

文章编号: 1001-1455(2007)03-0230-06

# 一种以 TATB/HMX 为基的高聚物粘结炸药的短脉冲冲击起爆特性\*

王桂吉<sup>1,2</sup>, 赵同虎<sup>1</sup>, 莫建军<sup>1</sup>, 吴刚<sup>1</sup>, 韩梅<sup>1</sup>, 谭福利<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 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实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用金属箔电爆炸驱动聚酯薄膜飞片产生短脉冲冲击波的加载技术(电炮), 依据 DRM(Delayed Robbins-Monro) 试验程序, 研究了以 TATB/HMX 为基的高聚物粘结炸药的短脉冲冲击起爆特性, 获得了其 50% 起爆概率条件下的冲击起爆阈值和 100% 起爆的最小起爆阈值。利用光纤探针/光电转换器/示波器接收技术, 研究了冲击起爆压力幅值和脉宽对该炸药到爆轰距离的影响, 得到了相应的 Pop 关系。

**关键词:** 爆炸力学; 冲击起爆; 电炮; 以 TATB/HMX 为基的炸药; 短脉冲; 起爆阈值; 到爆轰距离

**中图分类号:** O381; TQ564; TJ410.1

**国标学科代码:** 130 · 3510

**文献标志码:** A

## 1 引言

武器装药朝着钝感和高能的方向发展。钝感炸药的制备及性能研究得到了广泛关注, 各种不同钝感炸药相继问世。但到目前为止, TATB 仍是最钝感的炸药, 因此 TATB 炸药及以 TATB 为基的配方混合炸药的制备和性能研究近十几年来表现得十分活跃<sup>[1-4]</sup>。炸药对不同的激励表现出不同的特性响应, 因此, 不论是从安全性、可靠性方面, 还是从爆轰装药方面, 都有必要研究这些炸药对于不同激励而呈现的特性。冲击波作用是一种最常见的激励, 从脉宽角度可分为短脉冲、长脉冲和持续脉冲。对于具有不同脉宽的冲击波激励, 炸药所呈现的特性依脉宽不同而不同。国外特别是英美法等国家关于炸药对不同激励的响应都进行过系统的研究, 获取了详实的数据<sup>[5-8]</sup>。美国 LLNL 实验室<sup>[9]</sup>利用电炮加载装置研究炸药的短脉冲冲击起爆性能, 一年所做的实验发数达到 900 发。而国内对持续脉冲的冲击波作用激励的情况研究较多, 而对于长脉冲和短脉冲的情况研究较少, 除了王治平等<sup>[10]</sup>、程菊鑫等<sup>[11]</sup>曾经研究过 HNS、PETN 炸药的短脉冲冲击起爆阈值, 何碧<sup>[12]</sup>利用类 Floret 实验装置对 TATB 的短脉冲起爆特性做过初步研究外, 其余未见报道。何碧所利用的类 Floret 实验装置加载其实是炸药爆轰驱动薄金属飞片产生短脉冲, 这种做法存在的问题是整个实验装置是单次性的, 不利于发数较多的实验, 否则实验成本非常高; 另外, 这种装置所产生的飞片的平面度较差, 因此不利于加载波形的控制。王治平等<sup>[10]</sup>、程菊鑫等<sup>[11]</sup>利用金属箔电爆炸驱动薄飞片加载技术只对较敏感的 HNS、PETN 炸药做过小直径飞片(直径约 1 mm) 的实验研究, 而对于较大直径飞片和钝感炸药均未涉及到。近几年, 赵剑衡等<sup>[13]</sup>、王桂吉等<sup>[14]</sup>建立了一套储能 14.4 kJ 的金属箔电爆炸驱动聚酯薄膜飞片加载装置, 称为电炮, 该装置能驱动直径 10~20 mm、厚度 0.1~0.2 mm 的聚酯薄膜飞片速度达到 4~10 km/s, 飞片的平面度优于 22 ns, 飞片完整, 是一种性能优良的平面冲击波发生装置。该装置能可靠起爆 TATB 等钝感炸药, 利用该装置, 本文中拟研究一种以 TATB/HMX 为基的炸药的短脉冲冲击起爆性能, 包括 50% 起爆概率条件下的起爆阈值、100% 起爆最小起爆阈值及加载冲击波压力幅值和脉宽对到爆轰距离的影响关系。

