

文章编号: 1006-9941(2016)11-1048-09

含能毁伤元冲击引爆模拟战斗部试验研究

周杰, 何勇, 何源, 凌琦

(南京理工大学智能弹药技术国防重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 为提高战斗部的毁伤效能,对氟聚物基含能反应材料进行了研究。对氟聚物基含能材料配方改进并制备了一种 $\Phi 26\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的含能毁伤元。将含能毁伤元装入特定结构壳体后进行了冲击引爆模拟战斗部试验。采用高速录像观察含能毁伤元冲击侵彻模拟战斗部后的爆炸情况并测试爆炸后空气冲击波超压。考察了含能毁伤元不同速度下对 B 炸药和 PBX-9404 炸药的引燃引爆能力。设置了 B 炸药模拟战斗部静爆试验作为对比。在试验的基础上,通过测量爆炸后空气冲击波超压进行了 TNT 当量等效对比分析。试验研究表明,在 $735\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的侵彻速度下,氟聚物基含能毁伤元可冲击引爆 B 炸药模拟战斗部。在 $962\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的侵彻速度下,能引发 PBX-9404 炸药模拟战斗部爆燃反应。

关键词: 氟聚物基含能反应材料; 含能毁伤元; 冲击起爆; 冲击波超压; 反应度

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.11.003

1 引言

氟聚物基含能反应材料是一种主要由高氟含量(质量分数 $>70\%$)的氟聚物和活性金属颗粒或纤维以一定的工艺方法组合成的亚稳态含能复合材料,又称冲击引发反应类含能材料^[1](Impact-initiated Reactive Materials),最早由 Hugh E. 于 1976 年在专利中以反应破片^[2]的形式提出。氟聚物基含能反应材料本质上是一种混合高能材料,具有较高的能量水平;具有独特的能量释能特性,在静态和准静态下,对低速撞击、摩擦、电火花刺激表现钝感,传统引发材料反应的技术如爆炸桥丝和火焰等都不足以维持其反应^[3],在高速撞击下才反应释能;且因有成型工艺简单、成本低廉、较好的机械加工性能等优点,在军事上具有巨大的应用前景,因此受国内外学者的广泛关注^[4],特别是在含能反应材料配方设计与成型工艺研究^[3,5]、动静态力学性能测试^[6-11]、冲击感度测试^[12-15]、冲击毁伤效能研究^[16-20]等方面取得了显著成就。

氟聚物基含能反应材料主要以含能破片和含能药

型罩的形式应用于高效毁伤战斗部,利用含能反应材料制备的毁伤元在对目标的毁伤过程中,材料因受冲击作用引发化学反应,释放大能量并引起爆炸、燃烧等附加二次毁伤效应,实现对目标的多重毁伤。据报道^[21]美国海军研究办公室(office of naval research, ONR)对比反应破片与普通破片战斗部的毁伤效果发现,毁伤增强型破片杀伤半径是普通惰性破片战斗部的两倍,毁伤威力是普通破片战斗部的 500%;文献^[22]对毁伤增强型破片进行了探索研究,试验表明其化学潜能约为惰性破片平均动能的 12 倍;文献^[23]对活性破片侵彻性能和内爆效应进行了实验验证,结果表面当活性破片以 $1500\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度碰撞目标时,所释放的化学能约为动能的 5 倍。

国内开展的工作主要集中在含能反应材料反应释能机理、撞击释能阈值条件、反应效率以及在典型高效毁伤战斗部上的应用研究,基本实现了提高毁伤威力目的;但关于氟聚物基含能材料对战斗部装药类目标的引燃引爆情况鲜有报道。为了探索氟聚物基含能反应材料制备的含能毁伤元对炸药类目标的毁伤效能,本课题组分别设计了内装 B 炸药、内装 PBX-9404 炸药的模拟战斗部靶标,开展了氟聚物基含能毁伤元以不同速度对模拟战斗部的侵彻引爆试验研究,测量了模拟战斗部被含能毁伤元冲击引爆后的空气冲击波超压,并进行了 TNT 当量等效计算分析,得到了含能毁伤元对不同装药类型战斗部靶标的引燃引爆情况。

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助(51301093)

作者简介: 周杰(1989-),男,博士生,主要从事含能材料高效毁伤技术研究。e-mail: 15950462538@126.com

通信联系人: 何勇(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事战斗部总体技术和新概念战斗部技术研究。e-mail: yhe1964@mail.njust.edu.cn

2 试验方案

2.1 含能毁伤元试样

将铝粉(200目,国药集团化学试剂有限公司)、聚四氟乙烯粉(100目,国药集团化学试剂有限公司)按一定质量配比混合均匀,并加入一定质量比的高密度惰性金属粉末以增加试件的密度以及冲击反应能力,通过模具冷压成 $\Phi 26\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 柱形试件,然后参照文献[3]中的温度控制曲线(图1)进行烧结,得到由此类含能反应材料制备的含能毁伤元试样(如图2所示),其相关参数见表1,并将该含能毁伤元装入特定结构的钢制壳体内保证其具备足够的穿甲能力侵彻到模拟战斗部内部。

表1 含能毁伤元相关参数

Table 1 Related parameters of energetic kill element

dimension /mm	mass /g	theoretical density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	actual density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	reaction heat ^[3] / $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$	compression strength /MPa
$\Phi 26\times 60$	126	4.11	3.93	7.9	41.2

