

# LPP 燃烧室振荡燃烧特性、火焰结构和 NO<sub>x</sub> 排放的实验研究

孙培锋<sup>1</sup>, 陆启亮<sup>1</sup>, 葛冰<sup>2</sup>, 臧述升<sup>2</sup>

(1. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 利用动态压力传感器、平面激光诱导荧光(Planer Laser Induced Fluorescence, PLIF)测量系统和气体分析仪针对不同入口气流旋流数和空气含湿量条件下, 贫预混预蒸发(Lean Premixed Prevaporized, LPP)燃烧室中振荡燃烧特性、火焰结构变化规律和 NO<sub>x</sub> 排放特性开展了实验研究。研究表明: 在一定条件下, 随着燃烧室入口气流旋流数增加, 激励出振荡燃烧的当量比区域扩大, 所激励的振荡燃烧强度不断增加, 但振荡燃烧的主频则不断下降, 火焰变得更加紧凑且不断向燃烧室中心和上游壁面发展; 随着燃烧室入口空气含湿量的增加, 振荡燃烧强度会下降甚至消失, 振荡燃烧的主频增加, 火焰结构由振荡燃烧时的平整型火焰向稳定燃烧时的 V 型火焰转变, 火焰的位置也向燃烧室侧壁面和下游方向移动; LPP 燃烧室中 NO<sub>x</sub> 排放会随着燃烧室入口空气含湿量和入口气流旋流数的增加而下降。

**关键词:** 贫预混预蒸发; 旋流数; 含湿量; 振荡燃烧; 火焰结构; NO<sub>x</sub>

中图分类号: TK223.21 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgec.2024.01.016

[引用本文格式] 孙培锋, 陆启亮, 葛冰, 等. LPP 燃烧室振荡燃烧特性、火焰结构和 NO<sub>x</sub> 排放的实验研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 149-157. SUN Pei-feng, LU Qi-liang, GE Bing, et al. Experimental study on combustion oscillation characteristics, flame structures and NO<sub>x</sub> emissions of the LPP combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 149-157.

## Experimental Study on Combustion Oscillation Characteristics, Flame Structures and NO<sub>x</sub> Emissions of the LPP Combustor

SUN Pei-feng<sup>1</sup>, LU Qi-liang<sup>1</sup>, GE Bing<sup>2</sup>, ZANG Shu-sheng<sup>2</sup>

(1. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240;  
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

**Abstract:** The combustion oscillation characteristics, evolution laws of flame structure and NO<sub>x</sub> emissions under different swirl numbers and humidities of the inlet fuel-air mixture of the lean premixed pre-vaporized (LPP) combustor were experimental studied by dynamic pressure transducers, planer laser induced fluorescence (PLIF) and gas analyzer. It is found that under certain inlet parameters of the LPP combustor, the equivalence ratio range of the combustion oscillation will expand and the combustion oscillation intensity will increase with an increase of the swirl number of the inlet fuel-air mixture, while the dominant frequencies of the combustion oscillations will decrease, and the flame will become more compact and continuously develop towards the center and upstream wall of the combustion chamber; as the humidity of the inlet fuel-air mixture increases, the intensity of the combustion oscillation in the LPP combustor will decline and even disappear, the dominant frequencies of the combustion oscillations will increase, the flame structure will change from flat to V-shape, and the flame will continuously develop towards the side wall and downstream direction of the combustion chamber; the NO<sub>x</sub> emissions of LPP combustor will decrease with the increase of the swirl number and humidity of the inlet fuel-air mixture.

**Key words:** lean premixed pre-vaporation, swirl number, humidity, combustion oscillation, flame structure, NO<sub>x</sub>

## 引言

随着国际社会对环保的要求越来越高,LPP 燃烧室因低污染排放而受到广泛关注,但其容易激励出振荡燃烧的特性又限制了 LPP 燃烧室的工程应用。因此,很多研究人员针对 LPP 燃烧室的振荡燃烧开展了相关研究。

Temme 等人<sup>[1-2]</sup>研究发现,当量比的波动会导致 LPP 燃烧室的振荡燃烧,使燃烧室中的火焰前后跳动。马存祥等人<sup>[3]</sup>研究发现,中心分级 LPP 燃烧室的燃烧不稳定性由预燃级和主燃级的燃烧/湍流相互作用共同决定,并受到燃油分配比例、头部当量比和燃烧室进口参数等因素影响。Han 等人<sup>[4]</sup>研究发现,存在一个激发 LPP 燃烧室振荡燃烧的临界预热空气温度,超过临界温度时,振荡燃烧会消失。Armitage 等人<sup>[5]</sup>使用 TARTAN 软件计算了 LPP 燃烧室中振荡燃烧的振荡主频和振荡模态,计算结果与实验数据吻合良好。Mesquita 等人<sup>[6]</sup>研究发现,LPP 燃烧室振荡燃烧时,火焰往往呈 M 型(或者平整型),而稳定燃烧时火焰呈 V 型,火焰结构的变化主要是由火焰、燃烧室声学特性和中心回流区漩涡共同引起。Ruan 等人<sup>[7]</sup>研究多喷嘴 LPP 燃烧室的振荡燃烧特性发现,绝热火焰温度越高,振荡燃烧的

频率也会越高,点火延迟时间和放热率特性决定了振荡燃烧的强度。Conrad 等人<sup>[8]</sup>研究发现,不同的主旋流/次级旋流空气比例下的燃烧室振荡燃烧特性会极大地影响燃烧室中的燃烧稳定性及火焰结构。Meier 等人<sup>[9]</sup>利用粒子图像测速仪(PIV)和平面激光诱导荧光(PLIF)研究 LPP 燃烧室振荡燃烧特性,研究发现,剪切层内漩涡脱落和火焰间的相互作用会激励出振荡燃烧。朱嘉伟等人<sup>[10]</sup>采用数值模拟的方法研究发现,热力型 NO<sub>x</sub> 的生成速率和最高燃气温度有直接关系。

