

文章编号:1000-8055(2020)08-1655-09

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2020.08.010

声场扰动下预混旋流管状火焰动态响应特性

余 筱¹, 赵晓尧², 马 康¹, 王宁飞¹, 李水清³, 石保禄¹

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081;

2. 中北大学 军民融合协同创新研究院, 太原 030051;

3. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084)

摘 要: 针对预混旋流管状火焰不稳定问题,开展不同空气体积流量和当量比甲烷/空气火焰对轴向声场扰动响应特性的实验研究,揭示了火焰对不同声场频率的动态响应范围,获得了声场扰动下火焰结构、声压、OH^{*}等的变化规律。结果表明:火焰对声场的响应呈现低通滤波特性,高频声场对火焰影响较弱,中、低频声场迫使火焰发生同频振荡,甚至引发熄火现象。通过调整入口体积流量发现低通滤波特性的特征频率和低频熄火频率受混合燃气的体积流量及当量比的影响较小。熄火拉伸率计算表明:相对于高当量比火焰,当量比小于等于 0.65 时火焰抗熄火能力较弱,在中频声场扰动下火焰局部熄火致使火焰抬升。

关 键 词: 旋流燃烧; 管状火焰; 声场扰动; 热声共振; 火焰结构

中图分类号: V219

文献标志码: A

Characteristics of premixed swirling tubular flame under acoustics perturbation

YU Xiao¹, ZHAO Xiaoyao², MA Kang¹, WANG Ningfei¹,
LI Shuiqing³, SHI Baolu¹

(1. School of Aerospace Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Research Institute of Collaborative Innovation of Military-Civilian Integration,
North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Department of Energy and Power Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To investigate the combustion instability of the premixed swirling tubular flame, the responses characteristics of methane/air premixed flames to longitudinal acoustic field was experimentally studied with different air volume flow rates and methane equivalent ratios. The dynamic response range of flame to different acoustic frequencies was revealed, and the variation of flame structure, acoustic pressure and OH^{*} fluctuations under acoustics perturbation were studied. The results showed that the flame presented the low-pass filtering characteristic, demonstrating very weak response to the high acoustic frequency. For

收稿日期:2020-01-23

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91641204); 国家自然科学基金(51676016)

作者简介:余筱(1996—),男,硕士生,主要从事不稳定燃烧实验研究。

通信作者:石保禄(1983—),男,研究员、博士生导师,博士,主要从事旋流燃烧、富氧燃烧、发动机燃烧方面的研究。

E-mail: shibaolu@bit.edu.cn

引用格式:余筱,赵晓尧,马康,等. 声场扰动下预混旋流管状火焰动态响应特性[J]. 航空动力学报,2020,35(8):1655-1663. YU Xiao, ZHAO Xiaoyao, MA Kang, et al. Characteristics of premixed swirling tubular flame under acoustics perturbation[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(8): 1655-1663.

middle and low acoustic frequency, the flame was forced to oscillate at the same frequency, and even quenched at a lower acoustic frequency. In addition, the low-pass filtering behaviors were slightly affected by the flow rate and equivalent ratio. According to the calculated extinction strain rate, near lean extinction limit (e. g., equivalence ratio equaling to 0.65), the flame was much sensitive to middle acoustic frequency owing to low extinction strain rate, generally presenting flame lift-off.

Key words: swirl combustion; tubular flame; acoustics perturbation; thermoacoustic oscillation; flame structure

作为发动机核心动力的提供环节,燃烧系统的高效稳定运行对发动机性能起至关重要作用。在绝大部分军用、民用航空发动机以及燃气轮机中,燃烧室内的燃料混合、火焰稳定等多采用旋流燃烧方式。其往往通过旋流叶片或燃烧器结构设计,使空气或燃料以旋转方式进入燃烧室后快速完成掺混、点火及燃烧过程。其中,作为旋流燃烧的典型代表,旋流叶片式燃烧产生的旋转气流有利于着火回流区强烈的气流混合,对低热值煤层气的着火和稳燃具有很大优势^[1],广泛应用于各类航机及科研研究;另一类则是以 Ishizuka 等^[2]提出的旋流管状火焰技术为代表的切向旋流燃烧,其将燃料和氧化剂通过旋流燃烧器的切向入口注入,在燃烧器壁面导流作用下旋转进入燃烧室内燃烧。这种燃烧方式会形成环形管状火焰,火焰带内部为已燃气体,温度高,热损失少;外部为高密度的低温未燃混合气,使燃烧器壁面与火焰不会直接接触,从而大大提高了燃烧器的使用寿命,且这种方式产生的火焰通常具有热损失低、空气动力学和热力学稳定性优异等特性,因此被广泛应用于工业生产中。

而另一方面,军用航空发动机需要有更宽的工作条件(温度和压力)以满足高机动飞行的要求^[3],民用航空发动机及燃气轮机由于日益严格的空气环保标准迫使发动机采用低污染燃烧室设计^[4]。因此,发动机的工作条件逐渐向贫燃熄火极限靠近。工作在贫燃熄火极限附近的发动机,微小的扰动都有可能使工作区域落在吹熄区域内,再加上其内部高温、高压、高速的复杂流场,使得在来流引发的流动脉动、释热率脉动和压力脉动等复杂作用下,微小的扰动会急速累积放大,严重时甚至会危及工作系统^[5-7]。作为燃烧不稳定的一种主要表现形式,热声不稳定也因此受到了国内外学者的广泛关注。

