

声激励下旋流钝体火焰的非线性 响应实验

吴昀辉, 傅 宸, 高 怡, 王晓阳, 夏 溪
(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 在常压条件下对二甲醚贫燃预混旋流钝体火焰施加 100 Hz 的外加声激励, 运用高速 OH^* 化学发光成像和粒子图像测速锁相同步测量的实验方法, 针对不同速度脉动比例下的火焰形态特征和流场特征的动态变化开展可视化测量, 得到火焰描述函数。研究发现, 随着声波幅值增大, 火焰的热释放率先线性增加, 在到达扰动临界点后, 火焰出现非线性响应现象, 实验中的临界速度脉动比例为 16%。同时, 通过逆阿贝尔变换和本征正交分解等方法比较了火焰线性响应与非线性响应工况的流场和燃烧场差异, 发现在非线性响应工况下火焰形态的涡卷起和流场中的外回流区涡脱落特征增强, 这表明外回流区涡脱落增强现象可能是诱发火焰非线性响应的原因。

关 键 词: 非线性响应; 旋流火焰; OH^* 化学发光(OH^*CL); 粒子图像测速(PIV); 本征正交分解(POD)
中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Experiment on nonlinear response of swirling bluff-body flame with external acoustic forcing

WU Yunhui, FU Chen, GAO Yi, WANG Xiaoyang, XIA Xi
(School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The experimental measurement of lean premixed swirling bluff-body dimethyl ether flames excited by an external acoustic forcing at 100 Hz was carried out at atmospheric pressure. With the help of the phase-locked high-speed OH^* chemiluminescence imaging and particle image velocimetry, the visualization of the flame dynamic characteristic of both the flame shape and the flame flow field with different pulsation amplitudes of the velocity was achieved. Based on these images, the dynamic process of the flame was analyzed by the flame describing function. It was found that the heat release rate first linearly increased as the forcing amplitudes increased, and the nonlinear flame response was recognized when the critical value of the velocity fluctuation ratio was reached. The velocity fluctuation ratio of 16% was the critical value in this experiment. Meanwhile, the difference between linear and nonlinear flame responses was analyzed by means of inverse Abel transformation and proper orthogonal decomposition. The experimental results

收稿日期: 2021-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(U2141221, 52076136, 51776191, 52006139, 12072194);
国家重大科技专项(2017-III-0007-0033, 2017-III-0008-0034)

作者简介: 吴昀辉(1997—), 女, 硕士生, 主要从事外加声激励下火焰非线性响应研究。

通信作者: 高怡(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事湍流喷雾燃烧激光诊断技术及应用研究。E-mail: gaoyisjtu@sjtu.edu.cn

引用格式: 吴昀辉, 傅宸, 高怡, 等. 声激励下旋流钝体火焰的非线性响应实验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1872-1885. WU Yunhui, FU Chen, GAO Yi, et al. Experiment on nonlinear response of swirling bluff-body flame with external acoustic forcing[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(9): 1872-1885.

showed that the vortex roll-up of the flame shape and the vortex shedding of the flame flow field was enhanced in the nonlinear flame response. From the above analysis, it can be inferred that the enhancement of vortex shedding in the outer recirculation zone of the flame flow field induced the nonlinear flame response.

Key words: nonlinear response; swirling flame; OH^{*} chemiluminescence (OH^{*} CL); particle image velocimetry (PIV); proper orthogonal decomposition (POD)

贫燃预混燃烧技术被认为是目前最具发展潜力的低NO_x燃烧技术^[1],且相较于扩散火焰而言,预混火焰结构紧凑,更有利于缩减燃烧器的尺寸。然而,这种技术往往容易受到燃烧室内工况变化的影响,表现出强烈的压力脉动和热释放率脉动,最终引发热声振荡现象。这种现象对燃烧室的危害极大,严重时甚至会威胁发动机的安全运行^[2-4]。

因此,近几十年来,国内外学者针对热声振荡现象的产生机制和预测模型开展了大量的研究,以期最终能够制定相应的策略来抑制甚至避免热声振荡的发生。关于燃烧不稳定现象的相关研究主要包含两类:第一类是针对火焰自身在燃烧过程中产生的具有一定频率和幅值的声波与燃烧场发生的热声耦合现象,称为火焰的自激振荡;第二类是针对火焰在外加声激励下的动态响应,称为外激下的火焰响应特性研究^[5],外加声激励条件一般是利用扬声器或者旋笛来实现的。北京航空航天大学杨甫江等针对贫燃预混旋流火焰开展了热声特性实验^[6],通过改变当量比研究了自激振荡从开始至达到极限环状态的非线性演化过程,并利用低阶声网络模型加以数值验证,结果表明旋流引起的复杂流场结构和当量比脉动是引发热声振荡的重要原因。美国密歇根大学 Temme 等利用锁相粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术分析了贫燃预混预蒸发火焰中出现的 80 Hz 和 160 Hz 双频率主导的低频自激振荡^[7],并推断这一现象是由当量比脉动引起的。美国佐治亚理工学院的 Thummuluru 等借助平面激光诱导荧光 (planar laser induced fluorescence, PLIF) 技术研究了外部声激励下旋流火焰动态响应的变化^[8],发现了火焰的响应不受任何单一物理过程的控制,而是受几个同时发生的且存在潜在竞争关系的物理过程控制,并且火焰响应机制受声激励频率和激励幅值的影响较大。

综上,燃烧过程中热声振荡现象的发生往往伴随着复杂的多物理场相互作用,要实现对燃烧热声不稳定现象的预测和控制仍是燃烧领域的一

项巨大挑战^[4,9-10]。本文的研究目的是在前人研究的基础上,针对二甲醚(DME)火焰详细剖析其火焰响应机制。通过高速 OH^{*}化学发光和 PIV 同步锁相测量的方法,研究外加声激励条件下贫燃预混旋流钝体火焰的非线性动态响应的现象和成因,加深对流场与火焰相互作用的理

1 实验装置与测量系统

1.1 燃烧器实验装置

实验中使用的燃烧器简图如图1所示。在实验过程中,一定流量的二甲醚和空气按设计比例进入燃烧器,经过竖直布置的腔室混合后流经旋流器,再经由出口端直径为 25 mm 的钝体,进入高为 150 mm、截面为 95 mm×95 mm 的方形头部燃烧室中。燃烧室四面均为透光性良好的石英玻璃,玻璃厚度为 3 mm,长度和高度分别为 95 mm 和 150 mm。燃烧器中的旋流器采用增材制造工艺加工,由 12 片直叶片组成,叶片与轴向的角度为 45°。根据文献[11]中介绍的具有中心钝体的环形旋流器旋流数计算公式(式(1)),可以计算得到其对应的旋流数为 0.74,属于强旋流范围。

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_1/D_2)^3}{1 - (D_1/D_2)^2} \right] \tan \theta \quad (1)$$

其中 S 是旋流数, D_1 和 D_2 分别是中心钝体的直径和旋流器所在流道的截面直径, θ 为叶片角。

实验中保持混合气当量比为 0.65,属于贫燃范围。燃烧室入口的设计流速为 7.5 m/s,详细实验工况见表 1。在实验过程中,燃料和空气的流量分别由质量流量计(七星华创, D07-9E 和 D07-60B 系列)控制,流量控制精度分别为 $\pm 1.0\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 。使用平均直径为 1 μm 的氧化铝颗粒作为 PIV 示踪粒子,经由粒子发生器将粒子均匀布撒到空气流道中。速度脉动比例是通过选取 PIV 图像中方形头部燃烧室入口处 3 像素×3 像素区域计算平均速度,后对 100 个周期内该区域的平均速度进行快速傅里叶变换 (fast Fourier

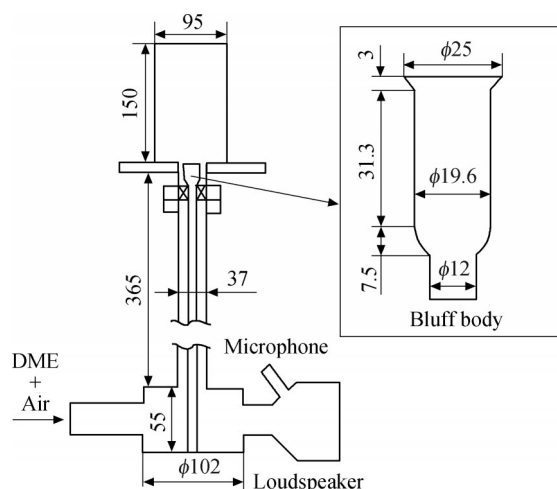


图1 燃烧器示意简图(单位:mm)

Fig.1 Schematic of the burner (unit: mm)

