

文章编号: 1001-1455(2004)05-0391-05

# 固、液相 FAE 一次引爆实验研究<sup>\*</sup>

王德润<sup>1,2</sup>, 沈兆武<sup>2</sup>, 周凯元<sup>2</sup>, 周昕清<sup>2</sup>, 叶剑飞<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001;

2. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 基于离散爆轰思想, 进行了小药量无约束空间固、液相燃料空气炸药 (fuel air explosive, 简称 FAE) 弹体的野外一次引爆实验。实验结果表明, 固、液相 FAE 弹体的爆炸效果均明显优于等质量的 TNT 装药; 固相 FAE 弹体一次引爆后的云雾分散规律和爆炸压力场分布不同于液相 FAE 弹体。在本实验装置条件下, 固相 FAE 弹体的远场超压增长峰值虽未超过等质量的液相 FAE 弹体, 但其火焰持续时间却比等质量液相 FAE 弹体的长。若仅考察弹体云雾最大半径, 固相 FAE 弹体并不比等质量的液相 FAE 弹体优越太多, 但固相 FAE 弹体的爆炸作用体积增大较多。

关键词: 爆炸力学; 一次引爆; 离散爆轰; 燃料空气炸药

中图分类号: O381 国标学科代码: 130°3510 文献标志码: A

## 1 引言

FAE 武器是一种新概念武器, 有两个独特性能<sup>[1]</sup>: (1) 它自身不含氧或含有少量氧, 因而质量效率高; (2) 爆炸在较大面积上进行, 对目标的直接爆轰作用范围大。从目前的研究趋势来看, 新型高能燃料的研制、FAE 的一次引爆技术等将是今后 FAE 发展的重要方向; 燃料的爆炸威力、冲击波作用范围以及 FAE 的安定性等将是研究的重要领域。提高威力性能是 FAE 设计的主要目标<sup>[2]</sup>。提高 FAE 爆炸威力的途径主要有两方面: FAE 的燃料组成和云爆技术。为了提高引爆的可靠性, FAE 的发展已由二次引爆系统向一次引爆系统转变。一次引爆技术是当前 FAE 武器研究的热点<sup>[3~5]</sup>。一次引爆型 FAE 是指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。

最初, FAE 所用的燃料是环氧乙烷 (EO) 和环氧丙烷 (PO) 及以其为基的复合物, 虽然也取得了很多实用性进展, 但由于环氧烷烃本身含氧量较高 (PO 含有 27.6% 的氧), 因而其 TNT 当量不是很高<sup>[1]</sup>。目前, 高威力 FAE 的装药燃料大多采用液固混合燃料, 其中固体组分主要为金属粉, 液态燃料大多采用碳氢化合物, 有时还加入适量的固 (液) 态高能炸药。FAE 战斗部使用有一定的温度范围, 液固混合燃料的体积会随温度改变发生相应变化<sup>[6]</sup>, 故需要对战斗部结构进行仔细设计。混合燃料中的固态金属粉经一定时期储存后, 其活性将降低并可能会发生沉淀分层; 液态燃料蒸汽压力较高, 平时存储运输易泄漏, 有可能发生安全事故。因此, 寻找其它能量高、引爆可靠、安定性好并易于处理的一次引爆型 FAE 燃料就尤显重要。

本文中基于离散爆轰思想, 采用三组元固态混合燃料制成固相 FAE。为对比分析, 利用自行配制的一种新型高能液基复合燃料<sup>[7]</sup>制成液相 FAE。通过引爆系统的协调设计, 在离散和爆轰的自协调控制下, 完成小药量无约束空间固相和液相 FAE 的野外一次引爆实验。

## 2 实验装置与条件

### 2.1 FAE 装药燃料选择

燃料是爆炸系统的核心, 决定着系统的固有威力。一次引爆型 FAE 燃料的选择必须同时考虑能量

\* 收稿日期: 2003-11-09; 修回日期: 2004-02-26

作者简介: 王德润 (1973—), 男, 博士研究生。

性能、引爆性能、雾化性能、使用性能(包括低温性、安定性、相容性、储存稳定性、毒性)、工艺性、经济性等<sup>[8]</sup>。本文在现有云爆武器燃料组成的基础上改进、合成新型的高能燃料,选择三种主要固态组分即高能固态燃料 WX、高能金属粉 TY 和固态有机化合物 SZ 制备了固相 FAE;同时还利用新型高能液基复合燃料制备了液相 FAE 以进行对比实验研究。实验时对固相和液相 FAE 中心装药的配方进行设计,选择含有敏化剂的固态粉状中心装药<sup>[7]</sup>。

