

文章编号: 1006-9941(2017)02-0138-06

高温下 TATB 基钝感炸药爆轰波波阵面曲率效应实验研究

郭刘伟, 刘宇思, 汪斌, 谷岩, 郑贤旭, 谭多望

(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)

摘要: 为了研究高温环境对钝感炸药爆轰波波阵面曲率效应的影响, 采用高速扫描照相技术及电探针测速技术获取了高温 60 °C 环境下 TATB 基钝感炸药三种直径药柱爆轰波拟定态爆轰波形状及波速。结果表明, TATB 基钝感炸药在高温 60 °C 下的拟定态爆轰波波速随着炸药直径基本呈现线性增长趋势, 且相同直径的高温结果均低于常温结果。三种直径 TATB 基钝感炸药在高温 60 °C 下的拟定态波阵面形状较常温结果更为陡峭。采用遗传算法对三种直径炸药的实验结果进行拟合计算, 获得了 TATB 基钝感炸药高温曲率效应 $D_n(\kappa)$ 关系参数。采用 DSD (Detonation Shock Dynamics) 方法对三种直径炸药的爆轰波非理想传播过程进行了模拟, 计算结果与实验结果吻合较好。

关键词: 钝感炸药; 曲率效应; 拟定态波形; 拟定态波速; Detonation Shock Dynamics (DSD) 方法

中图分类号: TJ55; O358

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.008

1 引言

钝感炸药反应区较宽, 其爆轰波传播易受边界稀疏波及环境温度的影响。曲率效应实验 (Front Curvature Rate Stick) 作为爆轰冲击动力学 (DSD)^[1-2] 研究爆轰波非理想传播行为的必需实验, 一直为国内外爆轰物理研究的热点之一。

LANL 多名研究人员对钝感炸药 PBX-9502 (TATB/Kel-F800 为 95/5) 的曲率效应开展了详细的实验研究。Campbell A W^[3] 对 PBX-9502 炸药在 -55, 24 °C 及 75 °C 下的直径效应进行了研究, 获取了不同温度下的失效直径及拟定态爆轰波波速随炸药直径的变化规律, 指出钝感炸药 PBX-9502 的拟定态波速随炸药直径的增大呈现加速增长趋势。Hill L G 等^[4] 对 PBX-9502 炸药在 -55, 25 °C 及 75 °C 下的曲率效应开展了实验研究, 获取了炸药末段拟定态爆轰波波速及波阵面形状。实验表明, 环境温度与炸药直径共同影响 PBX-9502 的爆轰波波阵面形状, 低温 -55 °C 时, 爆轰波拟定态波速随炸药直径基本呈现线性变化, 而 25 °C 及 75 °C 时, 则呈现明显的抛物线特征。Hill L G 等^[5-6] 对 PBX-9502 炸药的曲率效应实验进行了汇总分析。指出炸药批次及材料性质对

PBX-9502 炸药的曲率效应有着明显的影响。Hill 建立了爆轰波 $D_n(\kappa)$ 关系随炸药密度及温度变化的经验公式, 并在爆轰波长程绕射行为上得到了很好的应用。LANL 的研究结果表明钝感炸药爆轰波波阵面曲率效应受环境温度的影响很大。由于钝感炸药爆轰性能受炸药生产工艺的影响显著, 国外研究结果无法直接应用到国内钝感炸药的爆轰性能上。国内相关研究人员对采用国内生产工艺的钝感炸药爆轰波波阵面曲率效应也开展了一定的研究。谭多望等^[7-9] 对国产钝感炸药 TATB 基钝感的常温曲率效应进行了实验研究, 获取了拟定态爆轰波波阵面形状及波速。邹立勇等^[10] 开展了 TATB 基钝感炸药在低温 -30 °C 的曲率效应实验, 指出爆轰波低温拟定态波速高于常温结果, 波阵面形状也与常温结果差异较大。汪斌等^[11] 开展了国产钝感炸药 JBO-9021 的常温曲率效应实验研究, 结果表明, 钝感炸药材料性质对爆轰波波阵面的形状及波速影响很大。目前国内钝感炸药爆轰波波阵面曲率效应的研究主要集中在常温及低温环境, 高温环境对钝感炸药爆轰波波阵面曲率效应的影响研究尚缺乏。