尽管已有上述关于 LPP 燃烧室振荡燃烧的相关研究,但是针对不同燃烧室入口空气含湿量和入口气流旋流数条件下,LPP 燃烧室振荡燃烧特性、火焰结构和污染物排放特性的研究相对较少。因此,本文主要关注不同燃烧室入口空气含湿量和气流旋流数下的 LPP 燃烧室的振荡燃烧特性、火焰结构和污染物排放特性。

## 1 实验装置及测量方法

### 1.1 实验装置

实验装置主要包括燃烧空气系统、燃油系统、燃烧实验台架、平面激光诱导氢氧基荧光可视化测量系统(OH-PLIF 系统)和气体分析测试系统。LPP 燃烧实验系统如图 1 所示。LPP 燃烧室详图如图 2 所示。

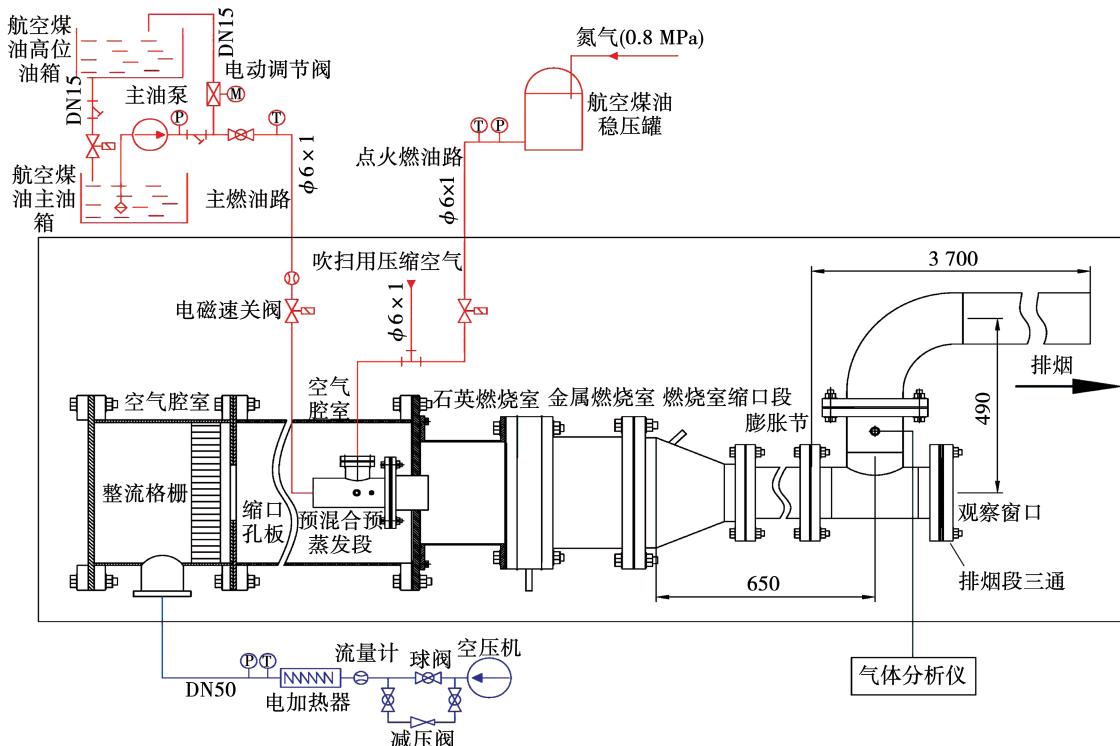


图 1 LPP 燃烧实验系统 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of LPP combustion system (mm)

