

平板式预膜喷嘴初次雾化特性试验

何昌升, 刘云鹏, 韩宗英, 李井华, 颜应文
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为深入了解平板式预膜喷嘴初次雾化特性, 试验研究不同进口条件对平板式预膜喷嘴初次雾化特性的影响规律。试验采用了背光照明和片状激光照明相结合的高频拍摄手段分别获得液膜俯视和侧视破碎形态, 同时运用本征正交分解(POD)法和液膜边缘定位等分析方法进行光学图像结果后处理, 获得表征平板式预膜喷嘴初次雾化特性三个物理量: 液膜波动频率、破碎距离和横向不稳定波长。试验结果表明: ①通过分析侧视和俯视破碎形态, 平板式预膜喷嘴液膜破碎形态可分为三类: 末端破碎、波浪脱落和表面剥离, 进口韦伯数对预膜喷嘴破碎形态的影响占主导地位; ②把 POD 法和液膜边缘定位方法等相结合方法应用到高频非接触光学喷嘴雾化图像的后处理分析中, 是一种非常有效的数据后处理方法; ③液膜初次雾化特性主要受到进口韦伯数和气液动量比的影响, 破碎距离和横向不稳定波长都随进口韦伯数的增加而降低, 液膜表面不稳定波动频率随进口韦伯数的增加而增加, 所获得的经验关系式与试验数据吻合较好。所获得的进口参数对液膜破碎形态和雾化特性的影响规律为喷嘴后续优化设计提供了依据。

关 键 词: 航空发动机燃烧室; 低污染; 平板式预膜喷嘴; 本征正交分解; 破碎形态; 雾化特性参数

中图分类号: V213.2 **文献标志码:** A

Experiment on primary atomization characteristics of planar prefilming nozzle

HE Changsheng, LIU Yunpeng, HAN Zongying,
LI Jinghua, YAN Yingwen

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To understand the primary atomization characteristics of the planar prefilming nozzle, the atomization experiment was carried out to study the influence of different inlet conditions. The high-frequency imaging method of backlight illumination and sheet laser illumination was used to obtain the liquid film breakup morphology in top view and side view. At the same time, the optical image was processed using proper orthogonal decomposition (POD) statistical analysis and the liquid film edge position analysis method, three physical quantities of the primary atomization characteristics were obtained: the main frequency of the liquid film surface wave, the breakup length and the transversal wave length. The experiment results indicated that: (1) the three liquid film breakup morphologies in the planar prefilming nozzle primary atomization process were divided into end breaking, wave dropping

收稿日期: 2019-09-15
基金项目: 国防科技创新特区项目; 国家自然科学基金(91741118)
作者简介: 何昌升(1995—), 男, 硕士生, 主要从事燃油雾化研究。E-mail: hcs95620@163.com
通信作者: 颜应文(1978—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机燃烧技术研究。E-mail: yanyw@nuaa.edu.cn

引用格式: 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. HE Changsheng, LIU Yunpeng, HAN Zongying, et al. Experiment on primary atomization characteristics of planar prefilming nozzle [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(3): 482-492.

and surface stripping based on the breakup morphology of side view and top view. The effect of inlet Weber number on breakup morphology of the prefilming nozzle was dominant. (2) The combination method of POD analysis and liquid film edge position analysis was applied to the post-processing analysis of the high-frequency non-contact optical image, as an effective data post-processing method. (3) The effect of inlet Weber number played an important role in liquid film breakup morphology. The primary atomization characteristics of the liquid film were mainly affected by the inlet Weber number and the gas-liquid momentum flux ratio. Both the breakup length and the transversal wave length decreased with the increase of the inlet Weber number, the frequency of the liquid film surface wave increased with the increase of the inlet Weber number and the obtained formula is in good agreement with the experiment data. The effect of the inlet parameters on the breakup morphology and atomization characteristics of the liquid film provides a basis for effectively optimizing the atomization quality of the prefilming nozzle.

Key words: aero-engine combustor; low emissions; planar prefilming nozzle; proper orthogonal decomposition; breakup morphology; atomization characteristic parameter

航空发动机排放问题越来越受到重视,这些排放物引起了全球环境问题^[1-2],针对污染物排放及其影响,国际民航组织提出了民用航空发动机减少污染物排放的目标^[3]。

在航空发动机中燃油与氧化剂的混合程度决定了燃烧的稳定性、燃烧效率和污染物排放。喷嘴作为航空发动机燃烧室中的重要部件为燃烧室提供相匹配的燃油雾化质量。空气雾化喷嘴能够快速均匀地将燃油与氧化剂混合,具有降低污染物排放的潜力,而预膜喷嘴是空气雾化喷嘴中具有较好应用前景的一种,受到广大研究机构的重视。

预膜喷嘴的雾化过程较简单,燃油先通过预膜内通道形成液膜,油膜受到两侧高速气流的剪切作用实现雾化。预膜喷嘴的雾化质量主要取决于空气与燃油的相对速度、燃油的物性和液膜的初始厚度,因此在燃油流量较小时,雾化效果良好,大幅降低了供油压力下限,获得更宽的调节范围,在燃烧时,燃油与空气充分掺混,大大降低NO_x、冒烟等污染物排放。

1966年,由Lefebvre和Miller^[4]首次提出预膜喷嘴。随后,大量国外学者对预膜喷嘴进行了大量研究。Berthoumieu等人^[5-6]通过试验和数值计算研究了纵横比为60的二维平板式预膜喷嘴的液膜雾化特性,并与环形液膜雾化特性进行了比较。研究发现:液膜的破碎机制取决于空气静压;环形液膜的初始曲率使得其具有更高的刚性,从而导致环形喷嘴的振荡频率更低,液膜形成

的条带间距更小。Gepperth等人^[7]测量并记录了液膜厚度与液膜破碎过程,同时基于试验所得到的结果,提出了一种预测索太尔平均直径(SMD)的物理模型。之后的研究表明^[8]:预膜区长度对液雾的SMD影响较小以及预膜板边缘厚度对雾化特性影响较大。但是,Déjean等人^[9-10]研究表明:预膜板有利于雾化而且预膜板存在最佳长度,此外还发现液膜破碎长度与液体流速密切相关,并且液膜波动频率和液滴尺寸主要取决于空气流动状态。Oshima等人^[11]研究发现较大的空气压力增大了气液接触面的不稳定性并增加了液膜沿流向的波动频率。国内也有一部分学者对预膜喷嘴的雾化特性进行了试验研究。赵其寿和甘晓华^[12]总结分析了预膜喷嘴内液膜厚度特性和液膜波动特性与雾化特性之间的关系,着重指出了唇口液流堆积雾化理论的问题所在。周春丽等人^[13]研究了喷嘴结构参数对雾化性能的影响,得到了SMD的变化规律。衡思江^[14]对旋流杯喷嘴和内通道式预膜雾化喷嘴的雾化特性进行了对比分析,研究发现:空气速度对内通道式预膜雾化喷嘴油雾场SMD的影响较大,燃油流量对油雾场的空间分布形态影响较小。

