

限制域形状对分层火焰和燃烧不稳定性的影响*

宋恒¹, 刘玉治¹, 王欣尧¹, 韩啸², 林宇震²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空发动机研究院 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘要: 为了研究中心分级燃烧室中限制域形状对火焰结构及燃烧不稳定性的影响, 实验过程中, 选择带有CH*滤镜的相机拍摄火焰图像, 采用动态压力传感器测量压力脉动。结果表明, 突扩限制域和斜坡限制域中的时均火焰结构相似, 但突扩限制域中的火焰动态结构呈现出周期性变化, 并伴随着压力振荡。而斜坡限制域中的火焰动态结构基本不变, 且压力脉动接近于零, 主要原因是斜坡限制域中的旋涡脱落过程受限, 旋涡与火焰的相互作用被大幅削弱。通过改变主燃级通道流速调节延迟时间, 发现突扩限制域中会出现压力振幅的周期性变化, 而斜坡限制域中始终保持稳定燃烧。本文的研究表明, 使用斜坡限制域有潜力成为在宽工况范围内有效抑制燃烧不稳定的被动控制方法。

关键词: 限制域形状; 分层火焰; 燃烧不稳定; 突扩限制域; 斜坡限制域

中图分类号: V436+.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210282-10

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210282

Effects of Confinement Shapes on Stratified Flames and Combustion Instabilities

SONG Heng¹, LIU Yu-zhi¹, WANG Xin-yao¹, HAN Xiao², LIN Yu-zhen²

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine, Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The effects of the confinement shape on flame structures and combustion instabilities in a centrally-staged burner were investigated. During the experiments, cameras equipped with CH* filters were used to capture flame images. Besides, pressure signals were synchronously collected by dynamic pressure sensors. The results show that time-averaged flame structures in the dump confinement and slope confinement are similar. The dynamic flame in the dump confinement shows periodic changes, accompanied by pressure oscillations. However, the dynamic flame in the slope confinement is basically unchanged with very small pressure fluctuations, which is attributed to the weakened vortex-flame interaction due to the limited vortex shedding within the slope confinement. Changing the flow speed in the main stage could adjust the delay time. It is found that the pressure amplitude shows periodic changes in the dump confinement, while the combustion is always stable for the slope confinement case. The present study illustrates that using the slope confinement has the potential to become a passive control method to effectively suppress combustion instabilities in a wide range of operating conditions.

* 收稿日期: 2021-05-09; 修订日期: 2021-07-28。

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-III-0004-0028); 国家自然科学基金 (91641109)。

作者简介: 宋恒, 博士生, 研究领域为非正常燃烧。

通讯作者: 韩啸, 博士后, 研究领域为燃烧振荡及控制。

引用格式: 宋恒, 刘玉治, 王欣尧, 等. 限制域形状对分层火焰和燃烧不稳定性的影响[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 210282. (SONG Heng, LIU Yu-zhi, WANG Xin-yao, et al. Effects of Confinement Shapes on Stratified Flames and Combustion Instabilities[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210282.)

Key words: Confinement shape; Stratified flame; Combustion instabilities; Dump confinement; Slope confinement

1 引言

日益严格的排放要求促进了贫油预混燃烧技术的发展,其主要通过降低火焰温度以减少热力型氮氧化物的生成量,具有广阔的应用前景^[1]。但是,贫油预混燃烧时容易发生燃烧不稳定,伴随着剧烈的压力脉动,造成回火、熄火,甚至燃烧室结构的破坏^[2]。因此,贫油预混燃烧所面临的燃烧不稳定性问题的机理、控制方法等方面得到了广泛关注。

对单旋流燃烧室的研究结果表明,火焰结构的变化伴随着燃烧状态的改变^[3]。随着当量比的增加,原本只稳定在旋流内侧剪切层的火焰传播进入角涡区,最终导致火焰同时稳定在旋流内、外两侧的剪切层。火焰形状从V型切换为M型,同时燃烧状态由稳态燃烧转变为振荡燃烧^[3]。Gotoda等^[4]在研究中观察到了相似的现象,当火核进入并点燃角涡区时,燃烧室内出现了燃烧不稳定的现象。而在中心分级燃烧室中,同样有研究证实了火焰结构与燃烧不稳定有明显的关联。中心分级的燃烧室有同轴心的两层旋流,内、外层(预、主燃级)旋流的当量比的比值定义为分层比。随着分层比的降低,火焰结构发生了V型火焰、分层火焰、脱体火焰的转变,只有分层火焰表现为稳态燃烧,而其他两种火焰类型下均发生了燃烧不稳定的现象^[5]。Gounder等^[6]在研究中降低分层比至阈值以下,观察到火焰结构的显著变化,同时突然出现了高振幅的压力脉动。在工程实际的TAPS燃烧室中也观察到了类似的结果,当附着的V型火焰转变为脱体火焰时,燃烧室内出现了剧烈的压力振荡和速度振荡^[7]。这些结果表明火焰结构与燃烧不稳定具有显著的关联。

进入燃烧室的旋流流动,由于面积突扩及涡破碎,燃烧室内的流场存在回流区与剪切层,进而影响着其中的火焰结构^[8]。另外,限制域形状的变化可以显著地改变燃烧室内的流场,从而改变火焰结构与燃烧不稳定性^[9]。Lee等^[10]采用大涡模拟的方法研究了限制域进口扩张角度对流场及燃烧不稳定的影响。结果表明,当限制域进口扩张角度为45°时,沿径向脉动的火焰面积与轴向的声波解耦,有效地抑制了燃烧不稳定。Meadows等^[11]利用粒子图像测速技术拍摄燃烧室内的流场,发现角涡区中旋涡结构是驱动燃烧不稳定的主要因素。将多孔介质放置于

