

多孔陶瓷板预混火焰热声振荡多模态转换实验研究

王阿彪, 季晨振, 宋秀阳, 王萌铭, 潘登, 朱彤
(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对多孔陶瓷板甲烷-空气预混火焰, 搭建了两端开口的 Rijke 管实验台, 研究了当量比对多模态转换的影响, 分析了不同自激振荡模式下火焰的不稳定特征。实验结果表明, 当量比的变化会引起自激振荡模态转换。当燃烧功率固定为 0.96 kW, 增加空气流量, 当量比从 1.17 降低到 0.71 时, 管内压力振荡主频由 163 Hz 迁移至 355 Hz。利用格林函数法计算 Rijke 管的声学特征频率, 表明实验测试的两组自激振荡频率分别为 Rijke 管的一阶和二阶声学特征频率。不同当量比下火焰平均热释放率图像表明, 高当量比火焰更易与系统低阶振荡频率耦合, 这是因为此时火焰长度较高, 且预混气体流速较慢, 对应对流延迟时间较长。使用相平均和本征正交分解方法得到了不同振荡频率下的振荡模态, 低频振荡以轴向振荡为主, 高频振荡以频闪振荡为主。

关键词: 燃烧不稳定; 热声振荡; 模态转换; 格林函数法; POD 分解

中图分类号: TK16 文献标志码: A 文章编号: 1006-8740(2024)06-0609-10

Multi-Modal Transition of Thermoacoustic Oscillations in Premixed Flame over Porous Ceramic Plates

Wang Abiao, Ji Chenzhen, Song Xiuyang, Wang Mengming, Pan Deng, Zhu Tong
(School of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this paper, a Rijke tube experimental rig with openings at both ends was constructed to study the methane-air premixed flame over porous ceramic plates. The effect of equivalence ratio on multi-modal transition was investigated, and the instability characteristics of the flame in different self-excited oscillatory modes were analyzed. It was found that the change of equivalence ratio induces the transition of self-excited oscillation modes. When the thermal power was fixed at 0.96 kW, the air flow rate was increased, and the equivalence ratio decreased from 1.17 to 0.71, the dominant frequency of pressure oscillations in the tube hopped from 163 Hz to 355 Hz. The acoustic eigenfrequency of the Rijke pipe was determined using the Green's function method. The dominant frequencies of the self-excited oscillation in the experimental tests corresponded to the first and second-order acoustic eigenfrequencies of the Rijke tube. The images of the average heat release rates of the flames at different equivalence ratios show that the flames at higher equivalence ratio are more likely to be coupled to the lower order oscillation frequencies of the system due to the greater flame length and the smaller premixed gas flow rate, which means a longer convective delay time. The flame oscillatory modes at different oscillation frequencies were obtained using phase-averaged and proper orthogonal decomposition methods. It was found that low-frequency flame oscillations are dominated by the longitude pulsation mode, while the high-frequency flame oscillations are dominated by the blinking mode.

收稿日期: 2024-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52106181); 上海市浦江人才计划资助项目(21PJ1412700).

作者简介: 王阿彪(1998—), 男, 硕士研究生, 2232728@tongji.edu.cn.

通信作者: 季晨振, 男, 博士, 特聘研究员, czji@tongji.edu.cn.

Keywords: combustion instability; thermoacoustic oscillations; modal transitions; Green's function method; proper orthogonal decomposition

近年来,随着我国环境保护政策的日趋严苛,对低氮排放的要求越来越高. 在燃烧领域,为实现低氮排放,贫燃预混燃烧技术得到了广泛的应用,但是该种燃烧技术易引起燃烧过程中出现由热声耦合导致的燃烧不稳定现象,产生巨大的压力振荡幅值,进而可能会导致燃烧器破坏,甚至爆炸^[1-2]. 为了避免燃烧热声振荡的发生,需要对燃烧不稳定产生的过程进行深入研究. 实际的燃烧振荡过程是一个复杂的物理化学反应过程,具有很强的非线性现象,包括拍振、模态转换等^[3-4]. 非线性热声现象的影响因素包括燃烧头的形状、当量比、燃烧功率等,这些因素都可能会影响热释放与声波的具体耦合过程,进而产生热声振荡. 在一些研究中,已经发现了模态转换的现象,其具体表现为在工况条件相差很小的工况中,振荡主频发生较大的改变^[5].

目前对模态转换的研究主要分为两个方向. 第1个是通过模拟或者理论计算燃烧器的特征频率,进而预测燃烧振荡的频率^[6-7]. 第2个是研究火焰的特性,以此来解释模态转换的产生^[8-9]. Rao等^[10]通过改变当量比发现,在不同的当量比情况下,燃烧室呈现不同的燃烧振荡形式,同时火焰的形态也出现了明显的差异. 张信等^[11]通过使用Y型Rijke管,发现了模态转换,当改变火焰在管中的位置,频率从570 Hz迁移到313 Hz. Ahn等^[7]通过在非预混燃烧系统进行燃油实验,发现其中存在亥姆霍兹、纵向和水动力等多种不稳定模式. 并且随着燃油流量的增加,振荡模式由纵向一阶振荡模式转变为亥姆霍兹一阶振荡模式,再转变为纵向二阶振荡模式. Noiray等^[9]利用有孔板稳燃预混火焰实验台发现,燃烧器的长度会影响稳定性和失稳状态的主导频率. 随着燃烧器空腔长度的增加,相应的燃烧器振荡频率的特征频率从第一特征模态切换到第三特征模态. Boudy等^[12]利用多孔板小火焰燃器,发现导致模态转换的现象有两个. 第1个现象是振荡发生在超临界分岔和亚临界分岔的重叠处,第2个现象是在不稳定模态达到极限环时,这两种模态的增长率轨迹斜率均为负. 扈学超等^[13]设计了多孔板预混氢燃料燃烧器,研究了甲烷掺氢燃烧过程中的燃烧不稳定现象. 他们发现在氢体积分数为10%和20%时,氢燃料微预混火焰出现振荡燃烧现象,且激发更高阶的谐波.

但是针对基于多孔板稳焰体的燃烧热声振荡,目

前文献中对其模态转换前后的火焰振荡特征的研究较少,本文搭建了甲烷和空气预混燃烧的Rijke管燃烧实验台,研究了当量比对多孔陶瓷板火焰模态转换的影响及模态转换前后的火焰振荡特征. 通过相空间重构和短时傅里叶变换对压力信号进行了分析,随后利用格林函数法计算了Rijke管燃烧器的空腔声学频率. 同时对火焰图片进行时间平均和锁相处理. 最后利用本征正交分解(POD)方法对模态转换前后火焰的振荡形式做了进一步分析.

