DOI: 10.11883/bzycj-2016-0330
文章编号: 1001-1455(2018)04-0743-06

JBO-9021 炸药的冲击起爆 Pop 关系*

张 涛[1],赵继波[1],伍 星[2],刘雨生[1],刘 艺[1],杨 佳[1],谷 岩[1]
(1. 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重点实验室,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: 采用激光干涉测速技术和高速扫描相机,对新型钝感高能炸药 JBO-9021(TATB、HMX 和黏结剂的质量分数分别为 80%、15%和 5%)的冲击起爆 Pop 关系进行了研究。通过激光干涉测速技术获得了 JBO-9021 炸药冲击起爆过程中不同光纤探针处(即不同冲击波位置)的粒子起跳瞬时速度,结合未反应炸药的雨贡纽曲线,获得了粒子起跳点的冲击波压力;通过高速扫描相机获得冲击到爆轰距离,结合光纤探针所处位置,得到不同压力下 JBO-9021 炸药的冲击到爆轰距离,进而拟合出反映 JBO-9021 炸药冲击起爆性能的 Pop 关系曲线。结果显示,相对于 TATB 基 PBX9502 炸药和 HMX 基 PBX9501 炸药,JBO-9021 炸药的冲击起爆性能更加优异。

关键词: JBO-9021;钝感高能炸药;激光干涉技术;Pop 曲线
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

三氨基三硝基苯(TATB)是常用的钝感高能炸药(IHE)。近年来,TATB 基炸药的冲击起爆性能和冲击动力学性能受到国内外众多学者的重视[1-4],其中钝感高能炸药在冲击波作用下的 Pop 关系是表征炸药性能的关键参数,也是炸药冲击起爆性能和炸药安定性研究的重要课题之一。如何高效地获取炸药的高精度 Pop 关系是当前国内外学者面临的问题之一。Sollier 等[5]对冲击作用下 TATB 基炸药 T2 的冲击起爆 Pop 关系进行了实验研究,获得了 0.5～25 GPa 压力下 T2 炸药的冲击起爆 Pop 关系。Wang 等[6]采用电炮驱动薄飞片高速撞击作为冲击加载手段,以激光干涉测速技术作为测试手段,研究了一种 TATB/HMX 基炸药在高压短脉冲冲击加载条件下的冲击起爆性能,获得了 10～17 GPa 时的 Pop 关系曲线。Vandersall 等[7]利用气炮驱动组合式飞片,结合锰铜应力计,对 LX04 炸药在低幅值单/双冲击波加载下的冲击响应进行了研究,发现 LX04 炸药在 0.6～1.4 GPa 压力下会发生冲击减敏,并获得了其低压 Pop 关系。另外 Gustavsen 等[8]、Sheffield 等[9-10]、Urtiew 等[11]、Chidester 等[12]利用电磁粒子速度计对 HMX 基炸药 EDC-37、PBX9501,以及 TATB 基炸药 LX-17、PBX9502 等多种高能钝感炸药的冲击起爆性能进行了研究,获得了表征炸药冲击起爆性能的 Pop 关系,并据此确定了炸药的化学反应速率方程参数。

本研究中采用测试精度相对更高的激光干涉测速技术,结合高速扫描相机,对新型钝感高能炸药 JBO-9021 的冲击起爆性能开展实验研究,结合一种新的获取炸药 Pop 关系的研究方法,得到表征 JBO-9021 冲击起爆性能的 Pop 关系。

1 实验装置及测试系统

实验装置及测试系统如图 1 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、激光干涉测速仪、示波器、计算机控制系统。测试窗口 LiF 晶体镀铝膜,镀膜一侧靠近受试炸药,作为粒子速度的载体。为了保证测试精度,膜层不宜过厚,本实验中铝膜厚度控制在 1.0 μm。为了使入射激光在 LiF 窗口上表面(靠近光纤探针一侧)的反射光不影响测试信号光,LiF 窗口的上表面与下表面(靠近受试炸药一侧)之间保持 5°倾角。通过高速扫描相机获得较精确的冲击到

