

文章编号: 1006-9941(2012)03-0329-04

一种高精度爆速测量方法

孙永强, 何智, 王珺

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为精确测量炸药拟态爆速, 设计了尖形探针和相应的实验测量方法, 测量了有机玻璃、不锈钢、铝合金约束下片状 TATB 为基钝感炸药的拟态爆速, 结果为 $(7.527 \pm 0.017) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表明: 采用尖形电探针测量钝感炸药爆速的不确定度为 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对不确定度为 0.25%, 与洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)精密爆轰物理实验结果相当, 为精密爆轰物理实验提供了一种新的爆速测量方法。

关键词: 爆炸力学; 爆速; 电探针; 测量不确定度

中图分类号: TJ55; O384; TD172+.2

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.03.014

1 引言

爆轰波在炸药中的定常传播速度(简称爆速)是表征炸药性能的重要参数之一, 该参数一般采用电探针方法和高速摄影方法测量。电探针方法通常利用多个精细加工的短炸药段相接成长炸药柱, 在炸药段连接处布置电探针, 炸药起爆后, 电探针给出爆轰波到达信号, 并由示波器记录, 线性回归爆轰波传播距离和时间即得到该炸药的拟态爆速。利用高速扫描相机, 记录爆轰波沿炸药传播方向的发光轨迹, 画出爆轰波传播距离-时间曲线, 进行线性回归得到爆速^[1]。

电探针方法简单、精度高, 是爆速主要测量方法, 但这种方法需要在炸药段之间嵌入电探针, 对爆轰波流场有干扰, 影响爆轰波的定常传播。目前研究认为: 对于敏感炸药, 由于炸药反应区短, 爆轰波传播的非理想行为很小, 嵌入的电探针对流场的影响可忽略不计; 对于以 TATB 为基的钝感炸药, 由于反应区宽, 爆轰波传播的非理想行为明显, 嵌入的电探针对流场的影响难以忽略。因此, 近年来国内外对钝感炸药拟态爆速的测量均不再采用嵌入电探针的方法, 而采用外置式电探针。外置式电探针在测量炸药爆速时, 通常在 8~10 mm 的距离范围内布置一个电探针, 采用对称布置的方式, 一次试验可以得到数十个电测信号, 采用

线性回归方法处理的数据也更精确, 降低了爆速测量不确定度, 达到精密试验的要求。国内外均采用外置式电探针测量钝感炸药的爆速, 为钝感炸药非理想爆轰波传播及爆轰冲击波动力学(Detonation Shock Dynamics, DSD)建模提供了重要的试验数据^[2-4]。

中国工程物理研究院流体物理研究所采用类似的测量技术研究了钝感炸药的直径效应, 获得拟态爆速随直径的变化关系, 加上高速摄影得到的拟态爆轰波形, 确定了钝感炸药速率效应参数, 加深了对钝感炸药爆轰波传播的非理想行为的认识^[5-6]。该实验所用的电探针是球头形的, 不易精确测量各电探针间的距离, 线性回归时发现爆速的标准误差稍大。为提高测试精度, 本试验设计了尖形探针, 通过精细的装配确保探针定位和绝缘, 采用显微工具确保电探针间距的高精度测量, 将拟态爆速测量的相对不确定度降低到 0.25%, 为拟态爆速的测量提供一种简单、精确的电子学测试技术。

2 爆速测量实验装置

高精度电探针测量爆速的实验装置主要由钝感炸药、传爆药、 $\Phi 100 \text{ mm}$ 平面波透镜、惰性介质、夹板、侧板等组成, 如图 1 所示。炸药为片状 TATB 基钝感炸药, 尺寸分为两种: 100 mm × 80 mm × 8 mm 和 100 mm × 80 mm × 10 mm。传爆药为 RDX 和 TNT 按一定比例制备的, 尺寸分别为: 100 mm × 10 mm × 8 mm 和 100 mm × 10 mm × 10 mm, 传爆药爆压与钝感炸药爆压相近, 以避免钝感炸药起爆不足或者形成

