文章编号：1000-5773(2005)02-0120-07

燃料爆炸抛撒过程的实验研究*

郭学永，惠君明，解立峰

（南京理工大学化工学院，江苏南京 210094）

摘要：通过高速录像对3种量级(5、20、50 kg)FAE装置的静爆实验进行了现场记录，通过对燃料爆炸抛撒形成云雾的成长过程的实时记录结果，把燃料的爆炸抛撒过程分为3个阶段：喷出阶段、过渡阶段和膨胀阶段，其依据是爆炸驱动力和气动阻力的相互作用而导致的云雾径向膨胀速度的变化；对于结构相似的FAE装置，爆炸抛撒各阶段结束时刻及最终的云雾直径与装填燃料量的立方根成正比，说明小型装置可以模拟大型FAE武器；此外对应于不同阶段结束时刻的云雾直径与装置直径的比值分别为5.5、30和45。

关键词：高速录像；燃料；爆炸抛撒；实验研究

中图分类号：E929.3 **文献标识码**：A

1 引 言

燃料的抛撒和燃料空气炸药(FAE)的形成是云爆技术研究的主要内容，也是提高FAE武器威力的重要途径。借助于爆炸抛撒形成云雾是一个十分复杂的问题，国外在对爆炸抛撒过程进行划分的基础上，多采用数值模拟的方法来预测云雾区内重要参数的变化，如莫斯科鲍曼大学的B. H. Охитин和莫斯科化学物理研究所的A. A. Borisov[1]把爆炸抛撒过程划分为四个阶段，而美国桑地亚国家实验室的D. R. Gardner[2]和M. W. Glass[3]把抛撒过程简单地划分为近场和远场两个阶段，并利用CTH[4]气体动力学代码进行了数值模拟，这些工作仍处于定性的分析阶段；国内也进行过爆炸抛撒过程的数值模拟[5,6]，并通过改变FAE装置各种参数来研究云雾的成长规律[7,8]，取得了一些研究成果。由于两次引爆型FAE的复杂性和实验仪器的缺乏，有关燃料的爆炸抛撒这一方面的内容，无论是理论分析、实验研究和数值模拟，国内外的研究都尚未完善。本研究主要是通过高速录像对燃料爆炸抛撒过程的实时记录结果，分析了燃料爆炸抛撒的机理，对云雾的成长过程进行了阶段性的划分，为数值模拟和理论计算提供必要的实验数据。

2 实验研究

2.1 测试仪器和试验装置

用高速录像记录云雾形状随时间的变化，高速录像机型号为HG Model 2000 Color，分幅率可达2 000 f/s，试验时采用的分幅率为1 000 f/s，此录像机的画面可根据实际需要调整，画面可编制成数据文件输入计算机，并通过专门的软件进行处理。

试验装置为南京理工大学自行设计的弹体，为钢壳圆柱形结构，侧壁刻有均匀分布的预制凹槽，上下端板的厚度和强度远大于侧壁，以限制燃料的轴向飞散，使形成的燃料云雾成饼状，尽可能地扩大云雾的覆盖面积。具体的装置参数见表1。

* **收稿日期**：2004-03-29；**修回日期**：2004-07-21

作者简介：郭学永(1975—)，男，博士研究生，助理研究员，主要研究方向：爆炸理论及应用、混合炸药.

通讯作者：惠君明(1946—)，男，研究员，博士生导师，主要研究方向：爆炸理论及应用、混合炸药.

2.2　测试现场布置情况

高速录像机布放在安全范围内,本次实验录像机设置在距爆源 150 m 左右的位置,为从不同角度观测云雾的成长过程,布置了两架高速录像机,它们与爆源的连线大体垂直,并与爆点在同一水平高度,直接对爆炸抛撒过程进行拍摄(如图 1 所示)。对照不同角度获得的图像进行分析,就可以对云雾的爆炸抛撒及云雾成长过程的空间变化有一个较为全面的认识。

表 1　试验装置的结构参数

Table 1　Structure parameters of experimental devices

Type	Diameter of device /(mm)	Height of device /(mm)	Ratio of height to diameter	Number of notch on device	Fuel quantity /(kg)
A	180	270	1.5	30	5
B	260	590	2.3	30	20
C	365	620	1.7	30	50

