

平面液膜破碎及雾化过程的试验研究*

芦翔¹, 靳朝阳², 葛冰¹, 臧述升¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240;
2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘要: 为考察液膜破碎及雾化特性, 通过高速相机、平面激光诱导荧光 (PLIF) 和相位多普勒粒子分析仪 (PDPA) 对平面液膜的失稳、破碎及雾化全过程进行了试验研究。结果表明, 平面液膜在预膜板上的液膜形态与气液速度比 (λ) 直接相关。随着气液速度比增大, 平面液膜分别会呈现平滑表面 ($\lambda \leq 23$)、波动表面 ($23 < \lambda < 70$) 和液膜剥离 ($\lambda \geq 70$) 三种形态。此外, 平面液膜破碎过程中会形成叶瓣状、波纹状、孔状和韧带状的液带, 液带形状主要取决于气流和液体速度。液膜破碎过程的破碎距离和横向不稳定波长与韦伯数、动量比以及液相雷诺数有关, 液膜破碎后的雾化粒径随着气流速度的增大而减小, 与液膜破碎过程的破碎距离和横向不稳定波长呈线性关系。

关键词: 平面液膜; 破碎过程; 可视化研究; 液膜形态; 雾化粒径

中图分类号: V231.2+3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 11-210655-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210655

Experiment Research on Break-Up and Atomization Process of Planar Prefilm

LU Xiang¹, JIN Zhao-yang², GE Bing¹, ZANG Shu-sheng¹

(1. Key Laboratory of Power Machinery and Engineering, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: High-speed camera, Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) and Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA) were used to evaluate the break-up and atomization process of planar prefilm to evaluate the breaking-up and atomization characteristics of liquid prefilm. The result shows, liquid sheet on the prefilm plate can be divided into three shapes decided by air and liquid velocity ratio: smooth film surface ($\lambda \leq 23$), wave film surface ($23 < \lambda < 70$) and film stripping ($\lambda \geq 70$). Prefilm will break up into shapes of lobe, corrugation, hole, and ligament based on the effect of air and liquid velocity. The break-up length and transverse unstable wavelength of the prefilm break-up are dependent on Weber number, momentum ratio and liquid Reynolds number. The drop-size decreases with the increase of air velocity and is in a linear relationship with break-up length and transverse unstable wavelength.

Key words: Planar prefilm; Break-up process; Visualization investigation; Prefilm shape; Atomization size

* 收稿日期: 2021-09-14; 修订日期: 2022-04-14。

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-V-0012-0064)。

作者简介: 芦翔, 硕士生, 研究领域为燃烧室的雾化与冷却。

通讯作者: 葛冰, 博士, 副研究员, 研究领域为航空发动机/燃气轮机低污染燃烧技术。

引用格式: 芦翔, 靳朝阳, 葛冰, 等. 平面液膜破碎及雾化过程的试验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(11): 210655. (LU Xiang, JIN Zhao-yang, GE Bing, et al. Experiment Research on Break-Up and Atomization Process of Planar Prefilm[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11): 210655.)

1 引 言

预膜式雾化喷嘴通过形成液体薄片,增大燃料与气流的接触面积,从而保证在较宽的气流速度、燃料流量和背压范围内得到良好的雾化效果^[1],因此被广泛应用于现代航空发动机燃烧室中。为进一步掌握预膜式雾化喷嘴的雾化机理,国内外学者常采用平面液膜雾化器开展试验与数值分析研究。

液膜破碎是由于气流剪切力引起的液膜表面波动产生。曹建明^[2]和 Li^[3-4]运用线性不稳定性理论建立了粘性液膜碎裂模型,推导出了粘性平面液膜射流在可压缩气体中的色散关系。根据其模型,表面波增长率即液膜表面的不稳定性与液膜两侧气液速度比之差、雷诺数、马赫数和韦伯数等有关。

Berthoumieu 等^[5]将液膜初次破碎的过程依据气液动量比分为四种机制,并利用经验公式将雾化特征与气液流动状态相联系。Zandian 等^[6]通过计算观察到液膜破碎的三种常见机制,并且指出破碎机制主要取决于液体的雷诺数 Re_1 和韦伯数 We_1 。雷诺数反映粘性的作用,是液膜拉伸的主要因素,韦伯数反映表面张力和气流作用的相对大小,是孔状液膜出现的原因。Chaussonnet 等^[7]对液膜破碎的过程进行了试验研究,试验结果较好地验证了 Zandian 等^[6]提出的液膜破碎机制。此外,他们还对背压对破碎机制的影响进行了探索,发现背压仅改变破碎距离,但不是破碎机制的决定性因素。Holz 等^[8]也通过数值计算对液膜的初次破碎过程进行了研究,讨论了薄膜波和阻力对韧带状液膜形成的影响,并指出韧带的破裂对二次区的雾化质量有着至关重要的影响。

液膜的破碎和雾化受到空气动力和液体表面张力的共同作用。Déjean 等^[9-10]研究了气液流动参数对平面液膜破碎距离,发现破碎距离主要取决于液体流动,而液膜波动频率受气流影响较大。Gepperth 等^[11]研究了液体流量、气流速度、预膜厚度对初次破碎过程及二次雾化质量的影响,发现液体流量只影响破碎过程,雾化质量仅取决于气流速度与预膜厚度。

