

文章编号:1006-9941(2023)05-0431-09

高落速云雾爆轰的数值模拟

苏震¹,高洪泉²,赵宏伟²,张奇¹

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京100081;2.中国人民解放军96901部队,北京市海淀区北清路109号院,北京100094)

摘要: 为了研究落速 $1000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下的燃料分散和爆轰过程,建立了燃料分散爆轰的计算仿真模型,以静态燃料分散及云雾爆轰实验结果作为数值方法进行了验证,分析了 2 kg 环氧丙烷燃料在高落速条件下分散爆轰的温度、压力随时间变化规律。结果发现:落速 $1000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下,数值模拟得到了云雾形态、浓度场随时间和空间的分布规律,云雾形态大致呈扇形,浓度随距离增加逐渐降低,最终达到稳定分布,云雾径向半径可达 2.24 m ,同时得到云雾爆轰过程及爆轰压力场、温度场的影响规律,起爆后形成弧形波阵面向外扩散且温度压力不断衰减。数值模拟结果与实验相吻合,为高落速云爆武器系统的安全设计提供了新途径。

关键词: 云雾分散;高落速;云雾;爆轰;环氧丙烷燃料;燃料空气炸药

中图分类号: TJ55;O38

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2022265

0 引言

燃料空气炸药(Fuel-Air-Explosive,简称FAE)作为先进的爆炸能源,利用爆炸驱动高能固液混合燃料形成多相云雾,并经起爆产生爆轰^[1]。高速云雾在实际战略中有广阔的应用前景,对高落速云雾场以及爆轰特性规律的研究,不仅可提高FAE威力和可靠性,同时可为优化设计云爆武器,提高云爆武器威力和安全性提供参考。

对于云雾爆轰,Simirnov等^[2]数值仿真了燃料抛撒所形成的气液两相云雾的起爆和爆轰全过程,得到了与实验结果较为一致的仿真结果。Ivanduev^[3]在燃料抛撒数值仿真计算中,将燃料液体简化为众多液滴,并只考虑一次液滴破碎过程。方伟等^[4]通过高速摄影观测了不同密度FAE云雾的运动状态,利用数值模拟计算了燃料圆柱外表面中心处质点的速度变化,利用

光电探测方法测量了云雾相对密度变化。杜海文等^[5]通过数值模拟和实验,得到爆轰气体产物与燃料、空气的时空分布,分析了导致蹿火发生的因素。畅博等^[6]对二次起爆型云爆抛撒过程、结构参数影响规律、蹿火现象、云雾浓度及颗粒尺寸测试、超压及热毁伤作用等研究内容进行了介绍。薛社生等^[7]建立了液体燃料空气炸药云雾运动规律模型,给出了云雾膨胀过程三个阶段的速度-半径关系或速度-时间关系,及燃料液滴尺寸估计。陈明生等^[8]通过仿真计算软件,对燃料抛撒过程以及云爆装置外壳的碎裂过程进行了计算,得到了燃料分散速度随时间变化的规律。刘庆明等^[9]通过分析气-固-液多相爆轰的特征和压力波形的特点,发现在云雾区内,多相爆轰波压力波形具有多峰结构,爆轰区外,爆轰波转变成爆炸冲击波,峰值压力和比冲量迅速衰减,并得到了冲击波峰值超压及比冲量随传播距离变化的规律。

以上数值模拟研究可以看出,目前国内外对静态或低速云雾分散及爆轰过程的研究已趋于完善,但高落速云雾分散和爆轰研究较少,这一方面是因为高速燃料分散实验难度大、成本高、难以监测,很难利用实验研究高落速下燃料爆炸的分散规律;另一方面,云爆装置抛撒点不够精确、云爆的安全性难以保证。为此,本研究采用流体动力学数值模拟了高落速云雾分散及

收稿日期:2022-10-31;修回日期:2023-02-17

网络出版日期:2023-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(11972089)

作者简介:苏震(1996-),男,硕士,主要从事云雾分散爆轰研究。

e-mail:291800188@qq.com

通信联系人:张奇(1956-),男,博士后,教授,主要从事含能材料的爆炸安全研究。e-mail:qzhang@bit.edu.cn

引用本文:苏震,高洪泉,赵宏伟,等.高落速云雾爆轰的数值模拟[J].含能材料,2023,31(5):431-439.

SU Zhen, GAO Hong-quan, ZHAO Hong-wei, et al. Numerical Simulation of Cloud Detonation at high Falling Velocity[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(5):431-439.

爆轰全过程,建立高落速燃料分散与爆轰过程的数值计算方法,包括发散性网格、燃烧模型、燃料液滴碰撞破碎等物理模型,并对模拟计算的可靠性进行验证;对高落速燃料分散过程进行数值模拟,分析其扩散半径及云雾场内燃料浓度变化。最后,对高落速燃料爆轰过程进行数值模拟,分析云雾爆轰最大压力、温度与压力随时间的变化规律,以及压力峰值与距离的关系。

1 控制方程

计算、模拟流体运动都要遵循流体力学基本方程,包括:质量守恒方程^[10]、动量守恒方程、能量守恒方程^[11]。另外还有湍流模型^[12]、燃烧反应模型^[13]、离散相模型^[14]等。

1.1 质量守恒方程

本仿真计算采用质量守恒方程,具体公式表达如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; t 为时间, s ; x_i 为空间坐标在 i 方向的分量, m ; u_i 为速度矢量在 i 方向的分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.2 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3)$$

