

低排放燃烧室空气雾化喷嘴射流破碎特性研究

陆景贺¹, 李珊², 傅琳², 刘潇¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:针对当前广泛应用于低排放燃气轮机燃烧室中的空气雾化喷嘴,采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)和流体体积法(Volume of Fluid, VOF)研究了其在流动模糊(Flow Blurring, FB)和流动聚焦(Flow Focusing, FF)模式下射流一次破碎过程的差异。结果表明:两种模式的射流一次破碎过程均可分为3个阶段,气液交界面波动阶段、射流发展阶段和射流破碎阶段;喷嘴内部回流区的演变决定了气液交界面的波动程度,流动模糊模式下射流在后两个阶段的径向速度和形态变化程度均远高于流动聚焦模式,气泡回流过程在其射流破碎阶段占据主导地位,液体管道内气泡分布位置与涡的强度呈正相关。

关键词:流动模糊;流动聚焦;射流发展;射流破碎;气泡回流

中图分类号:V231.2

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.019

[引用本文格式]陆景贺,李珊,傅琳,等.低排放燃烧室空气雾化喷嘴射流破碎特性研究[J].热能动力工程,2023,38(5):154-161. LU Jing-he, LI Shan, FU Lin, et al. Research on jet breakup characteristics of airblast atomizer in low emission combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5):154-161.

Research on Jet Breakup Characteristics of Airblast Atomizer in Low Emission Combustor

LU Jing-he¹, LI Shan², FU Lin², LIU Xiao¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code:150001;

2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code:150078)

Abstract: Airblast atomizer is widely used in low emission gas turbine combustor at present. The difference of airblast atomizer in primary breakup process in flow blurring (FB) and flow focusing (FF) modes was studied using large eddy simulation and volume of fluid (LES-VOF) method. Results show that the primary breakup process of jet in two modes can be divided into three stages, such as the fluctuation of air-liquid interface, development of liquid jet and liquid jet breakup; the evolution of the recirculation zone inside atomizer determines the fluctuation degree of air-liquid interface. In the later two stages, the radial velocity and changes in jet morphology in flow blurring mode are higher than that in flow focusing mode. The bubble reflow process plays a dominant role in the liquid jet breakup stage, and the bubble distribution position inside liquid tube is positively correlated with the intensity of the vortex.

Key words: flow blurring, flow focusing, jet development, jet breakup, bubble reflow

收稿日期:2022-07-06; 修订日期:2022-08-11

基金项目:国家科技重大专项(J2019-III-0012-0055)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (J2019-III-0012-0055)

作者简介:陆景贺(1994-),男,哈尔滨工程大学博士研究生。

通讯作者:刘潇(1988-),男,哈尔滨工程大学副教授。

引 言

在燃气轮机燃烧室中,燃油的雾化水平决定了其燃烧特性与污染物排放特性^[1]。空气雾化喷嘴所需燃油压力较低,在横向气流中的液雾穿透深度和散布水平均优于现有的直射式喷嘴^[2-6],因而其在低污染燃烧室中具有良好的应用前景^[7]。根据燃油管道出口截面至喷孔入口截面的距离(H)与燃油管道内径(D)的比值(H/D),可将空气雾化喷嘴分为两种流动模式:当 $H/D > 0.25$ 时,喷嘴内部流动处于 FF 模式^[8];当 $H/D < 0.25$ 时,喷嘴内部流动处于 FB 模式^[9]。国内外学者对两种模式下的雾化特性开展了大量研究。

在 FF 模式下,Vega 等人^[10]发现射流存在 3 种状态:稳定、局部不稳定和完全不稳定喷射状态;射流状态的转变主要由其动力学决定。Zhao 等人^[11-13]发现空气流量增大会使射流雾化水平提高,分布范围变窄;气液相对速度增大,射流逐渐经历了液滴射流模式、震动射流模式、破碎射流和模糊射流模式。Seay 和 Leong 等人^[14-16]发现在没有横向来流时,喷雾横截面的液体浓度呈现两瓣结构,雾化空气压降、孔径和气液比的增大会导致喷雾充分扩张;存在横向来流时,增大雾化空气压降会提高喷雾穿透深度,增大燃油流量则会导致雾化水平降低。Leong 等人^[17]发现雾化空气压降和气液比增大时,液滴索太尔平均直径更小,油气分布更加均匀。在 FB 模式中,气体在燃油管道出口唇部产生分叉现象,在管道出口与喷孔入口之间形成驻止点,导致部分气体回流进燃油管道内部使液体射流发生破碎,从而使其雾化效率为 FF 模式的十倍^[9]。为了研究气体回流特性,Jiang 等人^[18-19]在透明的液体管道内研究了气泡的发展过程。研究发现,气液比增大时,气泡穿透深度和气泡簇的体积均逐渐提高,雾化空气压降增大使得气泡快速膨胀和破碎;射流一次破碎以气泡破碎为主,二次破碎则主要由液体和高速气体之间的瑞利-泰勒不稳定性控制^[20-21]。Simmons 等人^[22]发现液体流量对雾化空气压降基本无影响,而气体流量增加则会使液体供应压降增大;气液比增大会导致喷嘴流量系数减小,同时液滴索太尔平均直径显著降低,轴向速度峰值和脉动值均增