Inamura 等^[12]对雾化过程进行了研究,发现一次雾化区的液滴粒径与预膜厚度和气流速度有关,而二次雾化区的粒径仅是气流速度的函数。增大预膜厚度会造成液滴粒径波动的范围扩大。此外,考虑到燃料蒸发速率与液滴的总表面积有关,他们还对液滴的总表面积进行了分析,发现表面积存在波动,且波动频率随预膜厚度的增大而减小。Chaussonnet

等^[13-14]和 Mingalev 等^[15]通过大涡模拟预测了平面液膜雾化粒径的空间分布。由于雾化液滴的空间分布对燃烧的稳定性和点火、再燃、负荷^[17]等特性有着重要影响,如何准确预测预膜雾化器雾化粒径的空间分布具有重要意义。

虽然针对预膜喷嘴雾化过程已经开展了大量研究,但是针对液膜破碎过程及其对雾化过程的影响的研究还较少。本文通过高速相机、平面激光诱导荧光(PLIF)和相位多普勒粒子分析仪(PDPA)对平面液膜从失稳到破碎最终雾化的全过程进行了研究,考察了平面液膜失稳、破碎及雾化过程的影响规律。

2 试验方法

2.1 平面液膜多过程可视化试验台

本文研究对象为弦长 80mm、叶高 10mm 的对称翼型平板预膜雾化器,雾化器宽度为 40mm。图 1 给出了预膜试验段的详细结构。初始预膜厚度为 0.5mm,液体通过液膜器出口后在预膜板上形成液体薄片,长度为 20mm。

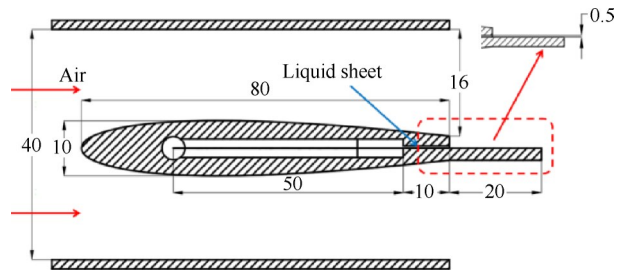


Fig. 1 Prefilm atomizer (mm)

为完成液膜破碎过程的试验分析,搭建了可视化预膜试验台,开展了平面预膜失稳、破碎及雾化全过程的试验研究。试验中,空气由变频风机提供,通过调节变频器频率改变流量,实际流量由压差流量计测量。试验所用过滤水,通过加压容器供应给雾化器,以保证流量的稳定。通过调节气瓶减压阀的开度,改变加压容器内压力,即可改变液体流量。

2.2 试验工况

表 1 给出了试验工况,试验主要考察不同气流和液体速度下平面液膜的失稳及破碎过程。

$$Re_1 = \frac{\rho_1 u_1 h}{\mu} \quad (1)$$

$$We = \frac{\rho_1 (\Delta u)^2 h}{\sigma} \quad (2)$$

$$MR = \frac{(\rho u^2)_g}{(\rho u^2)_l} \quad (3)$$

式中 ρ_g 和 ρ_l 分别表示空气和液体的密度, u_g 和 u_l 分别

Table 1 Operating conditions and important non-dimensional parameter

Parameter	Value
Mean air velocity/(m/s)	30~60
Liquid velocity/(m/s)	0.5~1.5
Liquid Reynolds number Re_l	493.8~1481.5
Weber number We	7.5~30.1
Air-liquid momentum ratio MR	0.5~16.8

表示空气和液体的速度, Δu 为气液速度之差, h 为初始预膜厚度, μ 和 σ 分别为空气的动力粘性系数和液体的表面张力系数。

2.3 测试技术

本文采用冷光源加高速相机的方法对液膜破碎过程进行可视化研究^[18], 具体拍摄方法如图2所示, 采用LED冷光源作为拍摄的背景光, 通过VEO-710L高速相机(最大频率7400Hz)拍摄。相机与预膜板表面平行, 以获得平面液膜的俯视位形态。相机拍摄频率为5kHz, 曝光时间为4 μ s, 每一工况进行2000次拍摄。

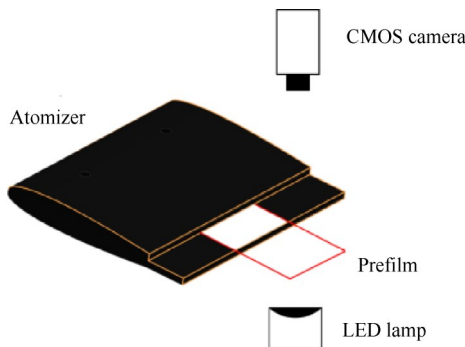


Fig. 2 Shoot method of prefilm break-up by high-speed camera

图3为高速相机拍摄结果。由图可知, 在液膜离开预膜板后, 在表面波横向作用下会破碎成液带。参考Chaussonnet等^[19]的研究, 定义液带末端之间的横向平均距离为横向不稳定波长。该长度的提取方法为: 首先对图片进行Matlab二值化处理以增强液膜和背景的区别, 通过Matlab图像边缘识别提取液膜轮廓; 通过找出轮廓拐点的位置捕捉液带尖端, 液带尖端之间横向距离的平均值即为横向不稳定波长。在拍摄之前, 通过标定块标定法得到图像像素点所代表的尺寸为0.11mm。