在实际武器工程中, 钝感炸药爆轰波非理想传播行为均处于一定的环境温度下, 对高温下钝感炸药爆轰波波阵面曲率效应进行实验研究, 具有一定的工程研究意义。本研究采用高速扫描照相技术及电探针测速技术对 TATB 基钝感炸药在高温 60 °C 下的爆轰波波阵面曲率效应开展实验研究。

收稿日期: 2016-06-21; 修回日期: 2016-09-05

作者简介: 郭刘伟 (1983-), 男, 副研究员, 主要从事爆轰物理研究。
e-mail: guoliuwei1@163.com

2 实验

曲率效应实验装置示意图见图 1。实验装置由雷管、传爆药柱(96% RDX)、主药柱(TATB 基钝感炸药)、电探针阵列及光学扫描窗口等组成。爆轰波在主药柱中传播足够距离后(大于 6 倍药柱直径),呈现拟定态传播状态,在距主药柱末端一定长度上对称布置 30 路弹簧电探针(SideA+SideB)以测量爆轰波达到各位置的时间。爆轰波到达主药柱末端端面时,采用高速扫描相机通过光学窗口记录爆轰波波形。实验中主药柱直径 d 包括三种类型: 10, 15 mm 及 30 mm, 药柱总长度分别为 200, 240 mm 及 300 mm。

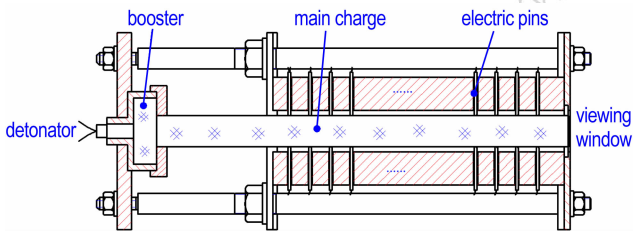


图 1 曲率效应实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of curvature rate stick apparatus

实验布局示意图见图 2。曲率效应实验件放置于高温控制箱中,箱体一侧预留 K9 玻璃光学窗口,实验时,高压氙灯释放脉冲光线照射主药柱末端面,反射光线经透镜、反光镜进入高速扫描相机,相机底片根据感光程度记录爆轰波出药柱端面的时间过程。高速扫描相机的扫描速度为 $12 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。高温控制箱采用热阻丝加热、电风扇散热的方式,促使温度箱内温度均匀。高温箱内的温度加载曲线见图 3 所示。实验温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 1 h。

