

甲烷预混多喷嘴阵列燃烧器热声振荡模态实验研究

任乐乐^{1,2}, 熊燕^{1,2}, 刘志刚^{1,2}, 杨柠菁^{1,2}

(1. 中国科学院工程热物理研究所 先进能源动力重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 航空宇航学院, 北京 100049)

摘要:以多喷嘴阵列燃烧器为对象,研究了甲烷预混模式下不同当量比燃烧的自激热声振荡特性,实验过程中同步测量了热释放率和压力脉动信号并获取了OH*时序图像。利用相空间重构和本征正交分解分别解析了压力脉动、反应区相干结构和各阶模态能量占比。研究结果表明,在当量比0.62~0.85范围内,随着当量比增加,燃烧室内依次出现低频振荡、稳定燃烧、间歇振荡和极限环振荡4种典型燃烧状态;当发生极限环振荡时,压力重构曲线为极限环,其轴线附近没有数据点分布,前3阶能量占比达到70%以上,反应区沿轴向发生明显的交替变化,沿径向具有较好的对称性和均匀性;稳定燃烧时,重构曲线凝成一团,前20阶能量占比不足25%,不存在明显的主频,瞬态火焰形态具有较好的一致性;甲烷预混多喷嘴阵列燃烧器的自激振荡模态为单一轴向振荡模态,和传统旋流燃烧有很大的不同,这可为后续进一步开展多喷嘴阵列燃烧器热声产生机理和抑制方案的研究提供参考。

关键词:多喷嘴阵列燃烧器;热声振荡;相空间重构;本征正交分解;轴向振荡模态

中图分类号:TK471 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.004

[引用本文格式]任乐乐,熊燕,刘志刚,等.甲烷预混多喷嘴阵列燃烧器热声振荡模态实验研究[J].热能动力工程,2023,38(5):30-41. REN Le-le, XIONG Yan, LIU Zhi-gang, et al. Experimental study on thermo-acoustic oscillation modes of a methane premixed multi-nozzle array combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 30-41.

Experimental Study on Thermo-acoustic Oscillation Modes of a Methane Premixed Multi-nozzle Array Combustor

REN Le-le^{1,2}, XIONG Yan^{1,2}, LIU Zhi-gang^{1,2}, YANG Ning-jing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Energy and Power, Institute of Engineering Thermophysics of CAS, Beijing, China,

Post Code:100190; 2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing, China, Post Code:100049)

Abstract: The self-excited thermo-acoustic oscillation characteristics of the methane premixed multi-nozzle array combustor were experimentally studied at different equivalent ratios. OH* time sequence images were obtained during the experiment while simultaneously measuring the heat release rate and pressure fluctuation signals. Pressure fluctuations, coherent structures in the reaction zone, and energy ratios of each-order mode were analyzed by phase space reconstruction and proper orthogonal decomposition, respectively. The research results show that four typical combustion states successively appear with the increase of equivalent ratio in the range of 0.62 to 0.85: low frequency oscillation, steady combustion, intermittent oscillation and limit cycle oscillation; when limit cycle oscillation occurs, the reconstructed

收稿日期:2022-12-16; 修订日期:2023-02-11

基金项目:国家重大科技专项(J2019-III-0020-0064)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (J2019-III-0020-0064)

作者简介:任乐乐(1998-),女,中国科学院工程热物理研究所硕士研究生。

通讯作者:熊燕(1978-),男,中国科学院工程热物理研究所高级工程师。

curve presents a hollow barrel shape, no data point distributes around axis, and the proportion of the first three orders of energy reaches more than 70%. The flame's axial path clearly displays alternating changes between light and dark, whereas the radial direction displays good symmetry and regularity; however, under the stable combustion state, the reconstructed curve is agglomerated and disorderly, the first 20 orders of energy accounts for less than 25%, the dominant frequency is not observed, and the transient flame profile has good consistency within a cycle; moreover, the methane premixed multi-nozzle array burner's self-excited oscillation mode is a single axial oscillation mode, which differs greatly from typical swirl combustion and can serve as a reference for future work on the multi-nozzle array burner's thermo-acoustic mechanism and suppression strategy.

Key words: multi-nozzle array combustor, thermo-acoustic oscillation, phase space reconstruction, proper orthogonal decomposition, axial oscillation mode

引言

贫燃预混燃烧技术在燃气轮机的清洁燃烧中得到广泛应用^[1],该技术可以降低燃烧区域的反应温度,抑制热型 NO_x 生成^[2]。但由于该燃烧模式下当量比趋于熄火边界,导致燃烧不稳定成为需要重点解决的问题^[3]。燃烧不稳定将导致燃烧室部件出现裂缝、变形和破碎,严重影响设备的安全^[4]。

燃气轮机普遍使用旋流稳定的燃烧器^[5],针对其振荡特性,国内外不少学者开展了相关研究。余志健等人^[6]实验验证了当量比会影响燃烧稳定性,并结合 COMSOL 证明了该脉动频率与腔体一阶纯声学模态有关。XU 等人^[7]实验研究了旋流器位置对燃烧稳定性的影响。Wang 等人^[8]实验发现可通过减小喷射器尺寸降低相位延迟的方式来抑制预混旋流火焰的稳定性。

针对火焰图像和时变脉动序列的后处理,广泛使用的方法为相空间重构^[9]和本征正交分解^[10]。Kim 等人^[11-12]针对自激喷射火焰,利用相空间重构方法识别了模态的转变。苏贺等人^[2]利用本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)研究了分级比对燃烧不稳定的影响,发现分级比会改变火焰宏观结构。Dong 等人^[13]利用 POD 方法提取了脉动主频和振荡燃烧过程中的相干结构。

但旋流燃烧器存在易回火、热声振荡等问题,且目前通过氢气来减少碳排放的方案得到燃气轮机研究界的广泛兴趣。氢由于具有火焰传播速度快、易回火的特点使得微混燃烧器得到广泛应用^[14],但该类型燃烧器的热声振荡特性仍需要研究。

Lee 等人^[15]研究了燃烧室长度对 60 喷嘴燃烧器稳定性的影响,发现长度增加更易激发燃烧不稳定;Kim 等人^[16]实验研究了燃料组分对多喷嘴燃烧器燃烧特性的影响,结果表明氢气含量增加会导致振荡主频增加,一系列涡结构的生长和均匀分布火焰之间的相互作用会影响燃烧稳定性。柳伟杰等人^[17]从大涡模拟和实验两方面验证了同向旋流多喷嘴火焰发生热声振荡与相邻火焰相互作用,以及次回流区和中心火焰尾部的热声耦合密切相关。当量比的变化会直接影响火焰结构,而火焰结构的变化是导致燃烧不稳定的重要因素^[18]。

为此,本文在前期工作的基础上^[19],以多喷嘴阵列燃烧器为研究对象,采用实验方法研究了预混燃烧过程中的热声自激振荡特性,分析了不同当量比下甲烷燃烧的动态过程和稳定范围。对比了不同当量比下压力脉动、热释放率脉动及火焰的结构,进而分析燃烧不稳定的产生机制,为后续开展相应的抑制方案提供参考。

