DOI: 10.11883/bzycj-2017-0379 文章编号: 1001-1455(2018)03-0485-06

基于多普勒测速技术的 JB-9014 炸药反应区结构研究*

裴红波,黄文斌,覃锦程,张 旭,赵 锋,郑贤旭
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 为了解 TATB 基 JB-9014 炸药的爆轰过程,利用火炮驱动飞片加载,采用光子多普勒测速技术,对 JB-9014 炸药的爆轰反应区结构进行了实验研究。实验中利用火炮发射高速蓝宝石飞片冲击起爆被测炸药,在炸药后表面安装镀膜氟化锂(LiF)窗口测量炸药爆轰时的界面粒子速度,测试过程的时间分辨率小于 2 ns。将粒子速度剖面对时间进行一阶求导,通过一阶导数的拐点来确定炸药反应区宽度、反应时间。研究结果表明,钝感炸药 JB-9014 的反应时间为(0.26±0.02) μs,对应的化学反应区宽度为(1.5±0.2) mm,反应结束点处的压力为 27.3 GPa,von Neumann 峰处压力为 40.3 GPa。

关键词: 光子多普勒测速仪;JB-9014 炸药;氟化锂窗口;粒子速度;反应区结构
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

考虑反应区的炸药爆轰反应过程,一般利用 Zeldovich-von Neumann-Doring(ZND)模型进行描述。按照 ZND 模型,未反应炸药在先导冲击波作用下会迅速发生反应,爆轰前导冲击波阵面之后是一个压力迅速下降并且不随传播距离变化的定态反应区,接着是压力下降较慢的自相似非定态 Taylor 波,如图 1 所示。通过测量炸药的爆轰反应区可以获取较准确的爆压、von Neumann(VN)峰处的未反应冲击雨贡纽数据和高压下炸药的反应速率等信息,这些数据对炸药爆轰过程的精密建模以及武器的设计具有重要意义。为了测量炸药的爆轰反应区结构,已提出了很多方法,包括自由面速度法[1]、电磁粒子速度计法[2]、电导率法[3-4]、光电法[5-6]、激光干涉测速法[7-12]等。目前最常用的是激光干涉测量炸药爆轰产物界面粒子速度方法,该方法将界面粒子速度随时间的变化与 ZND 爆轰模型中的压力分布假设相对应,将速度曲线中出现的速率变化折点看作爆轰波结构中的 Chapman-Jouguet (CJ)点,从而得出爆轰反应结束时间,确定出爆轰反应区宽度,相比于其他方法,该方法物理过程较明确,速度和时间分辨率较高。以三氨基三硝基苯(1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene, TATB)为基的塑性粘结炸药,由于其良好的安全性能,在军事上获得了广泛的应用。不同于 HMX、RDX 这些理想炸药,TATB 炸药爆轰反应由于存在碳凝聚控制的慢反应过程,导致其界面粒子速度曲线的拐点不明显。Sheffield 等[7]采用激光干涉仪测得了炸药与水界面粒子速度在 500 ns 之内的变化,结合炸药的状态方程,给出了 PBX-9502 炸药的反应区宽度。Seitz 等[8]采用 Fabry-Perot 激光速度干涉仪,分别测量 TATB 炸药与氟化锂和有机玻璃界面的粒子速度,结合数值模拟分析了 TATB 爆轰波结构。Gustavsen 等[9]利用光

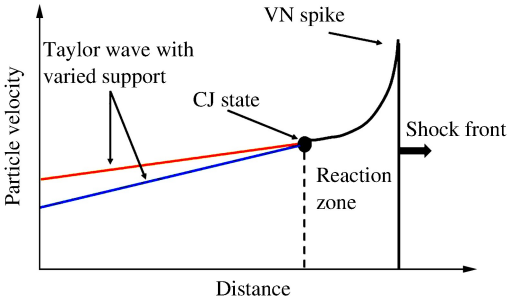


图 1 爆轰反应区结构示意图

Fig. 1 Schematic of the detonation wave profile

* 收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2017-11-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(11602248);科学挑战专题项目(TZ2018001);
国防科工局技术基础项目(JSZL2015212C001)
第一作者: 裴红波(1987—),男,博士,助理研究员; 通信作者: 黄文斌,caephwb@163.com。