收稿日期: 2012-02-07; 修回日期: 2012-03-12

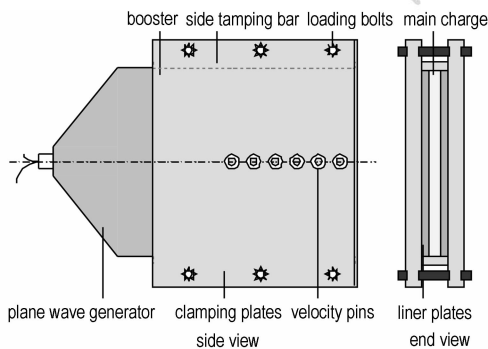
基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金(2007B01002)

作者简介: 孙永强(1974-), 男, 从事爆轰电子学测试研究。

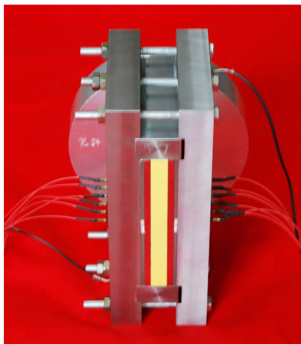
e-mail: sunyongqiang103@163.com

超压爆轰状态。夹板 2 块, 由 6 个螺栓连接(拧紧力矩为 2.2 Nm), 材料为 45 钢, 厚度为 20 mm, 确保在夹紧过程中不变形, 使惰性介质与钝感炸药之间紧贴, 受力均匀。侧板为 45 钢, 以减少爆轰波侧向稀疏。惰性介质厚 4 mm, 材料分三种: 有机玻璃、2A12 铝合金和 1Cr18Ni9 不锈钢。

平面波透镜起爆后, 在传爆药中形成平面爆轰波, 起爆传爆药后, 再起爆钝感炸药。钝感炸药的前端用于爆轰波的演化, 演化段长度不低于厚度的 5 倍, 以保证在测速段之前形成拟定态爆轰波。采用 24 路电探针测量爆速, 两边各对称布置 12 个, 电探针头部设计成尖形(图 2), 以保证探针间距的精确测量。



a. sketch map



b. object map

图 1 实验装置示意图

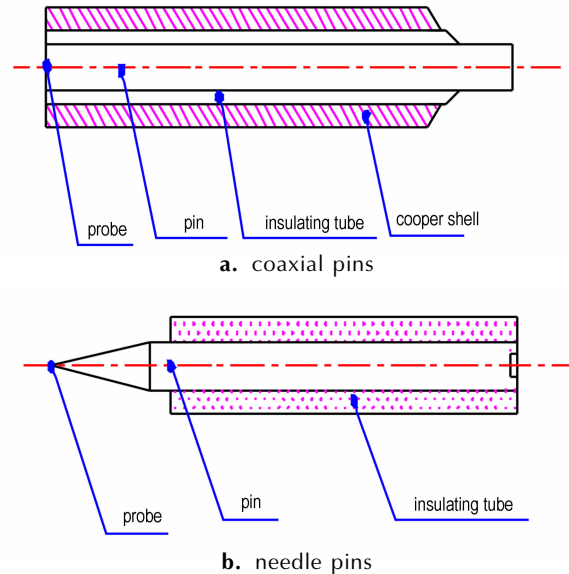
Fig. 1 Detonation confinement Sandwich test

3 电探针

3.1 尖形电探针制作

用于爆轰波速度测量的电探针主要是同轴电探针和光杆探针, 同轴电探针制作相对复杂, 它的主要原理是利用炸药的爆轰产物导电的特性, 将原来处于绝缘状态的两端导通, 示波器记录导通信号, 即为爆轰波到达时刻的时间信号, 如图 2a 所示。同轴式电探针用于炸药的精确爆速测量存在一定的缺点, 主要是因为电探针的敏感段为一个空气间隙, 难以精确测量相邻两个电探

针之间的距离。尖形电探针的结构如图 2b 所示, 其基本原理与光杆电探针相同, 具有简单的结构和较快的响应时间^[1]。尖形电探针的敏感段为一个尖点, 避免了因为空气间隙带来的电探针响应时间问题。其尖形结构的设计, 便于精确测量相邻电探针之间的距离。



a. coaxial pins

b. needle pins

图 2 电探针结构示意图

Fig. 2 Sketch map of electronic pins

在图 1 所示的实验装置中, 电探针安装时, 首先需要穿透金属夹板, 为了避免电探针侧壁与金属夹板之间相互接触, 使其提前导通, 我们设计的尖形电探针在侧面采用了有机玻璃套的方法, 确保电探针不与金属夹板接触。制作好待安装的电探针如图 3 所示。

