

燃料抛撒成雾及其燃烧爆炸的光滑离散颗粒流体动力学方法数值模拟研究

陈福振 强洪夫 苗刚 高巍然

Numerical simulation of fuel dispersal into cloud and its combustion and explosion with smoothed discrete particle hydrodynamics

Chen Fu-Zhen Qiang Hong-Fu Miao Gang Gao Wei-Ran

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 110202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.110202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

充模过程中熔接痕的改进光滑粒子动力学方法模拟与预测

Simulation and prediction of the weld-line in the filling process using a corrected smoothed particle hydrodynamics method

物理学报.2015, 64(8): 080202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.080202>

非等温非牛顿黏性流体流动问题的修正光滑粒子动力学方法模拟

A corrected smoothed particle hydrodynamics approach to solve the non-isothermal non-Newtonian viscous fluid flow problems

物理学报.2014, 63(21): 210203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.210203>

风沙运动问题的 SPH-FVM 耦合方法数值模拟研究

Simulation of aerolian sand transport with SPH-FVM coupled method

物理学报.2014, 63(13): 130202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.130202>

谐振管内非线性驻波的有限体积数值算法

A finite volume algorithm for solving nonlinear standing waves in acoustic resonators

物理学报.2012, 61(19): 190203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.190203>

卫星平台复杂振动引起的光谱成像退化仿真研究

Simulation of imaging spectrometers degraded by satellite vibrations

物理学报.2012, 61(7): 070202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.070202>

燃料抛撒成雾及其燃烧爆炸的光滑离散颗粒流体动力学方法数值模拟研究*

陈福振^{1)†} 强洪夫¹⁾ 苗刚²⁾ 高巍然³⁾

1) (第二炮兵工程大学 601 室, 西安 710025)

2) (第二炮兵工程大学青州士官学院, 青州 262500)

3) (第二炮兵装备研究院一所 2 室, 北京 100085)

(2014 年 12 月 2 日收到; 2015 年 3 月 12 日收到修改稿)

燃料在炸药爆炸驱动下形成燃料空气爆炸云团, 进而引燃爆炸, 对目标造成毁伤. 本文在前期提出的光滑离散颗粒流体动力学方法 (SDPH) 的基础上, 引入描述炸药由爆轰到膨胀整个过程的 Jones-Wilkins-Lee 状态方程及描述气体快速燃烧过程的 EBU-Arrhenius 燃烧模型, 建立了求解战斗部起爆、燃料抛撒和燃料二次引燃爆炸问题的新型 SDPH 方法. 设计了圆环形燃料颗粒在炸药爆炸驱动下运动抛撒的算例进行数值验证, 结果与理论相符; 对燃料空气炸药 (FAE) 云雾的形成和发展过程进行了数值模拟, 分析了云雾的形态, 并与实验结果进行对比, 符合较好, 同时分析了不同起爆方式对云雾团成型的影响; 最后, 在云雾团成型的基础上, 引入蒸发燃烧模型对 FAE 的燃烧爆炸过程进行了模拟研究. 结果表明, 本文建立的数学模型和计算方法可以较好的模拟燃料空气炸药抛撒成雾及云雾燃烧爆炸过程, 为该类武器装备的设计研究提供了较好的数值方法.

关键词: 燃料空气炸药, 爆炸抛撒, 燃烧, 光滑离散颗粒流体动力学

PACS: 02.70.-c, 47.40.Rs, 47.61.Jd, 82.40.Fp

DOI: 10.7498/aps.64.110202

1 引言

燃料空气炸药 (FAE) 作为一种多用途、高效能的新型爆炸能源, 广泛应用于飞机、火箭炮、大口径身管炮、中远程弹道导弹、巡航导弹等投射打击目标, 既可以用来杀伤有生力量, 又可以用来扫雷、毁伤设备和工事等, 又被形象地称为云爆弹. FAE 爆轰属两相不均匀爆轰, 先由引信引爆中心抛撒药柱, 利用中心抛撒药爆轰所产生的高温高压产物气体迅速将装填在战斗部内的燃料抛撒出去, 燃料与空气混合形成可爆性云团, 经适当延时后由云雾起爆引信引爆 FAE 云团, 利用云雾区爆炸冲击波和燃烧消耗氧气形成的低氧环境对目标实施毁伤. 因此, 可将该过程分为燃料爆炸抛撒成雾及其燃烧爆

炸两个过程.

目前, 国内外对于 FAE 进行了大量的实验研究, Samirant 等^[1] 采用 X 射线摄影方法研究了两种不同云爆战斗部金属壳体的破裂, 液滴的破碎、剥离过程, 得到了液滴的尺寸分布, 运动速度变化以及云雾再起爆过程. 张奇等^[2]、高洪泉等^[3]、李席等^[4] 采用高速摄影技术, 观测了燃料云雾的分散过程, 研究了不同参数对燃料云雾的影响规律. 郭学永^[5] 在分析实时记录的基础上, 将爆炸抛撒划分为三个阶段: 喷出阶段、过渡阶段和膨胀阶段. 蒋丽等^[6] 利用多相燃烧爆炸实验系统, 对化学当量比条件下 3 种典型燃料空气炸药燃烧转爆轰过程进行了实验研究. 同样 Sauer 等^[7]、Sedgwick 等^[8]、惠君明等^[9]、张陶等^[10]、熊祖钊等^[11] 对爆炸场超压分布进行了理论计算和实验研究, 对爆炸威力进行了

* 国家自然科学基金 (批准号: 51276192) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chen_fu_zhen@163.com

评估. Lin等^[12]对不同边界条件下, 燃烧转爆轰的临界爆燃波进行了实验研究. 虽然以上学者通过实验取得了一些丰硕的研究经验和成果, 但由于过程的复杂, 实验设备所限, 未能获得云团发展变化及爆轰过程中详尽的数据参数, 且成本高, 安全性差.

数值模拟通过建立反映问题各量之间的微分方程及相应的定解条件, 可以真实再现流场中的各种细节, 已经逐渐成为分析云爆过程的有效手段. 但目前用于FAE的数值模拟主要局限于燃料抛撒过程的模拟. Rosenblatt等最早^[13]借用并改造核爆形成的蘑菇云的DICE-II编码, 发表了关于液体云爆剂抛撒后, 可燃云雾团的形成及其爆轰过程的二维计算程序. 随后, Gardner^[14]和Glass^[15]用数值模拟的方法对云爆剂的抛撒和云雾团的形成过程进行了全面的研究. Ivanduev^[16]假设液体云爆剂液滴的初始分布, 且不考虑液滴的进一步破碎、剥离, 发表了关于抛撒问题的一维数值模拟. 国内的席志德等^[17]、薛社生等^[18]以及贾飞^[19]采用多相流模型对液体燃料的爆炸抛撒云雾形成过程进行了数值研究, 给出了云雾的形态及状态参数分布. 陈嘉琛等^[20]探索了固体与液体混合燃料抛撒的数值模拟方法. 史远通和张奇^[21]采用LS-DYNA软件对采用耦合装药的FAE装置进行了分析研究. 以上数值模拟过程或采用传统的气-液、气-粒两相流方法, 或采用有限元方法, 均为基于网格的数值方法, 在对云雾团中颗粒进行追踪时存在困难, 计算的效果不理想. 同时, 由于燃料的燃烧爆炸不仅涉及化学反应同时涉及冲击波的形成与传播, 求解过程复杂, 现有数值方法较难解决. 因此考虑FAE云雾形成及其爆炸过程的数值模拟尚未见报道. 本文尝试采用新型SDPH方法对燃料的抛撒成雾过程进行数值模拟, 同时在此基础上对燃料的爆燃过程进行探索性研究, 下一步重点开展燃料的燃烧转爆轰过程计算.

