度高的优点,并且可应用高阶多项式曲线拟合算法对采集数据进行图形可视化处理,通过图形曲线对多点爆速信号在行程长度内的变化趋势实现比较直观的分析。

本文中,对爆速的连续测量方法、采集数据多项式曲线拟合算法和爆速连续测量试验技术进行阐述;同时,使用不同长度的连续电阻丝探针测量锥形圆筒装药和金属爆炸焊接平板装药的炸药爆速,通过对爆速数据和爆速曲线的分析,研究炸药的爆轰特性。

## 1 炸药爆速的连续测量原理

工业炸药爆轰速度一般在 1.5 ~ 7.0 km/s,黑索今爆速则可以高达 9.0 km/s 以上,爆速连续测量技术关键在于如何连续高速地采集炸药滑移爆轰信号。笔者提出连续电阻丝法测量炸药爆速的方法,首先介绍一下爆速测量的工作原理。

图1为炸药爆速的连续测量技术的工作原理。炸药爆速一般为每秒几千米,而且在爆轰过程中还可能产生电离杂波信号,这就要求数据采集模块具备足够高的采样率和抗干扰能力。其中,直流电源采用电压  $V_0 = 12\text{ V}$  锂电池,  $R_1$  分压电阻为  $300\ \Omega$ ,高速数据采集模块的采样率为  $80\text{ M/s}$ ,  $R_2$  为电阻  $200 \sim 300\ \Omega$  的连续电阻丝探针,电阻率  $\rho$  为 343

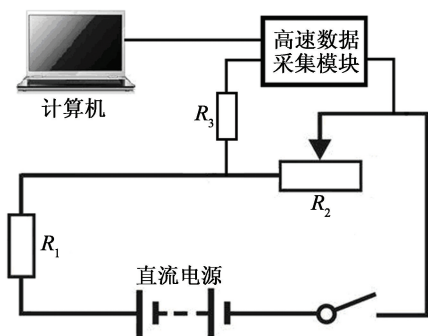


图1 爆速连续测量工作原理

Fig. 1 Principle of continuous detonation velocity testing

$\Omega \cdot \text{m}$ ,  $R_3$  为连接探针与高速采集模块的同轴电缆电阻,100 m 同轴电缆电阻为  $9\ \Omega$ 。炸药爆轰的推进使得探针电阻连续导通,导通后的  $R_2$  阻值不断地减小,高速数据采集模块则连续地记录  $R_2$  电阻两端的电压信号的变化值  $V_i$  和数据采集的时间长度,并实时地将这两组数据存储在计算机硬盘上。接下来就需要将因探针电阻变化的电压数据信号转换为滑移爆轰的行程长度  $X$ ,具体的计算公式如下:

$$X = \frac{R_2 + R_3}{\rho} - \frac{R_1 \times V_i}{(V_0 - V_i) \times \rho} \quad (1)$$

这样,采集的电压值就转换为离散时间与行程长度的数据集合。最后,还要对这组数据进行多项式曲线拟合计算,才能获得爆速测量值。

## 2 数据曲线多项式拟合算法

为了获得整个行程长度的平均爆速以及在不同时间和行程位置的炸药爆速,就需要对采集到的数据进行拟合,通过最小二乘法多项式曲线拟合,获得行程与时间的多阶曲线方程<sup>[7-8]</sup>。然后,对曲线方程求导,便可以得到某点爆速和随时间变化的连续爆速曲线。下面对最小二乘法多项式曲线拟合算法加以介绍。

假设给定  $N$  个数据点  $(x_i, y_i)$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, N$ , 求出一条数学曲线方程  $y = f(x)$ , 并不要求这条曲线精确地经过这些数据点,只是一条近似趋势性的曲线。为了能求得该近似曲线  $y = f(x)$ , 要计算离散数据点的真实值  $y_i$  与近似曲线的计算值  $\hat{y}_i$  的偏差,基于偏差  $e_i = |y_i - \hat{y}_i|$  最小原则来求这条近似拟合曲线。最小偏差原则有以下 3 种形式<sup>[9]</sup>:

