

多孔介质稳焰器对旋流火焰振荡燃烧特性影响的试验研究

金明, 陆羽笛, 葛冰, 臧述升

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要:为研究多孔介质稳焰器孔密度变化对贫预混旋流火焰振荡燃烧特性的影响,通过光电倍增管测量全局火焰热释放率,采用双麦克风方法测量旋流器入口速度脉动,获得不同孔密度多孔介质稳焰器火焰传递函数;并通过高速相机测量不同孔密度多孔介质稳焰器振荡火焰结构的变化。试验结果表明:多孔介质能够改变燃烧室声模态,有效抑制燃烧振荡,但孔密度对受迫燃烧火焰热释放率和压力脉动影响具有非线性;高频入口扰动对火焰响应特性影响较弱,火焰受迫响应呈现低通滤波特性;火焰传递函数增益峰值对应入口激励频率存在差异,但相位分布斜率基本一致;多孔介质导致火焰向稳焰器中心轴线聚拢,相干结构更加明显;宽频扰动范围内的火焰张角分布趋势与火焰传递函数增益曲线的分布趋势相反。

关键词:多孔介质;受迫燃烧;火焰传递函数;火焰结构

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.12.014

[引用本文格式]金明,陆羽笛,葛冰,等.多孔介质稳焰器对旋流火焰振荡燃烧特性影响的试验研究[J].热能动力工程,2022,37(12):110-117. JIN Ming, LU Yu-di, GE Bing, et al. Experimental study on the effect of porous medium burner on oscillating combustion characteristics of swirl flame[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(12):110-117.

Experimental Study on the Effect of Porous Medium Burner on Oscillating Combustion Characteristics of Swirl Flame

JIN Ming, LU Yu-di, GE Bing, ZANG Shu-sheng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code:200240)

Abstract: In order to study the effect of pore density variation of porous medium burners on the forced response characteristics of lean premixed swirl combustion flames, the global flame heat release rate was measured by a photomultiplier tube. The two-microphone method was used to measure the inlet velocity pulsation of the nozzle, and the flame transfer function of the porous medium burner with different pore densities was obtained. The changes of the oscillating flame structure of the porous medium burner with different pore densities were measured by a high speed camera. The experimental results indicate the porous medium can change the acoustic mode of combustor and inhibit combustion oscillation effectively, while the effect of pore density on the forced flame heat release rate and pressure pulse is nonlinear; the high-frequency inlet disturbance has a weaker effect on the flame response characteristics, and the forced flame response exhibits low-pass filtering characteristics; the inlet excitation frequencies corresponding to peak value of the flame transfer function gain are different, but the phase distribution slopes are basically the same; the porous medium causes the flame to converge toward the central axis of the burner, and the

收稿日期:2022-04-30; 修订日期:2022-06-15

基金项目:国家自然科学基金(51876123); 国家科技重大专项(J2019-III-0012-0055)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51876123); National Science and Technology Major Project(J2019-III-0012-0055)

作者简介:金明(1997-),男,安徽亳州人,上海交通大学博士研究生。

coherent structure in the flame becomes more obvious. The trend of flame angle distribution is exactly opposite to that of flame transfer function gain curve in the range of broadband disturbance.

Key words: porous medium, forced combustion, flame transfer function, flame structure

引 言

热声耦合振荡燃烧问题是燃烧学领域的前沿问题,也是现代燃气轮机低排放燃烧室最难解决的问题之一。燃烧振荡外在表现是系统声场与非稳态热释放耦合导致的周期性的高振幅的压力脉动,声能增长率控制方程表明热声耦合振荡燃烧的本质是热能向声能的转换,其实现方式是通过自激振荡的闭环反馈机制:首先燃烧室内声压或速度脉动会通过不稳定驱动机理导致燃烧室内热释放脉动,热释放脉动又会对燃烧室内的声压和速度脉动形成激励,继而形成正反馈,使得燃烧振荡达到极限环状态^[1]。

现代燃气轮机低排放燃烧室中,旋流器入口速度脉动或燃料与空气预混气的当量比出现周期性波动都会引发燃烧火焰热释放率的脉动;旋转射流、漩渦脱落、火焰间的相互干涉作用以及火焰不稳定拉伸作用和剪切作用都会对火焰热释放波动产生一定的影响^[2-6]。针对激发燃烧振荡的因素以及燃烧振荡特性,可以采取主动控制(Active control, AC)和被动控制(Passive control, PC)措施对燃烧室热声振荡进行抑制^[7-8]。目前,工业燃气轮机常采用被动控制方法,被动控制是在燃烧室中安装阻尼装置,如多孔介质材料等,达到抑制燃烧振荡的效果。Agrawal 等人^[9]最早在 2010 年的时候提出了一种在燃烧室燃烧反应区加装多孔介质材料(Porous insert media, PIM)从而削弱燃烧噪声的被动控制方法,该方法被证明能够有效抑制贫预混燃烧室的燃烧振荡^[10-12]。研究表明,多孔介质能否抑制振荡燃烧取决于多孔介质的几何参数。

