不同速度波动下氢含量变化对氢气-甲烷钝体火焰 燃烧不稳定性的影响*

术

凯、胡锦林、王明晓、钟 毅、赵盛郎、钟英杰 邓

(浙江工业大学 机械工程学院 能源与动力工程研究所,浙江杭州 310014)

要: 针对燃气轮机贫燃预混条件下容易产生燃烧不稳定问题, 探究了不同氢含量对氢气-甲烷 摘 混合气钝体火焰燃烧不稳定性的影响,用于获得燃烧不稳定性的控制方法。通过像增强相机 (ICCD)、 光电倍增管 (PMT)、卡塞格林定点采集等装置获得火焰图像,并借助火焰传递函数描述火焰对声场的 响应特性。由此得到了不同速度波动A下氢气含量变化(0%,10%,20%,40%)对燃烧不稳定性的影 响总规律,并分析了氢含量变化对混合气热释放率的作用机理。实验结果表明:随着速度波动A的增 加,燃烧不稳定性增强。当A较小时,火焰传递函数幅值|H|下降较快;当A大于0.3之后, |H|的下降趋 势趋于平缓,火焰传递函数发生饱和。当A相同时,分别对90Hz和140Hz作用下的火焰研究后得到了相 反的结论。氢气含量的增加导致90Hz作用下的火焰传递函数幅值I用增加;热释放波动的相位与速度波 动的相位相同,并且相位差接近0°,燃烧不稳定性减弱;而140Hz声作用下氢气的加入却使得IHI下降, 并且相位差远离0°,热释放波动与速度波动的跟随性变差,燃烧不稳定性增强。

关键词: 钝体火焰; 燃烧不稳定性; 火焰传递函数; 声场; 热释放波动; 速度波动 中图分类号: V231.2 文章编号: 1001-4055 (2021) 01-0185-07 文献标识码: A DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200200

Effects of Hydrogen Contents Change on Combustion Instability of Hydrogen-Methane Bluff-Body Flame at Different Velocities

DENG Kai, HU Jin-lin, WANG Ming-xiao, ZHONG Yi, ZHAO Sheng-lang, ZHONG Ying-jie

(Institute of Energy and Power Engineering, College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In view of the gas turbine being easy to produce combustion instability problems under the condition of lean burning premixed combustion, the effects of different hydrogen contents on the combustion instability of hydrogen-methane mixture bluff body flame were researched to obtain control method of combustion instability. With the help of the flame transfer function to describe the response characteristics of sound field, several devices were adopted to receive flame picture, such as the image intensifier cameras (ICCD), photomultiplier tubes (PMT) and cassegrain fixed-point sampling device. Thus the general law of influence under different speed fluctuation of 4 hydrogen contents (0%, 10%, 20%, 40%) on the combustion instability was obtained, and the action mechanism of hydrogen content change on the heat release rate of mixture was analyzed. The experiment results

收稿日期: 2020-04-08; 修订日期: 2020-07-06。

基金项目:浙江省自然科学基金(LY18E060012);国家自然科学基金(51106139)。

通讯作者:邓 凯,博士,讲师,研究领域为燃烧动力学和燃烧不稳定性。E-mail: dkai@zjut.edu.cn

引用格式:邓 凯,胡锦林,王明晓,等.不同速度波动下氢含量变化对氢气-甲烷钝体火焰燃烧不稳定性的影响[J].推进 技术, 2021, 42(1):185-191. (DENG Kai, HU Jin-lin, WANG Ming-xiao, et al. Effects of Hydrogen Contents Change on Combustion Instability of Hydrogen-Methane Bluff-Body Flame at Different Velocities [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(1):185-191.)

show that the combustion instability strengthens with the increasing of velocity fluctuation A. When A is smaller, amplitude of flame transfer function |H| reduces rapidly. When A is greater than 0.3, the decline of |H| tends to be flat, and the flame transfer function reaches saturation. Under the same velocity fluctuation, the opposite conclusion is obtained after studying the flame under the action of 90Hz and 140Hz. When the hydrogen content increases es at 90Hz, flame transfer function amplitude |H| increases. The heat release fluctuation is in phase with the velocity fluctuation phase and the phase difference is close to 0°, and the combustion instability is weakened. At 140Hz, the addition of hydrogen makes |H| decrease while the phase difference is far away from 0°. The following variation of heat release fluction and velocity fluctuation is poor, the combustion instability is enhanced.