- 1) 所有数据点的偏差绝对值之和最小;
- 2) 所有离散数据点与近似曲线计算值最大偏差的绝对值最小;
- 3) 所有离散数据点与近似曲线计算值的所有偏差平方和最小。

通常,多项式数学曲线方程拟合按偏差平方和最小原则来求得,这也称为数学曲线拟合的最小二乘法。具体算法就是对于给定  $N$  个离散数据点  $(x_i, y_i)$ , 假定多项式拟合曲线方程为

$$y = \sum_{j=0}^m a_j x^j \quad (2)$$

使所有离散点的偏差计算总和最小,即

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - \sum_{j=0}^m a_j x_i^j)^2 \quad (3)$$

这样,  $Q$  就可以被看成是关于多项式拟合曲线系数  $a_i$  的多元函数,拟合多项式曲线方程就归结为

多元函数求极值问题,即由

$$\frac{\partial Q}{\partial a_k}=0(k=0,1,2,\cdots m)$$
 (4)

得到

$$\sum_{i=1}^N(y_i-\sum_{j=0}^ma_ix_i^j)x_i^k=0(k=0,1,2,\cdots,m)。$$
 (5)

这样,将式(5)转换为如下线性方程组:

$$\begin{cases} a_0N+a_1\sum x_i+\cdots+a_m\sum x_i^m=\sum y_i; \\ a_0\sum x_i+a_1\sum x_i^2+\cdots+a_m\sum x_i^{m+1}=\sum x_iy_i; \\ \vdots \\ a_0\sum x_i^m+a_1\sum x_i^{m+1}+\cdots+a_m\sum x_i^{2m}=\sum x_i^my_i。 \end{cases}$$
 (6)

这个线性方程组也是正则方程组,通过该方程组的多项式系数  $a_i$  就可以获得拟合曲线数学方程式; $m$  取值并非越大越好,在一般情况下  $m\leqslant 9$  比较合理,如果取值太大的话,那么线性方程组的解有可能是病态的,尤其连续测量炸药爆轰速度的电压数据信号存在着一些干扰杂波信号,拟合曲线方程阶数过高,将导致爆速拟合计算值偏差值出现奇异<sup>[10]</sup>。

3 爆速连续测量仪设计

为了满足工程爆破和爆炸加工的需要,根据炸药爆速连续测量技术原理,设计了爆速测量仪以及爆速连续测量用的电阻丝探针。爆速连续测试系统的硬件包括:电压 12 V 可充电锂电池、80 M/s 高速采集卡、分压电阻、连续电阻探针和同轴电缆等,其他附件还包括配套的 USB 数据线、笔记本电脑以及实时显示锂电池电源电压的数字显示板,当锂电池的电压低于 7 V 时,需要对锂电池充电。爆速连续测量仪箱体与操作面板如图 2 所示。

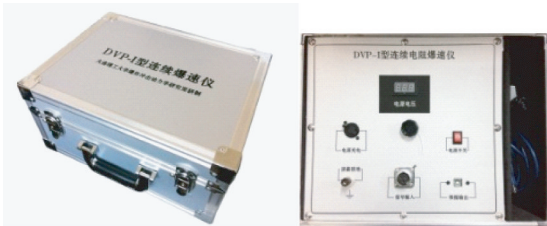


图 2 爆速连续测量仪

Fig. 2 Instrument for continuous detonation velocity testing

爆速连续测量仪的技术指标及其具体内容如表 1 所示。

在爆速连续测量系统中,连续电阻丝探针是重要的传感器部件,是一种专门为测量炸药爆速和冲

表 1 爆速仪的技术指标及其参数

Tab. 1 Technical parameters of detonation velocity testing instrument

技术指标	具体内容
通道数量	1 个 VOD 通道
垂直分辨率	12 位
模拟带宽/ MHz	20
充电电压/V	100 ~ 240
灵敏度/V	0. 01 ~ 20
DC 精度	全量程的 1%
最高采样率/( M · s <sup>-1</sup> )	80
时基/ms	0. 000 1 ~ 0. 2
时基精度	50 × 10 <sup>-6</sup>
触发类型	上升沿、下降沿
电源	内部可充电 12 V 锂电池
工作环境	0 ~ 40 ℃, 注意防潮