综上所述,关于不带预膜板的预膜喷嘴国内外已开展了大量研究,但针对带预膜板的预膜喷嘴研究相对较少,对带预膜板的预膜喷嘴初次雾化特性的规律认识亟需开展。本文试验探究了带预膜板的预膜喷嘴初次破碎形态和雾化

特性,分析研究了气流进口韦伯数和气液动量比对初次雾化的影响规律,并总结了表征初次雾化特性物理量的拟合公式,为预膜喷嘴的优化设计提供了依据。

1 试验系统

1.1 试验对象

本文主要研究简化的二维液膜的初次雾化过程。为了更好地模拟两侧高速气流对于液膜的剪切作用,本文采用弦长为 87 mm、叶宽为 38 mm 的 NACA-0010 对称翼型结构作为平板式预膜喷嘴外型,液膜内通道出口位于翼型后缘中心,液膜初始厚度为 0.6 mm,宽度为 20 mm。喷嘴几何结构如图 1 所示。液膜通过预膜内通道出口,在长为 10 mm、宽为 38 mm、厚为 0.5 mm 的预膜板上先受到一侧高速气流剪切作用,离开预膜板后再受到两侧高速气流剪切作用。

为保证气流流道内速度均匀分布,试验段内流道为 40 mm×25 mm 的矩形,且为保证预膜板上下气流流速相同,翼型放置在矩形流道的中间位置,同时为能观察液膜破碎形态,四面均开设了光学测量窗口,其中上下两面观察窗长度为 250 mm,高为 40 mm;喷嘴安装侧观察窗长度为 146 mm,高为 25 mm,另一侧观察窗长度为 250 mm,高为 25 mm。所有观察窗厚度均为 18 mm,观察窗材质选用石英玻璃,在紫外到红外的整个光谱波段都有较好的透光性能,以保证能拍摄到整个流道内喷嘴雾化信息。

1.2 试验工况

在常温常压下开展试验,液体选用 RP-3 航空煤油,经查阅,航空发动机中用于液膜雾化的空气流速范围为 10~120 m/s。当空气流速超过 80 m/s 时,液膜离开出口较短时间内就破碎成大液滴,较难捕捉喷嘴初次雾化特性,故本试验气流速度选用 14~70 m/s,考虑到空气速度最小为 14

m/s,燃油离开预膜内通道出口平均速度最大为 0.4 m/s,燃油速度与空气速度存在较大数量级差,故本文在计算进口韦伯数时,采用空气速度代替空气与燃油之间的相对速度,对比各工况的试验结果也能更直观一些,进口韦伯数 We 范围为 5~126,燃油流量($\dot{m}_l$)选用 1、2、4 g/s,气液动量比(γ)范围为 1.7~673。

$$We = \rho_a v_a^2 h_1 / \sigma \tag{1}$$

$$\gamma = \rho_a v_a^2 / (\rho_l v_l^2) \tag{2}$$

其中 σ 表示燃油表面张力系数, v_a 表示进口空气速度, ρ_a 表示空气密度, h_1 表示液膜初始厚度, ρ_l 表示燃油密度, v_l 表示燃油出口速度,下标 a 表示空气, l 表示燃油。

1.3 测量系统

本文主要研究简化的二维液膜的初次雾化特性。采用高速摄影仪拍摄并记录液膜在横流中的破碎过程,采用光学图像分析法拍摄液膜俯视和侧视喷雾场,研究液膜的初次雾化特性。

液膜破碎形态试验所用光学测试系统如图 2 所示,采用 150 W LED 灯作为照亮液膜的光源,试验所用高速摄影仪为美国 IDT(Integrated Design Tools)公司 Y5 型高速摄影仪,其具体参数为 2 336 像素×1 728 像素,最小曝光时间为 1 μs,16 G 内存。用高速摄影仪俯视拍摄液膜雾化过程,并且在计算机端输出记录。试验中,液膜俯视拍摄区域为 480 像素×384 像素,对应的区域尺寸为 20 mm×25 mm,每个像素点代表的尺寸为 52 μm。相机曝光时间为 4 μs,拍摄频率为 2 500 张/s,连续拍摄 1 250 幅图像。液膜侧视破碎形态试验所用光作为照亮液膜的光源,采用高速摄影仪拍摄激光照亮截面上液膜原始图片,液膜侧视拍摄区域为 5.86 mm×22.65 mm,每个像素点代表的尺寸为 9.9 μm,相机曝光时间为 2 497 μs,拍摄频率为 400 张/s,连续拍摄 400 幅图像。

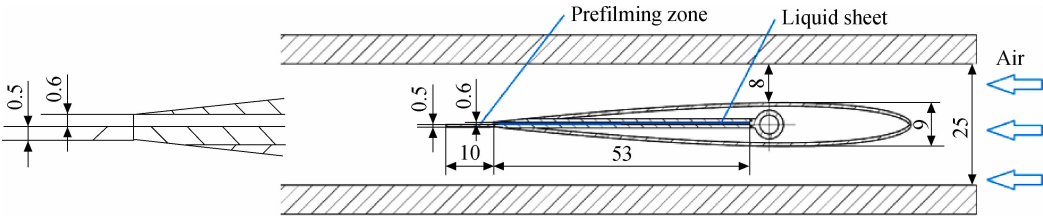


图 1 预膜喷嘴几何形状(单位:mm)

Fig. 1 Geometry of prefilming injector (unit:mm)

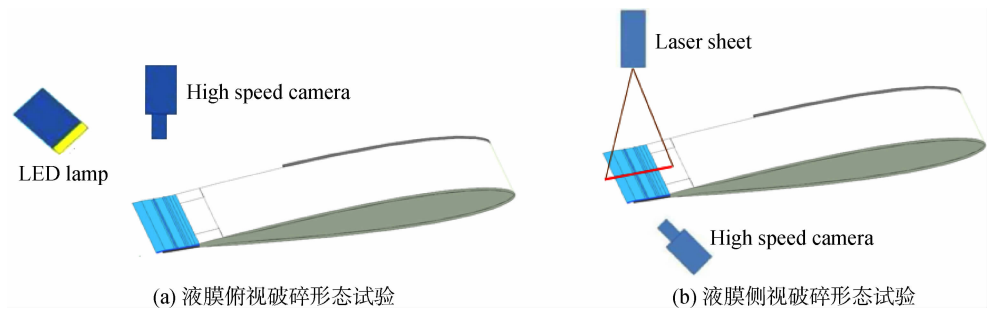


图 2 光学测试系统
Fig. 2 Optical experimental system

2 光学图像分析方法

2.1 液膜波动空间结构及波动频谱

POD 方法最初应用于湍流研究,根据试验结果或数值模拟结果获取湍流流动的拟序结构^[15-16]。此外还用于燃烧光学诊断,分析出火焰的动态特征和波动机制^[17]。