式中, p 为静压, Pa ; τ_{ij} 为应力张量; g_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力, N 。

1.3 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(\rho E + p)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_i(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right) + S_h \quad (4)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (5)$$

式中, k_{eff} 为无量纲数,代表导热系数; J_j 为 j 的扩散通量; S_h 为化学反应产生的源项。

1.4 湍流模型

燃料分散过程涉及湍流流动,计算采用标准模型 $k-\varepsilon$ 半经验公式^[15],用求解 k 、 ε 的守恒方程来获得湍流的流动。其相应的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (6)$$

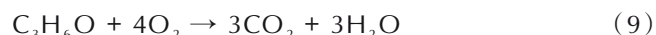
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

式中, k 为动能, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; ε 为耗散率, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$; G_b 是由浮力引起的 k 的产生项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ε 为常数项,分别为 1.44, 1.92, 1, 0.09, 1.3。 $C_{3\varepsilon}$ 为可压流体中浮力相关系数,当流体与水平地面垂直时, $C_{3\varepsilon}$ 取值为 0; 当流体与水平地面平行时, $C_{3\varepsilon}$ 取值为 1。

1.5 燃烧反应模型

在计算云雾爆轰过程中主要考虑环氧丙烷与氧气发生反应,为了简化计算,认为环氧丙烷与氧气的反应为单步反应,在反应中主要是环氧丙烷液滴在蒸发破碎后产生的环氧丙烷气体与空气中氧气的反应。方程式为:



对于本研究涉及的燃烧反应,由 Arrhenius 公式^[14]可得出化学反应速率 k_r :

$$k_r = A_r T^{\beta_r} e^{-\frac{E_r}{R_r T}} \quad (10)$$

式中, A_r 为指前因子; E_r 为活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; R_r 为普适气体常数,取值为 $8.314 \text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$ 。

1.6 离散相模型

采用离散相模型,通过对拉氏坐标下的颗粒作用力微分方程进行积分,求解粉尘或液滴的轨道,采用随机追踪模型(Stochastic Tracking model)^[16],离散项颗粒受作用力的平衡方程在笛卡尔坐标系下的形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} u_p = F_D(u - u_p) + \frac{g_x}{\rho_p} (\rho_p - \rho) + F_x \quad (11)$$

式中, u_p 为颗粒速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $F_D(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量拖拽曳力, N ; ρ_p 为颗粒密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; F_x 为附加质量力, N 。

2 云雾分散爆轰数值模拟

2.1 计算模型

对云爆装置燃料分散和云雾爆轰过程的数值模拟计算中,将装置简化为二维轴对称模型,设计了云爆装置模型,装置与水平地面保持垂直,该装置是高度为 H ,直径为 D 的圆柱体,中心载荷与装置同轴,直径为 d 。以 2 kg 环氧丙烷燃料的分散为例, H 取 0.168 m, D 取 0.112 m, d 取 0.02 m,若增加燃料质量,则装置尺寸也相应进行放大。在计算时,液体燃料通过中心载荷的

作用在自由空间中进行分散,对燃料分散一定时间后所形成的云雾进行点火发生爆轰。为了不影响计算,假定在中心载荷作用时,装置外壳已经破裂,且不对之后的燃料分散爆轰过程产生影响,中心载荷的作用通过设置高压来进行表达。相关物质的运算参数^[17-18]设置如表1所示。

表1 环氧丙烷物质参数^[17-18]

Table 1 Material parameters of propylene oxide^[17-18]

| parameters | results |
|--|---------------------------------|
| molecular formula | C ₃ H ₆ O |
| molecular weight / g·mol ⁻¹ | 58 |
| standard state entropy / J·kmol ⁻¹ ·K ⁻¹ | 287400 |
| liquid density / kg·m ⁻³ | 830 |
| liquid heat ratio / J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹ | 2106.72 |
| enthalpy of evaporation / J·kg ⁻¹ | 477000 |
| boiling point / K | 307 |
| saturated vapor pressure / Pa | temperature piecewise linearity |
| viscosity / kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹ | 2.8×10 ⁻⁴ |
| droplet surface tension / N·m ⁻¹ | 0.0245 |
| binary diffusion coefficient / m ² ·s ⁻¹ | 1.04×10 ⁻⁵ |

2.2 算法的验证

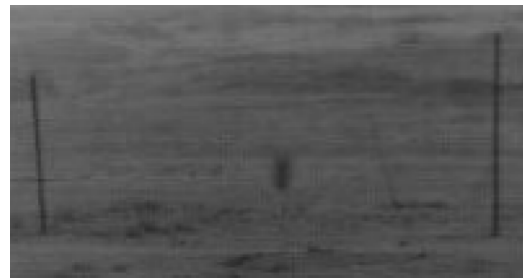
2.2.1 实验

研究设计了环氧丙烷爆轰实验,设计云爆壳体为高0.168 m,直径为0.112 m的圆柱体环氧丙烷燃料容器,装药2 kg。两侧为支撑杆,使用铁丝将云爆装置保持悬空,离地高度2 m,装置中心为高压载荷,初始静止状态进行分散,实验观测结果如图1所示,在50 ms时刻分散半径达到约3 m。