大^[23]。Panchasara 等人^[24-25]利用 FB 喷嘴和气动雾化喷嘴分别进行了柴油和煤油喷雾燃烧试验,发现在相同燃油和空气流量下,前者产生的氮氧化物和一氧化碳含量比气动雾化喷嘴低了 3~5 倍。针对高粘性燃油,FB 喷嘴也能产生清洁的蓝色火焰^[26-28]。

综上,两种模式下的喷嘴外部雾化特性研究较多,而内部流动特性的试验研究仅限于定性分析,不能给出明确的流动机制,同时现有的数值模拟研究多限于二维流动,难以真实反映喷嘴内部流场特性。因此,为了更加准确地给出喷嘴内部流动特性,本文采用 LES-VOF 方法,以柴油为雾化介质,深入分析两种流动模式下液体射流的一次破碎过程,并揭示二者射流破碎特性的差异。

1 数值计算方法

1.1 物理模型

喷嘴结构如图 1 所示。中心液体管道与气体管道同心布置,液体管道直径 D 为 2 mm,气体管道内径 D_1 为 4 mm,外径 D_2 为 10 mm,液体管道出口与喷嘴出口之间的距离为 H ,FB 喷嘴和 FF 喷嘴的 H/D 为 0.2 和 1。对该计算域进行结构化网格划分,并在环形通道 (Lateral Cylindrical Passageway, LCP) 和喷孔出口进行加密,以精确捕捉气液交界面的变化,最终网格数目为 80 万。用 $C_{12}H_{26}$ 代替柴油^[29],在美国国家标准与技术研究院网站查询其在 300 K 下的密度、粘度和表面张力分别为 744.29 kg/m^3 , $0.001\ 314\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 和 $0.024\ 752\text{ N/m}$ ^[30]。计算过程中进、出口分别使用速度进口和压力出口边界条件,空气和柴油进口速度分别为 11.756 和 0.191 m/s 。

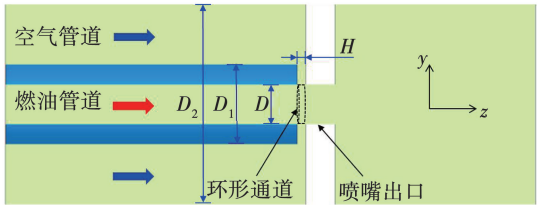


图 1 空气雾化喷嘴结构
Fig. 1 Structure of airblast atomizer

1.2 LES-VOF 计算方法

VOF 计算中气液两相分别为空气和柴油,二者任意时刻的空间分布通过容积比率 γ 来表征,当

$\gamma = 1$ 时,表明网格中充满了液体;当 $\gamma = 0$ 时,表明网格中充满了气体; $0 < \gamma < 1$ 时,表明网格内存在气液交界面。通过求解包含 γ 的控制方程来跟踪气液两相的交界面:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + F_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\gamma u_i) = 0 \quad (3)$$

式中: u —速度, m/s; x —坐标, m; 下标 i, j —不同方向; ρ —物质属性等效密度, kg/m³; p —压力, Pa; μ —等效粘性, Pa·s; F_s —质量力源项, N。

其中, ρ 及 μ 分别表示为:

$$\rho = \gamma \rho_f + (1 - \gamma) \rho_g \quad (4)$$

$$\mu = \gamma \mu_f + (1 - \gamma) \mu_g \quad (5)$$

式中: ρ_f —液体密度, kg/m³; ρ_g —气体密度, kg/m³; μ_f —液体粘性, Pa·s; μ_g —气体粘性, Pa·s。

大涡模拟在求解湍流流动时,根据空间尺度将流场中的涡分为大尺度涡和小尺度涡。其中,大尺度的涡受边界条件的影响较大,呈现出各向异性的特点,对流场变化影响较大;小尺度的涡受边界条件的影响极小,呈现出各向同性的特点,对流场主要产生耗散作用。因此,通过使用滤波函数,可以将流场中的独立变量分解为大尺度的可解分量和亚网格尺度量,可解分量可通过式(1)~(3)进行求解;亚网格尺度量则通过模型化求解。

$$\bar{\varphi}(x) = \int_D \varphi(x') G(x, x') dx' \quad (6)$$

式中: D —求解流场; $G(x, x')$ —滤波函数,其中 x' —真实流场上的空间坐标; x —滤波后的大尺度空间上的空间坐标。

亚网格尺度应力 τ_{ij} 表征过滤掉的小尺度脉动和可解尺度湍流间的动量输运。

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

亚网格尺度模型为:

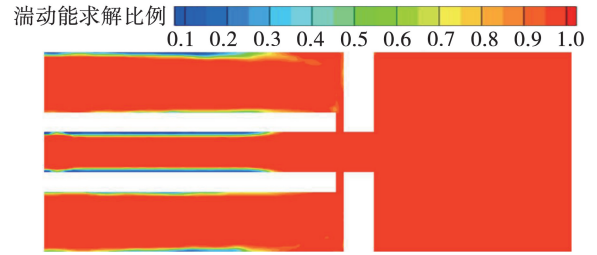
$$\tau_{ij}^{sgs} = -\mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{1}{3} \delta_{ij} \rho k_t \quad (8)$$

式中: 下标 k —方向; μ_t —亚网格动力粘性, Pa·s; k_t

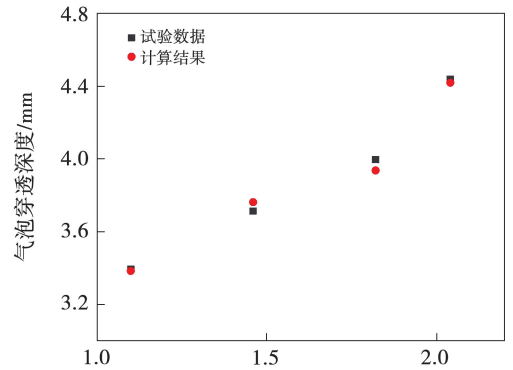
—亚网格动能, J; 二者使用 Smagorinsky-Lilly 模型进行求解。

1.3 数值模型验证

为了验证本文大涡计算的准确性,采用 Pope 准则^[31]获得了计算域内的湍动能求解比例,如图 2(a) 所示。在液体管道出口下游的环形通道和喷嘴下游区域的求解湍动能比例均大于 80%,表明所用的网格分辨率满足大涡计算的标准。同时,根据文献[19]中的透明喷嘴结构,采用上述计算方法,得到不同气液比时液体管道内的气泡穿透深度,与实验结果对比如图 2(b) 所示。可以看出,计算结果与试验数据变化趋势一致,数值吻合较好,表明本文所采用的计算方法准确。



(a) 湍动能求解比例



(b) 不同气液比下气泡穿透深度

图 2 数值模型验证

Fig. 2 Numerical model validation

2 结果和分析

2.1 射流核心长度发展特性

为了详细分析不同模式下的射流雾化特性,引入射流核心长度 L 表征射流一次破碎过程,其定义如图 3 所示。液体体积分数为 1 表明此处为射流核心,如图中黑色轮廓线所示。以燃油管道出口为分界线,其上游和下游射流核心与管道出口的距离分

别为 L_u 和 L_d ,其中 L_d 需满足管道出口下游的射流核心与管道内的射流核心相连。任意时刻下, L 定义为 L_u 或 L_d 绝对值较大的值。

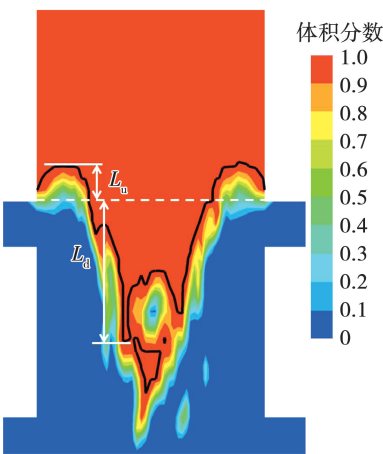


图 3 射流核心长度
Fig. 3 Jet core length

图 4 为不同模式下无量纲射流核心长度 (L/D) 的变化过程。图 4 将射流一次破碎过程分为 3 个阶段,分别为液体管道出口气液交界面波动阶段 (I),射流发展阶段 (II) 和射流破碎阶段 (III)。可以看出,在前两个阶段不同模式的射流核心长度变化趋势类似,但是在第 3 阶段存在明显差异。在第 I 阶段,由于液体管道出口下游的气体冲击作用,使得大部分射流核心集中于管道内部,因而 L/D 小于零;在第 II 阶段,当射流越过气体冲击区域后便开始向下游充分发展。在第 III 阶段,FB 模式中的射流首先在液体管道出口下游破碎,因而 L/D 逐渐减小;而后由于气泡回流使得射流在液体管道内部破碎,因而 L/D 一直小于零。

在 FF 模式中,射流破碎区域主要集中在其前端,由于气体射流的非定常冲击作用, L/D 变化趋势较为剧烈。同时,FB 模式下射流破碎前的准备时间明显短于 FF 模式。

2.2 气液交界面波动特性

气液交界面波动主要和气体速度相关,因而图 5 给出了不同模式下喷嘴内部气体径向速度分布,黑色轮廓线代表回流区,白色箭头代表气流运动方向。图 5(a) 和 (b) 分别对应图 4(a)、(b) 中 0.05 和 2.1 ms。由于 H/D 不同,导致二者的气体速度峰值、

