

液体燃料空气炸药形成过程的数值模拟*

薛社生 刘家聪 朱广圣 彭金华

(南京理工大学 南京 210094)

摘要 对液体燃料的爆炸抛撒形成的云雾运动作了数值模拟。建立了多相流模型与算法,给出了云雾区的速度场与燃料浓度分布。云雾的外形变化与实验结果符合较好。

关键词 云雾 多相流 任意拉格朗日-欧拉法

中图法分类号 O 389

1 引言

液体燃料的爆炸抛撒,是FAE(Fuel-Air-Explosive)技术中的重要问题。液体燃料在爆炸作用下,通过破裂与碎解,和空气充分混合,形成可爆炸性云雾,这一过程的研究工作,国外文献有所报道^[1-3],而国内目前尚不多见。

云雾的爆炸抛撒形成过程,按照爆炸推动力与气动阻力对液体燃料的作用的大小对比,分为近场与远场两个阶段。近场指爆炸作用力远大于气动阻力这一阶段,而远场则指气动阻力支配燃料运动这一阶段。作者在大型程序KIVA-II基础上,作了合理的改进,对云雾远场阶段的运动作了数值模拟,给出了一些重要的结果。

2 多相流模型

云雾是空气、液体燃料与其蒸发而成的燃料蒸汽的混合物。在多相流模型中,对液相,采用分散液滴模型,用Lagrange法,考察单个液滴沿其轨道上的速度、温度、尺寸变化。

2.1 气相控制方程

气相变量有:速度 \mathbf{u} , 压力 p , 密度 ρ , 温度 T , 湍流脉动速度 \mathbf{u}' , 于是方程如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p - \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \nabla : \mathbf{e} + \mathbf{F}^s + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} I) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{J} + \rho \dot{X} + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s \quad (3)$$

式中: $\dot{\rho}$ 是质量源项, k 、 X 分别是湍流动能和湍流动能耗散率; $\mathbf{e} = -\frac{1}{2} |\nabla \cdot \mathbf{u}| + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T + \lambda \nabla \cdot \mathbf{u}$, μ 、 λ 分别为第一和第二粘性系数, 单位矩阵, \mathbf{F}^s 为动量源项, I 为比内能(不包括化学能), \mathbf{J} 为热通量矢量, $\mathbf{J} = -k \nabla T$, \dot{Q}^s 为相间相互作用源项。对湍流的描述, 增加关于湍动能 k

* 国家教委高校博士点专项科研基金项目。

薛社生: 男, 1966年11月生, 博士后。

1997-03-03收到原稿, 1997-07-07收到修改稿。

及其耗散率 X 的两个输运方程

$$\frac{\partial(\frac{dk}{dt})}{\partial t} + \nabla \cdot (d\mathbf{u}k) = - \frac{2}{3} dk \nabla \cdot \mathbf{u} + \epsilon \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\frac{-\nabla k}{p_{rk}} \right] - dX + w^s \quad (4)$$

$$\frac{\partial(dX)}{\partial t} + \nabla \cdot (d\mathbf{u}X) = - \left(\frac{2}{3} c_1 - c_3 \right) dX \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\frac{(-)}{p_{rx}} \nabla X \right] + \frac{X}{k} \left[c_1 \epsilon \nabla \cdot \mathbf{u} - c_2 dX + c_3 w^s \right] \quad (5)$$

参数值 $c_1, c_2, c_3, p_{rk}, p_{rx}$ 是常数, 取标准值, w^s 表示与液滴相互作用的相关项
状态方程取理想气体方程

$$p = dRT \quad (6)$$

2.2 液滴控制方程

液滴的加速度这样给出

$$\mathbf{F} = \frac{3}{8} \frac{d}{dt} \frac{|\mathbf{u} + \mathbf{u}' - \mathbf{v}|}{r} (\mathbf{u} + \mathbf{u}' - \mathbf{v}) c_D + \mathbf{g} \quad (7)$$

其中: d, \mathbf{v}, r 分别为液滴密度、速度、半径, 阻力系数 c_D 这样给出^[4]

$$c_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} \left(1 + \frac{1}{6} Re_d^{2/3} \right) & Re_d < 1000 \\ 0.42 & Re_d > 1000 \end{cases}$$

其中, $Re_d = \frac{2d|\mathbf{u} + \mathbf{u}' - \mathbf{v}|r}{\nu}$, \mathbf{u}' 是气体湍流脉动速度。

