

# 高温高压下平板预膜喷嘴初次雾化试验

张举星, 邸东, 张萍, 张腾, 颜应文, 李井华  
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 为了深入探究预膜喷嘴燃油初次雾化机理, 试验研究了高温高压条件下不同工况参数对平板预膜喷嘴初次雾化特性的影响规律。采用高速摄影可视化技术和马尔文粒度仪获取了预膜平板液膜厚度、液膜波动形态以及索泰尔平均直径(SMD)等雾化特性。利用图像后处理技术提取液膜厚度, 试验结果表明: 液膜厚度随进气压力、进气温度和进口韦伯数的增加而减小, 随燃油流量增加而增加。采用本征正交分解(POD)对液膜波动主要模态时间系数进行快速傅里叶变换, 结果表明在相同工况下, 液膜波动频率表现出和液膜厚度变化相反的结果。当进气压力改变时, 进口韦伯数保持不变, 试验结果表明进气压力对最终液滴平均尺寸影响不明显, 证实了进口韦伯数是更适合的表征燃油雾化效果的参数, 在工况范围内液滴尺寸随着进口韦伯数的增加而减小。

**关 键 词:** 预膜喷嘴; 高温高压; 初次雾化; 雾化特性; 本征正交分解

**中图分类号:** V213.2

**文献标志码:** A

## Experiment on primary atomization of flat prefilm nozzle under high temperature and high pressure

ZHANG Juxing, DI Dong, ZHANG Ping, ZHANG Teng,  
YAN Yingwen, LI Jinghua

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

**Abstract:** In order to deeply explore the primary atomization mechanism of prefilm nozzle, the influences of different working parameters on the primary atomization characteristics of flat prefilm nozzle under high temperature and high pressure were experimentally studied. The atomization characteristics such as liquid film thickness, liquid film fluctuation pattern and Sauter mean diameter (SMD) of the prefilm plate were obtained by high-speed photography visualization technology and Malvern particle size analyzer. The film thickness of extraction solution was obtained by image post-processing technology. The experimental results showed that the film thickness decreased with the increase of inlet pressure, inlet temperature and inlet Weber number, and increased with the increase of fuel flow rate. Proper orthogonal decomposition (POD) was used to perform fast Fourier transform on the main mode time coefficients of liquid film fluctuation. The experimental results also showed that under the same working conditions, the fluctuation

**收稿日期:** 2021-01-30

**基金项目:** 国家科技重大专项(J2019-III-0004-0047)

**作者简介:** 张举星(1994—), 男, 硕士生, 主要从事燃油雾化研究。E-mail: zhang-juxing@qq.com

**通信作者:** 李井华(1981—), 女, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事航空发动机燃烧技术研究。E-mail: lijinghua@nuaa.edu.cn

**引用格式:** 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. ZHANG Juxing, DI Dong, ZHANG Ping, et al. Experiment on primary atomization of flat prefilm nozzle under high temperature and high pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 55-66.

frequency of liquid film presented opposite result with the change of liquid film thickness. When the inlet pressure changed, the inlet Weber number kept unchanged. The experimental results showed that the inlet pressure had no obvious effect on the average size of the final droplet, demonstrating that the inlet Weber number is more suitable for characterizing the fuel atomization effect, and the droplet size decreases with the increase of inlet Weber number.

**Key words:** prefilm nozzle; high temperature and high pressure; primary atomization; atomization characteristics; proper orthogonal decomposition

降低污染排放和提高飞机发动机效率是目前航空研究面临的最重要的挑战<sup>[1]</sup>。为了实现这些目标,需要改善现有的富油燃烧过程的排放性能,同时开发新的贫油燃烧技术。航空发动机污染物排放的形成与燃烧室内部的燃料分布密切相关,减少污染排放的一个关键方面是提供高质量的燃油雾化效果<sup>[2]</sup>。

在现代航空发动机中,预膜空气雾化喷嘴最大优势是在低工况(30% 工况)下,依靠气动提供良好的雾化效果,从而解决主级喷嘴燃油低工况下雾化效果差、燃烧效率低的问题。为了提升与高速气流之间的动量传递,主级喷嘴燃油在环形预膜板上形成液膜,随后液膜在预膜板尾缘后方被周围的高温高速气流剪切破碎形成小液滴,迅速蒸发并参与燃烧<sup>[3]</sup>,如图 1 预膜空气雾化喷嘴示意图<sup>[4]</sup>所示。尽管这种类型喷嘴在较大范围的供油压力下均能提供良好的雾化特性而被广泛应用<sup>[5-6]</sup>,但是在预膜区域发生的一次雾化过程的基本机理还没有被完全揭示,其雾化特性对于是否能够准确预测污染物排放至关重要<sup>[7]</sup>。因此,当前关于预膜空气雾化研究的目的是揭示各种参数对预膜喷嘴初次雾化特性的影响规律,如工况参数<sup>[8]</sup>、喷嘴几何特征<sup>[9]</sup>以及液体物理性质<sup>[10]</sup>,以便为开发和设计预膜空气雾化喷嘴提供相关理论支持。

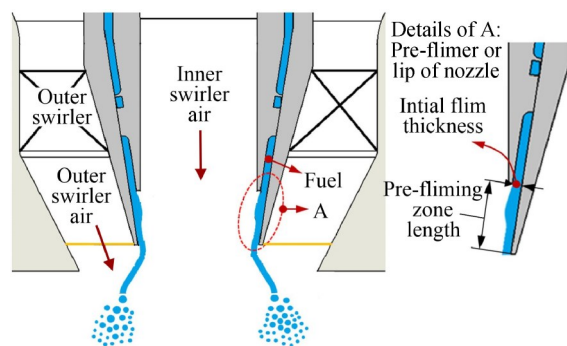


图 1 预膜空气雾化喷嘴示意图

Fig.1 Sketch of a prefilming airblast atomizer

对预膜喷嘴的试验研究由 Ebner、Rizkalla 等<sup>[11-12]</sup>开创,气体速度、表面张力和气液比被确定为影响平均液滴尺寸的主要参数。Beck、Lefebvre 等<sup>[13-14]</sup>证实增加气流速度、空气与液体的流量比降低液体表面张力和黏度对减小平均液滴直径更加有效。Fernandez 等<sup>[15]</sup>通过试验研究了进气压力为 100 000~600 000 Pa、进气速度为 20~70 m/s 和进气温度为常温工况下,水的初次雾化过程,并推导了液膜破碎长度和横向波长的经验公式。Sattelmayer 等<sup>[16]</sup>对液体和空气特性以及气流通道高度对二维平板液膜破裂过程的影响进行了相关研究,表明平均液滴尺寸与通道高度和液体流速无关,此外发现空气速度和表面张力是影响平均液滴尺寸的主要参数。对于预膜空气雾化喷嘴,液膜厚度的研究存在分歧:Lefebvre<sup>[17]</sup>认为液膜厚度是决定雾化特性的一个重要参数,液膜厚度的增加会导致平均液滴尺寸的增加。然而 Gopperth 等<sup>[18]</sup>研究了液体物性、空气速度、燃油流量、预膜平板长度和预膜平板尾缘厚度对一次雾化的影响,认为喷嘴尾缘厚度和气流速度是控制最终液滴尺寸的最有影响的参数。因此值得关注的是液膜能够达到的最小厚度,如果液膜厚度与雾化过程的平均液滴尺寸有关,那么它显然应该是预膜喷嘴设计中的一个重要考虑因素。