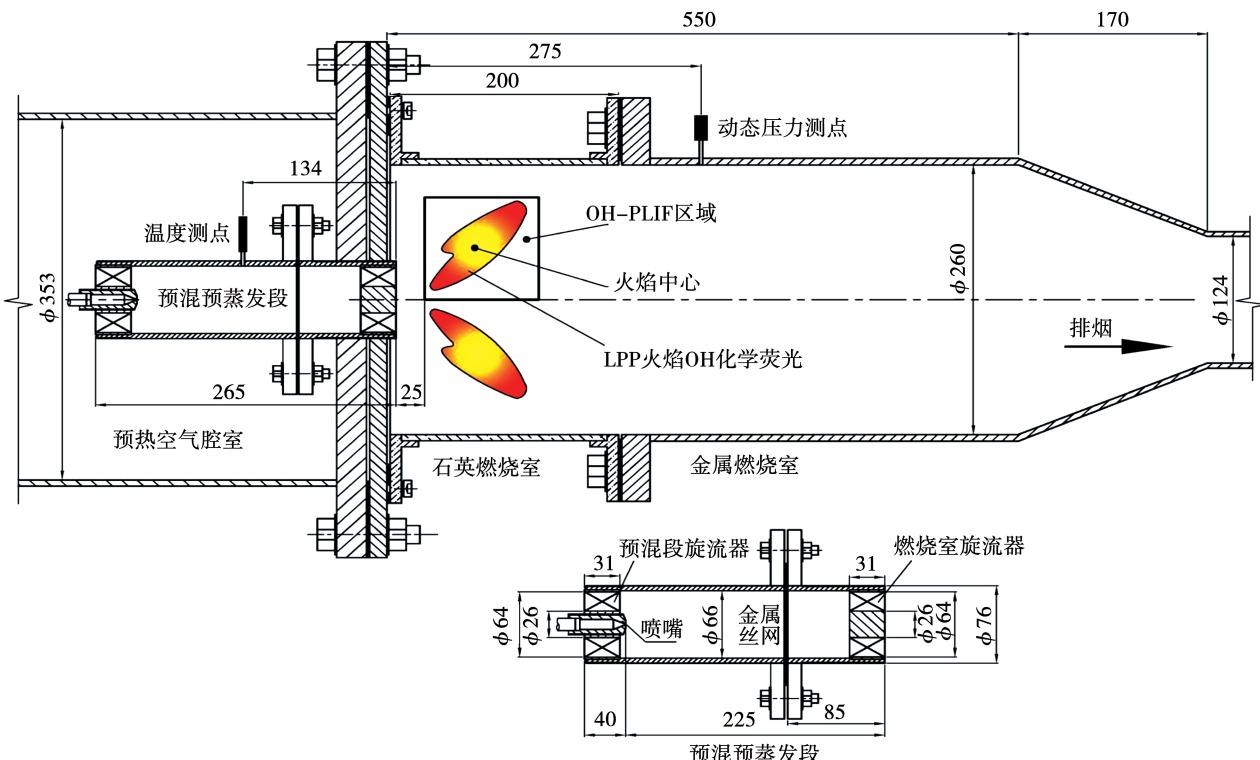


图2 LPP燃烧室(mm)

Fig. 2 Schematic diagram of LPP combustor (mm)

采用斯普瑞公司的60°压力雾化空心喷嘴,喷嘴出口的燃油液滴索太尔平均直径(SMD)为30 μm。预混段旋流器叶片旋流角为55°,燃烧室旋流器叶片旋流角为35°,45°和55°3个不同规格,最终进入燃烧室入口处的旋流数为:

$$S = \frac{\int_0^R 2\pi \rho u_z u_\theta r^2 dr}{R \int_0^R 2\pi \rho u_z^2 r dr} \quad (1)$$

式中: $u_\theta$ ,  $u_z$ —预混预蒸发段末端的切向和轴向速度,m/s;  $\rho$ —燃油空气混合物的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $R$ —旋流通道半径,m;  $r$ —气流所处位置到旋流器中心的半径,m。

计算得到不同旋流器配置下的燃烧室入口气流旋流数如表1所示。

表1 不同旋流器配置下的旋流数

Tab. 1 Calculated swirl number at the combustor inlet of different swirlier configurations

旋流器配置	旋流数
55° ~ 35°	1.04
55° ~ 45°	1.89
55° ~ 55°	2.59

## 1.2 燃烧室声学模态计算

根据经典声学理论,燃烧室内的三维声波方程可以表示为:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

式中: $\nabla^2$ —拉普拉斯算子; $p$ —声压,Pa; $t$ —时间,s; $c_0$ —声速,m/s。

采用有限元方法对声波方程进行离散,得到燃烧室的声模态单元矩阵方程:

$$([\mathbf{K}_f] - \omega^2 [\mathbf{M}_f]) \{p\} = 0 \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{K}_f]$ —声刚度矩阵; $[\mathbf{M}_f]$ —声质量矩阵; $\omega$ —角频率,rad/s。

使用有限元法求得声特征向量 $\{p\}$ 及 $\omega$ ,求得燃烧室的声振频率为:

$$f = \omega / 2\pi \quad (4)$$

式中: $f$ —燃烧室的固有声振频率,Hz。

采用ANSYS的APDL模块开展了实验台架结构的固有声模态频率计算,边界条件和计算参数详见文献[11],得到本实验台架的前4阶固有声振频率分别为76,139,226和288 Hz。

### 1.3 燃油在预混预蒸发段蒸发和停留时间

采用航空煤油  $C_{10}H_{20}$  作为燃油, 根据燃油物性参数<sup>[12]</sup>, 计算得到燃油液滴在预混预蒸发段内的蒸发时间约为 5.4 ms, 不同工况下燃油在预混预蒸发段内的停留时间在 10~18 ms。故可认燃油进入燃烧室前已经完全气化, 燃烧室内实现了预混预蒸发模式的燃烧。

### 1.4 测量方法

采用库力特公司的 Kulite XTL-190(M) 动态压力传感器测量燃烧室内的动态压力信号, 采样频率为 2 500 Hz。采用平面激光诱导荧光(PLIF)测量系统研究火焰内部结构。配置 Quanta-Ray Lab-Series Nd: YAG 激光器, 频率为 10 Hz, 单脉冲最高输出能量为 300 MJ。采用 Andor i334T ICCD 像机测量火焰的氢氧基(OH)荧光信号。采用 DG535 数字延时/脉冲发生器作为同步器开展振荡燃烧火焰结构的锁相 PLIF 测量。采用西门子 ULTRAMAT 23 测量燃烧烟气中的  $NO_x$  体积分数。采样点位于燃烧室下游约 1 300 mm 处, 以保证燃烧反应处于平衡状态。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 LPP 燃烧室振荡燃烧特性

研究了燃烧室入口气流旋流数和当量比对 LPP 燃烧室振荡特性的影响。实验中保持燃烧室入口预热空气温度 500 K、空气含湿量为 0、入口轴向气流速度 37 m/s 不变, 得到了 LPP 燃烧室振荡燃烧的旋流数和当量比区间, 如图 3 所示。