子多普勒速度计(photon Doppler velocimetry,PDV)对 TATB 基和 HMX 基炸药的反应区进行了测量,给出了 TATB 基炸药的反应区宽度。但是,通过该方法难以分辨 HMX 炸药的反应区。Bouyer 等[10-12]采用 PDV 和 VISAR(velocity interferometer system for any reflector)对 HMX、TATB 和硝基甲烷的爆轰波后界面粒子速度进行了测量,并对不同的干涉测速技术进行了比较,同时也研究了窗口材料对测试的影响。以上研究主要基于状态方程计算 CJ 压力,进而确定炸药反应结束位置,然而准确确定炸药状态方程本身比较困难,因此有必要发展新的分析方法确定钝感炸药反应区宽度。另外,相似配方炸药在粘结剂种类和炸药颗粒度级配上存在较大差异,因此,为了进一步阐明非理想炸药的反应区结构,需要以高精度 PDV 对 JB-9014 等钝感炸药开展更多的研究,以补充相关实验数据。JB-9014 炸药是以 TATB 为基的塑性粘结炸药,其组分中包含质量分数为 95%的 TATB 和质量分数为 5%的粘结剂,其典型装药密度为 1.895 g/cm^3,对应的炸药爆速为 7 660 m/s。本文中,采用激光干涉测速法测量 JB-9014 炸药反应区结构,获得炸药反应区宽度、反应时间、反应结束点压力、VN 峰压力等信息,以期为 JB-9014 炸药爆轰数值建模提供实验数据。

1 测试系统

测试系统如图 2 所示,主要包括火炮加载装置、蓝宝石飞片、激光飞片测速装置、待测炸药样品、光学窗口、光纤测速探头、光子多普勒测速仪、示波器等。火炮口径为 57 mm,蓝宝石飞片与弹托粘结在一起,实验时利用蓝宝石飞片撞击炸药产生一维平面波,蓝宝石飞片尺寸为 ∅55 mm×12 mm。装药通过支架安装在炮管正前方,安装时利用工装确保炸药撞击面与炮管轴线垂直,在火炮直径 57 mm 范围内,飞片加载的平面性优于 10 ns,中心区域平面性更好,该结果远高于一般平面波透镜的指标。在炸药背面安装有尺寸为∅20 mm×11 mm的 LiF 窗口,利用 PDV 测速系统测量炸药爆轰后产物的界面粒子速度。LiF 窗口一端镀有约 0.7 μm 厚的铝膜,冲击波在铝膜内反射 2~3 次后压力可达到平衡,据此估算窗口的响应时间约为 0.6 ns。安装窗口时首先在炸药表面涂抹适量硅油,然后利用工装将窗口与炸药紧密按压在一起,确保窗口与炸药接触面间没有空气隙。PDV 测速探头的直径为 3.2 mm,探头输出激光的焦斑直径小于 0.3 mm,探头距离窗口反射面的距离约为 35 mm。实验时依次布置 3 个光纤探头 P1、P2 和 P3,3 个测速探头位于一条直线上,探头 P2 的焦斑正对炸药中心,探头 P1 与 P3 距离炸药中心的距离为 3.8 mm。炸药样品和测速环等放置在爆炸罐中,实验前对爆炸罐抽真空,实验时爆炸罐内压强低于 200 Pa,激光测速探头通过爆炸罐上的光纤法兰与罐外仪器设备相连。

