

文章编号: 1001-1455(2006)05-0404-06

一次引爆云爆剂的爆炸特性*

——后燃反应对爆炸威力的影响

阚金玲, 刘家骥

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 研究了一次引爆云爆剂(SEFAE—single event fuel air explosive)的后燃反应(after-burning)及其爆炸波威力的影响。通过高速摄像的记录对战斗部爆炸过程进行了分析,根据对 SEFAE 战斗部爆炸场参数的测试,以及爆炸威力的 TNT 当量计算,对战斗部壳体破裂后 SEFAE 所释放的能量进行了定量分析,并同试验结果进行了对比。发现强烈的后燃反应使 SEFAE 爆轰总能量和爆炸威力较普通炸药有很大的提高。并探讨了壳体破裂后 SEFAE 与空气中氧的作用机理,提出了提高云爆剂威力的途径。

关键词: 爆炸力学;后燃反应;爆炸波;云爆剂;战斗部

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·3510

文献标志码: A

1 引言

可燃性液体或固体粉末被分散到空气介质中,形成两相或多相混合物,一旦遇到外加能量或自发化学反应所释放能量的作用,即可发生燃烧、爆炸乃至爆轰^[1],军事上利用燃料抛撒将有机燃料或金属粉末与空气混合造出了云爆武器(fuel air explosive, 简称 FAE)。FAE 的发展已由传统二次引爆云爆剂(double event FAE, 简称 DEFAE。)向一次引爆云爆剂(single event FAE, 简称 SEFAE)转变,SEFAE 燃料的抛撒和引爆一次完成,其装置结构简单,爆轰可靠性高,是当前 FAE 武器研究的热点^[1~5]。

发生在炸药爆轰区后的化学反应,被称为后燃反应^[6]。SEFAE 在爆轰后,灼热的爆炸云团(包含爆轰中间产物和某些尚未反应的 SEFAE 组分,主要是作为 SEFAE 中燃料的金属粉)在向四周抛撒的同时,爆炸云团各组分之间,以及爆炸云团同环境空气之间,还会继续进行剧烈的快速燃烧反应,这种抛撒同时进行的快速反应就是 SEFAE 的后燃反应。SEFAE 爆轰的后燃反应将会进一步增强爆炸冲击波的强度和毁伤效应。

研究 SEFAE 爆炸特征具有重要的理论意义和实用价值。许学忠等^[1]利用高速摄影和红外测温计,实测伴有爆炸反应的 FAE 燃料扩散速度、半径及云雾的温度。陈瑛等^[5]通过不同装药量的 SEFAE 装置的静爆试验,得到了超压和冲量随距离变化规律函数,从而研究了 SEFAE 的爆炸特性。本文中,通过外场高速摄像对 SEFAE 爆炸过程进行了分析,对 SEFAE 后燃反应现象进行了描述;通过威力测试和爆热计算,定量分析了 SEFAE 的后燃反应及其对 SEFAE 爆炸威力的影响,发现强烈的后燃反应使 SEFAE 爆轰总能量和爆炸威力较之普通炸药有很大的提高。同时对 SEFAE 的爆炸特征做了进一步的阐述。

2 试验研究

2.1 试验装置

试验设计了壳体壁厚分别为 15.0、4.0 和 1.5 的三种战斗部。三种云爆战斗部其余参数均相同:装药量为 10kg,壳体材料为碳钢,形状为圆柱形,长径比为 4.9。爆炸试验的炸高为 0.92m。每种壁厚的战斗

* 收稿日期: 2005-06-16; 修回日期: 2006-02-22

作者简介: 阚金玲(1978—),女,博士研究生。

部均进行两发试验。测试仪器配置如下:压力传感器为 Kistler 压电石英 211B 型和 211M 型低阻型压力传感器,频响为 500 Hz,波形上升时间为 $1\sim 2\ \mu\text{s}$;电荷适配器为 Kistler 5124A 型,频响 $0.071\sim 300\ \text{Hz}$;数据采集系统为 JOVIAN5200 型。另外又利用高速摄像机,对装药条件和试验条件均相同的 SEFAE 战斗部和 B 炸药战斗部的爆炸过程进行摄像,摄像机帧数 3000 f/s。