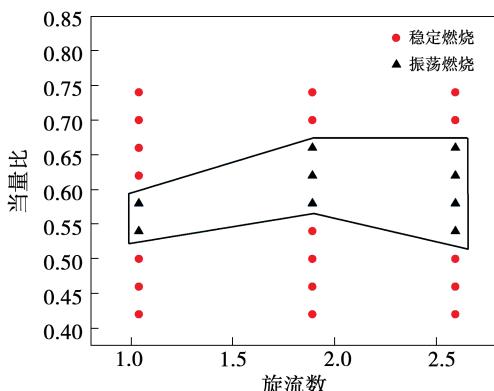


图 3 LPP 燃烧室燃烧稳定性图谱

Fig. 3 Diagram of combustion stability of LPP combustor

由图 3 可知, 激励出振荡燃烧的当量比区间会随着 LPP 燃烧室入口气流旋流数的增加而扩大。当入口气流旋流数为 1.04 时, 只在 0.58 和 0.54 的当量比工况下, 燃烧室中激励出了振荡燃烧; 当入口气流旋流数为 1.89 时, 在 0.58, 0.62 和 0.66 的当量比工况下, 燃烧室内激励出了明显的振荡燃烧; 当入口气流旋流数为 2.59 时, 燃烧室激励出振荡燃烧的工况扩大为 0.54, 0.58, 0.62 和 0.66 4 个当量比工况。可见, 当入口气流旋流数增加时, 燃烧室会更容易激励出振荡燃烧。

研究了当量比为 0.58 工况下, 入口气流旋流数对 LPP 燃烧室振荡特性影响的变化规律, 各工况参数见表 2。

表 2 不同入口气流旋流数实验工况  
Tab. 2 Operating conditions in the experiment under different inlet swirl numbers of airflow

工况	预热空气	入口轴向 流速/ $m \cdot s^{-1}$	含湿量/%
	温度/K	旋流数	
1	500	1.04	37
2	500	1.89	37
3	500	2.59	37

图 4 和图 5 分别为不同入口气流旋流数下燃烧室动态压力时序图和 FFT 变换后的频谱图。从图中可见, 当入口气流旋流数为 1.04 时, 动态压力脉动的波形较为规律, 压力脉动幅值约为 2.0%, FFT 变换后压力频谱图中有 138 Hz 的振荡主频, 对应的均方根压力脉动幅度为 0.784 kPa; 当入口气流旋流数增加为 1.89 时, 动态压力脉动的波形也较为规律, 压力脉动幅值增加到约 3.0%, FFT 变换后频谱图中存在 136 Hz 的主频, 对应的均方根压力脉动幅度增加为 1.095 kPa; 当入口气流旋流数进一步增加为 2.59 时, 动态压力脉动的波形变得更加规律, 压力脉动幅值进一步增加到约 5.0%, 频谱图中 135 Hz 的振荡主频对应的均方根压力脉动幅度增加为 1.814 kPa。可见, 在一定条件下, 随着入口气流旋流数的增加, 振荡燃烧强度会逐渐增加, 但振荡燃烧的主频则会逐渐下降。

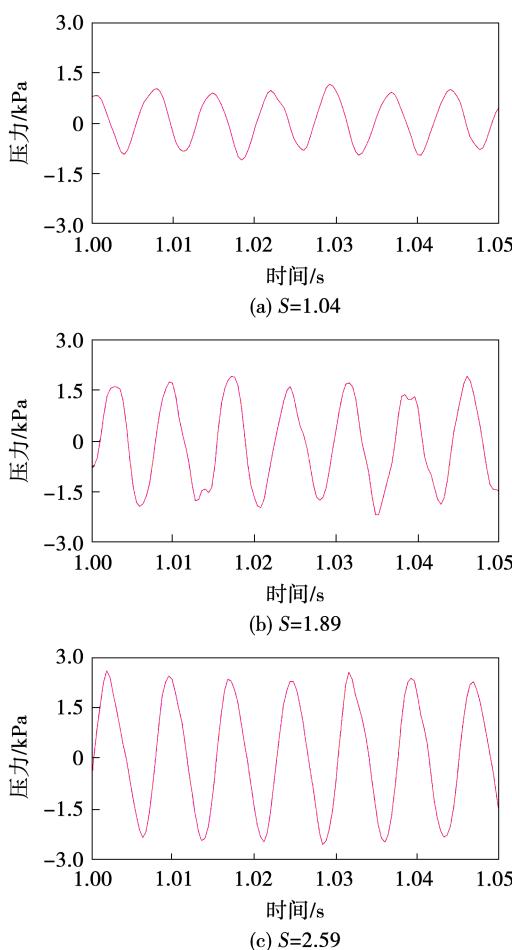


图4 不同入口气流旋流数下燃烧室动态压力时序图

Fig. 4 Sequence diagrams of dynamic pressure fluctuation of combustor under different inlet swirl numbers of airflow

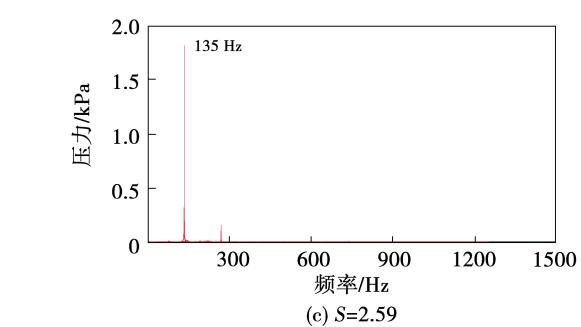
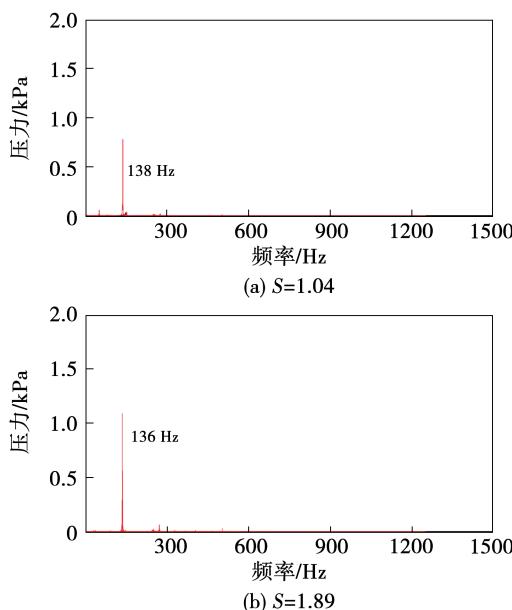


