

高可控非稳态对冲扩散火焰的实现 及其时变流场特征

余超¹, 李国柱¹, 周梦祥¹, 王宇^{1,2}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 430070, 武汉;

2. 先进汽车零部件技术湖北省重点实验室, 430070, 武汉)

摘要: 为研究火焰拉伸变化对流场、碳烟生成的瞬态效应,进一步完善层流火焰面模型在湍流火焰中的应用,设计并搭建了一个高可控的声激励对冲火焰燃烧器及其流场和碳烟浓度场的测量系统,利用相位锁定的粒子图像测速和激光诱导白炽光技术,测量了简谐振荡的对冲火焰中流场以及碳烟生成随时间的变化特性。结果表明:设计的声激励对冲燃烧器喷嘴出口速度为非均匀分布;非稳态工况下,施加的声激励电压信号幅值与出口速度振幅呈线性关系,频率为 40 Hz 的乙烯和丙烷火焰出口速度分别滞后电压信号 0.09、0.14 周期;随着电压信号频率的增加,速度的滞后程度也随之扩大。此外,40 Hz 频率下乙烯火焰的碳烟体积分数滞后准稳态值 0.35 周期,具有明显的瞬态效应。研究成果可为非稳态层流火焰面模型开发提供理论依据。

关键词: 声激励;对冲燃烧器;碳烟生成;粒子图像测速;激光诱导白炽光

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302006 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0049-08

Realization and Flow Field Characterization of Highly-Controllable Unsteady Counterflow Diffusion Flames

YU Chao¹, LI Guozhu¹, ZHOU Mengxiang¹, WANG Yu^{1,2}

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to investigate the transient effect of flame stretch on flow field and soot formation, and to further improve the application of laminar flamelet model in turbulent flame, a highly-controllable acoustically-excited counterflow flame burner with flow field and soot concentration field measurement system is designed and established. Using phase-locked particle image velocimetry (PIV) and laser-induced incandescence (LII) technologies, the characteristics of the flow field and soot formation with time in counterflow flames with harmonic oscillation are measured. The results show that the exit velocity profile at the nozzle of the acoustically-excited counterflow burner is non-uniform. Under unsteady conditions, the amplitude of the applied acoustic excitation voltage signal has a linear relationship with the exit velocity amplitude. At a frequency of 40 Hz, the ethylene and propane flame's exit velocities lag behind the voltage signal by 0.09 and 0.14 cycles, respectively. As the frequency of the voltage signal increases, the lag of the ve-

收稿日期: 2022-06-25。 作者简介: 余超(1998—),男,硕士生;王宇(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976142)。

网络出版时间: 2022-09-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220913.1643.004.html>

locities expands. In addition, the soot volume fraction of ethylene flame at 40 Hz lags behind the quasi-steady value by 0.35 cycles, which exhibits obvious transient effects. The research results provide a theoretical basis for the development of unsteady laminar flamelet model.

Keywords: acoustic excitation; counterflow burner; soot formation; particle image velocimetry; laser-induced incandescence

实际燃动装置如柴油机、航空发动机及工业锅炉等常采用湍流扩散燃烧以实现燃料化学能到热能的转换。扩散燃烧虽较为稳定,但更易生成如碳烟、 NO_x 等有害排放污染物,需要精细的燃烧设计和调控^[1]。目前,严苛的排放法规也增加了对于准确预测燃烧系统特征的需求。然而,湍流扩散燃烧包含时间、空间上强烈的流动和复杂化学反应动力学的耦合,对实际燃烧装置进行直接数值模拟目前仍然不现实^[2-3]。

层流小火焰模型(LFM)提供了一种模拟湍流扩散火焰的可行方法^[4-6],并得到广泛应用。小火焰模型的一个重要假设是火焰热化学场可以瞬间响应流场局部应变率的扰动(即准稳态),然而湍流扩散火焰固有的非稳态效应已经引起了科学界的广泛关注^[7-9]。Cuoci 等^[10]通过数值模拟研究了层流对冲火焰在非稳态条件下的熄灭特性,发现在施加正弦速度振荡后,非稳态火焰可以在远大于稳态火焰熄灭应变率的条件下生存。Cepeda 等^[11]通过实验测量了振荡层流火焰的局部辐射热流和碳烟生成特性,结果表明,振荡火焰条件下的碳烟生成、碳烟温度分布和辐射特性与稳态火焰相比都发生了显著的变化。但文中缺乏具体的速度边界特征,不易进行进一步定量分析。Jocher 等^[12]结合实验和数值研究,评估了振荡同轴射流火焰中碳烟形成、火焰化学以及流动输送的瞬态过程,观察到随着振荡频率的增加,峰值碳烟体积分数降低,并且峰值碳烟体积分数的降低与滞留时间的减小相关。Decroix 等^[13]针对振荡速度边界下的丙烷对冲扩散火焰的碳烟浓度进行了时间分辨率较低的测量,发现在低初始应变率下,高频振荡使峰值碳烟体积分数较稳态火焰下降。但是,实验中振荡速度的最小值出现负值,火焰结构和碳烟场可能会受到较大的浮力影响,同时发现两端通入不同气体组分的振荡会出现速度相位差,这是由于扬声器并联控制导致的。而氧化剂和燃料出现相位差会导致滞止面位置出现振荡,对于火焰以及碳烟生成非稳态特性的深入研究造成额外的不利影响。

