

掺氢功率比对富氢甲烷燃烧振荡特性的影响*

昌运鑫¹, 宋恒², 韩猛¹, 刘玉治², 韩啸¹, 林宇震¹

- (1. 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;
2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘要: 为探究工程应用中富氢甲烷对燃烧振荡的影响, 在北航BASIS燃烧器上针对富氢甲烷的中心分层火焰展开实验研究。分析主燃级当量比、预燃级当量比、主燃级掺氢功率比(氢气功率与主燃级燃料功率的比值)对燃烧振荡的影响。保持预燃级空气流量为2g/s, 主燃级空气流量为10g/s, 围绕主燃级当量比、预燃级当量比、主燃级掺氢功率比进行24个工况下的128组试验。试验对火焰压力脉动的振幅与频率进行测量, 并结合火焰宏观形状进行分析研究, 发现对于大多数当量比的工况, 富氢甲烷火焰都处于同一模态, 出现火焰分层现象但不产生燃烧振荡。主燃级当量比 $\phi_{\text{main}}=0.6$ 与0.55时, 富氢甲烷火焰脉动振幅随掺氢比加大, 先增后减, 分别有42%和32%的工况发生燃烧振荡。 $\phi_{\text{main}}=0.5$ 时, 燃烧振荡只在高预燃级当量比(ϕ_{pilot})、高掺氢比时发生, 仅有7%的工况出现燃烧振荡。因此, 为实现更大的减碳比例, 在不改变燃烧器构型的情况下, 大掺氢功率比燃烧需要工作在主燃级和预燃级非常贫油的条件下。在部分工况中, 掺加氢气可以在一定程度上减弱热声振荡的强度。

关键词: 富氢甲烷; 燃烧振荡; 分层旋流火焰; 贫油燃烧; 掺氢功率比

中图分类号: V231.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2023)01-210673-14

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210673

Effects of Hydrogen Power Ratio on Combustion Oscillation Characteristics of Hydrogen-Enriched Methane

CHANG Yun-xin¹, SONG Heng², HAN Meng¹, LIU Yu-zhi², HAN Xiao¹, LIN Yu-zhen¹

- (1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-Thermodynamics, Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-Thermodynamics, School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to explore the impact of hydrogen-rich methane on combustion oscillations in engineering applications, experimental research was carried out around the centrally-staged flame of hydrogen-rich methane on the BASIS burner. The effects of main stage equivalent ratio, pilot stage equivalent ratio, and the hydrogen power ratio of main stage on combustion oscillation are conducted and analyzed. In this study, the air flow of pilot stage is 2g/s and that of main stage is 10g/s. 128 groups of tests under 24 working conditions are carried out with three major varying parameters: equivalence ratio of main stage, equivalence ratio of pilot stage and hydro-

* 收稿日期: 2021-09-21; 修订日期: 2022-05-17。

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0004-0028); 国家自然科学基金(52106128)。

作者简介: 昌运鑫, 博士生, 研究领域为航发燃烧室掺氢燃烧。

通讯作者: 韩啸, 博士, 副研究员, 研究领域为燃烧振荡机理与控制。E-mail: hanxiaoflame@buaa.edu.cn

引用格式: 昌运鑫, 宋恒, 韩猛, 等. 掺氢功率比对富氢甲烷燃烧振荡特性的影响[J]. 推进技术, 2023, 44(1): 210673. (CHANG Yun-xin, SONG Heng, HAN Meng, et al. Effects of Hydrogen Power Ratio on Combustion Oscillation Characteristics of Hydrogen-Enriched Methane[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(1):210673.)

gen power ratio. The pressure fluctuation is measured and analysed combining with the flame macrostructure. It is found that under most of the equivalence ratio conditions, hydrogen-enriched flame occurs in the same thermoacoustic mode, and the flame stratification is obvious with no combustion instability. When $\phi_{\text{main}}=0.6$ and 0.55 , the pulsation amplitude of hydrogen rich methane flame increases first and then decreases with the increase of hydrogen power ratio. Combustion oscillation occurs under 42% and 32% working conditions respectively. When $\phi_{\text{main}}=0.5$, combustion oscillation occurs only under high ϕ_{pilot} and high hydrogen power ratio, and combustion oscillation occurs only under 7% working conditions. In order to achieve higher carbon reduction ratio, the combustor should be carried out under very lean combustion conditions of the main and pilot stage to avoid strong combustion instabilities. And in some working conditions, adding hydrogen can weaken the intensity of thermoacoustic oscillation.

Key words: Hydrogen-enriched methane; Combustion oscillation; Stratified swirl flame; Lean combustion; Hydrogen power ratio

1 引言

我国是以煤炭为主的化石能源消费大国。大量化石能源的消耗导致二氧化碳排放激增,对全球变暖造成深远影响。2020年,中国政府向世界做出庄严承诺:中国将提高自主贡献力度,力争使得中国的CO₂排放量在2030年前达到峰值,在2060年之前实现碳中和^[1]。因此,减碳增效是大势所趋。在众多燃料中,氢气是最具减碳潜力的替代燃料,排放性能优秀,制备方式多样且日趋成熟,能够缓解石油紧缺的严峻形势。

研究开发可燃烧富氢气体燃料运行的重型燃气轮机和航空发动机是全球减碳排放的一个重要途径^[2]。目前西门子(Siemens Energy AG)、三菱(MHPS)以及安萨尔多能源公司(Ansaldo Energia)等国际巨头都致力于掺氢、燃氢的重型燃气轮机研发,并且已有机型投入燃气轮机发电厂应用^[3]。为降低NO_x与CO的排放,当下航空发动机流行采用贫油预混预蒸发(LPP)技术。但在实际工程应用中,贫油预混燃烧(LPM)燃烧室工作在熄火边界工况,受到来流扰动时容易产生较大释热脉动,进而引发燃烧振荡现象^[4],对燃烧器造成破坏。同时由于氢气具有低点火能、高燃烧速度和高扩散率等特点^[5],在大量添加氢气后,火焰燃烧更为剧烈,绝热火焰温度提升,点火延迟时间缩短,更容易造成燃烧振荡现象,进而对燃气轮机造成重大破坏。因此研究富氢甲烷燃烧振荡特性意义重大^[6]。

目前已经有较多学者针对掺氢甲烷燃烧的理化特性进行仿真与试验探究。尚融雪等^[7]发现,随着掺氢比例的提升,燃烧产物的温度(绝热火焰温度)不断增大。焦琦等^[8]使用定容燃烧弹研究了不同初始

压力下天然气-氢气-空气混合气的火焰传播规律。研究发现:不同的初始压力下,掺氢后层流燃烧速率和质量燃烧流量都迅速增大,且掺氢对提高混合气的燃烧速率更为有利。刘晓佩^[9]采用CHEMIKIN的均相反应器,仿真模拟发现自动点火延迟时间随着掺氢比例的提升而缩短,且自动点火延迟时间近似于指数形式缩短。Zhang等^[10]实验研究了掺氢甲烷在激波管中的点火延迟时间变化情况。实验表明掺氢比40%时,点火延迟时间与 $p^{-0.5}$ 成比例,这主要是因为氢气含量越高反应活化能越低,当掺氢比达到80%甚至是100%时,点火延迟时间主要与压力有关。

Kim等^[11]在燃烧室恒定热负荷(5.81kW)下,对氢气质量占比为4%与9%的掺氢甲烷进行试验,发现较低浓度的氢气可抑制燃烧振荡现象。Gorkem等^[12]发现掺入氢气功率占燃料总功率1%~2%时可抑制掺氢甲烷的燃烧振荡现象,并对每种燃烧状态拍摄50张快照,对火焰的CH*信号进行处理,获得了火焰宏观结构照片。Shilong Guo等^[13]研究掺氢比例对钝体和涡流火焰稳定性的影响,发现氢气的加入会降低火焰附着的轴向速度波动,增强火焰的附着性。Emadi等^[14]研究发现,在甲烷中掺加体积比为20%和40%的氢气时,提高了约7%和35%的吹熄极限。

本文以北航BASIS(Beihang Axial Swirler Independently-Stratified Burner)燃烧器为研究对象,探究主燃级不同掺氢功率比对富氢甲烷分层旋流火焰燃烧振荡的影响,探索在不改变燃烧器原有结构的情况下,通过掺氢功率比和主、预燃级当量比的调整实现大比例掺氢工况运行,为实际工程应用提供参考。

2 实验设计

2.1 实验系统

图1为本实验采用的北航BASIS燃烧器实验平台系统图,主要分为燃烧器、空气供给模块、甲烷供给模块和氢气供给模块。空气从储气罐流出后分为两路,由Alicat质量流量控制器(MFC, Mass flowrate controller)调节流量。BASIS燃烧器采用中心分级结构,由内至外分别是预燃级路、主燃级路。主燃级空气采用量程为0~2000L/min,精度为1L/min的MCR-Series系列质量流量计控制,预燃级空气采用量程为0~200L/min,精度为0.1L/min的MCR-Series系列质量流量计控制。如图1所示,甲烷供给也分预燃级路、主燃级路,其中预燃级和主燃级甲烷分别与空气汇入混合器,经过充分混合后再分别进入预燃级和主燃级旋流通道。

