

# 射流在不可压气流中破碎过程高精度数值仿真

张波涛<sup>1,2</sup>, 张友平<sup>1</sup>, 张民庆<sup>3</sup>

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100;

2. 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100;

3. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

**摘要:**研究液体射流在不可压气流中破碎过程的难点在于捕捉射流柱表面细节特征。采用基于 Gerris 开源代码的树形自适应加密算法和 VOF 方法对射流袋式破碎和剪切破碎的典型算例数值计算, 实现了射流柱从变形、弯曲到破碎成液滴的全过程可视化, 清晰的捕捉到了射流柱表面形成的表面波, 计算得到的射流轨迹、破碎长度和液滴空间分布均与文献中实验结果很好的吻合。直观表明表面波导致射流柱不稳定, 射流袋式破碎液滴较大, 剪切破碎液滴平均直径约为 60  $\mu\text{m}$ , 基于 Gerris 的高精度数值算法有助于进一步认识射流破碎机理和高效评估破碎效果。

**关键词:**不可压气流; 射流; 袋式破碎; 剪切破碎; 自适应网格加密; Gerris

**中图分类号:**V430-34   **文献标识码:**A   **文章编号:**1672-9374(2018)01-0059-08

## High-precision numerical simulation of breakup processes of liquid jet in incompressible airflow

ZHANG Botao<sup>1,2</sup>, Zhang Youping<sup>1</sup>, ZHANG Mingqing<sup>3</sup>

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Key Laboratory for Science and Technology on Liquid Rocket Engine, Xi'an 710100, China;

3. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The difficulty of studying the breakup process of liquid jet in incompressible airflow is to capture the surface detail of the jet column. The typical calculating examples for bag breakup and shear breakup of jet column was numerically computed by VOF method and tree-structure adaptive mesh refinement algorithm based on Gerris open code, by which the visualization of the whole process of the jet column distortion, bend and breakup was realized, and the surface waves formed on the surface of the jet columns also be clearly captured. The calculated jet trajectory, breakup length and droplet space distribution are consistent with the experimental results in the reference literature, which shows that surface wave can cause instability of the jet column, big droplet of bag breakup and about 60  $\mu\text{m}$  diameter droplet of shear breakup. The high-precision numerical algorithm based on Gerris is conducive to further understand-

收稿日期: 2017-09-11; 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家重大基础研究项目(613193)

作者简介: 张波涛(1990—), 男, 硕士研究生, 研究领域为液体火箭发动机喷雾燃烧技术

ing of the jet breakup mechanism and effective evaluation of breakup.

**Keywords:** incompressible airflow; jet; bag breakup; shear breakup; adaptive mesh refinement; gerris

## 0 引言

射流破碎后液滴粒径小且均匀,就有利于气态燃料和液态燃料的掺混,实现高效率燃烧。为了透彻研究液体射流在不可压横向气流中破碎过程及破碎机理,近年来国内外学者对其进行了大量的研究。

横向气流中液体射流破碎过程研究工作主要包括射流柱破碎过程、穿透深度、射流轨迹和液滴分布等。朱英<sup>[1]</sup>采用高速摄像机对射流破碎过程进行研究,重点测量了射流柱穿透深度、破碎长度和射流轨迹等参数。Pei-Kuan Wu<sup>[2-3]</sup>对射流雾化过程进行了实验研究,得出了不同射流速度和射流角度与穿透深度之间的关系。K. A. Sallam<sup>[4]</sup>通过高速摄影测量射流柱表面波长、射流柱上出现的袋数和液滴粒径等参数,重点对低韦伯数横向气流中射流破碎过程进行宏观分析。王延胜<sup>[5]</sup>利用激光诱导荧光(PLIF)技术对航空煤油的穿透特性进行了实验,获得了射流穿透深度关于动量比、韦伯数和轴向距离的经验关系式。王雄辉<sup>[6]</sup>采用高速摄像机对低 Weber 数横向气流中射流破碎过程进行了实验研究,观察了表面波现象及射流破碎后形成液滴的尺寸及其速度。李龙飞<sup>[7]</sup>对真空环境下的射流雾化特性进行研究,得到真空环境下射流的闪蒸是射流破碎主要因素。刘静<sup>[8]</sup>和林宇震<sup>[9]</sup>都对横向气流中液体射流雾化过程的研究进展进行了总结。

