

# 轴向分级燃烧室受迫振荡特性的实验研究

贾玉良, 李昱泽, 葛冰, 臧述升

(上海交通大学 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 为了研究轴向分级燃烧室主燃空气入口扰动对轴向分级燃烧的影响, 开展了轴向分级燃烧室受迫振荡实验, 获取受迫振荡情况下燃烧室内压力响应以及再燃火焰特性。实验结果表明: 在受迫振荡燃烧过程中, 轴向分级燃烧室内振荡主频与空气入口扰动频率基本相同, 空气入口扰动频率为 270 Hz 时, 燃烧室内压力响应更加明显; 与稳定燃烧状态相比, 空气入口扰动的加入会使再燃火焰抬升, 再燃火焰向火焰中心收缩, 再燃火焰质心位置向上方移动, 火焰质心波动的带状区域由上下分布转化为左右分布, 燃烧振荡会缩小再燃火焰在径向的波动范围, 但是会扩大再燃火焰在轴向的波动范围; 在无燃烧振荡的情况下, 再燃火焰沿轴向和径向均出现了 201 Hz 的质心波动主频, 且轴向振荡主频幅值更高, 在振荡情况下, 质心沿轴向和径向均产生 270 Hz 的波动主频, 再燃火焰在轴向的波动的幅值增大, 在径向无明显变化。

**关键词:** 轴向分级燃烧; 受迫振荡; 再燃火焰

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.12.015

[引用本文格式] 贾玉良, 李昱泽, 葛冰, 等. 轴向分级燃烧室受迫振荡特性的实验研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(12): 118-123. JIA Yu-liang, LI Yu-ze, GE Bing, et al. Experimental study on forced oscillation characteristics of axial staged combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(12): 118-123.

## Experimental Study on Forced Oscillation Characteristics of Axial Staged Combustor

JIA Yu-liang, LI Yu-ze, GE Bing, ZANG Shu-sheng

(Key Laboratory of Power Machinery and Engineering, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

**Abstract:** In order to study the influence of main combustion air inlet disturbance on axial staged combustion, the forced oscillation experiment of axial staged combustor was carried out to obtain the pressure response and reburning flame characteristics in the case of forced oscillation. The experimental results show that the dominant frequency of oscillation in axial staged combustor is basically the same as air inlet disturbance frequency in the process of forced oscillation combustion; when the air inlet disturbance frequency is 270 Hz, the pressure response in the combustor is more obvious; compared with the stable combustion state, the addition of air inlet disturbance will raise the reburning flame, shrink the reburning flame to the flame center, move the position of the reburning flame centroid upward, and the band region of flame centroid fluctuation will change from up-down distribution to left-right distribution, combustion oscillation will reduce the fluctuation range of reburning flame in radial direction, but expand the fluctuation range of reburning flame in axial direction; in the case of no combustion oscillation, the centroid fluctuation dominant frequency of 201 Hz appears along the axial and radial directions of the reburning flame, and as the amplitude of the dominant frequency of the oscillation in the axial direction is higher; in the

收稿日期: 2021-12-07; 修订日期: 2022-03-27

基金项目: 国家科技重大专项(2017-V-0012-0064)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017-V-0012-0064)

作者简介: 贾玉良(1994-), 男, 安徽亳州人, 上海交通大学硕士研究生。

case of oscillation, the centroid fluctuation dominant frequency of 270 Hz occurs along the axial and radial directions, and as the amplitude of the original fluctuation of the reburning flame in the axial direction increases, there is no significant change in the radial direction.

**Key words:** axial staged combustion, forced oscillation, reburning flame

## 引 言

基于燃料分级的轴向分级燃烧技术被证明是降低污染物排放的先进燃烧技术<sup>[1-3]</sup>。该技术通过燃料的分级注入,控制燃烧室的温度维持在较低的水平,燃烧区可以保持较低的  $\text{NO}_x$  生成速率,以实现高温升条件下更高的燃烧稳定性和更低的污染物排放水平<sup>[4-7]</sup>。燃料轴向分级燃烧技术研究中再燃火焰的组织是一个焦点问题。Yi 等人<sup>[8]</sup>分析了主流中非混合射流的自燃控制火焰引发和火焰稳定的机理。在 Roa 等人<sup>[9]</sup>的研究中发现,再燃火焰由迎风侧火焰与背风侧火焰两个分支组成,迎风侧火焰很不稳定,会出现完全火焰附着、不稳定抬升和迎风吹散 3 种典型形态。郑祥龙<sup>[10]</sup>对轴向分级燃烧再燃火焰进行数值模拟,结果显示,迎风侧火焰呈现出明显不连续性,背风侧火焰连续稳定附着在再燃喷嘴出口。

