

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.04.002

光纤结构参数对亚毫米沟槽装药 爆速测试的影响研究*

武 鹏^① 焦建设^② 胡 艳^① 王晓勇^① 吴立志^① 叶迎华^① 沈瑞琪^①

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②炮兵防空兵装备技术研究所(北京,100012)

[摘 要] 为了对亚毫米尺度 SY 共晶沟槽装药的爆速进行测试,采用光纤探针法设计了爆速测试系统,得到的信号稳定可靠,表明光纤探针法用于亚毫米沟槽装药的爆速测试是可行的。同时,为了研究光纤结构参数对爆速测试的影响,采用了 3 种不同结构参数的光纤进行试验。对爆速结果和信号参数进行数据分析可得:当光纤的数值孔径越大时,爆速测试的精度越高,信号的上升时间也越短,但对信号幅值基本没有影响;当光纤的芯径越大时,爆速测试的精度越高,信号的上升时间越短,信号的幅值也会增大。当光纤的数值孔径为 0.22 时,测试的精度最高,对应的爆速值为 4.68 mm/ μ s,标准方差为 0.12,平均相对误差为 1.88%。

[关键词] 光纤探针;沟槽装药;爆速;测试

[分类号] TJ450.6

引言

炸药的爆速是其爆轰性能最重要的参数之一。目前,各种炸药的爆速测试一般采用电探针法,其原理是利用爆轰时的强电离作用使电探针导通获得计时信号。该方法虽然简单方便,但易受到空间电磁场的干扰,在强磁环境下无法应用,且安装探针的间距需要大于某一最小值,否则会相互干扰,影响测试结果的准确性^[1]。北京理工大学的李晓刚等^[2]采用薄膜探针对沟槽尺寸在 0.6 mm × 0.6 mm 到 1.5 mm × 1.5 mm 之间的 HMX 装药的爆速进行了测试,但当测试对象尺寸减小到 1.2 mm × 1.2 mm 时,出现了测试失败的现象,原因是当爆轰威力减小时,电探针无法保证探测到电信号^[3],会出现探针无法导通的情况。而且,电探针法对微区流场的边界效应会导致测试精度的降低,因此不适合于亚毫米尺度微区爆速的测试。

近年来光纤探针法的出现为爆轰测试提供了新途径,其工作原理^[4]是利用光纤探针对光的传输功能,探测炸药爆轰时产生的光信号,并由测试仪器记录信号。中国工程物理研究院的王荣波等^[5]采用石英探针对 GI-920 炸药爆轰波阵面进行了测量,获得了波阵面的三维形状,信号的上升时间在纳秒级,

表明光纤探针技术是一种高精度的测试手段。另外,国内外的研究结果证明,光纤探针还可用于爆轰波速度或飞片速度等参数的测量^[6-8],解决了电探针易受电磁干扰、无法密集安装等问题。

光纤探针法在常规装药的爆轰参数测试中得到了广泛的应用,但是其在微小尺寸起爆装置和传爆序列微区爆轰参数测试中的应用还鲜有研究。本文设计了尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm 的 SY 共晶起爆药沟槽装药,采用光纤探针法对其爆速进行了测试,并研究了光纤的结构参数对爆速测试结果的影响。

1 光纤探针测速系统

光纤探针测速系统主要由光纤探针(由光纤和光电探测器组成)、高频电缆和示波器组成,测速系统的示意图如图 1 所示。

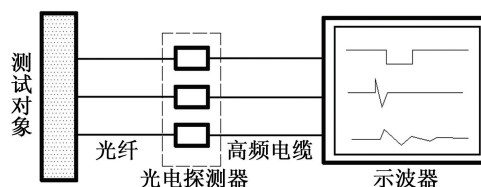


图 1 光纤探针测速系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detonation velocity measuring system equipped with optical fiber probe