## 2.2 实验装置

一次引爆实验装置如图 1 所示。所用仪器型号及参数:传感器型号为 CY-YD-203,压力范围为 0~30MPa,压力-电荷灵敏度为 120PC/MPa;数字记录仪为 8862 型 MEMORY HICOREDER;采用扬州科动电子技术研究所生产的 16 通道 KD5003 型电荷放大器,量程为 30mV/unit;高速摄影机为日本生产的 PHOTRON FASTCAM-Super 10KC。

固相 FAE 弹体形状为圆柱形,尺寸为  $\varnothing 59\text{mm} \times 70\text{mm}$ ,不加外壳,中心 PVC 管直径为 20mm,中心管中段为中心装药、两端为阻火泡沫;固态混合燃料总质量为 250g,密度为  $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ ,比药量为 10%。液相 FAE 弹体形状也为圆柱形,尺寸为  $\varnothing 63\text{mm} \times 100\text{mm}$ ,上下端盖为 5mm 厚塑料板,侧壁为聚酯塑料薄膜外壳,中心 PVC 管直径为 25mm,中心管中段为中心装药、两端为阻火泡沫;液态燃料总质量为 250g,密度为  $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ ,比药量为 14%。实验时弹体均静止悬挂在距离地面上方 1.3m 处,利用 8<sup>#</sup> 电雷管先引爆中心装药,然后由中心装药引爆抛撒主装药并进一步使离散抛撒形成的云雾实现爆炸。

## 3 实验结果及分析

基于室内爆炸容器里进行的几百次小药量的摸索实验结果,在野外实验时固相 FAE 中的组元 TY 含量保持 30% 不变,调整组元 WX 与 SZ 的比例,做了三组配比实验:WX/TY/SZ=50/30/20、WX/TY/SZ=40/30/30、WX/TY/SZ=30/30/40。为了比较,进行了液相 FAE 和纯高能炸药实验:100% 新型高能液基复合燃料;100% TNT,圆柱形散装装药,总质量为 250g,密度为  $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 3.1 不同弹体云雾分散规律

固相 FAE 弹体(WX/TY/SZ=50/30/20)和液相 FAE 弹体一次引爆过程的高速摄影典型分幅照片分别如图 2、图 3 所示,250g 纯 TNT 炸药爆炸过程的高速摄影典型分幅照片如图 4 所示,固相 FAE 弹体(各组配比实验)和液相 FAE 弹体的云雾半径随时间变化曲线如图 5 所示。

从图 2~图 4 的高速摄影记录可以看出,固相 FAE 弹体的爆炸区域趋近于球形,液相 FAE 弹体的爆炸区域为“+”字形的扁平体,纯 TNT 集中药包的爆炸区域可近似看作球形。在等质量(250g)条件下,固相 FAE 弹体的火焰持续时间(指从引爆到火焰消失的时间)明显增加,平均持续时间为 200~300ms;液相 FAE 弹体的火焰平均持续时间为 160~260ms;等质量的 TNT 装药火焰平均持续时间仅为 70~90ms。在 208ms 时刻,固相 FAE 弹体的云雾区内仍有火焰面存在,且火焰面呈蘑菇云形状向上逐渐漂移;液相 FAE 弹体的云雾区内已见不到火焰面,整个云雾区近似呈水平圆柱状分布。对于纯 TNT 弹体,在 112ms 时刻的云雾区内的火焰面已不存在,且云雾也即将散尽。

从图 5 可以看出,在 4ms 时刻,WX/TY/SZ=30/30/40 的固相 FAE 弹体云雾半径、液相 FAE 弹体云雾的水平和垂直方向半径以及 TNT 装药的云雾半径大小相当;而 WX/TY/SZ=50/30/20 和 WX/TY/SZ=40/30/30 的固相 FAE 弹体云雾半径值高出较多,在初始 4ms 时间内其相应的云雾分散速度也较大。对于固相 FAE 弹体,随着固态混合燃料中组元 WX 含量的逐渐减少(组元 SZ 含量相应增加),