Key words: Bluff-body flame; Combustion instability; Flame transfer functions; Acoustic excitation; Heat release fluctuation; Velocity fluctuation

1 引 言

目前,贫燃燃烧装置都面临着燃烧不稳定性问题,即热声振荡问题,具体表现为燃烧系统产生了大幅度的压力脉动现象,严重时则会损坏燃烧室的结构如火焰筒、透平^[1]。开展燃烧不稳定性的研究,通过探究其影响因素和内在机理,以寻找提高燃烧稳定性的途径,具有重要的工程意义和理论价值。

前人深入研究了预混燃烧的燃烧不稳定性的影 响因素[2-4],指出燃烧器结构、火焰结构、流场和热化 学状态及时空波动、强迫振幅和频率等对于了解燃 烧不稳定性机理至关重要。赵震等[5]通过实验的方 法研究贫油预混条件下的模型燃烧室,对比分析了 预混气的喷射速度和燃烧室的出口截面积对燃烧不 稳定性发生时频率和幅值的影响。结果显示:增加 预混气的喷射速度会使得频率和幅值都增加;减小 燃烧室出口截面积会使得频率减小而幅值增加。这 表明预混气的喷射速度和燃烧室的出口截面积会影 响燃烧的不稳定模态。刘晓佩等[6]通过对富氢燃料 旋流火焰进行热声振荡的进行研究,得到了化学当 量比*Φ* 和空气的质量流量对燃烧不稳定性的影响。 结果表明:火焰的压力振荡随着Φ的增加存在两个 峰值;空气的质量流量越大,压力的振荡强度越大, 加剧了燃烧不稳定性。杨甫江等[7]以常温常压下的 贫燃预混旋流火焰为研究对象,发现旋流数和掺混 段结构对燃烧不稳定性也会产生影响。具体表现 为:旋流强度越大,压力脉动越大,燃烧不稳定性越 强烈;火焰筒开孔方式对压力脉动有影响。

相关研究表明,碳氢燃料中添加其他可燃性气体,可以大大提高碳氢燃料的燃烧品质,并能改善燃 烧不稳定性问题。甲烷与氢气的混合气可以有效结 合甲烷和氢气的优点,实现燃料的充分燃烧,并满足 低污染的排放标准。有研究表明,加入氢气可以大 大降低甲烷氧化反应的起始温度和着火温度^[8]。 Zhang等^[9]在内径为2mm的T型管内进行了氢气、甲 烷和空气的催化燃烧,发现氢气的加入可以拓宽甲 烷的稳燃极限并提高燃烧效率。张勇等^[10]通过对甲 烷-氢气-空气的火焰传播规律进行研究,结果表明 加入氢气的比例越大,火焰稳定性越差。Law等^[11]研 究发现当掺氢比例增大时,火焰稳定性增强,Gauducheau等^[12]对高温高压下稀薄甲烷-空气-氢气的预 混火焰进行数值模拟,发现加入少量的氢气可以拓 展天然气发动机稳燃范围,这有效地促进了火焰的 稳定燃烧。

然而,目前关于加入氢气后混合燃料燃烧稳定 性方面的研究还不够完善,大部分研究主要集中在 燃烧不稳定性的影响因素和掺加其他可燃成分碳氢 燃料的燃烧性能更优上,都没有深入研究氢气的加 人和氢气含量的变化对火焰燃烧的影响机理。本文 借助像增强型相机(ICCD)、光电倍增管(PMT)和压 力传感器等测量分析装置,通过分析不同速度波动A 不同氢气含量(0,10%,20%,40%)的火焰传递函数 特性,结合CH基自发荧光火焰锋面演化图、典型基 团(OH)浓度分布、火焰局部振荡程度等,深入探究氢 含量变化对预混钝体火焰燃烧不稳定性的影响,从 而为燃烧不稳定性的控制提供相应的参考。