击波速度而设计的精密探头,它是由螺纹金属钢丝和漆包电阻丝组成的传感器核心元件,电阻丝电阻率为 173. 5 Ω · m,连续电阻丝探针外面包着绝缘层和屏蔽层,如图 3 所示。

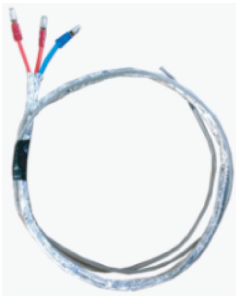


图 3 连续电阻丝探针

Fig. 3 Continuous resistance wire probe

测量原理是在爆轰波或冲击波压力作用下,连续导通漆包电阻丝与金属钢丝,整根探针形成电阻丝与金属钢丝连续可变的电阻回路,其两端电压发生相应连续变化,这样就由爆速仪高速数据采集模块记录电压-时间数据,通过式(1)计算,就可以得到行程位移与时间曲线,最后再对行程位移-时间拟合曲线方程进行求导,便能得到炸药的连续爆速。连续电阻丝探针可以根据不同测量对象设计不同长度,利用同轴电缆与爆速仪连接,炸药起爆后连续电阻丝探针开始连续导通,采集的电压信号数据就实时地记录在笔记本电脑内存中。

为了对炸药爆速的测量数据进行可视化分析,还配套开发了爆速的连续测量数据处理软件系统,如图 4 所示。



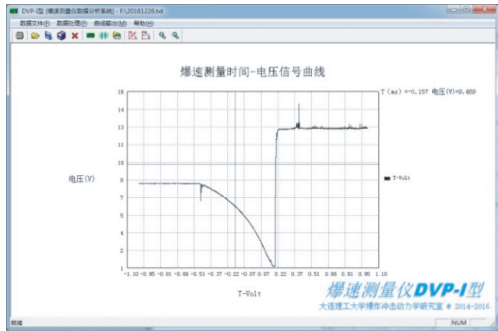


图 4 爆速测量仪数据分析软件

Fig. 4 Analysis software of detonation velocity testing instrument

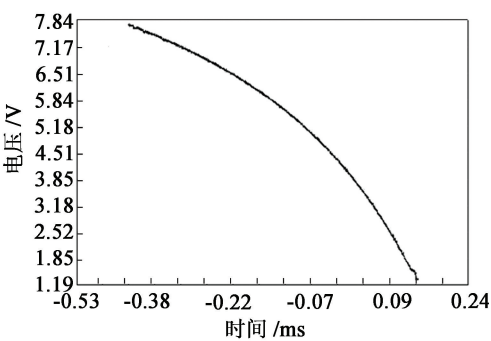


图 5 纯铵油炸药爆轰电压-时间曲线

Fig. 5 Voltage-time curve of AN explosive

4 连续爆速测试实例

应用爆速的连续测量技术,可以测量不同装药厚度和装药密度的平板爆炸焊接的炸药连续滑移的爆轰速度,还可以测量工程爆破炮孔装药的爆速。以爆炸焊接平板装药为例,测试连续行程长度的炸药爆速。同时,对锥形圆筒装药的爆速进行测量,可以分析岩土爆破的炮孔最小熄爆直径。为此,下面将对这两种试验测试的工程案例加以阐述分析。

4.1 爆炸焊接平板装药的爆速测试

在金属爆炸焊接工程中,炸药爆速是决定金属复合板质量和复合率的关键参数,如何准确地调制炸药以及测量滑移爆轰速度就显得尤为重要。在标准直径纸卷炸药柱上,采用传统两点探针法获得的爆速测量值与爆炸焊接的平板装药的爆速存在着很大的差别,而且两点探针法测量获得的爆速仅代表小段炸药的爆速,不同位置 and 不同装药厚度的炸药爆速会有很大的变化。为此,通过两个具体爆炸焊接工程实例,采用本文中的爆速测量技术和数学曲线拟合方法,对平板爆炸焊接不同组分炸药的连续爆速进行测量分析。