含能毁伤元质量 126 g,壳体质量 434 g,当含能毁伤元分别以 $735\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $955\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度侵彻引爆炸药装药时,假设含能毁伤元均完全反应释放化学能,计算了含能毁伤元化学能、含能毁伤元动能以及

表2 含能毁伤元与壳体对引爆炸药装药的贡献

Table 2 Contribution of energetic kill element and shell to detonate explosive charge

velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	chemical energy of energetic kill element		kinetic energy of energetic kill element		kinetic energy of steel shell	
	energy/kJ	ratio/%	energy/kJ	ratio/%	energy/kJ	ratio/%
735	995.4	86.8	34.0	3.0	117.2	10.2
955	995.4	79.6	57.5	4.6	197.9	15.8

2.2 模拟战斗部

模拟战斗部通过螺栓固定在钢支架上,实物如图3所示,外形尺寸、总重量及内部装药尺寸、装药质量如表3所列。

内装 B 炸药(64/36 RDX/TNT)和 PBX-9404 炸药(94/3/3 HMX/NC/TCEP),装药密度均为 $1.68\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,装药质量为 28.86 kg,根据不同炸药的爆热^[24](B 炸药: $5.132\times 10^6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、PBX-9404: $5.547\times 10^6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、TNT: $4.276\times 10^6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别计算出其 TNT 当量: $\omega_T=34.64\text{ kg}$ (B 炸药), $\omega_T=37.44\text{ kg}$ (PBX-9404 炸药)。

壳体动能,得到对引爆炸药的贡献,结果见表2。由表2可见,含能毁伤元化学能在引爆炸药装药贡献中占主导地位。两种不同侵彻速度下,含能毁伤元化学能在试件总能量(包括含能毁伤元化学能、含能毁伤元动能和壳体动能)中所占比例比例分别为 86.8% 和 79.6%。

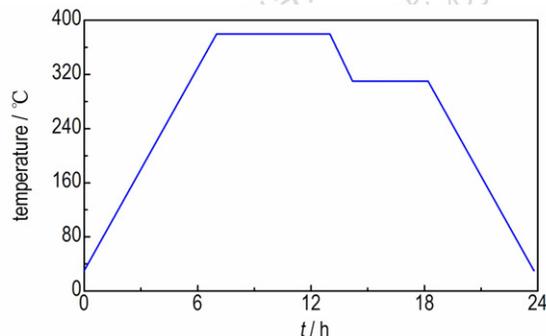


图1 烧结温度控制曲线

Fig. 1 Sintering temperature control curve



图2 含能毁伤元

Fig. 2 Energetic kill element



图3 B 炸药模拟战斗部实物图

Fig. 3 Simulative warhead of Comp. B

表 3 模拟战斗部相关参数

Table 3 Related parameters of simulative warhead

overall dimension/mm	total mass/kg	charging size/mm	charging mass/kg	shell material	shell thickness/mm	shell mass/kg
Φ300×330	77.76	Φ270×300	28.86	armor steel	15	48.9

2.3 试验测试装置

空气冲击波超压测量采用 211B 型压电式压力传感器, 采样频率为 500 kHz, 如图 4 所示为传感器、固定装置及防护装置。

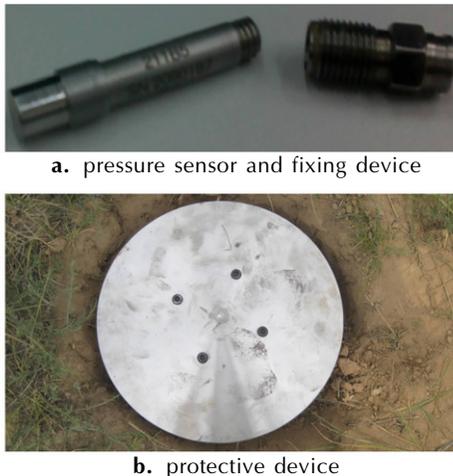


图 4 压力传感器及防护装置

Fig. 4 Pressure sensor and protective device

2.4 试验布局

图 5 为试验装置布局示意图, 发射装置距靶标约 100 m, 利用天幕靶测定带壳体的含能毁伤元飞行速度, 采用高速摄像机监测带壳体的含能毁伤元的飞行姿态及模拟战斗部引爆情况, 拍摄频率 10000 幅/s。

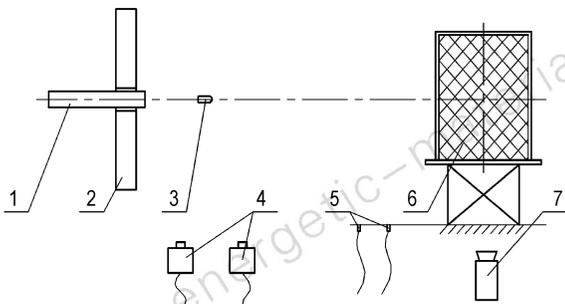


图 5 试验布置示意图

1—发射装置, 2—防护装置, 3—带壳体的含能毁伤元, 4—天幕靶, 5—传感器, 6—模拟战斗部, 7—高速录像

Fig. 5 Schematic diagram of experiment disposal

1—launcher, 2—protective device, 3—energetic kill element with shell, 4—sky screen, 5—sensor, 6—simulative warhead, 7—high speed video