* **收稿日期**: 2016-10-31; **修回日期**: 2016-12-13
第一作者: 张 涛(1988—),男,硕士,助理研究员; **通信作者**: 谷 岩,guyan@caep.cn。

爆轰距离。

采用自行研制的波分时复用多点激光干涉测速系统，测速范围为 0～8 km/s，测速不确定度小于 2%。平面波透镜的主装药为 RHT-901，主要成分为 RDX 和 TNT，质量分数分别为 60%和 40%，直径为 100 mm。传爆药 JO-9159 以 HMX 为基，HMX 与黏结剂的质量比为 95∶5，尺寸为∅100 mm×10 mm；主装药和受试炸药均采用 JBO-9021，JBO-9021 以 TATB 为基，含有少量 HMX，主装药的尺寸为∅100 mm×30 mm；钨合金飞片采用尺寸为∅100 mm×6.08 mm 的钨镍铁合金。

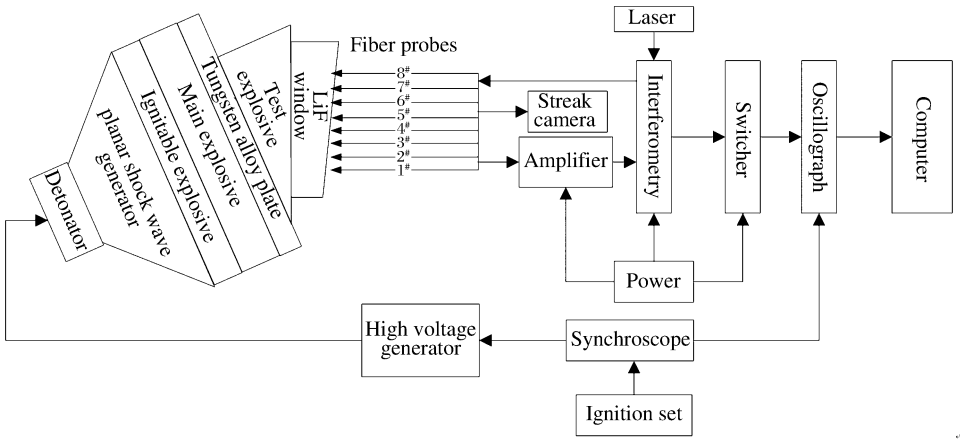


图 1 实验装置及测试系统

Fig. 1 Experiment setup and measuring system

为了获得冲击波进入受试炸药后粒子运动速度随冲击波传播距离的变化情况，受试炸药选择楔形，如图 2(a)所示。为了避免边侧稀疏波的影响，确保测试炸药部位受到一维冲击，楔形炸药的宽度设计为 50 mm；为了获得多个测点(本研究中设置了 8 个测试点，见图 2(b))的波后粒子速度，楔形炸药的斜面长度设计为 70 mm，楔形角为 30°。