燃烧室端壁处可以消除角涡区,且燃烧系统由全局不稳定模态转变为对流不稳定模态,降低了燃烧室内的压力振荡^[12]。值得注意的是,上述研究均是在单旋流燃烧室中开展的,而在分层旋流燃烧室中开展的相关研究较少。近期的研究关注了限制域出口直径的影响,结果表明,出口直径的减小有助于火焰在预燃级出口处的稳定燃烧,使得释热区在轴向和径向上的分布更加广泛,促进了压力振荡的减小^[13]。由于火焰主要稳定在端壁附近,因此限制域进口形状对火焰结构的影响更加具有研究意义。Song等^[14-15]曾对比了典型的突扩限制域与限制域进口形状修改后的斜坡限制域中的燃烧状态,并采用大涡模拟和声学模型的方法获取了相应的火焰响应,但并未通过实验进行验证。

本文在分层旋流燃烧室中,采用实验方法研究两种限制域进口形状(突扩限制域与斜坡限制域)对火焰结构及燃烧不稳定性的影响。通过对脉动压力信号、瞬时火焰图像的分析,阐明火焰结构与燃烧不稳定性之间的联系,揭示限制域进口形状的改变导致燃烧状态发生变化的机理。

2 实验系统

2.1 分层旋流燃烧器

本研究是在北航分层旋流燃烧器(BASIS, Beihang axial swirler independently-stratified burner)中开展的,该燃烧器头部具有中心分级的结构特征^[16],如图1(a)所示。中心体与级间段之间的内层环腔为预燃级通道,通道中安装有叶片角度为40°,旋流数为0.68的轴向旋流器;级间段外侧的外层环腔为主燃级通道,通道中安装有叶片角度为30°,旋流数为0.50的轴向旋流器;两旋流器的旋向相同,且处于相同的轴向位置。预混了的空气与甲烷通过主、预燃级通道上游的4个壅塞小孔进入燃烧器。小孔处流动处于壅塞状态,即小孔处的流速等于声速,声波在小孔处无法继续向上游传播,只能反射回下游。因此,小孔处的声边界相当于固壁边界。

燃烧器头部端壁可连接具有不同结构特征的石英玻璃筒作为限制域。本研究使用了两种类型的限制域,分别为突扩限制域(DC, Dump confinement)和斜坡限制域(SC, Slope confinement),如图1(a)中心线上、下两部分所示。突扩限制域的长度为600mm,直

径为100mm,具有恒定的截面形状;而斜坡限制域在端壁处的直径为61mm,与主燃级通道外径相同,并以单边30°的角度将直径扩张至100mm,随后保持了恒定的截面形状。斜坡限制域总长同样为600mm。图1(b)展示了突扩限制域中的时均流场结构,包括三个回流区,分别为中心回流区(PRZ, Primary recirculation zone)、角回流区(CRZ, Corner recirculation zone)和台阶回流区(LRZ, Lip recirculation zone)。由于旋流射流与回流区之间存在速度差,主燃级旋流两侧分别形成了外剪切层(OSL, Outer shear layer)和内剪切层(ISL, Inner shear layer),预燃级旋流两侧分别形成了中心剪切层(CSL, Central shear layer)和台阶剪切层(LSL, Lip shear layer)。斜坡限制域的倾斜壁面对流场的主要影响是消除了角涡区。

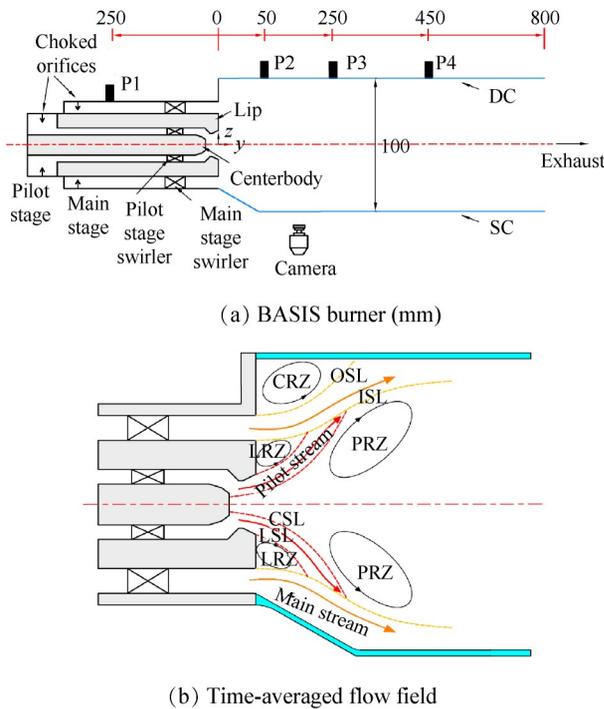


Fig. 1 Schematic of the BASIS burner and its time-averaged flow field

2.2 数据采集

为了采集脉动压力信号,在距离头部端壁250mm的主燃级旋流通道中安装有1个精度为1%的压力传感器P1(PCB 112A22),传感器尾端与主燃级通道外缘齐平。此外,在石英玻璃筒上安装有3个相同型号的压力传感器P2~P4。实验过程中,由于石英玻璃筒内的温度较高,P2~P4无法直接安装在玻璃筒表面,故采用半无限长管法的安装方式。压力传感器采样时间为5s,采样频率为20kHz。时序的脉动压力信号经过快速傅里叶变换,可获得脉动压力信号的频域

信息。

利用单反相机(Nikon D300)可拍摄时均火焰图像,曝光时间为0.5s。利用带有像增强器(UVi 1850-10-S20)的高速相机(Fastcam SA4)可拍摄瞬时火焰图像,拍摄频率为5kHz,分辨率为768×768。两个相机前均安装有CH*滤镜(430nm±10nm)。

使用Labview程序控制数据采集系统,其中,数据采集仪器为NI设备(cDAQ-9178),其搭载的NI9215模块进行脉动压力信号的采集,NI9402模块发射高电平信号触发高速相机,以保证脉动压力信号与瞬时火焰图像的同步采集。

