

DOI: 10.12382/bgxb.2025.0535



# 基于 VOF-DPM 方法的液体燃料爆炸抛撒数值模拟

随亚光<sup>1\*</sup>, 吴玉欣<sup>2</sup>, 仵可<sup>1</sup>, 张国凯<sup>2</sup>, 吴易烜<sup>1</sup>, 魏欣<sup>1</sup>, 李浩<sup>1</sup>

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 南京理工大学 安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 云爆剂抛撒形成燃料云雾的扩展直径及其变化速率, 是影响燃料空气炸药爆轰威力的关键因素。基于开源计算流体力学平台 OpenFOAM, 开发可压缩两相流 VOF-DPM 动网格求解器, 实现对液体燃料爆炸抛撒过程的高效数值模拟。在实验验证的基础上, 进一步研究云爆装置长径比与比药量等参数对抛撒特性的影响规律。研究表明: 云爆剂抛撒过程可分为三个阶段, 呈现先加速后减速的特征; 长径比增大可提升燃料抛撒初期速率, 当长径比达到 3 时最终扩展直径达 7.2 m; 比药量参数对抛撒初期扩展速率影响显著, 但对云雾最终稳定尺寸作用有限。通过建立冲击波驱动的燃料抛撒多物理场耦合模型, 为优化云爆装置结构设计提供了理论依据。

**关键词:** 燃料空气炸药; 爆炸抛撒; 流体体积法; 离散相模型

**中图分类号:** O382 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2026)04-250535-12

## Numerical Study on Explosive Dispersion of Liquid Fuels Using the VOF-DPM Method

SUI Yaguang<sup>1\*</sup>, WU Yuxin<sup>2</sup>, WU Ke<sup>1</sup>, ZHANG Guokai<sup>2</sup>, WU Yixuan<sup>1</sup>, WEI Xin<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China;

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

**Abstract:** The expansion diameter and change rate of fuel cloud resulting from the dispersal of cloud explosive agents are crucial in determining the detonation power of fuel-air explosives. Based on the open-source computational fluid dynamics platform OpenFOAM, a compressible two-phase flow VOF-DPM dynamic mesh solver is developed to achieve the efficient numerical simulation of fuel dispersion process. The numerical results are validated by experimental data. Then the influences of the aspect ratio and specific loading parameters of cloud explosive device on the kinetic characteristics of fuel dispersion are studied. The research shows that the dispersion process of cloud explosive agents can be divided into three stages, following a pattern of accelerating first and then decelerating. A larger aspect ratio increases the initial dispersion rate of the fuel. When the aspect ratio reaches 3, the final expansion diameter is 7.2 meters. The specific loading parameter significantly affects the initial expansion rate, but has a limited effect on the final stable size of the cloud. This paper establishes a multi-physical-field coupling model for shockwave-driven fuel dispersal, providing a theoretical basis and a numerical simulation method for optimizing the structural design of cloud explosive devices.

**Keywords:** fuel air explosive; explosive dispersion; volume of fluid method; discrete phase model

收稿日期: 2025-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278504)

\* 通信作者邮箱: suiyaguang@nint.ac.cn

## 0 引言

燃料空气炸药 (Fuel-Air Explosive, FAE), 又称云爆弹, 相比于传统的高爆炸药 (如 TNT、RDX), 其单位质量能量密度提升 2~3 倍, 通过形成大范围可燃云雾并爆轰, 产生强冲击波和热效应, 对大面积军事目标构成显著毁伤。凭借高威力特点, FAE 武器在现代战争和特种爆破领域具有重要的战略价值和广阔的应用前景, 已成为弹药研发的重点方向之一<sup>[1]</sup>。FAE 通过爆炸驱动燃料抛撒形成燃料云雾, 燃料云雾的扩展直径及其变化速率直接决定了云雾的空间分布均匀性、燃料浓度和后续爆轰效能。因此, 深入研究云雾爆炸抛撒动力学特性, 揭示关键参数的影响规律, 对优化云爆武器设计至关重要。

由于云雾抛撒过程伴随高速冲击波驱动、复杂气-液相互作用、液团雾化破碎等强瞬态、多尺度物理现象, 传统的实验手段虽然可获取宏观参数 (如云雾直径变化), 却难以捕捉流场细节及其瞬态演化机制。近年来, 基于计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的数值模拟技术逐渐引起研究人员的关注, 该方法能够得到详细的流场信息, 已成为研究 FAE 抛撒过程的重要手段。在早期关于抛撒过程的数值研究中, 大多对物理过程进行了大量简化。例如 20 世纪 80 年代初, Ivandaev<sup>[2]</sup> 对云爆剂抛撒过程进行了一维数值模拟, 其假定液滴的初始分布, 但未考虑液滴后续的剥离和破碎过程。1990 年, 美国桑地亚国家实验室 Gardner<sup>[3]</sup> 和 Glass<sup>[4]</sup> 将抛撒过程分为近场抛撒和远场抛撒, 通过耦合近场抛撒与远场抛撒模型, 实现了抛撒整体过程的模拟研究。类似地, 丁珏等<sup>[5-7]</sup> 也将复杂的云雾形成过程分为近场和远场两个阶段, 并基于一维假设建立了爆炸抛撒初期爆轰产物膨胀、液体燃料运动和破碎以及燃料团运动后期的多相流模型, 对装填 15 kg 环氧丙烷的 FAE 云团形成过程进行了数值模拟, 计算所得云雾外形变化与实验结果接近。随着计算能力的提升, 对于云雾抛撒过程的研究也从一维简化模型向三维实际模型拓展。徐豫新等<sup>[8]</sup> 采用有限元分析软件进行三维仿真计算, 研究了爆炸驱动液体燃料抛撒初始阶段的物理特性。方伟等<sup>[9]</sup> 通过数值仿真得到了燃料圆柱外表面中心点处质点的速度变化。Li 等<sup>[10]</sup> 从壳体的连续性方程和运动方程出发, 利用圆柱壳的 Taylor 断裂准则, 推导出了 FAE 液体燃料泄漏时的断裂半径和断裂速度的变化关系, 并采用 Adomian 分解法和

Runge-Kutta 数值方法, 获得了带壳液体燃料弥散过程的解析解。陈明生等<sup>[11]</sup> 利用有限元分析程序, 针对扇形截面的装药装置, 数值模拟壳体破裂与云爆剂抛撒过程, 并探究了中心抛撒药的类型以及壳体的刻槽间距对燃料抛撒速率的影响。但以上数值模拟多聚焦在云雾抛撒的初期, 缺少对后期液团雾化破碎和流场演变的计算分析。

要实现云雾抛撒整体过程的多相模拟, 需要完整考虑液相的运动计算以及气-液两相作用的处理。一种常用的方法是将气相看作连续相, 以欧拉框架下的守恒方程进行求解, 而把液相燃料看作是离散项, 以拉格朗日点源方法<sup>[12]</sup> 进行求解。在这种方法中, 液相控制方程被简化为一组拉格朗日控制方程, 每个液滴的运动和物理参数分别求解, 液滴运动和蒸发对气相的作用体现在气相欧拉控制方程组的源项。Zeng 等<sup>[13-14]</sup> 采用拉格朗日方法计算液态燃料运动, 比较了圆柱形、方形和扇形装药结构的燃料分散过程, 得到了不同装药结构下 11 kg 固-液燃料抛撒过程的云雾半径和浓度变化。Chen 等<sup>[15]</sup> 对爆炸载荷驱动下固-液混合燃料的抛撒进行了数值模拟, 通过离散相模型 (Discrete Phase Model, DPM) 得到了固-液混合燃料多相云中的浓度和湍流强度。苏震等<sup>[16]</sup> 针对环氧丙烷燃料在 1 000 m/s 落速下的抛撒和爆轰过程, 使用 DPM 进行数值模拟, 研究了高落速燃料云雾分散特性以及爆轰时温度与压力的变化情况。然而, 点源方法适用于稀疏两相流, 并不考虑液滴在流场中所占的体积大小, 但对流场尺度和液滴尺度具有严格的要求。近期有研究<sup>[17]</sup> 提出液滴直径小于 0.6 倍网格尺度时才是合理的, 这在一定程度上限制了点源方法的使用。