经研究发现,涡扇发动机内产生的燃烧振荡

主要是由燃烧室内双气流混合流动和热声耦合引起^[8]。You 等^[9]建立了湍流预混火焰对声振荡燃烧响应的解析模型,揭示发动机燃烧室内声波和湍流火焰之间的相互作用规律,发现被包络的火焰往往与声速振荡耦合,导致燃烧振荡的增强。对于旋流系统,Idahosa 等^[10]研究了轴向声场扰动下的非预混火焰,发现火焰的响应呈低通滤波特性,在低频声场作用下能够观察到高强度的热释率振荡。郭志辉等^[11]通过实验研究了贫燃预混旋流火焰的燃烧不稳定性,发现火焰结构在不稳定燃烧状态下发生显著变化,呈现大尺度运动的特点。考虑到热声耦合对燃烧不稳定潜在的加剧作用,对于热声耦合的预测和控制就显得尤为重要。通过理论分析和实验研究,Coats 等^[12]研究了预混火焰在声场扰动下火焰传递函数的增益和相位的滞后。Candel 等^[13-14]基于控制理论方程,推导出了火焰传递函数的计算公式,这为热声不稳定的预测与控制提供了理论依据。

上述旋流不稳定燃烧的研究主要针对旋片式旋流,针对切向旋流燃烧不稳定的研究相对缺乏。在切向旋流燃烧中,火焰通常被层流化,更多表现出层流火焰特性,不同于旋片式旋流中的湍流燃烧。当前已在实验过程中多次观察到了切向旋流火焰不稳定的现象。在大流量的丙烷/空气预混燃烧中^[15],大功率条件下探测到了火焰高频振荡,其振荡模式为高频周向及径向声学共振。石保禄等^[16-19]在甲烷、丙烷以及氢气的富氧燃烧实验中发现,高氧气摩尔分数下旋流管状火焰的振荡模式通常为轴向声学共振,发生这种振荡模式转变的原因推测是由于燃烧内掺混不均所致,并与燃烧器入口尺寸具有紧密联系。为进一步探究旋流管状火焰不稳定机制,拓宽其工业应用领域,本文围绕预混旋流管状火焰(下文简称为火焰)的热声不稳定开展实验研究,在轴向加入不同频率的声场扰动,探究了不同体积流量(下文简称为流量)、当量比的火焰对声场的动态响应特性。

1 实验装置及测试系统

为简化掺混不均匀带来的影响,本文采用预混的旋流火焰开展实验,实验及测试装置如图 1 所示。A-A 截面为切向旋流燃烧器的结构示意图,燃烧器直径 $D=24\text{ mm}$,切向入口宽度 $W=2.5\text{ mm}$,切向入口高度 $l=12\text{ mm}$,甲烷和空气按

一定比例混合后均匀通入四个切向入口。在燃烧器的上方为长度 $L=150\text{ mm}$ 的石英玻璃管,下方接入了声场发生装置。为了使声场装置内部的气流更加均匀一致,在扬声器上方 65 mm 处加入一块厚度为 12 mm 、孔隙密度为 10 ppi (10 pores per inch ,即约 2.54 mm 长度上平均孔数为 1)的多孔隔板。

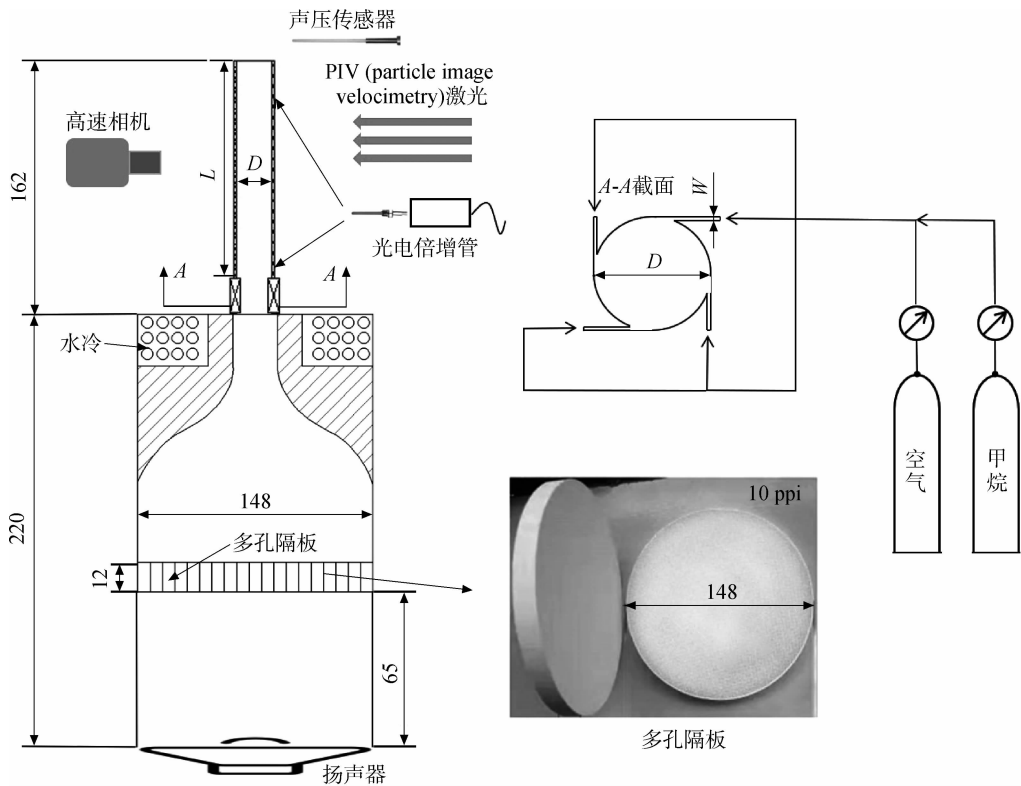


图 1 实验装置及测试系统(单位:mm)

Fig.1 Experimental apparatus and measurement system (unit:mm)

