

旋流作用下的液膜初始破碎可视化实验研究*

谢宇, 王航, 程泽宇, 郭志辉

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力国防重点实验室, 北京 100191)

摘要: 利用背光照明和高速相机, 对强剪切气动雾化喷嘴出口雾化进行了可视化实验研究, 探究旋流中的液膜初始破碎特性及一二级旋流对液膜初始破碎的影响。唯象描述了液膜破碎过程和模式, 并分析图像获得表征液膜初始破碎特性的物理量: 液膜破碎长度和径向拍振频率。实验结果表明: 旋流作用下液膜破碎主要为液袋破碎和液丝破碎模式, 这与平面液膜相似, 且受工况的影响规律也相同, 但旋流作用使得破碎过程和模式叠加, 更为复杂。液膜破碎长度主要由一级旋流决定, 二级旋流的影响可忽略。径向拍振频率认为是由 Kelvin-Helmholtz (KH) 和 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定机理共同主导, 且受一二级旋流共同影响; 此外, 在大气流流量时, 同旋更利液膜失稳破碎, 即径向拍振频率更大, 而小流量时反旋更利于破碎。进一步由实验数据得到拟合经验公式, 两者吻合良好, 且发现径向拍振频率可能与旋流数之间存在关联。最终认为旋流作用下液膜更易失稳破碎, 且一级旋流决定了液膜初始破碎的基本形态, 二级旋流起强化剪切和辅助作用。

关键词: 旋流; 液膜破碎; 可视化实验; 液膜破碎长度; 径向拍振频率

中图分类号: V231.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 05-2207082-11

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2207082

Visualization Experimental Investigation on Liquid Film Primary Breakup with Swirling Flow

XIE Yu, WANG Hang, CHENG Ze-yu, GUO Zhi-hui

(National Defense Key Laboratory of Aero-Engine on Aerothermodynamic, School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The liquid film primary breakup characterizations under swirling flow and the influence of the primary and secondary swirling on the liquid film primary breakup were visualization experimental investigated by means of high-speed camera and backlighting illumination at the outlet of high shear air-blast injector. The processes and modes of liquid film breakup were phenomenological described. Meanwhile, two typical physical quantities of liquid film primary breakup were obtained by analyzing the high speed images: liquid film breakup length and radial flapping frequency. The experimental results indicate that liquid film breakup mainly presents bag-breakup and ligament-breakup modes under swirling flow, which is similar to the planar liquid film, and the influence patterns of operating conditions is same. While the swirling flow makes the breakup processes and modes superimposed and more complex. The liquid film breakup length is major determined by the primary swirling flow, and the direction of secondary swirling can be ignored. The radial flapping frequency is thought to be

* 收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-10-27。

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-III-0004-0028)。

作者简介: 谢宇, 硕士生, 研究领域为航空发动机燃油雾化与燃烧。

通讯作者: 郭志辉, 硕士, 副教授, 研究领域为燃油雾化和燃烧不稳定性。E-mail: guozhahui@buaa.edu.cn

引用格式: 谢宇, 王航, 程泽宇, 等. 旋流作用下的液膜初始破碎可视化实验研究[J]. 推进技术, 2023, 44(5): 2207082. (XIE Yu, WANG Hang, CHENG Ze-yu, et al. Visualization Experimental Investigation on Liquid Film Primary Breakup with Swirling Flow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(5):2207082.)

jointly dictated by the Kelvin–Helmholtz (KH) and Rayleigh–Taylor (RT) instability mechanisms and affected by primary swirling flow as well as secondary swirling flow. In addition, at high air flow rates, co-rotation is more favorable for liquid film instability and breakup, namely higher radial flapping frequency. However, counter-rotation is more beneficial to breakup at low air flow rates. Furthermore, empirical equations are fitted from the experimental data, which agree well, and a possible correlation between radial flapping frequency and swirl number is also found. Finally, it is concluded that liquid film is prone to being instable and broken under the swirling flow, and the primary swirling flow determines the basic morphology of the liquid film primary breakup, the role of secondary swirling flow is to enhance shear and assist.

Key words: Swirling flow; Liquid film breakup; Visualization experiment; Liquid film breakup length; Radial flapping frequency

1 引言

液体燃料的雾化对于航空发动机燃烧室是至关重要的,因为雾化决定了喷雾场中的液滴分布,包括液滴的尺寸及空间分布,进一步影响气液掺混、火焰稳定、燃烧效率和污染物排放。故而对航空发动机中的雾化装置设计提出了很高的要求,目前航空发动机中普遍采用强剪切喷嘴来实现所需的喷雾场,旋流杯喷嘴也属于其中。一般来说,强剪切喷嘴主要由两级或三级径向旋流器与中心喷嘴同轴装配组合,液体由中心喷嘴喷出,在文氏管壁形成液膜,之后与经过旋流器的强剪切空气相互作用^[1]。

有关强剪切喷嘴的研究最早是由Smith等^[2]开展的,在不牺牲整体动力性能的同时,进行建模分析和实验以改进强剪切喷嘴的性能。最终根据结果认为二级气流量占比应当较小。Li等^[3]采用直接数值模拟(DNS)方法来研究强剪切喷嘴中液体燃料的喷注和雾化过程,使用先进的界面捕捉方法和自适应网格划分技术获得了与实验数据相匹配的数值计算结果。Rajamanickam等^[4]和Kumar等^[1]研究了两种强剪切喷嘴的几何结构对喷雾特性和流场分布的影响,探究各设计参数与喷雾特性的关系,着重就中心回流区的变化进行分析。

虽然研究者们已经就强剪切喷嘴的结构设计、喷雾特性和流场进行了详细的研究,但并未涉及到强剪切喷嘴中液膜破碎的初始雾化过程。而利用平面液膜对空气雾化的基本机理进行研究早就开始,在Carvalho等^[5]中已进行了总结。之后Gepperth等^[6-7]采用阴影法结合粒子液丝追踪技术研究了平面液膜的初始雾化过程,提出预测索泰尔平均直径(SMD)的物理模型,并认为气流速度和雾化边缘厚度是影响液膜破碎的关键参数。Déjean等^[8-9]通过分析液膜的破碎长度、拍振频率和液滴尺寸研究了气液厚度和