2.3 实验工况

本研究以甲烷为燃料,在常温常压的条件下开展实验。两台质量流量控制器(Alicat KM601,Sevenstar CS200)所调控的预燃级空气 $m_{a,i}$ 与预燃级甲烷 $m_{f,i}$ 分别进入预燃级掺混器,完全预混后流入预燃级通道。主燃级空气 $m_{a,o}$ 与主燃级甲烷 $m_{f,o}$ 采用相同的组织方式。因此,主、预燃级的当量比可独立调节。为了研究突扩限制域和斜坡限制域对分层火焰结构及燃烧不稳定性的影响,实验过程中通过空气与甲烷流量的调节,保持总当量比 ϕ 为0.6,并实现0.5与1.5的分层比,其中分层比SR定义为预燃级当量比 ϕ_i 与主燃级当量比 ϕ_o 的比值,具体工况见表1。

Table 1 Operating conditions

N	$m_{a,o}/(g/s)$	$m_{a,i}/(g/s)$	ϕ_o	ϕ_i	SR	ϕ
1	17.8	2.2	0.64	0.32	0.5	0.6
2	17.8	2.2	0.57	0.85	1.5	0.6
3	10.7	2.2	0.57	0.85	1.5	0.6
4	14.2	2.2	0.57	0.85	1.5	0.6
5	21.3	2.2	0.57	0.85	1.5	0.6
6	24.9	2.2	0.57	0.85	1.5	0.6
7	26.7	2.2	0.57	0.85	1.5	0.6

本研究中的主燃级空气流量较预燃级空气流量大,对限制域中的未燃混合物流速及延迟时间起主导作用。本文共设置了6种主燃级空气流量,用以研究延迟时间的变化在不同限制域中的作用。

3 结果与讨论

3.1 燃烧不稳定性

燃烧不稳定的主要特征为周期性的压力振荡。通过P2压力传感器记录的脉动压力时序信号,可观察压力信号的变化规律。进一步对时序信号进行快速傅里叶变换,可以更清晰地观察脉动压力的主频

及对应的幅值。本节内容主要为工况1,2下,限制域形状对两种典型分层比下火焰燃烧不稳定的影响。

图2(a)展示了分层比 $SR=0.5$ 时,突扩限制域(DC)中脉动压力信号的时序图与频谱图。此时,脉动压力信号在 $\pm 600\text{Pa}$ 范围内呈现周期性的变化规律,频谱图中有一个明显的峰值,表明压力脉动的频率为 246Hz ,振幅为 623Pa 。以上结果表明分层比 0.5 时,在突扩限制域中发生了燃烧不稳定的现象。相似的是,分层比 $SR=1.5$ 时,突扩限制域中也发生了燃烧不稳定,但压力脉动强度较 $SR=0.5$ 时弱,频率为 207Hz ,振幅为 279Pa ,如图2(b)所示。然而,在斜坡限制域(SC)中,分层比为 0.5 和 1.5 时,脉动压力信号

