

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

王明晓, 邓凯, 管清强, 钟英杰

(浙江工业大学 机械工程学院 能源与动力工程研究所, 杭州 310014)

摘 要: 在可调振幅的正弦波声场作用下,以甲烷-氢混合气预混钝体火焰为实验对象,通过火焰传递函数表征整个燃烧系统的燃烧不稳定性特征,借助CH基自发光图像描述火焰锋面运动及演化过程,研究了在声激励下不同当量比(0.8、1.0、1.2)下氢气体积分数的变化(0、10%、20%)对火焰燃烧不稳定的影响。结果表明:对于当量比为0.8和1.0的预混火焰,氢气的加入使得火焰传递函数幅值增大,热释放波动变大,整体火焰的不稳定性增强;对于当量比为1.2的富燃预混火焰,随着氢气体积分数的增加,火焰传递函数幅值先减小后增加,火焰稳定性较强。

关 键 词: 燃烧不稳定; 火焰传递函数; 钝体火焰; 声场; 火焰动力学

中图分类号: V231; TK16

文献标志码: A

Effect of hydrogen volume fraction on combustion instability of hydrogen/methane premixed flame under different equivalence rates

WANG Mingxiao, DENG Kai, GUAN Qingqiang, ZHONG Yingjie

(Institute of Energy and Power Engineering,

College of Mechanical Engineering,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The combustion instability of premixed bluff-body flame under acoustic excitation at different equivalence rates (0.8, 1.0, 1.2) and hydrogen volume fraction (0, 10%, 20%) was analyzed. The combustion instability could be captured by the flame transfer functions and the flame front distribution could be shown by CH chemiluminescence measurement. Results showed that the combustion characteristics were very sensitive to the fraction of hydrogen in the fuel mixture. When equivalence rates were 0.8 and 1.0, the amplitude of flame transfer functions and heat release fluctuations increased with hydrogen concentration. And with the increase of hydrogen concentration, the combustion instability of premixed flame became stronger. When hydrogen volume fraction increased at equivalence rate of 1.2,

收稿日期:2017-11-16

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

作者简介:王明晓(1986—),男,博士生,主要从事燃烧动力学和燃烧不稳定性研究。E-mail:wmxgood@126.com

通讯作者:钟英杰(1962—),男,教授、博士生导师,博士,主要研究方向为脉动燃烧技术、火焰动力学、燃烧污染物和传质传热。

E-mail:zhong_yingjie@zjut.edu.cn

引用格式: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 Mingxiao, DENG Kai, GUAN Qingqiang, et al. Effect of hydrogen volume fraction on combustion instability of hydrogen/methane premixed flame under different equivalence rates[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2851-2858.

the amplitude of flame transfer functions firstly reduced then increased.

Key words: combustion instability; flame transfer functions; bluff-body flame; acoustic excitation; flame dynamics

在燃烧过程中由于燃烧室内的不稳定热释放与声波的相互耦合,激发系统的一个或者多个固有声学模态,使得燃烧室内的压力波动与燃烧热释放波动之间的激励与反馈过程不断放大,最终发生燃烧不稳定^[1]。燃烧不稳定常出现于火箭发动机和燃气轮机的燃烧过程中,其中大振幅的压力波动和流场速度波动会引发火焰回火^[2]、吹熄^[3]、并伴随高分贝噪声^[4],伴随高热释放和强烈的机械振动,甚至导致设备的结构性破坏^[5]。

目前比较公认的导致燃烧不稳定性的详细机理包括:声与火焰面相互作用机理^[6]、火焰与涡相互作用机理^[7]、当量比波动机理^[8]、火焰与墙相互作用机理^[9]、涡波脉动机理^[10]等。虽然这些机理发生的原因有所不同,但燃烧不稳定性的本质都是通过流动混合对火焰动力学的影响来改变热释放率的脉动。研究声作用下的火焰响应行为是认识燃烧不稳定性机理的重要途径^[11]。声激励对预混火焰燃烧不稳定性的影响体现在两个方面:①声场激励下,压力波动引起速度波动,导致火焰表面积发生波动,形成燃烧热释放量的波动;②声场激励下,压力波动导致燃料射流区域的化学当量比扰动,进而改变反应热和火焰传播速度,并且火焰传播速度的改变间接影响了火焰表面积,故以反应热、火焰传播速度和火焰表面积 3 种途径影响了燃烧热释放量的波动^[12]。