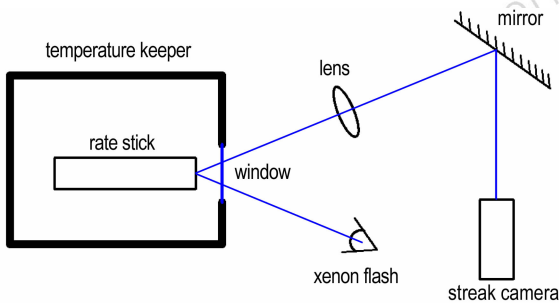


图 2 曲率效应实验布局示意图
Fig. 2 Schematic of curvature rate stick experiment set up

3 结果及分析

3.1 拟定态波速

采用最小二乘法,将双侧电探针阵列测到的爆轰

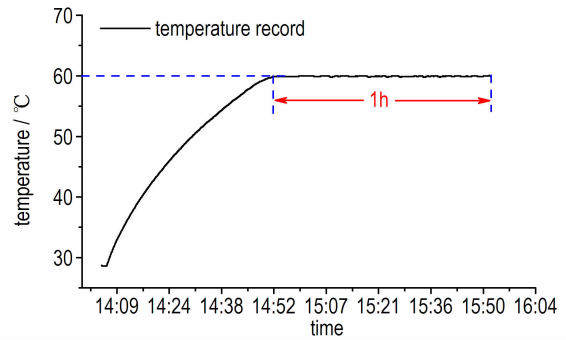


图 3 温度加载曲线
Fig. 3 Temperature record

波到达时间及各电探针间距进行处理见图 4 所示。每发实验中电探针距离-时间测试结果一致性较好,拟合过程中未有明显偏离拟合曲线的数据点。单侧电探针阵列距离-时间的拟合曲线斜率即为该侧爆轰波平均波速的测量值,双侧测量结果的平均值作为该发实验中炸药的拟定态爆轰波波速,与常温测试结果进行对比见图 5 所示。在此次实验范围内,高温 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 拟定态爆轰波波速随炸药直径的增大呈现线性增大趋势,直径 10, 15 mm 与 30 mm 的 TATB 基钝感炸药拟定态爆轰波波速在高温 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时均低于常温 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 结果,差异程度有所差别。当温度升高时,TATB 基钝

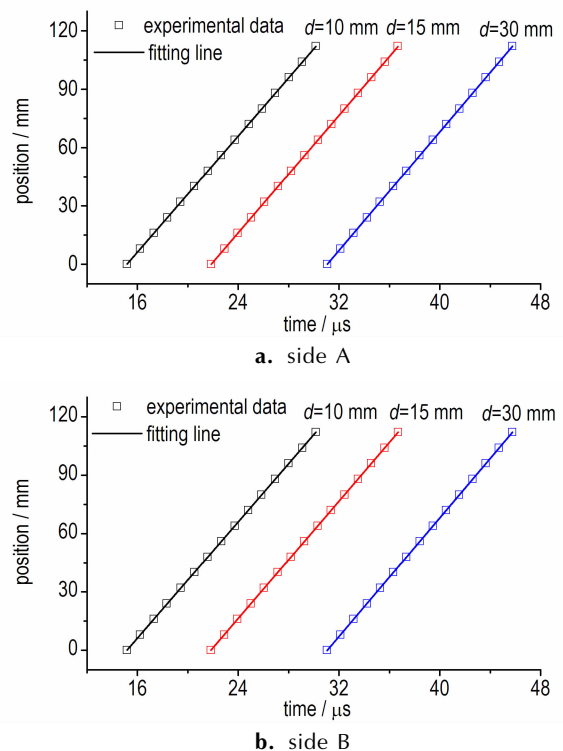


图 4 电探针距离-时间测试结果
Fig. 4 Distance-time results obtained by electric pins

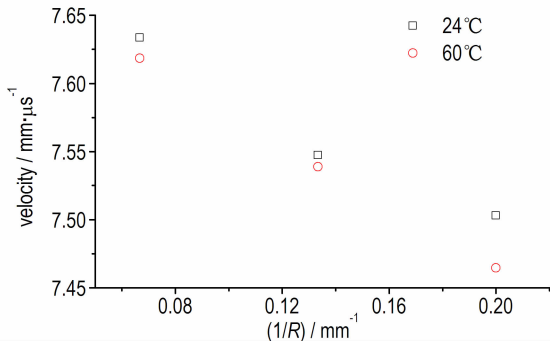


图5 TATB基钝感炸药高温与常温拟定态爆轰波波速对比
Fig.5 Comparisons of the steady-state detonation velocity of TATB based IHE at high and ambient temperature

感炸药的密度会发生一定的减小,同时边界稀疏波对炸药反应区的影响程度增强,从而使得炸药的拟定态爆轰波波速降低,但炸药密度随温度的变化量受炸药尺寸及炸药的非均质特性影响,每种直径的炸药密度随温度的变化量不同,故各直径炸药高温、常温波速测试结果的差异呈现非一致性。