本实验的压力测量系统为高频采集,在主燃级旋流通道安装了两个动态压力传感器(PCB, 112A22),位置如图1中S1和S2所示,分别在火焰筒端壁平面上游80mm与120mm处。预燃级入口距主燃级入口90mm, S1距主燃级入口端面120mm。采用NI9215采集模块收集压力脉动信号,采集频率为20kHz。采用尼康D610摄像机进行火焰宏观图像采集,相机镜头距离玻璃筒外壁距离为345mm,快门时间为1/15s,光圈为F1.8,ISO值为1600。

2.2 实验对象

BASIS燃烧器为中心分级旋流燃烧器,可产生同心旋流预混火焰,包括了中心体(Centerbody)、预燃级轴向旋流器(Inner Swirler)、主燃级轴向旋流器(Outer Swirler)、台阶隔离段(Lip)四大模块。其中预燃级旋流器包含8个叶片,叶片角度设计为 40° ,预燃级旋流数为0.56;主燃级旋流器包含20个叶片,其叶

片角度设计为 30° ,旋流数为0.50。旋流器的下游端面于燃烧室的入口平面的距离30mm。旋流器的具体尺寸结构如图2所示。

实验时为获取清晰的火焰图像,需要避免火焰和系统声模态产生自激振荡,因此采用长度 $L_c=200\text{mm}$,直径 $D_c=100\text{mm}$ 的光学玻璃管道作为火焰限制域和光学区域。而在测量富氢甲烷的燃烧振荡特性时采用长度 $L_c=800\text{mm}$,直径 $D_c=100\text{mm}$ 的光学玻璃管道,激发燃烧振荡,进而获得燃烧振荡的振幅与对应频率。

2.3 实验工况

当量比 ϕ 定义为燃料的燃气比与化学恰当比的比值;定义掺氢比为掺氢功率比HPR(Hydrogen power ratio)即:主燃级掺混氢气与主燃级总燃料的功率比值;减碳比CRR(Carbon reduction ratio)定义为:与纯甲烷燃烧相比,燃烧等功率的掺氢甲烷减少的二氧化碳排放占比。减碳比越高则说明减碳效果越好。其中,main代表主燃级,而pilot代表预燃级。实验采用完全预混燃烧,主燃级通入完全混合的甲烷-氢气-空气预混气,预燃级通入完全混合的甲烷-空气预混气,主燃级空气流量为10g/s,平均空气流速为6.2m/s,预燃级空气流量为2g/s,平均空气流速为5.9m/s。

本实验主要为燃气轮机掺氢燃烧的工程应用提供实验探究,并进行初步分析。为方便量化掺氢方案的减碳效果燃氢效率,引入“减碳比”以及与功率相关联的“掺氢比”。以燃烧器总功率19.21kW,主燃级功率为17.56kW,主燃级当量比为0.6为例,当掺氢比为0时,主燃级为纯甲烷燃烧,此时总减碳比为0。当掺氢比为5%时,即主燃级内氢气燃烧的功率达到了0.878kW,而此时的总减碳比为4.55%,当掺氢比为20%时,总减碳比可达到18.2%。具体比例如表1

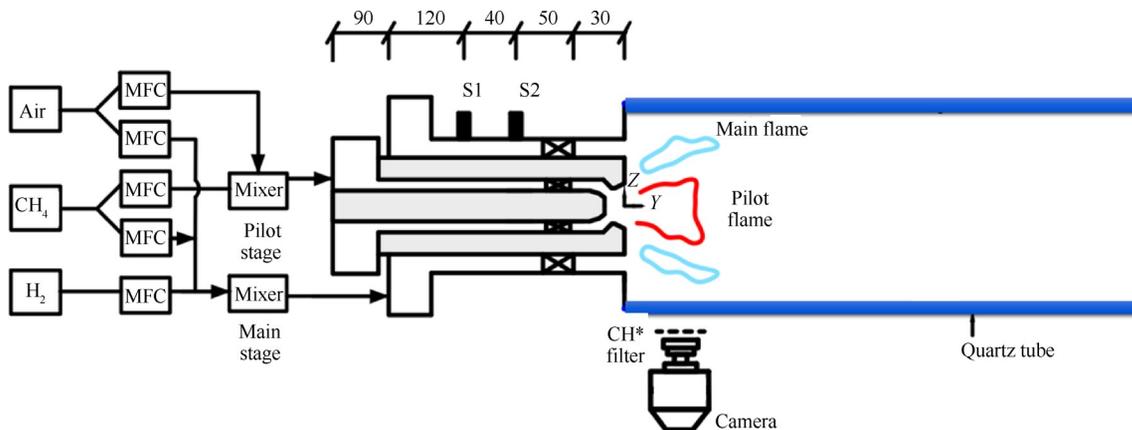


Fig. 1 Schematic of experimental system of BASIS (mm)

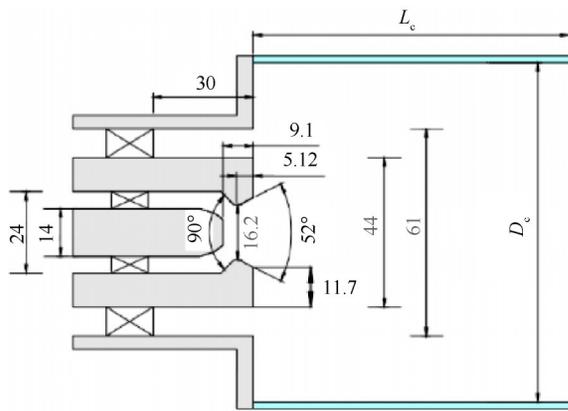


Fig. 2 Configuration of BASIS burner swirler (mm)

所示。

采用功率占比定义掺氢比不仅在工程上意义更大,而且由于氢气密度小、热值高,相对于掺氢流量比与掺氢体积比,采用功率占比定义掺氢比更加贴合实际。当主燃级掺氢功率比为20%时,在相同工况下,掺氢流量比为9.5%,掺氢体积比为45.7%,两者差距近5倍。

Table 1 CRR under various working conditions with $\phi_{\text{main}}=0.6$

Condition	$\dot{m}_{\text{main,air}}/(\text{g/s})$	HPR/%	$\dot{m}_{\text{main,CH}_4}/(\text{g/s})$	$\dot{m}_{\text{main,H}_2}/(\text{g/s})$	CRR/%
1	10.0	0	0.39	0	0
2	10.0	5	0.37	0.007	4.55
3	10.0	10	0.35	0.015	9.1
4	10.0	15	0.33	0.022	13.6
5	10.0	20	0.32	0.029	18.2

本实验设计的所有工况如表2所示,本文主要研究对象为主燃级掺氢功率比对燃烧振荡的影响,所有实验组的进口流量条件为常温常压(300K,0.1MPa)。本实验共分为三个大组,每组的主燃级当量比分别对应为0.6,0.55,0.5,而预燃级当量比为各组工况下的小变量,从0.3~1.2不等,步长为0.1,对于每组工况,各实验组主燃级的总热功率保持不变。

Table 2 Test conditions

Operating condition	$\dot{m}_{\text{pilot,air}}/(\text{g/s})$	$\dot{m}_{\text{main,air}}/(\text{g/s})$	Hydrogen power ratio/%	ϕ_{main}	ϕ_{pilot}
1	2.0	10.0	0~20	0.60	0.3~1.2
2	2.0	10.0	0~20	0.55	0.5~1.1
3	2.0	10.0	0~25	0.50	0.5~1.1

3 结果与讨论

3.1 宏观火焰结构

火焰图像采用带有CH*滤镜的尼康D610单反相机拍照获取。由于火焰形态具有较大的随机性,而单反相机拍摄的火焰宏观图像是时均图像,可以获得火焰在振荡周期上各相位的平均形态。由于直接在视场中获得的图像相当于三维火焰在二维平面上的叠加,存在一定误差。本实验运用Abel逆变换^[15-16]算法,对单反相机拍摄的宏观火焰图像,采用三点Abel去卷积的数理方法,运用Matlab软件计算处理图像,求解各位置光信号的轴对称分布情况,进而求得火焰中心平面上各点的光信号,还原掺氢甲烷燃烧火焰中心平面的二维图像。获取火焰的二维投影图像主要在于能够初步探究掺氢甲烷火焰释热的真实区域范围,进而研究其宏观火焰结构与燃烧振荡机理。

图3是在主燃级当量比为0.6,预燃级当量比为1.0的工况下,掺氢甲烷宏观形态随着掺氢比的变化情况。上半部分为经过阿贝尔逆变换所得的图像,下半部分为单反相机拍照所得原图,从左到右的功率掺氢功率比(HPR)为0,5%,10%,15%,20%。