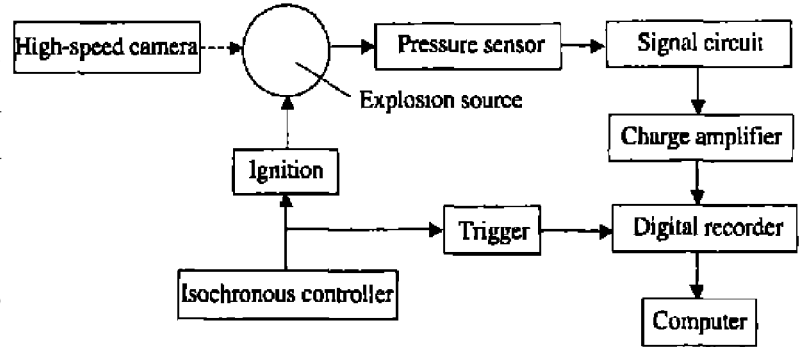


图 1 一次引爆测试系统示意图

Fig.1 Schematic of measurement system for single ignition

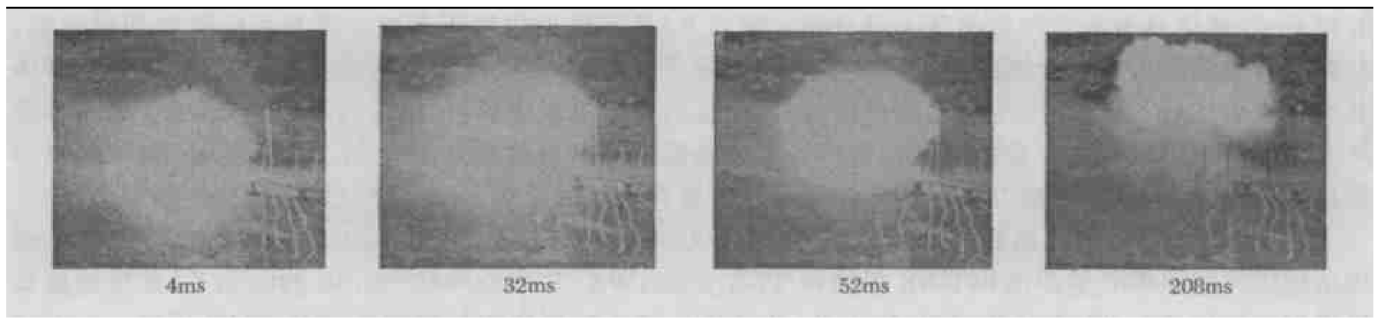


图 2 固相 FAE 弹体(WX/TY/SZ=50/30/20)一次引爆高速摄影分幅照片  
Fig.2 Pictures of single ignition of solid FAE bomb taken by high-speed camera

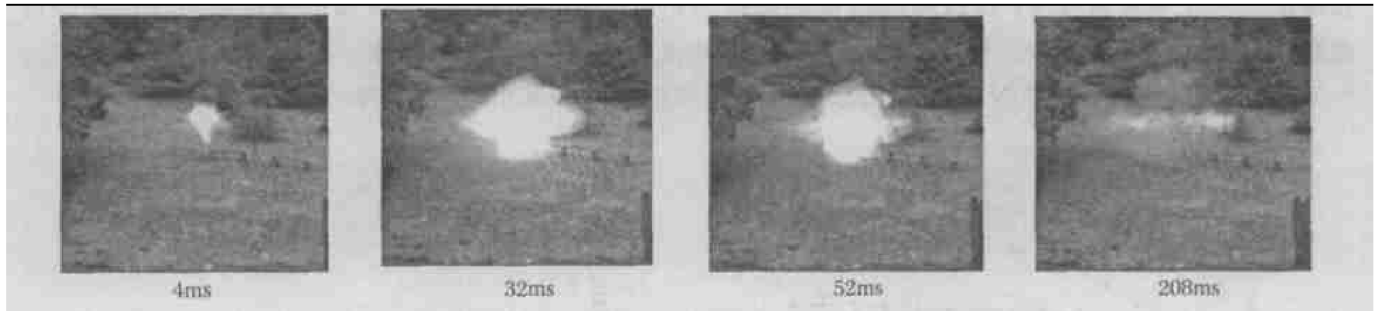


图 3 液相 FAE 弹体一次引爆高速摄影分幅照片  
Fig.3 Pictures of single ignition of liquid FAE bomb taken by high-speed camera