在以上工作基础上, 采用高频平面激光诱导荧光(PLIF)技术对平面液膜在预膜板上的失稳波动和离开液膜板后的破碎过程进行拍摄, 具体如图4所

示。试验中, 液体染料选取罗丹明6G, 浓度为5mol/L, 在527nm波长激光的激发下可以发出560nm中心波长的荧光。试验中, 激光与预膜板表面垂直, 通过高速相机(配540~590nm带通滤光片)拍摄截面上的液膜形态。相机和激光器通过同步器控制, PLIF拍摄频率为1kHz, 相机曝光时间为80 μ s, 试验中对每一工况进行1000次拍摄。相机拍摄区域大小为1280像素 \times 800像素, 标定得到像素点代表的尺寸为0.16mm。

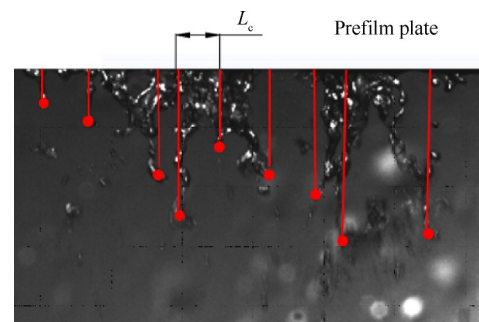


Fig. 3 Extraction of transverse unstable wavelength (L_c) based on images shot by camera

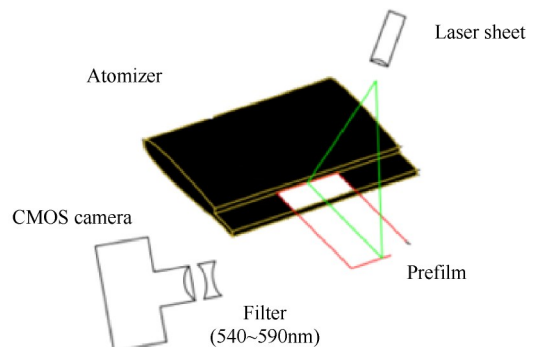


Fig. 4 Shoot method of prefilm break-up (PLIF)

图5(a)为采用PLIF方法获得的平面液膜轮廓分布。定义平面液膜离开液膜后直至完全破碎的距离为破碎距离, 通过自编的Matlab图像边缘识别软件进行提取。程序原理主要分为三步: 首先通过Matlab边缘识别函数捕捉液膜轮廓, 得到图5(b); 然后对两侧像素取平均, 得到液膜运动特征位置信息, 如图5(c)所示; 最后根据液膜出口和末端之间的像素点之差求出破碎距离。研究发现, 破碎距离存在周期性, 因此取每个工况下的最大距离为破碎距离。

最后, 采用Dual相位多普勒粒子分析仪(PDPA)对雾化场粒径的空间分布进行研究, 该分析仪粒径测量精度可达 $\pm 0.5\%$ 。PDA激光器与光学探头处于同一平面, 夹角为110 $^\circ$ 。通过三维坐标架移动PDA系统从而改变测点位置, 测点位置如图6所示。

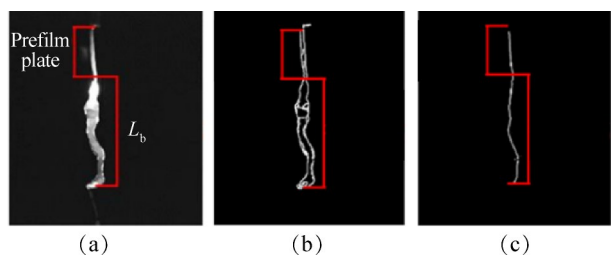


Fig. 5 Image extract of break-up length (L_b)

试验中分别对平面液膜在三个维度上的雾化特性进行测量,参考点为预膜板尾缘的中心。 x 方向间隔 4mm 取一测点,共 11 个测点,以评估预膜沿展向的雾化特性; y 方向间隔 2mm 取一测点,共 5 个测点,以评估预膜高度方向的雾化特性; z 方向间隔 5mm 取一测点,共 5 个测点,以评估沿气流方向的雾化特性。通过 Flowsizer 软件对 PDPA 进行控制、采集及后处理^[20]。

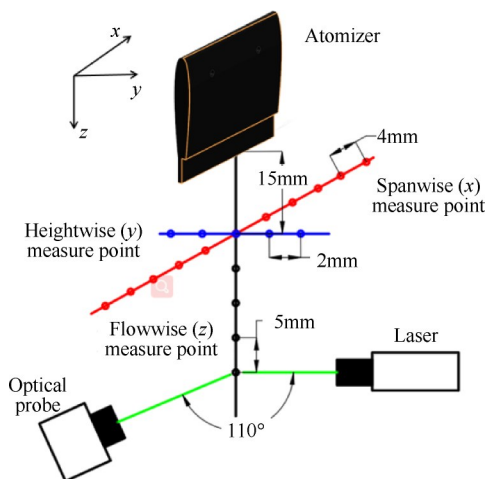


Fig. 6 Diagram of PDA measurement points

通过以上手段,实现对平面预膜的失稳、破碎以及雾化全过程的研究。

3 液膜破碎及雾化过程分析

3.1 液膜形态分析

根据线性不稳定理论模型^[2],表面波的增长率和液膜两侧的气液速度比之差有关。本研究中液膜在预膜板上流动时一侧为固体壁面,因此液膜的稳定性只与液膜上方气液相对速度的大小有关。

本文通过 PLIF 拍摄得到了平面预膜在冷却板上的流动状态。图 7(a)为气流速度 10, 30, 50m/s, 液体速度 0.5m/s 工况下液膜在预膜板表面的流动情况。

