

文章编号:1006-9941(2006)01-0012-04

强氧化剂对 FAE 诱导作用的实验研究

崔晓荣¹, 周昕清¹, 俞永华², 沈兆武¹

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027;

2. 山东银光化工集团有限公司, 山东 费县 273400)

摘要:就强氧化剂 KClO_4 、 NH_4ClO_4 对一次起爆型燃料空气炸药(FAE)的诱导作用进行了实验研究, 结果表明, 一次起爆型 FAE 的云雾覆盖区内的氧含量充足, 但对于原复合燃料, 空气中氧气的利用率不高, 致使燃料的潜能不能充分激发。在 FAE 总质量不变的情况下, 用 15% 的 NH_4ClO_4 作强氧化剂和爆轰反应的诱导剂取代部分复合燃料, 可有效提高一次起爆型 FAE 的爆轰威力和爆轰稳定性。

关键词:爆炸力学; 燃料空气炸药(FAE); 离散与爆轰; 延迟期; 氧化剂; 诱导剂

中图分类号: TJ55; O381

文献标识码: A

1 引言

燃料空气炸药(FAE)目前已经发展到第三代。与第一、第二代武器相比, 第三代武器的根本变革是将二次爆炸系统改为一次爆炸系统, 即在燃料被迅速抛撒形成云雾的同时诱发云雾的爆轰。二次起爆型 FAE 的燃料抛撒和二次引爆之间的延迟期为 100 ms 量级至 10 s 量级^[1-3], 例如 CBU-55B 延迟期为 125 ms, BLU-76E 延迟期为 4 s。因此其有充裕的时间让燃料和空气混合均匀, 能够比较充分地利用空气中的氧气来实现爆轰, 而一次起爆型 FAE 的延迟期为毫秒量级^[4-6], 对实现稳定爆轰、有效利用空气中的氧气不利。

筛选 FAE 的燃料组分时既要追求燃料的储能, 也要重视燃料总储能的有效利用。例如 TNT 的爆热为 $4.522 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 燃烧热为 $15.062 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; 而 RDX 的爆热和燃烧热分别是 $5.359 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $9.500 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这说明 TNT 的储能(燃烧热)比 RDX 大, 但被爆轰激发的能量(爆热)反而小。FAE 的药量可以理解为燃料和燃料云雾区域所含氧气的质量之和, 其关键是部分或全部利用空气中的氧, 如果配方设计得当, 等质量的 FAE 战斗部的能量利用率远远大于普通凝聚相炸药。因此, 无论从爆轰的稳定性还是从储能充分激发上看, 有效利用空气中的氧气对提高燃料空气炸药的威力具有十分重要的意义。

G Von Elbe^[7]等人通过实验得出, 某液相一次起爆型 FAE 在空气中不能实现爆轰, 而在氧气中能实现

爆轰, 在燃料中添加适量的诱导剂 ClF_3 (CTF) 或 BrF_3 (BTF) 后就能在空气中实现爆轰。 ClF_3 和 BrF_3 均为液态, 化学性质比较活泼, 是一种强氧化剂, 而固态的高氯酸盐和硝酸盐在高温高压下化学性质也很活泼, 也具有强氧化性, 因此本实验借鉴 G Von Elbe 的思路, 选择固态强氧化剂高氯酸盐和硝酸盐与复合燃料混合, 配成新的燃料, 进行一次起爆型实验, 并用高速摄影仪记录了 FAE 爆轰过程的分幅图片, 用压力传感器测试了不同距离处的超压, 对一次起爆型 FAE 在爆轰过程中, 空气中氧气的利用效率进行了计算分析。

2 实验

2.1 FAE 的配方组成

2.1.1 燃料的选择

多元固相一次起爆型 FAE 的配方主要由三种成分构成: 高能固态炸药(X), 比较敏感, 能够被中心装药直接冲击起爆, 用以调节燃料空气炸药的敏感度、起爆延迟时间等; 高能金属粉(Y), 化学性质比较活泼, 被氧化时放出大量的热, 增强爆轰威力; 起粘结剂作用的固态有机化合物(Z), 同时也是碳氢燃料。基于三种组分的十字交叉实验, 得出此系列一次起爆型 FAE 中组分 X 的最佳含量为 40%^[4]; 在组分 X 保持 40% 不变的情况下, 燃料离散与爆轰自协调性最佳的质量配比为 $X : Y : Z = 40 : 10 : 50$ 。本实验即按此质量配比配制原复合燃料。