实验采用的光学设备不能穿透射流柱,不易捕捉射流细节特征。因此研究者欲通过使用数值模拟对该问题进行研究。当前比较常用的是 VOF 方法和 Level set 方法。全毅恒<sup>[10]</sup>采用 Euler-Euler 双流体模型的 VOF 方法和 CLSVOF 方法对圆柱射流破碎过程和破碎位置等特性进行了研究,分析了射流破碎形式及其产生的原因。刘静<sup>[11]</sup>采用一次雾化模型和二次雾化模型对超声速横向气流中的液体喷射进行了数值模拟,研究了湍流度和附面层厚度对液雾穿透深度的影响。刘日超<sup>[12]</sup>等用 LES 结合 VOF 的方法,对射流破碎过程进行直接模拟,观

察到射流柱在进入横向气流中由于 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性和 Kelvin-Helmholtz (KH) 不稳定性的共同作用迅速发生变形。由于射流破碎后液滴数目众多且液滴尺寸范围较大,传统计算模型中固定不变的网格量难以满足雾场动态发展过程中不同位置对空间分辨率的需求。基于 Gerris 的树形自适应空间离散算法与分段线性的 VOF 方法可以很好的解决这一难点,四叉树/八叉树的树形结构网格使得自适应加密算法可简易灵活地实现,网格自适应函数可以用疏密程度不同的网格来解决不同空间分辨率的问题,在不损失计算精度的情况下显著降低了计算量。李佳楠<sup>[13]</sup>在国内率先使用 Gerris 软件对直流互击喷注单元雾化过程进行数值模拟,分析了撞击波的形成机理及孔径比、动量比和射流速度等参数对雾化特性的影响。王凯<sup>[14]</sup>基于 Gerris 软件建立锥形液膜雾化破碎过程数值仿真方法,对相邻多个离心式喷嘴液膜撞击雾化过程进行数值仿真,展示了喷雾场三维形态和细节特征,分析了液膜形成原因及液膜撞击对雾化效果的影响。可见基于 Gerris 的高精度数值算法可以很真实的反映雾化过程且捕捉到细节特征,但以往文献中采用 Gerris 研究的均是喷注单元外流场为静止气体的雾化过程,目前国内还没有采用 Gerris 研究射流在流动气体中雾化的相关文献。

为深入认识射流在不可压气流中的破碎过程,在国内率先采用基于 Gerris 的全三维 VOF 方法和树形自适应的空间离散算法对其研究,可以解决射流柱细节特征和多尺度液滴难捕捉的问题,通过对文献[1]中射流柱袋式破碎和文献[2]中射流柱剪切破碎的经典实验进行数值计算,分析射流在不可压气流中的破碎过程和捕捉雾场细节特征,全面验证基于 Gerris 数值方法计算射流在不可压气流中雾化的高精度性和高可靠性,为后续更进一步认识其雾化机理和评估雾化效果奠定基础。

## 1 数学物理模型

根据不可压横向气流中液体射流破碎的物理过程,基于八叉树结构的正方体单元对空间进行离

散,使用网格自适应加密方法处理多尺度问题<sup>[15]</sup>,采用有限体积法求解不可压 N-S 方程和分段线性 VOF 方法求解气液界面重构。通过将表面张力转化为某一区域连续的体积力并结合高度函数曲率估计实现表面张力的精确求解,结合隐式大涡模拟 (Implicit Large Eddy Simulation) 近似模拟小于最小网格尺度涡的耗散过程。

### 1.1 控制方程

在计算中假定气液流动过程是等温的且不考虑蒸发过程,因此无需求解能量方程。求解的不可压、两相流、含有表面张力的 N-S 方程组为:

$$\begin{cases} \rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \vec{D}) + \sigma \kappa \delta_s \vec{n} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \end{cases}$$

式中:  $\rho \equiv \rho(\vec{x}, t)$  为流体密度;  $\vec{u} = (u, v, w)$  为网格内流体速度;  $\mu \equiv \mu(\vec{x}, t)$  为动力粘度;  $\vec{D}$  为应变张量;  $D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $\delta_s$  为集中在界面上的表面张力;  $\kappa$  和  $\vec{n}$  分别为界面的曲率和法向方向。

### 1.2 VOF 方法

VOF 方法最早由 Hirt 和 Nichols<sup>[16]</sup> 提出,对于两相流动,通过定义第一相体积分数  $\alpha(\vec{x}, t)$  来描述气液界面。将密度连续方程用体积分数  $\alpha$  的连续方程替换为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) = 0$$

密度和粘度也可由体积分数表示为:

$$\begin{cases} \rho(\alpha) \equiv \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \\ \mu(\alpha) \equiv \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \end{cases}$$