* 收稿日期:2014-03-10

基金项目:总装预研项目

作者简介:武鹏(1988~),男,硕士生,研究领域为微区爆轰测试技术。E-mail:xingtaiwupeng@163.com

通信作者:胡艳(1977~),女,副研究员,研究领域为含能材料应用技术。E-mail:huyan@njust.edu.cn

光纤为 4 层结构,由内到外依次为纤芯、包层、涂覆层和紧套层。纤芯和包层为构成光纤的核心部分,形成对光信号的约束,实现光的传输,两者构成裸光纤。涂覆层是一层高分子材料,主要对裸光纤提供机械保护,提高其弯曲性能。紧套层是进一步提高光纤的耐环境性能。光纤的主要结构参数有芯径和数值孔径。芯径是指纤芯的直径(通光孔径)。数值孔径(NA)表示光纤能够接收的光的范围(光线入射角度范围),即收集光的能力^[9]。本试验采用的光纤的结构参数如表 1 所示。

表 1 光纤结构参数

Tab. 1 Structure parameters of optical fiber

编号	光纤型号	芯径/ μm	包层 直径/ μm	外径/ μm	紧套层/ μm	NA
1 [#]	SI 105/125- 22/250	105	125	250	900	0.22
2 [#]	SI 105/125- 15/250	105	125	250	900	0.15
3 [#]	SI 50/125- 12/250	50	125	250	900	0.12

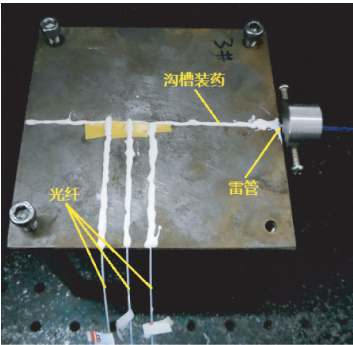
本文选取亚毫米尺度沟槽装药作为爆速测试对象。将亚毫米尺度沟槽装药设计在基板上,基板材料为普通 45[#] 钢,装药沟槽尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm。采用 SY 共晶起爆药作为沟槽装药,它是三乙二胺(TEDA)高氯酸盐和乙二胺(EDA)高氯酸盐的共晶化合物,具有爆速高、机械感度低的特点,该装药尺寸下最小稳定爆轰距离为 58 mm^[10]。利用压药模具将药剂压入沟槽中,装药密度为 1.04 g/cm³,为了使药剂更容易达到稳定爆轰,在药剂表面涂上一层硅橡胶。

光电探测器为 THORLABS 公司的 DET02AFC 型,其上升时间为 50 ps,探测的光信号波长范围为 400 ~ 1100 nm,可以满足爆轰测试的要求。示波器为力科公司的 44Xs 型示波器,其带宽 400 MHz,采样频率为 2.5 GHz。示波器与光电探测器之间采用高频电缆相连接,高频电缆的特征阻抗为 50 Ω。

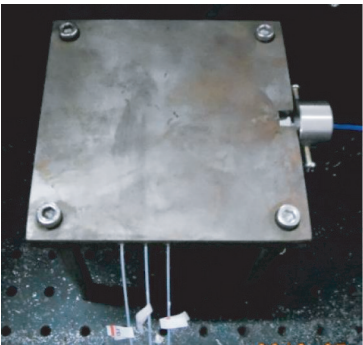
2 测试方法

光纤安装在沟槽基板上,在装药沟槽的一侧设计了 3 条间距为 10 mm 且垂直于装药沟槽的光纤安装沟槽,第一个光纤槽距起爆端为 60 mm。光纤的端面与沟槽装药紧密接触,然后用硅橡胶将光纤粘结固定。为了满足沟槽装药稳定爆轰的约束条件,需要在沟槽装药基板上加上一块盖板,盖板材料为普通 45[#] 钢,两者用螺钉固定。采用直径为 3 mm