由于轴向分级燃烧室存在两个燃烧区,即主燃烧区与再燃烧区,其燃烧稳定性与常规头部贫预混燃烧室有很大不同,因此必须考虑燃料轴向分级条件下的燃烧振荡问题。Ni 等人<sup>[11]</sup>提出了一种轴向分级燃烧室自激燃烧振荡的机理,该机理涉及到声学特性与自燃时间、火焰速度、燃料排布和热释放强度之间的耦合。Schulz 等人<sup>[12]</sup>对大涡模拟(Large eddy simulation, LES)火焰动力学的分析表明,由于混合温度和轴向速度的自激发异相位振荡,混合段的自点火长度受到强烈的调制,导致再燃烧区位置发生强烈振荡。

目前,国内外针对轴向分级燃烧排放以及再燃火焰结构已经开展了较多研究,但是对于轴向分级燃烧室燃烧振荡的研究相对较少,轴向分级燃烧振荡的作用机理还不清晰。本文通过声激励的方式对入口主燃空气施加扰动,使燃烧室内保持受迫振荡燃烧状态,获得轴向分级再燃烧区对主燃空气入口扰动的声压响应以及火焰振荡特性。

## 1 实验系统介绍

轴向分级燃烧室燃烧实验系统如图 1 所示。其主要由主燃空气供应系统、再燃空气供应系统、燃料供应系统、轴向分级燃烧室、燃烧试验台测量系统及其他辅助系统组成。其中, P1, P2 和 P3 分别为燃烧室主燃空气入口、主燃烧区和再燃烧区声压测点。在主燃空气入口上游设置扬声器用以施加正弦波声激励,提供的空气入口扰动功率为 300 W。

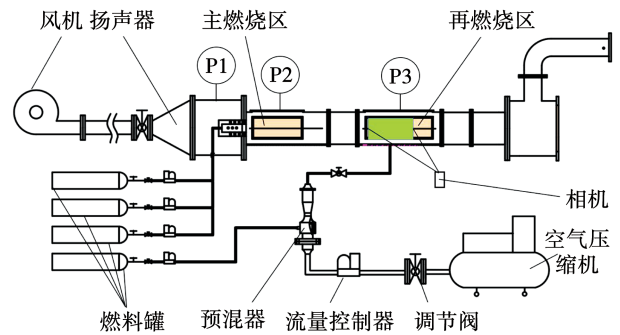


图 1 轴向分级燃烧室燃烧实验系统

Fig. 1 Axial staged combustor combustion experimental system

燃料为甲烷,主燃预混气通过主燃烧区燃烧,再经过 208 mm 的稳流过渡区后进入再燃烧区。再燃烧区截面尺寸为 144 mm × 96 mm,射流孔内径  $D = 12$  mm。再燃预混气与主流高温烟气在再燃烧区进行掺混燃烧。图 2 为轴向分级燃烧室模型。再燃烧区三维坐标,其中,  $Z$  为轴向,  $Y$  为高度方向,  $X$  为垂直于视图向里。坐标原点位于射流出口圆心。

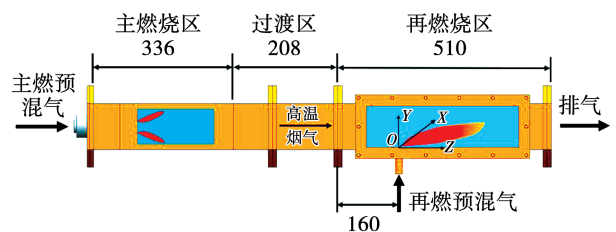


图 2 轴向分级燃烧室 (mm)

Fig. 2 Axial staged combustion chamber (mm)