预膜区长度对液膜破碎雾化过程的影响。何昌升等^[10]则将本征正交分解法(POD)引入液膜破碎特性的分析中,由实验数据拟合获得经验公式,为预膜喷嘴的设计优化提供参考。Chaussonnet等^[11]分析了环境压力和气动应力对液膜初始雾化的影响以构建可以预测雾化边缘处的初始雾化特性的模型。张举星等^[12]在高温高压条件下研究了工况参数对平面液膜破碎特性的影响规律,结果表明,液膜厚度的变化与液膜波动频率相反,并认为韦伯数是更适合表征雾化效果的参数。针对环形液膜,Wahono等^[13]的实验研究中,气液界面的剪切作用引起KH不稳定性,并促进了表面弯曲波的发展,利用高速图像定性分析了液膜的初始破碎过程。张海滨等^[14]针对气液两相环状流射流液膜进行实验研究,得到不同流动条件下的三种破碎模式,并就两段式破碎模式展开深入分析,建立了破碎高度的关联式。研究者大多通过实验手段测得表征液膜破碎的特征量,如破碎长度、破碎频率、拍振频率和液膜厚度,分析其影响因素及重要程度,进一步研究其与二次雾化,乃至最终喷雾场中的液滴尺寸和分布之间的关联。

无论是平面液膜还是环形液膜的破碎特性研究中,气流几乎都是与液膜同向流动,并未涉及旋流与液膜的相互作用。因此针对强剪切喷嘴中旋流剪切作用下的液膜初始破碎特性进行可视化实验研究,基于三组实验件,分析工况及一二级旋流对液膜破碎的影响作用和规律,并由实验数据拟合得到液膜破碎长度(L_b)和径向拍振频率(f)的拟合经验公式,提供强剪切喷嘴设计思路方案。

2 方法

2.1 实验系统

实验是在常温常压条件下开展的,喷雾实验台如图1所示,主要由气流通路、液体通路、实验段和收

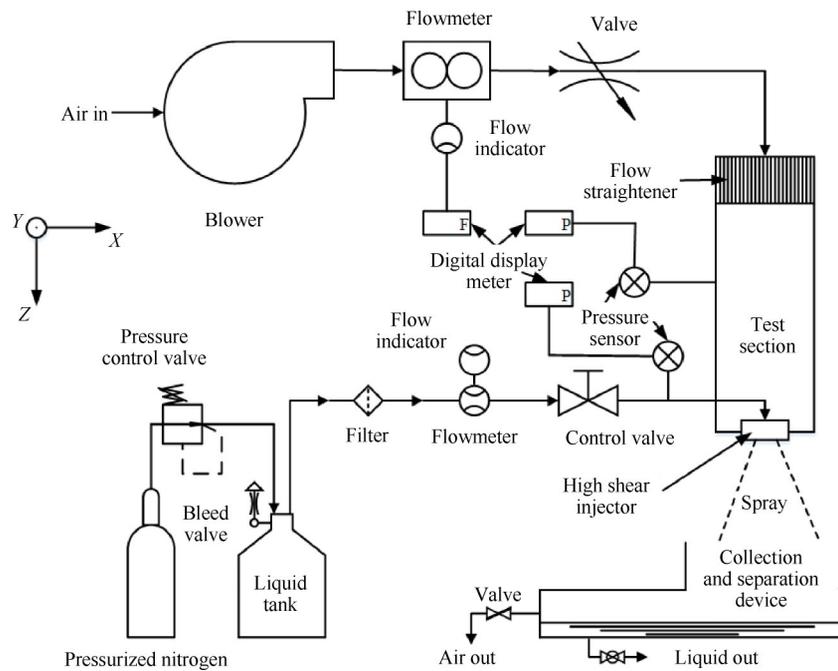


Fig. 1 Schematic of experimental setup

集分离装置四部分组成。雾化空气是由高压风机提供的,最大流量约 $400\text{m}^3/\text{h}$ 。在实验测试段的上游放置有蜂窝整流装置以确保气流湍流度较低。液体工质为水,由高压氮气压入液路管道。空气流量由涡轮流量计测量,精度为1%。液体流量由质量流量计测量,精度为0.2%。

对强剪切喷嘴进行分阶段研究^[15]以探究一二级旋流对液膜初始破碎的作用,设计了三组实验件,其中相同的是中心喷嘴在周向均匀分布有8个射流孔,射流孔与中心轴呈 50° ,孔直径均为 0.5mm ,一级旋流器的叶片径向安装角为 40° 。首先研究一级旋流对液膜破碎的影响,设计了A1结构,为了避免液膜在文氏管的尾缘外翻,仅保留了占比约10%的二级气流流量。由于同旋、反旋对流场特性有一定影响^[16],需要研究二级旋流及其旋向对液膜破碎特性的影响规律。在A2和A3结构中,二级旋流器的叶片径向安装角为 60° ,A2为同旋,A3为反旋。一二级旋流器对应的几何结构旋流数分别为0.897和1.373,均为强旋流,两级旋流器之间的空气流量占比约为60%和40%。图2即为其强剪切喷嘴结构示意图,其中中心直射喷嘴的出口中心与文氏管尾缘之间的轴向距离为 20.1mm ,径向距离为 10mm 。

2.2 实验工况

由于旋流场中的速度分布复杂,为了便于定量分析,基于气流流量和旋流器出口面积,得到气流总体速度(v_g),其中A2和A3出口面积相同,而A1中二

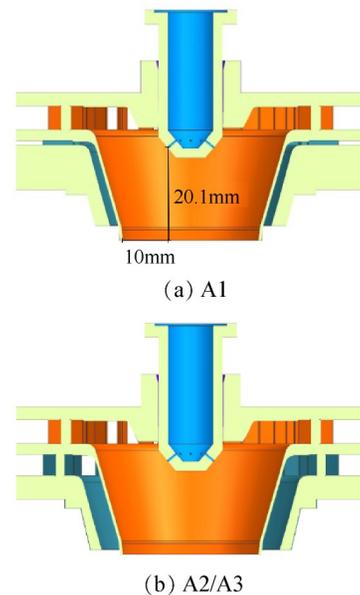


Fig. 2 Geometry illustration of high shear injectors

级出口面积减小,通过调节总气流流量来保证三个结构中一级旋流气流量相同,控制单一变量,也即保证了三组实验件中的 v_g 相同,具体值见表1。又文氏管尾缘厚度(δ)决定了尾缘处液膜厚度^[7,11],基于尾缘厚度确定液膜厚度,这样可由液体流量得到文氏管出口处的液流速度(v_l)。液体流量(m_l)分别选用12, 20, 28kg/h ,这样每组实验件均涉及15个相同工况。由于液体速度与气流速度相差约两个量级,故在计算出口气流韦伯数(We_g)时以 v_g 来替代气液之间的相对速度,气液动量比(M)为 $10 \sim 370$ 。

$$We_g = \rho_g v_g^2 \delta / \sigma \quad (1)$$

$$M = \frac{\rho_g v_g^2}{\rho_l v_l^2} \quad (2)$$

式中 σ 为水的表面张力系数, ρ_g 和 ρ_l 分别表示空气和水的密度, 下标 g 表示空气, l 表示液体, 即水。

Table 1 Parameters of gas

Gas bulk velocity $v_g/(m/s)$	We_g
20.55	4.24
29.72	8.87
36.56	13.42
42.57	18.20
52.23	27.39