仅在 $\pm 80\text{Pa}$ 范围内无规则波动,频谱图中也没有明显的峰值,信噪比较低,表明在斜坡限制域中没有发生燃烧不稳定。

与突扩限制域相比,斜坡限制域可以有效抑制典型分层比下分层火焰燃烧不稳定的现象,具有作为被动控制方法的潜在价值。

3.2 火焰结构

接下来展示工况1,2下,限制域形状对时均及相平均火焰结构的影响,并揭示限制域形状的变化可以抑制燃烧不稳定的原因。

带 CH^* 滤镜的单反相机拍摄的化学发光信号为沿视线积分的结果,通过Abel变换^[17],可以得到过轴

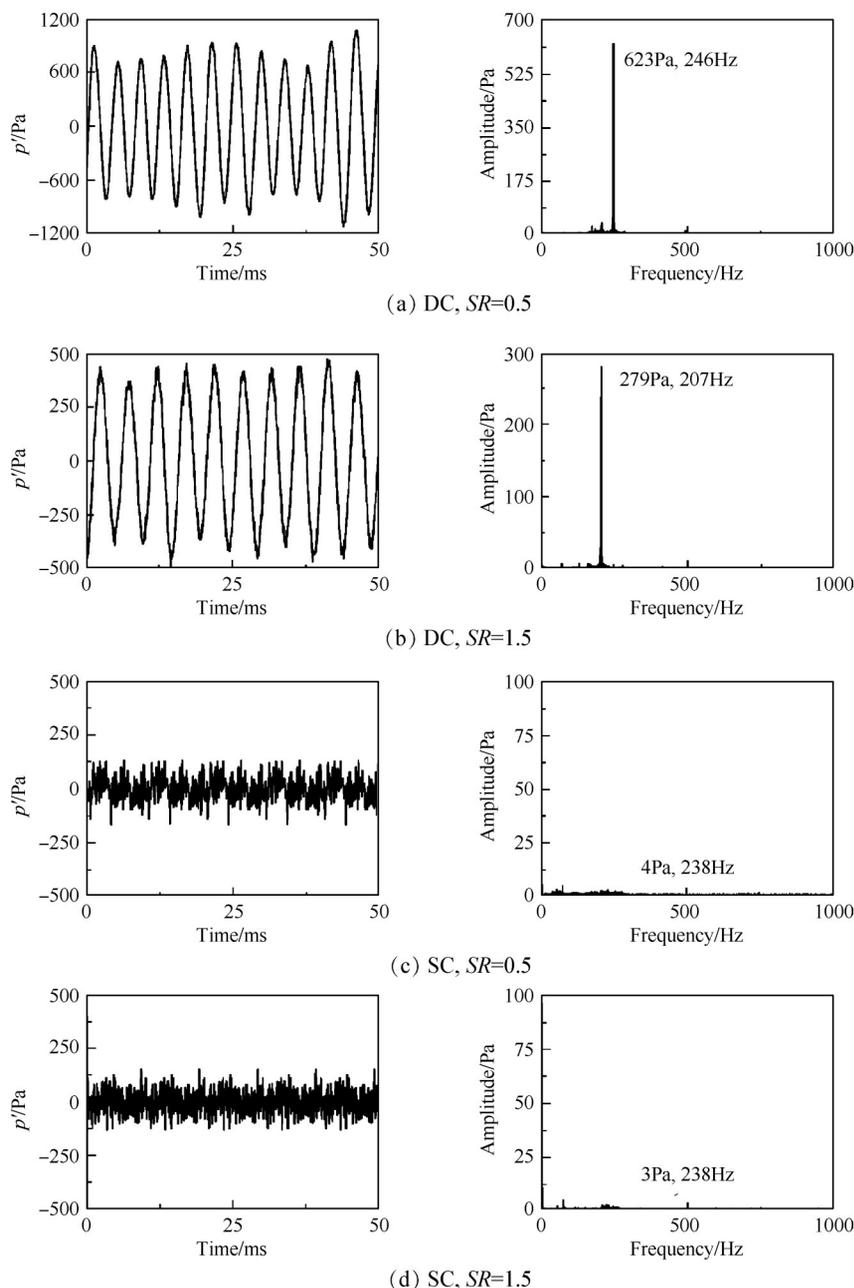


Fig. 2 Time traces and spectra of pressure fluctuation signals

线的中心平面上的化学发光信号。此外,研究表明对于分层火焰,CH*的化学发光信号与火焰释热率具有线性关系,因此可以用CH*的化学发光信号代表火焰的释热率^[18]。图3展示了时均的火焰图像。对于分层比 $SR=0.5$ 的情况,由于此时预燃级当量比仅为0.32,低于甲烷在空气中的贫油可燃极限^[19],预燃级火焰无法作为稳定的点火源,因此火焰整体呈现出无附着点的脱体状。在突扩限制域中,如图3(a)所示,由于出现了热声振荡,火焰释热遍布于角回流区与中心回流区中,呈分布式。而在斜坡限制中,限制域形状的变化消除了角涡区,此时稳定燃烧的脱体火焰主要稳定在内剪切层中。对于分层比 $SR=1.5$ 的情况,主、预燃级当量比均处于甲烷在空气中的可燃极限之内,火焰为附着的双锥形结构。其中预燃级火焰锚定在中心体及级间段的内缘处,而主燃级火焰锚定在级间段外缘处。火焰释热集中在中心剪切层、台阶剪切层与内剪切层中。虽然两种限制域中的火焰结构相似,但突扩限制域中由于燃烧不稳定,火焰边界较为模糊,而斜坡限制域中稳定燃烧的火焰边界较为清晰。

瞬时火焰图像可以更直观地观察火焰动态。另外,由于燃烧不稳定具有周期性的特征,根据脉动压力信号振荡的主频,可以对瞬时火焰图像进行相平均处理,并进一步进行 Abel 变换,得到的结果如图4所示。为了量化相平均火焰的周期性变化,定义了

火焰的主要释热区域、释热中心及火焰张角^[20]。其中,火焰的主要释热区域为大于火焰化学发光强度最大值50%的区域,如图4中蓝线所包围的区域;依据主要释热区域中各像素点的光强,将主要释热区域的“重心”定义为释热中心;坐标原点和释热中心的连线与中心轴线的夹角定义为火焰张角 θ 。通过光强梯度的最大值进一步处理得到火焰的边界,如图4中白线所示。

分层比 $SR=0.5$ 时,突扩限制域中的相平均火焰如图5(a)所示,此时火焰呈现出明显的周期性轴向运动,白色箭头标记了火焰的卷曲位置。在相位 $\varphi=0^\circ$ 时,一个旋涡结构从头部端壁脱落;随后沿着内、外剪切层向下游对流,并卷吸着火焰向下游运动,如图中的白线所示;当 $\varphi=300^\circ$ 时,一个新的旋涡结构从头部端壁脱落,如靠近端壁的箭头所示,该旋涡结构逐渐发展,随后对火焰的运动起到主导作用,而先前的旋涡结构继续向下游对流,脱离了释热区域,不再对火焰结构造成影响。分层比 $SR=1.5$ 时,火焰动态主要表现为火焰卷曲位置沿处于内剪切层的火焰锋面的周期性变化。当 φ 从 0° 变化至 180° 时,头部端壁脱落的旋涡结构推动火焰锋面上卷曲位置向下游运动; $\varphi=240^\circ$ 时,新的旋涡结构从端壁脱落,造成驻点处的火焰卷曲;在剩余的相位时,两个旋涡结构共同向下游对流。与 $SR=0.5$ 时所表现的火焰的轴向动态运动不同的是, $SR=1.5$ 时的旋涡与火焰的相互作用