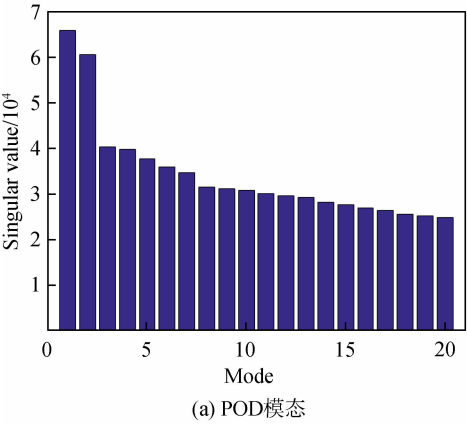
通过观察液膜侧视图和俯视图,发现液膜表面存在周期性波动,而且液膜的周期性波动会引起图像灰度变化,故可通过分析液膜俯视图的灰度变化规律,得到液膜波动规律。本文选用 POD 法来分析液膜表面的波动空间结构以及波动频率。

POD 的核心思想是假设连续变化的液膜俯视图可以由多个相互正交的模式叠加而成,即

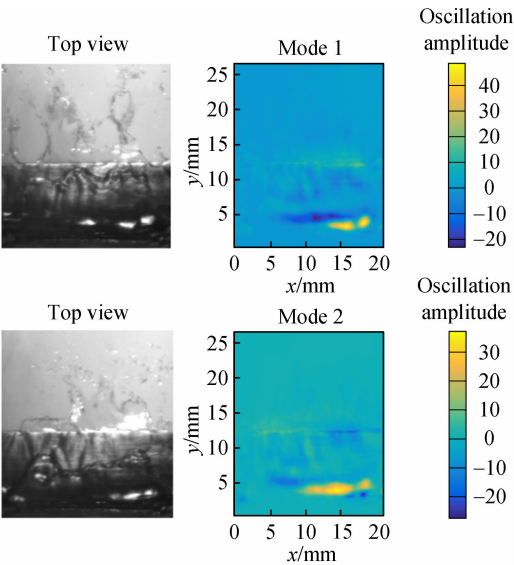
$$A(x,t)=\sum_{i=0}^m a_i(t)\varphi_i(x) \tag{3}$$

其中 x 表示空间位置(像素点), t 表示时间坐标, m 表示模式数, a_i 表示模式 i 的时间系数, φ_i 表示模式 i 的空间分布特征。

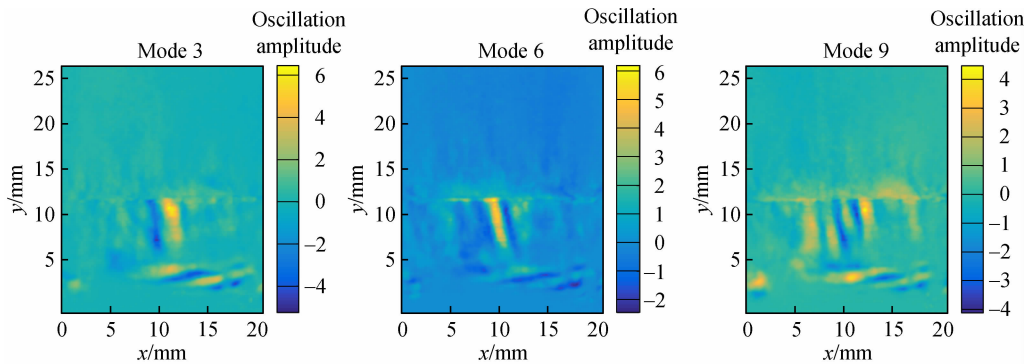
对液膜俯视图做 POD 分析,利用 POD 计算得到的液膜俯视图不同模式下灰度波动幅值比例分布如图 3(a)所示,图中包含了按波动幅值排序的前 20 个模式,可以发现,前两个模式的波动幅值最大,这两个模式代表了液膜俯视图图像中主要的灰度波动特性,因此接下来主要通过模式 1 和模式 2 来分析液膜波动特征。液膜俯视图以及前两个模式对应的空间分布结构如图 3(b)所示,其中色卡代表波动幅值,灰度波动空间结构中波动幅值越大代表液膜波动越剧烈。通过 POD 法分析出的前两个灰度波动空间结构与液膜波动区域吻合得较好,其他模式对应的灰度波动空间结构如图 3(c)所示,可以明显发现其他模式的空间结构主要波动的区域不是表征完整液膜的波动,有些表征预膜板末端经过初次破碎后的液膜表面波动规律,有些表征预膜板后堆积现象形成的液膜波动规律。故为了解初次破碎液膜波动规律,本文认为前两个模式的灰度波动空间结构表征完整液膜波动区域。对于液膜俯视图每一个波动模式的时间系数做快速傅里叶变换(FFT),就可得到对应的频谱如图 3(d),



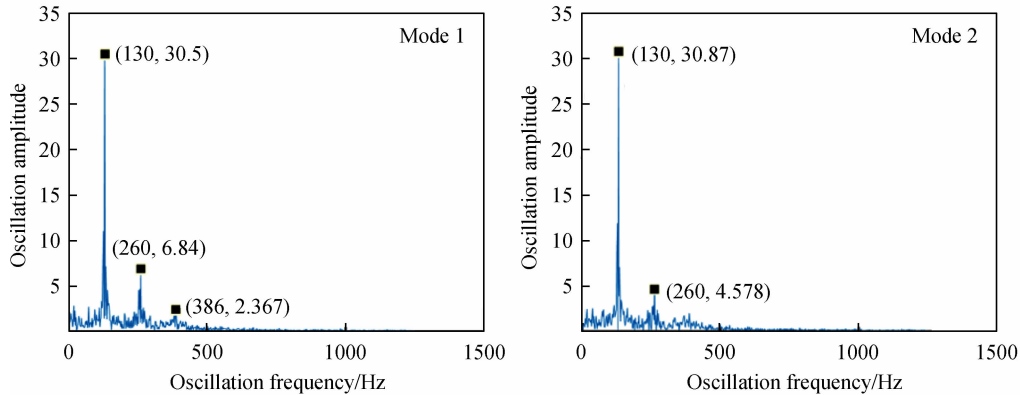
(a) POD模式



(b) 主模式空间分布结构



(c) 其他模态空间分布结构



(d) FFT分析频谱

图 3 POD 方法分析液膜波动

Fig. 3 POD analysis of liquid film oscillation

图中横坐标代表波动频率,纵坐标代表波动幅值。可以发现虽然前两个模态液膜波动的空间分布结构不同,但是其波动频谱基本相同,得到这个工况下的液膜波动频率为 130 Hz。利用此方法可以得到各工况下的液膜波动空间结构以及对应的频谱。