表1 实验工况表

Table 1 Experimental conditions

工况	电压幅值/mV	速度脉动比例/%
A0	0	0
A1	50	4
A2	100	8
A3	150	12
A4	200	16
A5	300	20
A6	400	23
A7	500	26
A8	700	34

transform, FFT)分析得到的。

之前的研究中,大多是单纯通过信号发生器来定量改变施加的声波频率和幅值从而控制速度脉动比例。此种情况扬声器持续工作,其产生的热量累积可能导致其内阻发生变化,进而导致扬声器输出的声激励幅值发生变化,造成燃烧器内声激励的实际幅值未知。针对这一问题,本实验对控制外加声激励幅值的方式进行了相应的改进。声激励系统主要由功率放大器(Yamaha, A-S501)、扬声器(Hivi, SS6.5R)、麦克风(BSWA, MA401)、传声器供电调理设备(BSWA, MC102)、数据采集卡(NI, PCIe-6363)和数据采集/处理计算机构成,如图2所示。箭头指示信号的传递方向,实验过程中通过LabVIEW集成程序控制整个声激励系统的通讯。相对于燃烧室预混腔的混合气入口,最大输出功率为120 W,额定电阻为5 Ω

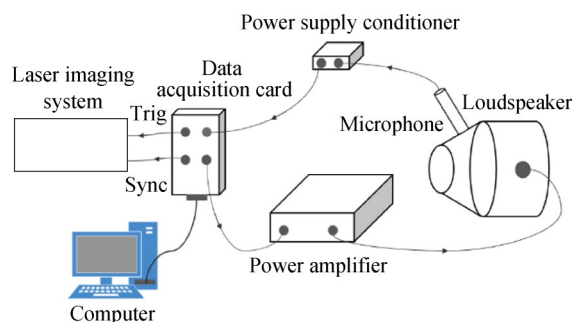


图2 声激励系统示意图

Fig.2 Schematic of the acoustic forcing system

的扬声器和对应的麦克风布置在预混腔的另一侧。麦克风声压信号在数据采集中被转化为电压幅值,再将其与每组工况设定的电压幅值比较,利用PID(proportional integral derivative)反馈调节保证实际电压幅值恒等于设定值。在电压幅值达到稳定后,则假定声激励导致的速度脉动比例恒定。此时LabVIEW程序才会输出触发信号(Trig)和同步信号(Sync)到光学诊断系统,实现整个实验的同步锁相功能。

由于火焰具有低频滤波特性,即火焰更易对低频扰动(50~450 Hz)产生响应^[12],同时真实燃烧室出现热声振荡的频率也大多是百赫兹的倍频,因此本实验主要针对100 Hz谐波扰动下的火焰响应展开研究。

1.2 光学测量系统

图3为实验搭建的光学诊断系统示意图,该系统主要包括双脉冲固体激光器(Beamtech, Vlite-Hi-527)、光片整形组件、高速相机(Phantom, v2012)、可编程时序控制单元(LaVision, PTU X)和图像采集计算机。其中,双脉冲激光器输出波长为527 nm,平均单脉冲能量为4 mJ,单个脉冲的持续时间约为10 ns,双脉冲之间的时间间隔为50 μ s。激光束经由光片整形组件产生厚度约为1.5 mm、高100 mm的激光片光,垂直入

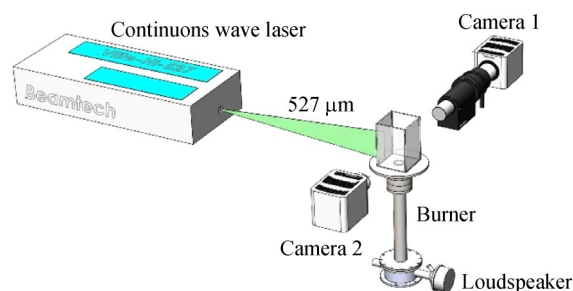


图3 光学诊断系统示意图

Fig.3 Schematic of the optical diagnostic system

射燃烧器出口的中心截面。两台正对布置的高速 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 相机均配有紫外镜头(焦长为 105 mm), 分别负责火焰 OH^* 化学发光(相机 1, 紫外镜头前装有滤波片 Semrock FF01-315/15-48D 和 SCHOTT UG11) 和 PIV (相机 2, 紫外镜头前装有滤波片 Edmund #84-114) 测量。同时, 由于滤波后火焰的化学发光信号较弱, 需要在高速相机 1 前加装一台像增强器 (Lambert, HiCATT 25) 放大化学发光信号强度。相机 1 和相机 2 的视场范围分别约为 $114 \text{ mm} \times 184 \text{ mm}$ 和 $122 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 经校准后, 对应的空间分辨率分别为 $143 \mu\text{m}/\text{像素}$ 和 $156 \mu\text{m}/\text{像素}$ 。

实验利用可编程时序控制单元来实现激光器、两台高速相机和像增强器之间的时序控制。激光器频率和相机拍摄频率设置为 2.4 kHz, 像增强器的曝光时间为 $20 \mu\text{s}$ 。相机 1 拍摄张数为 2 400 张, 相机 2 设置为双帧拍摄模式, 两帧之间的拍摄时间间隔为 $50 \mu\text{s}$, 共拍摄 2 400 对图像。因此, 每组工况共记录 2 400 张火焰 OH^* 化学发光图像和 4 800 张 PIV 图像, 即记录了 100 Hz 声激励下 100 个周期的火焰变化信息, 且每个周期均有 24 张图像。由于两台相机和激光器是锁相的, 因此相邻两张图像之间对应的相位差为 15° 。通过对火焰在不同声激励幅值下的 OH^* 化学发光和 PIV 图像处理, 可以进行火焰和流场的动态响应特征分析。

针对火焰 OH^* 化学发光图像, 由于其展示的是视线积分后的火焰形态, 因此本文在数据分析中, 采用逆阿贝尔变换的方法反演得出钝体出口中心截面的火焰二维形态^[13]。所用的方法是三点法, 这个方法是目前较为通用的一种逆阿贝尔变换方法。但变换后仍存在一定的计算误差, 主要出现在图像的中心轴线附近。同时, 由于火焰对声激励的响应是周期性的, 本文采用相平均的方法将实验中 100 个周期内同一相位的瞬态图像进行平均, 可以更好地分析同一周期内不同相位的火焰形态变化。在对图像进行相平均处理后, 再利用逆阿贝尔变换方法得到火焰的相平均逆阿贝尔变换图像。

针对 PIV 图像, 采用 Davis 8.4 软件对采集的速度场数据进行分析。首先选取火焰区域作为计算域, 利用标准的顺序迭代互相关算法逐步减小迭代窗口大小, 图像分析中窗口大小从 48 像素 $\times$

48 像素(空间重叠率为 50%)减小为 24 像素 $\times$ 24 像素(空间重叠率为 50%), 最终得到火焰的二维速度分布。

2 火焰动态响应特性

2.1 火焰的响应函数

在火焰动态响应特性的研究中, 火焰传递函数(flame transfer function, FTF)和火焰描述函数(flame describing function, FDF)理论的应用十分广泛。FTF 适用于描述入口处速度扰动较小的情形^[14]。当火焰受到较大幅值的外激时, 需要考虑非线性响应的重要性, 因此发展了 FDF 的理论^[15]。

针对火焰非线性响应中出现的热释放率饱和现象, Dowling 等在文献[16]中利用 FDF 对其进行描述, 具体数学表达式如下:

$$\frac{q'}{q} = \begin{cases} \left(\frac{q'}{q} \right)_1, & \left| \frac{q'}{q} \right| \leq \alpha \\ \alpha \operatorname{sgn} \left(\frac{q'}{q} \right), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\frac{q'}{q}$ 代表热释放率; α 代表与饱和现象相关的

常数(通常 $0 \leq \alpha \leq 1$); $\left(\frac{q'}{q} \right)_1$ 代表低幅值扰动下的

热释放率, 这一比值可以通过 FTF 计算出来。

由于无法直接测量火焰热释放率, 实验中一般使用光电倍增管或者 ICCD(intensified charge coupled device)相机通过测量 CH^* 或 OH^* 化学发光的方法表征火焰的热释放率^[4, 17-18]。在预混火焰中, OH^* 的浓度较 CH^* 稍高, 因此本实验采用 OH^* 化学发光强度标识火焰的热释放率。此时, FDF 对应的函数表达式为

$$F(\omega, u) = \frac{I'_{\text{OH}^*}/I_{\text{OH}^* \text{ave}}}{U/U_{\text{ave}}} \quad (3)$$

其中 $I'_{\text{OH}^*}/I_{\text{OH}^* \text{ave}}$ 指征火焰全局热释放率的脉动; U/U_{ave} 表示燃烧室入口速度的脉动, 一般采用 PIV、热线风速仪或双麦克风法等测量钝体出口的速度脉动^[18]。

