流向强迫作用下的液体初始雾化机制及动力学特征*

陈 潜,邹建锋,周程林,袁炎炎

(浙江大学 航空航天学院,浙江 杭州 310027)

摘 要:使用 Volume of fluid (VOF) 方法和基于树形数据结构的自适应算法来研究射流雾化的破碎 过程以及扰动对射流破碎机理产生的影响。在无扰动情况下,液体射流的头部、液丝和液滴随着射流时 间的发展不断发生演变。射流头部先呈现蘑菇状外形,随后液丝生成,并慢慢转变成网兜状,直至断裂 形成小液滴。在周期性流向强迫的作用下,射流液柱的表面会形成周期波,其液丝破裂形成液滴的时机 与稳定射流情形相比会有所提前,射流形成的头部更趋于扁平,最终生成的液滴数量更多。低中频阶 段,随着扰动频率的增大,射流未扰动液柱长度 (L)逐渐缩短,液滴直径的概率密度分布 (PDF) 趋 于尖锐,液滴平均直径 (SMD) 增大。在高频阶段,随着扰动频率的增大,L会随之增大,液滴直径的 PDF分布变得平缓,SMD会减小。

关键词:燃烧室;射流破碎;扰动波;雾化;频率;液滴 中图分类号:V231.2 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2020) 02-0353-09 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190155

Initial Atomization Mechanism and Dynamic Characteristics of Liquid with Forced Perturbation

CHEN Qian, ZOU Jian-feng, ZHOU Cheng-lin, YUAN Yan-yan

(School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To investigate the breakup process of jet atomization and the effects of disturbance on the jet, the volume of fluid (VOF) method and the adaptive algorithm based on tree data structure are used to simulate the atomization process. The tip, the liquid filaments and the droplets in undisturbed liquid jet change continuously with the evolution of the jet time. First, the tip appears in a mushroom shape, then the liquid filaments appear, and gradually become a thin-net shape. The liquid filaments slowly become small droplets, and the droplets spread upstream around the tip. The perturbation frequency forces on the jet and produces a periodic wave on the surface of the liquid column. Compared with the steady velocity jet, the liquid filaments form droplets earlier, the tip is flatter, and the number of droplets is larger. In the low-middle frequency phase, as the disturbance frequency increases, the non-perturbed length (L) gradually decreases, probability density function (PDF) distribution of the droplet diameter tends to be sharp, Sauter mean diameter (SMD) increases. In the high frequency phase, as the disturbance frequency increases, L gradually increases, PDF of the droplet diameter tends to be smooth and SMD decreases.

^{*} 收稿日期: 2019-03-13;修订日期: 2019-06-26。

基金项目:国家自然科学基金(11372276;11432013;11272285);国家自然科学基金委员会-广东省人民政府联合基金 (第二期)超级计算科学应用研究专项资助。

作者简介: 陈 潜, 硕士生, 研究领域为液体燃料射流数值模拟。E-mail: chenqian1994@zju.edu.com

通讯作者: 邹建锋, 博士, 副教授, 研究领域为燃料雾化和湍流燃烧数值模拟。E-mail: zoujianfeng@zju.edu.cn

引用格式: 陈 潜, 邹建锋, 周程林, 等. 流向强迫作用下的液体初始雾化机制及动力学特征[J]. 推进技术, 2020, 41(2):
 353-361. (CHEN Qian, ZOU Jian-feng, ZHOU Cheng-lin, et al. Initial Atomization Mechanism and Dynamic Characteristics of Liquid with Forced Perturbation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(2):353-361.)

