

横向射流中煤油雾化特性的数值研究*

何园源^{1,2}, 于小兵², 王智华², 李井华¹, 颜应文¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 为了研究燃油射流雾化过程中的破碎形态及发展轨迹, 实现燃油雾化过程的精确数值仿真, 本文对直射式喷嘴喷入横向气流中的雾化特性进行数值模拟。计算采用耦合的多相流模型VOF和离散相模型DPM, 研究煤油的一次雾化中射流破碎形态及发展过程, 二次雾化过程中油滴的索泰尔平均直径(SMD)空间分布特性。应用动态网格自适应技术, 精确捕捉到液体结构和射流表面的波动。数值计算结果表明, 射流破碎过程中主要发生的是液柱破碎和表面剪切破碎; 韦伯数对破碎模态的影响较大, 液-气动量比对射流轨迹影响较大; 在不同气动进口条件下, 燃油射流轨迹以及液滴空间分布特性与经典经验关系式以及试验数据具有较好的一致性。

关键词: 一次雾化; 二次雾化; 射流轨迹; 索泰尔平均直径; 动态自适应网格; 煤油雾化

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2023) 03-210756-11

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210756

Numerical Study on Spray Characteristics of Kerosene Jet in a Crossflow

HE Yuan-yuan^{1,2}, YU Xiao-bing², WANG Zhi-hua², LI Jing-hua¹, YAN Ying-wen¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Guiyang Engine Design Research Institute, Guiyang 550081, China)

Abstract: In order to study the fragmentation shape and development track of fuel jet atomization process, and realize the accurate numerical simulation of fuel atomization process, atomization characteristics of a direct jet in a cross flow were numerically investigated. A coupled Volume-of-Fluid (VOF) and discrete phase model (DPM) method was adopted to study the deformation and development of jet in the process of primary breakup, and to track the spatial distribution characteristics of Sauter mean diameter (SMD) of fuel droplets in the process of secondary. The adaptive mesh refinement (AMR) technique was applied to accurately capture the liquid structures and wave behaviour on liquid surface. The numerical results show as follows: column breakup and surface shearing breakup are dominant in primary breakup process of liquid jet. Breakup modes are highly influenced by Weber number, and the jet trajectory is obviously affected by the momentum ratio of liquid to gas. The fuel jet trajectory and droplet spatial distribution are in good agreement with the classical empirical relations and experimental data under different aerodynamic inlet conditions.

Key words: Primary breakup; Secondary breakup; Jet trajectory; SMD; Adaptive mesh refinement; Kerosene atomization

* 收稿日期: 2021-10-28; 修订日期: 2022-07-05。

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-III-0004-0047)。

作者简介: 何园源, 硕士生, 研究领域为航空发动机燃烧技术。

通讯作者: 颜应文, 博士, 教授, 研究领域为航空发动机燃烧技术, 低污染燃烧。E-mail: yanyw@nuaa.edu.cn

引用格式: 何园源, 于小兵, 王智华, 等. 横向射流中煤油雾化特性的数值研究[J]. 推进技术, 2023, 44(3):210756. (HE Yuan-yuan, YU Xiao-bing, WANG Zhi-hua, et al. Numerical Study on Spray Characteristics of Kerosene Jet in a Crossflow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(3):210756.)

1 引言

多相流是一个重要的研究课题。液体喷射雾化是多相流的一种复杂物理现象,液体雾化是指在液体粘性力和气体气动力的共同作用下,大块燃油破碎转化成细小液滴的过程。雾化过程分为初次雾化和二次雾化两个过程^[1]。初次雾化阶段,气液两相之间相互作用产生剪切力,导致液面的纵向不稳定性和流向不稳定波动,且这种波随着时间不断增长,波强度增加到一定程度后,液面表面褶皱,继而断裂成膜状或圆柱状液体结构。由初次雾化生成的膜状和带状结构在持续的波动中,继续分裂形成细小的液滴结构,为二次雾化过程。燃油的雾化效果对燃烧过程中污染物的生成、燃烧性能以及燃烧不稳定性等均有重要影响。

燃油雾化过程中涉及到多尺度结构,喷嘴附近区域,液体体积分数占比大,结构尺度大,适合采用界面捕捉方法,距喷嘴稍远的下游区域,液体结构细微,适用于颗粒追踪方法。目前的研究大多是分初次雾化和二次雾化两个阶段,各用不同求解器及方法进行模拟,很难实现准确模拟雾化的全过程。

液体破碎的主要来源是表面的不稳定性,而表面波主要来源于R-T不稳定性,波长随着韦伯数的增大而减小^[2-3]。学者们提出了多种数值模拟方法来研究液体雾化的波动过程及其影响因素。

Wu等^[4]对射流破碎的机理展开了研究,揭示了液柱破碎、表面破碎与气动力之间的联系,并提出表面破碎并不依赖于液体粘性而取决于气动力。基于开源求解器Gerris,Xiang等^[5]采用了VOF方法来模拟气-液两相剪切层的界面形态变化过程,揭示了液体雾化破碎机理,是由气动剪切力主导的剪切破碎。Salewshi^[6]采用大涡模拟对横向气流中煤油射流的雾化过程进行了数值模拟,获得了两相场中的速度和液相体积分数的分布情况,并研究了流场中涡系结构的发展过程和涡结构对射流雾化的影响。

Madhusudan等^[7]采用耦合Navier-Stokes/Ghost fluid界面追踪求解器,探究了气液动量比、气液两相韦伯数对射流破碎形态以及射流轨迹的影响。刘日超等^[8]利用LES结合VOF的方法,对液体射流柱的变形、弯曲以及其破碎过程进行了直接模拟,破碎过程由KH和RT不稳定性共同作用。VOF方法在两相界面捕捉上具有较好的质量守恒性。结合了VOF的守恒性和Level Set的界面光滑性,学者提出了CLS-VOF^[9]。刘楠^[10]采用了基于CLSVOF的大涡模拟方

法研究了喷射、喷孔直径和来流总温以及马赫数对射流穿透能力的影响。

Tsukamoto等^[11]采用拉格朗日离散液滴法(DDM)对燃油直接喷射的二次雾化油雾场进行LES求解,探讨了TAB(Taylor Analogy Breakup)模型和修正TAB模型以及不同进口条件对液滴运动的影响作用。张雨树等^[12]对二次雾化中不同 We 和 oh 数下液滴的破碎模式展开了研究。杜波等^[13]对该燃烧室中液体燃料雾化两相流场进行了数值模拟,获得了不同气流速度下液滴群SMD分布,通过对单个液滴二次破碎模拟再现了液滴在高速气流中变形破碎的整个过程。