## 2 实验测量方法

### 2.1 测量方法

再燃火焰照片的拍摄采用高分辨率工业相机 Phantom VE0710,分辨率为  $1080 \times 800$  像素,最大拍摄频率为  $7\ 400$  Hz。采用  $\text{CH}^*$  基的自发光测试技术研究甲烷/空气再燃火焰特性。在甲烷/空气燃烧反应机理中, $\text{CH}^*$  基是燃烧反应中重要的中间产物,可以表征燃烧反应区域,其自发光辐射波长为  $390$  和  $431$  nm。利用窄带滤光片进行射流火焰拍摄,其对波长为  $432 \pm 10$  nm 的光线透过率在  $90\%$  以上,对其他波长的光线透过率低于  $1\%$ 。为了测量轴向分级燃烧室各区域对入口空气扰动的响应,采用 PCB 公司生产的 130F20 型麦克风传感器在燃烧室各测点进行压力测量。压力采样频率设置为  $2\ 500$  Hz,对测量后的压力信号进行快速傅里叶变换 (Fast fourier transform, FFT),得到频域信息。

### 2.2 实验工况

入口的空气和燃料均为常温常压气体。主燃空气质量流量  $114.6$  g/s,主燃当量比  $0.53$ ,再燃当量比为  $0.8$ ,具体试验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况

Tab. 1 Experimental conditions

工况	主燃当量比	再燃当量比	声激励频率/Hz
1	0.53	0.80	0
2	0.53	0.80	110
3	0.53	0.80	190
4	0.53	0.80	270

### 2.3 数据处理

(1) 对主燃烧区和再燃烧区的燃料/空气当量比进行定义:

$$\phi_m = \frac{m_{m,f}}{m_{m,a}} \times 17.16 \quad (1)$$

$$\phi_r = \frac{m_{r,f}}{m_{r,a}} \times 17.16 \quad (2)$$

式中: $\phi_m$ —主燃烧区当量比; $\phi_r$ —再燃烧区当量比; $m_{m,f}$ —主燃烧区燃料质量流量,g/s; $m_{r,f}$ —再燃烧区燃料质量流量,g/s; $m_{m,a}$ —主燃烧区空气质量流量,g/s; $m_{r,a}$ —再燃烧区空气质量流量,g/s。

(2) 对燃烧室内产生的压力信号进行傅里叶变换,得到脉动压力的频域信息。

(3) 在再燃火焰照片的处理过程中,选取  $1\ 000$

张瞬态进行处理。由于提取了再燃火焰质心的坐标,因此对再燃火焰质心作出定义:

$$M_c = \left( \frac{\sum_{i=1}^n G_i \left( \frac{Z_i}{D} \right)}{\sum_{i=1}^n G_i}, \frac{\sum_{i=1}^n G_i \left( \frac{Y_i}{D} \right)}{\sum_{i=1}^n G_i} \right) \quad (3)$$

式中: $M_c$ —再燃火焰质心坐标; $G_i$ —第  $i$  个像素点的灰度值; $Z_i/D$ —第  $i$  个像素点在  $Z$  方向的无量纲坐标; $Y_i/D$ —第  $i$  个像素点在  $Y$  方向的无量纲坐标。坐标原点为射流出口圆心。

(4) 对  $1\ 000$  张瞬态再燃火焰照片进行傅里叶变换,得到再燃火焰质心波动的频域信息。

## 3 结果分析

### 3.1 受迫振荡下的燃烧室的压力响应

实验中发现,燃烧室内振荡主频与空气入口扰动频率基本相同。 $110$ ,  $190$  和  $270$  Hz 3 种典型工况的压力响应如图 3 所示。当燃烧室空气入口加入  $110$  Hz 的扰动时,出现  $220$  Hz 的响应主频。这在一定程度说明,轴向分级燃烧室的振荡可能更倾向于高频振荡,并且再燃区的振荡主频幅值相较于主燃烧区有明显的降低。原因为该入口空气扰动频率与燃烧室固有频率存在明显差异,压力传递到再燃区不易产生振荡。当燃烧室空气入口加入  $190$  Hz 的扰动时,虽然再燃区振荡主频有所降低,但是这种降低可能是由声压波动向下游传递过程的损耗导致的。当燃烧室空气入口加入  $270$  Hz 的扰动时,相比于另外两个扰动频率,燃烧室内响应更加明显,并且压力波动向下游传递的过程中,再燃区压力幅值只有略微的降低,这说明再燃区的振荡有所增强。