\* 收稿日期: 2005-12-29; 修回日期: 2006-05-18

基金项目: 中国工程物理研究院预先研究基金项目(2003-4210501-1-03)

作者简介: 王桂吉(1977—), 男, 博士研究生, 助理研究员。

## 2 实验装置及方法

### 2.1 实验装置

实验研究采用电炮装置进行。电炮是一种利用金属箔(铝箔)电爆炸瞬间形成高温高压气体(等离子体)膨胀推动置于金属箔上的聚酯薄膜飞片经加速腔剪切形成飞片并在其中加速飞行一定距离达到最大速度后撞击靶目标的装置。实验使用的电炮装置的基本参数:电容器电容为  $31.8 \mu\text{F}$ ;回路电阻为  $11 \text{ m}\Omega$ ;短路回路电感为  $49 \text{ nH}$ ;充电电压约  $30 \text{ kV}$ ;放电周期为  $7.9 \mu\text{s}$ ;储能  $14.4 \text{ kJ}$ ;Mylar 膜飞片尺寸为  $\varnothing 10 \text{ mm} \times (0.07, 0.10, 0.15, 0.20 \text{ mm})$ ,  $\varnothing 19 \text{ mm} \times (0.15, 0.20 \text{ mm})$ ;铝桥箔尺寸为  $12.5 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm} \times 0.028 \text{ mm}$ ,  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.028 \text{ mm}$ ;有机玻璃加速腔尺寸为  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,  $\varnothing 19 \text{ mm} \times (6, 8 \text{ mm})$ ;飞片平面度  $\leq 22 \text{ ns}$ ;压力脉宽为  $0.034 \sim 0.089 \mu\text{s}$ ;压力幅值为  $5 \sim 24 \text{ GPa}$ 。

### 2.2 实验方法

炸药的冲击起爆阈值实验研究依据 DRM 程序<sup>[15]</sup>进行,该程序是一种优化了的统计方法,用于炸药的起爆阈值测量,与上升-下降法<sup>[16]</sup>相比,实验发数可大大减少。例如用于测量炸药 50%起爆概率条件下的冲击起爆阈值,上升-下降法通常约需 25 发,而 DRM 法只需 6~8 发。需要注意的是,DRM 法在最后的数据统计处理时要用数值求解才能完成,上升-下降法要相对简单些。

起爆指炸药发生稳定爆轰。实验时利用光纤探针/光电转换器/示波器接收技术测量爆轰波速度,并与发生稳定爆轰时的爆速值相比较,达到或接近时判定为爆,否则判定为不爆。辅助的判断方法是利用钢鉴定块进行,炸药发生稳定爆轰应同时符合下列情况:钢鉴定块上有明显的向下冲的印记,留下的凹痕直径尺寸要大于炸药柱的直径尺寸,即约束钢套筒发生明显的向外膨胀;钢鉴定块穿孔,留下的孔洞直径较大,背面被剥离的层裂片面积较大;钢鉴定块表面没有炸药粉末的痕迹。

炸药到爆轰距离的测量利用光纤探针/光电转换器/示波器接收技术和炸药楔形块方法进行。光纤芯径为  $0.05 \mu\text{m}$ ,间距为  $0.5 \text{ mm}$ ,布置示意图见图 1,光纤之间的准确距离用工具显微镜测量,光纤探针端面需抛光磨平,并镀上铝膜以遮盖爆轰产物发光干扰,有机玻璃夹座被涂黑。图 2 是光纤探针测量炸药到爆轰距离实验装置的一个实物照片。