Volz 等^[21]将液膜在预膜板上的流动分为了三种情况:光滑表面、波动表面和表面剥离。当气流速度

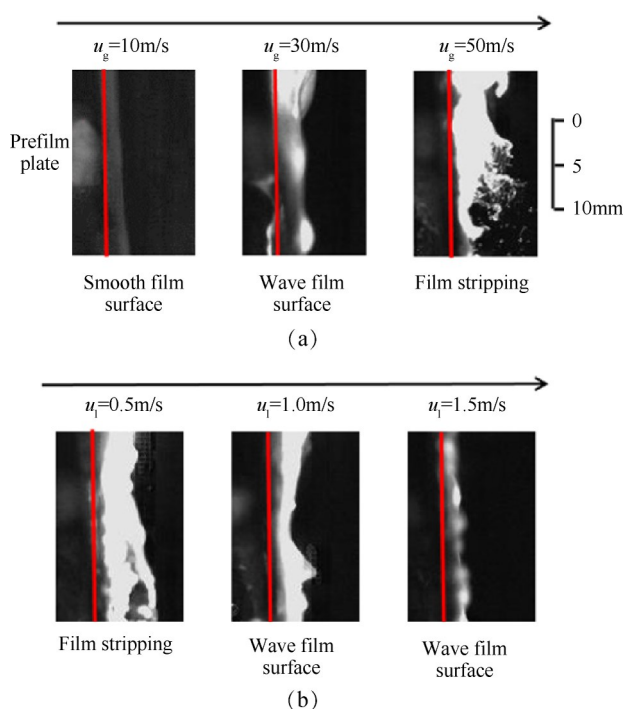


Fig. 7 Influence of air and liquid velocity on prefilm surface

为 10m/s 时,空气作用不足以克服液体表面张力,因此液膜表面比较光滑。随着气流增大到 30m/s,空气动力增强使得液膜表面出现了波动。当气流增大到 50m/s 时,此时空气动力的作用使一部分液体克服了表面张力的作用,从液膜表面剥离。

图 7(b)为气流速度 40m/s 下的液膜表面形态,结果表明,增大液体速度增加了单位时间内与相同空气量接触的液膜表面积,因此造成液膜更难破碎。从表面波不稳定性的角度来分析,气液相对速度的增大使表面波的增长率增大,使表面波更不稳定;同时也使最大增长率对应的波数增大,可以很好地解释图 7 的试验现象。

图 7 引入气液速度比的概念为

$$\lambda = u_g / u_l \quad (4)$$

气液速度比越大,单位面积的液体与更多的空气接触,表面波增长率越大,液膜表面越不稳定。随着气液速度比增加,平面液膜形态分别为平滑表面区($\lambda \leq 23$)、波动表面区($23 < \lambda < 70$)和液膜剥离区($\lambda \geq 70$),如图 8 所示,由图可知,除了液相速度 0.5m/s 和气相速度 20m/s 这一点,试验各工况点液膜所处的状态都能和所划分的区域很好地吻合。而在该工况下,可能由于气流速度较小时,液体表面张力的影响较大,造成液体无法波动,仍处于光滑表面。总体来说,根据气液速度比所划分的区域可以很好地预测平面预膜在预膜板上运动的状态。

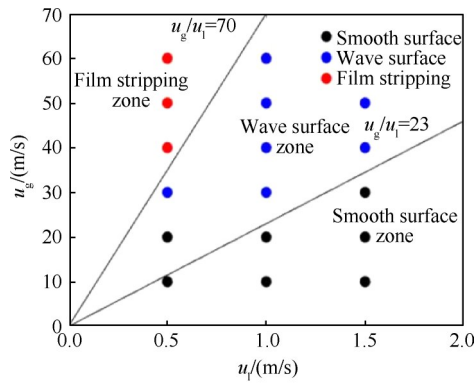


Fig. 8 Film shape on the prefilm plate

3.2 液膜破碎过程

Zandian 等^[6]通过计算发现,在液膜破碎过程中会形成孔状、桥状和波纹状的液带。但数值计算结果表明,任意工况点只存在单一破碎形态,而实际预膜雾化器中,破碎机制往往是复杂的。

本文分别在主流气流速度 10, 30, 50m/s 下通过高速相机对液膜破碎状态进行了拍摄,液体出口速度为 0.5m/s,如图 9 所示。

当气流速度很小时,液体表面张力在液膜破碎机制中起决定作用,液体不容易破碎,形成了叶瓣状的液膜。气流速度较低时,破碎机制较稳定,不同时间液膜形态几乎没有明显变化。随着气流速度由 10m/s 增大到 30m/s,占主要地位的是韧带状和波纹状液膜,叶瓣状液膜仅存在于两侧气流速度较小的边缘位置。当气流速度进一步增大到 50m/s 时,表面张力的影响进一步被削弱,在整个破碎过程中都未捕捉到叶瓣状的液膜。

对液体流速对液膜破碎形态的影响进行了研究,如图 10 所示。在液体流速为 0.5m/s 时,主要为叶瓣状和韧带状液膜,且在不同的时刻占据主要地位的液膜形态也不同,如在 $t=0$ 时刻,主要是以多股细长的韧带状液膜存在。而在 $t=200\text{ms}$,主要以叶瓣状形式存在。当液体速度进一步增大时,可以看到叶瓣状和韧带状液膜仍然存在,但多出了孔状的液膜。孔状液膜可认为是叶瓣状向韧带状的中间过渡模式。此时,空气动力作用于叶瓣表面,使得叶瓣中心破裂,存在孔状空洞,但气流速度又不够大到使叶瓣完全破裂成多股韧带。

