

文章编号: 1001-1455(2004)03-0240-05

竖直下抛液体燃料爆炸抛撒的初步数值研究*

席志德, 解立峰, 刘家骢, 李剑锋

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 对具有轴向初始速度即竖直下抛液体燃料的爆炸抛撒云雾形成过程进行了数值研究。近场的数据来自丁珏等的工作, 以此数据作为远场初始参数。远场是燃料液滴与空气、燃料蒸汽、不同尺寸的液滴颗粒组成的多相体系之间的相互作用的过程。液滴的直径比较小, 把液滴看成连续介质, 且相互作用只考虑液滴的蒸发、破碎、碰撞聚合。轴向初速为 0(静爆)时计算结果与实验结果相吻合。这说明本模型可以模拟爆炸抛撒云雾的形成过程, 进而可以预估高速运动下云雾的形成过程。用以上模型计算了竖直下抛初速为 100m/s、装填 5kg PO 的 FAE 装置的爆炸抛撒过程。所得的结果表明, 100m/s 的初速将影响云雾的最终形状及云雾内部的浓度分布。

关键词: 爆炸力学; 爆炸抛撒; 数值模拟; 燃料空气炸药; 云雾场; 液体燃料

中图分类号: O389 国标学科代码: 130*35 文献标志码: A

1 引言

云爆战斗部利用中心装药的爆炸将内装燃料向外抛撒并与空气混合形成燃料和空气的混合物, 再利用二次引信引爆所形成的云团, 对目标造成毁伤。这种由燃料和空气组成的混合物称为燃料空气炸药, 简称为 FAE (Fuel Air Explosive)。本文中主要涉及具有轴向初速液体燃料的爆炸抛撒。

液体燃料爆炸抛撒所用的典型装置, 即 FAE 装置, 如图 1 所示。关于 FAE 装置处于静止状态下的实验及数值研究表明, 在静止状态下的云雾呈一个中空圆柱状^[1]。但是, 用于高速航弹、火箭和导弹的 FAE 战斗部总是具有一定的初始速度。因此认识初始速度对云雾形成的影响, 对高速云爆武器的发展具有重要意义。

燃料爆炸抛撒过程持续时间短, 目前用实验的方法很难得到详细的内部云雾场参数, 可以用数值计算的方法获得。公开的文献仅涉及在静止状态下的爆炸抛撒, 本文中将对高速运动下的爆炸抛撒作初步探索。

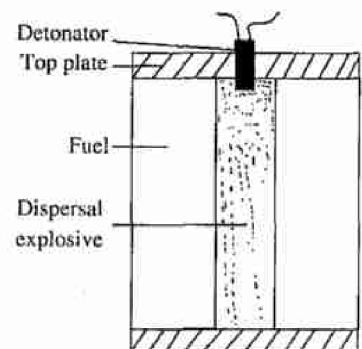


图 1 FAE 装置示意图

Fig. 1 Schematic of the FAE device

2 理论模型

静止液体爆炸抛撒过程一般分为近场和远场两阶段。由文献[2~3]知近场过程为: 中心管装药瞬时爆轰产生高温高压气体, 在高温高压气体推动下外层液体形成一个连续的液体环, 随着爆轰产物膨胀, 液体环变薄, 最终破碎形成液滴群, 因此可以用一维轴对称气相模型来描述此过程。远场是空气、蒸汽、液滴组成的多相体系的运动并存在相互作用的过程。文献[2~3]将此过程按轴对称问题处理, 坐标原点建立在弹体的中心, 计算区域取实际流场的 1/4。具有较高初始速度的爆炸抛撒过程比以上过程复杂。此时, 颗粒高速运动导致液滴与气相及液滴与液滴之间的相互作用加剧, 湍流效应加剧, 从而导致液滴破碎及碰撞聚合效应加剧, 以及蒸发速率提高。

* 收稿日期: 2003-04-07; 修回日期: 2004-03-02

基金项目: 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室开放基金项目(200101)

作者简介: 席志德(1975—), 男, 硕士。

为了简化问题,本文中只考虑以一定速度竖直下抛的燃料爆炸抛撒。对颗粒相作拟流体处理^[4],也分为近场和远场。由于近场阶段持续时间短,轴向初速导致的轴向变形可忽略不计,并认为近场的物理过程仍为液体环径向膨胀,并采用文献[2~3]的一维轴对称模型描述。对远场阶段,若将坐标系建立在弹体上则为非惯性系,会为后面的推导带来一些困难。因而本文中建立的柱坐标系是以近场结束时液体环上表面的中心为坐标原点, z 轴向下, r 为径向。认为所有的云雾参数沿环向具有相同的值。这样,本问题简化成二维轴对称问题。液滴颗粒较小,可忽略其浮力。假设相同粒径的液滴为同相,且具有相同的热力学参数。假设气相传给液滴的热量全部用于液体蒸发,则远场阶段所有的液滴相的温度保持不变,因而不必给出能量方程。