2.3　测试所采用的方法

燃料空气炸药云雾成长的过程时间很短,大多在百余毫秒,整个过程人的眼睛是不能分辨的。为了在屏幕上确定云雾抛撒范围,首先要拍摄“标准镜头”。其具体操作如下:首先固定录像机的位置(安全区),通过爆心相对于录像机与爆心连线垂直的方向上立两根标杆,每根标杆距爆心距离相等,两根标杆之间距离可预先由估算给出(如图 2)。把标杆收入画面内拍下一个镜头,此镜头就作为度量云雾范围的“基准”。拍摄标准镜头时的录像机位置、变焦镜头、爆心,在实验过程中均应固定不动,否则,就不是同一比例关系了。实验后对所录图像进行测量时,应首先放出标准镜头,在电视屏幕上定出比例尺。高速录像现场所采集的图像是以数据的形式存储的,分析时有专门编制的软件进行测量,由于彩色录像的分辨率很高,抛撒出的云雾边缘是比较清晰的,所以测量准确,精度很高。

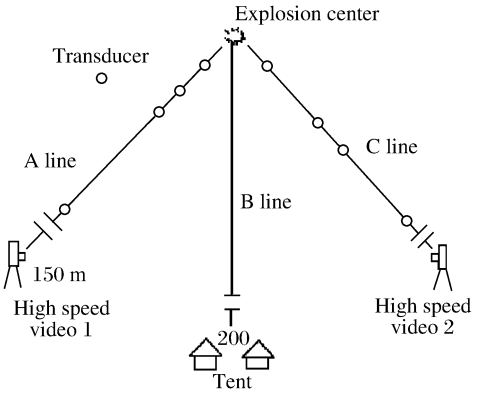


图 1　现场录像布置示意图

Fig. 1　Sketch of camera set-up

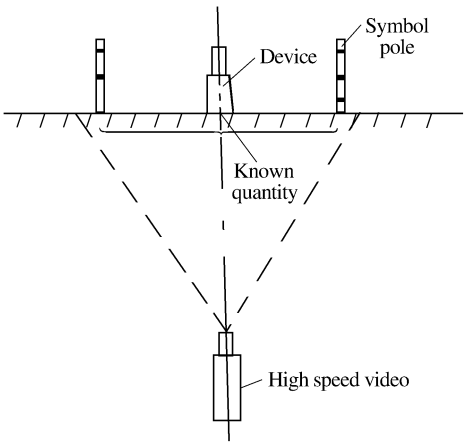


图 2　拍摄标准镜头示意图

Fig. 2　Sketch of taking standard scence

3　图像处理和结果分析

3.1　图像处理

用 Motion Analysis Video Maker 软件,对高速录像记录的图像进行读取,就可以准确、细致地观察到燃料的爆炸抛撒和云雾形成的全过程。如弹片和端盖的初始运动状态、云雾直径随时间的变化,云雾高度随时间的变化、中心装药爆炸产物的运动状态等参数,分析不同的 FAE 装置(如燃料装填量不同、装置参数不同)所得到的静爆实验数据,就可获得一些有助于提高燃料爆炸抛撒性能的实验结果。

3.2 图像分析和结果分析

3.2.1 爆炸抛撒过程的简略描述

图 3 是 50 kg 量级 FAE 装置爆炸抛撒过程的部分高速录像分幅图片，可清晰看出云雾随时间的变化情况。中心装药爆轰后，产生的冲击波压力使外壳有预制凹槽的部位在数十微秒内发生破裂，壳体内的液体在爆炸产物膨胀的推力及前沿激波所产生的拉伸波作用下，以射流的形式通过裂缝向外喷出[9]，时间约为装置完全解体所用的时间(由图 3 中 3 ms 以前的图片可见)。射流只占总体燃料的一部分，但在某种程度上决定着燃料的分散均匀度。在此阶段燃料的爆炸抛撒是一个加速过程。