3.3 破碎过程定量分析

液膜在离开预模板后的破碎过程受到沿流向和横向的不稳定波动。其中沿流向的波动仍满足线性不稳定理论模型^[2]。根据该模型,表面波的最大增长率随韦伯数的增大而增大,液膜更易破碎。

图 11(a)给出了液膜破碎距离与韦伯数 We 的关系曲线。韦伯数的增大使表面波更不稳定,因此破碎距离随韦伯数的增大而减小。韦伯数对破碎距离的影响主要体现在低韦伯数的情况下,当韦伯数较大时影响不大。此外,增大液相雷诺数会增大相同空气量接触的液体表面积,使得液膜更难破碎,造成破碎距离的增大。值得注意的是,低雷诺数时,破碎距离几乎不受液体流动情况的影响,可认为此时空气动力的作用占据了主导地位。

气液动量比也是破碎距离的重要影响因素,其值越大气体对液体的作用越强,表面波越不稳定,液膜越容易破碎。由图 11(b)可以看出,与韦伯数类

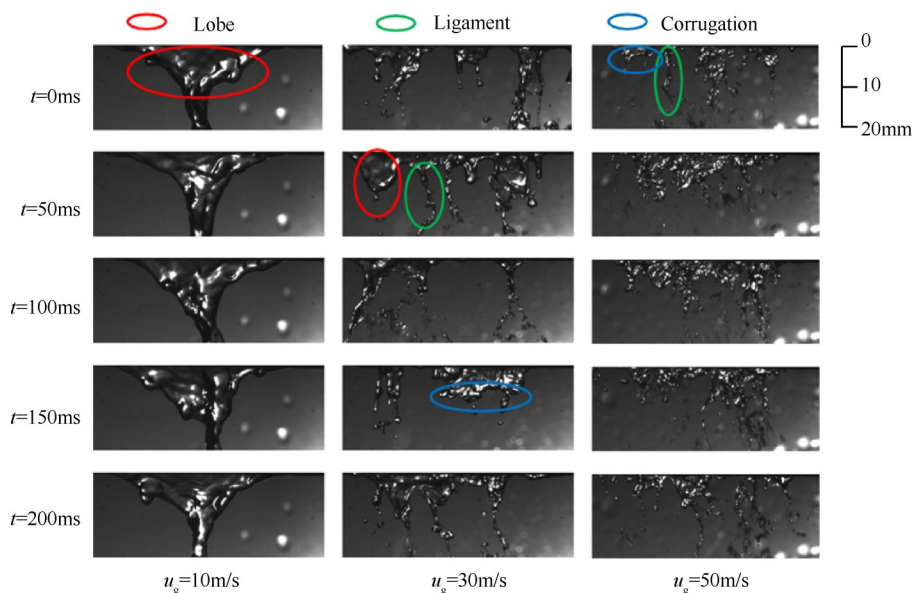


Fig. 9 Influence of air velocity on prefilming break-up mechanism (liquid velocity=0.5m/s)

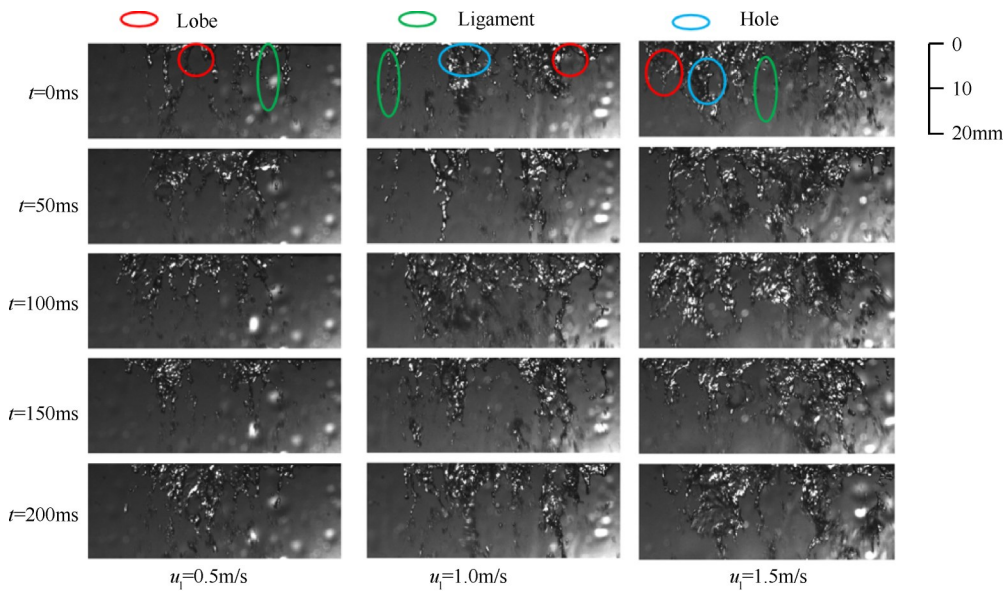


Fig. 10 Influence of liquid velocity on prefilming break-up mechanism (air velocity=60m/s)