由图3可以看出,掺氢甲烷燃烧原图与Abel逆变换后得到的图像的火焰轮廓总体形态非常接近,这说明两者都可以较为真实地表征火焰外围总体形态。这主要由于在火焰边缘,火焰厚度较小,火焰叠加信号不多,所以单反相机拍摄的火焰图像与实际火焰中心的图像较为接近。但由于直接拍摄的掺氢甲烷燃烧火焰图像是三维火焰在二维平面上的叠加,终究无法准确地表征掺氢甲烷火焰的真实结构。比如在越接近旋流火焰中心的地方,旋流火焰的释热量应当较小,而在原图中心亮度较大。这主要是因为越靠近燃烧火焰中心的地方火焰厚度越大,三维火焰场投影在平面上的叠加量也就更大。所以可以判断,采用Abel逆变换处理拍摄图像,可以很好地克服三维火焰叠加导致图像失真的问题,更加真实地表征掺氢甲烷火焰的宏观形态。

本实验针对不同主燃级当量比(0.5~0.6)、预燃级当量比(0.3~1.2)和主燃级掺氢功率比(0~25%)的实验工况进行了实验探究。为了更好地获取分层旋流火焰的图像,在用单反相机拍摄进行掺氢甲烷的分层旋流火焰结构时,本实验采用长度为200mm的石英火焰筒进行试验。采用Abel逆变换对所得图像进行后处理。为便于比较火焰亮度,计算出Abel逆

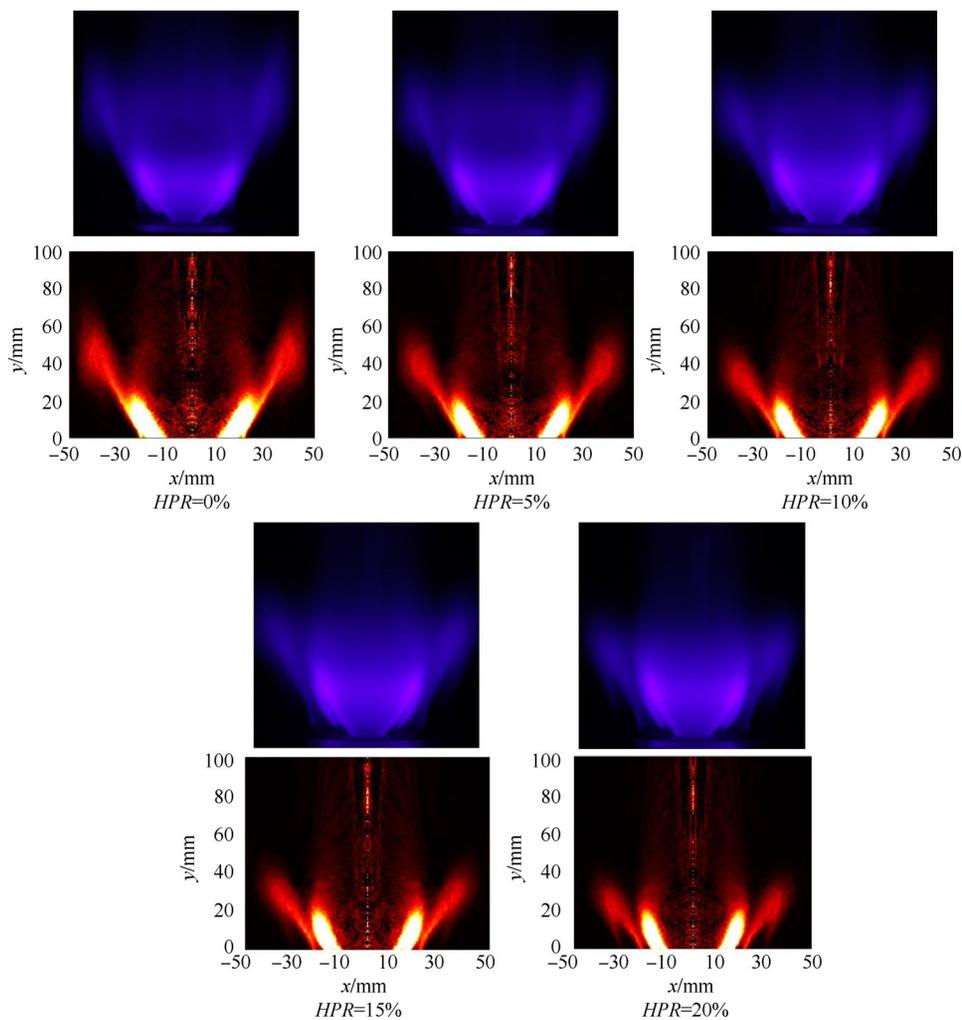


Fig. 3 Comparison between the original diagram of hydrogen-methane flame and that after Abel inverse transformation with $\phi_{\text{main}}=0.6$ and $\phi_{\text{pilot}}=1.0$

变换处理后得到图片的指定区域内像素点亮度之和。如图 4 所示,通过比较蓝色方框内像素点亮度之和来衡量各火焰的亮度与释热率。

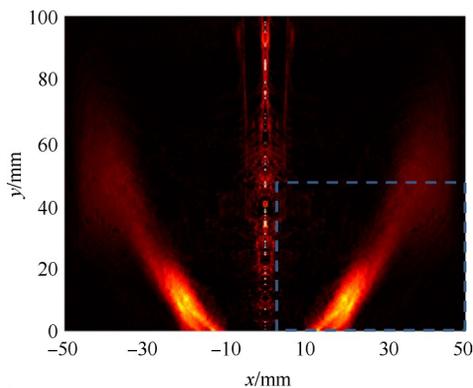


Fig. 4 Schematic diagram of flame brightness estimation

图 5 与图 6 是主燃级当量比为 0.5, 预燃级当量比为 0.5~0.8 时, 各掺氢比 Abel 逆变换后获得的火焰分层旋流图像。可见当预燃级当量比较小时, 掺氢甲

烷火焰为脱体火焰(L), 且释热率较低, 不易发现。当掺氢比增大时, 火焰长度变短, 释热中心(图 5 中圆圈部分)不断下移。当预燃级当量比增大时, 释热率明显增强, 稳火中心下降且逐渐形成分层旋流火焰。此时随着掺氢比例增大, 火焰逐渐变窄。

图 7 为主燃级当量比为 0.5, 预燃级当量比为 0.9 与 1.2 时, 各掺氢比工况在 Abel 逆变换后获得的火焰分层旋流图像。此阶段的掺氢甲烷火焰都为较标准的分层旋流火焰, 当预燃级当量比增大时, 火焰长度略微变短, 释热中心高度基本不变, 但回流区释热率明显增强, 且由宽 V 型变为窄 V 型。当掺氢比例增大时, 火焰释热率增强, 稳火中心下降, 此时随着掺氢比例增大, 火焰逐渐变短。

本实验对主燃级当量比为 0.6 的各工况火焰图像进行了处理, 如图 8 和图 9 所示, 可以发现当主燃级当量比从 0.5 提升至 0.6 时, 各工况的释热率有明显提升。具体表现为各 Abel 逆变换图像的火焰亮度

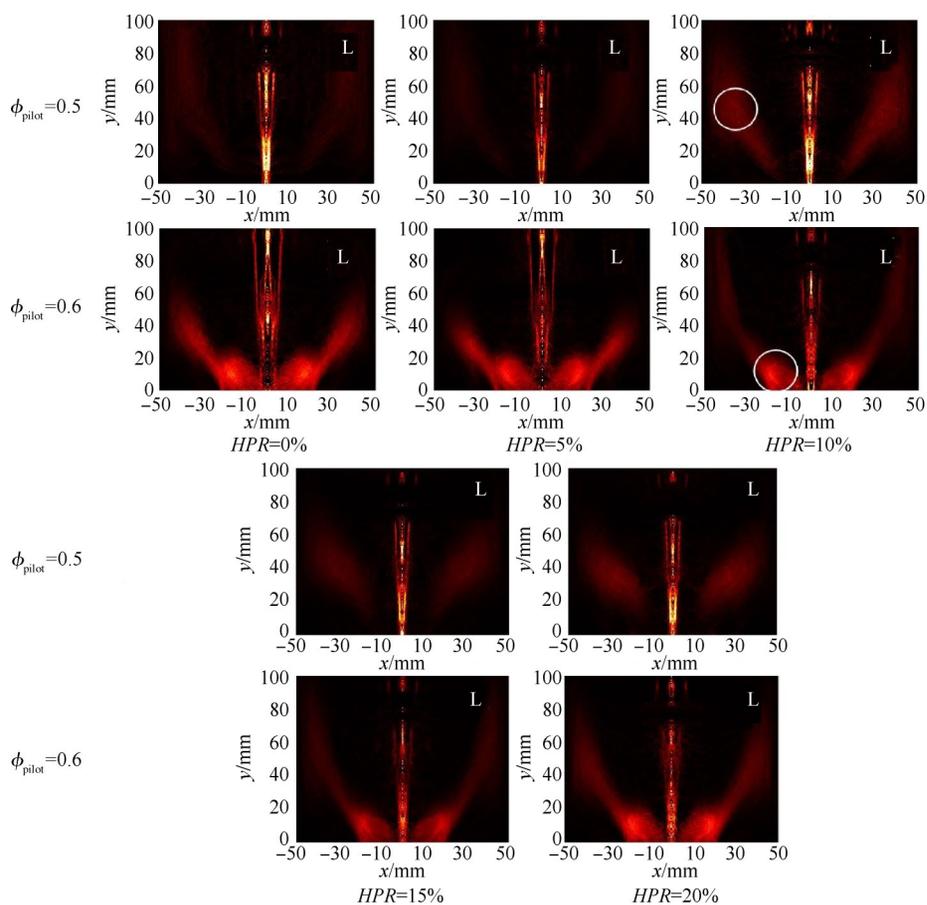


Fig. 5 Abel inverse transform images of each hydrogen power ratio with $\phi_{main}=0.5$, $\phi_{pilot}=0.5, 0.6$