2.3 测量方法

采用高速相机拍摄记录液膜破碎过程, 之后利用光学处理手段分析图像, 研究液膜破碎特性。拍摄图像采用背光照明模式, 即光源、喷嘴中心和高速相机三点一线, 光源与高速相机正对, 如图 3 所示。在拍摄图像时聚焦的平面为 A 和 B , 分别对图像处理后得到液膜破碎长度和径向拍振频率, 其中 A 平面与文氏管出口圆形相切, B 平面则是经过喷嘴中心。所使用的光源为 400W 的 LED 白光灯, 并在光源前方放置散光板。高速相机为 Photron FASTCAM SA4, 可在计算机端输出所记录的图像。实验中, 拍摄区域为 384 像素 \times 288 像素, 每个像素点代表实际尺寸约为 99.06 μm , 拍摄速度为 10000fps, 曝光时间为 16.67 μs , 连续拍摄 5000 幅图像, 即 0.5s。

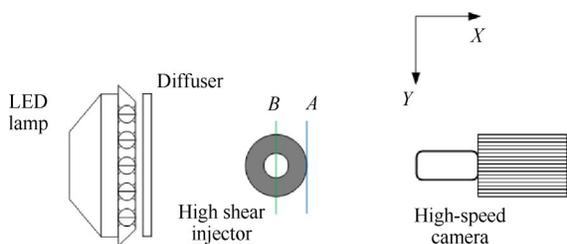
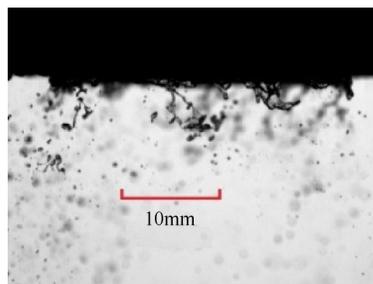


Fig. 3 Schematic of backlighting illumination

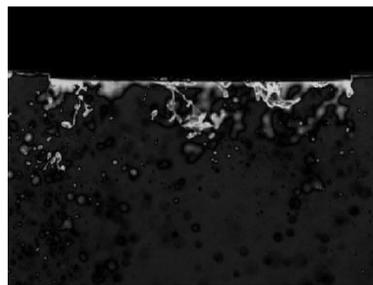
2.4 图像分析方法

图 4 为时均二值化处理流程: 对 A 平面拍摄的液膜图像先进行背景消除, 之后时均处理同一工况的所有背景消除后的图像, 再对时均图利用 Sobel 算子法得到二值图, 选取二值化液膜图像中文氏管中心固定区域 (红框) 进行周向的平均得到液膜边缘距文氏管边缘的轴向长度, 即液膜破碎长度, 简称破碎长度。

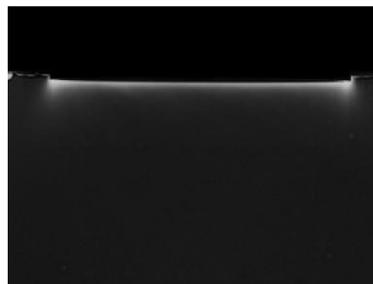
基于文献 [13] 中的时间集成法得到液膜径向拍



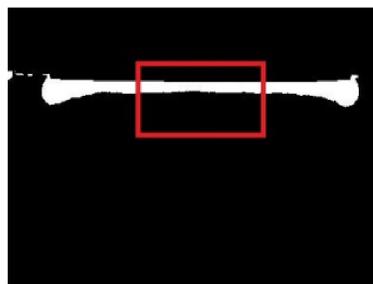
(a) Liquid film image shot in planar A



(b) Image after background removal



(c) Time-averaged image at one operating condition



(d) Binarized image of time-averaged

Fig. 4 Processes of time-averaged binarization

振频率, 处理流程如图 5 所示: 对同工况下所有 B 平面拍摄的液膜图像原图进行二值化处理, 再提取各二值图中距文氏管出口 3 像素高的位置 (红线) 处 1 像素高的图片, 并将所有提取的 1 像素高的图像按时间顺序拼接形成时间集成图, 图 5(c) 中可以看出有三个明显的波峰。在本研究中, 时间集成图对应的的时间长度为 0.5s, 因此波峰数的两倍即为液膜径向拍振频率, 简称拍振频率。针对液膜破碎长度内的不同位置和左右两侧进行相同处理发现, 波峰数的差异小于 5, 和文献 [13] 相吻合, 所以固定选取右侧 3 像素处来检测波峰数, 从而得到径向拍振频率。

图4(a)给出了本文中液膜图像所对应的真实尺度,除图5(c),6,7,9和10为局部放大外,其余液膜图像中的真实尺度均与图4相同。

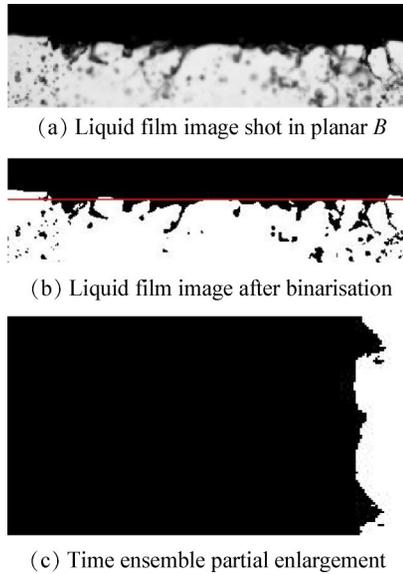


Fig. 5 Processes of time ensemble

3 结果与讨论

3.1 液膜破碎可视化

Becker和Hassa^[17]基于实际航空发动机中的贫油预混预蒸发(LPP)燃烧,实验研究了旋流场中的射流偏转和雾化情况,Li等^[3]则主要是利用高精度DNS方法。但是两者均尽量避免射流撞击到壁面以减小实验和数值模拟难度。而在本研究及实际航发强剪切喷嘴中,射流是由直射喷嘴中喷出后在一级旋流作用下偏转并射流破碎,以喷雾形式撞击到文氏管壁面。在一级旋流的旋进涡核(PVC)的驱使作用下,喷雾同样发生进动,撞壁位置随之变化导致文氏管壁面上的不均匀成膜^[18]。此外相邻的两股射流在壁面成膜后交汇在一起,交汇处形成较厚的“液脊”。故而液膜是非稳态的,但是文氏管通道收缩,气流不断加速,与液膜表面之间剪切作用,带动液膜加速运动。因此,液膜在文氏管周向上逐渐趋于均匀,之后