纯甲烷有着火焰传播速度低、可燃极限范围小、热效率低等特性,导致其燃烧效率较低和燃料消耗量较大。而甲烷加少量氢气有增加可燃极限、加快火焰传播速度、减少污染物排放等等优点^[13]。各个研究团队从多角度对甲烷加氢气混合气的燃烧特性和污染物排放进行了研究,如层流火焰传播速度^[14]、回火特性^[15]、点火特性^[16]、拉伸率^[17]和 NO_x ^[18]等等。但氢气体积分数变化对声作用下预混火焰动力学响应特性的影响的研究报道却比较少。Yoon 等^[19]以甲烷-氢混合气富燃部分预混火焰对象,发现氢气体积分数的加入使得燃料化学性质发生变化,火焰抵抗外界扰动的能力增强了。Sarli 等^[20]通过 PIV (particle image velocimetry) 实验来发现贫燃和化学当量比下的混合气火焰中氢气体积分数的增加导致火

焰与涡相互作用加剧,火焰稳定性变差。Emadi 等^[21]通过对比不同氢气体积分数下的混合气火焰瑞利指数图,指出了甲烷中加入氢气是能延缓燃烧不稳定的发生。Taamallah 等^[22]认为氢气的加入对贫燃火焰的热声振荡模态和火焰形态都没有明显的影响。综上所述,氢气对于混合气预混火焰的燃烧不稳定性的作用有待进一步研究。

本文以钝体预混火焰为实验对象,使用扬声器来强制谐波扰动,借助像增强型相机 (ICCD)、光电倍增管 (PMT) 和压力传感器等测试手段,通过分析在强迫振荡声频率 160 Hz 下当量比为 0.8、1.0、1.2,不同氢气体积分数 (0、10%、20%) 的火焰传递函数特性,并结合 CH 基自发光火焰锋面变化规律,探究氢气体积分数变化对预混钝体火焰燃烧不稳定性的影响。

1 实验装置及方法

实验系统由声发生装置和燃烧装置两大部件构成。在圆管底部放置扬声器作为强迫声源,其驱动信号由信号发生器产生正弦波信号,由功率放大器放大后,通过扬声器在管内形成可调的频率和振幅的声场环境,在本实验过程中保持声场频率 160 Hz 不变。燃烧系统的实验装置如图 1 所示,甲烷、氢气和空气由供气系统输送至混合器混合后,经过回火阻止器,进入喷嘴。喷嘴出口直径为 12.5 mm,中间放置上端直径为 8.9 mm 的倒锥形钝体来稳定火焰,其阻流比为 0.5。喷嘴放置在圆管内上端 1/4 处,圆管上方放置了一对平行的 90 mm × 400 mm 石英玻璃视窗。

压阻式压力传感器 (CYG1409T) 放置在火焰位置处,与圆管处于垂直状态,安装方式为齐平安装,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。在燃烧过程中化学反应带有激发态的特征自由基产生,OH 自由基荧光强度大小与燃烧强度强弱是正相关的,故自发光强度能代表热释放的大小^[23-24]。本实验在石英视窗处固定准直镜 (闻奕光电 74-UV),通过光纤连接内置 OH 基滤光片 (315 nm) 和光电倍增管 PMT (Hamamatsu R928) 的黑箱,光电倍增管产生的电流经过放大器转换成电压并放大,来得到火焰的热释放波动量。整个测量系统通过数据采

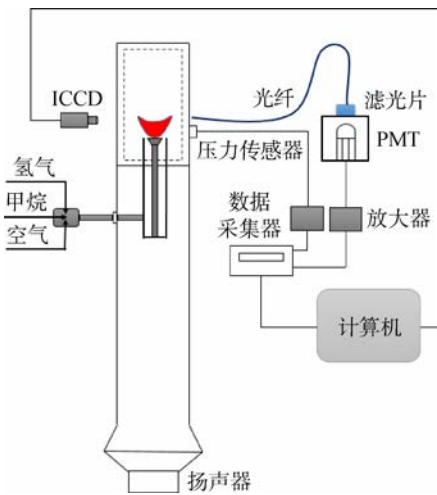


图 1 燃烧系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of combustion system

集设备 NI-DAQ 的 6284 同步采集卡和软件 LabVIEW 实现速度脉动量和热释放脉动量的同步实时采集。CH 自由基基团的荧光强度可以计算出火焰的温度场、速度场、组分浓度场,并能反应火焰的锋面形态^[25-26],故采集火焰锋面图片则使用 ICCD(Andor DH334)镜头上放置 CH 基滤光片(427 nm)来获得。