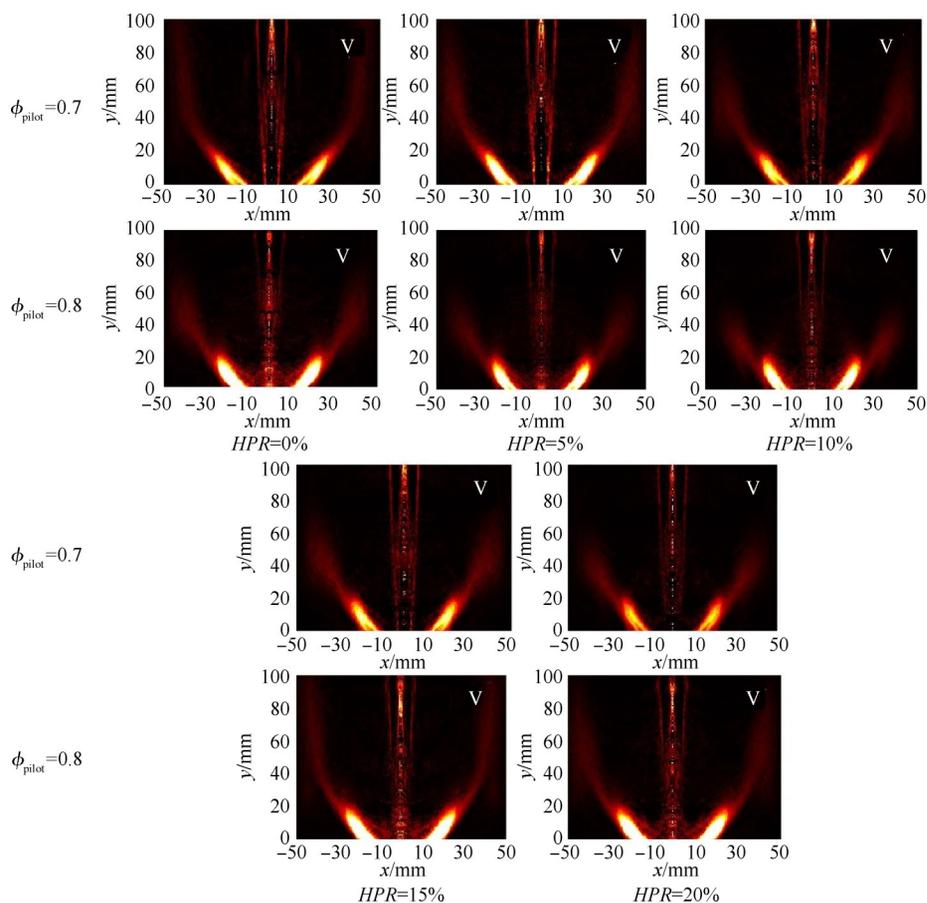


Fig. 6 Abel inverse transform images of each hydrogen power ratio with $\phi_{main}=0.5$, $\phi_{pilot}=0.7, 0.8$

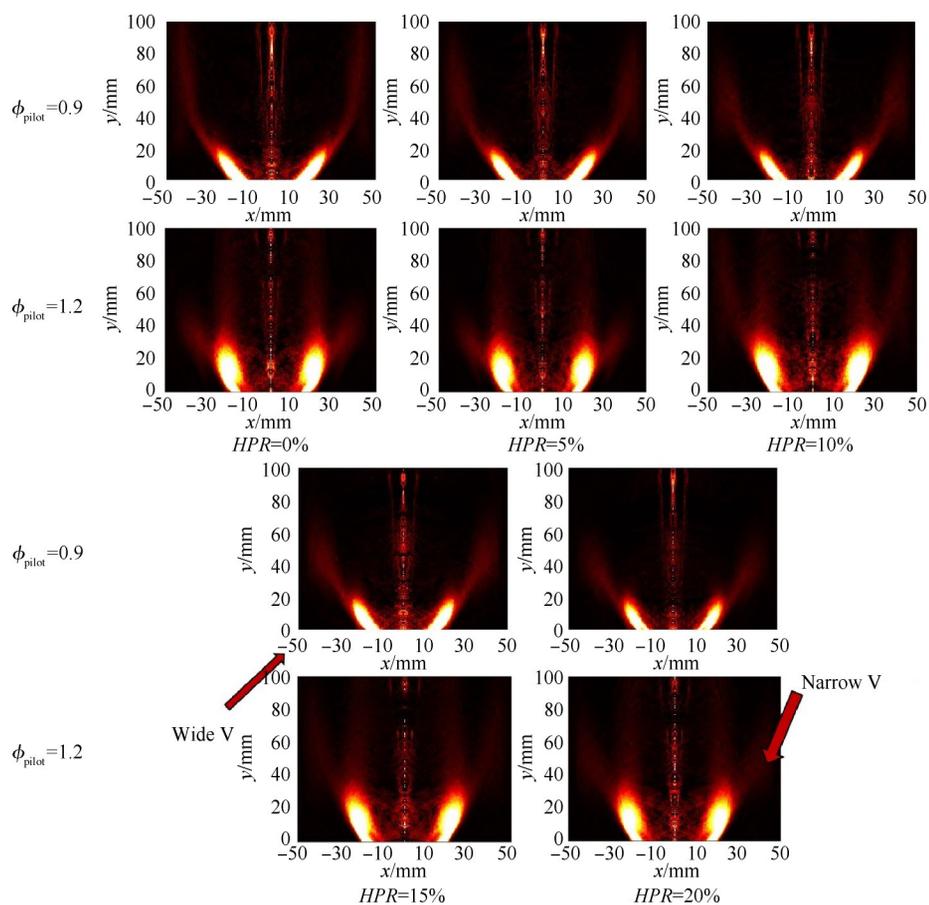


Fig. 7 Abel inverse transform images of each hydrogen power ratio with $\phi_{main}=0.5$, $\phi_{pilot}=0.9, 1.2$

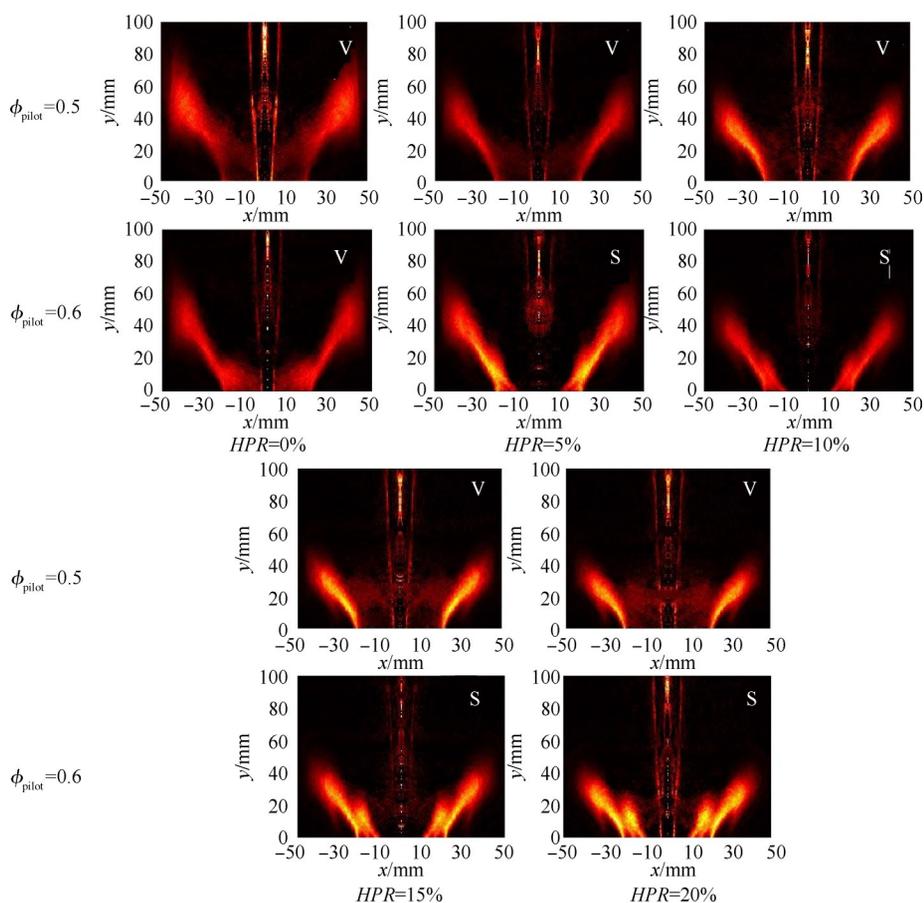


Fig. 8 Abel inverse transform images of each hydrogen power ratio with $\phi_{main}=0.6$, $\phi_{pilot}=0.5, 0.6$