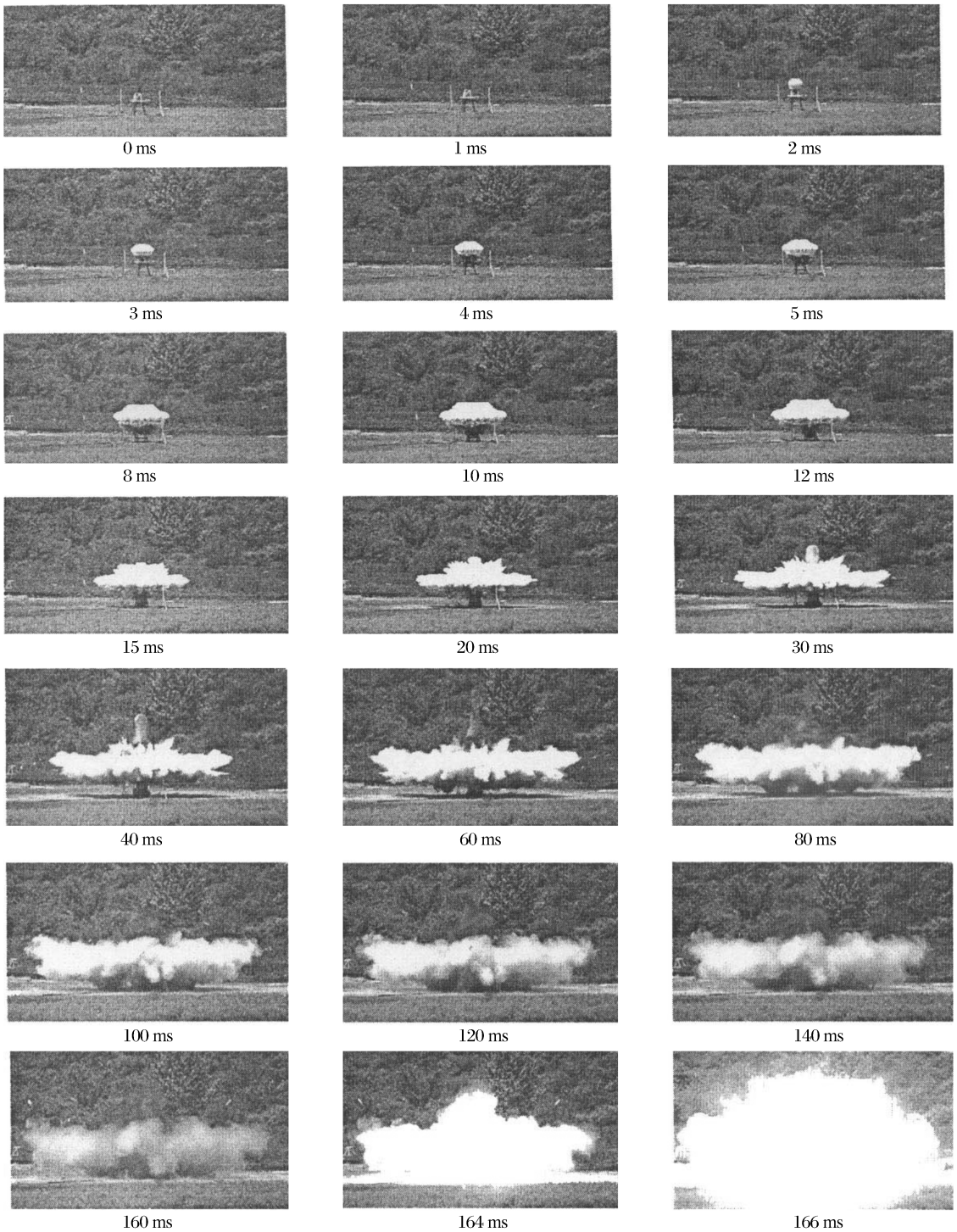


图 3 50 kg FAE 装置爆炸抛撒过程的分幅图片

Fig. 3 Pictures of explosion expansion process of 50 kg FAE device

而后燃料的主体部分保持着连续的环形,以比射流低的速度,克服气动阻力向外膨胀,虽然射流的初期速度快,但由于惯性小,受空气阻力动能损失快,被位于其后的燃料主体赶上并吞没。与空气接触的燃料边界层出现扰动,但燃料液滴还是相当紧密的,虽然夹带一些气体于其中,液体环却尚未破裂,而随着燃料抛撒面积的增大,气动阻力增大,由于爆炸驱动力的衰减很快,此阶段其与气动阻力大致相当,云雾开始做减速运动;随后的膨胀,由于液体环内部压力远小于气动阻力,液体在冲击波和气动阻力的作用下发生剥离、破碎以及挥发等过程,使液体环开始解体,作用于单个液滴的气动阻力已成为制约云雾运动的主要因素[10,11]。