由于燃烧室内压力脉动导致燃烧器入口速度或者当量比脉动,火焰传递函数可以量化火焰热释放对入口速度或者当量比脉动的响应特性,对揭示燃烧振荡的诱发机理至关重要。火焰传递函数可以通过理论计算、试验测量或数值模拟等方式得

到^[13-15]。但是,由于理论计算和数值模拟难以捕捉复杂流场与热释放之间的干涉作用,通常还是采用试验方法获得火焰传递函数,并将其直接应用于燃气轮机燃烧室热声网络模型中。基于火焰锋面演变动力学分析的预测表明,除未受迫原始火焰的基本形状,即锥形、倒楔形、V 形火焰等,火焰传递函数还取决于火焰角度和火焰长度,传递函数的增益对锥形火焰的火焰角不敏感,但对小火焰角 V 型火焰非常敏感,即增益随着火焰角的减小而增加;火焰长度与宽度的比率会影响传递函数非线性度^[16-17]。

郭志辉等人^[18]试验研究贫燃预混旋流火焰的燃烧不稳定性,发现火焰结构在燃烧振荡工况下发生显著变化。杨甫江等人^[19]研究了值班稳定器燃烧室值班火焰的火焰传递函数,发现值班燃料增加,值班级火焰从稳定转变为不稳定状态;不同当量比条件下火焰传递函数的相位与频率均呈现出线性关系。余筱等人^[20]试验研究了声场扰动下预混旋流管状火焰动态响应特性,结果表明,火焰对声场的响应呈现低通滤波特性。于丹等人^[21]研究了贫燃预混燃烧室中的分布式火焰传递函数,发现火焰传递函数的相位所对应的迟滞时间主要包括扰动从燃料喷注点传播至头部所需的输运时间、靠近头部出口突扩面处涡环形成的迟滞时间和涡环输运至火焰锋面的输运时间。

现阶段虽然发现多孔介质能够有效抑制贫预混燃烧振荡,但针对多孔介质对火焰动态响应特性和热释放的影响机理缺乏进一步研究。本文采用试验方法,分析在喷嘴入口上游施加不同频率的轴向声扰动时,不同孔密度稳焰器在受迫燃烧条件下的火焰结构和动态响应特性。

1 试验装置及测试方法

1.1 试验装置

多孔介质稳焰器火焰动态响应特性试验在常温常压试验台上进行,试验台主要由空气供给系统、燃料供给系统、石英玻璃燃烧室、测量控制系统及其他

辅助系统组成,试验系统如图 1 所示。采用离心风机供气,空气流量通过旁通阀调节,采用涡街流量计测量空气体积流量。液化天然气经汽化器后通过两级减压进入甲烷质量流量控制器,在喷嘴入口上游通过预混器与空气充分预混。旋流器出口平均速度为 18.5 m/s,当量比为 0.78。

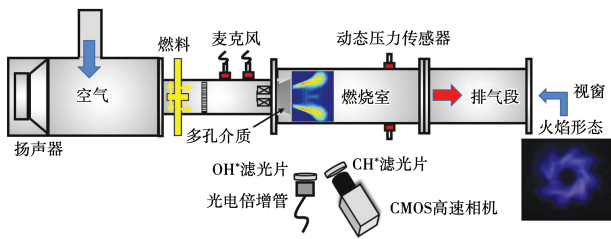


图 1 试验系统
Fig.1 Diagram of testing system

入口速度扰动通过扬声器提供,扬声器功率为 0~450 W,频响范围为 63~4 300 Hz,通过功率放大器和信号发生器调节入口速度扰动幅值和频率,激励波形为正弦波。入口速度扰动幅值采用双麦克风法测量^[22],通过在喷嘴入口沿轴向布置两个麦克风传感器,将实时测量的压力波动转变为速度脉动,速度扰动幅值约为 10%,扰动频率为 65~285 Hz。

多孔介质稳焰器结构如图 2 所示。该稳焰器由底部的直叶片式轴向旋流器和顶部的多孔介质组成,直叶片式轴向旋流器叶片安装角为 45°,叶片数为 8,旋流强度为 0.72。多孔介质结构采用内部非直通的形式,能够有效衰减声波以及避免火焰直接穿过多孔介质壁面。孔的分布和形状呈现出各向同性。多孔介质的孔密度定义为单位长度内孔的个数,孔密度为 0 cm⁻¹表示壁面采用实心结构,孔密度为 10 和 15 cm⁻¹表示单位长度孔的个数为 10 和 15。试验工况如表 1 所示。