提升,释热区域面积有所提升。预燃级当量比较低时,掺氢甲烷仍然表现为脱体火焰(L),随着预燃级当量比的增加,脱体火焰的释热中心开始下降,并逐步形成稳定的分层旋流火焰(S),当预燃级当量比大于0.5时,无论掺氢功率比为多少,火焰均呈现出分层旋流火焰形态。但在同一预燃级当量比下,随着掺氢比的提升,掺氢甲烷燃烧火焰也可由脱体火焰变为更为稳定的分层旋流火焰(S),且火焰长度变短,释热中心下移。

为了对比相同预燃级当量比下,主燃级当量比与掺氢比的变化对分层旋流火焰造成的影响,绘制了预燃级当量比为0.6时,不同工况下的Abel逆变换图像。如图10所示,随着主燃级掺氢比的减小,火焰在燃烧室出口处的火焰强度逐渐减弱,火焰长度拉长,火焰张角下降,且在燃烧室下游的石英管附近也出现了较大面积的释热,这主要是因为点火延迟时间变长的原因。进一步推断,此时掺氢甲烷火焰主要分成两部分:石英管壁附近的环状脱体火焰以及出口处的V型火焰,而随着火焰拉长使得主燃级与预燃级处的台阶稳火性能下降,且主、预燃级交汇段

变窄。

通过对于固定预燃级当量比,对不同主燃级当量比下的火焰进行纵向比较,可以发现当主燃级掺氢比在10%~25%时,三种工况下的火焰外形态较为相似,在旋流器出口处可发现较为明显的两级挂火分层旋流火焰图像,而当掺氢比下降时,主燃级与预燃级交汇区变得更为狭窄,分层旋流火焰开始向V型火焰转变。

从图11中可以看到,当预燃级当量比为0.8时,随着当量比的增长,火焰发光强度总体呈上升趋势。而在本实验的三种当量比对应的三种工况下,与图10对比可知,随着预燃级当量比的提升,火焰释热中心的发光强度在增强,随掺氢比例提升,火焰强度的中心位置先迅速下降,后缓慢下降,这与掺氢后火焰传播速度提升有关。当掺氢比例越大时,火焰长度越短,稳火点下移。同时,总体而言,随着预燃级当量比的增加,三种主燃级工况下对应的掺氢甲烷火焰最终都由脱体火焰变为了稳定的分层旋流火焰。

针对主燃级当量比为0.6,0.55,0.5的三种工况,

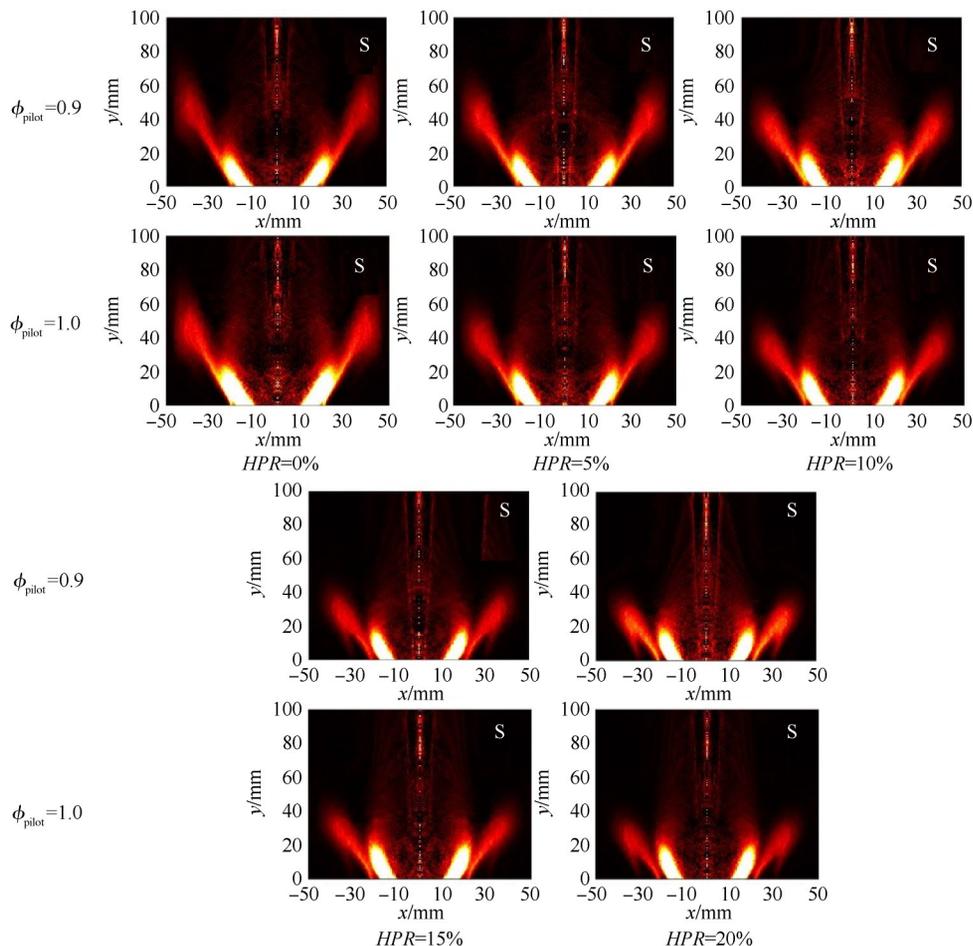


Fig. 9 Abel inverse transform image of each hydrogen power ratio with $\phi_{\text{main}}=0.6$, $\phi_{\text{pilot}}=0.9, 1.0$