本实验中, 对测量得到的 OH^* 化学发光信号强度和钝体出口流速作 FFT, 得到 100 Hz 声激励下不同激励幅值对应的归一化的 OH^* 信号强度脉动(对应全局热释放率)和速度脉动, 再利用式(3)可计算得到 FDF。表 1 中所列各个实验工况的数

据处理结果如图 4 所示,图例中标注了不同颜色对应的工况组别。其中,图 4(a)、图 4(b)分别展示了对应的火焰 OH^* 化学发光强度和来流速度脉动的 FFT 频谱图,将两者在 100 Hz 处的脉动比例

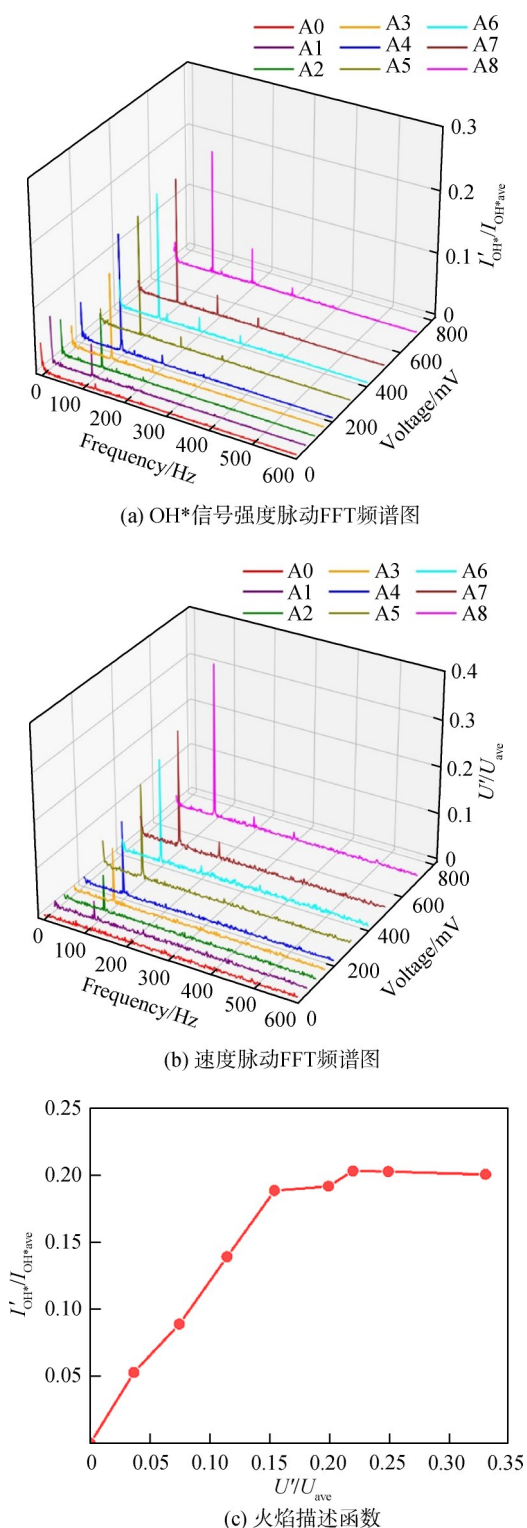


图 4 不同工况条件下的火焰响应对比

Fig.4 Comparison of flame response under different conditions

分量汇总展示于图 4(c)中,可以明显观察到火焰的热释放率脉动随着速度脉动的增加呈先增加(线性响应)后趋于稳定(即达到饱和状态)的变化趋势。因此可以得出,二甲醚贫燃预混旋流钝体火焰随着所施加的声激励幅值的增大,发生了非线性响应的现象。将图 4(c)中的数据与表 1 中的工况一一对应,可以明确组别 A1~A4 对应火焰的线性响应区,组别 A5~A8 对应火焰的非线性响应区。由于所测实验工况和图片数据较多,下文的分析仅从线性和非线性响应区各挑选一个实验工况点进行分析对比,即工况 A3 和 A7,以探究二甲醚贫燃预混旋流钝体火焰线性与非线性响应特性的异同。

2.2 火焰的形态特征

2.2.1 线性与非线性响应火焰的形态特征对比

利用实验中获得的火焰 OH^* 化学发光图像可以进一步分析二甲醚贫燃预混旋流钝体火焰的动态响应特性。图 5 中显示的是火焰线性响应工况 A3 和非线性响应工况 A7 的相平均逆阿贝尔变换图像。

在本节分析中,将 OH^* 化学发光强度值最小的图像定义为 0° 相位,前后两张图像间的相位间隔为 30° ,因此声激励周期内可以展示 12 个相位的火焰形态。

图 5 所示为线性(A3)和非线性(A7)响应工况中 100 个声激励周期内的火焰 OH^* 化学发光相平均逆阿贝尔变换图像,图中 x 、 y 分别为火焰的径向和轴向位置。对比观察图 5(a)、图 5(b),不难发现,相较于火焰的线性响应工况,非线性响应工况中火焰形态变化更加剧烈,且周期内不同相位 OH^* 化学发光信号强度差异明显。针对线性响应工况 A3,即图 5(a),火焰形态基本保持稳定的 V 型,未出现明显的涡旋卷起,即此时火焰内剪切层稳定,外回流区几乎没有发生反应,仅能观察到火焰面积的细微变化。图 5(b)中,非线性响应工况 A7,在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 相位时火焰呈现明显的涡旋卷起形态,即火焰发展到下游之后开始向上游外回流区卷曲以维持稳定。根据文献[19]中的描述,这时火焰主要依靠内剪切层及外回流区稳定,火焰面积变化剧烈。Bellows 等针对甲烷旋流火焰的实验研究中指出^[20],涡旋卷起后火焰面积的剧烈变化是非线性响应的原因之一。另外,可以观察到从 $120^\circ \sim 270^\circ$ 相位之间火焰的高度逐渐增加。为了进一步观察声激励周期内的热释放率脉

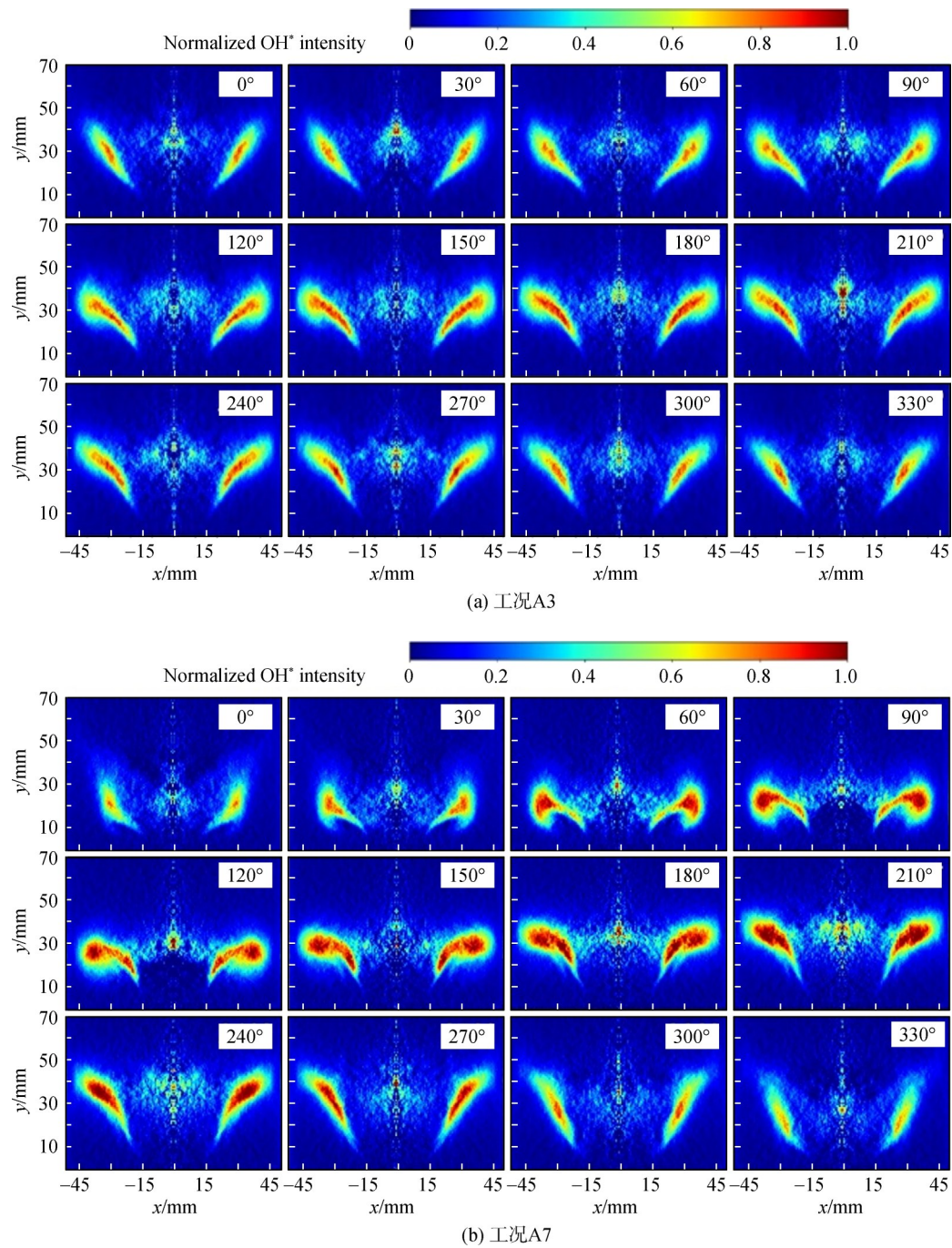


图5 火焰OH^{*}化学发光相平均逆阿贝尔变换图像

Fig.5 Phase-averaged OH^{*} CL images of flame obtained by inverse Abel transformation