综上所述,有关预膜喷嘴雾化特性研究主要在常温常压条件下开展,在高温高压条件下对预膜空气雾化喷嘴雾化特性相关研究较少,而实际上预膜喷嘴常在高温高压下工作,因此对预膜式喷嘴雾化特性的相关规律认识亟需进一步开展。本文在课题组前期研究基础<sup>[19]</sup>上,进一步试验探究了高温高压条件下不同进口工况参数对平板预膜喷嘴液膜厚度等一次雾化特性的影响规律,并总结了表征相关参数影响液膜厚度的拟合公式,从而为预膜空气雾化喷嘴的优化设计提供了技术支撑。

## 1 试验系统

### 1.1 试验对象

试验为了产生一种平坦的液体薄膜,从而更容易测量和拍摄,简化传统空气雾化喷嘴的环形截面,取而代之的是二维设计<sup>[19-21]</sup>,如图2平板预膜喷嘴所示。平板预膜喷嘴的中心截面示意图如图3所示,喷嘴两面都受到高速气流剪切作用。为了确保雾化过程有明确的初始条件,平板预膜喷嘴外型采用的NACA-0010对称翼型。在翼型喷嘴侧面有供油管,为了实现燃油流速在横向分布均匀,在喷嘴中心设置具有整流作用的内通道,其长为53 mm、宽为20 mm、高为0.6 mm,最后燃

油在长为10 mm的预膜区域上形成均匀液膜。试验段空气流道截面为宽为60 mm、高为40 mm的矩形件,且为保证预膜板上下气流流速相同,翼型喷嘴放置在矩形流道的中间位置,此外三个方向壁面开设了光学测量窗口,可以对液膜形态及液膜厚度进行光学拍摄,其中上侧观察窗长为52 mm、宽为23 mm,正向观察窗长为52 mm、高为21 mm,对侧观察窗长为41 mm、高为21 mm。由于试验工况为高温高压进气条件,观察窗玻璃选用石英玻璃,其厚度为32 mm,在保证试验安全前提下兼顾透光性能,确保能拍摄到所需预膜喷嘴雾化信息。

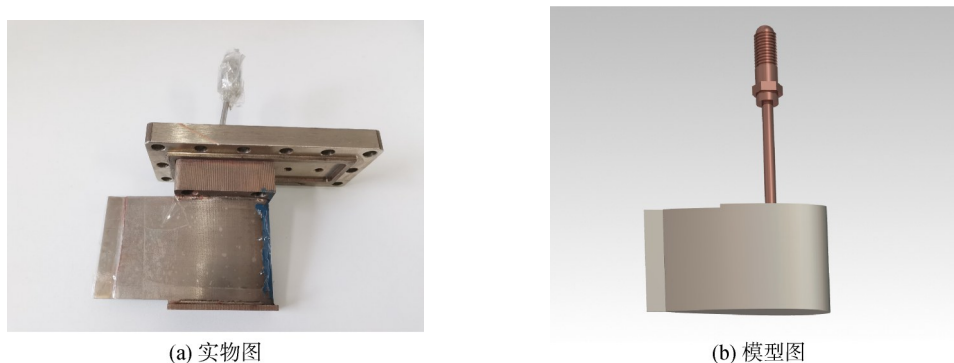


图2 平板预膜喷嘴  
Fig.2 Flat prefilm atomizer

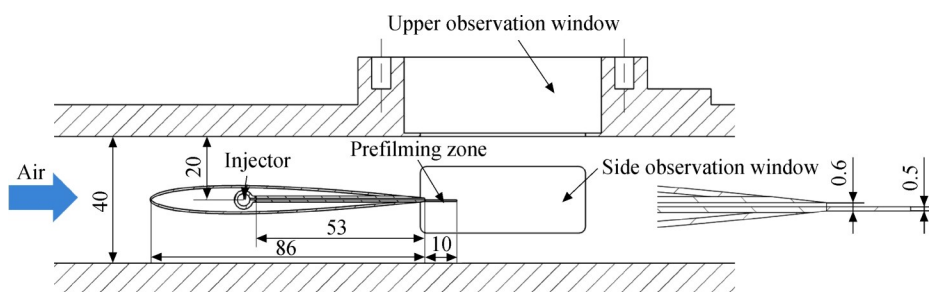


图3 平板预膜喷嘴的中心截面示意图(单位:mm)  
Fig.3 Diagram of central section of flat prefilm atomizer (unit:mm)

### 1.2 试验工况

试验工况为了考虑真实的发动机工作条件,液体选用RP-3航空煤油(燃油密度 $\rho_l=784 \text{ g/m}^3$ ,动力黏度 $\mu_l=0.00129 \text{ kg/m}$ ,表面张力 $\sigma_l=0.02767 \text{ kg/s}^2$ ),工况参数如表1所示,平板预膜喷嘴进气绝对压力为0.4~1.0 MPa,进气温度 $T_a$ 范围为300~600 K,燃油流量 $q_{m,l}$ 分别选用4、6 g/s和10 g/s。燃油离开预膜内通道出口平均速度最大为

1.07 m/s,燃油速度与空气速度存在较大速度差,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,即当进气压力 $p_a$ 改变时速度也相应地变化,以保持气动力 $\rho_a u_a^2$ 不变,进口韦伯数 $We_a$ 范围为6~100。重要的无量纲数,如进口韦伯数 $We_a$ 和液体雷诺数 $Re_l$ ,由式(1)、式(2)表示。

$$We_a = \frac{\rho_a u_a^2 h_l}{\sigma_l} \quad (1)$$

表 1 工况参数  
Table 1 Operating conditions

| 工况 | $We_a$         | $T_a/K$     | $p_a/MPa$   | $q_{m,1}/(g/s)$ |
|----|----------------|-------------|-------------|-----------------|
| 1  | 6,28,56,100    | 500         | 0.7         | 6               |
| 2  | 6,28,56,100    | 500         | 0.7         | 4,6,10          |
| 3  | 6,28,56,100    | 400,500,600 | 0.7         | 6               |
| 4  | 6,28,56,100    | 500         | 0.4,0.7,1.0 | 6               |
| 5  | 6,28,56,72,100 | 400         | 0.7         | 6               |
| 6  | 28             | 300,400,500 | 0.7         | 6               |
| 7  | 28             | 500         | 0.4,0.7,1.0 | 6               |
| 8  | 6,28,56,100    | 400         | 0.1,0.4     | 4,6,10          |

$$Re_1 = \frac{\rho_1 u_1 h_1}{\mu_1} \quad (2)$$

其中  $u_a$  表示进口空气速度,  $\rho_a$  表示空气密度,  $h_1$  表示液膜初始厚度,  $\sigma_1$  表示燃油表面张力,  $\rho_1$  表示燃油密度,  $u_1$  表示燃油出口速度,  $\mu_1$  表示燃油黏度, 下标 a 表示空气, l 表示燃油。

### 1.3 测量系统

本试验在南京航空航天大学燃烧实验室高压平台上进行, 整个试验系统试验装置示意图如图 4 所示。气源由一台流量为 0.4 kg/s、最高压力为 1 200 kPa 的压气机提供。为了使空气均匀, 在试验段的上游安装了一个稳压罐, 气流经稳压罐流入一台功率为 650 kW 的电加热器内进行加热, 以确保在进行试验时提供不同温度的进口气流, 进口空气流量由孔板流量计监测; 通过自编 Lab-view 程序对进口总压、总温以及流量数据进行采集, 进而通过调节放气阀以及试验段后的压力阀对试验段压力和空气流量进行调节。加热后高温高压气流依次进入测量段、试验段以及压力阀后,