连续型信号发生器(JUNTEK JDS-2900)产生特定频率的正弦信号,经过声频功率放大器(SAST SA-9006)将信号的功率放大后输入扬声器($4\text{ }\Omega$ 额定电阻, $20\sim 20\text{ kHz}$ 全频),产生同频的声场波动,本文实验中所用扬声器功率均为 10 W 。同时,为了确保输入正弦信号的完整性,将扬声器电源正负极处的信号接入高频示波器进行实时监控。通过高速相机(VEO 410L)拍摄石英玻璃管内的火焰,观察管状火焰在声场作用下的响应。高速相机的实时图形采集软件是 PCC2.8,采样帧率设定为 1000 Hz 。声压传感器(BSWA MPA416)被安置在距离石英玻璃管出口 10 cm 处,由采集卡(cDAQ-9171)采集声场数据后通过 LabView 编程记录和处理声压数据。光电信号测试系统由光纤传感器、光栅光谱仪(71SW303)、光电倍增管(71D101-CR131)、高压

电源($71\text{P}1250$)、高频示波器(PINTECH MDO704, 100 MHz , 1 Gs/s)及光谱采集系统软件组成,目的是观测能表征火焰释热率的 OH^* 自由基瞬态变化。直径为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的示踪粒子 TiO_2 随切向混合气体通入燃烧室中以进行速度场测量,高频连续激光器(MGL-W-532 nm-18 W)从石英玻璃管侧面打入功率为 1 W 的激光,在垂直于激光光路的侧面使用高速相机记录实验数据,高速相机帧率为 $10\text{ }000\text{ Hz}$ 。由于实验过程中火焰会沿轴向同时向上和向下传播,将使得下方的声场装置逐渐增温,在热传导和对流的作用下,密闭容积内的气体温度也会升高,从而损毁扬声器等非耐高温实验仪器。因此,在密闭容器的肩颈部设置自制水冷系统,用于降低密闭容器壳体的温度,水循环的速率在 $0\sim 8\text{ m/s}$ 之间,实验时根据实际情况调节水流速率。

2 结果和分析

2.1 无声场扰动火焰结构

由于在实验装置中拆除了前期^[16-19]切向旋流管状火焰燃烧器前端的石英观察窗,并加入了声场相关的装置,燃烧系统的固有频率及传热特性发生了变化,因此有必要考察无声场作用下的旋流燃烧特性,如火焰结构、燃烧极限等。本文以空气流量 $q_{v, \text{air}}=35 \text{ L/min}$ 的火焰为例,获得了当量比 $\Phi=0.65, 0.8, 1.0$ 的火焰结构,如图 2 所示。

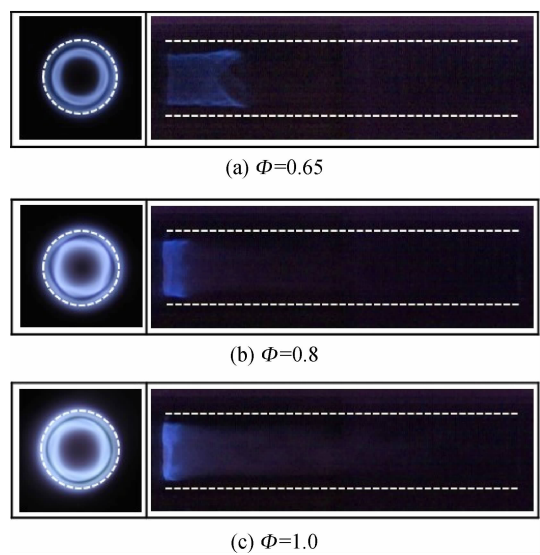


图 2 无声场扰动、 $\Phi=0.65, 0.8, 1.0$ 时,预混旋流火焰结构图

Fig. 2 Premixed swirling flame structures under $\Phi=0.65, 0.8, 1.0$ without acoustics perturbation

图 2 中左侧火焰结构图中内圈明亮的圆环为层流火焰锋面,其内部为高温的燃气,外部为未燃气体。由于声场装置的遮挡,只能自石英玻璃管出口向下拍摄得到左侧的横截面火焰结构图。三种当量比条件下均观察到淡蓝色的稳定的管状层流火焰。当量比 $\Phi=1.0$ 时火焰最亮,且火焰直径最大,长度最短,这是由于火焰锋面总是稳定在层流燃烧速度与未燃气体径向速度相平衡的位置,而 $\Phi=1.0$ 的火焰层流燃烧速度最大,因而火焰直径最大^[20]。可见,该装置在不加声场的条件下仍保有良好的旋流管状火焰的层流燃烧特性。实验测试表明无声场时的贫燃熄火极限约为 $\Phi=0.6$,在 $\Phi=0.6$ 至 $\Phi=1.1$ 之间旋流管状火焰一直稳定于切向燃烧器入口,当 Φ 进一步增加时,预混气的有效 Lewis 数增加(其值大于 1),在管壁处的热损失增大,因而火焰将出现抬升直至吹