小火焰模型与对冲扩散火焰在物理上存在天然

联系,因此后者是研究小火焰模型中非稳态效应影响的理想平台。但是,目前关于对冲扩散火焰非稳态效应的实验研究非常有限,在仅有的个别研究中也存在振荡负速度以及滞止面波动带来的不利影响,且缺乏具有高时空分辨率的实验数据。本文详细介绍了一个通过声激励实现速度边界高度可控的对冲燃烧器及相位锁定的流场和碳烟浓度场实验测量系统。分别使用粒子图像测速(PIV)和平面激光诱导白炽光(LII)技术测量了振荡火焰中流场和碳烟场的特征。

1 实验装置与方法

1.1 燃烧器设计

实验采用的非稳态对冲燃烧器是文献^[14]中稳态对冲燃烧器的改进版本,非稳态燃烧器的结构示意图如图1所示。燃烧器由两个完全相同、垂直相对的轮廓型喷嘴组成,喷嘴出口的内径为10 mm,喷嘴之间的距离保持为8 mm。上下腔体各有4个均匀分布的进气入口,以使出口气流足够均匀。通常燃烧器上端通入 O_2 、 N_2 的混合气作为氧化剂,下端通入燃料,所有的气体流量由热式质量流量计(七星华创)精确控制,为避免周围环境气体的干扰形成二次火焰,通过喷嘴同心的环槽通入 N_2 流,作为保护气。另外,喷嘴处设计了冷却水道,以防止喷嘴过热

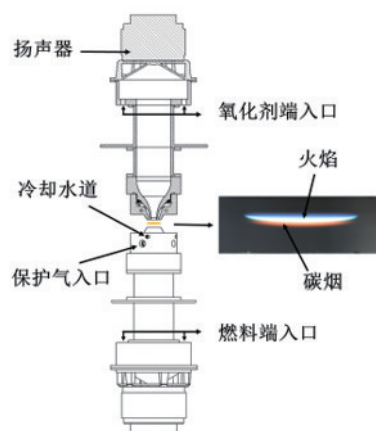


图1 声激励对冲燃烧器结构示意图

Fig. 1 Schematic of the acoustically excited counterflow burner

和变形,两个完全相同的扬声器分别安装在上下腔体上,利用电激励的振膜运动,在喷嘴的出口处产生可控的速度振荡。

已有研究^[15-17]表明:只有在非常小的振荡频率(低于 30 Hz)下,火焰温度以及主要组分浓度才能以准稳态的模式响应出口速度的振荡;而对于较高的振荡频率(高于 100 Hz),火焰的响应存在很大的相位差,甚至表现出不响应振荡的特性,中间频率的响应则更为复杂。因此,所配扬声器需要在一个较大的频率范围具有高保真响应,但是更低的频响范围意味着更大的扬声器振膜尺寸,这不仅会给安装和密封带来挑战,更为重要的是大尺寸的振膜运动会引起过大的流量扰动,从而导致喷嘴出口出现负速度,最终对火焰结构产生不良的影响。综合考虑上述因素,采用了外径为 12 cm 的振膜,其频率响应范围为 40~4 000 Hz,阻抗为 8 Ω 。燃烧器中扬声器需与燃料/氧化剂气体直接接触,因此振膜的材料需要具有一定的耐化学性和较好的机械性能,最终选择振膜材料为 PP(聚丙烯)盆的 Nubert 扬声器,其与燃烧器之间的密封由 O 型圈保证。

1.2 扬声器驱动系统

上下喷嘴出口速度的振荡是通过向扬声器施加一个已知频率和振幅的正弦电压实现的。由于压力波从扬声器到达滞止面存在一定的延迟^[18],为了避免不同组分之间存在相位差,实验采用两个扬声器独立控制。正弦信号从一个双通道的函数发生器(AFG31000, Tektronix)发出,分别经过两个功率放大器放大,以驱动扬声器工作,如图 2 所示。不同气体组分由于其物性差异,流经腔体后应对相同电压的所产生的速度振幅也存在差异。因此,在实际的非稳态燃烧器中,对氧化剂和燃料端的出口速度的频率、振幅和相位进行独立控制是十分必要的。