最后进入废气净化装置经净化后排放到大气中。

本文主要研究简化的二维平板液膜的一次雾化特性, 采用高速摄影仪拍摄并记录侧视以及俯视液膜在气流中的雾化过程, 所用高速摄影仪为美国 IDT 公司(Integrated Design Tools Inc) 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  $\mu s$ , 16 G 内存。试验液膜厚度拍摄所用光学测试系统如图 5(a) 所示, 其中激光发射器作为照亮液膜垂直截面的平面激光光源, 试验中, 测量均在预膜平板横向中心线上进行, 对应的区域尺寸为 16.58 mm × 16.58 mm, 每个像素点代表的尺寸为 8  $\mu m$ , 相机曝光时间为 30  $\mu s$ , 拍摄频率为 750 帧/s, 连续拍摄 200 幅图像。如图 5(b) 所示, 试验所用高速摄影仪俯视拍摄液膜雾化过程, 液膜俯视波动形态采用 150 W LED 灯作为照亮液膜的光源, 高速摄影仪拍摄的区域为 26.92 mm × 21.97 mm, 输出图片为 1 696 像素 × 1 384 像素, 每个像素点代表的尺寸为 15.8  $\mu m$ , 拍摄频率为 750 帧/s, 连续拍摄 400 幅图像, 并且在计算机端输出记录。

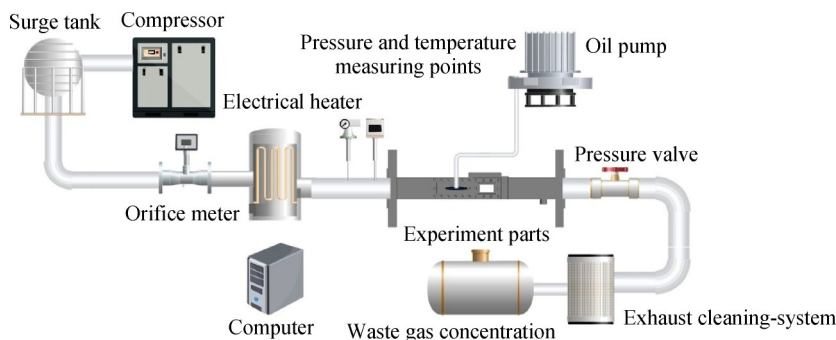


图 4 试验装置示意图

Fig.4 Schematic of the experimental system

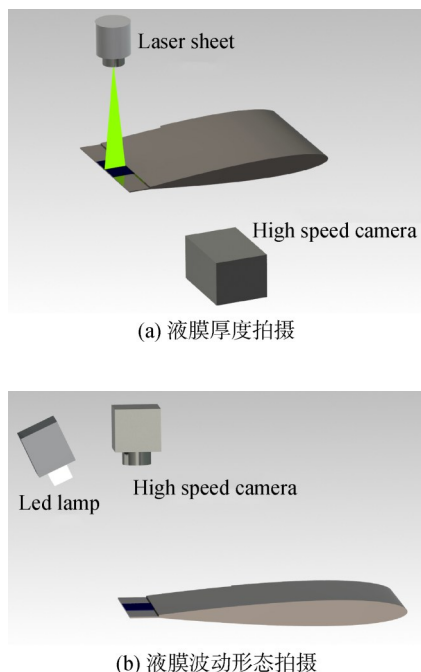


图5 高速摄影仪拍摄示意图

Fig.5 High-speed camera shooting schematic

测量平板预膜喷嘴燃油液滴粒径大小所使用的设备为马尔文粒度分析仪,索泰尔平均直径(SMD)测量示意图如图6所示,激光粒度分析仪采用“米氏散射”理论,充分考虑了分散介质和被测颗粒的折射率,根据大小不同的颗粒在各角度上散射光强的变化来反演出颗粒群的粒度大小和粒度分布规律,该设备量程为 $4.6\sim 323\ \mu\text{m}$ 。通常,在带有空气雾化喷嘴的燃气轮机燃烧室中,火焰前锋距离喷嘴边缘的距离不会超过 $25\ \text{mm}$ ,因此本文测量SMD位置位于喷嘴下游轴向距离 $25\ \text{mm}$ 处,马尔文粒度仪测量激光平行于预膜喷嘴横向。

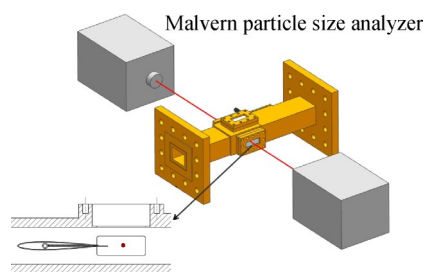


图6 SMD测量示意图

Fig.6 SMD measurement schematic

## 2 图像后处理方法

### 2.1 液膜厚度图像处理

为了定量评价试验工况参数对液膜厚度的影

响,本文采用图像后处理技术来确定液膜厚度。分析预膜平板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,采用Matlab软件图像处理中的灰度拉伸、二值化等运算进行液膜厚度的提取,液膜厚度图像处理流程如图7所示。

#### 1) 背景去除

在拍摄液膜厚度图像时,光线经过试验件与油滴粒子时会因反射作用使图像产生亮度不均匀现象,这对图像能否准确识别影响很大。因此,采用减去背景法来消除亮度不均匀以及图像中的坏点,以利于图像后续处理。假设原图像函数为 $f(x,y)$ ,背景图像函数为 $h(x,y)$ ,则减去背景后的图像函数为 $g(x,y)=f(x,y)-h(x,y)$ 。

#### 2) 自适应灰度拉伸

试验过程中由于光线不均以及液膜波动,导致液膜边界亮度分布不均,其中较暗部分不易识别。因此通过自适应最佳区间进行灰度拉伸,从而提高灰度图像的对比度,利于液膜厚度的识别。

#### 3) 二值化与膨胀腐蚀处理

将灰度图像通过阈值法转化为二值图像,这种二进制图像处理在图像强度小于阈值时用黑色像素替换图像中的每个像素,或者在图像强度大于阈值时用白色像素替换图像中的每个像素。所有处理图像均使用同一阈值以保证同一标准,再对其进行膨胀腐蚀处理,使液膜边界变得连续,排除不必要的误差。其中预膜平板由于安装误差出现轻微偏斜,不能将预膜平板上边界看做水平直线,通过对预膜板边缘进行识别确定液膜下部边界(即红色线条)。

其中,液膜表面需要通过镜面反射进行测量,因此液膜厚度只能在表面近似垂直于激光时被测量。试验工况接近真实发动机工作状态,在激光与液膜之间由于剧烈剪切形成的油气混合层对激光的散射作用,造成二值化图像中平板液膜上白色区域,液膜紧贴平板壁面由于透光作用所以没有被拍摄到。左端为气流以及燃油来流方向,油气混合层与预膜板上边缘之间为所求液膜厚度,由累积之间的像素数来计算液膜厚度,瞬时液膜厚度如图8所示,二值化阈值 $\phi=0.1$ 时,液膜厚度数据存在坏点,不能对图像准确识别,二值化阈值降低至 $0.01$ 时,液膜厚度分布达到收敛,且能够准确识别液膜波峰和波谷。对 $\phi=0.01$ 液膜厚度数据进行正态分布测试,瞬时液膜厚度数据正态概率图如图9所示,其中呈现 $0.55$ 的偏度和 $2.41$