分布结构和速度梯度等存在显著差异。由图 5(a) 可知,在 FB 模式中,较小的 H 使气体进入 LCP 前的径向速度极大,气流方向与射流流动方向近乎垂直。当气体由狭小空间进入相对宽阔的 LCP 内时,气流瞬间向外围扩散,可以将其简化为 3 股空气,即上部,中部和下部空气,如图中箭头所示。少量的上部空气沿燃油管道出口唇部向管道内部运动,在管道内壁产生回流区;中部空气继续向 LCP 中心运动,并在中心位置发生碰撞并产生驻止点,气流以驻止点为中心向四周分叉,部分气体向上游运动并在管道出口形成了中央回流区;下部空气迅速向下游运动,经过喷孔拐角时产生流线分离,近而在喷孔内壁产生较大的角落回流区。由图 5(b) 可知,在 FF 模式中,由于 H 和 LCP 空间均较大,气体所受空间阻碍作用大大减弱,因而气流速度显著下降。虽然该模式下气体也在 LCP 内部产生分叉效应,但是相比 FB 模式,其气体径向冲击力较小,因而气体难以进入液体管道内部,仅在管道出口下游流动。

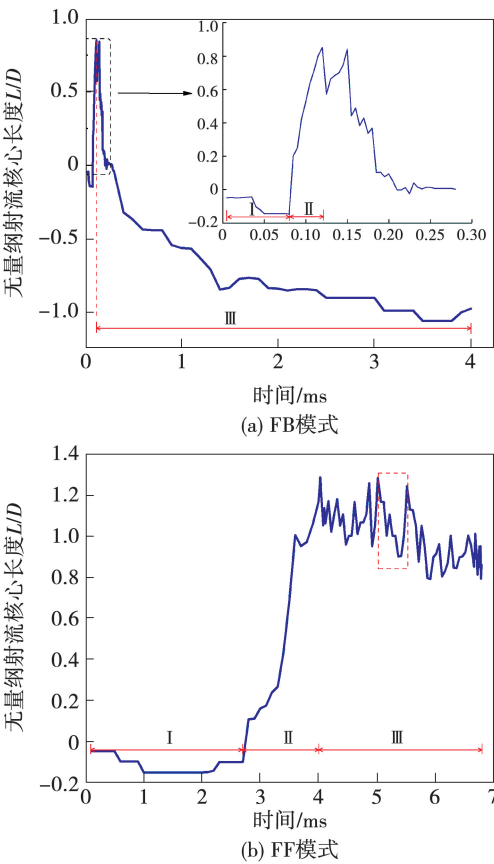


图 4 射流核心长度变化特征
Fig. 4 Variation of jet core length

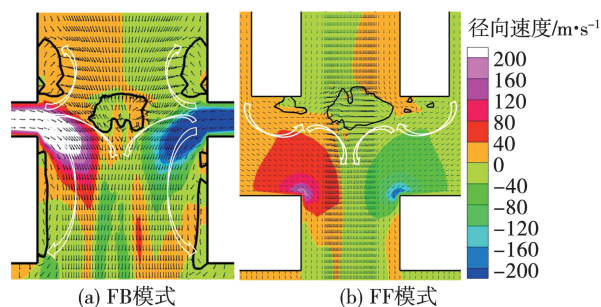


图 5 喷嘴内部流场结构

Fig. 5 Structure of flow field inside atomizer

图 6 为不同流动模式下,液体管道出口气液交界面的波动过程,实线代表液体体积分数为 1。由于两种模式流场特性差异较大,因而气液交界面波动也显著不同。由图 6(a)可知,在 FB 模式中,由于燃油管道内壁回流区和管道出口中央回流区的产生,在 0.01~0.05 ms 时气液交界面受到回流区向上游的挤压作用,其两侧和中间部分均逐渐向上游凹陷;由于燃油压力明显高于液体管道出口下游的环境压力,因而液体射流持续向下游移动,如 0.08 ms 时所示。由图 6(b)可知,在 FF 模式中,由于管道出口气体速度较低,因而在 2.1 ms 之前气液交界面波动变化不大;在 2.7 ms 时,由于燃油压力驱动和管道出口中央回流区的共同作用,使得气液交界面中心向上游凹陷,同时向管道出口唇部扩散并覆盖在其表面上,较长的径向扩散过程导致该模式下的气液交界面波动过程持续时间明显高于前者。