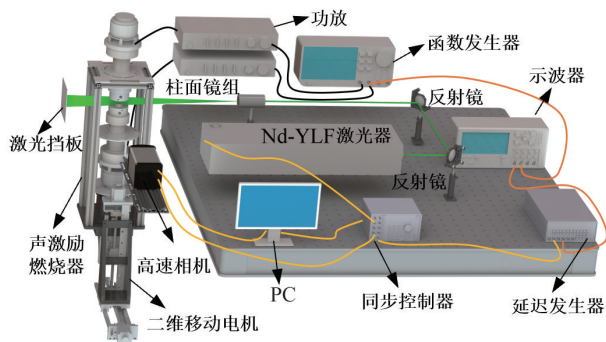


图 2 PIV 系统及扬声器驱动系统装置图

Fig. 2 Schematic of the PIV system and speaker drive system setup

1.3 PIV 测速系统

燃烧器喷嘴之间的二维流场由 PIV 系统测量,图 2 展示了本文所用实验设备及光路布置。PIV 系统由双脉冲 Nd-YLF 激光器(527 nm Terra PIV, Continuum)、高速相机(Phantom Miro Lab Series)、同步控制器和专用的图像处理软件(Insight 4 G, TSI)组成。使用粒子发生器(Particle Blaster, LaVision)将 TiO_2 示踪粒子散播至流场中,采用柱面透镜将火焰反应区处的激光塑造成薄片状,照亮喷嘴间的示踪粒子,使其在垂直于视场放置的高速相机上清晰成像。

对冲火焰流场具备轴对称性,仅需测量速度矢量的轴向和径向两个分量,速度矢量由两帧图像使用互相关算法得到。为了得到更准确的流场信息,需要优化两个脉冲激光之间的延迟时间 Δt 以及流场中示踪粒子的密度以实现与待测速度更好的匹配。根据工况条件,使用的 Δt 在 300~600 μs 之间。处理和平均 20 对帧率为 400 的不同周期相同相位瞬时图像得到瞬态的轴向和径向速度,其中轴向速度参考平均了中轴线相邻两点的速度。采用校准后的质量流量控制器和恒定温度的保护气流减小系统误差^[19],多次重复测量得到速度的随机误差不超过 $\pm 2\%$ 。

1.4 LII 碳烟测量系统

采用消光法(LE)标定的平面激光诱导白炽光(LII)技术测量喷嘴间的碳烟体积分数(SVF)。实验装置在文献[20-21]中已做详细介绍,LII 系统主要由一个高功率脉冲 Nd-YAG 激光器以及一个带有 405 nm 中心波长窄带滤波片的 ICCD 相机组成。相机测得的 LII 信号与火焰中的碳烟体积分数成正比。利用 980 nm 的近红外激光测得的碳烟体积分数进行绝对值标定。LII 的信号是由 30 张照片减去背景噪声平均得到的。

该测量系统中碳烟体积分数的不确定度分为系统不确定度和随机不确定度。系统不确定度主要来自形成碳烟的火焰环境、碳烟的光学特性以及成熟度^[22]。然而,考虑到系统不确定度对所有测量火焰具有类比性,预计不会显著影响碳烟体积分数测量值的相对变化。同时,碳烟测量的随机不确定度可由多个测量值统计得到。在实验过程中,对每个数据点至少重复测量了 5 次,得到碳烟体积分数的随机不确定度小于 5%。

1.5 相位锁定方法

扬声器工作时,反应区的流场按照预设的频率

和振幅持续振荡。瞬态流场和碳烟场的测量需要对扬声器输入电压、PIV/LII 激光的触发时间以及数据采集系统的触发时间进行延时同步控制,以便采集到具有时间分辨率和确定相位的瞬态数据。实验中所用 LII 激光装置的脉冲重复频率较低(10 Hz),无法直接实现高振荡频率下的瞬态测量,但考虑简谐振荡火焰具有周期性,可采用相位锁定的方法获取在振荡周期内不同相位的数据。

测量系统的触发信号相对于输入电压信号的时序图如图 3 所示。扬声器的振荡正弦信号由函数发生器提供,函数发生器的时钟作为相位锁定系统的主时钟。当输入的正弦电压信号上升并通过 0 电位时,函数发生器产生一个 TTL 信号(记作 TTL-A),该信号作为参考信号被示波器记录。通过延迟发生器产生第二个 TTL 信号(记作 TTL-B),该信号用来触发 PIV 的同步器或者 LII 系统的激光控制器。TTL-B 的频率(在 LII 实验中固定为 10 Hz)和相位是可以通过延迟发生器调节的。在每次非稳态实验的开始通过示波器将 TTL-B、TTL-A 调为同相,达到系统锁相的目的。对于振荡的流场和碳烟测量,通过调节 TTL-B 相对于 TTL-A 的延迟时间,来调节测试系统触发信号相对于扬声器输入信号的相位差,以完成在单周期内不同相位的 20 次数据采集工作。