1 实验装备与测量系统

1.1 实验装置和燃烧器

多喷嘴阵列燃烧器热声振荡实验系统结构如图 1 所示,其中包括空气系统、燃料系统、24 喷嘴阵列燃烧器和测量系统。空气系统由空气压缩机、储气罐、减压阀、空气流量计和对应的空气管道组成。空气流量控制是通过两路质量流量计(Seven star D07-60G,量程 0 ~ 1 000 L/min)并联实现,精度为 $\pm 2.0\%$ F.S。燃料系统主要由甲烷气瓶、减压阀、质量流量计和相应的燃料管道构成。甲烷流量的控制是通过质量流量计(Seven star D07-23F,量程 0 ~ 200 L/min)

实现,精度为 $\pm 1.5\%$ F.S。

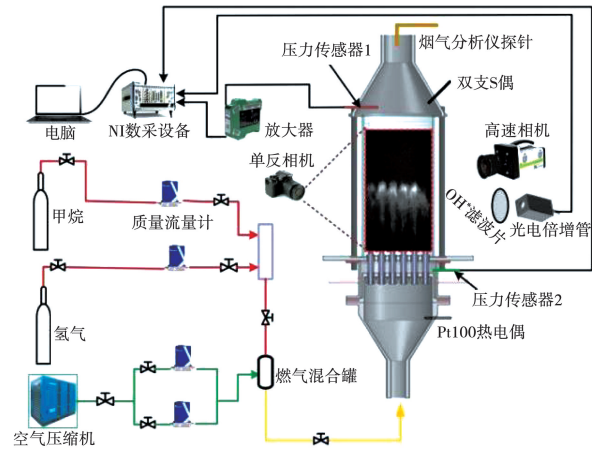


图 1 多喷嘴阵列燃烧器热声振荡实验系统

Fig. 1 Thermoacoustic oscillation experimental system diagram of the multi-nozzle array combustor

为避免燃料/空气掺混不均导致的局部当量比波动,本文在甲烷/空气预混模式下研究了不同当量比下 24 喷嘴阵列燃烧器的热声响应特性。模型燃烧器结构如图 2 所示,主要包括配气腔、腔体 2 和喷嘴组件。其中,腔体 2 为部分预混模式下的燃料混合腔,在完全预混模式下,空气和燃料由外部的空气燃料混合器提前混合,以预混气形式通过空气管进入配气腔,如图 2(a)。所示该燃烧器的喷嘴数目为 24,内径 $d_n = 5$ mm,壁厚 1.5 mm,总长度为 75 mm,如图 2(c)所示。其中喷嘴出口距安装端盖为 15 mm,喷嘴间最大间距为 $5.3d_n$,最小间距为 $3.8d_n$,如图 2(b)所示。考虑到光学测量的需要,燃烧室采用内径 120 mm、壁厚 2.5 mm、长度 400 mm 的石英玻璃窗。

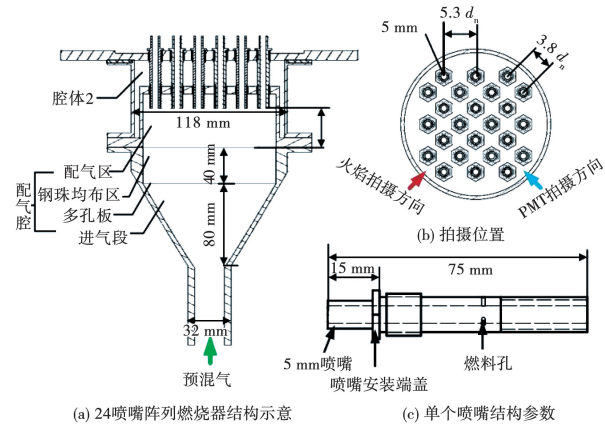


图 2 模型燃烧器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of combustor model

1.2 测量系统

为监测来流管路和燃烧室的压力脉动情况,在来流管路和燃烧室分别布置了 PCB-112A21 常温型传感器和 PCB-176A02 高温型传感器,常温型压力传感器距喷嘴安装端盖上游 20 mm,传感器与腔体内壁面平齐。高温型压力脉动传感器距喷嘴安装端盖下游 410 mm,其运行温度为 650 $^{\circ}\text{C}$ 以下,需考虑冷却;同时考虑声波在管道内的反射效应,该传感器安装采用探针和半无线长管法相结合的安装方式。火焰的集总释热率采用 HAMAMATSU 公司 H10722 系列电压输出型光电倍增管。光电倍增管距石英玻璃中轴线 570 mm,距离喷嘴出口端面 90 mm,探测窗前加装 OH 基带通滤波片 (310 ± 5 nm) 和衰减片,OH^{*} 自由基的浓度直接与燃烧强度相关联,可以用来表征瞬态燃烧特征^[20]。

脉动压力信号与光电倍增管信号由采集板卡 NI 4499 同时采集,采集机箱为 NI PXIe-1082,采集频率设为 20 kHz,采集时间为 1 s。

瞬态 OH^{*} 图像采用 IX cameras i-SPEED 7 系列高速摄像机配合图像增强器进行拍摄,拍摄频率为 4 kHz,满足那奎斯特采样定理。每张图片的分辨率为 2048×1536 ,每个工况拍摄 1 s。

1.3 数据处理

1.3.1 本征正交分解

本征正交分解 (POD) 为一种模态分解方法,可用于从不稳定流场中提取主要相干流。本实验中,对高速 OH^{*} 图像进行了一维“快照”POD 方法,其具体原理如下:

在 Δt 时间段内以固定采样频率 f 获得 n 张像素为 $a \times b$ 的二维火焰图像,通过 OH^{*} 滤镜后可以用灰度表示火焰热释放率强度。对单张图像进行维度转化使其变为单位列向量,则高速相机获得的瞬态火焰强度集合 U 可以以下面的矩阵表示:

$$U = \begin{bmatrix} u_1(x_1) & u_2(x_1) & \cdots & u_n(x_1) \\ u_1(x_2) & u_2(x_2) & \cdots & u_n(x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1(x_m) & u_2(x_m) & \cdots & u_n(x_m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

不同瞬间的火焰场 U 包含了平均场 $\bar{U}$ 和脉动场 U' :

$$U' = U - \hat{U} = \begin{bmatrix} u'_1(x_1) & u'_2(x_1) & \cdots & u'_n(x_1) \\ u'_1(x_2) & u'_2(x_2) & \cdots & u'_n(x_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u'_1(x_m) & u'_2(x_m) & \cdots & u'_n(x_m) \end{bmatrix} \tag{2}$$

令 $X = U'$, 转置后的矩阵为 X^T 其对应的自相关矩阵 C 为:

$$C = \frac{1}{m} X^T X \tag{3}$$

利用公式(4)计算矩阵 C 的所有特征值和特征向量:

$$(\varphi_j, \lambda_j, a) = svd(X) \tag{4}$$

式中: φ_j —基向量,也就是 POD 模态,特征值 λ_j 代表 POD 模态 φ_j 具有的能量; a —时间模态常数。将特征值按大小排列,其中第一个为占最大能量比例的模态,前若干阶占据主要能量的模态可用来表征原始数据的特征信息。

