DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0415-07

JBO-9021 炸药的化学反应区宽度*

张 涛[1],谷 岩[1],赵继波[1],刘雨生[1],伍 星[2]
(1.中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999;
2.中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘要:采用激光干涉测试技术和楔形炸药构型,对新型钝感高能炸药 JBO-9021 的爆轰反应区宽度进行了实验研究。实验中在楔形 JBO-9021 炸药后加镀膜 LiF 晶体作为测试窗口,测试受试炸药与测试窗口界面的粒子速度剖面。将粒子速度剖面对时间进行二阶求导,通过粒子速度剖面的二阶求导曲线上等于零的时刻判读 CJ 点的时刻,从而得到化学反应区宽度。研究结果表明,新型钝感高能炸药 JBO-9021 的化学反应持续时间为(238±13) ns,相应的化学反应区宽度为(1.52±0.09) mm。

关键词:JBO-9021;高能钝感炸药;激光干涉测速技术;反应区宽度
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

炸药稳定爆轰时的反应区宽度,是决定和表征炸药爆轰性能的关键参数。反应区宽度一般定义为从爆轰波波阵面到波后声速点或者 CJ 点之间的距离或时间,在此期间炸药会完成大部分化学反应。化学反应区不会受到爆轰产物的膨胀引起的 Taylor 稀疏波的作用,因为 Taylor 稀疏波以声速进行传播,化学反应区的宽度将会保持不变。这样便可通过测量波后粒子速度剖面获得稳定爆轰波的反应区宽度。炸药的反应区宽度对研究炸药的冲击起爆过程,确定化学反应率函数、理解爆轰反应区结构具有重要意义[1-3]。三氨基三硝基苯(TATB)是常用的钝感高能炸药(IHE),研究 TATB 及以 TATB 为基炸药的化学反应率参数、反应区结构受到很多学者的重视[4-7]。V. Bouyer 等[8]采用激光干涉测试技术对多种 TATB 基和 HMX 基炸药的爆轰波后粒子速度剖面进行了实验测量,从而较精确地获得了不同尺寸下所研究炸药的化学反应区结构。同时,V. Bouyer 等[9]采用 2 种激光干涉测速技术(photon Doppler velocimehy (PDV)和 heterodyne velocimetry (HV))对三硝基甲烷与窗口材料 PMMA 界面的波后粒子速度剖面进行测量,在获得三硝基甲烷的化学反应区结构的同时,对 2 种激光干涉测试技术的测试结果进行了对比。A. V. Utkin 等[10]研究了装药颗粒直径对压装 RDX 及 HMX 基炸药的化学反应区结构的影响,发现 von Neumann 峰值对炸药的装药颗粒直径非常敏感,随着炸药装药颗粒直径的增大,von Neumann 峰值增大,这一点也能从不同颗粒直径炸药稳定爆轰时的能量释放速率得到佐证。I. Plaksin 等[11]研究了多种 PBX 炸药在爆轰形成过程中的化学反应区三维结构。R. Engelke 等[12]通过实验和数值模拟研究了多种炸药的化学反应区长度。

炸药反应区宽度主要通过测试炸药内部或炸药与物质接触面的粒子速度或压力获得,目前主要测试方法有电磁粒子速度计、锰铜压力计、激光干涉测速法。炸药反应区宽度研究的难点是 von Neumann 峰和爆轰反应区早期区域的短历时性,所以,炸药反应区研究对测试系统的时间分辨率要求极高。以往的实验研究受实验方法、实验条件的限制,实验数据精度不高。其中激光干涉测速因为测试精度高、时间分辨率高、测试系统抗干扰能力强等优点近年来被广泛应用。

本文中,采用一种新型的、具有更高测试精度和时间分辨率的激光干涉测速技术对一种新型钝感高能炸药 JBO-9021 稳定爆轰时的波后粒子速度剖面进行测试,通过一种新的数据处理方法获取 CJ 点,从而更精确地获得这种新型钝感高能炸药的化学反应区的持续时间和宽度。

* **收稿日期**:2015-09-17;**修回日期**:2015-10-21
第一作者:张 涛(1988—),男,硕士;**通信作者**:谷 岩,guyan@caep.cn。