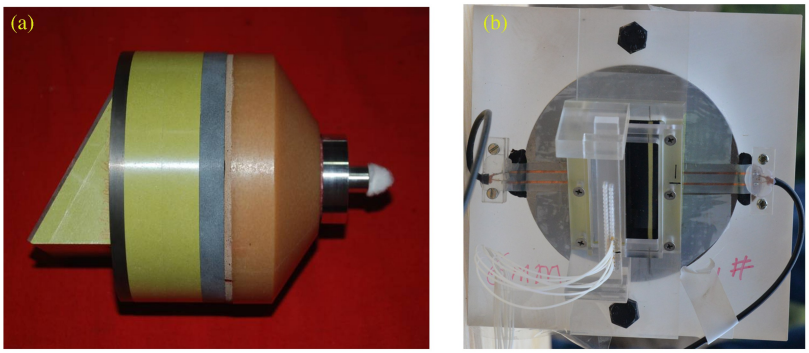


图 2 实验装置实物

Fig. 2 Actual experimental device

实验过程中，通过起爆装置向同步机输出起爆信号。同步机输出两路同步信号：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 JBO-9021 主装药；主装药与钨合金衰减层紧密接触，冲击波经过钨合金衰减层衰减后，进入并起爆 JBO-9021 楔形受试炸药，驱动紧贴其表面的铝膜运动；光纤探头将探测激光输出至 LiF 窗口表面，透过窗口到达铝膜表面，反射光携带楔形炸药/LiF 窗口界面粒子速度剖面的多普勒光信号返回光纤探头，通过光纤放大器进入激光干涉仪，经由光电传感器将承载速度剖面的光信号转化成电信号，最后由示波器记录。通过激光干涉测速处理，得到楔形炸药/窗口界面粒子速度剖面。同时由高速扫描相机记录，得到冲击转爆轰距离。

获得 Pop 关系的基本思路：在受试炸药冲击起爆过程中，随着冲击波进入受试炸药距离的不同，冲击波强度会发生变化，结合波后粒子速度剖面的粒子起跳速度和未反应炸药的雨贡纽曲线，可获得冲击波进入受试炸药不同距离处的冲击波压力；通过探针与冲击转爆轰点的距离获得该探针所处压力下的冲击到爆轰距离，从而获得一组初始冲击压力-冲击起爆距离数据，最后由多组实验数据拟合 Pop 关系。

2　实验结果与分析

实验过程中，平面波透镜、传爆药和主装药相继引爆产生一定强度的冲击波，经过不同厚度钨合金衰减层，冲击波强度得到衰减调节。当冲击波到达钨合金衰减层与受试炸药界面时，在受试炸药中入射一个特定幅值的冲击波。测得的楔形 JBO-9021 炸药后界面不同位置的粒子速度 u_p 随时间 t 的变化曲线如图 3 所示，其中光纤探针 1#～8# 分别测量冲击波进入炸药的距离为 4、5、6、7、8、9、10、11 mm 时的波后粒子速度剖面。

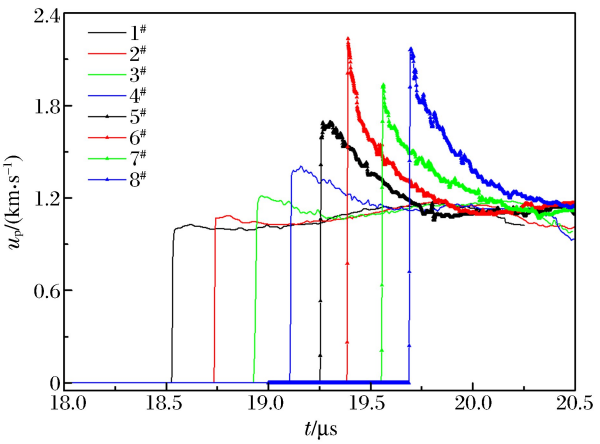


图 3　JBO-9021 炸药/LiF 窗口界面 u_p-t 曲线

Fig. 3　u_p-t curve of the interface of JBO-9021 explosive and LiF window

由于激光干涉测试技术获取的是 LiF 窗口/JBO-9021 炸药界面的粒子速度在垂直于斜面的分速度（如图 1 所示），并且 LiF 窗口与 JBO-9021 炸药的阻抗无法完全匹配，所测粒子速度并非受试炸药中稳定爆轰时的波后粒子速度，同时在冲击压缩过程中窗口材料的折射率会发生变化，从而引起一定的测试误差，因此需要对测量结果进行修正，以得到 JBO-9021 炸药稳定爆轰时的波后粒子速度剖面。采用角度修正、窗口折射率修正、阻抗匹配修正[13]后，获得冲击波在受试炸药 JBO-9021 中传播时的波后粒子速度剖面，如图 4 所示。从图 4 中可以看到：当冲击波进入受试炸药 4 mm 时，探针 1# 处对应的粒子速度开始起跳；此后随着冲击波进入炸药距离的增加，波后粒子速度峰值不断增加，从不同位置探针之间的起跳时间差可以看出，冲击波不断加速；冲击波进入炸药 8～9 mm 时，受试炸药发生爆轰。从波形可以看出，冲击波在进入炸药 0～8 mm（探针 1#～5#）的过程中，强度不断增加，但并未发生爆轰。通过不同探针处测得的粒子速度 u_p 和探针位置 h 获得一组 u_p-h 数据，其中粒子速度取波后粒子速度剖面的起跳速度，如表 1 所示。