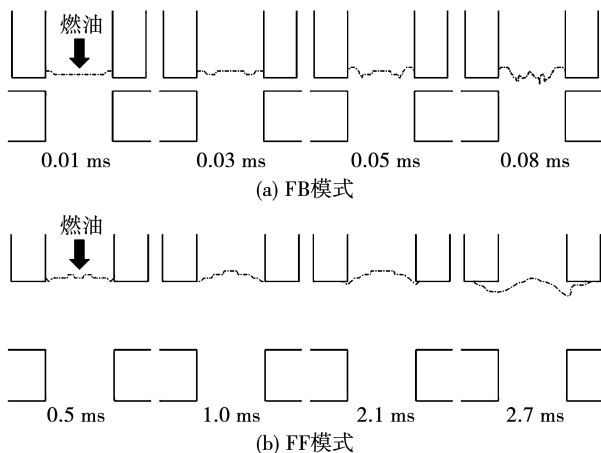


图 6 气液交界面波动过程

Fig. 6 Fluctuation process of air-liquid interface

2.3 液体射流发展特性

图 7 为不同流动模式下的液体射流发展过程,

黑线代表液体体积分数为 1,体积分数取值范围和图 3 一致。可以看出,两种模式射流根部差异和射流表面形状差异较大。在 FB 模式中,由于强烈的气体冲击作用,射流根部两端一直向管道内部凹陷;射流向下游运动过程中,其内部产生少量气泡,表面也逐渐产生锯齿状。而在 FF 模式中,管道出口唇部附着的液体在气体径向冲击作用下逐渐向中心靠拢,并向下游运动;由于气体径向作用力较小,因而射流表面较光滑,射流核心直径也远大于 FB 模式。另外,在两种模式下,射流自由发展过程中受空气冲击的作用,存在部分气体被液体所包裹,进而在射流内部产生气泡。

为了揭示两种模式下射流发展过程中的流场差异,分别在二者射流核心长度最大的时刻截取了 5 个截面,分别为液体出口 (L_1)、LCP 中心 (L_2)、LCP 出口 (L_3)、喷孔中心 (L_4) 和喷孔出口 (L_5),如图 7(a)中 0.12 ms 和图 7(b)中 3.9 ms 所示。

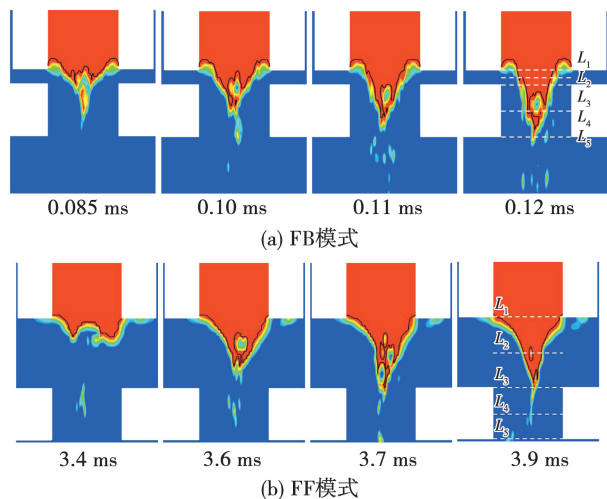


图 7 射流发展过程

Fig. 7 Development process of liquid jet

图 8 为不同截面的气体径向速度分布图,径向距离 R 使用无量纲数 R/D 表示。由图可知,从 L_1 至 L_5 截面,二者径向速度均呈现先增大后减小的趋势。在 FB 模式中, L_1 截面射流根部两侧较大的径向速度峰值正是其向管道内凹陷的主要原因;随后气体进入狭小的 LCP,射流表面速度急剧升高,而射流中心速度基本无变化,如 L_2 和 L_3 截面所示。当射流进入喷孔后,流通面积扩大使得径向速度迅速降低。在 FF 模式中,气体径向速度在 L_1 和 L_2 截面基本无变化,在 L_3 截面由于流通面积突然缩小气体径