2.1.2 氧化剂的选择

固态高效氧化剂有 NH_4ClO_4 、 KClO_4 、 NH_4NO_3 、 KNO_3 等高氯酸盐和硝酸盐, 还有高氯酸硝酰、硝仿肼等, 但后者价格昂贵或者有毒, 所以未采用。由于一次

收稿日期: 2005-06-06; 修回日期: 2005-08-30

作者简介: 崔晓荣(1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代爆炸技术。沈兆武(1953-), 男, 教授级高工, 博士生导师。

起爆型 FAE 中往往需添加诱导剂^[6,7],如三氟化氯 (ClF₃) 和三氟化溴 (BrF₃),同时作为强氧化剂,因此本实验中选择了氧化性强的 高氯酸盐 NH₄ClO₄、KClO₄,它们易受热分解产生大量活性氧,可起催化诱导作用。通过小药量实验证明,复合燃料中加入等质量高氯酸盐的爆轰效果明显优于硝酸盐。

2.1.3 燃料的配制

在 FAE 总质量不变的情况下,将上述复合燃料与强氧化剂 NH₄ClO₄、KClO₄ 混合,配制成新燃料。实验研究时的中心装药不变,选择高热量、高能量的固态粉状中心装药,其配比为 70% 钝化 RDX 和 30% 的细铝粉。

2.2 FAE 弹体参数及实验装置

FAE 弹体呈圆柱形 (见图 1),尺寸 $\Phi 62 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,燃料总质量为 0.25 kg,密度为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,中心装药为燃料总质量的 10%。采用 8[#] 电雷管引爆中心装药,再由被引爆的中心装药抛撒主装药,形成与空气混合的燃料云雾,实现分散爆轰。

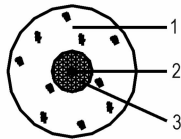


图 1 FAE 弹体结构

1—燃料, 2—雷管, 3—中心装药

Fig.1 Structure of FAE

1—fuel of FAE, 2—detonator, 3—central charge

压力传感器布置在圆柱形爆炸容器内 (见图 2),用以测试爆炸场不同距离处的超压。弹体竖立悬吊,中心在爆炸容器中心轴上。传感器支座固定在爆炸容器侧壁,垂直于侧壁,指向爆炸容器中心轴。压力传感器安装在传感器支座的端部。弹体中心、传感器及其支座均在同一水平面上。传感器支座长 0.3 m,设计较小巧,端部呈弧形,以尽量减小反射波的影响。

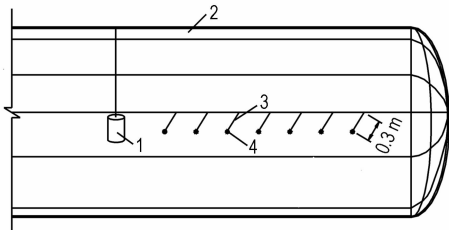


图 2 传感器布置图

1—FAE, 2—爆炸容器, 3—传感器支座, 4—压力传感器

Fig.2 Arrangement of pressure sensor

1—FAE, 2—explosive container,

3—bracket of pressure sensor, 4—pressure sensor

2.3 实验方法

2.3.1 高速摄影

采用日本生产的 PHOTRON FASTCAM-Super 10KC 高速摄影仪记录 FAE 点火到爆炸的全过程,实验时的拍摄频率为 1000 fps,镜头对准圆柱形弹体的中心轴。

2.3.2 超压测试

超压测试系统如图 3 所示,其中传感器型号为 VY-YD-203,压力范围为 0 ~ 30 MPa,压力-电荷灵敏度为 12.00 PC/105 Pa; 数字记录仪型号为 8862 型 MEMORY HICOREDER; 采用扬州科动电子研究所生产的 8 通道 KD5003 型电荷放大器,量程为 30 mV/unit。

