

## 工况参数对预混燃烧室热声振荡的影响

曹 炜, 杨凯淇, 任永杰, 郭康康, 仝毅恒, 黄卫东, 聂万胜  
(航天工程大学宇航与科学技术系, 北京 101416)

**摘要:** 针对燃气轮机模型燃烧室, 实验研究了工况参数变化对热声振荡的影响. 实验测量了模型燃烧室内热声耦合过程中的动态压力和  $\text{CH}^*$  表征的释热率, 采用高速相机捕获了火焰结构. 结果表明, 燃烧室动态压力和释热率相位差小于  $90^\circ$ , 燃烧室内发生了热声振荡; 火焰的周期性卷曲会引起释热率的脉动, 进而激发热声振荡. 当热声振荡发生时, 火焰结构和释热强度存在周期性波动, 而稳定燃烧时基本保持不变. 随着当量比的增大, 热声振荡的主频和声压级增大; 随着总流量的增大, 火焰抬升高度和火焰宽度相应增加, 释热区域向燃烧室下游延展.

**关键词:** 热声振荡; 预混燃烧; 当量比

中图分类号: TK421.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2024)06-0590-10

## Influence of Operating Parameters on Thermoacoustic Oscillations in Premixed Combustor

Cao Wei, Yang Kaiqi, Ren Yongjie, Guo Kangkang, Tong Yiheng, Huang Weidong, Nie Wansheng  
(Department of Astronautics and Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** The influence of varying operating parameters on thermoacoustic oscillations was experimentally investigated for a gas turbine model combustor. The dynamic pressure and the heat release rate (HRR) characterized by  $\text{CH}^*$  during the thermoacoustic coupling process in the model combustor were measured. High-speed camera was used to capture the flame structure. The results show that: the phase difference between the dynamic pressure and the HRR in the combustor is smaller than  $90^\circ$ , and that the thermoacoustic oscillations occur in the combustor. The periodic flame roll-up induces the pulsation of HRR, which in turn excites the thermoacoustic oscillations. When the thermoacoustic oscillations occur, there are periodic fluctuations in the flame structure and HRR intensity, which basically remain unchanged during stable combustion. With the increase of the equivalent ratio, the main frequency and sound pressure level of the thermoacoustic oscillations increase. With the increase of the total mass flow rate, the flame lift height and flame width increase accordingly, and the heat release region extends downstream in the combustor.

**Keywords:** thermoacoustic oscillations; premixed combustion; equivalent ratios

现代燃气轮机燃烧室普遍采用贫燃预混燃烧来降低  $\text{NO}_x$  的排放<sup>[1-2]</sup>. 然而, 贫燃预混燃烧技术对热

声振荡极为敏感<sup>[3-4]</sup>. 热声振荡也称燃烧热声不稳定, 是由燃烧室内非稳态的热释放速率和压力振荡之

收稿日期: 2024-03-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12002386).

作者简介: 曹 炜 (1999—), 男, 博士研究生, caowei\_0824@163.com.

通信作者: 仝毅恒, 男, 博士, 讲师, yiheng\_tong@sina.com.

间的耦合引起的. 这种热声振荡会引起发动机的结构振动<sup>[5]</sup>, 降低燃烧效率, 并可能损坏燃气轮机的硬件设备和控制系统<sup>[6-7]</sup>.

在过去的几十年里, 学者通过实验<sup>[8-9]</sup>和仿真<sup>[10-11]</sup>对燃气轮机燃烧不稳定进行了广泛的研究. Rayleigh 准则揭示了燃烧不稳定发生时能量从燃烧转移到声场的过程, 指出当地热释放与压力振荡的相位差小于  $90^\circ$  时, 燃烧不稳定就会发生<sup>[12]</sup>. 非稳态释热-声压耦合的知识对于燃烧不稳定机理的解释至关重要, 但对于不同的燃烧室几何形状、运行条件, 详细的不稳定机理是不同的, 因而很难推导出通用的机理<sup>[13]</sup>. 在气相燃烧中, 燃烧不稳定过程主要受到火焰-涡旋相互作用<sup>[14]</sup>、火焰-声波相互作用<sup>[15]</sup>和当量比的脉动<sup>[16]</sup>. Franzelli 等<sup>[11]</sup>研究了燃气轮机燃烧室中当量比脉动对燃烧不稳定的影响, 发现火焰在完全预混和部分预混的条件下呈现不同的火焰响应特性, 同样的结论也出现在 Hermeth 等<sup>[17]</sup>的研究中. Chen 等<sup>[18]</sup>对比了不同进气温度下模型燃烧室的燃烧不稳定, 发现随着温度的升高, 纵向燃烧不稳定的模态从二阶转变为一阶. Bernier 等<sup>[8]</sup>探究了旋流器旋向对燃烧不稳定发生区域的影响, 指出旋向相同的旋流器燃烧不稳定性是由于涡流卷曲引起的, 而旋向相反的旋流器燃烧不稳定是当量比脉动造成的. Kao 等<sup>[19]</sup>通过实验研究了喷嘴数量对振荡燃烧流场的影响, 指出旋流之间的相互作用对整体流动结构有着明显的影响. Yoon 等<sup>[20]</sup>对比了不同燃料-氧化剂混合速度下的火焰结构变化, 指出火焰-涡旋相互作用引起的不稳定会引起旋流器周围的局部流动振动. 然而, 燃烧不稳定的潜在机制是基于火焰、流动、释热之间的相互

作用, 驱动不稳定的机制目前尚未彻底明晰.

本文实验研究了当量比和总流量对热声振荡的影响, 利用高速相机、光电倍增管 (photomultiplier tubes, PMT) 和高压压力传感器得到了不同工况下的火焰结构、释热率和动态压力脉动特性, 通过对不同工况下的火焰动力学特征的分析, 进一步探究了热声振荡的产生机制.

## 1 实验系统

使用甲烷和空气在实验室规模下的燃气轮机模型预混燃烧室中进行了一系列实验, 预混燃烧器的结构如图 1 所示, 预混燃烧器主要包含 4 个部分, 即燃料空气预混段、旋流燃烧喷嘴段、燃烧室以及光学诊断系统. 燃料空气预混段的长度为 200 mm, 在距离喷嘴出口平面 65 mm 处安装了一组蜂窝板, 以便于提供明确的声学边界并获得均匀的轴向速度分布. 旋流燃烧器喷嘴段由一个轴向旋流器和二次燃料喷嘴组成, 轴向旋流器安装在突扩平面上游, 由 8 个角度为  $45^\circ$  的叶片组成, 二次燃料喷嘴与燃烧室突扩平面齐平安装, 在本文的研究中用来充当钝体, 能够在一定程度上稳定火焰. 此外, 本实验采用两套燃烧室, 两套燃烧室的直径和长度均相同, 因此两者的本征声学特性未发生改变. 不同之处在于: 一个是由石英管和不锈钢管制成 (见图 1, 燃烧室 1), 另一个则全是不锈钢管 (见图 2, 燃烧室 2). 这种配置的目的是既可以在燃烧室 1 进行光学可视化观测, 又可以在燃烧室 2 同步测得  $\text{CH}^*$  表征的释热率信号和压力脉动信号.