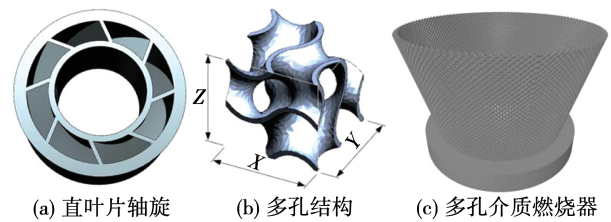


图 2 多孔介质稳焰器结构
Fig.2 Structures of porous medium burner

表 1 试验工况

Tab.1 Testing conditions

孔密度/ cm ⁻¹	入口激励幅 值(v'/v)/%	扰动频率/Hz	当量比	速度 v / m·s ⁻¹
0	10	0(无扰动)	0.78	18.5
10	10	65~285	0.78	18.5
15	10	20	0.78	18.5

1.2 测试方法

数据采集系统包括喷嘴入口双麦克风声压、稳焰器出口下游动态压力、远场麦克风声压、全局热释放率脉动和瞬态火焰图像。喷嘴入口和远场声压采用 PCB 130F20 麦克风传感器测量,灵敏度为 12 mV/Pa,采样频率为 5 000 Hz;燃烧室动态压力采用 Kulite XTL-190M 动态压力传感器测量,采样频率为 5 000 Hz;由于光电倍增管可以把微弱的光信号转变为电信号,且当量比在 0.6~1.0 时,OH^{*}的光辐射信号和热释放强度呈现出线性关系^[23],全局火焰热释放率通过 HAMAMATSU H10723-210 光电倍增管和波长范围为 307±10 nm 的 OH^{*}带通滤光片测得,灵敏度为 0.9 V/nW,采样频率为 5 000 Hz。上述参数基于 NI-DAQ 6284 同步采集卡和 LabView 软件同步采集。

1.3 数据处理方法

火焰传递函数表示燃烧室热释放率脉动对入口速度扰动的响应特性,火焰传递函数的定义式为:

$$FTF(f) = \frac{Q'(f)/Q_{mean}}{V'(f)/V_{mean}} \tag{1}$$

式中: Q_{mean} —光电倍增管电压信号平均值,表征燃烧室平均热释放率,mV; V_{mean} —燃烧器入口平均速度,m/s; $Q'(f)$ —光电倍增管电压信号脉动值,表征燃烧室热释放率的脉动,mV; $V'(f)$ —燃烧器入口速度脉动,m/s。

瞬态火焰结构通过 VEO 710L 高速相机和波长范围为 432±10 nm 的带通滤光片获取,采样频率为 1 000 Hz。由于多孔介质的非透明影响,火焰的起始拍摄位置位于多孔介质的出口,而不是旋流器的出口。时均火焰由 500 张瞬态火焰求取,采用火焰质心表征时均火焰热释放率最强的位置,火焰质心

坐标的计算式为:

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \\ y = \frac{\sum_{i=1}^n p_i y_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_i, y_i —图像中每个像素在 x, y 方向的坐标;
 p_i —为对应坐标的像素值。

本征正交分解法 (POD) 是一种用于提取非稳态物理场中主要特征结构的方法,如湍流流场和旋流火焰中的大尺度相干结构^[24-25]。由于 POD 函数对动能具有优越的收敛性,因此只需要少量的前几阶模态就可以表征非稳态物理场中的主要结构。采用快照 POD 方法对瞬态火焰结构进行处理,将时间序列的热释放率脉动 $I'(\mathbf{x}, t_m)$ 分解为特征函数 $\psi_i(\mathbf{x})$ 和时间系数 $a_i(t)$:

$$I'(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^M [a_i(t) \psi_i(\mathbf{x})] \quad (3)$$

相关矩阵 C 的离散形式为:

$$C_{mn} = \frac{1}{M} (I'(\mathbf{x}, t_m), I'(\mathbf{x}, t_n))_{\Omega} \quad (4)$$

相关矩阵 C 的特征向量为时间系数 $\mathbf{a}^{[i]} = (a_1^{[i]}, a_2^{[i]}, \dots, a_M^{[i]})$, 特征值 λ_i 表征与特征向量相关的脉动能量。火焰的第 i 阶 POD 模态为:

$$\psi_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{M \lambda_i} \sum_{m=1}^M a_m^{[i]} (I^{(m)} - \bar{I}) \quad (5)$$