3 试验原理及测试方法

3.1 带壳体炸药的爆炸

由于含能毁伤元为冲击引发化学反应类材料, 因此模拟战斗部靶标的壳体厚度对含能毁伤元的反应程度影响较大, 带壳体炸药爆炸时, 壳体变形、破碎消耗的能量约为 1%~3%, 其余能量用于爆炸产物的内能和动能的增加, 以及破片的动能增加。对于轴对称圆柱形战斗部, 有^[25]:

$$\omega_{be} = \omega_T \left[\frac{\alpha}{2-\alpha} + \frac{2(1-\alpha)}{2-\alpha} \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^{2\gamma-2} \right] \quad (1)$$

式中, ω_T 为战斗部装药 TNT 当量, kg; ω_{be} 为作用于爆炸产物的 TNT 当量, kg; α 为战斗部装填系数; r_0 为装药半径, cm; r_m 为破片达最大速度时的半径, cm。

本试验中, 以 B 炸药为例, $\omega_T = 34.64$ kg 模拟战斗部装填系数 $\alpha = 34.64 / (34.64 + 48.9) = 0.41$; 对于钢材料壳体, 破裂半径 $r_m \approx 1.5r_0$; 对于 TNT, $\gamma = 3.16$ 。将上述参数代入式(1), 得到 $\omega_{be} \approx 0.45\omega_T$, 代入 $\omega_T = 34.64$ kg (B 炸药), 得到 $\omega_{be} = 15.57$ kg。

3.2 近地面空气冲击波的传播规律

本试验中模拟战斗部距离地面高度 $h = 1.2$ m, 以 B 炸药模拟战斗部为例, 装药的对比高度满足 $\frac{h}{\sqrt[3]{\omega_{be}}} \approx 0.51 \geq 0.35$, 根据大量的实验结果, 可近似认为是在无限空中爆炸, 爆炸时空气冲击波的峰值超压通常使用的是通过试验数据拟合得到的经验公式, 常用的几种有:

(1) 我国国防工程设计规范中规定的超压计算公式^[25-26]:

$$\Delta p_m = 0.084 \frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} + 0.27 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} \right)^2 + 0.7 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} \right)^3, 1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega_{be}}} \leq 10 \quad (2)$$

(2) J. Henrych 在大量实验基础上提出的超压计算公式^[26]

$$\Delta p_m = \begin{cases} 0.619 \frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} - 0.032 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} \right)^2 + 0.213 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} \right)^3, & 0.3 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega_{be}}} \leq 1 \\ 0.066 \frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} + 0.405 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} \right)^2 + 0.329 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} \right)^3, & 1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega_{be}}} \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

(3) 《空中爆炸》一书提出的超压计算公式^[25]：

$$\Delta p_m = 0.067 \frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} + 0.301 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} \right)^2 + 0.431 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{r} \right)^3, 0.5 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega_{be}}} \leq 70.9 \quad (4)$$

式中, Δp_m 为无限空中爆炸时空气冲击波峰值超压, MPa; ω_{be} 为作用于爆炸产物的 TNT 当量, kg; r 为与爆炸中心的距离, m; 对应于本试验中的测点距离 $l = 1.5, 2.5, 3.5$ m, 对比距离 $\frac{r}{\sqrt[3]{\omega_{be}}} = 0.84, 1.21, 1.62$ 。

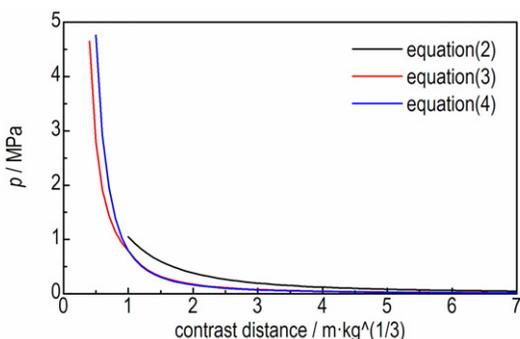


图6 不同对比距离下爆炸时空气中冲击波超压峰值
Fig.6 Shock wave overpressure peak in the air at different contrast distance

炸药量一定时, 三种不同经验公式随对比距离的变化关系如图6所示。可以看出, 当对比距离大于1时, 公式(3)和公式(4)的计算结果比较接近, 公式(2)计算结果略高; 当对比距离小于1时, 压力随对比距离的变化率较大, 因此对比距离越小, 不同公式间计算结果差距越大。本试验对比距离为0.84时, 公式(3)计算结果为1.05, 公式(4)的计算结果为1.23, 结果相差约14.6%; 为了减少不同经验公式对计算结果的影响且考虑试验中的对比距离分布范围, 本试验选择计算结果较为平均的公式(4)对结果进行计算分析。

炸药在空气中爆炸时, 爆炸冲击波近地面的传播情况如图7所示。爆炸冲击波以球形向外传播, 与地面碰撞产生反射冲击波, 反射波和入射波同时向外扩展, 两者的交点不断抬升, 并在交点连线的下方形成垂直地面的过度压缩冲击波, 即马赫波, 入射波、反射波、马赫反射波的交点即为三波点。

在测试冲击波超压方面, 为避免爆炸碎片对传感器的损坏, 主要采用壁面型压力传感器, 地面传感器测得的实际超压值与炸药量、炸药高度 h 和测点距离 l (OA 和 OB) 有关, 地面不同测点 (A 点和 B 点) 与爆