1 实验方法

1.1 实验设备

Rijke管型燃烧试验台简图如图1所示. Rijke管的长度为1200 mm,内管径为50 mm,壁厚3 mm. 燃烧头的内径为26 mm,壁厚为2 mm. 内部装配有金属均流板和多孔陶瓷片. 金属均流板直径为26 mm,厚度为6 mm,其上均匀分布12个孔,孔径为2 mm. 多孔陶瓷片直径为26 mm,厚度为4 mm,其上均匀分布121个孔,孔径为1.4 mm. 甲烷流量通过质量流量控制器(HORIBA Z500,最大容量17 SLM甲烷,测量精度 $\pm 1.0\%$)对流量进行测量和控制. 和甲烷预混的空气由空气压缩机提供,其流量也是通过质量流量控制器(HORIBA Z500型,最大容量30 SLM空气,精度 $\pm 1.0\%$ 测量)对流量进行测量和控制. 燃烧头位置处于Rijke底部入口上方240 mm处. 压力信号采集使用麦克风(GRAS 46BE,采样频率为10,240 Hz)进行采集,该麦克风处于燃烧头下方300 mm处. 火焰的图像采用高速火焰化学发光图

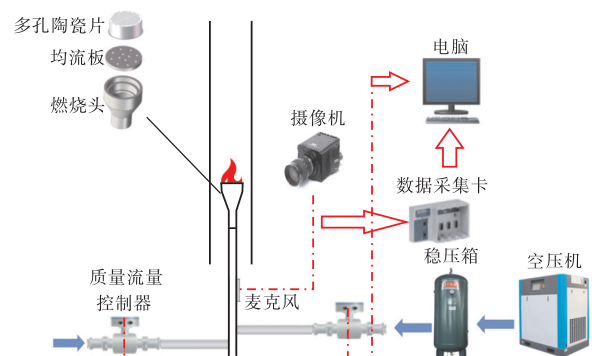


图1 Rijke管型燃烧实验台简图

Fig.1 Sketch of the Rijke tube combustion test rig

像平均系统进行采集,该系统包括高速摄像头(Revealer M220)、高速图像增强模块(EyeITS)和配备(410±5) nm 滤光片的 50 mm 定焦镜头,拍摄的采样频率为 5 000 Hz. 数据采集系统基于 NI Compact-DAQ 系统,在该系统上安装了两个模块. 一个是采集声压的 NI9234 模块,另一个是触发高速摄像的 NI9401 模块,两个模块可同步采集.

1.2 格林函数法

格林函数法是一种重要的研究声学特性的方法,可在频域及时域对燃烧室的声学特性进行解析. 国外已有学者如 Heckl 等^[14-17]对其进行理论推导及研究,目前已经分析了在 Rijke 管和 1/4 波长管中,管长、火焰位置、热源功率以及速度波动对燃烧不稳定的影响,并对频率偏移和时滞现象进行了分析.

根据 Heckl 等^[14]的假设,Rijke 管可简化为如图 2 所示的二维轴对称图形,其中管长为 L , L_1 和 L_2 处为管道的压力节点,在燃烧头下游存在温度间断线,位于 X_2 处,将 Rijke 管分为上下游两部分. 为方便研究,分别将管内上下游的流场和温度场简化为等温均质物场.

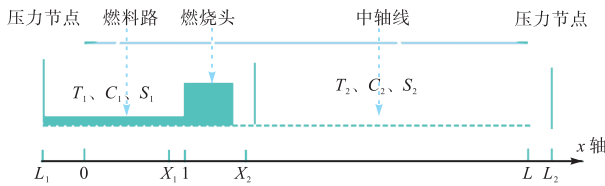


图 2 Rijke管简化二维轴对称图形

Fig.2 Simplified 2D axisymmetric graph of Rijke tube

首先定义频域内的格林函数 $G(x, x', \omega)$, 其满足方程(1)及方程(2):

$$\frac{\partial^2 \hat{G}}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c_1^2} \hat{G} = 0 \quad (0 < x < X_2) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \hat{G}}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c_2^2} \hat{G} = \delta(x - x') \quad (X_2 < x < L) \quad (2)$$

以 X_1 、 X_2 为界限,分别列出 3 个区域的格林函数表达式,具体如方程(3)所示.

$$\hat{G}(x, x', \omega) = \begin{cases} a \sin k_1(x - L_1) & (0 < x < X_1) \\ c e^{ik_2(x - X_2)} + d e^{-ik_2(x - X_2)} & (X_1 < x < X_2) \\ b \sin k_2(x - L_2) & (X_2 < x < L) \end{cases} \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 是未知数. 利用 $x = X_1$, 以及 $x = X_2$ 处格林函数值相等,可得两个等式,进而得到用 a 表达的 c 与 d , 见式(4)和(5).

$$c = a\gamma \quad (4)$$

$$d = a\gamma^* \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{\bar{\rho}_1}{\bar{\rho}_2} \sin k_1(X_1 - L_1) + \frac{1}{2} \frac{\bar{\rho}_1 S_1}{\bar{\rho}_2 S_2} L_{\text{eff}} k_1 \cdot$$

$$\cos k_1(X_1 - L_1) - \frac{1}{2} i \frac{S_1 k_1}{S_2 k_2} \cos k_1(X_1 - L_1) \quad (6)$$

式中 γ^* 为 γ 的共轭复数.

将式(4)和(5)代入式(3)中,利用区间端点处相等计算并进行化简可得

$$f(\omega) = -\frac{S_1}{S_2} \frac{1}{c_1} \cos \omega \tau_1 \sin \omega \tau_2 + \frac{S_1}{S_2} \frac{1}{c_1} \frac{\bar{\rho}_1}{\bar{\rho}_2} \cos \omega \tau_2 \cdot$$

$$\frac{S_1}{S_2} \frac{c_1}{c_2} \sin \omega \tau_1 + \frac{S_1}{S_2} \frac{1}{c_1} \frac{\bar{\rho}_1}{\bar{\rho}_2} \cos \omega \tau_2 \frac{L_{\text{eff}}}{c_2} \omega \cos \omega \tau_1 \quad (7)$$

令 $f(\omega) = 0$, 再利用 $\omega_0 = n\pi c_2 / (L_2 - L_1)$ 为初始值进行迭代,即可求解特征频率,其中 n 代表模态阶数, c_1 为上游平均声速, c_2 为下游平均声速. 更为详细的推导过程可参考 Heckl 等^[14]的具体工作.

本文利用 matlab 对 $f(\omega)$ 进行编程迭代,为了验证程序理论计算值的准确性,将参考文献中的参数代入程序并与原文进行验证,具体结果见图 3,横轴为温度间断线的轴向位置,纵坐标为热声振荡的角频率. 图 3 中实线为参考文献[12]中所给一阶本征频率数据,其随温度间断线的轴向位置的增加,先降低再增加最后再降低. 红叉代表本文根据 matlab 代码计算出的一阶本征频率值,其变化趋势与 Heckl 等^[14]的变化趋势相同,并且误差较小,可以验证本文 matlab 代码计算结果的准确性,可以用此代码来计算本实验台的本征频率.