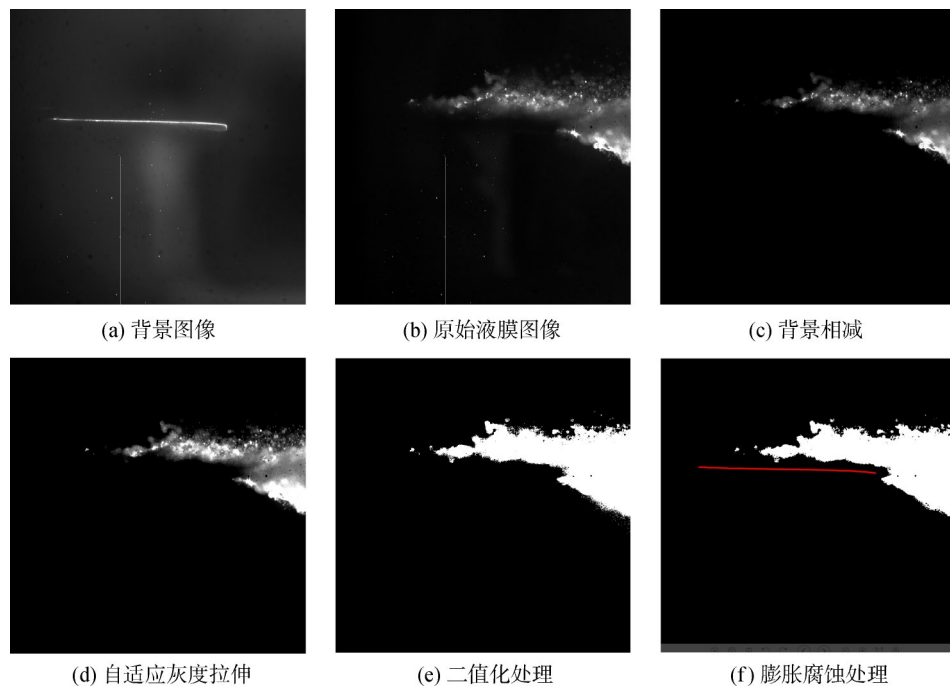


图 7 液膜厚度图像处理流程

Fig.7 Image processing flow of liquid film thickness

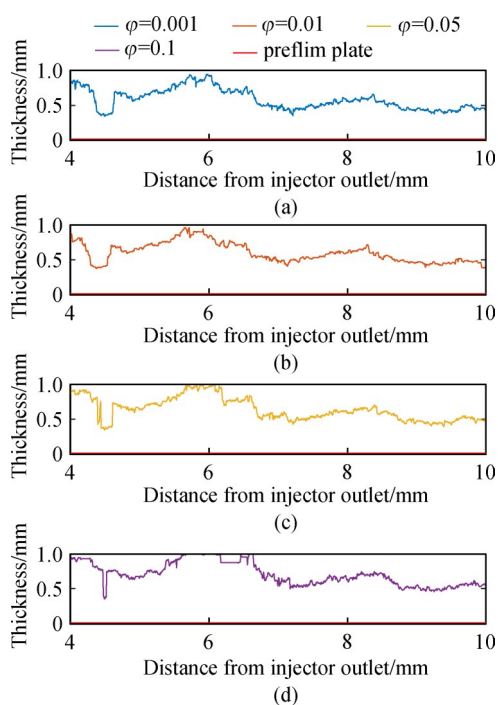


图 8 瞬时液膜厚度

Fig.8 Transient liquid film thickness

的峰度(偏度和峰度的正态分布值分别为 0 和 3),较为符合正态分布。

对于每一个试验工况,使用 Matlab 软件对上述方法编写程序处理一组 200 幅图像时间序列,然后将取得的液膜厚度进行时间平均,得到液膜厚度随平板预膜喷嘴内通道出口距离变化曲线。

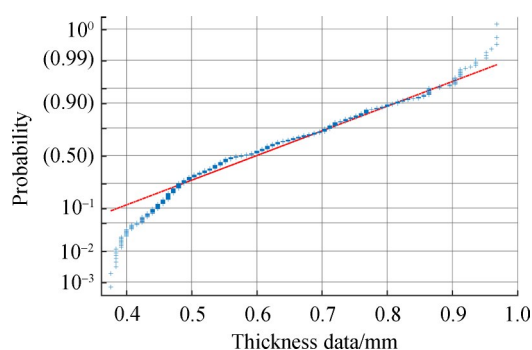


图 9 瞬时液膜厚度数据正态概率图

Fig.9 Normal probability plot of transient liquid film thickness data

## 2.2 液膜波动图像处理

本征正交分解(POD)方法将试验或数值模拟湍流流场分解为若干空间正交模态,按照各个模态的能量(特征值)大小进行排序,将一组数据分解成最少数量的基函数以捕获尽可能多的能量,进而提取相干结构建立流场的降阶模型<sup>[20]</sup>。

通过观察原始液膜俯视图,由于液膜表面存在周期性的波动导致图像发生灰度变化,所以可以通过分析液膜俯视图中的灰度变化规律得到液膜的波动规律,故本文选用 POD 来分析液膜表面的波动空间结构以及脉动频率。

POD 的核心思想是原始图像中液膜波动可以表示为全部正交模态及其相应时间系数的线性

组合。

$$q(\Omega, t) - \bar{q}(\Omega) = \sum_j a_j(t) \Phi_j(\Omega) \quad (3)$$

其中  $q(\Omega, t)$  可以为表示任意标量(压力、温度)或矢量(速度、涡量)的瞬时场,本文中时间序列图像中的一帧,  $\bar{q}(\Omega)$  为时均场,  $\Omega$  和  $t$  分别表示空间坐标与时间,  $\Phi_j(\Omega)$  表示模态  $j$  的空间特征,  $a_j(t)$  表示模态  $j$  的时间模态系数。

$$x(t) = q(\Omega, t) - \bar{q}(\Omega) \mathbf{R}^n, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_m \quad (4)$$

式中  $x(t)$  表示给定数据场关于时间的序列,即全部液膜波动图像,  $\mathbf{R}^n$  表示实数域。

POD 分析的目的是找到最佳的基础模态,代表给定的流场数据,即寻找矢量  $\Phi_j(\Omega)$  以最佳的方式和最少的模式数代表  $\bar{q}(\Omega)$ 。

$$D \Phi_j = \lambda_j \Phi_j, \quad \Phi_j \in \mathbf{R}^n, \quad \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0 \quad (5)$$

其中  $D$  是向量  $x(t)$  的协方差矩阵,  $\lambda_j$  为模态特征值,  $\Phi_j$  表示特征向量。

$$D = \sum_{i=1}^m x(t_i) x^T(t_i) = X X^T \in \mathbf{R}^{n \times m} \quad (6)$$