光滑离散颗粒流体动力学方法(SDPH)^[22,23]作为一种新的求解气-粒两相流动问题的数值模拟方法, 已成功用于模拟风沙运动过程及气-粒两相间传热蒸发问题. 本文在此基础上, 引入能够反映炸药由爆轰到膨胀整个过程的Jones-Willkins-Lee(JWL)方程, 对中心炸药爆轰的动力学行为进行描述; 引入液滴蒸发模型及气相湍流燃烧模型对云雾团的燃烧爆炸热力学行为进行描述, 建立了可同时求解炸药爆轰、燃料抛撒、燃料燃烧爆炸等复杂过程的SDPH方法, 对FAE的燃料抛撒成雾及其燃烧爆炸过程进行了完整的数值模拟, 并与实验及理

论计算结果进行对比验证.

2 数学模型及计算方法

液体颗粒在炸药爆轰波的驱动下抛撒成雾, 随后雾滴二次点火起爆, 整个过程属于典型的气-粒两相流动问题. 传统求解此类问题均存在一些不足^[22], 本文采用SDPH方法对该问题进行求解, 对中心炸药爆轰过程采用传统基于网格的有限体积(FVM)方法进行求解, 对于液滴颗粒在炸药爆轰驱动下抛撒成雾过程及雾滴的蒸发过程采用改进后的光滑粒子流体动力学方法(SPH)求解, 雾滴蒸发后的气相产物的燃烧爆炸过程进一步采用FVM方法进行求解, 这样既可以保持FVM在求解流体流动、数值传热和化学反应计算领域存在的优势, 又可以发挥SPH方法在追踪颗粒运动信息方面存在的优势, 得到燃料抛撒后的详貌, 为FAE武器的设计研究提供较好的数据基础. 2.1节列出了含传热蒸发模型在内的SDPH方法中颗粒相及连续相的质量、动量、能量、拟温度守恒方程以及颗粒相的SPH离散方程等, 具体方法及各参数表达式详见文献^[23]. 本文重点阐述炸药爆轰理论、气相燃烧理论及考虑炸药爆轰、燃料燃烧爆炸在内的SDPH方法流程.

2.1 SDPH模型方程

连续性方程:

气体相为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0.$$

颗粒相为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_p \rho_p) + \nabla \cdot (\epsilon_p \rho_p \mathbf{v}_p) = 0.$$

动量方程:

气体相为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) \\ & = -\alpha_g \nabla P + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_g + \mathbf{R}_{gp} + \alpha_g \rho_g \mathbf{g}. \end{aligned}$$

颗粒相为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p \mathbf{v}_p) \\ & = -\alpha_p \nabla P - \nabla P_p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_p + \epsilon_p \rho_p \mathbf{g} + \mathbf{R}_{pg}. \end{aligned}$$

拟温度方程:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho_p a_p \theta_p) + \nabla \cdot (\rho_p a_p \mathbf{v}_p \theta_p) \right]$$

$$= (-p_p \bar{I} + \bar{\tau}_p) : \nabla \mathbf{v}_p + \nabla \cdot (k_{\theta_p} \nabla \theta_p) - \gamma \theta_p + \varphi_{gp}.$$

能量方程:

气体相为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g h_g \mathbf{v}_g) \\ &= -\nabla \cdot \alpha_g \cdot \mathbf{q}_g + \varepsilon (T_p - T_g) \\ & \quad + \tau_g \cdot \nabla \cdot \mathbf{v}_g + \alpha_g \left[\frac{\partial}{\partial t} p + \mathbf{v}_g \cdot \nabla p \right]. \end{aligned}$$

颗粒相为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p h_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p h_p \mathbf{v}_p) \\ &= -\nabla \cdot \alpha_p \cdot \mathbf{q}_p + \varepsilon (T_g - T_p) \\ & \quad + \tau_p \cdot \nabla \cdot \mathbf{v}_p + \alpha_p \left[\frac{\partial}{\partial t} p + \mathbf{v}_p \cdot \nabla p \right]. \end{aligned}$$

颗粒相状态方程:

$$\begin{aligned} p_p &= a_p \rho_p \theta_p + 2\rho_p (1 + e_{pp}) a_p^2 g_{0,pp} \theta_p, \\ g_0 &= \frac{s + d_p}{s}. \end{aligned}$$

组分输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i.$$

液滴蒸发模型:

$$\frac{dm_p}{dt} = -N_i A_p M_{w,i}.$$

颗粒相 SPH 离散方程:

连续性方程为

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}.$$

动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} &= -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} \\ & \quad - \frac{\nabla P}{\rho_p} + \mathbf{g} + \mathbf{R}'_{gp} + \frac{\mathbf{f}_i^{bp}}{\rho_i}. \end{aligned}$$

能量方程为

$$\begin{aligned} \frac{dh_{p,i}}{dt} &= -\sum_b \frac{4m_j}{\rho_i \rho_j} \frac{\alpha_{p,i} k_i \alpha_{p,j} k_j}{\alpha_{p,i} k_i + \alpha_{p,j} k_j} (T_i - T_j) \\ & \quad \times \frac{\mathbf{r}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{(\mathbf{r}_{ij}^2 + \eta^2)} + \frac{\varepsilon (T_g - T_p)}{\alpha_p \rho_p}. \end{aligned}$$

拟温度守恒方程:

$$\frac{d\theta_{pi}}{dt} = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{v}_{ji} \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j}{\rho_j^2} - \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} \right.$$

$$\left. + \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{k_{\theta_p} (\nabla \theta_p)_i}{\rho_i^2} + \frac{k_{\theta_p} (\nabla \theta_p)_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} - \gamma \theta_{pi} - \varphi_{gp} \right).$$