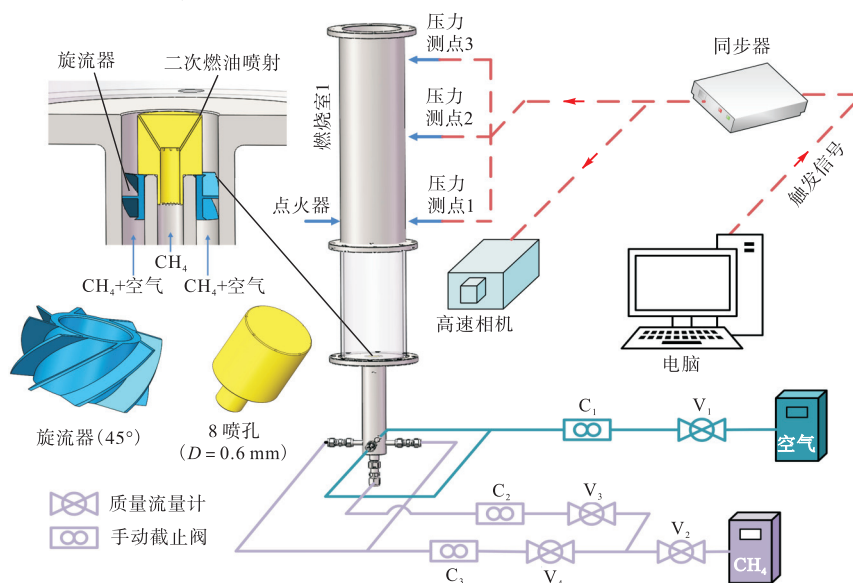


图 1 实验装置示意图<sup>[21]</sup>

Fig.1 Schematic of experimental setup<sup>[21]</sup>

实验过程中使用高速相机记录燃烧室 1 的局部火焰结构, 视图窗口设置为  $600 \times 600$  像素, 帧率为 2 000 f/s, 每种工况下获得 4 000 张瞬时火焰图像以描述瞬时的火焰动力学特征. 使用 3 支高灵敏度动态压力传感器 (Kistler 6021 A  $97.26 \text{ mV/MPa}$ ) 记录燃烧室 1 和燃烧室 2 的压力脉动信号, 两个燃烧室的压力测点如图 1 和图 2 所示, 测量的压力数据将用于燃烧室纵向模态的识别以及燃烧不稳定主导频率和声压等级的判断. 使用安装窄带滤光片 ( $430 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ ) 的光电倍增管 (PMT, Hamamatsu H10723-113) 测量火焰的  $\text{CH}^*$  化学发光信号,  $\text{CH}^*$  化学发光信号已被证明与甲烷-空气预混火焰的热释放速率直接相关<sup>[22]</sup>. 使用多通道数据采集卡 (KiDAQ 数据采集系统), 同时采集声压信号和  $\text{CH}^*$  化学发光信号, 采样频率为 2 kHz, 采样时间为 2 s. 使用同步器 (信号同步器 DG645) 将高速相机拍摄的火焰图像和声压信号同步记录. 使用质量流量控制器 (PIG-S102, 精度  $\pm 0.2\% \text{ F.S.}$ ) 调节甲烷和空气的质量流量. 此外, 有关本试验台的详细论述和结构参数可参见文献<sup>[21]</sup>.

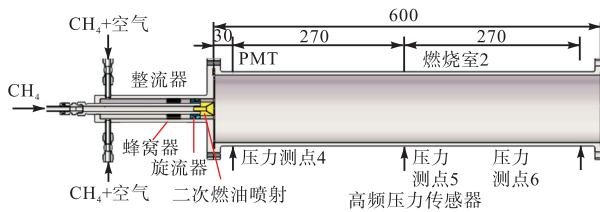


图 2 燃烧室 2 示意<sup>[21]</sup>(单位: mm)

Fig.2 Schematic of Comb-2 combustor<sup>[21]</sup>(unit: mm)

基于上述实验装置研究了当量比和总流量变化对热声振荡的影响. 在研究当量比  $\phi$  对热声振荡的影响时, 空气的质量流量  $m_{\text{air}}$  保持恒定, 通过改变甲烷的质量流量  $m_{\text{CH}_4}$  实现当量比的变化, 甲烷的质量流量依次递增 0.1 L/min; 在研究总流量对热声振荡影响时, 保证当量比不变, 即同时改变甲烷流量和空气流量. 本文的实验工况具体如表 1 所示.

表 1 实验工况

Tab.1 Experimental conditions

工况	当量比	甲烷流量/ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	空气流量/ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )
1	0.619 ~ 1.166	2.6 ~ 4.9	40
2	0.952	3, 4, 5, 6, 7	30, 40, 50, 60, 70

## 2 分析与讨论

### 2.1 当量比对热声振荡的影响

进行了一系列实验探究当量比对热声振荡的影响. 在实验过程中, 空气的流量保持  $m_{\text{air}} = 40 \text{ L/min}$ ,

当量比  $\phi$  的变化是通过改变燃料流量 ( $m_{\text{CH}_4}$ ) 来实现的. 以压力脉动数据的振荡幅值和频谱分析来判断燃烧室的稳定性状态, 以声压级 (sound pressure level, SPL) 来衡量热声振荡的强度. 图 3 显示了实验过程中不同当量比下的声压级、均方根压力幅值和振荡主频, 可以发现燃烧室内的稳定性状态强烈依赖于预混气当量比的变化.  $\phi = 0.618$  对应于燃烧室的贫燃极限, 而  $\phi = 1.154$  对应于燃烧室的富燃极限. 在二者之间, 随着当量比的增大, 燃烧室内的稳定性状态发生了稳定燃烧—不稳定燃烧—稳定燃烧的转变.  $\phi = 0.738$  对应于稳定燃烧开始转变为不稳定燃烧的状态, 而在  $\phi = 0.785$  时完全转变为不稳定燃烧, 并且伴随着燃烧状态的转变, 压力脉动的均方根幅值和声压级迅速增大, 也出现了相应的主频. 当量比进一步增大时, 燃烧状态又再次变为稳定燃烧, 均方根幅值和声压级迅速回归到噪声水平, 主频消失. 在本文的研究中, 实验工况的变化是连续调节的, 因此前一次工况温度变化引起的燃烧迟滞可能会对下一次工况的结果产生轻微影响, 但总体都在合理的误差范围内, 且这不是本文的研究重点, 因此可以忽略. 火焰结构的时空变化是本文的关注重点, 将在下文进行详细分析.