炸中心 C 构成不同的入射角 Φ_i , 因此必须考虑不同的反射情形^[27-28]。

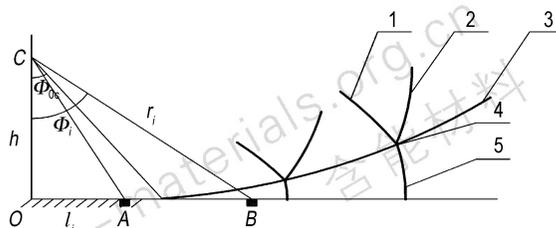


图7 爆炸冲击波在近地面的传播规律
1—反射波, 2—入射波, 3—三波点轨迹, 4—三波点, 5—马赫波
Fig.7 Spreading law of shock wave close to the ground
1—reflected wave, 2—incident wave, 3—triple point trajectory, 4—triple point, 5—Mach wave

(1) $\Phi_i = 0$ 时 (如图7中 O 点), 产生正反射, 反射波压力为:

$$\Delta p_M = 2\Delta p_m + \frac{6\Delta p_m^2}{\Delta p_m + 7p_0} \quad (5)$$

式中, Δp_m 为入射波压力, MPa; Δp_M 为反射波压力, MPa; p_0 为初始压力, MPa。

(2) 由实验可知, 当入射冲击波压力小于 0.3 MPa 时, 发生正规反射, 反射波压力与入射角无关, 仍可按式(4)进行计算。

(3) $\Phi_{oc} < \Phi_i < 90^\circ$ 时 (如图7中 B 点), 产生马赫反射, 其中 Φ_{oc} 为产生马赫反射的临界角, Φ_{oc} 与入射波的强度有关, 随着入射波压力增大, Φ_{oc} 不断减小, 并趋于一个极限值 40° , 此时马赫反射波压力:

$$\Delta p_M = \Delta p_m (1 + \cos\Phi_i) \quad (6)$$

本试验以 B 炸药为例, $\frac{\sqrt[3]{\omega_{be}}}{h} \approx 1.90$, 根据文献^[25]中临界角的实验曲线可以得到该情况下 $\Phi_{oc} = 40^\circ$, 因此当测点距离 $l > 1$ m 时, 地面传感器测量的炸药爆炸马赫反射冲击波超压。

4 试验结果及分析

为了检验氟聚物基含能毁伤元在不同速度下对 B 炸药和 PBX-9404 炸药的引燃引爆能力, 设计了两种侵彻速度: 低速 ($750 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和高速 ($950 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 以此开展了含能毁伤元分别以 $735 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的实际速度冲击侵彻 B 炸药模拟战斗部装药试验、以 $962 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的实际速度冲击侵彻 PBX-9404 炸药模拟战斗部装药试验, 并测量了爆炸后的冲击波超压; 为

了判断含能毁伤元对炸药的引爆程度,对比设置了 B 炸药模拟战斗部的静爆试验。

4.1 引燃引爆能力

735 m·s⁻¹ 速度下冲击侵彻 B 炸药模拟战斗部试验高速录像如图 8 所示,962 m·s⁻¹ 速度下冲击侵彻 PBX-9404 炸药模拟战斗部试验高速录像如图 9 所示,图中从含能毁伤元与左侧背景布平齐时开始计时。如图 8b 和图 8c 中所标示, B 炸药模拟战斗部被冲击反应后空气中可观测到爆轰波波阵面,图 8d 中可观察到产生的爆轰产物将地面尘土掀起;图 9 中 PBX-9404 炸药模拟战斗部冲击反应后地面无明显变化。B 炸药模拟战斗部试验后,现场未回收到战斗部与支架的残留; PBX-9404 炸药模拟战斗部试验过程中端盖飞出,试验结束后在距爆心约 5 m 处回收到模拟战斗部壳体以及 PBX-9404 炸药燃烧灰烬,如图 10 所示。由此对比可以初步判断冲击侵彻下, B 炸药模拟战斗部发生了爆炸,而 PBX-9404 炸药模拟战斗部发生了爆燃。

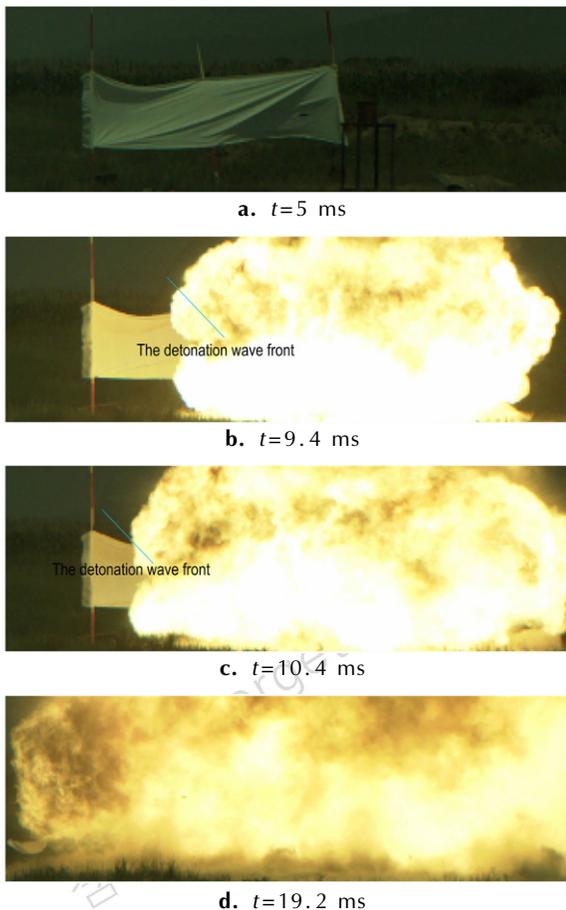


图 8 735 m·s⁻¹ 速度下冲击引爆 B 炸药的高速录像
Fig. 8 High-speed motion pictures of shock-initiated Comp. B under the speed of 735 m·s⁻¹

