

文章编号: 1006-9941(2007)05-0447-04

## 中心装药对 FAE 燃料成雾特性影响的试验分析

张奇, 覃彬, 白春华, 郭彦懿, 刘庆明, 梁慧敏

(北京理工大学科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了优化燃料空气炸药 (FAE) 装置参数, 采用高速运动分析系统, 观测燃料云雾的分散过程, 研究中心装药对燃料云雾体积的影响规律。试验结果表明, 燃料空气炸药装置的中心装药起爆后, 燃料开始分散, 云雾体积逐渐增大。燃料云雾抛散过程和最终体积与中心装药有关, 当中心装药能量较小时, 燃料云雾最大体积随中心装药能量增大而增大, 当中心装药能量达到临界值以后, 燃料云雾的最大体积不再随能量增大而增大。

**关键词:** 爆炸力学; 燃料空气炸药; 云雾爆轰; 燃料分散

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

### 1 引言

燃料分散是燃料空气炸药 (FAE) 的关键技术之一。FAE 装置先由中心装药爆炸作用使燃料分散形成云雾, 然后起爆实现爆轰。FAE 燃料云雾的形成过程一般可以分为两个阶段<sup>[1,2]</sup>: (1) 近区加速阶段; (2) 中远区减速阶段。前者主要依靠高能炸药的爆炸作用, 燃料由原始状态开始加速, 燃料的速度逐渐增大, 而中心装药的爆生气体膨胀速度逐渐减小。当燃料的分散速度大于高能炸药爆生气体的膨胀速度时, 燃料的加速过程结束。在此过程中, 燃料分散速度由小变大, 空气阻力与速度有关, 不易确定。但相对于高能炸药的爆炸抛散作用来说, 空气阻力较小, 忽略不计。燃料达到最大分散速度以后, 主要依靠惯性维持运动, 并受空气阻力作用, 使燃料液滴和颗粒不断减速, 直至运动停止。文献[1]对 FAE 燃料近区加速阶段进行了较深入的分析 and 探讨, 解决了燃料近区分散速度的计算方法。但 FAE 燃料分散中远区减速阶段, 有湍流等复杂的力学过程。采用力学分析和数值模拟有相当大的难度, 因此试验研究是非常必要的。

本研究采用试验方法, 对 FAE 燃料分散特性进行考察和探索。燃料的分散特性与很多因素有关, 如燃料、装置结构、中心高能炸药及装药结构等<sup>[3-5]</sup>, 文献[6]研究了壳体材料, 中心药量和长径比等参数对燃料

空气炸药云雾状态的影响。文献[7]建立了液体燃料爆炸抛撒模型并给出数值计算结果。文献[8]用高速摄影记录了不同情形下的液体燃料爆炸抛撒及云雾成长过程, 结果表明, 低粘度, 低表面张力的液体燃料爆炸抛撒及雾化效果较好。在上述工作的基础上, 本试验研究了中心装药能量对 FAE 燃料分散特性的影响。

### 2 试验

燃料空气装药结构如图 1 所示。壳体由硬质 PVC 塑料构成, 内径 90 mm, 壁厚 2 mm, 壳体内装填燃料 2.2 kg; 实验装置高 287 mm; PVC 塑料中心管内径 18 mm, 壁厚 2 mm, 中心管内装入高能炸药, 用于使燃料分散。

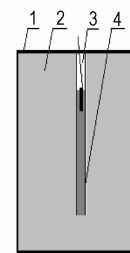


图 1 实验装置剖面图

1—端盖, 2—燃料, 3—雷管, 4—中心装药

Fig. 1 Section of FAE device

1—end cover, 2—mixed fuel, 3—detonator,

4—center pipe and explosive

收稿日期: 2006-11-10; 修回日期: 2007-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (10572023), 国家博士点基金资助课题 (20050007029), 北京理工大学基础研究基金课题 (20070242003)

作者简介: 张奇 (1956 -), 男, 教授, 博导, 研究方向为武器系统与运用工程。e-mail: qzhang@bit.edu.cn

中心高能炸药爆炸以后, 燃料分散的运动过程用高速运动分析系统进行记录。该仪器由美国的 KODARK 公司生产, 工作时用 10 mA 的晶体管-晶体管逻辑电路高电平来触发, 标准模式下拍摄总量为 546 幅, 该仪器最高记录频率为 200000 幅/秒, 频率高

有利于伴读抛散初期加速,但整个记录时间变短,不利于考查燃料分散的后期特征,经试验摸索,拍摄速度为1000幅/秒较为合适。试验现场分布如图2所示。在试验中将拍摄镜头正对云爆装置中轴,两侧标志杆对称放置。试验分四组进行,方案设计见表1。