动,对100个周期的OH^{*}化学发光图像进行相平均逆阿贝尔变换,然后对得到的每一个相位的图像强度进行平均,再进行统计分析,得到上述两个工况所对应的一个声激励周期内不同相位的OH^{*}化学发光强度演变趋势,如图6所示。

从图6中工况A3对应的OH^{*}化学发光强度变化可以直观地发现周期内的强度值变化近似于一条标准的正弦曲线,其中165°相位的OH^{*}化学发光强度最大。在该工况下火焰处于线性响应区,这表明其周期性热释放脉动对应的是一个近似于单频率的响应。而非线性响应工况A7却显示出OH^{*}化学发光强度变化曲线存在两个不同的峰值,这说明其周期性热释放率脉动可能展现为多个频率的响应,此时强度最大值出现在225°相位处,较线性响应工况的最大值滞后了60°,对应1/6个声激励周期。在图4(a)OH^{*}化学发光的

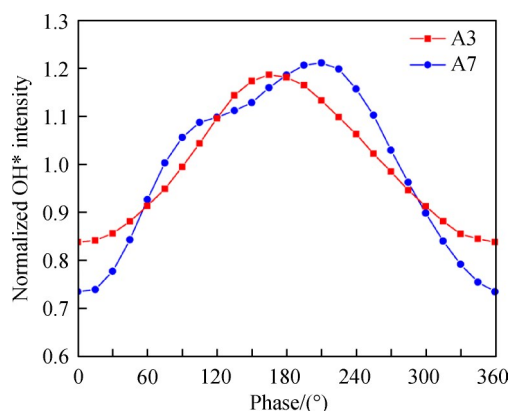


图6 基于100个声激励周期的相平均逆阿贝尔变换图像对比工况 A3 和 A7 的 OH^* 化学发光强度随相位的变化曲线

Fig.6 Phase-averaged OH^* CL intensity obtained by inversed Abel transformation over 100 acoustic periods in case A3 and case A7

FFT 频谱图中,工况 A7 的火焰热释放率脉动出现 100 Hz 和 200 Hz 这两个频率的特征峰,其中 200 Hz 频率的信号并不是实验中施加的,而是 100 Hz 声激励与火焰相互作用的过程中诱导产生的二倍频信号。

质心坐标是量化火焰形态变化的一个重要物理量,声激励周期内不同相位火焰图像中质心坐标的变化能够反映其径向和轴向上的响应特征。因此,本文对 100 个声激励周期的火焰相平均图像质心位置进行了统计和分析。由于火焰是对称的,为简化计算本文仅关注火焰左半部分的质心位置的变化,并以火焰中心对称轴线与钝体出口平面的交点为坐标零点。图 7 展示了声激励周期

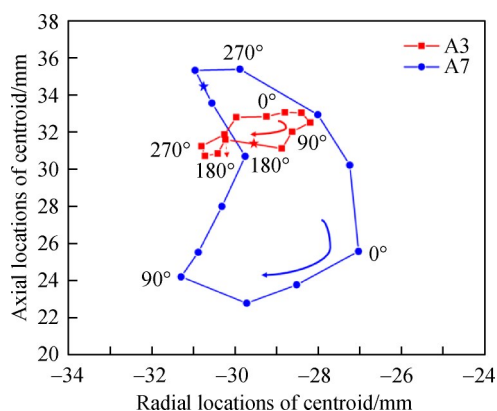


图7 基于火焰 OH^* 化学发光相平均逆阿贝尔变换图像对比工况 A3 和 A7 火焰质心坐标轨迹变化

Fig.7 Trajectory of axial and radial centroid locations in phased-averaged OH^* CL images obtained by inverse Abel transformed in case A3 and case A7

内的平均质心位置坐标轨迹,该轨迹图对比展示了工况 A3 和 A7 火焰质心坐标的变化情况。

从图 7 中可以看出,在声激励周期内质心坐标的变化过程是一个闭环,从 0° 相位开始质心坐标呈现出沿顺时针方向变化的趋势,这与文献[3]中的研究结果类似。其中,★符号标注的是相平均 OH^* 化学发光强度最大值所对应的相位,图 6 已给出相关描述。可以发现相较于工况 A3,工况 A7 的★号出现在火焰轴向上更下游的位置,在径向上更远离钝体中心。从线性到非线性响应,闭环的面积在径向和轴向上均有所增加,纵向坐标的增量是横向增量的 3 倍,可以明显看出,轴向施加的声激励使得火焰在轴向上的响应相较于径向上来说更为显著。

2.2.2 基于火焰形态特征的本征正交分解分析

为了进一步剖析火焰动态响应的特点,本文采用本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)方法,得到两种工况所对应的火焰的主导模态特征信息。分析发现,在瞬态图像数量大于等于 480 之后,POD 模态特征信息趋于收敛。在保证模态特征信息准确性的同时,为了降低计算成本,本文选取了 600 张瞬态图像进行 POD 分析。

图 8 展示了经过 POD 分析之后的两个工况所对应的前 10 阶模态能量占比,可以看出不管是线性响应工况 A3 还是非线性响应工况 A7,前两阶模态的能量占比均显著高于其他阶模态,这说明前两阶模态表征了该工况主要的热释放脉动特征,其中第 1 阶模态起主导作用。非线性响应工况 A7 的前两阶模态能量占全部模态能量的比例约为 57%,而线性响应工况 A3 的前两阶能量总占比约为 22%,即 A7 工况约是 A3 工况的 2.6 倍。另外,对两个工况来说,前 4 阶模态能量之和均约为总能量的 62%,之后几阶的模态能量占比均小于 1%。因此,本文选取 POD 分析中前 4 阶模态开展火焰形态空间分布和 POD 时间系数的 FFT 频谱分析。

图 9、图 10 分别展示了两个工况所对应的前 4 阶模态和 FFT 频谱图。其中,图像颜色对应的数值大小表示火焰热释放强度的变化趋势,正值表示热释放强度增加,负值则代表热释放强度减小。而 POD 分析的计算结果是根据能量比重按顺序将若干个模态排列得到的,因此第 1 阶模态的火焰图像往往代表了旋流火焰最主要的

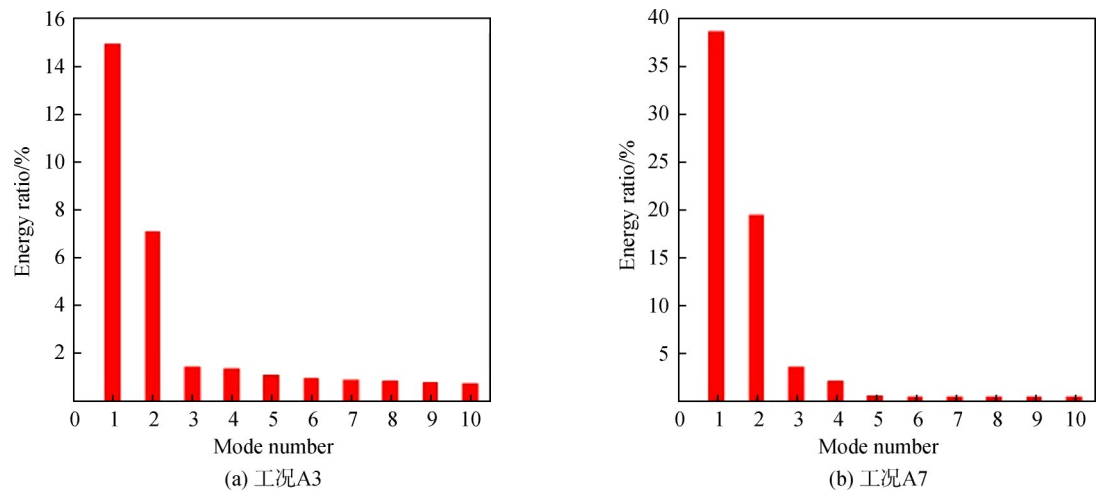


图 8 对比 A3 和 A7 工况下基于火焰 OH^{*} 化学发光图像得到的前 10 阶 POD 模态能量占比
Fig.8 The first 10 energy ratios between the corresponding POD mode and total obtained from OH^{*} CL images for case A3 and case A7