3.2 拟定态波阵面形状

采用高速扫描照相技术获取的 $\Phi 30$ 药柱的典型爆轰波波阵面形状见图6所示,爆轰波波阵面界面清晰,全波形记录完整,在一定程度上,波阵面对称性良好。

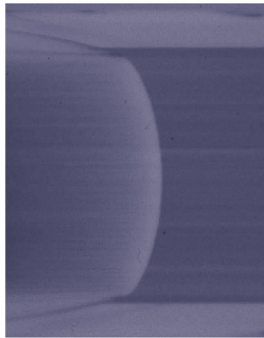


图6 高速扫描照相技术获取的典型波阵面形状
Fig.6 Typical film record obtained by high speed streak camera

对波形底片进行高精度扫描,并通过灰度梯度计算获取波阵面的界面形状数据。采用多项式^[4]级数 $z(r) = \sum_{i=1}^n a_n \left\{ \ln \left[\cos \left(\eta \frac{\pi}{2} \frac{r}{R} \right) \right] \right\}^i$ 对波阵面数据进行拟合,其中, a_n 及 η 为拟合参数, R 为药柱半径。各直径炸药爆轰波波阵面形状曲线的拟合结果与实验数据对比见图7所示。三种直径炸药的爆轰波波阵面形状

拟合曲线与实验结果均吻合较好。随着炸药直径的增大,TATB基钝感炸药拟定态爆轰波波阵面形状更为平坦,波阵面中心与边界点之间的时间差增大。分析其成因主要为:随着炸药直径的增大,边界稀疏波对炸药内部区域的影响范围及影响度逐渐变小,炸药内部相邻区域的爆轰波波速差异减小,波阵面表现更为平坦;同时炸药边界与中心区域的波速差异增大,故波阵面中心点与边界点的时间差增大。

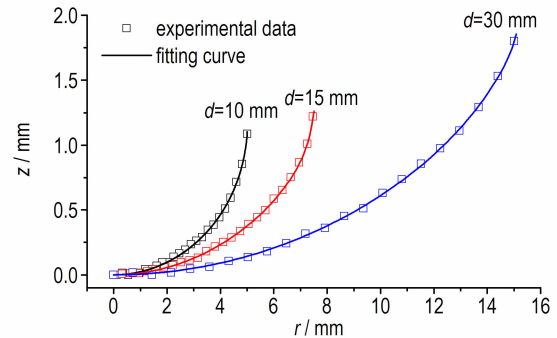


图7 波阵面形状拟合曲线
Fig.7 The fitting curve of steady-state detonation front shape

TATB基钝感炸药60℃高温爆轰波波阵面形状与常温24℃结果对比见图8所示。由图8可见,较常温结果,三种直径TATB基钝感炸药高温下的波阵面形状均更为陡峭,波阵面中心与边界点之间的时间差增大。其成因可能为:炸药在高温下发生膨胀,宏观密度降低,炸药边界处的稀疏波对炸药内部区域的影响增大,相邻区域的爆轰波波速差增大,波阵面中心点与边界点的波速差增大,故高温下爆轰波波阵面更为陡峭,波阵面中心与边界点的时间差提高。

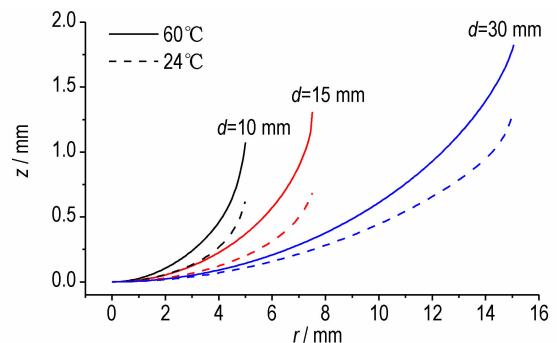


图8 TATB基钝感炸药高温及常温波阵面形状对比
Fig.8 The comparisons of detonation front shape at high and ambient temperature for TATB based IHE

3.3 DSD 计算

$D_n(\kappa)$ 关系参数是采用DSD模型对爆轰波传播

过程进行计算的关键参数之一,且目前只能通过实验标定获得。目前适应性较好的 $D_n(\kappa)$ 经验关系式为 LANL 的 Bdzil^[12] 于 2006 年提出,其关系式如下:

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

表 1 TATB 基钝感炸药高温曲率效应 $D_n(\kappa)$ 关系参数

Table 1 The $D_n(\kappa)$ parameters of TATB based IHE at 60 °C

$D_{CJ} / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	A	B	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	α
8054	2.0097	9.5103	6.4850	14.972	4.6153	221.42	957.13	0.1667

Note: D_{CJ} is the detonation velocity at the CJ point; A, B, α , C_1 – C_5 are the $D_n(\kappa)$ relation parameters.