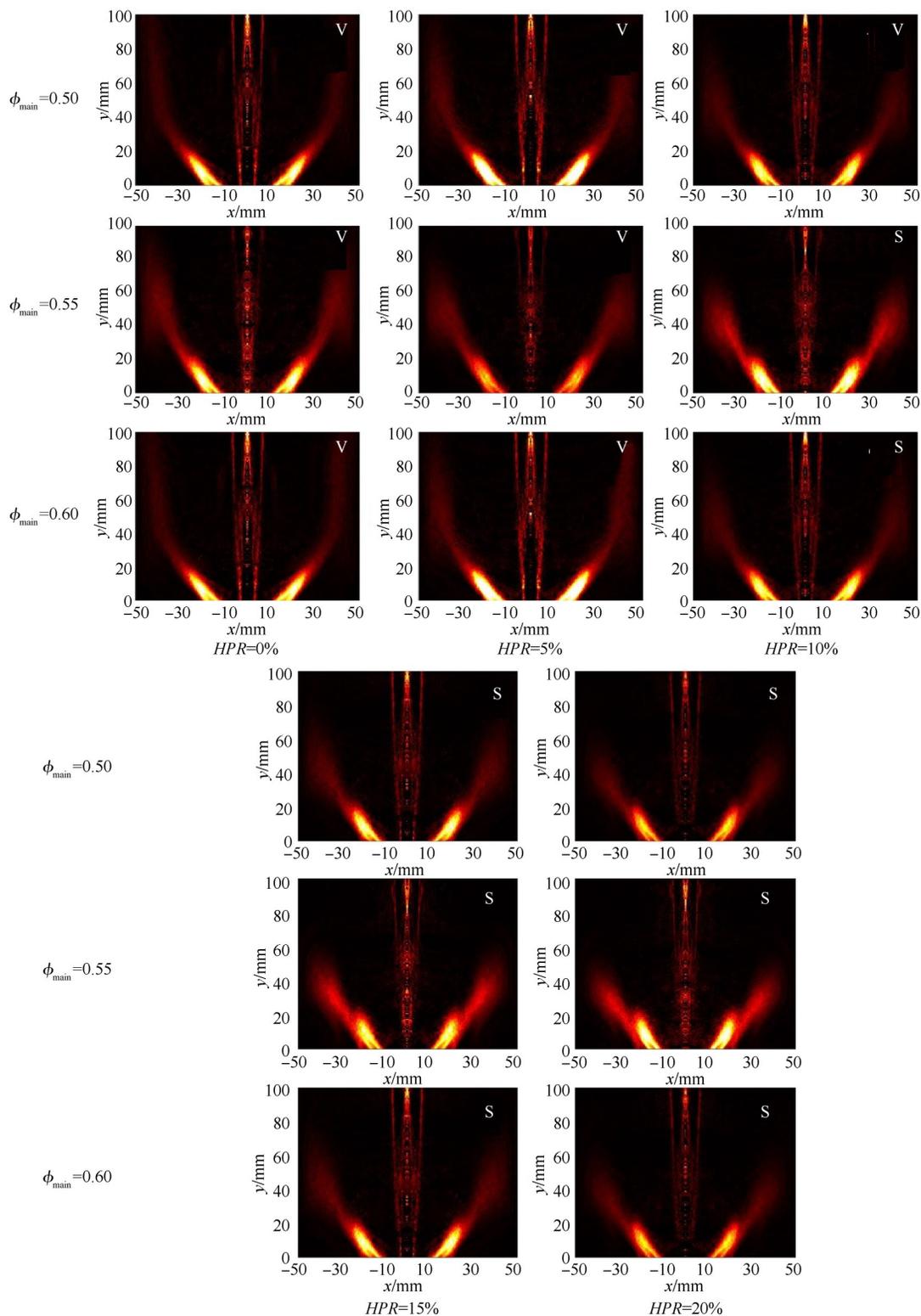


Fig. 10 Abel inverse transform images under different working conditions with $\phi_{pilot}=0.6$

进行CHEMKIN仿真模拟可得到图12。可以发现,在常温常压燃烧条件下,随着当量比的提升,富氢甲烷层流火焰传播速度迅速增加。掺氢比越大,层流燃烧速度加大;掺氢比越越小,火焰传播速度越小。这也解释了为何掺氢比例增大时,释热中心下移,且增大到一定程度后容易发生回火现象。

3.2 典型工况热声振荡特征机理探究

基于前期研究,热声振荡是由释热脉动激发的压力脉动(声波)与燃烧室中压力脉动导致的流速度脉动与释热脉动形成的闭环反馈。在系统耦合作用下,导致压力脉动的幅值迅速增加,达到极限环状态,本小节对部分典型工况进行相空间重构,进而准

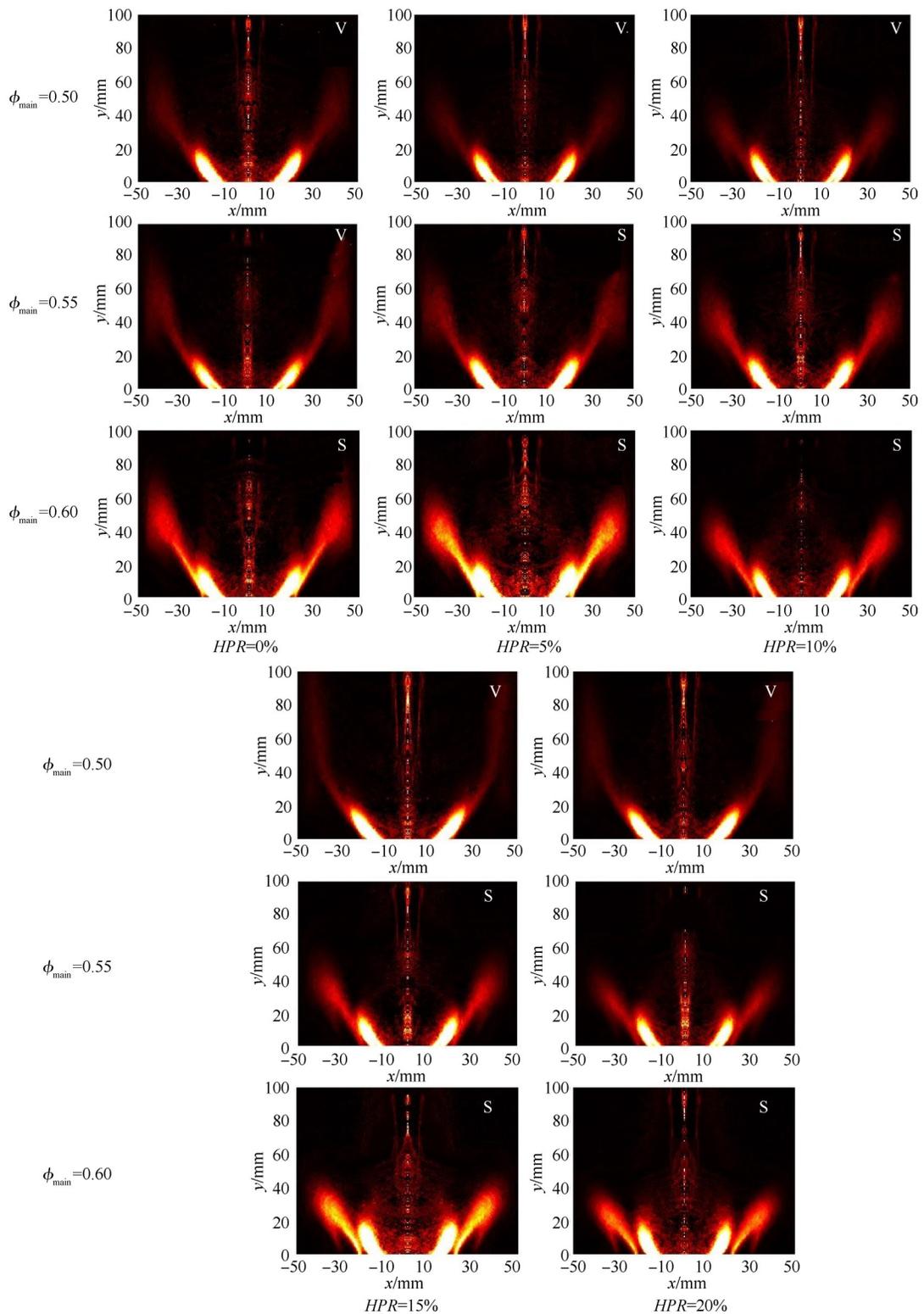


Fig. 11 Abel inverse transform images under different working conditions with $\phi_{pilot}=0.8$

确判断燃烧振荡是否达到了极限环状态。

为了更好地体现对比度,本实验针对主燃级当量比为0.6,预燃级当量比为1.2的工况组进行举例说明。对掺氢功率比为15%的掺氢甲烷燃烧压力脉动数据进行傅里叶快速变化处理后获得频谱图。如图13所示,该工况下的最大压力脉动振幅达到了

4159.7Pa。再利用Matlab软件对其进行相空间重构处理可得到相空间重构图,如图14所示,该工况相空间重构后出现了巨大的极限环,说明此工况产生了极为严重的燃烧振荡现象。

为增大直观感受的对比度,本文对 $\phi_{main}=0.5$, $\phi_{pilot}=1.2$ 工况下掺氢比从0~25%所有工况进行了相

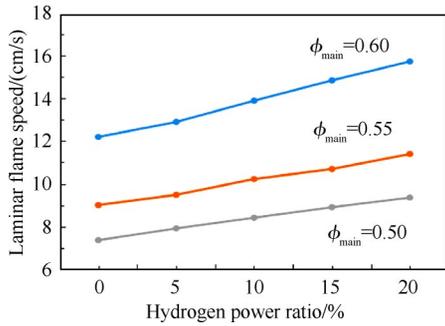


Fig. 12 Effect of hydrogen power ratio on laminar flame velocity

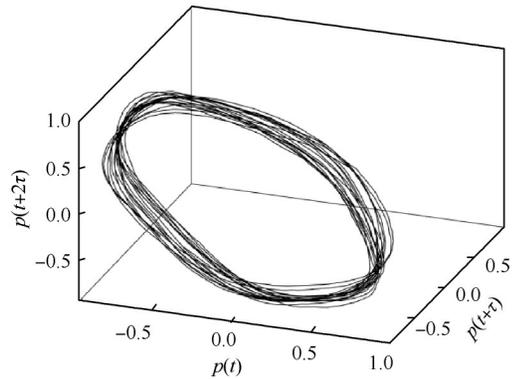


Fig. 14 Phase space reconstruction of pressure fluctuation with $\phi_{main}=0.6, \phi_{pilot}=1.2, HPR=15\%$

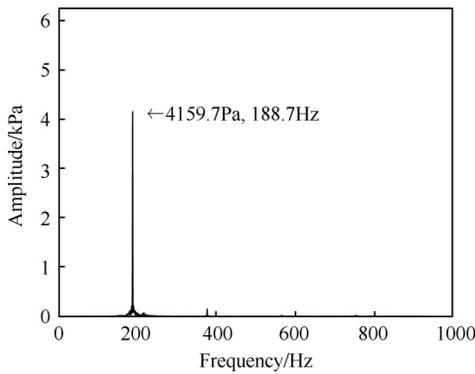


Fig. 13 Spectrum of pressure fluctuation with $\phi_{main}=0.6, \phi_{pilot}=1.2, HPR=15\%$