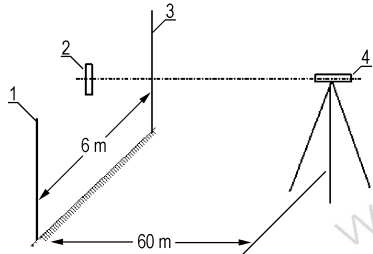


图2 高速运动分析系统放置的具体位置示意图  
1,3—标志杆,2—FAE装置,4—高速运动分析系统  
Fig.2 Sketch of experiment instrument arrangement  
1,3—symbol pole, 2—FAE device,  
4—high speed movement analysis system

表1 试验方案

Table 1 Experimental scheme

No.	explosive	$d/\text{mm}$	$M/\text{g}$	$R$
1	TNT	10	24	1.2%
2	8701	10	24	1.2%
3	TNT	15	40	1.8%
4	8701	15	40	1.8%

Note: TNT,  $\rho = 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $D = 5800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
8701,  $\rho = 1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $D = 8300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
 $d$ , center HE column diameters;  $M$ , center HE mass;  
 $R$ , mass ratio of center & mixed fuel.

在试验过程中,记录到每一时刻燃料云雾的分散云团,按图3将每一时刻燃料云团图像的最大宽度作为这一时刻的云雾直径。利用标志杆间距作为参考,由计算机专用软件,得到不同时刻的燃料云雾半径。拍摄结果如图4所示。

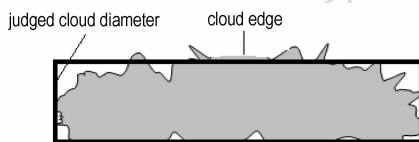


图3 云团直径判读  
Fig.3 Judgment of diameter of cloud volume

### 3 结果与讨论

#### 3.1 中心装药总能量对云团范围的影响

通过试验,可以得到各组试验条件下燃料云雾分散前沿的发展过程,燃料云雾前沿运动距离(云雾区半径随

时间的变化情况)如图4所示。由图4可看出,在燃料开始分散后的115 ms,第一组、第二组、第三组、第四组试验的云雾直径依次由大到小。第四组试验中,中心药总能量最大,但其燃料分散的最终云雾范围反而较小。

#### 3.2 中心装药总能量对云团运动特征的影响

经试验图像判读,可以得到各组试验条件下燃料云雾分散前沿随时间的变化曲线,限于篇幅本文仅列出了第四组燃料抛散的云雾前沿半径  $r$  随时间的变化规律(见图5)。由图5得到:云雾区半径随时间单调增加,大约在60 ms以后云雾半径  $r$  逐渐趋于常值,试验中每1 ms拍摄一幅云雾状态图,由这些云雾状态图中的云雾前沿随时间变化曲线微分,可以得到云雾分散前沿速度随时间的变化曲线。在数据处理过程中,选取的图幅越多,数据的处理结果就越精确。云雾前沿的平均运动速度可以写为

$$\bar{v} = \Delta \bar{r} / \Delta t$$

式中,  $\Delta \bar{r}$  是云雾前沿在时间内的运动距离。表2是根据上式和图4得到的试验结果,即每组试验仅取四幅云雾图像进行数据处理。

由表2可以得出:第一组、第二组、第三组、第四组的爆炸抛散云雾前沿运动的初始速度依次由小变大(在0~1 ms时间内的平均速度作为初始速度)。中心装药的总能量越大,云雾运动的初始速度就越高。燃料抛散云雾运动的中期速度与前期的运动情况相反,第一组、第二组、第三组、第四组试验爆炸抛散云雾的中期运动速度(在10~40 ms时间内的平均速度作为中期速度)依次由大到小。这些规律可能与燃料中期运动的阻力特性有关。由于云雾后期的运动速度很小,相对测量误差增大,其运动规律暂不作论述,但根据初始速度和中期运动速度的测量至少可以得到这样的结论:在一定的中心装药范围内,较大的中心装药能量能够使云雾获得较大初始运动速度大,而较小的中心装药能量能够使云雾获得较大的中期运动速度,通过无限制的增大中心装药能量得到较大的云雾范围的技术途径是错误的。

经试验图像判读,可以得到各组试验条件下燃料云雾分散前沿半径  $r$  随时间的变化规律,在本试验条件下,大约在60 ms以后各组试验云雾半径  $r$  逐渐趋于常值(限于篇幅,各组试验图像并未全部列出),因此115 ms时云雾速度可视为后期速度。