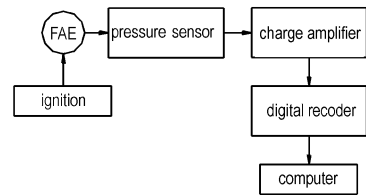


图 3 超压测试系统示意图

Fig.3 Schematic chart of measurement system

3 结果分析

选用两种不同氧化剂取代部分复合燃料,进行了不同配方 FAE 一次起爆实验,用高速摄影仪记录了 FAE 中心装药起爆、燃料抛撒、爆炸的全过程,其分幅图片如图 4 所示。用超压测试系统测试了各种 FAE 弹和等质量 TNT 标准弹的爆炸场参数,测试结果见 5、图 6。

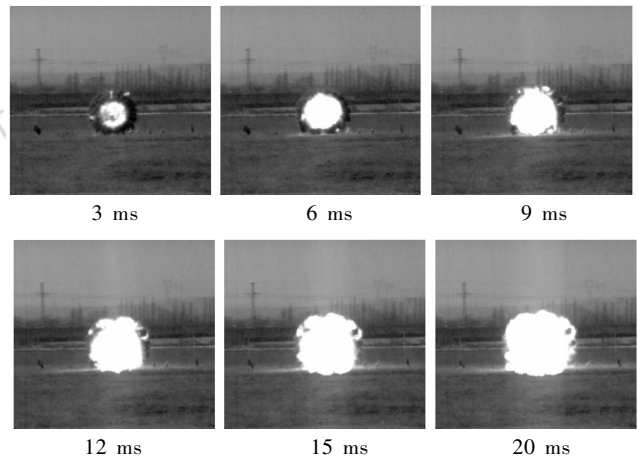


图 4 一次起爆型 FAE 的爆轰过程

Fig.4 Detonation of single-event FAE

3.1 空气中氧气的有效利用分析

两次起爆型 FAE 为先离散后爆轰,两者之间有较长的延迟期。在燃料云雾的爆轰反应阶段,云雾覆盖体积几乎不变,可用云雾覆盖区域内的含氧量来计算两次

起爆型 FAE 爆轰反应的氧平衡。而一次起爆型 FAE 的燃料的离散和爆轰过程是自协调的,延迟期很短,燃料云雾覆盖区域的体积在爆轰反应中是迅速变化的。

图 4 为一次起爆型 FAE 的爆轰过程,其燃料的质量配比为 $X : Y : Z = 40 : 10 : 50$ 。由图 4 可见,在起爆的初始阶段,一次起爆型 FAE 的燃料的离散与爆轰呈自协调性,也就是燃料云雾区和火焰阵面同步向外扩展。图 4 中,火焰阵面前的“黑烟”即为高速抛散的固体燃料颗粒。燃料在中心装药爆轰产物的驱动下,高速向外运动,在向外扩展的过程中,受空气阻力和剧烈的对流作用,燃料的大颗粒破碎、剥离成小颗粒,形成燃料云雾区。因为在空气阻力作用下的惯性体,质量越小,其速度衰减越快,所以越靠近火焰阵面的燃料颗粒的粒径越小,这使一次起爆型 FAE 的爆轰得以稳定传播,直到燃料消耗尽。由此可见凡是燃料离散与爆轰的自协调性好的 FAE,爆炸场参数也较理想。燃料颗粒边运动边破碎、剥离,粒径越来越小,扩展速度剧烈减小,最终被火焰阵面赶上,达到最大反应区,此时,火球向外扩展接近最大火球体积。所以,对于离散与爆轰自协调的一次起爆型 FAE 系统来说,可将燃料完全进入化学反应区时的火球体积近似为燃料云雾覆盖区。

对高速摄影图片进行数据处理,比较分析不同配方的 FAE 燃料完全氧化所需的氧和云雾覆盖区域内含的氧,结果见表 1。

表 1 一次起爆型 FAE 的氧的分析

Table 1 Oxygen analysis of single-event FAE with different formula

different FAE formula	volume of fuel cloud zone/ m^3	oxygen in fuel cloud zone/kg	oxygen needed in chemical reaction/kg
$X : Y : Z = 40 : 30 : 30$	28.27	8.54	0.603
$X : Y : Z = 40 : 20 : 40$	40.46	12.23	0.701
$X : Y : Z = 40 : 10 : 50$	48.97	14.80	0.952