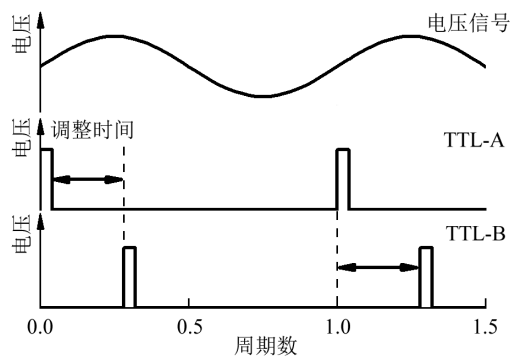


图 3 相位锁定时序图

Fig. 3 Timing diagram of phase locking

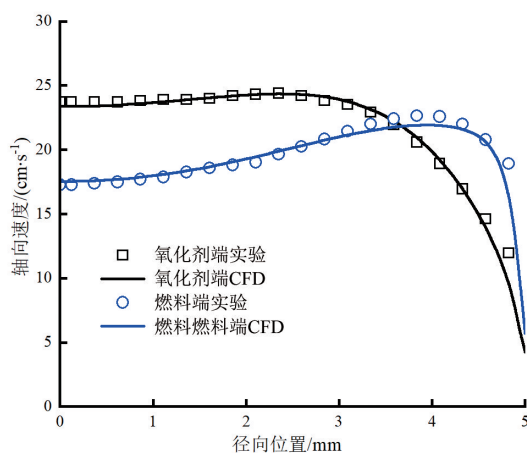
2 流场特征

实验中的流场测量包括对稳态基准对冲火焰及其基础上通过声激励实现的非稳态火焰的测量两部分。实验在常压下进行,稳态基准对冲火焰中燃料及氧化剂初始温度均为 298 K,氧化剂为摩尔分数 $X_O=0.2$ 的 O_2/N_2 混合气,燃料端通入摩尔分数 $X_F=1$ 的 C_2H_4 ,燃料端及氧化剂端喷嘴

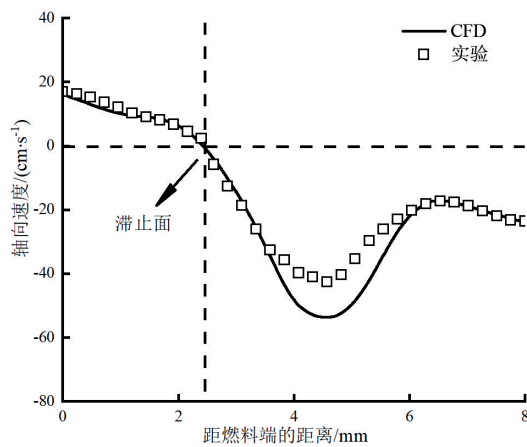
出口流量均为 942 mL/min。

2.1 稳态对冲火焰流场

利用 PIV 系统测量了基准火焰稳态时氧化剂端和燃料端喷嘴出口及火焰中心线上的轴向速度,结果如图 4 所示。为了对比验证,同时提供了由 LaminarSMOKE^[23-25] 软件考虑燃烧器详细几何形状进行的二维 CFD 得到的模拟结果,可知实验和模拟结果具有良好的一致性。



(a) 喷嘴出口位置



(b) 喷嘴间轴线位置

图 4 不同位置处速度分布的 PIV 测量值与 CFD 计算值对比

Fig. 4 Comparison of PIV measurement value and CFD simulation value for velocity distribution at different locations

对于目前喷嘴几何形状来说,不论是氧化剂端还是燃料端,喷嘴出口速度的径向分布都是非均匀形状,这是由于火焰轴线附近出现的局部静压升高导致的。而氧化剂和燃料端流体性质(主要是密度和黏性)的差异,导致燃料端喷嘴和氧化剂喷嘴出口处速度的径向分布存在差异。由于对冲火焰具有准

一维性,轴线上的热化学结构主要与轴线处的速度边界条件相关^[14],因此后续非稳态流场的测量主要针对轴线处的速度。

2.2 非稳态流场

对于非稳态对冲扩散火焰的流场,利用相位锁定的 PIV 系统,测量了喷嘴出口中心处的轴向速度随时间的变化关系。不同工况下,测量的时间原点均为正弦电压信号的 0^+ 点。通过延迟发生器调节测量触发信号(TTL-B)和参考信号(TTL-A)之间的相位差,对每个振荡周期内 20 个不同时刻的出口轴向速度进行了测量。不同时刻喷嘴出口中心的轴向速度可表示为

$$V = V_{\text{steady}}(1 + A_u \sin(\omega t + \varphi)) \quad (1)$$

式中: V_{steady} 为该气体流量下稳态时的轴向速度(即出口平均速度); A_u 为无量纲速度波动幅值; $\omega = 2\pi f$, f 为振荡的频率; φ 为电压信号和速度振荡之间的相位差。