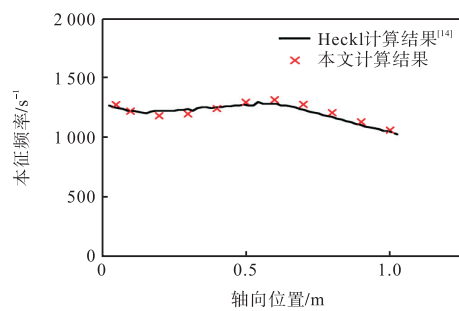


图 3 本文利用格林函数法得到的本征频率结果与 Heckl 计算结果^[14]对比

Fig.3 The eigenfrequency results obtained in this paper using the Green's function method are plotted against Heckl's calculations^[14]

2 结果和讨论

2.1 燃烧热声振荡模态转换

为研究燃烧振荡的非线性现象,本文进行了不同

当量比下的多种工况的实验测试. 实验结果分析发现当量比对振荡主频会有较大的影响. 当燃烧功率固定为 0.96 kW 时, 当量比在 0.65 ~ 1.40 之间变化时, 对应振荡工况的主导频率如图 4 所示. 从图 4 中可以发现, 在当量比从富燃非振荡工况逐渐降低的过程中(对应图中红色向下的箭头), 当量比小于 1.17 时, 系统从稳定燃烧的状态变为大幅值热声振荡的状态, 此时声压级大约为 140 dB, 振荡主频约为 165 Hz. 随后在当量比为 1.02 时, 系统重新变为稳定燃烧的状态. 随着当量比继续下降, 在当量比为 0.73 时, 系统重新变为振荡状态, 而此时的振荡主频从 165 Hz 左右增加至 365 Hz 左右. 在当量比接近贫燃熄火极限当量比时, 系统从大幅值热声振荡转变为稳定燃烧.

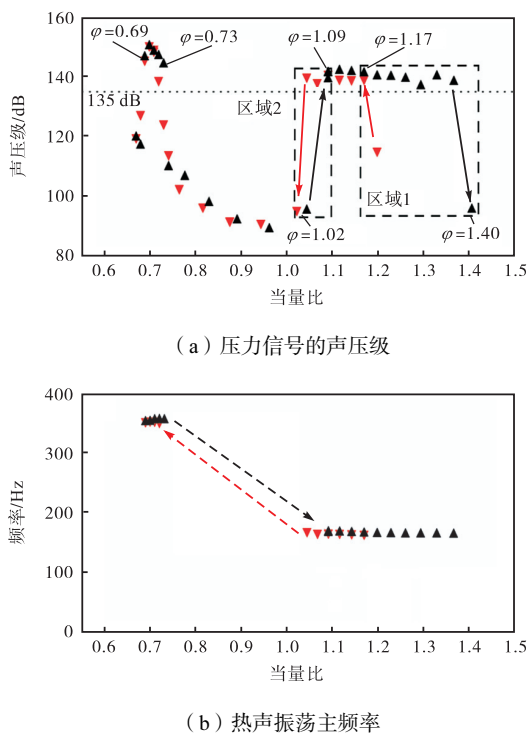


图 4 增加和降低当量比过程中系统内压力信号的声压级和热声振荡主频随当量比的变化

Fig.4 Sound pressure level of the pressure signal in the system and the dominant frequency of the thermoacoustic oscillations vary with the equivalence ratio

在当量比从贫燃熄火极限附近逐渐增加的过程中(对应图中黑色箭头), 系统的振荡状态同样随着当量比的变化而变化. 同样在当量比为 0.69 附近, 火焰从稳定燃烧状态转变为大幅值热声振荡状态, 此时声压级在 140 dB 左右, 振荡主频为 365 Hz 左右. 在当量比为 0.73 时, 系统从大幅值热声振荡状态转变为稳定燃烧状态. 在当量比为 1.09 时, 火焰从稳定燃烧

状态转变为大幅值热声振荡状态, 此时振荡主频和降低当量比的过程相似, 从 365 Hz 左右降低至 165 Hz 左右. 系统的热声振荡状态抑制保持到当量比为 1.4 时, 而非 1.17. 综上所述, 在该热功率下, 出现了亚临界 Hopf 分岔现象, 超临界 Hopf 分岔现象以及模态转换 3 种现象. 其中亚临界 Hopf 分岔现象包括两个区域, 分别为当量比为 1.17 ~ 1.40 的区域 1, 此时增加当量比会产生燃烧振荡, 而降低当量比的过程中则不会产生燃烧振荡现象. 当量比为 1.02 ~ 1.09 的区域 2, 此时降低当量比的过程中会产生燃烧振荡现象, 而增加当量比的过程不会产生燃烧振荡现象. 超临界 Hopf 分岔现象出现在当量比分别为 0.69 和 0.73 两处. 在上升或者下降当量比的过程中, 总是会在这两个点发生稳定性的转变, 这种现象称为超临界 Hopf 分岔现象. 当量比小于 1 时, 在 0.69 和 0.73 两个当量比之间, 会发生燃烧振荡现象. 两点之外, 则不会产生燃烧振荡. 针对模态转换, 如图 4(b)所示, 在高当量比时, 振荡频率在 160 Hz 左右. 随着空气流量的增加, 当量比逐渐降低, 在当量比为 0.73 左右时, 振荡频率变为 360 Hz 左右.

关于模态转换, 实验中发现了两个不同主导频率的振荡, 如图 5 所示, 实验工况为功率 0.96 kW, 当量比分别为 1.17 和 0.71. 图 5(a) 和 (b) 为功率 0.96 kW、当量比 1.17 时压力信号的时域图和频域图. 可以发现此时振荡的主频为 163 Hz, 属于低频振荡. 图 5(c) 和 (d) 为功率 0.96 kW、当量比为 0.71 时的压力信号的时域图和频域图. 可以发现此时振荡的主频为 354 Hz, 相对于前面一种工况的振荡主频, 发生了较大的频率迁移. 为了进一步分析模态转换前后声压振荡在时域和频域上的变化, 本文对声压信号进行了短时傅里叶变换和相空间重构, 结果如图 6 所示. 图 6(b) 和 (d) 为功率 0.96 kW、当量比分别为 1.17 和 0.71 工况下的相空间重构图. 其均呈现一个宽度很窄的圆环状, 因此, 可以判断这两个工况下声压振荡均处于标准的极限环状态. 图 6(a) 和 (c) 为对应工况下的声压信号经过短时傅里叶变换得到的时频域图, 可以发现在 2 s 内, 声压振荡的主频不随时间发生变化. 根据振荡主频的大小, 定义 163 Hz 附近的振荡为低频振荡, 355 Hz 附近的振荡为高频振荡.