另一种方法是将气相和液相皆看作是连续相, 基于欧拉方法捕捉液相在蒸发过程中的界面变化, 目前应用较多的两种界面捕捉方法为流体体积 (Volume of Fluid, VOF) 方法<sup>[18-19]</sup> 和水平集 (Level Set, LS) 方法<sup>[20-21]</sup>。其中 VOF 方法通过求解目标 VOF 数的输运方程得到的分布, 然后基于此重构出液相界面, 其优势是易于保持质量守恒。例如 Ren 等<sup>[22]</sup> 对无约束外场中固-液燃料的扩散和三相混合云爆轰过程进行了数值模拟, 使用 VOF 方法计算了冲击波与液体燃料的相互作用。然而, 不论是单独采用 VOF 方法或 LS 方法, 还是采用耦合 CLSVOF (Coupled Level Set method and Volume of Fluid)<sup>[23]</sup>, 求解液相运动行为时都需要非常细密的网格, 直接应用于云雾抛撒计算都将会带来巨大的计算量, 无法应用于多工

况的计算分析。

点源方法计算效率高,但受流场尺度限制大且精度有限;界面捕捉方法通过对液相的全尺度求解而具有较高精度,但计算量耗费巨大。鉴于两种方法的不同特点,近期研究者<sup>[24]</sup>尝试采用“界面捕捉-点源”混合算法,其思想是对流场中连续的液柱、大的液块和液滴采用界面捕捉方法求解,又根据一定的转换准则将达到一定尺度的小液滴转换为拉格朗日粒子求解。基于“界面捕捉-点源”混合算法思想,一些研究者采用VOF-DPM (Volume of Fluid-Discrete Phase Model) 方法对喷雾雾化过程进行了模拟计算,皆展现出了较高的计算精度和计算效率<sup>[25-27]</sup>。

综上所述,在对云雾抛撒过程的数值研究中,早期研究多对实际过程进行了大量简化或只计算分析了云雾抛撒初期的液相运动,近期对于云雾抛撒整体过程的多相模拟,研究者皆是单一采用拉格朗日点源方法或欧拉方法处理液相行为,存在计算效率和计算精度无法兼顾的问题。

考虑到“界面捕捉-点源”混合算法在处理气-液两相运动方面的优势,本文基于OpenFOAM开发了可压缩两相流VOF-DPM动网格求解器,以实现对FAE的云爆剂抛撒全过程的高效数值模拟。在对数值方法进行实验验证的基础上,进一步模拟分析了比药量、云爆装置长径比等关键参数对燃料云团膨胀速率和最终扩展直径的影响,以期优化云爆装置结构设计提供参考。

## 1 VOF-DPM方法

本文的数值计算中,利用VOF方法计算连续液相与气相间的相界面,并捕捉云爆剂抛撒的一次破碎过程;对于破碎后形成的液滴,当满足预先设置的转化标准时,将其转化为颗粒,采用DPM模型描述其运动行为。

### 1.1 VOF方法

VOF方法是一种基于欧拉框架的相界面捕获法,通过求解单一的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分,模拟2种或多种不能混合的流体。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $\mathbf{v}$ 为速度矢量场。

动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \\ \nabla \cdot \left( \mu \left[ (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] \right) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $p$ 为静压; $\mu$ 为分子的动态黏度系数; $\mathbf{I}$ 为单位张量; $\rho \mathbf{g}$ 为重力体积力, $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量; $\mathbf{F}$ 为附加体积力(浮力、电磁力等)。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_{\rho T} \quad (3)$$

式中: $T$ 为流体温度; $k$ 为流体的传热系数; $c_p$ 为定压比热容; $S_{\rho T}$ 为源项。

气体状态方程为

$$p = \rho_g R T \quad (4)$$

式中: $\rho_g$ 为气体密度; $R$ 为普适气体常数。

本文中以液相作为第一相,求解液相的体积分跟踪气-液两相的界面运动。相分数方程为

$$\frac{\partial(\rho \alpha_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \alpha_1 \mathbf{U}) = S_1 \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_g} \quad (6)$$

式中: $\alpha_1$ 为单个网格中液相体积与整个网格体积的比值; $S_1$ 为源项; $V_1$ 和 $V_g$ 分别为网格内液相和气相体积; $\mathbf{U}$ 为流体速度矢量。

本文采用RANS方法中的两方程标准 $k-\varepsilon$ ( $k$ 为湍流动能, $\varepsilon$ 为湍流耗散率)模型,这是一种针对充分发展的湍流流动,即高雷诺数湍流流动的计算模型,其输运方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \quad (7)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

式中: $u_i$ 为时均速度; $\mu$ 为分子动力黏度; $\mu_t$ 为湍流黏度; $x_i, x_j$ 为直角坐标系下的坐标分量; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为湍动能普朗特数; $G_k, G_b$ 为时均速度梯度与浮力引起的湍动能生成项; $Y_M$ 为可压缩流体中膨胀耗散项; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 的取值分别为1.44、1.92、1.0、1.3;对于可压流体的流动计算中与浮力相关的系数 $C_{3\varepsilon}$ ,当主流方向与重力方向平行时 $C_{3\varepsilon} = 1$ ,当主流方向与重力方向垂直时 $C_{3\varepsilon} = 0$ 。

在 VOF 方法的控制方程中,各网格单元的  $\rho$  与  $\mu$  分别由相应的液体和气体性质的加权平均值获得:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + (1 - \alpha_1) \rho_g \quad (9)$$

$$\mu = \alpha_1 \mu_1 + (1 - \alpha_1) \mu_g \quad (10)$$

式中:  $\rho_1$  与  $\rho_g$  分别为液相和气相密度;  $\mu_1$  和  $\mu_g$  分别为液相和气相黏度。

### 1.2 DPM 模型

DPM 是一种用于模拟流场中颗粒、液滴或气泡等离散相在连续介质中运动的方法。该方法基于拉格朗日框架,考虑作用在离散相上的各种力(例如曳力、重力、浮力等),通过牛顿第二定律构建并求解每个颗粒的运动微分方程来追踪其轨迹。离散相颗粒运动方程在笛卡尔坐标系下的形式如式(11)、式(12)所示。对运动方程进行积分即可得到颗粒的速度与轨迹。

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p \frac{(u - u_p)}{\tau_r} + m_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (11)$$

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (12)$$

式中:  $m_p$  为颗粒质量;  $u$  与  $u_p$  分别为连续相流体与离散相颗粒的运动速度;  $\rho$  与  $\rho_p$  分别为流体与颗粒的密度;  $g$  为重力加速度;  $F$  为其他作用力;  $x$  为颗粒的位置矢量;  $\tau_r$  为颗粒弛豫时间,