在各种金属爆炸焊接工程中,炸药一般采用膨化铵油炸药,对于出厂的纯铵油炸药都要测量爆速。假设纯铵油炸药的平板装药厚度为 38 mm,装药密度为 800 kg/m<sup>3</sup>,试验钢板长度为 2.5 m,宽度为 0.5 m,连续电阻探针长度为 2.0 m,探针从尾端沿着板面的中间位置纵向拉直,埋入铵油炸药中,埋深为 20 ~ 25 mm,在另一端电雷管起爆,爆速测量仪采集的电压-时间变化曲线如图 5 所示。经过 9 阶多项式曲线拟合计算,得到爆速-行程距离曲线,爆速测量值为 2 996 ~ 3 108 m/s,如图 6 所示。

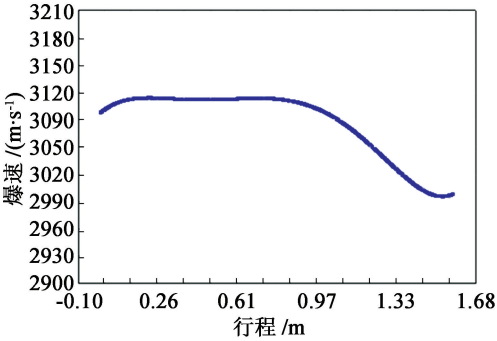


图 6 纯铵油炸药爆速-行程曲线

Fig. 6 Detonation velocity-distance curve of AN explosive

在金属爆炸焊接中,生产不同金属复合板材通常要对铵油炸药重新配制组分,以满足合理的爆速的需要。当需要降低铵油爆速时,需要添加珍珠岩、工业盐或矿石粉等,不同组分和配制比例的炸药,其爆速将发生变化,必须通过爆速仪测量。假设在爆炸焊接中使用的炸药为 50% (质量分数) 矿石粉调配的膨化铵油炸药,装药密度为 850 kg/m<sup>3</sup>,装药厚度为 55 mm。试验钢板长度为 2.5 m,宽度为 0.5 m,连续电阻探针长度为 2.0 m,探针从尾端沿着板面中间位置纵向拉直埋入铵油炸药中,埋深为 30 ~ 35 mm。炸药起爆以后,爆速测量仪采集的电压-时间变化曲线如图 7 所示。由于电压信号中存在着杂波干扰信号,在多项式曲线拟合计算中还进行了滤波处理,最后得到了爆速-行程距离曲线,爆速测量值为 2 095 ~ 2 178 m/s,如图 8 所示。

通过两个平板爆炸焊接炸药爆速测量结果可知,除了炸药装药密度、炸药调配组分和装药厚度影响爆速外,在平板不同位置,炸药的爆速也会有所不同,这是由于布药过程中很难保证装药密度和调配组分完全均匀化。