1 实验装置及测试系统

实验装置及测试系统如图 1～2 所示。测试系统主要包括起爆装置、同步机、高压脉冲发生器、光纤探针、光纤放大器、激光器、激光干涉仪、示波器、计算机控制系统。测试窗口 LiF 晶体靠近受试炸药的一面镀铝膜作为粒子速度的载体。为了保证测试精度，膜层不宜过厚，采用的铝膜厚度控制为1.0 μm。为了使输入激光在 LiF 窗口上表面(靠近光纤探针侧)的反射光不影响测试信号光，LiF 窗口上表面与下表面(靠近受试炸药侧)存在 5°的倾角。实验中使用的激光干涉测速仪为波分时复用多点激光干涉测速系统，该系统基于光学多普勒效应，测速范围为 0～8 km/s，测速不确定度小于 2%。

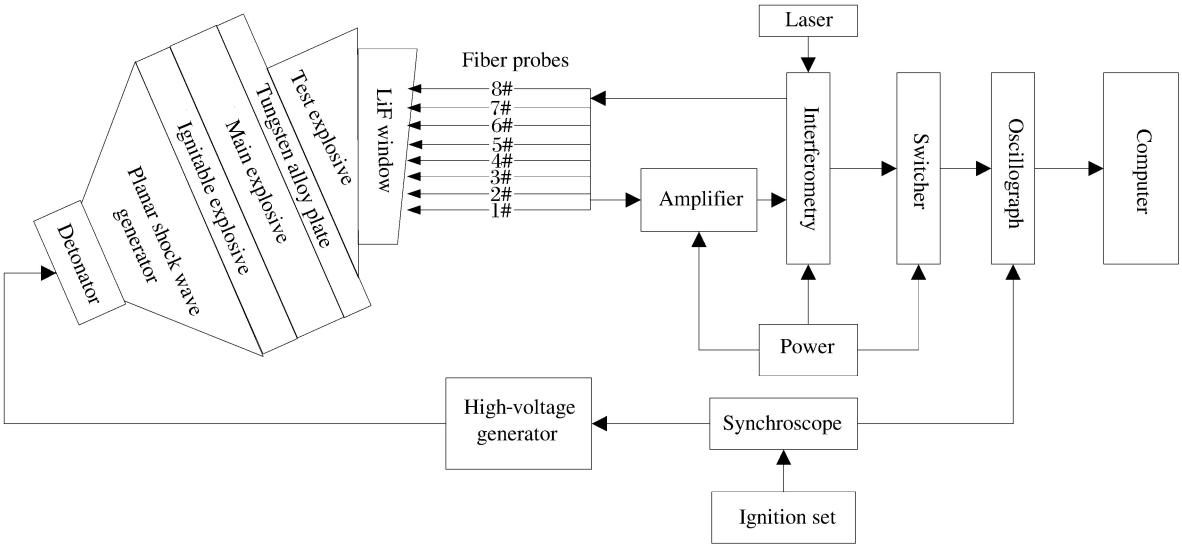

图 1 实验装置及测试系统图

Fig. 1 Sketch of experimental facility and measuring system



图 2 实验装置

Fig. 2 Sketch of experimental facility for studying reaction zone of JBO-9021 explosive

实验装置各部分尺寸分别为：平面波透镜，∅100 mm×37°；传爆药，∅100 mm×10 mm；主装药，∅100 mm×30 mm；钨合金，∅100 mm×6.08 mm；楔形受试炸药，70 mm×30°。其中平面波透镜主装药为 RHT-901，主要组成成分为 RDX 和 TNT，其质量之比 w(RDX)∶w(TNT)=60∶40；传爆药 JO-9159 以 HMX 为基，主要组成成分为 HMX 和粘结剂，其质量之比 w(HMX)∶w(粘结剂)=95∶5；主装药和楔形受试炸药 JBO-9021 以 TATB 为基，含有少量 HMX；钨合金为钨镍铁合金。

图 2 所示为本文中所采用的实验装置，为了获得波后粒子速度在稳定爆轰后不同爆轰波位置的变化情况，采用的受试炸药为楔形，这样可测量爆轰波运动不同距离后受试炸药的粒子速度，避免因爆轰