2.2 液膜厚度变化

分析液膜厚度变化的关键在于在液膜侧视图中定义液膜的边缘。本文采用 Sobel 算子做边缘检测,其方法是对图像中的每一个像素点灰度值做卷积计算,Sobel 算子通常有两个:一个用于检测垂直边缘的 C_1 矩阵;一个用于检测水平边缘的 C_2 矩阵,而两个卷积结果的最大值将作为该点的输出,即检测后的灰度值。

$$C_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

首先采用 Sobel 算子处理增强图像的边缘得

到液膜的两条定位边缘,通过取平均值的方法,保证所定位的液膜的边缘位于图中白色界面带的中间,处理结果如图 4 所示。这样就得到了液膜在预膜板上液膜厚度变化图像。

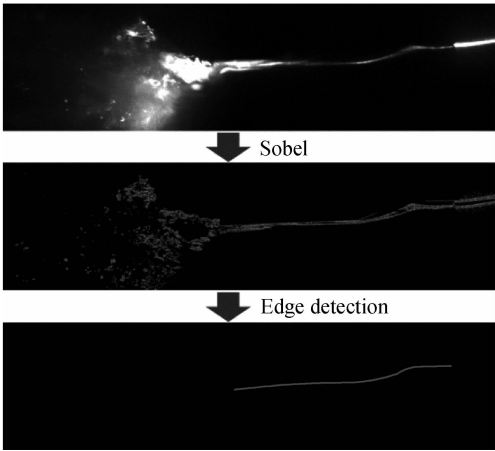


图 4 分析液膜厚度

Fig. 4 Analysis process of liquid film thickness

3 定性分析

在本次研究中,发现当液膜离开预膜内通道

后,上表面暴露于高速气流中,液膜与气流存在速度差,两种流体之间存在动量交换,液膜受到气流的剪切力作用,这些扰动导致液膜表面形成波动,波动幅值的大小取决于气流速度。根据进口条件,从液膜俯视图以及侧视图观察液膜破碎形态,本文提出了三种液膜破碎形态:末端破碎、波浪脱落和表面剥离,如图 5 所示。①当气流速度较小时,预膜板上液膜完整,液膜表面波动较弱,液膜在气流剪切力作用下较缓慢变薄,在离开预膜板后,在两侧气流的剪切力作用下,不稳定波动幅值

增大,液膜末端首先破碎成液带和少量大液团,液带再次破碎形成液团,这种破碎形态称为末端破碎。②随着气流速度增大,预膜板上液膜表面波动变得剧烈,液膜破碎不仅仅只发生在预膜板后,开始发生在预膜板区域,液膜表面顶部在气动力的作用下移动速度超过液膜底部的移动速度,部分燃油脱离液膜上表面,然后在重力的作用下回落液膜,这种破碎形态称为波浪脱落,液膜厚度变化剧烈。从俯视图上可以看出,液膜在发生波浪脱落现象后,表面张力使得薄液膜聚集形成液带,