图5 不同入口气流旋流数下燃烧室压力频谱图

Fig. 5 Spectrograms of dynamic pressure of combustor under different inlet swirl numbers of airflow

### 2.1.2 不同入口空气含湿量下的振荡燃烧特性

研究了当量比为 0.66 工况下,不同入口空气含湿量对 LPP 燃烧室振荡特性的影响,各工况参数见表 3。

表3 不同入口空气含湿量实验工况

Tab. 3 Operating conditions in the experiment under different inlet humidities of airflow

工况	预热空气 温度/K	旋流数	入口速度/ $m \cdot s^{-1}$	含湿量/ %
4	500	1.04	25	0
5	500	1.04	25	4
6	500	1.04	25	8

图 6 和图 7 分别为不同入口空气含湿量下燃烧室内动态压力脉动时序图和对应的经 FFT 变换后的频谱图。从图中可见,当燃烧室入口空气中水蒸气含量为 0 时,燃烧室内激励出了强烈的振荡燃烧,动态压力脉动的波形非常明显,压力脉动幅值约为 4.5%,压力频谱图有明显的 135 Hz 的振荡主频,对应的均方根压力脉动幅度为 1.698 kPa;当燃烧室入口空气中水蒸汽的含量为 4% 时,燃烧室内所激励出的振荡燃烧的强度明显下降,动态压力脉动虽然总体上仍然呈现周期性波形,但波形不太规则,压力脉动幅值约下降 3%,对应的均方根压力脉动幅度为 0.581 kPa;当燃烧室入口空气中水蒸汽的含量进一步增加为 8% 时,燃烧已经非常稳定,压力频谱图没有明显的振荡主频,动态压力脉动呈现无规则状态。

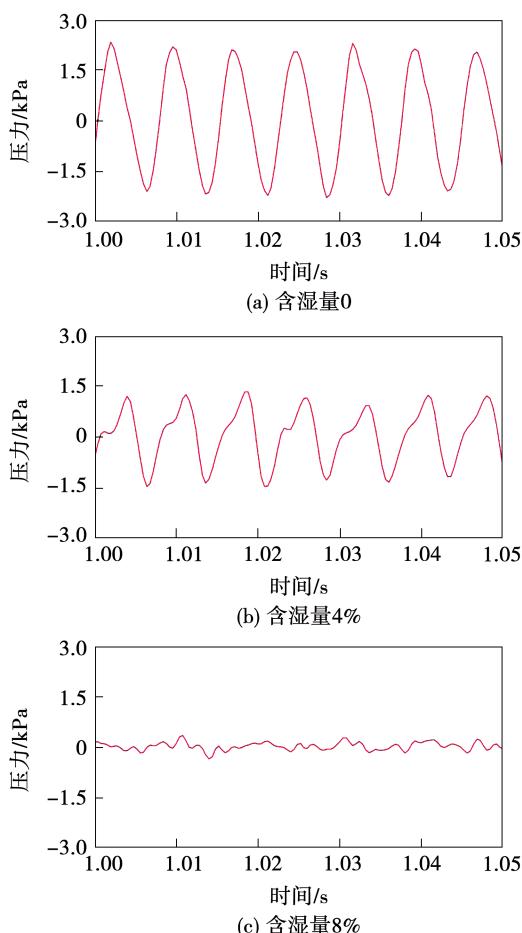


图 6 不同入口空气含湿量下燃烧室内动态压力脉动时序图

Fig. 6 Sequence diagrams of dynamic pressure fluctuation of combustor under different inlet humidities of airflow

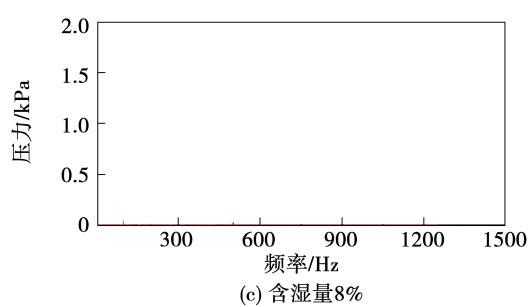
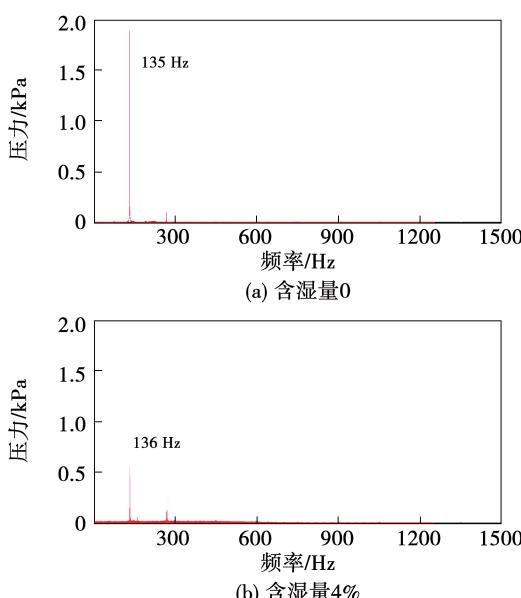