3 基本方程

3.1 控制方程

气相控制方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \theta) + \nabla \cdot (\rho_g \theta \mathbf{V}_g) &= S \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \theta \mathbf{V}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \theta \mathbf{V}_g \mathbf{V}_g) &= -\theta \nabla p + \nabla \cdot \dot{\mathbf{P}} - \sum \mathbf{F}_{lk} + \theta \rho_g \mathbf{a} + \sum (S_{lk} \mathbf{V}_{lk}) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \theta E) + \nabla \cdot (\rho_g \theta \mathbf{V}_g E) + \nabla \cdot (p \theta \mathbf{V}_g) &= \\ -p \frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T_g) - \sum (\mathbf{F}_{lk} \cdot \mathbf{V}_{lk}) - \sum Q_{lk} + h_s \sum S_{lk} + \theta \rho_g (\mathbf{a} \cdot \mathbf{V}_g) \end{aligned}$$

组分方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \theta Y) + \nabla \cdot (\rho_g \theta Y \mathbf{V}_g) = \nabla \cdot (\rho_g \theta D_g \nabla Y) + \sum S_{lk}$$

颗粒群第 k 组分控制方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \theta_{lk}) + \nabla \cdot (\rho_l \theta_{lk} \mathbf{V}_{lk}) &= -S_{lk} + m_{bk} + m_{zk} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \theta_{lk} \mathbf{V}_{lk}) + \nabla \cdot (\rho_l \theta_{lk} \mathbf{V}_{lk} \mathbf{V}_{lk}) &= -\theta_{lk} \nabla p + \nabla \cdot \dot{\mathbf{P}}_{lk} + \mathbf{F}_{lk} - (S_{lk} - m_{bk} - m_{zk}) \mathbf{V}_{lk} + \rho_l \theta_{lk} \mathbf{a} \\ \theta + \sum \theta_{lk} &= 1, \quad S_{lk} = n_{lk} m_{lkk}, \quad S = \sum S_{lk} \\ Q_{lk} = n_{lk} Q_{lkk}, \quad Q_{lkk} &= \pi d_{lk} Nu \lambda (T_g - T_{lk}) \ln(1+B)/B, \quad B = c_1 (T_g - T_l)/L \end{aligned}$$

式中: S 为液滴因蒸发变成气相的质量;阻力公式采用文献[5~6]中的表达式; c_1 为液体定压比热; θ 、 θ_{lk} 分别为气相和第 k 组分液滴群的体积分数; \mathbf{F}_{lk} 为单位体积内气体与第 k 组分液滴群间的作用力; $\dot{\mathbf{P}}$ 、 $\dot{\mathbf{P}}_{lk}$ 为气相和液相的粘性应力张量; Q_{lk} 为单位时间、单位体积内气体向第 k 组分液滴群传递的热量; λ 为气体的导热系数; D_g 为燃料蒸汽在气相中的扩散系数; Y 为燃料蒸汽所占的质量分数; m_{lkk} 为单位时间、单位体积内第 k 组液滴群单个液滴蒸发损失的质量; m_{bk} 为单位时间、单位体积内第 k 组液滴群发生破碎效应所损失的质量; m_{zk} 为单位时间、单位体积内第 k 组液滴群与其他液滴群发生相碰聚合作用损失或增加的质量。

3.2 补充方程

燃料液滴的蒸发,采用球形对称模型。由假设知,气相传给液相的热量全部用于液滴的蒸发,即蒸发模型为

$$m_{lkk} = Q_{lkk}/L$$

液滴破碎模型为

$$m_{bk} = \begin{cases} -\frac{m_k}{t_b} & t < t_b \\ 0 & t \geq t_b \end{cases} \quad t_b = \frac{Td_1}{v \sqrt{\rho_g/\rho_l}}$$