2 实验系统

2.1 实验系统

实验系统主要包括两部分,一是燃烧系统,二是 数据采集系统。实验系统装置如图1所示(同步采集 卡包含于数据收集装置里,Labview软件安装于计算 机上)。燃烧系统由燃烧装置和声发生装置两部分 构成。燃烧装置包括甲烷、氢气和空气由供气系统 输送至混合腔混合后,进入钝体燃烧器。钝体燃烧 器的喷管轴心处放置了一个倒锥形钝体(直径为 8.9mm,倒锥角度为45°,阻塞率为0.45)来稳定火焰, 喷嘴处安置图像采集窗口来观察和采集火焰特征; 声发生装置主要指燃烧器底部的扬声器,作用是模 拟可调节的声场环境。声频率和振幅通过底部放置 扬声器进行独立调节和控制,频率的调节范围为为 0~300Hz,振幅的调节范围为0~0.5。



Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

数据采集系统主要包括热释放采集装置、速度 采集装置和同步采集装置。热释放采集装置包括光 纤、OH基滤波片、光电倍增管 PMT (Hama-mastu R928)、放大器,用于得到热释放波动量;压阻式压力 传感器(CYG140 9T)获得压力波动量并经转化后得 到速度波动量;同步采集装置包括 NI-DAQ 6284 同 步采集卡和 Labview 软件,作用是实现速度波动量和 热释放波动量的同步采集。利用卡塞格林光线定点 采集装置捕捉火焰局部点的自发荧光^[13]来获取火焰 局部的热释放率。

甲烷-氢混合气的化学计量关系式为

$$(1 - \alpha)CH_4 + \alpha H_2 + (2 - \frac{3}{2}a)(O_2 + 4N_2) \rightarrow (1)$$

(1 - \alpha)CO_2 + (2 - \alpha)H_2O + 4(2 - \frac{3}{2}a)N_2 (1)

式中,α=η(H₂)/(η(H₂)+η(CH₄))为混合气中氢 的摩尔分数,而η为气体的物质的量。为了消除化学 当量比变化对测量结果分析产生的影响,当改变氢 气含量时,采用式(2)通过调整空气流量来保持混合 气的当量比不变。

$$\Phi = \frac{\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}}}{\left(\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}}\right)_{\text{stoich}}} = \left(\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}}\right) \cdot \frac{\left(2 - \frac{3}{2}\alpha\right)\left(M_{\text{O}_2} + 4M_{\text{N}_2}\right)}{(1 - \alpha)M_{\text{CH}_2} + \alpha M_{\text{H}_2}} \quad (2)$$

式中**Φ**为燃料混合气的总流量,m为气体质量, M为气体的摩尔质量。具体实验工况如表1所示。

2.2 分析方法

2.2.1 时域 P-P法速度测量

P-P法速度测量的原理图如图2所示。





两个传声器与声学中心的连线方向与声波的传播方向 r 一致, C 点为传声器 A 与 B 的声学中心连线的中点, r 为点与声源之间的距离, Δr 为两个传声器与之间的距离。

压阻式压力传感器测量得到管内的实时压力波动,将压力波动进一步转化成速度波动。速度与压力之间的转换关系为

$$u_{r}(t) = -\frac{1}{\rho_{0}} \int \frac{P_{B}(t) - P_{A}(t)}{\Delta r} dt \qquad (3)$$

2.2.2 火焰传递函数及局部火焰传递函数

通过构建压力波动与热释放量波动之间的关系 得到火焰传递函数 H(f,A),用于反映整个燃烧系统

Table1 Exper	imental conditions
--------------	--------------------

Number	Hydrogen content /(mL/min)	Methane content (mL/min)	Equivalence ratio	Sound frequency <i>f</i> /Hz	Velocity fluctuation
1	0	1000		90	0~0.3
2	100	900	0.0		
3	200	800	0.8	140	0.05
4	400	600		140	0~0.5

Annotation: The velocity fluctuation is the ratio between the pressure amplitude and the average velocity after the amplitude is converted to the velocity amplitude.