Key words: Combustor; Jet breakup; Disturbing wave; Atomization; Frequency; Droplet

1 引 言

液体雾化过程是典型的气液两相流问题,在实际工业生产中有着非常多的应用案例,如航空发动机和地面燃机的燃烧室在工作时就涉及复杂的射流 雾化现象。高质量的液体雾化对提升液态燃料的燃 烧效率、降低航空发动机和地面燃机等动力设备的 污染物排放起着决定性作用^[1]。液体雾化涵括多种 模态的流动现象和复杂的物理过程,譬如液柱失稳、 液膜表面形变破碎、液丝/液滴形成等,液滴之间以及 液滴和液柱之间还可能存在碰撞效应。

实际应用中,液体射流喷口可能存在一定形式 的扰动,使得燃烧室中液态燃料的雾化破碎过程呈 现剧烈的非定常特性,并直接影响液滴蒸发的动力 学过程。瞬时特性显著的雾化蒸发过程与化学反应 过程的耦合作用,将导致压力振荡和不稳定热释放 的出现,从而造成严重影响燃烧室性能的所谓燃烧 不稳定问题。根据瑞利准则:当热释放与压力振荡 的相位重叠时,不稳定性程度会增强,反之则减弱。 可见,通过合理控制雾化过程的瞬时特性可以降低 出现燃烧不稳定性的概率或强度。为此,需要深入 了解液体射流扰动现象对实际雾化过程的影响 机制。

目前已经有许多关于燃料喷射和雾化的实验、 计算和理论研究。Linner等^[2]使用光学技术观测到 了柴油射流雾化的复杂内部结构。Wang等^[3]使用X 射线成像技术对高压状态下的液体射流过程进行了 实验研究。Blaisot等^[4]运用图像分析技术研究了液 滴尺寸和分布特征。Hoove等^[5]关注横向扰动对射流 雾化的影响,在他们的实验中观察到,液体射流的扇 形扁平化会激发横向共振模式。韩雅芳等^[6]在实验 中引入周期变频脉动,定性发现存在一个频率范围, 超出此频率范围将不能获得均匀液滴流。Carpentier 等^[7]对低速圆柱液体射流进行了实验和分析,通过设 置不同的频率和射流入口位置以观察射流状态的 变化。

当考察的液体射流速度增快时,流动结构、流动 模态及其动力学过程变得更加复杂,液丝和液滴的 空间尺寸更小,流场的瞬时特性更明显,从而对实验 测量设备的空间分辨率和时间精度的要求更加苛 刻,限制了实验测量技术的进一步应用。作为实验 研究的重要辅助手段,数值模拟技术,则可以在一定 程度上更好地预测射流雾化场的空间详细分布和时 间演化信息。

YuP等^[8]采用Level Set方法对液体射流问题进 行了数值模拟,研究了层流状态下的射流破碎情形。 Ménard 等^[9]将 Level Set/VOF/GFM 方法相结合,计算 展示了三维液体射流进入静止空气的瞬态动力学过 程。Herrmann^[10-12]使用改进的Level Set方法研究了 横向射流情形下密度比等因素对射流长度和破碎特 征的影响。Fuster等^[13]使用AMR (Adaptive Mesh Refinement) 网格自适应技术模拟射流首次破碎过程, 该技术能够降低网格量、节省计算资源。Gonzalez-Flesca^[14]使用大涡模拟技术来研究射流与横向声场 的相互作用,研究发现在声场的作用下,射流长度显 著缩短。Heister等^[15]考虑了声学扰动的影响,利用 边界元法(BEM)模拟轴对称的液体射流。在动态环 境和低韦伯数下,以非线性频率响应、射流破碎长度 和液滴尺寸为指标,研究了纵向声学振荡与液体射 流之间的耦合作用。

综上分析,目前已有文献中关于扰动作用下的 雾化流场研究还不够深入和系统,相关研究主要涉 及雾化破碎长度和流动模态等整体特征在扰动作用 下的特性变化,对内在的动力学过程和液丝/液滴产 生机制尚缺乏认知。本文拟采用 VOF 界面捕捉方 法,结合使用网格自适应求解技术,对强迫扰动作用 下的射流雾化过程进行高分辨率的数值模拟,深入 分析强迫扰动对射流雾化破碎机理及液滴分布特征 的影响。

2 数值方法和物理问题描述

2.1 VOF界面捕捉方法

本文考虑的射流液体为不可压缩黏性流体,射 流周围为静止不可压缩空气,忽略能量输运过程。 用如下控制方程进行描述为^[13]

$$\begin{cases} \rho \frac{\mathrm{D}\boldsymbol{u}}{\mathrm{D}t} = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu D) + \sigma \kappa \delta(x - x_{s})\boldsymbol{n} \\ \nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \end{cases}$$
(1)