2.2 试验结果与讨论

2.2.1 高速摄像记录及讨论

SEFAE 爆炸过程的典型照片见图 1:上为 B 炸药战斗部,下为云爆战斗部。

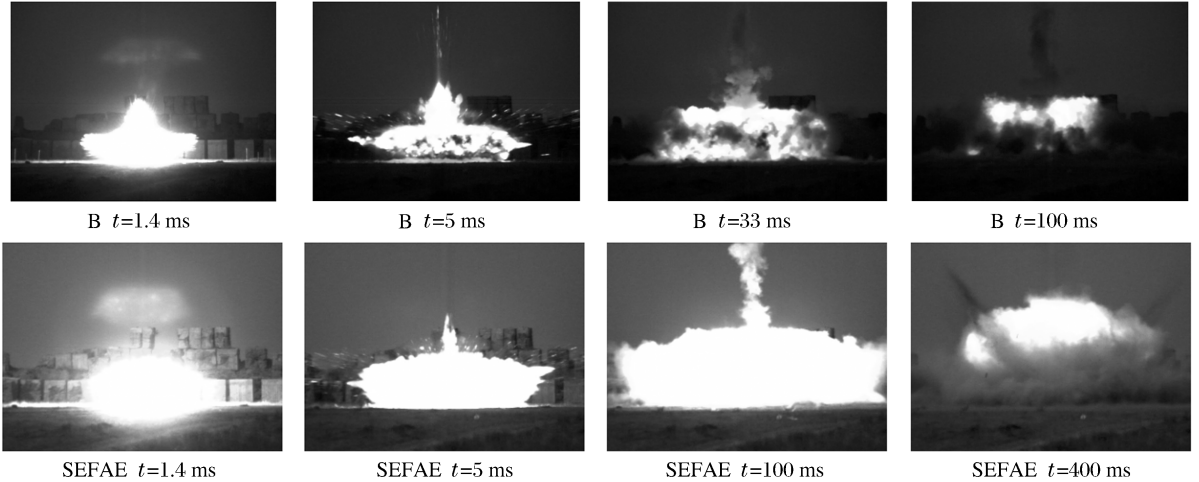


图 1 SEFAE 战斗部与 B 炸药战斗部爆炸现象的对比

Fig. 1 Contrast of blast phenomena of SEFAE and Comp. B warhead

对图 1 的图像测量,SEFAE 战斗部所形成火球(即爆炸云团)的体积,在 1.4 ms 时达到装药体积的 4 800 倍;在 5.0 ms 时为装药体积的 27 000 倍;在 100 ms 时,火球体积接近最大,为装药体积的 57 000 倍以上。火球持续时间不少于 400 ms。而同场爆炸的 B 炸药战斗部(装药的初始体积和质量均与云爆装药相等),在 1.4 ms 时,火球体积与 SEFAE 的相差无几,约为其初始体积的 4 500 倍;而在 5.0 ms 时,仅膨胀到装药体积的 5 000 倍;到 33 ms,火球体积就达到最大,但只有装药体积的 6 000 倍,持续时间约 100 ms。由此可见,在相同的试验条件下,SEFAE 的持续时间和作用范围均远大于 B 炸药。

在某发 SEFAE 战斗部爆炸过程的高速摄像记录中发现,由于战斗部的上端盖强度不够,SEFAE 爆炸云团向上泄漏。这时,处于高压状态的 SEFAE 爆炸云团高速地向上喷射,并发生了“二次爆炸”,如图 2 所示。从录像可见,二次爆炸开始的时间约在点火后 40 ms,其持续时间在 40 ms 以上。