1.3.2 相空间重构

压力时变序列具有非线性特点,相空间重构可以拓展原有的数据维数,并且把原有时间序列中的信息充分显露出来,从而恢复原来系统的动力学特征^[21]。

其基本原理为利用实验获得的压力序列 $p_i, i = 1, 2, \cdots, n$ 总共 N 个点,用坐标延迟的方法形成延时变量 $p_{i+\tau}$,从而构建 m 维状态向量 $p(t)$ 。 m 为嵌入维数,该值通过 Takens 嵌入定理确定^[22],一维时变序列中维数取 3。延迟时间 $\tau(s)$ 通过自相关分析法确定,自相关函数 R_{pp} 的公式如下所示:

$$R_{pp}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} p_i p_{i+\tau} \tag{5}$$

当自相关函数下降至初始值的 $1 - 1/e$ 时所得的时间即为延迟时间。

1.4 实验工况

实验过程中,燃料、空气均为常温,燃烧器的运行压力为常压。燃料组分为甲烷,纯度为 99.9%。过程中固定空气流量 $58.4 \text{ m}^3/\text{h}$ (空气射流速度 40 m/s) 不变,通过改变燃料流量来调节当量比在 $0.62 \sim 0.85$ 区间变化,其对应的热负荷也从 37.91 kW 增长至 57.31 kW 。具体的工况如表 1 所示。

表 1 实验工况表
Tab.1 Experimental conditions table

序号	空气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	进口温 度/K	当量比	空气射流 速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	热负 荷/kW
1	58.4	300	0.62	40	37.91
2	58.4	300	0.65	40	40.42
3	58.4	300	0.68	40	43.00
4	58.4	300	0.70	40	45.00
5	58.4	301	0.75	40	49.00
6	58.4	301	0.80	40	53.10
7	58.4	301	0.85	40	57.31

2 实验结果与分析

为监测流量的稳定性,在空气流量为 $58.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 且无燃料供应的条件下,利用常温型压力传感器监测声压信号的波动变化,对应的时域、频谱分析如图 3 所示,时域压力信号波动幅值较小,且对其进行傅里叶变换后发现不存在明显的主频。基于此,可认为冷态进气时流量具有稳定性,不存在周期性脉动主频。

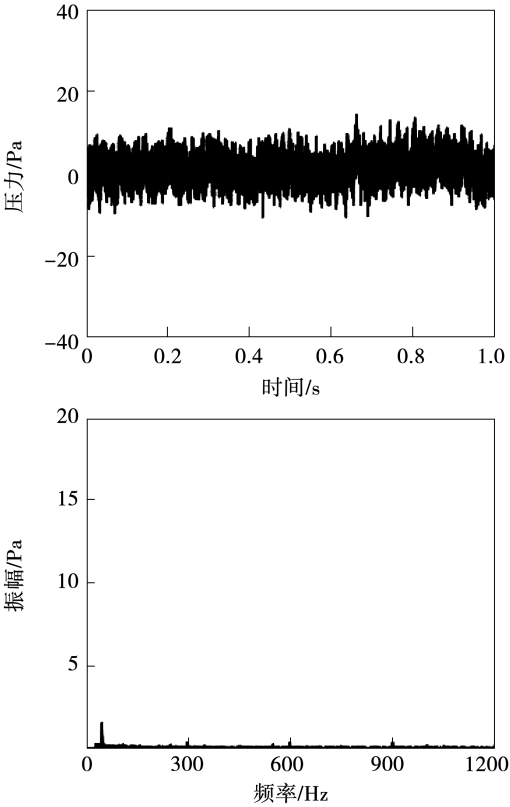


图 3 冷态工况下,来流管路的声压时域信号和频谱分析
Fig.3 Sound pressure time domain signal and frequency spectrum analyses of incoming line under cold condition

结合实验过程中的动态响应特性和反应区分布,将燃烧过程分为低频振荡、稳定燃烧、间歇振荡和极限环振荡 4 种典型燃烧状态。不同当量比下时均 OH^{*} 图像如图 4 所示,其中时均 OH^{*} 图像是 300

张瞬态图像叠加的平均。随着当量比的增加,单簇火焰的长度沿轴向有显著拉伸趋势,由于燃烧器玻璃罩散热的原因沿径向有压缩趋势,同时反应区整体向燃烧室的上游移动。

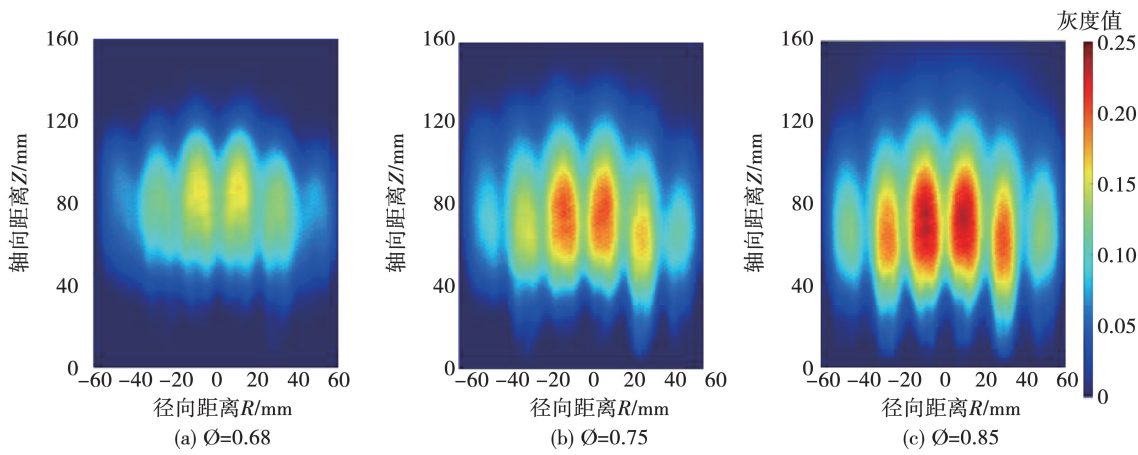


图 4 当量比对火焰形态的影响

Fig. 4 Effect of equivalent ratio on flame shape

2.1 压力脉动分析

射流速度、燃烧室长度和当量比是影响燃烧不稳定特性的重要参数^[20]。本文在能激发热声不稳定的管长 400 mm、射流速度 40 m/s 下,研究当量比对燃烧不稳定的影响。

当量比的变化不仅会影响燃烧室的温度和火焰

形态,而且会对燃烧室的动态特性产生影响。图 5 是当量比分别为 0.68、0.75 和 0.85 时来流管路和燃烧室压力脉动的时域和频域图。实验发现当量比的增加会导致脉动主频提高,这是因为当量比增加会导致燃烧室温度提高,声速增加,而燃烧室的压力脉动主频与声速成正比。