出管口。

2.2 火焰对声场的动态响应

首先,选择当量比 $\Phi=0.8$ 的甲烷/空气预混气体进行实验,观察不同声场频率 f_0 下火焰对声场的动态响应特性,结果如图 3 所示。根据实时测量的火焰结构、 OH^* 信号及火焰场声压脉动 (Δp) 特征,将预混火焰对声场脉动的响应划分了不同区域。具体是通过高速相机每隔 10 Hz 拍一段火焰结构图,直至火焰有明显变化为止。在变化点附近缩小声场频率间隔细化测量,记录此时的声场频率作为区域分界线,再辅以 OH^* 信号和声压脉动数据加以验证,并根据其幅值进一步确定各个区域的特征(强/弱 OH^* 振荡和高/低 Δp)。此处, Δp 为不同声场频率下热声耦合后的瞬时声压除以对应声场频率下纯声场的声压幅值,用以表征火焰场的声压增益。理想情况下,如果曲线的最大幅值等于 1,则表明声压没有发生增益。同时,为说明火焰的周期性脉动特征,借助高速摄影获得了空气流量 $q_{v, \text{air}}=35 \text{ L/min}$ 火焰在声场频率 $f_0=250, 180, 100, 60 \text{ Hz}$ 作用下一个振荡周期 (T) 内火焰结构演化图,如图 4 所示。由于此时火焰附着在燃烧器根部,所以火焰结构图只显示管中部至管底部分。

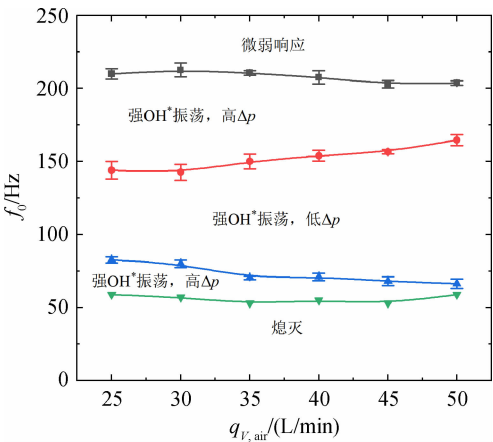


图 3 旋流预混火焰对不同声场频率的响应特性 ($\Phi=0.8$)

Fig. 3 Responses of premixed swirling flame under different acoustic frequencies ($\Phi=0.8$)

火焰对声场的响应相图(图 3)表明:高频声场(约 210 Hz 以上)作用下,火焰的响应极其微弱,中、低频声场对火焰影响较大。图 4 中 250 Hz 声场扰动下,火焰在一个周期内观察不到明显的变化,此时火焰处于高频声场作用下的微弱响应区域。 $f_0=150 \sim 210 \text{ Hz}$ 附近为强振荡区域,火

焰对声场响应强烈并伴随着较大的噪声, Δp 脉动幅值增大。随着燃烧功率的增加, 该区域逐渐变窄。 $f_0=180\text{ Hz}$ 声场扰动下的火焰结构图显示, 火焰受声场作用沿着轴向上下振动, 火焰有明显的周期性变化, 显示了火焰的受迫振荡行为。

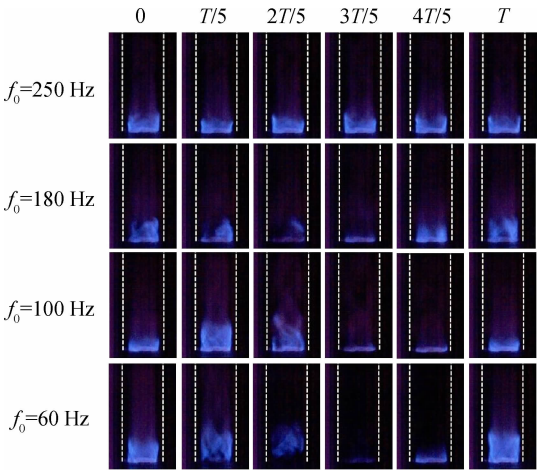


图 4 振荡周期内火焰结构演化图($\Phi=0.8$)
Fig. 4 Evolution of flame structure in a perturbation cycle ($\Phi=0.8$)

$f_0=80\sim150\text{ Hz}$ 附近仍为强振荡区域, 但是 Δp 脉动减弱, 随着燃烧功率的增加, 该区域逐渐拓宽。与 $f_0=180\text{ Hz}$ 声场下的火焰结构相似, $f_0=100\text{ Hz}$ 下的火焰亦呈现轴向周期性振荡, 但热声耦合后 Δp 脉动小。继续降低声场频率, 火焰在 $f_0=50\sim80\text{ Hz}$ 再次表现出大幅 Δp 脉动的强振荡, 60 Hz 下的火焰已经不能完全稳定在燃烧器根部, 此时的火焰离熄灭区域较近, 火焰处于极不稳定的状态。声场频率低于熄火频率时, 声场迫使火焰熄灭, 其受流量的影响较小, 基本稳定在 50 Hz 左右。为进一步说明声场脉动特性, 图 5

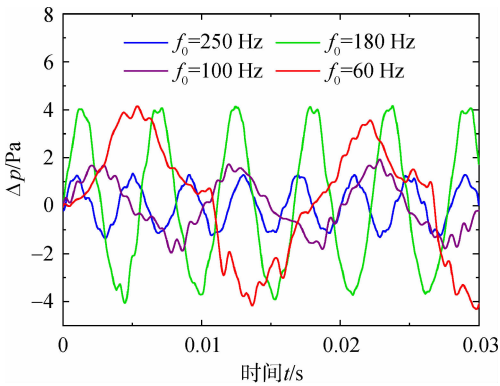


图 5 不同声场频率下 Δp - t 曲线($\Phi=0.8$)
Fig. 5 Δp - t curves under different acoustic frequencies ($\Phi=0.8$)

给出了不同声场频率下的 Δp - t 曲线。其中, 声场频率为 250 Hz 时, Δp 幅值接近于 1 Pa , 此时声压几乎没有发生增益; 声场频率 100 Hz 时, Δp 幅值在 1.5 Pa 左右, 声压有略微的增益; 声场频率为 60 Hz 及 180 Hz 时, Δp 幅值在 4 Pa 左右, 声压增益明显较大。反映在实验现象中则是 60 Hz 及 180 Hz 声场扰动下的噪声较大, 而 100 Hz 及 250 Hz 的噪声较小。

