

# 燃料爆炸抛撒成雾的实验与数值研究<sup>\*</sup>

薛社生<sup>1</sup>, 刘家骢<sup>2</sup>, 秦承森<sup>1</sup>, 彭金华<sup>2</sup>

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100080; 2. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了合理设计云雾爆轰装置, 对液体燃料爆炸抛撒规律作了实验与数值模拟研究。获得 6~250kg FAE 装置云雾形成的若干重要实验数据。通过实验数据分析给出了云雾膨胀的相似律, 并研究了爆炸抛撒过程中近场与远场阶段特性; 用一个简化的解析模型描述了液体燃料的近场膨胀, 给出了液体燃料在加速阶段的极限速度; 用数值方法研究了远场云雾的物理特性, 给出了云雾速度场及云雾内部燃料浓度与燃料蒸汽浓度的分布。

关键词: 燃料空气炸药; 爆炸抛撒; 云雾

中图分类号: O382.1 文献标识码: A

燃料空气炸药 (FAE) 是一种强的爆炸源, 由于在同质量条件下有比一般高能炸药大得多的释放能量, 因而受到武器研制者的极大关注。燃料空气炸药的形成依靠 FAE 装置来实现。燃料在装置中心装填炸药的爆炸作用下飞散、膨胀, 并与空气混合, 形成可爆炸性混合物云团。该云团就是燃料空气炸药, 其形成过程称作爆炸抛撒。

认识爆炸抛撒过程的机理对研制、设计云爆武器有重要的意义。有别于一般的云雾形成, FAE 的形成包含着许多复杂的物理现象, 如液体在爆炸冲击波作用下的膨胀、破碎、蒸发及与空气混合等。对这些现象的描述是困难的, 难以用一种模型描述全过程, 数值方法也面临极大的挑战。美国和前苏联研究者作了大量的工作<sup>[1~7]</sup>, 具有代表性的有: 用高速摄影记录了云雾的形状变化过程<sup>[3]</sup>, 近场液体燃料膨胀的数值模拟<sup>[6]</sup>, 及远场云雾运动的数值模拟<sup>[4,7]</sup>。这些工作揭示了云雾形成的重要规律, 指出了研究思路。然而, 由于物理机制的复杂性和武器设计的实际需要, 还需对不同装置、不同物理参数条件下的抛撒过程作大量的研究。本文中, 我们给出特定 6 个质量等级 FAE 装置的抛撒研究结果。包括实验测试、近场燃料膨胀的理论分析及远场云雾膨胀的数值模拟结果。

## 1 实验研究

### 1.1 实验测试

燃料的爆炸抛撒借助于 FAE 装置来实现。所用装置 (如图 1 所示) 为钢壳圆柱形结构, 侧壁布有均匀分布的母线刻槽, 上下端盖的质量及强度远大于侧壁, 以限制液体的轴向飞散。测试用的 FAE 装置按装填燃料质量  $M$  分为 6 个等级, 分别为 6、15、40、100、150 和 250kg。云雾记录采用高速摄影技术与高速录像技术, 其试验分幅率分别为 3000 和 50s<sup>-1</sup>。摄影机 (录像机) 放在距离装置约 200m 的位置, 镜头与装置中心平齐。对 15kg 装置采用高速摄影记录, 其它采用高速录像记录。15、40、100、150 和 250kg 云雾半径随时间曲线见图 2。后期云雾形状如图 3, 呈贴地扁平状。