The equivalence ratio stays at 0.8 and the total fuel flow remains unchanged at 1000mL/min

的不稳定性特征[14-16],表达式为

$$H(f,A) = \frac{Q^{\prime(f)}/\langle Q \rangle}{U^{\prime(f)}/\langle U \rangle}$$
(4)

式中,f是声场频率;A是速度波动,A=U'(f)/〈U〉; 〈Q〉和〈U〉分别是指热释放量和速度的平均值。 Q'(f)是指f频率下的瞬态热释放波动量;U'(f)是指 在f频率下的瞬态速度波动量。Q'(f)和U'(f)分别通 过PMT和压力传感器采集的时域信号再经过傅里叶 变换转换成频域信号来得到。局部火焰传递函数的 测量是通过卡塞格林定点采集系统连接光纤和PMT 得到热释放波动量,压力传感器采集到速度波动量, 再根据式(4)获得。

2.2.3 火焰热释放率与火焰结构的分析

通过 ICCD(Andor DH334)和 OH 滤光片可获得 火焰锋面 OH 浓度分布图,OH 自由基的浓度大小与 燃烧强度的强弱是呈正相关的,故可以用自发荧光 强度反映热释放的大小^[17]。通过 ICCD 与 CH 基滤光 片(427±10nm)获得火焰锋面图片,从图中可以清晰 地观察到火焰的长度、褶皱结构的变化。

同时采用卡塞格林光学系统获得了局部火焰 OH基和OH基光强度,该系统的主要结构详见课题 组相关工作^[18],作为一种非接触式测量系统,它不仅 能够获得火焰自由基荧光强度时域上连续动态信号 的定点采集,而且相对于激光诱导荧光测量系统具 有高分辨率、低成本的优点。

3 实验结果与讨论

3.1 不同速度波动下氢气含量对燃烧不稳定性的 影响

为了进一步分析氢含量变化在不同声场频率区 间内对火焰热释放波动的影响,以当量比为0.8,总流 量为1000mL/min的H₂-CH₄混合气的钝体火焰为研 究对象,选取了声场频率90Hz(80~100Hz区间氢气 加入导致热释放波动减少)和140Hz(110~240Hz区 间氢气加入导致热释放波动增大)声作用下钝体火 焰,研究声场频率为90Hz和140Hz,速度波动0~0.5 的声作用下氢气含量对钝体燃烧不稳定性的影响 (由于90Hz时,速度波动在0.3以后幅值IHI保持不变, 故速度波动只取到0.3)。图3和图4分别给出了 90Hz和140Hz不同速度波动(声振幅)作用下氢气含 量变化对火焰传递函数的幅值IHI和相位的影响。其 中,速度波动A,幅值IHI均为无量纲量。

由图3可知,随着速度波动A的增加,火焰传递 函数的幅值///快速降低,当A达到0.1之后,////的变



of 90Hz

化趋势趋于平缓,达到饱和状态;当A相同时,加氢比 例的不同会使IH发生变化,并且随着氢含量的增加, IH的降低说明火焰热释放对来流扰动的响应程度有 所降低,导致燃烧不稳定性降低。从图3(b)中可以 看出,随着速度波动A的变化,火焰传递函数相位差 均小于0°,说明热释放波动落后于速度波动,火焰的 跟随性变差,火焰变稳定;随着氢含量的增加,相位 差逐渐远离0°,说明热释放波动对于速度波动的跟 随性变差,扰动的特征传播时间延长了,火焰对来流 速度扰动的响应变差,火焰燃烧稳定性增强。这一 点与从物理意义上讲,火焰热释放脉动是由于火焰 上游速度脉动引起,因此火焰热释放脉动的相位必 然落后于速度相位,是相一致的。