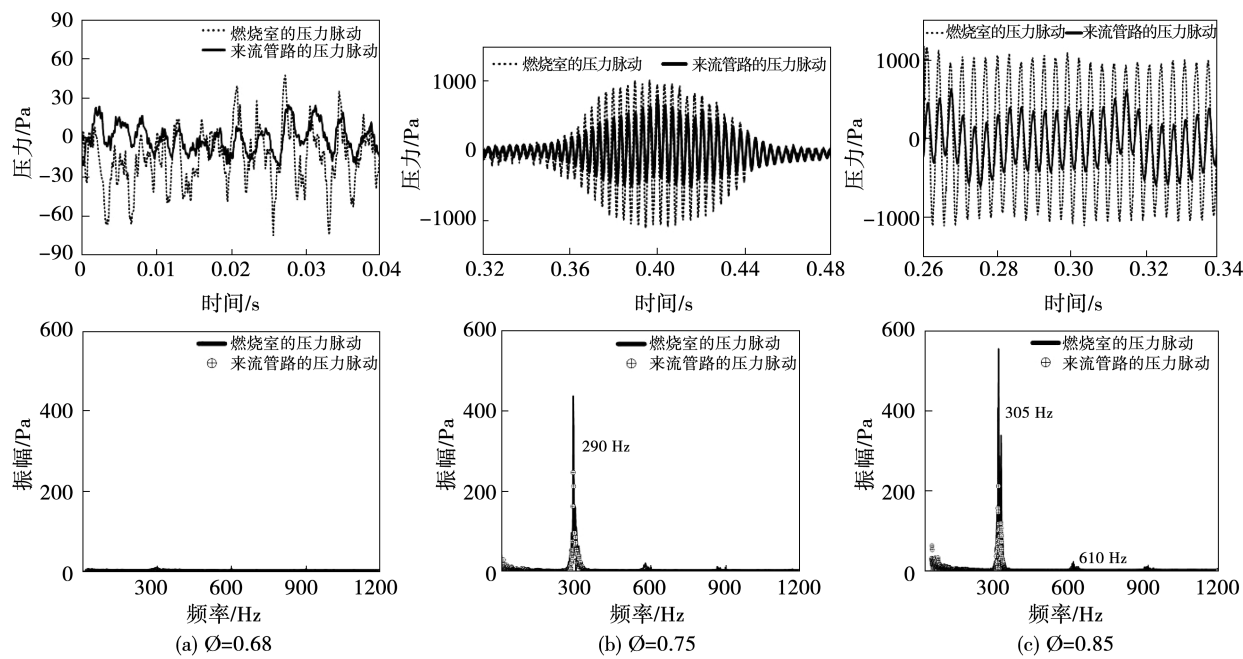


图 5 当量比变化对压力脉动的时域及频谱分析

Fig. 5 Time domain and frequency spectrum analyses of pressure pulsation at different equivalent ratios

由图 5 可知,当量比为 0.68 时,时域压力脉动幅值较小,声压信号处于混沌状态,具有白噪声的特征^[21],对其进行频谱分析发现不存在明显特征峰。推测此时压力脉动的主要来源为湍流流动噪声。

当量比增加到 0.75 时,时域上压力脉动振幅大幅增加,但振幅大小随时间变化表现出间歇性。频谱上来流管路和燃烧室的压力脉动均在 290 Hz 处出现峰值,这主要是由于管道流通、压力波可以连续传播导致。

当量比增加到 0.85 时,时域声压信号近似稳定的正弦波,脉动幅值趋于稳定,达到极限环状态,燃烧室和来流管路的压力脉动主频均为 305 Hz,但燃烧室中出现 610 Hz 的倍频,表现出较强的非线性。时域显示来流管路压力脉动达到峰值的时间滞后于

燃烧室,推测来路管路的压力脉动可能是由于燃烧室的部分振荡能量向前传递,引起其发生的共振^[6]。

2.2 热释放率分析

瑞利准则为研究热声振荡提供了理论判断基础,即当热释放率扰动与压力脉动同相,且热转化为声的能量始终大于声能耗散时,燃烧室内会发生热声振荡。因此探究热释放与压力脉动之间的相位关系对燃烧稳定性的研究有着重要作用。

图 6 为不同当量比下火焰热释放与燃烧室压力脉动的时域、频谱、相位和相空间重构对比图。随着当量比的增加,热释放的平均值不断增加。实验结果表明当当量比由 0.68 增加至 0.85 时,表征热释放率强度的光电倍增管输出电压也由 1.2 V 增加至 1.8 V。

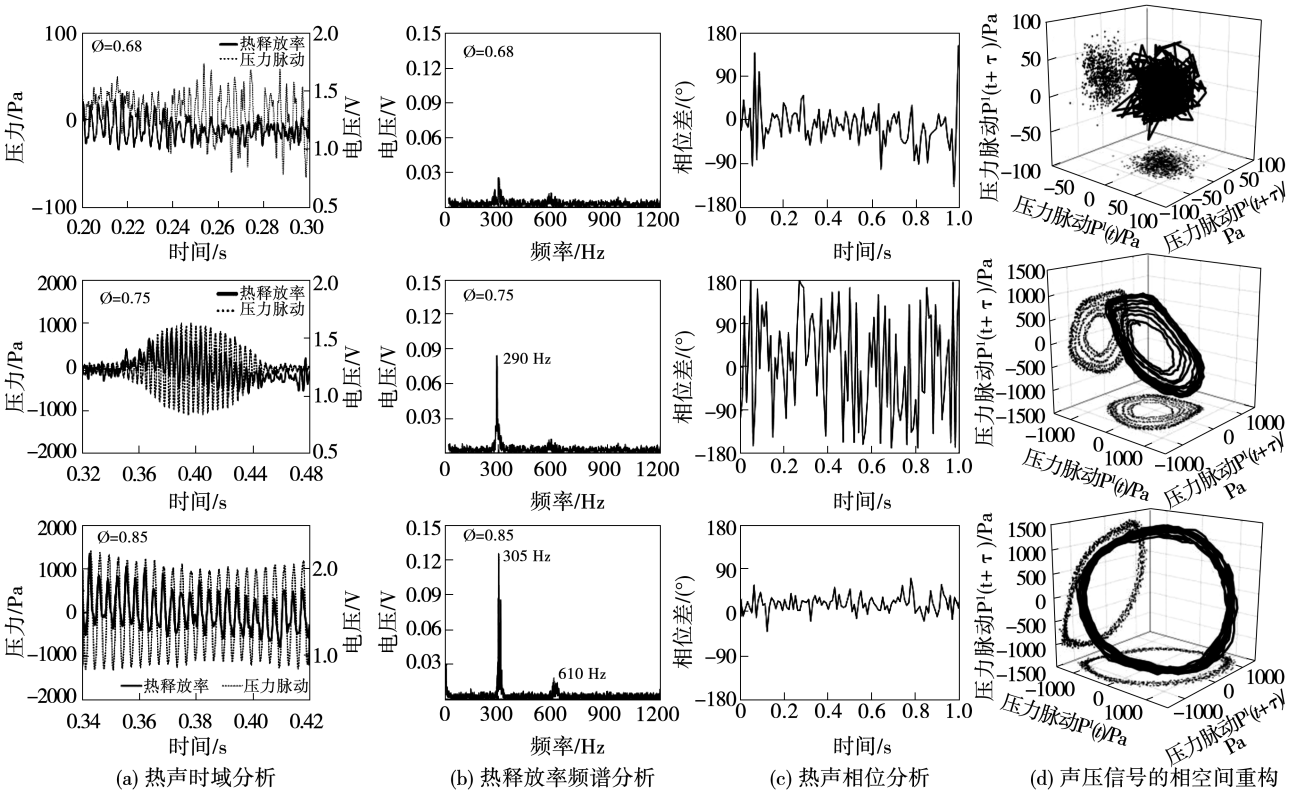


图 6 不同当量比下,压力脉动和热释放脉动的时域、频谱和相空间重构图

Fig. 6 Time domain, frequency spectrum and phase space reconstruction diagram of pressure pulsation and heat release pulsation at different equivalent ratios

