

纯氢阵列微管预混火焰结构及湍流燃烧速度测量

刘泓芳¹, 蔡骁¹, 王金华¹, 代鸿超¹, 韩啸², 刘晓佩³, 汤成龙¹, 黄佐华¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 北京航空航天大学

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 100191, 北京;

3. 上海电气燃气轮机有限公司, 200240, 上海)

摘要: 为给出稀燃环境 45~87 m/s 流速下的纯氢微混火焰的湍流燃烧特性, 采用阵列微管喷嘴模型燃烧室进行研究。通过粒子图像测速技术与羟基平面激光诱导荧光技术诊断火焰, 研究了纯氢湍流火焰前锋面结构及火焰热态流场, 得到火焰前锋面尺度信息及微混燃烧室湍流参数, 包括火焰体积、火焰面密度、湍流强度、湍流积分尺度和湍流燃烧速度。研究结果表明: 微混燃烧室出口的湍流强度随着来流速度线性增加, 火焰前锋面凸向未燃气与凹向未燃气的概率基本相同, 并且随着湍流强度的增加, 火焰的小尺度结构和褶皱程度有所增加。这些变化导致火焰面密度的增加, 从而增加了湍流火焰面积和湍流燃烧速度。此外, 氢气微混火焰归一化湍流燃烧速度达到 7~11, 约是火焰面积比 3.5~5.5 的两倍, 这主要是因为稀燃氢气火焰的路易斯数较低, 导致火焰局部燃烧速率超过了层流燃烧速度。因此, 稀燃纯氢微混湍流火焰的燃烧速度的增加主要由火焰面积的扩大和局部燃烧速率的增强共同影响。该研究为优化阵列微管喷嘴模型燃烧室及微混燃烧技术提供了理论依据和实验支持。

关键词: 微混燃烧; 纯氢火焰; 火焰结构; 湍流燃烧速度

中图分类号: TK91 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202412007 **文章编号:** 0253-987X(2024)12-0069-09

Structure of Pure Hydrogen Array Microtube Premixed Flame and Measurement of Turbulent Burning Velocity

LIU Hongfang¹, CAI Xiao¹, WANG Jinhua¹, DAI Hongchao¹, HAN Xiao²,

LIU Xiaopei³, TANG Chenglong¹, HUANG Zuohua¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. Shanghai Electric Gas Turbine Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: To investigate the turbulent burning characteristics of pure hydrogen micromix flames at various flow velocities ranging from 45—87 m/s under lean combustion conditions, an arrayed microtube nozzle model combustion chamber is employed. The flame is diagnosed using particle image velocimetry and hydroxyl plane laser-induced fluorescence techniques to examine the structure of the turbulent flame front and the thermal flow field of the flame. Details on the scale of the flame front and turbulent parameters of the micromix combustion chamber are obtained,

收稿日期: 2024-04-06。 作者简介: 刘泓芳(2000—), 男, 硕士生; 蔡骁(通信作者), 男, 副教授, 硕士生导师。

基金项目: 国家重大专项基础科学资助项目(P2022-A-II-006-001)。

网络出版时间: 2024-07-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240717.1758.010>

基金

including flame volume, flame surface density, turbulent intensity, turbulent integral scale, and turbulent burning velocity. The results suggest that the turbulence intensity at the outlet of the micromix combustion chamber linearly increases with the inflow velocity. The probabilities of the flame front protruding towards unburned gas and receding from unburned gas are nearly equal. As turbulent intensity rises, the small-scale structure and wrinkling degree of the flame also increase. These changes lead to an increase in flame surface density, thereby increasing the turbulent flame area and turbulent burning velocity. Additionally, the normalized turbulent burning velocity of the hydrogen micromix flames reaches 7—11, approximately twice the flame area ratio of 3.5—5.5. This is primarily attributed to the low Lewis number of lean hydrogen flames, causing the local combustion rate of the flame to surpass the laminar burning velocity. Therefore, the increase in burning velocity of lean pure hydrogen micromix turbulent flames is mainly driven by the expansion of the flame area and the enhancement of the local combustion rate. This research provides a theoretical basis and experimental support for optimizing the arrayed microtube nozzle model combustion chamber and micromix combustion technology.