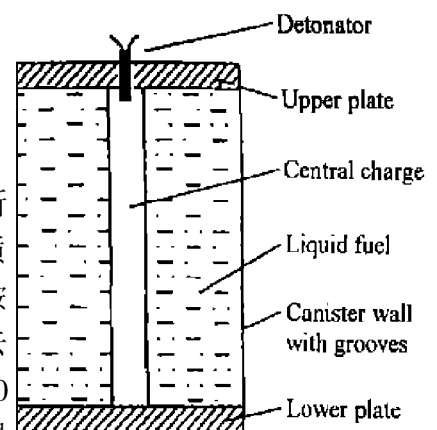


图 1 FAE 装置示意图  
Fig. 1 Diagram scheme of FAE devices

\* 收稿日期: 2000-04-24; 修回日期: 2001-04-19

作者简介: 薛社生 (1965—), 男, 博士, 副研究员。

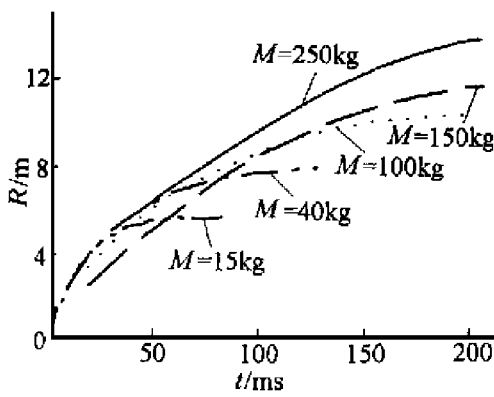


图 2 FAE 装置云雾半径时间曲线  
Fig.2 The curves of radius versus time

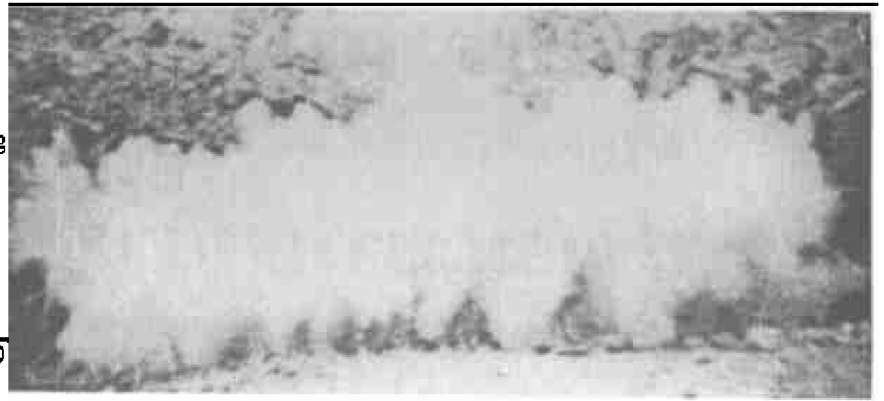


图 3 FAE 云雾  
Fig.3 FAE cloud

### 1.2 实验室模拟装置测试

对尺寸为  $\phi 110\text{mm} \times 170\text{mm}$  的一种小型 FAE 装置的爆炸抛撒作了闪光 X 光照像记录。所用燃料为 PO (环氧丙烷), 质量 1kg。在燃料中加入适量的碘。结果显示, 1.3ms 时液体已完全碎裂, 云宽 7cm, 这一时期云的平均速度约  $230\text{m/s}$ 。

### 1.3 云雾膨胀的相似关系

根据实测的 6 个质量等级 FAE 装置所形成云雾半径时间数据, 可确定其 FAE 云雾的形成时间  $t_f$  和云雾半径  $R_f$ 。此外, 从实验记录还可得到云雾的平均厚度  $h_f$  (若干点平均)。由  $R_f$  和  $h_f$  又可算出云雾的外观体积  $V_f$  (爆轰产物所占体积也计算在内)。表 1 列出了 FAE 装置参数、FAE 云雾参数<sup>[8]</sup> 及相应参数比,  $r_0$ 、 $h_0$ 、 $V_0$  分别为 FAE 装置的半径、长度、体积,  $b$  为比药量,  $t_{fl}$ 、 $t_{fc}$  分别 FAE 云雾形成时间的实验和计算数据。从表中数据可看出如下的比例关系。

(1) 对 6 个质量等级的 FAE 装置,  $R_f / r_0$  均在 40.0 ~ 44.5 的范围内。考虑到云雾形状和大小受较多因素影响, 且形状不规则, 可以认为云雾半径与装置半径成正比。

(2) 对 3 个质量等级较小的 FAE 装置,  $h_f / h_0 \approx 6$ , 对 3 个质量等级较大的 FAE 装置,  $h_f / h_0 \approx 5$ 。考虑到云雾形状的不规则性及测量原因, 6 个装置的  $h_f / h_0$  是基本相等的。因此可以认为, 几何相似的 FAE 装置所形成的云雾, 其平均厚度与装置长度成正比。

(3) 对 6 个质量等级的 FAE 装置,  $V_f / V_0 \approx 1.0 \times 10^4$ , 云雾体积与装置体积 (近似地等于液体燃料的初始体积) 成正比。