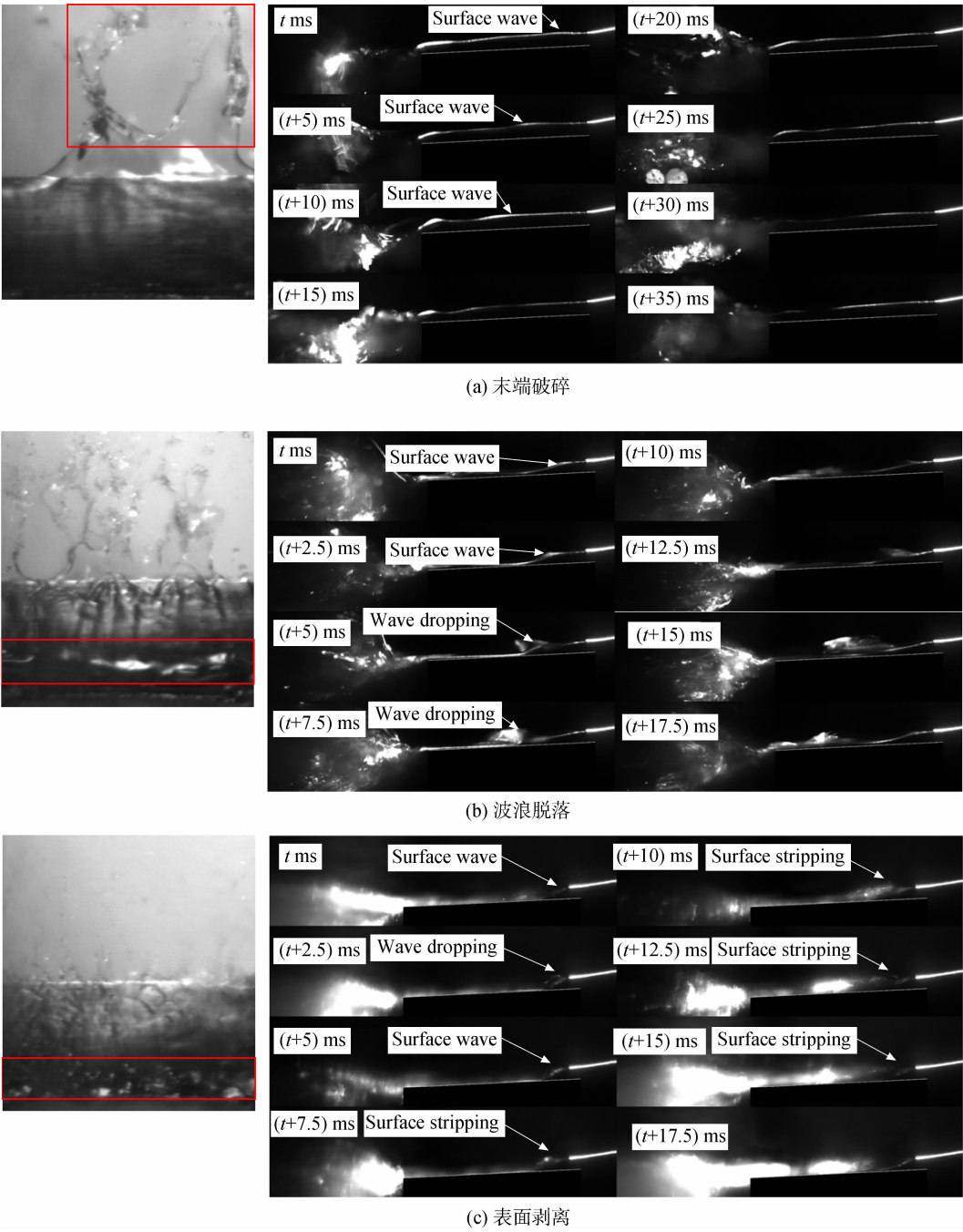


图 5 三种液膜破碎形态

Fig. 5 Three different breakup morphologies of liquid film

使得液膜在横向上存在不均匀现象,使得在预膜板后破碎后产生液带数量增加,破碎距离缩短。

③当气流速度进一步增大时,从液膜侧视图上发现,在气动剪切力作用下,预膜板上液膜波动频率和幅值增大,液膜破碎在预膜板区域发生的形式变得复杂和剧烈,液膜表面顶部在气动剪切力的作用下克服了表面张力和液膜黏性力,部分燃油脱离液膜,在气动力的作用下,这部分液膜不会回到预膜板而是在预膜板上方破碎成大液团,这种破碎形态称为表面剥离,液膜厚度变化更加剧烈。从俯视图上可以看出,液膜在发生表面剥离的现象后,横向不稳定波使得薄液膜在横向上厚度进一步不均匀,液膜厚度在横向呈现高度锯齿状,使得在预膜板后破碎后产生液带数量进一步增加,破碎距离进一步缩短。

预膜板上液膜受到空气剪切力作用,其平均速度不断增加,且燃油流量一定时,预膜板上液膜厚度会不断变薄,当液膜到达预膜板末端时,受到表面张力以及附面层的影响,燃油会在末端发生堆积现象,液膜厚度会有一定程度的增加,但随着空气流速的增加,预膜板末端堆积现象变得越少,预膜板上液膜单调变薄。总结液膜破碎形态和液膜厚度变化的规律,可以得到不同进口韦伯数和气液动量比下的液膜破碎形态和不同进口韦伯数下的完整液膜厚度变化曲线,如图 6 和图 7 所示。图像表明:进口韦伯数相比气液动量比对液膜破碎形态的影响更大,当进口韦伯数等于 5 时,液膜表面波动较弱,液膜主要在预膜板后破碎,液膜平滑变薄;当进口韦伯数进一步增加到 24 时,液膜

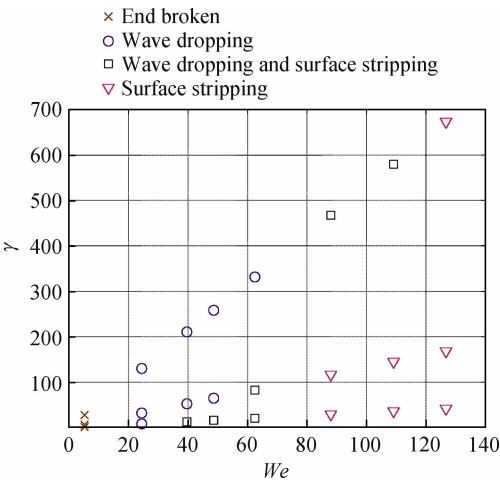


图 6 进口韦伯数对破碎形态的影响

Fig. 6 Effect of inlet Weber number on breakup morphology

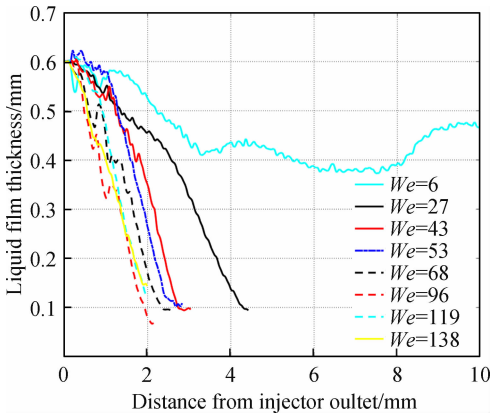


图 7 进口韦伯数对液膜厚度的影响(燃油流量为 2 g/s)

Fig. 7 Effect of inlet Weber number on liquid film thickness (fuel flow rate of 2 g/s)

表面波动增强,部分液膜在预膜板上发生波浪脱落现象,但液膜仍然完整,末端破碎为液膜主要破碎形式,液膜厚度变化较剧烈;当进口韦伯数增加到 48 时,液膜表面波动变得剧变得剧烈,表面开始出现表面剥离现象,液膜厚度变得较薄,破碎形式以波浪脱落和末端破碎为主;当进口韦伯数增加到 88 时,液膜表面波动非常剧烈,液膜表面剥离为液膜的主要破碎形式,完整液膜长度较短。

4 定量分析

在第 3 节中,定义了在不同进口条件下的液膜破碎形态,这有助于更好地理解液膜破碎机理。当液膜离开预膜内通道后,上表面暴露于高速气流中,由于液膜与气流存在速度差,两种流体之间存在动量交换,液膜受到气流剪切力作用,这些扰动导致在液膜表面形成波动,表面波动可以根据其传播的方向分为沿流向和沿横向的不稳定波动。从液膜俯视图中可以看出,在液膜破碎过程中同时受到沿流向的不稳定波动和沿横向的不稳定波动的影响:①发生在预膜板的液膜破碎主要受到沿流向的不稳定波动影响,当不稳定波动幅值超过液膜表面张力作用时,液膜发生波浪脱落或者表面剥离现象;②发生在预膜板后的液膜破碎同时受到沿横向和沿流向的不稳定波动的影响,液膜破碎成大的袋状或条状结构。破碎距离表征液膜沿流向的不稳定波动幅度,横向不稳定波长表征液膜沿横向的不稳定波动幅度,液膜波动频率表征液膜波动频率特性,因此,本文通过分析代表预膜喷嘴初次雾化特性的三个定量参数,即破碎距离、横向不稳定波长和液膜波动频率,深入了解进口条件对液膜初次雾化的影响规律。

