

不同气量分配下声激励对中心分级旋流火焰动力学的影响

魏 为^{1,3}, 许全宏^{2,3}, 苏 童^{1,3}, 韩 啸^{2,3}, 杨思恒^{1,3}, 周宇晨^{1,3}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 102206;

2. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 102206;

3. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 采用高速摄像拍摄火焰化学自发光和本征正交分解(POD)法研究了多激励频率下中心分级旋流分层火焰的宏观结构和动力学特性。结果表明:随着气量分配比的增加,火焰宏观结构逐渐沿径向方向扩张,火焰分层现象变得更加明显。激励频率的变化对火焰宏观结构的影响较小。POD 分析结果表明:外激频率为 200 Hz 时火焰脉动最明显。随着主燃级气量占比的增加,释热脉动在激励的作用下沿轴向方向减弱,在径向上出现极值交替且振荡变强。

关 键 词: 燃烧不稳定性; 中心分级燃烧室; 旋流火焰; 火焰动力学; 本征正交分解(POD)

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Effects of acoustic excitation on the dynamics of centrically-staged swirling stratified flames under different air split ratios

WEI Wei^{1,3}, XU Quanhong^{2,3}, SU Tong^{1,3}, HAN Xiao^{2,3},
YANG Siheng^{1,3}, ZHOU Yuchen^{1,3}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 102206, China;

2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 102206, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine
Aero-thermodynamics, Beihang University, Beijing 102206, China)

Abstract: Macrostructures and dynamic characteristics of concentrically-staged swirling stratified flames under multiple excitation frequencies were studied using high-speed CH* chemiluminescence and proper orthogonal decomposition (POD). Results showed that the flame expanded radially with more pronounced stratification as air split ratio increased, whereas the excitation frequency played an insignificant role. POD analysis revealed that among the conducted external excitation cases, the most intense flame oscillations were observed at the excitation frequency of

收稿日期: 2021-10-11

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0007-0032)

作者简介: 魏为(1997—), 男, 博士生, 研究领域为燃烧及传热传质(航空发动机低排放燃烧室)。

E-mail: sy1904419@buaa.edu.cn

通信作者: 许全宏(1969—), 男, 副研究员, 博士, 研究领域为燃烧及传热传质(航空发动机低排放燃烧室)、燃烧室冷却、高温高压试验。E-mail: xuquanhong@buaa.edu.cn

引用格式: 魏为, 许全宏, 苏童, 等. 不同气量分配下声激励对中心分级旋流火焰动力学的影响[J]. 航空动力学报, 2022, 37(8): 1607-1619. WEI Wei, XU Quanhong, SU Tong, et al. Effects of acoustic excitation on the dynamics of centrically-staged swirling stratified flames under different air split ratios[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(8): 1607-1619.

200 Hz. With the increase of main stage air allocation, the heat release oscillation decreased along the axial direction. On the radial direction, however, local minima and maxima were alternately observed with stronger oscillations.

Key words: combustion instability; concentrically-staged combustor; swirl flame; flame dynamics; proper orthogonal decomposition (POD)

近年来,随着能源危机和环境污染问题的日益严重,国际上对于环境问题和污染问题越来越重视。贫油预混预蒸发燃烧(lean premixed pre-vaporized combustion, LPP)技术因而被广泛应用于航空发动机上以减少 NO_x 的排放,但LPP燃烧室面临诸多挑战,其中燃烧(热声)不稳定性问题尤为严重。热声不稳定可能会造成大幅度压力脉动下的火焰吹熄、回火等现象^[1],在实际运行中严重影响发动机的安全性和可靠性,且难以预测,是高性能低排放燃气轮机的设计和运行中都需要关注的重点问题。为了提高发动机的稳定工作范围,LPP燃烧室通常设计为主燃级火焰包围预燃级火焰的中心分级结构。主、预燃级通常在不同的质量流量下参与燃烧反应,因此如何调控适当的流量比以获得稳定的流场结构和火焰结构并保证发动机的稳定高效工作亟待研究。

目前,国内外目前对火焰动力学现象从宏观结构方面进行了较多的分析研究。刘宗宽等人^[2]建立了燃烧室模型以研究湍流强度与火焰形态之间的关系,发现火焰的形态变化会受到其周围流场中湍流强度的影响,湍流导致火焰表面的变形,而火焰表面的变形会进一步加剧湍流强度的变化,影响燃烧室的稳定性。Palies等人^[3]通过采集火焰的可见光图像,指出火焰不稳定时的释热脉动是由速度脉动引起的。Altay等人^[4]发现当释热速率和压力振荡频率接近时将导致火焰结构不稳定,而且火焰结构越紧致,火焰锋面面积越小,释热脉动振幅也越小。Kim等人^[5]通过高速相机对振荡的火焰进行了拍摄,在火焰不稳定的情况下火焰会周期振荡,回流区也会以与火焰振荡相同的频率进行共振。

部分研究通过粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)和本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)等手段对不稳定现象和火焰结构改变进行了研究。Dhanuka等人^[6]利用PIV观察剪切层和涡的脱落,指出火焰在剪切层内能否稳定燃烧与整体速度梯度密切相关。张俊等人^[7]在不同当量比下对燃烧场进行了拍摄,发

现增加当量比,火焰流场结构和反应区分布变化不大,但燃烧变得更稳定,火焰高度增加,回流区的经典双涡结构破碎成多个旋涡,并开始出现旋涡进动的现象。Taamallah等人^[8]通过实验观察了火焰的各种结构,并以此为根据提出了火焰形态转换的机理解释。魏星^[9]以冷态流场为研究对象,分析了流场和火焰形态转变之间的关系,发现燃烧室直径和旋流器高度通过影响剪切层与突扩界面间的夹角而影响火焰形态转变。Chen等人^[10]则通过POD方法分析发动机燃烧中的热声不稳定性现象,发现POD方法可以定量地区分流场运动。上述研究对激励下的火焰动态特征进行了一定研究,但并未涉及气量分配对火焰燃烧特性的影响。

国内关于燃烧室的研究工作较少涉及到气量分配方面的内容。谢法等人^[11]研究了头部气量分配对燃烧室贫油熄火特性的影响,发现在空气流量不变的情况下,一、二级旋流器有效面积增加20%将分别拓宽贫油熄火边界11.8%和16.6%。谢法等人^[12]后续进一步研究了头部气量分配对熄火边界的影响。Wei等人^[13]的研究结果也表明,增大任一级旋流器空气流量都能拓宽熄火边界。姜磊等人^[14]研究了气量分配对排放、热态流场和贫油熄火特性的影响,研究结果表明最优气量分配方案为内旋空气流量比外旋空气流量等于1/0.67的方案。上述实验虽然对气量分配的影响进行了一定的研究,但并未涉及具有减排能力的中心分级燃烧室结构。

中心分级燃烧室具有在提高火焰稳定性同时降低排放的作用,因而在航空发动机上得到了广泛应用。近年来,林宇震团队对LPP燃烧室和中心分级旋流火焰也进行了一些相关实验研究,其中付镇柏等人^[15]发现,提高预燃级当量比可以显著提升燃烧稳定性,但同时也会导致 NO_x 的排放量提高,该研究并未涉及火焰脉动和火焰宏观结构等动态特征。韩啸等人^[16]对火焰宏观结构进行了定量分析,发现分层比是影响火焰宏观结构的主要参数。韩啸等人^[17]将实验结果与LES(large

eddy simulation)结果进行比较,指出当仅有预燃级存在火焰,主燃级从关闭状态切换到通入纯净空气时,预燃级气流会与主燃级气流发生掺混,火焰形态从V形转变为M形。张弛等人^[18]在总当量比0.5的工况下通过改变分层比的方式探究了外激对火焰结构的影响,结果表明压力脉动引起的当量比脉动并不是导致火焰脉动的唯一因素。