由表 1 可以看出,3 种一次起爆型 FAE 的燃料云雾覆盖区域(火球体积)内含氧均远远大于燃料完全反应所需氧。为了提高氧含量定量分析的精确度,可将火球体积扣除中心装药的爆轰产物引起的“燃料中心空洞”体积。此中心装药的爆温为 4860 K,爆容为 $1050 L \cdot kg^{-1}$ 。爆容为常温常压下爆轰气体产物的体积,根据理想气体状态方程和中心装药量,换算到 4860 K(爆温)、一个标准大气压下,其体积为 435.4 L,约 $0.44 m^3$,与表 1 中各 FAE 弹的火球体积相比,小两个数量级,可以忽略不计。事实上,“燃料中心空洞”

的温度低于爆温,压强高于一个标准大气压,故其体积远远小于 $0.44 m^3$ 。所以,即使扣除中心装药爆轰产物引起的“燃料中心空洞”的影响,云雾覆盖区内的氧仍远远大于燃料完全反应所需的氧。这说明一次起爆型 FAE 的云雾覆盖区内的氧气是充足的,足以完全氧化复合燃料,但其利用率不高,详见 3.2 节。

3.2 爆轰超压分析

本实验所用的几种燃料配方总质量均为 250 g,不同点是在原复合燃料中分别添加了两种不同的强氧化剂 NH_4ClO_4 (AP) 和 $KClO_4$ (AA),用其取代配方中的部分燃料,爆炸场参数见图 5。图中 Fuel 指原复合燃料(不含强氧化剂),实验中选择爆轰效果最佳的配比,即表 1 中的第 3 种($X : Y : Z = 40 : 10 : 50$);“Fuel : AP”和“Fuel : AA”表示原复合燃料与两种不同氧化剂配成的新燃料。

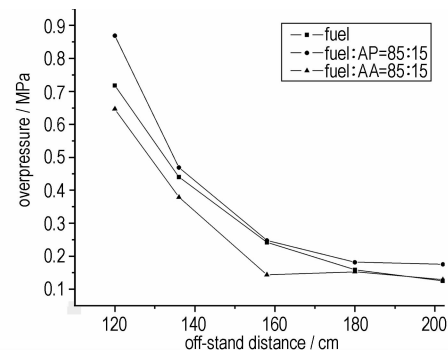


图 5 两种氧化剂的爆炸效果比较

Fig. 5 Comparison of FAE containing different oxidizer

由图 5 可以看出:用 $KClO_4$ 取代部分燃料后,并没有提高原配方的爆轰效果,而用 NH_4ClO_4 取代部分燃料后,却提高了爆轰效果。这说明,尽管两种强氧化剂都为燃料云雾的爆轰提供了活性氧,在爆轰反应中起诱导剂的作用,但由于钾离子的原子量较大,因此后者效果更好。另外,高氯酸钾仅提供活性氧,本身并不产生气体,故添加适量的高氯酸钾虽使原燃料配方的有效反应率略有提高,但不足以弥补由于燃料质量减少带来的负面影响,因此总释放的能量减小,爆轰威力略减。高氯酸铵的物质的量相对多些,不仅能提供活性氧充当诱导剂,提高燃料的有效反应率,而且自身也能反应生成大量气体,故适量添加高氯酸铵能够增强原 FAE 的爆轰威力。由此确定高氯酸铵为强氧化剂的最优选择。

在此基础上,课题组在保持燃料总质量不变的情况下,还对原复合燃料与高氯酸铵的质量配比进行了对比实验,所得爆炸超压数据如图 6 所示。

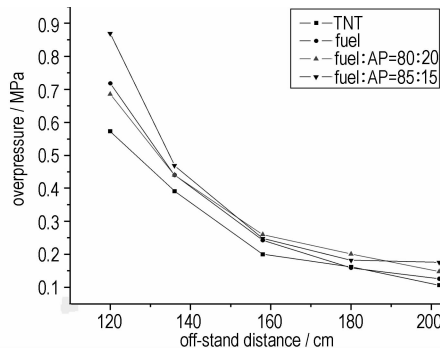


图 6 含 NH_4ClO_4 的新 FAE 的爆炸场参数的对比

Fig. 6 Comparison of blast field parameter of new FAE containing NH_4ClO_4

由图 6 可以看出, 适量添加高氯酸铵的新 FAE 配方, 不但可以提高爆炸场超压, 而且可以改善爆轰参数的稳定性。高氯酸铵的较佳含量宜定为 15% ~ 20%。