4.2 锥形圆筒装药的爆速测试

在岩土工程爆破中,岩土作业面首先要打一定深度和直径的炮孔,然后再向炮孔内填装炸药,炸药

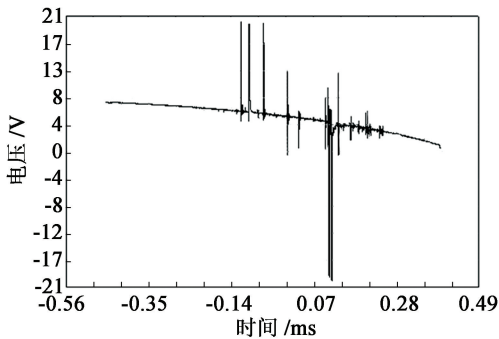


图 7 配制铵油炸药爆炸电压-时间曲线

Fig. 7 Voltage-time curve of prepared AN explosive

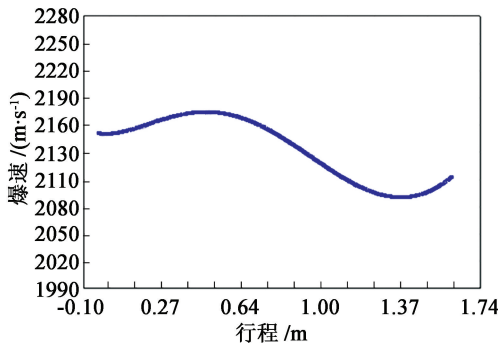


图 8 配制铵油炸药爆速-行程曲线

Fig. 8 Detonation velocity-distance curve of prepared AN explosive

装药密度和炮孔的装药直径对炸药爆速会产生比较大的影响,如果炮孔直径或者装药直径小于某个数值时,炸药可能会产生熄爆的现象,这个直径就称为炸药的熄爆直径。如何确定这个熄爆直径,可以利用锥形圆筒装药,锥形圆筒左端面直径为 60 mm,长度为 800 mm,连续电阻丝探针穿过锥形圆筒中心线,并保持拉直状态,锥形圆筒装药爆速测量的试验模型如图 9 所示。

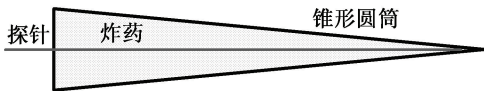


图 9 锥形圆筒装药试验模型

Fig. 9 Experimental model of conical charge

将调配 10% (质量分数) 珍珠岩的铵油炸药填充到锥形圆筒内,在锥形圆筒左侧中心起爆,随着炸药爆轰不断地推进,炸药圆筒直径减小,爆速会逐渐减小,直至完全熄爆。通过爆速测量,获得的电压-时间曲线如图 10 所示。由于炸药在锥形圆筒内爆炸速度变化较大,将电压-时间曲线划分为 5 段,然后对每段曲线利用 6 阶多项式曲线拟合,这样使得爆速计算精度更高,锥形圆筒装药爆速-行程曲线如

图 11 所示。

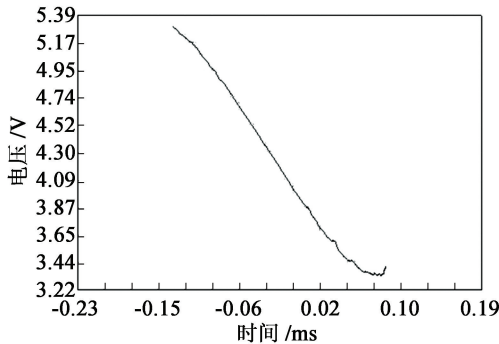


图 10 锥形圆筒装药电压-时间曲线

Fig. 10 Voltage-time curve of conical charge

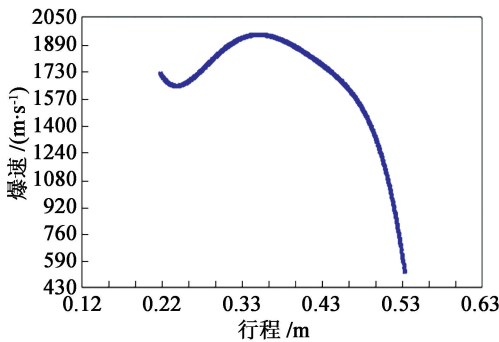


图 11 锥形圆筒装药爆速-行程曲线

Fig. 11 Detonation velocity-distance curve of conical charge

接下来分析锥形圆筒炸药不同位置的爆速。根据爆速的变化趋势就可以确定炸药的熄爆直径,从图 11 的爆速变化曲线可知,在行程长度为 500 mm 位置,爆速为 1 240 m/s,而且后面曲线几乎为直线段,该位置炸药则可以认为已经到了熄爆状态,测量这个位置的圆筒直径,便能获得该种组分铵油炸药的熄爆直径。