然而,针对低排放的中心分级燃烧室存在燃烧不稳定性现象,这将大大降低燃烧室的使用寿命和安全性。目前关于燃烧室的自激振荡的研究已有较为成熟的理论支撑,包括基本的瑞利准则和自激振荡的模型。除此以外,也可以通过外加声激励的方式来研究火焰响应特性,测量得到火焰传递函数(flame transfer function, FTF)或火焰描述函数(flame describing function, FDF)。针对真实燃烧室的FTF和FDF可以反映火焰在不同扰动下的响应情况,目前已经应用于低阶模型,计算分析系统的燃烧不稳定性。但是针对一些较为复杂的燃烧振荡问题,仍需进一步探索^[19]。

本文计划研究在保证旋流数、油气比和总气量不变的贫油燃烧工况下,通过在中心分级燃烧室内对主预燃级施加频率不断增加的激励作用,探索外界激励与火焰振荡间的耦合联系。之后调节主预燃级的气量分配比例,进而改变流场结构和火焰宏观结构。采用高速CH⁺化学自发光和单反相机对火焰宏观结构进行观察,并通过时均处理,Abel逆变换和POD处理对实验数据进一步分析,从而得出气量分配对燃烧不稳定性的影响。

1 实验设计

实验系统主要分为气路和控制电路两部分,整体的系统图如图1所示。甲烷(纯度99.9%)和空压机压缩的空气在干燥脱水后,均被分为两路分别进入主预燃级预混器进行充分混合,并且都分别通过质量流量控制器控制流量(甲烷气路采用的质量流量控制器型号为七星CS200,精度1%;空气路为Alicat KM601,精度1%)。实验中可以分别改变主预燃级的当量比和分层比(预燃级当量比与主燃级当量比之比)等参数。混合气分别进入主预燃级通道并且在下游通过点火器进行点燃。

控制电路则包括声波信号的产生、放大和输出:函数发生器用于产生正弦波信号,随后功率放大器将信号的幅值进行等比例放大,通过扬声器将正弦波信号转换为声波音频信号输出。

实验工况参数如表1所示,共进行了3组不同工况下的实验,每组工况分别施加外激频率100、200、300、400 Hz和500 Hz,并分别单独对预燃级(Pilot)施加激励、主燃级(Main)施加激励以及主预燃级(Total)同时施加激励进行了研究。

声功率计算的过程如下。压力脉动可从下式计算得到:

$$p' = u' \rho c \quad (1)$$

其中 u' 为速度脉动大小, ρ 为密度,而 c 为声速, ρc 为阻抗。

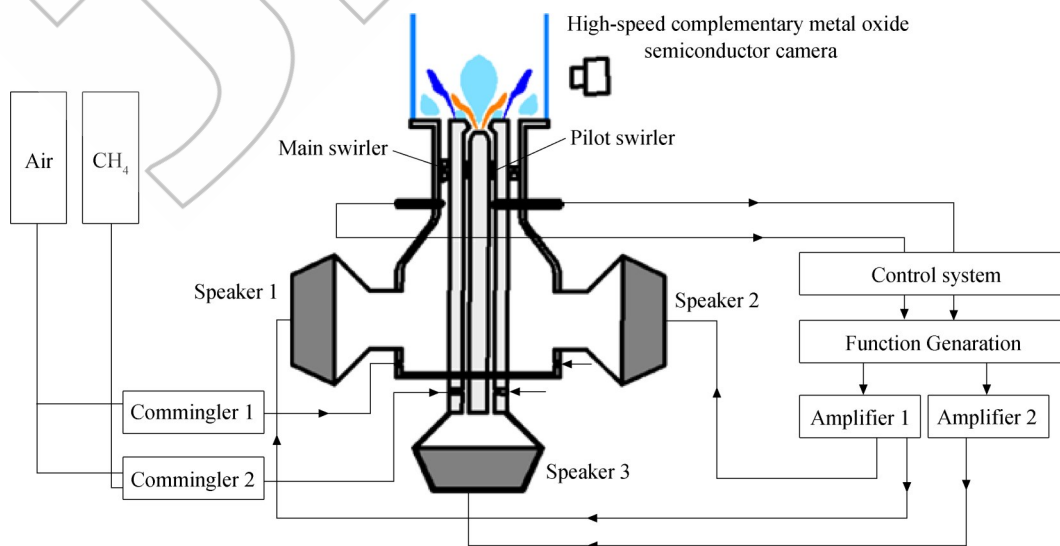


图1 实验系统图

Fig.1 Experimental setup

表 1 实验工况参数表
Table 1 Experimental conditions

空气总流量/ (g/s)	主燃级空气 流量/(g/s)	预燃级空气 流量/(g/s)	总当量比	分层比	主燃级 当量比	主燃级甲烷 流量/(g/s)	预燃级甲烷 流量/(g/s)
1	0.4	0.6	0.95	1	0.95	0.022	0.033
1	0.5	0.5	0.95	1	0.95	0.028	0.028
1	0.6	0.4	0.95	1	0.95	0.033	0.022

声功率的计算公式为

$$P = \rho' u' A / \delta_{\text{lost}} \quad (2)$$

假设速度脉动为主流平均速度的 50% 且损失为 50%，计算得到的主燃级声功率为 0.17 W，预燃级的声功率为 1.2 W。主预燃级的功率放大器的音量均为 65%，正弦波的初始相位选择 0°，输出的电压信号幅值为 50 mV。根据理论计算的结果，目前选定的额定功率为 15 W 的扬声器基本可以满足实验需求。

$\dot{m}_{\text{pilot}}$ 和 $\dot{m}_{\text{main}}$ 分别为预燃级和主燃级的空气流量，用 $\frac{\dot{m}_{\text{main}}}{\dot{m}_{\text{pilot}}}$ 表征气量分配比 (air split ratio)，则三组工况分别对应于气量分配比为 0.67、1 和 1.5。

实验中，高速 CH* 化学自发光捕捉了火焰的释热区域。像增强器镜头使用的 CH* 的滤镜为带通滤镜，中心波长 430 nm，半峰全宽 10 nm，峰值透过率 45%。计算的火焰释热脉动周期约为 0.01 s，而拍摄频率为 5 000 Hz，为保证每个工况的拍摄时长为施加扰动的速度脉动的十倍周期以上，每个工况需至少拍摄 500 张照片。本次实验每个工况所获取的照片数量均超过 2 500 张，符合要求。火焰的 CH* 主要集中在燃烧反应区，由于释热率和发光强度之间存在线性关系^[20]，因而可以认为火焰图像的亮度高低可以表征火焰释热的大小。

2 数据后处理

本次研究采用 Matlab 软件编写程序对 CH* 图像进行后处理，包括时均和 Abel 逆变换，并采用 POD 方法对火焰脉动形态进行分解分析。

火焰平均图像是火焰在一段时间内平均形态的体现。通过对 1 000 张连续 CH* 图像进行平均处理，可以直接分析火焰的整体形态特征。由于火焰是三维结构，而化学自发光是一种沿视线积分的测量方法，因而拍摄得到的火焰是沿着同一个周向方向的像素的叠加得到的二维图像。因此