液滴半径变化率 R 由 Frossling 关系^[4]给出

$$R = \frac{\Phi(T)}{2d_r} \frac{y^m - y_1}{1 - y_1} sh_d \quad (8)$$

其中: sh_d 是质量传输的 Sherwood 数, y^m 是在液滴表面处的燃料蒸汽质量分数, $y_1 = d_1/d$ Φ 是燃料蒸汽在空气中的弥散。为了描述两相间的相互作用, 定义一个液滴数密度分布函数 $f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, r, T_d, t)$ 于是液体的体积分

$$Q = \int f \frac{4}{3} \pi r^3 dv dr dT_d \quad (9)$$

由分布函数 f 随时间的变化, 有

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f\mathbf{v}) + \nabla_{\mathbf{v}} \cdot (f\mathbf{F}) + \frac{\partial}{\partial r} (fR) + \frac{\partial}{\partial T_d} (fT_d) = f_{bu} \quad (10)$$

其中: \mathbf{F}, R, T_d 分别为单个液滴的速度、半径及温度的时间变化率。 f_{bu} 为破碎源项。

气相方程中各源项表示如下

$$\begin{aligned} d_s &= - \int f d_1 4\pi r^2 R dv dr dT_d \\ \mathbf{F}^s &= - \int f d_1 \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \mathbf{F} + 4\pi r^2 R \mathbf{v} \right) dv dr dT_d \\ Q^s &= - \int f d_1 \left\{ 4\pi r^2 R [I_1(T_d) + \frac{1}{2} (\mathbf{v} - \mathbf{u})^2 + \frac{4}{3} \pi r^3 [c_1 T_d + \mathbf{F} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{u} - \mathbf{u}')]] \right\} dv dr dT_d \\ \dot{W}^s &= - \int f d_1 \frac{4}{3} \pi r^3 \mathbf{F} \cdot \mathbf{u}' dv dr dT_d \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $F' = F - g$, W^s 是负值, 是湍流涡对液滴做的功。

3 初始条件与边界条件

对云雾的二维轴对称运动, 取以圆柱形 FAE 装置几何中心为原点, 建立坐标系, z 轴取在装置的对称轴上, x 轴方向代表云雾膨胀的径向。由对称性, 只示出计算域的 1/4 如图 1 所示,

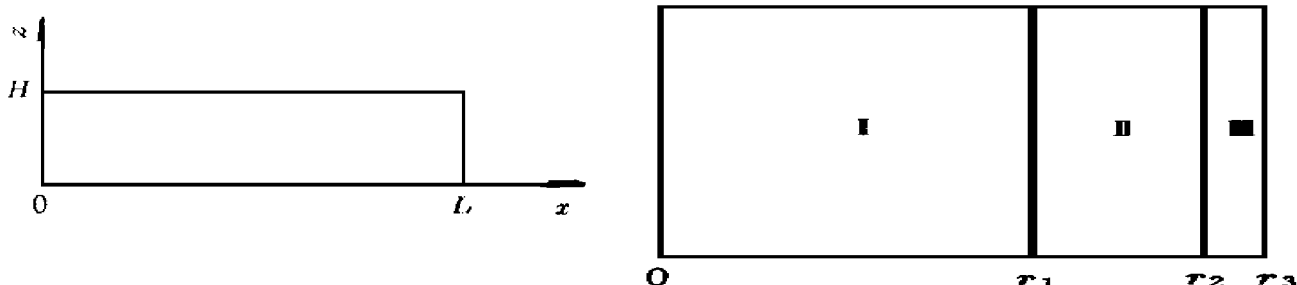


图 1 计算域

Fig 1 Computational domain

取长 $L = 20\text{m}$, 高 $H = 5\text{m}$ 的矩形。考察 15kg FAE 装置云雾的运动。从该量级装置云雾膨胀的高速摄影记录, 以云雾膨胀的加速运动终止, 减速运动开始为依据, 可知远场阶段起始于中心药爆轰后 8ms 半径达 2m 左右时, 此时图 2 中