2.2 燃烧器声学特性分析

为了进一步了解实验中获得的振荡频域处于实验装置的几阶振荡模态, 本文基于格林函数法, 计算了本实验台的声学特征频率, 实验台具体参数见表 1, 其中上游温度固定为 288 K, 下游温度根据从实验

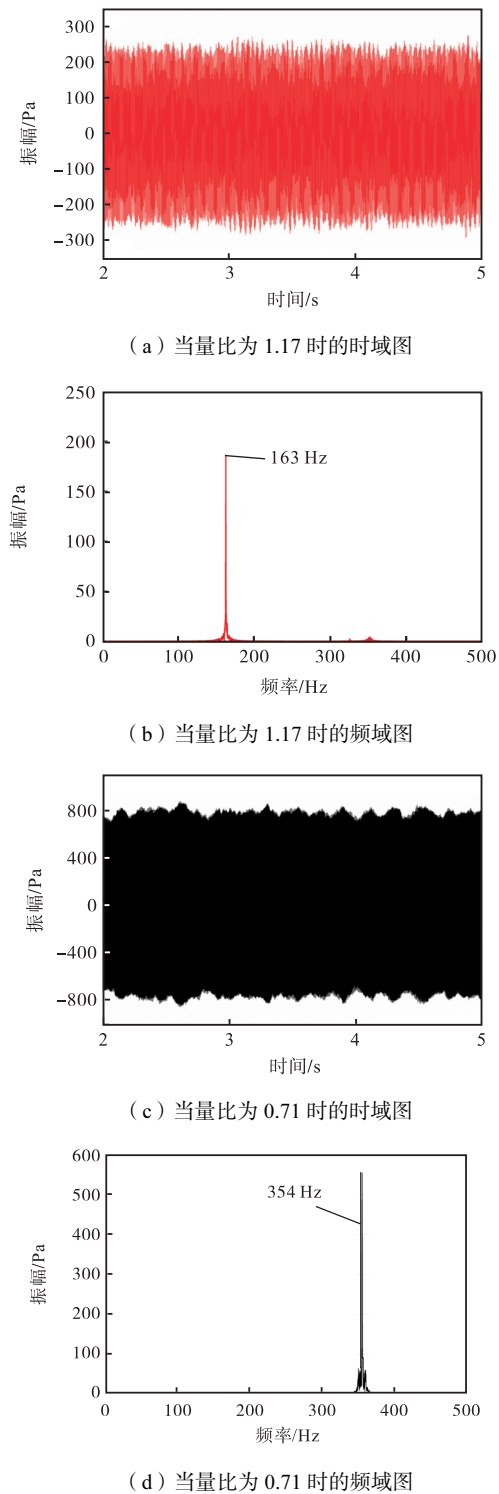


图 5 当量比为 1.17 和 0.71 时的频域图和时域图

Fig.5 Frequency domain and time domain plots for equivalence ratios of 1.17 and 0.71 respectively

测量的 Rijke 管壁面温度,随后利用 FLUENT 进行三维模拟^[18],得到下游平均温度为 650 K 到 750 K. 根据理论计算值以及实验测量振荡主频随当量比的变化,绘制图 7. 随着当量比的增加,实验测得二阶振荡频率先增加后降低,在当量比等于 1 附近,达到最大值. 其原因可能是当量比在 1 附近,火焰温度达到

最高,下游声速达到最大,因此二阶振荡频率达到最大值. 而当量比超过 1 时,随着当量比的增加,火焰

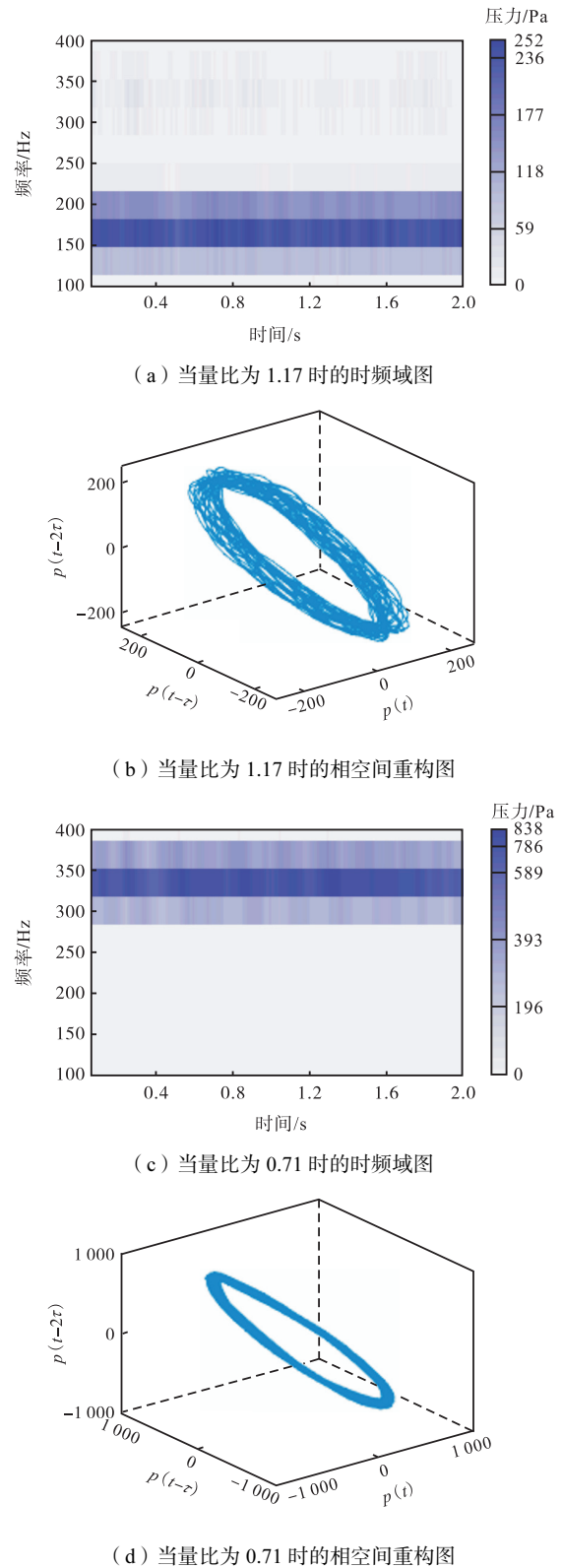


图 6 当量比为 1.17 和 0.71 时的时频域图与相空间重构图

Fig.6 Time-frequency domain plots and phase space reconstruction plots for equivalence ratios of 1.17 and 0.71, respectively

温度逐渐降低,下游声速也在逐渐下降,这也导致一阶振荡频率的实验值也在下降.而对于计算理论值,由于假设其温度随着当量比逐渐升高,因此下游声速也在逐渐增大,一阶和二阶的振荡频率也在增加.同时由图 7 可知,发生大幅值频率迁移的两个频率分别位于空腔一阶声学频率和二阶声学频率.理论计算值与实验值存在差异可能是因为在利用格林函数计算时,只是单纯地考虑声学,并没有考虑热释放源项(即热释放对扰动的响应),因此会对计算结果造成一定的偏差.后续在进行燃烧室的稳定性的判断时,会引入热释放源项.