的雷管对沟槽装药进行起爆。安装好的沟槽装药的实物照片如图 2 所示。



(a) 加盖板前



(b) 加盖板后

图 2 测试对象安装图

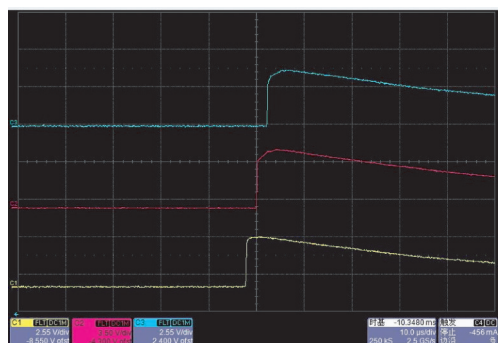
Fig. 2 Diagram of test object set-up

测试时将起爆电流作为示波器的触发信号,测试系统各部分连接完毕后起爆雷管,雷管将沟槽装药引爆,炸药爆轰时因强电离作用而产生强光,当爆轰波传播至光纤的位置时,光纤将光信号传输到光电转换器并被示波器记录。示波器记录的爆轰波信号如图 3 所示,图 3(a)为测得的初始信号,可以看出,当爆轰波传输到探针位置时,因为会有强光出现,信号首先是一个突越,然后随着爆轰波的衰减而逐渐降至基线位置,每个信号有一定的时间间隔,没有相互干扰的现象。两个探针的间距已知,则可以求出爆轰波阵面在两个探针之间的平均爆速。每进行一次试验,采用人工处理的方式处理光纤的端面,对测试信号进行数据处理,得到爆速、每个信号的上升时间和幅值,通过数据分析得出结论。

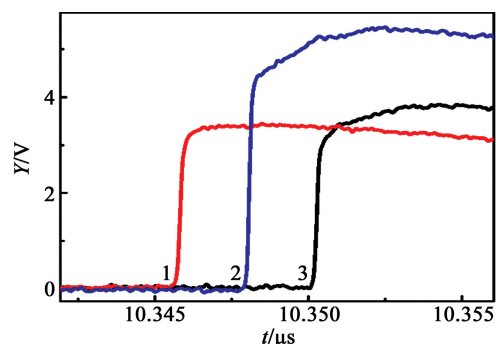
将数据导入 Origin 软件作图,便于数据读取。局部放大图如图 3(b)所示,图中 1、2、3 点的时刻是爆轰波到达每个光纤探针的时刻。

3 光纤结构参数对测试结果的影响研究

每种光纤进行 3 次试验,每次测试前采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺精确测量两个光纤之间的距离。每次试验时 SY 共晶起爆药沟槽装药的密度保持一致。3 种光纤的爆速测试结果如表 2 所示,



(a) 原始信号



(b) 局部放大信号

图 3 爆轰波信号

Fig. 3 Testing signal plot of detonation wave

表 2 中列出了每次的平均爆速和每种光纤 3 次测试的总平均速度。其中: t_1 代表爆轰波通过第一段的时间间隔; t_2 代表爆轰波通过第二段的时间间隔; D_1 代表爆轰波通过第一段的速度; D_2 代表爆轰波通过第二段的速度。

3.1 数值孔径对测试结果的影响研究

1[#] 光纤与 2[#] 光纤的芯径一样, 数值孔径不同, 将两种光纤的测试结果做数值孔径对测试结果影响的研究。

根据表 2 的测试结果, 1[#] 光纤 3 次试验的标准

方差 $S_1 = 0.12$, 平均相对误差 $\delta_1 = 1.88\%$; 2[#] 光纤 3 次试验的标准方差 $S_2 = 0.13$, 平均相对误差 $\delta_2 = 2.00\%$ 。从爆速的对比结果可知, 两者测得爆速基本相同, 但 $S_1 < S_2$, $\delta_1 < \delta_2$, 表明 1[#] 光纤测得的爆速不但精密度比 2[#] 光纤要好, 而且准确度也比 2[#] 光纤好, 因此数值孔径越大, 得到的结果的精度越高。