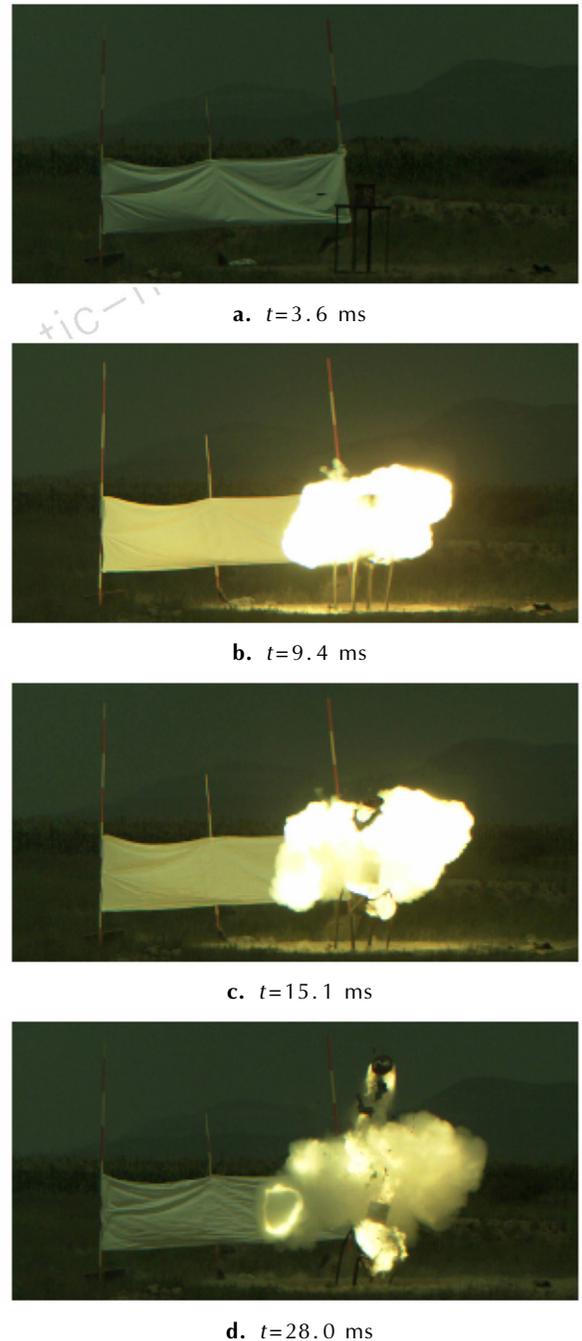


图 9 962 m·s⁻¹ 速度下冲击引燃 PBX-9404 炸药的高速录像
Fig. 9 High-speed motion pictures of shock-deflagrated PBX-9404 under the speed of 962 m·s⁻¹

735 m·s⁻¹ 和 955 m·s⁻¹ 两种速度下,含能毁伤元均能可靠引爆 B 炸药模拟战斗部,远小于文献[18]中含能破片引爆屏蔽 B 炸药的极限速度 1275 m·s⁻¹,分析原因可能是由于文献[18]中采用的含能材料为 8701 炸药,相比于氟聚物基含能材料,8701 炸药在撞击条件下需要更高的速度来达到含能材料的反应阈值;引爆机理为含能毁伤元在侵彻模拟战斗部 15 mm

钢壳体后,在模拟战斗部内部发生了剧烈的化学反应并释放出大量热量,在炸药内部形成热点,同时产生一定强度的爆轰波,共同作用引燃引爆模拟战斗部装药。



图 10 PBX-9404 炸药冲击引燃效果
Fig.10 The effect of shock- deflagrated PBX-9404

4.2 冲击波超压

在测点距离 $l=1.5, 2.5$ m 和 3.5 m 处分别设置

有 211B 型压电传感器,用于测量引爆模拟战斗部时的冲击波超压,结果见表 4。

如图 11 a 所示为静爆条件下引爆 B 炸药模拟战斗部超压曲线,超压峰值约 2.48 MPa,峰值前端有一系列扰动,是壳体破裂时超音速的破片穿过空气时产生的弹道波。

如图 11b 所示为 1.5 m 测点处测得的含能毁伤元以不同速度冲击引爆 B 炸药模拟战斗部的超压曲线,超压峰值分别为 1.84 MPa 和 2.22 MPa;从图中可以看出,相比于 B 炸药模拟战斗部静爆的超压曲线,超压峰值前约 2 ms 处分别有一个约 0.114 MPa 和 0.109 MPa 的尖峰,分析为侵彻模拟战斗部壳体的过程中,含能毁伤元受冲击引发化学反应后爆炸产生的空气冲击波超压。

表 4 试验测得的马赫波超压峰值

Table 4 Measured overpressure peak values of Mach wave

No.	explosive	velocity/ $m \cdot s^{-1}$	$\Delta p_M / MPa$			$\Delta p / MPa$ 1.5 m
			1.5 m	2.5 m	3.5 m	
1	Comp. B	static detonation	2.48	0.88	0.40	-
2	Comp. B	$735 m \cdot s^{-1}$	1.84	0.72	0.33	0.114
3	Comp. B	$955 m \cdot s^{-1}$	2.22	0.80	0.37	0.137
4	PBX-9404	$962 m \cdot s^{-1}$	0.046	0.016	-	0.136

Note: Δp_M —overpressure peak values of Mach wave detonated by simulative warhead; Δp —overpressure peak values of Mach wave detonated by energetic kill element.