当量比为 0.68 时,热释放率与压力脉动均为无序波形,且二者之间相位差大于 90°,不满足瑞利准则,呈现稳定燃烧状态。同时,重构的脉动压力轨迹杂乱无序。

当量比增加至 0.75 时,热释放率脉动和声压脉动在短时间范围内可满足小于 90°要求,但时间跨度较大时则不满足同相条件,因此整体呈现间歇振荡状态。分析可能的原因有两个,一是振荡燃

烧通过改变平均火焰位置影响热声耦合条件,从而
影响燃烧状态;二是贫燃的实验工况导致热能转
化成声能的能量无法时时满足大于声能的耗散,所
以能量只能在积聚一段时间后形成一次较小的
振荡^[23]。

当量比增加至 0.85 时,热释放脉动和压力脉动
均呈现出规则的波形,热释放率和压力扰动之间同
相,这说明该状态下始终存在着热能向声能的转化
且该部分能量大于声能耗散;重构相图形成了极
限环。

当量比 0.68 下,频谱上不存在特征峰;当量
比为 0.85 时,热释放率脉动出现 305 Hz 主频和
610 Hz 的二次谐波,该频率与压力脉动频率一致,

表明热释放脉动与压力脉动是相互耦合的。

2.3 火焰动态分析

火焰结构可以较好地反映压力脉动和热释放扰
动之间的耦合过程。一个周期内火焰形态的演变过
程如图 7 所示。为进一步研究极限环振荡周期内火
焰的线强度变化,提取了单个喷嘴火焰线强度沿轴
向的释热变化(提取的是从左数起第 3 个喷嘴中心
位置)。如图 8 所示,固定径向位置(左数第 3 个喷
嘴中心)研究不同轴向高度的热释放率大小,其中
线段 $a-n$ 代表的是该位置在一个周期不同时刻对
应的火焰强度。图 7 和图 8 均采用灰度的大小代表
火焰强度。

