

文章编号: 1001-1455(2012)05-0490-05

常温下 JBO-9021 高能钝感炸药直径效应实验^{*}

汪 斌, 谭多望, 赵继波, 文尚刚

(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 621900)

摘要: 通过光电联合测试方法, 测量了常温下直径为 10、15 和 30 mm 高能钝感炸药柱 JBO-9021 炸药的定态爆速和波形, 根据拟合的爆轰波阵面形状, 分析了波阵面法向速度 D_n 与当地曲率 κ 之间的关系。研究表明, JBO-9021 炸药的定态爆速随药柱直径的增大而增大, JBO-9021 ($w(\text{HMX}) = 15\%$) 相对 JB-9014 炸药 ($w(\text{TATB}) = 95\%$), 爆轰波非理想传播行为得到一定改进。

关键词: 爆炸力学; 直径效应; 高速摄影; 钝感炸药; 定态爆速; 定态波形

中图分类号: O381 **国标学科代码:** 1303510 **文献标志码:** A

以 TATB 为基的钝感炸药具有良好的安全性, 受到武器系统研究人员的重视。但是, 由于钝感炸药反应区比较宽, 直径效应明显。特别在研究钝感炸药爆轰波绕射、拐角效应、爆轰波与介质相互作用等方面, 采用严格的二维反应流动理论分析和数值计算都十分困难。通过精细实验标定待测炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系, 采用爆轰冲击动力学(DSD)方法, 就可以把爆轰反应流动方程组分解为爆轰冲击波阵面发展方程和一维拟定态反应区动力学的常微分方程组, 对复杂的二维反应流动理论进行解耦处理, 这是目前计算爆轰波非理想传播研究的热点^[1]。L. G. Hill 等^[2]、J. B. Bdzil 等^[3]、T. D. Aslam 等^[4]测量了不同温度、不同直径下 PBX-9502 炸药的爆速和波形, 并用这些波形标定了 DSD 参数, 得到了 $D_n(\kappa)$ 关系和反应速率。研究得到的 $D_n(\kappa)$ 关系表明: 当 κ 较小时, 法向爆速 D_n 只与当地曲率 κ 有关, 当 κ 较大时, 法向爆速 D_n 不仅与当地曲率 κ 有关, 而且还与药柱直径有关。C. D. Hutchinson 等^[5]测量了 EDC235 炸药在不同温度、不同约束条件下的爆速和波形曲线, B. D. Lambourn 等^[6]利用实验得到的爆轰波形状, 用 Whitham 冲击动力学方法拟合了线性 $D_n(\kappa)$ 关系。谭多望等^[7]、邹立勇等^[8]开展了常温和低温环境下 JB-9014 炸药的直径效应研究工作, 赵继波等^[9]测量了黄铜、铝、有机玻璃等边界条件下柱形 JB-9014 炸药中爆轰波的演化过程。

对新型高能钝感炸药 JBO-9021 ($w(\text{TATB}) = 80\%$, $w(\text{HMX}) = 15\%$, $w(\text{粘结剂}) = 5\%$), 采用精细的工艺处理技术, 可以使它的安全性与 JB-9014 炸药相当, 但做功能力可以提升 17% 左右。本文中, 采用光电联合测试方法, 测量常温下直径分别为 10、15、30 mm 的圆柱形 JBO-9021 钝感炸药定态爆速和波形, 根据拟合的爆轰波形, 分析波阵面法向速度 D_n 与当地曲率 κ 之间的关系, 并与 JB-9014 炸药 ($w(\text{TATB}) = 95\%$, $w(\text{粘结剂}) = 5\%$)、PBX-9051 炸药 ($w(\text{HMX}) = 95\%$, $w(\text{粘结剂}) = 5\%$) 的 $D_n(\kappa)$ 关系进行对比。

1 实 验

JBO-9021 炸药直径效应研究的实验装置如图 1 所示。雷管起爆泰安导爆药柱后, 再起爆无约束的柱形 JBO-9021 钝感主装药。主装药的前端用于爆轰波的演化, 演化段长度不少于主炸药直径的 6 倍, 以保证在测速段之前形成拟定态爆轰波。炸药爆速由两组对称布置的探针测量, 探针采用半球头形状的弹簧探针, 以保证探针与炸药表面之间点接触, 典型的实验装置照片如图 2 所示。