实验中应用了两种测试技术,一种是利用 VISAR(velocity interferometer system for any reflectors)测量电炮飞片的速度,赵剑衡等对该测试技术的可靠性做过实验和理论上的论证,认为该测试技术是可靠的,测量精度在  $1.5\% \sim 2\%$  的范围内或者更好。邓向阳等<sup>[17]</sup>对利用该技术测量电炮飞片速度做过研究和分析。另一种是利用光纤探针测量炸药的到爆轰距离,该技术的精度小于  $3\%$ ,王荣波对该技术的可靠性和精度做了分析。

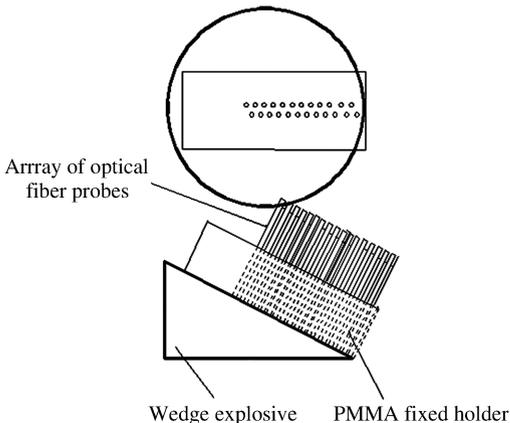


图 1 光纤探针布置示意图

Fig. 1 Sketch of optical fiber array

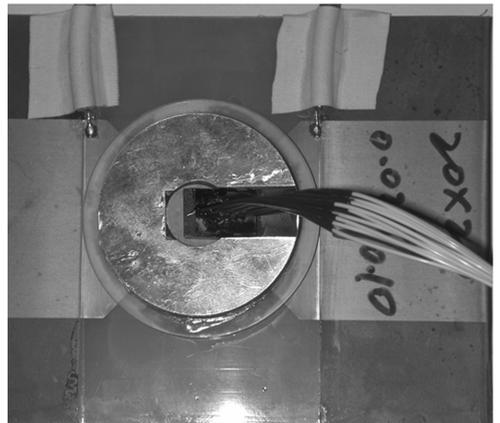


图 2 光纤探针阵列及实验靶目标照片

Fig. 2 Photo of the experimental target and optical fibre array

## 2.3 研究炸药基本参数

研究炸药为一种以 TATB/HMX 为基的混合炸药 (PBX-TATB/HMX), 其中 TATB 占 80%, HMX 占 15%, 其余 5% 为粘接剂和其他添加剂。冲击起爆阈值的测量使用圆柱形装药, 到爆轰距离的测量使用楔形装药。圆柱形装药密度为  $(1.84 \pm 0.01) \text{ g/cm}^3$ , 样品尺寸为  $\varnothing 16 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ; 楔形状装药密度为  $(1.84 \pm 0.01) \text{ g/cm}^3$ , 样品尺寸为  $\varnothing 16 \text{ mm}$ , 楔形角为  $30^\circ$ , 选取该角度是参考英国原子武器研究所学者 D. Grief 对 PBX9503 炸药到爆轰距离的测量所选取的楔形角度以及我国学者卫玉章<sup>[6]</sup>对到爆轰距离楔形角选取所作的分析。PBX9503 炸药主成份及配方比例与实验所用炸药相同。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 50%起爆概率条件下冲击起爆阈值

实验结果如表 1 所示, 其中桥箔尺寸为  $12.5 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm} \times 0.028 \text{ mm}$ ,  $J$  为爆炸电流密度,  $v_c$  为飞片速度阈值,  $p_c$  为压力阈值,  $\tau$  为压力脉宽, 炸药受钢套筒约束, 套筒厚  $15 \text{ mm}$ 。

表 1 50%起爆概率条件下 PBX-TATB/HMX 的冲击起爆阈值

Table 1 Shock initiation thresholds of PBX-TATB/HMX under the condition of 50% initiation probability