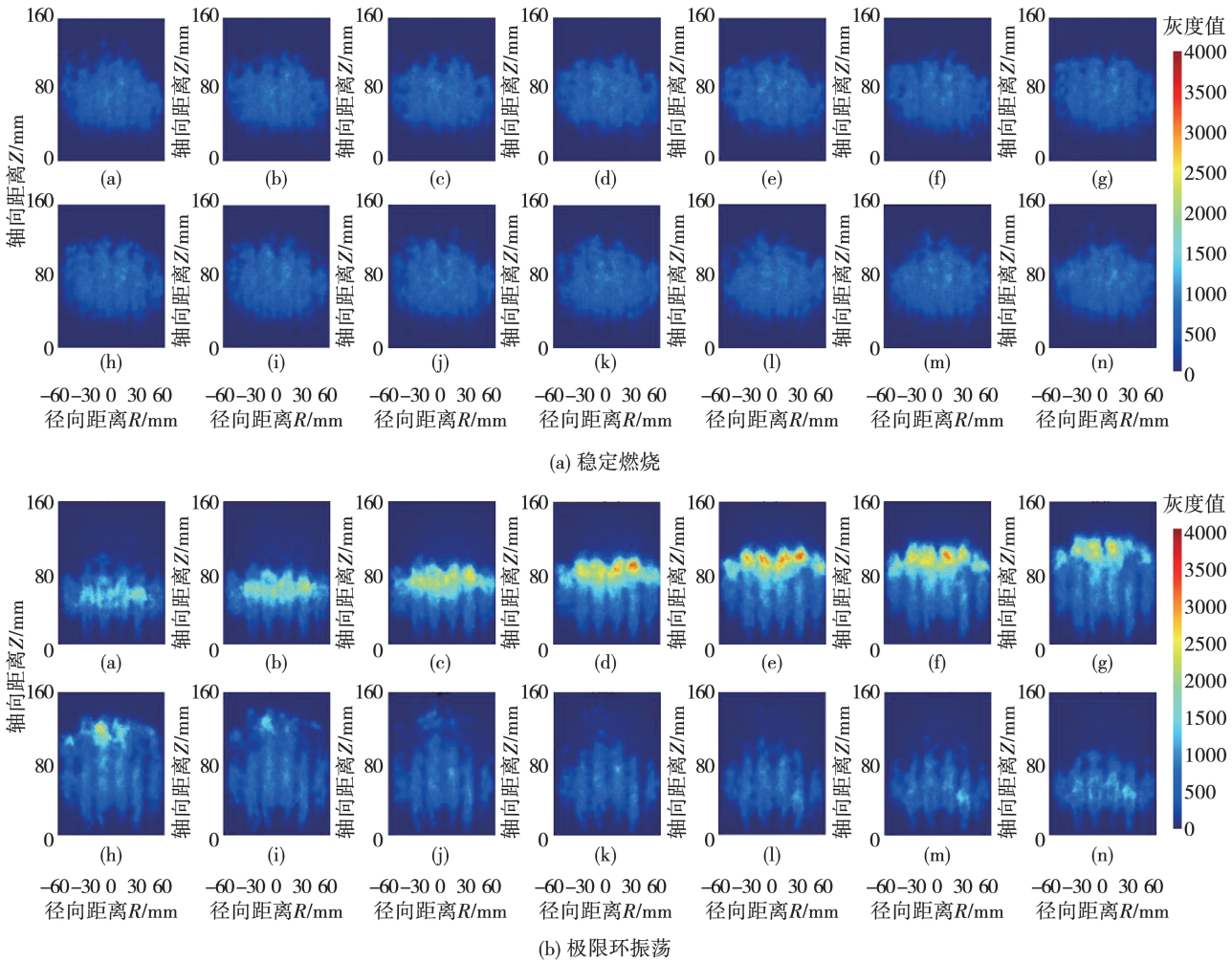


图 7 一个周期内火焰形态的演变过程

Fig. 7 Flame shape evolution process within one cycle

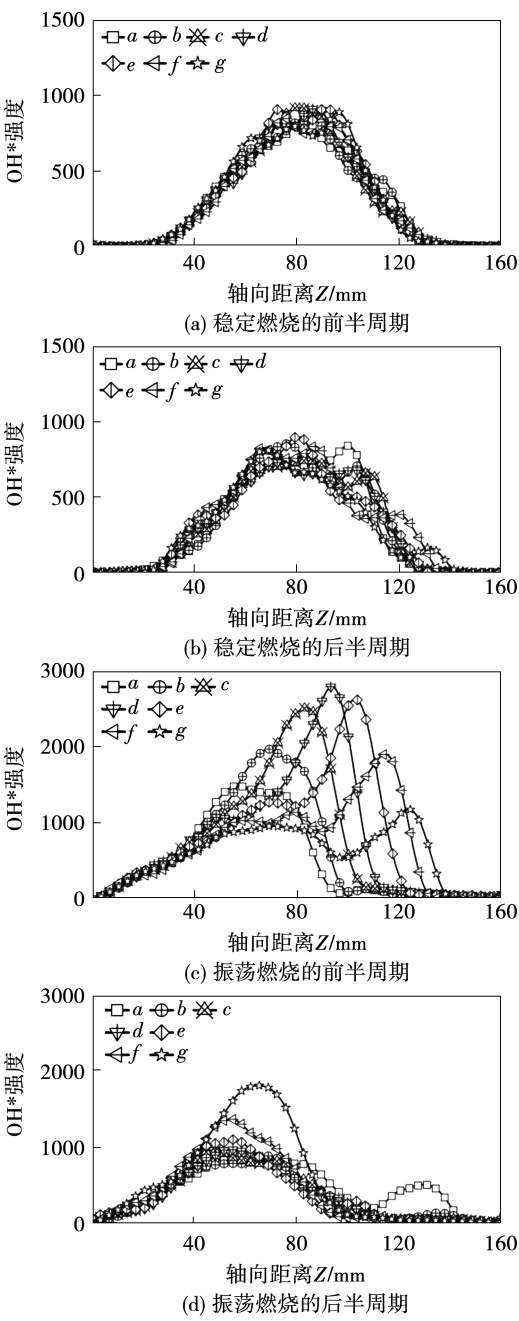


图 8 一个周期内火焰强度的线提取

Fig. 8 Line extraction of flame intensity within one cycle

由图 8(a) 和图 8(b) 可知,稳定燃烧时,火焰线强度沿轴向的释热率变化在整个周期内基本不变。由图 7(a) 可知,由于燃气混合物空间分布的随机性,瞬态 OH^{*} 图像在不同时刻没有出现明显变化。

结合图 7(b) 和图 8(c)、(d) 可知,当燃烧达到极限环振荡状态时,火焰结构呈现周期性脉动特点。前半周期:火焰根部基本固定,火焰锋面不断向燃烧室下游方向移动,火焰长度不断被拉伸,燃烧热释放

逐渐增强;而后半周期:火焰热释放逐渐减弱,火焰长度逐渐缩短,过渡到和稳态燃烧类似的形态。对比来看,前半周期释热率的形态对热声振荡的发生起到重要推动作用;由上述分析可见,火焰沿径向具有较好的均匀性和对称性。火焰的耦合运动会改变火焰平均位置,导致气流受热不均产生压力波,进一步影响火焰的物理、化学行为^[22]。

为进一步分析火焰的相干结构,对高速 OH^{*} 图像进行 POD 分解^[23],前 20 阶模态能量占比如图 9 所示。当燃烧室内发生极限环振荡时,模态能量主要集中在前 3 阶,其能量占比达到 70% 以上,根据主成分分析思想,前 3 阶模态可以很好地反映火焰的整体脉动特点,而稳定燃烧时,前 20 阶能量占比不足 25%,不存在能量占优的模态。

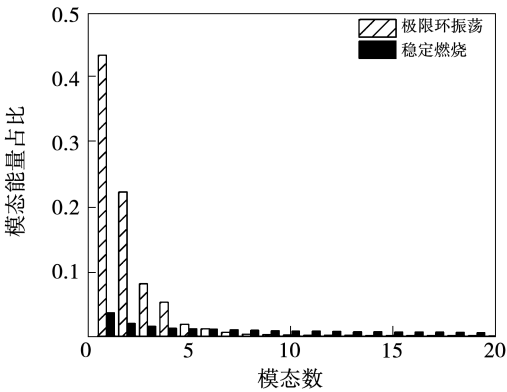


图 9 不同当量比下的模态能量占比图

Fig. 9 Modal energy proportion diagram at different equivalent ratios

图 10、图 11 为不同当量比下,前 4 阶 POD 模态分布图。当量比为 0.68 时,前几阶火焰模态空间分布较为无序,不存在明显的明暗变化规律。当量比为 0.85 时,火焰的模态分布沿轴向发生明显的明暗交替变化,沿径向具有较好的对称性和均匀性,呈现明显的轴向振荡特征。分析可能的原因是模型燃烧器的 24 个喷嘴结构完全一致,形成热释放均匀的对称性和相邻多火焰间的时空趋同性,相干涡结构阵列的生长和多火焰之间的共同作用下激发了热声振荡^[24]。

为进一步分析 POD 对应的时间常数与压力脉动之间的关系,分别对当量比 0.68 和 0.85 下的前 2 阶 POD 模态时间常数进行快速傅里叶变换,以获得特征频率,如图 12、图 13 所示。

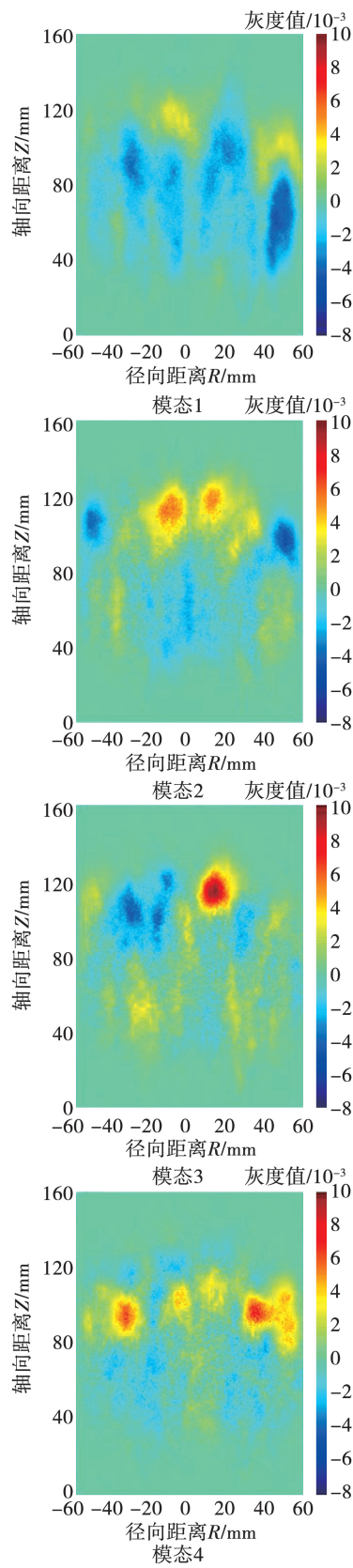


图 10 当量比 0.68 时前 4 阶 POD 模态分布图
Fig. 10 The first 4 orders of POD modes of flames
at 0.68 equivalence ratio

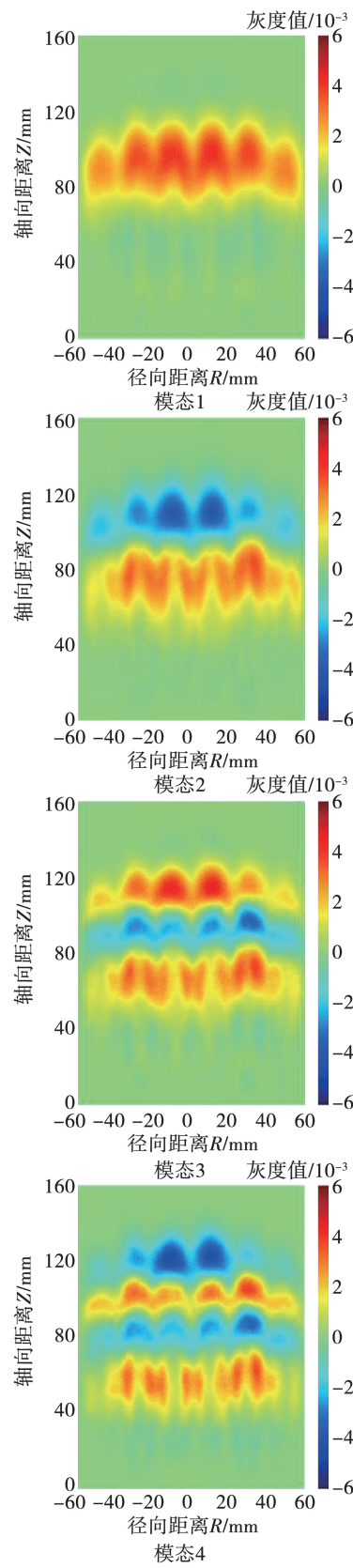


图 11 当量比 0.85 时前 4 阶 POD 模态分布图
Fig. 11 The first 4 orders of POD modes of flames
at 0.85 equivalent ratio