在燃烧不稳定性研究中构建压力波动与热释放量波动之间的关系通常用火焰传递函数来表示。在燃烧系统中给定一个谐波扰动或者角速度频率下,火焰热释放率波动与速度波动的比值称为火焰传递函数^[27-28]。根据火焰传递函数的定义可知,幅值 $|H|$ 增加意味着速度波动对热释放波动的影响变大,火焰抵抗外界扰动的能力减弱,稳定性变差;相反,幅值 $|H|$ 减小则表明稳定性增强。实验测量得到的火焰传递函数 $H(f,A)$ 则表示为

$$H(f,A) = \frac{Q'(f)/\langle \bar{Q} \rangle}{U'(f)/\langle \bar{U} \rangle}$$

(1)

式中 f 是声场频率, A 是速度波动, $A = U'(f)/\langle \bar{U} \rangle$, 其中 $\langle \bar{Q} \rangle$ 和 $\langle \bar{U} \rangle$ 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。

对于甲烷-氢混合气的化学计量关系式为

$$(1-x)\text{CH}_4 + x\text{H}_2 + (2-3x/2)(\text{O}_2 + 4\text{N}_2) \rightarrow (1-x)\text{CO}_2 + (2-x)\text{H}_2\text{O} + 4(2-3x/2)\text{N}_2$$

(2)

式中 $x = n(\text{H}_2)/[n(\text{H}_2) + n(\text{CH}_4)]$ 为混合气中的氢的摩尔分数,而 n 为气体的物质的量。故甲烷-氢混合气的当量比公式为

$$\Phi = \frac{m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}}}{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}})_{\text{stoich}}} = \left(\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}} \right) \cdot \frac{(2-3\alpha/2)(M_{\text{O}_2} + 4M_{\text{N}_2})}{(1-\alpha)M_{\text{CH}_4} + \alpha M_{\text{H}_2}}$$

(3)

式中 m 为气体质量, M 为气体的摩尔质量。在本文中燃料总流量为 1000 mL/min 保持不变,当改变混合气中氢气体积分数时,则根据式(3)来调整空气流量来保持当量比不变。

2 实验结果与讨论

2.1 当量比为 0.8 的实验工况

在当量比 Φ 为 0.8 的实验工况下,对于不同氢气体积分数 φ_{H_2} 的混合气,其火焰传递函数的幅值($|H|$)随速度波动(A)的变化如图 2 所示。显然可见,随着速度波动的增大,火焰传递函数的幅值先逐渐减小,然后趋于稳定,即认为达到了饱和状态。氢气体积分数为 0、10% 和 20% 的混合气对应的火焰传递函数幅值的饱和点分别为 0.1、0.129 和 0.166,可见火焰传递函数幅值的饱和点随着氢气体积分数的增加而增大。这表明氢气体积分数的增大,导致火焰传递函数的幅值受到速度波动的影响区域扩大。另外,由图 2 可见,在相同速度波动下,火焰传递函数幅值随着氢气体积分数的增加而增大。根据火焰传递函数的定义可知,其幅值的增大意味着火焰热释放波动受到速度波动的影响更明显,火焰稳定性减弱^[29-30]。

图 3 给出了当量比为 0.8 工况下火焰传递函数的相位值随速度波动的变化。由图可知,随着氢气体积分数的增加,火焰传递函数相位值变小,

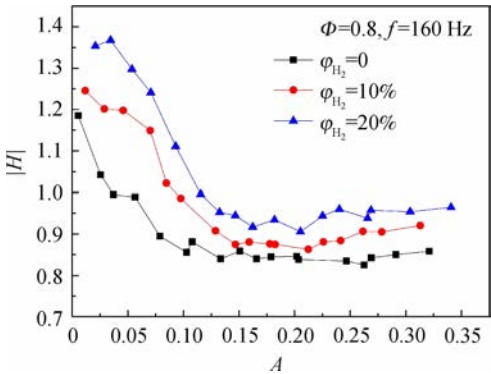


图 2 当量比为 0.8 工况下火焰传递函数的幅值

Fig.2 Flame transfer function amplitude for the case of equivalence rate of 0.8

表明入口扰动对火焰热释放影响增加,火焰稳定性变差^[31]。这是由于氢气体积分数的增加导致燃料的化学性质发生变化,如燃烧时更快的反应速率和火焰传播速度,使得火焰热释放波动明显变大^[29]。Hong 等^[17]研究了预混火焰的压力波动与热释放波动之间的相位差 θ'_{qp} 与火焰动力学之间的关系,发现两者同相(即 $\theta'_{qp} \approx 0^\circ$) 处于燃烧不稳定状态,随着相位差增加到极限相位 $\pi/2$ 后,火焰进入另一种稳定的动力学模式。