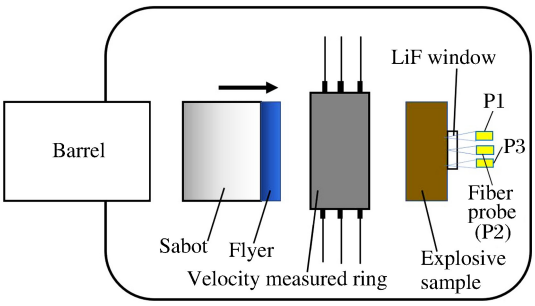


图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Schematic of measurement system

实验中使用光子多普勒测速仪 CAEP-PDV-3,该测速仪为全光纤结构,结构较紧凑。PDV 使用的激光波长为 1 550 nm,当被测物体的运动速度为 1 000 m/s 时,对应的差频频率 f_b=1.29 GHz。该 PDV 光电探测器带宽为 12.5 GHz,与其配套的采集示波器带宽为 13 GHz,示波器最高采样速率为 40 GS/s,受 PDV 探测器带宽的限制,该系统最高可以测量约9 700 m/s的速度。PDV 装置的具体结构及测速原理可参见文献[13]。

PDV 测速获得的是干涉信号强度随时间的变化历程,要想获得速度数据,还需要对实验采集到的数据进行处理,常见的数据处理方法主要有条纹法、窗口傅里叶变换法、小波变换方法[13-15]。本文中采用窗口傅里叶变换法进行数据处理。尽管 PDV 硬件系统能够实现亚纳秒的时间分辨率,但是,在利用傅里叶变换方法处理数据时存在时间分辨率和速度分辨率相互竞争的情况,即时间分辨率越高,速度不确定度越大。因此,在数据处理时针对不同阶段选取不同的窗口宽度,在炸药反应后 50 ns 内,粒子速度变化较快,选取的窗口宽度为2 ns,测速的不确定度约为 2%。50 ns 后,界面粒子速度变化较慢,选取

的窗口宽度为4 ns，速度测试的不确定度小于 1%。

加窗激光干涉测试中，在冲击波作用下，测试窗口的折射率会发生变化，从而引入附加多普勒频率[16-17]，因此，需要对实验测得的速度进行修正，本文中采用赵万广等[16]提供的系数进行折射率修正：

$$u = u_a / 1.267\ 8 \tag{1}$$

式中：u 为真实粒子速度，u_a 为界面处表观粒子速度。如没有特别说明，本文中给出的粒子速度皆为经过修正后的真实粒子速度。

由于炸药和 LiF 阻抗不同，测试得到的粒子速度并非炸药稳定爆轰时的波后粒子速度，为此，本文中采用声学近似，利用冲击阻抗匹配公式计算炸药反应区内的压力[2]：

$$p = \frac{1}{2} u [\rho_{m0} (C_0 + \lambda u) + \rho_0 D_{CJ}] \tag{2}$$

式中：p 为炸药与窗口界面处的压力，ρ_{m0} 为窗体材料初始密度，C_0 为窗体材料冲击绝热线常数，λ 为窗体材料冲击绝热线常数，ρ_0 为待测炸药初始密度，D_{CJ} 为待测炸药 CJ 爆速。本文计算中 LiF 冲击绝热参数使用文献[16]提供的数据。

2　实验结果

炸药样品尺寸为∅42 mm×30 mm，密度为1.893 g/cm^3。示波器带宽为13 GHz，采样速率为20 GS/s。测得的蓝宝石飞片速度为(1 409±30) m/s，根据蓝宝石和 JB-9014 炸药冲击绝热线计算得到炸药中的输入压力为10.46 GPa，该压力下 JB-9014 炸药的到爆轰距离约为13 mm，因此，炸药稳定爆轰传播的距离约为17 mm。图 3(a)为经过傅里叶变换后获得的速度谱图。由于本发实验中 PDV 采集方式为上变频外差，因此，真实速度还需要减去基线。图 3(b)为经过数据处理提取获得的速度历程图，由于原始速度频谱图中局部存在信号对比度较差的情况，导致该时刻处理得到的数据不光滑。为此，利用 Origin 软件对提取到的数据进行光滑处理，光滑后的曲线见图 3(c)。从图 3 可以看出，3 个探头测得的界面粒子速度一致性较好，实验记录时间范围内相同时刻不同位置处探头测得的界面粒子速度的差别小于 1.6%。