近年来也有诸多学者致力于雾化耦合模型或方法的研究。刘日超等^[14]将一次雾化模型和二次雾化模型耦合嵌入Saturne程序中,对燃油雾化、蒸发以及燃烧全过程进行模拟,对比不同二次雾化模型,KH-RT混合雾化模型能够更加真实地反映雾化过程。Yoo等^[15]采用自编软件中欧拉-拉格朗日求解器模拟了初次雾化和二次雾化,分析了流场涡系间相互作用、射流穿透深度以及液滴索泰尔平均直径的分布特性。Herrmann^[16]提出将LSM/LPT耦合方法应用于液体雾化。用欧拉方法捕捉动态演变的界面,用拉格朗日方法解析小的液体结构。

VOF to DPM方法是近年发展的液体雾化数值计算模型,实现了连续相液体向离散相液滴的转化过程,能够再现液体雾化全过程。并且,在二次雾化区域离散网格尺度较大,网格总量减少,从而减少了数值计算负载。

本文在模拟横向射流中煤油的雾化过程时,采用了Fluent中VOF to DPM的耦合模型,应用网格自适应策略,对燃油初次雾化和二次雾化过程中的液体结构形态及雾化特性进行模拟,分析液体射流在横向气流中的破碎机理、射流破碎过程中与气流的相互作用、气动参数对射流破碎的影响,并利用米氏散射成像技术拍摄得到射流破碎图像,对数值计算进行对比验证。

2 方法

2.1 试验系统

试验研究了某型中心分级燃烧室内主级旋流器叶片通道内单点燃油直接喷射雾化过程。图1所示为中心分级燃烧室内的三级旋流器,其燃油在主级旋流器叶片通道内的流动过程近似为在长方体内的流动,因此试验开展的是横向气流中单点燃油直接

喷射的雾化试验。试验系统如图2所示,采用的直射式喷嘴实际结构如图1所示。整个试验系统包括燃油供给系统、空气供给系统、试验流道、光学测量装置、图像采集装置、油气分离系统等部分。大气中的空气经由压气机进入试验流道,进口段布置了气体流量计监测进气流量。燃油由油泵供给,燃油流经一个稳压罐后,在喷嘴上游位置测量燃油流量并监控油压的变化。在核心测量段部分四周开设了光学窗口,利用光源照射流所在区域,采用高速摄影机拍摄并记录射流在横向射流中的雾化图像。并通过自编程图像处理对射流图像进行后处理,获得煤油射流轨迹和油珠分布特性。本团队前期实验中,将马尔文测量得到的油珠粒径与图像处理方法得到的油珠粒径进行定量对比,两者符合较好,验证了本文图像处理方法的可行性^[17]。

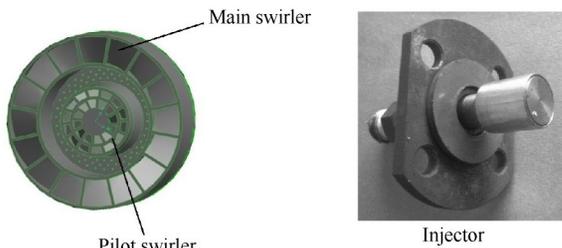


Fig. 1 Triple swirler in model LPP and the plain orifice injector in experiments

2.2 数学模型和计算方法

界面流方法适用于捕捉初次雾化中气液两相界面的运动。VOF (Volume of Fluid) 模型遵循欧拉-欧拉方法,基本思路是通过定义一个网格单元中流体体积与网格体积比函数 α 来确定自由面,追踪流体的变化。认为 $\alpha=1$ 时,该网格单元全部为液相流体所占据;若 $\alpha=0$,则该单元为气相流体所占据;当 $0 < \alpha < 1$ 时,则该单元称为交界面单元。液体体积分数的输

运方程如式(1),下标 l 代表液相,下标 g 代表气相, S 表示源项, m 表示气液两相之间的质量传递。

$$\frac{1}{\rho_l} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l u_l) \right] = S_{\alpha_l} + (m_{gl} - m_{lg}) \quad (1)$$

离散相方法则适用于追踪二次雾化中粒子的运动。该方法认为气体为连续分布,占据整个空间,直接由 N-S 方程求解;液相则为离散分布,其运动由连续流体的输运方程决定。

横向射流中气相作为连续相处理。遵循如下连续性方程和动量方程,即

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g u_g) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g u_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g (u_g \otimes u_g)) - \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \tau_g) = -\alpha_g \nabla p_g + \alpha_g \rho_g g - F \quad (3)$$

对液相采用颗粒轨道追踪模型。液滴的运动可由下列方程描述,其中

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p \frac{u - u_p}{\tau_r} + m_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (4)$$

式中 m_p 为颗粒质量, u 和 ρ 为连续相速度和密度, u_p 和 ρ_p 为离散相速度和密度。 F 为额外力(虚拟质量力,升力等)的合力,右边第一项为阻力项, τ_r 为粒子的弛豫时间,定义为

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (5)$$

式中 μ 为连续相的分子粘度, d_p 为粒子直径, Re 为相对雷诺数,定义为

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (6)$$

C_d 为液滴与气相之间的阻力系数,认为液滴为光滑球体,采用球形阻力定律,则 C_d 定义如下

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re} \quad (7)$$

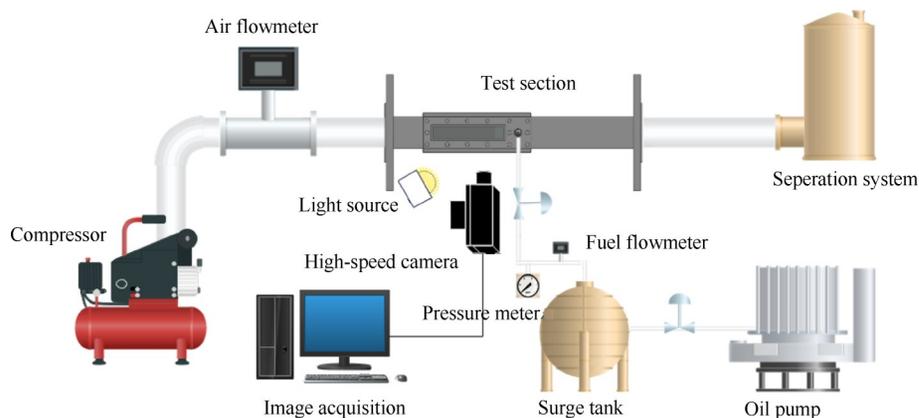


Fig. 2 Experimental system

式中 a_1, a_2, a_3 为常数, 由 Morsi 和 Alexander 给定^[18]。

VOF 与 DPM 之间的耦合实现了将连续相液体结构转化为离散相液滴的过程, 转化标准遵循液滴球形相似准则和等效粒径范围。射流在运动过程中, 在横向气流的剪切作用下, 会破碎成大小形状各异的小结构液团或液滴, 假设当前液体结构的外部形状轮廓符合球形相似, 且该液体结构的等效粒径在设定范围内, 则认为该液体结构符合转化标准。将当前液体结构从连续相中剔除掉, 并将其所在网格的 VOF 场重置为 0, 同时计算其液体结构的等效属性, 向拉格朗日场中输运具有相同属性的离散颗粒, 后对离散液滴的运动进行追踪。本文中转化液滴的等效粒径设置为 0~0.2mm。