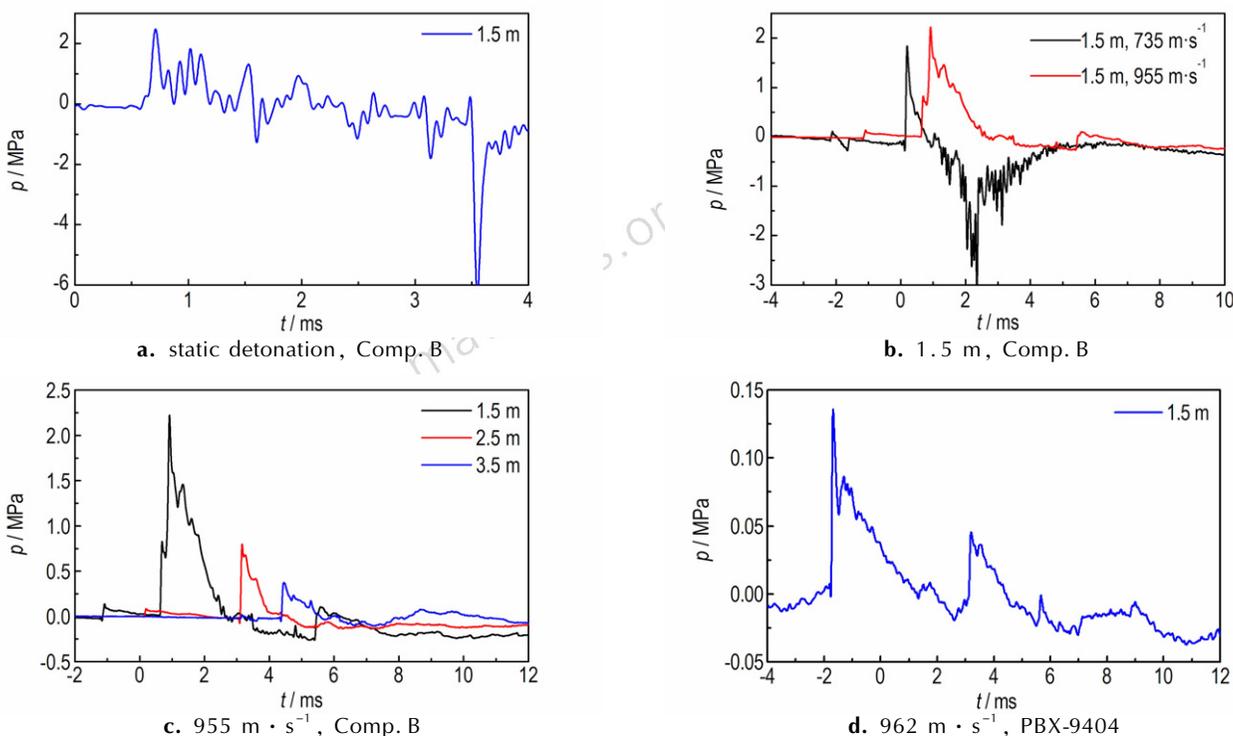


图 11 不同测点处、不同侵彻速度下的超压曲线

Fig.11 Overpressure curves at different measuring points and different penetration speeds

如图 11c 所示为不同测点处测得的含能毁伤元以 $955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度冲击引爆 B 炸药模拟战斗部的超压曲线, 1.5, 2.5, 3.5 m 测点处的超压峰值依次为 2.22, 0.80, 0.37 MPa。

图 11d 为 $962 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下冲击引爆 PBX-9404 炸药模拟战斗部的超压曲线, 可以明显看出, 曲线上第一个峰值为 0.136 MPa, 为含能毁伤元爆炸引起的冲击波超压, 与 $955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下测得的含能毁伤元超压值接近, 第二个尖峰约为 0.046 MPa, 是 PBX-9404 炸药发生爆燃反应引起的, 与试验的高速录像结果相符。

4.3 TNT 当量计算结果

由上节测试结果可知, PBX-9404 炸药模拟战斗部的反应类型主要为爆燃, 测得的冲击波超压峰值较小, 因此本节不予分析。

针对含能毁伤元对 B 炸药模拟战斗部的毁伤结果, 根据前述冲击波超压的测试方法, 可知作用于爆炸产物和空气冲击波的炸药当量: $\omega_{\text{be}} = 11.78 \text{ kg}$; 将测得的马赫反射冲击波超压带入式(6)可求出入射冲击

波超压, 再通过式(4)求出各测点相应的 TNT 当量值 ω_{bei} , 如表 5 所列。

由表 5 可以看出, 将 B 炸药模拟战斗部在各测点处的静爆试验结果通过理论方法进行了 TNT 当量等效对比, 并与实际装药量进行了对比分析, 结果误差约为 2.7%, 分析可能是未考虑端面起爆和端盖螺纹连接的影响, 但误差在允许范围之内, 证实了测试结果的真实性与理论计算分析的准确性。