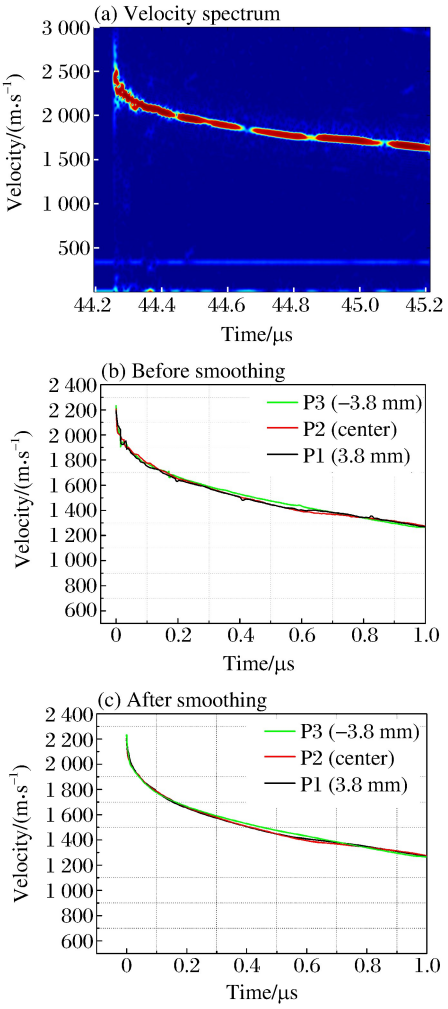


图 3　实验界面粒子速度历程

Fig. 3　Experimental interface particle velocity-time curves

对光滑后的界面粒子速度进行一阶求导得到界面粒子加速度，见图 4。从图 4 可知，界面粒子加速度初始阶段下降较快，由 30 mm/μs^2 迅速下降到约 3 mm/μs^2，该过程持续约 20 ns，一般被认为是炸药的快反应阶段。在这一过程中炸药迅速分解形成 H_2O、CO_2、CO、N_2 和小颗粒的固相 C，该过程释放的能量约占总能量的(80～90)%。随后界面粒子速度缓慢下降，其持续时间大于200 ns，一般认为该过程对应产物中碳凝聚过程(慢反应)[18]。反应结束后，产物受稀疏波的影响，界面粒子速度开始缓慢下降，对应界面粒子速度一阶导数为一接近于零的定值，通过读取速度导数的拐点可以确定炸药的反应结束点。

3 个探头给出的反应平均持续时间为(0.26±0.02) μs，不确定度主要由判读引起，炸药化学反应区宽度：

$$a = \int_0^{\tau} (D_{CJ} - u)\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中:τ 为炸药反应持续时间,u 为界面粒子速度,a 为反应区宽度。根据试验测得的界面粒子速度历程和公式(3)计算得到炸药反应区宽度为(1.5±0.2) mm。