在距离石英玻璃管 10 mm 处通过光纤传感器和光栅光谱仪测量不同声场频率下火焰的 OH^* 信号用以表征火焰的热释率脉动特征^[21-22], 以确认中、低频扰动下火焰振荡的幅度与周期性。光谱仪将 OH^* 脉动转化为电信号后, 由示波器显示并存储数据。将图 5 中 Δp 和采集的 OH^* 数据作快速傅里叶变换分别得到 Δp 和 OH^* 频谱图, 如图 6 和图 7 所示。其中, OH^* 数据以无声场扰动的电压幅值(ΔU)为基准做归一化处理。

图 7 中 $f_0=250\text{ Hz}$ 时, OH^* 脉动的低频杂波较多, 振幅与主频幅值相近, 说明此时火焰对声

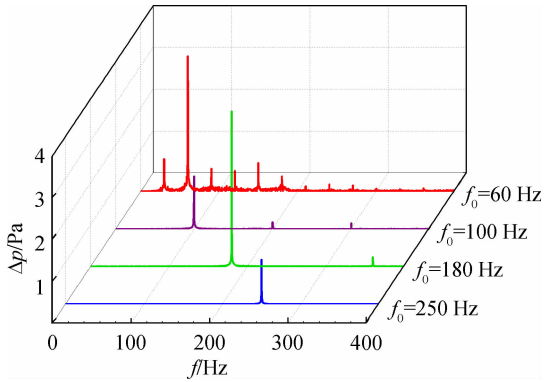


图 6 声压脉动频谱图($\Phi=0.8$)
Fig. 6 Acoustic pressure fluctuation spectra ($\Phi=0.8$)

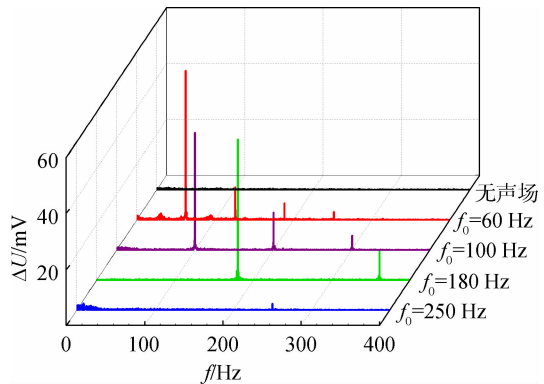


图 7 OH^* 脉动频谱图($\Phi=0.8$)
Fig. 7 OH^* fluctuation spectra ($\Phi=0.8$)

场响应较弱,热声未耦合;在其他三个声场频率(180、100、60 Hz)下,OH^{*}脉动均有明显的主频,其脉动频率 f 与声场频率一致,且幅值急剧增加,同时伴有较高幅值的倍频振荡和较低幅值的杂波,这说明此时火焰对声场响应强烈,热声耦合程度高,火焰在声场作用下发生同频受迫振荡。60 Hz 声场扰动下,声压和 OH^{*}脉动均在 30 Hz 和 90 Hz 附近有杂波脉动,这是由于此时火焰濒临熄灭,无法完全稳定在燃烧器底部,不稳定的火焰产生了不同频率的微振。

综上所述, $\Phi=0.8$ 时,火焰对声场的响应呈现低通滤波特性,特征频率约为 210 Hz。声场频率高于此值,火焰几乎不受影响;声场频率低于 210 Hz,火焰受声场扰动发生同频受迫振荡,继续降低声场频率甚至会导致火焰熄灭,但低通滤波特性的特征频率和火焰的熄火频率(50 Hz 左右)受流量的影响不大。

2.3 参数化分析

为了进一步探究火焰对声场的动态响应特性,选取较低和较高燃烧功率的当量比 $\Phi=0.65$ 和 $\Phi=1.0$ 为实验条件,结果如图 8 所示。相比于图 3,仍存在高频(210 Hz 以上)的微弱响应区域和低频(约 50 Hz 以下)的熄火区域,不同当量比下这两个区域的变化不明显;低当量比下,如 $\Phi=0.65$,火焰在 $f_0=150\sim 210$ Hz 附近的强 OH^{*}振荡区转为抬升和吹熄区域,高当量比下仍为附着于燃烧器根部的强 OH^{*}振荡区;此外, $f_0=80\sim 150$ Hz 附近的强 OH^{*}振荡区在低当量比下转为弱 OH^{*}振荡区,在高当量比下未发生振荡模式的转变。

在中、低频声场扰动下,不同当量比火焰结构均呈现周期性变化,如图 9 给出了 $f_0=180,100$

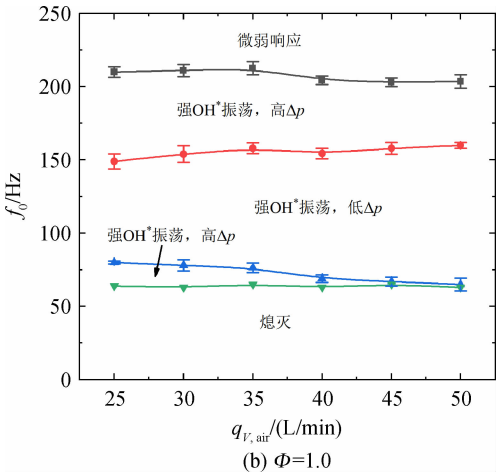


图 8 $\Phi=0.65,1.0$ 火焰对声场的动态响应相图
Fig. 8 Dynamic response of flame to acoustics field under $\Phi=0.65,1.0$