### 3.2 受迫振荡下的再燃火焰结构

由于空气入口扰动频率为  $270$  Hz 时,再燃区响应最明显。因此,选取空气入口扰动频率  $270$  Hz 的工况,研究受迫振荡情况下再燃火焰的响应特性。与无空气入口扰动时的火焰结构进行对比,如图 4 所示。为了排除噪点对火焰图像的干扰,设置火焰照片灰度,进行了处理分析。通过综合对比,将灰度小于  $30\%$  的部分剔除。从图 4 可以看出,与无扰动的稳定燃烧状态相比,受迫振荡会使再燃火焰抬升,这种抬升效果可能会导致火焰更容易冲刷上壁面,使燃烧室运行工况范围变窄。此外,受迫振荡状态下再燃火焰向火焰中心收缩,这种收缩状态可能会

导致局部热释放率增强,产生局部高温热点,从而导致局部  $\text{NO}_x$  生成速率提高。

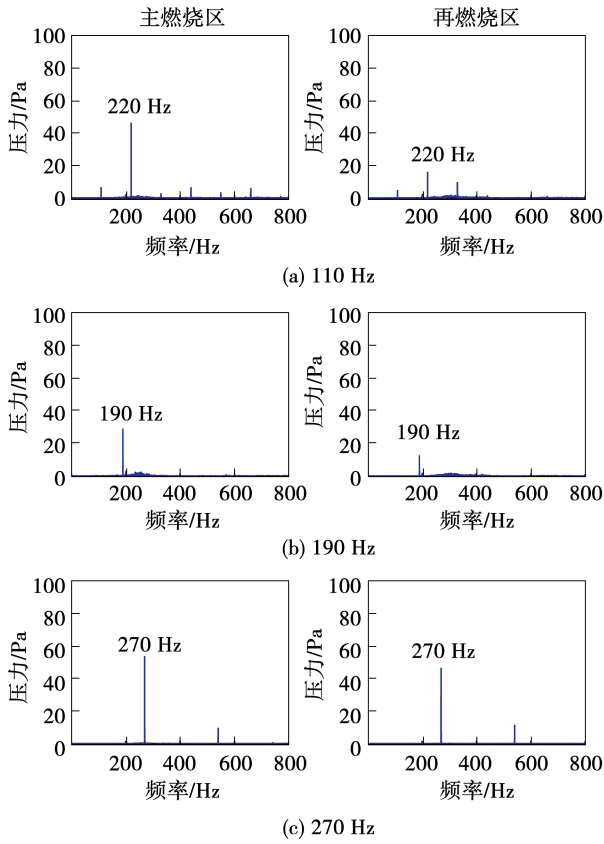


图 3 轴向分级燃烧室内的压力脉动  
Fig. 3 Distribution of pressure pulsation in axial staged combustor

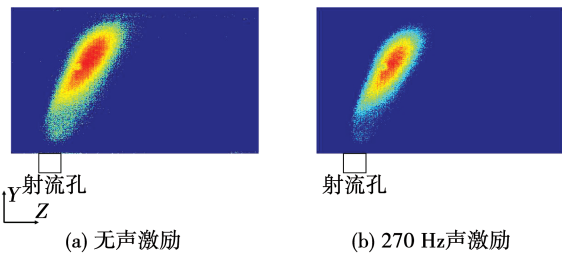


图 4 受迫振荡下的再燃火焰结构  
Fig. 4 Effect of forced oscillation on the structure of reburning flame

### 3.3 受迫振荡下的再燃火焰位置

图 5 为有无空气入口扰动情况下,瞬态再燃火焰的质心位置分布。从图中可以明显看出,稳定燃烧情况下,火焰质心趋向于高度方向上的波动,Z 方向波动范围主要分布在  $Z/D = 1.0 \sim 1.5$  内。相比于稳定燃烧状态,在受迫振荡情况下,再燃火焰质心位置向上方移动,主要分布在  $Y/D = 4$  附近。火焰