I : 爆轰产物气体; II : 云雾主体; III : 云雾前沿

I : Burster detonation products

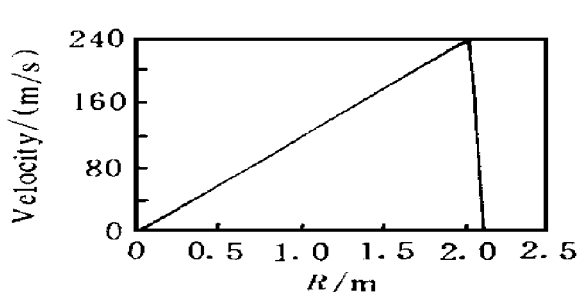
II : Main body of fuel charge

III : Leading edge of fuel charge

图 2 云雾初始构形图

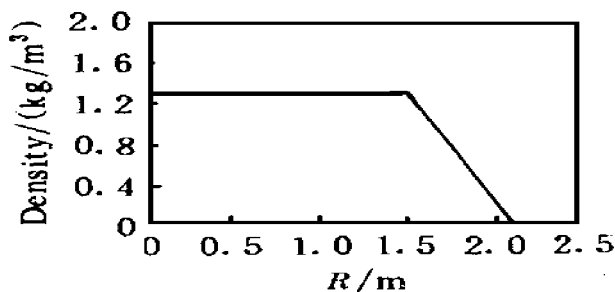
Fig 2 Initial configuration for FAE cloud

$r = 2\text{m}$ 云雾的最大径向速度 240m/s , 最大轴向速度 25m/s 。按速度的线性分布假设与浓度的均匀分布假设, 初始条件如图 3 液滴的初始平均尺寸按文献 [5] 中的破碎理论取为



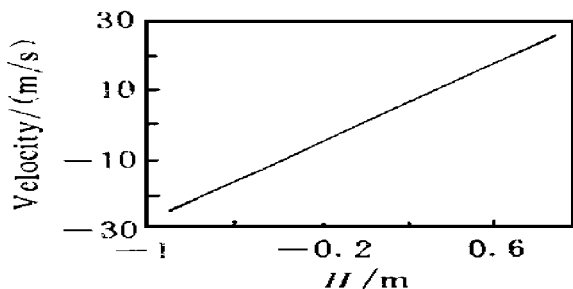
(a) 气体与燃料径向速度分布

(a) Gas and fuel radial velocity profile



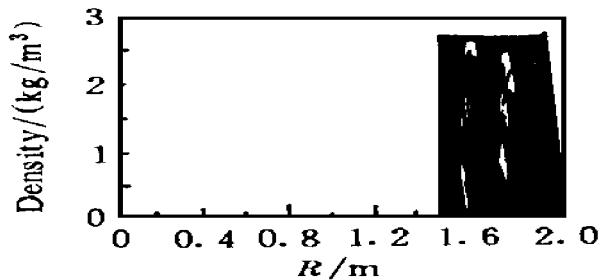
(b) 气体密度分布

(b) Gas density profile



(c) 气体与燃料轴向速度分布

(c) Gas and fuel axial velocity profile



(d) 燃料浓度分布

(d) Fuel concentration profile

图 3 参量的初始分布

Fig 3 Initial distribution of parameters

0.4m 在 x 轴和 z 轴上的边界取对称轴边界条件。

4 数值求解方法

对控制方程在时间和空间上离散化, 基于任意拉格朗日-欧拉法 (ALE) 求解气相方程。第一步作显式拉格朗日计算, 第二步对压力项作隐式迭代, 第三步重新划分网格, 在 Euler 网格上重新分配各参量值。液滴数密度分布函数 f 也被离散化, 液滴被沿轨道跟踪计算。详细过程参见文献 [4]。

5 计算结果

装填 15kg 环氧丙烷的 FAE 装置, 爆炸抛撒所成云雾的运动, 数值计算的结果如下:

5.1 气相速度分布

速度场如图 4 所示。在云雾膨胀过程中, 径向速度沿 x 轴及其附近 (高 0.3m) 速度最大; 在 50ms 后, 其最大值小于 20m/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, 而产生了气体回流。30ms 后轴向最大速度不超过 12m/s。在 x 轴上方高 0.4~1.0m 的区域, 在 30ms 和 60ms 时出现了气体的径向回流, 并产生涡旋, 这使得燃料滴能较长时间地驻留在这一区域中, 半径为 3~5m 的范围内。