式中:  $\rho_1, \rho_2$  和  $\mu_1, \mu_2$  分别为第一相和第二相的密度和粘度。

### 1.3 计算域与参数设置

Gerris 计算三维算例的网格均为正方体单元,如图 1 所示每个 Box 由前、后、左、右、上、下共六个面组成,计算域可以根据计算模型由多个 Box 块连接而成。计算区域可以不用三维建模软件建立,直接在参数脚本文件中给定 Box 数目、Box 连接方向

和计算模型在计算域的位置。为了提高计算精度,文中采用八个边长为 11.25 mm 的 Box,计算域如图 2 所示,上下两层,每层 4 个 Box,计算域长、宽、高分别为 45 mm, 11.25 mm 和 22.5 mm,横向气流以一定的速度从两层最左侧 Box 的左侧面流入,液体射流以一定角度从下表面上的圆孔射入。计算时最高网格等级设为 10 级,最小网格为 10.99  $\mu\text{m}$ ,计算域和边界条件的设置均通过编写大量代码实现。

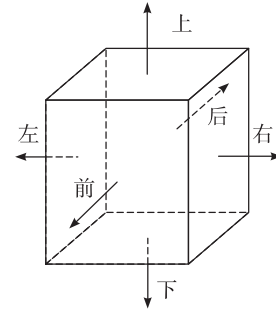


图1 基本块 Box 离散方向的定义

Fig. 1 Definition for discrete direction of basic block Box

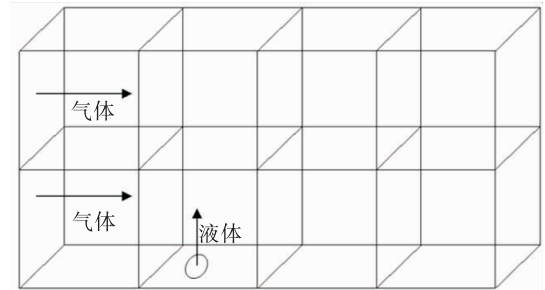


图2 计算域

Fig. 2 Calculation domain

射流破碎过程仿真边界条件如表 1 所示,算例 1 和算例 2 属袋式破碎,在算例 1 与文献[1]中同工况实验结果对比验证计算方法准确的基础之上,算例 2 捕捉射流柱表面细节特征。算例 3 ~ 算例 5 属剪切破碎,在与文献[2]中同工况实验对比验证后,分析射流角度对破碎效果的影响。

横向气流中液体射流破碎过程的数值模拟属于多相流模拟的范畴,在计算过程中需要给定的物性参数有液相的密度、粘度系数、表面张力系数、气相的密度及粘性系数等参数。数值仿真中液相为水,气相为空气。物性参数如表 2 所示。

表 1 边界条件  
Tab. 1 Boundary conditions

算例	射流直径/mm	液气动量比	气体韦伯数	液体雷诺数	射流角度/(°)
1	0.3	40.24	6.20	2 328.80	90
2	0.6	40.24	12.40	4 656.40	90
3	0.5	47.98	38.80	8 210.52	30
4	0.5	47.98	38.80	8 210.52	45
5	0.5	47.98	38.80	8 210.52	75

表 2 物性参数表  
Tab. 2 Physical parameters

参数	值
液体密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	998.2
液体粘性/( $\text{MPa} \cdot \text{s}$ )	1.003
液体表面张力/( $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	73
气体密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.225
气体粘性/( $\text{MPa} \cdot \text{s}$ )	0.018

2 结果分析

2.1 计算结果与实验结果对比

图 3 给出了算例 1 工况下数值仿真结果和文献[1]中实验结果对比图,计算所得到的雾场宏观结构与实验结果非常相近。

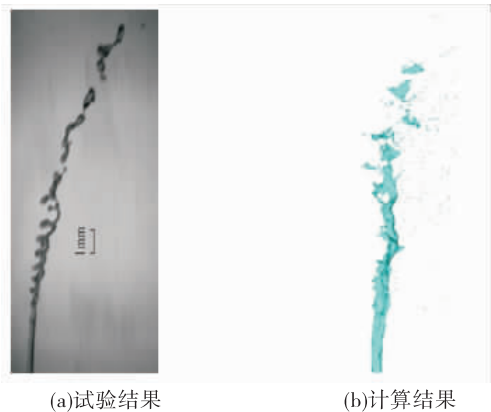


图 3 算例 1 的计算结果与试验结果对比  
Fig. 3 Comparison of numerical calculation and experiment results of Case 1