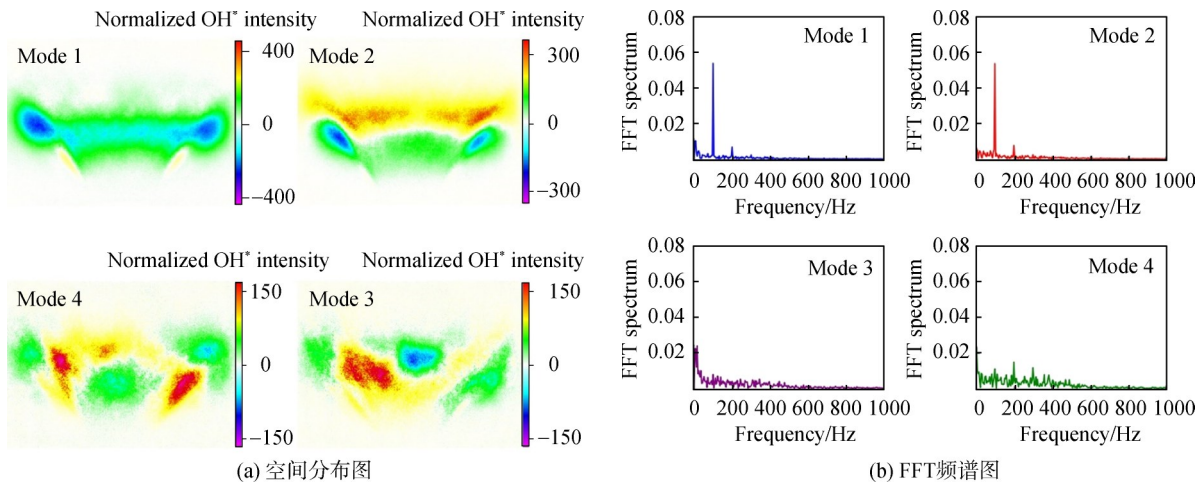


图 9 工况 A3 中基于 OH^{*} 化学发光图像得到的前 4 阶 POD 模态及相应的 FFT 频谱
Fig.9 The first 4 POD modes and the corresponding FFT spectrum calculated from OH^{*} CL images for case A3

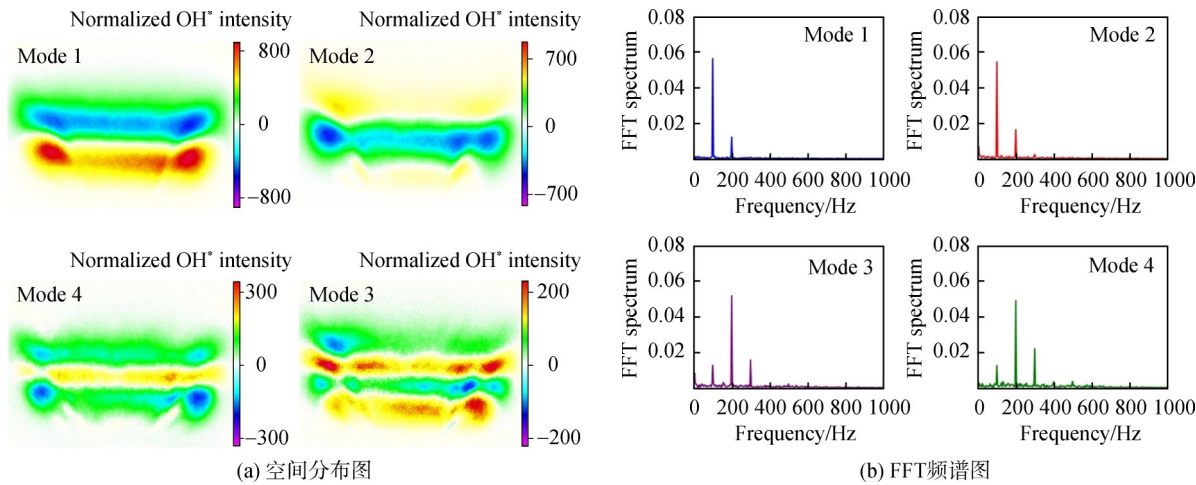


图 10 工况 A7 中基于 OH^{*} 化学发光图像得到的前 4 阶 POD 模态及相应的 FFT 频谱
Fig.10 The first 4 POD modes and the corresponding FFT spectrum calculated from OH^{*} CL images for case A7

动态信息,它显示了火焰在声激励下热释放的主要脉动特征。

从图 9(a)中的第 1、2 阶模态可以看出,火焰信号呈现上下分布且具有此消彼长的特征,说明火焰的热释放脉动主要在轴向上,与实验中施加的轴向声激励相对应。同时观察图 9(b)中给出的这 4 阶模态对应的频率特征,可以看出,第 1、2 阶模态均由 100 Hz 频率主导,并伴随着小幅值的 200 Hz 频率信号,分别约为 100 Hz 频率信号的 12.6% 和 9.5%,这两个模态可认为具有相似的火焰响应模式;第 3、4 阶模态没有明显的主导频率信息,且总能量占比较小。

观察图 10(a)可知,非线性响应时旋流火焰 POD 模态的空间分布呈现更加明显的轴向热释放脉动特征。其中,第 1 阶模态呈现上下两层分布的形式,对应文献[21]中提出的涡脱落模式,而第 2、3 阶模态中出现的上、中、下 3 层分布和第 4 阶模态中出现的上下 4 层分布,均反映了轴向热释放率脉动的高阶模态特征,这与张弛等在研究中观察到的高阶轴向运动模态一致^[22],并推断这一现象与旋流火焰在轴向上的传播和脱落有关。结合图 10(b)里的频率信息,第 1 阶模态表现出 100 Hz 主导的热释放变化,并伴随着小幅值的 200 Hz 频率信号,与线性响应工况中的前两个模态频谱相似。第 2 阶模态中开始出现微弱的 300 Hz 频率信号;第 3 阶模态中 200 Hz 和 300 Hz 频率信号进一步增强,100 Hz 频率峰值则开始减弱;而第 4 阶模态中,300 Hz 频率信号继续增强,出现微弱的 400 Hz 和 500 Hz 频率信号。与图 10(a)的分析对应,后 3 阶模态指示的是高阶涡脱落模式,三者总能量占比约为 25%。然而,在线性响应工况中没有出现上述类似的形态特征,可以推测高阶的涡脱落模式是火焰的非线性响应在热释放脉动上区别于线性响应的一项特征。

2.3 火焰的流场特征

从火焰的形态特征分析中发现,非线性响应工况 A7 的火焰 OH^{*} 化学发光图像的前 4 阶 POD 模态中存在高阶涡脱落模式,因而需要进一步结合 PIV 实验结果显示的流场特征分析流场与火焰的相互作用,以加深对声波扰动下火焰响应的理解。

图 11 对比了有、无声激励作用下旋流燃烧器钝体出口下游冷场的时均速度场。由于流场具有对称性,这里仅选取流场中左半部分的 PIV 结果

进行对比分析,其中 V_y 表示的是轴向速度, r 是钝体顶部半径,为 12.5 mm。图 11(a)中标注了旋流火焰对应的典型流场区域,包括内回流区(inner circulation zone, IRZ)、外回流区(outer circulation zone, ORZ)、环形射流(annular jet)、内剪切层(inner shear layer, ISL)和外剪切层(outer shear layer, OSL)。对比图 11(a)和图 11(b)可以发现,在冷态工况下,声激励对燃烧室的流场结构影响显著,环形射流出现明显的横向扩张,IRZ 和 ORZ 内的涡旋均向燃烧室上游偏移,表征火焰的回流速度增大。

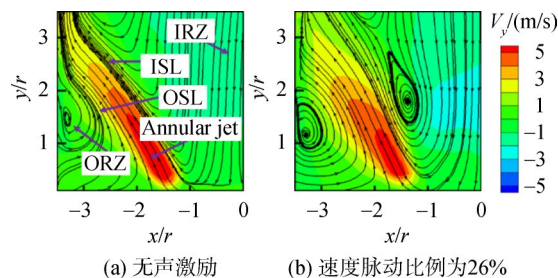


图 11 两种冷态工况时均流线与轴向速度云图
Fig.11 Time-averaged streamline and axial velocity contour in cold airflow for the two cases