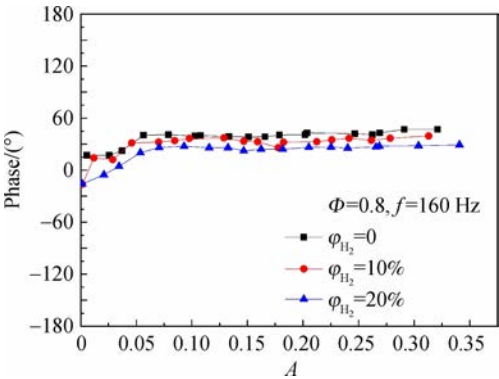
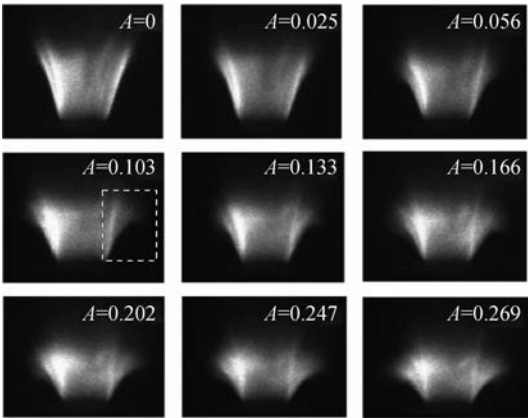
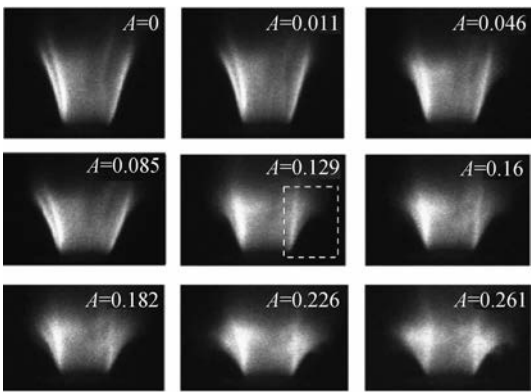


图 3 当量比为 0.8 工况下火焰传递函数的相位
Fig. 3 Flame transfer function phase for the case of equivalence rate of 0.8

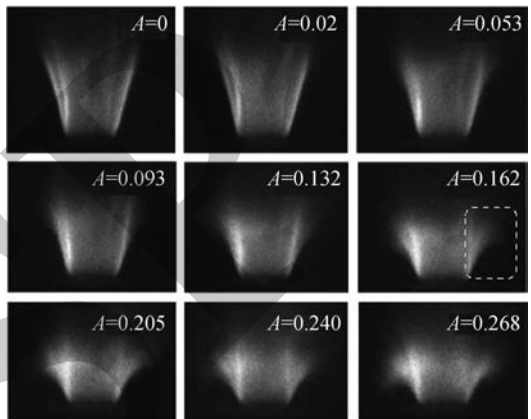
为了进一步研究氢气体积分数对于燃烧不稳定性的影响,利用 ICCD 捕捉混合气 CH 自发荧光火焰锋面的演化过程。如图 4 所示,钝体火焰呈现倒置空心锥台形状,火焰中心为回流区。随着速度波动的增加,纯甲烷火焰面被压缩变短,当速度波动增加到 0.103 时,火焰卷曲程度增加,形成涡状的火焰面。氢气体积分数为 10% 和 20% 的混合气火焰则分别在 $A = 0.129$ 时和 $A = 0.166$ 时涡状火焰面开始形成。这种涡状火焰面的形成与图 2 中发现的火焰传递函数幅值的斜率变化规律是一致的。另外,图 2 中火焰传递函数



(a) 纯甲烷的CH自发荧光锋面



(b) 氢气体积分数为10%的CH自发荧光锋面



(c) 氢气体积分数为20%的CH自发荧光锋面

图 4 当量比为 0.8 的工况下的火焰锋面图

Fig. 4 Flame front for the case of equivalence rate of 0.8

幅值出现的饱和状态与火焰结构发生的剧烈变化(火焰发生卷曲形成旋涡)有关^[23,32]。并且当 $A > 0.2$ 后,氢气体积分数的增加,火焰面下游区域的幅面更宽,火焰区域的涡结构更加明显,火焰流场的卷吸作用逐渐增强,火焰对速度扰动更加明显,致使火焰稳定性变差。