将 1[#] 光纤与 2[#] 光纤的信号的上冲时间和幅值进行对比。每次试验可得到 3 个信号, 3 个信号的平均值为该次测试的平均值。试验结果如表 3 和表 4 所示, 其中: t 代表信号的上冲时间; Y 代表信号的幅值; \bar{t} 代表每次的平均上升时间; \bar{t}_{all} 代表 3 次的平均上升时间; \bar{Y} 代表每次的平均幅值; \bar{Y}_{all} 代表 3 次的平均幅值。

光纤探针测速系统中, 信号的上冲时间由光纤探测器的上升时间、示波器和高频电缆的上升时间、光纤本身的上升时间组成。其中, 光电探测器的上升时间为皮秒级, 示波器和高频电缆的上升时间也在纳秒级, 而信号的上冲时间在微秒级, 因此, 信号的上冲时间主要取决于光纤的上升时间。从表 3 和表 4 可以看出, 1[#] 光纤测得的信号上升时间小于 2[#] 光纤, 说明数值孔径越大, 上升时间就越小; 而芯径主要影响在接收范围内光的平均光效应, 两种光纤芯径相同, 因此两者的信号幅值基本一样。

3.2 芯径对测试结果的影响研究

由于光纤制造技术的限制, 没有数值孔径相同、芯径不同的光纤可供选择, 因此只能选择数值孔径相近的光纤作为对比。试验中的 3[#] 光纤的芯径为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.12。2[#] 光纤的数值孔径为 0.15, 根据理论计算, 两种光纤在数值孔径上的差异很小, 可以认为两者的数值孔径相同。故将 2[#] 光纤和 3[#] 光纤用于芯径对测试结果的影响研究。

表 2 1[#]、2[#]、3[#] 光纤的爆速结果Tab. 2 Results of detonation velocity for 1[#], 2[#] and 3[#] optical fibers

光纤编号	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$	$D_1/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$D_2/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	平均爆速/ ($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	总平均爆速/ ($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)
1 [#]	2.35	2.20	4.40	4.69	4.55	4.68
	2.15	2.15	4.74	4.74	4.74	
	2.10	2.20	4.86	4.64	4.75	
2 [#]	2.10	2.15	4.86	4.77	4.81	4.69
	2.30	2.10	4.49	4.91	4.70	
	2.40	2.10	4.25	4.86	4.55	
3 [#]	2.30	2.20	4.48	4.69	4.59	4.73
	2.30	2.10	4.49	4.89	4.69	
	2.10	2.10	4.89	4.91	4.90	

表 3 1#光纤的信号参数

Tab. 3 Signal parameters of 1# optical fiber

序号	$t/\mu\text{s}$	$\bar{t}/\mu\text{s}$	Y/V	\bar{Y}/V	$\bar{t}_{\text{all}}/\mu\text{s}$	$\bar{Y}_{\text{all}}/\text{V}$
1	2.10		8.50			
	1.25	1.25	7.47	7.03		
	0.40		5.11			
2	2.40		8.17			
	0.35	2.09	7.92	8.09	1.38	6.34
	3.50		8.18			
3	1.50		4.81			
	0.40	0.73	4.92	3.91		
	0.30		2.01			

表 4 2#光纤的信号参数

Tab. 4 Signal parameters of 2# optical fiber

序号	$t/\mu\text{s}$	$\bar{t}/\mu\text{s}$	Y/V	\bar{Y}/V	$\bar{t}_{\text{all}}/\mu\text{s}$	$\bar{Y}_{\text{all}}/\text{V}$
1	3.10		9.84			
	2.50	2.70	7.15	8.56		
	2.50		8.68			
2	3.10		9.12			
	1.10	1.70	5.03	6.50	2.92	6.42
	0.90		5.28			
3	3.80		3.85			
	4.80	4.37	3.47	4.20		
	4.50		5.28			

从表 2 可以看出,3#光纤的 3 次试验的总平均爆速为 $4.73 \text{ mm}/\mu\text{s}$,与 1#、2#光纤的测试结果相差不大,经过计算可得标准方差 $S_3 = 0.16$,平均相对误差 $\delta_3 = 2.46\%$,与 2#光纤所测的结果对比, $S_2 < S_3, \delta_2 < \delta_3$,2#光纤的测试精度高于 3#,说明芯径越大,测试的精度也越高。