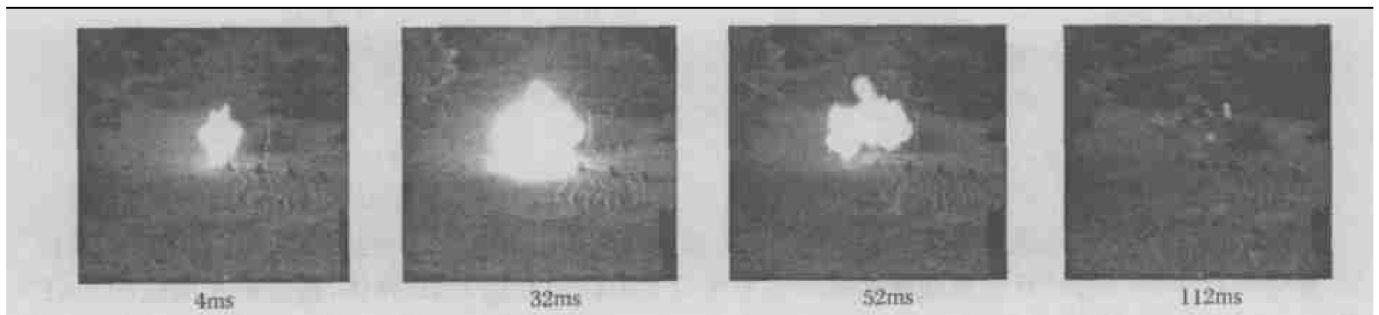


图 4 250g 纯 TNT 炸药爆炸高速摄影分幅照片  
Fig.4 Pictures of 250g TNT explosive taken by high-speed camera

云雾最大半径先由小变大, 之后又随之减小。各种配比的固相 FAE 弹体云雾最大半径均比等质量 TNT 装药的大。WX/TY/SZ=40/30/30 的固相 FAE 弹体云雾最大半径值最大, 达 3.1m, 大于液相 FAE 弹体云雾的水平方向和垂直方向最大半径值。对于液相 FAE 弹体, 云雾的水平方向最大半径比垂直方向的大, 也比 WX/TY/SZ=50/30/20 和 WX/TY/SZ=30/30/40 的固相 FAE 弹体及 TNT 装药的大; 而液相 FAE 弹体云雾的垂直方向最大半径与 TNT 装药相当。固相 FAE 弹体(各组配比实验)和液相 FAE 弹体的云雾半径达到最大后, 都会维持在最大半径附近一段时间, 与等质量的 TNT 相比, 维持时间要长得多。

分析表明, 在等质量条件下, 固、液相 FAE 弹体的云雾分散效果均优于 TNT 装药, 火焰持续时间也比 TNT 装药的长。适宜配比的固相 FAE 弹体云雾最大半径会比液相 FAE 弹体的大, 初始云雾分散速度较大, 火焰持续时间也比液相 FAE 弹体的长。若仅考察弹体云雾最大半径, 固相 FAE 弹体并不比液相 FAE 弹体优越太多, 但固相 FAE 弹体的爆炸作用体积(指云雾覆盖区域的体积)却增大较多。

### 3.2 爆炸压力场分布规律

固相 FAE 弹体(各组配比实验)和液相 FAE 弹体的爆炸压力场分布如图 6 所示, 可以看出, TNT 集中药包的爆炸场超压呈单调衰减趋势; 而固相 FAE 弹体的爆炸场超压随距离的增加总体呈衰减趋势, 但在衰减过程中又出现增强阶段, 爆炸场超压存在一个“衰减—增长—再衰减”的过程。不同配比的