式中: T 为取决于液相物质的量纲一的常数, v 为液滴与气体之间的相对速度, m_k 为第 k 组分液滴群的总质量。液滴碰撞聚合模型采用文献[2]中的模型。

将气相当成理想气体考虑。液相本构关系也采用线性化假设。

4 初始、边界条件及稳定性条件

对装有 5kgPO 燃料的 FAE 装置在初速为 100m/s 竖直下抛的条件下进行了数值计算。计算区域如图 2 所示。径向区域为 7m, 轴向为 12m。空间步长为 $\Delta r = 0.021m$, $\Delta z = 0.038m$ 。差分格式采用 MacComack 格式。

初始条件见文献[3]。计算中考虑的颗粒尺寸为: 大颗粒直径 5mm, 小颗粒直径为 1mm。由近场的结果得出每个网格上的颗粒数及颗粒的体积, 并由此确定每个网格上的体积分数 θ_{lk} 。由 θ_{lk} 确定气相的体积分数 θ 。因上边界与大气接触, 故采用大气初始条件为上边界条件。右边界和下边界均取下游边界条件。左边界为

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial \rho_g}{\partial r} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \frac{\partial v_{gz}}{\partial r} = \frac{\partial v_{lkz}}{\partial r} = 0, \frac{\partial v_{gr}}{\partial r} = \frac{\partial v_{lkr}}{\partial r} = 0$$

稳定性条件为

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{|v_{gr}|}{\Delta r} + \frac{|v_{gz}|}{\Delta z} + c \sqrt{\frac{1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}$$

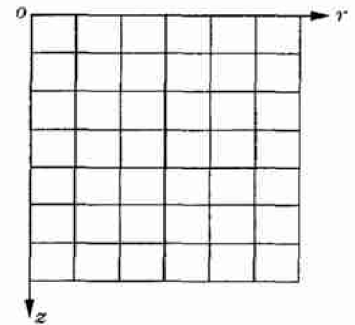


图 2 计算区域示意图
Fig. 2 Computational domain

5 数值结果与分析

图 3 给出不同时刻云雾外边界。从图 3 可以看出云雾发展过程及云雾外形。将每一条曲线绕 z 轴旋转一圈便得此时刻云雾的外形。结果表明, 在高速运动下爆炸抛撒形成的云雾与静爆时有所不同。云雾呈上大下小的圆台状。

由于无高速运动 FAE 装置爆炸抛撒云雾的实验数据, 只能同“静爆”抛撒的云雾数据进行对比以考核本方法。图 4 给出了计算的“静爆”抛撒的云雾边界尺寸与时间的关系, 同时给出了实验的结果。可以看出本文计算结果与实验数据相吻合。这说明用本模型可以描述云雾的形成过程。

图 5 为初速为 100m/s 竖直下抛燃料液滴在不同 z 轴处云雾浓度沿径向分布, 在左边图中 ($z = 0.38m$), 由于靠近初始网格, 颗粒进入网格的数量小于离开的数量, 所以颗粒浓度变化是由大到小。而在右图中 ($z = 0.76m$), 开始一段时间内颗粒进入此网格的数量大于离开此网格的数量, 一定时间后进入的数量小于离开的数量, 故其浓度变化有一个由小到大, 再由大变小的过程。

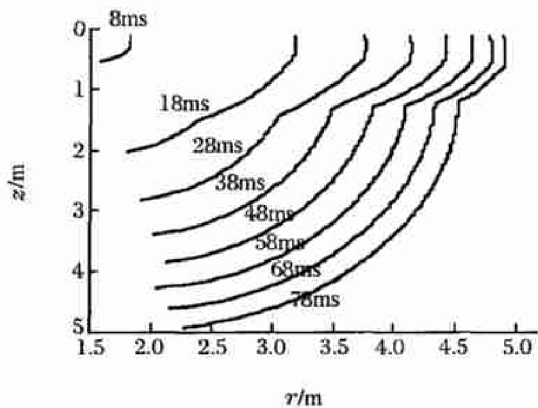


图 3 不同时刻云雾边界形状

Fig. 3 History of boundary of the cloud propagation

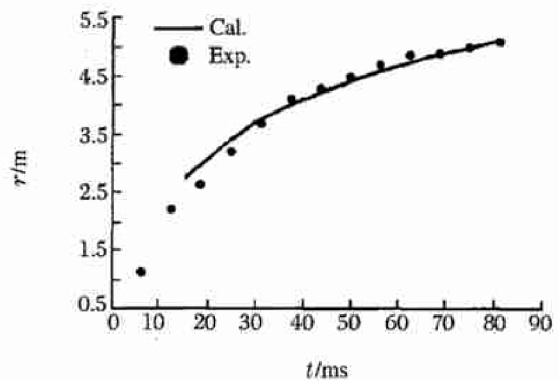


图 4 静爆条件下的计算与实验的对比

Fig. 4 Comparison of different results obtained with zero initial longitudinal velocity