2.2.1 速度振幅

非稳态实验中,有两种方式可以控制速度振幅的大小:①直接在函数发生器中改变原始信号的电压峰峰值;②调节功放的放大倍数。但是,通过功放调节振幅可能会带来额外噪声的影响,本文主要是通过调节函数发生器的原始信号电压峰峰值来调节速度的振幅大小。

实验测量了基准火焰工况在 40 Hz 的振荡下,氧化剂端轴向速度与信号发生器信号电压幅值间的关系。不同振幅下出口速度随时间的变化如图 5 所示,可知喷嘴出口速度随时间的变化关系基本符合简谐振荡。而当气体流量一定时,逐步增大电压信号的幅值,速度振幅相应增大。速度波动幅值 A_u 分别为 0.3、0.5、0.7 时对应的电压信号峰峰值分别为 95、161 和 225 mV,可知速度振幅与电压信号幅值成线性关系,当改变气体流速、气体种类、频率时,这一结论依然成立。这是因为,施加到扬声器上电压信号的大小控制着振膜的运动,更大的电压意味着振膜更大的位移,其在单位时间里扰动燃烧器内的流量更多,表现为产生更大的速度振幅。

2.2.2 速度振荡的延迟

稳态火焰中,气体组分流体性质(雷诺数)的不同会导致出口速度径向分布的差异,而在非稳态火焰中,也可能影响气体运动受振膜扰动的灵敏度。

对两种不同燃料(乙烯和丙烷)的非稳态火焰进行了出口速度测量,扬声器相同电压信号时不同气

体出口速度随时间变化如图 6 所示。两种火焰扬声器输入频率均为 40 Hz,信号电压振幅均为 161 mV,且气体流量均为 942 mL/min。实验结果表明:两种火焰氧化剂端中心出口速度振荡规律基本一致,其平均值为 23 cm/s, A_u 为 0.5;乙烯的平均速度略小,为 18.1 cm/s, A_u 为 0.9;丙烷的平均速度最小,为 17.8 cm/s, A_u 为 0.74。通过振荡速度与电压信号的相位关系可以看出:3 种气体相对电压信号的相位差不同,其中乙烯气体速度振荡的相位差最小,滞后 0.09 周期,丙烷气体速度振荡的相位差最大,滞后 0.14 周期。

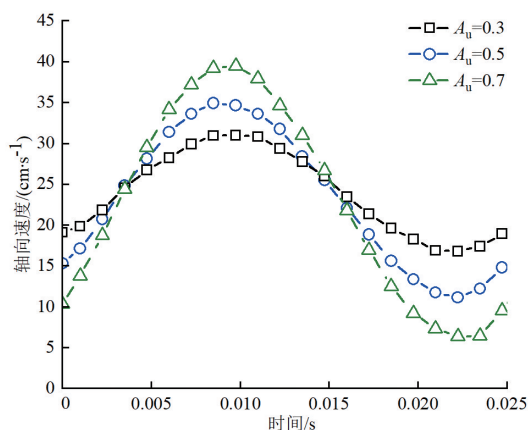


图 5 不同振幅下出口速度随时间的变化

Fig. 5 The functions of exit velocity with time under different amplitudes

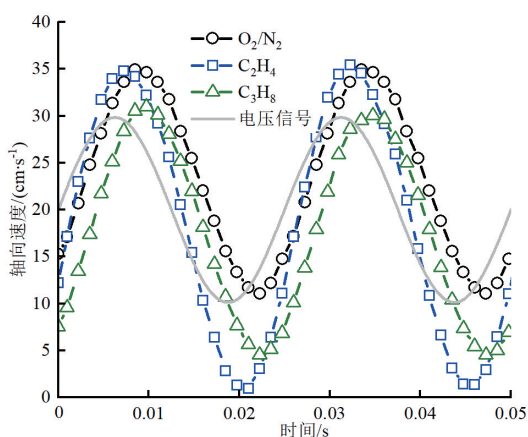


图 6 扬声器相同电压信号时不同气体出口速度随时间变化

Fig. 6 The functions of exit velocity with time of different gas with the same voltage signal of speaker

这一结果很可能来源于流体物性的差异,乙烯

的密度较 O_2/N_2 略小,但是由于乙烯的中心速度较小,因此其相对振幅更大,且相位差较小。丙烷的出口速度更小,但是速度振幅却小于乙烯振幅,较大密度的丙烷表现出对于速度振荡的低敏感性。因此,雷诺数的差异不仅会影响稳态出口速度的分布,而且在非稳态的振荡过程中会导致振幅和相位迟滞的不同。