向速度迅速增大,但随后又在喷孔中逐渐降低。在任意截面其速度值均远小于 FB 模式,因而射流形状变化较为缓和。

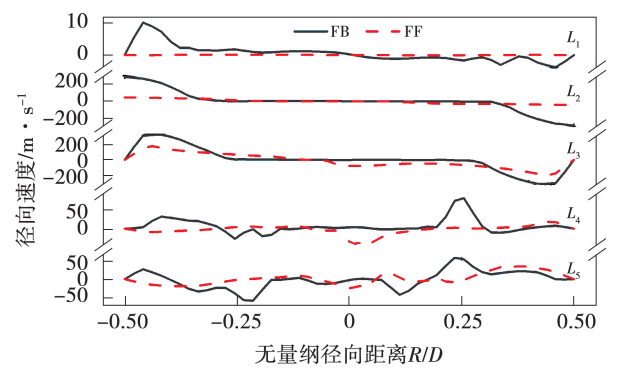


图 8 不同截面气体径向速度分布

Fig. 8 Air radial velocity distribution on different sections

2.4 液体射流破碎特性

为了较完整地体现两种流动模式下的射流破碎过程,分别选取了不同时刻下液体体积分数为 0.5

的射流等值面,射流破碎过程如图 9 所示。FB 模式中,射流破碎包含液体管道外部射流破碎阶段和管道内部射流破碎阶段(气泡回流阶段)。FF 模式中射流破碎过程极不规则,因而选择了射流核心长度由最大值降低至最小值而后又回升到最大值的阶段,如图 4 中虚线框所示。由图 9 可知,二者的射流破碎过程存在显著差异。在 FB 模式中,当射流核心直径较大时,其表面产生很多韧带,受到气动力的剪切而破碎成更小的液片,如图 9(a)中黑色圆圈所示。在喷孔内部,气体速度较大,导致射流表面高速区域也显著增大,进一步加速射流的断裂。射流前端到达大气环境时,其内部气泡的压力迅速降低并发生爆炸,使射流前端出现很多缺口,如图 9(a)中红色圆圈所示。同时,射流根部受到气流的冲击作用产生很多气泡,近而使射流表面出现大量缺口,如图 9(a)中箭头所示,射流直径逐渐缩小,最终在 0.155 ms 时,射流核心断裂。射流继续经历韧带破碎和射流根部破碎过程,直至射流核心消失。

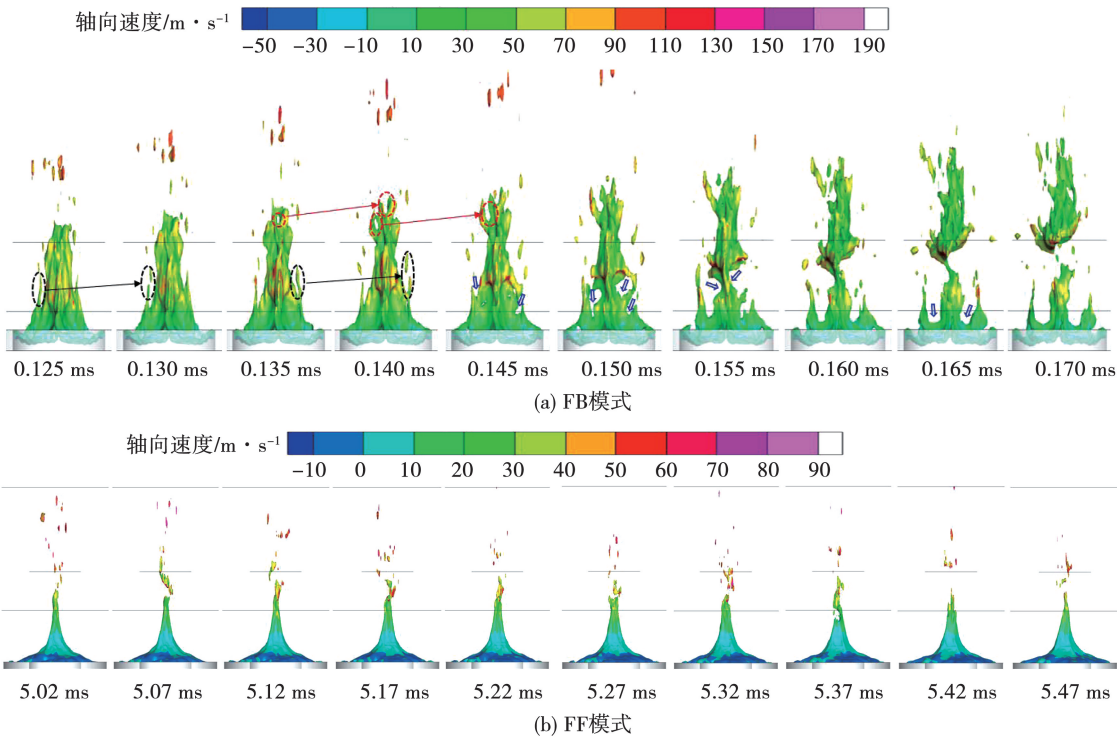


图 9 射流破碎过程

Fig. 9 Process of liquid jet breakup

在 FF 模式中,由于气体径向速度较小难以对射流表面产生较强的冲击作用,因而射流表面形状较为平滑,速度值也较小。在喷孔内气体速度明显

增大,导致射流前端速度显著升高,射流表面韦伯数迅速扩大,因而射流出现断裂,破碎成小尺寸的液片。

2.5 FB 模式气泡回流特性

在 FB 模式下,液体管道外部射流破碎过程持续时间较短,因而气泡回流过程在射流一次破碎中占据主导地位。图 10 为该阶段液体管道内的气泡穿透深度(Bubble Penetration Length, BPL)和回流区最大高度(Maximum Height of CRZ, MHCRZ)变化。其中,BPL 定义为管道内液体体积分数为零的点与管道出口的距离,通过管道直径 D 进行无量纲化。在 2.4 ms 之前 BPL 总体处于上升趋势,表明此阶段气泡对射流表面的冲击作用大于射流上游的压力驱动作用;在 2.4 ms 之后,二者则进入了相持阶段,气泡穿透深度变化幅度几乎一致,可以认为此时气泡与燃油之间达到了动态平衡。对于 MHCRZ,在 1.1 ms 前变化过程十分剧烈,随后逐渐缓和,综合来看其变化过程与 BPL 并无太大联系。