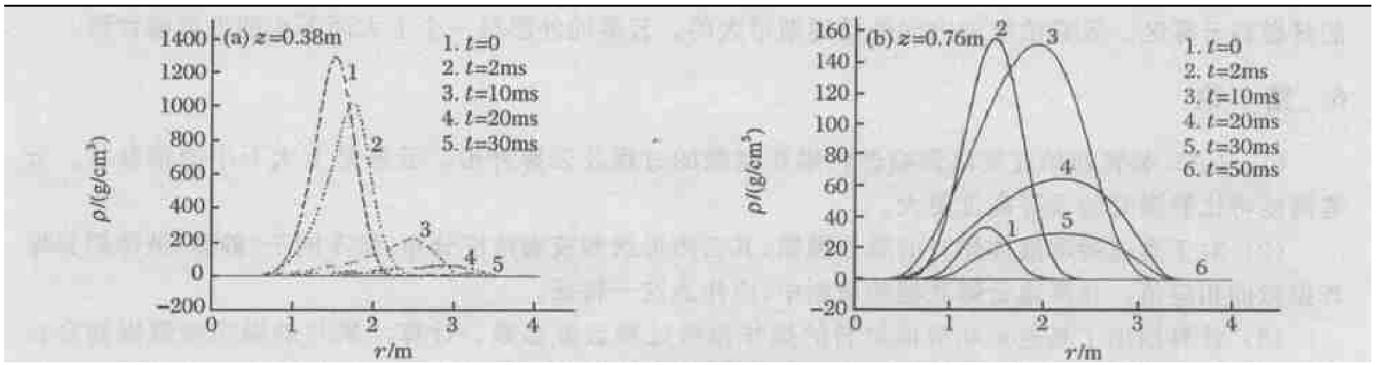


图 5 不同时刻云雾浓度在不同轴向处沿径向分布

Fig.5 Cloud concentration distribution along the radius at different z in different time