2 结果分析

2.1 火焰响应特性

不同孔密度稳焰器的火焰传递函数幅值与相位随入口扰动频率的变化如图 3 所示。稳焰器孔密度由 0 增大至 15 cm^{-1} , 火焰传递函数增益峰值分别出现在 125, 85 和 105 Hz。说明多孔介质孔密度的变化会导致燃烧器对上游入口扰动的响应特性存在差异。不同孔密度稳焰器火焰传递函数峰值频率的变化表明, 多孔介质稳焰器能够改变燃烧器的声模态。

随着入口扰动频率增大, 3 种孔密度稳焰器的

响应增益均逐渐降低。表明, 高频入口扰动对多孔介质稳焰器的火焰热释放率脉动影响较弱, 而在中低频入口扰动时, 入口声激励引起的燃烧室内火焰热释放率脉动明显增强, 燃烧器易发生受迫燃烧振荡。不同孔密度稳焰器出口火焰受迫响应特性均呈现低通滤波特性。

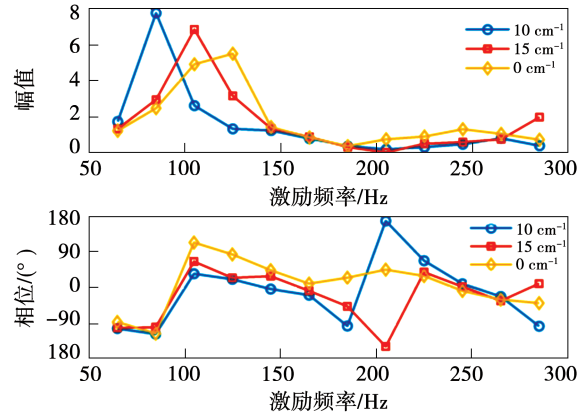


图 3 不同孔密度稳焰器火焰传递函数幅值和相位对比

Fig. 3 Comparison of flame transfer function gain and phase of different porous medium burners

虽然在低通滤波特性上存在相似性, 但不同孔密度稳焰器导致全局火焰传递函数增益峰值存在差异, 且增益大小也存在差异。火焰传递函数相位的斜率表征由喷嘴入口速度脉动测点到燃烧热释放区的扰动延迟时间。不同孔密度稳焰器的火焰传递函数相位斜率基本一致, 表明稳焰器孔密度的变化对于延迟时间影响较小。

孔密度变化对全局火焰热释放脉动和燃烧室压力脉动的影响如图 4 所示。其中, 全局火焰热释放脉动通过光电倍增管测量, 将火焰 CH^* 辐射强度的脉动转化为光电倍增管电压信号的脉动; 燃烧室压力脉动通过安装在燃烧室壁面的脉动压力传感器测量。选取入口扰动频率为 105 Hz, 研究火焰的热释放率和燃烧室内的压力脉动变化。振荡燃烧的特征为, 燃烧室内产生周期性和高幅值的压力脉动。文献[26]对燃烧振荡提出了量化标准: 当燃烧室内周期性动态压力脉动的幅值达到大气压力的 0.5% 时, 即可认为燃烧达到振荡燃烧状态。实际机组当高压燃烧室动态压力脉动幅值超过 2 000 Pa 即达到