2.2 炸药爆轰模型

在炸药爆轰性能的预报中, 炸药爆轰产物的状态方程占有非常重要的地位. 状态方程一般分为两大类: 一类不处理化学反应, 称为不显含化学反应的状态方程, 被广泛应用于爆轰动力学计算; 另一类考虑化学反应, 称为显含化学反应的状态方程, 被广泛应用于爆轰热力学计算. 在本文所研究的FAE问题中, 中心装药的爆轰主要为燃料的抛撒提供驱动力, 其自身热力学变化过程可忽略, 因此对于中心装药采用不显含化学反应的JWL状态方程描述, 能够反映由爆轰到膨胀整个过程, 同时对于产物的后期做功描述较好, 且形式简单易于编程实现. JWL状态方程^[24]为

$$\begin{aligned} P(e, v) &= A \left(1 - \frac{w}{R_1 \cdot v} \right) \exp(-R_1 \cdot v) \\ & \quad + B \left(1 - \frac{w}{R_2 \cdot v} \right) \exp(-R_2 \cdot v) \\ & \quad + \frac{w \rho_0 e}{v}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $v = \rho_0/\rho$ 为相对体积, e 为单位质量内能. A, B, R_1, R_2, w 为常量, 与爆炸的环境、材料等因素有关, 由实验获得. 该状态方程描述了炸药爆轰之后的爆轰产物各物理量之间的关系. 首先爆轰产物在高温高压高密度状态下, 分子之间的相互作用类似于固体或液体的性态, 随着产物的膨胀, 压力降到环境气压, 分子之间的相互作用又呈现气态.

为了能唯一确定爆轰波的状态, 除状态方程外还需要建立控制方程. 由于炸药爆轰速度很快, 爆轰产物可近似为无黏流体, 控制方程采用Euler方程形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P, \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{v}) = -P \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad (4)$$

式中 ρ, \mathbf{v}, e, P 为爆轰产物的性能参数分别是密度, 速度, 比内能和压强. 该控制方程用于中心装药爆轰气体相的描述, 采用基于欧拉网格的FVM方法计算.

2.3 燃料燃烧模型

FAE 抛撒形成的燃料云雾二次起爆威力主要由燃料爆炸产生的压力波、热辐射及爆炸消耗大量氧气所形成的缺氧环境构成, 其燃烧爆炸中的化学反应过程不可忽略. 因此, 本文主要采用燃烧模型对FAE抛撒形成的云雾团二次引燃爆炸过程进行描述.

将燃料的燃烧爆炸过程分为燃料液滴蒸发和蒸发后气体燃烧爆炸两步反应进行. 液滴的蒸发采用液滴蒸发传质定律描述, 如2.1节所述. 气体的燃烧爆炸化学反应机理比较复杂, 本文采用单步不可逆反应模型. 燃料组分为环氧丙烷, 假设云雾团中燃料与空气混合均匀, 燃料在充足的氧气下完全燃烧. 对于环氧丙烷-空气预混气体的燃烧爆炸, 单步不可逆反应可表示为



对湍流燃烧采用 EBU-Arrhenius 模型, 该模型认为, 化学反应的平均速率与化学动力学无关, 而只取决于低温的反应物 and 高温的燃烧产物之间的湍流混合作用, 对时均反应速率取 ω_t 和 ω_A 两者中较小的一个, 如下式:

$$\bar{\omega} = \min(\omega_t, \omega_A), \quad (6)$$

其中, ω_t 为基于 $k-\epsilon$ 湍流模型计算的湍流化学反应速率, 决定于已燃和未燃气体微团破碎速率中的较小值

$$\omega_{t1} = -v_i M_i A \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{m_R}{v_R M_R}, \quad (7)$$

$$\omega_{t2} = -v_i M_i A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_i m_i}{\sum_i v_i M_i}, \quad (8)$$

ω_A 为基于 Arrhenius 公式计算的平均化学反应速率, 如下式:

$$\omega_A = v_i M_i A_r T^{Br} \exp(-E_r/RT) \prod_i X_i^{\eta_i}. \quad (9)$$

2.4 含炸药爆轰和燃料燃烧爆炸过程的SDPH方法流程

考虑炸药爆轰及燃料燃烧爆炸过程的SDPH方法流程如图1所示. 在前期提出的含传质传热模型SDPH方法的基础上^[22]引入描述炸药爆轰过程的JWL方程, 计算燃料颗粒在爆轰波作用下的运

动情况, SPH和FVM模块之间通过交换粒子和网格节点的速度、温度、压力以及体积分数值进行数据交换, 实现耦合作用. 当颗粒的温度超过其蒸发温度时, 颗粒进行蒸发反应, 自身质量减小, 动量能量发生相应变化, 而这些变化量反作用于网格上. 网格上的燃料蒸汽在高温火源的作用下, 开始燃烧化学反应, 计算EBU-Arrhenius气相湍流燃烧模型, 化学反应公式为(5)式, 消耗环氧丙烷和氧气, 生成二氧化碳和水蒸气, 所有气相组分进行组分输运计算, 直至反应物燃烧耗尽.

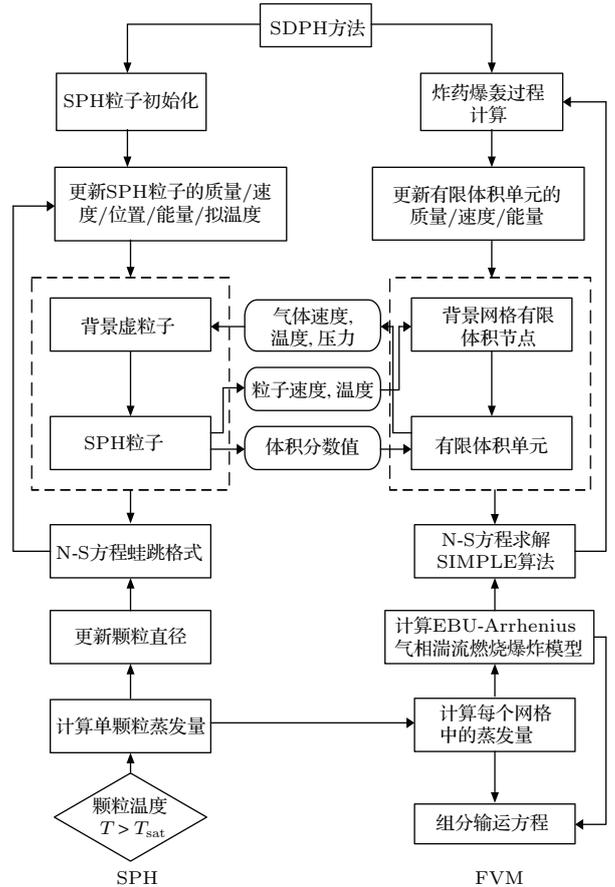


图1 考虑炸药爆轰及燃料燃烧爆炸过程的SDPH方法流程图

Fig. 1. Solution procedure for SDPH algorithm containing the explosive detonation and fuel combustion explosion.