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_g} \cdot \frac{24}{C_D Re} \quad (13)$$

$d_p$  为颗粒直径,  $\mu_g$  为气相动力黏度,  $C_D$  为曳力系数,  $Re$  为颗粒雷诺数。

液滴破碎模型使用 KH (Kelvin-Helmholtz)-RT (Rayleigh-Taylor) 模型预测,液滴颗粒在气流中同时受到 KH 和 RT 两种不稳定波的作用。液滴的破碎由 2 种不稳定波中最快增长的波引起。

### 1.3 VOF 与 DPM 的转换

本文的数值计算中,利用 VOF 方法计算连续液相与气相间的相界面,并捕捉云爆剂抛撒的一次破碎过程;对于破碎后形成的液滴,当满足预先设置的转化标准时将其转化为颗粒,采用 DPM 模型描述其运动行为。

两种模型之间的转化机制<sup>[28]</sup>如下:

1) 液滴的体积等效直径  $d_{eq}$  小于模型转换直径  $d_c$ 。液滴的体积等效直径是具有与给定液滴相同质量的完美球体的直径,由式(14)给出:

$$d_{eq} = (6V_p / \pi)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

式中:  $V_p$  为液滴体积。

2) 球形度  $\psi_{eq}$  小于预设值  $\psi_c$ 。球形度是量化物体形状接近理想球体程度的参数,此处定义为与液滴体积相同的球体表面积与液滴实际表面积之比,如下式:

$$\psi_{eq} = \frac{\sqrt[3]{\pi(6V_p)^2}}{A_p} \quad (15)$$

式中:  $A_p$  为液滴表面积。

在本文计算中,若以上两条件均满足,则将在计算域对应的液滴转化为拉格朗日粒子,同时将该液滴从欧拉场中移除。本文中模型转换直径  $d_c$  设为 5 mm,球形度预设值  $\psi_c$  设为 1。

## 2 模型验证

本文使用基于 C++ 语言编写的开源 CFD 软件包 OpenFOAM 进行数值计算,所用到的求解器通过在官方提供的可压缩两相流 VOF 求解器 compressibleInterDyMFoam 中添加 DPM 得到。

### 2.1 计算模型

针对云爆装置静爆实验,建立在开敞空间内云爆剂抛撒的数值计算模型。本文假设装置外壳在爆炸瞬间破碎,且不对之后的燃料抛撒过程造成影响。如图 1 所示,建立三维计算模型, OXYZ 为直角坐标系,计算域为直径 8.5 m、高 3.5 m 的圆柱体,云爆装置与水平地面保持垂直,并置于计算域中轴线上,装置中心距离地面 2 m。其中,云爆装置外壳是直径为 0.112 m、高为 0.168 m 的圆柱体,中心装药与装置同轴,直径为 0.02 m、高为 0.168 m。

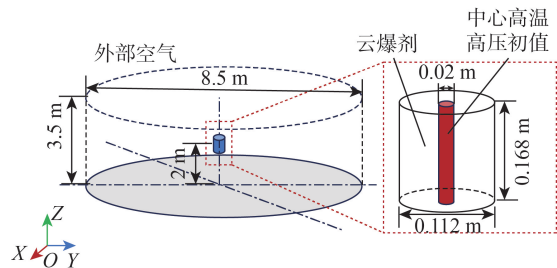


图 1 爆炸抛撒计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of explosion dispersion computational model

计算域底部边界为地面,设置为无滑移条件;其余各面与大气相连,设置为无反射边界条件。云爆装置中心抛撒药的爆炸作用通过设置高温高压来表述,初始温度设为 2 500 K,压强设为 100 MPa。环境

温度设为 298 K,压强设为 100 kPa。本文计算时中心抛撒药为 TNT,云爆剂设置为环氧丙烷,其相关物性参数如表 1 所示,并假设计算过程中物性参数不变。计算过程中,气相均视为理想气体。

表 1 云爆剂物性参数

Table 1 Physical properties of FAE liquid fuel

物性	数值
分子式	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O
摩尔质量/(g·mol <sup>-1</sup> )	58
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	830
定压比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	2 106.72
动力黏度/(Pa·s)	3.089×10 <sup>-4</sup>
运动黏度/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	3.749×10 <sup>-7</sup>
普朗特数	3.83
表面张力系数/(N·m <sup>-1</sup> )	0.024 5

为了保证获得的结果不受网格质量的影响,进行网格无关性检验。分别采用 46 万(网格 1)、84 万(网格 2)、110 万(网格 3)和 150 万(网格 4)共 4 种不同数量的初始网格进行仿真计算,对比其在 50 ms 内燃料云雾的扩展直径。仿真计算时均采用 4 级网格自适应加密,所得结果如图 2 所示。图 2 的结果显示,当基础网格数从 110 万增加到 150 万时,50 ms 时云雾扩展直径相差 0.76%。同时考虑计算精度与计算成本,本文采用 110 万初始网格方案。

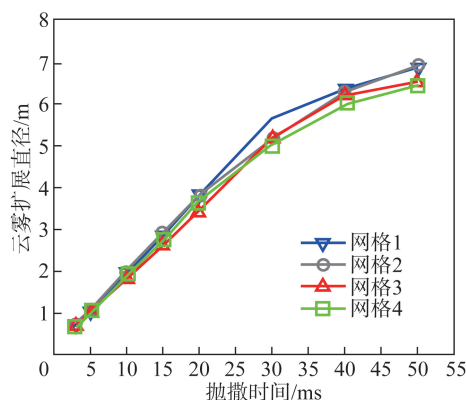


图 2 不同初始网格数下云雾扩展直径随时间的变化  
Fig. 2 The variation of the cloud expansion diameter over time under different initial grid numbers

### 2.2 可靠性验证

基于爆炸抛撒实验进行分散过程的模拟计算,并与文献[16]中的实验结果进行对比,云雾形貌变化如图 3 所示,云雾直径变化如图 4 所示。由图 3 可知,实验与数值模拟所得云雾形貌基本一致,均呈现出前期径向迅速扩张与后期纵向缓慢膨胀的特点。从图 4 中可以看出,数值模拟所得变化曲线与实验结果可以较好吻合,在 50 ms 时实验分散直径约为 6 m,数值模拟分散直径为 6.55 m,相对误差为 9.17%,表明该结果较为可靠。