将表 1 中的 $D_n(\kappa)$ 关系参数耦合入爆轰波传播 DSD 计算程序中,设定爆轰波初始波形为平面波,对三种直径炸药的爆轰波非理想传播过程进行计算。计算获得的拟定态爆轰波波阵面形状见图 9。可见,除直径 10 mm 炸药的边界区域外 (<10% 直径),采用表 1 中的 $D_n(\kappa)$ 关系参数计算的拟定态爆轰波形状与实验结果吻合较好。

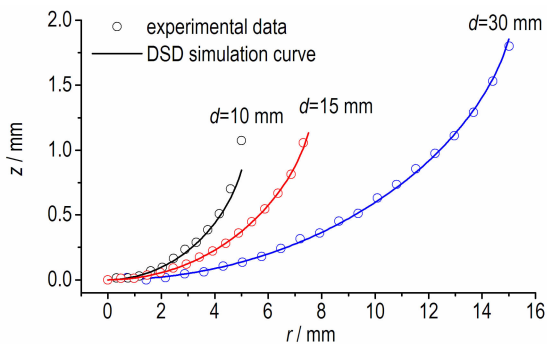


图 9 TATB 基钝感炸药 DSD 计算波形与实验结果对比
Fig. 9 The comparisons of detonation front shape between experimental results and simulation results for TATB based IHE

三种直径炸药的中心点波速演变过程计算结果见图 10。可见,中心点波速随爆轰波传播迅速下降并逐渐稳定。炸药直径越大,边界稀疏波到达炸药中心点的时间越长,中心点波速的稳定时间越长。采用 DSD 计算获得的三种直径炸药拟定态爆轰波波速与实验值对比见表 2,可见,采用表 1 参数计算的爆轰波拟定态波速与实验结果吻合较好,偏差均小于 1%。

三种直径炸药的爆轰波波阵面演变过程计算结果见图 11。受边界稀疏波的影响,随着爆轰波的传播,三种直径炸药的爆轰波波阵面由平面形状逐渐弯曲,波阵面中心点与边界点之间的时间差逐渐增大。计算中三种直径炸药的爆轰波波阵面形状从平面初始形状发

展至稳定的时间分别为 4, 5 μs 及 14 μs 。对比图 12 中爆轰波中心点波速的稳定时间,可见,波阵面形状与爆轰波中心点波速的稳定时间相一致。

表 2 TATB 基钝感炸药中心点波速计算结果与实验对比

Table 2 Calculated center point velocity compared with the experimental results of TATB based IHE

diameter /mm	experimental Velocity /mm · μs^{-1}	calculated velocity /mm · μs^{-1}
10	7.464	7.425
15	7.539	7.547
30	7.618	7.692

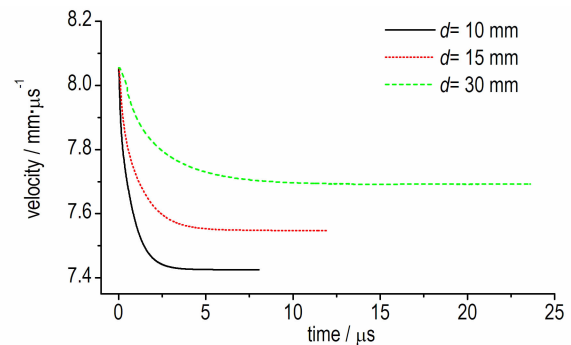


图 10 TATB 基钝感炸药中心点波速计算结果

Fig. 10 Calculated center point velocity of the charge for TATB based IHE

4 结论

高温 60 °C 环境下, TATB 基钝感炸药的拟定态爆轰波波速随着直径的增大基本呈现线性增长趋势,且三种直径炸药的波速结果均低于常温结果。随炸药直径的增大,爆轰波波阵面形状更为平坦,波阵面中心与