燃烧振荡。

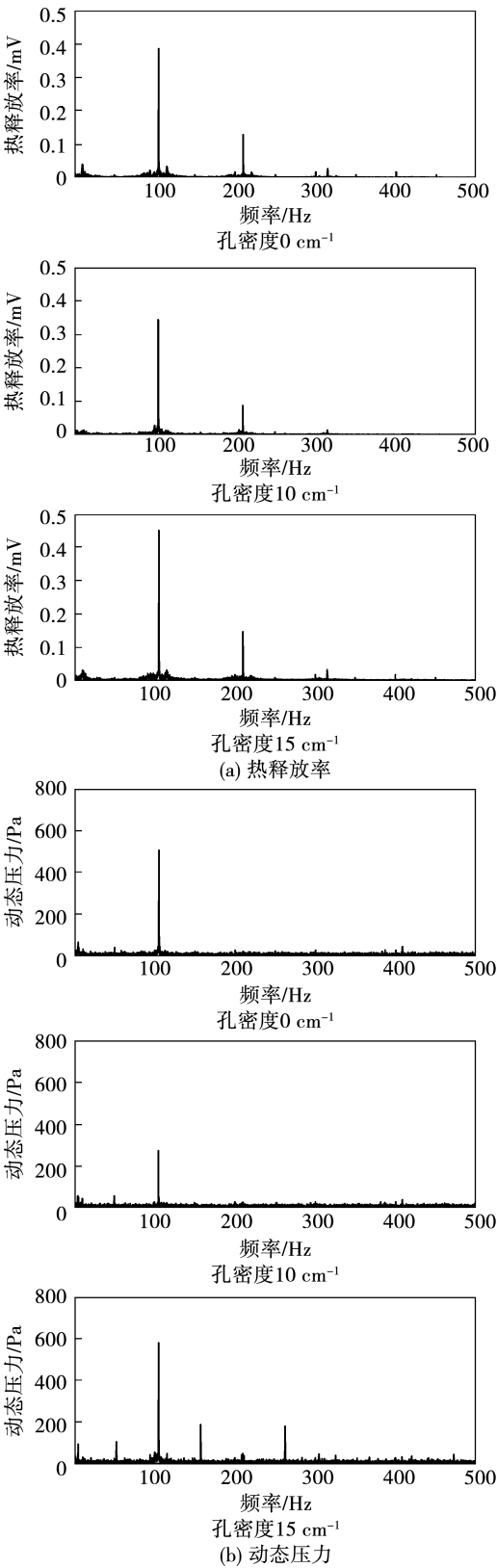


图 4 105 Hz 激励下燃烧室热释放率与动态压力频谱

Fig. 4 Heat release rate and dynamic pressure spectrum of combustor with 105 Hz excitation

不同孔密度稳焰器的热释放率和动态压力脉动频谱图的主频与入口扰动主频一致,均为 105 Hz,表明热声参数的脉动是由于入口扰动引起的。采用实心稳焰器时燃烧室内动态压力脉动幅值为大气压力的 0.51%;孔密度为 10 和 15 cm⁻¹时,燃烧室内动态压力脉动幅值分别为大气压力的 0.27% 和 0.58%。说明,采用实心和孔密度为 15 cm⁻¹的稳焰器时燃烧达到振荡燃烧状态,而采用孔密度为 10 cm⁻¹时燃烧振荡得到抑制。因此,多孔介质孔密度对旋流火焰动态响应特性的影响是非线性的。

2.2 时均火焰结构

不同孔密度稳焰器在入口扰动频率从 65 Hz 增大到 285 Hz 的单侧时均火焰质心的分布如图 5 所示。孔密度变化对火焰质心分布具有重要影响,与实心稳焰器相比,多孔介质能够导致火焰热释放最强的区域向喷嘴移动,缩短稳焰器火焰沿轴向的长度,火焰向多孔介质的中心聚拢。

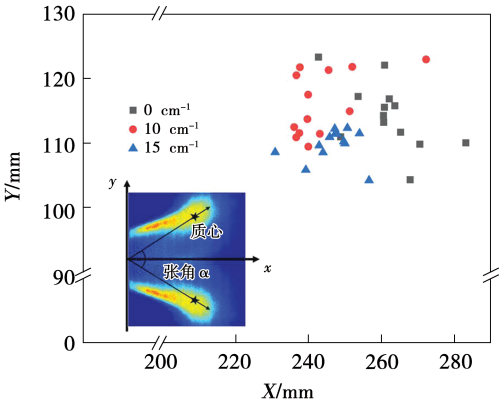


图 5 不同孔密度稳焰器时均火焰质心分布
Fig. 5 Time-averaged flame centroid distribution of different porous medium burners

为定量表征稳焰器孔密度变化对火焰形态的影响,根据 CH^{*} 荧光信号的强度求取每个工况下时均火焰结构的质心位置后,将火焰质心和稳焰器出口截面中心(图 5 中的坐标原点)的连线与中心轴线(图 5 中的 X 轴)夹角表征火焰张角的二分之一。图 6 为不同孔密度稳焰器出口火焰张角随入口速度扰动频率的变化。在孔密度为 0,10 和 15 cm⁻¹时,分别在扰动频率为 125,85 和 105 Hz 时火焰张角最小。火焰张角的分布与火焰传递函数的增益分布趋

势恰好相反,即火焰张角最小时火焰传递函数的增益幅值最大。且孔密度为 15 cm^{-1} 时,不同工况下火焰张角均小于其他两种孔密度稳焰器出口火焰张角,火焰形态变得紧凑。而孔密度为 10 cm^{-1} 时,火焰张角最大。多孔介质孔密度变化对火焰形态的影响是非线性变化的。

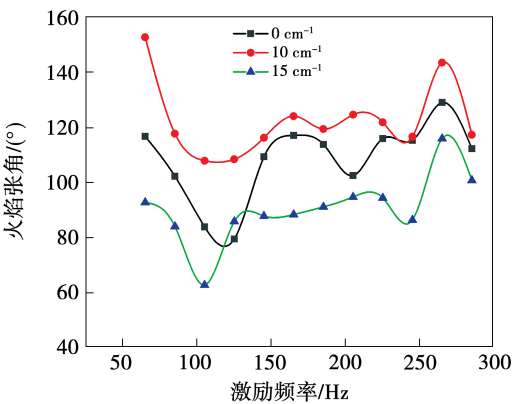


图 6 不同孔密度稳焰器时均火焰张角

Fig. 6 Time-averaged flame angles of different porous medium burners

2.3 瞬态火焰结构

图 7 为无激励工况和入口扰动为 105 Hz 频率下,不同孔密度稳焰器出口 CH^* 信号分布在 7 ms 内的变化情况。在无激励工况下火焰热释放无周期性脉动,说明燃烧稳定;孔密度为 0 和 15 cm^{-1} 时火焰热释放率较高的区域更加集中,尤其在孔密度为 15 cm^{-1} 时最高;而当孔密度为 10 cm^{-1} 时热释放率的峰值减小。