4.1 破碎距离

破碎点(breakup point)是液膜初次雾化的重要特征,其定义是液膜初次破碎形成液带,液带在空气剪切力作用下克服表面张力和黏性力,再次破碎形成大的液带或尺寸较大的液团的空间位置,通常将液带末端称为破碎点,破碎距离是指破碎点与预膜内通道出口之间的距离。然而,预膜板后液膜破碎产生的液带的末端位置不是恒定的,广义破碎点的空间位置是随机的,通过观察液膜俯视图以及分析液膜破碎形态和机理,发现液膜初次破碎形成的液带基点位置主要受到沿流向的不稳定波动的影响,存在周期性。因此,本文将破碎距离重新定义为预膜喷嘴基点与液带基点之间的距离。

如图 8 所示,液膜的破碎距离(L_b)随着进口韦伯数的增加而减小,随着燃油流量($\dot{m}_f$)的增加而增加。值得注意的是,正如第 3 节所述,当进口韦伯数增加到 88 时,其液膜破碎的主要形式为表面剥离,其破碎点距离预膜内通道出口非常近,破碎距离随进口韦伯数增大变化较小。

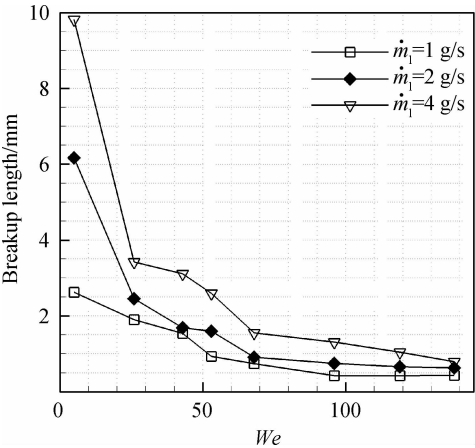


图 8 进口韦伯数对破碎距离的影响
Fig. 8 Effect of inlet Weber number on breakup length

预膜喷嘴破碎距离的影响因素很多,且不同学者对于破碎距离的主观定义方式也缺乏共识,故不同的学者总结的经验拟合公式存在较大差异。然而,气液密度比、进口韦伯数、燃油雷诺数(Re_1)以及气液动量比这些物理量对破碎距离的影响较大,在这一点上绝大多数学者已经达成了共识^[18-20]。本文通过分析和总结试验结果,得到了如下拟合经验公式:

$$L_b = \left(\frac{\rho_l}{\rho_a}\right)^{0.564} (We^{-1} \gamma^{-1} Re_1^{0.5})^{0.28} h_i \quad (6)$$

拟合经验公式与试验结果的收敛程度如图 9 所示,结果表明该经验公式与试验结果吻合度较好。

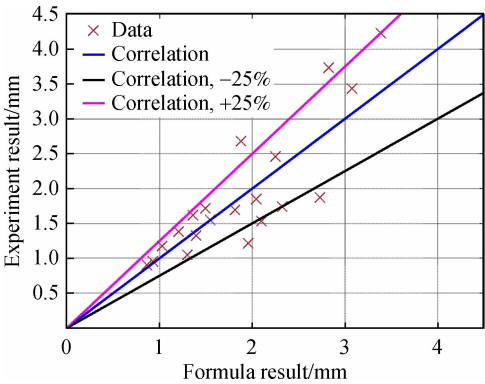


图 9 破碎距离的经验公式与试验结果对比
Fig. 9 Comparison of breakup length between formula and experiment results

4.2 横向不稳定波长

在初次雾化区域中,预膜板后液膜破碎成液带受到沿横向的不稳定波动的影响。随着气流速度的增加,液膜表面横向不稳定波动增强,液膜破碎产生的液带数量增加,液带之间的间距缩短,由液带进一步破碎形成的液滴在横向上分布更均匀。因此横向不稳定波长(transversal wavelength)是表征液膜初次雾化质量的重要物理参数,其定义是液膜破碎形成的液带之间的横向间距。

液膜破碎形成液团的主要形式是在预膜板后破碎形成液带,然后再次破碎形成大液团,故液滴的横向分布主要由液带的空间位置决定。如图 10 所示,图中红线表示由横向不稳定波动导致预膜板上液膜横向厚度不均,致使预膜板后液膜破碎形成的液带横向分布不均匀。气流速度较低时预膜板上液膜受到的气流剪切力较小,液膜黏性力占主导地位使得液膜初次破碎形成的液带数量较少,液带间距较长,液带分布不均匀;随着气流速度的增加,液膜在预膜板上发生波浪脱落现象后液膜变薄,气流剪切力与液膜黏性力共同作用使得液膜在预膜板上存在横向厚度上的不均匀,在预膜板后破碎形成的液带数量变多,且液带间距变短,液带在空间的横向位置变得更均匀,液带再次破碎形成的液团在横向上分布也越均匀,有利于液滴与来流空气均匀掺混得到更好的雾化质量。由上述分析可知,横向不稳定波长越短,其液带之间的间距越短,液带在预膜板后横向分布越均匀,有利于得到更好的雾化质量。如图 11 所示,由横向不稳定波长与进口

韦伯数的关系曲线可以发现,横向不稳定波长与进口韦伯数成反比。从液膜俯视图也可发现,随着进口韦伯数的增加,产生液带数量也就越多,在横向上分布更均匀,产生的大液团也越均匀。

本文通过分析和总结试验结果,得到了如下横向不稳定波长 λ 拟合经验公式:

$$\lambda = \left(\frac{\rho_l}{\rho_a}\right)^{0.41} (We^{-1} \gamma^{-1})^{0.15} h_1 \tag{7}$$