图 4 为算例 3 ~ 算例 5 工况下的数值仿真结果与文献[2]中实验结果的对比图,图 4 中颜色代表

速度大小,从图 4 中可以看出,随着射流角度的增大,射流柱纵向穿透深度增大,横向破碎长度减小,由于气流速度与射流柱横向分速度差变大,射流柱上的波动和惯性力更加明显,雾化效果较好。当角度较小时,射流柱上的气动力相对作用将减小,射流柱变直,接近于自由射流。

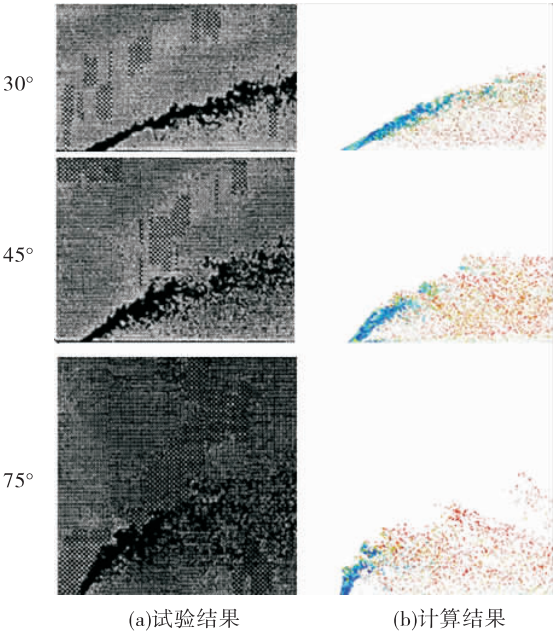
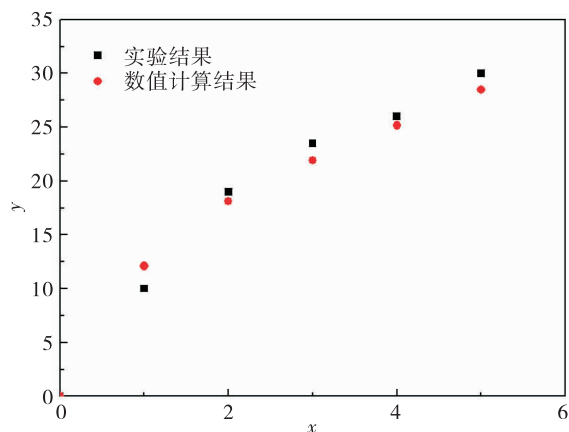


图 4 算例 3 ~ 算例 5 的计算结果与试验结果对比  
Fig. 4 Comparison of numerical calculation and experiment results of Case 3, Case 4 and Case 5

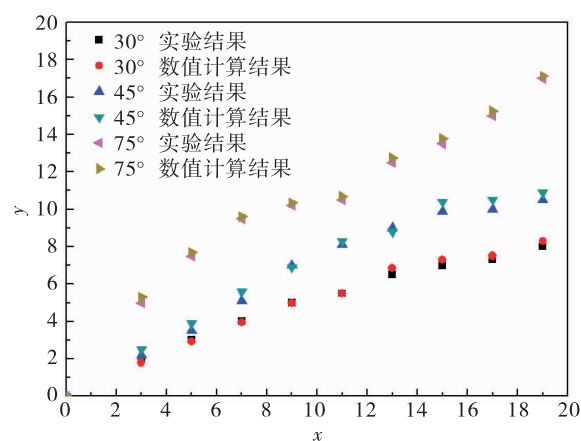
为了进一步验证数值计算的准确性,本文取射流柱外围为射流轨迹,将数值计算得到的射流轨迹结果与实验结果对比,图 5(a)和图 5(b)分别为袋式破碎和剪切破碎射流轨迹图,数值计算结果与实验结果相对误差在 5% 左右。

2.2 射流柱袋式破碎过程

图 6 为射流柱在横向气流作用下变形、弯曲到进一步破碎成大液滴的破碎全过程,由于采用 VOF 相界面捕捉方法,显示结果是体积分数为  $\alpha = 0.5$  的等值面。从图 6 中可以看出,射流柱在初始发展阶段没有明显的液滴剥离,只在射流柱表面有小褶皱,随着射流柱的发展,射流柱表面的小褶皱在气动力作用下剥离形成小液滴,接着迎风面向内凹陷形成波谷,随着射流柱的变形,迎风面和背风面间的波谷厚度不断变薄,有袋式破碎的特征,最终在表面张力和气动力共同作用下断开,形成小液块和液滴。