式中 $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla$ 是随体导数, u = (u, v, w)是 流体速度, p为压力, $\rho \equiv \rho(x, t)$ 是流体密度, $\mu \equiv \mu(x, t)$ 是动力粘度, $\sigma \equiv \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^{T})$ 是应变张 量, $\delta(x - x_{s})$ 为狄拉克分布函数,其中 x_{s} 表示界面点。 κ, n 分别是界面曲率和法向量。 应用 VOF 求解两相流问题,需要引入体积分数 *c*(*x*,*t*)来表达界面的分布情况。

$$c(x,t) = \begin{cases} 0 & \text{Gas} \\ (0,1) & \text{Interface} \\ 1 & \text{Liquid} \end{cases}$$
(2)

进而密度和黏度可以分别定义为

$$\begin{cases} \rho(c) \equiv c\rho_1 + (1-c)\rho_g \\ \mu(c) \equiv c\mu_1 + (1-c)\mu_g \end{cases}$$
(3)

式中下标1和g分别代表液体和气体。体积分数 c(x,t)的输运方程可写成

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (c\boldsymbol{u}) = 0 \tag{4}$$

液体射流通过 VOF 界面捕捉方法进行求解^[16], 时间离散采用一阶隐式 Euler格式。梯度项的计算采 用有限元型的高斯线性插值格式。对流项的离散采 用具有二阶精度的高斯迎风格式。扩散项采用二阶 高斯守恒格式^[17]。表面插值采用中心差分格式。通 过引入流体体积分数及其输运方程,在每个时间步 内求解动量方程和界面输运方程,从而获得网格单 元内体积分数的变化。

2.2 网格自适应求解技术

本文利用开源工具 Gerris 实现网格自适应加密。 用八叉树对计算区域进行空间离散,压力场通过求 解压力泊松方程获得,在不损失精度的条件下充分 利用了计算机内存空间,显著地提高了计算速度。 在加密网格上,空间和时间离散趋于二阶收敛。本 文中,基于八叉树的自适应网格加密(AMR)方法应 用于每个时间步,计算规模和计算耗时明显降低,能 准确捕获射流雾化问题中小尺度界面破碎结构的拓 扑变化。图1(a)为自适应网格,图1(b)为加密的结 构网格。采用 AMR 的自适应方法,细化后得到的加 密网格可以精准辨识破碎液滴的细部结构,准确有 效地跟踪流动特征。与固定的加密结构网格相比, 当液滴的最小尺寸要求达到0.5µm时,固定网格的网 格量大约在4亿,而自适应网格只有2000万,有效地 降低了网格计算量。

使用网格自适应加密算法可以根据流场参数变 化或界面位置演化对局部网格进行动态加密或粗 化。对气液两相界面位置进行细化加密时,网格可 以自动加密直至满足对液滴结构进行有效数值解析 所需的尺度,再结合 VOF 方法可以很清晰地捕捉到 微小液滴。

2.3 物理问题描述与计算参数设置

本文研究燃油液体通过圆形喷口进入静止空气



Fig. 1 Computational grids based on VOF

的射流破碎过程。入射速度考虑两种状况,其一是 均匀分布的入射速度;其二,引入不同频率的振动噪 声波,考虑流向强迫扰动对射流入口速度的叠加效 应,分析其对射流破碎过程产生的影响。

该液体射流算例的计算域设置为长方体,横向 与流向的计算域尺寸分别是10D×10D×50D,其中 D为入射液柱的初始直径,取0.1mm。

计算 雷诺数 和韦伯数 分别为 Re = 440, We = 1270, 其它流动参数详见表 1, 其中 U是速度, ρ是密度, μ是动力黏度系数, σ是表面张力系数。计算中采用 AMR 和树形数据结构存储形式, 计算规模大大缩小, 网格量约为 2000 万。加密网格的最小空间尺寸可达 0.5μm。