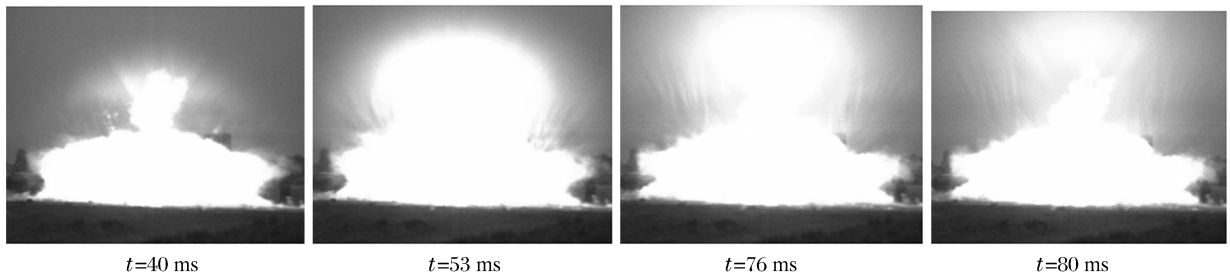


图 2 SEFAE 战斗部的二次爆炸现象

Fig. 2 The secondary blast of SEFAE

SEFAE 战斗部被引信点火后,爆轰并形成灼热且富含燃料的“爆炸云团”(“爆炸云团”,既包含爆轰中间产物,也包含某些尚未反应的 SEFAE 组分),高温高压的爆炸云团从正在破裂的战斗部壳体裂缝以射流的形式高速喷出,与空气相遇并发湍流混合(包含多种组分的产物自身的湍流混合,还有产物

同环境大气的湍流混合)。SEFAE 的配方被设计为负氧平衡,在与空气混合时后燃反应的化学速率可能迅速增大,就形成了二次爆炸。

由于云团泄漏,直观地看到了二次爆炸。在正常情况,这种“二次爆炸”发生在主云团内部。由于主云团内部二次爆炸的存在,使得 SEFAE 爆炸威力大为增强。前述实验已经表明,同传统高能炸药相比,由于后燃反应,SEFAE 的爆炸云团膨胀更迅速,形成体积更大、持续时间更长的高温高压火球即爆炸云团,从而具有更高的爆炸威力。

2.2.2 爆炸场参数测试结果及分析

带壳装药(战斗部)爆炸所释放的能量主要用于两部分:一是形成爆炸冲击波;二是形成破片。形成破片时,爆炸能量消耗于壳体破裂、破片形成与加速。这就是说,战斗部的壳体将消耗炸药的部分能量。用抛物线插值法对实测数据进行外推,便可得到壳体厚度为零时云爆战斗部(即无壳裸体装药)的爆炸场参数。其方法是:假设某一测点的爆炸场参数值 Y 随壳体厚度 X 的变化符合公式 $Y=AX^2+BX+C$,通过已知三种壳体的厚度及在某点处的爆炸场参数值,拟合得到该点处爆炸场参数值 Y 随壳体厚度 X 的变化关系式,即得到 A 、 B 、 C 值。其中 C 值就是壳体厚度为 0 的爆炸场参数值。另外,还用同场同条件下测得的 TNT 裸体装药的爆炸场参数,拟合了 TNT 超压与冲量随比例距离 $R/W^{1/3}$ 的变化关系(R 为距离, W 为装药量),如图 3 所示,以用于对爆炸波输出进行 TNT 比当量计算。