在计算燃油雾化时, 连续的核心射流会破碎成大的液团, 进而分裂为细小的液滴, 且液团的大小和位置是时刻变化的, 因此需要动态捕捉液团的位置, 并加密当前区域网格, 以更精确地捕捉液滴的形状。动态网格自适应应用于瞬态求解计算时, 按照一定的方法动态加密网格某一区域, 以实现对该区域物理量的高精度捕捉。自适应加密过程如图 3 所示。

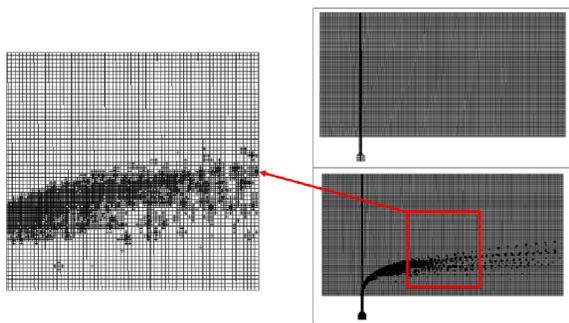


Fig. 3 Adaptive mesh refinement

网格自适应策略以及最终细化网格尺度相同的条件下, 燃油雾化过程的模拟结果具有一定的初始网格依赖性。为了使网格与两相界面的运动之间保持良好的跟随性, 网格的动态变化周期需要尽可能短。考虑到 CPU 时间的限制和计算精度的要求, 在对比不同自适应策略后, 选择细化阈值为 0.45~0.55, 基于液相体积分数的悬挂式网格节点自适应法作为最佳网格自适应方法。

2.3 物理模型和工况条件

燃油从直射式喷嘴中流出, 并发生破碎, 单点燃油喷射雾化的过程类似于射流在横向气流中雾化的过程。对直射式喷嘴结构(如图 1)进行简化, 保留内通道结构, 关键尺寸与原试验模型保持一致, 得到计

算模型如图 4 所示。本文采用了喷嘴直径为 0.4mm 的喷嘴, 喷嘴与喷嘴内油路过渡段为 90°锥面。确定计算流体域尺寸为 36mm×48mm×18mm, 喷嘴的中心位置在 (6mm, 0mm, 0mm) 处。空气沿 x 轴方向流动, 燃油从喷嘴的喷孔中流出, 初始速度沿 z 轴方向。

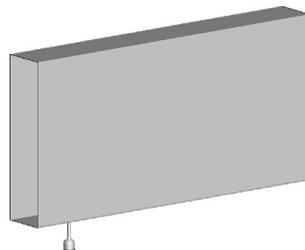


Fig. 4 Computational domain

本文针对常温常压条件下煤油在横向射流中雾化的过程进行数值模拟。计算前, 需要对流体域进行区域离散, 采用 ICEM 生成计算网格模型, 由于两相分界面结构复杂, 尺度多样化, 为了尽可能捕捉到较小结构的动态过程, 要求网格尺度比较精细。本文整体网格采用 L 结构化网格, 基础网格尺寸为 100~125 μm 。经网格无关性验证后, 选择网格数量为 171 万的网格模型(如图 5 所示), 在喷射口高度方向上, 网格密度较大, 尺度较小。网格经动态加密后, 液相所占据的流域的网格尺寸约为 20~30 μm , 网格数量上限为 2000 万。数值计算中采用 PISO 算法, 时间项的离散采用一阶隐式格式, 连续方程和动量方程的离散格式采用二阶迎风, 湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 多相流模型采用 VOF to DPM。数值计算中涉及到的边界条件有: 空气、燃油进口均设为速度进口, 入口湍流脉动速度为进口速度的 5%; 出口设为压力出口, 余气直接排入大气环境中; 其余为壁面条件。且全程需考虑重力作用, 重力方向沿 z 轴负方向。计算工况条件及工质物性参数如表 1 所示。其中, 韦伯数 We 和动量比 q 的定义如下

$$We = \rho_g u_g^2 l / \sigma \quad (8)$$

$$q = \rho_l u_l^2 / (\rho_g u_g^2) \quad (9)$$

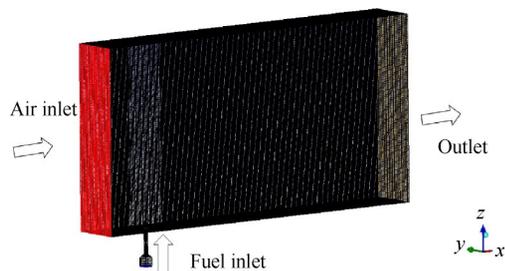


Fig. 5 Mesh description

Table 1 Fluid properties and operating conditions

Parameter	Value
Liquid density/(kg/m^3)	780
Air density/(kg/m^3)	1.225
Liquid velocity/(m/s)	3.4~13.7
Air velocity/(m/s)	60.4~90
Momentum flux ratio	2~32.3
Weber number	76~167.9

3 结果与讨论

3.1 煤油射流形态结构及流场结构

首先采用VOF方法对煤油的雾化过程进行非稳态两相流数值计算,数值计算的环境温度和燃油喷射温度均为常温298K。气液两相间的表面张力系数取 $0.026\text{N}/\text{m}$,默认空气为第一相,煤油为第二相,计算时间步长为 $0.1\sim 1\mu\text{s}$ 。考虑到不同入口条件下,流体的流通周期不一致,两相流计算均算至 2ms ,保证液体射流充分发展。

图6为 $We=76, q=7.4$ 时 $t=2\text{ms}$ 时刻 $y=0$ 中心截面速度矢量图以及液体相分数为0.1的等值面图,蓝色曲线示意的是射流轨迹外部轮廓线,图6(b)为图6(a)的局部放大图。在统计射流外轮廓时,首先确定计算域范围内射流液柱或液滴所能达到的最高位置坐标,剔除液滴出现概率较小的点后,对坐标点进行抛物线拟合,从而获得射流的外轮廓线。

煤油从喷嘴中喷射到稳定流动的空气中,气流受到液体射流的冲击被向上挤压,射流在气动力作用下改变速度方向,液柱弯曲,与下壁面之间形成一个低速回流区。在两相界面处,气动剪切力作用较强,液柱表面主要发生剪切破碎,剪切破碎是由K-H不稳定性主导的。液柱沿流向发展,在R-T不稳定性的作用下,液柱从尾部发生断裂,形成圆柱状或丝