拟合经验公式与试验结果的收敛程度如图 12 所示,结果表明该经验公式与试验结果吻合度较好。

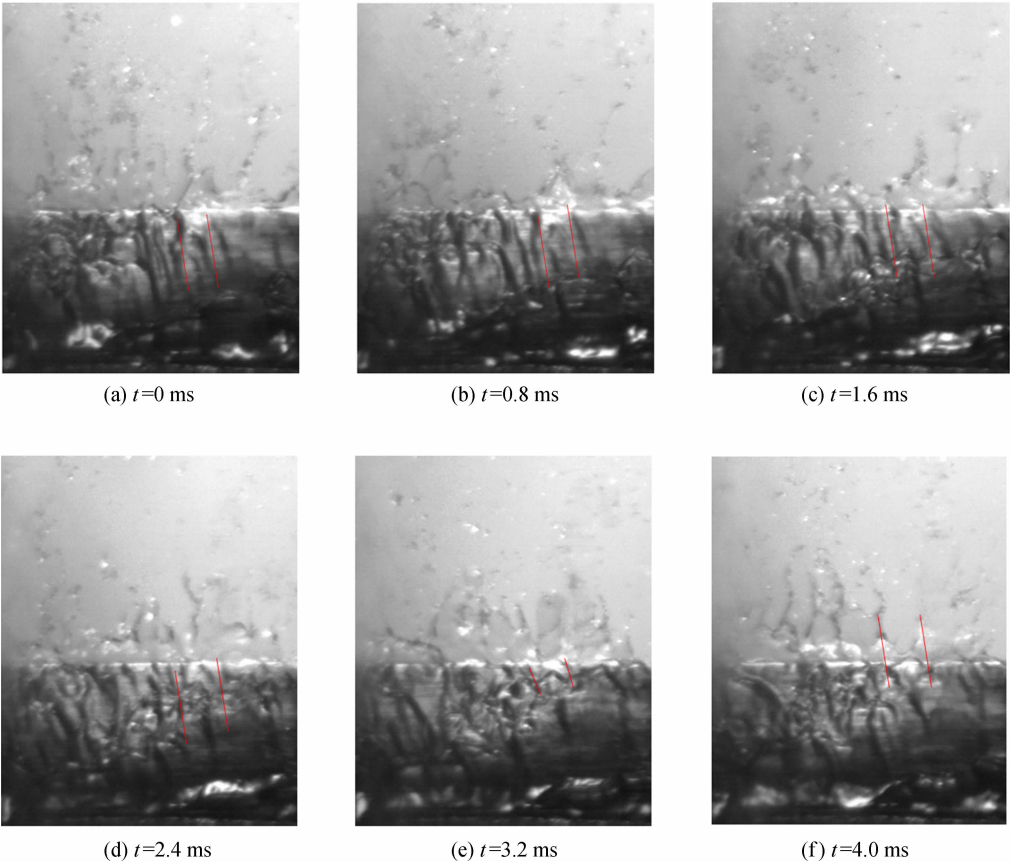


图 10 液带的形成($We=43$)

Fig. 10 Formation of liquid ligaments ($We=43$)

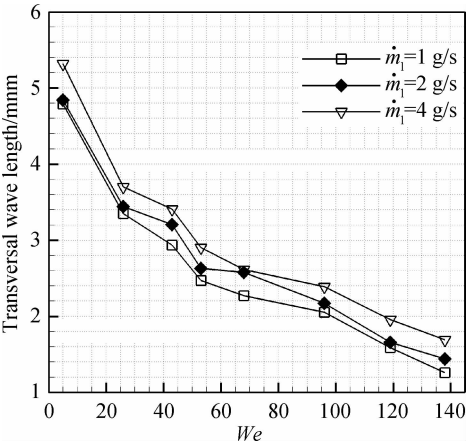


图 11 进口韦伯数对横向不稳定波长的影响

Fig. 11 Effect of inlet Weber number on transversal wave length

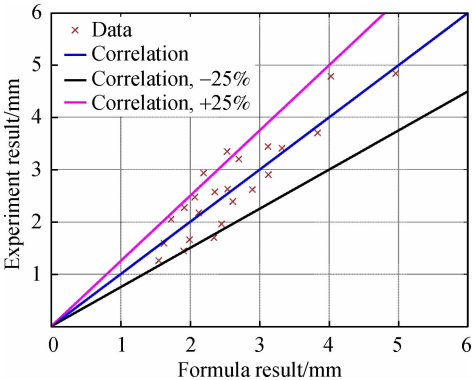


图 12 横向不稳定波长经验公式结果与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of transversal wave length between formula and experimental results

4.3 液膜波动频率

如前所述,在预膜板上液膜在受到高速气流的剪切作用,导致液膜波动,这种波动包括沿流向和沿横向的不稳定波动,存在周期性。经 POD 方法分析,可得液膜波动的频率,因此液膜波动频率是表征液膜初次雾化特征的重要物理参数。液膜波动频率随进口韦伯数的变化如图 13 所示,可以看出液膜波动频率与进口韦伯数成线性关系。如前所述,本文通过分析光学图像的灰度变化表征液膜波动。因此,当进口韦伯数较小时,预膜板上液膜波动较弱时,图像上灰度变化微弱,较难分析出预膜板液膜波动频率,只能分析预膜板上液膜在两侧气流的剪切作用下做幅值较大正弦波的波动区域的波动频率。随着进口韦伯数的增大,预膜板上液膜波动变得剧烈,存在一定频率,而预膜板后液膜波动是无序的,没有明显频率。此外,液膜波动频率也受到燃油初始平均速度的影响,液膜波动频率随燃油初始速度的增大而增大。

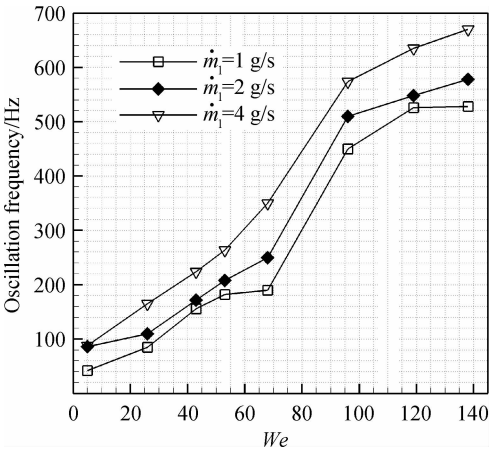


图 13 进口韦伯数对液膜波动频率的影响
Fig. 13 Effect of inlet Weber number on liquid film oscillation frequency

通常用斯特劳哈尔数 (Sr) 来表示无量纲的液膜波动特性,从上文的分析中,可得液膜波动频率主要与液体表面张力、燃油速度、空气速度和气液密度比相关,故本文提出的 Sr 拟合液膜波动经验公式为

$$Sr = \frac{fh_1}{u_1} = \left(\frac{\rho_l}{\rho_a}\right)^{0.617} (We^{-1}\gamma^{-1})^{0.357} \quad (8)$$

式中 f 为液膜波动频率, u_1 为燃油速度。
拟合经验公式与试验结果的收敛程度如图 14 所示,结果表明该经验公式与试验结果吻合度较好。

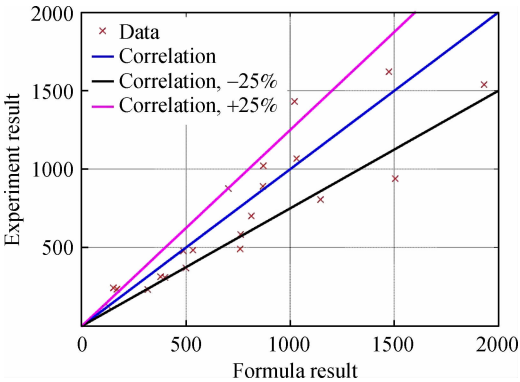


图 14 斯特劳哈尔数经验公式与试验结果对比
Fig. 14 Comparison of Strouhal number between formula and experiment results