其中矩阵  $X$  表示以矩阵形式存在的  $m$  张时间序列流场数据。

可以用特征值来确定代表流场数据波动所需的模态数,按照特征值的大小进行排序,一般只保留前  $r$  个模式来表示全部数据,即

$$\sum_{j=1}^r \lambda_j / \sum_{j=1}^n \lambda_j \approx 1 \quad (7)$$

$$q(\Omega, t) - \bar{q}(\Omega) \approx \sum_{j=1}^r a_j(t) \Phi_j(\Omega) \quad (8)$$

相应地确定时间系数  $a_j(t)$ , 其中时间系数反映了 POD 模态随时间变化的趋势。

$$a_j(t) = \langle x(t), \Phi_j \rangle \quad (9)$$

### 3 误差分析

试验测量进气工况参数不确定度为设定值的 2%, 燃油流量的不确定度小于 0.5%。试验在高温工况下进行, 燃油喷嘴长时间暴露在高温气流中, 将对燃油的初始温度和表面张力造成一定影响, 但由于燃油杆隐藏在翼型喷嘴内, 并不直接受到高温来流的热冲击, 对喷嘴做模型简化处理并进行传热数学分析可知燃油并不会被显著加热, 其不确定度约为 4%。在液膜厚度的图像后处理中, 图像局部存在激光散射效应, 因此通过多次迭代确定最佳阈值, 其不确定度约为 5%。通过 POD 提取脉动主频最大误差小于 2%, 在燃油 SMD 测量前通过校准马尔文粒度分析仪, 经标准

粒子板测量确定其测量误差均小于 2%。因此, 试验最大不确定度约为 11%。

## 4 结果分析

### 4.1 液膜厚度结果分析

通过分析平板预膜喷嘴的液膜厚度随参数的变化, 深入了解进口条件对液膜一次雾化的影响规律。试验拍摄位置位于预膜平板中间位置, 通过对高速摄影仪所拍摄的液膜侧视图进行液膜厚度后处理, 得到预膜平板上液膜厚度变化。试验在高温高压工况下进行, 观察窗玻璃壁厚影响较大, 导致距预膜平板内通道出口 4 mm 内燃油厚度变化数据不准确, 因此本文只统计 4~10 mm 内液膜厚度变化规律。

观察其余工况参数一定时液膜厚度随进口韦伯数的变化曲线, 工况 1 下气流韦伯数对液膜厚度影响如图 10 所示。试验结果表明, 当其余工况参数一定时, 预膜板同一位置液膜厚度随着进口韦伯数的增加, 液膜厚度明显减小。导致液膜厚度减小的原因是当液膜离开预膜内通道出口后, 上表面暴露于高速气流中, 两种流体之间存在动量交换, 液膜受到气流剪切力的作用, 导致液膜厚度减小, 当薄膜接近预膜平板唇口位置时, 这种效应更加显著。且在低进口韦伯数下, 薄膜厚度随着韦伯数增加而迅速减小; 然而, 在高进口韦伯数下, 气流速度对液膜厚度的影响变小。

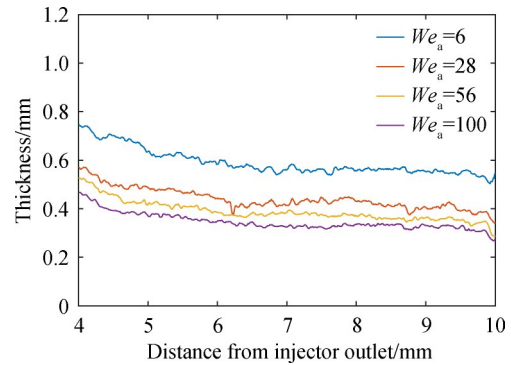


图 10 进口韦伯数对液膜厚度影响

Fig.10 Influence of inlet Weber number on liquid film thickness

观察其余工况参数一定时液膜厚度随燃油流量的变化曲线, 工况 2 下燃油流量对液膜厚度影响如图 11 所示。试验结果表明, 当其余工况参数一定时, 预膜平板上平均液膜厚度随燃油流量的增大而增大。燃油流量增大, 即燃油流速增加, 两

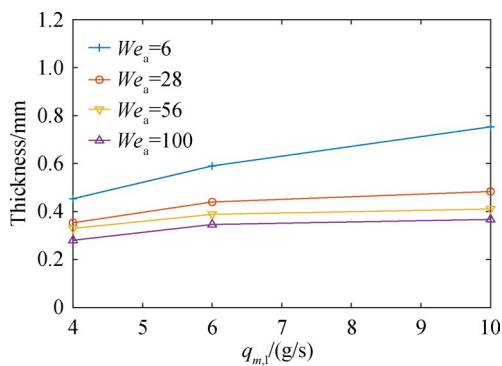


图 11 燃油流量对液膜厚度影响

Fig.11 Influence of fuel flow rate on liquid film thickness

者相对速度减少,降低了气液两相之间的切应力,因此在高进口韦伯数下,燃油流速量级较小,燃油流量对液膜厚度的影响降低。此外在大燃油流量、小进口韦伯数工况下,可以观察到在接近预膜平板内通道出口位置液膜厚度的增加,超过内通道出口高度,这种现象是由于在内通道出口位置对气流的滞止作用,出现了低压区,因此剪切作用在此部分减小,削弱了该区域液膜受到气动力的影响,燃油流速降低,液膜厚度增加,随着进口韦伯数的增加,低压区受到挤压进而导致最大液膜厚度位置向内通道出口接近。

观察其余工况参数一定时液膜厚度随气流温度的变化曲线,工况 3 下气流温度对液膜厚度影响如图 12 所示。试验结果表明,当其余工况参数一定时,预膜平板平均液膜厚度随进气温度的增大而减小。这是因为当来流温度增加时,燃油的蒸发受高温影响明显,预膜平板上贴壁燃油流量减少,导致液膜厚度减少;其次燃油黏性随着温度升高降低,表面张力减小,在高速气流剪切的作用下液膜厚度降低更明显。在低进口韦伯数下,进气温度对液膜厚度影响较大;但在高进口韦伯数

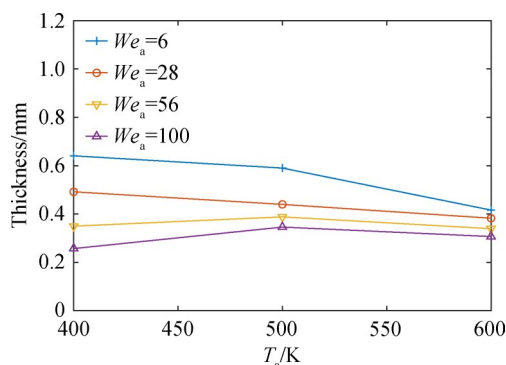


图 12 气流温度对液膜厚度影响

Fig.12 Influence of flow temperature on liquid film thickness

时进气温度对液膜厚度作用不明显。这是由于高进口韦伯数下,气流对燃油液膜剪切作用明显,燃油液膜上方充满了由于表面剥离而脱落的燃油液团,燃油液团充当了隔热层。

观察其余工况参数一定时液膜厚度随进气压力的变化曲线,工况 4 下进气压力对液膜厚度影响如图 13 所示。结果表明,当进口韦伯数、进气温度以及燃油流量一定时,预膜平板平均液膜厚度随进气压力的增大而减小。这是因为当进气压力升高时,来流空气对液膜挤压作用更加明显,所以对于恒定的燃料流量其液膜厚度会降低,意味着燃油流速会随着进气压力增加而增加,即低进口韦伯数高进气压力情况下,进口韦伯数增加对于液膜厚度的影响被削弱。