波在传播过程中的变化引起的不确定性。楔形受试炸药的三角形截面的斜面长度为 70 mm，楔形角为 30°，短边长度即高度为 35 mm，这样可以获得高度方向多点（本文中设置了 4 个测试点）的波后粒子速度。楔形受试炸药宽度为 50 mm，该尺寸设计可以避免边侧稀疏对爆轰波波阵面的影响。

实验过程中，通过起爆装置向同步机输出起爆信号。同步机输出 2 路同步信号：一路触发高压脉冲发生器起爆 26 号雷管；另一路触发示波器。26 号雷管起爆平面波透镜产生平面冲击波，平面冲击波起爆传爆药继而起爆主装药，主装药与钨合金衰减层紧密接触，通过衰减后，冲击波进入并起爆 JBO-9021 楔形受试炸药，受试炸药稳定爆轰后的爆轰波驱动紧贴其表面的铝膜运动；铝膜的运动轨迹即楔形炸药与窗口界面粒子速度剖面将通过激光干涉测速系统记录，通过窗口界面粒子速度剖面可以计算得到 JBO-9021 炸药的反应区宽度。

2　实验结果

实验得到的 JBO-9021 炸药与 LiF 窗口不同位置的界面粒子速度随时间的变化曲线如图 3 所示。其中 1＃、2＃、3＃、4＃光纤探针分别位于受试炸药中距离钨合金衰减层 10、11、12、13 mm 处。从图 3 可以看出，当冲击波进入受试炸药 10 mm 时，1＃光纤探针正对处的粒子速度接近 2.5 km/s。根据粒子速度剖面的波形和幅值可以判断，在此测试点，JBO-9021 炸药已经达到爆轰。冲击波在进入炸药 11、12、13 mm 时，粒子速度剖面的 von Neumann 峰有小幅震荡。此震荡可以通过 von Neumann 峰的短历时性和高频性超出测试系统的极限频率得到解释。从粒子速度剖面的幅值和波形可以判断冲击波在进入炸药 10 mm 后，JBO-9021 炸药已经达到稳定爆轰。

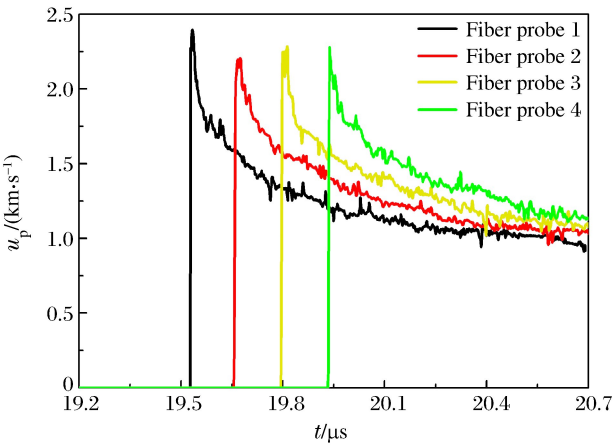

图 3　受试炸药与 LiF 窗口界面粒子速度随时间的变化曲线

Fig. 3　Particle velocity-time curves at the interface between JBO-9021 explosive and LiF window

从图 2 可以看出，本文中采用激光干涉测试技术获取的是 LiF 窗口与 JBO-9021 炸药界面的粒子速度。由于两者阻抗并非完全匹配，测试得到的粒子速度并非受试炸药中稳定爆轰时的波后粒子速度，同时由于窗口材料在冲击压缩过程中折射率会发生变化，引起一定的测试误差，所以需要对其进行修正后得到 JBO-9021 炸药稳定爆轰时的波后粒子速度剖面。

B. J. Jensen 等[13]提出在加窗光子多普勒测速中，因冲击压缩作用窗口折射率变化会引入附加多普勒频移，即窗口折射率变化导致测得的界面速度变大，所以采用下式进行修正：

$$v^*(t)=a(\lambda)v(t)-[a(\lambda)-1]v_s(t) \tag{1}$$

式中：v^* 为激光干涉测速测量的表观速度，也即未经过折射率变化修正的速度；$a(\lambda)$ 为窗口修正系数，$v(t)$ 为实际样品-窗口界面粒子速度；$v_s(t)$ 为窗口材料的自由面粒子速度。