2.3.1 基于火焰流场特征的本征正交分解分析

为了进一步验证火焰形态变化和流场变化的空间分布特征以及 POD 时间系数的 FFT 频谱特征,对 PIV 流场进行 POD 分析得到前 10 阶模态的能量占比,如图 12 所示。对比图 8 可以发现,图 12 中各阶模态的能量占比分布趋势与通过 OH^{*} 化学发光图像处理得到的 POD 模态能量占比相似,主要区别是各阶模态的能量占比在数值上有所降低。同样地,分别选取两种工况中的前 4 阶模态开展分析,如图 13 和图 14 所示。图 13 和图 14 中,燃烧流场 POD 模态空间分布图中的箭头代表流场中的速度向量,图中的颜色指示流场的涡量大小,橙红色对应涡量为正,深蓝色对应涡量为负。

图 13(a)中显示,线性工况下第 1 阶模态中,涡量出现了微弱的卷曲趋势,并伴随着涡脱落,其中外部区域的脱落较弱;同时第 2、3 阶模态表现出几乎一致的轴向分布的涡量场形态,仅在剪切层内侧出现涡脱落。通过图 13(b)所示的频谱图,可以看出该工况下前 3 阶模态均表现出流场受 100 Hz 信号主导的特征,而第 4 阶模态已经没有明显的频率信息,仅显示出湍流特征。结合图

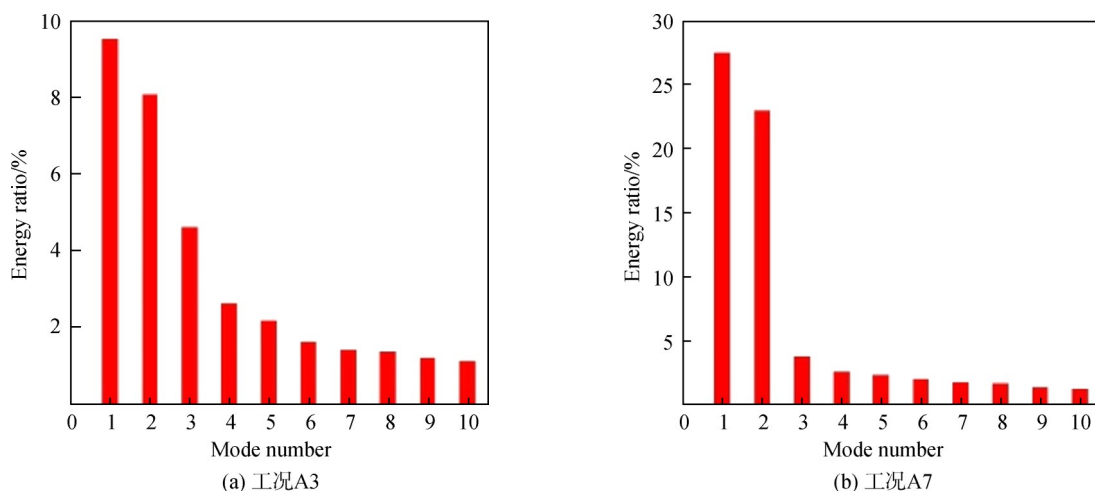


图12 对比A3和A7工况下基于PIV速度分布得到的前10阶POD模态能量占比

Fig.12 The first 10 energy ratios between the corresponding POD mode and total obtained from PIV velocity results for case A3 and case A7

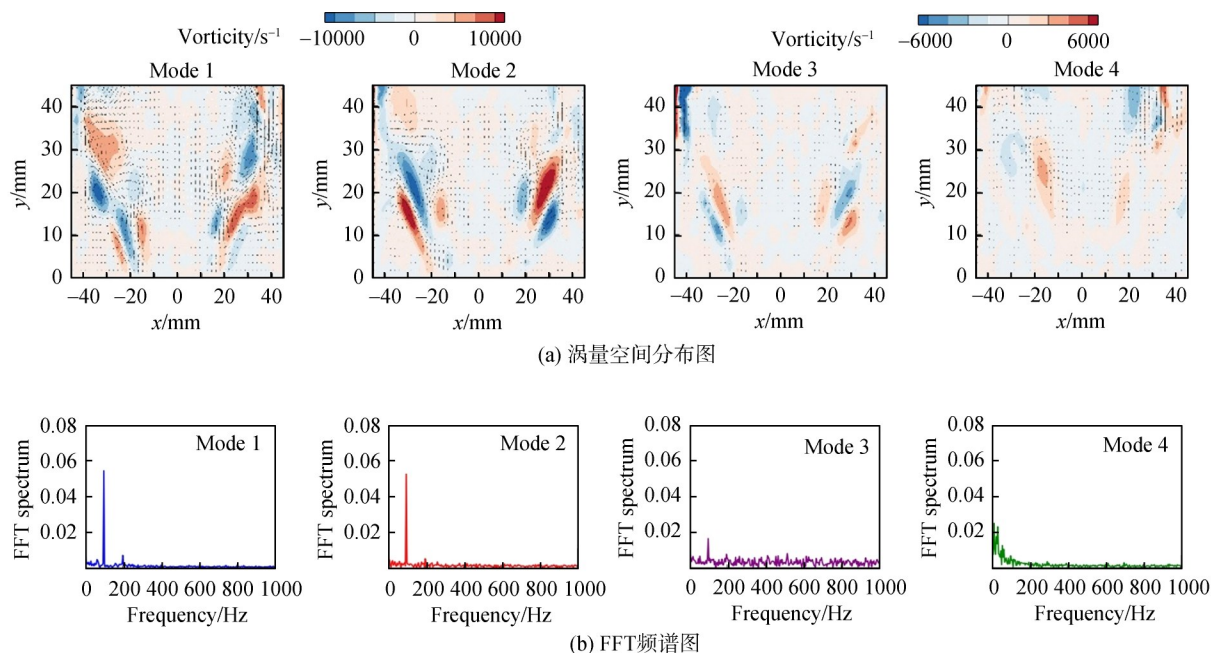


图13 工况A3中基于PIV速度分布得到的前4阶POD模态及相应的FFT频谱图

Fig.13 The first 4 POD modes and the corresponding FFT spectrum calculated from PIV velocity results for case A3

13(a)、图14(a)可以看出,非线性响应工况相较于线性响应工况表现出更强烈的涡卷曲和涡脱落特征。这些特征也呈现出明显的轴向分布模式,表现为4组对称分布的涡对,同时在图14(b)中出现了明显的200 Hz和微弱的300 Hz信号,与火焰形态特征的POD分析结果对应,说明流场中出现了高阶速度脉动。综合比较,可以发现空间分布图中涡量场的卷曲伴随着频谱图中倍频信号的增强,另外可以明确流场在非线性响应时涡卷曲和涡脱落特征得到了加强。

2.3.2 流场与火焰相互作用的分析

为了进一步理解流场与火焰的相互作用,本文将无声激励的反应流工况(A0)、线性响应工况(A3)和非线性响应工况(A7)中的火焰面信息与速度场信息叠加,观察不同工况条件下的不同相位处的火焰响应特征,如图15所示,图15(a)、图15(b)和图15(c)分别对应上述3个工况。其中火焰中心截面是对火焰相平均图像做逆阿贝尔变换后的结果,流线则是通过PIV计算出速度分布后进一步计算得到的。