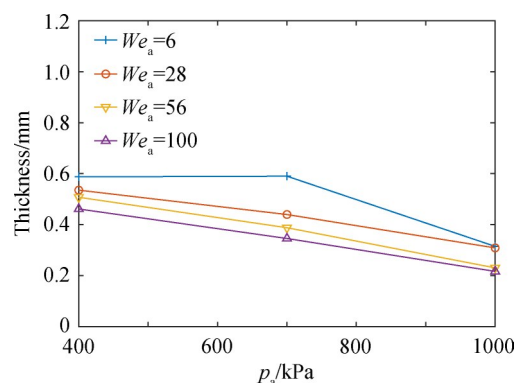


图 13 进气压力对液膜厚度影响

Fig.13 Influence of flow pressure on liquid film thickness

Lefebvre<sup>[17]</sup>对预膜喷嘴的液膜初级雾化过程进行分析,假设液膜中表面切应力等于壁面切应力且为常数,并引入摩擦因数,推导出液膜厚度与相关参数呈幂律关系。通过上述分析和总结试验结果表明,高温环境对液膜的蒸发作用不能忽略,因此引入蒸发系数  $\beta = 1 - 0.01(\Delta T)^{0.5}$ ,其中  $\Delta T$  为气流温升,液膜厚度与进口韦伯数、燃油流量以及进气压力有关,对相关参数进行无量纲化分析,得到了如下拟合经验公式

$$t_{\text{exp}} = 0.05\beta We_a^{-0.25} Re_1^{0.375} \left( \frac{\rho_l}{\rho_a} \right)^{0.3} h_1 \quad (10)$$

液膜厚度经验公式与试验数据对比如图 14 所示(分别用  $h_{\text{cal}}$  和  $h_{\text{exp}}$  表示),在不确定度 30% 的范围内,拟合经验公式与试验数据结果吻合度较好。

## 4.2 液膜波动结果分析

平板预膜喷嘴雾化过程中的非定常特性值得关注,液膜波动周期瞬时图像如图 15 所示(图中  $t_0$  为初始时刻),在液膜内通道出口处,由于液体流

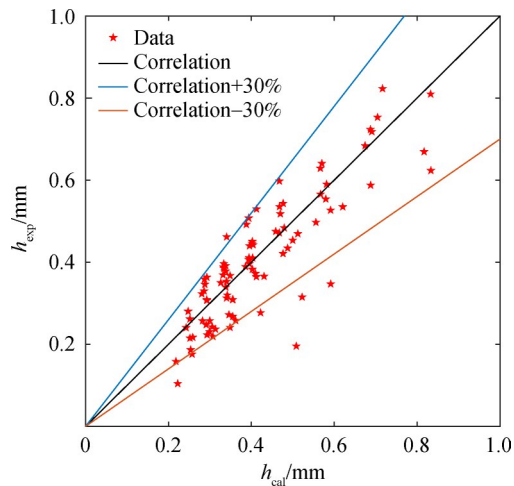


图 14 液膜厚度经验公式与试验数据对比

Fig.14 Comparison between calculated and measured values of liquid film thickness

速低,液体发生积聚,并呈周期性地释放燃油,在预膜区域后半部分由于薄膜和湍流气流之间的相

互作用,附近出现剧烈波动,且伴随着油雾的蒸发,假设波长和频率在时间和空间上随机变化是合理的。

预膜平板前半部分区域的液膜波动是一个周期性的过程,针对液膜波动图像序列进行POD分析。分解得到的模态根据各阶模态的特征值大小进行排序,定义前20阶模态所重构流场的灰度波动幅值,主要模态灰度波动幅值如图16所示,前两个模态灰度波动幅值最大,因此可以认为前两阶模态可以代表流场的主要空间结构。

在整个过程从预膜喷嘴内通道流出的燃油在预膜平板上表面扩散,并暴露在高速气流中;高速气流与液体相耦合并进行动量交换,两相流之间的压差产生波峰或波谷,从而导致表面波的形成,在液膜表面观察到波动现象,这些波动随着燃油传播到喷嘴尾缘位置,但燃油脱离喷嘴发生在靠近尾缘非常小的区域。其中在预膜喷嘴内通道出

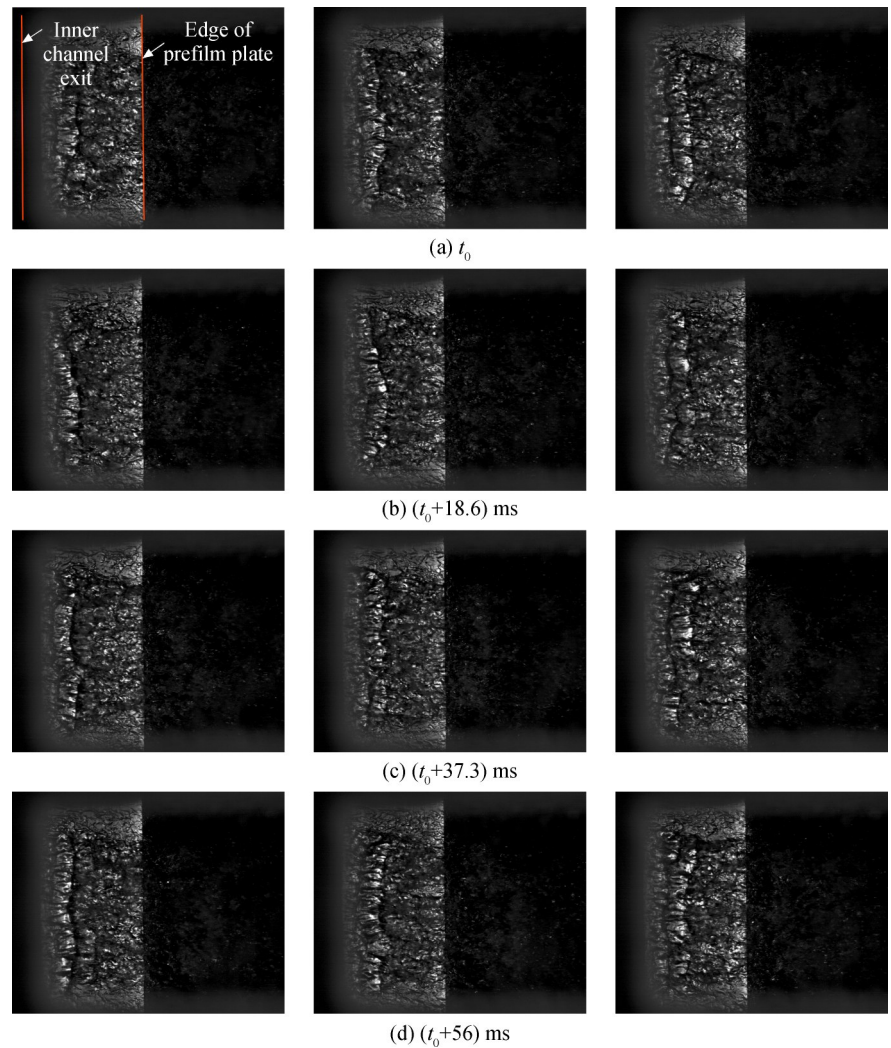


图 15 液膜波动周期瞬时图像

Fig.15 Instantaneous image of liquid film fluctuation period

口附近燃油周期性的波动明显,液膜波动 POD 模态如图 17 所示,其中  $X_c$  和  $Y_c$  分别为喷嘴的轴向和周向坐标,颜色图条代表脉动幅值,灰度波动空间结构中脉动幅值越大代表液膜波动越剧烈,可以观察到流向波动占主导地位,通过 POD 方法分析出的灰度波动空间结构与原始图像吻合较好。