表 1 FAE 装置参数及相应 FAE 云雾参数

Table 1 The parameters of FAE set-up and corresponding FAE cloud

$M / \text{kg}$	$V_0 / \text{m}^3$	$b / (\%)$	$t_{fl} / \text{ms}$	$t_{fc} / \text{ms}$	$R_f / \text{m}$	$h_f / \text{m}$	$V_f / \text{m}^3$	$R_f / r_0$	$h_f / h_0$	$V_f / V_0$
6	0.0106	1.40	70	70 <sup>1)</sup>	4.5	1.66	106	40.9	5.9	$1.00 \times 10^4$
15	0.0234	1.30	90	95	5.5	2.33	221	40.0	6.2	$0.99 \times 10^4$
40	0.0452	1.00	130	132	7.8	2.95	564	42.2	6.1	$1.20 \times 10^4$
100	0.1340	1.03	180	179	9.7	4.35	1290	44.0	4.9	$0.96 \times 10^4$
150	0.2050	1.00	200	205	11.0	5.15	1960	42.6	5.2	$0.96 \times 10^4$
250	0.3300	1.01	240	243	13.5	6.18	3540	44.5	5.4	$1.10 \times 10^4$

1) 以此作基准时间。

云雾形状除几何相似外, 还可用量纲分析与相似理论发现其中物理量之间的关系<sup>[9]</sup>。云雾半径主要与中心装药释放能量  $E$ 、燃料质量  $M$  和装置尺寸有关, 若以云雾形状变化最显著的半径来描述云雾

的膨胀,那么云雾半径

$$R(t) = f(E, M, r_0, t)$$

式中:  $M, r_0, t$  为量纲独立量,由  $\Pi$  定理,可得  $R(t) = r_0 \cdot f\left[\frac{Et^2}{Mr_0^2}\right]$ 。而  $E = m \cdot e, m$  为炸药质量,  $e$  为炸药释放的质量能量。进而有  $R(t) = r_0 \cdot f(b \cdot e \cdot t^2 / r_0^2)$ 。根据实验数据的最小二乘拟合,可得出数值关系式

$$R(t) = 45r_0[1 - 0.96\exp(-0.07 \cdot b \cdot e \cdot t^2 / r_0^2)]$$

上式包含了装置的尺寸、比药量、炸药能量几种影响因素。

### 2 云雾膨胀阶段特性与近场研究

云雾膨胀过程可作不同的分段及描述。一般地,按中心装药爆轰产物的推动作用与外部气动阻力的相对大小,分为近场与远场。近场的特征是前一个作用远大于后一个作用,而远场则相反。

近场包括这样一些过程:中心装药的爆轰,冲击波在燃料中的传播,壳体的膨胀破裂及喷流速度的形成<sup>[6]</sup>。判定特定的 FAE 装置的抛撒过程的阶段性是重要的。图 4 为云雾半径随时间变化曲线(以  $M = 15\text{kg}$  为例),在 6ms 前有一个平台,裂缝喷出射流初期速度快,但由于惯性小,受空气阻力动能损失快,后被位于其后的云雾主体赶上并吞没。在 6~9ms 云雾主体仍处于加速阶段,9ms 后不再有加速特征。可以认为,近场结束于 9ms 时刻,此时云雾半径达 2.5m,是初始半径的近 20 倍。

高速摄影记录显示,在燃料云雾膨胀初期,FAE 装置上下盖板的运动速度远小于径向膨胀速度。若忽略桶壁影响,燃料膨胀可看作不可压缩流体的一维柱对称运动。由此得到燃料受加速作用的极限速度  $U$  与爆速  $D$  及比药量  $b$  的关系<sup>[10]</sup>

$$U = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{b}{\gamma - 1}}$$

根据 Grady 模型<sup>[11]</sup>,可得燃料破碎成液滴的尺寸的数值方程

$$d = \left[ \frac{\sqrt{20K}}{\rho_c \epsilon} \right]^{2/3}$$

式中:  $\epsilon$  为线性应变率,  $K$  为材料断裂韧度。由此,液滴直径  $d \approx 0.5\text{cm}$ 。

### 3 远场的数值模拟

将云雾膨胀视为二维轴对称气液两相流动,液滴作为离散的实体处理,气体看作连续相,燃料蒸汽作为气相中的一组分。气相运动由连续方程、动量方程、能量守恒方程及理想气体状态方程来控制<sup>[12]</sup>,采用 ALE 方法求解。对液相作假设:(1)燃料液滴始终为球形;(2)液滴在气流场中只受 Stokes 阻力作用。初始条件由近场分析给出。