2.2 当量比为 1.0 的实验工况

图 5 为当量比 1.0 的实验工况下,火焰传递函数的幅值随速度波动的变化。与图 2 相似,随着速度波动的增大,火焰传递函数的幅值先逐渐减小,然后达到了饱和状态:纯甲烷工况下,当速度波动大于 0.17 后,火焰传递函数的幅值达到饱和状态;而甲烷中加入少量氢气后,火焰传递函数幅值转捩点发生偏移,氢气体积分数为 10% 和 20% 的混合气火焰传递函数的转捩点分别为 0.183 和 0.207。这说明随着氢气体积分数的提升,火焰传递函数的幅值受速度波动的影响范围变大。在相同速度波动下,随着氢气体积分数的增加使得火焰传递函数的幅值增加,火焰抵抗外界扰动能力变差。

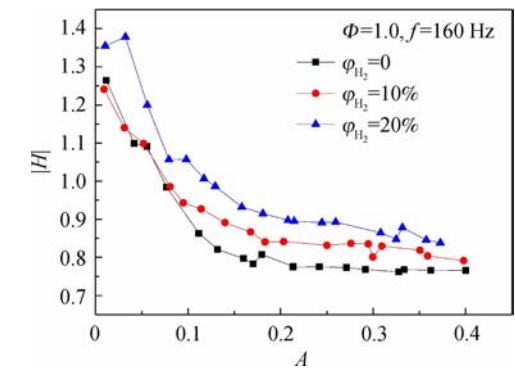


图 5 当量比为 1.0 工况下火焰传递函数幅值

Fig. 5 Flame transfer function amplitude for the case of equivalence rate of 1.0

图 6 为当量比 1.0 的工况下,火焰传递函数的相位值随速度波动的变化。显然可见,随着氢气体积分数的增加,传递函数相位值变小并接近 0°。热释放波动和速度波动相位差减少,说明火焰的燃烧不稳定性增强。

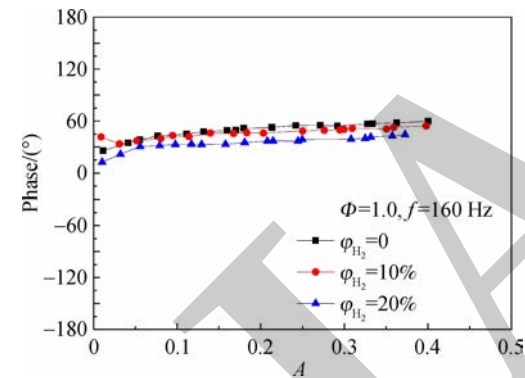
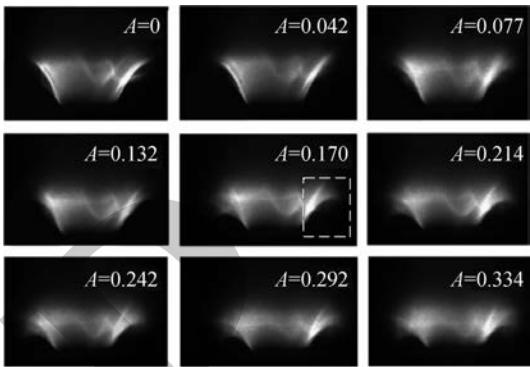


图 6 当量比为 1.0 工况下火焰传递函数相位

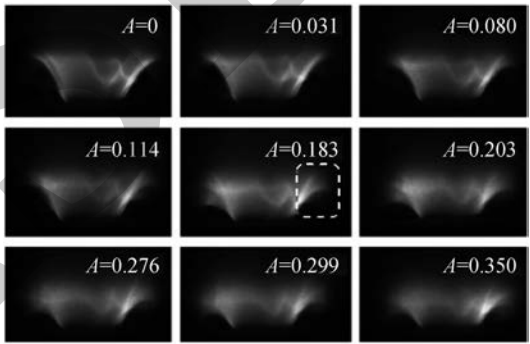
Fig. 6 Flame transfer function phase for the case of equivalence rate of 1.0