Keywords: micromix combustion; pure hydrogen flame; flame structure; turbulent burning velocity

近年来,由于环境污染加剧和化石燃料等一次能源的逐渐枯竭,可再生能源开发利用在我国得到了全面发展^[1]。针对如何实现可再生能源利用这一严峻问题,一种可行的方式是应用可再生清洁替代燃料氢气^[2-3]。一些发达国家先后启动了高效纯氢/富氢燃料燃气轮机相关的重大项目,旨在为下一代近零排放的高效低碳燃气轮机开发奠定基础^[4]。

目前,国内外开展了基础和工程应用研究,主要有改良传统低排放燃机和研发新型氢燃料燃烧室这两个方向。王金华等^[5]针对传统直喷发动机,在天然气掺氢比例 0~37%工况下开展实验得到不同掺氢比对发动机的影响,研究发现,在低掺氢比 0~20%时发动机热效率增加,污染物排放降低,但掺氢比大于 20%后 NO_x 的排放大幅增加,燃烧性能下降。巨翊宇等^[6]研究发现,采用传统低污染大尺度旋流的预混燃烧室虽可以抑制污染物排放,但容易出现回火、燃烧振荡等问题。因此,开发新型燃烧室是实现纯氢低排放燃烧室一种更可行的手段^[7]。

微混燃烧技术是一种通过缩小燃料空气混合时空尺度来防止自燃、规避回火、减小高温气体停留时间,同时配合贫燃燃烧来降低火焰温度、提高燃烧效率,并实现超低 NO_x 排放的新型纯氢/富氢燃料燃烧技术^[8]。通过微型喷嘴替代传统的大直径喷嘴结构,使燃料和空气均匀地分布在每个微喷嘴中并进行混合^[9]。微型喷嘴采用阵列布置,增加喷嘴数的方式,并通过增加空气喷射速度,使每个微型喷嘴中燃料和空气短暂而迅速地进行有效的混合,形成抬

升火焰,降低回火风险,通过减少高温区烟气的停留时间,并配合贫燃高效燃烧,可以同时兼顾火焰稳定性和低 NO_x 排放特性^[10]。微混燃烧同时兼具预混燃烧室的低 NO_x 排放与扩散燃烧室的火焰稳定的优点^[11]。

国内外研究学者多采用实验测量与数值模拟的方法探究微混燃烧室的燃烧特性与过程。Funke 等^[12]研究发现微混技术可以使富氢燃料稳定燃烧,在不同掺氢比下表现出较好的燃料适应性,且具有宽负荷调节适应性,可以有效降低 NO_x 生成,缩短火焰长度。另外,Funke 等^[13-14]系统研究了燃烧器内燃烧与流动的相互作用,发现对燃烧性能影响最大的设计参数包括氢气空气的动量通量比、临界注入深度、喷嘴入口形状及阻塞比,在优化结构参数后可以有效避免相邻火焰融合,从而降低 NO_x 生成。York 等^[15-16]在微混燃烧技术的概念上,利用头部密集的微混合管替代了传统燃烧器的大喷嘴,每个燃料腔分别对应一组微混管,通过多级燃料控制实现更为灵活的燃料调节,从而拓宽了燃烧室的稳定范围,使得微混燃烧器的大规模应用成为可能,但是该思路使得整体系统结构复杂化,系统可靠性有待进一步验证。刘勋伟^[17]设计了一种新型微混模型燃烧器,并通过实验研究了常压条件下氢含量、热负荷等对火焰结构、火焰稳定性和 NO_x 排放的影响,同时对该燃烧器进行数值模拟研究,研究其冷态流场分布以及掺氢燃料火焰结构,阐明了微混火焰的稳定机制。张猛等^[18]利用羟基平面激光诱导荧光技

术(OH-PLIF)测量了甲烷掺氢预混湍流火焰前峰面结构,发现掺氢会引起火焰不稳定性增强,导致火焰对湍流流动响应积极,增加了火焰前峰面褶皱程度,从而增加了火焰面面积。俞森彬等^[19]利用 OH-PLIF 测量了 CH_4 /空气和 C_3H_8 /空气混合气在不同湍流强度下的预混湍流火焰前峰面结构,分析了湍流强度和火焰特征参数对预混湍流火焰结构、湍流燃烧速度的影响,发现火焰前峰面结构的褶皱程度随湍流强度的增大而显著增强。