#### 3.1 气相速度场

云雾膨胀过程的速度分布显示:径向速度在  $X$  轴附近(高 0.3m)最大;50ms 后最大值小于  $20\text{m/s}$ ;轴向速度在 30ms 时在  $Z$  轴附近出现负值,说明云雾由于径向膨胀,引起内部压力减小;30ms 后轴向最大速度不超过  $12\text{m/s}$ 。这些为分析云雾前沿处液滴的破碎提供了参考。

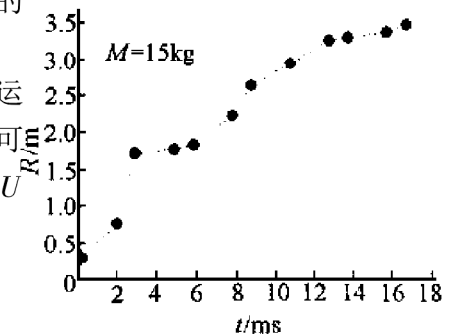


图 4 云雾半径变化曲线  
Fig.4 Cloud radial history

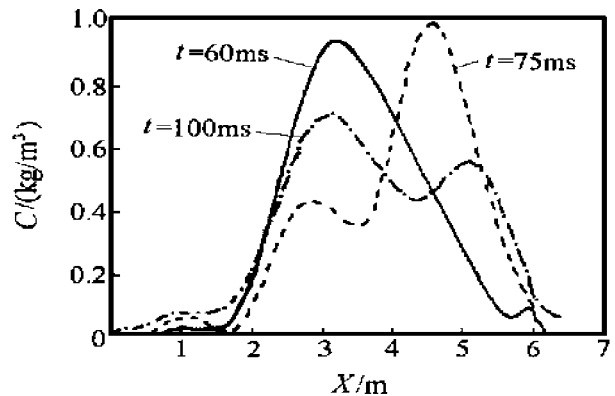


图 5 燃料浓度沿 X 轴的分布  
Fig.5 The profile of fuel concentration along X-axis

### 3.2 燃料浓度分布

燃料空气混和物中燃料液滴的体积质量为燃料浓度。模拟结果表明：在 15 ~ 60ms，云雾的宽度有明显的增大；而 60ms 后燃料主要是在半径 2 ~ 6m 之间重新分配。图 5 为 60、75、100ms 时刻燃料浓度沿 X 轴的分布(X 轴位于装置中心所在的水平面)。