在相同的 B 炸药装药条件下, 将含能毁伤元侵彻速度从 $735 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升到 $955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 结合表 4 中 1.5 m 处测得含能毁伤元超压峰值可以发现, 含能毁伤元的反应程度提高了约 0.2 倍; 通过与 B 炸药模拟战斗部静爆结果比较发现, 当侵彻速度 $735 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升到 $955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, B 炸药爆炸反应程度从 75.0% (73.0/97.3) 提升到 88.8% (86.4/97.3), 说明提高侵彻速度可提高含能毁伤元的反应程度, 进一步提高对 B 炸药引爆程度; 不同测试条件下存在部分测点 TNT 当量值偏离平均值, 是由于近爆炸场高温、高压环境对压力传感器综合作用, 导致测试精度降低。

表 5 B 炸药爆炸部各测点 TNT 当量

Table 5 The TNT equivalence of Comp B at different measuring points

No.	$\omega_{\text{be}}/\text{kg}$	$\omega_{\text{bei}}/\text{kg}$			$\bar{\omega}_{\text{bei}}/\text{kg}$	$(\bar{\omega}_{\text{bei}}/\omega_{\text{be}})/\%$
		1.5 m	2.5 m	3.5 m		
1 (static detonation)		15.35	15.36	14.74	15.15	97.3
2 ($735 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	15.57	10.78	11.93	11.39	11.37	73.0
3 ($955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)		13.47	13.63	13.26	13.45	86.4

Note: ω_{bei} is TNT equivalence at different measuring points; $\bar{\omega}_{\text{bei}}$ is the average of TNT equivalence.

5 结 论

(1) 利用氟聚合物基含能反应材料制备的含能毁伤元在特定的包覆壳体下具有较高的强度, 可承受侵彻中过载; 该含能毁伤元除了对目标造成常规动能毁伤外, 在侵彻模拟战斗部装药结构过程中, 含能毁伤元受强烈冲击后发生爆炸性化学反应释放大量能量, 并产生一定强度的冲击波, 化学能和冲击波共同作用引燃引爆模拟战斗部装药。

(2) 试验结果表明, $735 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 侵彻速度下, 氟聚合物基含能毁伤元可引爆 B 炸药模拟战斗部; $962 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 侵彻速度下, 可导致 PBX-9404 炸药模拟战斗部发生爆燃。

(3) 侵彻速度从 $735 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升到 $955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 对 B 炸药引爆程度从 75.0% 提升到 88.8%, 适当

提高速度有利于提高含能毁伤元反应程度, 进一步提高对模拟战斗部的爆炸毁伤效果。

参考文献:

- [1] 叶文君, 汪涛, 鱼银虎. 氟聚合物基含能反应材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(6): 19-23.
YE Wen-jun, WANG Tao, YU Yin-hu. Research progress of fluoropolymer-matrix energetic reactive materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2012, 42(6): 19-23.
- [2] Hugh E. Reactive fragment: United States, 3961576[P]. 1976.
- [3] 阳世清, 徐松林, 张彤. PTFE/Al 反应材料制备工艺及性能[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6): 39-42.
YANG Shi-qing, XU Song-lin, ZHANG Tong. Preparation and performance of PTFE/Al reactive materials[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6): 39-42.
- [4] 张先锋, 赵晓宁. 多功能含能结构材料研究进展[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 731-739.
ZHANG Xian-feng, ZHAO Xiao-ning. Review on multifunctional