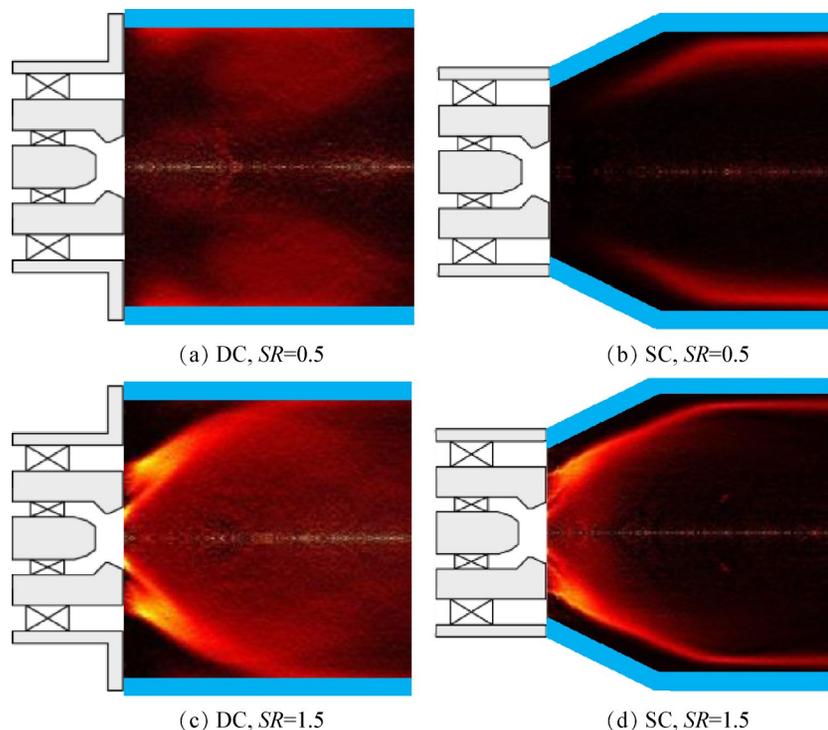


Fig. 3 Time-averaged flame images

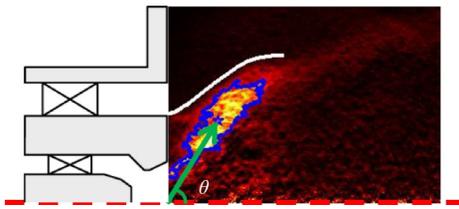


Fig. 4 Post-processing of the phase-averaged flame image

主要造成了火焰面积的脉动。但是,这两种类型的火焰动态均产生了非定常释热,并进一步与压力脉动耦合,造成了燃烧不稳定的发生,使得图 2(a),(b)中表现出高振幅的压力振荡。对于斜坡限制域中的情况,无论是 $SR=0.5$ 时的脱体火焰,还是 $SR=1.5$ 时的双锥形火焰,不同相位下的火焰形状基本不变,并未出现明显的周期性火焰轴向运动与火焰锋面的卷曲和皱褶,表明此时为稳定燃烧的状态,与图 2(c),(d)中的结果保持一致。

旋涡与火焰相互作用除了造成火焰锋面的卷曲、轴向运动,还会造成火焰张角的变化。Palies

等^[21]发现轴向扰动传递至旋流器时,在旋流器下游不仅会产生轴向扰动,还会产生周向扰动(涡波)。值得注意的是,轴向扰动是以声速向下游传播的,而周向扰动是以旋流通道中的流动速度向下游传播的,轴向扰动与周向扰动传播的速度差,会造成旋流数脉动,使得火焰张角产生周期性变化。图 6 展示了在突扩限制域和斜坡限制域中,不同分层比下火焰张角在两个周期中的变化规律。可以看出,在突扩限制域中,分层比 $SR=0.5$ 和 $SR=1.5$ 时,火焰张角均产生了 10° 大小的周期性变化;而在斜坡限制域中仅能观察到不足 2° 的无规律的火焰张角脉动。

瑞利指数分布表示空间中释热脉动与压力脉动在一个振荡周期中的耦合效果,其定义为 $R = \tau^{-1} \int p' I' dt$ ^[7],式中 p' 表示压力脉动,由动态压力传感器采集获得; I' 表示与 p' 对应时刻的 CH^* 化学发光强度的脉动,通过瞬时的 CH^* 强度分布减去平均 CH^* 强度值来获得; τ 表示振荡的周期。