固相 FAE 弹体具有非常相似的压力场分布。固相 FAE 弹体近场超压衰减可能是反应时间相对较短、没有充足的氧使固态混合燃料中的高能金属粉充分反应所致；远场超压出现增长可能是固相 FAE 弹体发生分布爆炸后，由后续反应引起局部爆轰，使此处的超压出现增长；在接近云雾边缘处，由于燃料浓度降低使远场超压再次发生衰减。这也可以从高速摄影记录的分幅照片中看到。液相 FAE 弹体的爆炸场超压呈现出“增长—衰减”的规律，可能是由液基复合燃料的分散不均匀性以及后续反应造成的。

在距爆心 0.5m 的近场处，WX/TY/SZ=50/30/20 和 WX/TY/SZ=40/30/30 的固相 FAE 弹体爆炸场超压均高于等质量的液相 FAE 弹体和 TNT 炸药；WX/TY/SZ=30/30/40 的固相 FAE 弹体爆炸场超压与等质量的 TNT 炸药相当；液相 FAE 弹体的爆炸场超压则低于等质量的 TNT 炸药。在距爆心 1.0~3.5m 的远场范围内，固、液相 FAE 弹体的爆炸场超压均出现不同程度的增长趋势，且超压增长峰值均高于等质量 TNT 炸药相应位置的爆炸场超压。其中液相 FAE 弹体的爆炸场超压增长峰值最高，各种配比的固相 FAE 弹体爆炸场超压增长峰值均低于液相 FAE 弹体。在所测区域(距爆心 0.5~3.5m)内，与等质量的 TNT 炸药相比，随着时间的增加，固、液相 FAE 弹体的威力优势会更明显。

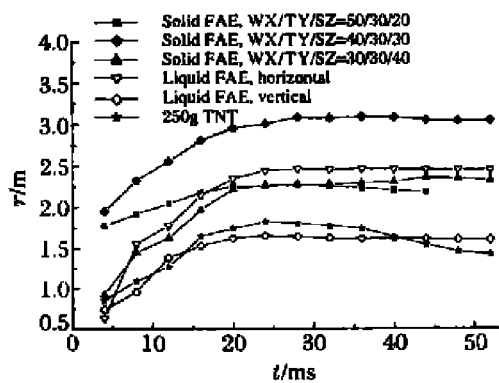


图 5 云雾半径随时间变化曲线

Fig. 5 Curve of cloud radius and time

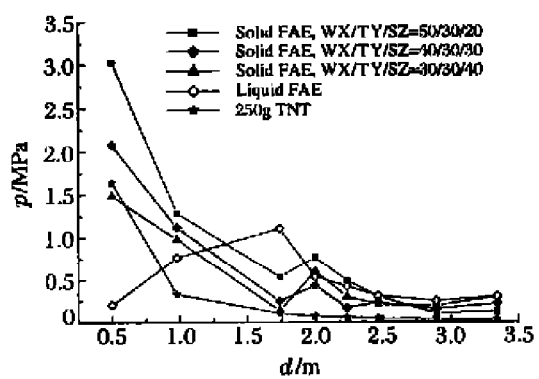


图 6 爆炸压力场分布

Fig. 6 Distribution of overpressure field

实验结果表明，在等质量条件下，固、液相 FAE 弹体的一次引爆效果均明显优于 TNT 装药。固相 FAE 弹体一次引爆后的云雾分散规律和爆炸压力场分布不同于液相 FAE 弹体，适宜配比的固相 FAE 弹体一次引爆后的云雾最大半径会大于等质量的液相 FAE 弹体；固相 FAE 弹体的远场超压增长峰值虽未能超过等质量的液相 FAE 弹体，但火焰持续时间比等质量液相 FAE 弹体的长。若考察弹体的爆炸作用体积，则固相 FAE 弹体的优势较明显。

## 4 结 论

(1)自行设计制备的固、液相 FAE 弹体和含有敏化剂的中心装药的制备工艺简便。野外一次引爆实验结果表明，固、液相 FAE 弹体的爆炸效果和机理不同于高能炸药的点爆炸，与等质量的 TNT 装药相比，固、液相 FAE 弹体的优势较明显。(2)固相 FAE 弹体的爆炸场超压存在一个“衰减—增长—再衰减”的过程，不同配比的固相 FAE 弹体具有非常相似的压力场分布；液相 FAE 弹体的爆炸场超压呈现出“增长—衰减”的规律。固相 FAE 弹体的远场超压增长峰值低于等质量的液相 FAE 弹体，但火焰持续时间比等质量液相 FAE 弹体的要长。(3)在本实验装置条件下，适宜配比的固相 FAE 弹体一次引爆后的云雾最大半径大于等质量的液相 FAE 弹体。若仅考察弹体云雾最大半径，固相 FAE 弹体并不比液相 FAE 弹体优越太多，但爆炸作用体积增大较多。(4)今后拟进行温度场的测量，以便能对不同弹体的爆炸场能量作出较精确的计算。