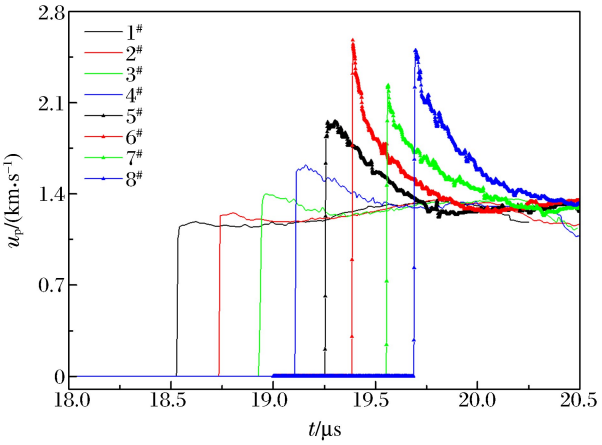


图 4　修正后 JBO-9021 炸药波后粒子速度剖面

Fig. 4　Rectified particle velocity-time curve for JBO-9021 explosive

高速扫描相机的测试结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出：当入射冲击波进入受试楔形炸药后，空气隙开始发光，迹线线宽较窄；经过一段较明显的加速段（迹线颜色较浅，宽度较窄），冲击波转化为爆轰波，因为爆轰产物持续发光，所以迹线加粗，爆轰段的迹线斜率保持不变，也就是爆轰波传播速度保持恒定。将高速扫描结果进行处理后可以得到该发试验的冲击转爆轰时间为 1.5 μs，从冲击波进入受试楔形炸药到炸药爆轰，冲击波在传播方向的传播距离为 8.49 mm。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

探针编号	h/mm	s/mm	u_p/(km·s^{-1})	p/GPa
1#	4	4.49	1.147	10.31
2#	5	3.49	1.233	11.72
3#	6	2.49	1.349	13.77
4#	7	1.49	1.592	18.60
5#	8	0.49	1.838	27.06

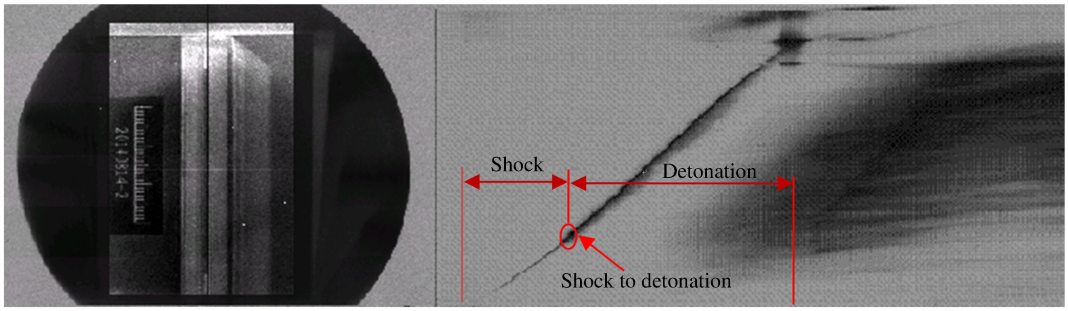


图 5 高速扫描相机测试结果

Fig. 5 Result obtained using streak camera

JBO-9021 炸药中未反应炸药的雨贡纽关系和动量守恒关系可表示为[13]

$$D_s = 1.07 + 3.18u_p \qquad 1.18\ \text{km/s} < u_p < 1.68\ \text{km/s} \tag{1}$$

$$p = \rho_0 D_s u_p \tag{2}$$

式中：p 为冲击波阵面压力，GPa；ρ_0 为炸药的初始密度，g/cm^3；D_s 为冲击波速度，km/s；u_p 为冲击波过后的粒子速度，km/s。根据式(1)、式(2)以及炸药的初始密度，可以计算得到冲击压力与冲击波进入受试炸药距离的关系，结合高速扫描相机得到的冲击起爆距离 8.49 mm，可以获得探针位置与冲击转爆轰点的距离 s，如表 1 所示。