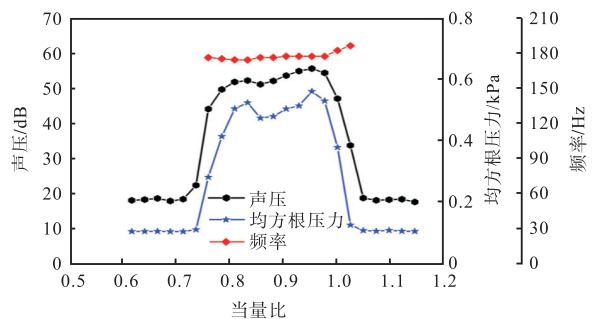


图 3 不同当量比下的声压级、均方根压力和频率

Fig.3 SPL, RMS pressure and frequency at different equivalence ratio

为了探究当量比变化对压力振荡幅度和声压级的影响, 选取了当量比为 0.714、0.833、0.952 和 1.071 的 4 种工况进一步分析, 它们分别代表贫燃状态下的稳定燃烧、燃烧不稳定、最剧烈的燃烧不稳定和富燃状态下的稳定燃烧这 4 种典型的燃烧状态. 图 4 给出了这些工况下的压力-时间序列和压力测点 1 的频谱分析, 对于稳定燃烧的工况, 如图 4(a) 和 (d) 所示, 3 个压力测点的数据没有明显的周期性, 且压力振荡的幅值均未超过 0.4 kPa, 这说明燃烧室中发生了平稳的燃烧; 其相对应的频谱分析也并未有突出的主频, 稳定燃烧下的噪声水平大约在 14 dB. 值得注意

的是, 频谱分析中显示的 100 Hz 和 150 Hz 的突频, 这是点火器交流电频率的倍频, 而不是热声振荡引起的. 对于不稳定燃烧的工况, 当  $\varphi=0.833$  时, 压力振荡峰峰值为 1.5 kPa, 相对应的主频为 173 Hz, 对应的声压级为 52 dB. 当  $\varphi=0.952$  时, 压力振荡峰峰值为 1.8 kPa, 相对应的主频为 176 Hz, 对应的声压级为 55 dB. 这是由于当量比增大时, 对应甲烷的流量增大, 因此燃料燃烧增加了燃烧室的温度, 导致能量从

燃烧场到声场的传递增大, 从而造成振荡幅值和声压级的提高.

借助于高速摄影, 详细研究了各工况的火焰结构特性. 图 5 显示了不同当量比下的时均火焰结构图像和火焰轮廓. 其中, 时均火焰结构图像是对瞬时火焰图像时均处理得到的, 火焰轮廓则是对时均火焰图像边界提取得到的. 从图 5 可以看出, 火焰分布在燃烧室内的整个空间, 但火焰释热的最大位置集中在燃

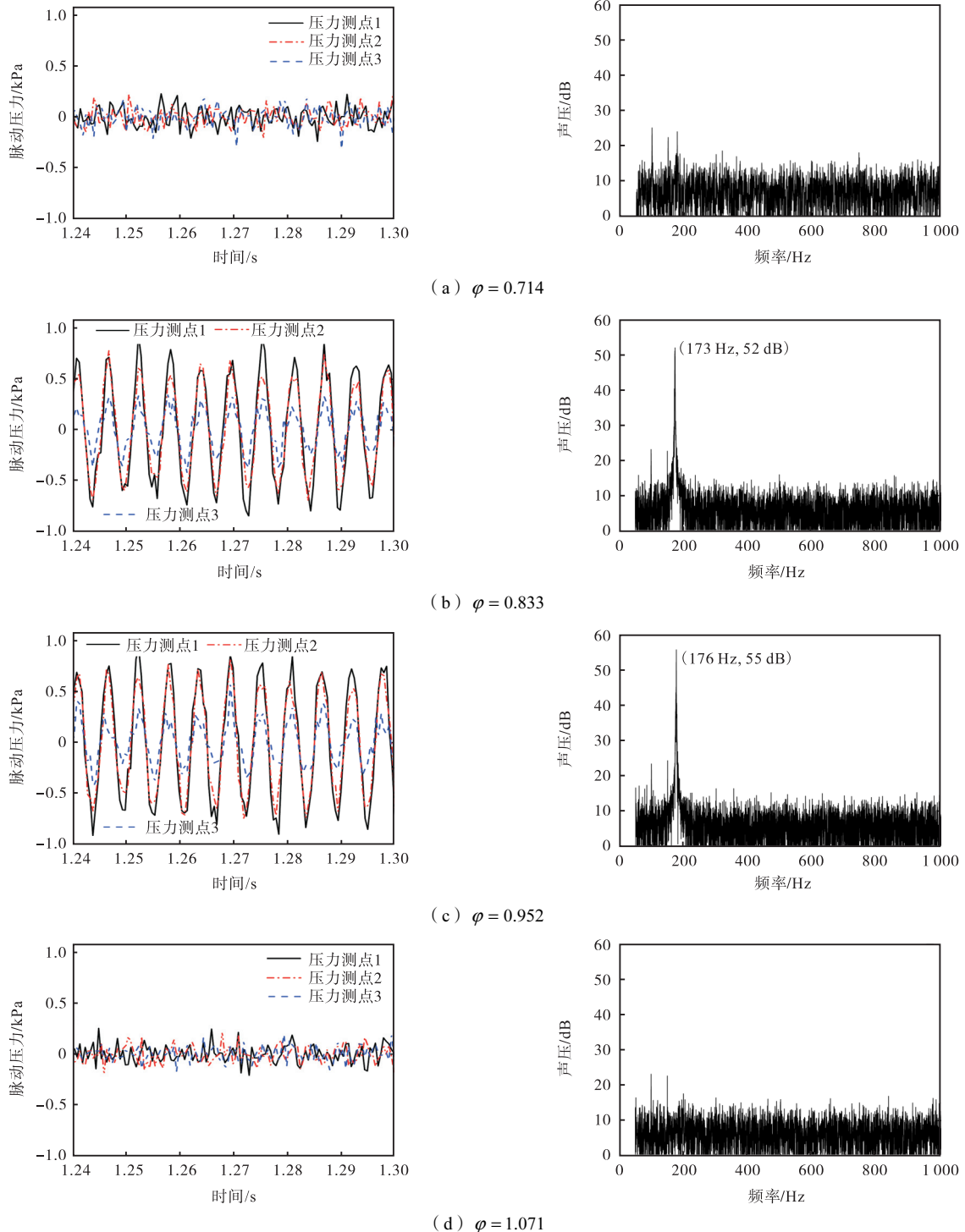


图 4 不同当量比下的压力时间序列和频谱分析

Fig.4 Time-traces and spectrograms of pressure signal at different equivalence ratio