3 炸药爆轰驱动颗粒运动算例验证

为了验证本文方法在计算炸药爆轰及颗粒受爆轰波作用下运动问题中应用的可行性, 我们选用一个简单算例进行验证——炸药爆轰驱动颗粒运动算例. 它可以对炸药爆轰过程和颗粒的运动过程进行捕捉, 获取爆轰波速度矢量及单颗粒运动轨迹等. 初始炸药及颗粒分布如图2所示. 圆形炸药从

表1 炸药材料参数
Table 1. The explosive material parameters

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	w	初始密度 $\rho_0/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	爆轰速度 $D/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	爆轰能量 $e_0/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
371.2	3.231	4.15	0.95	0.3	1630	6930	4290

中心点开始起爆, 燃料颗粒布置在炸药的外围, 炸药起爆完之后, 爆轰的能量全部释放出来, 对燃料颗粒产生极大的驱动作用. 炸药材料参数如表1所示. 燃料颗粒密度为 830 kg/m^3 , 颗粒直径为 0.3 mm , SPH粒子数量为476, SPH粒子间距为 5 mm , 光滑长度为 7.5 mm , FVM网格为 $10 \text{ mm}\times 10 \text{ mm}$ 的正方形单元.

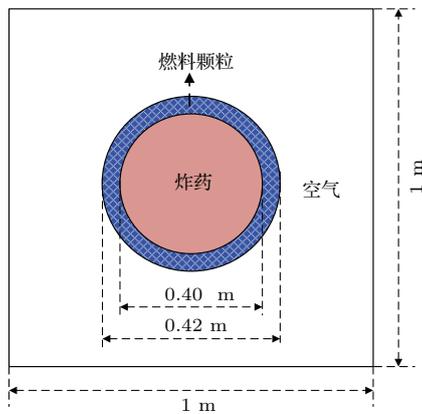


图2 炸药与颗粒分布示意图

Fig. 2. Distribution sketch of explosive and particles.

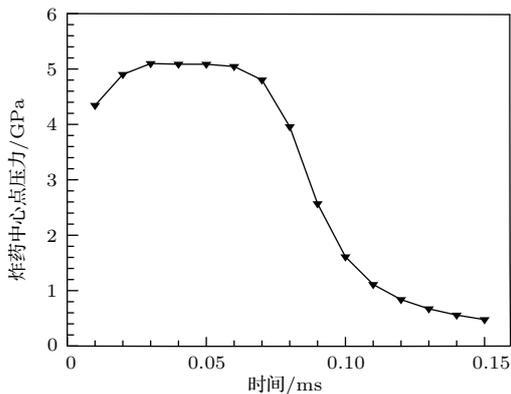


图3 装药中心点压力随时间变化曲线

Fig. 3. Pressure changes with time at the center of explosive.

图3为炸药中心点(0.5, 0.5)处压力随时间变化曲线, 图4为炸药在 $30 \mu\text{s}$ 时刻爆轰速度矢量图. 可以看出, 炸药由于有初始能量的存在, 在初始时刻具有一定的压力, 而在爆轰之后, 由于化学反应同时释放出能量, 其压力值迅速增加, 随着能量向

周围扩散, 压力值随之降低, 中心区域速度逐渐减小为零, 速度场中心区域出现空洞现象. 图5为燃料颗粒在 $30 \mu\text{s}$ 时刻所受到的驱动速度矢量, 颗粒在爆轰气体作用下均匀地向四周运动, 速度场结果同样较好, 与实际过程相符.

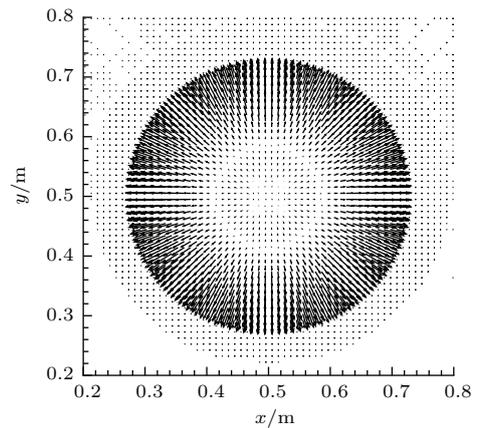


图4 炸药 $30 \mu\text{s}$ 时刻爆轰速度矢量

Fig. 4. Velocity vector of explosive detonation at $30 \mu\text{s}$.

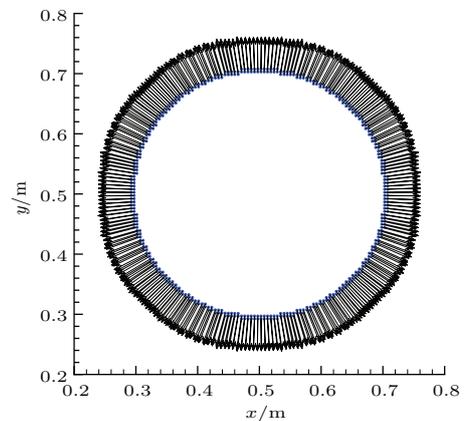


图5 燃料颗粒 $30 \mu\text{s}$ 时刻受驱动速度矢量

Fig. 5. Velocity vector of fuel particles under driving force at $30 \mu\text{s}$.

4 FAE燃料爆炸抛撒成雾过程数值模拟

对于云雾的组成, 本文选用液体燃料作为研究对象, 同时假定初始云爆剂为颗粒状, 颗粒的尺寸统一为 0.3 mm , 本文重点研究形成云雾的形态参

数. FAE模型结构如图6所示, 为二次起爆型燃料空气炸药战斗部, 包括中心抛撒装药、燃料、战斗部壳体以及上下端盖组成, 尺寸分布如图6(a)所示. 燃料选为环氧丙烷液体, 分子式为 C_3H_6O , 密

度为 830 kg/m^3 . 炸药起爆方式为瞬时全起爆的方式. 初始化后, 网格-粒子分布如图6(b)所示. 数值模拟中所取参数如表2所示.

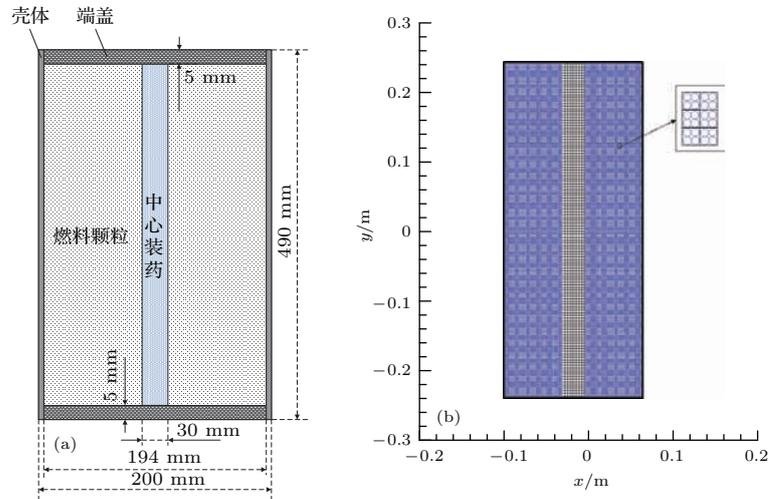


图6 (网刊彩色) FAE结构示意图及初始化网格-粒子分布图 (a) FAE结构示意图; (b) FAE网格-粒子分布图
Fig. 6. (color online) FAE configuration and initial mesh-particle distribution: (a) configuration of FAE; (b) mesh-Particle distribution of FAE.