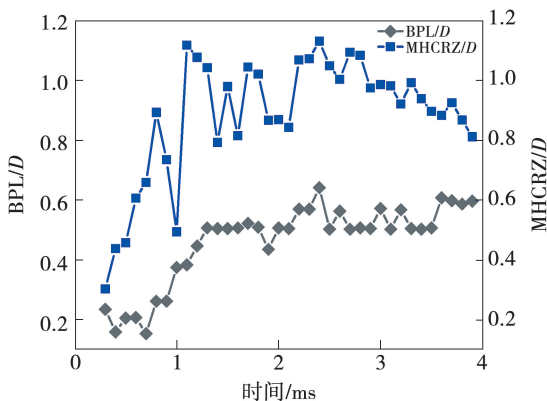


图 10 气泡回流参数变化

Fig. 10 Variation of bubble reflow parameters

由于 2.4 ms 时 BPL 最大,因而选取了 2.4 ms 时液体管道内部不同截面分析流场分布特性,气泡回流阶段流场结构如图 11 所示。图 11(a)为喷嘴中截面,图 11(b)为中截面上各白线位置对应的轴向截面(F_1 - F_4),黑线代表回流区,流线为涡量分布,体积分数取值范围和图 3 一致。可以看出,截面向上游移动时,液体核心区域逐渐增大,从管道四周向中心聚拢;回流区的数目和气泡分布范围均减小。强度大的涡所在位置液体体积分数最小,表明气泡的分布位置和涡的强度有关。在 F_3 和 F_4 截面,液体内部虽然存在少量涡结构,但是由于其强度较低因而未能出现气泡。

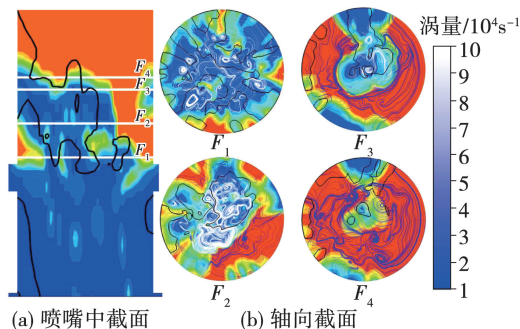


图 11 气泡回流阶段流场结构

Fig. 11 Structure of flow field in bubble reflow stage

3 结 论

本文采用 LES-VOF 方法研究了 FB 和 FF 模式下液体射流的一次破碎过程,对比了不同流动阶段喷嘴内部的流场特性,主要得出以下结论:

(1) 根据射流核心长度的变化,两种模式下射流一次破碎过程均可以分为 3 个阶段:即 I - 液体管道出口气液交界面波动阶段,II - 射流发展阶段和 III - 射流破碎阶段。其中,FB 模式的第 3 阶段中气泡回流过程占据主导地位。

(2) 两种模式下液体管道出口回流区的演变,是气液交界面波动的关键因素。FB 模式下的分叉效应明显强于 FF 模式,因而其气液交界面波动过程也更加剧烈。

(3) 在射流发展阶段,FB 模式的气体径向速度明显高于 FF 模式,其射流根部两端向液体管道内凹陷,射流表面形成锯齿状,射流形态变化程度比后者更加剧烈。

(4) 在 FB 模式下,液体管道外部射流破碎过程中主要存在 3 种破碎机制,分别为射流表面韧带破碎,射流前端气泡爆炸破碎和射流根部气体冲击破碎。在 FF 模式下,仅射流前端破碎过程较剧烈,射流根部和表面几乎无变化。

(5) 在 FB 模式的气泡回流阶段,气泡穿透深度先增加后趋于平衡,回流区最大高度变化极不规则,二者之间没有较强的关联性。液体管道内截面向上游移动,回流区的数量和气泡分布范围均减小,气泡分布位置与涡的强度相关,涡强度越高的位置,形成气泡的可能性越大。

参考文献:

[1] LEFEBVRE A H, MCDONELL V G. Atomization and sprays[M].