飞片尺寸	$J/(\text{GA}/\text{m}^2)$	$v_c/(\text{km}/\text{s})$	$p_c/\text{GPa}$	$\tau/\mu\text{s}$
$\varnothing 10 \text{ mm} \times 0.07 \text{ mm}$	298.82	3.398	13.73	0.029
$\varnothing 10 \text{ mm} \times 0.10 \text{ mm}$	272.42	2.542	9.0	0.047
$\varnothing 10 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$	267.03	2.066	6.73	0.076
$\varnothing 10 \text{ mm} \times 0.20 \text{ mm}$	256.69	1.713	5.23	0.109

表 1 的实验结果表明, 压力脉宽对炸药的起爆阈值压力影响较大, 脉宽越短, 所需要的冲击起爆压力越高; 随着压力脉宽的增大, 脉宽的效应影响减小, 逐渐接近长脉冲的效果, 如图 3(a) 所示。对于利用高阻抗的材料作为约束条件, 压力脉宽的影响主要体现在背面稀疏的作用, 飞片越薄, 撞击产生的压力脉宽越短, 背面稀疏的影响来得越早, 因此, 要克服这种背面稀疏效应, 就需要更高的冲击压力来补偿稀疏损失。

将坐标取为以 10 为底的对数后得到的  $p$ - $\tau$  关系曲线如图 3(b) 所示, 由此得到考虑压力幅值和脉宽效应的 50% 起爆概率条件下的起爆判据

$$p^{1.451} \tau = 1.2 \quad (1)$$

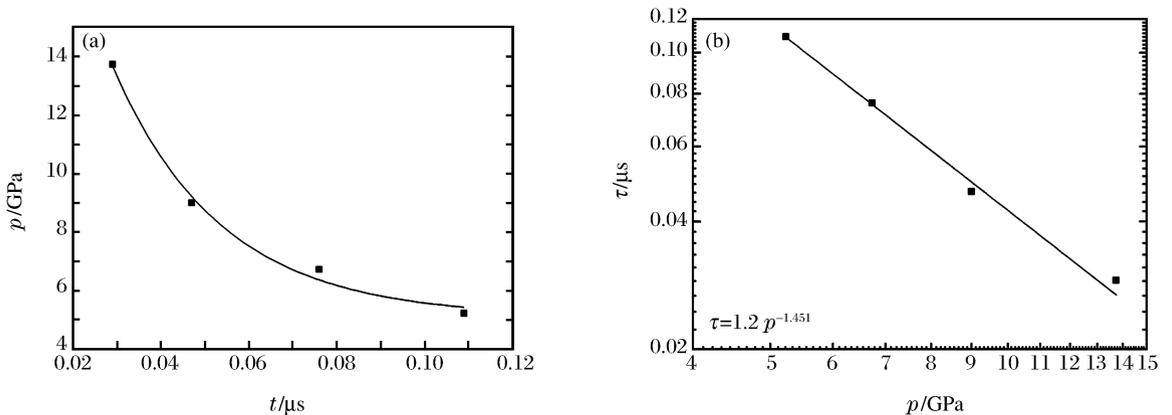


图 3 PBX-TATB/HMX 50%起爆概率条件下的  $p$ - $\tau$  关系曲线

Fig. 3  $p$ - $\tau$  curves of PBX-TATB/HMX under the condition of 50% initiation probability

### 3.2 100%起爆最小冲击起爆阈值

实验结果见表 2, 其中桥箔尺寸为  $12.5 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm} \times 0.028 \text{ mm}$ ,  $J$  为爆炸电流密度,  $v_c$  为飞片速度阈值,  $p_c$  为压力阈值,  $\tau$  为压力脉宽, 炸药受钢套筒约束, 套筒厚  $15 \text{ mm}$ 。表 2 中的实验结果用  $p$ - $\tau$  关系曲线表示见图 4(a), 坐标取为以 10 为底的对数后得到的  $p$ - $\tau$  关系曲线见图 4(b), 由此得到考虑压