由图 4(a)可知,140Hz时,随着氢含量的增加,IHI 快速增加,火焰的稳定性变差,这与 90Hz时的相反; 随着 A 的增加,IHI快速降低;由图 4(b)不难看出, 140Hz时火焰的相位差均大于 0°,说明 140Hz时火焰 的稳定性较 90Hz时变差,火焰对来流速度扰度的响 应变得灵敏,扰动的特征传播时间变短;并且随着氢 含量的增加,传递函数的相位差越趋于 0°,说明氢含 量的增加使得 140Hz时火焰的不稳定性得到改善。

图 5(a)和(b)分别给出了 90Hz 和 140Hz 频率下, 随着速度波动 A 的增加, 钝体火焰 CH 自发荧光锋面 演化图。可以看出:随着 A 的增加, 火焰长度变短, 火 焰幅面变宽, 对流时间变短, 火焰的不稳定性变差;



Fig. 4 Amplitude and phase of the flame transfer function of 140Hz

当A=0.1时开始出现涡结构,并且当A增加时涡结构 明显增大。

随着氢含量的增加,90Hz时火焰的CH自发荧光 图逐渐变暗,荧光强度减弱,热释放波动减小,火焰 稳定性增强;当A相同时,氢含量的增加,火焰涡结构 变小,火焰对根部区域的影响变小,火焰的稳定性增 强。而140Hz时刚好相反。

3.2 不同速度波动下氢气含量变化对热释放波动的 影响

为了进一步探讨速度波动A增加时氢含量变化 对燃烧稳定性的影响机理,分析了速度波动A增加时 热释放波动的影响规律,图6给出了不同速度波动下 ICCD拍摄的火焰锋面OH荧光图及经Abel变换后的 火焰锋面OH浓度分布图。色标显示卡分为十个区 间,色标值由0到1,红色区域表示OH基浓度较大, 蓝色区域则为OH基浓度较小。色标值表示火焰光 强与最大光强的比值。随着速度波动A的增加,由图 6(a)可得到如下结论:

(1)当A增加时,OH基分布区域变小,幅面变宽。 OH基分布区域意味着燃烧化学反应区域,区域越 小,火焰的压缩程度越小,热释放波动越小。氢气的 加入导致OH基分布区域幅面进一步变窄,说明氢的 加入使得火焰热释放波动减小。

(2)火焰锋面上OH基结构形态呈涡旋褶皱态, 并向喷嘴靠拢;而氢气的加入导致火焰OH基结构形

H ₂ : CH ₄ =0:100, f=90Hz, A=0	H ₂ : CH ₄ =0:100, f=90Hz, A=0.1	H ₂ : CH ₄ =0:100, f=90Hz, A=0.2	H₂: CH₄=0:100, ƒ=90Hz, A=0.3			
H ₂ : CH ₄ =20:80, f=90Hz, A=0	H ₂ : CH ₄ =20:80, <i>f</i> =90Hz, <i>A</i> =0.1	H ₂ : CH ₄ =20:80, <i>f</i> =90Hz, <i>A</i> =0.2	H ₂ : CH ₄ =20:80, <i>f</i> =90Hz, <i>A</i> =0.3			
H ₂ : CH ₄ =40:60, <i>f</i> =90Hz, <i>A</i> =0	H ₂ : CH ₄ =40:60, <i>f</i> =90Hz, <i>A</i> =0.1	H ₂ : CH ₄ =40:60, <i>f</i> =90Hz, <i>A</i> =0.2	H ₂ : CH ₄ =40:60, <i>f</i> =90Hz, <i>A</i> =0.3			
(a)						
H ₂ : CH ₄ =0:100, f=140Hz, A=0	H ₂ : CH ₄ =0:100, <i>f</i> =140Hz, ∦=0.15	H ₂ : CH ₄ =0:100, <i>f</i> =140Hz, <i>A</i> =0.3	H ₂ : CH ₄ =0:100, f=140Hz, A=0.45			
H ₂ : CH ₄ =20:80, <i>f</i> =140Hz, <i>A</i> =0	H ₂ : CH ₄ =20:80, f=140Hz, A=0.15	H ₂ : CH ₄ =20:80, f=140Hz, A=0.3	H ₂ : CH ₄ =20:80, f=140Hz, A=0.45			
H ₂ : CH ₄ =40:60, f=140Hz, A=0	H ₂ : CH ₄ =40:60, <i>f</i> =140Hz, <i>A</i> =0.15	H ₂ : CH ₄ =40:60, f=140Hz, A=0.3	H ₂ : CH ₄ =40:60, <i>f</i> =140Hz, <i>A</i> =0.45			
(b)						