表 1 格林函数参数

Tab.1 Parameter table of Green's function

参数	数值
管长/m	1.2
管径/m	0.025
燃料管径/m	0.003 16
上游温度/K	288
下游温度/K	650 ~ 750
上下游横截面面积比值	1.016

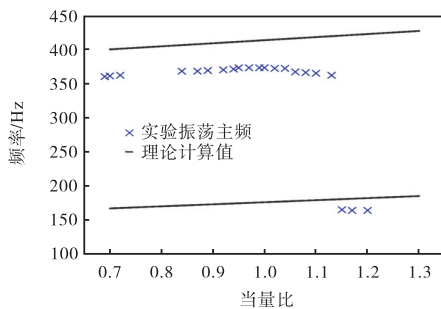


图 7 实验振荡主频与格林函数理论计算值随当量比的变化

Fig.7 Variation of experimental oscillation main frequency and Green's function calculated theoretical value with equivalence ratio

2.3 燃烧振荡火焰动力学分析

从上节分析可知,模态转换前后,振荡主频会发生接近 200 Hz 左右的频率变化,而振荡火焰的特征也可能存在明显的差别.

因此,本节选取了 4 个工况对燃烧振荡火焰动力学进行了分析,具体工况如表 2 所示.图 8 为对应工况下的火焰时间平均图像,以及对应的火焰长度和火焰质心高度(火焰发光率的轴向分布图中数字代表火焰质心轴向位置和火焰长度).其中火焰时间平均图像采用 2 500 张图片,采样频率为 5 000 Hz,拍摄时长为 0.5 s.火焰平均长度取对应的火焰图像的轴向归一化发光率大于 0.2 区域的长度.从图像可知,其存在两种火焰形状,分别为中间高,两侧低的长火焰,以及长度一致的紧凑型火焰.

经过对比发现,影响火焰形状的主要因素为当量比.在高当量比的情况下,如图 8(a)和(c)所示,中心火焰较高,两侧火焰较低,同时中心火焰的亮度也偏高.这是由于当量比较高,和甲烷预混的空气量较少,此时处于富燃状态,因此需要从 Rijke 管底部卷吸较多的空气,而卷吸的空气首先与燃烧头两侧未燃尽的甲烷混合燃烧,随后再与燃烧头中部的未燃尽的甲烷进行混合燃烧,所以中部的火焰簇较长,两边的火焰簇较短.同时燃烧头和燃料管处存在突扩,导致其燃烧头中心处流量较大,功率也较大,亮度较高.在低当量比的情况下,如图 8(b)和(d)所示,多孔陶瓷板火焰高度类似,中心火焰偏亮.这是由于当量比较低时,和甲烷预混的空气量较多,整体混合较好,此时处于贫燃状态,不需要从 Rijke 管底部卷吸过多的空气,所以火焰长度类似.至于火焰亮度同样是因为燃烧头和燃料管路连接处的突扩造成的.

表 2 实验工况

Tab.2 Experimental working condition

工况编号	功率/kW	当量比	振荡形式	延迟时间/ms
1	1.13	1.20	一阶轴向振荡	9.5
2	1.13	1.05	二阶轴向振荡	7.2
3	0.96	1.17	一阶轴向振荡	8.5
4	0.96	0.71	二阶轴向振荡	4.8

而火焰的长度和位置会影响火焰的响应特性,进而影响到系统的稳定性和振荡频率.相关研究常用延迟时间 τ 表征火焰的响应特性,其定义式为 $\tau = L_{com}/v$,其中 L_{com} 表示火焰质心的位置到喷口的距离, v 表示气流流动速度^[19].通常来说,长度越长的火焰,其延迟时间越长,而长度较短的火焰,其延迟时间较短.而延迟时间的变化会导致系统的耦合振荡频率也随之变化.根据 Ghirardo 等^[20]对延迟时间和系统稳定性之间的联系的研究,他们发现,在低当量比时,火焰较紧凑,延迟时间较短,火焰容易与系统的高阶模态耦合.高当量比时,火焰较长,延迟时间也较长,火焰容易与系统的低阶模态相耦合.

本文对选取的 4 个工况分别计算了其延迟时间,计算结果见表 2.可以发现,高当量比的工况 1 和工况 3 对应的延迟时间较大,而低当量比的工况 2 和工况 4 对应的延迟时间相对较小.高延迟时间火焰更易与系统低阶频率耦合,相反低延迟时间火焰更易与系统高阶频率耦合^[20].这解释了不同当量比下自激振荡的模态转换.