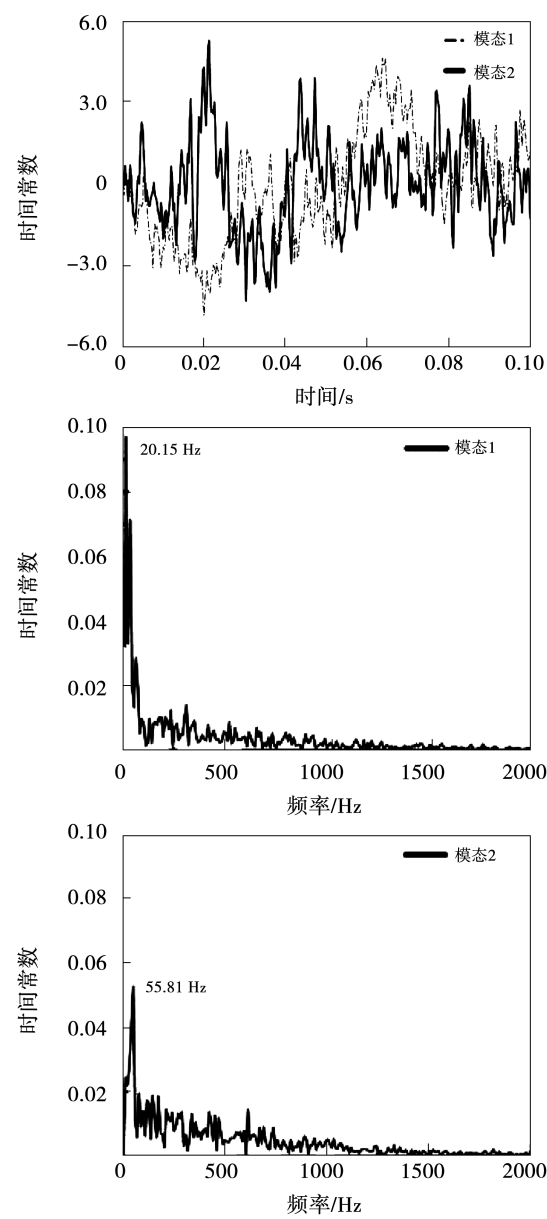


图 12 当量比 0.68 时前 2 阶 POD 模态时间常数时域和频谱

Fig. 12 Time coefficient of the first 2 orders of POD modes in the time domain and frequency spectrum at 0.68 equivalence ratio

由图 12 所示,当量比为 0.68 时,一、二阶模态的时间常数在时域上均为紊乱波形,频谱上分别存在 20.51 和 55.81 Hz 的低频特征峰,该频率与压力脉动主频未相互耦合,推测是由于流量波动等导致的火焰随机抖动^[25]。

由图 13 所示,当量比为 0.85 时,时间常数在时

域上呈现出规则的波形,一、二阶频谱上均存在 319.2 和 628.4 Hz 的基频和二次谐频。对比发现该频率和压力脉动主频存在一定偏差。推测可能是因为振荡系统并不是完全稳定的,由于燃气流量等存在较小的扰动所致。需要注意的是,该频率与压力脉动主频接近,容易导致压力脉动与释热率的耦合。

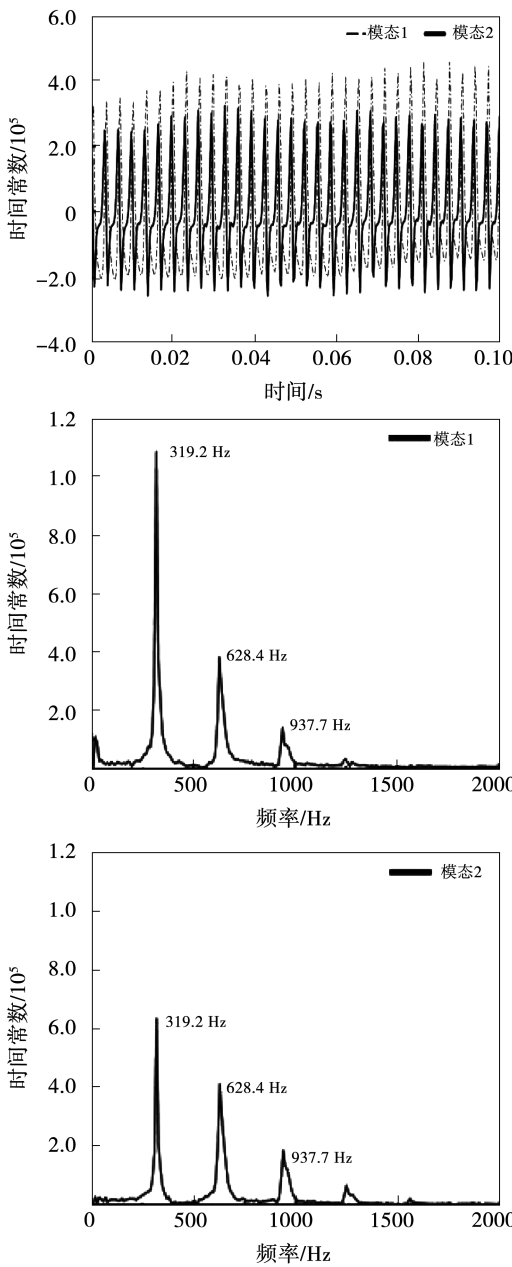


图 13 当量比 0.85 时前 2 阶 POD 模态时间常数时域、频谱

Fig. 13 Time coefficient of the first 2 orders of POD modes in the time domain and frequency spectrum at 0.85 equivalence ratio

3 结 论

本文通过实验探究了甲烷预混 24 喷嘴阵列燃烧器在常压下的自激振荡燃烧特性。通过快速傅里叶变换和相空间重构对压力脉动数据进行处理,利用本征正交分解分析火焰相干结构,得到如下结论:

(1) 在当量比区间 0.62 ~ 0.85 范围内,随着当量比增加,依次呈现低频振荡、稳定燃烧、间歇振荡和极限环振荡 4 种不同的典型燃烧状态。当量比区间 0.62 ~ 0.65 时呈现低频振荡特征,在当量比区间 0.65 ~ 0.70 时呈现稳定燃烧特征,在当量比区间 0.70 ~ 0.75 时呈现间歇振荡特征,在当量比区间 0.75 ~ 0.85 时呈现极限环振荡特征。

(2) 稳定燃烧时,时变声压信号脉动幅值较小,频谱不存在峰值;压力重构曲线紊乱无序;瞬态 OH* 形态具有较好的一致性;POD 表明不存在能量占优的模式,POD 时间常数的频谱分析均为低频,推测可能是由于流动不稳定等导致的火焰随机扰动。

(3) 间歇振荡时,时变声压信号在时域上振幅大幅增加,但振幅大小随时间变化表现出间歇性,频谱分析存在明显的主频,但幅值较低。

(4) 极限环振荡时,时变声压信号呈现较为稳定的周期性振荡;频谱分析存在明显的主频;瞬态 OH* 图像沿径向具有较好的对称性和均匀性,沿轴向呈现前半周期拉伸,后半周期压缩的趋势;压力重构曲线形成了极限环;POD 分析存在能量占优的模式,推测振荡是由于热释放均匀性、对称性和相邻多火焰间的时空趋同性导致。

参考文献:

[1] 李苏辉,张归华,吴玉新. 面向未来燃气轮机的先进燃烧技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版),2021,61(12):1423-1437.
LI Su-hui, ZHANG Gui-hua, WU Yu-xin. Advanced combustion technologies for future gas turbines[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(12):1423-1437.