Fig. 5 CH fluorescence images with different hydrogen contents at different frequencies

态的涡旋程度减弱。火焰锋面的褶皱程度意味着火 焰涡结构对火焰流场的拉伸和卷吸作用的强弱,这 会影响未燃预混气与高温产物的传热传质,最终改 变火焰热释放波动的大小。故氢气含量的增大使得 火焰热释放波动减小。

从图 6(b)140Hz 的图像中得到与图 6(a)90Hz 时相反的结论。

3.3 氢含量对局部火焰传递函数的影响规律

从局部火焰传递函数分布的角度来探讨氢的加入对火焰热释放波动的作用机理。由于90Hz和140Hz声作用下钝体火焰的涡结构主要作用于火焰上游区域,故卡塞格林系统扫描钝体火焰喷嘴上方15mm 位置处,测得局部火焰传递函数,局部火焰传递函数表征火焰锋面附近火焰的热释放波动对速度波动的响应敏感程度,从图7(a)可以看出:氢含量的



Fig. 6 OH fluorescence image and flame frontal structure by Abel change

增加使得IHI明显降低,并向轴心靠拢,这说明火焰中 最不稳定的区域随着氢含量的增加逐渐趋向稳定, 热释放波动变小,火焰稳定性增强。而140Hz时得到 与之相反的结论。90Hz声作用下钝体火焰随着速度 波动的增加,整个局部火焰传递函数幅值增加。而 氡含量的增加,局部火焰传递函数幅值明显减小,这 说明氢气的加入导致整个钝体火焰燃烧不稳定性减 弱。而局部火焰传递函数表征火焰锋面附近火焰的 热释放波动对速度波动的响应敏感程度,表明氢气 的加入导致火焰锋面附近的热释放波动对外界的扰 动变迟缓,导致声作用对火焰流场效果逐渐减弱。 从图7(b)可以看出,140Hz声作用下钝体火焰传递函 数幅值随着速度波动的增加而增大,说明速度波动 的增加都导致火焰热释放增加,燃烧不稳定性增强; 在相同速度波动下,随着氢含量的增加,也导致局部 火焰传递函数幅值增大,特别是火焰传递函数峰值 区域的增大特别明显,这是由于氢气的加入导致混 合气火焰出现涡状火焰面,涡结构对火焰流场的拉 伸和卷吸作用增强,故在火焰锋面两侧的位置对速 度扰动非常敏感。



Fig. 7 Local flame transfer function distribution

4 结 论

本文通过实验方法,分析了氢含量变化对H₂-CH₄混合燃料燃烧的影响。得到的主要结论如下:

(1)随着速度波动A的增加,火焰燃烧不稳定性 增强。

(2)当A相同时,分别研究了90Hz和140Hz时的 火焰结构,发现氢含量的增加导致90Hz声作用下火 焰的长度变短,传递函数的幅值旧降低,CH自发荧 光锋面演化图变暗,OH基分布区域变小,火焰锋面 的旋转程度减弱,热释放波动的相位与速度波动的 相位相同,并且相位差接近0°,燃烧不稳定性减弱; 而140Hz声作用下刚好相反,氢的加入却使得旧下 降,并且相位差远离0°,高氢含量的混合气火焰热释 放波动与速度波动的跟随性变差,燃烧不稳定性增 强。由以上分析结果可知,在较低频率(80~100Hz) 时,可选择通过增加氢气含量或增大速度波动、在较 高频率(110~240Hz)时可通过减少氢气含量或者减 小速度波动进行燃烧不稳定性的控制。