采用下式：

$$v(t)=v^*(t)-\Delta v(t) \tag{2}$$

$$\Delta v(t)=0.273\,9v(t) \tag{3}$$

对式(1)进行简化[14]，即可得到样品-窗口界面的实际粒子速度。

JBO-9021 炸药是一种新型高能钝感炸药，当前对其研究还不够全面，所以其爆轰产物的状态方程目前还无法获取。PBXC10 和 JBO-9021 炸药均以 TATB 为基，成分相似，可采用 PBXC10 的 JWL 状态方程[15]与冲击波阵面的 RH 关系：

$$p=\rho_0 D_J u_p \tag{4}$$

$$\rho_0 D_s = \rho (D_J - u_p) \tag{5}$$

进行联立。式中：p 为冲击波(爆轰波)阵面压力，ρ_0 为炸药的初始密度，ρ 为冲击波(爆轰波)过后 JBO-9021 炸药的密度，D_J 为冲击波(爆轰波)速度，u_p 为波后粒子速度。

计算得到 JBO-9021 的 Hugoniot 关系为：

$$D_J = 5.441 + 1.134 u_p \tag{6}$$

式中：D_J 和 u_p 的单位均为 km/s。

单晶 LiF 窗口的 Hugoniot 关系[16]为：

$$D_J = 5.148 + 1.358 u_p \tag{7}$$

式中：D_J 和 u_p 的单位均为 km/s。

根据界面连续定理，即在接触界面上，冲击波过后的压力和粒子速度不能出现间断。同时将冲击波阵面的动量守恒定理(式(4))代入，对受试炸药与 LiF 窗口界面粒子速度曲线进行二次修正。这样就可以得到如图 4 所示的受试炸药 JBO-9021 中稳定爆轰时的波后粒子速度。

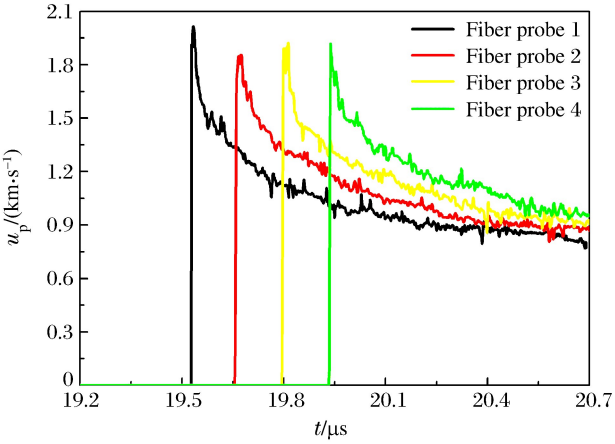

图 4 修正后的受试炸药与 LiF 窗口界面粒子速度随时间的变化曲线

Fig. 4 Amended particle velocity-time curves at the interface between JBO-9021 explosive and LiF window

炸药反应区宽度研究的难点是 von Neumann 峰和爆轰反应区早期区域的短历时性。从图 4 可清楚地看到，虽然采用了时间分辨率达到 2 ns 的激光干涉测试技术，还是由于时间分辨率未及 von Neumann 峰的时间宽度而未能准确获取波后粒子速度 von Neumann 峰值，但测试结果获取了爆轰波过后粒子速度起跳后约 9 ns 内的 von Neumann 峰值平均值。实验成功获取了粒子速度起跳即 von Neumann 峰值出现的时刻，但化学反应区终点即 CJ 点不甚明显。为了验证实验结果是否正确反映 JBO-9021 炸药的特征，本文中参考了其他学者对以 TATB 为主要成分的钝感炸药化学反应区结构的实验结果。W. L. Seitz 等[17]通过实验和数值模拟获得了 PBX-9502 在一维平面定常爆轰时的反应区结构。C. M. Tarver 等[18]研究了 LX-9 炸药的反应区结构，从其测试结果均看不到明显的化学反应区终点和 CJ 点，说明以 TATB 为主要成分的钝感炸药没有明显的化学反应区终点。