实验采用2 kg环氧丙烷燃料分散后,在云雾分散中心使用高温点火源起爆,在1,3 m处设置压力监测点,装置设置如图2所示,得到的如表2所示结果。通过实验,测得1 m处的爆轰压力约为1.55 MPa,3 m处的爆轰压力约为0.48 MPa。

2.2.2 验证

分散过程算法验证:采用2 kg云爆模型对静态条件下的2 kg环氧丙烷燃料进行分散过程的模拟计算,并与上面的实验结果进行对比,结果如图3所示。由图3可知,实验数据与模拟数据的增长趋势基本一致,在云雾分散初始阶段,即0~30 ms间,均呈迅速上升趋势,随着时间不断增加,半径增长速度逐渐变小。在云雾分散到80 ms时,模拟分散半径为2.88 m,实验分散半径达到约3.11 m,此时相对误差约为7.3%。说明该数值模拟方法较为理想可靠,计算结果较为准确。



a. 0 ms



b. 50 ms

图1 2 kg云爆装置分散实验观测结果

Fig.1 Observation results of dispersion experiment of 2 kg cloud explosion device

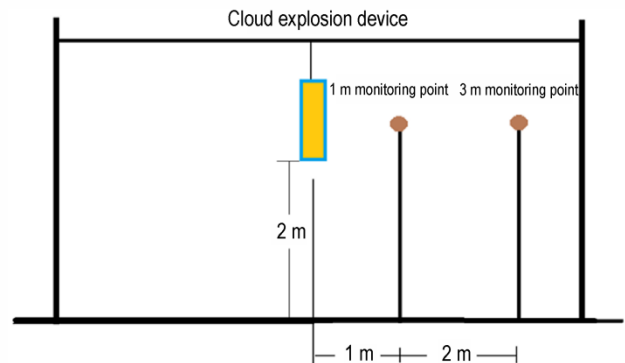


图2 2 kg云爆装置爆轰实验设置

Fig.2 Detonation experiment setup of 2 kg cloud detonation device

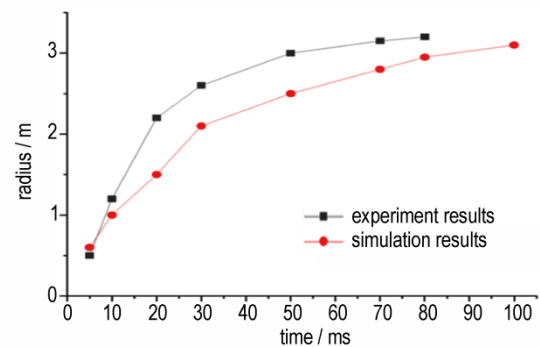


图3 分散半径实验与模拟结果对比

Fig.3 Comparison of the dispersion radius between experiment and simulation

爆轰过程算法验证:为了验证云雾爆轰过程数值模拟仿真方法的可靠性,研究对比了实验与数值模拟条件下静态2 kg燃料的爆轰压力。数值模拟采用2 kg环氧丙烷燃料分散后,在云雾分散中心使用高温点火源起爆,在1,3 m处设置压力监测点,各项条件与实验设置的条件保持一致,得到如表2所示结果。

研究数值模拟计算得到的结果列于表2。由表2可以看到,在1 m处进行压力验证,得到模拟计算结果为1.50 MPa,与实验值的相对误差约为3.2%;对3 m处进行压力验证,得到模拟计算结果为0.46 MPa,与实验值的相对误差为4.2%,说明计算得到的爆轰压力值与实验所测结果较为一致,相对误差均小于5%,故认为仿真计算方法较为可靠。

表2 2 kg静态燃料爆轰压力实验结果与仿真结果对比

Table 2 Detonation pressure comparison between experimental and simulated results of 2 kg static fuel

| distance / m | experimental results / MPa | simulated results / MPa | relative error / % |
|--------------|----------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | 1.55 | 1.50 | 3.2 |
| 3 | 0.48 | 0.46 | 4.2 |