进一步,研究分析了基础工况下氧化剂端($X_{O_2}=0.2$)出口速度在不同频率下的振荡规律,可知驱动扬声器在更大频率下产生相同速度的振幅需要更大的信号电压。通过设定电压峰峰值,使出口速度在 $40\sim 200$ Hz 的频率下以 $A_u=0.5$ 的波动幅值振荡,速度振荡与归一化电压信号的相位关系如图 7 所示,可知随着频率的增大,速度振荡相对电压信号的延迟也随之增大。Decroxi 等^[18]发现了类似的现象,这很有可能是由于扬声器位移与施加的电压信号之间存在一定的相位延迟而导致的。

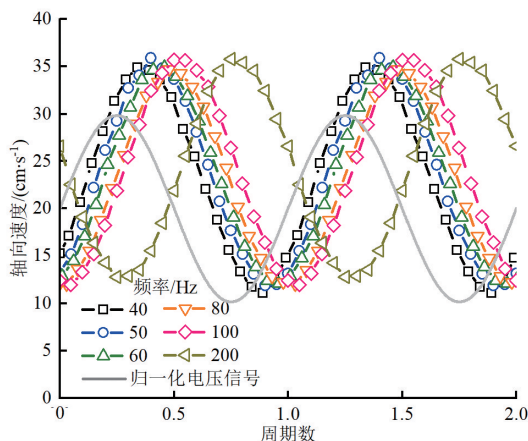


图 7 不同频率下出口速度随时间的变化

Fig. 7 The functions of exit velocity with time under different frequencies

2.3 非稳态轴向速度分布

由于雷诺数不同,对冲扩散火焰的两端出口速度分布存在一定的差异。而两端出口速度分布以及不同气体组分对于振荡响应敏感性的不同,在非稳态振荡条件下会因动量通量的变化率不同带来滞止面位置的波动。图 8 为基准火焰在 40 Hz 的振荡条件下,燃料侧的轴向速度变化情况。为了更清晰认识滞止面的变化,该实验两端扬声器的电压信号是相同的。结果表明,在速度振荡的过程中,轴向速度在一周期内先增大后减小再回到初始值,而滞止面在 $1\sim 3.8$ mm 的位置波动。

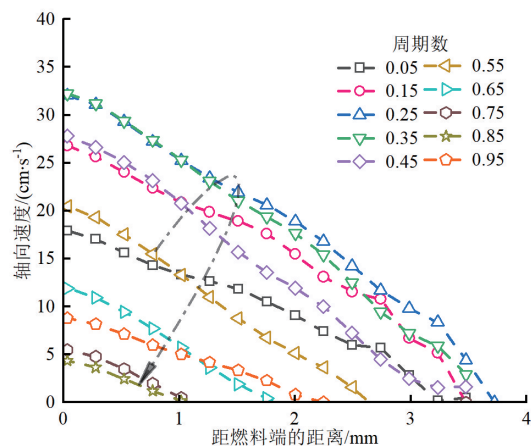


图 8 周期内不同时刻火焰轴线处的轴向速度

Fig. 8 The axial velocity at flame axis at different times in a period

滞止面位置变化的同时会导致火焰面(最高温度)位置的变化,火焰高温反应区以及组分生成都会受到较大的影响,这对于精确控制流场边界是不利的,而且滞止面位置的波动对于有些使用视线光学测量的技术在非稳态测量的应用上会产生新的挑战,不利于实验测量。

因此,在实际的非稳态实验中,为了让滞止面保持在一个相对稳定的位置,简化实验测量,建议利用两个独立的电压信号分别控制的两个扬声器来调节两端出口速度振荡,使燃烧器喷嘴出口速度保持一致,避免不同气体组分间的相位延迟和振幅差异。通过稳态和非稳态不同工况的速度对比,可以看出,利用该声激励对冲火焰燃烧器及其测量系统获得的时变流场实验数据具有较高的时间分辨率,能得到准确的速度边界特征,并且可以利用声激励电压信号对对冲火焰燃料端和氧化剂端的时变出口速度进行独立精确控制,从而实现非稳态火焰流场的频率、振幅、相位延迟以及滞止面位置波动的高度可控。

3 碳烟特征

采用相位锁定的 LII 系统测量了乙烯火焰在流量为 942 mL/min (喷嘴出口平均速度 $V_{in}=20\text{ cm/s}$)、 $X_{O_2}=0.25$ 、 $X_F=1$ 工况下稳态和非稳态的碳烟体积分数(SVF)分布,其中非稳态工况下测量的时间原点为正弦电压信号的 0^+ 点。图 9 显示了稳态下火焰中心轴线上 SVF 的分布,该分布与文献[21]中利用 LE 测得的结果基本一致。