带状的小液体结构。在真实情况下,由于燃油流道的壁面摩擦作用,燃油出口并非是完全均匀的速度流场。燃油出口中心速度高,近壁面处速度则有所变小。在数值计算时保留燃油流道是必要的。

图7为 $We=76, q=7.4$ 时不同时刻下液相体积分数为0.1的等值面图。结合图6中液相体积分数在 xz 平面分布云图分析,煤油沿 z 轴方向从喷嘴喷出,成液柱状,在横向射流的气动力作用和气液两相间表面张力作用下,向 x 方向运动, $t=0.5\text{ms}$ 时刻,在喷嘴附近位置,核心射流开始产生波动,液柱逐渐沿展向铺开呈膜状,表面出现较多不均匀褶皱。 $t=1\text{ms}$ 时刻,液体射流继续沿流向和垂直方向运动,轨迹呈抛物线型,在气动力的强剪切作用下,膜状结构较薄的地方破裂,形成条带状、块状的液体结构,进一步破碎成小液团乃至液滴。 $t=1.5\text{ms}$,煤油射流充分发展,并随着气流从出口流入大气环境中。

待VOF场充分发展达到动态稳定状态后,添加离散相模型,对二次雾化过程中液滴的运动轨迹及空间分布进行详细模拟。从相分场中获得液相的体积分数分布后,根据液滴筛选准则,将较小的液团结构转化为拉格朗日框架下的颗粒相,随后在离散相模型DPM下求解液滴的二次雾化过程。 $t=5\text{ms}$ 时刻获得的液滴空间分布云图如图8所示。二次雾化中考虑了粒子自身的运动,液滴的分布范围比液相体积分数分布范围要广,且呈向四周扩散的趋势。

3.2 不同进口条件对射流轨迹的影响作用

试验中拍摄得到的射流图像如图9所示,图像依次对应的工况条件列在表2中。前两个工况通过改变韦伯数 We ,后三个工况通过改变液-气动力比 q 的大小,分析进口条件对射流雾化形态的影响。

如图9所示,不同韦伯数条件下射流高度差异较

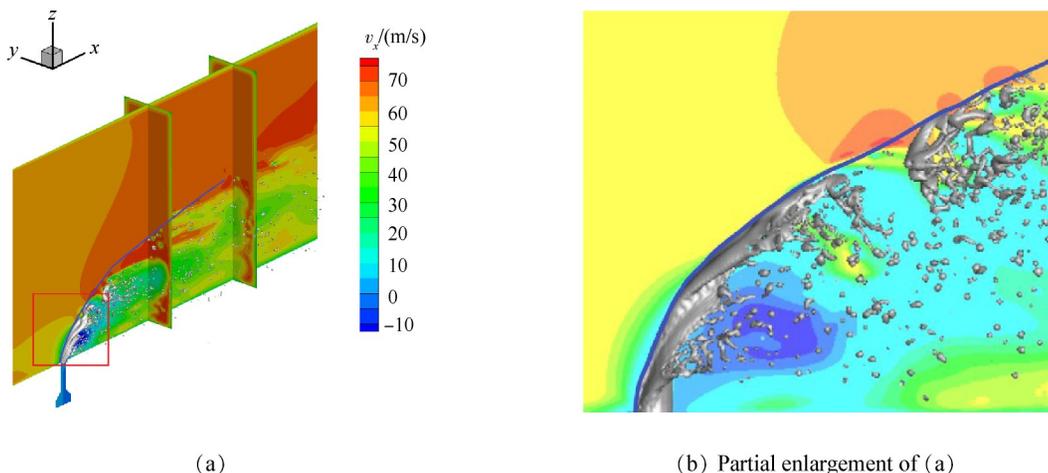


Fig. 6 Velocity distribution at plane $y=0, x=0.01$ and $x=0.02\text{m}$; iso-surface of volume of fraction=0.1

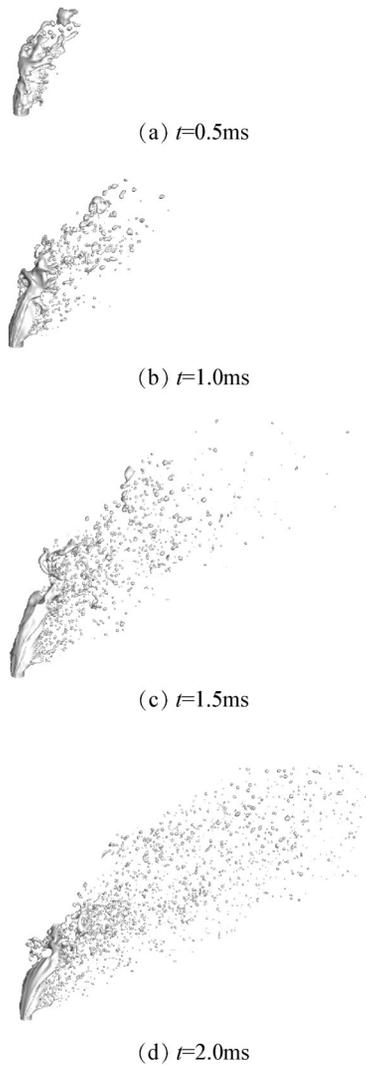


Fig. 7 Evolution of iso-surface of the volume of fraction=0.1

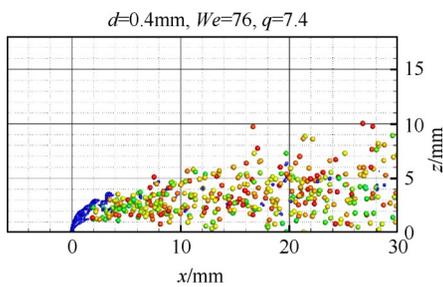


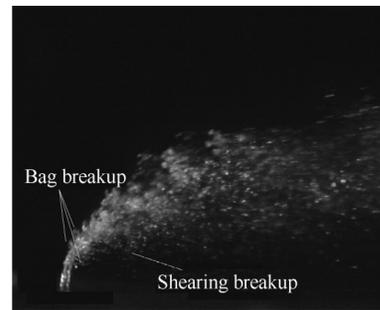
Fig. 8 Droplet distribution

小, We 数对射流轨迹的影响相对较弱,对破碎方式的影响显著。低 We 数时,破碎模式为袋状破碎和剪切破碎,表面张力和气动剪切力同时作用于射流的破碎。高 We 数时,气动剪切力占主导地位,破碎方式主要为剪切破碎。剪切破碎占主导时,生成的射流喷雾更致密。

目前研究学者们针对横向气流中的射流轨迹总结了大量经验公式^[4,19-23],有幂指数型,对数型和指数型。本文根据相似的应用条件,选取四个描述射流轨迹外轮廓的经验公式,与数值计算中射流的运动轨迹进行对比分析。