为了更清晰地认识到火焰的中心平面上的结构，还需要对火焰图像进行后处理，本文选择的是噪音最低的三点 Abel 逆变换方法。经过 Abel 逆变换，能够清晰地观察到火焰在中心平面处的结构^[21]。

POD 最早在 1967 年由 Lumley 应用于湍流中拟序结构的提取，是一种根据数据的空间线性相关性来获得线性基的技术。近年来，由于 POD 可以把初始图像转化成为更高层的模式数据，进而实现火焰的模式分类并降维处理，因而逐渐作为一种分析火焰脉动特性和时序变化的工具被广泛应用于燃烧不稳定领域。

POD 的基本思想是将一组标量 $S^{(k)} = (s)_{i,j}^{(k)}$ 分解成 M 阶空间相关函数和时间相关系数的线性组合^[22]，例如：

$$S^{(k)} = \sum_{m=1}^M C_m^{(k)} \varphi_m \quad (3)$$

式中 $\varphi_m (m=1, 2, \dots, M)$ 是相互正交的基本函数， $C_m^{(k)}$ 是第 m 个模式的 POD 系数， M 是所选模式的总数。

选择 CH* 图像的亮度 (即火焰释热强度) 作为标量分布 $(s)_{i,j}^{(k)}$ ，其中 i 和 j 分别是 Z 和 r 方向上的像素位置， k 是图像索引。本次实验处理 1 000 幅连续的火焰图像 (超过 10 个周期) 来分析周期性变化。

系数矩阵如下所示：

$$C_m^{(k)} = \begin{bmatrix} C_1^{(1)} & C_2^{(1)} & \dots & C_M^{(1)} \\ C_1^{(2)} & C_2^{(2)} & \dots & C_M^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_1^{(K)} & C_2^{(K)} & \dots & C_M^{(K)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵 $C_m^{(k)}$ 中的每一行表示同一模式在不同时刻下的 POD 系数，而每列代表同一时刻不同模式下的 POD 系数。那么前 m 个模式的累积能量分数 (E_m) 可以认为是

$$E_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (C_m^{(k)})^2 \quad (k=1, 2, \dots, 1000) \quad (5)$$

第 m 个模态的能量分数(e_m)由下式推导出:

$$e_m = E_m / \sum_{m=1}^M E_m \quad (6)$$

在 POD 分析中,能量分数代表了每种模态对火焰动力学的贡献,数值越大,影响越大。理论上,POD 的前几个模态包含了波动火焰中的大部分能量,因而可以用于表征火焰最显著的特征^[23]。

3 结果与讨论

3.1 时均火焰和 Abel 逆变换火焰图像对比

根据上述 Abel 逆变换的原理进行编程,对不施加激励的数据进行处理,结果如图 2 所示。每组图中左侧展示的是 CH* 图像的时均结果,右侧为经过 Abel 逆变换后得到的图像。对比后发现,Abel 逆变换可以表征火焰中心平面更多的结构细节。

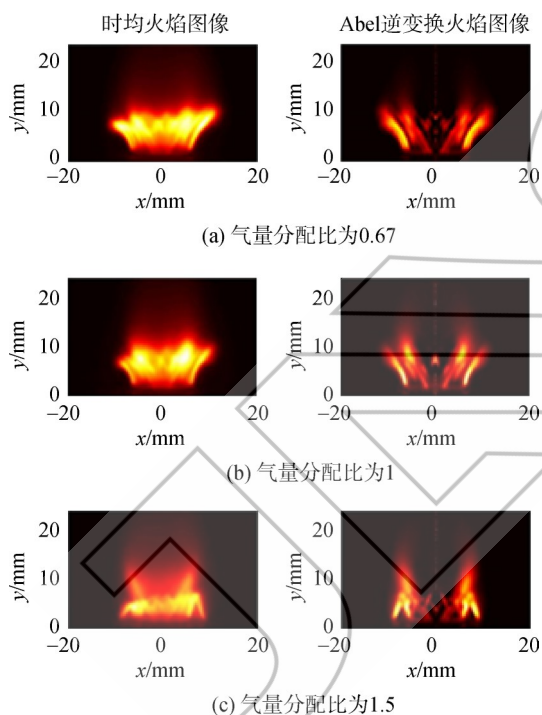


图2 不同气量分配下时均火焰图像与 Abel 逆变换火焰图像对比

Fig.2 Comparison of time-averaged flame images and the corresponding Abel inverse transformed images under different values of air split ratio

不加激励时,三种气量分配下火焰长度以及主预燃级的耦合关系有着明显差别,呈现出不同的火焰宏观结构。当预燃级流量较大时,火焰耦合程度更高,主燃级火焰在预燃级火焰的“吸附”作用下向轴心靠拢,主燃级火焰根部贴向预燃级火焰,火焰呈现稳定的 V 形结构。随着主燃级气

量的增加,火焰宏观结构逐渐外扩,火焰分层现象变得更加明显。火焰张角逐渐扩大,反应区域的轴向长度减小,径向长度增加。

在气量分配比为 1 的工况下,对不同外激频率下拍摄的火焰图像进行处理,时均火焰图像和相应 Abel 逆变换的处理结果如图 3 和图 4 所示。发现当激励频率为 100 Hz 时,仅对预燃级施加激励与另外两种激励方式下的火焰形态有较大差别。推测原因可能是主燃级流道的有效面积较大,其轴向速度分量相对较小,对其施加径向速度脉动更容易产生影响效果。其余外激频率下无法看出明显差别,需要对图像进行 POD 处理以便深入研究。

3.2 火焰动态模态分析

对不施加激励情况下的火焰图像进行 POD 处理,从中选取能量最高的四组模态进行分析,如图 5(a)所示,其中能量分布具有相同的色阶显示范围,而各模态能量占比见图 5(b)。后续图像处理方法相同,每组数据仅显示一个色标。每种模态的能量占比较为平均,火焰形态没有被某一种模态主导,此时图像处理显示的是速度脉动和释热脉动引发的噪声共同作用的结果。而随着主燃级气量的增加,第一模态的能量占比提高,主导性增强,但是并不显著。火焰变化规律与图 2 相符。

图 6 展示了气量分配比为 1 时不同激励频率下的 POD 处理结果。当激励频率为 100 Hz 时,火焰的模态相对简单,释热脉动较小,结构也较为简单,呈现主燃级包围预燃级的形式,而模态三和模态四此时表现出了一定的轴向分层结构。当外激频率增加到 200 Hz 时,轴向模态成为主导,但是沿径向有交替出现的反向释热脉动,这体现了火焰的螺旋结构,此时火焰释热脉动模态较为杂乱,主预燃级释热脉动现象最为明显。外激频率为 300 Hz 的情况以轴向模态为主,但是火焰释热脉动模态更加杂乱,此时模态三和模态四已经无法明显看出释热脉动的轴向分层现象,释热脉动较大。当外激频率继续增加时,现象基本保持不变,但模态一中轴向分层现象变得更加明显。当外激频率为 100、200 Hz 时,火焰表现出明显的拟序结构,尤其是 200 Hz 时现象尤为明显,这与过往研究的实验结果具有较好的一致性^[16-17],值得进一步分析。频率较高时火焰对激励的响应变弱,前两种模态的能量占比大幅下降,主导作用变弱,此时燃烧场结构的随机性变强。