力幅值和脉宽效应的 100%起爆的最小起爆阈值的起爆判据见公式(2)

$$p^{1.8} \tau = 2.63 \tag{2}$$

表 2 PBX-TATB/HMX 的最小冲击起爆阈值

Table 2 Minimum shock initiation thresholds of PBX-TATB/HMX

飞片尺寸	$J/(GA/m^2)$	$v_c/(km/s)$	$p_c/GPa$	$\tau/\mu s$
∅10 mm×0.07 mm	299.00	3.401	13.76	0.029
∅10 mm×0.10 mm	274.48	2.572	9.15	0.047
∅10 mm×0.15 mm	268.35	2.081	6.82	0.076
∅10 mm×0.20 mm	259.15	1.739	6.26	0.104

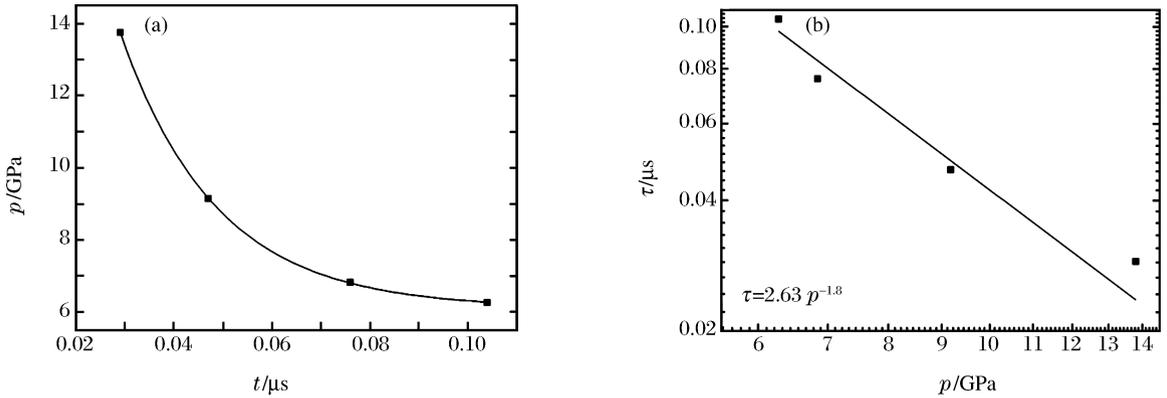


图 4 PBX-TATB/HMX 最小起爆阈值  $p-\tau$  关系曲线

Fig. 4  $p-\tau$  curves of PBX-TATB/HMX under the minimum initiation thresholds

### 3.3 到爆轰距离

测量炸药到爆轰距离时,为了避免飞片尺寸带来 2 维效应的影响及炸药发生散心爆轰,采取飞片尺寸大于楔形炸药块尺寸措施,飞片直径为 19 mm。研究了压力幅值和脉宽对炸药到爆轰距离的影响,图 5 为实验测量得到的不同脉宽压力作用下研究炸药到爆轰距离  $h$  随压力  $p$  变化的 Pop 关系曲线。图 5 的实验结果所对应的 Pop 关系表达式为

$$\lg h = 2.141 - 1.471 \lg p \quad \tau = 0.079 \sim 0.089 \mu s, p = 10 \sim 17 \text{ GPa} \tag{3}$$

$$\lg h = 2.545 - 1.657 \lg p \quad \tau = 0.057 \sim 0.061 \mu s, p = 14 \sim 19 \text{ GPa} \tag{4}$$

式中: $h$  的单位为 mm。

利用楔形状炸药测量炸药的到爆轰距离,除了背面稀疏波的影响之外,楔形端的侧向稀疏波影响非常大,因此,测量值比用圆柱形炸药测量的值偏大些,因为圆柱形的情况没有侧向稀疏波的影响。而事实上,到目前为止,还很少有报道利用圆柱形药柱去测量炸药的到爆轰距离。

与文献[6]公布的关于 PBX9503 炸药的数据结果相比较,此处测量的关于研究炸药的到爆轰距离值稍大。需要注意的是文献[6]中加载的压力脉宽为 0.08 ~ 0.11  $\mu s$ ,比本文中的加载压力脉宽宽得多;另外,其加载压力也较高,在 15 ~ 26 GPa 的范围,而本文的在 20 GPa 以内,大部分处在 17 GPa 以内,而两种炸药的密度相近,从这些来看,实验情况下研究炸药的到爆轰距离偏大是可接受的。