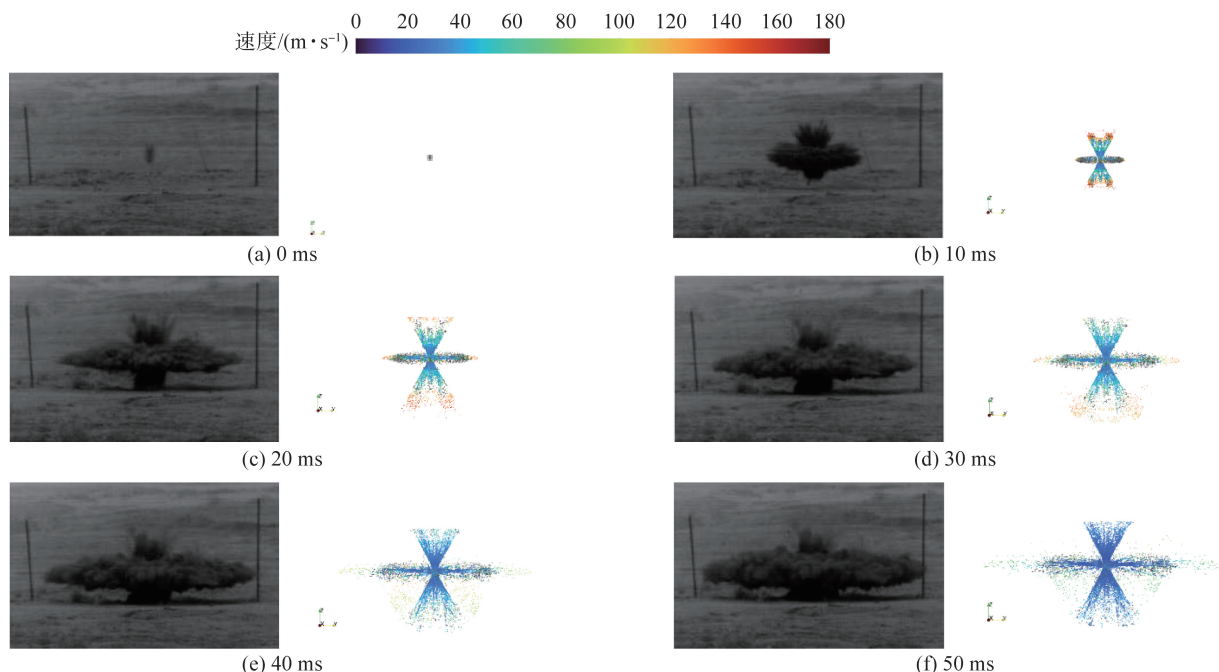


图 3 实验(左)与数值模拟(右)获得的云爆剂抛撒过程<sup>[16]</sup>

Fig. 3 The dispersion process of cloud explosive agents in experiments(left) and numerical simulations(right)<sup>[16]</sup>

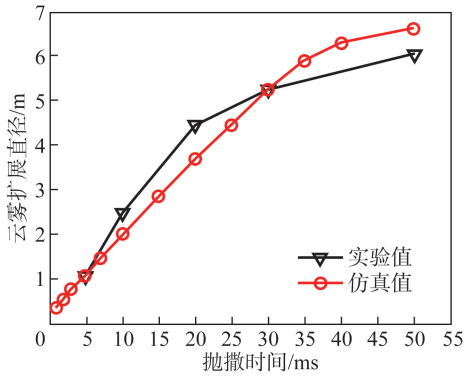


图 4 云爆装置燃料抛撒直径的实验结果与数值模拟对比

Fig. 4 Comparison of experimental and simulated results of the fuel dispersion diameter in cloud explosion device

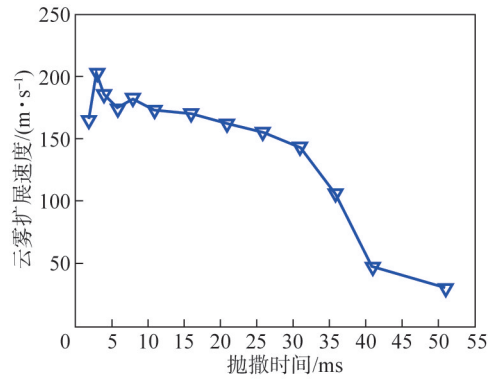


图 5 云雾扩展速率随时间的变化

Fig. 5 The variation of cloud expansion rate over time

### 3 结果与分析

#### 3.1 云雾扩展特征

图 5 为云雾扩展速率随时间的变化情况,从中可以看出,燃料云雾径向膨胀速率呈现先增大后减小的趋势,其中加速过程极快,在 2 ms 左右达到最大,约为 200 m/s。选择计算域中的横截面,并创建不同时刻的流场速度矢量云图,如图 6 所示。

通过对云雾运动特征的分析,可以得出在燃料抛撒的前 2 ms 内,径向扩展速率较快。由图 5 可知,在此阶段冲击波对燃料的驱动力大于气动阻力,表现为加速膨胀;在 2~30 ms 时间段内,驱动力开始小于气动阻力。由于云雾的惯性作用,其仍呈现向外扩张的趋势,但扩张速度显著降低,进入减速扩展阶段;在 30 ms 后,云雾逐渐进入湍流扩展阶段,在此期间云雾直径变化缓慢,云雾厚度略有增加;从 30 ms 后的矢量图可以看出,云雾边缘主要表现为湍流卷吸运动,径向膨胀运动明显减弱。

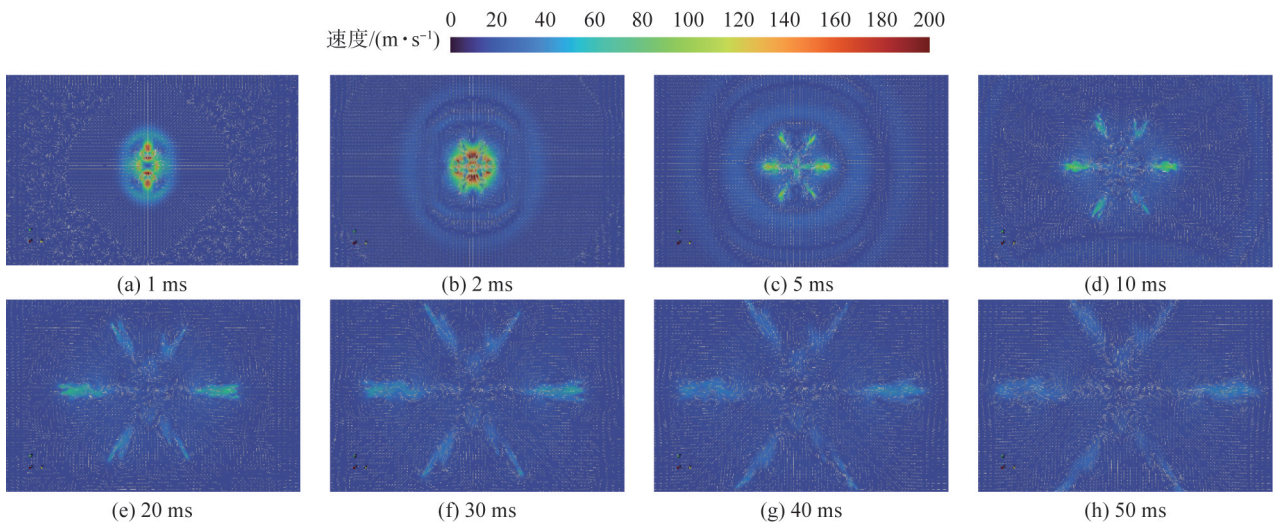


图 6 Y=0 m 截面上不同时刻的速度矢量图

Fig. 6 Velocity contours on Y=0 m cross-section at different times

选择计算域中 Y=0 m 截面,创建不同时刻的压力云图,如图 7 所示。在计算域中,沿径向方向定义一条监测线,起点位于抛撒装置初始位置的中心,延伸至 0.5 m 处。该监测线上压力分布随时间的变化情况如图 8 所示。观察可知,抛撒的前 5 ms 内,压力变化主要可分为 4 个阶段:1)0~0.2 ms,爆源处

局部压力表现为急速降低。此阶段高压爆轰产物的能量极短时间内转化为燃料的动能,但由于云爆剂的限制,压力的径向扩展速率较慢;2)0.2~0.5 ms,爆源局部压力衰减放缓,爆轰产物的压力势能进一步转化为云爆剂燃料的动能。此阶段监测线上出现明显的波动,反映出压力波与周围流场的相互作用