通过以上研究可以发现,微混燃烧的研究及光学诊断测量研究多集中于富氢掺氢燃料,而对以纯氢为燃料的微混燃烧室研究十分缺乏。在对燃烧特性的研究中,多集中于多簇喷嘴的整体结构参数、掺混特性等宏观的参数测量,而对微混火焰的冷热态流场、火焰微观结构分析仍然不足。

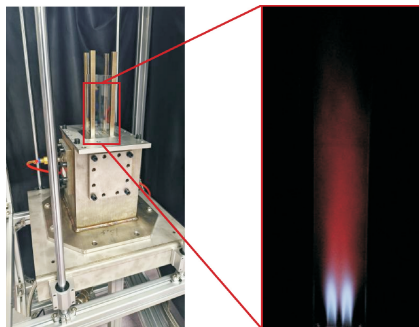
本文采用了一种新型氢燃料微混模型燃烧室,与其他燃烧室主要有两点不同:其一为空气的进气方式,通过喷嘴侧面间歇分布的两排 8 个进气口进入混合流道;其二是空气与氢气的混合方式,氢气通过直喷的形式从混合管上游喷入,而空气则与氢气流向成 90° 垂直射入混合管,实现了交叉射流混合形式,使燃料氧化剂在短距离内可实现快速掺混。本文对其开展了不同流速下纯氢火焰的粒子图像测速(PIV)及 OH-PLIF 测量,研究流速对纯氢微混火焰结构和湍流燃烧速度的影响。

1 实验系统

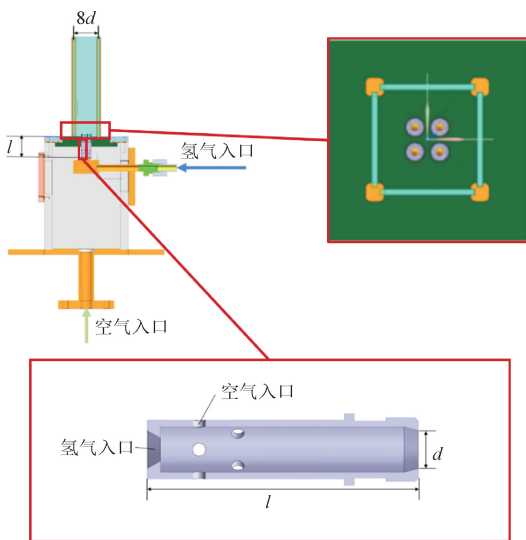
本文所采用的阵列微管模型燃烧室(AMT)如图 1 所示。图 1(a)为燃烧器实物及典型火焰形态,火焰形态给出的是压降为 3 kPa、当量比为 0.6 的纯氢燃烧火焰数码照片,图 1(b)为燃烧室结构及喷嘴示意图。本燃烧室模型由 4 个喷嘴组成,喷嘴出口直径 $d=6$ mm。4 个喷嘴按 2×2 方形阵列排列,所有喷嘴的中心距离相等,间距 $D=2d$,4 个喷嘴结构完全一致,喷嘴内直径为 7.2 mm,喷嘴长度 $l=40$ mm,喷嘴出口处为直线型收缩,角度为 15° 。

PIV 是一种先进的流场测量技术,相比于热线风速仪,PIV 能研究空间全流场的瞬态速度,对流场的干扰小。图 2(a)为 PIV 测量系统示意图,双脉冲激光器(Litron, Nano TRL325-15)可以产生两束波长为 532 nm、间隔为 $2.95\sim 9.95\ \mu\text{s}$ 的激光,单脉冲能量可以达到 325 mJ,频率为 10 Hz。随后,片光透镜组将激光束转换为片光并通过火焰中心,火焰处片光厚度为 1 mm。实验中,通过质量流量计(北京七

星,误差约 $\pm 1\%$)在混合气中均匀地通入平均粒径为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 TiO_2 示踪粒子,片光作用在粒子上产生的米氏散射信号被装有窄带通滤波片(LaVision, $(532\pm 5)\ \text{nm}$)和定焦镜头(100 mm, F/2.8)的双帧 CCD 相机(Imager LX 2M)采集。测量热态 PIV 时,由于两帧图像曝光时间不同,信号强度差别较大,需要调节相机快门时序来降低两帧图像信号强度差距。修改相机快门开启、关闭的时间,取两帧信号强度差距最小的值,随后利用 Davis 软件的互相关算法计算瞬时速度场。基于自主开发的代码对瞬时速度场进行流场后处理,获得湍流强度、特征尺度和涡量场,从而研究流场对阵列微管火焰的作用。