形成液膜并向出口移动,大量的液体会在文氏管尾缘聚集。在Gepperth等^[6-7]的研究中发现,液膜通常是直接在聚集处,即雾化边缘破碎的。气液物性参数、工况参数和结构参数决定了液膜初始破碎。

观察三种结构的液膜图像,可以总结出液膜的破碎模式主要为液袋破碎模式和液丝破碎模式两种,图6和图7分别给出了这两种不同的液膜破碎模式。

气流的剪切使得文氏管尾缘聚集的液膜在流向上有一定的拉伸,形成“舌头”状的液体形态,称为液瓣(图6(a)和图7(a))。当有较强的气动力作用于液瓣表面时,中心被拉薄呈现类似袋式破碎的现象,而液瓣的侧边则形成液缘(图6(b)~(d))。之后液袋中的薄膜和液缘的末端被气流快速地撕裂破碎,薄膜破碎形成细小液滴(图6(e)),而液缘则会进一步破碎产生较大的液滴。最后,剩余的部分的液缘和液瓣的根部会形成液丝再进一步破碎(图6(f)~(h)),故而称为液袋破碎模式。

而当局部气流的气动力并不足以挤压拉伸液瓣的表面时,但液瓣伸展的速度要比根部的液体堆积速度要快,这样液瓣逐渐变细,最终形成液丝(图7(b)~(d)),再破碎形成液滴(图7(e)~(f)),称之为液丝破碎模式。

图8为三种结构中液膜破碎时间序列图像,蓝圈为液袋破碎模式,红圈为液丝破碎模式,均由7张图像拼接而成,时间间隔并不同。可以发现A1中液膜破碎所经历的时间尺度要大于A2和A3,这是因为只有内侧的旋流作用导致气动力整体不足,多为液丝破碎模式,仍保有部分的液袋破碎,但完全破碎所需时间更长,图8(a)中的液袋仍未完全破碎。而在图8(b)和图8(c),即A2和A3中更多的为液袋破碎模式,同时伴有少量的液丝破碎模式。

液膜破碎过程中形成的各液体形态,如液瓣、液袋、液丝,受到由旋流引起的切向和流向剪切会沿展向移动,同时有着一定的偏转,特别是液丝。在平面

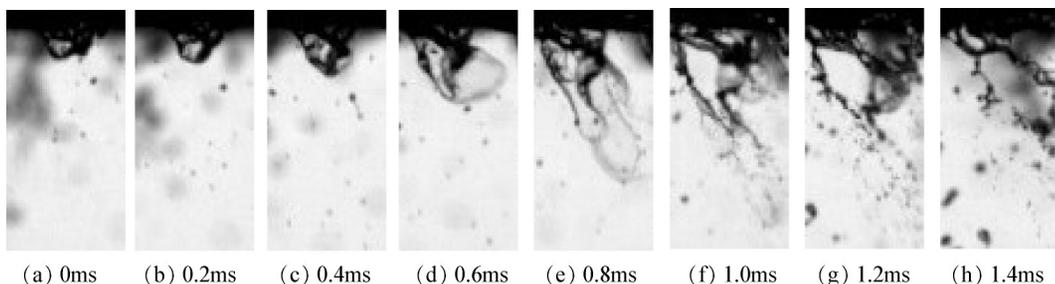


Fig. 6 Time series of bag-breakup at $\dot{m}_1=12\text{kg/h}$ and $We_g=4.24$ in A2

液膜破碎过程中,各液体形态与雾化边缘(文氏管尾缘)之间几乎为垂直的,而旋流的切向速度作用使得液体形态有所偏移,与雾化边缘之间不再垂直,由图6~8中的液袋和液丝就能清晰地看出。

A1中几乎只有单面旋流剪切,各液体形态的偏转程度减弱,且各形态液体尺度有着明显增大,预示着液膜破碎长度同样增加。另外,液膜破碎所经历的时间尺度也较大。还观察到了液瓣在被拉伸的过程中进行“自旋”运动,认为是由受到单面的旋流的

切向剪切作用所引起的,如图9所示。液瓣在被逐渐拉伸为液袋的过程中,侧边会变厚形成液缘,中心拉薄形成薄膜,受到内侧的旋流切向剪切作用,而外侧没有,从而诱发整体呈现出类似于DNA的双螺旋结构,较厚的液缘就相当于DNA的外侧主链,薄膜则对应中心碱基对,但这种结构并不如DNA般稳定,往往会逐渐变细,缠绕在一起形成液丝再破碎或在自旋过程中薄膜破碎,发生液袋破碎模式。而在A2中为双面同向剪切,对“自旋”运动有一定抑制,A3中双面

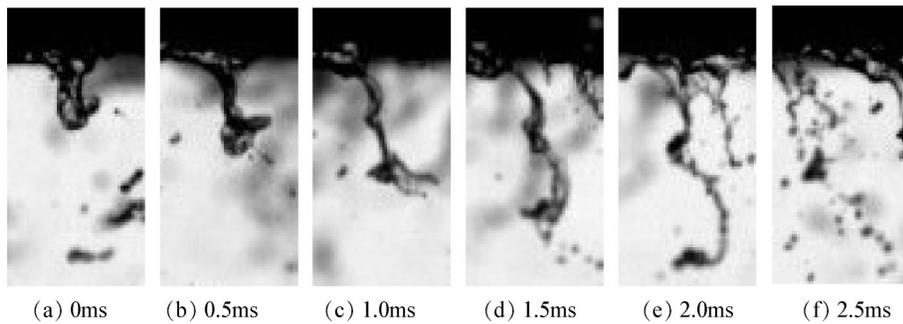


Fig. 7 Time series of ligament-breakup at $\dot{m}_1=12\text{kg/h}$ and $We_g=4.24$ in A2