图 7 不同入口空气含湿量下燃烧室内压力频谱图

Fig. 7 Spectrograms of dynamic pressure of combustor under different inlet humidities of airflow

可见,随着入口空气含湿量的增加,所激励的振荡燃烧强度会下降直至消失,燃烧由振荡转为稳定。可能是随着燃烧室入口空气含量的增加,燃烧室反应区内的绝热火焰温度不断下降,燃烧室内的热负荷不断降低,从而使得原先的振荡燃烧无法维持而趋向于稳定燃烧。另外,空气中含湿量的增加,也会影晌燃烧室中的流场结构,进而影响火焰和流场之间的相互作用,导致燃烧状态发生变化<sup>[2,13]</sup>。

## 2.2 LPP 火焰结构

实验中,观察到各工况的 LPP 火焰总体呈现 V 型和平整形两种结构,如图 8 所示。

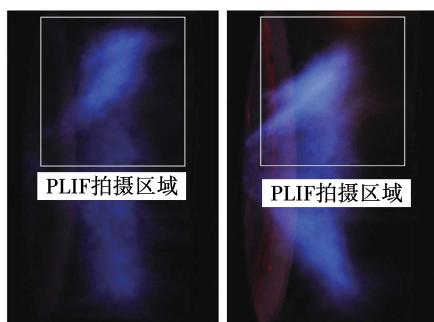


图 8 平整型火焰(左)和 V 型火焰(右)

Fig. 8 Flat (left) and V-shaped (right) LPP flames

### 2.2.1 不同入口空气旋流数下的火焰结构

图 9 为不同燃烧室入口气流旋流数下(表 2 工况)的火焰结构,图中横纵坐标为喷嘴和燃烧室及火焰结构的空间位置。由图 9 中可知,不同旋流数下的火焰总体上较为相似,都为平整型火焰,且可分为靠近燃烧室中心和靠近燃烧室侧壁面两部分火焰。随着燃烧室入口气流数的增加,靠近燃烧室轴线处的火焰和靠近燃烧室侧壁面处的火焰会慢慢融

合,并且火焰中心向燃烧室中心轴线方向和上游壁面方向移动,整个燃烧室内的火焰变得更加紧凑。

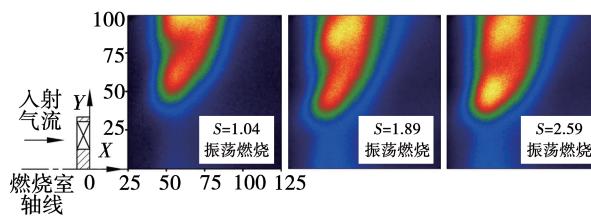


图9 不同入口气流旋流数下火焰结构 (mm)

Fig. 9 Flame structures under different inlet swirl numbers of airflow (mm)

## 2.2.2 不同入口空气含湿量下的火焰结构

图10为不同燃烧室入口空气含湿量下的火焰结构。由图10中可知,当入口空气含湿量为0%时,LPP燃烧室内激励出了强烈的振荡燃烧,火焰结构为平整型;当入口空气含湿量增加为4%时,LPP燃烧室内的振荡燃烧强度下降,火焰张角开始变小,开始向V型火焰转变,同时火焰的OH浓度下降;当入口空气含湿量为8%时,LPP燃烧室中的振荡燃烧消失,燃烧变得稳定,火焰的结构呈现V型,火焰的OH浓度值进一步下降。随着入口空气含湿量的增加,火焰所在的位置不断地向燃烧室侧壁面和下游方向移动,LPP火焰也变得更加松散。

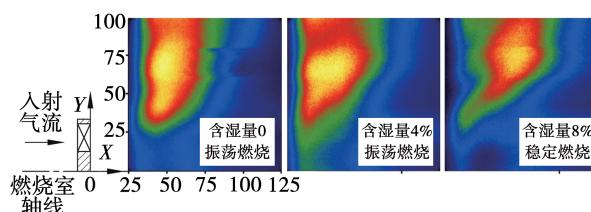


图10 不同入口空气含湿量下火焰结构 (mm)

Fig. 10 Flame structures under different inlet humidities of airflow (mm)

## 2.2.3 火焰结构与振荡燃烧的关系

由各工况的火焰结构可见,当LPP燃烧室内激励出振荡燃烧时,火焰结构基本呈现为平整型,当LPP燃烧室的燃烧变得稳定时,火焰结构转变为V型。实验得到的燃烧状态和火焰结构关系间的结论与Mesquita等人<sup>[4]</sup>和Mestuita等人<sup>[14]</sup>的实验结果相同。

当火焰结构为平整型时,燃料从喷嘴喷出到开始燃烧处的距离基本相等,在入口气流流速不变的前提下,燃料从喷嘴喷出后到开始参与燃烧的延迟

时间也基本相等,容易满足参考文献[15]关于时间延迟和振荡燃烧周期比值的要求(详见式(5)),从而激励出振荡燃烧。

$$n - 1/4 < \frac{\tau}{T} < n + 1/4 \quad (5)$$

式中: $\tau$ —燃油从喷嘴喷出到参与燃烧化学反应的延迟时间,s; $T$ —1个振荡燃烧周期的时长,s; $n$ —自然数。

而V型火焰锋面的不同位置处参与燃烧的燃油从喷嘴出口到反应区的距离不同,相应的延迟时间也不相同。部分火焰区域的燃料从喷嘴出口到燃烧的延迟时间满足式(5),会激励出振荡燃烧,而部分火焰区域处的延迟时间不满足式(5),反而会抑制振荡燃烧,使得V型火焰的燃烧更稳定。这也解释了实验中随着燃烧室入口气流旋流数的增加,激励出振荡燃烧的当量比区间会变大的原因。燃烧室流场中剪切层的张角会随着旋流数的增加变大,火焰也会相应变得平整,燃油从喷嘴出口到参与燃烧反应的延迟时间更易满足式(5)的要求,更易激励出振荡燃烧。