(a) 阵列微管模型燃烧室及典型火焰



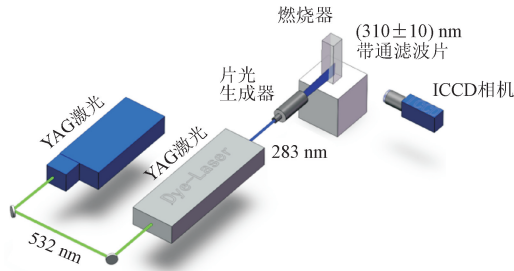
(b) 燃烧室结构及喷嘴示意图

图 1 阵列微管模型燃烧室典型火焰及喷嘴示意图

Fig.1 Typical flame and nozzle diagram of an array microtube model combustion chamber

平面激光诱导荧光(PLIF)由于其非接触性、高分辨率、高灵敏度的优势近年来被普遍应用于燃烧诊断当中。该技术的基本原理是采用特定波长激光使特定中间组分跃迁到激发态,随后激发态组分会退激发到较低的能级,并最终在重新向低能级跃迁

时自发辐射出荧光信号。荧光信号的波长一般大于入射激光的波长,其强度和分布并不会受到入射激光信号的干扰。因此,利用增强型 CCD 相机 (ICCD) 捕捉荧光信号的分布并进行矫正后,可获得该中间组分在燃烧场中的二维组分场分布。OH-PLIF 常用于研究火焰结构,由于 OH 基主要分布在 1 400~1 500 K 以上的区域,使得 OH-PLIF 图像为获得反应区 and 高温已燃区火焰结构提供了重要的信息。实验时采用的 OH-PLIF 系统如图 2(b) 所示, YAG 激光器首先发出波长为 1 064 nm、频率为 10 Hz 的脉冲激光,接着由二倍频晶体模块将 1 064 nm 激光进行倍频得到波长为 532 nm 的激光,该波长激光束在 532 nm 平面高反镜的反射下进入染料激光器 (Q-Scan) 被进一步调谐^[20]。图 2(b) 所示系统中的染料激光器可以进行不同波长的调谐,进而可以激发 OH、CH 和 NO 等多种中间组分的荧光信号。由于 OH 基的荧光信号较强,并且广泛存在于反应区和已燃区,因此被普遍应用于火焰结构的研究中。在进行 OH-PLIF 测量时,532 nm 激光进入染料激光器并激发染料池内 Rh590 染料,从而获得 566 nm 波段的激光;接着,利用 BBO 倍频晶体将 566 nm 波长的激光倍频到 OH 基激光诱导荧光所需的 283.03 nm 激光。该波长的激光束单脉冲能量最高可达 50 mJ,该激光束被片光透镜组转换为高度约 70 mm、厚度约 0.2 mm 的平面激光。平面激光通过火焰中心平面激发 OH 基并产生波长约为 308 nm 的荧光信号,并最终由 ICCD 相机捕捉。ICCD 相机上配备有紫外镜头与 OH 带通滤波片,ICCD 相机拍摄相对于激光触发的延迟约为 410 ns,拍摄门宽为 100 ns,可以捕捉瞬时的火焰结构。对获得的 OH 原始图像进行背景减除、片光矫正、中值滤波得到清晰的 OH 火焰结果,然后基于自主火焰结构处理算法,提取 OH 火焰前锋面、火焰刷、火焰面密度、局部火焰曲率、湍流燃烧速度等关键信息。



(b)平面激光诱导荧光(OH-PLIF)实验系统

图 2 激光诊断测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser diagnostic measurement

本文中压降 Δp 是通过测量混合气总压力以及出口处的大气压力并计算差值得到的, 差值的大小变化主要通过调节来流的总流量来实现。在确定压降后, 以实验工况所需当量比计算来流中空气以及氢气的比例, 在实验中通过流量计来精确控制空气以及氢气的流量最终实现当量比的准确控制。