采用氙灯外光源和药柱表面贴反射膜的方法, 由高速扫描相机测量药柱中的爆轰波阵面形状, 实验

* 收稿日期: 2011-07-15; 修回日期: 2011-10-26

作者简介: 汪 斌(1980—), 男, 硕士, 助理研究员。

布局见图 3。由于药柱直径较小,在药柱与反光镜之间放置一个透镜放大成像尺寸。药柱端面贴一层非常薄的反射膜,将氙灯光反射至相机,使胶片曝光。当爆轰波到达药柱端面,反射膜被破坏,氙灯光不再反射至相机,之后产物光出现,胶片再度曝光。氙灯光被截止的形状即为爆轰波阵面形状。为使波形前沿和边界清晰,药柱端面平整光滑,反射膜与药柱紧贴,氙灯照明角度尽可能小,以不影响测量为原则,相机扫描速度为 12 km/s。

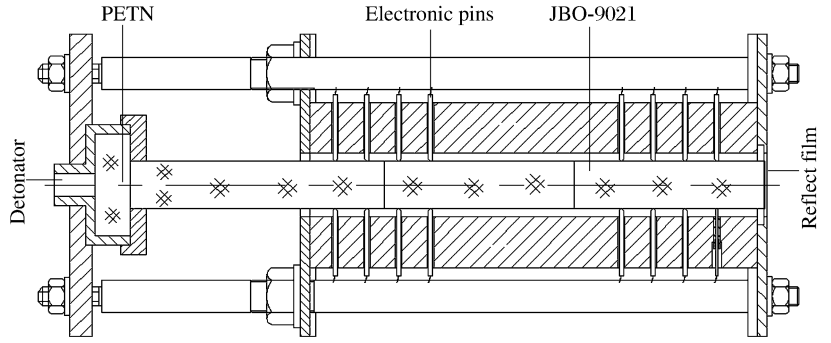


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Rate stick design

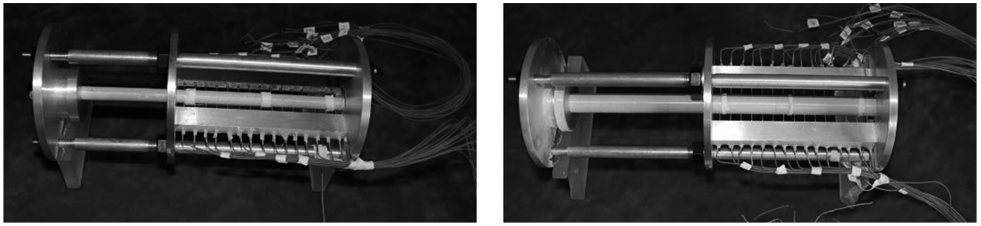


图 2 典型的实验装置照片
Fig. 2 Picture of experimental apparatus

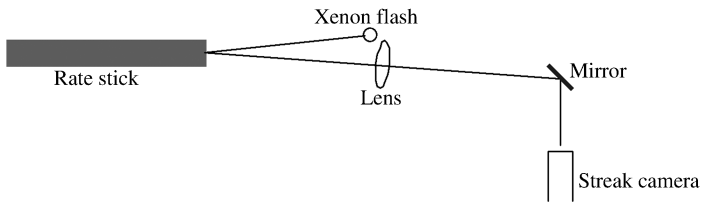


图 3 实验布局
Fig. 3 Schematic diagram of experiment

2 结果及分析

2.1 爆轰波速度

在炸药两边轴对称地各放置一组探针,第一组接入探针 1~15,第二组接入探针 16~30,采用最小二乘法拟合探针距离-时间数据,得到图 4 所示的拟合曲线。三种直径条件下得到的实验数据点都在拟合线上,说明爆速已经达到定态,爆速为拟合曲线的斜率。