质心波动的带状区域由上下分布转化为左右分布。

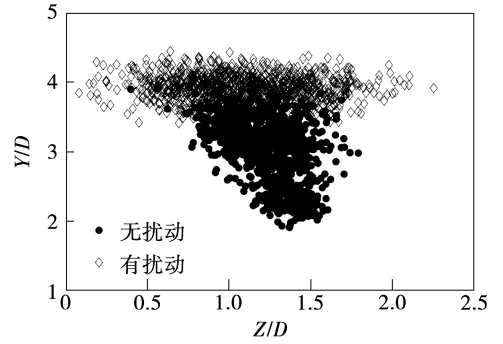


图 5 瞬态再燃火焰质心分布  
Fig. 5 Centroid distribution of instantaneous reburning flame

为了研究再燃火焰质心波动在分布区域的概率分布,在 Z 方向和 Y 方向分别选取  $0.05D$  作为区间单元,描述再燃火焰在各区间单元的概率分布。图 6 为受迫振荡对质心位置波动的影响。可以看出,受迫振荡基本不会改变平均火焰质心在 Z 方向的位置(维持在  $Z/D = 1.2$  左右),但是会使平均火焰质心由  $Y/D = 3.2$  抬升到  $Y/D = 4$ 。

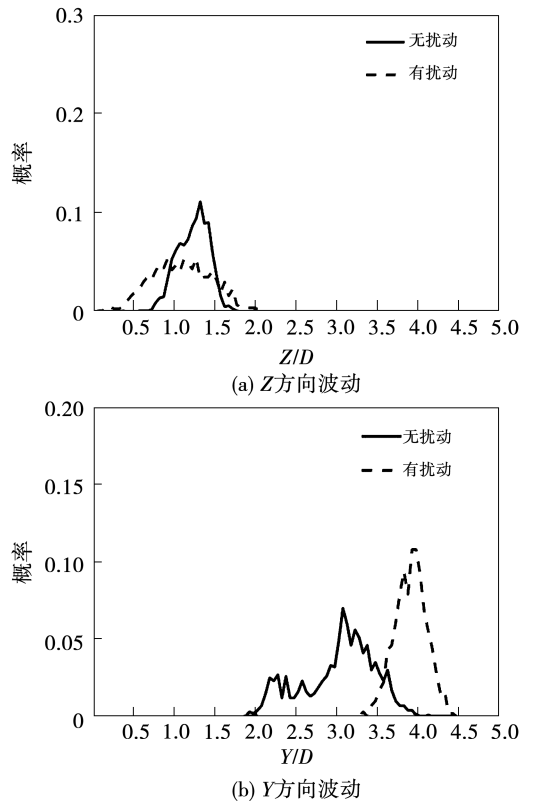


图 6 受迫振荡对再燃火焰波动的影响  
Fig. 6 Effect of forced oscillation on reburning flame fluctuation

此外,受迫振荡会缩小再燃火焰在  $Y$  方向的波动范围,但是会扩大再燃火焰在  $Z$  方向的波动范围。再燃火焰质心位置的左右移动,会改变高温烟气在高温区域的停留时间,这对燃烧室出口的  $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}$  排放产生影响;两个方向波动范围的变化说明入口的扰动传递到燃烧室内,表现为轴向的波动。其他方向的波动在传递过程中受到燃烧室壁面的限制,与其产生碰撞,能量损耗直至完全消失。

图 7 为  $Z$  方向再燃火焰质心位置波动的快速傅里叶变换结果。其中,波动幅值  $Z/D$  为  $Z$  方向瞬态波动值/再燃射流孔直径。从图 7(a) 中可以看出,在无空气入口扰动的情况下,再燃火焰沿  $Z$  方向出现了频率为 201 Hz 的质心波动,该波动主频的产生可能是流场中相干结构的周期性出现导致的;此外,该波动主频的存在,并未使燃烧室产生燃烧振荡,这说明再燃火焰质心的周期性波动可能并不一定是产生燃烧振荡的诱因。从图 7(b) 中可以看出,在振荡情况下,再燃火焰受到空气入口扰动的影响,质心产生了频率为 270 Hz 的波动,该波动主频的产生说明入口扰动会影响再燃火焰的稳定性;此外,扰动的加入会导致再燃火焰原本产生的 201 Hz 波动频率幅值增大,这在一定程度说明受迫振荡下,入口扰动影响到再燃烧区的流场,从而使再燃火焰受到影响,增强原本的扰动,使火焰波动更加明显。