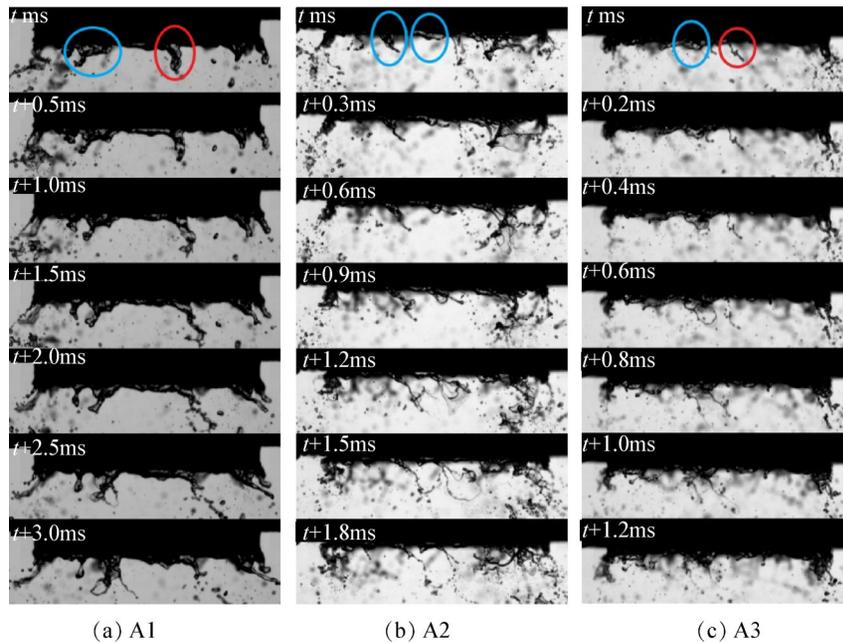


Fig. 8 Liquid film images of each structure at $\dot{m}_1=12\text{kg/h}$ and $We_g=4.24$

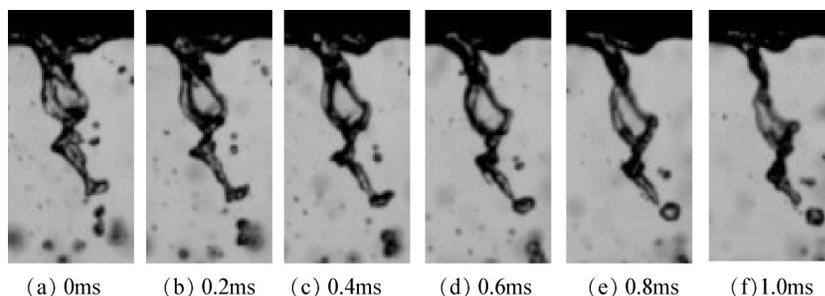


Fig. 9 Time series of spinning phenomenon at $\dot{m}_1=12\text{kg/h}$ and $We_g=4.24$ in A1

反向剪切则更利于“自旋”运动,同时各液体形态的拍动运动更为显著,液体的不稳定程度加剧,更利于液膜破碎,时间尺度也证实了这一点。但是并不意味着液膜破碎长度要比同工况下的A2中的短,因为液体的偏转整体减弱,需要依据数据分析。

此外,旋流作用下相邻位置的两个聚集处的液体还在经历某种破碎模式时就相互碰撞在一起,打破了原有的破碎过程,相互叠加导致破碎过程更为复杂,液膜破碎后的液体形态尺寸也会偏大,引起喷雾场中的液滴分布不均匀。如图10的时间序列所示,其中还可以发现液袋和液丝与文氏管尾缘之间的夹角在不断变化,表明液体在不断地拍动,这在其他图像中也有所体现。这一碰撞、叠加现象通常发生在气流流量较小和液体流量较大或者局部液体流量较大以及A1中,因为气流流量较大时,破碎速度要比液体在展向上的移动速度快。

上述液膜图像的时间序列突出了在文氏管尾缘,即雾化边缘处液体聚集的重要性,液体的聚集如同蓄水池一般提供“给养”,让液膜得以不断地拉伸和破碎^[11]。在聚集处液体经历一次破碎后,仍有部分液体聚集在尾缘处,并会在旋流的作用下,沿文氏管的周向运动或由于拍动与其他位置的液体碰撞叠加,之后重新破碎。

图11展现了工况参数影响,液体仍在文氏管尾缘聚集,存在液瓣、液袋和液丝等形态,液膜破碎还是呈现液袋破碎和液丝破碎模式,这表明在研究的工况范围内破碎模式独立于总体气流速度和液体流量,取决于当地的局部气液条件。然而,各液体形态

尺度有着明显的改变,随着气流流量的增大或液体流量减小,液袋、液丝及液滴的尺度均有所减小。

综合上述定性分析描述,认为一级旋流决定了液膜初始破碎的基本形态,二级旋流起强化剪切作用。比较发现,旋流作用下的液膜破碎过程与Zandian等^[19]利用DNS获得的两种平面液膜破碎过程和模式基本一致,但是两种破碎模式可同时在文氏管尾缘出现,存在这样差异的原因是由于环形液膜和雾化边缘的破碎及旋流局部流场与数值模拟时的稳定条件存在较大区别。旋流引起的切向剪切作用,导致各液体形态偏转、拍动甚至“自旋”以及沿文氏管的展向运动所引起的破碎过程和模式叠加,这些都是平面中不涉及的,但是液膜初始破碎模式基本一致,工况参数的影响规律趋势也相同。因此仍需要更为先进和精细的实验测量技术和图像处理方法来揭示旋流作用下液膜初始破碎的全部机制。

3.2 液膜破碎长度

根据液膜破碎长度的定义^[5],即文氏管尾缘与液膜首次破碎的水平面之间的距离,这个量的测定是困难的,因为瞬时的破碎点并不固定,会随着液膜的展向移动和径向波动而变化。因此,利用MATLAB软件对各工况的5000幅图像进行时均二值化处理以获得较好的统计量数据,认为是液膜破碎长度。

研究了工况和结构对于液膜破碎长度的影响。如图12所示,在气流流量恒定,即相同 We_g ,而液体流量变化的情况下,观察到了预期的趋势,随着液体流量的增加,液膜会变长,这是因为液体流量的增加会增大液膜的惯性力,使得液膜的稳定性得到加强,引

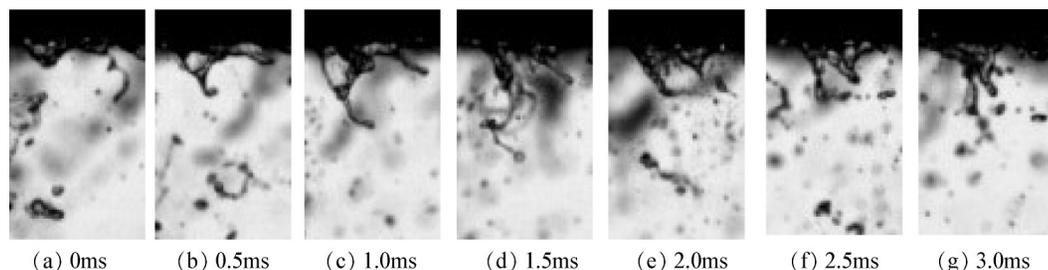


Fig. 10 Time series of flapping, collision and overlay at $\dot{m}_1=20\text{kg/h}$ and $We_g=4.24$ in A2