火焰传递函数的幅值变化特性与火焰的动力学特征是密切相关的。故从火焰形态的角度观察甲烷加氢后的火焰锋面变化过程,并分析氢对声激励下的火焰动力学特征的影响。图 7 中所示的是在当量比为 1.0 的工况下,纯甲烷和混合气火焰随速度波动变化的 CH 自发荧光火焰锋面图像。从图中可以看到,在无扰动状态下 CH 自发荧光火焰锋面呈现碗状结构;随着速度波动的增加,火焰上游变宽,火焰表现为压缩的锋面特征。3 种工况依次在 $A=0.17, 0.183, 0.207$ 时,火焰锋面直径逐渐变大,并且横向扩张,呈现卷曲状,形成涡状的火焰面。这与图 5 中火焰传递函数幅值的变化规律相一致。同时氢气体积分数的增加,火焰卷曲程度增加,火焰区域涡结构的影响逐

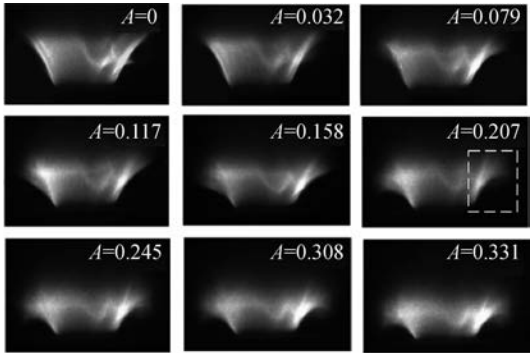
渐增强,火焰流场的褶皱、拉伸、卷吸逐渐增强,导致火焰稳定性变差。相较于当量比为 0.8 工况,完全预混火焰长度较小,幅面较宽;而在较高速率波动下混合气火焰的弯曲程度更加明显。在两种工况下,氢气体积分数的提升都导致了混合气火焰燃烧不稳定性的增强。



(a) 纯甲烷的CH自发荧光锋面



(b) 氢气体积分数为10%的CH自发荧光锋面



(c) 氢气体积分数为20%的CH自发荧光锋面

图 7 当量比为 1.0 的工况下的火焰锋面图

Fig. 7 Flame front for the case of equivalence rate of 1.0

2.3 当量比为 1.2 的实验工况

图 8 和图 9 分别表示当量比为 1.2 时不同氢气体积分数下火焰传递函数幅值和相位。如图 8 所示,火焰传递函数幅值基本与速度波动的横轴保持平行,当量比为 1.2 的火焰传递函数幅值比

当量比为 0.8 的火焰传递函数幅值小,说明了富燃火焰热释放波动受速度波动影响比贫燃火焰的情况要小,贫燃火焰稳定性比较差,富燃火焰抵抗外部扰动能力很强。当混合气中的氢气体积分数为 10% 时,火焰传递函数幅值降低,稳定在 0.3 左右;而在当氢气体积分数为 20% 的混合气火焰传递函数幅值有所增大,稳定在 0.35 左右。图 9 中的富燃火焰传递函数相位值接近 90° ,热释放波动超前于压力波动,火焰抵抗外界扰动能力强^[24]。

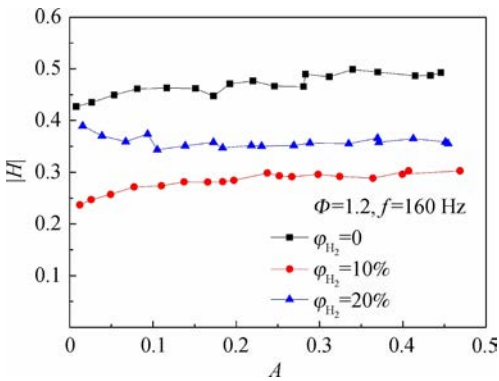


图 8 当量比为 1.2 工况下火焰传递函数的幅值
Fig. 8 Flame transfer function amplitude for the case of equivalence rate of 1.2

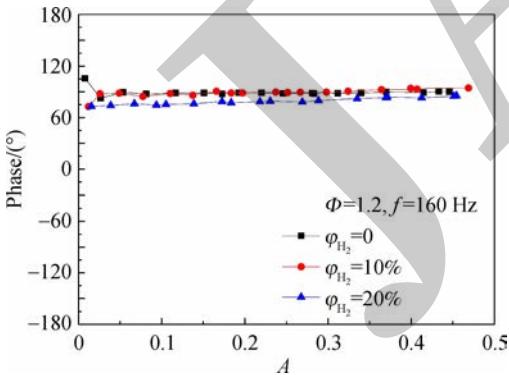


图 9 当量比为 1.2 工况下火焰传递函数相位
Fig. 9 Flame transfer function phase for the case of equivalence rate of 1.2