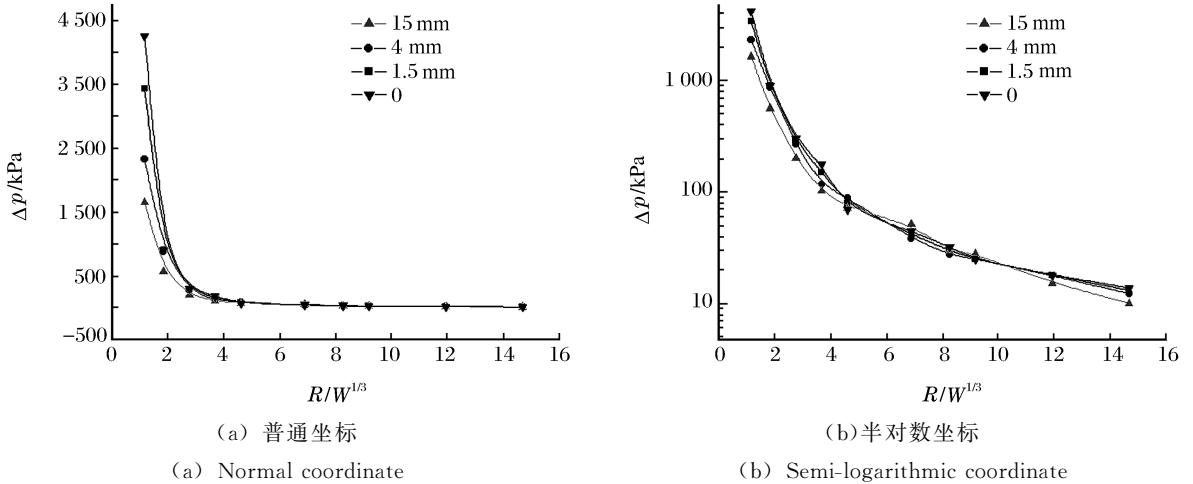


图 3 不同壳体厚度的 SEFAE 战斗部的超压随距离变化曲线

Fig. 3 Overpressure curves of SEFAE warheads with different wall-thicknesses

实测及外推的云爆战斗部的超压数据分别见表 1 和表 2。

用实测爆炸波参数计算求得的能量,应是用于形成爆炸波的那部分炸药所释放的能量,而非全部装药的总能量。所以使用了“有效 TNT 比当量”和“总 TNT 比当量”的概念。有效 TNT 比当量的意义是:与一定量有壳云爆装药(SEFAE 战斗部)产生相等爆炸冲击波威力的无壳 TNT 装药量,同该云爆剂装药量的比值。它的数值是,无壳 TNT 装药质量同该云爆战斗部装药质量之比。总 TNT 比当量的意义是,若战斗部的全部装药都用于形成爆炸波,相当于该装药质量多少倍的 TNT 装药,才能形成与其能量相等的爆炸波。显然,当壳体厚度为零时,SEFAE 所释放的能量全部用来形成爆炸波。这时云爆剂的有效 TNT 比当量就是它的总 TNT 能量与实际装药量之比。按照本试验数据外推,该量级云爆剂装药(无壳云爆战斗部)的总 TNT 比当量为 2.39。

根据文献[7],装填普通高能炸药的轴对称圆柱形战斗部爆炸时,形成爆炸冲击波的装药质量为

$$W_{bs} = W \left[\frac{\alpha}{2-\alpha} + \frac{2(1-\alpha)}{2-\alpha} \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^{2\gamma-2} \right] \quad (1)$$

式中: W_{bs} 为形成冲击波的装药质量, kg; W 为战斗部装药总质量, kg; α 为战斗部装填系数; r_0 为装药半径, mm; r_m 为破片达到最大速度时的半径, mm, 也就是战斗部壳体刚破裂时的半径, 对钢质壳体, 近似