- energetic structural materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 731-739.
- [5] Jingbo Wu, Maoquan Li, Shuhai Zhang, et al. Research on sintering polytechnic of PTFE/Al reactive materials [C] // *Advanced Materials Research*, 2013, 820: 25-29.
- [6] Raftenberg M N, Mock W, Kirby G C. Modeling the impact deformation of rods of a pressed PTFE/Al composite mixture [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1735-1744.
- [7] 徐松林, 阳世清, 张炜, 等. PTFE/Al 含能复合物的本构关系 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(4): 105-110.
XU Song-lin, YANG Shi-qing, ZHANG Wei, et al. A constitutive relation for a pressed PTFE/Al energetic composite material [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(4): 105-110.
- [8] 徐松林, 阳世清, 赵鹏铎, 等. PTFE/Al 含能复合材料的压缩行为研究 [J]. *力学学报*, 2009, 41(5): 102-106.
XU Song-lin, YANG Shi-qing, ZHAO Peng-duo, et al. The study on the compressive behavior of PTFE/Al energetic composite [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, 41(5): 102-106.
- [9] Zhang X F, Zhang J, Qiao L, et al. Experimental study of the compression properties of Al/W/PTFE granular composites under elevated strain rates [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 581: 48-55.
- [10] Herbold E B, Nesterenko V F, Benson D J, et al. Particle size effect on strength, failure, and shock behavior in polytetrafluoroethylene-Al-W granular composite materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(10): 103903.
- [11] 赵鹏铎, 卢芳云, 李俊玲, 等. 活性材料 PTFE/Al 动态压缩性能 [J]. *含能材料*, 2009, 17(4): 459-462.
ZHAO Peng-duo, LU Fang-yun, LI Jun-ling, et al. The dynamic compressive properties of PTFE/Al reactive materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(4): 459-462.
- [12] Hunt E M, Malcolm S, Pantoya M L, et al. Impact ignition of nano and micron composite energetic materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 842-846.
- [13] Denisaev A A, Shteinberg A S, Berlin A A, et al. Study of the impact sensitivity of aluminum-polytetrafluoroethylene layered compositions [C] // *Doklady Physical Chemistry. Nauka/Interperiodica*, 2007, 414(2): 139-142.
- [14] Densmore J M, Biss M M, Homan B E, et al. Thermal imaging of nickel-aluminum and aluminum-polytetrafluoroethylene impact initiated combustion [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(5): 084911.
- [15] Denisaev A A, Shteinberg A S, Berlin A A. Temperature effect on the impact sensitivity of aluminum-polytetrafluoroethylene layered composites [C] // *Doklady Physical Chemistry. MAIK Nauka/Interperiodica*, 2009, 428(1): 163-166.
- [16] 李顺平, 冯顺山, 董永香, 等. 冲击作用下反应破片燃爆温度效应 [J]. *弹箭与制导学报*, 2015, 35(2): 54-57.
LI Shun-ping, FENG Shun-shan, DONG Yong-xiang, et al. Explosive temperature effect of reactive fragment under impact [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, 35(2): 54-57.
- [17] 帅俊峰, 蒋建伟, 王树有, 等. 复合反应破片对钢靶侵彻的实验研究 [J]. *含能材料*, 2009, 17(6): 722-725.
SHUAI Jun-feng, JIANG Jian-wei, WANG Shu-you, et al. Compound reactive fragment penetrating steel target [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 722-725.
- [18] 何源, 何勇, 潘绪超, 等. 含能破片冲击引爆屏蔽炸药研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2011, 35(2): 187-193.
HE Yuan, HE Yong, PAN Xu-chao, et al. Initiation of shielded high explosive impacted by energetic fragment [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, 35(2): 187-193.
- [19] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引燃航空煤油实验研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(9): 1148-1152.
WANG Hai-fu, ZHENG Yuan-feng, YU Qing-bo, et al. Experimental research on igniting the aviation kerosene by reactive fragment [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(9): 1148-1152.
- [20] 彭飞, 余道强, 阳世清, 等. 含能破片战斗部毁伤效应研究 [J]. *含能材料*, 2011, 19(4): 450-453.
PENG Fei, YU Dao-qiang, YANG Shi-qing, et al. Damage effects of energetic fragment warhead [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(4): 450-453.
- [21] Taylor A P. Al/PTFE reactive material (RM-4) sandia effort: experiment & modeling [R]. SAND 2003-1840P, 2003.
- [22] 黄亨建, 黄辉, 阳世清, 等. 毁伤增强型破片探索研究 [J]. *含能材料*, 2007, 15(6): 566-569.
HUANG Heng-jian, HUANG Hui, YANG Shi-qing, et al. Preliminary research on damage enhanced fragment [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 566-569.
- [23] 王海福, 刘宗伟, 俞为民, 等. 活性破片能量输出特性实验研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2009, 29(8): 663-666.
WANG Hai-fu, LIU Zong-wei, YU Wei-min, et al. Experimental investigation of energy release characteristics of reactive fragments [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(8): 663-666.
- [24] Akst I B. Heat of detonation, the cylinder test, and performance munitions [R]. USA: Los Alamos National Lab, NM, 1989.
- [25] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. *爆炸及其作用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 347.
- [26] 李翼祺, 马素贞. *爆炸力学* [M], 199.
- [27] 张玉磊, 苏健军, 姬建荣, 等. 超压测试方法对炸药 TNT 当量计算结果的影响 [J]. *火炸药学报*, 2014, 37(3): 16-19.
ZHANG Yu-lei, SU Jian-jun, JI Jian-rong, et al. Effect of overpressure test method on calculated results of TNT equivalence [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2014, 37(3): 16-19.
- [28] 陈昊, 陶钢, 蒲元. 冲击波的超压测试与威力计算 [J]. *火工品*, 2010(1): 21-24.
CHEN Hao, TAO Gang, PU Yuan. The measurements of overpressure of shock wave and analysis of TNT equivalent [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2010(1): 21-24.

Experimental Study on Shock Initiation of Simulative Warhead by Energetic Kill Element

ZHOU Jie, HE Yong, HE Yuan, LING Qi

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To improve the damage efficiency of warhead, the fluorine polymer based energetic reactive materials were studied. The formulation of the fluorine polymer based energetic material was improved and a kind of energetic kill element with dimension of $\Phi 26$ mm \times 60 mm was prepared. Experimental study on shock Initiation of simulative warhead was carried out, in which the energetic kill element was confined by a shell with specific structure. The explosion situation after the energetic kill element penetrated into the warhead was observed by high-speed video and the air shock wave overpressure after explosion was measured. The ignition and blasting ability of the energetic kill element to detonate Comp. B and PBX-9404 under different speeds was examined. The static detonation test of Comp. B simulation warhead for comparison was set. Based on the test, through the measurement of air shock wave overpressure after explosion, the comparison and analysis of the equivalent TNT equivalent was performed. Experimental study show that under the penetration speed of $735 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the energetic kill element can detonate the Comp. B warhead. Under the penetration speed of $962 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the energetic kill element can arouse the Comp. B warhead deflagration.

Key words: fluorine polymer based energetic reactive materials; energetic kill element; shock Initiation; shock wave overpressure; reaction degree

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.11.003