及局部反射效应;3) 0.5~1.5 ms, 压力波推动燃料液团进一步扩展, 爆源处压力继续下降。此时压力波前缘处出现靠近中心处压力大而远离中心处压力小的阶跃变化, 其原因在于压力波前缘处为燃料液团, 此阶段燃料液团已获得较大的抛撒速度, 而压力波尚未传播到的外围空气可视为静止, 液团运动前缘处在这种速度差下形成局部高压(见图 7), 与此同时, 靠近中心处压力由于膨胀作用继续降低, 进而导致压力阶跃现象;4) 1.5~5.0 ms, 压力波继续向外扩散, 但在监测线上的波动幅度趋缓, 且整体压力值逐渐趋于环境压力, 表明冲击波能量已基本耗散殆尽。

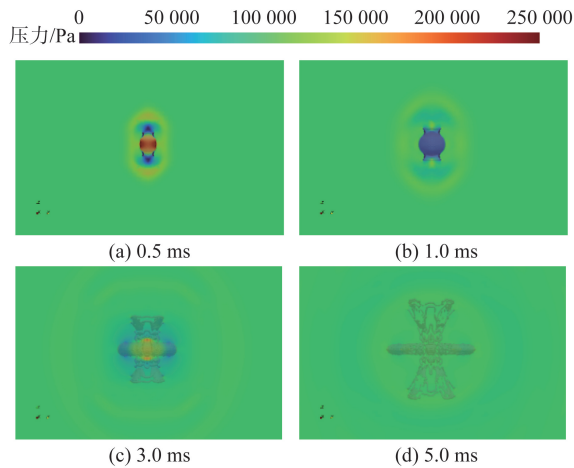


图 7 Y=0 m 截面上不同时刻的压力云图  
Fig. 7 Pressure contours on Y=0 m cross-section at different times

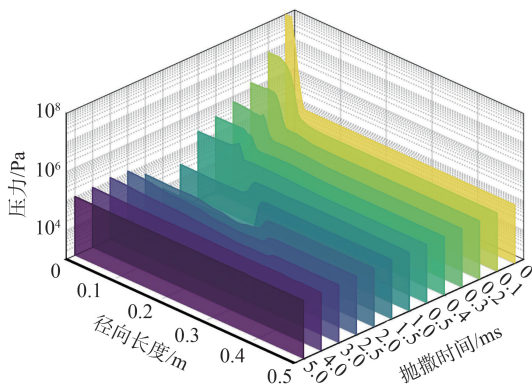


图 8 径向监测线上的压力分布随时间变化情况  
Fig. 8 Pressure distribution along the radial monitoring line as a function of time

云爆剂抛撒过程中的液团形态变化与破碎是一个复杂的流动过程, 涉及到高速液团与周围流体的相互作用以及剪切力、压力梯度和黏性效应的影响。燃料液团在 0~5.0 ms 内的液相轮廓变化如图 9 所示。由图 9 可见: 在初始时刻(0 ms), 液团外形为完

整的圆柱形; 在 0~1 ms 期间, 液团在中心处高压气体推动作用下逐渐发生形态畸变, 边缘出现局部凹凸, 液团外轮廓呈波浪状; 3~5 ms 时, 液团已出现破碎现象, 气-液界面呈现不规则裂纹和分叉, 大量液滴从液团中分离并扩散至周围区域。

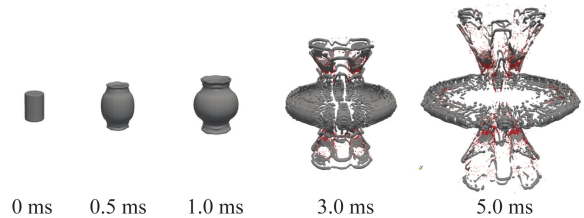


图 9 燃料液团在 0~5.0 ms 内液相轮廓变化  
Fig. 9 The variation of the liquid phase contour of fuel droplet between 0 and 5.0 ms

选取 5 ms 时的液团相界面, 通过对其周围流线的观察, 根据图 10 显示的结果, 可以明显观察到, 液团上下侧形成了一对逆向涡流, 这些涡流与高速液团相互作用, 并对其施加了强烈的剪切力和拉伸作用, 导致液团发生明显的变形和局部拉伸, 当液团边缘的流体层受到的剪切力超过其黏性阻力时液团开始破碎, 大量液滴从液团上下两侧剥落, 并逐渐分裂成更小的液滴。

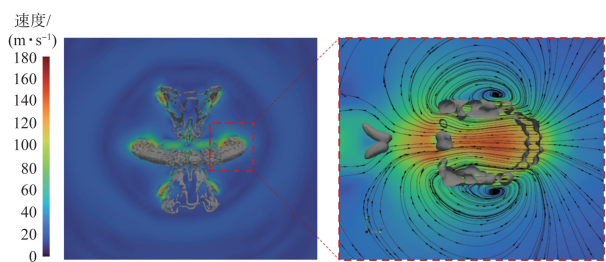


图 10 5 ms 时刻液团前缘附近的流线分布  
Fig. 10 Streamline distribution near the leading edge of fuel droplet at 5 ms

图 11 所示为抛撒过程中燃料质量浓度分布的演变, 其中横轴表示监测点与爆炸中心在地面的投影距离, 纵轴表示云雾团的燃料浓度, 并区分由 VOF 方法捕捉的液滴和由 DPM 方法追踪的液滴。从图 11 中可以看出: 随着云雾团体积的膨胀, 云雾团内的燃料浓度不断降低; 在 10 ms 时燃料液团主要集中在靠近爆炸中心的位置, 且 VOF 方法计算的连续相浓度显著高于 DPM 方法计算的离散相浓度, 表明在此阶段液团尚未充分破碎与扩散; 在 20 ms 时, 虽然靠近爆炸中心的位置仍然保持较高浓度, 但通过 DPM 方法计算的离散液滴颗粒浓度占比明显