取 $r_m \approx 1.5r_0$; $\gamma \approx 3$ 。

表1 不同壳体壁厚的 SEFAE 战斗部的超压数据

Table 1 Overpressure data of SEFAE warheads with different wall-thickness

| R/m | $\Delta P/\text{kPa}$ | | | | A | B |
|------------|-----------------------|----------|----------|----------|--------|----------|
| | 15 mm | 4 mm | 1.5 mm | 0(C) | | |
| 2.5 | 1 659.70 | 2 333.20 | 3 441.40 | 4 276.10 | 28.299 | -598.908 |
| 4 | 568.23 | 882.40 | 905.30 | 910.42 | -1.437 | -1.256 |
| 6 | 201.86 | 269.80 | 290.95 | 304.65 | 0.169 | -9.390 |
| 8 | 103.45 | 117.05 | 152.29 | 179.15 | 0.953 | -19.335 |
| 10 | 72.52 | 89.66 | 79.06 | 70.12 | -0.430 | 6.602 |
| 15 | 51.61 | 38.52 | 41.91 | 45.08 | 0.189 | -2.393 |
| 18 | 30.05 | 27.46 | 30.11 | 32.28 | 0.096 | -1.588 |
| 20 | 28.31 | 25.26 | 25.06 | 25.03 | 0.015 | 0.000 |
| 26 | 15.30 | 17.90 | 18.07 | 18.10 | -0.013 | 0.001 |
| 32 | 10.08 | 12.31 | 13.25 | 13.89 | 0.013 | -0.447 |
| 有效 TNT 比当量 | 1.62 | 1.85 | 2.09 | 2.39 | | |

因为三种试验战斗部均装填同种云爆剂,且装药质量基本相等,所以三种战斗部的总 TNT 比当量也应基本相同。但是,当用经验公式(1)来计算云爆剂的总 TNT 比当量时,却发现根据不同壳体厚度战斗部的试验数据进行计算,所得的总 TNT 当量与其相差颇大。这是因为 SEFAE 在壳体破裂后仍有不可忽略的释能反应在进行。而这时破片已基本形成,所以这部分能量不能对破片进行加速,不会转化成破片的动能,因此我们将公式(1)修改为

$$W_{bs} = W \times A + W \times (1 - A) \times \left[\frac{\alpha'}{2 - \alpha'} + \frac{2(1 - \alpha')}{2 - \alpha'} \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^{2\gamma - 2} \right] \quad (2)$$

式中: $\alpha' = (W - B)/(W - B + m_{wall})$; A 为后燃反应所释放能量占总能的百分比; B 为后燃反应所释放能量, kg; m_{wall} 为壳质量。显然,有效 TNT 当量 / 总 TNT 当量 = W_{bs}/W 。

只要计算出 A 值,就可以得到战斗部壳体破裂后 SEFAE 因后燃反应所释放的能量占总能量。通过迭代,根据 SEFAE 的反应数据,其结果见表 2。

表2 壳体破裂后 SEFAE 反应数据

Table 2 The data of SEFAE after shell burst

| W/kg | h_{wall}/mm | m_{wall}/kg | 有效 TNT 当量 | 总 TNT 当量 | α' | θ' | B/kg | A |
|------|----------------------|----------------------|--------------|-------------|-----------|-----------|------|------|
| 10 | 15 | 33.22 | 1.62 | 2.39 | 0.17 | 0.27 | 3.2 | 0.32 |
| 10 | 4 | 8.17 | 1.85 | 2.39 | 0.45 | 0.43 | 3.5 | 0.34 |
| 10 | 1.5 | 3.00 | 2.09 | 2.39 | 0.68 | 0.61 | 3.5 | 0.35 |

h_{wall} 为壁厚。

可看出,战斗部壳体破裂后,SEFAE 因后燃反应所释放的能量,约占爆炸总能量的 1/3 以上,是个不可忽视的数值。

从不同壳体壁厚云爆战斗部的爆炸波超压随距离变化的曲线可以看到,当装填系数减小,也就是壳体质量增加(厚度增加)时,近场的超压随壳体厚度的增加减小得很快,而中、远场的超压随壳体厚度的增加减小得较慢。对于所用的 10 kg 级云爆战斗部,在距爆心 10 ~ 18 m 处,壳体壁厚 15 mm 战斗部的超压甚至高出了壁厚 4 mm 与 1.5 mm 战斗部的超压。这说明后燃反应所释放的能量对爆炸威力的贡献,主要是延缓冲击波衰减,且离爆心较远处,其作用更明显。