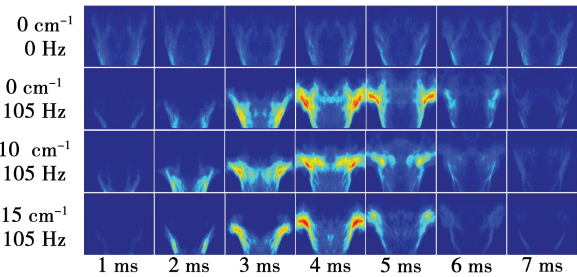


图 7 不同孔密度稳焰器瞬态火焰结构

Fig. 7 Instantaneous flame structures of different porous medium burners

图 8 为不同孔密度稳焰器火焰的前 3 阶 POD 模态和能量占比。前两阶模态能量之和占比超过

40%,第 3 阶模态的能量占比均小于 5%,说明火焰的特征模态分布在前 2 阶。孔密度为 15 cm^{-1} 稳焰器的前两阶模态能量占比超过 50%,说明该稳焰器周期性脉动的瞬态火焰中存在大尺度的相干结构。且实心稳焰器火焰的前两阶模态能量占比与多孔介质稳焰器相比最低,说明多孔介质导致火焰中的相干结构更加明显。

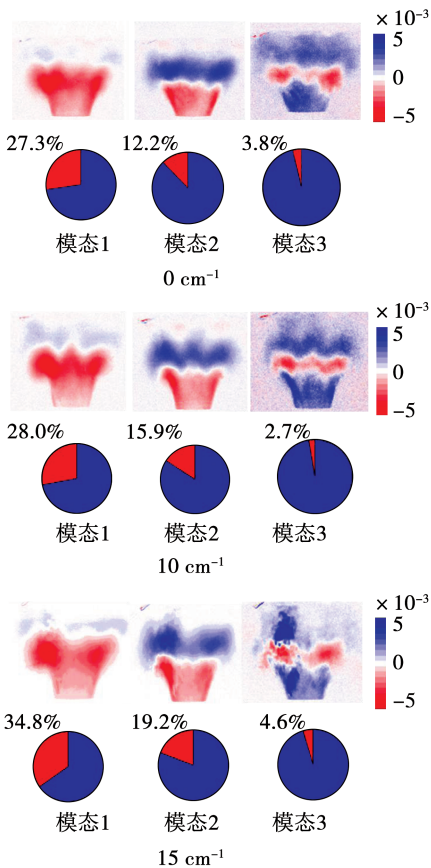


图 8 不同孔密度稳焰器火焰 POD 模态

Fig. 8 Flame POD modes of different porous medium burners

图 9 为不同孔密度稳焰器火焰的前 3 阶 POD 模态时间系数 a_i 的频谱。前 2 阶模态的主频均为 105 Hz,说明火焰相干结构的形成主要与入口激励相关。第 3 阶模态的 105 Hz 主频峰值消失,在倍频 210 和 10 Hz 存在幅值较低的峰值,该模态下入口激励的扰动影响已经大幅减小。与 POD 模态能量分布相同,孔密度为 15 cm^{-1} 稳焰器的前两阶模态的时间系数幅值较大,说明该稳焰器导致周期性脉动的瞬态火焰中存在大尺度的相干结构。

