

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0101

基于 PDV 的 JOB-9003 炸药爆轰反应区测量*

覃锦程, 裴红波, 黄文斌, 张旭, 郑贤旭, 赵锋

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 炸药的反应区数据对爆轰过程的精密建模具有重要意义, 为了得到 JOB-9003 炸药的反应区信息, 采用光子多普勒测速仪 (PDV) 对 JOB-9003 炸药的爆轰反应区进行了实验研究。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) 窗口测量炸药一维稳态爆轰时的界面粒子速度, 测试过程的时间分辨率小于 1 ns, 测速相对不确定度小于 2%。通过读取界面粒子速度时程曲线的拐点来确定 CJ 点, 根据阻抗匹配公式计算炸药的 CJ 压力。研究表明, JOB-9003 炸药界面粒子速度时程曲线上存在较为明显的拐点, JOB-9003 炸药的化学反应时间为 (11 ± 2) ns, 对应的化学反应区宽度为 (0.075 ± 0.014) mm, JOB-9003 炸药的 CJ 爆压为 (35.6 ± 0.9) GPa, 冯诺依曼 (Von Neumann) 峰处的压力为 (47.9 ± 1.2) GPa。

关键词: 爆轰反应区; HMX; 爆压; 激光干涉法

中图分类号: O381

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

炸药的爆轰反应区一般由 ZND (Zeldovich-Von Neumann-Doring) 模型进行描述, 在 ZND 模型中, 冲击波作用下炸药的化学反应要历经一定的时间和空间, 这一区间被称为反应区, 反应区由无反应的先导冲击波和紧随其后的化学反应区构成, 在化学反应区的末端是 Chapman-Jouguet (CJ) 点, CJ 点连接了反应区和 Taylor 波稀疏区, 如图 1 所示。测量炸药的爆轰反应区结构, 一般包含测量 CJ 点处的压力 (爆压), Von Neumann (下文称 VN) 峰压力, 反应时间等, 这些信息对理解炸药的爆轰反应过程、爆轰数值模拟等具有重要价值。针对反应区的测量, 各国研究者提出了基于不同物理机制的方法, 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^[7-14]等。在以上方法中, 激光干涉法的物理机制最为明确, 且时间分辨率最高, 利用激光干涉法测量反应区时, 粒子速度曲线的时移曲线和反应区中的压力分布对应, 因此, 在测量得到界面粒子速度曲线后, 通过读取曲线上的折点, 可得到反应区末端对应的 CJ 点, 同时得到反应时间和反应区宽度。

以奥克托金 (HMX) 为主要成分的塑性黏结炸药, 由于其良好的爆轰性能, 在军事上获得了广泛的应用, 已有的测试结果表明, 对于 HMX 炸药, 由于其反应区较窄, 受测试仪器时间分辨率、测试精度、炸

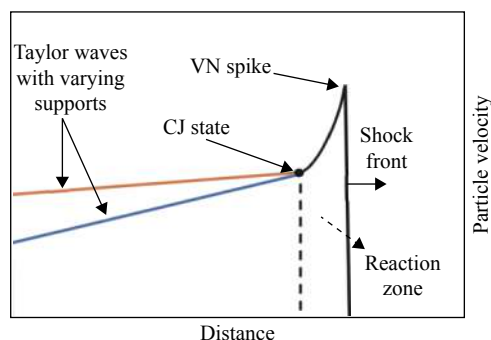


图 1 爆轰反应区结构示意图

Fig. 1 Schematic representation of the detonation reaction zone profile

* 收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-06-22

基金项目: 科学挑战专题 (TZ2018001); NSAF 联合基金 (U1630113); 国防科工局技术基础项目 (JSZL2015212C001)

第一作者: 覃锦程 (1993—), 男, 硕士研究生, jc_qin@163.com;

通信作者: 裴红波 (1987—), 男, 博士, 助理研究员, hongbo2751@sina.com。

药非均匀性等因素的影响,不同研究者给出的 HMX 炸药反应持续时间在 15 ~ 40 ns 之间^[9-11],测试结果分散性较大,尚缺乏较为准确的 HMX 基炸药反应区数据。JOB-9003 是以 HMX 为主要成分的塑性黏结炸药,其组分(质量分数)包含 87% 的 HMX、8.7% 的 TATB、4.3% 的塑性黏结剂,典型装药密度为 1.845 g/cm³,对应的爆速为 8 712 m/s^[15]。由于钝感组分 TATB 的加入,相比于纯 HMX 基炸药,其安全性更好,同时又具有较高的做功能力。