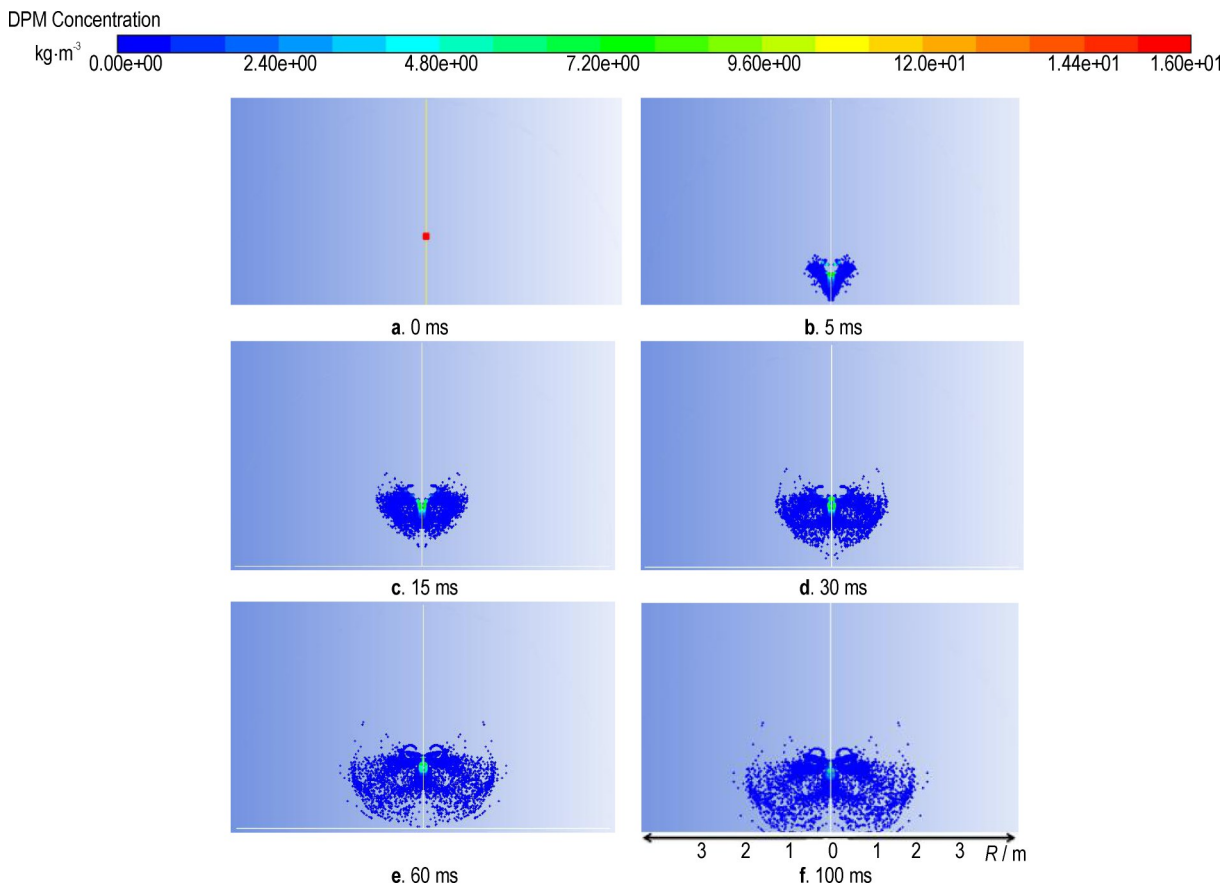


图4 云雾分散浓度云图

Fig.4 Cloud dispersion concentration nephogram

3 结果与讨论

3.1 1000 m·s⁻¹高落速条件下云雾分散

采用数值模拟方法对1000 m·s⁻¹高落速云雾分散过程进行研究,结果如图4所示,由图4可以看出,在落速1000 m·s⁻¹的燃料分散过程初期(图4b、图4c),燃料受中心载荷与初始落速的共同作用,且中心载荷的高压作用赋予燃料的速度与垂直落速基本处于同一量级,因此高落速云雾在水平方向与垂直方向上的运动都很明显,这使得云雾分散大致呈扇形扩散,并随着分散的进行,云雾形状变化幅度逐渐减小。

对于落速1000 m·s⁻¹的燃料分散,在分散进行至15 ms时刻(图4c),云雾大致呈扇形向两侧扩散,并在60 ms后形状变化较小(图4e),这是由于中心载荷高压作用的不断衰减,惯性减小,并由于空气阻力的作用,云雾的扩散速度不断下降,直至不再明显扩散(图4e),在轴向和径向方向上的速度都很快衰减,最终达到较为稳定的形状并不再变化(图4f)。

1000 m·s⁻¹落速情况下,由于受到1000 m·s⁻¹初

始落速的影响,中心压力快速衰减,云雾分散半径在100 ms时刻达到约2.24 m(图4f),而在可靠性验证中模拟计算得到2 kg静态云雾分散半径在100 ms时刻达到约3.05 m,可知高落速条件下云雾分散半径有明显降低。由于具有轴向初速度,云雾被轴向拉长,整体呈斜向下扩散趋势,因此粒子浓度较低,并由图4可知在云雾中心存在空洞区(即云图中无液滴存在的空白区域)。

3.2 落速 $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下云雾爆轰

为探究高落速云雾分散爆轰,本研究在落速

$1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下,对100 ms时刻2 kg环氧丙烷云雾进行爆轰计算,设置云爆装置离地高度为2 m。选择中心(1.4,0.6)处进行点火。研究将计算模型设置为二维旋转轴对称模型,因计算条件限制不能用实际方式进行点火,故设置半径为0.03 m,压力为50 MPa,温度为3000 K的球形点火区域对云雾爆轰进行仿真计算,得到高落速云雾爆轰温度与压力计算结果,结果如图5、图6所示。