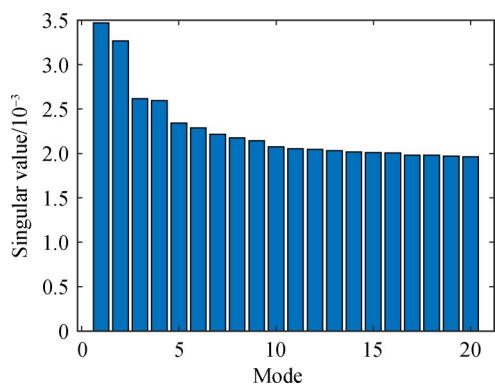
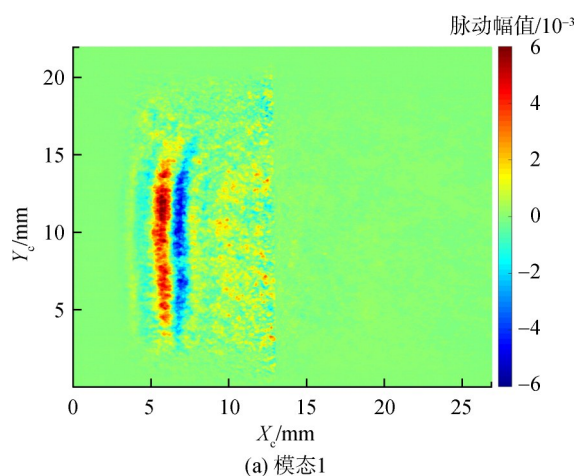
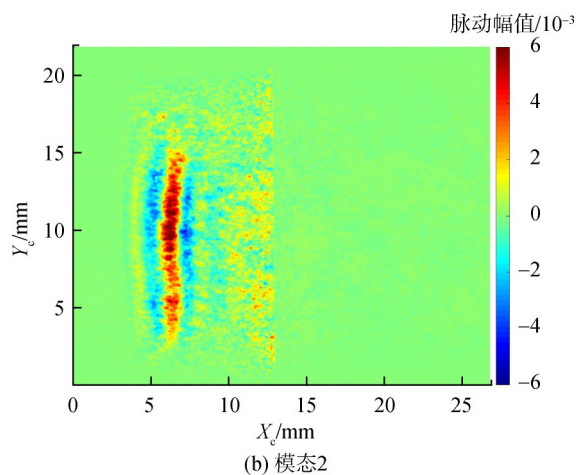


图 16 主要模态灰度波动幅值

Fig.16 Fluctuation amplitude of principal mode gray level



(a) 模态1

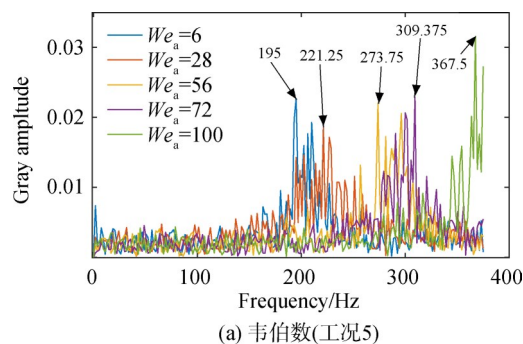


(b) 模态2

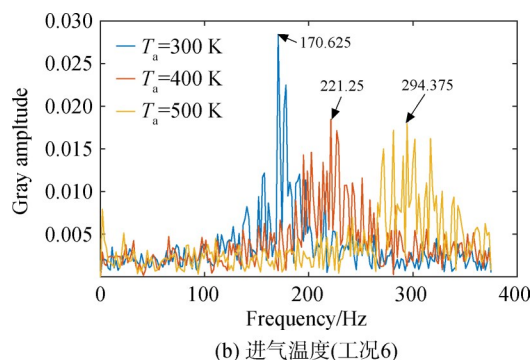
图 17 液膜波动 POD 模态

Fig.17 POD mode of liquid film fluctuation

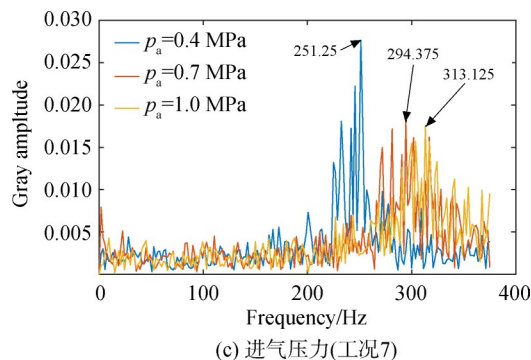
根据高速摄影仪连续图像,当液膜波动是周期性时,对于模态时间系数进行快速傅里叶变换获得液膜波动的频谱。频谱分析仅考虑在平板预膜喷嘴内通道出口附近获得的主要频率,气流速度是影响波动频率的主要参数,如图 18(a)所示,工况 5 下,其他参数不变,仅改变进口韦伯数,观察到脉动主频随着进口韦伯数的增加而增加。这种变化与高速气流对液膜上的剪切强度的变化有关,它们在液体界面上相互作用,是液膜波动的主要原因。如图 18(b)、图 18(c)所示,工况 6 和工况 7 下,其他参数不变,分别改变进气温度和进气压力,观察到脉动主频随着进气压力和进气温度的增加而增加,这种与改变进口韦伯数导致相同的



(a) 韦伯数(工况5)



(b) 进气温度(工况6)



(c) 进气压力(工况7)

图 18 POD 模态时间系数的 FFT 频谱

Fig.18 FFT spectra of POD mode time coefficient

结果是合乎逻辑的,即随着进气压力和进气温度的增加,其液膜厚度的减小导致液膜受到剪切强度有着明显的增加。

### 4.3 SMD 结果分析

SMD 是雾化及燃烧过程的关键参数,本文采用马尔文粒度仪测量距离预膜平板出口位置 25 mm 处燃油液滴的粒径大小。试验工况 8 下,即在不同进气压力下,改变进口韦伯数和燃油流量的对 SMD (记为  $D_{sm}$ ) 的影响规律。如图 19 不同进气压力下韦伯数对 SMD 影响所示,发现进口韦伯数是影响平均液滴尺寸的主要参数,随着进口韦伯数的增加,燃油流量对燃油雾化作用变得不明显。随着进口韦伯数升高, SMD 迅速减小并在高进口韦伯数时达到收敛状态,这是由于作用在液带或液团表面的剪切作用力增加。此外小进口韦伯数时, SMD 随着燃油流量的增加而增加,雾化效果变差,大进口韦伯数时,燃油流量变化对 SMD 影响较小。最后值得注意的是进气压力对 SMD 的影响,在之前的论述中发现当进气压力增加时,预膜平板上液膜厚度减少,直观认为液膜厚