液膜波动频率不仅与进口韦伯数、气液动量比有关,还可能与破碎距离、横向不稳定波长有关。液膜的破碎距离主要受到沿流向的不稳定波动影响,液膜初次破碎产生的液带间距主要受到沿横向的不稳定波动影响,而通过 POD 法分析得到的液膜波动包括沿流向和沿横向波动,故液膜波动频率与液膜破碎距离以及液带间距存在相应联系:

$$f = \left(\frac{\rho_l}{\rho_a}\right)^{1.36} \left(\frac{L_b}{h_1}\right)^{-0.515} \left(\frac{\lambda_{exp}}{h_1}\right)^{-1.06} \frac{u_1}{h_1} \quad (9)$$

拟合经验公式与试验结果的收敛程度如图 15 所示,结果表明该经验公式与试验结果吻合度较好。

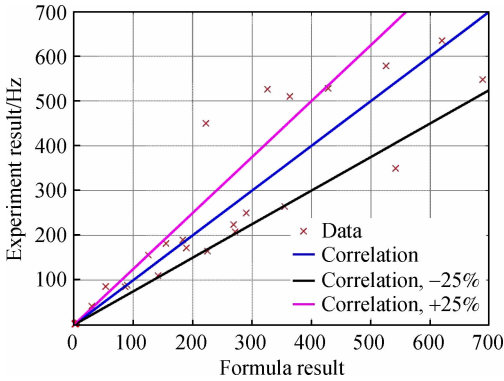


图 15 波动频率与试验结果对比
Fig. 15 Comparison of oscillation frequency between formula and experiment results

5 结 论

为了理解带预膜板的预膜喷嘴液膜初次雾化特性,本文对不同进口条件下液膜破碎形态图像进行了高速采集,重点是运用 POD、图像边缘捕捉等图像处理技术获得了液膜破碎的形态、主要波动模

态的空间分布和时间变化特征,以及表征初次雾化特性的物理量:横向不稳定波长、破碎距离和液膜波动频率。通过试验结果分析得到如下结论:

1) 根据进口条件观察到三种不同破碎形态:末端破碎、波浪脱落和表面剥离,同时建立了两个无量纲数下的破碎形态图,发现相比于气液动量比,韦伯数对液膜破碎具有更重要的影响。

2) 本文提出将 POD 法和液膜边缘定位等分析方法应用于光学图像结果的后处理分析,高效完整地提取到液膜表面波动特征,从而为研究预膜喷嘴初次雾化特性提供了有效的光学图像处理方法。

3) 通过统计预膜喷嘴初次雾化特性的物理量,揭示了横向不稳定波长和破碎距离都随进口韦伯数的增加而减小,液膜波动频率与进口韦伯数成正比的变化规律,拟合的初次雾化参数经验公式与试验数据吻合较好。此外还通过分析破碎距离和横向不稳定波长与液膜波动频率之间的关系,获得液膜波动频率与破碎距离和横向不稳定波长之间的经验公式,与试验结果基本吻合。

本文所获的试验结果以及总结出的经验关系式为预膜喷嘴的设计和优化提供依据。

参考文献:

- [1] UNAL A, CHANG H M E, ODMAN M T, et al. Airport related emissions and impacts on air quality: application to the Atlanta International Airport[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(32): 5787-5798.
- [2] AMABILE S, CUTRONE L, BATTISTA F, et al. Analysis of a low-emission combustion strategy for a high performance trans-atmospheric aircraft engine[R]. AIAA-2010-6549, 2010.
- [3] International Civil Aviation Organization. ICAO environmental reoport 2010, aviation and climate change[R]. Montreal, Canada; ICAO Environment Branch, 2010.
- [4] LEFEBVRE A H, MILLER D. The development of an air blast atomizer for gas turbine application[R]. Cranfield, UK; College of Aeronautics Report, Aero 193, 1966.
- [5] BERTHOUMIEU P, CARENTZ H. Experimental study of a thin planar liquid sheet disintegration[R]. Darmstadt, Germany; International Conference on Liquid Atomization and Spray, 2000.
- [6] BERTHOUMIEU P, LAVERGNE G. Video techniques applied to the characterization of liquid sheet breakup[J]. *Journal of Visualization*, 2001, 4(3): 267-275.
- [7] GEPPERTH S, GUILDENBECHER D, KOCH R, et al. Pre-filming primary atomization: experiments and modeling [R]. Brno, Czech Republic; 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2010.

- [8] GEPPERTH S, KOCH R, BAUER H J. Analysis and comparison of primary droplet characteristics in the near field of a prefilming airblast atomizer[R]. San Antonio, US; Turbo Expo; Turbine Technical Conference & Exposition, 2013.
- [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] OSHIMA I, SOU A, KAWABATA R, et al. Longitudinal wavelength of oscillating liquid sheet with air flow[R]. Dallas, US; 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [12] 赵其寿, 甘晓华. 空气雾化喷嘴内液膜对雾化性能的作用[J]. *推进技术*, 1991, 12(4): 42-48.
ZHAO Qishou, GAN Xiaohua. Effect of liquid film on atomizing performance in airblast atomizers[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1991, 12(4): 42-48. (in Chinese)
- [13] 周春丽, 程从明, 李定凯, 等. 结构尺寸对预膜式雾化喷嘴雾化特性的影响[J]. *热力发电*, 2004, 33(5): 38-39.
ZHOU Chunli, CHENG Congming, LI Dingkai, et al. Influence of structure size on atomization characteristics of prefilming atomizers[J]. *Thermal Power Generation*, 2004, 33(5): 38-39. (in Chinese)
- [14] 衡思江. 小型航空发动机气动雾化喷嘴雾化特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
HENG Sijiang. Investigations of spray characteristics of air-blast fuel nozzle for small aircraft engine[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [15] CHATTERJEE A. An introduction to the proper orthogonal decomposition[J]. *Current Science*, 2000, 78(9): 808-817.
- [16] ALLERY C, BÉGHEIN C, HAMDOUNI A. Applying proper orthogonal decomposition to the computation of particle dispersion in a two-dimensional ventilated cavity [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2005, 10(8): 907-920.
- [17] LIU Y, LI J, HAN Q, et al. Study of combustion oscillation mechanism and flame image processing[J]. *AIAA Journal*, 2018, 57(2): 824-835.
- [18] 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.
- [19] PARK J, HUH K Y, LI X, et al. Experimental investigation on cellular breakup of a planar liquid sheet from an airblast nozzle[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(3): 625-632.
- [20] FERNANDEZ V G. Experimental study of a liquid sheet disintegration in a high pressure environment [D]. Toulouse, France: Toulouse University, 2010.