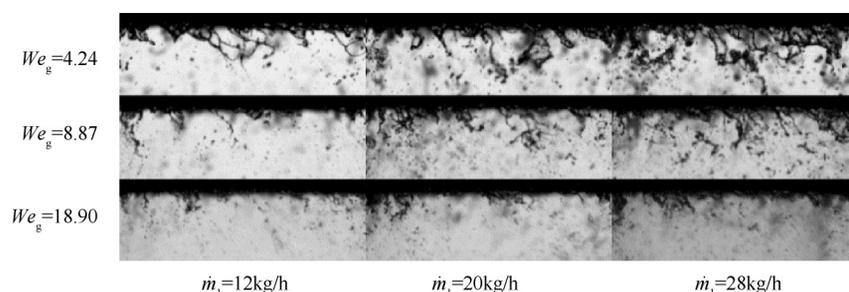


Fig. 11 Liquid film images of A2 structure for different operating conditions

起破碎长度的变大。另外,当液体流量固定而气流流量变化时,破碎长度则随 We_g 的增加而减小。气流流量的增加意味着气流速度的增加,引起剪切作用和气动力的增大,而气流与液体表面相互作用是液膜破碎失稳的主要机制。由图8还可以看出来结构组合并未对破碎长度的变化趋势有所影响。

进一步比较各工况下不同结构组合对破碎长度的具体影响。如图13所示,工况相同的情况下,三种结构组合的破碎长度之间差异较小,相差最大仅约0.2mm。A1结构组合中各工况下的破碎长度都要比A2和A3要大,这主要是因为缺少二级旋流的作用及其所引起的液膜偏转程度较小。A2和A3两者之间的差距很小。前面分析中提出,各液体形态的偏转对液膜破碎长度有着较大影响,大气流流量 ($We_g \geq 18.20$) 下,反旋中破碎长度略小;但气流量较小 ($We_g < 18.20$) 时,反旋时液体偏转程度小导致液膜破碎长度比同旋略大,故而认为旋向对液膜破碎长度的影响可忽略,且这种平均液膜破碎长度并不能完整地代表液膜初始破碎雾化效果,需要更为科学的物理量来表示。

三种结构组合中的破碎长度变化趋势一致,且彼此之间差异较小,认为二级旋流并未对破碎长度起到决定性作用,认为A2中的破碎长度可以代表另两种结构。本文基于A2的实验结果分析和总结,得到三种结构均适用的拟合经验公式,即

$$L_b = 0.15Re_1^{0.72}(We_g M)^{-0.073} \delta \quad (3)$$

拟合经验公式的结果和实验数据结果的比较如图14所示,其中拟合结果的误差棒的百分比为10%,可以发现,除了小工况时,实验数据基本都是在误差棒的范围内,表明拟合结果良好,进一步证明主要由一级旋流决定破碎长度,二级旋流的作用较弱。由该拟合经验公式中各参数的指数可以看出,液体雷诺数对破碎长度的影响较大,而气流韦伯数、气液动量比与破碎长度之间则是弱相关关系,这与平面液膜^[5,10]有所不同。

3.3 径向拍振频率

液体在离开文氏管壁面的瞬间,在惯性的作用下沿切线继续运动,从而有了径向的加速度分量,同时气液之间存在密度差,引起RT不稳定机理,另外,气液界面之间的速度差会引起KH不稳定机理。RT和KH机理被认为是决定雾化过程中的重要不稳定性机理^[20]。Duke等^[21]在研究中发现KH不稳定性引起的液膜表面拍动提供了触发RT不稳定性的加速度场。与Duke研究中的环形液膜结构不同,本文中液体在离开壁面的瞬间就有了径向的加速度,虽然之后会附着于尾缘中形成液体聚集,但仍有着一定的径向加速度,之后聚集处的液体沿流向拉伸,液膜表面同时在径向上有拍动,继续引起径向加速度,因此液膜在RT和KH机理的复杂交互作用下会有着径向上的拍振。这种拍振加剧了液膜的不稳定性,最终

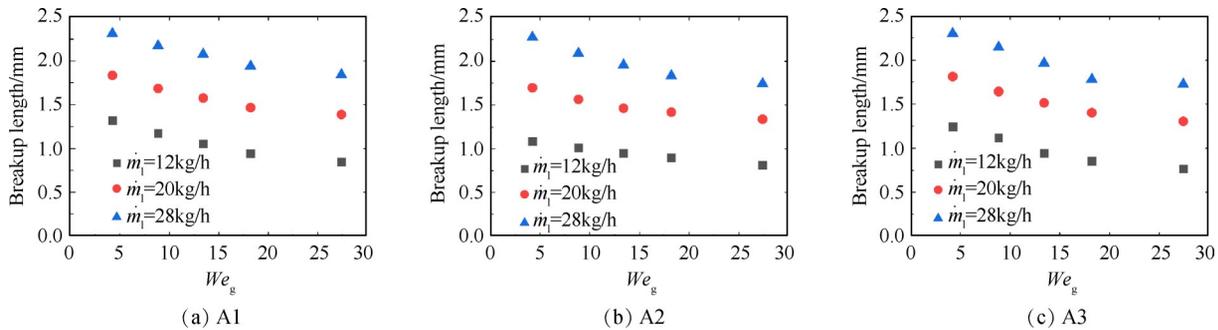


Fig. 12 Influence of operating conditions on breakup length in each structure

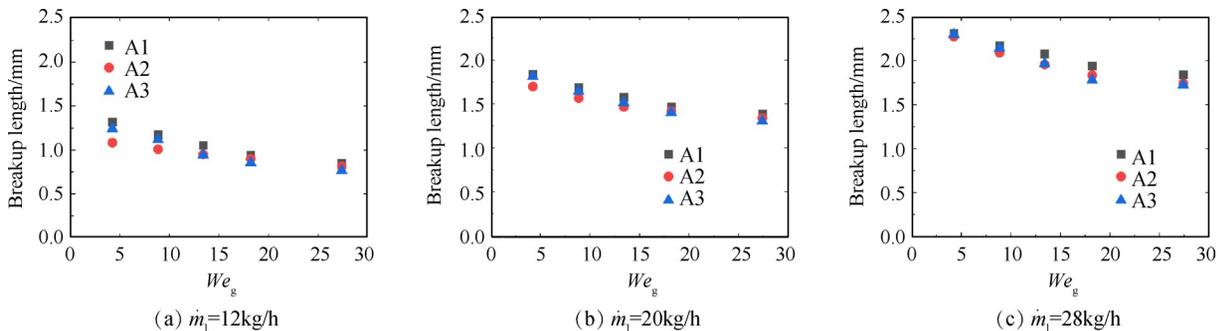


Fig. 13 Influence of structure on breakup length for each operating condition

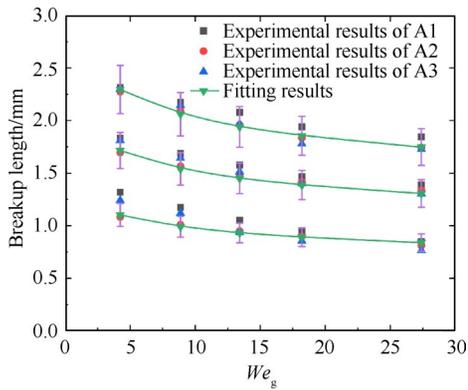


Fig. 14 Comparison between fitting results and experimental results of breakup length