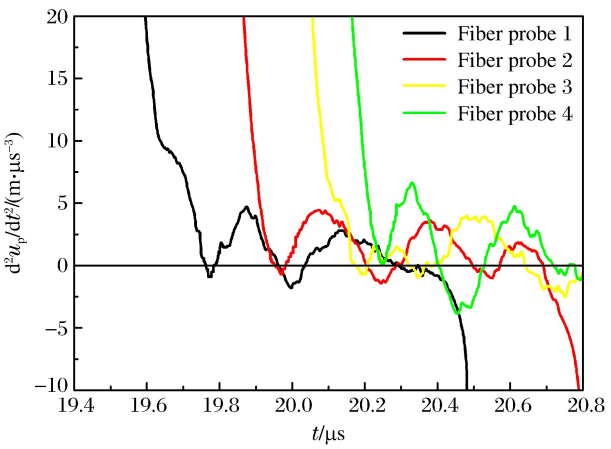

图 5 平滑后的受试炸药与 LiF 窗口界面粒子加速度斜率随时间的变化曲线

Fig. 5 Smoothed derivative of acceleration to time-time curves at the interface between JBO-9021 explosive and LiF window

根据爆轰波的 ZND 模型，爆轰波后产物粒子速度在 von Neumann 峰后随着化学反应的进行快速下降，产物粒子速度曲线在化学反应区表现出凹形；随着化学反应的结束，粒子速度会由于产物飞散造成的稀疏波进一步降低，粒子速度曲线在产物飞散区接近直线。所以根据 ZND 模型，如果将爆轰波后产物粒子速度曲线对时间进行二阶微分，则在化学反应区，该值不断快速降低，但始终为正；在产物飞散区，该值约为零，但会由于冲击波不稳定性和粒子速度的相互碰撞影响而不断震荡。

对图 4 所示的受试炸药稳定爆轰时的波后粒子剖面对时间求二阶导数，得到如图 5 所示受试炸药不同位置处波后粒子的加速度斜率曲线。

从图 5 可以看出，受试炸药不同位置处粒子的加速度斜率曲线虽绝对值大小不一，但波形和趋势较吻合。先导冲击波过后，粒子速度出现突跃，但随后化学反应开始，粒子的加速度出现一个快速降低的

突跃；随着化学反应完成份额的升高，后续的化学反应越来越少，致使化学反应导致的粒子加速度绝对值逐渐减小，表现在图 5 中即为粒子加速度斜率快速下降；当达到某一点后，化学反应基本完成，表现在图 5 中即为化学反应造成加速度的斜率基本为零。后续粒子速度下降主要由产物飞散时的 Taylor 稀疏波引起。根据图 5 中曲线和 $d^2u_p/dt^2=0$ 的交点可以判断图 4 中曲线的拐点即化学反应区终点或 CJ 点时刻。从图 4～5 可以得到不同探针处的粒子速度最大值即 von Neumann 峰出现的时刻和其拐点即 CJ 点出现的时刻，获得反应区持续时间。炸药化学反应区宽度可以根据下式确定：

$$a=(D_J-u_p)\tau \tag{8}$$

式中：τ 为炸药反应区持续时间，a 为反应区宽度，D_J 为炸药的 CJ 爆速，u_p 为在反应区持续时间 τ 内炸药反应产物的粒子速度平均值。

JBO-9021 的稳定爆速为 7.86 km/s。通过图 4 和 CJ 拐点时刻通过积分求平均获得化学反应区平均粒子速度 u_p，然后根据式(8)得到爆轰反应区宽度、化学反应持续时间及化学反应区宽度，见表 1。

表 1 不同探针处测得的 JBO-9021 炸药化学反应区宽度

Table 1 Lengths of reaction zone for JBO-9021 explosive at different points

炸药	探针编号	u_p/(km·s^{-1})	τ/μs	a/mm
JBO-9021	1#	1.431	0.241	1.55
JBO-9021	2#	1.477	0.228	1.46
JBO-9021	3#	1.441	0.251	1.61
JBO-9021	4#	1.499	0.231	1.47
PBX-9502				2[17]
PBX-9502				2.1[19]
LX-9				2[18]

3　讨　论

炸药反应区宽度研究的难点是 von Neumann 峰和爆轰反应区早期区域的短历时性。本文中采用一种新型激光干涉测速技术对高能钝感炸药 JBO-9021 稳定爆轰时的波后粒子速度剖面进行了测试，通过一种新的数据处理方法将粒子速度剖面对时间进行二阶求导获取 CJ 点，从而获得所研究炸药的化学反应区持续时间和宽度。