表2 颗粒相与气体相参数列表
Table 2. Parameters of particle and gas phases.

燃料密度	$\rho_s/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	830
燃料颗粒直径	d_p/mm	0.3
颗粒相比热容	$C_{p_p}/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1950
颗粒相热传导系数	$k_p/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.0454
初始颗粒相体积分数	α_s	0.6
气体密度	$\rho_g/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.225
气体黏性	$\mu_g/\text{Pa}\cdot\text{s}$	1.7895×10^{-5}
气体相热传导系数	$k_g/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.0242
气体相比热容	$C_{p_g}/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1006.43
SPH 粒子数量	N	19680
SPH 粒子间距	$\Delta x/\text{mm}$	2.0
SPH 光滑长度	h/mm	3.0
SPH 粒子密度	$\rho_{\text{SPH}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	498
FVM 网格间距	$\Delta x \times \Delta y/\text{mm}$	4×4
FVM 时间步长	$\Delta T_{\text{FVM}}/\text{s}$	1×10^{-6}

图7为计算得到的两个不同时刻燃料抛撒所形成的云雾形态, 可以看到燃料抛撒过程中典型的径向运动和湍流运动状态, 有一部分燃料直接飞向弹体正下方地面和正上方空中, 燃料的云团扩散速度较快, 使得云雾空洞尺寸增大, 云雾区燃料浓度

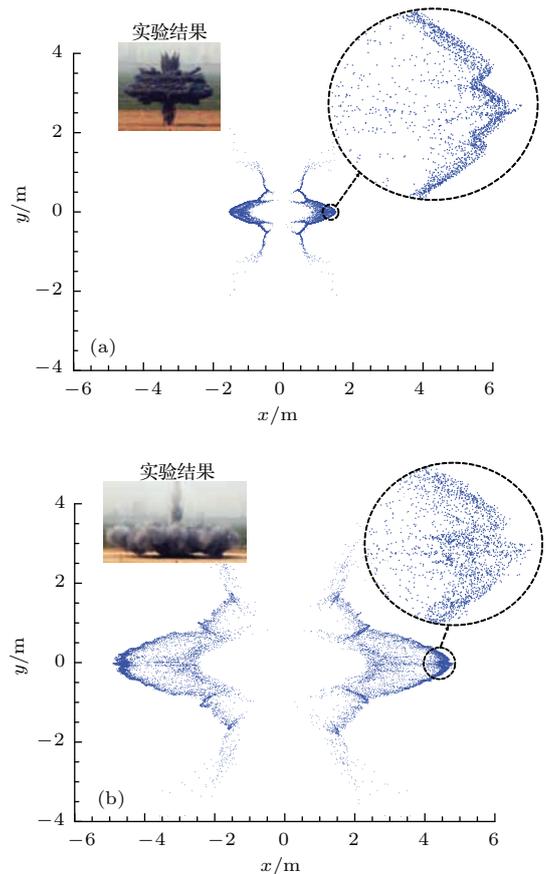


图7 (网刊彩色) 燃料抛撒过程数值模拟结果 (a) 4 ms; (b) 50 ms

Fig. 7. (color online) Numerical results of fuel dispersal process: (a) 4 ms; (b) 50 ms.

偏低,而在云雾的边缘浓度较高.在燃料抛撒的前阶段,主要受初始爆炸驱动载荷的作用,云团持续做加速运动,呈现集中运动的情形,云团边缘颗粒分布规则,而在云团中心部位的顶端逐渐开始出现波动现象,开始有整体分解为分散微团的趋势,如4 ms时刻云团分布;随着时间的发展,燃料受到的驱动力逐渐减小,空气阻力逐渐起到主导作用,燃料逐渐被驱散开,沿着曲线轨迹做湍流运动,燃料分散更加均匀,云团边缘颗粒浓度逐渐减小,如50 ms时刻云团分布形态.同时可以看出由于上下两端燃料在炸药的驱动下可以向上下两端运动,分散能量,而中心部位的燃料只在水平方向运动,炸药驱动能量完全用于水平方向速度的增加,如图8所示5 ms时刻燃料颗粒速度场分布,中心部位燃料横向速度最大,最终形成的云雾呈现典型的扁球形.而从燃料分散的角度考虑,在满足设计要求的前提下,应尽量使燃料抛撒速度的最大值出现在FAE装置的中部,形成半径尽可能大的扁平状云雾.图7左上方图像为李席等^[4]的实验结果图像,可以看出数值结果与实验结果符合较好,云雾的形态符合度较高.

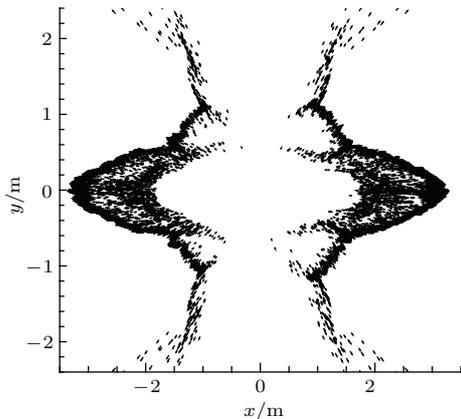


图8 5 ms时刻燃料颗粒速度场分布

Fig. 8. Velocity distribution of fuel particles at 5 ms.

图9为燃料抛撒云雾直径随时间变化曲线,图10为计算得到的边缘处燃料的分散速度与实验结果对比图.可以看到,燃料扩散直径随时间单调增加,燃料分散速度随时间呈现先增加后减小的趋势.大约10 ms之前燃料云团在爆炸驱动压力的持续作用下加速扩散,云雾直径增长很快,10 ms之后由于燃料受到空气阻力作用,燃料的分散速度开始减小,云雾直径增加缓慢,大约50 ms之后云雾直径不再有明显的增长,燃料颗粒仅在较小的区域范围内做波动运动.数值模拟结果与实验结果较为一

致,数值解略低于实验值,分析原因为实验所处的环境场地较为空旷,受压缩的气体迅速向外扩散,导致空气对抛撒燃料的阻力降低.其次为本文所采用的液滴颗粒直径为统一直径分布,比实际云雾颗粒直径稍大,因此受到的阻力偏大.

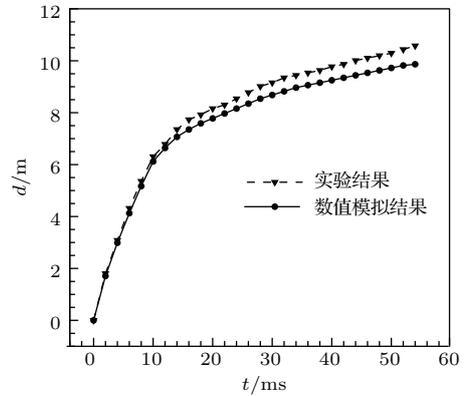


图9 燃料抛撒云雾直径随时间变化曲线

Fig. 9. Fuel dispersal diameters versus time.