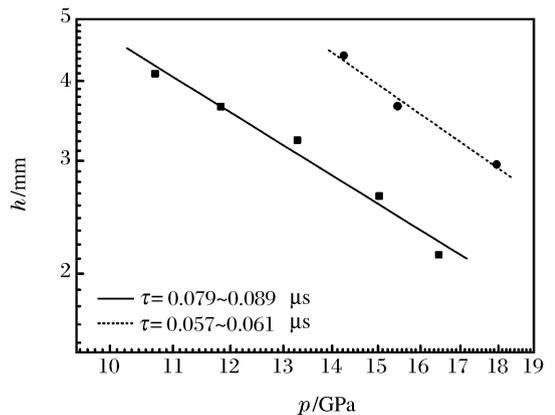


图 5 不同脉冲宽度加载压力作用下 PBX-TATB/HMX 的 Pop 曲线

Fig. 5 Pop plots for PBX-TATB/HMX at different pulse durations of loading pressure

在此讨论一下上述测量值与冲击起爆阈值的一致性。以飞片厚度 0.2 mm 为例,表 2 的结果表明,该条件下,最小起爆压力为 6.26 GPa,压力脉宽为 0.104  $\mu\text{s}$ ,炸药柱长度为 8 mm。而从式(3)得出压力为 6.26 GPa、脉宽为 0.079 ~ 0.089  $\mu\text{s}$  时,到爆轰距离为 9.32 mm。比较两种情况的条件,前者的脉宽较后者长 0.015 ~ 0.025  $\mu\text{s}$ ,且前者炸药柱约束较后者好,不存在侧向稀疏,因此前者的到爆轰距离要短些。从这些来看,两者是一致的,这也说明测量的到爆轰距离可信。

需要说明的是,影响研究炸药到爆轰距离测量的另一个重要因素是楔形炸药块楔形面的平面度难以保证。多发试验使用的炸药样品在距离楔形端约 3 mm 的楔形面内的平面度不是很好,肉眼都可辨别出凹下或凸起的地方,这需要加以改进。

## 4 结 论

(1)实验条件下研究炸药的短脉冲冲击起爆判据为:50%起爆概率条件下, $p^{1.451}\tau = 1.2$ ;100%起爆最小起爆阈值, $p^{1.8}\tau = 2.63$ 。

(2)实验条件下研究炸药的到爆轰距离 Pop 关系表达式为

$$\lg h = 2.141 - 1.471 \lg p \quad \tau = 0.079 \sim 0.089 \mu\text{s}, p = 10 \sim 17 \text{ GPa}$$

$$\lg h = 2.545 - 1.657 \lg p \quad \tau = 0.057 \sim 0.061 \mu\text{s}, p = 14 \sim 19 \text{ GPa}$$