似,随着气液动量比的增大,液膜破碎距离减小,且在气液动量比较小时对液膜破碎距离的影响较大。值得指出的是,当雷诺数大于 495 时,破碎距离仅与动量通量比有关,而受雷诺数影响较小。这是由于根据线性不稳定理论模型,虽然雷诺数对表面波增长率存在影响,但当雷诺数较大时影响不明显。

图 12(a)反映了横向不稳定波长随韦伯数的变

化。随着韦伯数的增大,横向不稳定波长减小。这是由于随着韦伯数的增大,气相对液相的作用加强,更易克服表面张力形成更多的液带,使得横向不稳定波长减小。随着液体雷诺数的增大横向不稳定波长增大也佐证了这一点:随着液相速度的增加,液相动量增加,要想克服表面张力就需要更强的气动力。增大韦伯数,减小液相速度,有助于减小横向不稳定

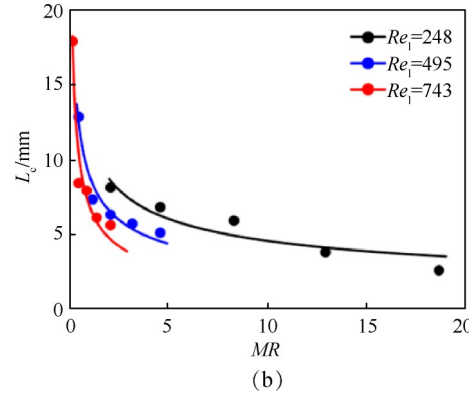
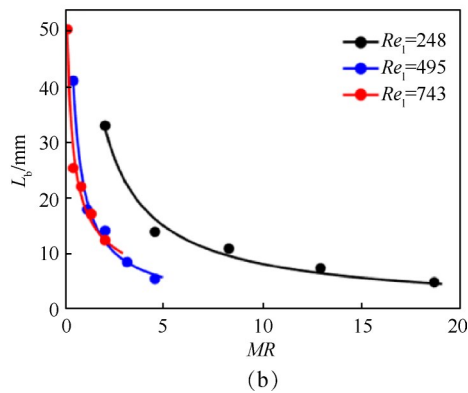
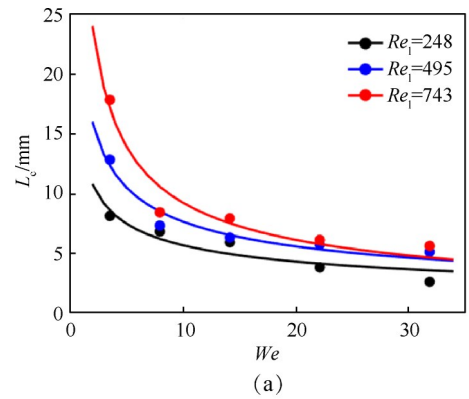
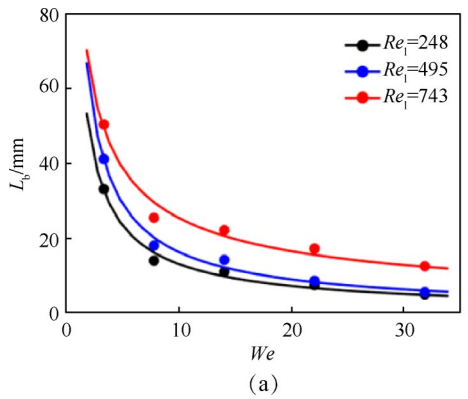


Fig. 11 Relationship between L_b with Weber number and momentum ratio

Fig. 12 Relationship between L_c with Weber number and momentum ratio

波长,获得更均匀的雾化效果。

图12(b)给出了气液动量比对横向不稳定波长的影响。气液动量比的增大反映空气作用力相对于表面张力的增强,使得液膜更易破碎,进而造成横向不稳定波长减小。此外值得注意的是,相同气液动量比下,横向不稳定波长均随液相雷诺数增大而减小。这是因为随着雷诺数增大,若想保证动量比不变,就必须随之增大空气速度。

虽然线性不稳定理论模型^[2]描述的是二维下的液膜波动,无法体现液膜在横向上的波动,但试验结果表明韦伯数和气液动量比对液膜横向不稳定波长和破碎距离的影响趋势是一致的,随着韦伯数和气液动量比的增大液膜横向表面波不稳定性也有所增强。

3.4 雾化特性分析

本文通过PDPA对平面液膜雾化粒径的空间分布进行了测量。图13(a)为沿预膜板展向的粒径分布曲线。雾化粒径沿展向基本保持不变,虽然液膜破碎过程沿展向并非均匀,但由于其存在周期性,因此其雾化粒径的时均值沿展向分布较为均匀。随着气流速度的增大,空气作用增强,粒径减小,雾化质量提高。但增大气流速度对粒径的展向分布特征没有显著的影响。

图13(b)反映了雾化粒径沿液膜高度方向的变化。可以看到,粒径在 y 为负值时要大得多,这是因为该面为预膜板背面,受到空气作用较晚,液膜较晚发生破碎。Roudini等^[22]的研究则发现,对于两侧都有预膜板的液膜破碎后粒径最大的位置为 $y=0$ 处。此外,当空气流速增大时,粒径分布的均匀性有所改善。这可能是由于空气流速增大,液膜破碎距离减小,即使预膜板背面侧的液膜受到空气作用较晚,在测点位置处仍然已经充分破碎。