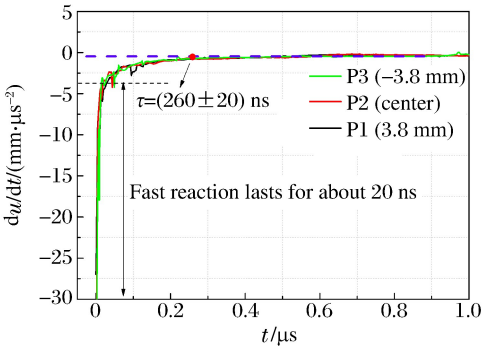


图 4 界面粒子加速度

Fig. 4 Interface particle acceleration history

3 讨 论

3.1 反应持续时间及反应区宽度

表 1 中列出了 TATB 基炸药反应区宽度和时间测试结果,JB-9014 与 PBX-9502 炸药配方中 TATB 的质量分数均为 95%,只是质量分数为 5%的粘结剂不同。对比文献报道的不同方法测量的反应区宽度和时间可知,大部分研究者给出的 TATB 基炸药反应时间在 0.21～0.31 μs 之间,反应区宽度在 1.2～2.9 mm 之间,本文的测试结果位于这一范围内。已有激光干涉法测试中,主要依靠状态方程或者数值模拟确定反应区宽度,测试的精度不仅取决于实验本身,还取决于状态方程及数值模拟的精度。对于 TATB 基炸药,由于其爆轰过程的非理想性,导致其状态方程难以准确确定,因此不同研究者给出的实验结果存在一定的差异。相比于光电法,无论是测试的时间分辨率还是精度,本文中采用的 PDV 都更高,此外本文 3 个探头给出的结果一致性较好,测试结果的不确定度较小。

表 1 TATB 基炸药反应区时间和宽度

Table 1 Time and length of reaction zone for TATB-based explosive

炸药	方法	τ/μs	a/mm	来源	备注
JB-9014	激光测速+粒子速度求导	0.26±0.02	1.5±0.2	本文	
PBX9502	激光测速+炸药状态方程	0.28	2.1	Sheffield 等[7]	
PBX9502	曲率效应试验+数值模拟		2.9	Wescott 等[19]	
PBX9502	激光测速+数值模拟	0.3	2	Seitz 等[8]	
PBX9502	激光测速+炸药状态方程	0.21±0.02 0.28±0.01		Dattelbaum 等[20]	LiF 窗口 Kel-F 窗口
JB-9014	光电法+粒子速度求导	0.31	1.75	赵同虎等[5]	
TATB/inert	光电法+粒子速度求导	0.26±0.05	1.24±0.17	Loboiko 等[6]	

3.2 反应结束点压力

反应结束点处,3 个探头给出的平均界面粒子速度为 1 613 m/s,根据阻抗匹配公式(2)计算得到反应结束点产物的压力为27.3 GPa。对于 JB-9014 非理想炸药,由于存在碳凝聚的慢反应过程,在炸药 CJ 点后,还可能存在能量释放。因此,炸药 CJ 压力不低于反应结束点的压力27.3 GPa。Wescott 等[19]根据超压爆轰实验给出的 PBX-9502 炸药爆压为 28 GPa,Mader[21] 采用 BKW 方程计算得到的 PBX9502 炸药爆压为 28.5 GPa,Tarver[18] 结合实验和数值模拟给出 LX-17 (TATB 的质量分数为 92.5%,Kel-F 的质量分数为7.5%)炸药的爆压为27 GPa。本文测得的 JB-9014 炸药反应结束点的压力,相比于理论或者实验给出的 TATB 基炸药爆压上限值28.5 GPa,低4.2%,相比于下限值27 GPa,高1.1%。考虑到炸药配方之间的细微差异以及测试的不确定度,这种差异几乎可以忽略,说明即使反应结束点滞后于 CJ 点,但是在 CJ 点后炸药释放的能量也比较少,大部分能量都支持了爆轰波的传播。

3.3 VN 点速度和压力

Gustavsen 等[9]利用 PDV 对 EDC-35 炸药(TATB 的质量分数为95%,Kel-800 的质量分数为5%)的界面粒子速度进行了测试, VN 点速度为(2.25±0.05) km/s。Seitz 等[8]利用 Fabry-Perot 干涉仪测得的 PBX-9502 炸药 VN 点速度为(2.19±0.05) km/s;Dattelbaum 等[20]给出的 PBX-9502 炸药 VN 点速度为(2.19±0.08) km/s。这与本文中 3 个探头给出 VN 点平均界面粒子速度2 209 m/s基本一致,根据阻抗匹配公式(2)计算得到炸药的 VN 峰处压力为(40.3±1.2) GPa。压力不确定度主要源自