燃料浓度的空间分布见图 6，在半径 2m 以内、高 1.2m 以下区域，几乎是无燃料区；最大浓度区域

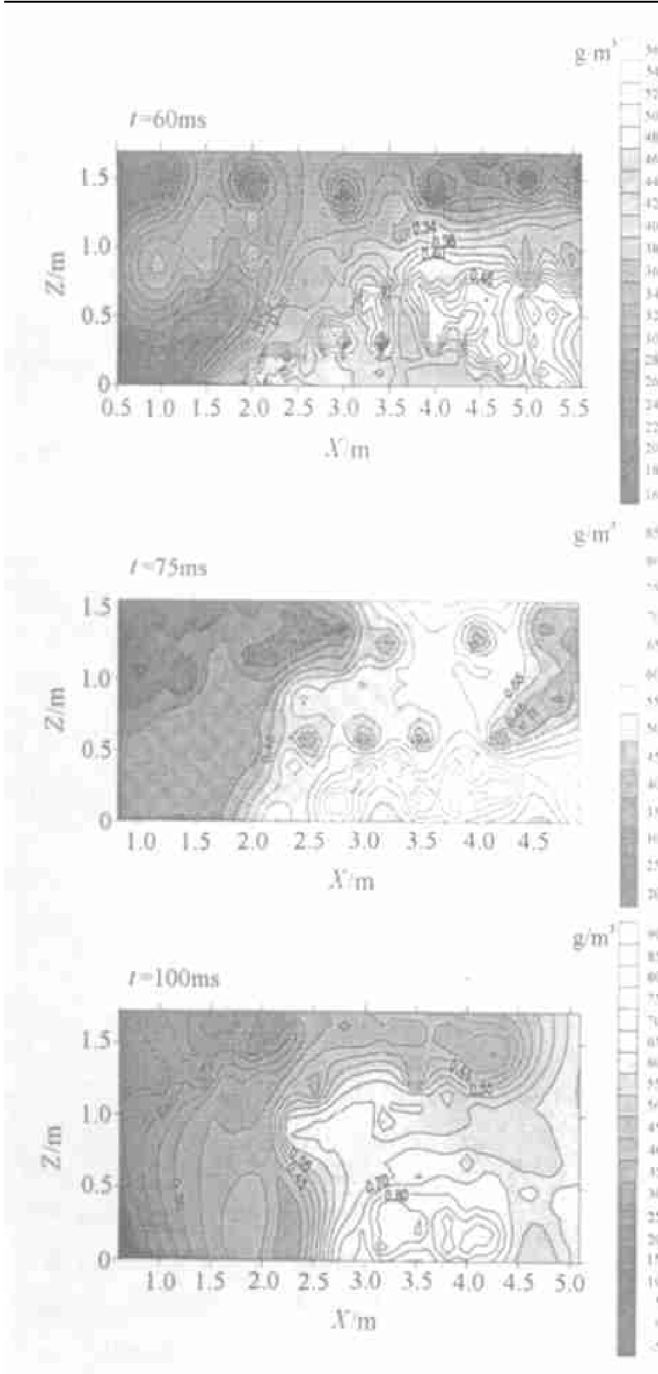


图 6 燃料浓度的空间分布

Fig.6 The contour of concentration of fuel

在半径 3 ~ 4.5m、X 轴附近 0.5m 内。

燃料蒸汽浓度的空间分布见图 7，反映了云雾在后期强的蒸发作用。估计约有 6% 的燃料变为蒸汽。

## 4 结 论

在 6、15、40、100、150 和 250kg 等 6 个燃料质量等级 FAE 装置的爆炸抛撒实验基础上，分析了云雾的阶段特性，发现了云雾膨胀的相似关系。建立了近场的一个简化解，对远场的云雾膨胀作了二维轴对称数值模拟。从测试数据发现，对于圆柱形钢壳结构 FAE 装置，比药量在 1.0% ~ 1.4% 范围，对云雾膨胀影响较小，且形成的云雾的形状是相似的；云雾半径是装置半径的 40 ~ 50 倍，云雾体积是装置体积的约  $10^4$  倍。15kg 装置测试结果显示，近场阶段云雾体积约占云雾最终体积的 16%。远场的模拟显示，在半径 2m 以内，是无燃料区，最大浓度区域分布于半径 3 ~ 4.5m 处；燃料蒸汽浓度分布显示，云雾膨胀后期