增加,表明燃料液团的破碎程度增强;在 30~50 ms 期间,经过进一步扩散,燃料云的浓度分布更加均

匀,此时 DPM 方法计算的离散相浓度占比显著增加,表明液团已经充分破碎并形成大量细小的液滴。

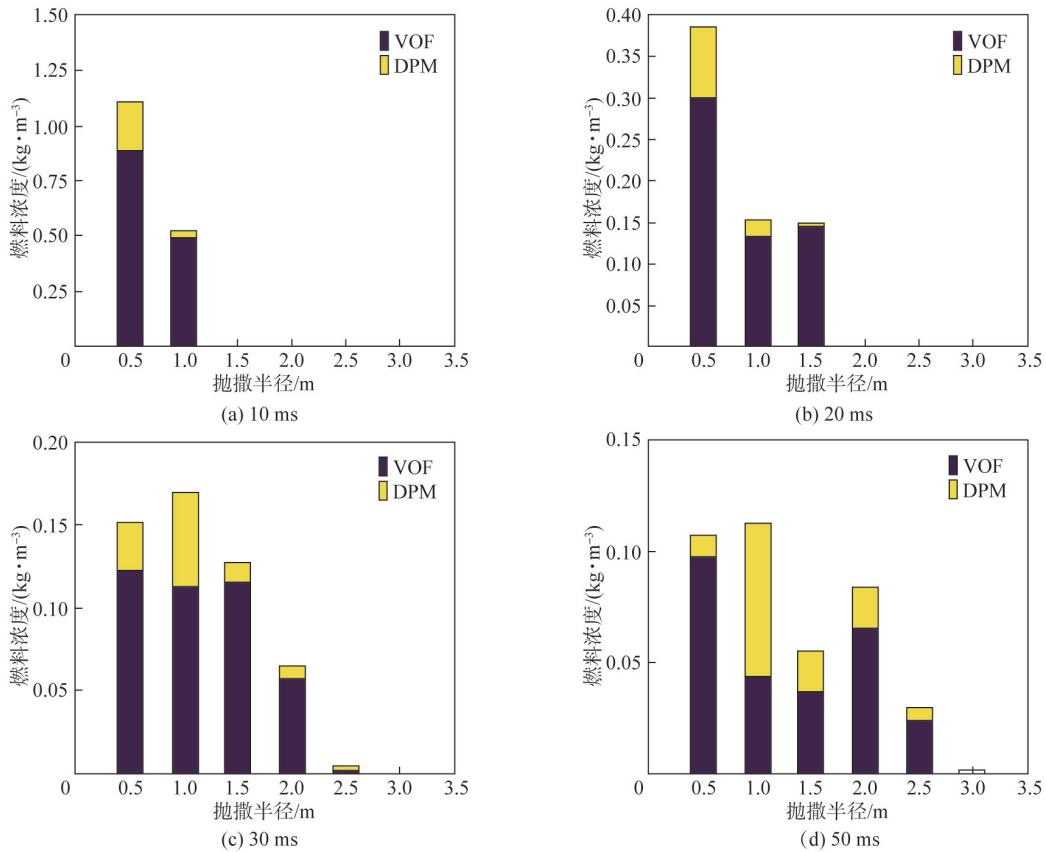


图 11 抛撒过程中燃料质量浓度分布的演变

Fig. 11 Evolution of fuel mass concentration distribution during dispersion

### 3.2 长径比对云雾形貌的影响

长径比是指 FAE 云爆装置的高与底面直径之比,它是发展远程云爆弹和低阻型航弹的一个具有重要意义参数,因此研究长径比对云爆剂抛撒的影响具有重要的意义。

本节使用图 12 所示的 FAE 云爆装置结构 ( $L$  为云爆装置高度,  $D$  为云爆装置底面直径,  $d$  为中心抛撒药柱直径),云爆剂质量与装置比药量保持不变,采用 4 种不同长径比的 FAE 装置进行数值模拟,各装置结构数据如表 2 所示。

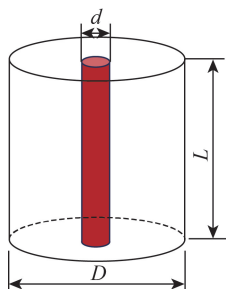


图 12 云爆装置结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the structure of FAE device

表 2 不同长径比的云爆装置结构参数

Table 2 Structural parameters of cloud explosion devices under different aspect ratios

云爆装置尺寸 $D \times L / \text{mm}$	中心装药尺寸 $d \times L / \text{mm}$	比药量 $\beta / \%$	长径比 $L/D$
128.2×128.2	22.9×128.2	6.56	1.0
112.0×168.0	20.0×168.0	6.56	1.5
88.9×266.7	15.9×266.7	6.56	3.0
80.8×323.0	14.4×323.0	6.56	4.0

采用不同长径比时的云雾形貌如图 13 所示。从云雾形貌上看,装置长径比越大,最终形成的燃料云雾厚度越大,且在轴向上抛撒出的燃料占比越少。这是因为大长径比装置的轴向约束相比于小长径比装置的更强,使得中心高压气体的压力势能更多地转化为燃料的径向动能。

云雾扩展直径及其变化速率如图 14 所示,从中可以看出,当长径比从 1 增加到 4 时,云雾扩展直径呈现先增大后减小的非线性变化趋势,当长径比为

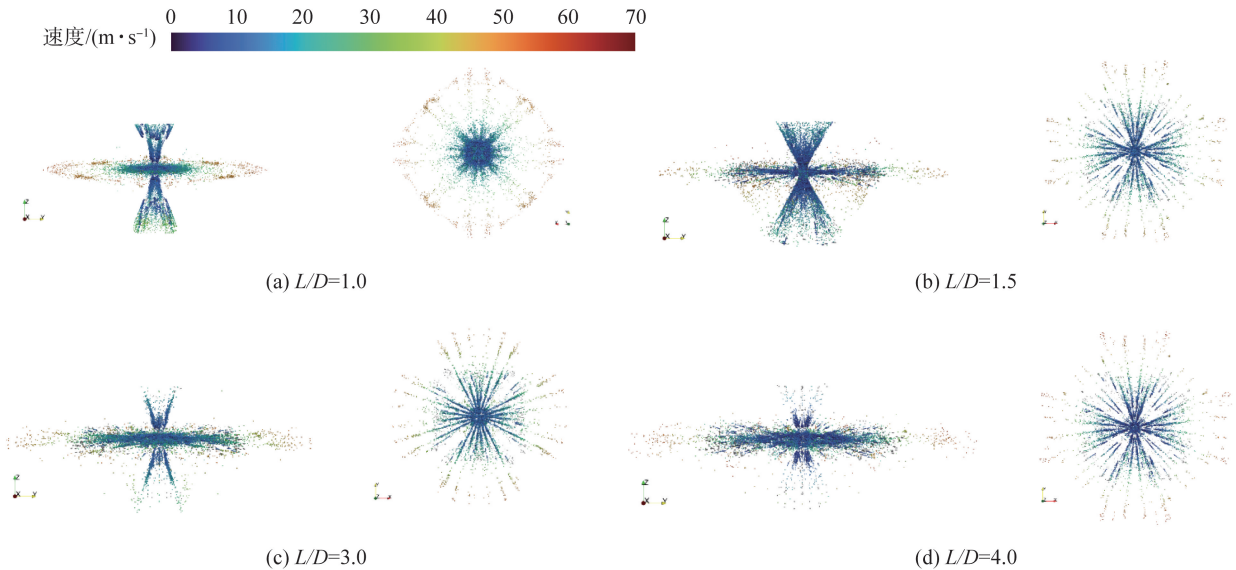


图 13 不同长径比时的云雾形貌(左为正视图,右为俯视图)

Fig. 13 Cloud morphologies at different aspect ratios(the left is the front view, and the right is the top view)

3 时,达到最优扩展效果,此时云雾径向覆盖直径可达 7.2 m。

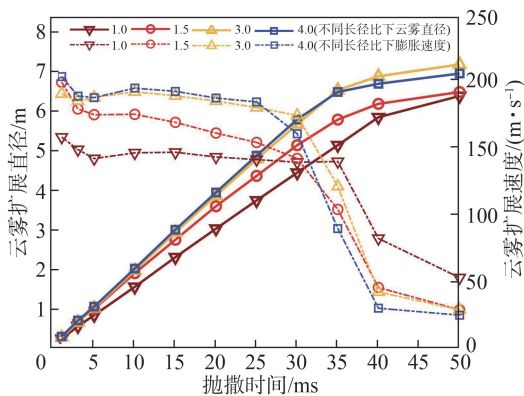


图 14 不同长径比云爆装置抛撒形成的云雾扩展直径及其变化速率

Fig. 14 The expansion diameter and change rate of cloud clusters dispersed by cloud explosion devices with different aspect ratios