Wu:

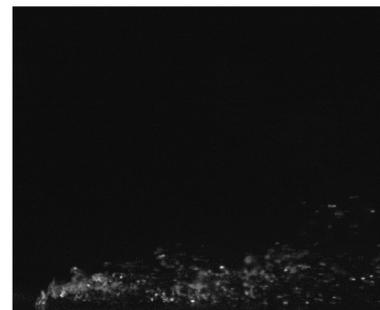
$$y/d_{\max} = 1.37(q \cdot x/d)^{0.5} \quad (10)$$



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4



(e) Case 5

Fig. 9 Jet trajectory image in experiments

Table 2 Operating conditions in experiments

Case	We	q
1	76	16.6
2	167.9	16.0
3	76	2.0
4	76	7.4
5	76	32.3

Gopala:

$$y/d = 0.9066q^{0.482}We^{0.0517} \ln(1 + 1.8855(x/d)) \quad (11)$$

Stenzler:

$$y/d = 2.63q^{0.482}We^{-0.088}(x/d)^{0.39}(\mu/\mu_{H_2O})^{-0.027} \quad (12)$$

Wang:

$$y/d = We^{-0.05}q^{0.5}(1.5 + 1.46\ln(x/d)) \quad (13)$$

数值计算中采用与试验相同的工况条件进行模拟,图10分别为初次雾化阶段,五个工况下液相体积分分数为0.1的等值面在xz平面的分布,图中用红色标记液体结构的位置,四条彩色的抛物线分别是根据上述选取的经验关系式预估的射流轨迹线。

从图中可以看出,随着We的增大,在相同液-气动量比条件下,射流穿透深度在喷射方向上有减小趋势。而液-气动量比的增大,射流穿透深度在喷射方向上大幅度增加。且射流轨迹形态对动量比的敏感性更显著,We大小的改变对射流轨迹的影响略小。We主要影响破碎方式,从定性分析上,数值计算结果与试验中射流破碎过程的变化规律保持一致。

与经验公式所预估的射流轨迹线进行对比,数值模拟中不同工况下得到的射流轨迹均与Gopala射流轨迹外轮廓线符合得较好,与Wu提出的预测轨迹线差距尤其明显。研究^[22]中表明气动力作用对射流轨迹的影响最大,其次是液体的粘性。Wu提出的经验公式中没有考虑We对射流轨迹的影响,而We对射流轨迹的影响不容忽视。其次,在他的试验中采用的液体工质是水,其物性与航空煤油差距明显,因此本文的数值模拟结果与Wu的预测公式差距尤其明显。其他三位学者充分考虑了We数对射流轨迹的影响。且Stenzler的试验中采用了水、丙酮和庚酮三种液体工质,考虑了液体粘性的作用。Wang和Gopala的试验中均采用了航空煤油。因此数值模拟的结果与这三位学者的预测公式之间的偏差相对较小。并且,由于试验工况条件以及操作方式不同,不同的经验公式之间是会存在一定差异的。

在二次雾化计算中,考虑了液滴的运动,在液体相分场的基础上,液滴会进一步向四周扩散运动。如

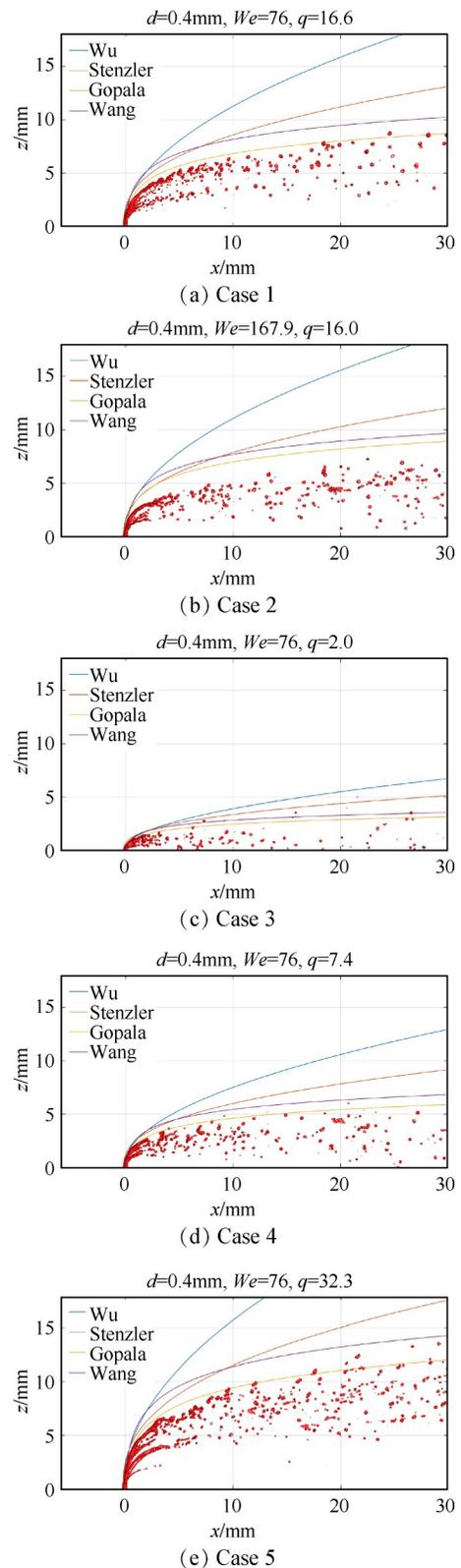


Fig. 10 Comparison between jet trajectory from VOF-numerical simulations with correlations

图11所示,蓝色标记表示初次雾化阶段液体结构,彩色球状结构表示二次雾化阶段燃油液滴,液滴以液滴粒径染色,四条彩色的抛物线为常用预测射流轨迹的经验关系式。不同工况下液滴的空间分布特性随

口条件的变化与射流轨迹的变化趋势一致,但液滴外边界线的范围有所扩大。与多个经验公式对比分析,数值模拟中的液滴分布范围的外边界线与式(12) Stenzler 所给出的射流轨迹外轮廓线重合度最高。