对表 1 所示的冲击波进入炸药不同距离处，未反应炸药经历不同冲击压力时的冲击到爆轰距离(X)进行最小二乘法拟合，获得 JBO-9021 炸药的冲击起爆 Pop 关系(见图 6)，即

$$\lg X = (2.951 \pm 0.182) - (2.246 \pm 0.152)\lg p \qquad 10.3\ \text{GPa} < p < 27.1\ \text{GPa} \tag{3}$$

式中：p 的单位为 GPa；X 的单位为 mm。

从式(3)所示的 JBO-9021 炸药冲击起爆 Pop 关系可知，当入射冲击波压力分别为 10 和 15 GPa 时，冲击到爆轰距离分别为 5.07 和 2.04 mm。以纯 TATB 为主装药的炸药 PBX9502 在入射冲击波压力分别为 10 和 15 GPa 时，其冲击到爆轰距离分别为 15.85 和 4.58 mm。以纯 HMX 为主装药的炸药 PBX9501 在入射冲击波压力分别为 4.2 和 8.3 GPa 时，其冲击到爆轰距离分别为 5.07 和 2.04 mm。可以看出：相对于 PBX9502 炸药，JBO-9021 炸药的冲击起爆感度较高，即 JBO-9021 炸药对起爆药的要求更低，同时由于 HMX 的爆压和爆速较 TATB 更高，使得 JBO-9021 炸药的爆轰性能更加优越；而相

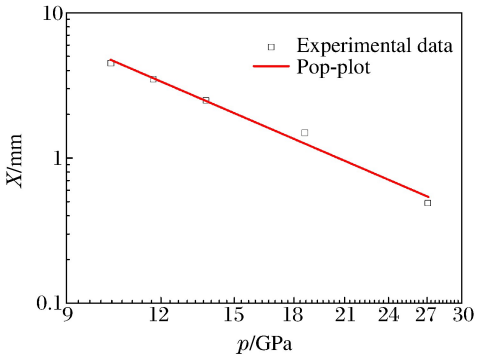


图 6 JBO-9021 炸药的 Pop 关系

Fig. 6 Pop-plot of JBO-9021 explosive

对于 PBX9501 炸药，JBO-9021 炸药的冲击起爆感度较低，表明 JBO-9021 炸药的安全性更好，炸药安全性的提高对武器的生产、运输和使用将起到积极的推动作用。

3　结　论

采用一种高测试精度、高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 在冲击起爆过程中不同冲击波位置处的波后粒子速度剖面进行了测量；并采用高速扫描相机测量冲击波进入炸药的距离随时间的变化关系，获得了冲击到爆轰距离。采用不同冲击波位置处的波后粒子起跳速度和该点到冲击转爆轰点的距离，拟合得到表征 JBO-9021 炸药冲击起爆性能的 Pop 关系，即 $\lg X=(2.951\pm0.182)-(2.246\pm0.152)\lg p$ (10.3 GPa$<p<$27.1 GPa)。研究结果表明：激光干涉测速技术结合楔形炸药是一种研究炸药冲击起爆过程中波后流场状态的有效方法，实验装置简捷，测试信号上升前沿窄，可在一发冲击起爆实验的不同冲击波位置处获得冲击压力和冲击到爆轰距离，继而拟合得到受试炸药的 Pop 关系，方法简单、高效，精度较高。

参考文献：

[1] GUSTAVSEN R L, THOMPSON D G, OLINGER B W, et al. Shock initiation experiments on ratchet grown PBX 9502: LA-UR-10-01468[R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory (LANL), 2010.