本文中采用高时间分辨率的 PDV 对 JOB-9003 炸药反应区进行测量,获得较为准确的炸药反应时间、反应区宽度、爆压、VN 峰压力等信息,并与已有的数据进行对比、分析,研究结果可为炸药爆轰数值模拟提供实验数据。

1 实验

1.1 实验装置及测试系统

实验装置如图 2 所示,由火炮、蓝宝石飞片、待测 JOB-9003 炸药样品、LiF 光学窗口以及光纤测速探头等构成,记录装置包含光子多普勒测速仪和示波器。蓝宝石的尺寸为 $\varnothing 55 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, LiF 窗口尺寸为 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$,在窗口的一端镀有 0.7 μm 厚的铝膜,用于反射射向炸药和窗口界面的光信号。装配时在炸药和窗口间涂抹硅油,再按压在一起以排除两者间的空气隙,铝膜和硅油的厚度均在微米级别,至少比反应区宽度小一个数量级,在爆轰波通过瞬间即达到平衡,因此对反应区的影响较小。三个光纤探头 P1、P2、P3 直径为 3.2 mm, P1 正对炸药后表面中心,各探头输出激光的焦斑直径小于 0.3 mm,实验时探头距反射铝膜的距离为 35 mm,实验中其余各仪器的具体安装过程以及 PDV 的介绍可参考文献 [16]。

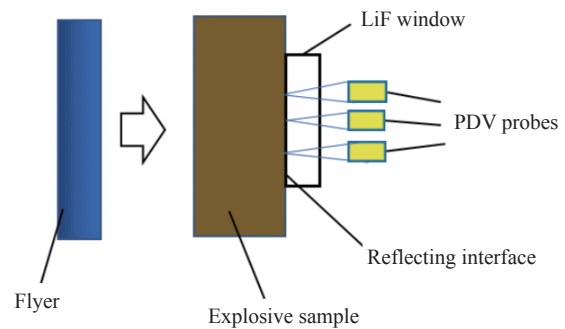


图 2 测试系统组成图

Fig. 2 Experimental set-up

1.2 实验数据处理

要获得界面粒子速度历程,需要对 PDV 测试获得的原始频域干涉信号进行处理,变换为时域信号。常见的数据处理方法有条纹法、窗口傅里叶变换法、小波变换方法等^[17-19]。本文中针对反应区的不同阶段采用不同的数据处理方法。在炸药开始反应的 20 ns 内,粒子速度下降较快,而且由于波阵面非均匀性等原因,信号对比度一般不好,因此我们采用条纹法处理数据,通过读取干涉信号的周期来计算速度,为了减小不确定度,每次选取 3 ~ 4 个正弦周期,其对应的时间分辨率优于 1 ns,测速的不确定度小于 2%,如图 3 所示(图中 775 为激光半波长,单位 nm, T 为干涉信号周期,单位 ns, 1.267 8 为窗口折射率修正系数)。炸药反应约 20 ns 之后,界面粒子速度变化较为缓慢,这一阶段采用窗口傅里叶变换法进行数据处理,选取的窗口宽度为 2 ns,速度测试的不确定度小于 1%。

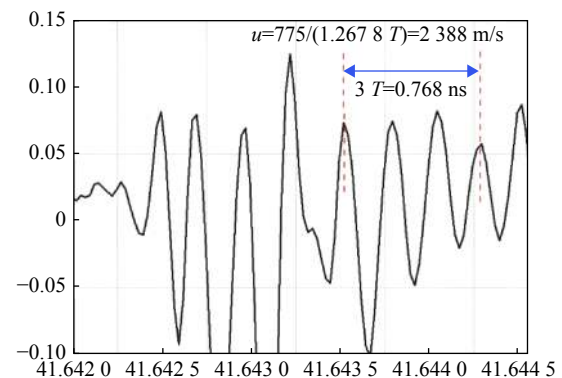


图 3 条纹法计算速度示意图

Fig. 3 Schematic of velocity calculation with fringe method

加窗激光干涉测试中,测试窗口的折射率在冲击波的作用下会发生变化,测得的干涉频域信号中会附加多普勒频率^[20-21],因此需要对实验测得的速度进行修正,本文采用文献 [20] 提供的系数进行折射率修正。具体的折射率修正和反应区内的压力计算方法可参考文献 [16]。