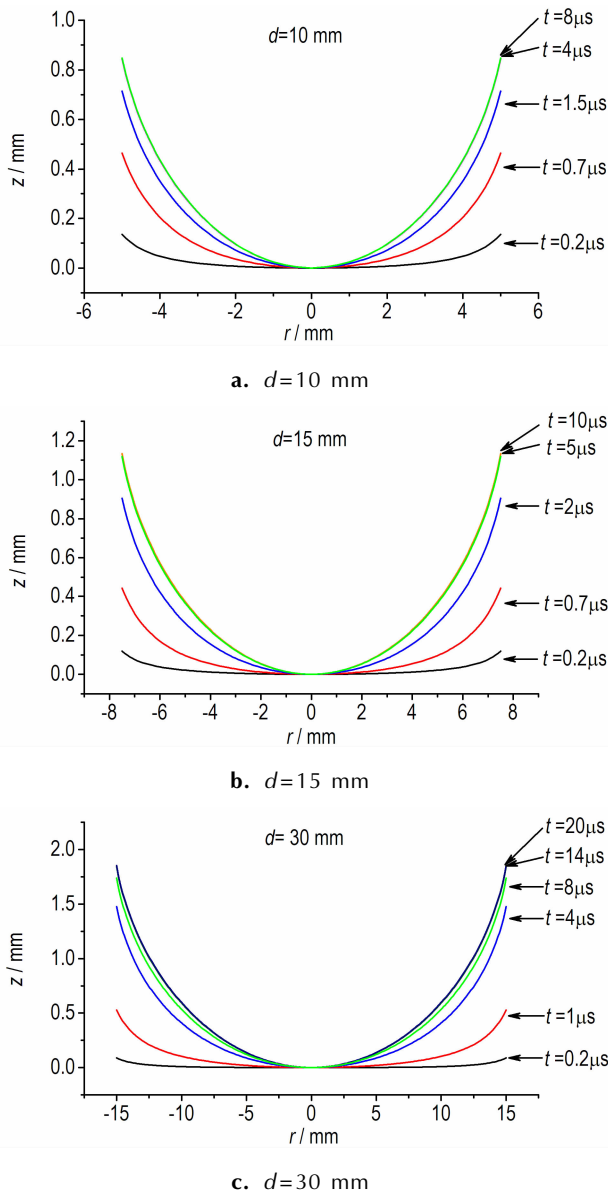


图 11 TATB 基钝感炸药波阵面演变过程计算结果

Fig. 11 The Calculated detonation shape propagation of TATB based IHE

边界点的时间差提高。三种直径炸药的波阵面形状高温结果较常温结果均更为陡峭, 高温下爆轰波波阵面中心与边界点的时间差较常温结果更高。采用遗传算法拟合了 TATB 基钝感炸药高温 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 $D_n(\kappa)$ 关系参数并对三种直径炸药的爆轰波非理想传播过程进行了数值计算, 计算获得的爆轰波拟态波阵面形状及波速与实验结果吻合较好, 爆轰波的波阵面形状稳定时间与波阵面中心点波速的稳定时间相一致。

参考文献:

[1] Bdzil J B, Stewart D S. The Dynamics of detonation in explosive

system DSD[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2007, 39: 263–292.

[2] Bdzil J B and Stewart D S. Modeling two-dimensional detonation with detonation shock dynamics[J]. *Physics of Fluids A*, 1989, 1(7): 1261–1267.

[3] Campbell A W. Diameter effect and failure diameter of a TATB-based explosive [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1984, 9: 183–187.

[4] 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, Snowmass, CO, 1998: 1029–1037.

[5] Hill L G, Aslam T D. PBX 9502 front curvature rate stick data: Repeatability and the effects of temperature and material variation [C] // Proceedings of 13th International Detonation Symposium, Norfolk, VA, 2006, 175(3): 311–341.