[2] 张涛，谷岩，赵继波，等. 新型高能钝感炸药 JBO-9X 在较高冲击压力下冲击起爆过程的实验研究[J]. 火炸药学报，2016，39(1)：28-33.
ZHANG Tao, GU Yan, ZHAO Jibo, et al. Experimental study on shock initiation process of a new insensitive high explosive JBO-9X under high impact pressure[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1): 28-33.

[3] BOUYER V, DOUCET M, DECARIS L. Experimental measurements of the detonation wave profile in a TATB based explosive[C]// EPJ Web of Conferences, EDP Sciences, 2010, 10: 00030.

[4] BOUYER V, HEBERT P, DOUCET M, et al. Experimental measurements of the chemical reaction zone of TATB and HMX based explosives[J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1426(1): 209-212.

[5] SOLLIER A, MANCZUR P, CROUZET B, et al. Single and double shock initiation of TATB based explosive T2: comparison of electromagnetic gauge measurements with DNS using different reactive flow models[C]// Proceedings of the 14th Symposium (International) on Detonation. Coeur d'Alene, USA, 2010: 563-572.

[6] 王桂吉，赵同虎，莫建军，等. 一种以 TATB/HMX 为基炸药的到爆轰距离[J]. 爆炸与冲击，2006，26(6)：510-515.
WANG Guiji, ZHAO Tonghu, MO Jianjun, et al. Run distance to detonation in a TATB/HMX-based explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6): 510-515.

[7] VANDERSALL K S, TARVER C M, GARCIA F, et al. Low amplitude single and multiple shock initiation experiments and modeling of LX-04: UCRL-CONF-222467[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 2006.

[8] GUSTAVSEN R L, SHEFFIELD S A, ALCON R R, et al. Initiation of EDC-37 measured with embedded electromagnetic particle velocity gauges[J]. AIP Conference Proceedings, 2000, 505(1): 879-882.

[9] SHEFFIELD S A, GUSTAVSEN R L, ALCON R R. *In-situ* magnetic gauging technique used at LANL-method and shock information obtained[J]. AIP Conference Proceedings, 2000, 505(1): 1043-1048.

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

[11] URTIEW P A, VANDERSALL K S, TARVER C M, et al. Shock initiation experiments and modeling of composition B, C-4, and ANFO[C]// Proceedings of the 13th Symposium (International) on Detonation. Norfolk, 2006: 432-439.

[12] CHIDESTER S K, THOMPSON D G, VANDERSALL K S, et al. Shock initiation experiments on PBX 9501 explosive at pressures below 3 GPa with associated ignition and growth modeling[J]. AIP Conference Proceedings, 2007, 955(1): 903-906.

[13] 张涛,赵继波,伍星,等.未反应 JBO-9021 炸药冲击雨贡纽曲线的研究[J].高压物理学报,2016,30(6):457-462.
ZHANG Tao, ZHAO Jibo, WU Xing, et al. Hugoniot curve of unreacted JBO-9021 explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016,30(6):457-462.

Pop relationship of JBO-9021 explosives

ZHANG Tao[1], ZHAO Jibo[1], WU Xing[2], LIU Yusheng[1],
LIU Yi[1], YANG Jia[1], GU Yan[1]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, 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 study we performed experiment on JBO-9021, a new kind of high insensitive explosive, in which the mass fractions of TATB, HMX and binder are 80%, 15% and 5%, respectively, under strong shock and achieved its particle velocity histories using laser interferometry and a high-speed scanning camera. We derived the initial shock pressures at different positions in the wedge-shaped test explosive from the particle velocity histories that were measured by laser interferometry and the Hugoniot curve of the unreacted JBO-9021 explosive. According to the run distance to detonation obtained by a streak camera and the locations of the pins, we investigated the Pop relationship of this high insensitive explosive as a function of the initial shock pressure and the run distance to detonation, and demonstrated that JBO-9021's shock initiation performance is superior to that of the TATB based explosive PBX9502 and the HMX based explosive PBX9501.

Keywords: JBO-9021; insensitive high explosive; laser interferometry; Pop-plot

(责任编辑 王 影)