本文考虑的算例分为无射流扰动和有射流扰动 两种情况。在无射流扰动的情形下,液体以30m/s的 速度喷射进入静止空气,在速度差和剪切力作用下, 头部的液体开始堆积卷曲,形成蘑菇状结构。随后, 具有高惯性的液膜继续卷起和发展,并在燃烧室中 流动形成液体薄片。

喷口射流扰动会对射流雾化过程产生影响,故 在有射流扰动情形下,通过设置不同的扰动频率和 幅值,以观察最终的雾化效果。发动机燃烧室雾化 喷嘴喷射出来的液柱受到的扰动主要来源于两方 面,一部分来源于入射口无规律的随机机械振动,另 一部分来源于气液两相对流的相互作用。为此,需 要在射流入口处增加纵向强制扰动来模拟真实情 况。射流孔口的流量波动可以通过模拟速度的动态 变化来实现,假设速度的变化规律为

 $U = U_0 (1 + A \sin(2\pi f \times t))$ (5) $\vec{x} + U_0 = 2 \hbar c \lambda f$ $\vec{x} + A = 2 \hbar c x + \delta c x +$ 幅值比,其值为0.05,*f*是扰动的频率,也就是扰动增长率。

根据表面波的线性不稳定方程和N-S方程,可以 求解出射流的入射基频率和波数之间的关系^[18]。波 数有长波、中波和短波三个分段,而不同的扰动频率对 应着不同的波段。为了探究扰动频率对射流模态的影 响特征,经过大量的粗网格变动频率验证,主要考虑三 个不同的频率范围,分别称为低频(f = 0~16Hz),中频(f = 22Hz~44Hz)和高频(f = 48Hz~100Hz),各自对应着波 数的短波、中波和长波。计算中具体设定的扰动频 率值见表 2,分别落在不同的频率范围。

 Table 1 Physical parameters and flow conditions of liquid

 and gas

and gas								
Item	U/(m/s)	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	$\mu/(Pa \cdot s)$	$\sigma/(N \cdot m)$	$D_{\rm in}/\mu{ m m}$			
Liquid	30	848	2.87×10^{-6}	0.03	100			
Gas	0	34.5	1.97×10^{-5}					

Table 2 Forced disturbance in five cases

Case	Frequency <i>f</i> /Hz
1	1
2	10
3	20
4	42
5	100

3 结果分析与讨论

3.1 算法验证和网格测试

3.1.1 网格无关性验证

雾化过程对采用的网格分辨率非常敏感,网格 必须足够精细才能捕获到正确的雾化形态。本文采 用的是自适应网格,在气液接触面的网格会不断地 迭代调节以生成细化网格单元,做到网格点布置与 物理量求解的实时耦合。本文算例中,计算域远场 区域的网格分布比较稀疏,而液柱附近区域网格比 较密集。为了进行网格无关性验证,对不同网格密 度下的稳态无扰动射流过程进行了数值计算和分 析,流动参数见表1。从图2可见,射流计算结果和网 格的细化程度有密切的联系。在同一时刻和相同的 物理仿真时间步上,大尺度的液柱形态和小尺度的 液滴分布在三个不同的网格密度计算中得到的结果 相近,头部均产生蘑菇状卷起,液滴集中分布在头部 附近,呈锥状扩散,液柱前端的液面波动很明显,与 之前已有文献中的描述一致[1]。网格精细程度越高, 液滴分布呈现的形态越丰富。

图3显示了不同网格精度下,归一化之后的液滴

直径概率分布曲线图。因为不同精度的液滴尺寸和 数量大小关系不在一个量级,所以需要做归一化处 理。从图上可知,在不同精度下,液滴的平均尺寸略 有不同,但是总体符合正态分布。

受限于实际的计算资源,需要从中选取最合适的能被接受的计算精度和计算规模。0.5μm精度的网格计算量在2000万,1μm精度的网格计算量在500 万,而2μm精度的网格计算量在100万。图2中最小 尺寸为0.5μm的网格已经可以有效地捕捉射流柱失 稳和首次破碎过程,继续加密需要的网格规模十分 庞大。为了保证计算精度,充分使用计算资源,在计 算中最终选取了最小网格尺寸为0.5μm的网格 系统。