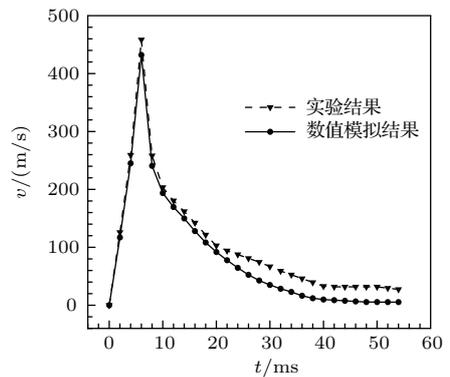


图10 边缘处燃料分散速度随时间变化曲线

Fig. 10. Fuel dispersal velocity versus time at boundary.

由文献^[25]分析可知,炸药的起爆方式对炸药能量的释放具有较大的影响,进而会影响云雾的形态.为了进一步深入研究燃料爆炸抛撒成雾的影响因素,本文对另一种起爆方式——点起爆下云雾的形成过程进行了模拟计算.FAE装置结构参数与上述全起爆方式下的结构参数基本相同,为保证形成的云雾在中心部位避免空洞的存在,在燃料的下方增加10 mm厚的燃料填充区,同时在起爆位置上发生改变,如图11所示.

图12为计算得到的不同时刻燃料云雾形态.与全起爆方式完全不同,点起爆云雾成上大下小的圆台状.5 ms时刻由于上部炸药先起爆,其爆轰作用时间首先撤销,空气阻力起主要作用,云雾在上部两端开始出现颗粒分散状态,颗粒分布逐渐趋于均匀,而下部主要受炸药驱动力作用继续向下方运

动, 在 40 ms 后, 云团尺寸基本保持不变. 可以得到采用点起爆方式由于炸药能量释放的不集中, 同时燃料运动方向发生了改变, 使得燃料抛撒形成的云雾尺寸与全起爆方式相比较小, 而且形成的云雾均匀性较全起爆方式差, 不建议采用该方式起爆. 该计算结果与文献 [10] 得到的结果基本相符.

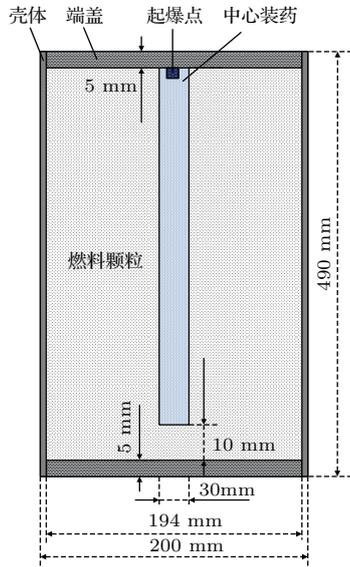


图 11 (网刊彩色) FAE 点起爆结构示意图
Fig. 11. (color online) Configuration of FAE under point detonation.

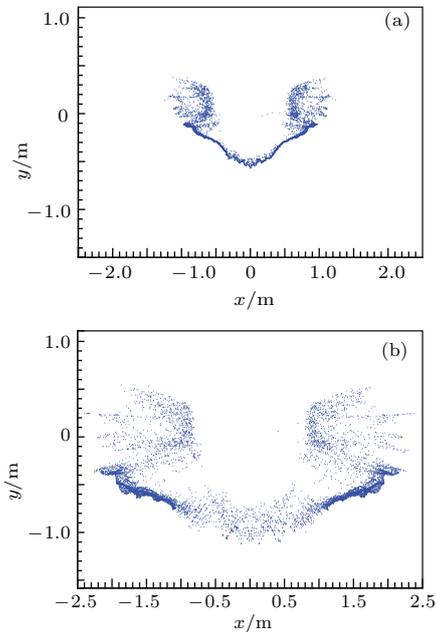


图 12 (网刊彩色) 炸药点起爆下燃料抛撒过程数值模拟结果 (a) 5 ms; (b) 40 ms
Fig. 12. (color online) Numerical results of fuel dispersal process under explosive point detonation: (a) 5 ms; (b) 40 ms.

5 云雾团燃烧爆炸过程数值模拟

在前面计算燃料抛撒形成云雾的基础上, 加入液滴蒸发模型及气相燃烧模型对云雾团的燃烧爆炸过程进行数值模拟研究, 验证新方法在该领域中应用的通用性. 设定云雾团爆炸的外部区域为 $10\text{ m} \times 7\text{ m}$ 的长方形区域, 云雾团数据为第 4 节计算得到的 56 ms 时刻云雾团的数据. 假定燃料气体在发生爆炸之前, 燃料颗粒蒸发已经达到稳定状态, 燃料蒸汽浓度不再发生改变, 与周围的空气形成稳定的气溶胶云团, 如图 13 所示. 这时在外部火源的引燃作用下进行燃料的燃烧过程. 由于燃料的燃烧爆炸传播速度较快, 假定其在瞬时完成, 这样将起爆方式考虑为全起爆的方式, 即初始设定外部区域为 1000 K 高温起爆环境, 开始起爆的时刻为 0 时刻.

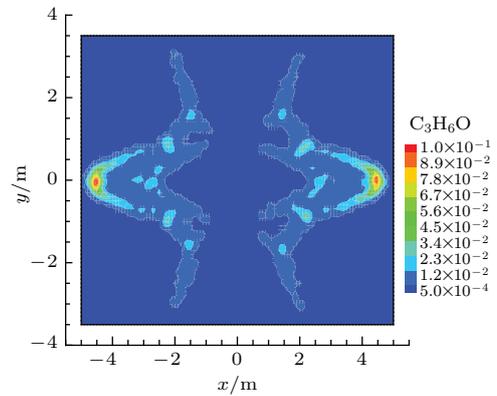


图 13 (网刊彩色) 燃料蒸发后 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 浓度分布
Fig. 13. (color online) $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ concentration distribution after fuel evaporation.