从图4中的高速运动分析系统记录的图像可以看出,中心装药爆炸的能量较大时(第四组),燃料抛散云雾分散的规则性、完整性、对称性反而较差。

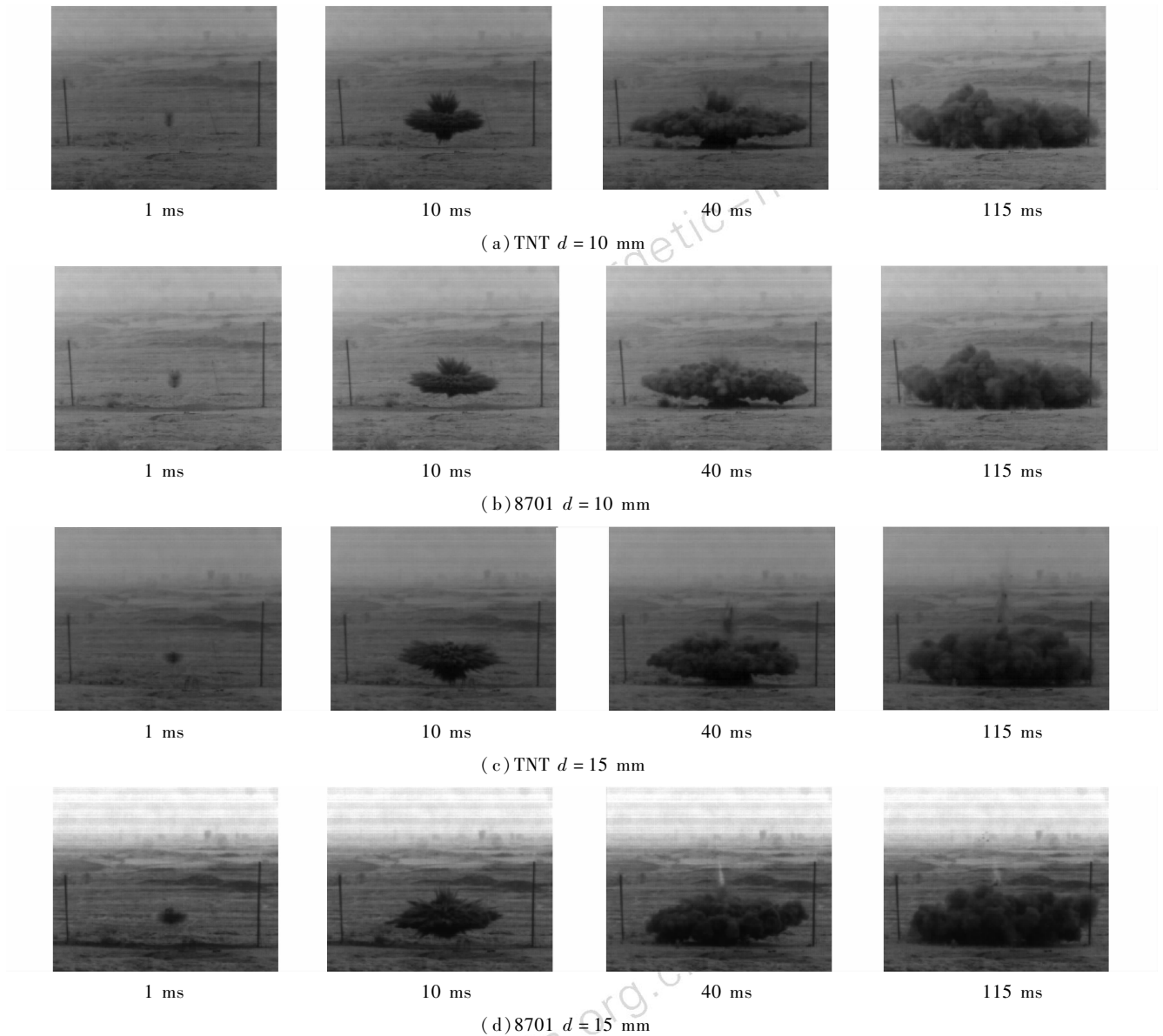


图 4 燃料分散过程

Fig.4 Dispersal processes of fuel

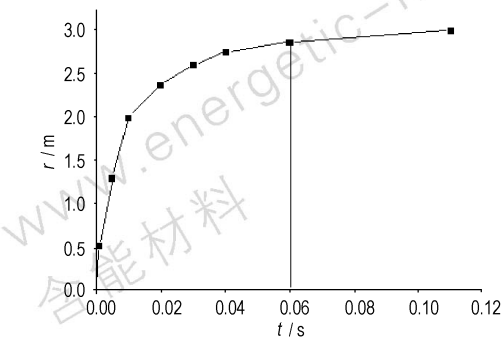


图 5 分散半径与时间的关系 (中心药 8701  $d = 15 \text{ mm}$ )

Fig.5 Dispersal radius vs time  
(center explosive 8701, charge radius is 15 mm)

表 2 云雾扩散前沿速度随时间变化的实验结果 (与图 4 对应)