对稳态火焰施加 40 Hz 、 $A_u=0.5$ 的正弦出口速度振荡后,利用相位锁定的 LII 系统测量了随时

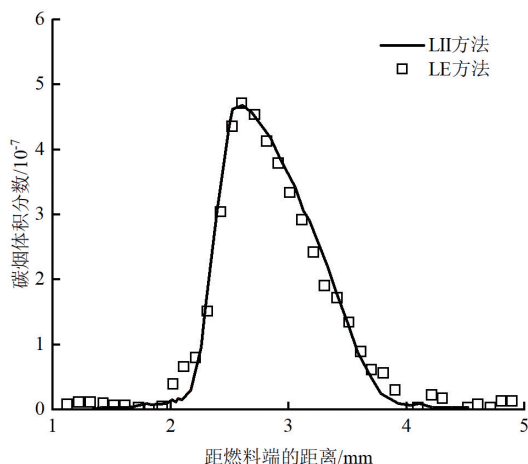


图9 火焰中心轴线上碳烟体积分数的分布

Fig. 9 The profile of soot volume fraction at the centerline of flame

间变化的碳烟浓度场。图10显示了测量的氧化剂端出口速度以及峰值SVF(沿火焰中心线)在振荡火焰中随时间的变化,同时还提供了稳态、准稳态峰值SVF,即对应相同振荡速度下的稳态火焰峰值SVF。对于稳态火焰,碳烟生成的浓度随着气体出口速度的增大而减小,并且这种变化的响应是非线性的,图10中准稳态SVF具有非对称性。而非稳态火焰的SVF随出口速度的变化已偏离准稳态,其幅值约为准稳态的57%,相位滞后准稳态0.35周期,表现出明显的幅值衰减和相位滞后,这一结果与文献[26]的仿真计算在定性上保持良好的一致。对于振荡火焰碳烟生成的研究将为开发更完善的碳烟生成模型提供新的参考。

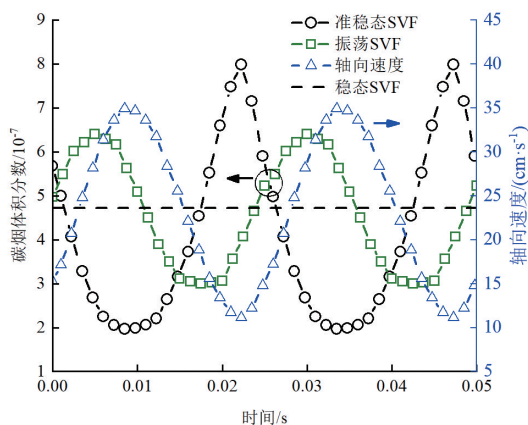


图10 乙烯火焰碳烟体积分数及氧化剂出口速度随时间的变化

Fig. 10 The functions of soot volume fraction and oxidizer nozzle exit velocity with time in ethylene flame

4 结论

为研究非稳态对冲扩散火焰的时变流场特征,设计了一个两端速度独立振荡的声激励对冲火焰燃烧器,利用粒子图像测速和激光诱导白炽光技术测量了流场和碳烟场的特征。得到如下结论。

(1)由于火焰轴线附近出现的局部静压升高,对冲火焰燃烧器喷嘴出口速度的径向分布为非均匀形状。

(2)频率为40 Hz的基准火焰工况下,在声激励电压信号峰峰值为95、161和225 mV时,出口速度波动幅值分别为0.3、0.5、0.7,二者展现出线性关系。当信号电压振幅为161 mV时,乙烯和丙烷火焰出口速度分别滞后电压信号0.09、0.14周期,同时随着频率的增大,速度振荡相对电压信号的延迟也随之增大。利用两端独立的声激励电压信号可以高度控制非稳态火焰的流场变化,同时避免滞止面位置产生较大波动。

(3)40 Hz频率振荡下乙烯火焰的碳烟体积分幅值约为准稳态的57%,相位滞后准稳态0.35周期,较准稳态出现明显的幅值衰减和相位滞后,展现了非稳态火焰中碳烟生成的瞬态效应。

参考文献:

- [1] FOO K K, SUN Zhiwei, MEDWELL P R, et al. Experimental investigation of acoustic forcing on temperature, soot volume fraction and primary particle diameter in non-premixed laminar flames [J]. Combustion and Flame, 2017, 181: 270-282.
- [2] 王海鸥, 罗坤, 樊建人. 湍流分层燃烧的直接数值模拟和小火焰模型研究 [J]. 工程热物学报, 2020, 41(2): 469-473.
WANG Hai'ou, LUO Kun, FAN Jianren. Direct numerical simulation of turbulent stratified combustion and study of flamelet model [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(2): 469-473.
- [3] 王振林, 李祥晟, 庄士超, 等. 旋进涡核与火焰面耦合作用对燃烧稳定性影响的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(7): 60-67.
WANG Zhenlin, LI Xiangsheng, ZHUANG Shichao, et al. Numerical study on the influence of precessing vortex core coupling with flame surface on combustion stability [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(7): 60-67.
- [4] PITSCH H. Large-eddy simulation of turbulent combustion [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38(1): 453-482.
- [5] PETERS N. Laminar flamelet concepts in turbulent