感谢安徽淮南矿业集团化工厂和安徽理工大学化学工程系弹药工程实验室对实验的大力协助。

## 参考文献:

[1] 杨立中,张春云,张正才,等.高能 FAE 燃料的选择[J].南京理工大学学报,1998,22(1):15-18.

YANG Li-zhong, ZHANG Chun-yun, ZHANG Zhen-cai, et al. Selection of fuels of high power FAE[J]. Journal of

- Nanjing University of Science and Technology, 1998, 22(1): 15—18.
- [2] 贵大勇, 刘吉平, 冯顺山. 几种典型燃料空气炸药威力性能研究[J]. 含能材料, 2002, 10(3): 121—124.  
GUI Da-yong, LIU Ji-ping, FENG Shun-shan. Research of power performance of several typical fuel-air explosives[J]. Energetic Materials, 2002, 10(3): 121—124.
- [3] Smirnov N N, Nikitin V F. Ignition and combustion of turbulized dust-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2000, 123: 46.
- [4] 蒲加顺, 白春华, 梁慧敏, 等. 多元混合燃料分散爆轰研究[J]. 火炸药学报, 1998, 21(1): 1—5.  
PU Jia-shun, BAI Chun-hua, LIANG Hui-min, et al. Dispersed detonation of multinary fuel mixture[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1998, 21(1): 1—5.
- [5] 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.
- [6] 梁慧敏, 张奇, 白春华. 混合燃料装填状态及结构特征分析[J]. 火炸药学报, 2002, 25(4): 5—7.  
LIANG Hui-min, ZHANG Qi, BAI Chun-hua. Comparative study of the loading state and structure for the mixed fuel [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(4): 5—7.
- [7] 王德润, 沈兆武, 周昕清. 新型高能液基复合燃料离散爆炸的试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4 增刊): 58—61.  
WANG De-run, SHEN Zhao-wu, ZHOU Ting-qing. Experimental study on dispersion and explosion of new high-energy liquid composite fuel[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(4 suppl): 58—61.
- [8] 贵大勇, 冯顺山, 刘吉平. 高威力 FAE 液态燃料的优化选择[J]. 火炸药学报, 2002, 25(3): 14—16; 25.  
GUI Da-yong, FENG Shun-shan, LIU Ji-ping. The optimization selection of liquid fuels for high power FAE[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(3): 14—16; 25.

## Experimental study on single ignition of solid and liquid FAE

WANG De-run<sup>1,2\*</sup>, SHEN Zhao-wu<sup>2</sup>, ZHOU Kai-yuan<sup>2</sup>,  
ZHOU Ting-qing<sup>2</sup>, YE Jian-fei<sup>2</sup>

(1. *Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

*2. Department of Mechanics and Mechanical Engineering,*

*University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)*

**Abstract:** Based on dispersed detonation idea, field single ignition experiments of unconfined volume dispersion and small dosage solid and liquid FAE bombs were done. Experimental results show that explosion effects of both solid and liquid FAE bombs are better than trinitrotoluene in the same mass. The regular rules of dispersion and distribution of the overpressure field of the solid and liquid FAE bomb are different. Under the same experimental condition, the increasing overpressure peak value within far field of solid FAE bomb is lower than liquid FAE bomb, but the continuous time of flame is longer than liquid FAE bomb. If consider the maximum radius of the dispersed cloud only, the solid FAE bomb isn't superior to liquid FAE bomb in the same mass, but the increasing action volume of the solid FAE bomb is bigger.

**Key words:** mechanics of explosion; single ignition; dispersed detonation; fuel air explosive (FAE)

\* Corresponding author: WANG De-run

E-mail address: wangderun@ustc.edu

Telephone: 0554-6631728