(3)氢含量对燃烧不稳定性产生影响的机理在 于氢气含量的增加导致流场发生变化,进而影响了 火焰结构,涡的结构随之发生了变化,对火焰流场的 传热传质作用和OH基浓度产生了影响,最终对火焰的热释放波动和燃烧稳定性产生了影响。

致 谢:感谢浙江省自然科学基金和国家自然科学基金 的资助。

参考文献

- [1] Lieuwen T C, Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling[M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [2] Oberleithner K, Stoehr M, Im S H, et al. Formation and Flame-Induced Suppression of the Precessing Vortex Core in a Swirl Combustor: Experiments and Linear Stability Analysis [J]. Combustion & Flame, 2015, 162 (8): 3100-3114.
- Meier W, Dem C, Arndt C M. Mixing and Reaction Progress in a Confined Swirl Flame Undergoing Thermo-Acoustic Oscillations Studied with Laser Raman Scattering [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2016, 73: 71-78.
- [4] Cosic B, Bobusch B C, Moeck J P, et al. Open-Loop Control of Combustion Instabilities and the Role of the Flame Response to Two-Frequency Forcing[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 34 (6): 1-8.
- [5] 赵 震,郭志辉,黄 勇,等.模型燃烧室低频不稳 定燃烧的初步探讨[J].航空动力学报,2003,18
 (6):803-807.
- [6] 刘晓佩,崔玉峰,邢双喜,等.富氢燃料贫预混旋流 燃烧热声振荡特性的实验研究[J].燃气轮机技术, 2016,29(1):25-47.
- [7] 杨甫江,郭志辉,任立磊.贫燃预混旋流火焰的燃烧 不稳定性[J].燃烧科学与技术,2014,20(1):51-57.
- [8] 冉景煜,吴 晟,赵柳洁.微细通道内氢气辅助甲烷 催化氧化的数值模拟[J].燃烧科学与技术,2011,17 (3):196-202.
- [9] Zhang Y, Zhou J, Yang W, et al. Effects of Hydrogen Addition on Methane Catalytic Combustion in a Microtube

[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(9): 1286–1293.

- [10] 张 勇,黄佐华,王 倩,等.天然气-氢气-空气混
 合气火焰传播特性研究[J].内燃机学报,2006,24
 (6):481-488.
- [11] Law C K, Kwon O C. Effects of Hydrocarbon Substitution on Atmospheric Hydrogen-Air Flame Propagation
 [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(8): 867-879.
- [12] Gauducheau J L, Denet B, Searby G. A Numerical Study of Lean CH₄/H₂/Air Premixed Flames at High Pressure [J]. Combustion Science & Technology, 1998, 137 (1-6): 81-99.
- Shoshin Y, Bastiaans R J M, Degoey L P H. Anomalous Blow-off Behavior of Laminar Inverted Flames of Ultra-Lean Hydrogen-Methane-Air Mixtures [J]. Combustion & Flame, 2013, 160(3): 565-576.
- [14] Lacoste D A, Xiong Y, Moeck J P, et al. Transfer Functions of Laminar Premixed Flames Subjected to Forcing by Acoustic Waves, AC Electric Fields, and Non-Thermal Plasma Discharges [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 4183-4192.
- [15] Yoon J, Joo S, Kim J, et al. Effects of Convection Time on the High Harmonic Combustion Instability in a Partially Premixed Combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 3753-3761.
- [16] Cuquel A, Durox D, Schuller T. Scaling the Flame Transfer Function of Confined Premixed Conical Flames
 [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34 (1): 1007-1014.
- [17] Hong S, Shanbhogue S J, Speth R L, et al. On the Phase between Pressure and Heat Release Fluctuations for Propane/Hydrogen Flames and Its Role in Mode Transitions [J]. Combustion & Flame, 2013, 160 (12) : 2827-2842.
- [18] 钟英杰,王根娟,王明晓,等.基于卡塞格林原理的 火焰自由基测量系统[J].浙江大学学报(工学版), 2017,51(5).

(编辑:梅 瑛)