不同振荡频率下火焰的振荡模式也不相同,因此本文选取了工况 3 和工况 4 两个工况,分析了其锁相图像以及一个周期内不同相位下的火焰长度和质心

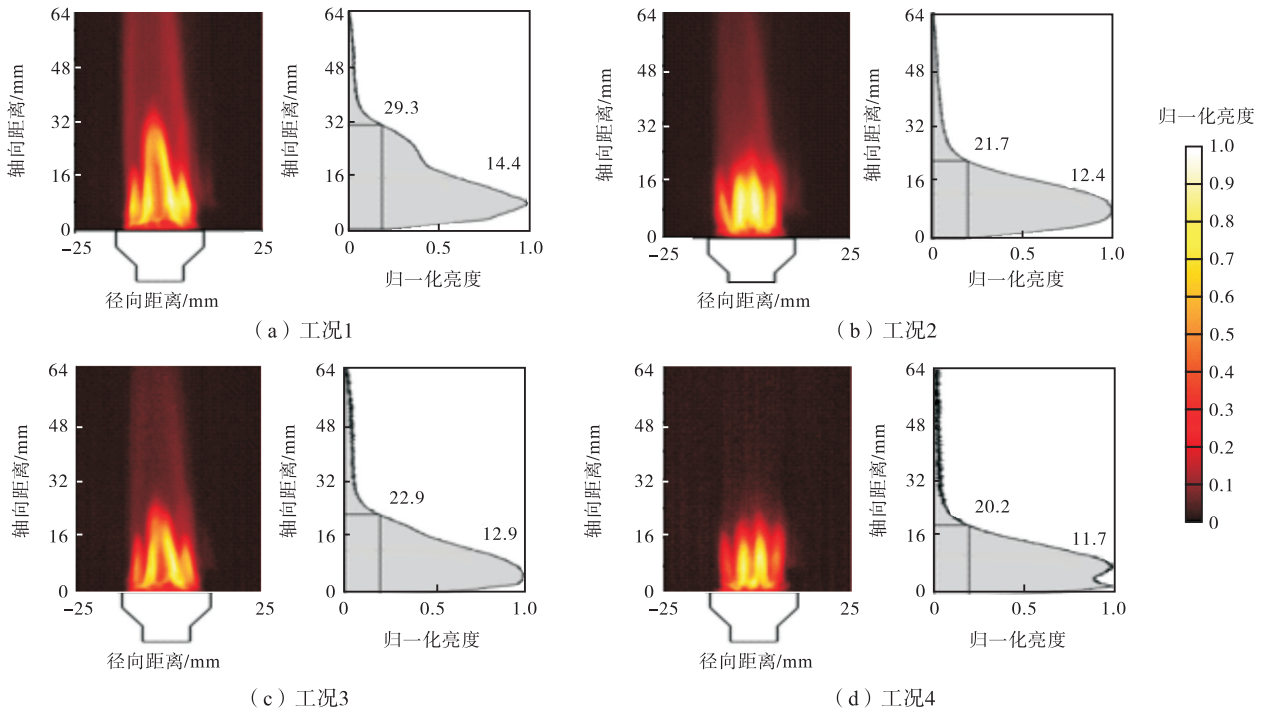
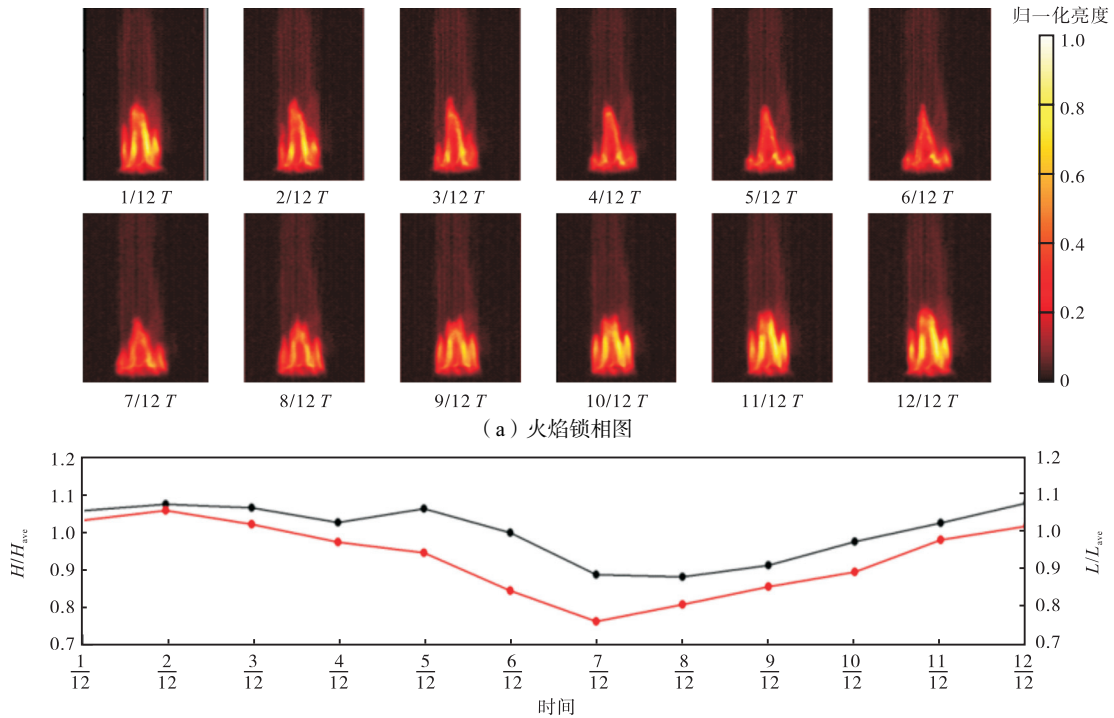


图8 各工况火焰图像与归一化火焰发光率轴向分布

Fig.8 Flame images for each case with the normalized axial distribution of flame luminosity

高度,其中火焰长度和质心高度分别处于对应工况下的时均值,以进行无量纲处理.处理时将一个燃烧振荡的周期平均分为12段,每一段的相位间隔为 30° .对每间隔 $1/12$ 周期(即 $(1/12)T$)的火焰图像进行染色,并计算火焰的长度以及火焰质心的轴向位置,处理结果如图9和图10所示.图9对应的工况

为功率 0.96 kW ,当量比 1.17 ,此时的振荡频率为 163 Hz ,属于低频振荡.可以发现,火焰长度在前半个周期变短,后半个周期增加,火焰整体的振荡形式为轴向的上下摆动.这种火焰长度的周期性变化称之为轴向振荡.而火焰亮度也在一个周期内存在变化,火焰亮度先变暗,后变亮,呈现周期性变化,而火



(b) 火焰质心高度 H 与火焰长度 L 在一个周期 T 内随相位的变化

图9 当量比为1.17,火焰锁相图和火焰质心高度 H 与长度 L 随相位的变化

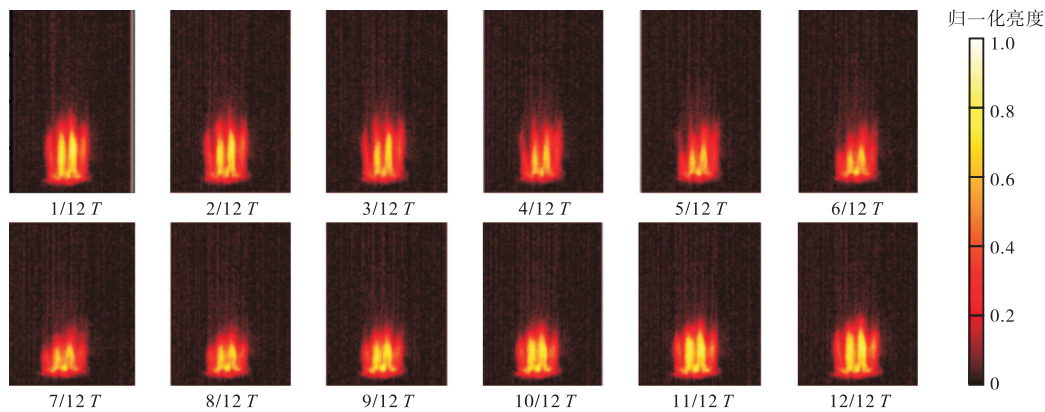
Fig.9 Equivalent ratio of 1.17, flame phase-locked plot, flame center-of-mass height H and length L with phase variation

焰的明暗与热释放相关. 这种由热释放周期性变化产生的振荡称之为频闪振荡. 当高频振荡发生时, 如图 10 所示(图中功率为 0.96 kW), 其同样存在两种振荡形式, 分别为火焰轴向长度周期性变化的轴向振荡, 以及热释放周期性变化而引起的亮度变化而对应的频闪振荡.