以下几方面：VN 点的界面粒子速度测试相对不确定度，约2%；窗口材料状态方程的相对不确定度，约0.5%；式(1)中采用声学近似导致的相对不确定度约1%；根据不确定度传递规律，计算得到的 VN 点处压力的相对标准不确定度约为3.1%。Wescott 等[19]利用低压下冲击雨贡纽关系外推到爆速，得到 VN 峰处的压力为42 GPa，略高于本文实验值。如果炸药爆压按照28 GPa计算，则 JB-9014 炸药 VN 点与 CJ 点压力之比为1.44，符合一般认为的合理区间范围。

4　结　论

采用光子多普勒测速仪对 JB-9014 炸药稳定爆轰时的加窗波后粒子速度剖面进行了测量，测试的时间分辨率为2 ns，测速的相对不确定度优于2%。结果表明，将实验获得的界面粒子速度对时间求一阶导数，通过一阶导数的拐点来确定钝感炸药的反应时间和反应区宽度的方法是可行的。JB-9014 炸药化学反应可以分为 2 个阶段：第一阶段过程较快，持续时间约为20 ns；第二阶段持续时间较长，为200～300 ns，该阶段对应小颗粒固相碳凝聚过程。JB-9014 炸药的爆轰反应时间为(0.26±0.02) μs，对应的化学反应区宽度为(1.5±0.2) mm；JB-9014 炸药的 VN 点界面粒子速度为2 209 m/s，压力为(40.3±1.2) GPa，VN 点和 CJ 点压力之比$p_{VN}/p_{CJ}\approx1.44$。

感谢钟斌、张蓉、李强在火炮运行中给予的帮助，感谢刘寿先、刘俊、李建中、雷江波在 PDV 测试、数据处理中给予的帮助。

参考文献：

[1] DUFF R E, HOUSTON E. Measurement of the Chapman Jouguet pressure and reaction zone length in a detonating high explosive[J]. Journal of Chemical Physics, 1955,23(7):1268-1273. DOI: 10.1063/1.1742255.

[2] 张宝坪，张庆明，黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京：兵器工业出版社，2001:151-153.

[3] TASKER D G, LEE R J. The measurement of electrical conductivity in the detonating condensed explosives[C]// Proceedings of the 9th International Detonation Symposium. USA: Office of Naval Research, 1989:123-126.

[4] LEE R J, GUSTAVSON P K. Electrical conductivity as a realtime probe of secondary combustion of solid-fuel additives in detonating explosives[C]// Shock Compression of Condensed Matter 2003. USA: American Institute of Physics, 2004:1273-1276.

[5] 赵同虎，张新彦，李斌，等. 用光电法研究钝感炸药 JB-9014 反应区结构[J]. 高压物理学报，2002,16(2):111-119. DOI: 10.11858/gywlxb.2002.02.005.
ZHAO Tonghu, ZHANG Xinyan, LI Bin, et al. Detonation reaction zone structure of JB-9014[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002,16(2):111-119. DOI: 10.11858/gywlxb.2002.02.005.

[6] LOBOIKO B L, LUBYATINSKY S N. Reaction zones of detonating solid explosives[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2000,36(6):716-733. DOI: 10.1023/A:1002898505288.

[7] SHEFFIELD S A, BLOOMQUIST D D, TARVER C M. Subnanosecond measurements of detonation fronts in solid high explosives[J]. Journal of Chemical Physics, 1984,80(8):3831-3844. DOI: 10.1063/1.447164.

[8] SEITZ W L, STACY H L, ENGELKE R, et al. Detonation reaction-zone structure of PBX-9502[C]// Proceedings of the 9th International Detonation Symposium. USA: Office of Naval Research, 1989:675-682.

[9] GUSTAVSEN R L, BARTRAM B D, SANCHEZ N. Detonation wave profiles measured in plastic bonded explosives using 1550 nm photon Doppler velocimetry (PDV) [C]// Shock Compression of Condensed Matter 2009. USA: American Institute of Physics, 2009:253-256.