2 实验结果

共进行了 2 发重复实验, 实验所用圆柱炸药尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 密度为 $(1.845 \pm 0.005) \text{ g/cm}^3$ 。实验测得的蓝宝石飞片速度为 $(1\,378 \pm 30) \text{ m/s}$, 根据蓝宝石和 JOB-9003 炸药冲击绝热线计算可知, 飞片对炸药的加载压力约为 10.8 GPa, 该压力下 JOB-9003 炸药的到爆轰距离约为 $1 \text{ mm}^{[15]}$, 因此炸药稳定爆轰传播的距离约为 14 mm。图 4 为经过傅里叶窗口变换后获得的典型速度谱图, 粒子速度上升到 VN 峰的时间在 1 ns 以内。

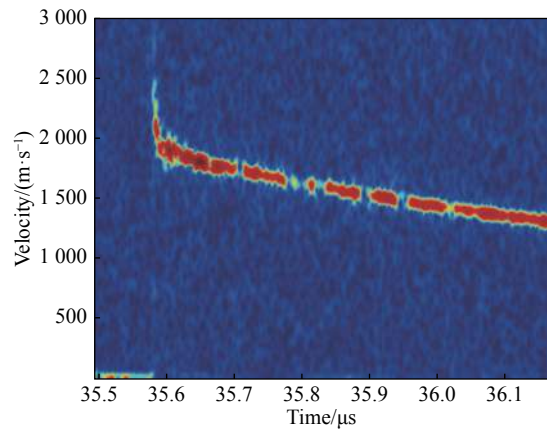


图 4 窗口傅里叶变换得到的速度谱图(探头: shot 1-P1)

Fig. 4 Velocity spectrogram calculated with Fourier transformation (probe: shot 1-P1)

图 5 为经过数据处理提取获得的界面粒子速度历程图, 从图中可以看出初期界面粒子速度下降得较快, 后期下降较为缓慢, 界面粒子速度曲线上存在着较为明显的拐点, 读取界面粒子速度的拐点为 CJ 点, 实验测得的 VN、CJ 点速度、压力和反应时间等数据如表 1 所示。从图 5(a) 中可以看出, 第 1 发实验 CJ 点之后 $0.3 \mu\text{s}$ 的时间内, 不同测点的粒子速度曲线出现了分离, 这表明爆轰波并非理想一维结构, 而是在空间上存在一定差异, $0.3 \mu\text{s}$ 后界面粒子速度又趋于一致, 这表明随着时间的推移, 产物开始接近于平衡状态, 第 2 发实验也出现了类似的情况, 但是差异要小于第 1 发实验。从细观上来看, 本文所使用的塑性黏结炸药包含不同颗粒大小的炸药单晶和