图13(c)反映了一个有趣的趋势:在下游足够远处,随着气流速度的增大粒径反而增大。这是因为当空气速度增大时,已经充分破碎的细小液滴容易被吹离原来的位置,留下的被PDPA捕捉到的液滴粒径反而更大。Roudini等^[22]的研究也发现了该现象。

此外,在气流速度较小时,粒径向下游发展呈现出逐渐减小的趋势,这是由于破碎距离较大,在下游15mm位置还未完全破碎。随着向下游运动,液膜逐渐破碎,粒径也随之减小。而当气流速度较大时,在下游15mm位置已充分破碎,但随着向下游运动,液滴逐渐汇聚使得粒径有所增大。

本文3.1节指出,根据气液速度比能很好地预测

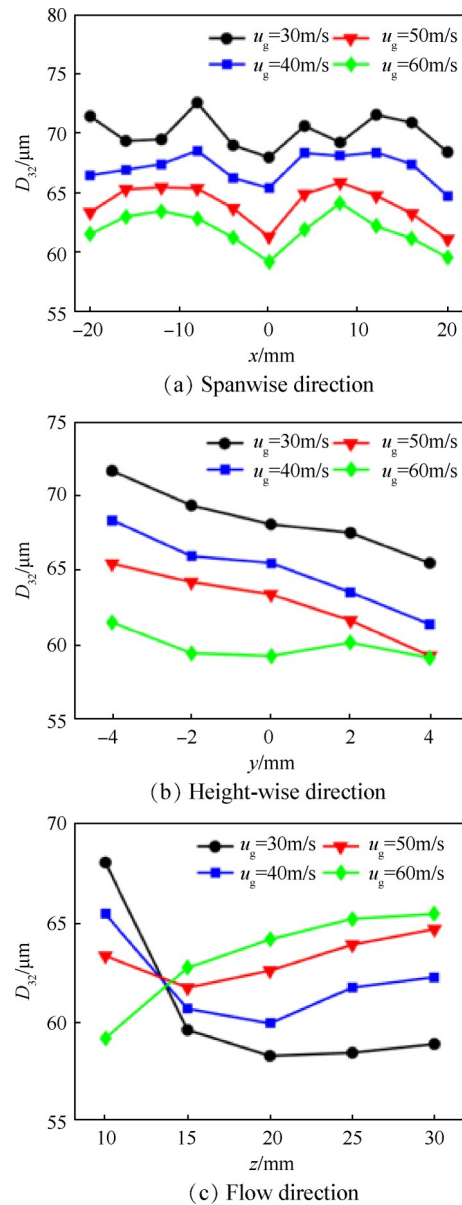


Fig. 13 Droplet size distribution along the spanwise direction, height-wise direction and flow direction

平面预膜在预膜板上的运动状态。图14给出了预膜板下游15mm中心处液滴粒径与气液速度比的关系。

液滴粒径与气液速度比呈线性关系,随着气液速度比的增大而减小。这是因为随着气液速度比的增大,表面波逐渐变得不稳定,液膜形态由平滑到波动直至剥离变化,既使液膜的破碎提前发生,也增大了液膜与空气的接触面积。

破碎距离与横向不稳定波长分别表征了液膜表面波沿流向和横向的不稳定性,反映了液膜的破碎程度,对雾化效果有较大影响^[23]。图15(a)给出了 D_{32} 与破碎距离的关系。破碎距离越小,表面波越不稳定,破碎的越彻底,粒径越小。随着破碎距离的增大,液膜破碎越晚发生,粒径增大。可以看到 D_{32} 与破

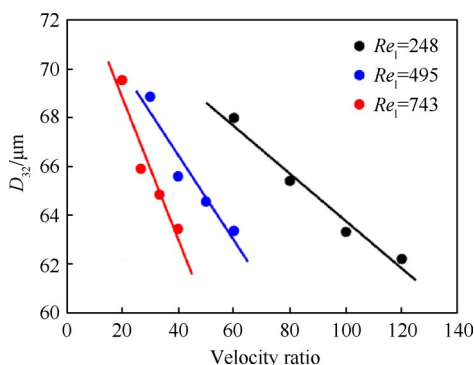


Fig. 14 Relationship between droplet size with velocity ratio

碎距离呈线性关系。值得注意的是,当液相雷诺数即液体速度较小时,液体速度对粒径的影响很小。

对比试验结果可以发现,横向不稳定波长衡量的是液膜横向的表面波不稳定性。横向不稳定波长越大,说明形成的韧带数越小,液膜与空气接触总面积越小,因此形成的液滴粒径偏大,如图 15(b)所示。粒径和横向不稳定波长也是近似呈线性关系。但与破碎距离不同的是,在相同横向不稳定波长下,液体流量的影响均不大。原因可能是,虽然液相速度的增大使得相同空气量作用的液体增多,但要保证横向不稳定波长不变,就必须随之增大空气速度,从而抵消了液相速度的影响。