由图5和图6的高落速条件下云雾爆轰的温度和

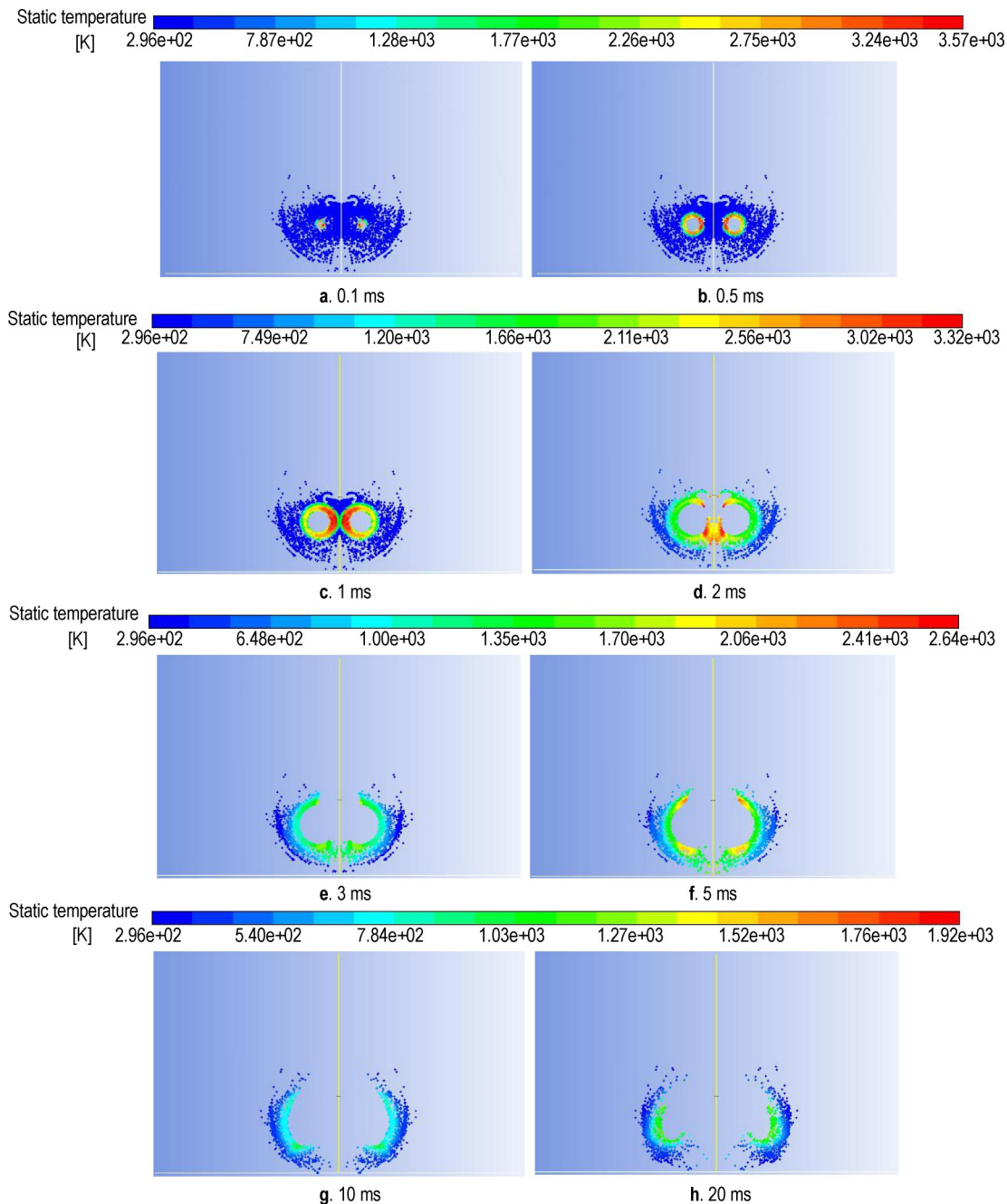


图5 云雾爆轰温度云图

Fig.5 Cloud detonation temperature nephogram

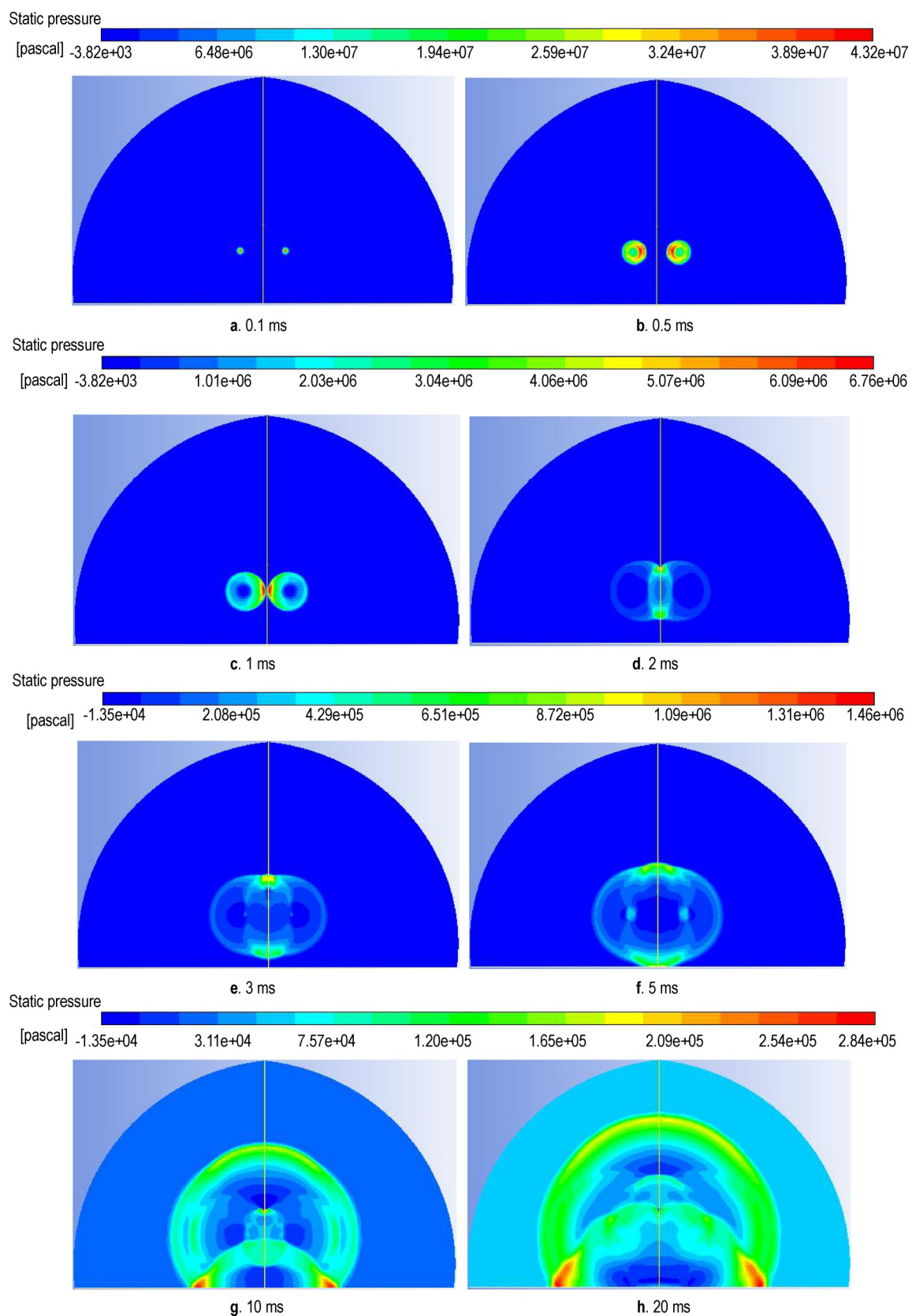


图6 云雾爆轰压力云图

Fig.6 Cloud detonation pressure nephogram

压力云图,结合图 5d、图 5e 可以看出,高速情况下,由于云雾的轴向扩散,云雾形状呈现斜向下的扩散趋势。在(1.4,0.6)起爆点进行点火后,火焰和超压沿内外两个方向迅速进行传播,在距点火中心 0.3 m 内,各点采集的超压值均大于等于 2 MPa。(1.4,1)点超压值为 1.7 MPa 且随距离逐渐减小,距中心 1 m 处爆轰压力可达到 1.2 MPa 左右,3 m 处爆轰压力在 0.3 MPa 左右。在 3 ms 左右出现椭圆形波阵面,并不断向外扩散。由温度曲线可以看出,爆轰过程中,云雾区爆轰波后流场各点的温度均可达到 2000~3000 K,温度曲线在到达峰值后同样出现波动。