烧室头部,这就表明预混气体反应主要发生在燃烧室出口附近. 总体而言,燃烧不稳定工况下火焰图像的发光强度要高于稳定燃烧时的火焰发光强度,这表明不稳定工况下的反应强度更加剧烈.  $\varphi=0.952$  工况下的火焰图像发光强度最大,同时它对应于燃烧不稳定最剧烈的工况,其次是  $\varphi=0.833$  的工况,  $\varphi=0.714$  时的火焰发光强度最小,再次是  $\varphi=1.071$ ,这与图 4 中的声压级和压力脉动幅值相对应. 发光强度的改变是由甲烷流量变化导致燃烧释热不同所致,另一方面当其远离化学计量比,由于燃烧效率的降低释热也会降低. 此外,由火焰轮廓图像可以发现相较于稳定

燃烧的工况,燃烧不稳定发生时的火焰轴向抬升高度略小,而径向火焰宽度更大,这就表明此时的燃烧释热更集中在突扩平面处,有利于激发并维持燃烧不稳定.

时均火焰图像忽略了局部湍流对火焰结构动态演化的影响,因此图 6 展示了 4 种当量比下的瞬时火焰结构图像,以获得对火焰动力学的全面了解. 选用 6 张瞬时照片描述一个周期内火焰结构的动态演化过程. 从图 6 中可以发现,当  $\varphi=0.833$  和  $\varphi=0.952$  时刻,释热强度和火焰结构在一个周期内具有明显的波动. 从火焰的高亮特征可以看出:从阶段 1 时的最低火焰强度到阶段 4 的最高火焰强度,而后再回到最

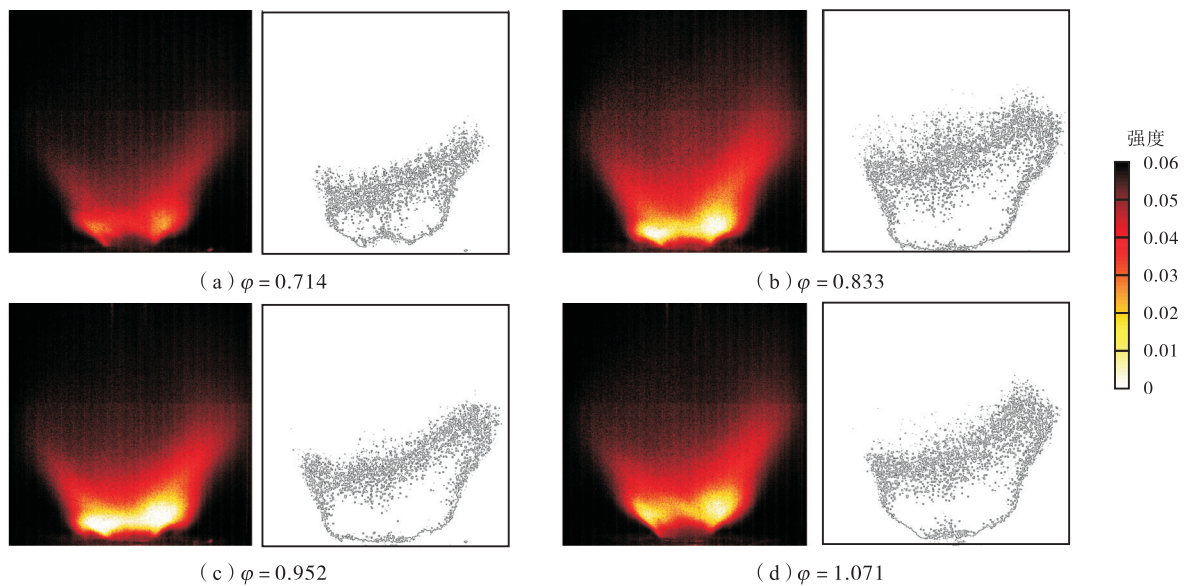


图 5 不同当量比下的时均火焰图像和火焰轮廓

Fig.5 Time-average flame structure and outline images at different equivalence ratio