## 5 结论

采用连续电阻丝探针与高速数据采集模块研制开发爆速连续测量仪,可以比较准确地记录各种炸药爆轰的连续爆速,这种爆速测试技术方法与其他单通道或多通道爆速仪相比具有以下 3 个优势:

- 1) 测量炸药连续爆速不受炸药爆轰距离限制,连续电阻丝探针可以是任意长度,这样就可以全面地测量炸药连续爆速,这是其他爆速仪所不具备的。
- 2) 炸药爆轰过程中,在起爆和爆轰波传播过程中会产生各种干扰信号或电离信号,采用单通道和多通道爆速仪可能会丢失部分测量数据,或者测量数据存在很大的偏差。而爆速连续测量仪只使用一

个通道就可以将探针测量长度范围内的数据信号全部记录下来,硬件模块本身具有很强的抗干扰能力,并且通过高阶多项式曲线拟合算法,可以将干扰杂波信号全部过滤掉,从而能准确地获得炸药不同位置的爆速。

3)除了可以测量炸药的连续爆速外,还能够通过分析炸药爆速的变化规律来确定炸药的熄爆直径以及殉爆距离等,这样可以更加全面地评测炸药性能。此外,还能测试炸药在水下爆炸冲击波的传播速度。

### 参 考 文 献

- [1] 徐森,唐双凌,刘大斌,等. 改性铵油炸药连续爆速实验研究[J]. 火炸药学报,2009,32(3):25-28.  
XU S, TANG S L, LIU D B, et al. Experimental study on continuous detonation velocity of modified ANFO [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(3):25-28.
- [2] 赵根,王文辉. 孔内炸药连续爆速测试新技术[J]. 工程爆破,2008,14(03):63-66.  
ZHAO G, WANG W H. New measurement technology of continuous detonation velocity of explosive in blasthole [J]. Engineering Blasting, 2008, 14(3):63-66.
- [3] 刘桂涛,吕春绪,曲虹霞. 超细 RDX 爆速和作功能力的研究与测试[J]. 爆破器材, 2003, 32(3):1-3.  
LIU G T, LÜ C X, QU H X. Study and test on detonation velocity and power of superfine RDX [J]. Explosive Materials, 2003, 32(3):1-3.
- [4] 高志强. 基于 FPGA 的新型单段光纤爆速仪设计[D]. 太原: 中北大学, 2012.  
GAO Z Q. Design of a new single fiber detonation velocity meter based on FPGA [D]. Taiyuan: North Central University, 2012.
- [5] 姜爱华,焦宁,王高,等. 新型高精度多段光纤爆速仪的设计磁[J]. 爆破器材,2013,42(6):29-31.  
JANG A H, JIAO N, WANG G, et al. Design of a new high-precision multiple fiber optical detonation velocity meter [J]. Explosive Materials, 2013, 42(6):29-31.
- [6] 王荣波,何莉华,田建华,等. 两种光纤探针在冲击波作用下的时间响应特征[J]. 高压物理学报, 2005, 19(3):284-288.  
WANG R B, HE L H, TIAN J H, et al. The time response character of two types of fiber-optic pin under shock wave loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(3):284-288.
- [7] 刘霞,王运锋. 基于最小二乘法的自动分段多项式曲线拟合方法研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(3):55-58.  
LIU X, WANG Y F. Research of automatically piecewise polynomial curve-fitting method based on least-square principle [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(3):55-58.
- [8] 张永涛,贾延明. 最小二乘法中代数多项式曲线拟合的分析及实现[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(4):637-639.  
ZHANG Y T, JIA Y M. Analysis and program implementation of least squares polynomial curve fitting [J]. Computer and Digital Engineering, 2017, 45(4):637-639.
- [9] 张继龙,甄蜀春,曹鹏,等. 实验数据的曲线拟合方法及其应用[J]. 测试技术学报, 2003, 17(3):255-257.  
ZHANG J L, ZHEN S C, CAO P, et al. Research and application of new method of curve fitting [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2003, 17(3):255-257.
- [10] 王能超. 计算方法:算法设计及其 MATLAB 实现[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2010.