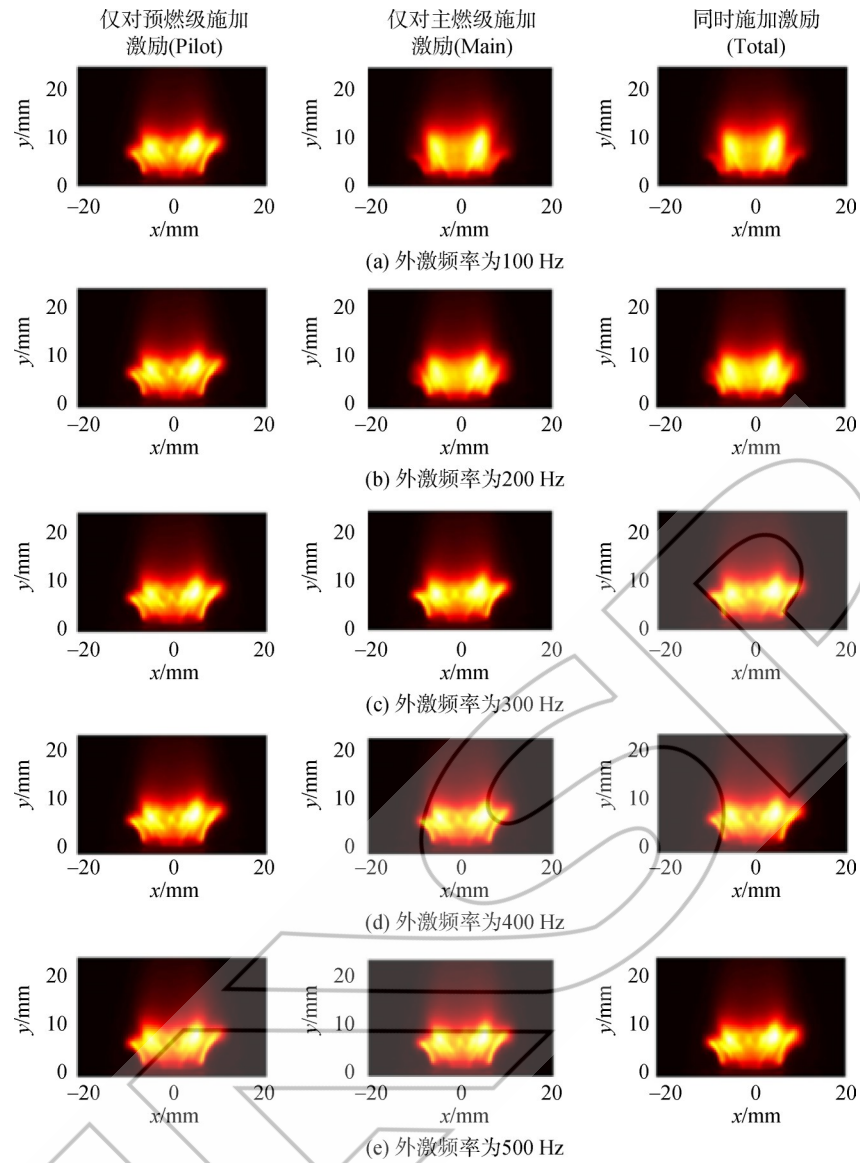
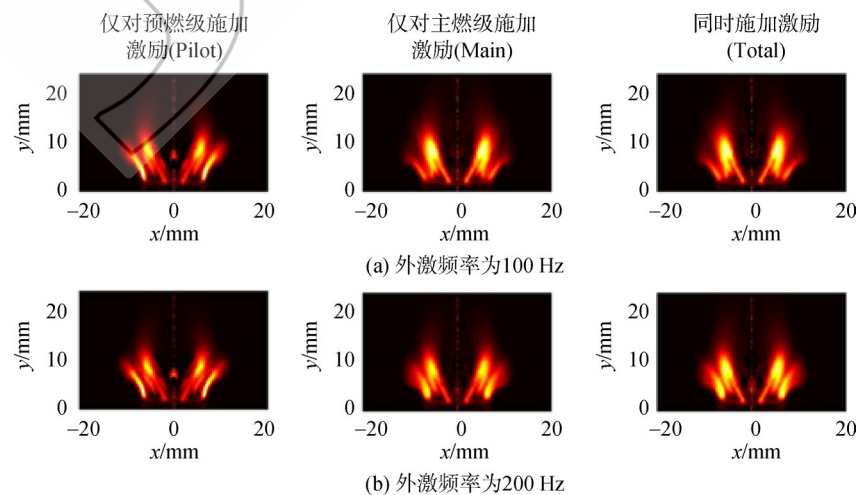


图3 气量分配比为1时不同外激频率下的时均火焰图像

Fig.3 Time-averaged flame images at different excitation frequencies when air split ratio equals 1



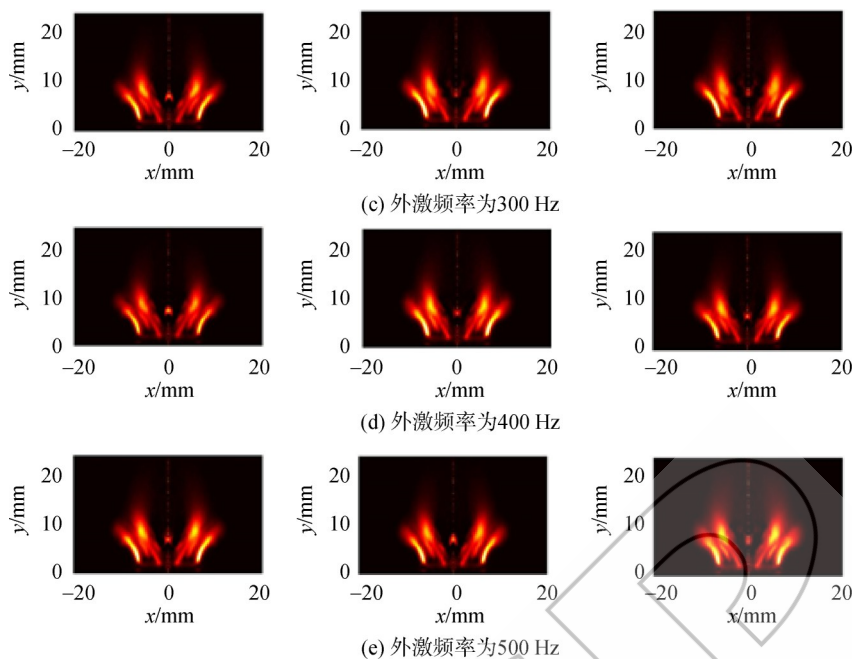
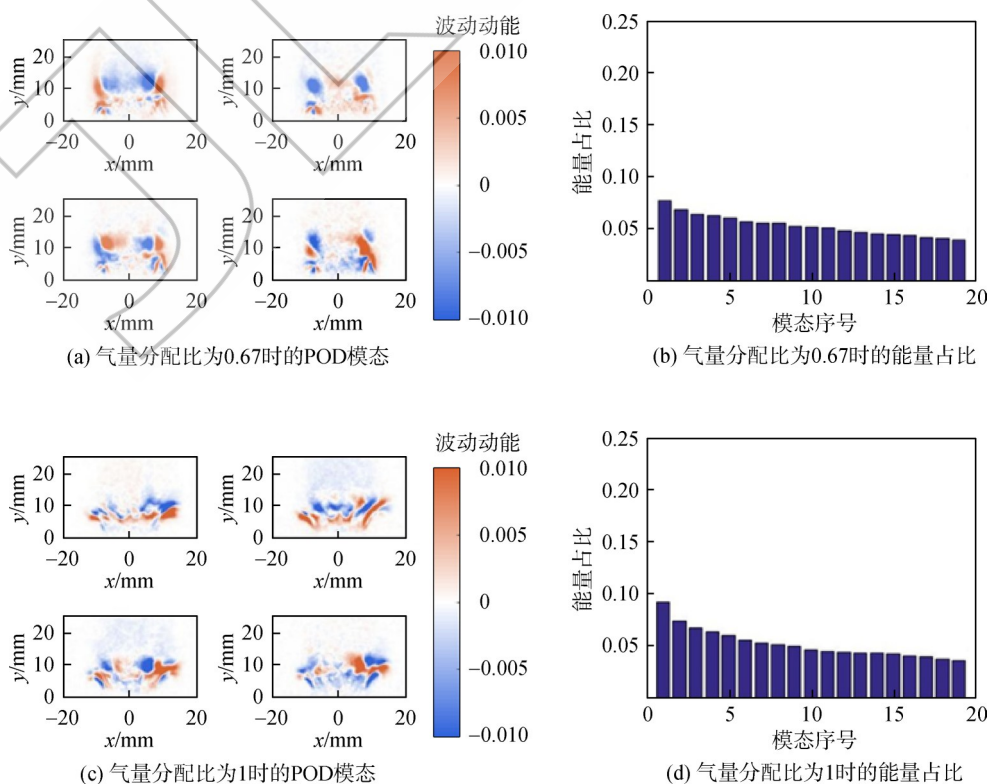