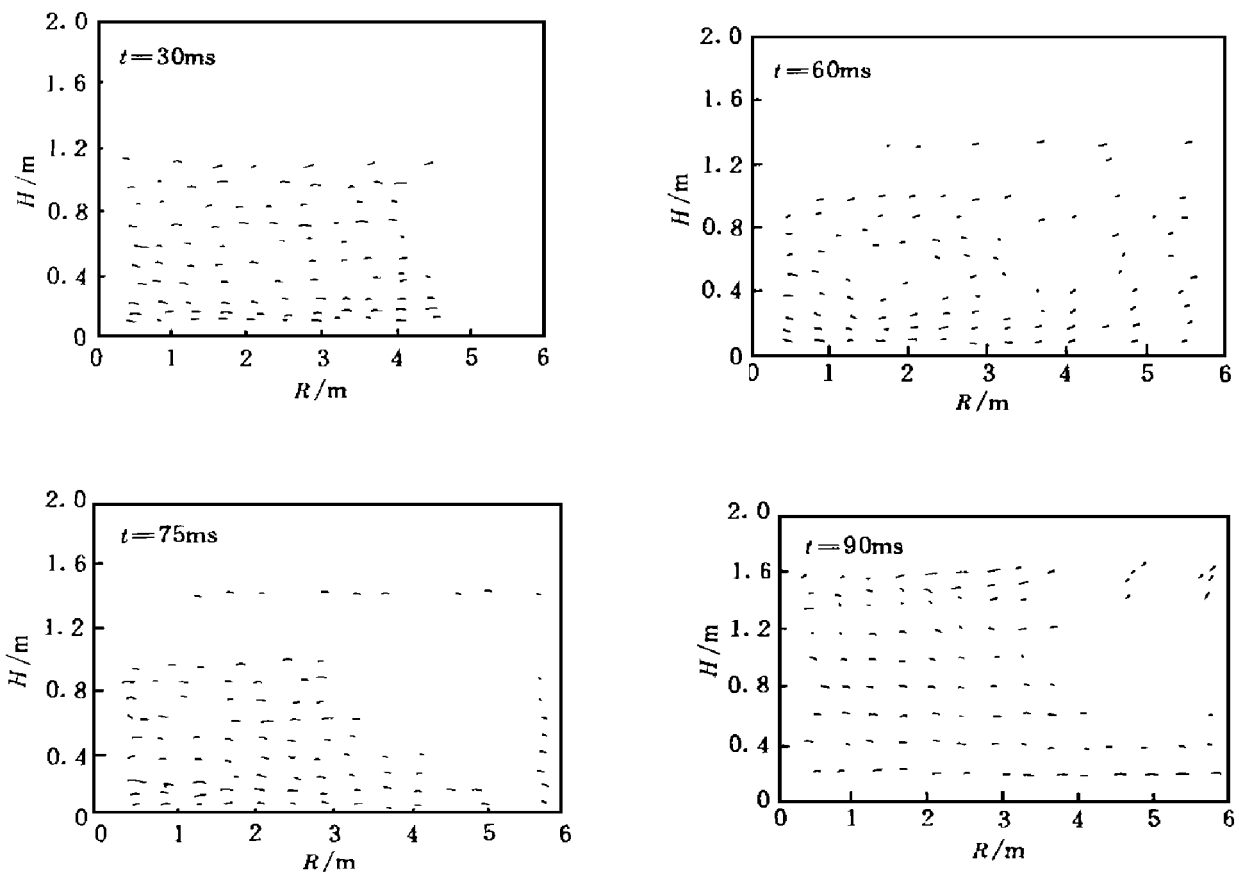


图 4 气相速度场

Fig. 4 Gas phase velocity fields

5.2 燃料浓度分布

在云雾膨胀过程中, 燃料浓度从 15ms 到 100ms 沿 x 轴的分布如图 5 图 5(a) 中随时间的发

展, 浓度曲线峰值下降而前移, 曲线宽度增大; 图 5(b)中浓度曲线由 60ms 时一个明显的峰值变成 75ms 和 100ms 时的两个明显峰值结构, 75ms 后峰值不再前移, 而在后面又形成一峰值。这
表明, 在 15~ 60ms 随着云雾的膨胀, 其宽度有较明显的增大; 而在 60ms 后, 燃料主要是在半径 2~ 6m 之间重新分配, 100ms 时后一峰值的形成主要是附近气流回流的作用。