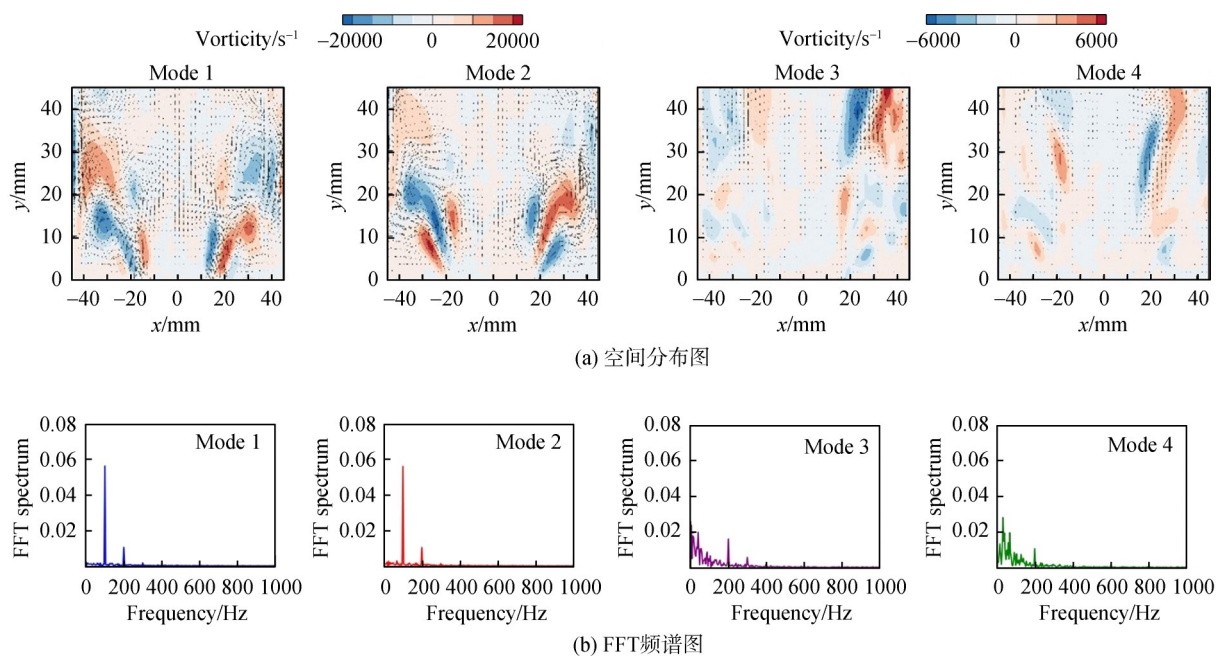
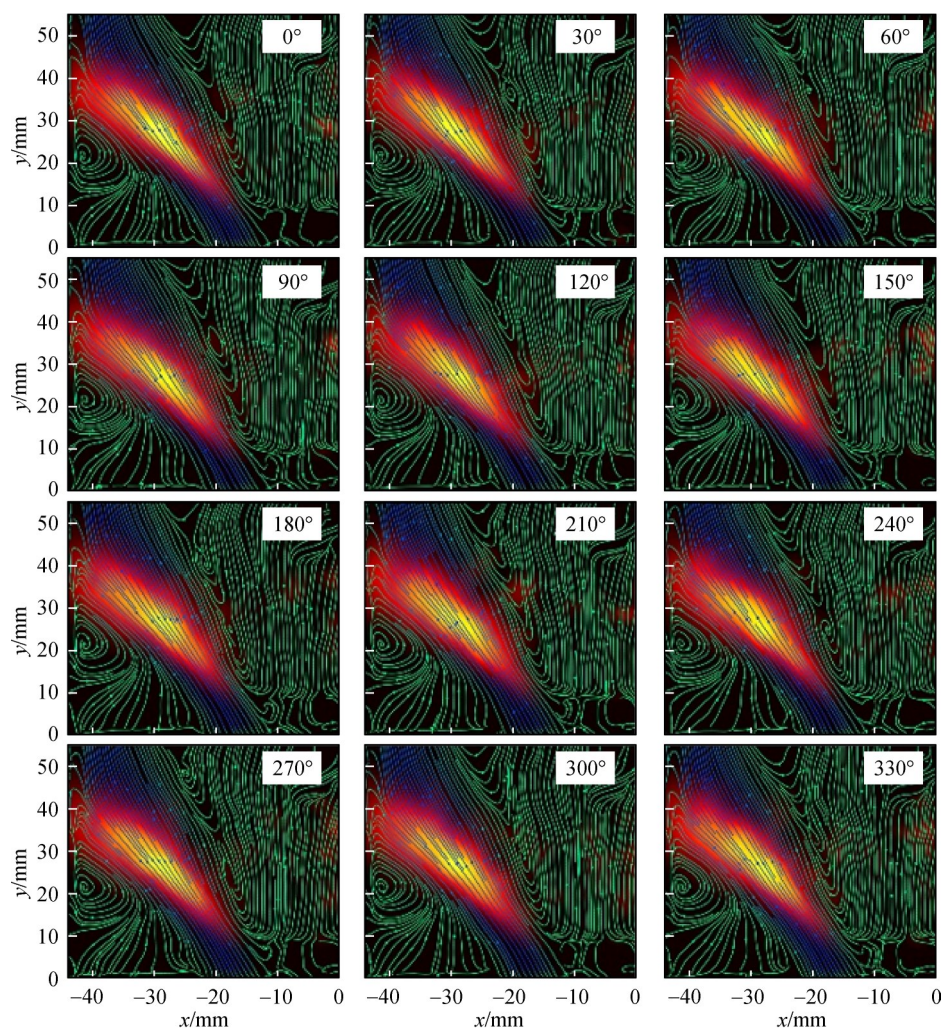
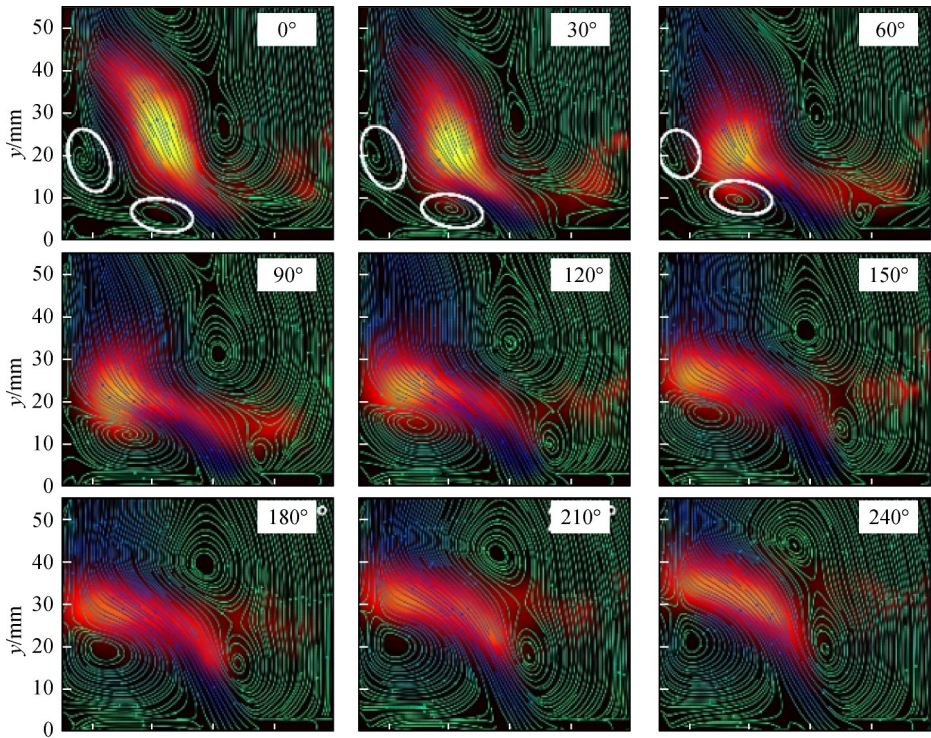
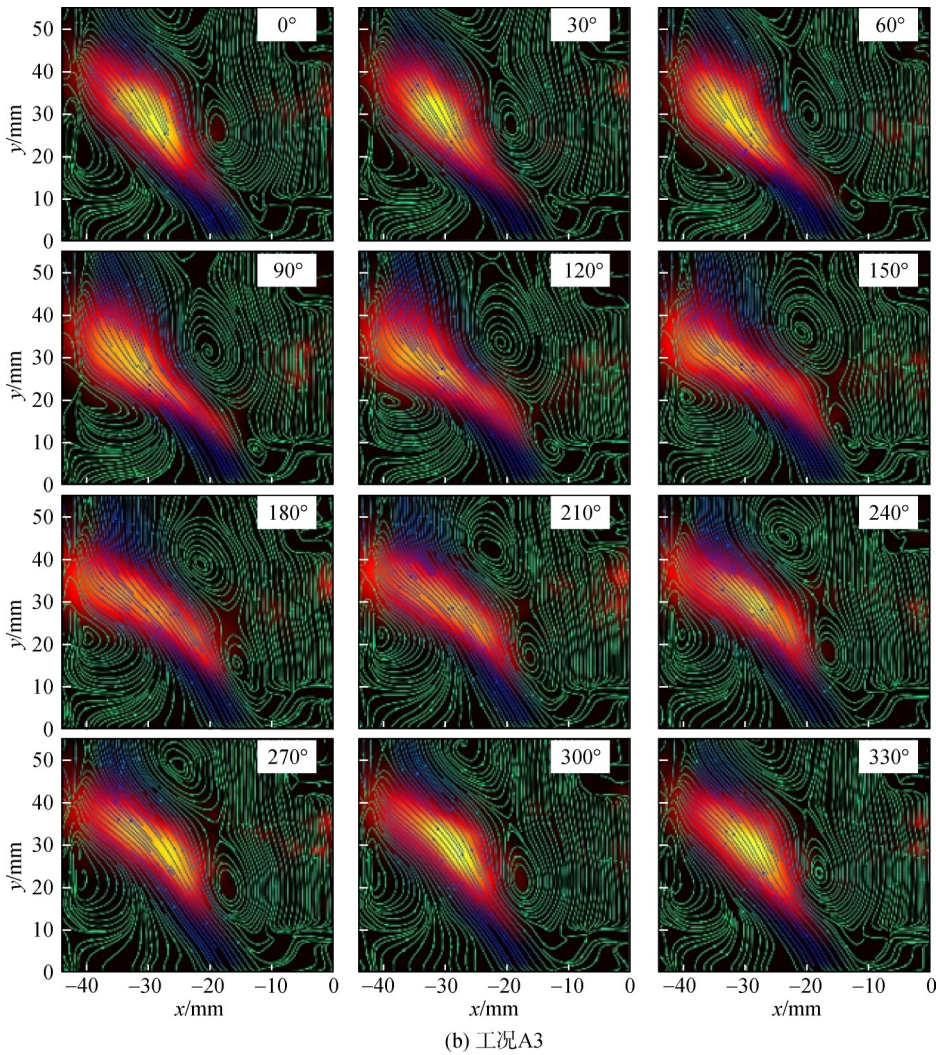