3.2.2　爆炸抛撒过程的划分

图 4 是从高速录像获得的 5 kg、20 kg、50 kg 级 FAE 装置爆炸抛撒的云雾直径与时间的关系曲线,即 D-t 曲线。图 5、图 6、图 7 分别是 3 种量级装置的云雾径向抛撒速度与时间的关系。

在燃料的爆炸抛撒过程中,作用于液体燃料上的力主要为爆炸驱动力和气动阻力,两者作用的大小将直接反映在云雾的径向抛撒速度上,因此以云雾的径向抛撒速度为依据来划分云雾的爆炸抛撒过程。由图 5、图 6、图 7 云雾径向抛撒速度曲线图,经分析可看出,对应于 5 kg、20 kg 和 50 kg 量级的装置,其云雾径向抛撒分别在 2 ms、3 ms 和 4 ms 之前是一个加速的过程,可见此阶段为爆炸力起主导作用的阶段,而在此时刻后,速度急剧下降;在 15 ms、27 ms 和 33 ms 三种装置的云雾径向抛撒速度分别出现拐点,其后的云雾扩散速度大体相当,可认为是气动阻力起主导作用的阶段。

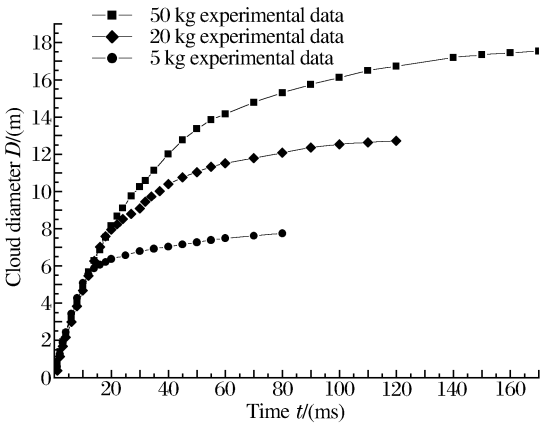


图 4　3 种量级 FAE 装置爆炸抛撒的 D-t 曲线

Fig. 4　D-t curve of 3 kinds of devices

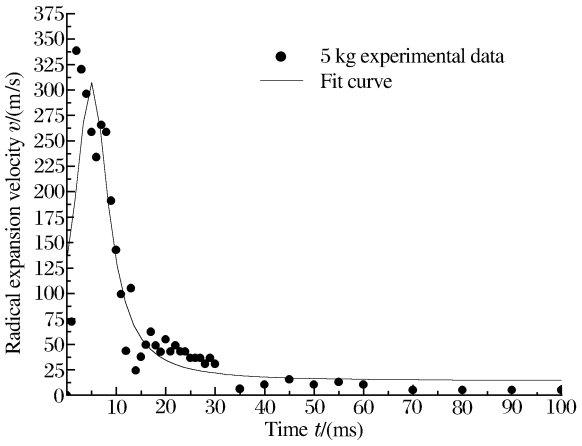


图 5　5 kg 量级云雾径向抛撒速度与时间的关系

Fig. 5　The relation of radial expansion velocity with time of 5 kg FAE device

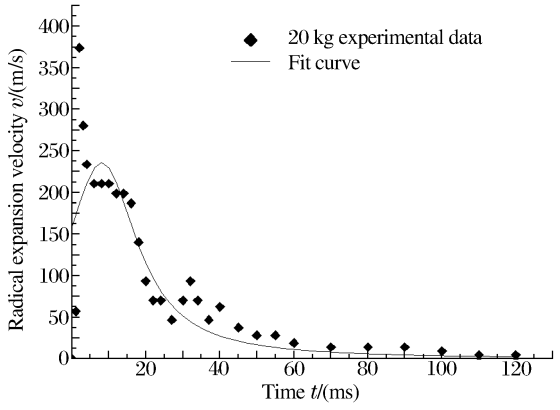


图 6　20 kg 量级云雾径向抛撒速度与时间的关系

Fig. 6　The relation of radial expansion velocity with time of 20 kg FAE device

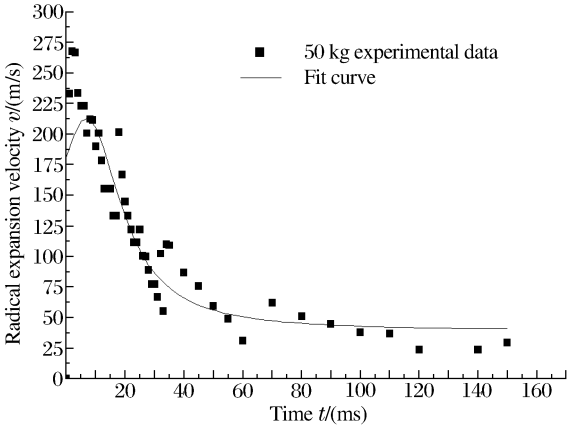


图 7　50 kg 量级云雾径向抛撒速度与时间的关系

Fig. 7　The relation of radial expansion velocity with time of 50 kg FAE device

根据以上分析,考虑到爆炸驱动力和云雾所受气动阻力的相互作用导致云雾径向抛撒速度的变化,我们将 FAE 装置的爆炸抛撒过程分为如下 3 个阶段:

(1) 喷出阶段:爆炸驱动力起主导作用的阶段,主要表现形式是燃料的射流、云雾的抛撒速度是一个加速过程,对应于 5 kg、20 kg、50 kg FAE 装置的时间约为 2 ms、3 ms 和 4 ms。

(2) 过渡阶段:爆炸驱动力与气动阻力相互作用阶段,也是激波反射和透射阶段,伴随着液体环的扰动,燃料液滴的剥离、破碎及挥发等过程,云雾径向膨胀速度急剧下降,对应于 5 kg、20 kg、50 kg FAE 装置的时间分别在 15 ms、27 ms 和 33 ms 之前。

(3) 膨胀阶段:气动阻力起主导作用阶段,此时液体环已经瓦解,液滴在气动阻力作用下继续向外运动,并进一步碎解和蒸发,与空气进行湍流的混合,最后形成 FAE 云雾的阶段,对应于 5 kg、20 kg 和 50 kg FAE 装置其时间分别为 15 ms、27 ms 和 33 ms 以后。

由于 FAE 装置的喷出阶段时间非常短,一般只有几个毫秒,因此由高速录像所读取的数据点很少,依据数据所做出的拟合曲线在初始抛撒阶段只能说明一定的趋势,不能用拟合曲线的最高点来判断喷出阶段的结束时刻;而在过渡阶段,实验数据点较多,拟合曲线可在一定程度上体现过渡阶段的结束时刻,即为云雾径向扩散速度曲线上出现拐点的时刻。

从图 6 和图 7 可见,云雾径向抛撒速度有脉动的情况出现,分析原因是:射流产生的燃料云雾被主体燃料吞没所产生的,另一个原因是在爆炸驱动力和气动阻力的相互作用下,燃料液体内部存在着一定的浓度梯度,同时也由于液体的粘弹性,当气动阻力起主导作用时,浓度梯度高的内部燃料将向浓度低的外部运动,使膨胀速度进一步增大,这个过程是反复的,即抛撒速度随时间有脉动的情况发生,在进行数值模拟时也应该考虑到这一问题。

3.2.3 云雾参数和燃料量的比例关系

由图 4 可知,5 kg、20 kg 和 50 kg 量级装置的云雾直径分别在 80 ms、120 ms 和 160 ms 时与前一时刻相比已没有太大变化,由图 3 中 50 kg 量级的分幅图片可见,此时的云雾已非常稀薄,如二次起爆时间再延长的话,将会有一部分燃料损失掉,不能充分发挥全部燃料的爆炸能力,使威力降低,综合分析认为,3 种量级装置的二次引爆时间宜选择为 80 ms、120 ms 和 160 ms。表 2 给出了一些云雾参数的对比关系。