从图 4 可以看出，以 TATB 为基的新型钝感高能炸药 JBO-9021 稳定爆轰时，粒子速度经过前导冲击波后突跃到 von Neumann 峰，之后随着炸药化学反应的进行，波后粒子速度呈现较快速下降，该过程持续约 238 ns，说明 JBO-9021 炸药在 von Neumann 峰后 238 ns 内完成主要化学反应；主要化学反应完成后由于产物飞散造成的稀疏波导致粒子速度进一步缓慢降低。

JBO-9021 属于钝感炸药，化学反应区较长且后期反应缓慢，导致整个粒子速度剖面未能出现明显的 CJ 点。通过对粒子速度波形进行二阶求导，可以较清楚和准确地确定 JBO-9021 爆轰波后粒子速度剖面的 CJ 点。

将本文研究结果同文献报道的研究结果进行比较。W. L. Seitz 等[17]通过实验和数值模拟得到 PBX-9502 在一维平面定常爆轰时反应区宽度为 2 mm。C. M. Tarver 等[18]对 LX-9 炸药(w(TATB)∶w(Kel-F)=92.5∶7.5)的反应区宽度进行了研究，得到其反应区宽度为 2 mm。S. A. Sheffield 等[19]通过 Hugoniot 曲线相交的方法对 PBX-9502 进行了研究，得到其反应区宽度为 2.1 mm。JBO-9021 的反应区宽度应较 PBX-9502、LX-9 等的窄约 25%。这是因为 PBX-9502、LX-9 均以 TATB 为主装药，JBO-9021 是以 TATB 为主装药，掺加部分 HMX，而 HMX 炸药的化学反应进行较快，所以 JBO-9021 的反应区宽度较 PBX-9502、LX-9 的窄。这与本文的实验结果相符，说明本文中得到的 JBO-9021 炸药在一维平面定常爆轰时的反应区宽度是可信的。

4 结 论

采用一种高测试精度和时间分辨率的激光干涉测速技术对一种新型高能钝感炸药 JBO-9021 稳定爆轰时的波后粒子速度剖面进行了测试,通过新的数据处理方法将粒子速度剖面对时间进行二阶求导获取 CJ 点,从而获得所研究炸药的化学反应区持续时间和宽度,得到如下结论:

(1)激光干涉测速技术结合楔形炸药是一种研究炸药反应区结构的有效方法,实验装置简便,信号响应快。

(2)JBO-9021 炸药有较明显的化学反应区存在,可以用 ZND 模型进行描述。但由于在 CJ 点后仍有少量化学反应进行,所以化学反应终点和 CJ 点不易判读,说明利用 ZND 模型并不能很好地对这种 TATB 基炸药的化学反应区进行描述。

(3)采用将粒子速度剖面对时间进行二阶求导获取 CJ 点的新的数据处理方法,可以较容易得到更准确的 CJ 点,从而获得所研究炸药的化学反应区持续时间和宽度。

(4)对 JBO-9021 炸药的波后粒子速度剖面进行实验测量,采用新的数据处理方法,得到这种新型高能钝感炸药的化学反应持续时间为(238±13) ns,相应的化学反应区宽度为(1.52±0.09) mm。

参考文献:

[1] Armstrong M R, Crowhurst J C, Bastea S, et al. Observation of off-hugoniot shocked states with ultrafast time resolution[C]// Proceedings of the 14th International Detonation Symposium. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2010:366-373.

[2] Mattsson A E, Wixom R R, Mattsson T R. Calculating hugoniots for molecular crystals from first principles[C]// Proceedings of the 14th International Detonation Symposium. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2010:537-544.

[3] 黄奎邦,陈永丽,于鑫,等. JB-9014 炸药的化学反应率参数及应用研究[J]. 爆炸与冲击,2013,33(增):140-144.
Huang Kuibang, Chen Yongli, Yu Xin, et al. Parameters and application research of reaction rate for JB-9014 explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(suppl):140-144.