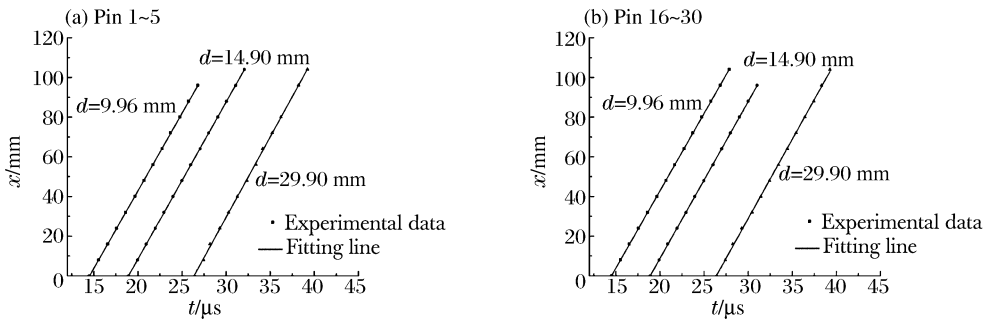


图 4 探针的距离-时间关系

表 1 给出了实验时三种直径药柱相应的尺寸、密度、定态爆速、实验温度等实验数据。可以看出,随着炸药直径的增加,JBO-9021 炸药的爆速迅速增大,当炸药直径为 29.9 mm 时,爆速为 8.015 km/s。

2.2 定态波阵面

实验得到的典型爆轰波阵面波形如图 5 所示,从图中可看出,波形前沿和边界比较清晰,说明采用氙灯外光源和药柱表面贴反射膜的方法是可行的。测量底片数字化后读取波形数据,根据相机扫描速度,得到爆轰波到达药柱端面的时间,再乘以定态爆速得到波阵面曲线。实验得到的波阵面有轻微的不对称,可能是炸药密度不均匀、相机光路存在的

系统误差或数字化底片时由于分辨率不够导致读数的偏差等引起的。目前比较好的处理办法是,将药柱中轴两侧的截面圆半径数据平均,作为最后的波形数据。

2.3 波阵面拟合曲线

将爆轰波波形底片扫描到计算机中,根据相机转速、放大比、爆轰波到达时刻和定态爆速,用图像处理软件可以得到相机扫描时间 t 和截面圆半径 r 的数据。将处理的数据进行拟合,得到爆速曲率关系曲线。对于非线性的爆速-曲率关系,目前拟合波阵面曲线的最佳形式是 $\ln[\cos(r)]$ 级数,它适用于长径比较大的扁条炸药和圆柱形炸药,具体表达式为^[2]

$$z(r) = - \sum_{i=1}^n a_i \left\{ \ln \left[\cos \left(\eta \frac{\pi}{2} \frac{r}{R} \right) \right] \right\}^i \quad (1)$$

式中: $z(r)$ 为波阵面曲线, R 为药柱半径, r 为波阵面上截面圆的半径, a_i 和 η 为拟合参数。对于钝感炸药,取前三项即可很好地模拟波阵面曲线。

本次实验的拟合参数见表 2,拟合波阵面结果见图 6。图 7 给出了谭多望等^[7]得到的常温下 JB-9014 炸药的爆轰波波阵面的实验结果。可以看到,相同直径条件下,JBO-9021 炸药的波形比 JB-9014 炸药的波形更为平坦。造成这种现象的原因主要在于 JBO-9021 炸药含有部分高能 HMX 炸药,因此直径效应对波阵面的影响相对较小。

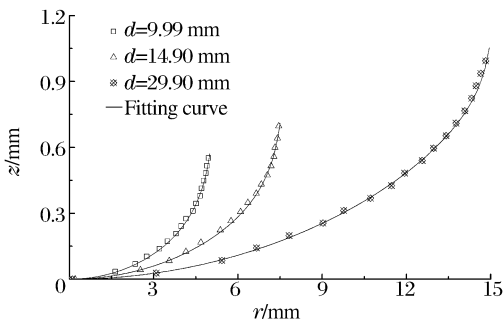


图 6 JBO-9021 炸药波阵面拟合结果

Fig. 6 Fits of wavefront data of JBO-9021

表 1 定态爆速测量结果

Table 1 Steady-state detonation velocity

d/mm	l/mm	$t/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D_0/(\text{km}/\text{s})$
9.99	149.97	19.9	1.905	7.818
14.90	240.04	18.8	1.902	7.895
29.90	300.08	19.5	1.905	8.015