Hz 时, $\Phi=0.65,1.0$ 的火焰在一个周期内的变化图。其中,图 9(a)为 180 Hz 声场作用下的火焰结构图。 $\Phi=0.65$,火焰脱离燃烧器根部,在石英玻璃管上半段燃烧,火焰结构图只显示管中部至管口部分。此时 OH^{*}脉动(图 10)的杂波较多,主频幅值较低。 $\Phi=1.0$ 时,火焰结构图与 $\Phi=0.8$ 的类似,火焰在声场作用下变化明显,OH^{*}脉动的频谱图也显示出此时声场迫使火焰作同频振荡。图 9(b)为 100 Hz 声场作用下的火焰结构

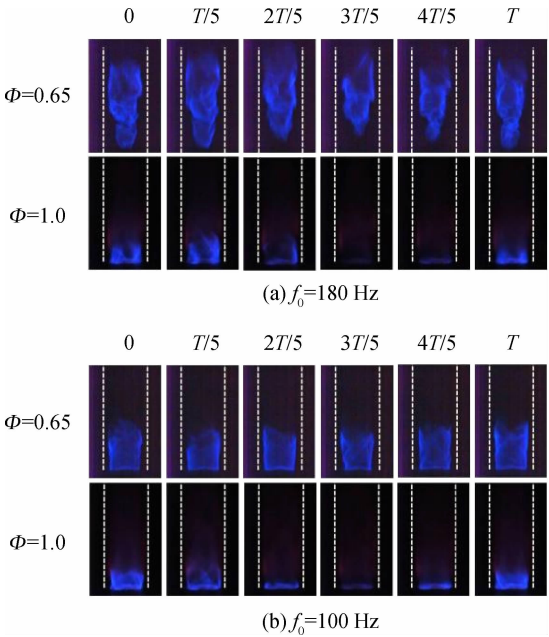
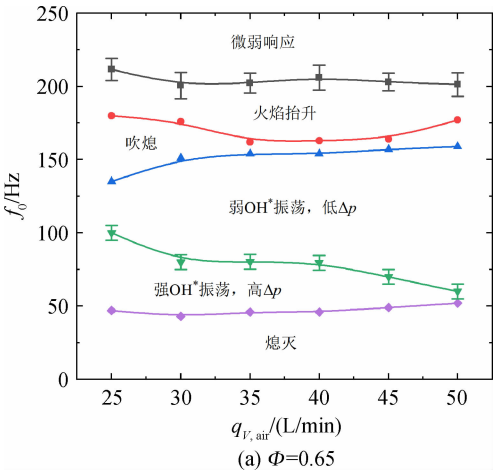


图 9 不同声场频率下 $\Phi=0.65,1.0$ 火焰的周期性变化规律($q_{v,air}=35$ L/min)
Fig. 9 Cyclic variation of flame structure with $\Phi=0.65,1.0$ under different acoustic frequencies ($q_{v,air}=35$ L/min)



图。 $\Phi=0.65$,火焰在一个周期内变化较弱, OH^* 脉动虽有主频但幅值较低,属于弱 OH^* 振荡模式,而 $\Phi=1.0$ 的火焰振荡模式为强 OH^* 振荡。贫燃熄火极限附近的火焰在声场作用下呈现出更多不同的响应特性。

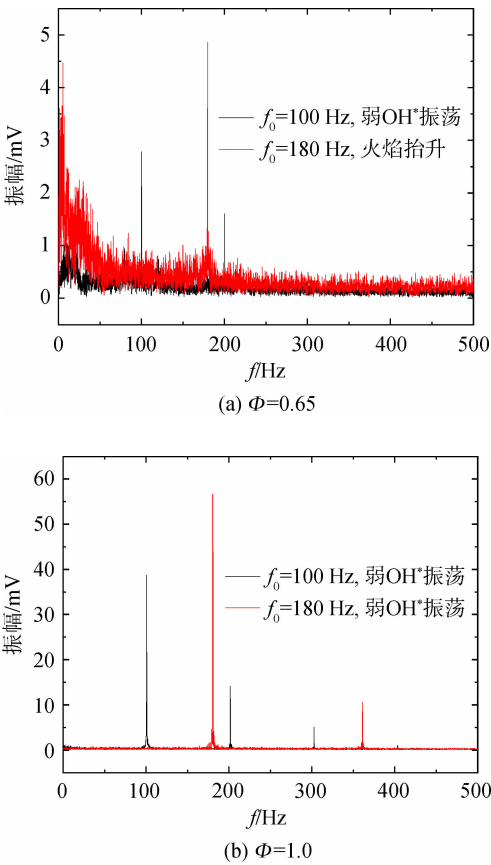


图 10 OH^* 脉动频谱图($\Phi=0.65,1.0$)
Fig. 10 OH^* fluctuation spectra ($\Phi=0.65,1.0$)

为进一步分析火焰响应特性,对 $\Phi=0.65$ 、 $f_0=180\text{ Hz}$ 的抬升火焰开展速度场测试。通过 PIV 实验获得抬升火焰上游的速度场,结合火焰中的 OH^* 信号脉动值,可近似获得火焰传递函数^[13-14]。PIV 实验中所用的高速相机帧率为 $10\,000\text{ Hz}$,取其中的 500 张数据做流场分析,得出火焰上游某一点速度随时间的变化规律,根据火焰传递函数公式

$$|F(\omega)| = \frac{|\hat{Q}/\bar{Q}|}{|\hat{u}/\bar{u}|}$$

式中 $\hat{Q}/\bar{Q}$ 为火焰的相对热释率,由 OH^* 信号测量得到; $\hat{u}/\bar{u}$ 为火焰的相对速度脉动,由 PIV 实验得到,绝对值表示只探究火焰传递函数的幅值,即不考虑相位差。利用 Originlab 软件开展 $\hat{Q}/\bar{Q}$ 和 $\hat{u}/\bar{u}$ 比值的快速傅里叶变换便可得到图 11 中