燃料空气炸药与普通凝聚相炸药(例如图 6 中的等质量的 TNT 标准弹)相比, 优越性体现在其远场超压高, 作用时间长, 衰减慢。对于所关心的远场, 原混合燃料、含 20% 高氯酸铵的新燃料、含 15% 高氯酸铵的新燃料制成的 FAE 的爆炸场超压与各自的平均超压值相比, 依次在 $\pm 12.5\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 8\%$ 内波动, 说明燃料中含 15% 高氯酸铵的 FAE 的轰效果最佳。

4 结 论

(1) 对于燃料离散与爆轰自协调的一次起爆型 FAE 系统来说, 燃料云雾覆盖区内的氧气足以完全氧化复合燃料, 但空气中氧气的利用效率不高, 以致混合燃料的能量不能被充分激发。

(2) 在保证装药质量不变的情况下, 用高氯酸铵

代替部分燃料, 能够提高燃料的有效反应率, 足以弥补燃料质量的减少而引起的总储能减少的负面影响, 进而提高 FAE 的爆轰威力。

(3) 对于原复合燃料配方, 添加高氯酸铵的较佳范围是 15% ~ 20%, 其爆炸场威力和爆轰稳定性均有所提高, 而高氯酸铵的最佳含量宜定为 15%。

参考文献:

- [1] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [2] 郭学永, 惠君明. 装置参数对 FAE 云雾状态的影响 [J]. 含能材料, 2002, 10(4): 161 - 164.
GUO XUE-yong, HUI Jun-ming. Influence of equipment parameters on FAE cloud status [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002, 10(4): 161 - 164.
- [3] 北京工业学院八系编写组. 爆炸及其作用(上册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [4] 王德润, 周昕清, 周凯元, 等. 多元混合燃料一次引爆实验研究 [J]. 力学与实践, 2004, 26(6): 58 - 61.
WANG De-run, ZHOU Ting-qing, ZHOU Kai-yuan, et al. Experimental study on single ignition of multi-component fuel mixture [J]. *Lixue Yu Shijian*, 2004, 26(6): 58 - 61.
- [5] 赵玉坤, 白春华, 孙晓明, 等. 2 kg 一次起爆 FAE 装置爆轰过程研究 [J]. 火炸药学报, 1998, 21(3): 36 - 39.
ZHAO Yu-kun, BAI Chun-hua, SUN XIAO-ming, et al. Detonation process of 2 kg test bomb with single-event ignition structure [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1998, 21(3): 36 - 39.
- [6] 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-hui, et al. Dispersion characteristics of single-event FAE [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2000, 23(1): 47 - 49.
- [7] G Von Elbe, Mchale E T. Chemical initiation of FAE clouds [R]. AD-A082610. 1979.

Experimental Study on Revulsive Effect of Oxidizer on Single-event FAE

CUI Xiao-rong¹, ZHOU Ting-qing¹, YU Yong-hua², SHEN Zhao-wu¹

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Shandong Yinguang Chemical Industry Group Co. Ltd., Feixian 273400, China)

Abstract: The fuel dispersion and initiation of single-event FAE (SEFAE) is self-harmonious. The very short delay-time between fuel dispersion and initiation is adverse to make good use of the oxygen in atmosphere for detonation of SEFAE. Therefore, experimental study on single-event FAE were made with adding solid oxidizer to the fuel (KClO_4 , NH_4ClO_4) to improve the power of SEFAE. The results show that (1) the oxygen in fuel clouds zone is abundant to oxidize the fuel of SEFAE completely, whereas, for the original solid multi-component fuel mixture, the oxygen in atmosphere is not utilized effectively, and the energy of SEFAE do not release thoroughly; (2) adding NH_4ClO_4 to the original solid multi-component fuel mixture improves the power and stability of SEFAE, and the optimum content of NH_4ClO_4 in this kind single-event FAE is 15%.

Key words: explosion mechanics; FAE; dispersion and initiation; delay-time; oxidizer; revulsant