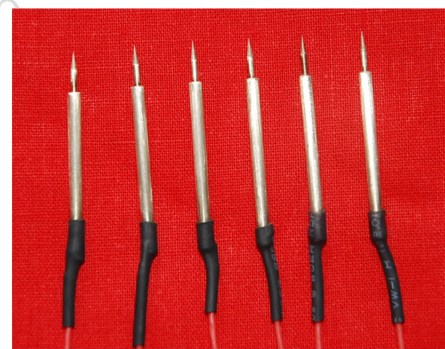


图 3 探针照片

Fig. 3 Photograph of electrical pins

3.2 电探针安装

本试验装置主要用于研究钝感炸药的爆轰波非理想传播以及爆轰波在有一定约束条件下的非理想传播特性, 因此为了不影响爆轰波与惰性介质之间的相互作用过程, 我们未在惰性介质上进行开孔, 而将电探针

安装在惰性介质表面。对于金属惰性介质,由于其本身具有导通性,因此需要在电探针和惰性介质之间垫上厚度为 20 μm 的绝缘膜。当冲击波到达惰性介质表面时,惰性介质膨胀向外运动,电探针刺破绝缘膜,使探针与被测物体之间导通产生电信号,即为爆轰波到达时间。当惰性介质为绝缘体 (PMMA) 时,在 PMMA 侧面镀金属膜,使之成为导体,电探针的安装方法与惰性金属相同。采用 24 路电探针测量钝感炸药爆速,两边各对称布置 12 个。将电探针安装在夹板上以后,采用力矩扳手对约束螺栓进行紧固,初步的研究结果表明:在本实验状态条件下,力矩扳手的力矩在 2.2 Nm 时,可以确保炸药和约束介质紧密接触且不会造成电探针刺破绝缘膜,且试验装置的受力约束

更均匀,安装在夹板上的电探针之间的距离采用精度为 0.02 mm 的光学显微镜进行测量。

4 实验结果

共进行了 6 发实验,线性回归试验得到的探针距离 x 和时间 t 数据,得到拟定态爆速,测量结果见表 1,表中拟定态爆速是两组探针测量结果的平均值,典型的探针 $x-t$ 数据及其拟合曲线见表 2 和图 4。从表 1 中可看出,爆速测量不确定度不超过 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对不确定度不超过 0.25%^[7]。美国 LANL 设计的精密“三明治”装置对片状 PBX-9502 炸药拟定态爆速的测量结果为 $(7.525 \pm 0.013) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4],本方法的测量精度与美国 LANL 的相当。

表 1 拟定态爆速测量结果

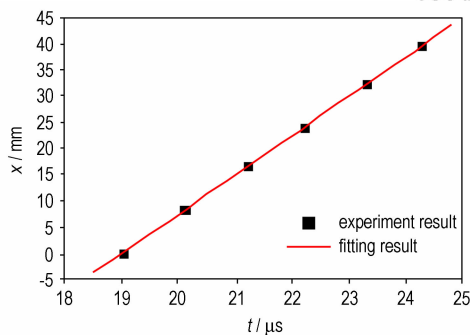
Table 1 Experimental result of steady detonation velocity

No.	thickness/mm	density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	constraint	detonation velocity/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	uncertainty/%
1	8.00	1.897	PMMA	7.527 ± 0.017	0.23
2	8.00	1.898	2A12	7.536 ± 0.014	0.19
3	8.01	1.905	1Cr18Ni9Ti	7.540 ± 0.012	0.16
4	10.02	1.899	PMMA	7.542 ± 0.019	0.25
5	10.01	1.904	2A12	7.569 ± 0.013	0.17
6	10.00	1.898	1Cr18Ni9Ti	7.552 ± 0.016	0.21