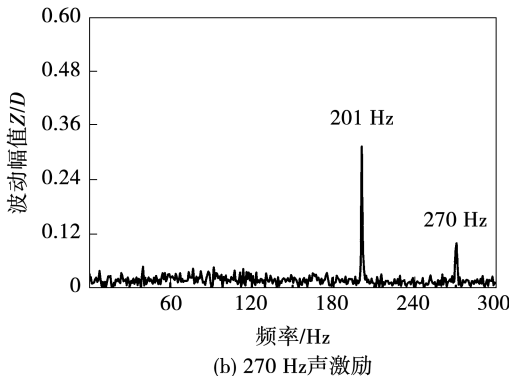
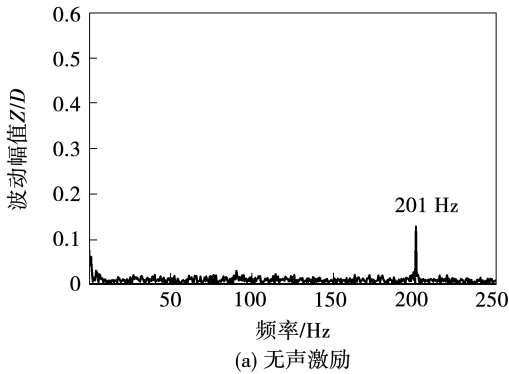


图 7 Z 方向质心波动频谱图

Fig. 7 Spectrogram of Z-directional centroid fluctuation

图 8 为  $Y$  方向再燃火焰质心位置波动快速傅里叶变换结果。其中,波动幅值  $Y/D$  为  $Y$  方向波动值/再燃射流孔直径。在无扰动的情况下,再燃火焰沿  $Y$  方向出现了可能由流场中相干结构周期性出现导致的 201 Hz 质心波动主频。但是与  $Z$  方向的波动相比,该波动主频的幅值明显较低。在振荡情况下,再燃火焰受到入口扰动的影响,质心沿  $Y$  方向产生了频率为 270 Hz 的波动,与  $Z$  方向的波动相比,该主频的幅值明显较低,这也说明空气入口扰动在燃烧室主要传递的是轴向的波动。此外,空气入口扰动的加入对再燃火焰原本在  $Y$  方向的波动幅值无明显影响。

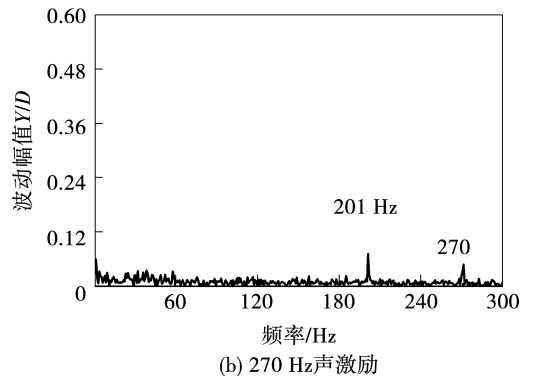
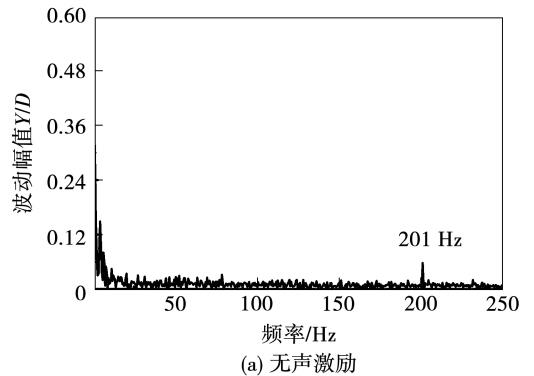


图 8 Y 方向质心波动频谱图

Fig. 8 Spectrogram of Y-directional centroid fluctuation

### 4 结论

通过声激励的方式对主燃空气入口加入扰动,使轴向分级燃烧室处于受迫振荡的燃烧状态,考察轴向分级再燃过程中,燃烧室内声压对主燃空气入口扰动的响应以及再燃火焰特性,主要结论为:

- (1) 燃烧室内振荡主频与声激励频率基本相同;当燃烧室入口加入 110 Hz 的声激励时,燃烧室

内倾向于倍频的响应;当燃烧室入口加入 190 Hz 的声激励时,再燃烧区振荡主频的降低可能是由于压力波动向下游传递过程的损耗导致的;当燃烧室入口加入 270 Hz 的声激励时,相比于另外两个声激励频率,燃烧室内响应更加明显,并且压力波动向下游传递的过程中,再燃烧区压力幅值只有略微的降低。

(2) 与无扰动的稳定燃烧状态相比,有扰动的受迫振荡会使再燃火焰抬升(平均火焰质心由  $Y/D=3.2$  抬升到  $Y/D=4$ ),再燃火焰向火焰中心收缩,火焰质心波动的带状区域由上下分布转化为左右分布。

(3) 入口波动传递到燃烧室内,占据主导的波动为轴向波动。受迫振荡条件下,再燃火焰在  $Y$  方向的波动范围缩小,再燃火焰在  $Z$  方向的波动范围扩大;在无振荡的情况下,再燃火焰沿  $Z$  和  $Y$  方向均出现了频率为 201 Hz 的质心波动,且  $Z$  方向振荡主频幅值更高,在受迫振荡情况下,质心沿  $Z$  和  $Y$  方向均产生频率为 270 Hz 的波动,再燃火焰原本在  $Z$  方向的波动的幅值增大,在  $Y$  方向无明显变化。

## 参考文献:

- [1] WINKLER D, GENG W, ENGELBRECHT G, et al. Staged combustion concept for gas turbine [J]. Journal of the Global Power and Propulsion Society, 2017(1): 184 - 194.
- [2] GOH E, SIRIGNANO M, NAIR V, et al. Modeling of minimum  $NO_x$  in staged-combustion architectures at elevated temperatures [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions. Charlotte, North Carolina, USA: June 26 - 30, 2017. V04AT04A048.
- [3] KARIM H, NATARAJAN J, NARRA V, et al. Staged combustion system for improved emissions operability and flexibility for 7HA class heavy duty gas turbine engine [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions. Charlotte, North Carolina, USA: June 26 - 30, 2017.
- [4] ROMOSER C E, HARPER J, WILSON M B, et al. E-class late fuel staging technology delivers flexibility leap [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2016; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 4B: Combustion, Fuels and Emissions. Seoul, South Korea: June 13 - 17, 2016.
- [5] TANAKA R, KOJI T, RYU M, et al. Development of high efficient 30 MW class gas turbine: the Kawasaki L30A [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012; Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 3: Cycle Innovations; Education; Electric Power; Fans and Blowers; Industrial and Cogeneration. Copenhagen, Denmark: June 11 - 15, 2012; 883 - 889.
- [6] PENNELL D A, BOTHIEN M R, CIANI A, et al. An introduction to the Ansaldo GT36 constant pressure sequential combustor [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 4B: Combustion, Fuels and Emissions. Charlotte, North Carolina, USA: June 26 - 30, 2017.
- [7] 王子叶. 天然气轴向分级预混燃烧特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2019.  
WANG Zi-ye. Study on axial staged premixed combustion characteristics of natural gas [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [8] YI T A, BRH B, JIANG N A, et al. Autoignition-controlled flame initiation and flame stabilization in a reacting jet in crossflow [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(2): 2109 - 2116.
- [9] ROA M, LAMONT W G, MEYER S E, et al. Emission measurements and OH-PLIF of reacting hydrogen jets in vitiated crossflow for stationary gas turbines [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012; Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B. Copenhagen, Denmark: June 11 - 15, 2012; 491 - 498.
- [10] 郑祥龙. 燃料轴向分级燃烧污染物排放及其交叉射流火焰特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2020.  
ZHENG Xiang-long. Study on pollutant emission and cross jet flame characteristics of fuel axial staged combustion [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [11] NI A, POLIFKE W, JOOS F. Ignition delay time modulation as a contribution to thermo-acoustic instability in sequential combustion [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2000; Power for Land, Sea, and Air. Volume 2: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Combustion and Fuels; Oil and Gas Applications; Cycle Innovations. Munich, Germany: May 8 - 11, 2000.
- [12] SCHULZ O, DOLL U, EBI D, et al. Thermoacoustic instability in a sequential combustor: large eddy simulation and experiments [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 5325 - 5332.