3#光纤的信号参数如表 5 所示。

通过与表 4 中 2#光纤的信号参数对比可知,信号的上升时间大于 2#光纤的上升时间,说明芯径越小,上升时间就越大,即响应速度慢;在信号幅值方面,3#光纤的平均幅值明显小于 2#光纤,说明芯径越小,信号的幅值也越小。

另外,在 3#光纤探针的 3 次试验中,第 1 次的光纤端面是经过机械处理的,机械处理的光纤端面更光滑平整,第 2、3 次试验的光纤端面是人工处理的,信号的幅值明显小于第一次试验。上述试验表明,当光纤的芯径为 $50 \mu\text{m}$ 时,人工处理光纤端面对信号幅值有一定的影响。

将 3 种光纤的试验结果整理如表 6 所示,其中:

表 5 3#光纤的信号参数

Tab. 5 Signal parameters of 3# optical fiber

序号	$t/\mu\text{s}$	$\bar{t}/\mu\text{s}$	Y/V	\bar{Y}/V	$\bar{t}_{\text{all}}/\mu\text{s}$	$\bar{Y}_{\text{all}}/\text{V}$
1	4.6		2.38			
	5.0	4.90	1.49	1.72		
	5.1		1.30			
2	4.1		0.43			
	4.3	3.70	0.44	0.50	3.83	0.94
	2.7		0.64			
3	2.5		0.57			
	3.8	2.90	0.62	0.60		
	2.4		0.62			

表 6 3 种光纤的试验结果

Tab. 6 Test results of three optical fibers

光纤编号	$\bar{D}_{\text{all-}i}/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	S_i	$\delta_i/\%$	$\bar{t}_{\text{all}}/\mu\text{s}$	$\bar{Y}_{\text{all}}/\text{V}$
1#	4.68	0.12	1.88	1.38	6.34
2#	4.69	0.13	2.00	2.92	6.42
3#	4.73	0.16	2.46	3.83	0.94

$\bar{D}_{\text{all-}i}$ 代表 3 次试验测得的平均爆速; S_i 代表 3 次试验的标准方差; δ_i 代表 3 次试验的平均相对误差; \bar{t}_{all} 代表 3 次试验信号的总平均上升时间; \bar{Y}_{all} 代表 3 次试验信号的总平均幅值; $i = 1, 2, 3$ 。

从表 6 可以看出,3 种光纤测得的爆速基本相同,但 1#光纤和 2#光纤测得的爆速值更为接近。当数值孔径越大时,测试结果的精度越高,信号的上升时间也越短,即响应速度快;当芯径越大时,不但测试结果的精度越高、上升时间越短,而且信号的幅值也越大。

该试验的光纤长度小于 6 m,光纤长度对响应时间的影响在长度小于 20 m 时可以忽略不计^[11],而数值孔径代表接收光的能力,芯径代表接受范围内的平均光效应。因此,当任何一个结构参数增大时,都会使光纤的响应速度变快,测试的精度也会相应地提高。同时,光纤芯径的大小也会影响信号的幅值,芯径越大,平均光效应就越大,得到的信号幅值也越大。

4 结论

本文设计了光纤探针法测试 SY 共晶起爆药的沟槽装药的爆速测试系统,结果表明光纤探针法可以用于亚毫米沟槽装药的爆速测试,信号可靠稳定。同时采用 3 种不同结构参数的光纤进行爆速测试,测得的爆速基本相同,但前两种光纤测得的爆速更

为接近。当芯径相同时,数值孔径越大,测得的结果的精度越高,上升时间越短,但对信号幅值基本没有影响;当数值孔径相同时,芯径越大,测试的精度和信号幅值越高,信号的上升时间越小。综上所述,3种光纤中 SI 105/125-22/250 型光纤的测试精度最高,对应的爆速值为 $4.68 \text{ mm}/\mu\text{s}$,标准方差为 0.12,平均相对误差为 1.88 %。