(a) 袋式破碎射流轨迹



(b) 剪切破碎射流轨迹

图5 液体射流轨迹

Fig. 5 Trajectories of liquid jets

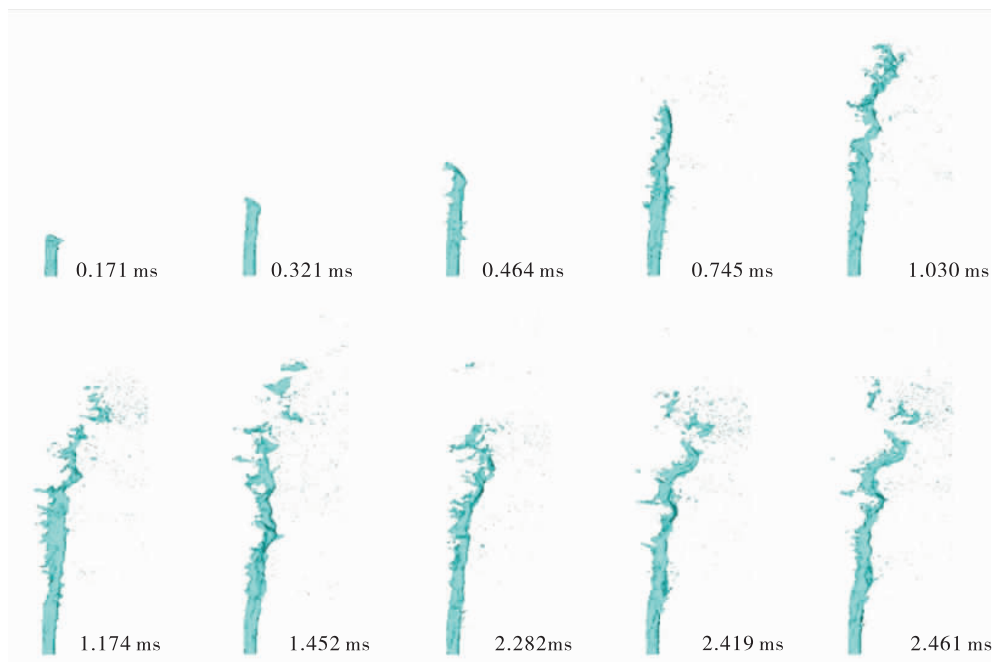


图6 袋式破碎过程数值计算结果

Fig. 6 Numerical calculation results of bag breakup process of jet column

为了更清晰的观察射流柱表面特征和截面特征,对算例2中射流柱弯曲前截面进行分析。将三维雾场沿着射流柱所在的 $xy$ 平面和 $yz$ 平面剖切,得到了前视图和左视图的射流柱二维体积分分布云图,如图7所示。图7(a)显示了射流柱在横向气流的作用下沿射流方向越来越窄,图7(b)显示了射流柱沿射流方向逐渐变宽,迎风面稍有变大。这是因为横向气流遇到射流柱发生滞止,在迎风面上

形成一个滞留区,滞留区内速度为零,使得迎风面压力增大,同时射流柱背风面压力较低。在压差作用下,射流柱变得宽而薄,随着射流柱变形,射流柱受到气流作用力越来越大,导致射流柱在流动方向表现为向下游弯曲。

为了进一步认识射流柱破碎机理,图8是不同视角观察到的射流柱弯曲前迎风面放大图,可以清晰看到射流柱表面形成的表面波,表面波是导致射



流柱不稳定的根本原因。由于射流柱左侧迎风面受到气流垂直作用,气液密度差和交界面上的垂直加速度导致 RT 波的产生,RT 波将射流柱两侧液体向前推移,以致射流柱变得薄且向下游弯曲。横向气、液相对速度由 1 逐渐变小,气液横向速度差导致 KH 波的产生。横向气、液相对速度差也是影响射流柱破碎的重要参数。箭头指出了射流柱发展过程中在射流柱表面产生的表面波,1 为射流柱在射流发展方向与气流存在速度差通过相互剪切而生成的 KH 表面波,2 为射流柱在横向与气流存在速度差产生的 KH 表面波,随着 KH 波的发展射流柱侧面有液滴剥离,从图中也可以清晰的看出表面波处颜色较深,即表面波处速度较大。