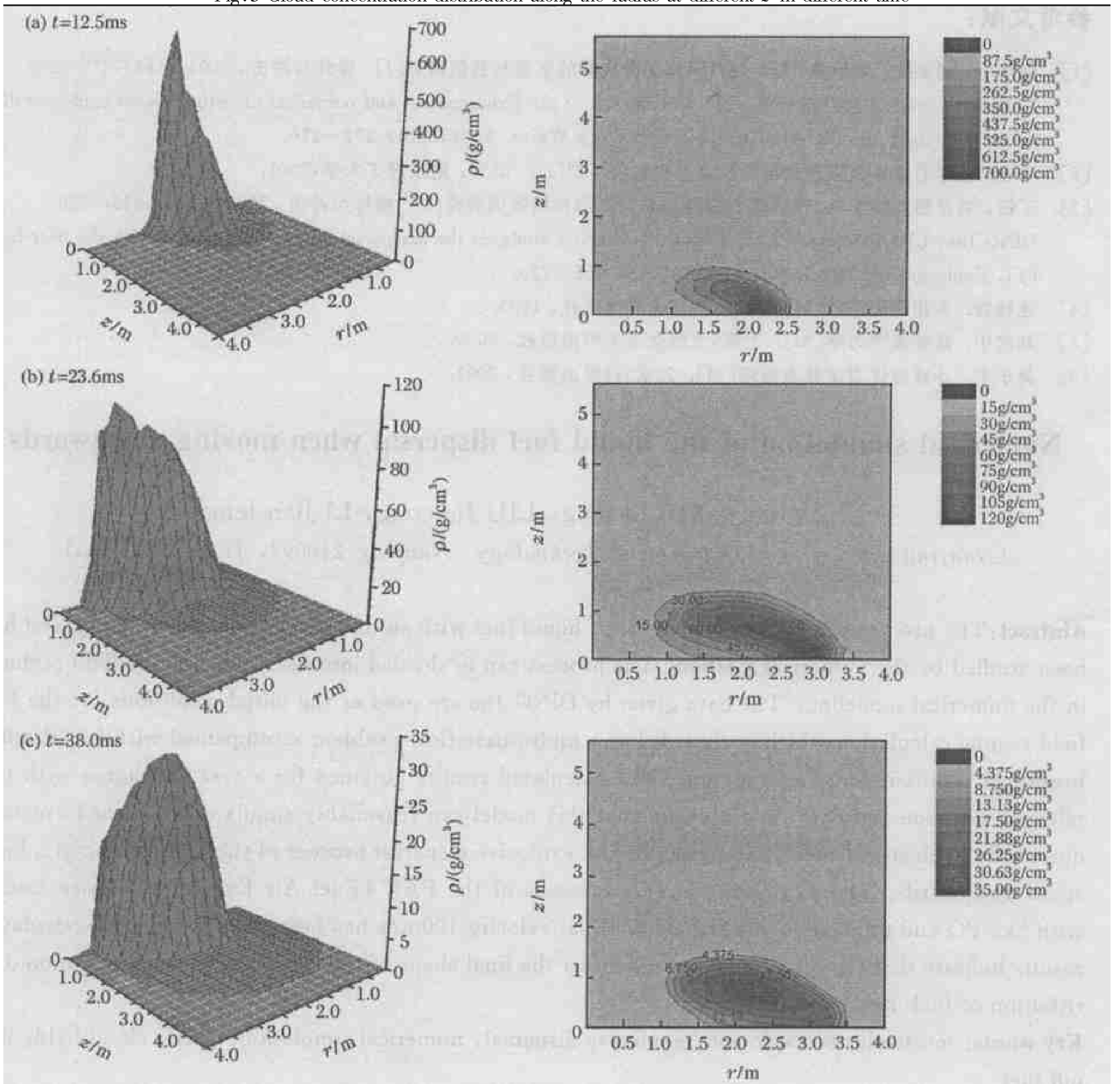


图 6 不同时刻云雾浓度的空间分布和等位图

Fig.6 The profile and contours for the cloud concentration in different time

图 6 给出不同时刻云雾浓度的空间分布及等位图，从中可以看出云雾边界的发展过程及内部的浓

度分布。从等位图可以看出,靠近 z 轴的流场中心区域,云雾的浓度为 0。这是由空气和爆轰气体组成的贫燃料云雾区。云雾浓度由内向外是逐渐增大的。云雾的外形呈一个上大而下小的近似锥台形。

6 结 论

(1) FAE 装置初始速度将影响燃料爆炸抛撒的过程及云雾外形。云雾呈上大下小的锥台状。云雾高度将比静爆时的云雾高度更大。

(2) 对于高速运动液体燃料的爆炸抛撒,其云团形状和液滴浓度分布,将不同于“静态”液体燃料爆炸抛撒的相应值。在高速云爆武器的研制中,应注意这一特征。

(3) 计算给出了高速运动液体燃料的爆炸抛撒过程云雾参数。计算结果与静爆实验数据吻合良好,但对高速运动 FAE 爆炸抛撒的计算给予验证需作进一步的工作。

参考文献:

- [1] 薛社生, 刘家聪, 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.
XUE She-sheng, LIU Jia-cong, QIN Cheng-sen, et al. Experimental and numerical investigation on explosive dispersal and cloud forming[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4):272—276.
- [2] 丁钰. 液体的爆炸抛撒理论模型及全过程数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2001.
- [3] 丁钰, 刘家聪, 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.
DING Jue, LIU Jia-cong, PENG Jin-jua. Numerical study on the explosively dispersed liquid fuel in the near-field[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3):215—220.
- [4] 连桂森. 多相流动基础[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989.
- [5] 刘应中. 高等流体力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [6] 吴子牛. 计算流体力学基本原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

Numerical simulation of the liquid fuel dispersal when moving downwards

XI Zhi-de^{*}, XIE Li-feng, LIU Jia-cong, LI Jian-feng

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The process of explosive dispersal of liquid fuel with an initial vertically downward speed has been studied by the numerical method. The process can be divided into near-field and far-field regimes in the numerical modeling. The data given by DING Jue are used as the initial conditions for the far-field regime calculation which is regarded as a multiphase flow problem accompanied with fuel droplet breaking, vaporizing and aggregating. The calculated results obtained for a rest fuel agree with the relevant experimental data, and indicate that this model can reasonably simulate the cloud formation due to the explosive dispersal and describe the explosive dispersal process of the fuel moving at a high speed downwards. The explosive dispersal process of the FAE (Fuel Air Explosive) device loaded with 5kg PO and pitched downward at an initial velocity 100m/s has been calculated. The calculated results indicate that the initial velocity can affect the final shape of the cloud and the concentration distribution of fuel inside the cloud.

Key words: mechanics of explosion; explosive dispersal; numerical simulation; FAE; cloud field; liquid fuel

* Corresponding author: XI Zhi-de

E-mail address: xielifeng319@etang.com

Telephone: 025-84315526