[10] BOUYER V, DOUCET M, DECARIS L. Experimental measurements of the detonation wave profile in a TATB based explosive[C]// EPJ Web of Conference. France: EDP Science, 2010:378-384.

[11] BOUYER V, HEBERT P, DOUCET M, et al. Experimental measurements of the chemical reaction zone of TATB and HMX based explosives[C]// Shock Compression of Condensed Matter 2011. USA: American Institute of Physics, 2012:209-212.

[12] BOUYER V, SHEFFIELD S A, DATTELBAUM D M, et al. Experimental measurements of the chemical reac-

tion zone of detonating liquid explosives[C]// Shock Compression of Condensed Matter 2009. USA: American Institute of Physics, 2009:177-180.

[13] STRAND O T, GOOSMAN D R, MARTINEZ C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques[J]. Review of Scientific Instruments, 2006,77(8):083108.

[14] 项红亮,王建,毕重连,等.光子多普勒速度测量系统的数据处理方法[J].光学与光电技术,2012,10(2):52-56.
XIANG Hongliang, WANG Jian, BI Chonglian, et al. Data processing of photonic Doppler velocimetry system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012,10(2):52-56.

[15] LIU S, WANG D, LI T, et al. Analysis of photonic Doppler velocimetry data based on the continuous wavelet transform[J]. Review of Scientific Instruments, 2011,82(2):593-599. DOI: 10.1063/1.3534011.

[16] 赵万广,周显明,李加波,等.LiF 单晶的高压折射率及窗口速度的修正[J].高压物理学报,2014,28(5):571-576. DOI: 10.11858/gywlxb.2014.05.010.
ZHAO Wanguang, ZHOU Xianming, LI Jiabo, et al. Refractive index of LiF single crystal at high pressure and its window correction[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014,28(5):571-576. DOI: 10.11858/gywlxb.2014.05.010.

[17] JENSEN B J, HOLTKAMP D B, RIGG P A, et al. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry[J]. Journal of Applied Physics, 2007,101(1):523-454. DOI: 10.1063/1.2407290.

[18] TARVER C M. Detonation reaction zones in condensed explosives[C]// Shock Compression of Condensed Matter 2005. USA: American Institute of Physics, 2005:1026-1029.

[19] WESCOTT B L, STEWART D S, DAVIS W C. Equation of state and reaction rate for condensed-phase explosives[J]. Journal of Applied Physics, 2005,98(5):90-98.

[20] DATTELBAUM D M, GUSTAVSEN R L, ASLAM T, et al. Influence of window characteristics on chemical reaction zone measurements in PBX 9502[C]// Proceedings of the 15th International Detonation Symposium. USA: Office of Naval Research, 2014:396-406. DOI: 10.1063/1.2035310.

[21] MADER C L. Numerical modeling of detonation[M]. Berkely, California: University of California Press, 1979: 69-70.

Reaction zone structure of JB-9014 explosive measured by PDV

PEI Hongbo, HUANG Wenbin, QIN Jincheng,
ZHANG Xu, ZHAO Feng, ZHENG Xianxu
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan*, *China*)

Abstract: To understand the detonation reaction process of the TATB-based JB-9014 explosive, experimental measurements of the detonation wave profile of solid explosives using photon Doppler velocimetry (PDV) were performed. Planar detonations were produced by impacting the explosive with a sapphire flyer in a gas gun. Particle velocity wave profiles were measured at the explosive/window interface using PDV. LiF windows with very thin vapor deposited aluminum mirrors were used, and the time resolution of the measuring system was less than 2 ns. The interface velocity histories were derived to determine the reaction zone length and reaction time. The results show that the reaction time of JB-9014 is (0.26±0.02) μs, and the corresponding reaction zone length is (1.5±0.2) mm. The pressure at the end of chemical reaction is 27.3 GPa, the pressure at von Neumann spike is 40.3 GPa.

Keywords: photon Doppler velocimetry; JB-9014 explosive; LiF windows; particle velocity; reaction zone structure

(责任编辑 张凌云)