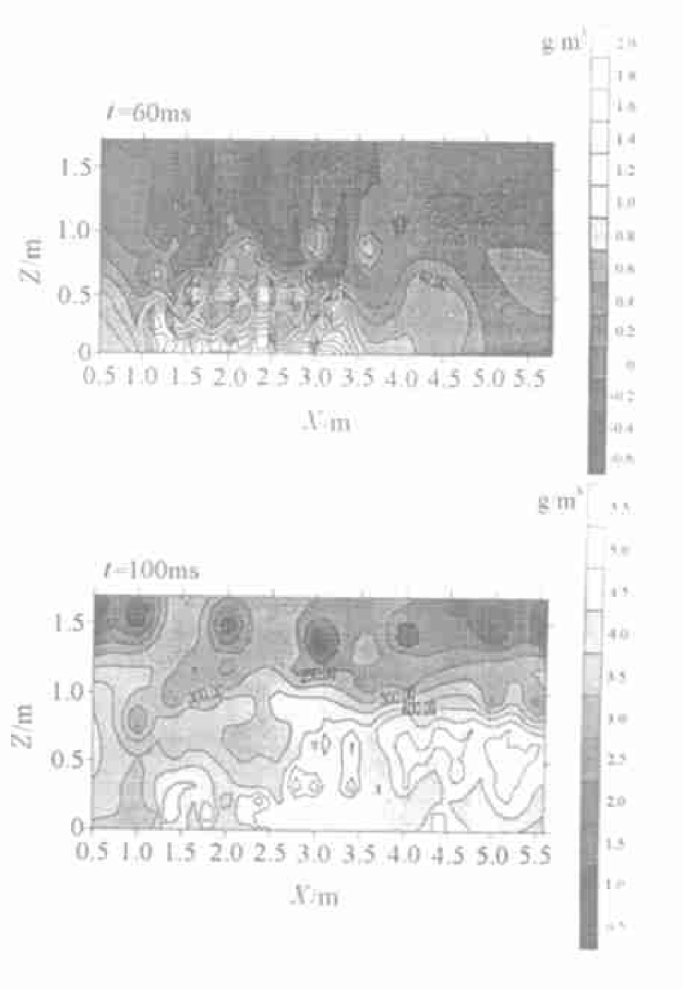


图 7 燃料蒸汽浓度的空间分布

Fig.7 The contour of concentration of fuel evaporation

蒸发作用强烈,约有 6%的燃料蒸发。

以上结果限于圆柱形钢壳结构 FAE 装置及其相关条件。由于近场过程的复杂性及了解的欠缺,须作进一步的探索,以便深入认识抛撒机理及为远场提供合理的初始条件。

### 参考文献:

- [1] Abrahamson G R, Gates R W, Muller G M. Explosive Dissemination [ R ] .SRI Technical Report No 18, 1967.
- [2] Buck D E. The Explosive Dissemination of Liquids of Low Volatility [ R ] .Army Chemical Warfare Laboratories, AD312068, 1959.
- [3] Zabelka R J, Smith S H. Explosively Dispersed Liquids: Dispersion Model [ R ] .NWL TP4702, AD 863268, 1969.
- [4] Rosenblatt M, Eggum G E, Kryenhagen K N. DICE-FAE Analysis of Fuel Dispersal and Detonation from a Fuel-air-explosive Device [ R ] .AFATL-TR-76-33, 1976.
- [5] Ivadaev A I, Kutushev A G, Nigmatulin R I. Numerical Investigation of the Expansion of a Cloud of Dispersed Particles Drops under the Influence of an Explosion [ J ] .Fluid Dynamics, 1982, 17: 69—74.
- [6] Gardner D R. Near-field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-air-explosives [ R ] .SAND90-0686, 1990.
- [7] Glass M W. Far-field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-air-explosive Devices [ R ] .SAND90-0528, 1990.
- [8] 刘家骢, 薛社生, 张正才, 等. 液体燃料的爆炸抛撒和 FAE 云雾特性研究 [ J ] .爆炸与冲击, 1997, 17(增刊): 1—6.
- [9] 薛社生. 液体燃料的爆炸抛撒研究 [ D ] .南京: 南京理工大学, 1997.
- [10] 薛社生. 液体燃料爆炸抛撒近场阶段研究 [ J ] .南京理工大学学报, 1997, 21(4): 333—336.
- [11] Grady D E. Local Inertial Effects in Dynamic Fragmentation [ J ] .J Appl Phys, 1982, 53(1): 322—325.
- [12] 薛社生, 刘家骢, 朱广圣, 等. 液体燃料空气炸药形成的数值模拟 [ J ] .爆炸与冲击, 1998, 18(4): 296—302.

## Experimental and Numerical Investigation on Explosive Dispersal and Cloud Forming

XUE She-sheng<sup>1</sup>, LIU Jia-cong<sup>2</sup>, QIN Cheng-sen<sup>1</sup>, PENG Jin-hua<sup>2</sup>

(1. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;*

2. *Chemical Engineering School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China* )

**Abstract:** In order to design the setup of cloud detonation properly, experimental and numerical investigation on fuel-air-explosive and explosive dispersal are carried out. A lot of important data for 6 ~ 250kg series FAE set-up are obtained. By analyzing the experimental data, the scaling rule of the expansion of FAE cloud is found, and the characteristics of both near field and far field are studied. A simplified analytical model is used to describe the expansion of fuel of near field, and numerical method is used to study the physical characteristics inside the cloud. The concentration of fuel and their evaporation is obtained.

**Key words:** fuel air explosive; explosive dispersal; cloud