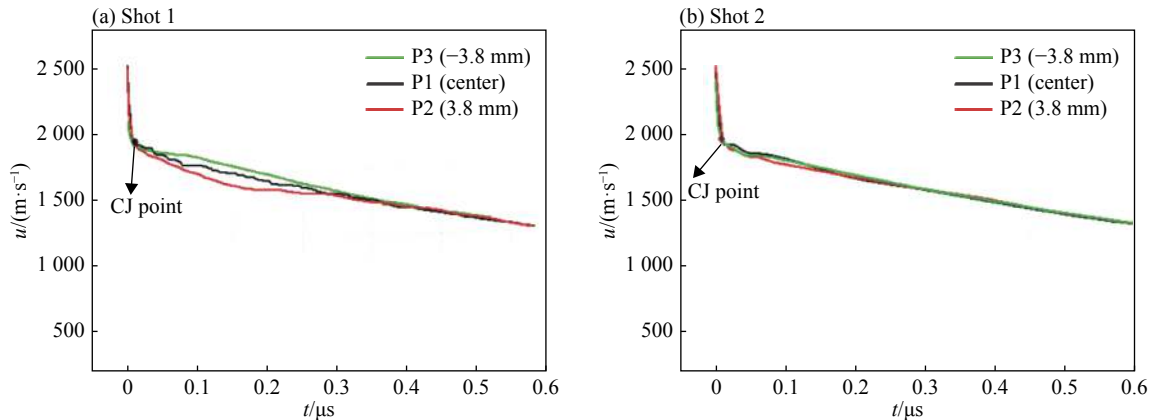


图 5 界面粒子速度历程图

Fig. 5 Particle velocity histories at LiF window interface

表 1 实验测得的 JOB-9003 爆轰反应区参数

Table 1 Reaction zone parameter of JOB-9003 measured from experiments

探头	$u_{VN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_{CJ}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P_{VN}/GPa	P_{CJ}/GPa	τ/ns
shot 1-P1	2 519	1 943	48.8	35.6	11
shot 1-P2	2 495	1 934	48.2	35.4	11
shot 1-P3	—	1 940	—	35.5	11
shot 2-P1	2 477	1 948	47.8	35.7	11
shot 2-P2	2 513	1 945	48.7	35.7	11
shot 2-P3	2 402	1 932	46.0	35.4	11
平均	$2\,481 \pm 50$	$1\,940 \pm 39$	47.9 ± 1.2	35.6 ± 0.9	11 ± 2

注: (1) shot 1-P1 表示第 1 发实验中的第 1 个探头。(2) 平均值中不确定度主要来自于界面粒子速度测试。

黏结剂,是一种非均匀的物质,不同位置探头测试结果的差异正是炸药本身非均匀性的体现。第1发实验P3探头测得的VN点速度要显著小于其他探头的值,通过对原始数据分析发现P3探头反应区内信号对比度较差,因此在计算VN点速度和压力时我们排除掉P3探头的结果。

炸药的化学反应区宽度由下式计算^[6]:

$$a = \int_0^{\tau} (D_{CJ} - u) dt \quad (1)$$

式中: τ 为化学反应的持续时间, u 为经过修正后的真实界面粒子速度, a 为反应区宽度。经过计算得到JOB-9003的反应区宽度为(0.075±0.014)mm。

3 分析与讨论

3.1 CJ爆压

两发实验多个测点给出JOB-9003炸药平均CJ压力为(35.6±0.9)GPa。传统炸药爆压测试方法——自由表面速度法、锰铜压阻计法和水箱法主要根据的是CJ模型,没有考虑炸药的反应区结构,受测试仪器响应时间的限制,这些方法实际测得的只是CJ点附近的压力,只能算是近似压力。Fritz等^[22]通过测量炸药超压爆轰产物拉格朗日声速与冲击绝热线的交点确定炸药的CJ点,给出PBX-9501(95 HMX/5Binder)炸药的CJ压力为(34.8±0.3)GPa,作者在文中同时引用了美国其他研究人员对HMX基炸药PBX-9404(94HMX/3NC/3CEF)、LX-14(95.5HMX/4.5Estane)爆压的测试结果,不同研究者给出的HMX基炸药爆压在(34.5~37.5)GPa之间。Mader等^[23]采用BKW状态方程对PBX-9501和LX-14炸药的爆压进行了计算,给出的PBX-9501和LX-14炸药爆压分别为36.3和34.8 GPa。Menikoff^[24]在进行PBX-9501炸药爆轰数值模拟时,采用的PBX-9501炸药爆压为35 GPa,数值模拟计算得到的界面粒子速度剖面与实验结果较为吻合。Loboiko等^[6]采用光电法给出的HMX基炸药CJ点处粒子速度为2.2 km/s,对应的CJ压力为35.5 GPa。董海山等^[15]采用高速摄影测量了JOB-9003炸药与不同厚度铝板作用下铝板的自由表面速度,并将其外推到铝板厚度为零的情况,利用迭代法求解炸药-铝板处的界面方程,得到JOB-9003炸药的爆压为(35.2±0.2)GPa。综上所述可以看出,大部分研究者给出的HMX基高能炸药爆压在(34.5~36.5)GPa之间,考虑到测试的不确定度,本文的实验结果与以上结果具有较好的一致性。