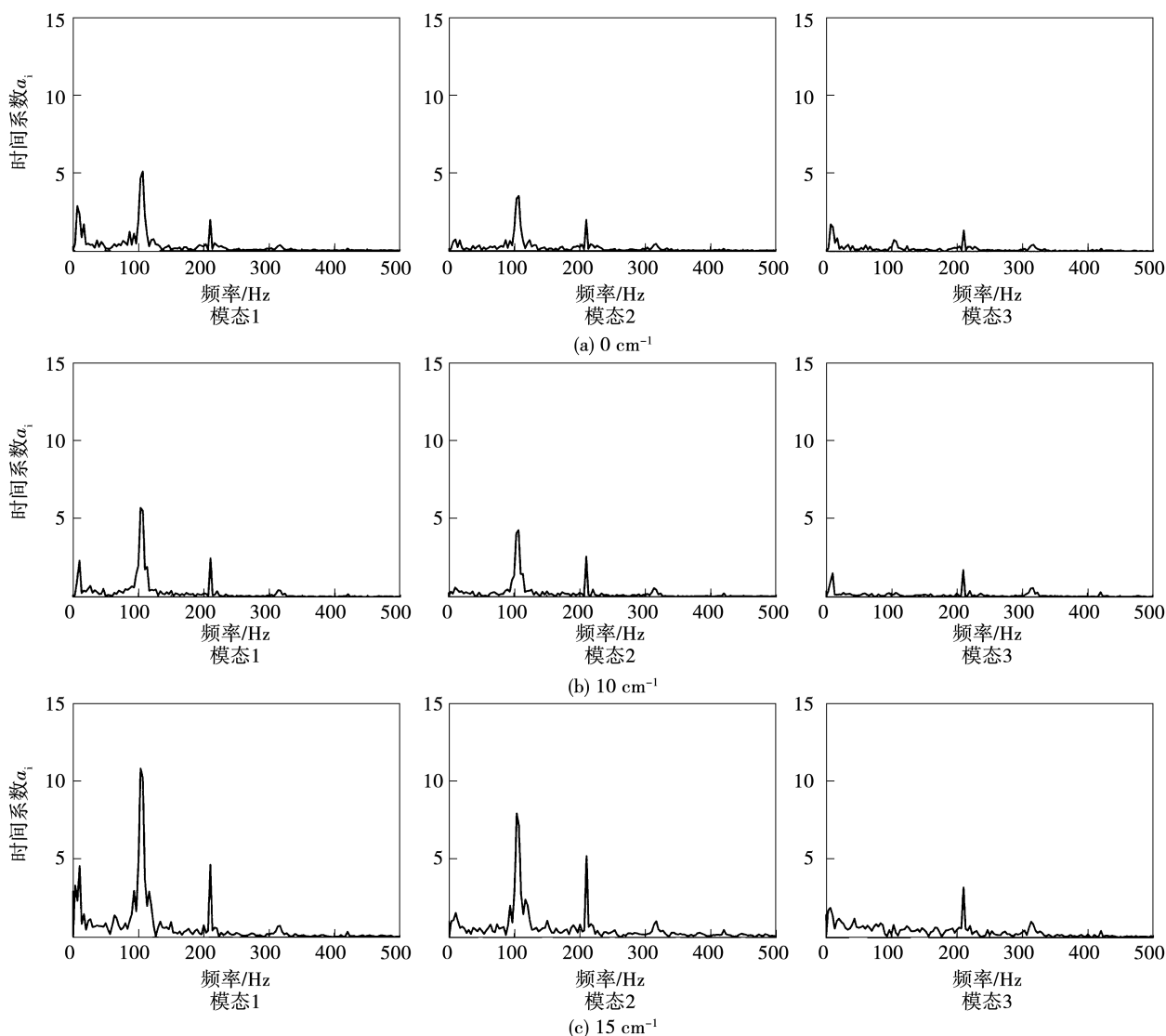


图9 不同孔密度稳焰器火焰 POD 时间系数频谱

Fig. 9 Flame POD time coefficient spectrum of different porous medium burners

3 结 论

(1) 多孔介质稳焰器能够改变燃烧器的声模态,孔密度对热声参数的影响是非线性的,不同孔密度稳焰器导致热声振荡被抑制或加强。

(2) 高频扰动对火焰热释放率脉动的影响较弱,在中低频入口扰动时热释放率脉动明显增强,多孔介质稳焰器火焰受迫响应均呈现低通滤波特性;火焰传递函数相位曲线斜率基本一致,表明稳焰器孔密度的变化对入口扰动传递到火焰热释放区域的延迟时间影响较小。

(3) 多孔介质稳焰器导致火焰热释放最强的区域向喷嘴移动,火焰向稳焰器中心聚拢;孔密度为

15 cm⁻¹时热释放率较高的区域更加集中,孔密度为10 cm⁻¹时热释放率峰值减小。多孔介质导致火焰中的相干结构更加明显。

(4) 火焰张角的分布与火焰传递函数的增益分布趋势恰好相反,即火焰张角最小时火焰传递函数的增益幅值最大。

参考文献:

- [1] CANDEL S M. Combustion instabilities coupled by pressure waves and their active control[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1992, 24: 1277 - 1296.
- [2] JONES B, LEE J G, QUAY B D, et al. Flame response mechanisms due to velocity perturbations in a lean premixed gas turbine com-

- bustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(2):021503.
- [3] KIM K T, LEE J G, LEE H J, et al. Characterization of forced flame response of swirl-stabilized turbulent lean-premixed flames in a gas turbine combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(4):041502.
- [4] AGUILAR M, MALANOSKI M, ADHITYA G, et al. Helical flow disturbances in a multinozzle combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(9):091507.
- [5] LACARELLE A, FAUSTMANN T, GREENBLATT D, et al. Spatio-temporal characterization of a conical swirler flow field under strong forcing[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(3):031504.
- [6] RENARD P H, THEVENIN D, ROLON J C, et al. Dynamics of flame/vortex interactions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(3):225–282.
- [7] SCHADOW K C, GUTMARK E, WILSON K J. Active combustion control in a coaxial dump combustor[J]. Combustion Science and Technology, 1992, 81:285–300.
- [8] STEELE R C, COWELL L H, CANNON S M, et al. Passive control of combustion instability in lean premixed combustors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines Power, 2000, 122(3):412–419.
- [9] AGRAWAL A K, VIJAYKANT S. Passive noise attenuation system [P]. US, 8,109,362 B2, 2010.
- [10] MEADOWS J, AGRAWAL A K. Passive mitigation of noise in a dual fuel combustor using porous inert media[J]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2012, 44687:1235–1243.
- [11] KORNEGAY J, DEPPERSCHMIDT D, AGRAWAL A K. Passive control of thermo-acoustic instability in different length combustors using a high-strength metallic porous insert[C]//IGTI Turbo Expo. Montreal, 2015.
- [12] DANIEL L, DEPPERSCHMIDT J A, KORNEGAY J C, et al. Effect of preheating on flame structure of a swirl stabilized combustor with porous insert to control thermo-acoustics[J]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2016, 49767: V04BT04A053.
- [13] DOWLING A P. A kinematic model of a ducted flame[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 394:51–72.
- [14] ARMITAGE C A, BALACHANDRAN R, MASTORAKOS E, et al. Investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations[J]. Combustion and Flame, 2006, 156:419–436.
- [15] BALACHANDRAN R, AYOOLA B O, KAMINSKI C F, et al. Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations[J]. Combustion and Flame, 2005, 143:37–55.
- [16] LIEUWEN T. Nonlinear kinematic response of premixed flames to harmonic velocity disturbances[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30:1725–1732.
- [17] SCHULLER T, DUROX D, CANDEL S. An unified model for the prediction of laminar flame transfer functions: comparisons between conical and V-flame dynamics[J]. Combustion and Flame, 2003, 134:21–34.
- [18] 郭志辉, 王帅, 李磊, 等. 贫燃预混旋流火焰燃烧不稳定性的试验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12):2637–2642.
- GUO Zhi-hui, WANG Shuai, LI Lei, et al. Experiment on combustion instability of lean-burn premixed swirl flame[J]. Journal of Aerodynamics, 2009, 24(12):2637–2642.
- [19] 付虢, 杨甫江, 郭志辉. 值班稳定器燃烧室值班火焰的火焰传递函数研究[J]. 推进技术, 2019, 40(1):84–94.
- FU Xiao, YANG Fu-jiang, GUO Zhi-hui. Research on the flame transfer function of the duty flame in the combustion chamber of the duty stabilizer[J]. Propulsion Technology, 2019, 40(1):84–94.
- [20] 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 Xiao-yao, MA Kang, et al. Dynamic response characteristics of premixed swirling tubular flames under the disturbance of sound field[J]. Journal of Aerodynamics, 2020, 35(8):1655–1663.
- [21] 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(12):2210–2218.
- YU Dan, GUO Zhi-hui, YANG Fu-jiang. Distributed flame transfer function analysis in lean-burn premixed combustor[J]. Propulsion Technology, 2016(12):2210–2218.
- [22] 王明晓, 邓凯, 管清强, 等. 不同当量比下氢气体积分数对甲烷-氢混合气预混火焰燃烧不稳定性的影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12):2851–2858.
- WANG Ming-xiao, DENG Kai, GUAN Qing-qiang, et al. Effect of hydrogen volume fraction on combustion instability of methane-hydrogen mixture premixed with different equivalence ratios[J]. Journal of Aerodynamics, 2018, 33(12):2851–2858.
- [23] HARDALUPAS Y, ORAIN M. Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame[J]. Combustion and Flame, 2004, 139(3):188–207.
- [24] OBERLEITHNER K, SIEBER M, NAYERI C N, et al. Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown; stability analysis and empirical mode construction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 679:383–414.
- [25] LIU W J, XUE R R, ZHANG L, et al. Dynamic response of a forced low-swirl premixed flame with acoustic excitation[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2022, 108(4):1139–1157.
- [26] WYATT C, CHEN X, JANITH S, et al. The effect of variable fuel staging transients on self-excited instabilities in a multiple-nozzle combustor[J]. Combustion and Flame, 2018, 194:472–484.