(c) 0.5µm

Fig. 2 Snapshots of flow jet atomization in different mesh sizes at the same time



Fig. 3 Normalized probability density function distribution of droplets diameter in different mesh sizes

3.1.2 液滴形成机制的对比验证

高速的液柱进入静止的气体之后,在前方阻力 的挤压作用下,头部液体产生堆积并向外侧且向后 侧转移。在与周围气体接触时,由于气液两相存在 速度差,液柱表面受到剪切力作用。又由于表面张 力的作用,液体射流表面发生变形扭曲。扭曲变形 的液柱头部的边缘受剪切力最大而表面张力最小, 会最先变薄,呈现薄片状结构。薄片结构的不均匀 分布导致破碎的发生和液丝的生成。

本文采用的是自适应加密方法,网格分辨率高, 可以准确考虑液丝的形态和结构。将本文的无扰动 稳态射流计算结果与李霄月等^[19]的结果进行对比, 两者对液体破碎形态的描述吻合良好。如图4所示, (a)为李霄月等的计算结果,采用的是固定加密网格 系统,计算网格规模达4亿,(b)采用的是自适应网格 加密。从图中可以看出,流场中存在两类液丝结构, 即条带状液丝和环状液丝。红色箭头指向的条带状 液丝随着上游的高速运动,一部分逐渐向后输运并 破碎产生液滴,一部分和液柱发生撞击并融汇在一 起。而图中蓝色的环状液丝则一直以环形的样式向 后扩散输运,直至逐渐转化为液滴。整个液丝形成 机理与没有采用自适应网格计算的李霄月等的数值 分析保持一致。

3.2 结果分析与讨论

3.2.1 无扰动稳定射流的流场拓扑结构

无扰动稳定射流的液体界面演化过程见图 5,每 个液柱快照之间的时间间隔如图所示,最小网格尺

寸是0.5µm。气动力剪切作用引起的纵向Kelvin-Hemoltz不稳定和气液界面引起的横向 Rayleigh-Taylor不稳定^[20],是流向细长液丝状结构形成的主要因 素。随后,液丝逐渐从头部脱落,并向液柱靠拢,液 丝结构的长度随着射流过程的发展而增长。液丝末 端聚集形成小液滴,液滴直径大小由液丝长度和外 力共同决定,与射流速度密切相关。具有较低惯性 的液膜在雾化区域边缘的尾流区域积聚。积聚的液 体由于横向不稳定会被空气剪切。此外,从图5中可 以看出,液柱两侧还存在很多小尺寸的卫星液滴,为 二次破碎产生。当液滴尺寸较小时更易被空气拖 拽,导致气液相对速度接近为零,进而降低了气动剪 切作用。剪切力和表面张力之间的相互制约导致了 不同的二次雾化状态。整个射流初期过程中,蘑菇 头的形状从椭圆慢慢变化成圆锥形外观,气液表面 积增大,雾化程度不断提高。

3.2.2 强迫扰动作用下射流的流场拓扑结构

对于强迫扰动作用下的脉动射流(f = 0.5Hz), 其产生的液丝如图6所示。可以很清晰地发现,液丝 由射流头部脱离,靠内侧形成条状液丝,边缘处产生 环形液丝,计算结果与稳定射流一致。与无扰动的 稳态射流结果(图4)相比,强迫扰动作用下的射流更 早开始充分雾化,环状液丝的扩散半径更大,周期性 条状液丝更早地成形,长度拉升得更长。有扰动的 射流液滴形态相对更加丰富,小液滴在液丝附近也 有积聚,数量也更多。



(b) Result by AMR

Fig. 4 Ligament formation from tip edge with steady jet



Fig. 5 Jet behavior at different time



图 7 是对应扰动频率f = 10Hz的强迫扰动作用 下的射流界面演化过程,每个液柱快照的时间间隔 如图中所示。从图 7 可以看出,此时的液柱出现很明 显的周期性脉动,波数的数量很多,随着射流长度变 长,脉动逐渐减弱。射流头部依旧呈明显的蘑菇状, 但是和稳定速度的射流相比,其外形更扁平,未出现 明显堆积。液丝迅速地被拉伸和切割,条状液丝被 拉伸之后快速破碎成为小液滴,环状液丝只在初期 出现在头部附近,在后期成形之后立刻破碎成液滴。 整个雾化过程比稳定射流情形进展更快,而且液滴 数量也更多。