3.2 反应区宽度

Gustavsen等^[9-10]采用VISAR对PBX-9501界面粒子速度进行了测量,测试时间分辨率为2~3 ns,由于CJ点处粒子速度下降较为缓慢,使得CJ点难以确定,作者给出的PBX-9501炸药反应时间在15~35 ns之间,分散性较大。Tarver^[25]结合实验和数值模拟认为HMX炸药的快反应为20 ns时,数值模拟给出爆速随装药半径的变化关系与实验结果吻合较好。Loboiko等^[6]采用光电法对HMX炸药爆轰反应区进行了测量,测试仪器的分辨率约为5 ns,通过对界面粒子速度求导,给出的反应时间为(40±10)ns,炸药反应区宽度为(0.25±0.04)mm。Menikoff等^[24]对PBX-9501炸药的反应区进行了理论研究,基于阿伦尼乌斯反应速率给出的PBX-9501炸药反应时间为10 ns,反应区宽度为0.06 mm。相比于已有的实验结果,本文中所用的实验方法具有更高的时间分辨率,而且多个探头给出的实验结果具有较好的一致性。

3.3 VN峰压力

由于HMX炸药在较高的冲击压力下会迅速发生反应,因此如何准确测量VN点的压力一直是一个难题。Gustavsen等^[10]采用VISAR对PBX-9501界面粒子速度进行了测量,由于VN点处粒子速度下降较快,受仪器时间分辨率的原因,作者给出的 P_{VN} 在38.7~53.4 GPa之间。Loboiko等^[6]采用光电法给出的HMX基炸药VN点界面粒子速度约为3 km/s,对应的 P_{VN} =48.6 GPa。Sheffield等^[26]、Dick等^[27]对PBX-9501炸药20 GPa以下压力的冲击绝热线进行了测量,将其外推到高压端,得到VN点压力约为44 GPa。Menikoff^[24]结合低压下PBX-9501炸药冲击压缩数据和30 GPa压力附近的单晶HMX冲击压缩数据^[28],对PBX-9501炸药冲击绝热线进行了拟合,给出的VN点处粒子速度在2.8~3.9 km/s之间,对应VN点压

力在 45~63 GPa 之间, 不确定度较大。Baer 等^[29] 在 Z 脉冲功率装置上针对 PBX-9501 炸药进行了准等熵压缩实验, 根据实验获得的界面粒子速度反演得到包含二次项的 PBX-9501 冲击绝热线, 实验过程准等熵加载的最大压力超过 30 GPa, 根据其给出的冲击波速度与粒子速度 ($D-u$) 关系, 当 $D=8.8$ km/s 时, $u=3.3$ km/s, 计算得到 PBX-9501 炸药 VN 点的压力为 53.2 GPa。根据文献 [30] 中给出的 PBX-9404 冲击绝热线关系, 将 $D-u$ 关系外推到 $D=D_{CJ}$ 处, 得到 VN 点压力 $P_{VN}=48.4$ GPa。池家春^[31] 用“压力对比法”测量了 20 GPa 以下压力 JOB-9003 炸药的冲击绝热线, 将 $D-u$ 直线外推到 $D=D_{CJ}$, 得到 VN 点压力 $P_{VN}=45.2$ GPa。根据以上分析可以看出, 大部分研究者给出的 HMX 基塑性黏结炸药 VN 点压力在 44~54 GPa 之间, 相比以往的测试方法, 本文的测量精度更高, 基本能够分辨 VN 峰的压力大小, 测得 $P_{VN}=(47.9\pm 1.2)$ GPa 在这一范围内。

4 结 论

通过飞片冲击起爆 JOB-9003 炸药到达稳定爆轰状态, 利用 PDV 对 JOB-9003 炸药的加窗波后界面粒子速度进行测量, 测试过程时间分辨率为 2 ns, 不确定度小于 2%, 初步得到如下结论:

(1) JOB-9003 炸药界面粒子速度存在着较为明显的拐点, 可以通过读取炸药界面粒子速度的拐点确定炸药的 CJ 点, 进而计算炸药爆压; 受炸药本身非均匀性的影响, 爆轰波速度剖面在空间上存在着一定的差异, 因此在测试中有必要布设多个传感器以减小这种非均匀性对测试结果的影响。

(2) JOB-9003 炸药的爆轰反应时间为 (11 ± 2) ns, 对应的化学反应区宽度为 (0.075 ± 0.014) mm, JOB-9003 炸药的爆压为 (35.6 ± 0.9) GPa, VN 峰处的压力为 (47.9 ± 1.2) GPa, 研究结果为炸药性能评估及爆轰数值模拟提供了数据。

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 real time 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/gywlb.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/gywlb.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.
- [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, SHEFFIELD S A, ALCON R R. Detonation wave profiles in HMX based explosives [J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 1998, 429(429): 739–742. DOI: 10.1063/1.55674.
- [10] GUSTAVSEN R L, SHEFFIELD S A, ALCON R R. Progress in measuring detonation wave profiles in PBX9501 [C] // 11th International Detonation Symposium. USA: Office of Naval Research, 1998: 821–827.