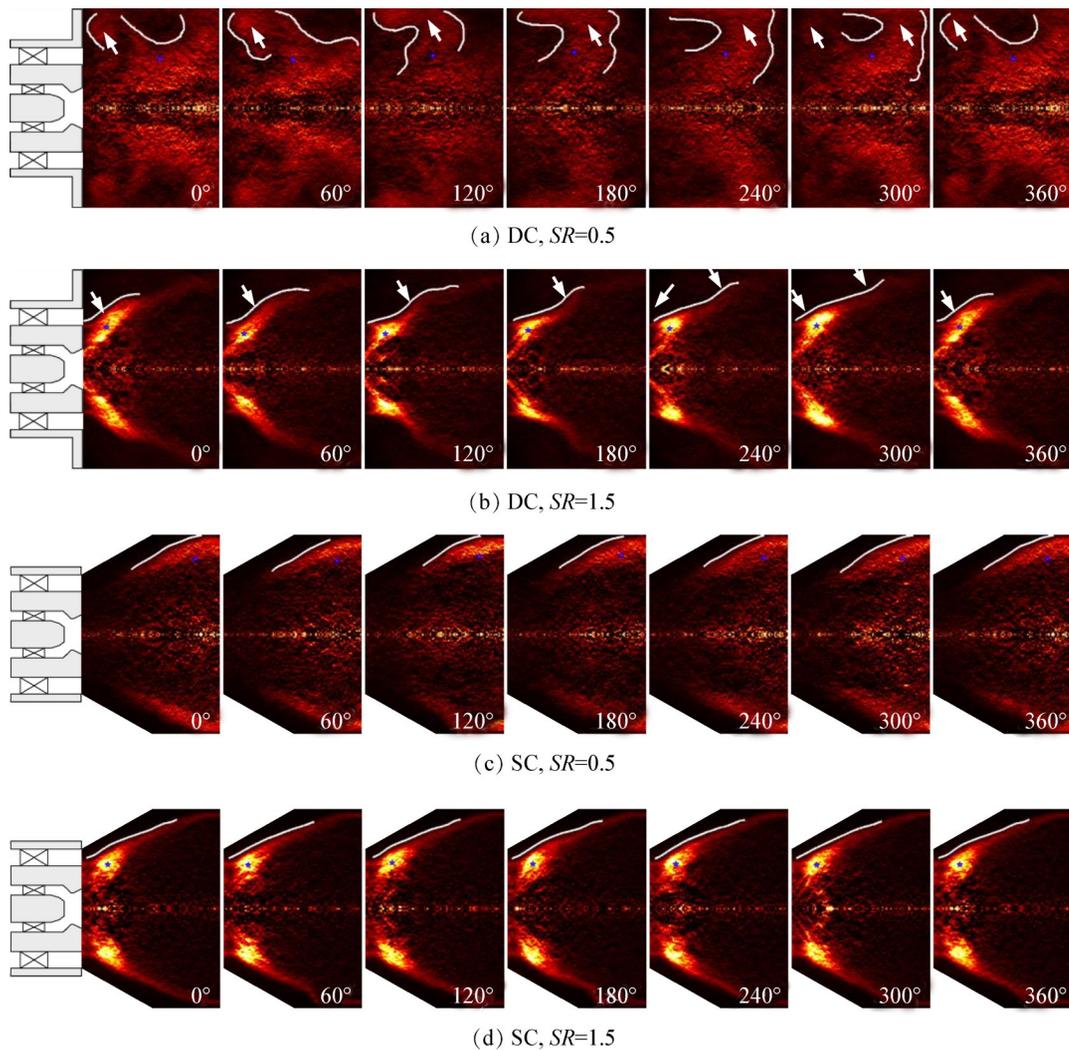


Fig. 5 Phase-averaged flame images

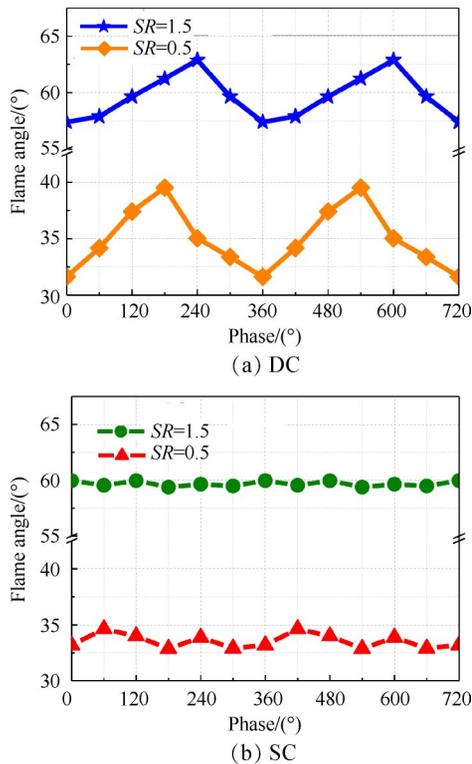


Fig. 6 Variation of flame angles during two cycles

本文中,当参与计算的振荡周期大于 60 时结果将收敛,故选择 60 个振荡周期参与运算。在计算获得的瑞利指数分布的基础上,利用 Abel 变化,得到过轴线的中心平面上的瑞利指数分布。根据瑞利指数的分布情况,可以进一步明确燃烧不稳定的驱动区域。图 7 中红色部分代表驱动燃烧不稳定的区域,而蓝色部分表示抑制燃烧不稳定的区域。对于 $SR=0.5$ 时突扩限制域中的情况,驱动区域主要位于角涡区中,表明角涡区中的火焰轴向运动是燃烧不稳定的主要驱动因素;而相同分层比下斜坡限制域中,红色区域与蓝色区域相互融合,没有连续的驱动区域。当 $SR=1.5$ 时,突扩限制域中驱动区与抑制区沿内剪切层交替排列,表明稳定在内剪切层的火焰锋面的周期性脉动是燃烧不稳定的主要驱动项;而斜坡限制域中没有明显的驱动区域,表明此时为稳定燃烧。

火焰动态及瑞利指数分布证明了突扩限制域中的旋涡与火焰的相互作用是驱动燃烧不稳定的主要因素,而斜坡限制域的使用抑制了旋涡脱落,减弱了旋涡对火焰的影响及非常释热,进而抑制了燃烧不稳定。

3.3 延迟时间

火焰响应和声学特征是影响系统热声稳定性的重要因素,与突扩限制域相比,使用斜坡限制域所造

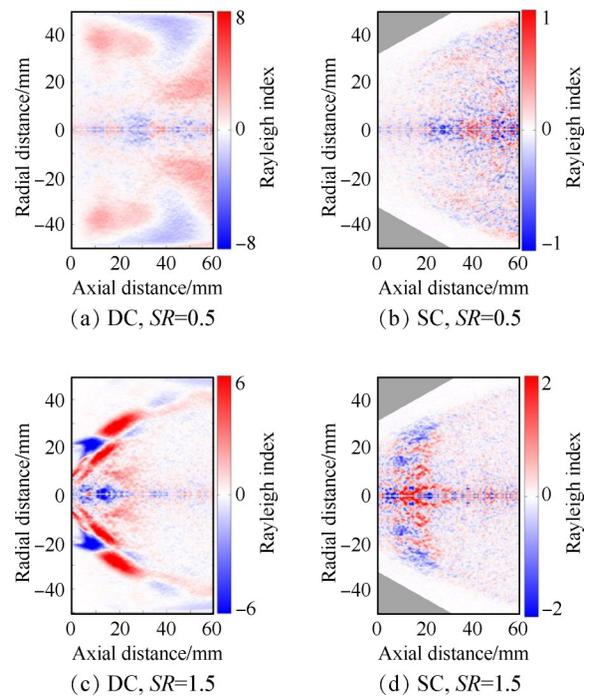


Fig. 7 Local Rayleigh index maps

成的声学特征的变化对系统热声稳定性的影响较小,而火焰响应的变化对系统热声稳定性的影响较大^[15]。火焰响应在用于预测燃烧不稳定频率的热声网络模型中通常被简化为 $n-\tau$ 模型^[22]。其中, n 为增益,表示系统受到扰动时趋于不稳定的程度; τ 为延迟时间,表示以流动速度传播的扰动运动至火焰锋面所需要的时间。文献[14-15]通过数值方法,关注了特定外激频率及振幅下突扩限制域与斜坡限制域中的火焰响应增益,并进一步将火焰响应增益带入热声网络模型中,研究其对热声稳定性的影响。由于火焰响应和声学特征是影响系统热声稳定性的重要因素,文献[15]首先计算了冷态条件下限制域形状对热声稳定性的影响,结果表明限制域形状的变化所造成的声学特征的变化对系统热声稳定性的影响较小;随后将两种限制域的火焰响应增益分别带入添加了 $n-\tau$ 模型的热声网络模型中,此时系统热声稳定性表现出明显的差别^[15]。值得注意的是,上述计算中虽然引入了 $n-\tau$ 模型,但并未关注延迟时间的作用。因此,本文通过实验方法改变延迟时间,判断不同限制域中延迟时间的变化对燃烧状态的影响。

3.2 节的分析表明,突扩限制域中燃烧不稳定主要与主燃级通道出口处的旋涡脱落有关,此外,主燃级空气流量较预燃级空气流量大,对限制域中的流动速度起主导作用。因此,通过改变主燃级通道的