2.3 大气中参与 SEFAE 后燃反应的氧的量

通常,由各种炸药的不同爆热,都可根据能量相似原理计算该炸药的 TNT 比当量,其方法是

$$\text{TNT 比当量} = \text{炸药的爆热} / \text{TNT 的爆热} \quad (3)$$

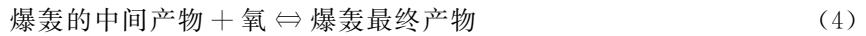
采用阿瓦克扬法计算炸药的理论爆热,其方法见下。

按照炸药的最大放热原则,炸药分子中的氧元素按照元素的活泼性,将分子中的还原性元素氧化成对应的氧化物,此时的爆炸产物生成热总和为最大($Q_{1.3\max}$)。但在实际中,由于完全氧化的产物产生离解,使产物生成热总值发生变化,因而需采用一个真实系数 K 来表示实际爆炸生成热总和 $Q_{1.3}$ 与爆炸产物最大生成热总和 $Q_{1.3\max}$ 之间的比例关系,即 $Q_{1.3} = KQ_{1.3\max}$, 式中 $K = 0.32A^{0.24}$, A 为氧平衡系数,所以爆热的经验计算式为 $Q_{2.3} = KQ_{1.3\max} - Q_{1.2}$, 式中 $Q_{2.3}$ 即为爆热, $Q_{1.2}$ 为云爆剂的理论生成热。

TNT 的爆热为 4 155 J/g, 计算所得 SEFAE 爆热参数如下: $Q_{2.3} = 7\ 746$ J/g; $A = 0.32$; $K = 0.732$; TNT 比当量 = 1.86。

由此可见,用阿瓦克扬法计算出云爆剂理论爆热要小于云爆剂实际释放的能量,这是因为阿瓦克扬法计算氧平衡系数时,外界氧的量不计算在其中,所以 7 746 J/g 应是云爆剂点火到爆轰产物未与空气混合时(或者说壳体破裂前)这一极短的时刻所释放的理论能量。

在阿瓦克扬法中,炸药爆炸时化学反应向正方向进行的程度是受反应体系中氧含量影响的。因为 SEFAE 的配方设计为负氧平衡,所以 SEFAE 爆炸云团与空气互相进行湍流混合与分子扩散,引起物质间如下的化学反应



式(4)的反应是耗氧反应。所以外界氧的加入,都促进了化学反应向正方向进行。其反应放出的能量,仍对爆炸波有所贡献。空气中的氧与 SEFAE 的反应是相当复杂的过程,既有物质的变化,又有能量的改变。为了量化氧的加入对化学反应进行的促进作用,假设 SEFAE 与空气的反应速度远大于空气的扩散速度,即反应在爆轰产物与空气接触的瞬间,反应即达平衡。当向反应体系加入少量的氧气,就可依据阿瓦克扬法重新计算 SEFAE 的爆热和 TNT 当量,再由式(3)计算云爆剂的 TNT 当量。若计算的 TNT 当量不为 2.39,则再加入少量氧重新计算,直到计算所得到的 TNT 当量等于 2.39(即外场试验所测量的 TNT 当量)为止。通过多次迭代后,计算所得到的云爆剂爆热参数如下: $A = 0.44$; $K = 0.796$; $Q_{23} = 9\ 931$ J/g; TNT 当量 = 2.39; Oxygen-mass/(100 g SEFAE) = 0.41 mol。