烧振荡。这也与该工况压力脉动的频率-振幅图(图16)相互印证。当掺氢比小于20%时,压力脉动较小,当掺氢比达到20%~25%时,压力脉动呈现数量级的增长,最大振幅超过400Pa。

对所有实验工况进行相空间重构后发现,无论是主燃级当量比还是预燃级当量比降低,掺氢甲烷的燃烧振荡程度都有显著下降,且主燃级当量比变化时对掺氢甲烷的燃烧振荡程度影响更大。这主要是因为主燃级当量比和预燃级当量比都影响着火焰结构和释热率分布,与声波耦合后更容易造成较大的释热率脉动,从而更容易激发出燃烧振荡。

空间重构处理。图15为汇总后的相空间重构图,其中 $p(t)$ 单位为Pa,可以发现,当掺氢比小于20%时,相空间重构图未能形成闭合的极限环,说明此工况并未激发燃烧振荡。当掺氢比达到20%~25%时,相空间重构后逐渐形成较小的极限环,产生了轻微燃

同时,当主燃级当量比为0.5时,随着掺氢比例的提升,掺氢甲烷燃烧压力脉动最大振幅增加,这主要是因为,在甲烷中掺加氢气后层流火焰速度不断增

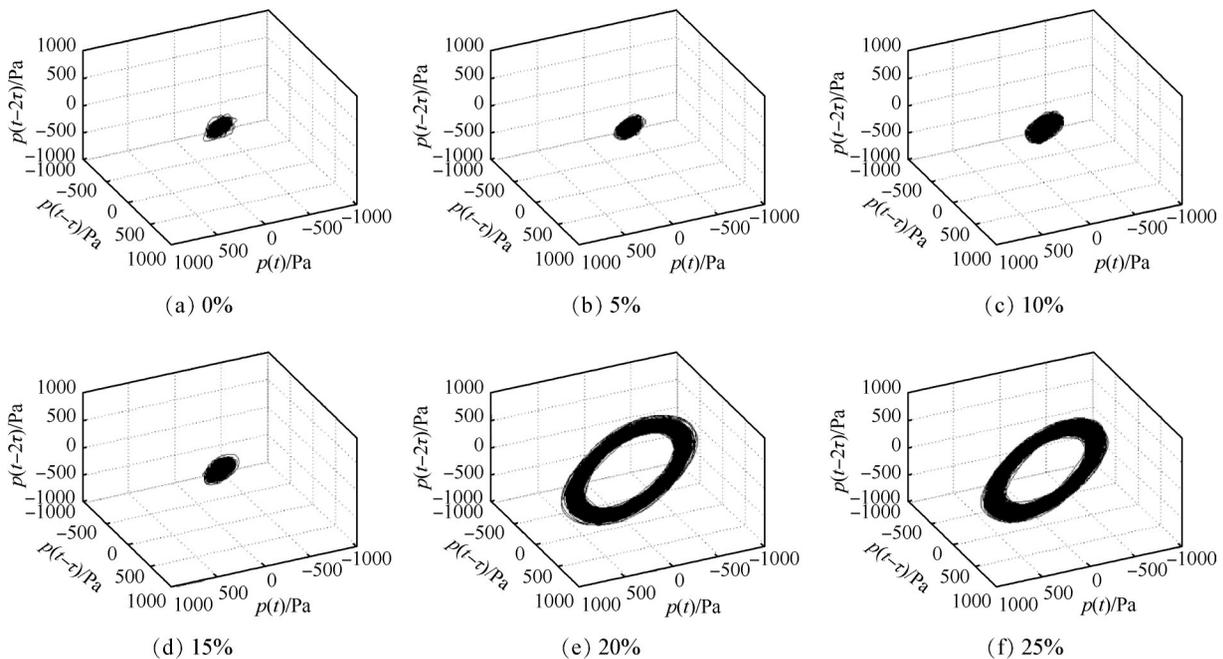


Fig. 15 Phase space reconstruction of pressure fluctuation with $\phi_{main}=0.5$ and $\phi_{pilot}=1.2$

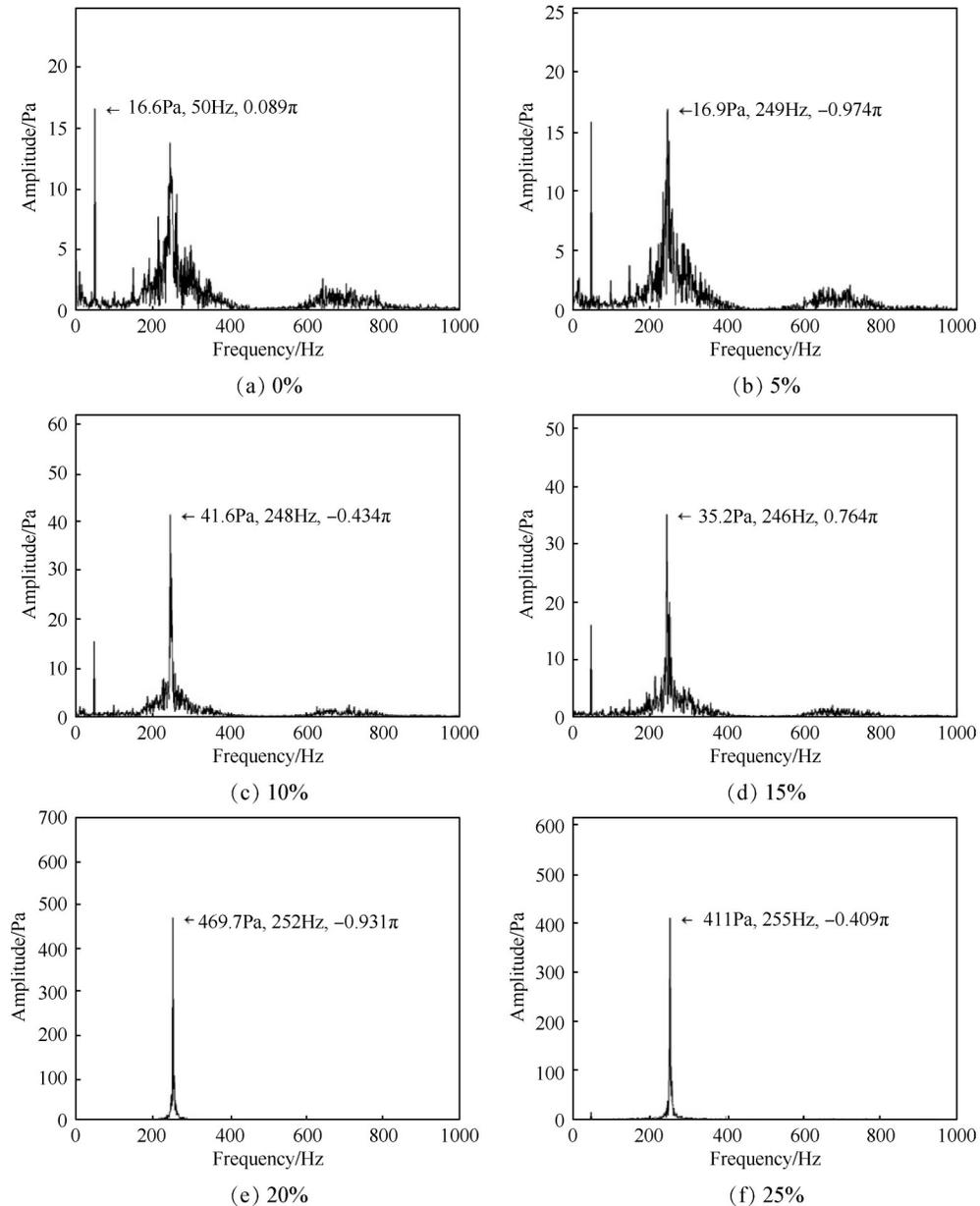


Fig. 16 Spectrum of pressure fluctuation with $\phi_{\text{main}}=0.5$ and $\phi_{\text{pilot}}=1.2$

加,导致火焰长度变短,释热密度增加,同等程度的流动拟序结构造成的释热脉动更大,造成的燃烧振荡加强。

3.3 掺氢甲烷燃烧振荡的参数化研究

为了充分展示各工况下,掺氢比变化对掺氢甲烷燃烧压力脉动的影响,本文绘制了 $\phi_{\text{main}}=0.6$ 时, ϕ_{pilot} 从0.3~1.1,掺氢功率比从0~20%的所有工况燃烧压力脉动的最大振幅柱状图。经过相空间重构处理发现在本次实验所有工况里,最大振幅超过200Pa的工况都能达到极限环状态。如图17可知,主燃级当量比为0.6时,预燃级当量比越大,掺氢甲烷燃烧越容易出现燃烧振荡,发生超过200Pa燃烧振荡的工况比

例为41.7%。预燃级当量比较小时,随着掺氢比例的增加,燃烧振荡越激烈。但当预燃级当量比大于0.5时,随着掺氢比例的增加,燃烧压力脉动的最大振幅无一例外地先变剧烈,随后变得缓和,其中掺氢比为10%是变化的分界线。