图 14 工况 A7 中基于 PIV 速度分布得到的前 4 阶 POD 模态及相应的 FFT 频谱图

Fig.14 The first 4 POD modes and the corresponding FFT spectrum calculated from PIV velocity results for case A7



(a) 工况 A0



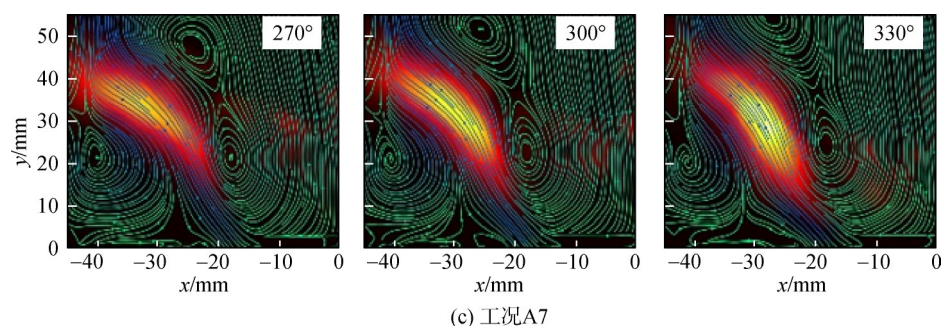


图 15 A0、A3 和 A7 工况的相平均火焰中心截面(基于 OH^* 化学发光图像)与流线(基于 PIV 结果)叠加图

Fig.15 Phase-averaged flame area from OH^* CL images overlaid with streamline from PIV results for case A0, case A3 and case A7

对比发现,无声激励工况时,如图 15(a),火焰十分稳定,随着相位变化,火焰形态和流场保持不变,外回流区仅存在一个稳定的涡旋。线性响应工况 A3,如图 15(b),外加声激励后内回流区开始出现周期性的涡脱落,涡脱落频率与外加声激励频率一致,外回流区的涡旋随相位变化而变化,内、外回流区涡旋规律性的变化使得火焰面积也呈现规律性变化,表现为火焰的线性响应。非线性响应工况 A7,如图 15(c),内回流区仍保持与线性响应工况一致的涡脱落形式,而在外回流区则观察到在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 相位出现了涡脱落增强现象,即外回流区出现两个涡旋(白色椭圆圈标识处),并且外回流区的涡旋大小和位置随相位变化剧烈,导致了火焰面积的剧烈变化,最终使得火焰热释放率脉动趋于饱和。

3 结 论

本文利用高速 OH^* 化学发光成像和 PIV 技术,针对贫燃预混旋流钝体火焰的动态响应开展了实验研究,主要结论包括:

1) 二甲醚贫燃预混旋流钝体火焰在外部声激励作用下会出现非线性响应现象,线性与非线性响应现象转变的速度脉动比例临界值是 16%。

2) 通过对 100 个周期内火焰 OH^* 化学发光强度的分析,研究对比了线性响应和非线性响应不同的火焰形态。发现在非线性响应工况中,火焰形态变化剧烈,并伴随着涡旋卷起的形态特征,这一形态变化导致火焰面积非线性变化,最终导致火焰热释放脉动出现饱和。另外,基于火焰 OH^* 化学发光图像的 POD 分析,观察到非线性响应工况中,第 2、3、4 阶 POD 模态均出现高阶的涡脱落特征,推测这可能是非线性响应的标志。

3) 通过分析锁相同步测量得到的 OH^* 化学

发光图像和 PIV 流场,研究了流场与火焰的相互作用。发现非线性响应工况中,流场显示出外回流区涡脱落增强的特征,且火焰面形态的剧烈变化与涡旋作用的位置十分贴合,这一特征说明外回流区涡脱落增强可能是使得火焰面积剧烈变化并诱发火焰非线性响应的主要因素。

参考文献:

- [1] LIEUWEN T, TORRES H, JOHNSON C, et al. A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(1):182-189.
- [2] LIEUWEN T, MCDONELL V, PETERSEN E, et al. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1):601-615.
- [3] SCHIMEK S, MOECK J P, PASCHEREIT C O. An experimental investigation of the nonlinear response of an atmospheric swirl-stabilized premixed flame[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(10):665-675.
- [4] ROY R, GUPTA A K. Experimental investigation of flame fluctuation reduction in distributed combustion[J]. Experiments in Fluids, 2021, 62(4):1-17.
- [5] 吕丽君, 林宇震, 韩啸, 等. 外激作用下自激热声系统的非线性动力学响应[J]. 航空动力学报, 2018, 33(10):2404-2413.
LÜ Lijun, LIN Yuzhen, HAN Xiao, et al. Nonlinear dynamic responses of a self-excited thermoacoustic system subjected to acoustic forcing[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(10):2404-2413. (in Chinese)
- [6] 杨甫江, 郭志辉, 曾宇晖. 贫燃预混旋流火焰热声特性研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12):2854-2861.
YANG Fujiang, GUO Zhihui, ZENG Yuhui. Study on thermoacoustic characteristics of lean premixed swirling flames[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12):2854-2861. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] THUMULURU S K, LIEUWEN T. Characterization of acoustically forced swirl flame dynamics[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2):2893-2900.
- [9] RUAN C, CHEN F, YU T, et al. Experimental study on impacts of fuel type on thermo-acoustic instability in a gas turbine model combustor[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64:1345-1358.
- [10] CANDEL S. Combustion dynamics and control-progress and challenges[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2002, 29(1):1-28.
- [11] 孟晟. 燃烧器几何结构对于非预混旋流燃烧热声不稳定的影响及其控制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2019.
- MENG Sheng. Study of combustor geometry effects on thermoacoustic instability of non-premixed swirling flame and its passive control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [12] HUANG Y, YANG V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(4):293-364.
- [13] WANG G, LIU X, XIA X, et al. Dynamics of periodically-excited vortices in swirling flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4):6183-6191.
- [14] KIM K T, SANTAVICCA D. Linear stability analysis of acoustically driven pressure oscillations in a lean premixed gas turbine combustor[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 23(12):3436-3447.
- [15] NOIRAY N, DUROX D, SCHULLER T, et al. A unified framework for nonlinear combustion instability analysis based on the flame describing function[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 615:139-167.
- [16] DOWLING A P. Nonlinear self-excited oscillations of a ducted flame[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 346: 271-290.
- [17] 胡悦, 谭建国, 吕良. 甲烷-空气预混火焰中 OH* 标识放热率的数值模拟研究[J]. 推进技术, 2018, 39(4):835-842.
- HU Yue, TAN Jianguo, LÜ Liang. Numerical valuation of heat release rate measurement using OH* chemiluminescence in premixed methane-air flames[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(4):835-842. (in Chinese)
- [18] PALIES P, DUROX D, SCHULLER T, et al. The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(9):1698-1717.
- [19] 王俊懿, 葛宏达, 赵晓敏, et al. 当量比对旋流燃烧室火焰形态与流场影响的激光诊断[J]. 实验流体力学, 2019, 33(4): 21-26.
- WANG Junyi, GE Hongda, ZHAO Xiaomin, et al. measurement and diagnosis of the influence of equivalent ratio on the flame shape and flow field of a swirling combustor[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(4):21-26. (in Chinese)
- [20] BELLOWS B D, BOBBA M K, FORTE A, et al. Flame transfer function saturation mechanisms in a swirl-stabilized combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2):3181-3188.
- [21] 马静, 郭志辉. 贫燃预混旋流火焰的模式转换燃烧不稳定特性分析[J]. 推进技术, 2020, 41(5):1072-1081.
- MA Jing, GUO Zhihui. Analysis of combustion instability characteristics of mode-switching on lean-premixed swirling flame[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(5): 1072-1081. (in Chinese)
- [22] 张弛, 王波, 邹鹏飞, 等. 同心旋流分层火焰的外激脉动特性统计学分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8):1801-1808.
- ZHANG Chi, WANG Bo, ZOU Pengfei, et al. Statistical analysis on the forced dynamic of internally-staged-swirling stratified flame[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1801-1808. (in Chinese)

(编辑:陈越)