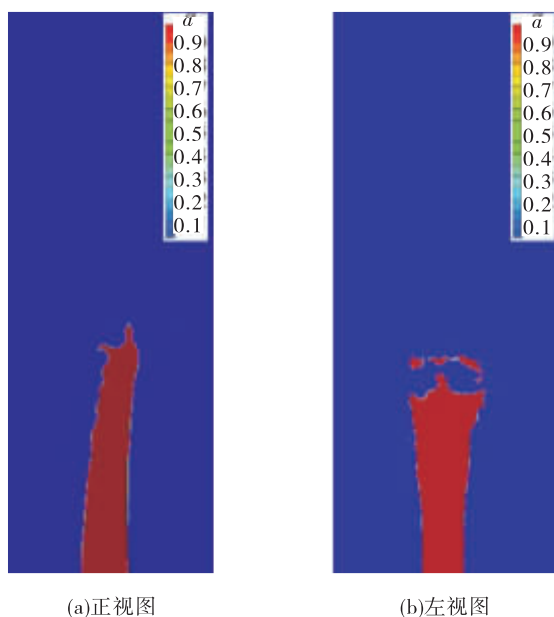


图 7 体积分数云图

Fig. 7 Contours of volume fraction  $\alpha$

### 2.3 射流柱剪切破碎过程

以  $30^\circ$  为例分析射流柱剪切破碎过程,图 9 是射流角度为  $30^\circ$  工况下的射流破碎过程图,在射流柱刚喷入横向气流中的初始阶段,即有小液滴从射流柱表面剥离,这一现象始终贯穿于射流柱发展的全过程。射流柱迎风面和背风面均出现小尺度波动,但迎风面表面波尺度大于背风面表面波尺度,这是由于迎风面受到的气动力更大。小尺度波动在气动力作用下发展为明显的大尺度波动,最终由于气动力大于射流柱表面张力和粘性力而导致射

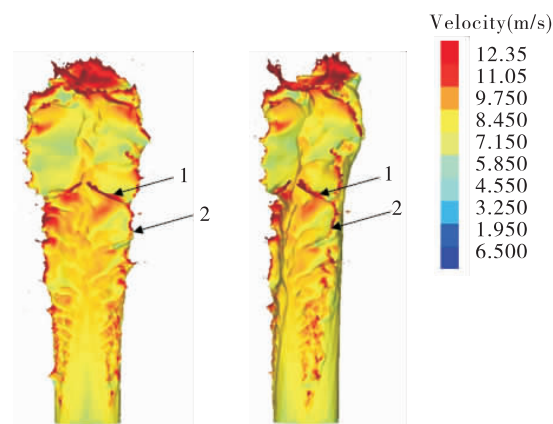


图 8 射流柱表面速度分布图

Fig. 8 Contours of velocity distribution on jet column surfaces

流破碎。这类似于射流柱袋式破碎在气动力作用下迎风向内凹陷形成波谷并被拉长后断裂的特征。同时,随着射流柱的发展,射流柱逐渐破碎成许多大液块,发生一次雾化,而不像射流柱袋式破碎先断裂为单一大液块后在气动力的作用下发生二次雾化破碎为众多小液滴。在整个射流柱破碎过程中,射流柱剪切破碎和袋式破碎一样存在 R-T 和 K-H 两种不稳定波,但剪切破碎的不稳定波更加明显。

图 10 ~ 图 12 分别表征的是射流中间截面的体积分数云图、速度云图和涡量云图,从图中可以看出射流在出口处即有小液滴剥离,射流柱迎风面在气动力的作用下出现小尺度波,同时可以看到在射流柱迎风面很薄的区域内速度很小,这是因为横向气流遇到射流柱发生滞止,速度减小,压强增大,背风面比迎风面速度大,压强小,迎风面的压强大于背风面的压强使射流柱弯曲。随着射流柱的发展,非稳态波动变大,并形成大量涡结构,加剧雾化过程,缩短射流柱破碎长度。

Gerris 可以对全场所有的液滴数目、体积进行统计后并输出。算例 3 ~ 算例 5 工况下的全场液滴 SMD 分别为  $60.23 \mu\text{m}$ ,  $59.96 \mu\text{m}$  和  $59.12 \mu\text{m}$ ,射流角度对粒径影响很小。图 13 是射流角度为  $30^\circ$  时计算的全场液滴粒径分布图,从图 13 中可以看出,液滴粒径分布范围广,但呈现两端少、中间多的分布。