的曲线图。传递函数明显地反映出火焰对声场响应的低通滤波特性,传递函数幅值在高频声场作用下很低,此时火焰对声场响应不明显;中、低频时传递函数幅值有所增加,在 160 Hz 附近有波峰,结合相图来看,此时的火焰正处于吹熄区域; 90 Hz 附近曲线处于波谷,此时的火焰正处于弱 OH^* 振荡区域,继续降低脉动频率,火焰对声场的响应逐渐加剧直至熄灭。

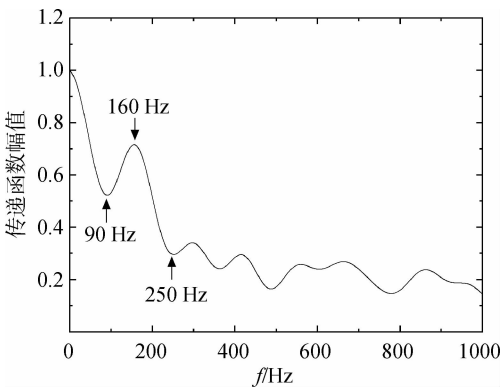


图 11 贫燃抬升火焰传递函数($\Phi=0.65$)
Fig. 11 Flame transfer function for the lean lift-off flame ($\Phi=0.65$)

为了探究低当量比时火焰发生的抬升现象,本文采用 Chemkin 拉伸火焰模型(反应机理采用 GRI Mech 3.0)计算了无声场条件下的一维预混对冲火焰的熄火拉伸率^[23]。通过计算可以得到特定当量比下火焰拉伸率与温度的关系曲线,根据曲线中转折点所对应的拉伸率确定此时的熄火拉伸率。图 12 中转折点(曲线与垂直虚线相切的点)对应的纵坐标即为当量比 $\Phi=0.8$ 时火焰的熄火拉伸率。同理,可计算出其他当量比下的熄火拉伸率,其结果与 Law 等^[24] 的实验结果较为吻合,如图 13 所示。

根据计算结果, $\Phi=0.65$ 时火焰的熄火拉伸率约为 320 s^{-1} 。与对冲火焰不同,该旋流火焰除受到轴向拉伸的影响外,还受径向曲率的影响,其贫燃熄火拉伸率将小于对冲火焰的熄火拉伸率^[25]。因而,在 $f_0=150\sim 210\text{ Hz}$ 声场扰动下,火焰将被拉伸,拉伸率过大的局部区域出现熄火,无法稳定在燃烧器根部,出现抬升和吹熄现象。 $\Phi=0.8$ 及 $\Phi=1.0$ 的熄火拉伸率分别为 $1\,370\text{ s}^{-1}$ 和 $1\,830\text{ s}^{-1}$,远高于有效的声场频率($f_0=60\sim 210\text{ Hz}$)。由于火焰的振荡模式为同频受迫振荡,火焰在扰动下的拉伸率远低于熄火拉伸率,因此不会出现局部熄火现象,火焰未出现抬升和吹熄。

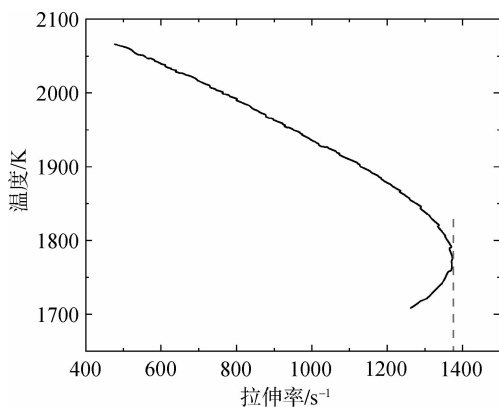
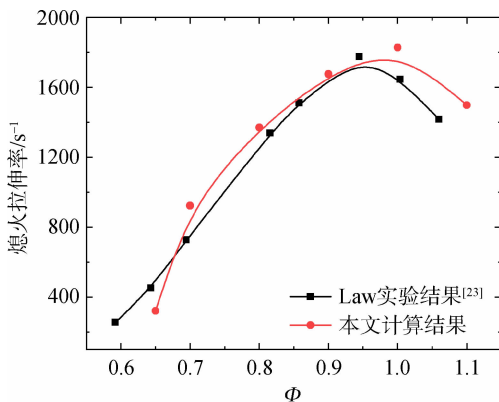
图12 火焰拉伸率与温度关系曲线($\Phi=0.8$)Fig. 12 Relationship between strain rate and temperature ($\Phi=0.8$)

图13 不同当量比甲烷/空气预混火焰熄火拉伸率

Fig. 13 Extinction strain rate of methane/air premixed flame under different equivalent ratios

3 结 论

为分析切向旋流燃烧不稳定性,本文在旋流管状火焰场中引入轴向声场扰动,开展了不同声场扰动下甲烷/空气预混燃烧的实验研究,获得了火焰对声场的动态响应随声场频率 f_0 、空气流量 $q_{v, \text{air}}$ 和当量比 Φ 的变化规律,具体结论如下:

1) 火焰对声场的响应呈现低通滤波特性,高频声场作用下火焰变化不明显,中、低频声场对火焰影响较大,迫使火焰发生同频振荡以及火焰抬升、熄火等。低通滤波的特征频率约为 210 Hz,低频熄火频率约为 50 Hz,两者几乎不受预混气流量和当量比的影响。

2) 中、低频同频受迫振荡中,不同当量比下的火焰对声场呈现出不同的响应特性。低当量比下火焰有抬升和吹熄现象,当量比较高时火焰不再抬升,转为附着于燃烧器根部的强 OH^* 振荡。