[4] Bouyer V, Doucet M, Decaris L. Experimental measurements of the detonation wave profile in a TATB based explosive[C]// EPJ Web of Conferences 10. DOI: 10.1051/epjconf/20101000030.

[5] Tarver C M. Detonation reaction zones in condensed explosives[J]. Aip Conference Proceedings, 2005,845(1): 1026-1029.

[6] Hansen J S, Nowakowski B, Lemarchand A. Molecular-dynamics simulations and master-equation description of a chemical wave front: Effects of density and size of reaction zone on propagation speed[J]. Journal of Chemical Physics, 2006,124(3):034503.

[7] Pulham C R, Millar D I A, Oswald I D H, et al. Pressure-cooking of explosives: The crystal structure of a high-pressure, high-temperature form of RDX as determined by X-ray and neutron diffraction[C]// Proceedings of the 14th International Detonation Symposium. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2010:395-400.

[8] Bouyer V, Hebert P, Doucet M, et al. Experimental measurements of the chemical reaction zone of TATB and HMX based explosives[C]// Biennial International Conference of the Aps Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. 2012,1426(1):209-212.

[9] Bouyer V, Sheffield S A, Dattelbaum D M, et al. Experimental measurements of the chemical reaction zone of detonating liquid explosives[C]// 16th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. The American Physical Society, 2009,54(8):177-180.

[10] Utkin A V, Mochalova V M, Zav'yalov V S, et al. Influence of powder dispersion on the reaction zone structure for pressed RDX and HMX[C]// Proceedings of the 14th International Detonation Symposium. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2010:194-198.

[11] Plaksin I, Rodrigues L, Plaksin S, et al. Effect of the reaction light absorption on the formation of the detonation reaction zone 3D-structure in PBXs[C]// Proceedings of the 14th International Detonation Symposium. Albuquer-

que: Sandia National Laboratory, 2010:241-250.

[12] Engelke R, Sheffield S A, Stacy H L. Chemical-reaction-zone lengths in condensed-phase explosives[J]. Physics of Fluids, 2004,16(11):4143-4149.

[13] 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):013523-013523-10.

[14] LaLone B M, Fat'yanov O V, Asay J R, et al. Velocity correction and refractive index changes for [100] lithium fluoride opticalwindows under shock compression, recompression, and unloading[J]. Journal of Applied Physics, 2008,103(9):093505-093505-7.

[15] Mader C L. Numerical modeling of detonation[M]. Berkely, California: University of California Press,1979:48.

[16] Carter W J. Hugoniot equation of state of some alkali halides[J]. High Temperatures-High Pressures, 1973,5(3):313-318.

[17] Seitz W L, Stacy H L, Engelke R, et al. Detonation reaction-zone structure of PBX-9502[C]// Proceedings of the Ninth International Detonation Symposium. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1989:675.

[18] Tarver C M, Breithaupt R D, Kury J W. Current experimental and theoretical understanding of detonation waves in heterogeneous solid explosives[C]// Proceedings of the Eighth International Detonation Symposium. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1985:692.

[19] 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.

Chemical reaction zone length of JBO-9021

Zhang Tao[1], Gu Yan[1], Zhao Jibo[1], Liu Yusheng[1], Wu Xing[2]

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
2. *Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In this work we used the laser velocity interferometry for measuring particle velocities and the wedge-shaped test explosive to study the structure of the chemical reaction zone of JBO-9021, a new insensitive high explosive (80 weight% TATB explosive, 15 weight% HMX explosive, 5 weight% binder). We conducted an experiment to achieve the in-situ particle velocity histories of a thin aluminium film between the test explosive and the LiF window that were introduced to obtain the particle velocities at different positions in the wedge-shaped test explosive after detonation. The CJ point of the particle velocity histories for JBO-9021 were derived from a second time derivative of the velocity history of particles from which we successfully obtained the chemical reaction structure, including the chemical reaction duration and the chemical reaction zone length. The results show that the chemical reaction duration of JBO-9021 is (238±13) ns and the chemical reaction zone length of JBO-9021 is about (1.52±0.09) mm. Additionally, they also show that the CJ point obtained from a second time derivative of the particle velocity histories is effective.

Keywords: JBO-9021; insensitive high explosive; laser velocity interferometry; chemical reaction zone length

(责任编辑　张凌云)