主燃级当量比为0.55时,预燃级当量比从0.5~1.1,掺氢功率比从0~20%的所有工况燃烧压力脉动的最大振幅变化如图18所示。此时掺氢甲烷燃烧振荡较难发生。预燃级当量比大于0.7时,掺氢比例达到15%时才出现较为明显的振荡。预燃级当量比大于0.8时,掺氢比例增大,燃烧振荡振幅先增大后减小,掺氢比例为15%时,存在最大值。预燃级当量比

越大,掺氢甲烷燃烧越容易出现燃烧振荡,出现超过200Pa燃烧振荡的工况下降至32.1%。而且各工况的最大振幅都有所下降,这说明要实现大功率掺氢甲烷燃气轮机的应用,可将主燃级当量比适当调低,以缓解燃烧振荡现象的出现。

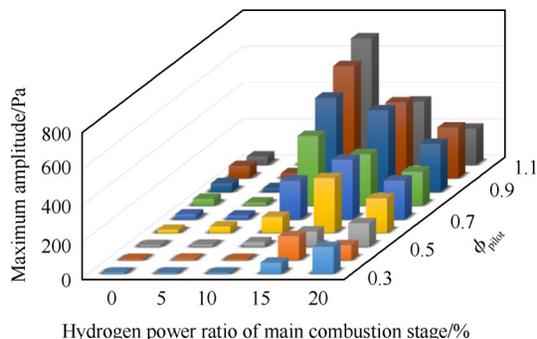


Fig. 17 Maximum amplitude of combustion oscillation with $\phi_{\text{main}}=0.6$

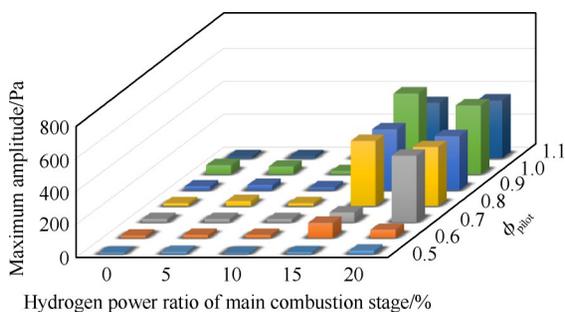


Fig. 18 Maximum amplitude of combustion oscillation with $\phi_{\text{main}}=0.55$

为进一步验证本次试验的发现,接着对主燃级当量比为0.5,预燃级当量比从0.5~1.1,掺氢功率比从0~25%的所有工况压力脉动的最大振幅进行了柱状图绘制。如图19所示,当主燃级当量比为0.5时,掺氢甲烷燃烧振荡更难发生。随着预燃级当量比增大,掺氢甲烷燃烧的燃烧振荡最大振幅先不断增加。当预燃级当量比大于1.1时,振幅先增后减。预燃级当量比越大,掺氢甲烷燃烧越容易出现燃烧

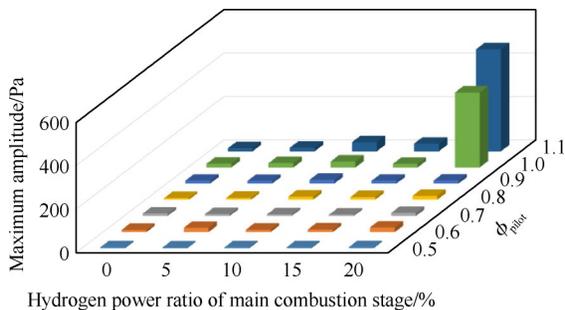


Fig. 19 Maximum amplitude of combustion oscillation with $\phi_{\text{main}}=0.5$

振荡,出现燃烧振荡超过200Pa的工况仅有7.1%。而且各工况的最大振幅都有显著的下降,即使在预燃级当量比达到1或1.1,也仅在掺氢比达到20%才产生振荡。当预燃级当量比为0.5~0.9时,燃烧压力脉动的最大振幅一直未超过20Pa。因此,要实现大功率掺氢甲烷燃气轮机的应用,可将主燃级当量比与预燃级当量比都调低,以缓解燃烧振荡现象的出现。

4 结论

本文在BASIS实验平台上围绕掺氢甲烷的中心分级旋流火焰展开了实验研究。实验中保证主、预燃级空气流量不变,围绕主燃级当量比、预燃级当量比、主燃级掺氢功率比等三个参数进行试验。实验对火焰压力脉动进行高频测量,结合火焰宏观形状、掺氢功率比对层流火焰速度的影响,得出了以下结论:

(1)当预燃级当量比较小时,掺氢甲烷火焰宏观结构表现为脱体火焰,且释热率较低。当燃烧功率不变,随着掺氢比例增大时,火焰长度变短,释热中心不断下移。预燃级当量比增大时,释热率明显增强,释热中心逐渐向上游移动,并开始形成分层旋流火焰,随着掺氢比例的增大,火焰逐渐变窄。

(2)掺氢甲烷的燃烧振荡程度受掺氢比的影响较大。加入少量氢气时燃烧振荡变化不大。随着掺氢比例的提升,掺氢甲烷燃烧压力脉动最大振幅增加,这主要是因为掺氢后层流火焰速度提高,火焰长度变短,释热密度增加,由同等程度的流动拟序结构造成的释热脉动增加,更容易造成燃烧振荡。

(3)当主燃级当量比为0.6,预燃级当量比大于0.5时,随着掺氢比例的增加,燃烧压力脉动的最大振幅均先变剧烈,后变得缓和。其中掺氢比为10%是变化的分界线。当主燃级当量比为0.55时,只有预燃级当量比大于0.7且掺氢比在15%以上才能引起燃烧振荡,而主燃级当量比为0.5时,基本不产生燃烧振荡。

本文的结论可以为燃气轮机实际运行中的燃料分级和匹配参数选择提供参考,即在需要实现大掺氢比燃烧时,主预燃级当量比应尽量低于0.6,以尽量避免产生强烈的燃烧振荡。

致谢:感谢国家科技重大专项与国家自然科学基金的资助;感谢周宇晨博士提供了部分数据处理程序。

参考文献

[1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲

- 话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [2] Hsin-Yi Shih, Chi-Rong Liu. Computational Study on the Combustion of Hydrogen/Methane Blended Fuels for a Micro Gas Turbines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(27): 15103-15115.
- [3] Noble D, Wu D, Emerson B, et al. Assessment of Current Capabilities and Near-Term Availability of Hydrogen-Fired Gas Turbines Considering a Low-Carbon Future [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, 2021, 143(4): 041002.
- [4] Dunn M J, Masri A R, Bilger R W, et al. The Compositional Structure of Highly Turbulent Piloted Premixed Flames Issuing into a Hot Coflow [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 1779-1786.
- [5] Wang J, Huang Z, Tang C, et al. Effect of Hydrogen Addition on Early Flame Growth of Lean Burn Natural Gas-Air Mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(13): 7246-7252.
- [6] Song H, Lin Y, X Han, et al. The Thermoacoustic Instability in a Stratified Swirl Burner and Its Passive Control by Using a Slope Confinement [J]. *Energy*, 2020, 195(15): 1-17.
- [7] 尚融雪, 杨悦, 高俊豪, 等. 掺氢天然气层流火焰传播速度试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(11).
- [8] 焦琦, 苗海燕, 黄潜, 等. 初始压力对天然气-氢气-空气混合气火焰传播特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2009(4): 374-380.
- [9] 刘晓佩. 氢气/天然气混合燃料贫预混旋流燃烧特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016.
- [10] Zhang Y, Huang Z, Wei L, et al. Experimental and Modeling Study on Ignition Delays of Lean Mixtures of Methane, Hydrogen, Oxygen and Argon at Elevated Pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(3).
- [11] Kim H S, Arghode V K. Hydrogen Addition Effects on Swirl Stabilized Methane Flame [C]. *Nevada: Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2007.
- [12] Gorkem Oztarlik, Laurent Selle, Thierry Poinso, et al. Suppression of Instabilities of Swirled Premixed Flames with Minimal Secondary Hydrogen Injection [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 214: 266-276.
- [13] Shilong Guo, Jinhua Wang, Weijie Zhang, et al. Investigation on Bluff-Body and Swirl Stabilized Flames near Lean Blowoff with PIV/PLIF Measurements and LES Modelling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 160: 114021.
- [14] Emadi M, Karkow D, Sdlameh T, et al. Flame Structure Changes Resulting from Hydrogen-Enrichment and Pressurization for Low-Swirl Premixed Methane-Air Flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(13): 10397-10404.
- [15] Seo S. Parametric Study of Lean Premixed Combustion Instability in a Pressurized Model Gas Turbine Combustor [D]. *Pennsylvania: The Pennsylvania State University*, 1999.
- [16] Dasch C J. One-Dimensional Tomography: A Comparison of Abel, Onion-Peeling, and Filtered Backprojection Methods [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(8): 1146-1152.

(编辑:白鹭)