与表 2 数值方法验证中静止状态下云雾爆轰相比,落速 $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 云雾爆轰在持续时间、火焰传播、超压作用位置、爆轰波传播等方面基本一致。由云雾爆轰压力云雾中 5 ms 时刻云图(图 6f)可以看出,落速 $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 云雾爆轰产生的爆轰波在 5 ms 时刻上顶点出现了凸起形状,并且爆轰波为斜向下传播趋势。

对爆轰区,在 1.4 m 点火水平面上每隔 0.2 m 设置一个监测点,得到的温度压力随时间变化曲线如图 7、图 8、图 9。

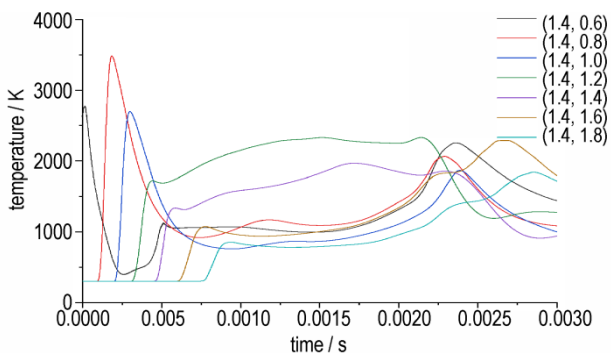


图 7 2 kg 环氧丙烷燃料高落速云爆温度-时间曲线

Fig.7 Temperature-time curves of cloud explosion at a high falling velocity of 2 kg propylene oxide fuel

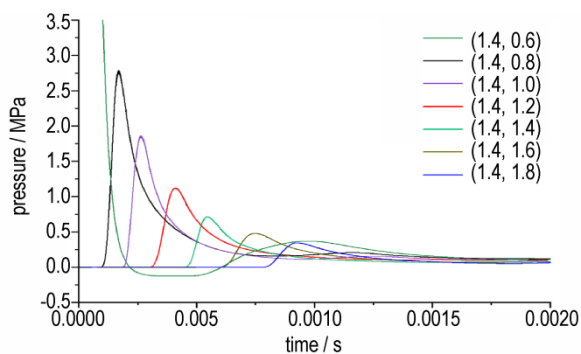


图 8 2 kg 环氧丙烷燃料高落速云爆近场压力-时间曲线

Fig.8 Near field pressure-time curves of cloud explosion at a high falling velocity of 2 kg propylene oxide fuel