导致液膜破碎。此外,液膜的拍振会影响到液膜末端形成的液丝或液袋的运动和破碎,可以认为液膜的拍振运动与液膜破碎有关联。Carvalho等^[22]认为液膜的破碎频率是由拍振频率决定的,所以径向拍振频率可以表征液膜的破碎特性。

由图15可知,随着气流流量或液体流量的增加A2和A3中的拍振频率都有所增大,而在A1中则是随着液体流量的增大而略有减小,三者中均受气流流量的影响程度更大。首先,气流流量的增加会使得KH不稳定性加剧,另外随着液体流量的增大,液膜离开文氏管尾缘的速度也越大,意味着离心力更大,使得初始的径向加速度更大,RT不稳定性加剧。A1中只有液膜的内表面存在较强的旋流作用,单边

气流作用不足以完全克服液体的惯性力导致拍振频率随着液体流量的增加而下降。综上,表明KH和RT机理共同决定了液膜的拍振频率,更多的细节需要更为清晰的图像来分析确定。

接下来比较不同结构中拍振频率差异,如图16所示,A1由于缺少二级气流的作用,拍振频率要比其余两个结构要小一些,并且差距随着液体流量的增加而增加。继续比较A2和A3,发现气流流量较小时($We_g \leq 18.20$),A2中的拍振频率要小于A3,而当 $We_g > 18.20$ 时,A2的拍振频率大于A3。表明在气流流量较小时,反旋剪切引起的失稳作用更为显著,对液膜的拍振更有利,而大气流流量时,则是同旋剪切作用更有利于液膜的失稳拍振及之后的破碎。

由上文分析,认为气流韦伯数和气液动量比决定了拍振频率,对三种结构分别提出了各自的拍振频率拟合经验公式,分别如下

$$A1: f\delta/v_1 = 0.091We_g^{0.089} M^{0.607} \quad (4)$$

$$A2: f\delta/v_1 = 0.155We_g^{0.256} M^{0.44} \quad (5)$$

$$A3: f\delta/v_1 = 0.216We_g^{0.133} M^{0.45} \quad (6)$$

将拟合结果与实验数据比较,如图17所示,偏差基本几乎都是 $\pm 10\%$ 以内,拟合结果良好。进一步观察三种结构的拟合公式,首先是A1结构,前面的分析已经提到,由于基本只有一面气流剪切,决定其拍振频率主要为液相,这在拟合公式中也可以看出:气流韦伯数的指数较小,而气液动量比的指数要比另两

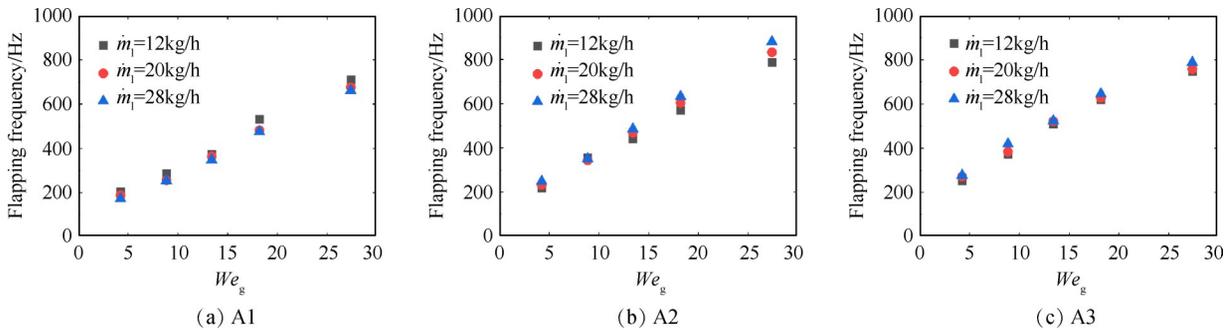


Fig. 15 Influence of operating conditions on flapping frequency in each structure

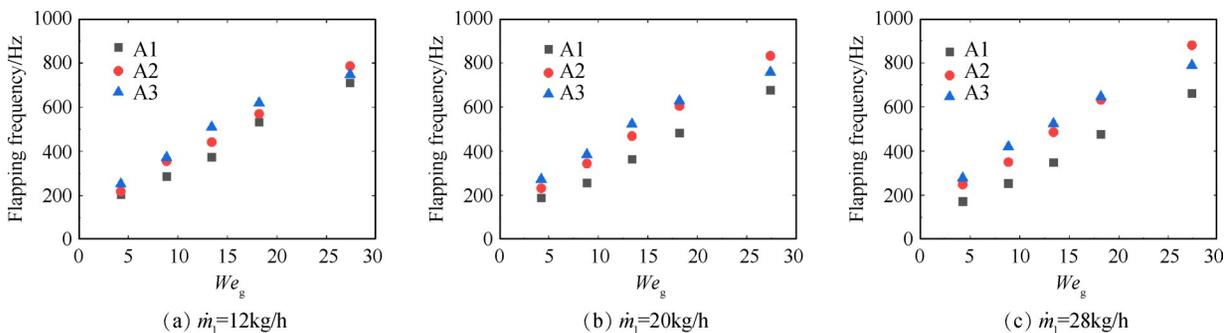


Fig. 16 Influence of structure on flapping frequency for each operating condition

种结构更大,表明主要是气液动量比影响拍振频率。对于A2和A3结构,两者的气液动量比的指数很接近,主要区别在于气流韦伯数的影响程度不同。A2和A3之间只有二级旋向不同,意味着旋流数可能是另一决定拍振频率的重要参数。接下来将尝试改变一二级旋流数,研究旋流数变化对液膜初始破碎的影响,并将旋流数引入拟合经验公式中。另外拍振频率对于液膜破碎的定性影响作用及与破碎长度等破碎特性之间的关联尚未可知,值得进一步探究。