图4 气量分配比为1时不同外激频率下的Abel逆变换火焰图像

Fig.4 Abel inverse flame images at different excitation frequencies when air split ratio equals 1

图7展示的是在气量分配比为1时对主燃级和预燃级施加频率为200 Hz的激励的POD结果,发现仅对预燃级施加激励时能量分布较为平均,而对主燃级施加脉动或同时施加脉动时前两种模态有较高的能量占比,对火焰动态模态起主导作用。与不施加激励的火焰图像相比,对预燃

级施加激励的影响不明显,而对主预燃级同时施加激励的结果与仅对主燃级施加激励的结果相似度很高,说明对主燃级施加激励造成的影响更大并占据了主导作用。主要有两点原因:一是主燃级有效面积比预燃级有效面积大,流速相对较低,更容易受到径向脉动的影响;二是预燃级出口处



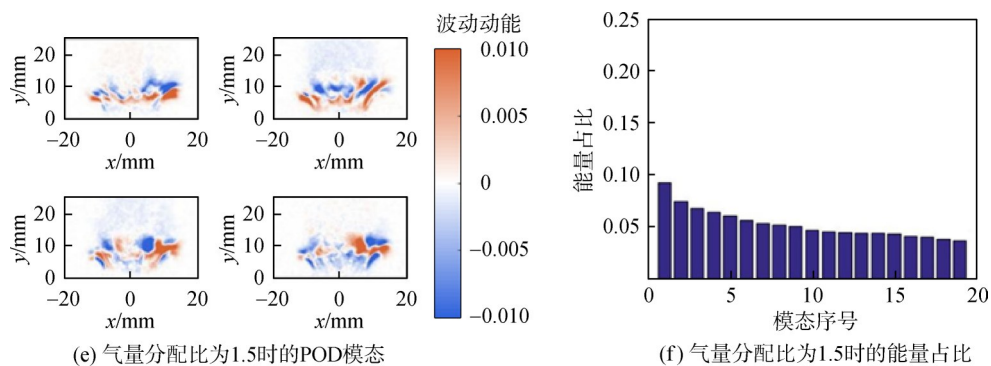
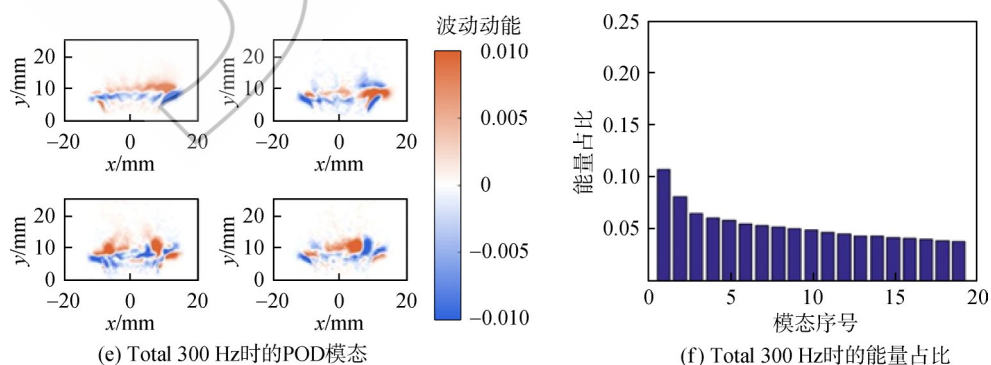
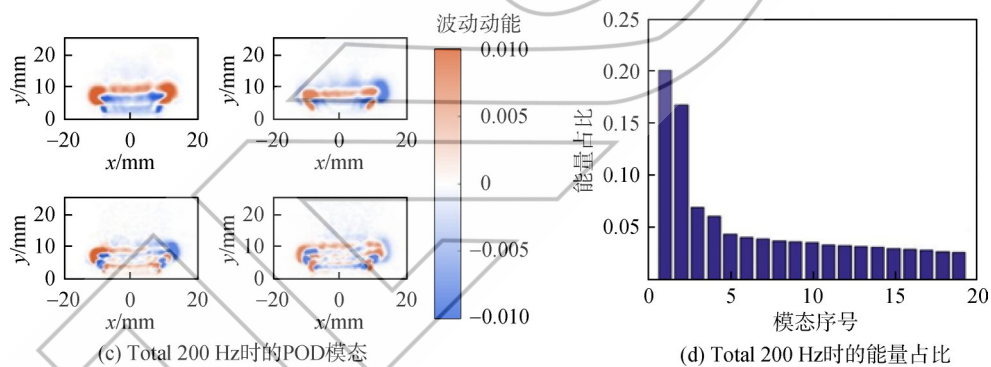
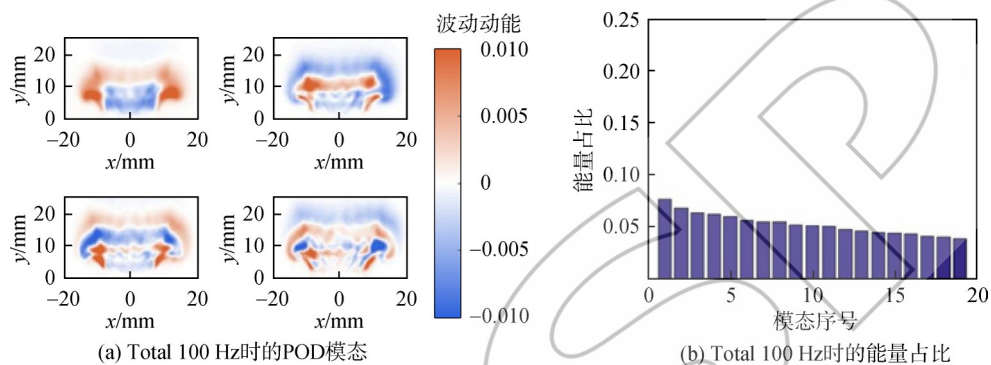