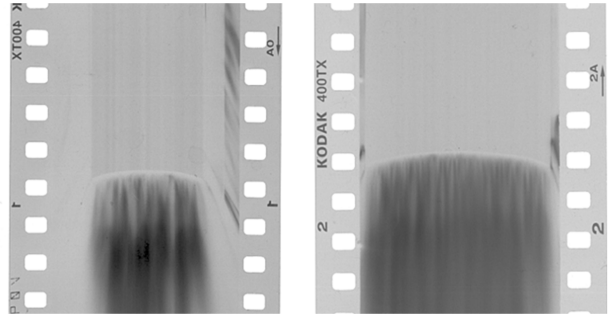


图 5 典型的测量波形

Fig. 5 Typical film record of streak camera

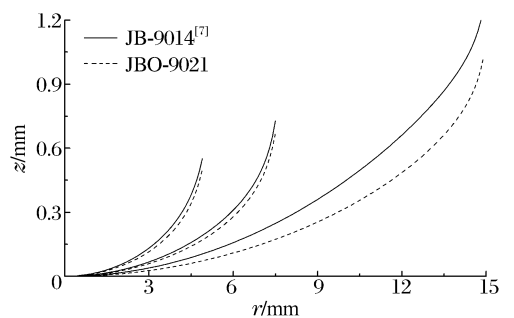


图 7 JB-9014 和 JBO-9021 炸药波阵面对比

Fig. 7 Fits of wavefront data of JB-9014 and JBO-9021

表 2 波阵面曲线拟合参数
Table 2 Fitting parameters of wave front

d/mm	$D_0/(km/s)$	a_1/mm	a_2/mm	a_3/mm	η
9.99	7.818	0.267 71	0.034 01	0.010 97	0.935 13
14.90	7.895	0.308 54	0.056 28	0.011 01	0.957 98
29.90	8.015	0.556 77	0.127 33	0.015 08	0.981 91

2.4 爆速曲率关系

最早, $D_n(\kappa)$ 关系是根据理论和实验研究结果得到的线性关系^[10]

$$\frac{D_n}{D_{CJ}} = 1 - a\kappa \tag{2}$$

式中: a 是曲率系数。对大多数凝聚态炸药, 当爆轰波比较平滑、变化缓慢时, 线性 $D_n(\kappa)$ 关系近似成立。随着研究的深入, 发现线性关系在小曲率情况下不再适用, 并发现 $D_n(\kappa)$ 关系同反应速率密切相关。一般反应速率形式下 $D_n(\kappa)$ 关系的理论分析非常困难, 通常采用经验关系, 有较好效果的有^[11-12]

$$\frac{D_n}{D_{CJ}} = 1 + A[(C_1 - \kappa)^\alpha - C_1^\alpha] - B\kappa \frac{1 + C_2\kappa + C_3\kappa^2}{1 + C_4\kappa + C_5\kappa^2} \tag{3}$$

式中: $A, B, C_1 \sim C_5, \alpha$ 是拟合参数。由不同尺寸 JBO-9021 炸药实验数据拟合得到的 $D_n(\kappa)$ 曲线见图 8, 拟合参数为: $D_{CJ} = 8.070 2 \text{ km/s}, A = 1.485 4, B = 5.676 4, C_1 = 7.103 8 \text{ mm}^{-1}, C_2 = 3.939 9 \text{ mm}^{-1}, C_3 = 3.562 6 \text{ mm}^{-2}, C_4 = 211.055 7 \text{ mm}^{-1}, C_5 = 205.171 1 \text{ mm}^{-2}, \alpha = 0.050 19$ 。图 8 中同时给出了 JB-9014^[7] 和 PBX-9501^[11] 炸药的爆速曲率关系, 可以看出, 以 HMX 为主的 PBX-9501 炸药和以 TATB 为主的 JB-9014 炸药相比, JBO-9021 炸药的曲率关系位于两者之间, 说明含 HMX 对 JBO-9021 炸药的直径效应有一定影响, 炸药爆轰波传播过程中受曲率效应的影响比 PBX-9502 小。

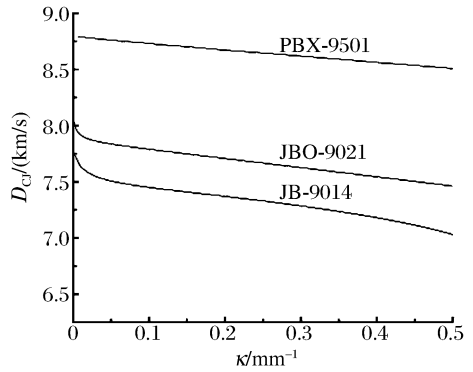


图 8 不同炸药 $D_n(\kappa)$ 关系

Fig. 8 $D_n(\kappa)$ curves with different explosive

3 结 论

JBO-9021 钝感炸药的定态爆速随直径的增大而增大, 在 TATB 中加入一定量的 HMX 炸药以后, 炸药爆轰波的非理想传播行为得到了一定的改进, JBO-9021 炸药波阵面比 JB-9014 炸药平坦, JBO-9021 炸药的爆速随曲率的变化比 JB-9014 炸药慢。