表 2 FAE 装置的云雾参数

Table 2 Cloud parameters of FAE devices

Type	Time at the end of ejection /(ms)	Time at the end of transition /(ms)	Best duration /(ms)	Cloud diameter before detonation /(m)
A	2	15	80	7.71
B	3	27	120	12.75
C	4	33	160	16.94
C/A	2.00	2.20	2.00	2.20
C/B	1.33	1.22	1.33	1.33

而装填燃料的立方根之比为:$\sqrt[3]{50}/\sqrt[3]{5}=2.15$,$\sqrt[3]{50}/\sqrt[3]{20}=1.36$,由表中两者的比值可见,与装填燃料量的立方根大体相当,可认为爆炸抛撒的不同阶段及云雾参数与装填燃料量的立方根成正比,这说明,就云雾的一些参数而言,小型 FAE 装置是可以模拟大型 FAE 装置的。

表 3 给出了三种结构相似的不同量级装置在爆炸抛撒的不同阶段结束时刻云雾直径和装置直径的比值。

由表 3 中数据可得,喷出阶段结束时,云雾直径约为装置直径的 5.5 倍左右,过渡阶段结束时刻的云雾直径约为装置直径 30 倍左右,而云雾的最终尺寸约为装置直径的 45 倍左右,这为数值模拟和理论计算提供了必要的实验数据。

表 3　不同阶段结束时刻云雾直径和装置直径的比值

Table 3　The ratio of cloud diameter to device diameter at the end moment of different phases

Type	Cloud diameter of devices D_0/(mm)	Cloud diameter at the end of ejection D_1/(m)	$\frac{D_1}{D_0}$	Cloud diameter at the end of transition D_2/(m)	$\frac{D_2}{D_0}$	Cloud diameter before detonation D_3/(m)	$\frac{D_3}{D_0}$
A	180	0.89	4.94	5.63	31.28	7.71	42.83
B	260	1.50	6.11	8.80	33.85	12.73	48.96
C	365	2.03	5.56	10.72	29.36	16.94	46.41

4　结　论

(1) 高速录像在现场实验中不仅能把实验情况如实地记录下来,还可以通过所录图像的分析揭示静爆实验过程的内在规律,画面色彩逼真,实验现象一目了然。

(2) 通过 3 种量级 FAE 装置的静爆实验,用高速录像所得到的实验数据来分析,对燃料爆炸抛撒过程进行了 3 个阶段的划分:喷出阶段、过渡阶段和膨胀阶段,其依据是爆炸驱动力和气动阻力的相互作用所产生的云雾径向抛撒速度的变化。

(3) 对于不同装药量的 FAE 装置来说,在爆炸抛撒过程中,不同阶段结束时间与装填的燃料量的立方根成正比。

(4) 在本实验条件下,燃料爆炸抛撒喷出阶段结束时云雾的直径约为装置直径的 5.5 倍,过渡阶段结束时刻云雾的直径约为装置直径的 30 倍,而最终的适合于二次起爆的云雾直径约为装置直径的 45 倍。

References:

[1] Borisov A A. Research on the Explosive Dispersion of FAE [R]. Report in NUST, 1995.

[2] Gardner D R. Near-Field Dispersal Modeling for Liguid Fuel-Air Explosives [R]. SAND90-0686, 1990.

[3] Glass M W. Far-Field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-Air Explosive [R]. SAND90-0687, 1991.

[4] McGlaun J M. CTH Manual [R]. SAND88-0523, 1988.

[5] Ding J, Liu J C, Peng J H. Numerical Study on the Explosively Dispersed Liquid Fuel in the Near-Field [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 215－220. (in Chinese)
丁　珏, 刘家骢, 彭金华. 液体燃料爆炸抛撒近场阶段的数值研究 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 215－220.

[6] Xue S S, Liu J C, Qin C S, et al. Experimental and Numerical Investigation on Explosive Dispersal and Cloud Forming [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4): 272－276. (in Chinese)
薛社生, 刘家骢, 秦承森, 等. 燃料爆炸抛撒成雾的实验与数值研究 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4): 272－276.

[7] Guo X Y, Hui J M. Influence on the Ratio of Height to Diameter on FAE Cloud Status [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2002, 25(4): 8－10. (in Chinese)
郭学永, 惠君明. 长径比对 FAE 云雾状态的影响研究 [J]. 火炸药学报, 2002, 25(4): 8－10.