图 5 不施加激励时各气量分配下 POD 处理结果

Fig.5 POD results for different values of air split ratio without excitation



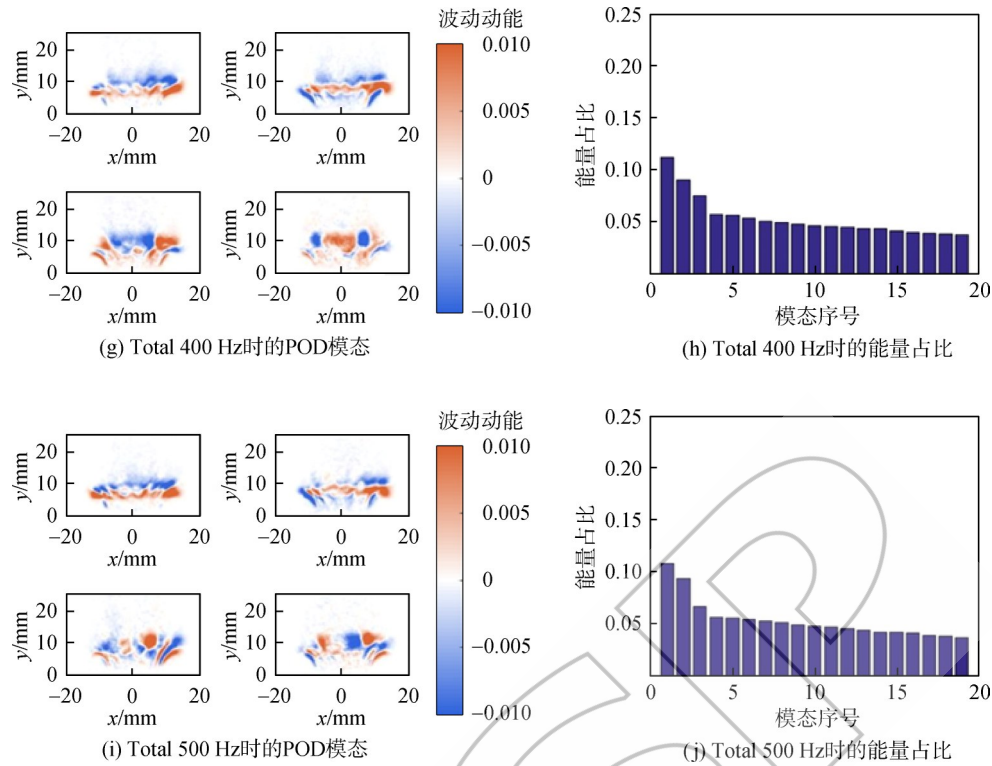
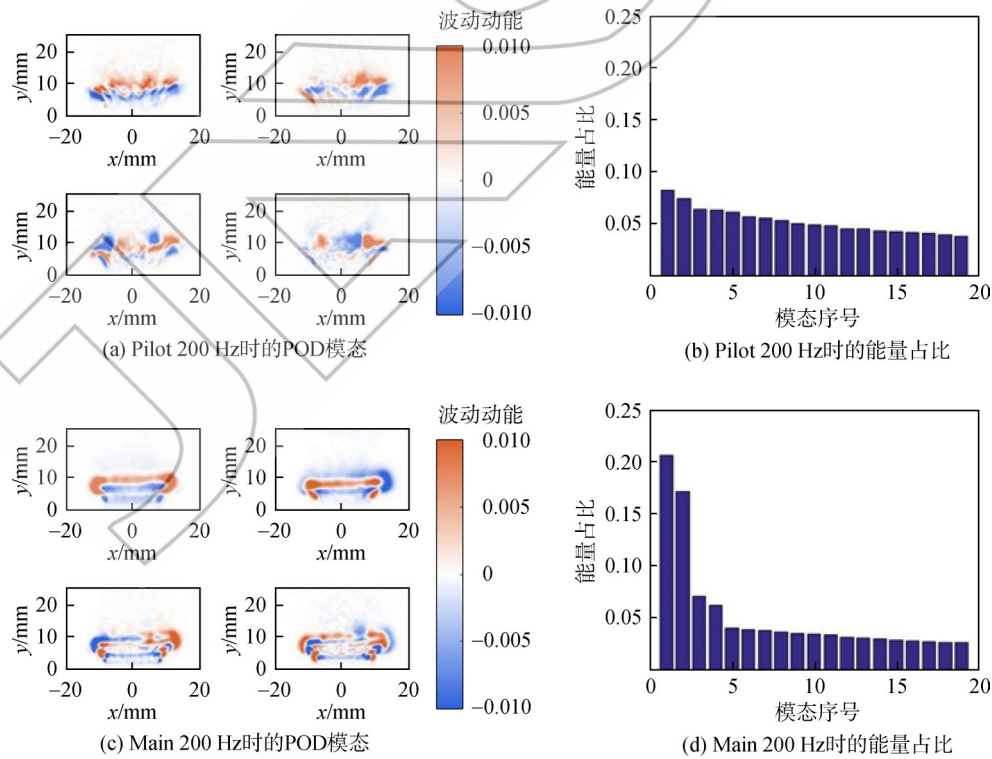


图6 气量分配比为1时不同频率激励下POD处理结果
Fig.6 POD results for air split ratio equals 1 at different excitation frequency