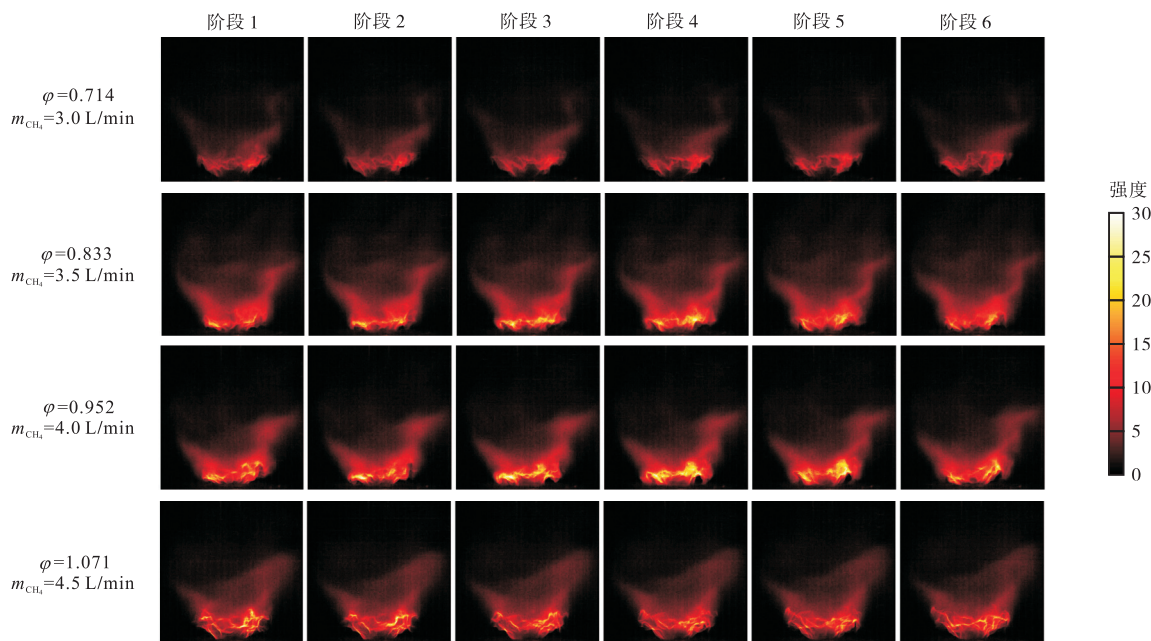


图 6 不同当量比下的瞬时火焰图像

Fig.6 Consecutive flame structure images at different equivalence ratio

低, 这表明释热强度存在周期性脉动; 另一方面, 可以观察到在燃烧室头部外回流区火焰发生了卷曲(如阶段 3、4 和 5), 火焰呈现“M”形, 而在其他时刻火焰又恢复了“V”形. 周期形火焰形态的转变将导致火焰面积的变化, 进而再次引起释热率的脉动, 当燃烧室内的释热脉动和压力脉动发生耦合时, 燃烧不稳定就会发生. 当  $\varphi=0.714$  和  $\varphi=1.071$  时, 释热强度和火焰结构在一个周期内基本保持不变, 这就表明此时燃烧室内是稳定的燃烧. 与图 5 相一致, 燃烧不稳定工况相较于稳定燃烧的工况具有更小的火焰抬升高度和更宽的火焰宽度. 最后, 整体而言不稳定火焰和稳定火焰在空间上都没有明显的对流运动.

燃烧室内热释放速率和压力波动之间的相互作用

用可以通过瑞利准则进行评估, 瑞利准则指出, 如果热释放速率和压力脉动同相或异相, 燃烧不稳定将会被放大或抑制. 图 7 给出了不同当量比下的声压和热释放速率的无量纲时间序列以及对应的频谱分析. 对于稳定燃烧的工况, 如图 7(a) 和(d) 所示, 无量纲声压和热释放之间没有明显的耦合关系, 其声压和热释放的频谱分析也没有显著的突频, 热声振荡处于抑制状态; 而热声振荡发生时, 如图 7(b) 和(c) 所示, 无量纲声压和热释放之间发生了明显的耦合, 声压信号和热释放速率之间相位差均小于  $90^\circ$ , 满足瑞利准则, 因此热声振荡得以维持. 此外, 声压信号和热释放信号的频谱分析也捕捉到了主频, 并且二者一致.

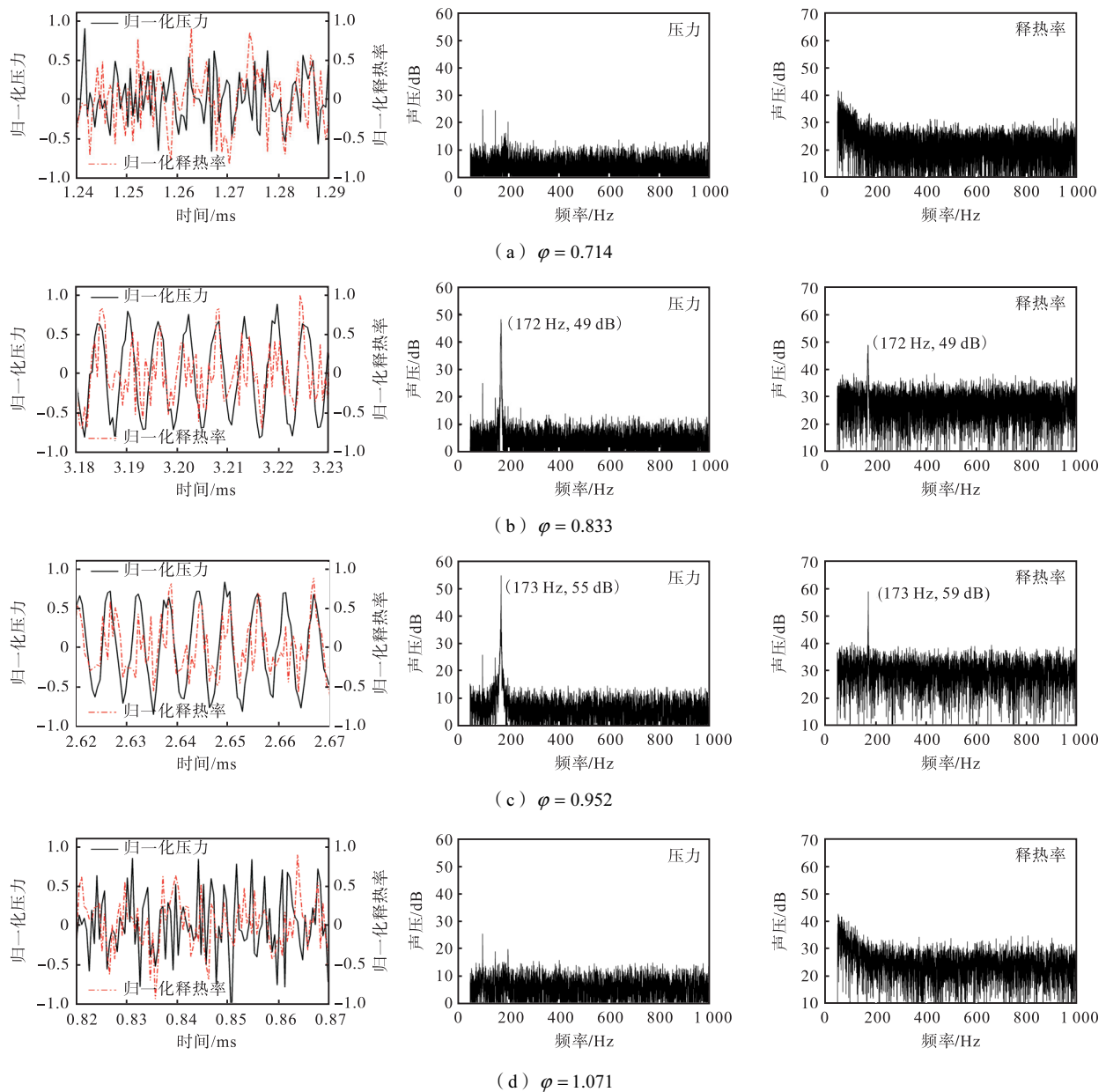


图 7 不同当量比下的声压和释热率的无量纲时间序列和频谱分析

Fig.7 Dimensionless time-traces and spectrograms of pressure and heat release rate at different equivalence ratio