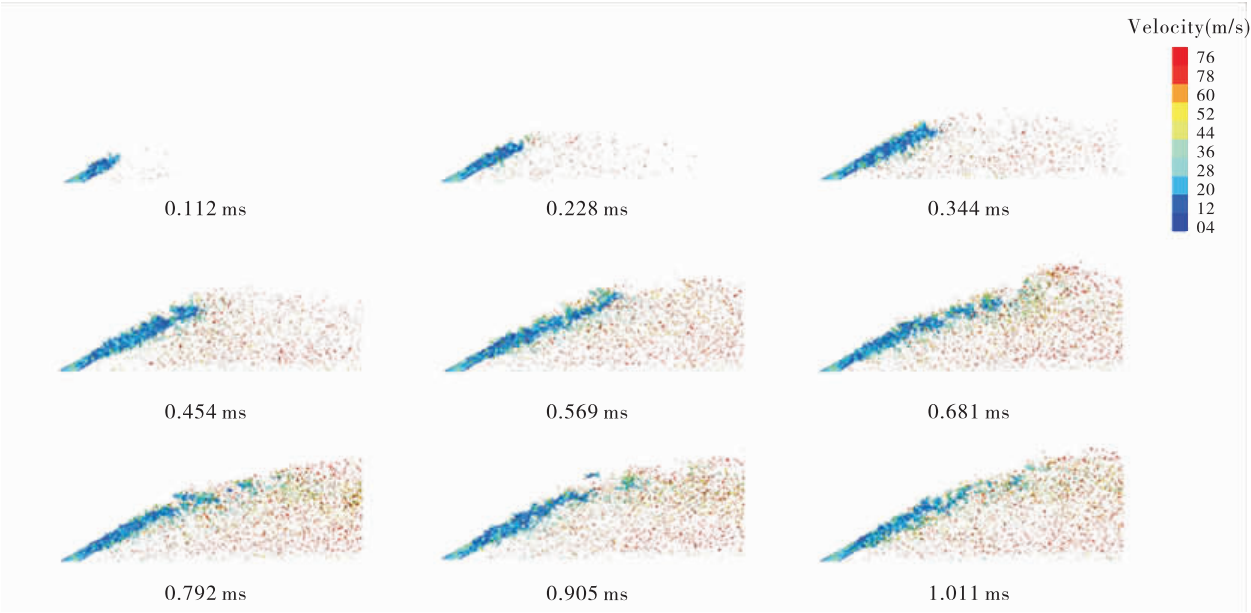


图 9 射流柱剪切过程数值计算结果  
Fig. 9 Numerical calculation results of shear breakup process of jet column

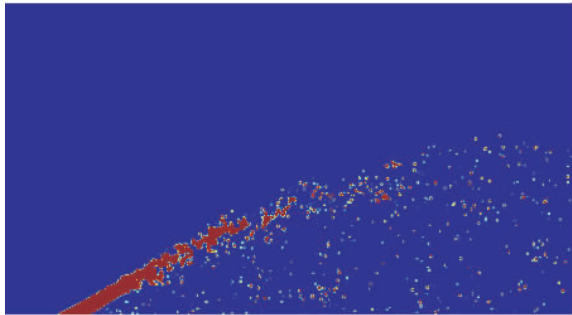


图 10 射流柱中心截面体积分数云图  
Fig. 10 Volume fraction contour on center section of jet column

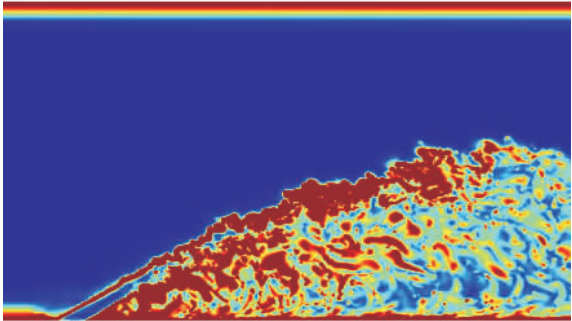


图 12 射流柱中心截面涡量云图  
Fig. 12 Vorticity contour on center section of jet column

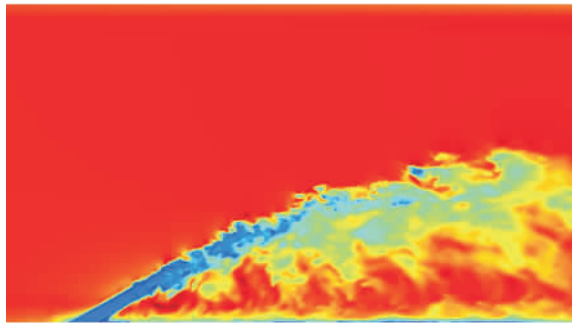


图 11 射流柱中心截面速度云图  
Fig. 11 Velocity contour on center section of jet column

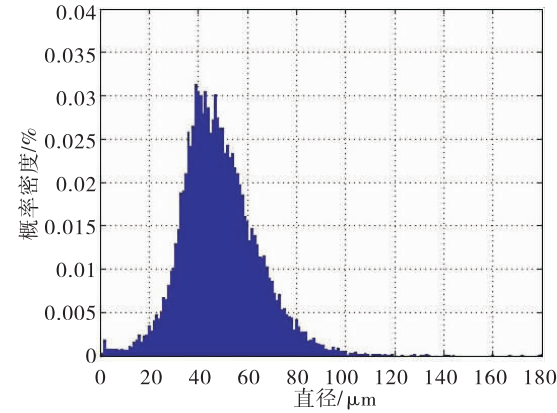


图 13 全场液滴粒径概率密度分布  
Fig. 13 Probability density distribution of droplet diameter in whole flow field