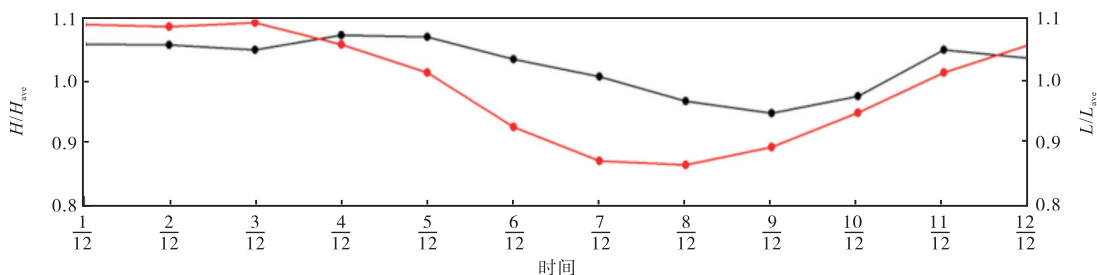
2.4 动态火焰图像特征分析

为了进一步研究高频振荡和低频振荡中的各个

低阶模态的空间分布以及主导振荡形式等细节, 本节将结合本征正交分解(POD)方法, 对火焰图像进行处理. 本征正交分解(POD)方法可以把一个振荡系统进行空间正交模态分解, 可以把复杂振荡系统进行降阶处理, 得到多个低阶振荡模态的能量占比、空间分布等^[21]. 图 11 是功率为 0.96 kW, 当量比为 1.17, 振荡主频为 163 Hz 的低阶振荡的 POD 分解. 图 11(c) 为该工况经过 POD 分解后, 前 10 阶模态的能量占



(a) 火焰锁相图



(b) 火焰质心高度 H 与火焰长度 L 在一个周期 T 内随相位的变化

图 10 当量比为 0.71, 火焰锁相图和火焰质心高度 H 与火焰长度 L 在一个周期 T 内随相位变化图

Fig.10 Equivalent ratio of 0.71, flame phase-locked plot, flame center-of-mass height H and length L with phase variation

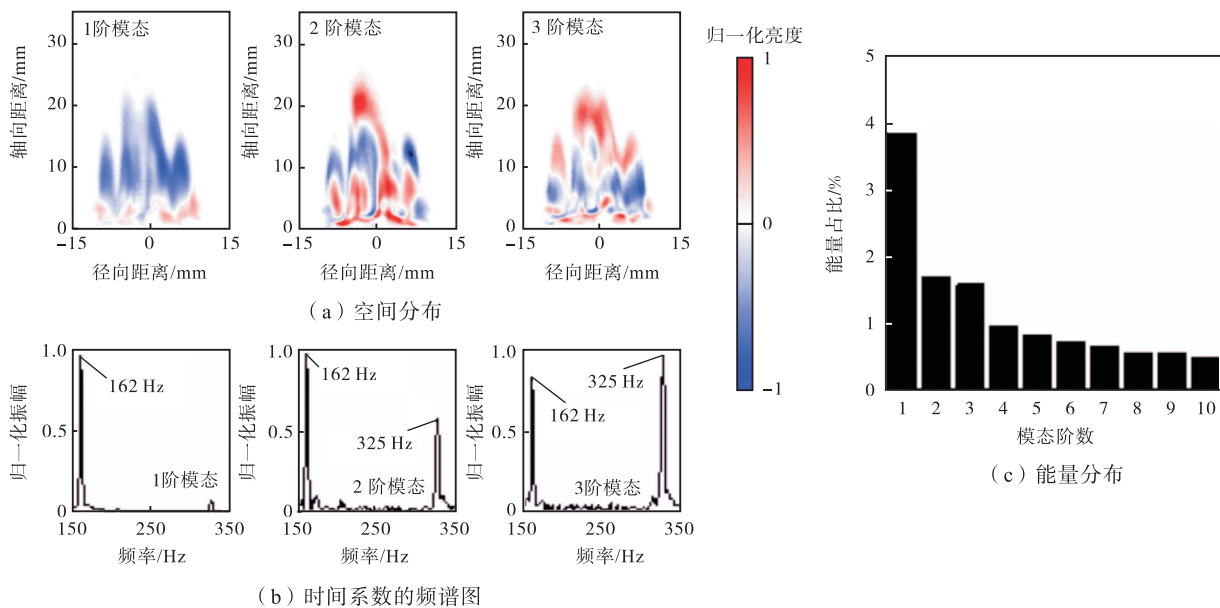


图 11 功率为 0.96 kW, 当量比为 1.17, 火焰图像 POD 分解结果

Fig.11 POD decomposition results of flame image for 0.96 kW and equivalent ratio of 1.17

比. 根据各阶模态的能量占比, 本文选取前 3 阶模态进行分析, 对应的模态空间分布图和时间系数的频谱图见图 11(a) ~ (b). 从前 3 阶模态来看, 其空间分布呈现均为双色分布, 为轴向振荡的特征. 根据时间系数的快速傅里叶变换可以发现, 能量占比最大的前两阶振荡的振荡主频均为 162 Hz, 为低频振荡, 在更高频的模态中出现了 2 阶模态占据主导的振荡形式.

图 12 对应工况的功率是 0.96 kW, 当量比为 0.71, 振荡主频为 354 Hz. 其 POD 分解的结果与上述低频振荡的结果明显不同. 图 12(c) 为该工况经过 POD 分解后, 前 10 阶模态的能量占比. 根据各阶模

态的能量占比, 本文选取前 3 阶模态进行分析, 对应的模态空间分布图和时间系数的频谱图见图 12(a) ~ (b). 其 1 阶振荡模态的空间分布具有非常明显的单色特征, 对应的振荡形式为频闪振荡. 而能量占比较低的 2 阶和高阶模态为双色分布, 振荡形式为轴向振荡. 根据时间系数的傅里叶变换可以发现, 前两阶模态的主频均为 Rijke 管的 2 阶声学特征频率. 在更高频的模态中出现了高阶模态振荡. 综上所述, 该工况下主导的热声振荡模式为 Rijke 管的 2 阶特征频率, 具体振荡形式包括频闪模式和轴向振荡, 其中频闪模式占据主导.