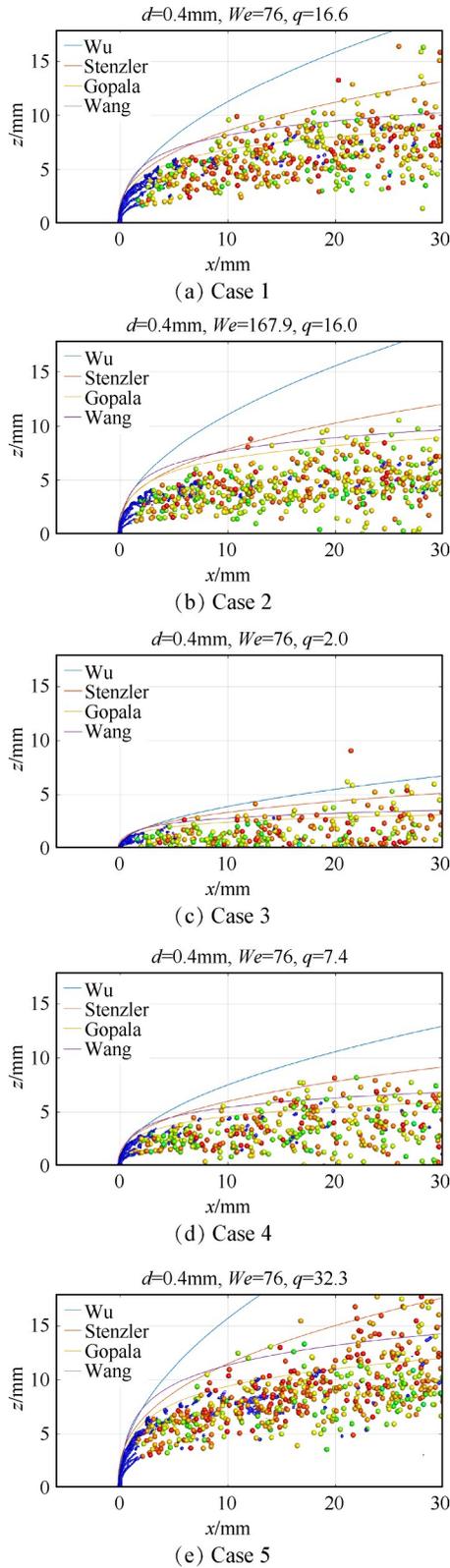


Fig. 11 Comparison between jet trajectory and droplet distribution from VOF-DPM numerical simulations with correlations

考虑了二次雾化中液滴颗粒的运动,数值计算中射流的运动轨迹更接近试验数据。通过图像处理获得试验图像中射流轨迹外轮廓线,如图 12 所示,图中的三条轨迹线分别表示试验测量得到的原

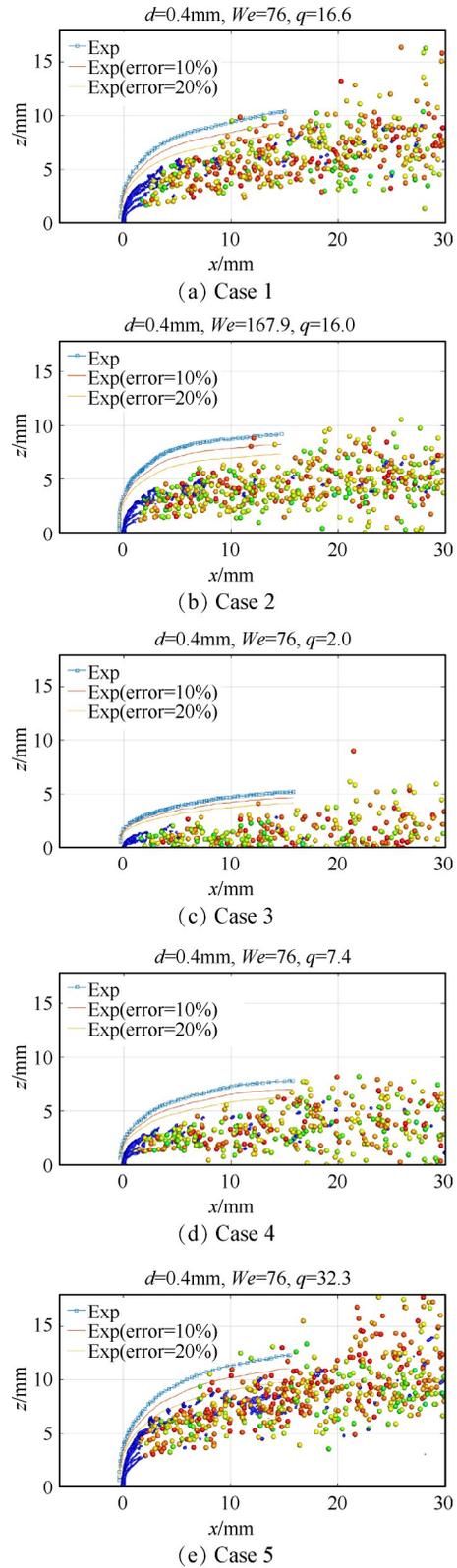


Fig. 12 Comparison between jet trajectory and droplet distribution from VOF-DPM numerical simulations with experimental results

始射流轨迹外轮廓线,和试验数据向下分别有着10%,20%误差的轨迹外轮廓线。将试验中获得的射流轨迹外轮廓线与数值计算的射流轨迹进行对比,两者达到较好的一致性,误差在20%左右。由此说明,一次雾化和二次雾化场耦合数值计算能较为准确地还原真实雾化场的形态。在初次雾化阶段,计算得到的射流喷雾范围比试验数据偏小,其原因主要是RANS雷诺时均方法对煤油射流与气流之间剪切作用的模拟精度不高。本文采用RANS方法模拟出来的射流形态与试验射流图像较为一致,能满足基本要求。但是对于非稳态精细流场模拟,LES大涡模拟或DES分离涡模拟方法的计算精度会更高,对射流的发展轨迹的预测会更准确。其次,二次雾化中液滴自身的扩散运动,对液雾的分布范围也会有一定影响,使得射流轨迹与试验图像更接近。

3.3 二次雾化喷雾特性分析

对二次雾化中获得的液滴空间分布特性进行批量处理,输出多个时间序列下的液滴粒径和位置信息,将同一工况下的数据,在 xz 平面进行网格划分,如图13所示,在网格 i 位置处,对液滴信息进行时均处理,得到各网格点处液滴的SMD值,从而得到该条件下喷雾的时均SMD空间分布和粒径大小分布。取得每一列网格中分布在最外侧的液滴的位置信息,将 $x-z$ 拟合可得到数值模拟中射流轨迹的外轮廓线。