### 3 结 论

通过数值求解三维不可压 N-S 方程组对射流在不可压横向气流中的破碎过程开展数值模拟工作,得出的主要结论如下:

1)通过采用分段线性的 VOF 方法和树形自适应加密算法对朱英和 P K Wu 的实验进行数值模拟,可以详细展现整个破碎过程及雾场细节特征,计算得到的射流轨迹和液滴空间分布都与实验结果吻合,全面验证了基于 Gerris 数值方法计算射流在不可压横向气流中雾化的高可靠性和高精度性。

2)射流柱剪切破碎全场液滴平均直径约为  $60\mu\text{m}$  左右,随着角度从  $30^\circ$  增大到  $75^\circ$  粒径没有明显变化,射流角度对粒径影响较小,由于气流速度射流横向分速度差变大,只会加快射流雾化。

3)射流柱在气动力和表面张力共同作用下产生 RT 波和 KH 波,表面波是导致射流柱不稳定的根本原因,表面波处的速度较大,射流柱剪切破碎比袋式破碎形成的表面波更多。

本文数值计算因重点放在验证 Gerris 数值算法计算射流在流动气体中破碎的高可靠性和高精度性,没有定量分析射流柱表面细节特征,因此对射流柱表面细节特征定量分析作为下一步的工作,本文的工作也进一步为应用和改进 Gerris 代码奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] 朱英,黄勇,王方,等. 横向气流中的液体圆形射流破碎实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2216-2266.
- [2] WU Peikuan, KEVIN A. Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows: AIAA 1996-3024 [R]. USA: AIAA, 1996.
- [3] FULLER R P, WU Peikuan. Effects of injection angle on atomization of liquid jets in tranverse airflow [R]. AIAA journal, 2000, 38(1): 2216-2266.
- [4] SALLAM K A. Bag breakup of nonturbulent liquid jets in crossflow [J]. International journal of multiphase flow, 2008, 34(2008): 64-72.
- [5] 王延胜,林宇震,李林,等. 基于 PLIF 技术的航空煤油横向射流穿透深度研究[J]. 推进技术, 2015, 36(9): 1395-1403.
- [6] 王雄辉,黄勇,王方,等. 横向气流中液体圆柱射流的破碎特性和表面波现象[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1979-1987.
- [7] 李龙飞,池保华,杨伟东,等. 真空环境下液体射流雾化特性的实验研究[J]. 火箭推进, 2010, 36(5): 27-30.  
LI Longfei, CHI Baohua, YANG Weidong, et al. Experimental study on atomization characteristic of liquid jet in vacuum environment [J]. Journal of rocket propulsion, 2010, 36(5): 27-30.
- [8] 刘静,徐旭. 高速气流中横向液体射流雾化研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39(3): 273-283.
- [9] 林宇震,李林,张弛,等. 液体射流喷入横向气流混合特性研究进展[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 46-57.
- [10] 全毅恒. 横向气流中液体射流喷注特性和破碎过程研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.
- [11] 刘静,徐旭. 超声速横向气流中喷雾的数值模拟[J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 32-36.  
LIU Jing, XU Xu. Numerical simulation of liquid jet in supersonic cross flows[J]. Journal of rocket propulsion, 2006, 32(5): 32-36.
- [12] 刘日超,乐嘉陵,杨顺华,等. 亚声速横向气流中液体射流破碎过程的直接模拟[J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2135-2141.
- [13] 李佳楠,费俊,杨伟东,等. 直流互击式喷注单元雾化特性准直接数值模拟[J]. 推进技术, 2016, 37(4): 713-724.
- [14] 王凯,李鹏飞,杨国华,等. 相邻离心式喷嘴液膜撞击雾化过程仿真[J]. 推进技术, 2017, 38(2): 408-415.
- [15] GERRIS P S. A tree-based adaptive solver for the incompressible euler equations in complex geometries [J]. Journal of computational physics, 2003, 190(2): 572-600.
- [16] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.

(编辑:马 杰)