通过对熄火拉伸率的计算分析可知,低当量比下火焰的熄火拉伸率低,声场扰动迫使火焰局部熄火,火焰抬升;高当量比下火焰的熄火拉伸率高、抗熄火能力强,火焰不再抬升。

参考文献:

- [1] 闫云飞,张力,张代生,等.旋流片旋流角度对低热值煤层气燃烧特性的影响[J].煤炭学报,2011,36(9):1490-1494.
YAN Yunfei, ZHANG Li, ZHANG Daisheng, et al. Influence of swirl angle of swirling slice on combustion characteristics of low heat value coal-bed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1490-1494. (in Chinese)
- [2] ISHIZUKA S, HAGIWARA R, SUZUKI M, et al. Combustion characteristics of a tubular flame burner [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 2000, 66(652): 3226-3232
- [3] 陈懋章.航空发动机技术的发展[J].科学中国人,2015(10):10-19.
- [4] 刘大响,程荣辉.世界航空动力技术的现状及发展动向[J].北京航空航天大学学报,2002,28(5):490-496.
LIU Daxiang, CHENG Ronghui. Current status and development direction of aircraft power technology in the world [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 490-496. (in Chinese)
- [5] 张澄宇,李磊,孙晓峰.加力燃烧室热声振荡纵向传播特性及控制[J].航空动力学报,2010,25(2):278-283.
ZHANG Chengyu, LI Lei, SUN Xiaofeng. Thermoacoustic oscillating calculation of longitudinal equivalence frequency and stability in aero-engine afterburner[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 278-283. (in Chinese)
- [6] POURSAEIDI E, ARABLU M, MEYMANDI M A Y, et al. Investigation of choking and combustion products' swirling frequency effects on gas turbine compressor blade fractures[J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 135(6): 061203. 1-061203. 6.
- [7] LIEUWEN T, TORRES H, JOHNSON C, et al. A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors[R]. ASME Paper 99-GT-003, 1999.
- [8] MACQUISTEN M A. Combustion oscillations in a twin-stream after burner[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 188(4): 545-560.
- [9] YOU D, HUANG Y, YANG V. A generalized model of acoustic response of turbulent premixed flame and its application to gas-turbine combustion instability analysis[J]. Combustion Science and Technology, 2005, 177(5/6): 1109-1150.
- [10] IDAHOSA U, SAHA A, XU C, et al. Non-premixed acoustically perturbed swirling flame dynamics [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(9): 1800-1814.
- [11] 郭志辉,王帅,李磊,等.贫燃预混旋流火焰燃烧不稳定性的实验[J].航空动力学报,2009,24(12):2637-2642.

GUO Zhihui, WANG Shuai, LI Lei, et al. Experimental study on combustion instability of lean premixed swirl flame[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24 (12): 2637-2642. (in Chinese)

[12] COATS C M, CHANG Z, WILLIAMS P D. Excitation of thermoacoustic oscillations by small premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(6): 1037-1051.

[13] CANDEL S, DUROX D, SCHULLER T, et al. Progress and challenges in swirling flame dynamics[J]. Comptes Rendus Mécanique, 2012, 340(11/12): 758-768.

[14] CANDEL S, DUROX D, SCHULLER T, et al. Dynamics of swirling flames[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1): 147-173.

[15] SHIMOKURI D, SHIRAGA Y, ISHII K, et al. An experimental study on the high frequency oscillatory combustion in tubular flame burners[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(8): 2025-2037.

[16] SHI B, LI B, ZHAO X, et al. Rapidly mixed combustion of hydrogen/oxygen diluted by N₂ and CO₂ in a tubular flame combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 20018, 31(43): 14806-14815.

[17] SHI B, HU J, ISHIZUKA S. Carbon dioxide diluted methane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(2): 420-430.

[18] LI B, SHI B, ZHAO X, et al. Oxy-fuel combustion of methane in a swirl tubular flame burner under various oxygen contents: operation limits and combustion instability[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 90, 115-124.

[19] SHI B, PENG W, LI B, et al. CO₂ diluted propane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36 (3): 4261-4268.

[20] 彭维康, 赵晓尧, 初庆钊, 等. 基于急速混合管状火焰技术的丙烷富氧燃烧[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 76-84.

PENG Weikang, ZHAO Xiaoyao, CHU Qingzhao, et al. Oxy-fuel combustion of propane in a rapidly mixed tubular flame burner[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32 (11): 76-84. (in Chinese)

[21] 何磊, 龚岩, 郭庆华, 等. 甲烷/氧气层流同轴射流扩散火焰 OH* 自由基的数值研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38 (3): 685-691.

HE Lei, GONG Yan, GUO Qinghua, et al. Numerical study on OH* radicals in the laminar methane/oxygen co-flowing jet diffusion flame[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 685-691. (in Chinese)

[22] 章晓梅, 夏允庆, 单洪彬, 等. 低频振荡燃烧研究综述[J]. 推进技术, 1996, 17(1): 47-53.

ZHANG Xiaomei, XIA Yunqing, SHAN Hongbin, et al. Summarization of low-frequency oscillatory combustion study[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(1): 47-53. (in Chinese)

[23] CHO E S, CHUNG S H, OH T K. Local karlovitz numbers at extinction for various fuels in counterflow premixed flames[J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178 (9): 1559-1584.

[24] LAW C K, ZHU D L, YU G. Propagation and extinction of stretched premixed flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1988, 21(1): 1419-1426.

[25] CHEN Z, JU Y. Combined effects of curvature, radiation, and stretch on the extinction of premixed tubular flames [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25/26): 6118-6125.

(编辑:陈 越)