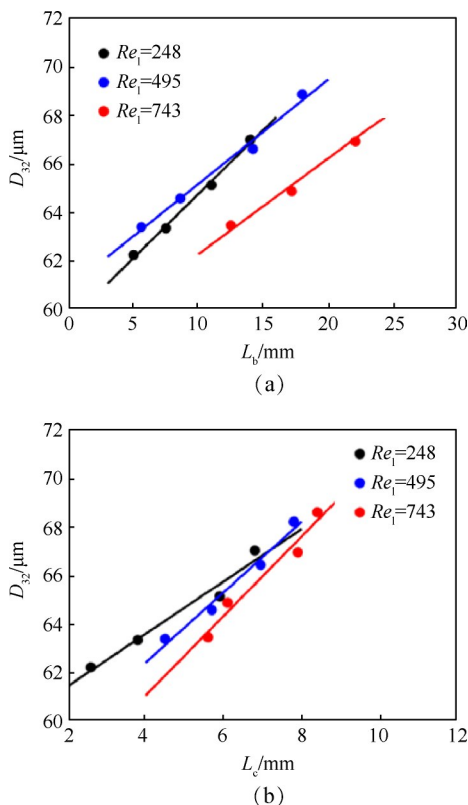


Fig. 15 Relationship between droplet size with break-up length (L_b) and transverse unstable wavelength (L_c)

4 结 论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)平面液膜在预膜板上的形态,与气液速度比直接相关。随着气液速度比增大,平面液膜分别会呈现平滑表面($\lambda \leq 23$)、波动表面($23 < \lambda < 70$)和液膜剥离($\lambda \geq 70$)三种形态。

(2)平面液膜的破碎过程存在多种形态,与气动力和液体表面张力的相对大小有关。破碎过程的破碎距离、横向不稳定波长随韦伯数、动量比的增大而增大,且在液相雷诺数较低时受到的影响较小。

(3)液膜雾化粒径在雾化区起始位置随气流速度的增大而减小,粒径和气液速度比、破碎距离、横向不稳定波长均呈线性关系。

致 谢: 感谢国家科技重大专项的资助。

参考文献

- [1] Lefebvre A H. Atomization and Sprays [M]. Boca Raton: CPC Press, 2017.
- [2] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] Li X, Tankin R S. On the Temporal Instability of a Two-Dimensional Viscous Liquid Sheet [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 226: 425-443.
- [4] Li X. Spatial Instability of Plane Liquid Sheets [J]. *Chemical Engineering Science*, 1993, 48 (16) : 2973-2981.
- [5] Berthoumieu P, Fernandez V G, Lavergne G. Geometric Primary Atomization Characteristics in an Airblast Atomizer, High Pressure Conditions [J]. *Atomization and Sprays*, 2011, 21(1): 17-29.
- [6] Zandian A, William S, Hussain F. Planar Liquid Jet: Early Deformation and Atomization Cascades [J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(6).
- [7] 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 (10).
- [8] Holz S, Braun S, Chaussonnet G, et al. Close Nozzle Spray Characteristics of a Prefilming Airblast Atomizer [J]. *Energies*, 2019, 12(14).
- [9] Déjean B, Berthoumieu P, Gajan P. Experimental Study on the Influence of Liquid and Air Boundary Conditions on a Planar Air-Blasted Liquid Sheet, Part I: Liquid and Air Thicknesses [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 79(8): 202-213.
- [10] Déjean B, Berthoumieu P, Gajan P. Experimental Study on the Influence of Liquid and Air Boundary Conditions

- on a Planar Air-Blasted Liquid Sheet, Part II: Prefilming Zone Length [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 79(8): 214–224.
- [11] Gepperth S, Müller A, Koch R, et al. Ligament and Droplet Characteristics in Prefilming Airblast Atomization [C]. *Heidelberg: International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2012.
- [12] Inamura T, Katagata N, Nishikawa H, et al. Effects of Prefilmer Edge Thickness on Spray Characteristics in Prefilming Airblast Atomization [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 121(10).
- [13] Chaussonnet G, Riber E, Vermorel O, et al. Large Eddy Simulation of a Prefilming Airblast Atomizer [C]. *Chania: International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2013.
- [14] Chaussonnet G, Vermorel O, Riber E, et al. A New Phenomenological Model to Predict Drop Size Distribution in Large-Eddy Simulations of Airblast Atomizers [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 80: 29–42.
- [15] Mingalev S, Inozemtsev A, Gomzikov L, et al. Simulation of Primary Film Atomization in Prefilming Air-Assisted Atomizer Using Volume-of-Fluid Method [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2020, 32(5): 465–476.
- [16] Meier W, Weigand P, Duan X R, et al. Detailed Characterization of the Dynamics of Thermoacoustic Pulsations in a Lean Premixed Swirl Flame [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 150(1–2): 2–26.
- [17] Mishra R K, Kumar S K, Chandel S. Effect of Fuel Particle Size on the Stability of Swirl Stabilized Flame in a Gas Turbine Combustor [J]. *International Journal of Turbo and Jet-Engines*, 2015, 32: 129–141.
- [18] 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.
- [19] Chaussonnet G, Laroche T, Lieber C, et al. Investigation of the Liquid Accumulation Characteristics in Planar Prefilming Airblast Atomization [C]. *Chicago: 14th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2018.
- [20] 王文远, 朱性哲. 一种旋流式喷嘴的雾化实验研究 [J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(8): 1222–1224.
- [21] Volz M, Konle M, Gebretsadik M, et al. Investigation of a Prefilming Airblast Atomizer with Respect to Surface Stripping [C]. *Montreal: ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*, 2015.
- [22] Roudini M, Wozniak G. Experimental Investigation of Spray Characteristics of Pre-Filming Air-Blast Atomizers, II: Influence of Liquid Properties [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2019, 13(2): 679–691.
- [23] Bhayaraju U C. Analysis of Liquid Sheet Breakup and Characterisation of Plane Prefilming and Nonprefilming Airblast Atomisers [D]. *Darmstadt: Technische Universität*, 2007.

(编辑:朱立影)