另外,平整型火焰所处的位置更靠近燃烧室上游壁面的波腹点<sup>[16-17]</sup>,火焰热量释放更加集中,更易于实现放热率波动和压力波动的耦合,从而激励出振荡燃烧。

## 2.3 LPP燃烧室污染物排放特性

### 2.3.1 不同入口气流旋流数下的污染物排放特性

实验中,测量了不同燃烧室入口气流旋流数下各工况的NO<sub>x</sub>体积分数(15%的O<sub>2</sub>含量下的NO<sub>x</sub>排放值,下同),如图11所示。

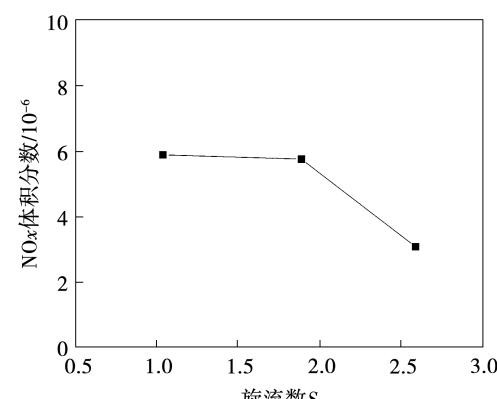


图11 入口气流旋流数对NO<sub>x</sub>体积分数影响

Fig. 11 Effect of inlet swirl number of airflow on NO<sub>x</sub> volume fraction

由图 11 中可知,当入口气流旋流数从 1.04 增加到 2.59 时,燃烧尾气的  $\text{NO}_x$  体积分数会从  $5.89 \times 10^{-6}$  降低到  $3.09 \times 10^{-6}$ 。可能的原因是入口气流旋流数的提高导致流场中回流效应更加明显,回流的烟气会降低高温反应区的温度。同时,因为火焰不断向燃烧室上游壁面发展,使得燃烧反应的高温区不断远离燃烧室尾气的采样点,故测得的  $\text{NO}_x$  体积分数会不断下降。

### 2.3.2 不同入口空气含湿量下的污染物排放特性

实验中,测量了不同燃烧室入口空气含湿量下的  $\text{NO}_x$  体积分数,如图 12 所示。

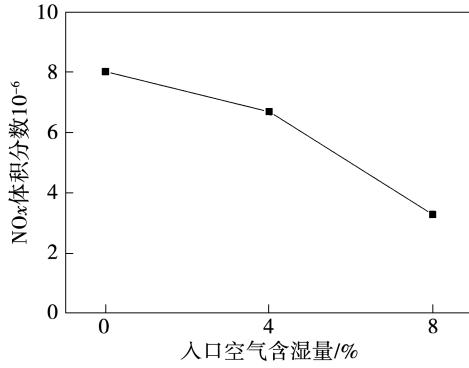


图 12 入口空气含湿量对  $\text{NO}_x$  排放影响

Fig. 12 Effect of inlet humidity of airflow on  $\text{NO}_x$  volume fraction

由图 12 中可知,随着燃烧室入口空气含湿量从 0 增加到 8%,LPP 燃烧室的  $\text{NO}_x$  体积分数会从  $8.01 \times 10^{-6}$  降低到  $3.29 \times 10^{-6}$ 。可能的原因是随着燃烧室入口空气含湿量的提高,燃烧区域的温度下降,从而使得燃烧室的  $\text{NO}_x$  体积分数下降。即往人口空气中掺入水蒸气能显著降低 LPP 燃烧室中的  $\text{NO}_x$  体积分数。本实验中,在燃烧室入口空气中添加约 8% 的水蒸气,可将  $\text{NO}_x$  体积分数降低约 59%。

## 3 结 论

开展了不同入口参数下,LPP 燃烧室的自激振荡燃烧的特性、火焰结构和污染物排放特性的实验研究,得到如下结论:

(1) 在一定条件下,随着 LPP 燃烧室入口气流旋流数的增加,振荡燃烧的当量比区间会变大,所激

励出的振荡燃烧强度也会增加,但振荡燃烧的主频会随着入口气流旋流数的增加而下降。靠近燃烧室轴线处的火焰和远离燃烧室轴线处的火焰会慢慢融合,整个燃烧室内的火焰变得更加紧凑,火焰向燃烧室上游壁面移动,同时火焰的 OH 浓度会不断增加。

(2) 随着燃烧室入口空气含湿量的增加,LPP 燃烧室中的振荡燃烧强度会下降,直至变成稳定燃烧,但振荡燃烧的主频会随着燃烧室入口空气含湿量的增加而增加。LPP 火焰的形状会从振荡燃烧时的平整型火焰转化为稳定燃烧时的 V 型火焰,火焰会向燃烧室下游方向移动,同时火焰的 OH 浓度会不断下降。