由于药柱边界处爆轰波形变化非常快, 精确测量需提高波形和边界清晰度外, 还需提高相机扫描速度和胶片数字化精度。机械式扫描相机受机械组件的安装精度和设计公差的影响, 相机记录的波形存在一定的不对称性, 需要采用扫描速度更高、成像更稳定的数字式高速扫描相机, 以得到更精确的炸药爆轰波实验结果。

参考文献:

[1] 孙承伟. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
 [2] Hill L G, Bdzil J B, Aslam T D. Front curvature rate stick measurements and detonation shock dynamics calibration for PBX 9502 over a wide temperature range[C]// Proceedings of 11th International Detonation Symposium. 1998:1029-1037.
 [3] Bdzil J B, Davis W C. Detonation shock dynamics(DSD) calibration for PBX 9502[C]// Proceedings of 10th International Detonation Symposium. 1993:146-149.

- [4] Aslam T D, Bdzil J B, Hill L G. Extensions to DSD theory: Analysis of PBX 9502 rate stick data[C]//Proceedings of 11th International Detonation Symposium. 1998;21-29.
- [5] Hutchinson C D, Foam G C W. Initiation and detonation properties of the insensitive high explosive TATB/Kel-F 800 95/5[C]//Proceedings of 9th International Detonation Symposium. 1989;123-132.
- [6] Lambourn B D, Swift D C. Application of Whitham's shock dynamics theory to the propagation of divergent detonation wave[C]//Proceedings of 9th International Detonation Symposium. 1989;784-797.
- [7] 谭多望,方青,张光昇,等. 钝感炸药直径效应实验研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(4):300-304.
TAN Duo-wang, FANG Qing, ZHANG Guang-sheng, et al. Experimental study on the diameter effect for JB-9014 rate sticks[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(4):300-304.
- [8] 邹立勇,谭多望,文尚刚,等. 低温下小尺度钝感炸药非理想爆轰实验研究[J]. 爆炸与冲击,2007,27(4):325-330.
ZOU Li-yong, TAN Duo-wang, WEN Sang-gang, et al. Experimental study on the nonideal detonation for JB29014 rate sticks at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(4):325-330.
- [9] 赵继波,谭多望,赵峰,等. 带壳钝感炸药非理想爆轰实验研究[J]. 含能材料,2005,13(4):217-221.
ZHAO Ji-bo, TAN Duo-wan, ZHAO Feng, et al. Experimental study on the nonideal detonation of IHE with confinements[J]. Energetic Materials, 2005,13(4):217-221.
- [10] Eyring H, Powell R E, Duffy G H, et al. The stability of detonation[J]. Chemical Reviews, 1949,45(1):69-181.
- [11] Aslam T D. Detonation shock dynamics calibration of PBX 9501[C]//Shock Compression of Condensed Matter—2007. Oregon: American Institute of Physics, 2007:813-816.
- [12] Hill L G, Bdzil J B. PBX 9502 front curvature rate stick data: Repeatability and the effects of material variation [C]//Proceedings of 14th International Detonation Symposium. 2010.

Diameter effect of JBO-9021 rate sticks at room temperature^{*}

WANG Bin, TAN Duo-wang, ZHAO Ji-bo, WEN Shang-gang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: By using the photoelectric method, the steady-state detonation velocities and the corresponding wave shapes were measured for the JBO-9021 rate sticks with the diameters of 10, 15 and 30 mm, respectively, and in the JBO-9021 rate sticks the mass fractions of TATB, HMX and F2314 were 80%, 15% and 5%, respectively, at room temperature. An analytic expression was fitted to the wave front data. And based on the analytic expression, the relation was obtained between the normal velocity of the wave front and its local curvature. The investigated result displays that the steady-state detonation velocity of the JBO-9021 explosive increases with the increase of the diameter of the JBO-9021 rate stick. The detonation wave of the JBO-9021 explosive is fatter than that of the JB-9014 explosive in which the mass fractions of TATB and F2314 are 95% and 5%, respectively. Consequently, the nonideal spread characteristics of the detonation waves weaken.

Key words: mechanics of explosion; diameter effect; high-speed photography; insensitive high explosive; steady-state wave shape; steady-state detonation velocity

* Received 15 July 2011; Revised 26 October 2011

Corresponding author: WANG Bin, wbin98221@163.com