Table 2 Cloud movement velocity vs time from Fig. 4

$t/\text{ms}$	0	1	10	40	115	
$\bar{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1	0.0	111.4	112.4	56.6	5.7
	2	0.0	197.1	138.0	40.2	7.3
	3	0.0	276.2	151.1	28.7	6.7
	4	0.0	466.3	156.2	24.8	5.6

#### 4 结 论

FAE 燃料分散速度与中心高能炸药装药有关。在 FAE 装置 (尺寸和燃料) 为一定时, 如果中心装药总能量较小, 则燃料分散的最终半径随总能量的增加而

增大。当中心装药总能量增加到某一临界值后,中心装药能量再增加,燃料云雾的最终半径不再增大。因此在云爆装置中通过增加中心装药能量以提高云雾范围是有条件的。在FAE装置和燃料一定的情况下,中心高能炸药装药品种、尺寸需要优化。根据笔者的实际经验,燃料云团的爆轰效果在很大程度上取决于云团体积、云团的对称性和规则性,因此如果将燃料最终云团的体积和云团的对称性、规则性作为判别标准,那么TNT作为FAE装置的中心分散装药,其燃料抛散效果优于爆速更高的炸药8701。在所进行的四组试验条件下,直径10 mm的装药药柱,其燃料抛散效果优于直径15 mm药柱。FAE装置中心装药与燃料的质量比为1.2%时的燃料抛散效果优于质量比为1.8%时的抛散效果。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Study on near field dispersal of fuel air explosive [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1999, 8(2): 113 - 118.
- [2] 张奇, 白春华, 刘庆明, 等. 燃料空气炸药抛散过程中的相似律[J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(5): 651 - 655.  
ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Law of similitude in fuel dispersal process [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2000, 20(5): 651 - 655.
- [3] 张奇, 白春华, 刘庆明, 等. 不耦合装药作用下燃料的近区分散[J]. 弹道学报, 2000, 12(2): 22 - 25.  
ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Near field dispersal of FAE fuel under load of uncoupling charge in center pipe [J]. *Journal of Ballistic*, 2000, 12(2): 22 - 25.
- [4] 张奇, 郭彦懿, 白春华, 等. 中心药量对燃料的抛散作用[J]. 火炸药学报, 2001, 24(1): 17 - 20.  
ZHANG Qi, GUO Yan-yi, BAI Chun-hua, et al. Dispersal affection of center high explosive charge to fuel [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(1): 17 - 20.
- [5] 张奇, 白春华, 刘庆明. 壳体对燃料近区抛散速度的影响[J]. 应用力学学报, 2000, 17(3): 102 - 107.  
ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming. Influence of shell casting on fuel near-field dispersal velocity [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2000, 17(3): 102 - 107.
- [6] 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 - 163.  
GUO Xue-yong, HUI Jun-ming. Influence of equipment parameters on FAE cloud status [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Haneng Cailiao)*, 2002, 10(4): 161 - 163.
- [7] 席志德, 解立峰, 刘家聪, 等. 高速运动液体燃料爆炸抛撒模型的建立[J]. 弹道学报, 2004, 16(2): 80 - 84.  
XI Zhi-de, XIE Li-feng, LIU Jia-cong, et al. The model for process of explosive dispersal of high speed fuel [J]. *Journal of Ballistic*, 2004, 16(2): 80 - 84.
- [8] 王德润, 沈兆武, 周昕清. 液体燃料爆炸抛撒及云雾形成的实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(4): 15 - 17.  
WANG De-run, SHEN Zhao-wu, ZHOU Ting-qing. Experimental study on explosive dispersion and cloud formation of liquid fuel [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2004, 18(4): 15 - 17.

## Effect of Total Energy of Center Explosive Charge on Fuel Dispersal Characteristic Feature

ZHANG Qi, QIN Bin, BAI Chun-hua, GUO Yan-yi, LIU Qing-ming, LIANG Hui-min

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In the dispersal of fuel mixture, a key technique in fuel air explosive weapons, concentration distribution and volume of fuel cloud are the main factors of explosion effect of a fuel air explosive device. The fuel/air cloud volume and consistency can be controlled by center high explosive charge in a fuel air explosive device. Fuel/air cloud dispersal processes of four kinds of center high explosive charges were introduced in this paper. The experimental results show that the cloud dispersal velocity varies from high to low and tends to zero. When the cloud dispersal velocity drops to zero, the volume of cloud reaches max. The max cloud volume relates to center high explosive charge and increases with the total energy when the total energy of center high explosive is lower. When the total energy of center high explosive reaches a critical value the max volume of cloud does not increase with the total energy. The conclusion has offered a basis for improving the cloud dispersal characteristic feature and detonation effects of FAE.

**Key words:** explosion mechanics; fuel air explosive (FAE); cloud detonation; fuel dispersal