图 14 表明,对于长径比大的云爆装置,其径向扩展速率在云爆剂抛撒的近场阶段大于长径比较小的装置。造成这一现象的原因主要有两点:其一是轴向动能与径向动能的转化机制,较小长径比时轴向动能占主导,导致燃料过早的轴向扩散;过大长径比则限制了径向动能转化效率。其二是当云爆装置的云爆剂质量和抛撒药质量均不变时,长径比大的装置在单位长度上的云爆剂质量大于长度小的装置,在相同的压力作用下,大长径比装置云爆剂获得的初速度较大。

在云爆剂抛撒的远场阶段,大长径比云爆装置燃料云雾的膨胀速率小于小长径比装置。其原因在于,相比于小长径比云爆装置,大长径比装置的云爆剂在抛撒初期速率大,导致液团表面所受的气动剪切力较大,液体剥落效应明显,表面破碎过程较为剧烈,进一步导致最终形成的云雾中液滴颗粒数量多、尺寸小。而在云爆剂质量相同的情况下,分散成的液滴数量越多、尺寸越小,气-液接触面积越大,则整体燃料云雾的气动阻力越大,进而导致膨胀速率减小。

### 3.3 比药量对云雾形貌的影响

比药量是指中心抛撒装药质量与云爆剂质量之比,可由式(16)表示:

$$\beta = \frac{m_b}{m_f} = \frac{\rho_b \pi R_2^2}{\rho_f \pi (R_1^2 - R_2^2)} \quad (16)$$

式中: $m_b$  和  $m_f$  分别为抛撒药质量和云爆剂质量; $\rho_b$  与  $\rho_f$  分别为抛撒药密度和云爆剂密度; $R_1$  和  $R_2$  分别为燃料环半径和中心抛撒装药半径。

作为影响云雾场分布的关键参数,比药量的变化会显著改变云爆剂抛撒的动力学特性。为研究比药量对抛撒性能的影响,本节使用图 12 所示的 FAE 结构。通过量纲分析可知<sup>[29]</sup>,当 FAE 装置的尺度增大时,抛撒过程的燃料扩展直径也随之等比例增大。因此在本节中,云爆装置外壳尺寸保持不变,采用 4 种不同比药量的 FAE 装置进行数值模拟,各装置结构数据如表 3 所示。

采用不同比药量时的云雾形貌如图 15 所示。

表 3 不同比药量的云爆装置结构参数

Table 3 Structural parameters of cloud explosion devices with different ratios of central charge with fuel

云爆装置尺寸 $D \times L / \text{mm}$	中心装药尺寸 $d \times L / \text{mm}$	比药量 $\beta / \%$	长径比 $L/D$
112×168	11.1×168	2	1.5
112×168	13.6×168	3	1.5
112×168	15.7×168	4	1.5
112×168	20.0×168	6.56	1.5

云雾扩展直径及其变化速率如图 16 所示,其中实线代表云雾直径随时间变化情况,虚线代表云雾膨

胀速率变化情况。从图 16 中可以看出:适当增加比药量,可以增大云雾的抛撒直径,当比药量从 2% 增加至 3% 时,最终的云雾直径增大约 1 m,此时继续增加比药量,形成的云雾直径变化不大;随着比药量的增大,云雾扩展速率增加,这是因为当云爆装置的比药量越大时,中心抛撒装药质量越大,其爆炸后所释放的能量也越大,而云爆剂质量几乎不变,使得云爆剂可以在抛撒时获得更大的动能,即获得更大的初速度。但较大的中心装药量产生的强冲击波会使得燃料液团更容易破碎剥离,形成更细小的液滴,小液滴所具有的动能较小,且气动阻力大,导致速度衰减较快。

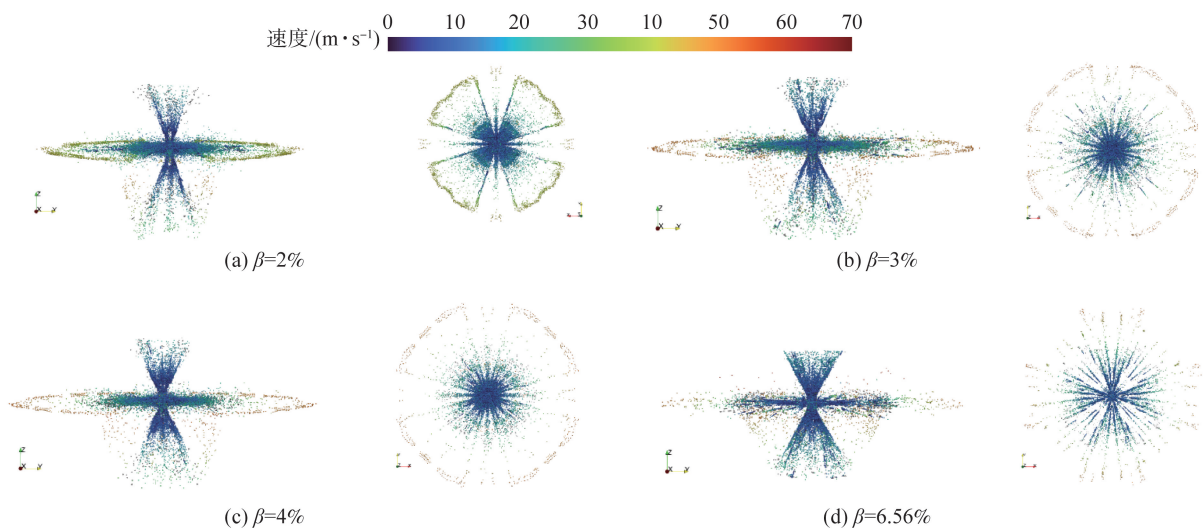


图 15 不同比药量时的云雾形貌(左为正视图,右为俯视图)

Fig. 15 Cloud morphologies under different ratios of central charge with fuel(The left is the front view and the right is the top view)

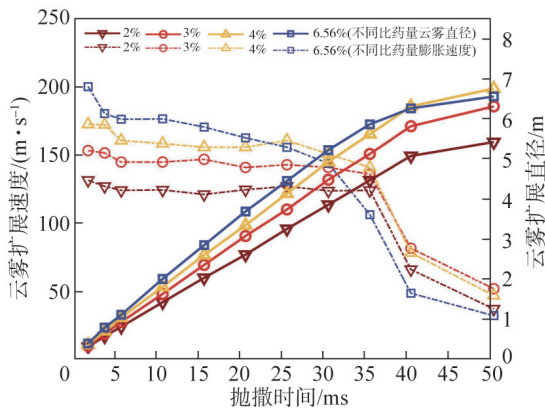


图 16 不同比药量云爆装置抛撒形成的云雾扩展直径及其变化速率

Fig. 16 The expansion diameter and change rate of cloud clusters dispersed by cloud explosion devices with different ratios of central charge with fuel

### 4 结论

本文基于 OpenFOAM 开源计算流体力学平台,开发了可压缩两相流 VOF-DPM 动网格求解器,建立了液体燃料爆炸抛撒的数值模型。该模型结合了 VOF 方法在捕捉大尺度气-液界面方面的优势和 DPM 方法在处理小液滴方面的计算效率,有效解决了传统单一方法无法兼顾计算精度与效率的问题。在此基础上,对强冲击波驱动下云爆剂的抛撒特性及形成的云雾形貌进行了分析,并研究了云爆装置长径比和比药量等关键参数对该过程的影响。得出主要结论如下:

1) 云爆剂抛撒过程可分为 3 个阶段:径向加速扩展阶段、径向缓慢减速扩展阶段与纵向膨胀阶段。在径向急剧加速扩展阶段,燃料在强冲击波推动下

向外加速扩展。随后,中心高压气体势能释放完毕,进入缓慢减速扩展阶段,此过程燃料经历破碎、雾化等,云雾逐渐成型。当云雾径向速度趋于0 m/s时,进入纵向膨胀阶段。

2) 在抛撒过程中,由于液团与周围空气存在速度差,产生了强烈的气动剪切力。随着抛撒过程的进行,大液团在扩展时不断破碎、剥离,形成大量小液滴,通过DPM方法计算的离散液滴颗粒的浓度占比明显增加。

3) 在云爆剂和中心抛撒药质量不变的前提下,长径比越大,燃料抛撒初速度和云雾初期的膨胀速率也越快。云雾的最终扩展范围随长径比的增大呈现先增后减的趋势。

4) 比药量越大,前期云雾扩展速率越大;当比药量增大到一定值后,继续增加比药量对云雾的最终尺寸影响不大。

### 参考文献 (References)

- [1] 薛田,徐更光,黄求安,等. 爆炸抛撒过程的研究进展[J]. 科学技术与工程,2015,15(21):60-67.  
XUE T, XU G G, HUANG Q A, et al. Review on explosive dispersion[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(21): 60-67. (in Chinese)
- [2] IVANDAEV A I, KUTUSHEV A G, NIGMATULIN R I. Numerical investigation of the expansion of a cloud of dispersion particles or drops under the influence of an explosion[J]. Fluid Dynamics, 1982, 17:68-74.
- [3] GARDNER D R. Near-field dispersal modeling for liquid fuel-air explosives [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Lab. (SNL-NM), 1990.
- [4] GLASS M W. Far-field dispersal modeling for fuel-air-explosive devices [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Lab. (SNL-NM), 1990.
- [5] 丁珏,刘家聪. 液体燃料爆炸抛撒和云雾形成全过程的数值研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(1):20-23.  
DING J, LIU J C. Numerical study on the whole process of explosive dispersal for forming liquid air cloud[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001, 24(1):20-23. (in Chinese)
- [6] 丁珏,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 J, LIU J C, PENG J H. Numerical study on the explosively dispersed liquid fuel in the near-field [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3):215-220. (in Chinese)
- [7] 丁珏,刘家聪. 液体燃料云团形成过程的数值仿真[J]. 兵工学报, 2001, 22(4):481-484.  
DING J, LIU J C. Numerical simulation for the formation of liquid fuel air cloud[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4):481-484. (in Chinese)
- [8] 徐豫新,王树山,韩宝成,等. 爆炸作用驱动液体抛撒初始阶段数值仿真[J]. 高压物理学报, 2011, 25(1):73-78.  
XU Y X, WANG S S, HAN B C, et al. Numerical simulation on initial stage of liquid dispersed under explosion drive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(1):73-78. (in Chinese)
- [9] 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 W, ZHAO S X, LI W X, et al. Movement characteristics of fuel-air explosive (FAE) clouds in the explosion dispersal process [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(11):1061-1066. (in Chinese)
- [10] LI Y H, SONG Z D, LI Y Z, et al. Theoretical analysis and numerical simulation for the spill procedure of liquid fuel of fuel air explosive with shell [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2010, 45(7):699-703.
- [11] 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, 23(4):323-329.  
CHEN M S, BAI C H, LI J P. Simulation on initial velocity and structure dynamic response for fuel dispersion [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(4):323-329. (in Chinese)
- [12] BALACHANDAR S, EATON J K. Turbulent dispersed multiphase flow[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42(1):111-133.
- [13] ZENG L H, WANG Z Q, NIU J Y. Dispersion and explosion characteristics of multi-phase fuel with different charge structure [J]. Transactions of The Institution of Chemical Engineers, Part B. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 191Part B:1696-1710.
- [14] ZENG L H, WANG Z Q, CHEN X, et al. Study on concentration distribution and detonation characteristics for non-axisymmetric fuel dispersal [J]. SSRN Electronic Journal, 2024, 31(1):484-495.
- [15] CHEN J C, MA X, MA Q J. Study on concentration and turbulence of solid-liquid FAE in dispersal process [J]. Defence Technology, 2018, 14(6):647-660.
- [16] 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 Z, GAO H Q, ZHAO H W, et al. Numerical simulation of cloud detonation at high falling velocity [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(5):431-439. (in Chinese)
- [17] ABDELSAMIE A, THÉVENIN D. Direct numerical simulation of spray evaporation and autoignition in a temporally-evolving jet [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2):2493-2502.

- [18] SHANG X P, ZHANG X, NGUYEN T B, et al. Direct numerical simulation of evaporating droplets based on a sharp-interface algebraic VOF approach [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 184: 122282.
- [19] YAN S L, ZHANG X B, LUO Z H. Adaptive mesh refinement for VOF modeling gas-liquid two-phase flow: a summary of some algorithms and applications [J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 306: 121291.
- [20] LUO J, HU X Y, ADAMS N A. A conservative sharp interface method for incompressible multiphase flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 2015, 284: 547-565.
- [21] MCCASLIN J O, DESJARDINS O. A localized re-initialization equation for the conservative level set method [J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 262: 408-426.
- [22] REN J F, BAI C H, CHANG C Y, et al. Experimental and numerical simulation study on the dispersion and explosion process of solid-liquid-air mixed three phase components [J]. *Combustion and Flame*, 2024, 261: 113336.
- [23] WEN J, HU Y, NAKANISHI A, et al. Atomization and evaporation process of liquid fuel jets in crossflows: a numerical study using Eulerian/Lagrangian method [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 129: 103331.
- [24] LING Y, ZALESKI S, SCARDOVELLI R. Multiscale simulation of atomization with small droplets represented by a Lagrangian point-particle model [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 76: 122-143.
- [25] SHI P, ZHU G Q, CHENG J M, et al. Simulation on atomization process of gas-liquid pintle injector in LRE under periodic conditions based on the VOF to DPM method [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 136: 108222.
- [26] ZHOU W Y, CHEN B, ZHU Q B, et al. Numerical simulation of angled-injected liquid jet breakup in supersonic crossflow by a hybrid VOF-LPT method [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2023, 166: 104503.
- [27] ZHANG B, CHENG P, LI Q L, et al. Breakup process of liquid jet in gas film [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2021, 70(5): 054702.
- [28] 周涛涛, 唐志全, 王辰, 等. 基于 VOF-DPM 的横向射流雾化过程数值模拟 [J]. *内燃机与动力装置*, 2024, 41(4): 1-10.
- ZHOU T T, TANG Z Q, WANG C, et al. Numerical simulation of the atomization process of liquid jet in a crossflow based on VOF-DPM [J]. *Internal Combustion Engines & Powertrain*, 2024, 41(4): 1-10. (in Chinese)
- [29] 张奇, 白春华, 刘庆明, 等. 燃料抛散过程中的相似律 [J]. *北京理工大学学报*, 2000, 20(5): 651-655.
- ZHANG Q, BAI C H, LIU Q M, et al. Law of similitude in fuel dispersal process [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2000, 20(5): 651-655. (in Chinese)