[8] Guo X Y, Hui J M. Influence of Equipment Parameters on FAE Cloud Status [J]. Energetic Materials, 2002, 10(4): 161－164. (in Chinese)
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.

[9] Zabelka R J, Smith L H. Explosively Dispersal Liquids [R]. AD-863268, 1969.

[10] Xie S S. Liu J C, Peng J H. Study on the Explosively Dispersed Liquid Fuel in the Near-Field [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1997, 21(4): 333－336. (in Chinese)
薛社生, 刘家骢, 彭金华. 液体燃料爆炸抛撒的近场阶段研究 [J]. 南京理工大学学报, 1997, 21(4): 333－336.

[11] Feng W. Numerical Simulation in the Near-Field of FAE [D]. Nanjing: NUST, 2000. (in Chinese)
冯　伟. 燃料空气炸药近场抛撒数值模拟 [D]. 南京: 南京理工大学, 2000.

Experimental Study on the Process of Fuel Explosive Dispersion

GUO Xue-Yong, HUI Jun-Ming, XIE Li-Feng

(*Chemical School of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: Local records of static explosion were taken by the high-speed video for the 3 kinds of FAE devices. On the analysis of experimental data, the process of fuel explosive dispersion was divided into three regimes: Ejection stage, transition stage and expansion stage, based on the radical expanded velocity caused by explosion acting force and aerodynamic force. For FAE devices with similar structure, according to the experiment data obtained from high-speed video, we got that end-time of different stages and cloud diameters before detonation were proportional to the cube root of fuel quantity, which illuminated that small device can simulate big FAE device. The ratios of cloud diameter to device diameter were 5.5, 30 and 45 at the end moment of different stages, respectively.

Key words: high speed video; fuel; explosive dispersion; experimental study

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。《高压物理学报》力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。《高压物理学报》征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。《高压物理学报》接受中、英文稿件。

来稿应论点明确、数据可靠、逻辑严密、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在6000～12000字以内，论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用中华人民共和国法定计量单位。第一作者应确保全体作者同意文章署名，并提供所有联系方式，简要介绍工作背景和论文意义。来稿应一式3份。稿件中所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

自1987年创刊以来，《高压物理学报》取得了较大的成就。2001年，《高压物理学报》被科技部和国家新闻出版总署评为“中国期刊方阵”双效期刊。国际主要检索系统“EI Compendex”和“CA”一直收录《高压物理学报》文章。由北京高校图书馆期刊工作研究会和北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》连续四版把《高压物理学报》列为物理学类核心期刊(北京大学出版社，1992年、1996年、2000年、2004年)。据中国科学引文数据库公布的“2000年影响因子最高的中国科技期刊300名排行榜”显示，《高压物理学报》影响因子为0.3627，全国排名第94名，列物理类期刊第3名。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在3个月甚至更短时间内刊出。为缩短邮寄时间，编辑部建议作者使用电子邮件投稿。

重点注意事项

▲ 中英文摘要　作为文章精华部分，中、英文摘要一定要仔细斟酌，特别是英文摘要，其质量直接决定文章能否被EI Compendex收录。《高压物理学报》要求文章的中文摘要在200～400个字之间，英文摘要不少于120个单词；摘要内容千万不要泛泛而谈，应有具体内容。为促进论文的国际交流，英文摘要必须：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，应重点包括4个要素：即研究目的、方法、结果、结论等，结果、结论是最重要的；应要素齐全，繁简得当。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。(3) 英文摘要中尽量避免特殊字符(希腊字符、上下标)及特殊字符组成的数学表达式，且第1句不要与英文题名重复。

▲ 参考文献　科技论文必须引用参考文献，《高压物理学报》要求作者应充分著录参考文献，并尽量引用近期期刊文章。中文参考文献必须附英译文，著录项目齐全。

▲ 版权与稿酬　《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》和万方数字化科技期刊群。凡经本刊录用的稿件，作者便自动将光盘版和网络版出版权转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。来稿一经发表，即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

来稿请寄：四川绵阳919信箱110分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

电子邮件：gaoya@caep.ac.cn；gywl@chinajournal.net.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042；传真：(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部启