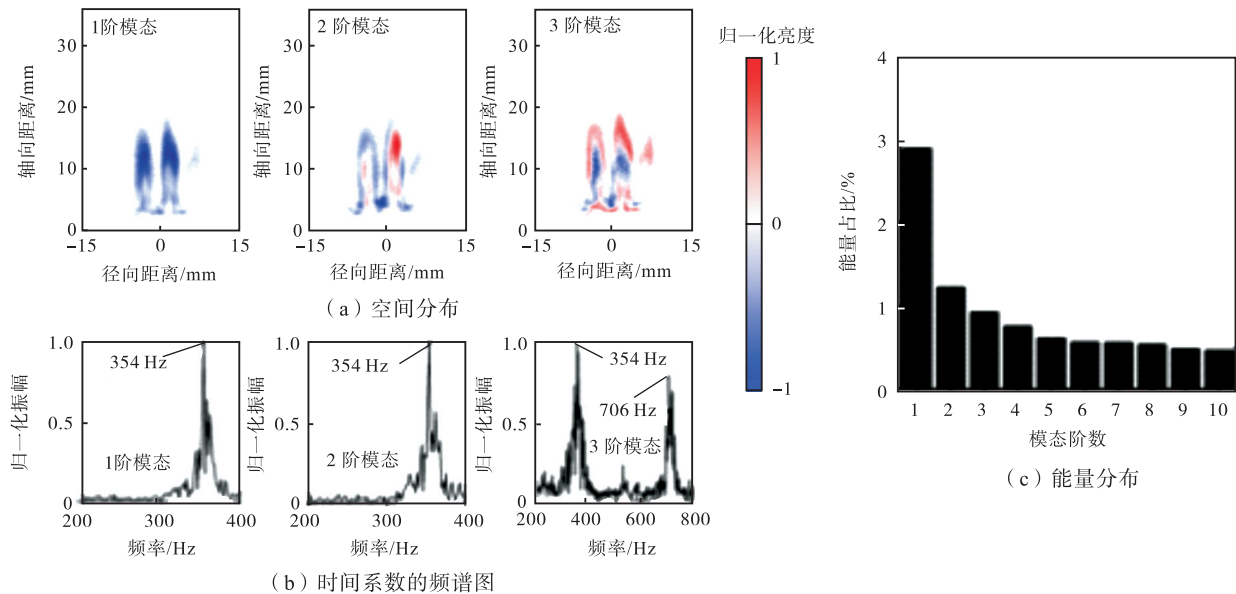


图 12 功率为 0.96 kW, 当量比为 0.71, 火焰图像 POD 分解结果

Fig.12 POD decomposition results of flame image for 0.96 kW and equivalent ratio of 0.71

通过 POD 分解的结果, 得到了高频振荡和低频振荡的主导振荡形式, 以及各个低阶模态的空间分布. 1 阶和 2 阶的热声振荡工况下火焰的振荡形式存在明显差异. 1 阶振荡时, 火焰的振荡主要为轴向振荡. 2 阶振荡时, 火焰倾向于频闪模式的振荡.

3 结论

本文基于实验和格林函数理论计算相结合的方法, 研究多孔陶瓷板预混火焰多模态热声振荡的特征, 通过改变当量比发现了模态转换现象, 结合火焰热释放率图像的时均处理、锁相分析处理以及 POD 分解, 揭示了模态转换前后火焰振荡的特点.

(1) 随着当量比的降低, 发生了模态转换现象. 在功率为 0.96 kW 时, 当量比从 1.17 变化到 0.71 时, 振荡主频从 163 Hz 的迁移到 355 Hz. 其中 163 Hz 对应系统的一阶声学特征频率, 355 Hz 对应

系统的二阶声学特征频率.

(2) 通过计算火焰的长度和质心位置, 得到了模态转换产生的原因: 高当量比条件下火焰面更高, 且流速较低, 对应的火焰对流延迟时间长, 此时火焰容易与系统的低频声学模态耦合.

(3) 火焰图像的动态特征分析发现: 火焰存在轴向振荡和频闪振荡两种振荡形式; 高频振荡以频闪振荡为主; 低频振荡以轴向振荡为主.

参考文献:

- [1] 柯恩雷, 季晨振, 潘登, 等. 结合系统辨识方法的旋流部分预混燃烧不稳定预测及控制研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(8): 2319-2329.
Ke Enlei, Ji Chenzhen, Pan Deng, et al. The prediction and control of partially premixed swirl combustion instability by system identification method[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(8): 2319-

- 2329 (in Chinese).
- [2] 张世红, 王欣尧, 张弛, 等. 分层旋流火焰特征提取与燃烧不稳定预测[J]. 燃烧科学与技术, 2023, 29(5): 483-490.
Zhang Shihong, Wang Xinyao, Zhang Chi, et al. Feature extraction and combustion instabilities prediction of stratified swirling flame[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(5): 483-490 (in Chinese).
- [3] Matthew P, Juniper R I. Sensitivity and nonlinearity of thermoacoustic oscillations[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2018, 50(1): 661-689.
- [4] Krishna M, Samadhan A P, Jürgen K. Rijke tube: A nonlinear oscillator[J]. *An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2022, 32(7): 72-101.
- [5] Cheney T, Hao Z. Effects of operating parameters on the combustion oscillation behaviour in a lean premixed CH₄ combustor[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(8): 3753-3762.
- [6] Thomas I, Abel F B, Nicolas N. The effect of dynamic operating conditions on the thermoacoustic response of hydrogen rich flames in an annular combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 223: 284-294.
- [7] Ahn B, Lee J, Jung S. Low-frequency combustion instabilities of an airblast swirl injector in a liquid-fuel combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 196: 424-438.
- [8] Frédéric B, Daniel D, Thierry S. Analysis of limit cycles sustained by two modes in the flame describing function framework[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2013, 341(1): 181-190.
- [9] Noiray N, Durox D, Schuller T, et al. Self-induced instabilities of premixed flames in a multiple injection configuration[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 145: 435-446.
- [10] Rao Zhuming, Li Ruichao, Zhang Bo. Experimental investigations of equivalence ratio effect on nonlinear dynamics features in premixed swirl-stabilized combustor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 112: 106601.
- [11] 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]. 推进技术, 2023, 44(4): 167-175.
Zhang Xin, Li Jingxuan, Yang Lijun. Experimental study on chaotic phenomena of multimodal thermoacoustic instability[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(4): 167-175 (in Chinese).
- [12] Boudry F, Durox D, Schuller T, et al. Analysis of limit cycles sustained by two modes in the flame describing function framework[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2013, 341: 181-190.
- [13] 扈学超, 毕笑天, 刘策, 等. 氢燃料微预混火焰燃烧不稳定性实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(4): 572-584.
Hu Xuechao, Bi Xiaotian, Liu Ce, et al. Study of combustion characteristics and flame stabilization mechanism of hydrogen-containing micromix jet flames[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(4): 572-584 (in Chinese).
- [14] Heckl M A, Howe M S. Stability analysis of the Rijke tube with a Green's function approach[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 305: 672-688.
- [15] Heckl M A. Analytical model of nonlinear thermoacoustic effects in a matrix burner[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(17): 4021-4036.
- [16] Alessandra B, Heckl M A. A Green's function approach to the rapid prediction of thermoacoustic instabilities in combustors[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 798: 970-996.
- [17] Wang Xiaoyu, Heckl M A. 3-D thermoacoustic instability analysis based on Green's function approach[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 537: 116816.
- [18] Song Xiuyang, Zhu Tong, Pan Deng, et al. Numerical investigations on the beating behavior of self-excited combustion instability in a hydrogen-fueled Rijke type combustor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 126: 107624.
- [19] Jones B, Lee J G, Quay B D, et al. Flame response mechanisms due to velocity perturbations in a lean premixed gas turbine combustor[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(2): 021503.
- [20] Ghirardo Giulio, Juniper Matthew P, Bothien Mirko R. The effect of the flame phase on thermoacoustic instabilities[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 187: 165-184.
- [21] 王子豫, 潘登, 季晨振, 等. 基于模态分解的扩散火焰动态响应特性分析[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(12): 3304-3311.
Wang Ziyu, Pan Deng, Ji Chenzhen, et al. Characteristics of diffusion flame by using modal decomposition[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(12): 3304-3311 (in Chinese).