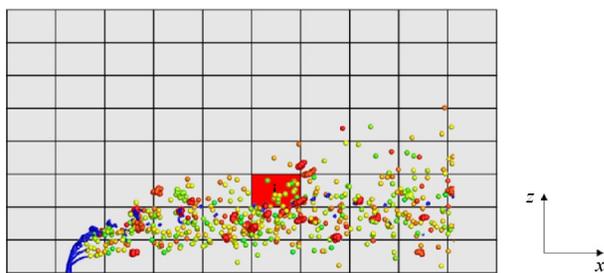
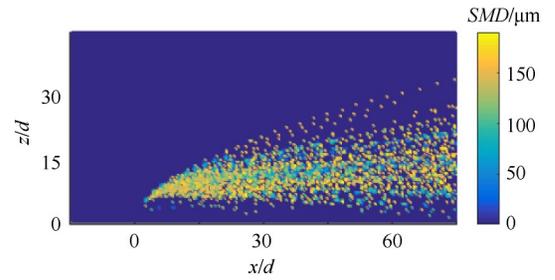
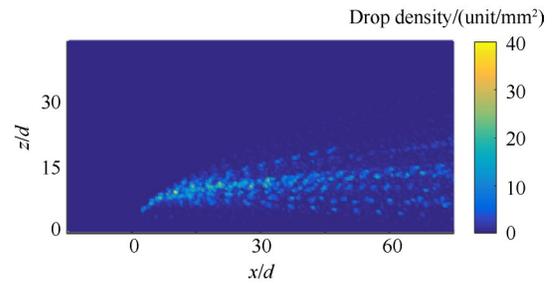


Fig. 13 Spray image processing

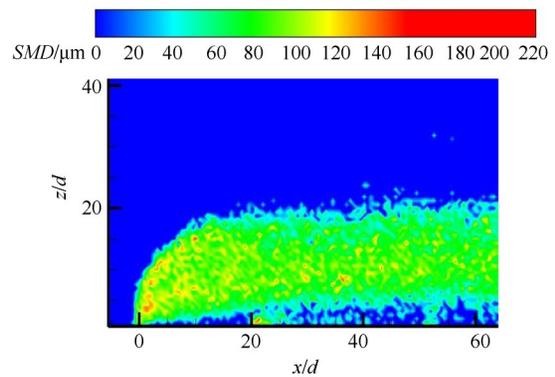
如图14为工况 $We=167.9, q=16$ 下的时均SMD空间分布图和液滴密度分布图。射流出口附近的液滴粒径较大,沿流向运动中,大液滴在进一步剪切中破碎,故气流下游的粒径相对变小。且核心射流区的粒径较气液界面附近的大,这是由于在液柱表面气动剪切力较强,液团碎裂程度更明显。数值模拟结果的分布形态与试验数据相似。定量结果上,数值模拟得到的油珠时均SMD比试验中测量得到的SMD要大。油珠的粒径偏大,从而导致燃油液滴的数量



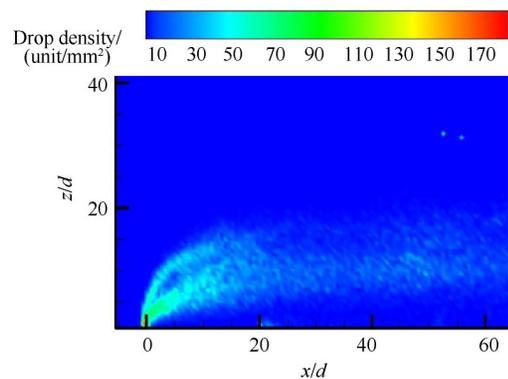
(a) Numerical results: the time-averaged SMD



(b) Numerical results: drop density



(c) Experimental results: the time-averaged SMD



(d) Experimental results: drop density

Fig. 14 Time average SMD and drop density

偏少。图15为液滴的粒径大小分布图,数值计算中捕捉到的液滴粒径在 $0\sim 200\mu\text{m}$ 内,将液滴根据尺度大小分组,间隔为 $20\mu\text{m}$ 。如图15(b)所示,试验中测的液滴平均粒径为 $57\mu\text{m}$,数值结果稍偏大,平均粒径为 $97\mu\text{m}$ 。导致误差的原因有二,一是数值计算中没有考虑液滴的蒸发效应,二是二次雾化模型选择不合适,液滴的二次雾化不够充分。后续工作中会

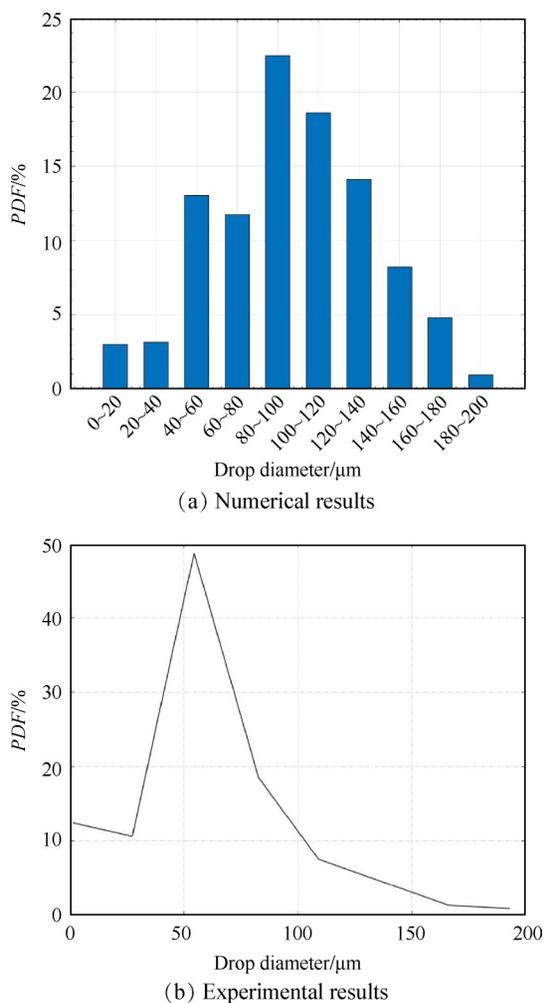


Fig. 15 Droplet diameter distribution

着重研究不同二次雾化模型以及模型的参数设置对液雾分布特性的研究。

图 16 为时均液滴空间分布与射流轨迹经验公式和试验数据的对比。图 16(a) 中液滴分布范围的外轮廓线与 Stenzler 提出的射流轨迹经验公式吻合得很好。在二次雾化中, 考虑到液滴会进一步向外扩散运动, 分布范围会更广。图 16(b) 中的三条轨迹线分别表示试验测量得到的原始射流轨迹外轮廓线, 和试验数据分别有着 10%, 20% 误差的轨迹外轮廓线。与试验结果相比较, 在离喷嘴较近的区域, 液滴的分布范围小于试验统计得到的射流轨迹外轮廓线, 误差大于 20%, 沿流向发展, 液滴逐渐向外扩散, 液滴分布范围逐渐接近外轮廓线, 在远离喷嘴出口约 $35d$ 的距离后, 液滴分布范围开始超过外轮廓线。在目前的研究中, 对于横向射流轨迹的结论一直没有统一。本文与多个经验公式对比, 认为数值计算结果是在合理范围内的。