图 14 为计算得到的燃料燃烧过程中速度矢量分布, 可以看到燃料在 1 ms 时刻燃料基本燃烧完毕, 释放出大量的能量, 所形成压力波逐渐由燃料蒸汽区域向外部扩散, 随着左右两端压力波相遇, 水平方向动能逐渐向垂直方向动能转化, 垂直方向速度逐渐增加. 在 4 ms 时刻, 基本全部转化为垂直方向动能, 从而对外部物体造成较大的冲击损伤. 图 15 为计算得到的 4 ms 时刻温度场分布, 由于燃料的燃烧产生了大量的能量, 燃料中心区域温度最高可达 2300 K, 随着压力波的扩散, 高温区域也将随之扩散, 对目标造成热辐射毁伤. 图 16、图 17 分别为计算得到的 4 ms 时刻氧气和二氧化碳浓度分布等值线图, 燃料燃烧的过程中消耗了大量的氧气, 生成了大量的二氧化碳, 随着影响区域的进一步扩展, 低浓度的氧气及高浓度的二氧化碳, 必然将对有生力量及汽车等消耗氧气的设备造成巨大

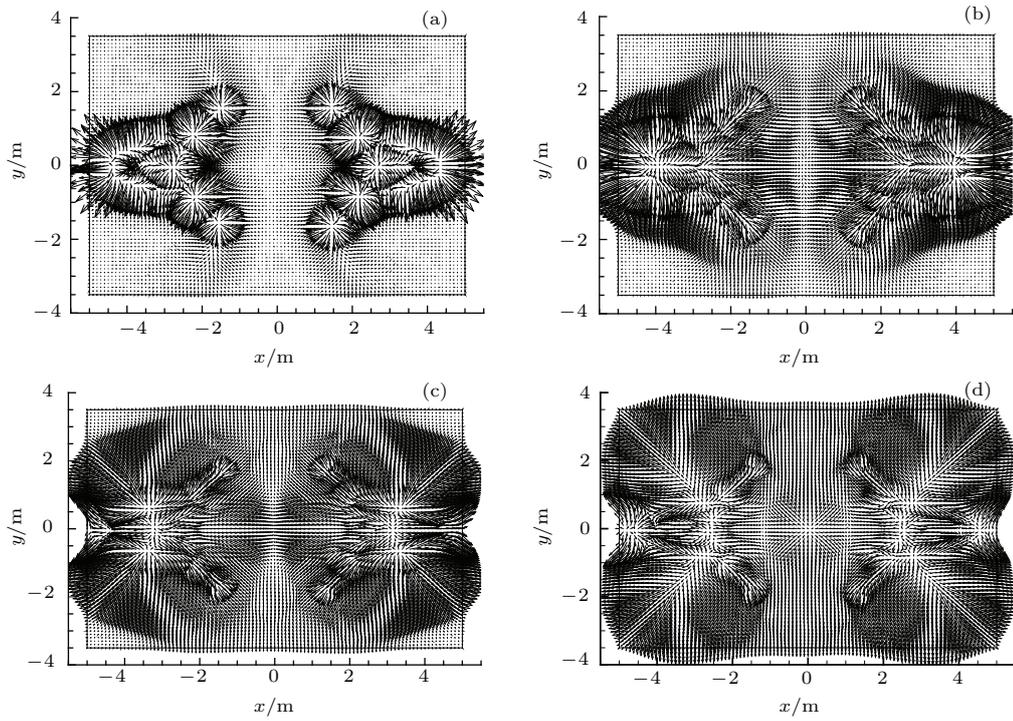


图 14 燃料蒸汽爆炸过程中速度场变化 (a) 1 ms; (b) 2 ms; (c) 3 ms; (d) 4 ms

Fig. 14. Velocity field variation in the explosion of fuel gas: (a) 1 ms; (b) 2 ms; (c) 3 ms; (d) 4 ms.

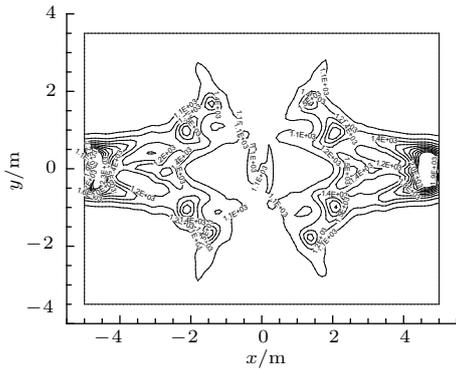


图 15 燃料燃烧过程中 4 ms 时刻温度场等值线

Fig. 15. Temperature contour lines during fuel combustion at 4 ms.

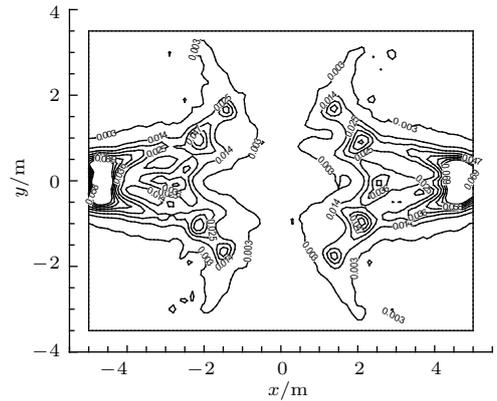


图 17 4 ms 时刻二氧化碳浓度等值线

Fig. 17. Contour lines of carbon dioxide concentration at 4 ms.

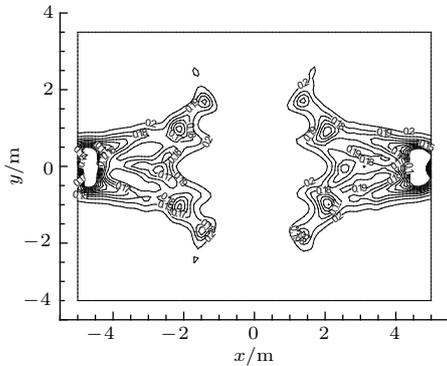


图 16 4 ms 时刻氧气浓度等值线

Fig. 16. Contour lines of oxygen concentration at 4 ms.

破坏. 计算结果与实际现象相符合, 由于实验较难获得燃料爆炸之后压力波的传播以及各物质的浓度分布参数, 同时, 其他数值模拟研究大多只停留在云雾团抛撒成型问题上, 因此, 该算例属于探索性模拟研究, 验证新方法的适用性, 下一步随着实验的完善, 将对具体参数进行深入的对比分析.

6 结 论

本文基于SDPH方法, 引入爆轰模型及气相燃烧理论, 对考虑炸药爆轰及燃料燃烧在内的燃料爆

炸抛撒成雾及其燃烧爆炸过程进行了数值模拟研究, 主要结论为:

1) 建立了含炸药爆轰及气相燃烧爆炸在内的新的SDPH方法, 对SDPH方法进行了完善, 其应用领域进一步拓展, 为更好的解决气-粒两相流动问题提供了一种有效的思路.

2) 应用炸药爆轰驱动颗粒运动基础算例对新方法进行了数值验证, 对FAE燃料爆炸抛撒成雾过程进行了数值模拟, 并与实验结果进行对比, 符合较好, 验证了新方法在计算该类问题时的可行性和准确性; 同时通过对不同起爆方式的数值模拟研究发现, 采用点起爆的方式对于炸药能量的释放产生抑制作用, 形成的云雾效果不及全起爆方式.

3) 对抛撒形成的云雾团的燃烧爆炸过程进行了探索性模拟研究, 得到了压力波传播过程、温度场分布以及氧气和二氧化碳浓度分布等, 与实际过程相符, 可以较好地模拟分析爆炸产生的威力, 为下一步开展FAE燃料以及装置的设计研究提供了一种非常有效的数值方法.