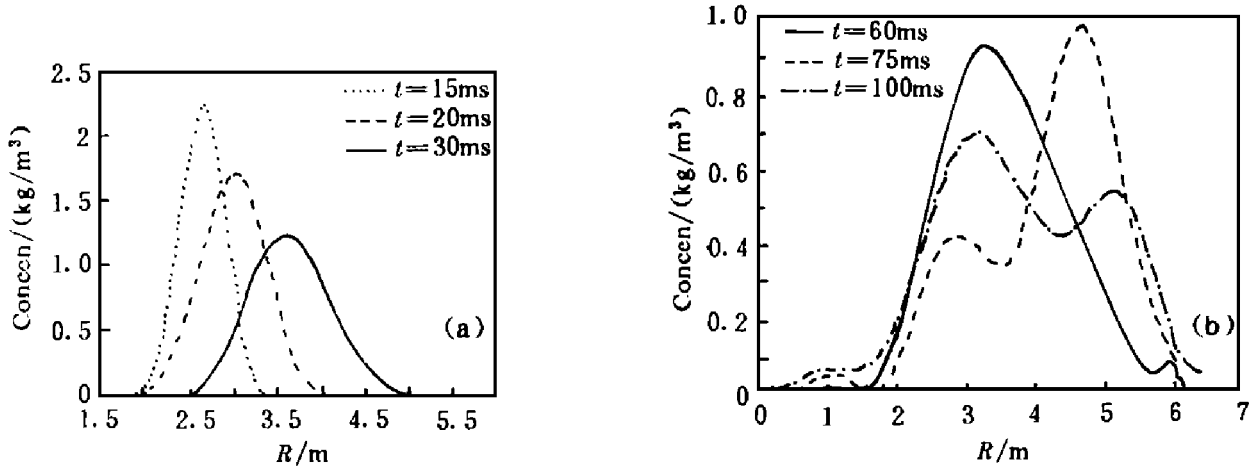


图 5 燃料浓度沿 x 轴的分布

Fig 5 Fuel concentration distribution along x-axis

燃料的空间分布如图 6所示。把 x 轴所在平面称作子午面。发现半径在 3~ 5m 内, 子午面上方约 0.8m 以内的区域是高燃料浓度区, 最大浓度为 0.00123g/cm³。且这一区域在 75ms 后浓度分布是较稳定的。

燃料主要以液滴形式存在, 其蒸汽量仅占总质量的 1% ~ 2%。

5.3 燃料液滴的尺寸分布

燃料液滴在运动中由于蒸发和破碎, 直径发生变化。计算结果显示, 75ms 后液滴不再发生破碎, 液滴的尺寸分布如图 7所示, 其中: a b c d 分别表示直径在 0.03~ 0.09cm, 0.01~ 0.03cm, 0.09~ 0.2cm, 大于 0.2cm 之间的液滴数量。可见直径 0.01~ 0.03cm 的液滴最多。