- Florida, USA: CRC Press, 2017.
- [2] SEAY J E, MCDONELL V G, SAMUELSON G S. Atomization and dispersion from a radial airblast injector in a subsonic crossflow [C]//San Diego, California: 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1995.
- [3] TAN Z, LUBARSKY E, BIBIK O, et al. Effect of air-assist on liquid jet penetration and dispersion in a cross-flow of hot, high-pressure air [C]//Montréal, Canada: ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, 2015.
- [4] TAN Z, LUBARSKY E, BIBIK O, et al. The effects of air-assist upon liquid fuel jet penetration and dispersion in a cross-flow of pre-heated air [J]. *Atomization and Sprays*, 2016, 26 (11): 1177–1196.
- [5] TAN Z, BIBIK O, SHCHERBIK D, et al. The regimes of twin-fluid jet-in-crossflow at atmospheric and jet-engine operating conditions [J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30: 025101.
- [6] TAN Z. The physics of twin-fluid jet-in-crossflow at atmospheric and jet-engine operating conditions [J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31: 045106.
- [7] 金如山, 索建秦. 先进燃气轮机燃烧室 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- JIN Ru-shan, SUO Jian-qin. Advanced gas turbine combustor [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016.
- [8] GAÑÁN-CALVO A M. Generation of steady liquid microthreads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(2): 285–288.
- [9] GAÑÁN-CALVO A M. Enhanced liquid atomization: from flow-focusing to flow-blurring [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(21): 214101.
- [10] VEGA E J, MONTANERO J M, HERRADA M A, et al. Global and local instability of flow focusing: the influence of the geometry [J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(6): 064105. 1–064105. 10.
- [11] ZHAO J, NING Z, LYU M. Experimental study on the two-phase flow pattern and transformation characteristics of a flow mixing nozzle under a moderate flow rate [J]. *Meccanica*, 2019, 54(2): 1–13.
- [12] ZHAO J, NING Z, LYU M. Large eddy simulation of two-phase flow pattern and transformation characteristics of flow mixing nozzle [J]. *Journal of Mechanics*, 2019, 35(5): 1–12.
- [13] ZHAO J, NING Z, LYU M, et al. Numerical simulation of flow focusing pattern and morphological changes in two-phase flow inside nozzle [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019, 27(1): 63–71.
- [14] SEAY J E. Atomization and dispersion of a liquid jet injected into a crossflow of air [R]//NASA-CR-198543, Irvine, CA: University of California, 1996.
- [15] LEONG M Y, MCDONELL V G, SAMUELSEN S. Mixing of an airblast atomized fuel spray injected into a crossflow of air [R]. NASA-CR-2000-210467, Irvine, CA: University of California, 2000.
- [16] LEONG M Y, MCDONELL V G, SAMUELSEN S. Effect of ambient pressure on an airblast spray injected into a crossflow [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(5): 1076–1084.
- [17] LEONG M Y, SMUGERESKY C S, MCDONELL V G, et al. Rapid liquid fuel mixing for lean-burning combustors: low-power performance [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, 123(3): 574–579.
- [18] AKINYEMI O S, JIANG L. Investigation of primary atomization mechanism of a novel twin-fluid atomizer using high spatial-resolution shadowgraph [C]//San Diego, California: AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [19] AGRAWAL S R, JIANG L, AGRAWAL A K, et al. High-speed visualization of two-phase flow inside a transparent fuel injector [C]//Salt Lake City, Utah: 8th US National Combustion Meeting, 2013.
- [20] JIANG L, AGRAWAL A K. Spray features in the near field of a flow-blurring injector investigated by high-speed visualization and time-resolved PIV [J]. *Experiments in Fluids*, 2015, 56(103): 1–13.
- [21] JIANG L, AGRAWAL A K. Investigation of glycerol atomization in the near-field of a flow-blurring injector using time-resolved PIV and high-speed visualization [J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2015, 94(2): 323–338.
- [22] SIMMONS B M, AGRAWAL A K. Spray characteristics of a flow-blurring atomizer [J]. *Atomization and Sprays*, 2010, 20(9): 821–835.
- [23] AZEVEDO C C, FERNANDO A, JOSE C. Effects of nozzle exit geometry on spray characteristics of a blurry injector [J]. *Atomization and Sprays*, 2013, 23(3): 193–209.
- [24] PANCHASARA H V, SEQUERA D E, SCHREIBER W C, et al. Emissions reductions in diesel and kerosene flames using a novel fuel injector [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2012, 25(4): 984–987.
- [25] PANCHASARA H V, SIMMONS B M, AGRAWAL A K, et al. Combustion performance of biodiesel and diesel-vegetable oil blends in a simulated gas turbine burner [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2009, 131(3): 031503. 1–031503. 11.
- [26] SIMMONS B M, AGRAWAL A K. Flow blurring atomization for low-emission combustion of liquid biofuels [J]. *Combustion Science and Technology*, 2014, 184(5): 660–675.
- [27] JIANG L, AGRAWAL A K, TAYLOR R P. Clean combustion of different liquid fuels using a novel injector [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 57: 275–284.
- [28] OSA A, LJA B. Development and combustion characterization of a novel twin-fluid fuel injector in a swirl-stabilized gas turbine burner operating on straight vegetable oil [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 102: 279–290.
- [29] LUO Z, SOM S, SARATHY S M, et al. Development and validation of an n-dodecane skeletal mechanism for spray combustion applications [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2014, 18(2): 187–203.
- [30] NIST Chemistry WebBook [EB/OL]. <https://webbook.nist.gov>.
- [31] POPE S B. Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows [J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6(35): 1–24.