## 参考文献:

- [1] Dobratz B M. The insensitive high explosive triaminotrinitrobenzene (TATB): Development and characterization-1888 to 1994[R]. LA-13014-H. Los Alamos National Lab. Los Alamos, New Mexico, 1995.
- [2] 董海山. 炸药及相关物性能[M]. 绵阳:《中国工程物理研究院科技丛书》编辑部,2005:1-8.
- [3] 董海山. 高能量密度材料的发展及对策[J]. 含能材料,2004,12 增刊:1-11.  
DONG Hai-shang. Development and countermeasures of high energy density[J]. Energetic Materials, 2004,12 suppl:1-11.
- [4] 王军,董海山,宋华杰,等. 合成超细粉末 TATB 的研究[C]//2002 全国火炸药技术及钝感弹药学术研讨会论文集. 2002:138-141.
- [5] Seitz W L, Stacy H L, Engelke R, et al. Detonation reaction-zone structure of PBX-9502[C]//Proceedings of the 9th Symposium (Int) on Detonation. 1989:657-669.
- [6] Grief D, Ward H S, Coley G D. Run to detonation in TATB[C]//Proceedings of the 8th Symposium (Int) on Detonation. 1985:380-389.
- [7] Tarver C M, McGuire E M. Reactive flow modeling of the interaction of TATB detonation waves with inert materials[C]//Proceedings of the 12th Symposium (Int) on Detonation. 2002:1-10.
- [8] Honodel C A, Humphrey J R, Weingart R C, et al. Shock initiation of TATB formulations[C]//Proceedings of the 8th Symposium (Int) on Detonation. 1981:425-434.
- [9] Weingart R C. The electric gun: A versatile tool for studying explosive initiation[R]. UCRL-52000-76-8, 1976.
- [10] 王治平,欧阳登焕,彭得志. HNS 炸药的小面积短脉冲冲击起爆特性研究[J]. 爆炸与冲击,1987,7(2):154-159.  
WANG Zhi-ping, OUYANG Deng-huan, PENG Zhi-de. The initiation behaviour of HNS by a short duration shock with small loading area[J]. Explosion and Shock Waves, 1987,7(2):154-159.
- [11] 程菊鑫,徐龙弟,徐辉. 窄脉冲引爆纯泰安的面积效应[J]. 爆轰波与冲击波,1984(4):17-20.
- [12] 何碧. 冲击片雷管飞片速度测试及亚微米 TATB 短脉冲起爆特性研究[D]. 北京理工大学:博士学位论文,2004.
- [13] 赵剑衡,王桂吉,孙承纬,等. 储能 14.4 kJ 电炮实验装置的研制[C]//实验力学在国防科研领域研究中的应用学术交流会议,绵阳,2004.
- [14] 王桂吉,赵剑衡,唐小松,等. 一维平面应变电炮加载技术研究[J]. 高压物理学报,2005,19(3):269-274.  
WANG Gui-ji, ZHAO Jian-heng, TANG Xiao-song, et al. Study on the technique of electric gun loading for one dimensionally planar strain[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(3):269-274.
- [15] Bloom G, Chau H, Glaser R, et al. Improvements in thin-pulse shock initiation threshold measurements[C]//

Shock Waves in Condensed Matter, 1983:534-538.

[16] 升降法[S]. GJB/Z377A-94, 1994.

[17] 邓向阳,赵剑衡,马冬莉,等. 电炮驱动薄膜飞片的运动速度[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4):382-384.

DENG Xiang-yang, ZHAO Jian-heng, MA Dong-li, et al. Experimental study on velocity of a film flyer driven by electric gun[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4):382-384

## Short-duration pulse shock initiation characteristics of a TATB/HMX-based polymer bonded explosive

WANG Gui-ji<sup>1,2,\*</sup>, ZHAO Tong-hu<sup>1</sup>, MO Jian-jun<sup>1</sup>,

WU Gang<sup>1</sup>, HAN Mei<sup>1</sup>, TAN Fu-li<sup>1</sup>

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

**Abstract:** Using the loading technique of electrical explosion of metallic foil driving the polyester film flyer to produce short-duration pulse shock wave, the shock initiation characteristics of a TATB/HMX based explosive were studied according to the DRM (delayed Robbins-Monro) test procedure. Both the shock initiation thresholds under the condition of 50% initiation probability and the minimum initiation thresholds under the condition of 100% initiation probability were obtained. And by means of the diagnostic technique of optical fibre probe, optical-electrical converter, and digital oscillograph and the method of cylindrical wedges of explosive material, the run distance to detonation was measured as a function of initial shock pressure in the studied explosive, and the effect of pulse duration on the initiation and growth to detonation characteristics was considered. The results in the form of Pop plots were presented.

**Key words:** mechanics of explosion; shock initiation; electric gun; TATB/HMX based explosive; short-duration pulse; run distance to detonation

---

\* Corresponding author: WANG Gui-ji  
E-mail address: wangguiji@126.com  
Telephone: 86-816-2491854