(3) 根据实验中不同工况下测得的动态压力信号频谱图中的振荡主频,结合燃烧室的声学模态分析,认为 LPP 燃烧室中所激励出的振荡燃烧为二阶轴向振荡模态。

(4) LPP 燃烧室的  $\text{NO}_x$  排放会随着燃烧室入口空气含湿量和旋流数的增加而下降。

## 参 考 文 献:

- [1] TEMME J E, ALLISON P M, DRISCOLL J F. Combustion instability of a lean premixed prevaporized gas turbine combustor studied using phase-averaged PIV [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(4):958–970.
- [2] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J F. Unsteady aspects of lean premixed prevaporized gas turbine combustors: Flame-flame interactions [J]. Journal of Propulsion and Power, 2011, 27(3): 631–641.
- [3] 马存祥,孙 露,马 鑫,等.贫油预混预蒸发燃烧室燃烧不稳定性试验研究 [J].推进技术,2019,40(3):602–607.  
MA Cun-xiang, SUN Lu, MA Xin, et al. Experimental study on combustion instability of lean premixed pre-vaporized combustor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(3):602–607.
- [4] HAN X, LAERA D, MORGANS A S, et al. Inlet temperature driven supercritical bifurcation of combustion instabilities in a lean premixed prevaporized combustor [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 109:1–11.
- [5] ARMITAGE C A, CANT R S, DOWLING A P, et al. Linearised theory for LPP combustion dynamics [C]//ASME Turbo Expo, Collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference, Atlanta, USA, 2003.
- [6] MESQUITA L C, VIE A, ZIMMER L, et al. Numerical analysis of flame shape bifurcation in a two-stage swirled liquid burner using

- large eddy simulation [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5971–5978.
- [7] RUAN C, ZHANG L, CHEN F, et al. Thermoacoustic instability characteristics and flame/flow dynamics in a multinozzle lean premixed gas turbine model combustor operated with high carbon number hydrocarbon fuels [J]. Energy and Fuels, 2021, 35(2): 1701–1714.
- [8] CONRAD T, LUBARSKY E, ZINN B, et al. "Slow" control of combustion instabilities by fuel spray modification using smart fuel injector [C]//42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2004.
- [9] 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): 2–26.
- [10] 朱嘉伟, 颜应文, 李诗, 等. LPP 低污染燃烧室两相喷雾燃烧性能数值研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 792–800.  
ZHU Jia-wei, YAN Ying-wen, LI Shi, et al. Numerical investigation of two-phase spray combustion performance for LPP low-emission combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 792–800.
- [11] SUN Pei-feng, YUAN Yi-ren, GE Bing, et al. Combustion oscillation characteristics and flame structures in a lean premixed pre-vaporized combustor [J]. Energy and Fuels, 2017, 31(9): 10060–10067.
- [12] FRANZELLI B, RIBER E, SANJOSE M, et al. A two-step chemical scheme for kerosene-air premixed flames [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(7): 1364–1373.
- [13] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J F, et al. Vortex-shedding and mixing layer effects on periodic flashback in a lean premixed pre-vaporized gas turbine combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2901–2908.
- [14] MESTUITA L C, VIE A, DUCRUIX S. Flashback-induced flame shape transition in a two-stage LPP aeronautical combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(4): 4781–4790.
- [15] LIEUWEN T, ZINN B T. The role of equivalence ratio oscillations in driving combustion instabilities in low NO<sub>x</sub> gas turbines [J]. Symposium (International) on Combustion, 1998, 27(2): 1809–1816.
- [16] HUANG Y, SUNG H G, HSIEH S Y, et al. Large-eddy simulation of combustion dynamics of lean-premixed swirl-stabilized combustor [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(5): 782–794.
- [17] THERKELSEN P L, PORTILLO J E, LITTLEJOHN D, et al. Self-induced unstable behaviors of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> flames in a model combustor with a low-swirl injector [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(2): 307–321.

(刘颖 编辑)

## (上接第118页)

- [17] THIELICKE W, STAMHUIS E. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB [J]. Journal of Open Research Software, 2014, 2(1): 30.
- [18] 赵博, 吴蔚, 竺晓程, 等. 二维无叶扩压器旋转失速的正交模态分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 122–128.  
ZHAO Bo, WU Wei, ZHU Xiao-cheng, et al. Orthogonal modal analysis for rotating stall of two-dimensional vaneless diffuser [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 122–128.
- [19] 张赫辉, 薛翔, 竺晓程, 等. 基于本征正交分解的无叶扩压器流动稳定性 Galerkin 降阶模型[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8): 16–21.  
ZHANG He-hui, XUE Xiang, ZHU Xiao-cheng, et al. Galerkin reduced-order model for flow stability of vaneless diffuser based on proper orthogonal decomposition [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 16–21.
- [20] SAHA A K, MURALIDHAR K, BISWAS G. Experimental study of flow past a square cylinder at high Reynolds numbers [J]. Experiments in Fluids, 2000, 29(6): 553–563.
- [21] FENG L H, WANG J J, PAN C. Proper orthogonal decomposition analysis of vortex dynamics of a circular cylinder under synthetic jet control [J]. Physics of Fluids, 2011, 23(1): 014106.
- [22] HE G S, LI N, WANG J J. Drag reduction of square cylinders with cut-corners at the front edges [J]. Experiments in Fluids, 2014, 55(6): 1–11.
- [23] FENG L H, WANG J J. The virtual aeroshaping enhancement by synthetic jets with variable suction and blowing cycles [J]. Physics of Fluids, 2014, 26(1): 014105.
- [24] FENG L H, WANG J J. Modification of a circular cylinder wake with synthetic jet: Vortex shedding modes and mechanism [J]. European Journal of Mechanics, B: Fluids, 2014, 43: 14–32.
- [25] YU H, CHEN W L, HUANG Y, et al. Dynamic wake of a square cylinder controlled with steady jet positioned at the rear stagnation point [J]. Ocean Engineering, 2021, 233: 109157.

(姜雪梅 编辑)