- combustion [J]. Symposium (International) on Combustion, 1988, 21(1): 1231-1250.
- [6] 张欣, 许健, 侯效森, 等. CNG/CO₂ 气体发动机湍流火焰结构的大涡模拟 [J]. 内燃机学报, 2014, 32(5): 448-453.
- ZHANG Xin, XU Jian, HOU Xiaosen, et al. Large eddy simulation on turbulent flame structure of engine fueled with CNG/CO₂ blends [J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(5): 448-453.
- [7] EGOLFOPOULOS F N, CAMPBELL C S. Unsteady counterflowing strained diffusion flames: diffusion-limited frequency response [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 318: 1-29.
- [8] WANG Yu, CHUNG S H. Soot formation in laminar counterflow flames [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 74: 152-238.
- [9] RODRIGUES P, FRANZELLI B, VICQUELIN R, et al. Unsteady dynamics of PAH and soot particles in laminar counterflow diffusion flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(1): 927-934.
- [10] CUOCI A, FRASSOLDATI A, FARAVELLI T, et al. Extinction of laminar, premixed, counter-flow methane/air flames under unsteady conditions: effect of H₂ addition [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 93: 266-276.
- [11] CEPEDA F, DEMARCO R, ESCUDERO F, et al. Influence of the oxygen index on acoustically forced laminar ethylene non-premixed flames [J]. Combustion and Flame, 2022, 236: 111745.
- [12] JOCHER A, FOO K K, SUN Zhiwei, et al. Impact of acoustic forcing on soot evolution and temperature in ethylene-air flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(1): 781-788.
- [13] DECROIX M E, ROBERTS W L. Transient flow field effects on Soot volume fraction in diffusion flames [J]. Combustion Science and Technology, 2000, 160(1): 165-189.
- [14] JIANG Peng, ZHOU Mengxiang, WEN Daxin, et al. An experimental multiparameter investigation on the thermochemical structures of benchmark ethylene and propane counterflow diffusion flames and implications to their numerical modeling [J]. Combustion and Flame, 2021, 234: 111622.
- [15] CUOCI A, FRASSOLDATI A, FARAVELLI T, et al. Frequency response of counter flow diffusion flames to strain rate harmonic oscillations [J]. Combustion Science and Technology, 2008, 180(5): 767-784.
- [16] WELLE E J, ROBERTS W L, CARTER C D, et al. The response of a propane-air counter-flow diffusion flame subjected to a transient flow field [J]. Combustion and Flame, 2003, 135(3): 285-297.
- [17] XIAO J, AUSTIN E, ROBERTS W L. Relative polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in unsteady counterflow diffusion flames [J]. Combustion Science and Technology, 2005, 177(4): 691-713.
- [18] DECROIX M E, ROBERTS W L. Study of transient effects on the extinction limits of an unsteady counterflow diffusion flame [J]. Combustion Science and Technology, 1999, 146(1/6): 57-84.
- [19] YANG Xiehe, WU Yuxin, ZHANG Yang, et al. Re-assessing the 2-D velocity boundary effect on the determination of extinction stretch rate and laminar flame speed using the counterflow flame configuration [J]. Combustion and Flame, 2021, 234: 111630.
- [20] YAN Fuwu, XU Lei, WANG Yu, et al. On the opposing effects of methanol and ethanol addition on PAH and soot formation in ethylene counterflow diffusion flames [J]. Combustion and Flame, 2019, 202: 228-242.
- [21] YAN Fuwu, ZHOU Mengxiang, XU Lei, et al. An experimental study on the spectral dependence of light extinction in sooting ethylene counterflow diffusion flames [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 100: 259-270.
- [22] 刘福水, 花阳, 吴晗, 等. 基于激光诱导炽光法进行碳烟测量的研究进展 [J]. 实验流体力学, 2017, 31(1): 1-12.
- LIU Fushui, HUA Yang, WU Han, et al. Research progress on soot measurement by laser induced incandescence [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(1): 1-12.
- [23] CUOCI A, FRASSOLDATI A, FARAVELLI T, et al. Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(12): 7730-7753.
- [24] CUOCI A, FRASSOLDATI A, FARAVELLI T, et al. A computational tool for the detailed kinetic modeling of laminar flames: application to C₂H₄/CH₄ coflow flames [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(5): 870-886.
- [25] CUOCI A, FRASSOLDATI A, FARAVELLI T, et al. OpenSMOKE++: an object-oriented framework for the numerical modeling of reactive systems with detailed kinetic mechanisms [J]. Computer Physics Communications, 2015, 192: 237-264.
- [26] CUOCI A, FRASSOLDATI A, FARAVELLI T, et al. Soot formation in unsteady counterflow diffusion flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 1335-1342.

(编辑 赵炜 杜秀杰)