度对液膜破碎机理影响应当较大,但在 SMD 测量中,同一进口韦伯数不同进气压力时其 SMD 并无明显变化,甚至进气压力较高时部分工况测得 SMD 略有上升,平均直径的微小变化可能在测量技术的试验不确定度范围内,即液膜厚度对雾化质量影响较小。这可以从两个方面解释:通过观察原始液膜厚度图像,因为燃油受到表面张力以及附面层的影响,在预膜平板尾缘位置周期性地积聚然后脱落,即预膜平板尾缘有一定的燃油存储效果,大直径液滴由这种方式产生,可以推测这种积聚效果与液膜平板尾缘厚度有关;此外在测量 SMD 位置处在同样受到二次雾化效果的影响,二次雾化进口韦伯数对雾化过程占有主导地位,最终的液滴尺寸取决于初次雾化和二次雾化的控制参数。这解释了液膜厚度在决定最终液滴尺寸方面没有太大作用,未来的研究将试图量化和减少这些不确定性,以便能够更详细地研究液膜厚度对燃油雾化过程的影响。

## 5 结 论

本文通过试验探究了高温高压条件下进气工况参数对平板预膜喷嘴液膜厚度等一次雾化特性影响规律,通过图像边缘提取、POD 分析等获取雾化过程的三个主要雾化参数,即液膜厚度、脉动频率和最终液滴尺寸。通过试验结果分析得到如下结论:

1) 随着进气压力以及进口韦伯数的增加,液膜厚度明显减小,燃油流量对其作用相反,此外在大进口韦伯数下,进气温度对液膜厚度作用不明显,并拟合了相关工况参数与液膜厚度之间的幂律经验公式,其误差在工程接受范围内。

2) 液膜表面存在流向和横向两个方向的波动,通过 FFT 分析发现其流向脉动主频主要取决于气流对液膜施加的剪切强度。

3) 进气压力对液滴平均尺寸影响不明显,进口韦伯数是比气流速度或进气压力更合适的表征燃油雾化效果的参数,液膜厚度并不决定最终液滴尺寸。

以上研究成果为预膜喷嘴的设计与优化提供相应的技术支持。

## 参考文献:

- [1] GOSSELIN V, FERRET B, BAZILE R. Coupled study of film and spray on a basic annular preforming airblast atomizer [R]. Valence, Spain: ILASS - 28th European Conference on

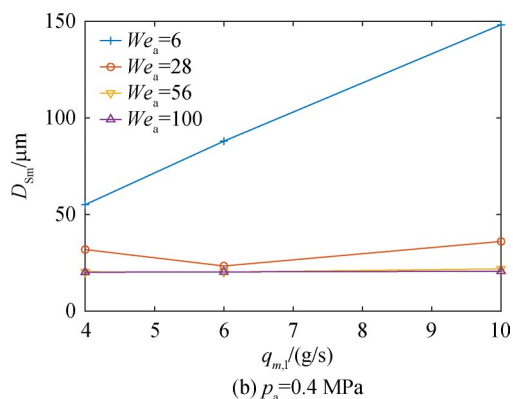
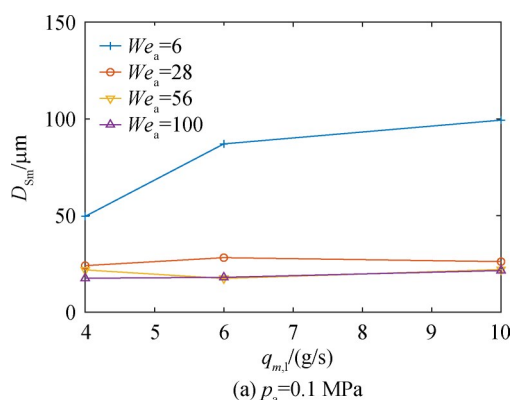


图 19 不同进气压力下进口韦伯数对 SMD 影响  
Fig.19 Influence of the inlet Weber number on SMD with different inlet pressures

- Liquid Atomization and Spray Systems, 2017.
- [2] 刘殿春,董玉玺,尚守堂,等.航空发动机减排关键技术及应用[J].航空制造技术,2008(23):32-37.  
LIU Dianchun, DONG Yuxi, SHANG Shoutang, et al. Effect of liquid film in air atomizer on atomization performance [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008 (23): 32-37. (in Chinese)
- [3] 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(4):42-48.  
ZHAO Qishou, GAN Xiaohua. Effect of liquid film in air atomization nozzle on atomization performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 1991(4):42-48. (in Chinese)
- [4] TAREQ M M, DAFSARI R A, JUNG S, et al. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 126: 124-129.
- [5] LEFEBVRE A H, MILLER D. The development of an airblast atomizer for gas turbine application[R]. Cranfield, UK: Colledge of Aeronautics Cranfield, Colledge of Aeronautics Report Aero 193, 1966.
- [6] LEFEBVRE A H. Atomization and sprays[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [7] LEFEBVRE A H, BALLAL D R, BAHR D W. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132 (11): 443-511.
- [8] ROUDINI M, WOZNIAC G. Experimental investigation of spray characteristics of prefilming airblast atomizers[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2018, 11(6):1455-1469.
- [9] OKABE T, KATAGATA N, SAKAKI T, et al. Effect of prefilmer edge thickness on breakup phenomena of liquid film in prefilming airblast atomizer[R]. Valencia, Spain: ILASS-28th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2017.
- [10] ROUDINI M, WOZNIAC G. Experimental investigation of spray characteristics of pre-filming airblast atomizers II: influence of liquid properties[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2019, 13(2):679-691.
- [11] EBNER J. Modelling of shear-driven liquid wall films: effect of accelerated air flow on the film flow propagation[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2004, 4(3):183-190.
- [12] RIZKALLA A A, LEFEBVRE A H. The influence of air and liquid properties on airblast atomization[J]. Journal of Fluids Engineering, 1974, 97(3):316-320.
- [13] BECK J E, LEFEBVRE A H, KOBLISH T R. Liquid sheet disintegration by impinging air streams[J]. Atomization and Sprays, 1991, 1(2):155-170.
- [14] LEFEBVRE A H, KOBLISH T R, BECK J E. Airblast atomization at conditions of low air velocity[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 7(2):207-212.
- [15] FERNANDEZ V G, BERTHOUMIE P, LAVERGNE G. Liquid sheet disintegration at high pressure: an experimental approach[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2009, 337 (6/7): 481-491.
- [16] SATTELMAYER T, WITTIG S. Internal flow effects in prefilming airblast atomizers: mechanisms of atomization and droplet spectra[J]. Journal of Engineering for Power, 1986, 108(3):465-472.
- [17] LEFEBVRE A H. Airblast atomization[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1980, 6(3):233-261.
- [18] GEPPERTH S, MULLERARMIN, KOCH R, et al. Ligament and droplet characteristics in pre filming airblast atomization[R]. Heidelberg, Germany: ICLASS Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2012.
- [19] 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):482-495.  
HE Changsheng, LIU Yunpeng, HAN Zhongying, et al. Initial atomization characteristics test of planar prefilm nozzle [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35 (3): 482-495. (in Chinese)
- [20] GEPPERTH S, GULDENBECHER D, KOCH R, et al. Prefilming primary atomization: experiments and modeling [R]. Chennai, India: ILASS-Europe Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2010.
- [21] TAIRA K, BRUNTON S L, DAWSON S T M, et al. Modal analysis of fluid flows: an overview[J]. AIAA Journal, 2017, 55(12):4013-4041.

(编辑:陈 越)