参考文献

- [1] Samirant M, Smeets G, Baras Ch 1989 *Propell. Explos. Pyrot.* **14** 47
- [2] Zhang Q, Qin B, Bai C H, Guo Y Y, Liu Q M, Liang H M 2007 *Chinese J. Energ. Mater.* **10** 447 (in Chinese) [张奇, 覃彬, 白春华, 郭彦懿, 刘庆明, 梁慧敏 2007 含能材料 **10** 447]
- [3] Gao H Q, Lu F Y, Wang S L, Luo Y F, Yuan Y N 2010 *J. Ballistics* **22** 58 (in Chinese) [高洪泉, 卢芳云, 王少龙, 罗永锋, 袁亚楠 2010 弹道学报 **22** 58]
- [4] Li X, Wang B L, Han Z, Wang X L 2013 *Explos. Mater.* **42** 23 (in Chinese) [李席, 王伯良, 韩早, 王兴龙 2013 爆破器材 **42** 23]
- [5] Guo X Y 2006 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [郭学永 2006 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [6] Jiang L, Bai C H, Liu Q M 2010 *Explos. Shock Waves* **30** 588 (in Chinese) [蒋丽, 白春华, 刘庆明 2010 爆炸与冲击 **30** 588]
- [7] Sauer F, Stubbs T 1977 AD-A047385
- [8] Sedgwick R T, Krata H R 1976 AD-A159
- [9] Hui J M, Liu R H, Peng J H, Tang M J 1996 *Chinese J. Energ. Mater.* **4** 123 (in Chinese) [惠君明, 刘荣海, 彭金华, 汤明钧 1996 含能材料 **4** 123]
- [10] Zhang T, Hui J M, Xie L F, Guo X Y, Yu J 2004 *Explos. Shock Waves* **24** 176 (in Chinese) [张陶, 惠君明, 解立峰, 於津 2004 爆炸与冲击 **24** 176]
- [11] Xiong Z Z, Bai C H, Zhang Q, Liu Q M 2001 *Blasting* **18** 83 (in Chinese) [熊祖钊, 白春华, 张奇, 刘庆明 2001 爆破 **18** 83]
- [12] Lin W, Zhou J, Fan X H, Lin Z Y 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014701
- [13] Rosenblatt M 1976 AD-BO-17905
- [14] Gardner D R 1979 SAND-90-0686
- [15] Glass M W 1978 SAND90
- [16] Ivandaev A I 1982 *Fluid Dynam.* **17** 68
- [17] Xi Z D, Xie L F, Liu J C, Li J F 2004 *Explos. Shock Waves* **24** 240 (in Chinese) [席志德, 解立峰, 刘家聪, 李剑锋 2004 爆炸与冲击 **24** 240]
- [18] Xue S S, Liu J C, Zhu G S, Peng J H 1998 *Explos. Shock Waves* **18** 296 (in Chinese) [薛社生, 刘家聪, 朱广圣, 彭金华 1998 爆炸与冲击 **18** 296]
- [19] Jia F 2014 *MS Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [贾飞 2014 硕士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [20] Chen J C, Zhang Q, Ma Q J, Huang Y, Liu X L, Shen S L, Li D 2014 *Acta Armamentarii* **35** 972 (in Chinese) [陈嘉琛, 张奇, 马秋菊, 黄莹, 刘雪岭, 沈世磊, 李栋 2014 兵工学报 **35** 972]
- [21] Shi Y T, Zhang Q 2014 *Chinese J. Energ. Mater.* **22** 353 (in Chinese) [史远通, 张奇 2014 含能材料 **22** 353]
- [22] Chen F Z, Qiang H F, Gao W R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 130202 (in Chinese) [陈福振, 强洪夫, 高巍然 2014 物理学报 **63** 130202]
- [23] Chen F Z, Qiang H F, Gao W R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 230206 (in Chinese) [陈福振, 强洪夫, 高巍然 2014 物理学报 **63** 230206]
- [24] Dobratz B M 1981 *Explosive Handbook* (Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory)
- [25] Qiang H F, Wang K P, Gao W R 2008 *T. TianJin Univ.* **14** 495

Numerical simulation of fuel dispersal into cloud and its combustion and explosion with smoothed discrete particle hydrodynamics*

Chen Fu-Zhen^{1)†} Qiang Hong-Fu¹⁾ Miao Gang²⁾ Gao Wei-Ran³⁾

1) (Faculty 601, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

2) (Non-commissioned Officer Institute, Second Artillery Engineering University, Qingzhou 262500, China)

3) (First Institute, Second Artillery Equipment Academe, Beijing 100085, China)

(Received 2 December 2014; revised manuscript received 12 March 2015)

Abstract

A fuel air cloud is formed under the driving force of the explosive detonation and then it's ignited to explosion to attack the target. The existing numerical simulations are mainly limited to the fuel dispersal processes which are all based on mesh methods. The fuel particles in the air cloud are difficult to traced. Otherwise, the computing process is complex and could not be solved by the exiting methods for the chemical reaction and the forming and propagation of shock waves are both involved in the fuel combustion and explosion. Smoothed discrete particle hydrodynamics (SDPH), as a new method to solve the gas-particle two-phase flow, has been successfully used to simulate the aeolian sand transport, heat transfer and evaporation. Based on the previous work, the Jones-Wilkins-Lee (JWL) function is imported to describe the explosive detonation to expansion and it is solved by finite volume method. The fuel drops dispersed by explosion are traced by the improved smoothed particle hydrodynamics. The drop evaporation model and the EBU-Arrhenius combustion model for gas high-speed combustion are introduced to describe the combustion and detonation of fuel drops. Then we build a new SDPH method to simulate the warhead initiation, fuel dispersal, and the fuel second explosion. Firstly, we design a test that is the dispersal of circular fuel drops drove by explosive detonation to validate our new method. The changing of the explosive detonation pressure and the velocity fields of explosive and particles are analyzed and they are consistent with the theory. And then, the forming and developing of FAE cloud are simulated. Through comparing with the experiments, the shapes of the cloud by the two methods coincide with each other. The effects of different initiations on the cloud forming are also analyzed. Finally, based on the cloud group forming, the evaporation and combustion models are introduced to study the combustion and explosion of FAE. We obtain the velocity field and the distribution of combustion product. The result indicates that the fuel dispersal into cloud and its explosion can be simulated better with the mathematical model and computational method built in this paper. This finding supplies a more effective numerical method for the design and research on this type of weapon equipments.

Keywords: fuel air explosive, dispersal by explosion, combustion, smoothed discrete particle hydrodynamics

PACS: 02.70.-c, 47.40.Rs, 47.61.Jd, 82.40.Fp

DOI: [10.7498/aps.64.110202](https://doi.org/10.7498/aps.64.110202)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51276192).

† Corresponding author. E-mail: chen_fu_zhen@163.com