5.4 云雾外形变化

计算所得云雾轴向变化的高度-时间曲线和径向变化的半径-时间曲线, 与实验记录符合较好, 以半径-时间曲线为例, 最大半径误差约 0.5m, 如图 8

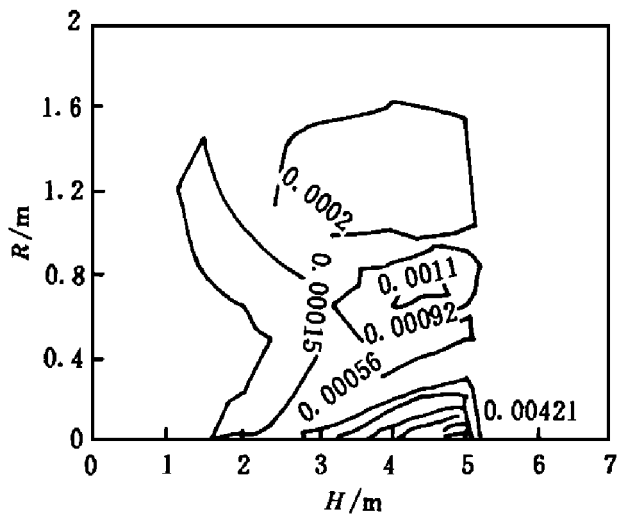


图 6 燃料浓度的空间分布

Fig 6 Fuel concentration distribution in space

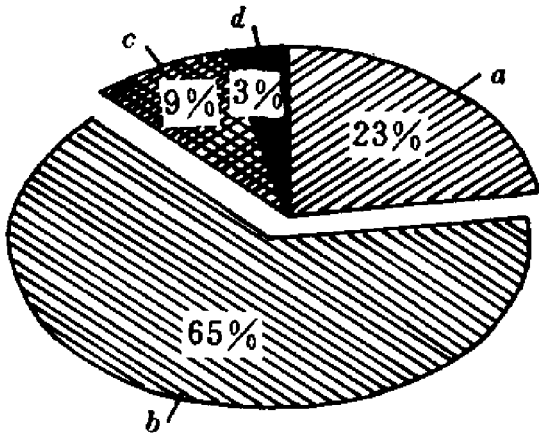


图7 液滴尺寸分布

Fig. 7 Liquid droplets size distribution

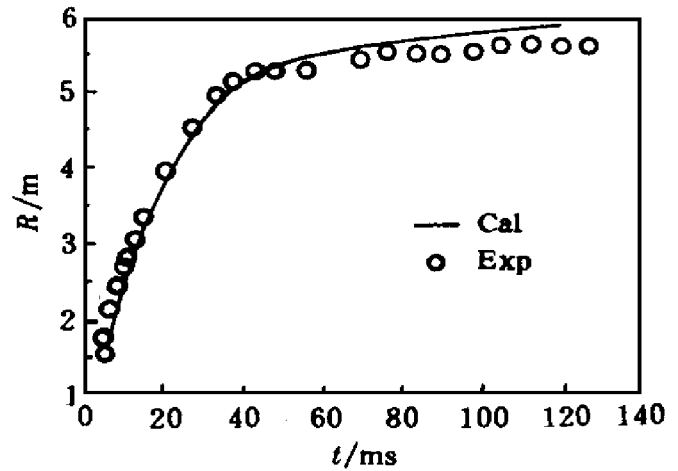


图8 半径-时间曲线对比

Fig. 8 Comparison for $R-t$ curves

6 结 论

(1) 以 KIVA-II 程序为基础, 按问题的需要对程序作了改造, 模拟了 15kg 级 FAE 装置燃料爆炸抛撒和云雾形成过程, 给出了云雾区内气相速度场、燃料浓度场、燃料颗粒(液滴)尺寸分布, 以及燃料的蒸发量等 FAE 云雾重要参数。通过计算所得的云雾膨胀 $R-t$ 曲线与实测 $R-t$ 曲线对比的一致性, 说明了计算结果的可靠性。

(2) 所采用的描述云雾的多相流模型中, 把气相和液相分别作为连续相和分散相处理, 充分考虑了液滴的破碎与蒸发, 以及气相湍流的作用对液滴运动的影响等。数值计算结果表明了该模型的有效性。

(3) 计算所用的初始条件是由实验测试得到的, 这说明, 对于 FAE 云雾的形成过程, 只要根据有效的实验数据, 确定计算所需的初始条件, 就能给出诸如 FAE 云雾中燃料的浓度分布和颗粒(液滴)的尺寸分布以及燃料的蒸发量, 而这些参数迄今为止尚无法进行实验测定。因此, 该问题的数值模拟对云雾的二次起爆以及爆轰性能研究, 都有着重要意义。

参 考 文 献

- 1 Gardner D R. Near-field Dispersion Modeling for Liquid Fuel-air-explosives SAND-90-0686 1990
- 2 Rosenblatt M. DICE-FAE Analysis of Fuel Dispersion and Detonation from a Fuel-air-explosive Device Air Force Ammunition Laboratory Report AFATL-TR-76-33 1976
- 3 Abrahamson G R, Gates R W, Muller G M, et al Explosive Dissemiation. Stanford Research Institute Technical Report, 1967, (18)
- 4 Amsteden A A, et al KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flow with Sprays LA-11560-MS
- 5 Gady D E. The Spall Strength of Condensed Matter. J Mech Phys Solids 1988 36 353~ 384

NUMERICAL SIMULATION FOR FORMING OF LIQUID FUEL-AIR-EXPLOSIVE

Xue Shesheng, Liu Jiacong, Zhu Guangsheng, Peng Jinhua

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

ABSTRACT Numerical simulation for the cloud movement during explosive dispersion of liquid fuel was carried out. The multiphase flow model and algorithm was setup. The velocity fields and distribution of fuel concentration are given. Computational cloud shape is compared with that obtained from experiments, they are in good accord.

KEY WORDS cloud, multiphase flow, ALE algorithm