可以看出,每 100 g SEFAE 吸收 0.41 mol 的氧气并进行释能反应,才达到云爆战斗部外场试验所测得的爆炸威力。

由此可知,SEFAE 是在战斗部壳体破裂之后、爆炸云团在向外膨胀的过程中,可以卷吸环境入大气进入云团并同其中的氧进行化学反应,SEFAE 之所以能够达到高威力,既与特定的配方设计有关,也与空气的参与反应有关。所以既有恰当的配方设计,也设法更好利用空气中的氧,以促进云爆剂的后燃反应,应是提高云爆剂威力的一个途径。

3 结 论

通过试验研究和理论推导,得到以下结论:

(1) 相对于普通高能炸药,SEFAE 能形成作用范围较大,持续时间较长的高温火球,总 TNT 比当量 2~2.5 左右,具有较高的爆炸威力。

(2) SEFAE 爆轰并形成灼热且富含燃料的“爆炸云团”,与空气相遇并发湍流混合,氧的参与促进了后燃反应的进行,同时也增大了 SEFAE 的爆炸总能量,提高了爆炸威力,每 100 g SEFAE 吸收 0.41 mol 的氧气并进行释能反应。

(3) 后燃反应释放的能量是 SEFAE 反应能量中不可忽视的部分,对于所研究的 SEFAE 可达成总能量的 1/3。

(4) SEFAE 后燃反应所释放的能量对爆炸威力的贡献主要是延缓爆炸波的衰减,使云爆战斗部在中、远场具有更高的威力。

(5) 在 SEFAE 配方设计和战斗部结构设计中,设法加强后燃反应,包括利用空气中的氧,是提高云爆战斗部爆炸威力的一个途径。

参考文献:

- [1] 许学忠,裴明敬,王宇辉,等.一次起爆FAE的燃料扩散特征[J].火炸药学报,2000,23(1):47-49.
XU Xue-zhong, PEI Ming-jing, WANG Yu-hu, et al. Dispersion characteristics of single-event FAE[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000,23(1):47-49.
- [2] 王德润,沈兆武,周凯元,等.固-液相FAE一次引爆实验研究[J],爆炸与冲击,2004,24(5):391-395.
WANG De-run, SHEN Zhao-wu, ZHOU Kai-yuan, et al. Experimental study on single ignition of solid and liquid FAE[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(5):391-395.
- [3] Smirnov N N, Nikitin V F. Ignition and combustion of turbulized dust-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2000,123:46-47.
- [4] 张奇,白春华,刘庆明,等.一次引爆燃料空气炸药及其爆炸效应研究[J].实验力学,2000,15(4):448-453.
ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Investigation on single igniting fuel-air explosive and its explosion effects[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000,15(4):448-453.
- [5] 陈瑛,刘家聪,解立峰,等.液固复合云爆药剂爆炸特性的试验研究[J].含能材料,2004,12(3):1-4.
CHEN Ying, LIU Jia-cong, XIE Li-feng, et al. Experimental study on the explosion performance of SEFAE[J]. Energetic Materials, 2004,12(3):1-4.
- [6] Kuhl A L, Forbes J, Chandler J, et al. Confined combustion of TNT explosion products in air[A]. The 8th International Colloquium on Dust Explosions Schaumburg[C]. Illinois, USA: Defense Special Weapons Agency, 1998: 1-49.
- [7] 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.

The blast characteristic of SEFAE

——Effect of after-burning on blast power

KAN Jin-ling*, LIU Jia-cong

(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: Effect of after-burning on the blast power of SEFAE was studied by analyzing blast process of SEFAE warhead recorded by a high-speed video camera. By means of data obtained from SEFAE warhead field test and their TNT equivalency calculation, energy release of after-burning was quantitatively analyzed and compared with experimental results. Comparisons show that total energy and blast power are improved due to intense after-burning. The reaction mechanism between SEFAE and oxygen in air was explored and the way of enhancing SEFAE power was proposed.

Key words: mechanics of explosion; after-burning; blast power; SEFAE(single event fuel air explosive); warhead

* Corresponding author: KAN Jin-ling

E-mail address: quanzhang-nike@hotmail.com

Telephone: 025-84310201