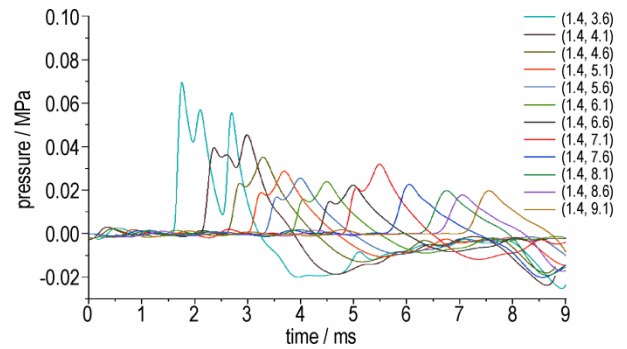


图 9 2 kg 环氧丙烷燃料高落速云爆远场压力-时间曲线

Fig.9 Far field pressure-time curves of cloud explosion at a high falling velocity of 2 kg propylene oxide fuel

为了对爆轰数据进行收集整理,并对爆轰远场的压力进行监测,将计算域扩大为 $10 \text{ m}\times 6 \text{ m}$,并在 1.4 m 水平面间隔 0.5 m 设置一个温度压力监测点,得到远场压力时间图。图 9 为高落速云雾爆轰远场压力时间曲线。从图 9 中可以看出,随着爆轰波不断向外传播,远场压力在不断减小,但由于距爆炸中心较远,压力衰减较为均匀,且均保持在较低压力。

为进一步探究高落速云雾爆轰,对静态云雾爆轰以及高落速云雾爆轰距点火中心相同位置的峰值数值模拟结果进行了对比,如图 10。

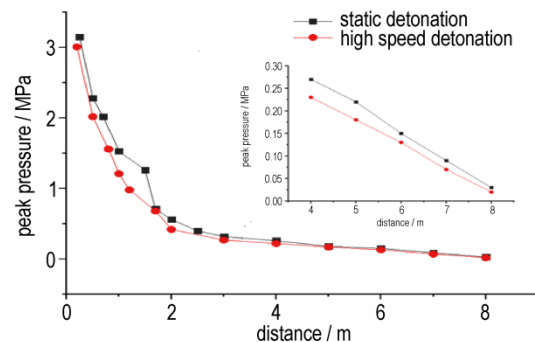


图 10 2 kg 环氧丙烷燃料高落速云爆距离-压力峰值曲线

Fig.10 Pressure peak-distance curves of cloud explosion at high falling velocity of 2 kg propylene oxide fuel

由图 10 可以看出,静态爆轰与高落速爆轰的压力峰值随时间变化趋势大体一致,随着距离的增加压力峰值不断衰减,两者均从最初的距中心约 0.2 m 处的压力峰值约 3 MPa,衰减至 5~6 m 处的 0.1~0.2 MPa,并不断衰减,且高落速爆轰在 8 m 处的冲击波压力峰值衰减至约 0.02 MPa。并且由图 10 可以看出,在距点火中心相同的距离处,静态爆轰的压力峰值略高于高落速爆轰。

综合图 6 到图 10 的计算结果可以发现,对于爆轰阶段,静态抛撒情况下,距爆轰中心 0.25 m 处爆轰压

力可达到约 3.1 MPa,在 1000 m·s⁻¹ 落速抛撒情况下,距中心 0.2 m 处压力也可达到约 3 MPa,之后压力均逐渐减小,并且初始静止状态与落速 1000 m·s⁻¹ 云雾爆轰在持续时间、爆轰压力传播衰减等方面基本一致,爆轰持续时间均约为 20 ms,可能是由于药量小导致分散后粒子速度衰减严重,使 2 种情况比较相近。同时爆轰形成的弧形波阵面向外扩散,1000 m·s⁻¹ 落速下波阵面有略微斜向下传播的趋势。随着距离向外增加,2 种情况下的压力峰值都随距离减小,并最终衰减至 0.02 MPa 左右,且在整个爆轰过程中,1000 m·s⁻¹ 落速云雾爆轰的压力峰值小于静态爆轰的压力峰值。说明 2 种情况下云雾爆轰过程影响规律基本一致,但高落速云雾爆轰具有斜向下传播趋势,且高落速云雾爆轰产生的威力略小于静态云雾爆轰威力。

4 结论

以 2 kg 环氧丙烷燃料静态分散及爆轰实验结果作为数值方法验证,对环氧丙烷云雾进行了 1000 m·s⁻¹ 高落速条件下分散与爆轰的数值模拟计算,研究了云雾在高落速条件下的分散及爆轰过程,得到以下结果,补充了对于 1000 m·s⁻¹ 高落速云雾分散、爆轰数值模拟研究的缺失,可为高落速云雾的优化设计提供参考。

(1) 研究了 2 kg 环氧丙烷燃料在 1000 m·s⁻¹ 落速条件下的云雾分散形态,在 100 ms 时刻云雾径向分散半径达到约 2.24 m,较静态分散 100 ms 时刻的数值模拟结果(3.05 m)降低了 26.6%,并存在云雾燃料空洞区。

(2) 研究了 2 kg 高落速云雾爆轰传播过程,爆轰温度和爆轰压力的变化过程。爆轰温度可达到 2000~3000 K,温度在到达峰值后上下波动。爆轰波在中心相遇后,中心爆轰波相遇处具有较大的超压值,距中心 0.2 m 处压力可达到约 3 MPa,距中心 1 m 处爆轰压力可达到 1.2 MPa 左右,3 m 处爆轰压力在 0.3 MPa 左右,形成的弧形波阵面向外扩散并不断衰减,最终在 8 m 处衰减至约 0.02 MPa。

参考文献:

- [1] VIJAYARAGHAVAN G. Impact assessment, modelling, and control of dust explosions in chemical process industries[D]. Coimbatore (India): Coimbatore Institute of Technology, 2004.
- [2] SMIRNOV N N, Zverev N I, Tyurnikov M V. Two-phase flow behind a shock wave with phase transitions and chemical reactions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, 13(1):11-20.
- [3] IVANDAEV A I. Numerical Investigation of Expansion of a cloud of dispersion particles or drops under the influence of an explosion[J]. *Fluid Dynamics*, 1982, 17(1):68-74.
- [4] 方伟,赵省向,李文祥,等. 爆炸抛撒过程中 FAE 云雾的运动特性[J]. 含能材料, 2015, 23(11):1061-1066.
FANG Wei, ZHAO Sheng-xiang, LI Wen-xiang, et al. Movement characteristics of fuel-air explosive (FAE) clouds in the explosion dispersal process[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11):1061-1066.
- [5] 杜海文,韩天一. 燃料抛撒初始阶段的蹿火现象[J]. 科技导报, 2015, 33(16):61-64.
DU Hai-wen, HAN Tian-yi. Phenomenon of fire in the initial stage of fuel dispersion [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(16):61-64.
- [6] 畅博,王世英. 二次起爆型云爆战斗部爆炸抛撒过程及毁伤作用[J]. 战术导弹技术, 2016(6):111-117.
CHANG Bo, WANG Shi-ying. Explosive dispersion process and damage effect of double event fuel air explosion warhead [J]. *Tactical Missile Technology*, 2016(6):111-117.
- [7] 薛社生,刘家聪. 液体燃料爆炸抛撒过程分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 1998, 022(1):34-38.
XUE She-sheng, LIU Jia-cong. Analysis of explosive dispersion for liquid fuel[J]. *Journal of Nanjing University of Science And Technology*, 1998, 022(1):34-38.
- [8] 陈明生,白春华,李建平. 燃料抛撒的初始速率与结构动态响应数值模拟[J]. 含能材料, 2015(4):323-329.
CHEN Ming-sheng, BAI Chun-hua, LI Jian-ping. Simulation on initial velocity and structure dynamic response for fuel dispersion [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015(4):323-329.
- [9] 刘庆明,白春华,李建平. 多相燃料空气炸药爆炸压力场研究[J]. 实验力学, 2008, 23(4):360-370.
LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, LI Jian-ping. Study oil blast field characteristics of multiphase fuel air explosive[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(4):360-370.
- [10] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: I. Basic theory [J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1:1-51.
- [11] CHOUDHURY D. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling [C]//Technical Memorandum TM-107, Landon: Fluent Inc, 1993, 15-50.
- [12] 罗艾民,张奇,李建平,等. 爆炸驱动作用下固体燃料分散过程的计算分析[J]. 北京理工大学学报, 2005(02):103-107.
LUO Ai-min, ZHANG Qi, LI Jian-ping, et al. Calculation and analysis of solid fuel dispersion process under explosive driving [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2005(02):103-107.
- [13] 王淑梅. 可燃性气体爆炸极限与温度、压力的关系[J]. 安全技术, 1998, 2.
WANG Shu-mei. The relationship between the explosion limit of combustible gas and temperature and pressure [J]. *Security Technology*, 1998, 2.
- [14] FLUENT Incorporated. *Fluent 6.3 User's Guide*. Cavendish: Fluent Incorporated, 2006.
- [15] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5):1.
WANG Fu-jun. Computational fluid dynamics analysis——prin-

- ciple and application of CFD software[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2005, 20(5):1.
- [16] REITZ RD. Mechanisms of atomization processes in high-pressure vaporizing sprays [J]. *Atomization and Spray Technology*, 1987, 3: 309-337.
- [17] 炎正馨. 纳米铝粉在环氧丙烷快速反应催化机理研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- YAN Zheng-xin. Study on catalytic mechanism of rapid reaction of nano-aluminum powder in propylene oxide[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [18] BOTT T R, SADLER H N. Vapor pressure of propylene oxide[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1966, 11(1): 25.

Numerical Simulation of Cloud Detonation at high Falling Velocity

SU Zhen¹, GAO Hong-quan², ZHAO Hong-wei², ZHANG Qi¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. 96901 troops of the Chinese People's Liberation Army, No. 109 Courtyard, Beijing 100094, China)

Abstract: To study the fuel dispersion and detonation process at a falling speed of $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a computational simulation model of fuel dispersion detonation was established, and the static fuel dispersion and cloud detonation experimental results were used as numerical methods to verify the results. Results show that under the condition of a falling speed of $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the distribution of cloud shape and concentration field with time and space is obtained by numerical simulation. The cloud shape is roughly fan-shaped, and the concentration gradually decreases with distance, and finally reaches a stable distribution. The radial radius of the cloud can reach 2.24 m. The law of the cloud detonation process and the influence of the detonation pressure field and temperature field are obtained. After initiation, the arc-shaped wave front is formed and diffuses outward, and the temperature and pressure continue to decay. The numerical simulation results are consistent with the experiments, which provide a new way for the safety design of the high-falling velocity cloud explosion weapon system.

Key words: cloud dispersion; high falling speed; cloud; detonation; propylene oxide fuel; fuel air explosive

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022265

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 11972089)

(责编: 姜梅)