3.2.3 扰动频率对射流过程的影响

设置不同频率的速度扰动,同一时刻,在相同的 物理仿真时间上(3s),观察射流形态的变化(见图 8)。在低频阶段,未扰动长度L变化显著,随着扰动 频率的增大,其长度不断缩短;进入中高频阶段后, 随着扰动频率的增大,L也随之增大。换言之,中高 频强迫扰动对L的影响不是很明显。

强迫扰动使得液柱表面产生很多凸起,低频射



Fig. 7 Perturbed jet behavior at different time

流表面有很明显的规则周期波;中频阶段,在射流入 口处产生为数不多的周期性短波;高频射流表面则 不存在明显的周期波。周期性表面凸起对于液丝的 剥落和生成有一定的促进作用。

稳定射流头部附近的液柱呈直线形式,低频强 迫扰动将对其产生很强的干扰,产生弯曲变形。中 高频扰动对液柱的干扰相对于低频扰动有所减弱, 但对头部附近液面的形态以及液丝的产生方式和分 布形式有很大的干扰。

液滴分布规律和雾化性能的一个重要指标就是 液滴直径的概率密度分布(PDF),其对燃烧效率的估 算有重大的参考意义。对分离出来的液滴计算其体积,并把液滴近似成球形,进一步计算出直径的直方 图分布,即可得液滴直径的PDF分布。如图9所示, 液滴尺寸分布主要集中在5μm附近。对于不同频率 的强迫扰动作用,液滴直径的概率分布趋势差异明 显。在中低频阶段,随着扰动频率的增大,液滴的分 布逐渐趋于尖锐。而在中高频阶段,液滴的分布又 将随着频率的增大回归平缓。液柱的自身频率和扰





Fig. 9 Probability density function (PDF) distribution of droplet diameter in different frequencies

动频率如果接近的话,会产生更高质量的雾化效果。

继续考察统计平均索泰尔直径 SMD, SMD 的估 算对网格尺寸的选择和判断具有指导意义。文献 [21]中不同频率下对应的 SMD 分布规律是,在中低 频阶段,随着扰动频率的增大, SMD 逐渐变大。而中 高频阶段, SMD 随着扰动频率的增大则会减小。表 3 为不同频率下计算得出的 SMD 数值, 数据的分布和 文献吻合。

 Table 3
 SMD in different frequencies

<i>f</i> /Hz	1	10	20	42	100
SMD/µm	7.26	7.91	7.95	7.61	7.52

4 结 论

(1)利用自适应网格求解技术对雾化过程进行 仿真。对于无扰动情形,稳态射流进入静止空气后, 在纵向Kelvin-Hemoltz不稳定和横向Rayleigh-Taylor 不稳定的作用下,射流头部发展成蘑菇状,随后形成 液丝,慢慢发展成网兜状并破碎成小液滴。流场中 存在力学行为各异的条带状和环状等两类液丝 结构。

(2)周期性强迫扰动的射流会在液柱表面产生 周期性波动,与稳定射流相比,射流发展更为迅速, 液丝破碎形成液滴的速度更快,射流头部更扁平,液 滴数量更多。不同频率的强迫扰动对射流的未扰动 长度(L)、液滴分布概率(PDF)和液滴直径(SMD)都 有显著的影响。在较小的幅值比约束下,中低频阶 段,随着扰动频率的增大,L逐渐减小,PDF分布趋于 尖锐,SMD增大。但在中高频阶段,随着扰动频率的 增大,L随之增大,PDF分布恢复平缓,SMD则减小。

致 谢:感谢国家自然科学基金、国家自然科学基金委员会-广东省人民政府联合基金(第二期)超级计算科学应用研究专项的资助。

参考文献

- [1] Shinjo J, Umemura A. Simulation of Liquid Jet Primary Breakup: Dynamics of Ligament and Droplet Formation
 [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36 (7): 513-532.
- [2] Linne M A, Megan P, Gord J R, et al. Ballistic Imaging of the Liquid Core for a Steady Jet in Crossflow [J]. Applied Optics, 2005, 44(31): 6627-6634.
- [3] Wang Y, Liu X, Im K S, et al. Ultrafast X-Ray Study of Dense-Liquid-Jet Flow Dynamics Using Structure-Track-

ing Velocimetry [J]. *Nature Physics*, 2008, 4(4): 305-309.