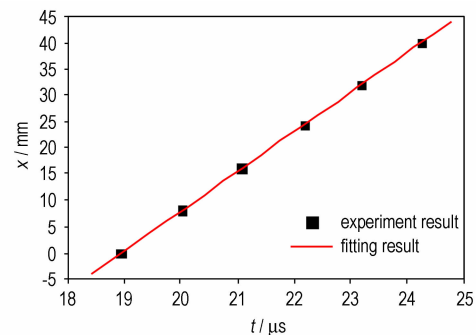
表 2 实验号 1 的拟定态爆速测量结果

Table 2 Experimental result of steady detonation velocity for No. 1

No. 1 electronic pins			No. 2 electronic pins			average detonation velocity / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
distance /mm	time / μs	detonation velocity / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	distance /mm	time / μs	detonation velocity / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	
0.00	19.038		0.00	18.926		
8.30	20.118		8.15	20.008		
16.60	21.22		16.15	21.057		
24.04	22.224	7.5217 ± 0.0226	24.38	22.175	7.5314 ± 0.0233	7.527 ± 0.017
32.34	23.325		31.93	23.174		
39.61	24.295		40.07	24.236		



a. No. 1 electronic pins



b. No. 2 electronic pins

图 4 实验号 1 的探针 $x-t$ 数据及拟合结果

Fig. 4 Experimental and fitting result of electrical pins at No. 1

5 结 论

采用本试验设计的尖形探针及测量方法测得片状TATB为基钝感炸药的拟定态爆速度为 $(7.527 \pm 0.017) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 测量相对不确定度为0.25%, 精度较高, 与LANL精密实验结果相当, 为精密爆轰物理实验提供了一种新的爆速测量方法。该方法优点是不影响爆轰波的传播, 可以精确测量探针间距, 缺点是难以解决探针绝缘问题。绝缘膜厚影响测量精度, 绝缘膜薄探针易漏电, 需仔细装配, 装配好后实验过程中也可能产生漏电现象, 不能测到有效数据。

参考文献:

- [1] 孙承伟, 卫玉文, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 216-219.
SUN Cheng-wei, WEI Yu-wen, ZHOU Zhi-kui. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 216-219.
- [2] Collyer A M, Dunnett J D, Swift D C, et al. WBL detonation wave propagation for EDC35 and EDC37[C]//Proceeding of Eleventh Symposium (International) on Detonation. Colorado. Office of Naval Research, 1997: 12-20.
- [3] Hill L G, Bdzil J B, Aslam T D. Front curvature rate stick measurements and detonation shock dynamics calibration for PBX 9502 over a wide temperature range [C] // Proceeding of Eleventh Symposium (International) on Detonation. Colorado. Office of Naval Research, 1997: 1029-1037.
- [4] Hill L G, Aslam T D. The LANL detonation - confinement test; prototype development and sample results [C] // Shock Compression of Condensed Matter. Portland, Oregon. American Institute of Physics, 2003: 847-850.
- [5] 谭多望, 方青, 张光升, 等. 钝感炸药直径效应实验研究[J]. 爆轰与冲击, 2003, 23(4): 300-304.
TAN Duo-wang, FANG Qing, ZHANG Guang-sheng, et al. Experimental study on the diameter effect for JB-9014 rate sticks [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(4): 300-304.
- [6] 谭多望, 方青, 张光升, 等. 常温下 JB-9014 钝感炸药的 DSD 参数研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(3): 161-166.
TAN Duo-wang, FANG Qing, ZHANG Guang-sheng, et al. Detonation shock dynamics calibration of JB-9014 explosive at ambient temperature [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(3): 161-166.
- [7] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007: 233-242.
LI Jin-mei. Theoretical Error and Evaluation of Uncertain in Measurement [M]. Beijing: China Metrology Press, 2007: 233-242.

A Precision Experimental Method of Measurement Detonation Velocity

SUN Yong-qiang, HE Zhi, WANG Jun

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The pin shape probe and corresponding experiment method was designed to measure the precision steady detonation velocity. The steady detonation velocities of sheet insensitive high explosive (IHE) based on TATB at the restricted by polymethyl-methacrylate, stainless steel and aluminum alloy were measured by needle shape pins, and the uncertainty of measurement velocity was analyzed. The result shows that the uncertainty of detonation velocity in IHE based TATB measurement using this method is not exceed $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the relatively uncertainty is not exceed 0.25%. Results are accordant with the precision detonation physics experiment result of Los Alamos National Laboratory (LANL). It is a high precision detonation velocity measurement method for precision detonation physics.

Key words: mechanics of explosion; detonation velocity; electricity probe; uncertainty in measurement

CLC number: TJ55; O384; TD172+.2 **Document code:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.03.014