空气流量,调节通道内的气流速度,可以显著地改变延迟时间。图 8 展示了 $SR=1.5$ 时,两个限制域中脉动压力振幅随主燃级空气流量的变化规律。本文设置的主燃级空气流量分别为 10.7, 14.2, 17.8, 21.3, 24.9, 26.7 g/s, 对应的主燃级空气流速分别为 6.5, 8.6, 10.8, 12.9, 15.1, 16.2 m/s。从图 6 可以看出,分层比 $SR=1.5$ 时的火焰角度约为 60° , 火焰根部至火焰锋面的轴向长度约为 13.7 mm。因此,以流动速度传播的扰动运动至火焰锋面所对应的延迟时间约分别为 2.11, 1.59, 1.27, 10.6, 0.91, 0.85 ms。值得注意的是,延迟时间受火焰角度及当地空气流速的影响,且流速往往是非定常、非均匀的,因此上述计算获得的延迟时间与真实的延迟时间存在一定的偏差。但是,本文中设置的最大主燃级空气流量为最小主燃级空气流量的 2.5 倍左右,对应的最大主燃级通道流速同样为最小主燃级通道流速的 2.5 倍左右。因此,主燃级空气

流量的大范围改变足以使延迟时间发生显著的变化。

在突扩限制域中,压力振幅变化的幅度较大,当主燃级空气流量从 14.2 g/s 提高至 17.8 g/s 时,延迟时间从 1.59 ms 变化至 1.27 ms,振幅从约 20 Pa 增加至约 280 Pa,图 9(a), (b) 为对应工况下的脉动压力的相空间轨迹,前者的轨迹坍塌为一体,而后者的轨迹形成了极限环,表明主燃级空气流量为 14.2 g/s 时的燃烧为稳定状态,而主燃级空气流量为 17.8 g/s 时发生了燃烧不稳定。当继续增加主燃级空气流量至 24.9 g/s 时(如图 9(c) 所示),延迟时间变为 0.91 ms,振幅降为约 50 Pa,相空间轨迹表明此时的燃烧再次转变为稳定状态。延迟时间的变化可以显著地改变突扩限制域中的燃烧状态。然而,斜坡限制域中脉动压力振幅始终较小,均不超过 20 Pa,且相空间图均未形成极限环,如图 9(d)~(f) 所示,表明不同的主燃级空气流量下均为稳态燃烧,未发生燃烧不稳定性。

与突扩限制域中的现象不同的是,随着主燃级空气流量的变化,斜坡限制域中的燃烧状态未发生稳态燃烧与振荡燃烧的切换,表明斜坡限制域对燃烧不稳定抑制现象并不是受延迟时间的影响(即由于延迟时间落在了合适的区间,使得压力脉动与释热脉动解耦)。从 $n-\tau$ 模型的角度而言,排除了延迟时间对燃烧不稳定抑制作用的影响,则从侧面说明了火焰响应增益的变化很可能是斜坡限制域抑制燃烧不稳定的原因。斜坡限制域的使用削弱了主燃级通道的旋涡脱落,限制了火焰面的脉动。延迟时间

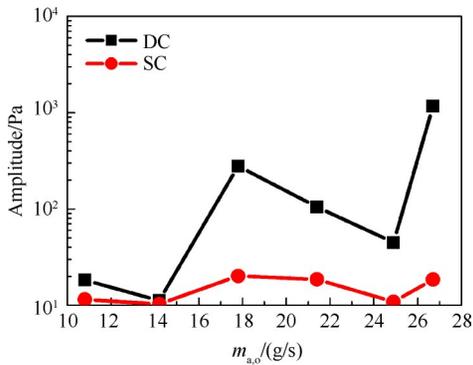


Fig. 8 Pressure amplitudes as a function of the air mass flow rate of the main stage

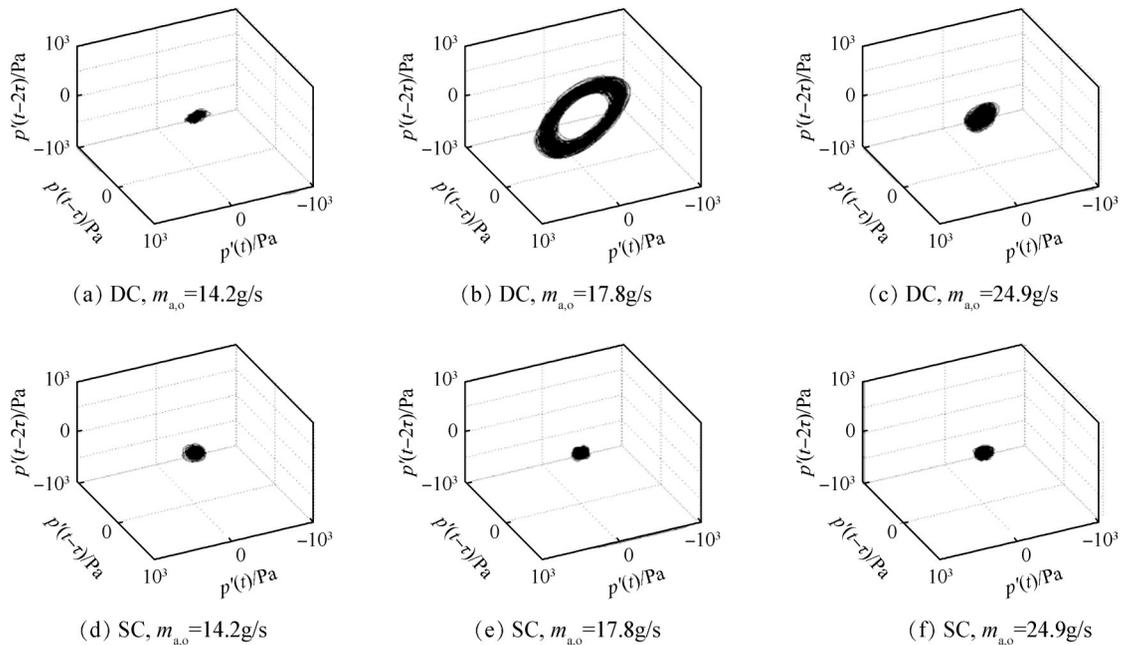


Fig. 9 Phase space trajectories of pressure fluctuations as a function of $m_{a,o}$