### 2.2 总流量对热声振荡的影响

由上一小节可知,在当量比为 0.952 时发生了最为剧烈的热声振荡,因此本节选定当量比 0.952 保持不变,探究总流量变化对热声振荡的影响。

图 8 显示了不同流量下的压力时间序列和频谱分析。当甲烷流量为 3 L/min、6 L/min 和 7 L/min 时,

燃烧室没有发生热声振荡,3 个压力测点的数据没有明显的规律,压力振荡的幅值均未超过 0.4 kPa,相应的频谱分析也并没有明显的主频,稳定燃烧时的噪声水平约为 15 dB;而当甲烷流量为 4 L/min 和 5 L/min 时,系统发生了热声振荡,压力振荡具有明显的周期性,且捕捉到了主频的存在。当甲烷流量为 4 L/min

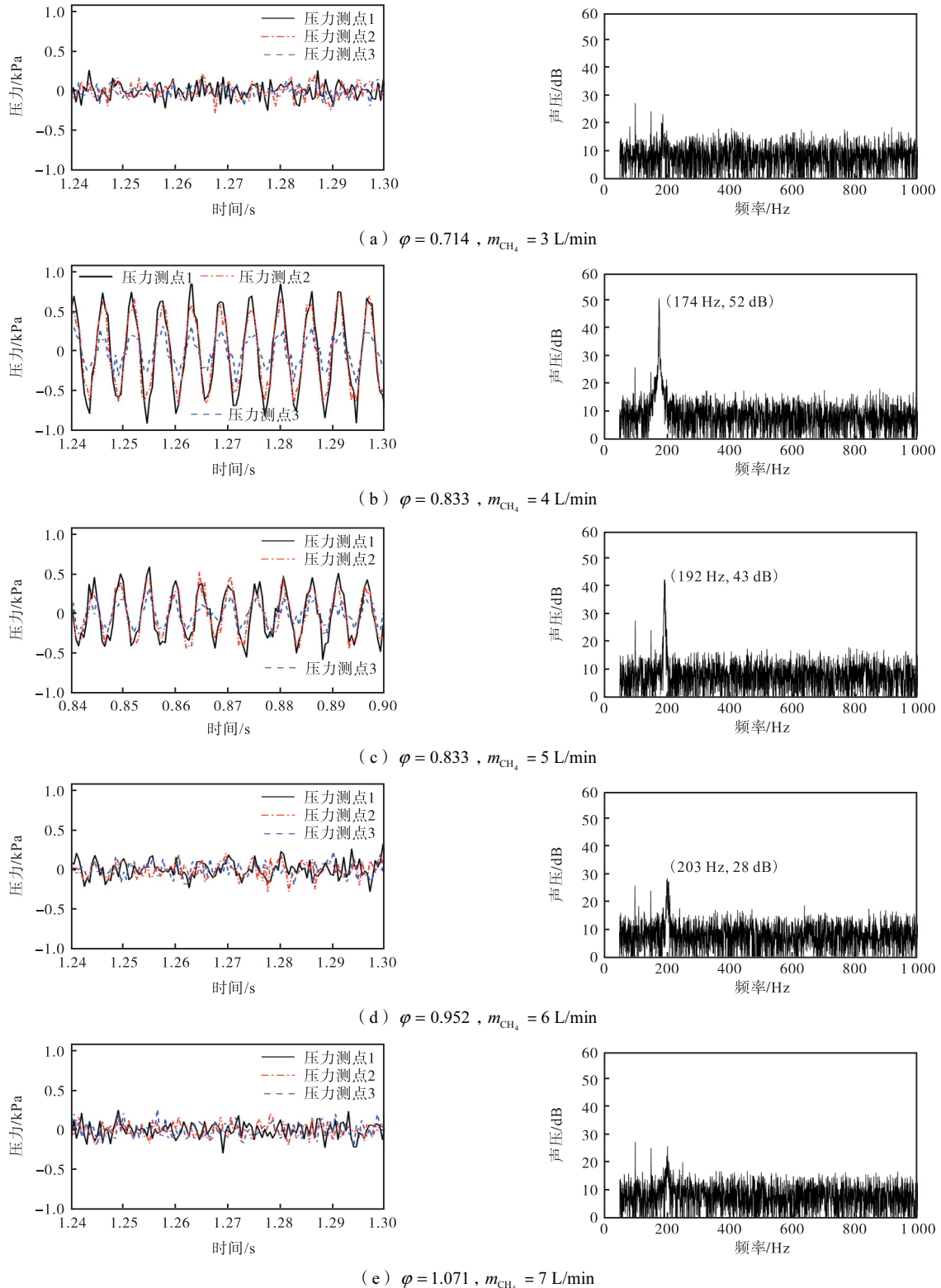


图 8 不同流量下的压力时间序列和频谱分析

Fig.8 Time-traces and spectrograms of pressure signal at different mass flow rate

时,压力振荡峰峰值达到 1.7 kPa,热声振荡的主频为 174 Hz,相应的声压级为 52 dB;当甲烷流量为 5 L/min 时,压力振荡峰峰值为 1.1 kPa,热声振荡的主频为 192 Hz,声压级为 43 dB. 这些数据表明,燃烧室内的燃烧状态依赖于总流量,总流量的变化将改变混合气体的速度分布,从而改变了系统的旋流数,这将导致燃烧室内的火焰结构发生显著的变化,火焰结构的微小变化极易引起释热率的变化,从而改变燃烧的状态.

图 9 显示了不同流量下的时均火焰结构和火焰轮廓. 从图中可以看到不同流量下的火焰结构发生了显著变化,当甲烷流量为 3 L/min 时,整个火焰呈长条状,而后随着甲烷流量的增大,火焰发展为梯形,当甲烷流量为 7 L/min 时,火焰发展为椭球形. 注意,本文所述的火焰结构均为火焰图像的视线积分,而并非中心平面. 此外,火焰宽度和火焰高度也随着流量的变化发生了显著变化,从 3 L/min 时火焰锚定在旋流器出口到 7 L/min 时类似出现的抬举火焰,火

焰高度随着流量的变大而不断增大,在这一过程中,火焰宽度也不断增大. 究其原因是因为总流量增大了混合气体的轴向速度,因而当混合气体通过燃烧室入口平面时,火焰向更远更宽的范围扩张. 不同流量下的火焰发光强度变化不大,基本维持在同一水平,这是因为总体的当量比一样,即使流量增大会使燃烧室内释热增加,但火焰轮廓的增大也会将增大的释热均匀分布到各个地方.