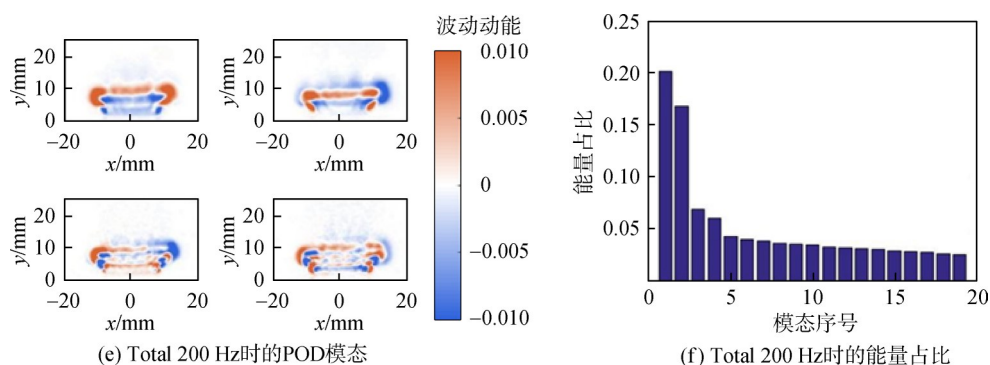


图7 气量分配比为1不同激励方式下POD处理结果

Fig.7 POD results for air split ratio equals 1 under different excitation modes

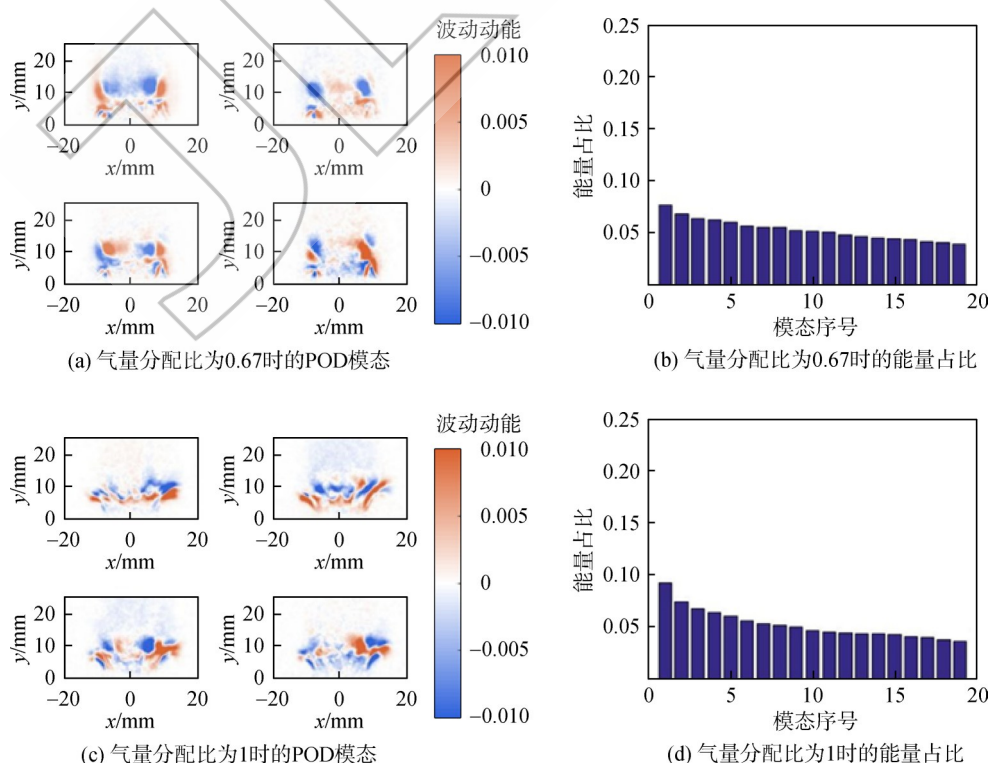
存在扩张的结构,这将对声能的传播产生较大的阻尼作用,能量在传播过程中存在大量的耗散现象,其脉动值在火焰处大大降低。

对不同气量分配下,主预燃级同时施加 100 Hz 和 200 Hz 激励的工况进行分析,结果如图 8 和图 9 所示。当外激频率为 100 Hz 时,气量分配比为 0.67 的主燃级火焰从火焰根部沿轴向方向呈现向外扩张的特点并将预燃级火焰包住,而当气量分配比为 1 和气量分配比为 1.5 时,主燃级火焰从根部开始呈现先扩张再收缩的特征,主燃级火焰长度沿轴向方向增加,预燃级火焰释热脉动值降低,这与主燃级气量的增加有关。此时不同气量分配比下火焰的整体结构较为相似,在模态三和模态四中释热脉动沿径向交替出现正负值,体

现了受旋流影响而出现螺旋运动的火焰模态。

而激励频率增加到 200 Hz 时,气量分配比为 0.67 的工况下可以明显看到主燃级火焰根部有向内的释热脉动,之后能看到向外扩张的释热脉动,而气量分配比为 1 和 1.5 时动态火焰结构很像,都具有明显的轴向模态,与火焰时均图像的特性有较高的一致性。此时前两种模态能量占比较高,具有主导作用。

综合来看,气量分配比为 0.67 时总体火焰的释热脉动较小,释热脉动在径向方向上交替出现,且释热脉动呈现高低交替变换的特征,其正负均可以相互抵消,因此火焰释热脉动值呈现出了极小值,而气量分配比为 1 和 1.5 时能量极值点沿径向分布交替出现并具有向外扩张的特性,火焰具



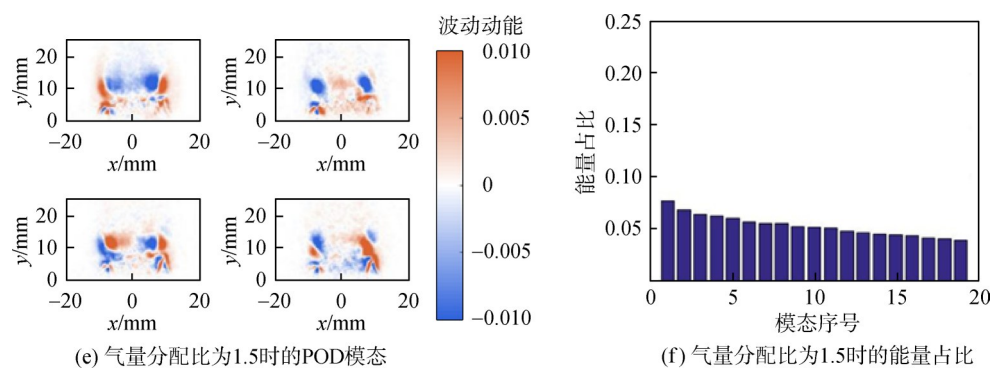


图8 100 Hz时不同气量分配下的POD处理结果

Fig.8 POD results for different values of air split ratio at excitation frequency of 100 Hz

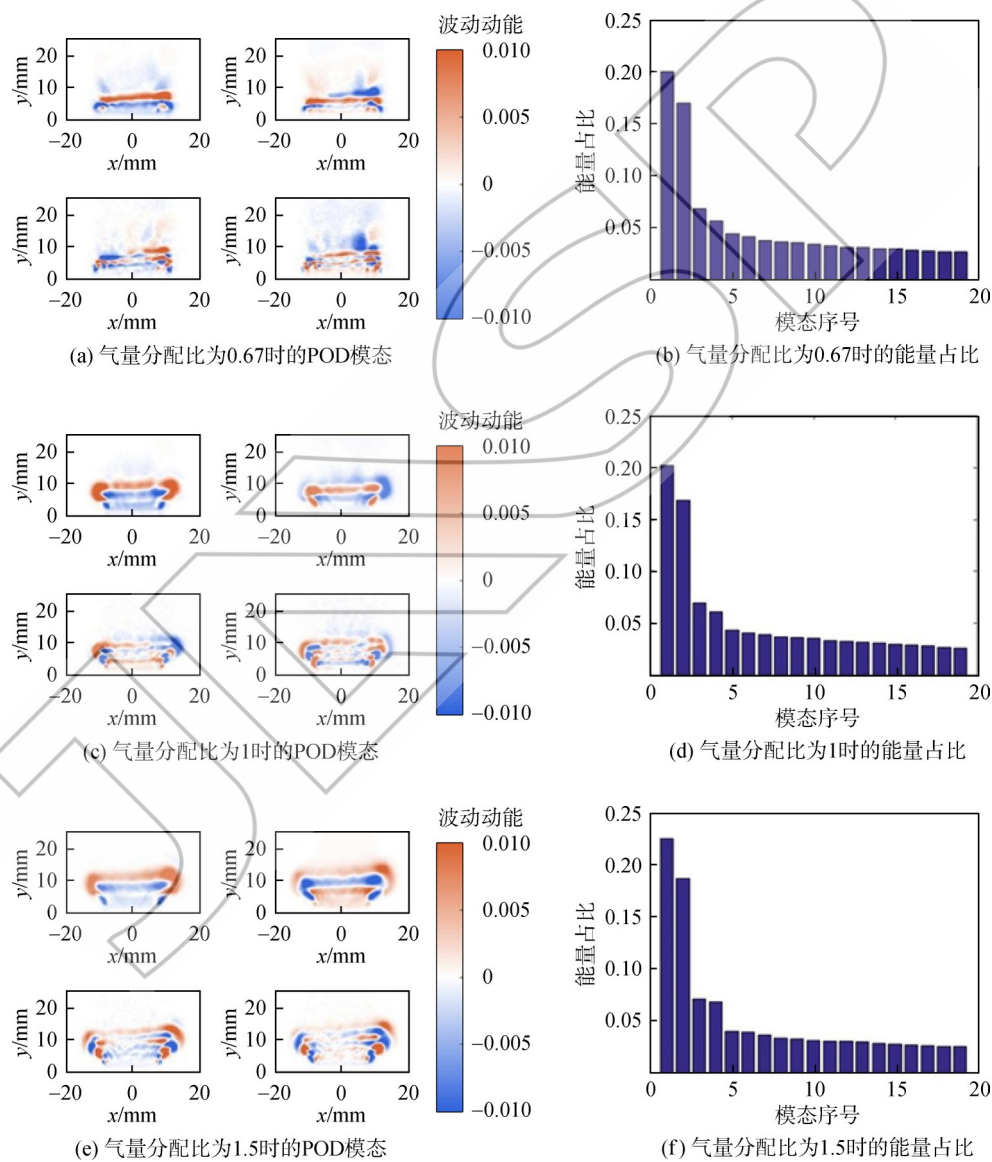


图9 200 Hz时不同气量分配下的POD处理结果

Fig.9 POD results for different values of air split ratio at excitation frequency of 200 Hz