的变化不会改变斜坡限制域中的稳态燃烧状态,说明使用斜坡限制域,有潜力实现在宽工况范围内对燃烧不稳定的有效抑制。

4 结 论

本文研究了中心分级燃烧室中分层比为0.5和1.5时限制域形状对火焰结构及燃烧不稳定性的影响,主要结论如下:

(1)分层比为0.5和1.5时,在突扩限制域中均发生了周期性的压力振荡,振幅分别为623Pa和279Pa;而在斜坡限制域中的压力脉动很小,未出现明显的频谱峰值,表明斜坡限制域中未发生燃烧不稳定。

(2)两种限制域中的火焰动态演化存在显著的差异。在突扩限制域中,头部端壁处存在周期性的旋涡脱落,使得火焰产生了规律性的轴向运动及火焰锋面的卷曲。这两种火焰动态所产生的非定常释热与脉动压力相耦合,成为驱动燃烧不稳定的源项。但是斜坡限制域的使用抑制了旋涡脱落,减弱了旋涡对火焰的影响及非定常释热,因此不同相位下的火焰结构未发生明显的变化。

(3)改变主燃级空气流量可以调节延迟时间,突扩限制域中的燃烧状态发生了稳态燃烧与振荡燃烧的转变,而斜坡限制域中始终为稳态燃烧,从侧面说明了火焰响应增益的变化很可能是斜坡限制域抑制燃烧不稳定的原因。

本文的研究表明斜坡限制域有潜力成为在宽工况范围内有效抑制燃烧不稳定的被动控制方法。未来将继续在不同燃料和不同结构的燃烧器中进一步验证斜坡限制域的抑制效果,并开展火焰传递函数的测量,将获得的火焰响应增益带入热声网络模型中,直接确定火焰响应增益对系统热声稳定性的影响。

致 谢:感谢国家科技重大专项和国家自然科学基金的资助。

参 考 文 献

- [1] 黄 勇, 林宇震, 樊未军, 等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [2] Huang Y, Yang V. Dynamics and Stability of Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(4): 293-364.
- [3] Taamallah S, Labry Z A, Shanbhogue S J, et al. Thermo-Acoustic Instabilities in Lean Premixed Swirl-Stabilized Combustion and Their Link to Acoustically Coupled and Decoupled Flame Macrostructures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2014, 35(3): 3273-3282.
- [4] Gotoda H, Nikimoto H, Miyano T, et al. Dynamic Properties of Combustion Instability in a Lean Premixed Gas-Turbine Combustor[J]. *Chaos*, 2011, 21(1).
- [5] Han X, Laera D, Morgans A, et al. Flame Macrostructures and Thermoacoustic Instabilities in Stratified Swirling Flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2018, 37(4): 5377-5384.
- [6] Gounder J D, Boxx I, Kutne P, et al. An Investigation of the Effects of Fuel Staging on Flame Structure in a Gas Turbine Model Combustor[R]. *ASME GT-2013-95520*.
- [7] Temme J E, Allison P M, Driscoll J F. Combustion Instability of a Lean Premixed Pre-vaporized Gas Turbine Combustor Studied Using Phase-Averaged PIV[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(4): 958-970.
- [8] Chtereve I, Foti D, Seitzman J, et al. Flow Field Characterization in a Premixed, Swirling Annular Flow [R]. *AIAA 2012-0450*.
- [9] 王俊懿, 葛宏达, 赵晓敏, 等. 当量比对旋流燃烧室火焰形态与流场影响的激光诊断[J]. *实验流体力学*, 2019, 33(4): 21-26.
- [10] Lee C E, Park S H, Hwang C H. Numerical Study of the Effect of Inlet Geometry on Combustion Instabilities in a Lean Premixed Swirl Combustor[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(11): 5293-5303.
- [11] Meadows J, Agrawal A K. Time-Resolved PIV of Lean Premixed Combustion Without and with Porous Inert Media for Acoustic Control [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(4): 1063-1077.
- [12] Allen J C, Fisher B T, Agrawal A K. Effect of Porous Insert on Flame Dynamics in a Lean Premixed Swirl-Stabilized Combustor Using Planar Laser-Induced Fluorescence[R]. *AIAA 2016-0242*.
- [13] 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.
- [14] Song H, Han X, Lin Y, et al. The Effect of the Corner Recirculation Zone on Separated Stratified Swirling Flames and Combustion Instabilities [R]. *ASME GT-2019-90436*.
- [15] Song H, Lin Y, Han X, et al. The Thermoacoustic Instability in a Stratified Swirl Burner and Its Passive Control by Using a Slope Confinement[J]. *Energy*, 2020, 195: 116956.

- [16] Han X, Laera D, Yang D, et al. Flame Interactions in a Stratified Swirl Burner: Flame Stabilization, Combustion Instabilities and Beating Oscillations [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 212: 500–509.
- [17] Dasch C J. One-Dimensional Tomography: A Comparison of Abel, Onion-Peeling, and Filtered Back Projection Methods[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(8): 1146–1152.
- [18] 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.
- [19] Glassman I, Yetter R A. *Combustion*[M]. USA: Elsevier, 2008.
- [20] Li J H, Peluso S, Quay B, et al. Effect of Pilot Flame on Flame Macrostructure and Combustion Instability [R]. *ASME GT-2017-64079*.
- [21] Palies P, Durox D, Schuller T, et al. The Combined Dynamics of Swirler and Turbulent Premixed Swirling Flames[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157: 1698–1717.
- [22] Li J, Yang D, Luzzato C, et al. OSCILOS: The Open Source Combustion Instability Low Order Simulator[DB/OL]. <http://www.oscilos.com>, 2014.

(编辑:朱立影)