参 考 文 献

- [1] 盛永定. 光学纤维在爆轰测试中的应用[J]. 爆炸与冲击,1982(1):78-84.
Cheng Yongding. The application of optical fibers on the measurement of detonation [J]. Explosion and Shock Waves,1982(1):78-84.
- [2] 李晓刚,焦清介,温玉全. 超细钝感 HMX 小尺寸沟槽装药爆轰波传播速度的测试与分析[J]. 北京理工大学学报,2008,28(9):759-763.
Li Xiaogang, Jiao Qingjie, Wen Yuquan. A study on the detonation velocity of superfine insensitive HMX charged in small sized channels[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2008,28(9):759-763.
- [3] 李明明,李国新. 光纤在燃速及爆速测试中的应用[J]. 火工品,2000(3):13-16.
Li Mingming, Li Guoxin. Application of optical fibers for measuring combustion and detonation velocities [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2000(3):13-16.
- [4] 何慧灵,赵春梅,陈丹,等. 光纤传感器现状[J]. 激光与光电子学进展,2004,41(3):39-41.
He Huiling, Zhao Chunmei, Chen Dan, et al. Present status of optic fiber sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2004,41(3):39-41.
- [5] 王荣波,田建华,李泽仁,等. GI-920 炸药爆轰波阵面的光纤探针测量[J]. 火炸药学报,2006,29(2):7-9,14.
Wang Rongbo, Tian Jianhua, Li Zeren, et al. Measurement of detonation wave front of GI-920 by quartz fiber-optic pins[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2006,29(2):7-9,14.
- [6] George M J, Menikoff R, Vesser L R. The use of optical fibers for shock pressure and timing measurements at high pressures[R]. LA-11148-MS, 1988:1-33.
- [7] Roeske F. A fast rise-time, fiber optic pin[R]. International Detonation Symposium,1998:422-427.
- [8] Homae T, Moritoh T, Ooya K, et al. A simple fiber-optic pin for detecting a shock-wave front [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(11):4192-4194.
- [9] 赵仲刚,等. 光纤通信与光纤传感[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1993:4-6.
- [10] 王洪星. SY 起爆药线性装药技术及性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
Wang Hongxing. Study on linear charging technology and property with SY primary explosive [D]. Nanjing: Nanjing University Science & Technology,2013.
- [11] 李春花,叶玉堂,吴云峰,等. 光纤探针技术在冲击波参量测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展,2007,44(11):36-40.
Li Chunhua, Ye Yutang, Wu Yunfeng, et al. Application of optical fiber probe in shock-wave parameter testing[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2007,44(11):36-40.

Structure Parameter Dependence of Detonation Velocity of Sub-millimeter Groove Charge on Optical Fiber

WU Peng^①, JIAO Jianshe^②, HU Yan^①, WANG Xiaoyong^①, WU Lizhi^①, YE Yinghua^①, SHEN Ruiqi^①

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Equipment and Technologies Research Institute of FA and ADA (Beijing, 100012)

[ABSTRACT] A new testing system was designed according to optical fiber probe method to measure the detonation velocity of sub-millimeter eutectic SY groove charge. The stability and reliability of captured signal demonstrated that it was feasible for the optical fiber probe to be used in measuring the detonation velocity of sub-millimeter groove charge. And optical fibers with three different structure parameters were tested to study the effects of the structure parameters on the measured detonation velocities. Based on analysis of the experimental results, it can be concluded that the larger numerical aperture optical fibers leads to the higher precision of the detonation velocity, the shorter rising time of signal, but no obvious change in signal amplitude; the highest precision can be achieved at a numerical aperture of 0.22, which corresponds to a detonation velocity of $4.68 \text{ mm}/\mu\text{s}$, a standard deviation of 0.12, and an average relative error of 1.88%.

[KEY WORDS] optical fiber probe; groove charge; detonation velocity; test