- [11] 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.
- [12] 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20101000030>
- [13] 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. DOI: 10.1063/1.3686256
- [14] BOUYER V, SHEFFIELD S A, DATTELBAUM D M, et al. Experimental measurements of the chemical reaction zone of detonating liquid explosives [C] // Shock Compression of Condensed Matter 2009. USA: American Institute of Physics, 2009: 177–180. DOI: 10.1063/1.3295096.
- [15] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 126; 130; 301.
- [16] 裴红波, 黄文斌, 覃锦程, 等. 基于多普勒测速技术的 JB-9014 炸药反应区结构研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 485–490. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0379.
- PEI Hongbo, HUANG Wenbin, QIN Jincheng, et al. Reaction zone structure of JB-9014 explosive measured by PDV [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 485–490. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0379.
- [17] 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. DOI: 10.1063/1.2336749.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] FRITZ J N, HIXSON R S, SHAW M S, et al. Overdriven-detonation and sound-speed measurements in PBX-9501 and the “thermodynamic” Chapman-Jouguet pressure [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 80(11): 6129–6141. DOI: 10.1063/1.363681.
- [23] MADER C L. Numerical modeling of detonation [M]. Berkely, California: University of California Press, 1979: 69–70.
- [24] MENIKOFF R. Detonation waves in PBX 9501 [J]. *Combustion Theory & Modelling*, 2006, 10(6): 1003–1021. DOI: 10.1080/13647830600851754.
- [25] TARVER C M. Detonation reaction zones in condensed explosives [C] // APS Topical Conference on Scem. American Institute of Physics, 2006: 1026–1029. DOI: 10.1063/1.2263497
- [26] SHEFFIELD S A, GUSTAVSEN R L, ALCON R R, et al. High pressure Hugoniot and reaction rate measurements in PBX9501 [C] // AIP Conference Proceedings, 2004, 706(1): 1033–1036. DOI: 10.1063/1.1780414
- [27] DICK J J, MARTINEZ A R, HIXSON R S. Plane impact response of PBX 9501 and its components below 2 GPa: LA-13426-MS [R]. USA: Los Alamos National Laboratory Report, 1998.
- [28] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [M]. Berkely: University of California press, 1980: 83.
- [29] BAER M R, ROOT S, DATTELBAUM D, et al. Shockless compression studies of HMX-based explosives [C] // American Institute of Physics Conference Series. American Institute of Physics, 2009: 699–702. DOI: 10.1063/1.3295235
- [30] GIBBS T R. LLNL handbook of high explosives [M]. Berkely: University of California press, 1980: 259–262.
- [31] 池家春. 非均匀炸药未反应冲击雨贡纽关系的压力对比测量技术 [C] // 第二次全国爆轰学术会议论文集 (3). 南京, 1983: 134–140.

Measuring the detonation reaction zone structure of JOB-9003 explosive using PDV

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

Abstract: In order to obtain the chemical reaction zone of HMX based JOB-9003 explosive, experimental measurements on the detonation wave profile of solid explosives using photon Doppler velocimetry (PDV) have been performed. Planar detonations were produced by impacting the explosive with sapphire flyer launched from a powder gun. Particle velocity wave profiles were measured at the explosive/window interface. LiF windows with very thin vapor deposited aluminum mirrors were used in the experiments. The time resolution of PDV is about 1 ns, and the velocity uncertainty is less than 2%. The measurements show distinct end to the reaction zone indicating a CJ point in JOB-9003. The results show that the reaction time of JOB-9003 is (11 ± 2) ns, and the corresponding reaction length is (0.075 ± 0.014) mm. The CJ pressure is (35.6 ± 0.9) GPa, and the pressure at Von-Neumann spike is (47.9 ± 1.2) GPa.

Keywords: detonation reaction zone; HMX; CJ pressure; laser interferometric method

(责任编辑 曾月蓉)