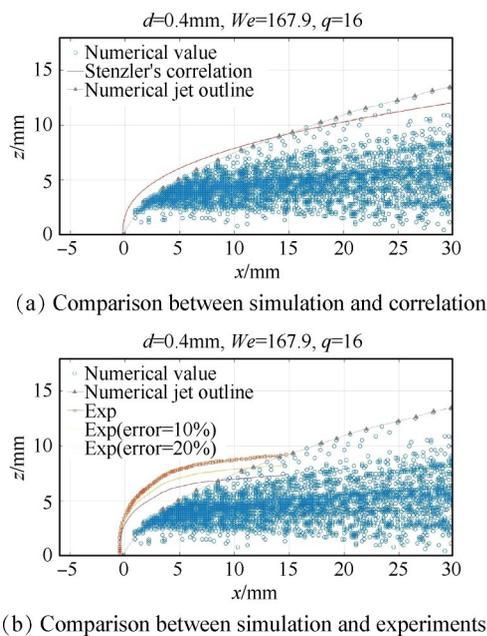


Fig. 16 Droplet spatial distribution

4 结 论

本文通过研究, 得到如下主要结论:

(1) 在模拟直射式喷嘴下游雾化特性中, 动态网格自适应加密策略的引入, 在满足计算网格细密度和计算精度要求的同时大量降低了计算时间和计算机负载。

(2) 在不同的气液进口条件下, 随着 We 数的增大, 射流穿透深度略有降低, 但影响并不显著。气动力作用主要影响液体射流在剪切力和表面张力作用下的破碎模式。液-气动量比占主导地位, 随着液气动量比的增大, 射流穿透深度显著增加。

(3) 将数值计算中的射流轨迹, 与经典经验关系式以及试验数据进行对比, 一次雾化和二次雾化耦合数值计算能较为准确地还原真实雾化场的形态。

(4) 二次雾化过程中, 油珠 SMD 的空间分布特性与试验以及经验关系式都能符合得很好。粒径分布特性近似 R-R 分布, 粒径大小与试验数据相比稍偏大。

本文数值计算中采用的是 RANS 方法, 出于对更高精度的追求, 后续会采用 LES 或 DES 对煤油射流的雾化进行进一步研究。并且, 为了能更好地再现真实燃烧室中煤油射流的雾化过程, 后续工作中会考虑复杂的旋流流动对射流雾化的影响。

致 谢: 感谢国家科技重大专项的资助。

参考文献

- [1] Duronio F, De Vita A, Montanaro A, et al. Gasoline Direct Injection Engines—A Review of Latest Technologies and Trends. Part 1: Spray Breakup Process[J]. *Fuel*, 2020, 265: 116948.
- [2] Liu N, Wang Z, Sun M, et al. Simulation of Liquid Jet Primary Breakup in a Supersonic Crossflow under Adaptive Mesh Refinement Framework[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 91: 456–473.
- [3] Xiao F, Dianat M, McGuirk J J. Large Eddy Simulation of Liquid-Jet Primary Breakup in Air Crossflow [J]. *AIAA Journal*, 2013, 51(12): 2878–2893.
- [4] Wu P K, Kirkendall K A, Fuller R P, et al. Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, 13(1): 64–73.
- [5] Xiang G, Ren Z, Kim S, et al. Numerical Analysis on the Disintegration of Gas-Liquid Interface in Two-Phase Shear-Layer Flows [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 98: 105710.
- [6] Salewshi M. A Comparison of Single and Multiphase Jets in a Crossflow Using Large Eddy Simulations [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(61): 61–68.
- [7] Madhusudan G P, Heinz P. Detailed Numerical Simulations of Primary Atomization of Liquid Jets in Crossflow [R]. *AIAA* 2009–373.
- [8] 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. (LIU Ri-chao, LE Jia-ling, YANG Shun-hua, et al. Direct Numerical Simulations of Atomization Processes of Liquid Jet in Subsonic Cross-Flow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(11): 2135–2141.)
- [9] Olsson E, Kreiss G. A Conservative Level Set Method for Two Phase Flow [J]. *Journal of Computational Physics*, 2005, 210(1): 225–246.
- [10] 刘楠. 超声速气流中液体横向射流一次雾化的试验与大涡模拟研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- [11] Tsukamoto K, Hirayama Y, Oshima N, et al. Large Eddy Simulation of Spray Injection for Direct Injection Gasoline Engine [C]. *Orlando: 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009.
- [12] 张雨树, 薛雷平. 液滴二次雾化破碎模式数值模拟[J]. 力学季刊, 2015, 36(4): 574–585.
- [13] 杜波, 白皓, 周康. 液体燃料横向射流雾化数值模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2013, 32(4): 352–355.
- [14] 刘日超, 乐嘉陵, 杨顺华. KH-RT模型在横向来流作用下射流雾化过程的应用[J]. 推进技术, 2017, 38(7): 161–168. (LIU Ri-chao, LE Jia-ling, YANG Shun-hua. Application of KH-RT Model in Process of Spray Jet Breakup in Across-Flow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(7): 161–168.)
- [15] Yoo Y L, Han D H, Hong J S, et al. A Large Eddy Simulation of the Breakup and Atomization of a Liquid Jet into a Cross Turbulent Flow at Various Spray Conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 112: 97–112.
- [16] Herrmann M. A Parallel Eulerian Interface Tracking/Lagrangian Point Particle Multi-Scale Coupling Procedure [J]. *Journal of Computational Physics*, 2010, 229(3): 745–759.
- [17] Yan Y, Liu Y, Wang Y, et al. Experimental Study of Fuel Evaporation Characteristics [J]. *Fuel*, 2016, 169: 33–40.
- [18] Morsi S A, Alexander A J. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 55(2).
- [19] Stenzler J N, Lee J G, Santavicca D A, et al. Penetration of Liquid Jets in a Cross Flow [C]. *Orlando: Proceeding of the 41st Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 2003.
- [20] 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): 1395–1402. (WANG Yan-sheng, LIN Yu-zhen, LI Lin, et al. Research on Penetration of Aviation Kerosene Injected into Crossflows Based on PLIF Technique [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(9): 1395–1402.)
- [21] Yong S H, Yu I J. The Penetration Characteristics of Normally Injected Kerosene Liquid Jet in High Weber Number Flow [C]. *Denver: AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2009.
- [22] Gopala Y, Zhang P, Bibik O, et al. Liquid Fuel Jet in Crossflow-Trajectory Correlations Based on the Column Breakup Point [C]. *Orlando: Proceeding of the 48th AIAA Aerospace Science Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2010.
- [23] Wang Q, Mondragon U M, Brown C T, et al. Characterization of Trajectory, Breakup Point, and Break Point Dynamics of a Plain Liquid Jet in a Cross flow [J]. *Atomization and Sprays*, 2011, 21(3): 203–219.

(编辑:梅 瑛)