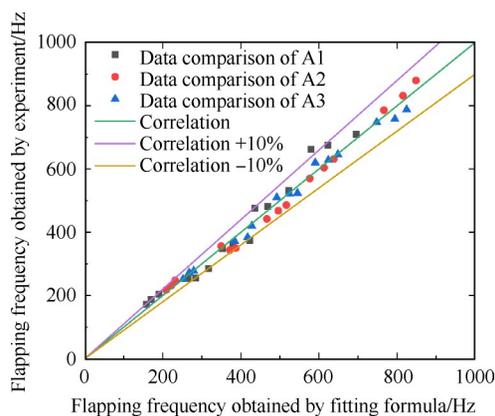


Fig. 17 Comparison between fitting results and experimental results of flapping frequency

4 结论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)旋流的作用使得液膜的破碎过程和模式叠加且更为复杂,但主要为液袋破碎和液丝破碎模式,与平面液膜所涉及的破碎机理和过程相似。同时也呈现出了偏转、碰撞和自旋等关键的不同特性。定性分析表明,一级旋流决定了液膜初始破碎的基本形态,二级旋流起强化剪切作用。

(2)三种结构中的液膜破碎长度随工况的变化趋势相同,且相同工况下不同结构的破碎长度之间的差异很小,认为由一级旋流主要决定破碎长度,二级旋流的作用较弱。同旋和反旋结构之间的差异更小,旋向的影响作用可忽略。

(3)A1结构中液膜径向拍振频率呈现随液体流量增大而略微减小,与A2和A3相反,且各工况下的拍振频率要明显小于A2和A3,表明二级旋流的存在,即双面剪切更有利于液膜的拍振。认为KH和RT不稳定机理共同决定了液膜的径向拍振频率。而二级同旋在大气流流量时($We_g > 18.20$),拍振频率更大,有利于破碎雾化;小气量时反旋的拍振频率更大。

(4)对破碎长度和拍振频率进行了经验公式的

拟合,吻合度良好。从拟合经验公式可以看出,液膜破碎长度与气流韦伯数和气液动量比之间为弱相关,而平面液膜研究中往往为强相关,表明旋流作用下液膜的失稳破碎更易发生;另外径向拍振频率展现出与旋流数之间的关联性,值得进一步研究。

未来将提高图像分辨率并结合PDA和PIV等光学测量技术,探究流场特性、液膜初始破碎、喷雾场三者之间的关联,明晰液膜破碎机理及喷雾场中液滴的速度和尺寸关系,以及明确各液膜破碎特性之间的关联性。

致谢:感谢国家科技重大专项的资助。

参考文献

- [1] Kumar S, Malavalli S, Chaudhuri S, et al. Spray Characteristics and Flow Topologies of High Shear Injector at High Primary Swirl [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 131: 103393.
- [2] Smith C, Graves C, Roback R, et al. Fuel Injection Characterization and Design Methodology to Improve Lean Stability [C]. *California: AIAA/SAE/ASME/ASEE 21st Joint Propulsion Conference*, 1985.
- [3] Li X, Soteriou M C, Kim W, et al. High Fidelity Simulation of the Spray Generated by a Realistic Swirling Flow Injector [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 136(7): 071503.
- [4] Rajamanickam K, Potnis A, Kumar K R S, et al. On the Influence of Geometrical Parameters on the Spray Characteristics of High Shear Injectors [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 109: 109872.
- [5] Carvalho I S, Heitor M V, Santos D. Liquid Film Disintegration Regimes and Proposed Correlations [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, 28(5): 773-789.
- [6] Gepperth S, Guildenbecher D, Koch R, et al. Pre-Filming Primary Atomization: Experiments and Modeling [C]. *Brno: ILASS, 23rd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2010.
- [7] Gepperth S, Müller A, Koch R, et al. Ligament and Droplet Characteristics in Prefilming Airblast Atomization [C]. *Heidelberg: ICLASS, 12th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2012.
- [8] Déjean B, Berthoumieu P, Gajan P. Experimental Study on the Influence of Liquid and Air Boundary Conditions on a Planar Air-Blasted Liquid Film, Part I: Liquid and Air Thicknesses [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 100(79): 202-213.
- [9] Déjean B, Berthoumieu P, Gajan P. Experimental Study

- on the Influence of Liquid and Air Boundary Conditions on a Planar Air-Blasted Liquid Film, Part II: Prefilming Zone Length [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 100(79): 214-224.
- [10] 何昌升, 刘云鹏, 韩宗英, 等. 平板式预膜喷嘴初次雾化特性试验[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(3): 482-492.
- [11] Chaussonnet G, Geppert S, Holz S, et al. Influence of the Ambient Pressure on the Liquid Accumulation and on the Primary Spray in Prefilming Airblast Atomization [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 125: 103229.
- [12] 张举星, 邸东, 张萍, 等. 高温高压下平板预膜喷嘴初次雾化试验[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(1): 55-66.
- [13] Wahono S, Honnery D, Soria J, et al. High-Speed Visualisation of Primary Break up of an Annular Liquid Film [J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44(3): 451-459.
- [14] 张海滨, 裴焕, 张浩, 等. 气液两相环状流射流液膜的破碎与雾化特性实验研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(4): 200046. (ZHANG Hai-bin, PEI Huan, ZHANG Hao, et al. Experimental Study on Liquid Film Breakup and Atomization of Gas-Liquid Annular Flow Jet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(4): 200046.)
- [15] Shanmugadas K P, Chakravarthy S R, Chiranthan R N, et al. Characterization of Wall Filming and Atomization Inside a Gas-Turbine Swirl Injector [J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(10): 1-26.
- [16] Wang S, Yang V, Hsiao G, et al. Large-Eddy Simulations of Gas-Turbine Swirl Injector Flow Dynamics [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 583: 99-122.
- [17] Becker J, Hassa C. Liquid Fuel Placement and Mixing of Generic Aeroengine Premix Module at Different Operating Conditions [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines Power*, 2003, 125(4): 901-908.
- [18] Shanmugadas K P, Chakravarthy S R. A Canonical Geometry to Study Wall Filming and Atomization in Prefilming Coaxial Swirl Injectors [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2467-2474.
- [19] Zandian A, Sirignano W A, Hussain F. Planar Liquid Jet: Early Deformation and Atomization Cascades [J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(6): 062109.
- [20] Lasheras J C, Hopfinger E J. Liquid Jet Instability and Atomization in a Coaxial Gas Stream [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000, 32(1): 275-308.
- [21] Duke D, Honnery D, Soria J. Experimental Investigation of Nonlinear Instabilities in Annular Liquid Films [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 691: 594-604.
- [22] Carvalho I, Heitor M, Santos D. On the Frequency Analysis of the Disintegration of Planar Liquid Films [C]. *Lisbon: 9th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 1998.

(编辑:白鹭)