为了捕捉燃烧时的火焰动力学演化特征,图 10 展示了不同流量下的瞬时火焰结构图像. 从图中可以看出火焰宽度和火焰高度随着甲烷流量的增大不断增大,这一点与时均火焰图像表现出来的特征一致. 在一个周期内,稳定燃烧的工况火焰结构和反应强度基本保持不变;而不稳定燃烧的工况,火焰强度和火焰结构在一个周期内发生了变化,火焰发生了卷曲(如阶段 4 和阶段 5 所示),导致火焰底部的宽度也周期性的膨胀和收缩. 也正是由于这种火焰形态的变化才使得系统稳定性表现出不同的特征.

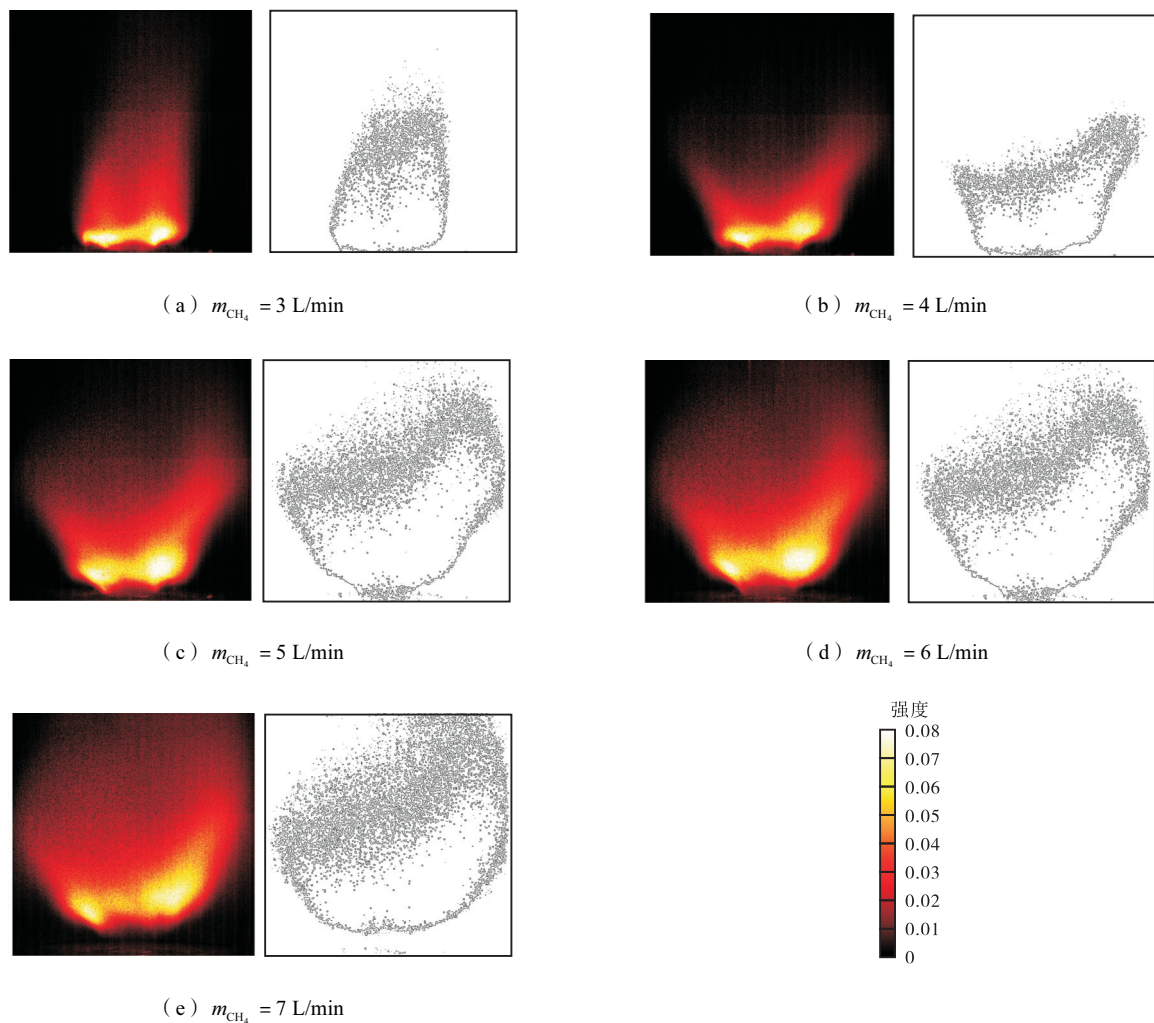


图 9 不同流量下的时均火焰图像和火焰轮廓

Fig.9 Time-average flame structure and outline images at different mass flow rate