[6] Hill L G, Aslam T D. Detonation shock dynamics calibration for PBX 9502 with temperature, density, and material lot variations [C] // Proceedings of 14th International Detonation Symposium, Coeur d'Alene, ID, 2010, 52(3): 779–788.

[7] 谭多望, 方青, 张光升, 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] 谭多望, 方青. 常温下钝感炸药爆轰波传播的曲率效应研究[J]. *含能材料*, 2005, 13(1): 13–16.

TAN Duo-wang, FANG Qing. Curvature effect for insensitive explosive at normal atmospheric temperature[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(1): 13–16.

[9] 谭多望, 方青, 张光升, 等. 常温下 TATB 基钝感炸药 DSD 参数研究[J]. *高压物理学报*, 2009, 23(3): 161–166.

TAN Duo-wang, FANG Qing, ZHANG Guang-sheng, et al. Detonation shock dynamics calibration of JB-9014 explosive at ambient temperature[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(3): 161–166.

[10] 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 Shang-gang, et al. Experimental study on the nonideal detonation for TATB 基钝感 rate sticks at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(4): 325–330.

[11] 汪斌, 谭多望, 赵继波, 等. 常温下 JBO-9021 高温钝感炸药直径效应实验[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(5): 490–494.

WANG Bin, TAN Duo-wang, ZHAO Ji-bo, et al. Diameter effect of JBO-9021 rate sticks at room temperature[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(5): 490–494.

[12] Bdzil J B, Aslam T D, Henniger R J. Detonation Front Models: Theories and Methods[R]. LA-14274, 2006.

[13] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 18–31.

ZHOU Min, SUN Shu-dong. Genetic Algorithms: Theory and Applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 18–31.

Front Curvature Rate Stick Experiment of TATB Based Insensitive High Explosives at High Temperature

GUO Liu-wei, LIU Yu-si, WANG Bin, GU Yan, ZHENG Xian-xu, TAN Duo-wang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: To study the influence of high temperature on the front curvature rate effect for insensitive high explosives, steady-state detonation velocities and wave shapes were obtained for TATB Based Insensitive High Explosives (IHEs) with three different diameters at the temperature 60 °C by using high speed streak camera technique and electric foil velocimetry. Results show that steady-state detonation velocities increase almost linearly with the diameter of TATB based IHEs at the temperature 60 °C. For each charge diameter, steady-state detonation waves propagated slower and the wave shapes become much curved as the initial temperature increases. The $D_n(\kappa)$ parameters of TATB based IHEs at the temperature 60 °C were obtained numerically using the genetic arithmetic method for DSD. By using these $D_n(\kappa)$ parameters, the detonation propagation behaviors of TATB based IHEs at the temperature 60 °C were simulated with the DSD model. The numerical results agree well with the experimental ones.

Key words: insensitive high explosive; front curvature effect; steady-state detonation velocity; steady-state detonation front wave shape; detonation shock dynamics

CLC number: Tj55; O358

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.008



编者按: 近日,西南科技大学裴重华教授参考《关于“芪”的读音和使用的探讨》(编辑学报,2012(S2):36-37),严谨地分析了“六硝基芪(HNS)”中“芪”的读音并来信,以期促进含能材料学科相关知识的正确传播。希望含能材料领域的学者们踊跃发言,参与讨论。

关于六硝基芪(HNS)中“芪”的读音

近日在评阅一份论文时涉及一个六硝基芪的炸药,看“芪”字被打印成“卅”和“氏”两个字分开粘合而成,字体别扭,就去查“芪”的读音,在“dī”中没有搜索到“芪”字,后来通过部首查,找到了“芪”字。百度百科对该字有解释:芪(读音 zhī),亦作芪(读音 qí)(stilbene),即指 1,2-二苯基乙烯(1,2-diphenylethene)。后来咨询同行专家,原来“芪”字一直误读为“dī”,曰:老师就是这样教的。为了避免一讹再讹,特此提出供各位方家讨论。

西南科技大学 裴重华