图 10 为不同氢气体积分数和速度波动下的火焰 CH 自发荧光锋面图。图中重点分析了富燃火焰中亮度较亮的内焰部分。声激励下不同氢气体积分数的火焰形态变化不大,仅在较大振幅下有略微抖动,这与图 8 中火焰传递函数幅值较小的规律相一致。与贫燃火焰不同的是,随着氢气体积分数的增加,火焰内焰长度逐渐变短,说明富燃混合气受浮力作用不明显,而氢的加入导致混

合气火焰传播速度增加,内焰长度变短,幅面变小。

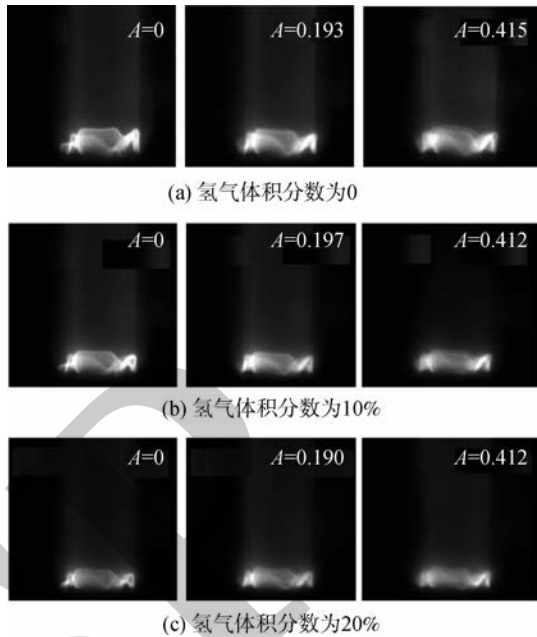


图 10 当量比为 1.2 的工况下的火焰锋面图
Fig. 10 Flame front for the case of equivalence rate of 1.2

综上所述,氢气体积分数变化对不同当量比下的火焰动力学影响规律是不同的。当 $\Phi = 0.8$ 和 $\Phi = 1.0$ 时,贫燃火焰的传递函数幅值随着氢气体积分数的增加而增加,火焰稳定性变差;而当 $\Phi = 1.2$ 时,随着氢气体积分数的增加,富燃火焰的传递函数幅值先减少后略微增加,整体火焰稳定性较强。

3 结 论

本文采用 PMT 测量热释放率,用扬声器强迫振荡产生速度扰动,对比了声场频率 160 Hz 时,不同氢气体积分数和当量比的火焰传递函数,并结合其相应的火焰锋面图片,研究了氢气体积分数对不同工况下火焰动力学的影响规律。结果表明

- 1) 对于当量比为 0.8 的贫燃预混火焰,在 160 Hz 声激励下,氢的加入使得火焰传递函数幅值增大,相位值减少,热释放波动变大,整体火焰的不稳定性增强;
- 2) 对于当量比为 1.0 的预混火焰,在 160 Hz 声激励下,氢气的加入导致混合气的火焰传递函数幅值增加,其相位值变小,整体火焰抵抗外界扰动能力减弱;

3) 对于当量比为 1.2 的富燃预混火焰,在 160 Hz 声激励下,随着氢气体积分数的增加,火焰传递函数幅值先减小后增加,传递函数相位值接近 90° ,整体火焰稳定性较强。

实验结果为掌握燃气轮机中含氢燃料燃烧不稳定性的机理和发展抑制其燃烧不稳定性技术提供了重要参考。

参考文献:

- [1] MIN C L, YOON J, JOO S, et al. Investigation into the cause of high multi-mode combustion instability of $H_2/CO/CH_4$ syngas in a partially premixed gas turbine model combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3263-3271.
- [2] MIN C L, YOON J, JOO S, et al. Gas turbine combustion characteristics of H_2/CO synthetic gas for coal integrated gasification combined cycle applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(34): 11032-11045.
- [3] KITANO T, TSUJI T, KUROSE R, et al. Effect of pressure oscillations on flashback characteristics in a turbulent channel flow[J]. *Energy and Fuels*, 2015, 29(10): 6815-6822.
- [4] GARCÍA-ARMINGOL T, BALLESTER J. Operational issues in premixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(2): 1229-1243.
- [5] POINSOT T. Prediction and control of combustion instabilities in real engines[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(1): 1-28.
- [6] ZHAO D, JI C, LI X, et al. Mitigation of premixed flame-sustained thermoacoustic oscillations using an electrical heater[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 86: 309-318.
- [7] ALTAY H M, SPETH R L, HUDGINS D E, et al. Flame-vortex interaction driven combustion dynamics in a backward-facing step combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(5): 1111-1125.
- [8] TACHIBANA S, KANAI K, YOSHIDA S, et al. Combined effect of spatial and temporal variations of equivalence ratio on combustion instability in a low-swirl combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3299-3308.
- [9] SHAHI M, KOK J B W, CASADO J C R, et al. Transient heat transfer between a turbulent lean partially premixed flame in limit cycle oscillation and the walls of a can type combustor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 81(2): 128-139.
- [10] POLIFKE W, PASCHEREIT C O, DÖBBELING K. Constructive and destructive interference of acoustic and entropy waves in a premixed combustor with a choked exit[J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2001, 6(3): 135-146.
- [11] MIRAT C, DUROX D, SCHULLER T. Stability analysis of a swirl spray combustor based on flame describing function[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3291-3298.
- [12] JU H C, LIEUWEN T. Laminar premixed flame response to equivalence ratio oscillations[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 140(1/2): 116-129.
- [13] TANG C, ZHANG Y, HUANG Z. Progress in combustion investigations of hydrogen enriched hydrocarbons[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30(2): 195-216.
- [14] BOUSHAKI T, DHUÉ Y, SELLE L, et al. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane-air premixed flame: experimental and numerical analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(11): 9412-9422.
- [15] SYRED N, LEWIS J, MEDINA A V, et al. Effect of inlet and outlet configurations on blow-off and flashback with premixed combustion for methane and a high hydrogen content fuel in a generic swirl burner[J]. *Applied Energy*, 2014, 116(3): 288-296.
- [16] SHOSHIN Y, BASTIAANS R J M, GOEY L P H D. Anomalous blow-off behavior of laminar inverted flames of ultra-lean hydrogen-methane-air mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(3): 565-576.
- [17] HONG S, SPETH R L, SHANBHOGUE S J, et al. Examining flow-flame interaction and the characteristic stretch rate in vortex-driven combustion dynamics using PIV and numerical simulation[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(8): 1381-1397.
- [18] LEE J, JEON S, KIM Y. Multi-environment probability density function approach for turbulent CH_4/H_2 flames under the MILD combustion condition[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(4): 1464-1476.
- [19] 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*, 2016, 36(3): 3753-3761.
- [20] SARLI V D, BENEDETTO A D, LONG E J, et al. Time-resolved particle image velocimetry of dynamic interactions between hydrogen-enriched methane/air premixed flames and toroidal vortex structures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(21): 16201-16213.
- [21] EMADI M, KAUFMAN K, BURKHALTER M W, et al. Examination of thermo-acoustic instability in a low swirl burner[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(39): 13594-13603.
- [22] 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*, 2015, 35(3): 3273-3282.
- [23] 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(1): 37-55.

[24] 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 and Flame*, 2013, 160(12): 2827-2842.

[25] 宋旭东, 郭庆华, 张婷, 等. 甲烷同轴射流扩散火焰中自由基的辐射特性[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(35): 50-57.

SONG Xudong, GUO Qinghua, ZHANG Ting, et al. Radiation characteristics of radicals in methane co-flowing jet diffusion flame[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2013, 33(35): 50-57. (in Chinese)

[26] RUGGLES A, KELMAN J. Unsteady vortex breakdown in an atmospheric swirl stabilised combustor: Part 1 chamber behavior[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(2): 388-407.

[27] INNOCENTI A, ANDREINI A, FACCHINI B. Numerical identification of a premixed flame transfer function and stability analysis of a lean burn combustor[J]. *Energy Procedia*, 2015, 82: 358-365.

[28] 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.

[29] BIRBAUD A L, DUROX D, DUCRUIX S, et al. Dynamics of confined premixed flames submitted to upstream acoustic modulations[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1257-1265.

[30] DUROX D, SCHULLER T, CANDEL S. Combustion dynamics of inverted conical flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 1717-1724.

[31] 张晓宇. 合成气燃料点火及火焰稳定性的研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.

ZHANG Xiaoyu. Research on ignition characteristics and flame stability of syngas fuels[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)

[32] 唐豪杰, 高原, 朱民. 预混火焰传递函数的测量与分析[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(1): 173-176.

TANG Haojie, GAO Yuan, ZHU Min. Measurements and analysis of premixed flame transfer function[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(1): 173-176. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)