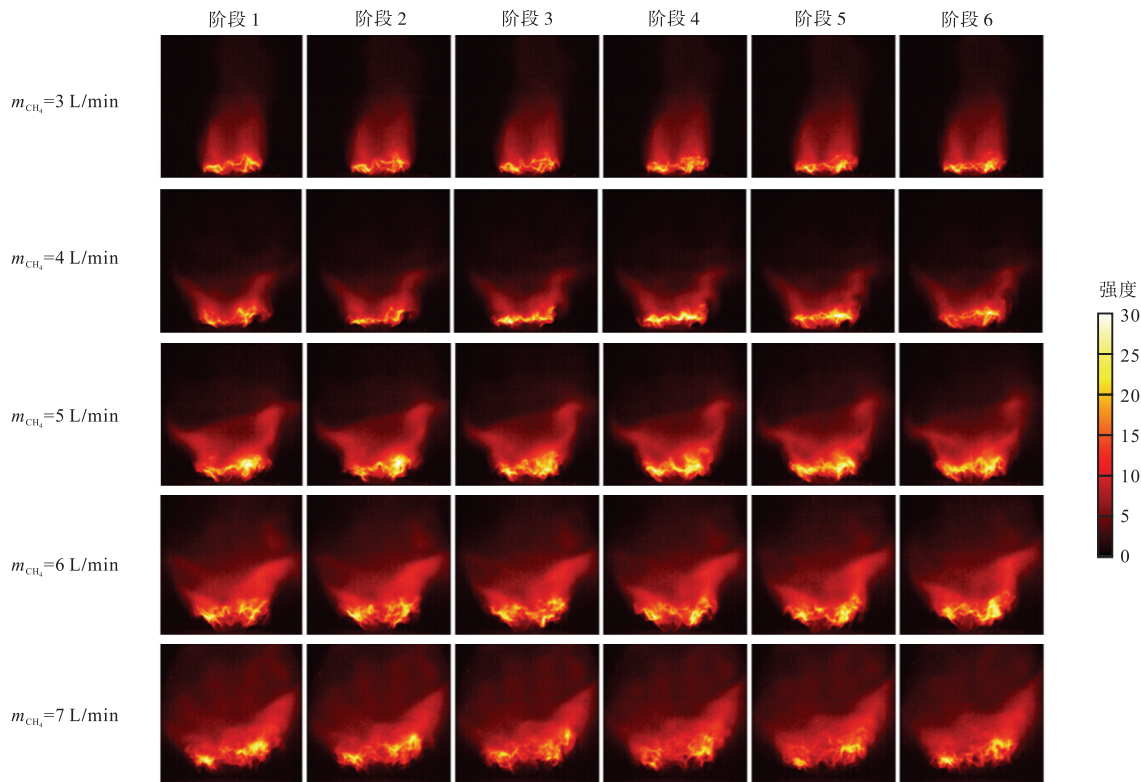


图 10 不同流量下的瞬时火焰图像

Fig.10 Consecutive flame structure images at different mass flow rate

### 3 结 论

本文通过实验研究了工况参数对热声振荡的影响,利用高速相机、光电倍增管和高频压力传感器测量了不同工况下的火焰结构、热释放速率和动态压力脉动特性,通过分析得到了以下结论:

(1) 由高频压力传感器和 PMT 采集到的信号表明,燃烧室动态压力和释热率相位差小于  $90^\circ$ ,燃烧室内发生了热声振荡。

(2) 火焰的周期性卷曲会导致火焰面积的变化,从而引发热释放速率的波动,激发热声振荡。

(3) 热声振荡发生时的释热强度和火焰结构存在明显的周期性波动,而稳定燃烧时其基本保持不变。

(4) 随着当量比的增大,燃烧不稳定的主频和声压级增大;随着总流量的增大,火焰抬升高度和火焰宽度相应增加,释热区域向燃烧室下游延展。

#### 参考文献:

[1] Ruan Can, Chen Feier, Cai Weiwei, et al. Principles of non-intrusive diagnostic techniques and their applications for fundamental studies of combustion instabilities in gas turbine combustors: A brief review[J]. *Aerospace*

*Science and Technology*, 2019, 84: 585-603.

- [2] Liu Yize, Sun Xiaoxiao, Sethi V, et al. Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2017, 94: 12-45.
- [3] 宋 恒, 林宇震, 韩 啸, 等. 出口收缩对分层旋流火焰和热声振荡的影响[J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(9): 2279-2284.
- Song Heng, Lin Yuzhen, Han Xiao, et al. Effects of the outlet contraction on stratified swirl flame and thermoacoustic oscillations[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(9): 2279-2284 (in Chinese).
- [4] Li Longkun, Zhang Deying, Li Peng, et al. Virus integration and genome influence in approaches to stem cell based therapy for andro-urology[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2015, 82-83: 12-21.
- [5] Blonbou R, Laverdant A, Zaleski S, et al. Active control of combustion instabilities on a rijke tube using neural networks[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 747-755.
- [6] Worth N A, Dawson J R. Modal dynamics of self-excited azimuthal instabilities in an annular combustion chamber[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(11):

- 2476-2489.
- [7] 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*, 2009, 32(2): 2901-2908.
- [8] Bernier D, Candel S, Lacas F. Instability mechanisms in a premixed prevaporized combustor[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(4): 648-656.
- [9] 谢 法, 张珊珊, 蒋洪德. 入口流动参数脉动对燃气轮机燃烧室燃烧不稳定的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(7): 1561-1565.
- Xie Fa, Zhang Shanshan, Jiang Hongde. Effects of inlet flow parameters oscillation on combustion instability of gas turbine combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(7): 1561-1565(in Chinese).
- [10] Pillai A L, Nagao J, Awane R, et al. Influences of liquid fuel atomization and flow rate fluctuations on spray combustion instabilities in a backward-facing step combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 220: 337-356.
- [11] Franzelli B, Riber E, Gicquel L Y M, et al. Large eddy simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(2): 621-637.
- [12] Durox D, Schuller T, Noiray N, et al. Rayleigh criterion and acoustic energy balance in unconfined self-sustained oscillating flames[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(1): 106-119.
- [13] Lee M C, Yoon J, Joo S, et al. Investigation into the cause of high multi-mode combustion instability of H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub> syngas in a partially premixed gas turbine model combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3263-3271.
- [14] Chen Zhi, Langella I, Swaminathan S, et al. Large eddy simulation of a dual swirl gas turbine combustor: Flame/flow structures and stabilisation under thermoacoustically stable and unstable conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 203: 279-300.
- [15] Wang Haiou, Chen Guo, Luo Kun, et al. Turbulence/flame/wall interactions in non-premixed inclined slot-jet flames impinging at a wall using direct numerical simulation[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(2): 2711-2720.
- [16] Ruan Can, Chen Feier, Yu Tao, et al. Experimental study on flame/flow dynamics in a multi-nozzle gas turbine model combustor under thermo-acoustically unstable condition with different swirler configurations[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 98: 105692.
- [17] Hermeth S, Staffelbach G, Gicquel L Y M, et al. Bistable swirled flames and influence on flame transfer functions[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(1): 184-196.
- [18] Chen Feier, Ruan Can, Yu Tao, et al. Effects of fuel variation and inlet air temperature on combustion stability in a gas turbine model combustor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92: 126-138.
- [19] Kao Y H, Tambe S B, Jeng S M. In aerodynamics of linearly arranged rad-rad swirlers, effect of number of swirlers and alignment[C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*. San Antonio, Texas, USA, 2013: GT 2013-94280.
- [20] Yoon J, Kim M K, Hwang J, et al. Effect of fuel-air mixture velocity on combustion instability of a model gas turbine combustor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(1): 92-101.
- [21] 曹 炜, 杨凯淇, 任永杰, 等. 基于二次燃料喷射的预混燃烧室热声振荡主动控制方法[J/OL]. *推进技术*, <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.2310005>.
- Cao Wei, Yang Kaiqi, Ren Yongjie, et al. Active control of thermoacoustic oscillations in premixed combustor based on secondary fuel injection[J/OL]. *Journal of Propulsion Technology*, <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.2310005> (in Chinese).
- [22] Kim K T, Hochgreb S. The nonlinear heat release response of stratified lean-premixed flames to acoustic velocity oscillations[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(12): 2482-2499.