[2] 苏贺,郭志辉. 分级旋流火焰的燃烧不稳定性及火焰动力学[J]. 航空动力学报,2021,36(4):806-815.
SU He, GUO Zhi-hui. Combustion instability and flame dynamics of staged swirl flame[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(4): 806-815.

[3] 于丹,郭志辉,杨甫江. 贫燃预混燃烧室中的分布式火焰传递函数分析[J]. 推进技术,2016,37(12):2210-2218.
YU Dan, GUO Zhi-hui, YANG Fu-jiang. Experimentally study on distribution of flame transfer function in a lean premixed combustor[J]. Propulsion Technology, 2016, 37(12):2210-2218.

[4] 王译晨,朱民. 火焰动力学及其对热声稳定性的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(4):785-793.
WANG Yi-chen, ZHU Min. Flame dynamics and their effect on thermoacoustic instabilities[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(4):785-793.

[5] XUE Shuai-jie, YANG Wei-dong, ZHOU Li-xin, et al. Experimental investigation of self-excited combustion instabilities in a small Earth storable bipropellant rocket combustor[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 105:106008. 1-106008. 11.

[6] 余志健,杨旸. 部分预混燃烧室热声不稳定及火焰结构实验分析[J]. 航空动力学报,2023,37(12):2851-2864.
YU Zhi-jian, YANG Yang. Investigation of thermo-acoustic instabilities and flame structures in a swirled partly premixed combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 37(12):2851-2864.

[7] XU Liang-liang, ZHENG Jian-yi, WANG Guo-qing, et al. Effects of swirler position on flame response and combustion instabilities[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(3):345-355.

[8] WANG Guo-qing, XU Liang-liang, LI Lei, et al. The effects of injector size on the dynamics and instabilities of lean premixed swirling flame[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 123: 107463. 1-107463. 10.

[9] 何祖强,王平, MURUGESAN M, 等. 新型双旋流燃烧室热声振荡的实验研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(1):44-52.
HE Zu-qiang, WANG Ping, MURUGESAN M, et al. Experimental investigation on thermoacoustic oscillation of a new dual-swirl combustor[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(1):44-52.

[10] 赖安卿,刘云鹏,付尧明,等. 振荡燃烧火焰图像处理[J]. 燃烧科学与技术,2020,26(1):10-17.
LAI An-qing, LIU Yun-peng, FU Yao-ming, et al. Images processing of combustion oscillating flame[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(1):10-17.

[11] AHN B, LEE J, JUNG S, et al. Nonlinear mode transition mechanisms of a self-excited Jet A-1 spray flame[J]. Combustion and Flame, 2019, 203:170-179.

[12] JIN U, KIM K T. Influence of radial fuel staging on combustion instabilities and exhaust emissions from lean-premixed multi-element hydrogen/methane/air flames[J]. Combustion and Flame, 2022, 242:112184.

[13] DI D, YAN Y, LIU Y. Study on the flow characteristics and oscillating mechanism of a swirl flame[J]. Fuel, 2021, 306:121657.

[14] 仇园,张哲巖,雷福林,等. 单管微混燃烧器燃料/空气掺混

规律研究[J]. 热能动力工程,2022,37(5):62–71.

QIU Yuan,ZHANG Zhe-dian,LEI Fu-lin,et al. Study on fuel/air mixing law of single tube micro mixing burner [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(5):62–71.

[15] LEE T,KIM K T. High-frequency transverse combustion instabilities of lean-premixed multislit hydrogen-air flames [J]. Combustion and Flame,2022,238:111899.

[16] KIM S K,KIM D,CHA D J. Finite element analysis of self-excited instabilities in a lean premixed gas turbine combustor [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,120:350–360.

[17] 柳伟杰,葛冰,田寅申,等. 预混多喷嘴火焰自激振荡燃烧的实验研究[J]. 工程热物理学报,2017,38(3):672–677.

LIU Wei-jie,GE Bing,TIAN Yin-shen,et al. Experimental study on self-excited combustion oscillation in a premixed multi-nozzle flame[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2017,38(3):672–677.

[18] 马静,郭志辉. 贫燃预混旋流火焰的模态转换燃烧不稳定性分析[J]. 推进技术,2020,41(5):1072–1081.

MA Jing,GUO Zhi-hui. Analysis of combustion instability characteristics of mode switching on lean-premixed swirling flame[J]. Propulsion Technology,2020,41(5):1072–1081.

[19] LIU Zhi-gang,XIONG Yan,ZHANG Zhe-dian,et al. Investigation of a novel combustion stabilization mechanism and combustion characteristics of a multi-nozzle array model combustor [J]. Fuel,2022,327:125138.

[20] HE Lei,GUO Qing-hua,GONG Yan,et al. Investigation of OH* chemiluminescence and heat release in laminar methane-oxygen co-flow diffusion flames [J]. Combustion and Flame,2019,201:12–22.

[21] 葛逸飞,李森,魏小林. 利用相空间重构方法分析层流扩散火焰燃烧不稳定现象[J]. 工程热物理学报,2020,41(6):1550–1555.

GE Yi-fei,LI Sen,WEI Xiao-lin. An analysis of laminar co-flow diffusion flame instability based on phase space reconstruction method[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2020,41(6):1550–1555.

[22] TAKENS F. Detecting strange attractors in turbulence,in dynamical systems and turbulence,warwick,1980[J]. Lecture Notes in Mathematics,1981,898:366–381.

[23] 张信,李敬轩,杨立军. 多模态热声不稳定混沌现象实验研究[J/OL]. 推进技术:1–11. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.210919>.

ZHANG Xin,LI Jing-xuan,YANG Li-jun. Experimental study on chaotic phenomena of multimodal thermoacoustic instability [J/OL]. Propulsion Technology:1–11. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.210919>.

[24] JIN U,KIM K T. Experimental investigation of combustion dynamics and NO_x/CO emissions from densely distributed lean-premixed multinozzle CH₄/C₃H₈/H₂/air flames [J]. Combustion and Flame,2021,229:111410.

[25] 陶成飞,周昊,胡流斌,等. 液雾燃烧的热声不稳定动态特性[J]. 浙江大学学报(工学版),2021,55(11):2108–2114,2133.

TAO Cheng-fei,ZHOU Hao,HU Liu-bin,et al. Dynamics characteristics of thermoacoustic instability of liquid spray combustion [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2021,55(11):2108–2114,2133.

(金圣迪 编辑)