- Blaisot J B, Yon J. Droplet Size and Morphology Characterization for Dense Sprays by Image Processing: Application to the Diesel Spray [J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(6): 977-994.
- [5] Hoover D V, Ryan H M, Pal S, et al. Pressure Oscillation Effects on Jet Breakup[R]. AIAA 2012–0259.
- [6] 韩雅芳,戴圣龙,杨守杰,等.均匀液滴喷射沉积模 拟研究[J].航空制造技术,2003,(7):25-27.
- [7] Carpentier J B, Baillot F, Blaisot J B, et al. Behavior of Cylindrical Liquid Jets Evolving in a Transverse Acoustic Field[J]. Physics of Fluids, 2009, 21(2): 247-276.
- [8] Yu P, Suga K. A Numerical Study on the Breakup Process of Laminar Jets into a Gas [J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(5).
- [9] Ménard T, Tanguy S, Berlemont A. Coupling Level Set/ VOF/Ghost Fluid Methods: Validation and Application to 3D Simulation of the Primary Break-Up of a Liquid Jet
 [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33 (5): 510-524.
- [10] Herrmann M. A Balanced Force Refined Level Set Grid Method for Two-Phase Flows on Unstructured Flow Solver Grids [J]. Journal of Computational Physics, 2008, 227(4): 2674-2706.
- [11] Herrmann M. Detailed Numerical Simulations of the Primary Atomization of a Turbulent Liquid Jet in Crossflow
 [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(6).
- Herrmann M. The Influence of Density Ratio on the Primary Atomization of a Turbulent Liquid Jet in Crossflow
 [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 2079-2088.
- [13] Fuster D, Bagué A, Boeck T, et al. Simulation of Primary Atomization with an Octree Adaptive Mesh Refinement and VOF Method[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(6): 550-565.
- [14] Gonzalez-Flesca M, Schmitt T, Ducruix S, et al. Large Eddy Simulations of a Transcritical Round Jet Submitted to Transverse Acoustic Modulation [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(5): 163-178.
- [15] Heister S D, Rutz M W, Hilbing J H. Effect of Acoustic Perturbations on Liquid Jet Atomization [J]. Journal of Propulsion & Power, 1997, 13(1): 82-88.
- [16] 邹建锋,黄钰期,应新亚,等.VOF方法计算密度异 重流[C].珠海:第十六届全国水动力学研讨会,2002.

- [17] 王 凯,杨国华,李鹏飞,等.基于Gerris的离心式喷 嘴锥形液膜破碎过程数值模拟[J].推进技术,2018, 39(5):1041-1050. (WANG Kai, YANG Guo-hua, LI Peng-fei. Numerical Simulation on Conical Liquid Sheet Breakup Process of Pressure Swirl Injector Based on Gerris[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(5): 1041-1050.)
- [18] Ashgriz N, Yarin A L, Yarin A L, et al. Handbook of Atomization and Sprays[M]. USA: Springer, 2011.
- [19] 李霄月, 邹建锋, 张 阳, 等. 液体射流首次破碎的 直接数值模拟及动力学过程分析[J]. 推进技术,

2018, 39(7): 1529-1539. (LI Xiao-yue, ZOU Jianfeng, ZHANG Yang, et al. Direct Numerical Simulation and Dynamics Analysis of Primary Breakup in Liquid Jet [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(7): 1529-1539.)

- [20] Yarin A L. Drop Impact Dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing… [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38(1): 159-192.
- [21] Yang X, Turan A. Simulation of Liquid Jet Atomization Coupled with Forced Perturbation [J]. Physics of Fluids, 2017, 29(2).

(编辑:梅 瑛)