有一定的螺旋作用,螺旋作用随着气量分配比的减小而更加明显。这可能是因为预燃级流量减小,轴向速度变低,根据速度三角形的合成原理,更容易受到脉动的影响。此外,随着气量分配比的减小,火焰释热区域沿径向增大,火焰根部的位置向内收缩,对主燃级施加激励可以明显看到火

焰释热区域的轴向长度减少。可以得出结论:当主燃级气量占据主导地位时,火焰面较宽,释热脉动在激励的作用下有明显的沿轴向减少的趋势,在径向出现了极值点交替并随着主燃级流量增加而脉动加剧的现象,说明此时火焰释热区域脉动较大。

4 结 论

本文采用控制变量法,通过分别控制对主、预燃级气流的声激励,实现了在分别和同时施加扰动下的条件下对中心分级旋流火焰宏观结构和释热脉动特性开展研究的目标,并通过时均图像处理、Abel逆变换和POD方法对火焰图像进行了分析,研究了气量分配对LPP燃烧室燃烧不稳定性的影响并得到了以下结论:

1) 在不同气量分配比下,火焰的宏观结构存在明显的差别,施加外部激励对火焰宏观结构的影响很小。

2) 外激频率为100 Hz和200 Hz时可以明显看出脉动对火焰动态模态分布的影响,火焰出现大尺度的拟序结构。而当外激频率进一步增加后,各模态的能量占比分布趋于平均,已无法看出火焰明显的拟序结构,说明火焰未出现明显的响应。

3) 随着主燃级气量占比增加,火焰在轴向出现了分层现象,火焰释热脉动极值点的径向分布更加杂乱无章,并出现了由旋流引起的螺旋模态。

参考文献:

- [1] DUROX D, SCHULLER T, NOIRAY N, et al. Experimental analysis of nonlinear flame transfer functions for different flame geometries[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1):1391-1398.
- [2] 刘宗宽, 刘昌文, 卫海桥, 等. 湍流强度对火焰传播影响的大涡模拟研究[J]. *车用发动机*, 2019, 37(4):79-87.
LIU Zongkuan, LIU Changwen, WEI Haiqiao, et al. Effect of turbulence intensity on flame propagation based on large eddy simulation[J]. *Vehicle Engine*, 2019, 37(4):79-87. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] ALTAY H M, SPETH R L, HUDGINS D E, et al. Flame-vortex interaction driven combustion dynamics in a backward-facing step combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(5):1111-1125.
- [5] KIM K M, YOON J, PARK S, et al. Effects of unstable flame structure and recirculation zones in a swirl-stabilized dump combustor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 58(1/2):125-135.
- [6] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J F, et al. Vortex-shedding and mixing layer effects on periodic flashback in a lean premixed prevaporized gas turbine combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2008, 32(2):2901-2908.
- [7] 张俊, 涂晓波, 陈爽, 等. 贫燃预混旋流火焰PIV和OH-PLIF[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(10):2046-2055.
ZHANG Jun, TU Xiaobo, CHEN Shuang, et al. Instantaneous and simultaneous PIV and OH-PLIF measurement for lean premixed swirl flame[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(10):2046-2055. (in Chinese)
- [8] TAAMALLAH S, SHANBHOGUE S J, GHONIEM A F. Turbulent flame stabilization modes in premixed swirl combustion: physical mechanism and Karlovitz number-based criterion[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 166:19-33.
- [9] 魏星. 贫燃预混燃烧火焰形态与流场研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
WEI Xing. Flame shape and flow field research of lean premixed combustion[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] CHEN H, REUSS D L, HUNG D L S, et al. A practical guide for using proper orthogonal decomposition in engine research[J]. *International Journal of Engine Research*, 2013, 14(4):307-319.
- [11] 谢法, 黄勇, 苗辉, 等. 气量分配对双轴向旋流器燃烧室贫燃性能影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(11):1456-1460.
XIE Fa, HUANG Yong, MIAO Hui, et al. Effects of airflow split and primary holes arrangement on lean blowout limits of combustor with dual-axial swirlers[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(11):1456-1460. (in Chinese)
- [12] 谢法, 黄勇, 苗辉, 等. 气量分配对轴径向旋流杯燃烧室贫燃边界的影响[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(8):1756-1760.
XIE Fa, HUANG Yong, MIAO Hui, et al. Effects of airflow split and primary holes arrangement on the lean blowout limits of a combustor with axial-radial swirl cup[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(8):1756-1760. (in Chinese)
- [13] WEI Xiao, YONG Huang. Lean blowout limits of a gas turbine combustor operated with aviation fuel and methane[J]. *Heat Mass Transfer*, 2016, 52(5):1015-1024.
- [14] 姜磊, 孔文俊. 双级反向旋流器气量分配对燃烧室性能的影响[J]. *热能动力工程*, 2018, 33(3):50-56.
JIANG Lei, KONG Wenjun. Effects of air split of dual-stage counter rotating swirlers on the performance of combustor[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2018, 33(3):50-56. (in Chinese)
- [15] 付镇柏, 林宇震, 张弛, 等. 中心分级燃烧室预燃级燃烧性能实验[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(1):46-52
FU Zhenbo, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experiment of

- combustion performance of internally-staged combustor pilot stage[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(1):46-52. (in Chinese)
- [16] HAN X, LAERA D, MORGANS A S, et al. Flame macro-structures and thermoacoustic instabilities in stratified swirling flames[J]. *Proceedings of the combustion institute*, 2018, 37(4):5377-5384.
- [17] HAN X, LAERA D, YANG D, et al. Flame interactions in a stratified swirl burner: flame stabilization, combustion instabilities and beating oscillations[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 212:500-509.
- [18] 张弛, 周宇晨, 韩啸, 等. 同心旋流分层预混火焰的动力学模态分析[J]. *推进技术*, 2020, 41(3):595-604.
ZHANG Chi, ZHOU Yuchen, HAN Xiao, et al. Dynamic mode analysis on internally-staged-swirling stratified premixed flame[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(3):595-604. (in Chinese)
- [19] 苏童. 外激速度扰动条件下分层旋流火焰的动态响应[D]. 北京:北京航空航天大学, 2021.
- SU Tong. Response of stratified swirl-stabilized flame to the forced-excited velocity disturbances[D]. Beijing:Beihang University, 2021. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] DASCH C J. One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(8):1146-1152.
- [22] MA K, YU X, ZHAO X, et al. Response of lean premixed swirl tubular flame to acoustic perturbations[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 119:110199.1-110199.10.
- [23] CHARALAMBIDES A G, SAHU S, HARDALUPAS Y, et al. Evaluation of homogeneous charge compression ignition (HCCI) autoignition development through chemiluminescence imaging and proper orthogonal decomposition[J]. *Applied Energy*, 2018, 210:288-302.

(编辑:张 雪)