本文研究的阵列微管预混氢气/空气火焰当量比 ϕ 为 0.6, 压降 Δp 为 800~3 000 Pa, 对应流速为 45~87 m/s。采用 PIV 测量热态流场, 得到湍流强度 u' 与来流速度 U 呈线性关系, $u' = 0.051\ 2U + 5.418\ 2$, 如图 3 所示。层流燃烧速度 S_L 和层流火焰厚度 δ_L 采用 Chemkin-Pro 软件计算得到, 具体火焰和湍流基础参数如表 1 所示, 表征流体中最小的湍流结构尺寸的 Kolmogorov 尺度 l_k 随着流速的增加而减小。

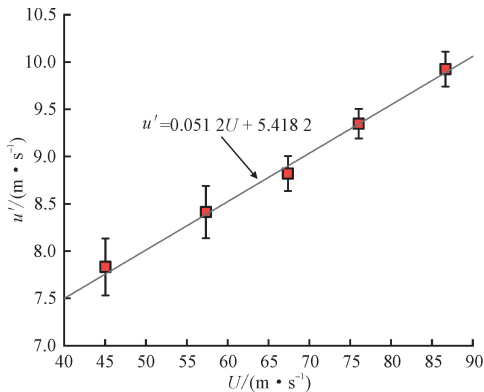


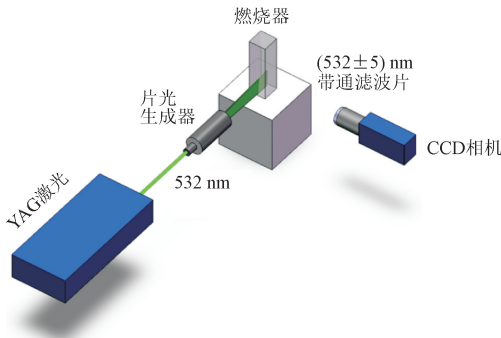
图 3 湍流强度随来流速度的变化

Fig. 3 Variation of turbulence intensity with flow velocity

表1 当量比为0.6下的氢气火焰和流场参数

Table 1 Flame and turbulence parameters of hydrogen/air flames at equivalence ratio of 0.6

$\Delta p/\text{Pa}$	$U/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$u'/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$S_{\text{T},0.1}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$S_{\text{T},0.5}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	l_{k}/mm
800	45.05	6.845	7.288	3.827	0.007 2
1 300	57.34	8.023	8.447	4.613	0.006 7
1 800	67.37	8.912	9.476	5.432	0.006 5
2 300	76.04	9.881	10.252	5.955	0.005 6
3 000	86.66	10.190	11.216	6.647	0.004 0



(a) PIV 流场测量系统

根据预混湍流火焰模式理论,预混湍流火焰分为层流火焰区、褶皱火焰区、薄反应区和增厚反应区,湍流尺度与层流火焰尺度的关系决定了预混湍流的火焰模式^[21]。图 4 给出了预混湍流火焰模式,其中 Re_T 为湍流雷诺数, Ka 为卡罗维兹数, l_0 为湍流积分尺度。由于混合气当量比、温度等恒定,混合气的层流参数不变,其中 δ_L 为 0.362 mm, S_L 为 1.038 m/s。湍流强度很弱时,湍流尺度大于层流火焰厚度,湍流只能微弱地扰动火焰,为火焰片区。湍流强度非常大,湍流尺度小于火焰反应区,影响化学反应,导致反应区增厚或破碎,为增厚反应区,也称为破碎反应区。这两种是预混湍流火焰的极端情况,介于这两种之间的为薄反应区,湍流尺度小于层流火焰厚度,但大于反应区厚度,湍流涡可以扰动到火焰的预热区,但不能作用到反应区,本文研究的火焰都处于薄反应区。

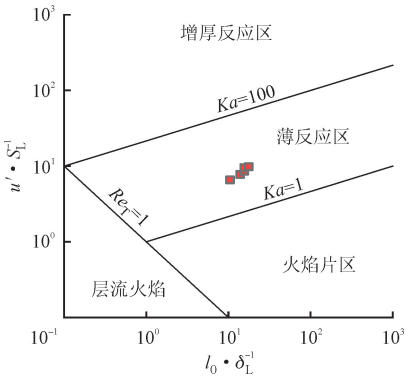


图 4 研究火焰在湍流火焰模式图中分布
Fig. 4 Regime diagram of investigated turbulent flames

2 研究结果和讨论

2.1 实验结果处理

OH 基广泛存在于已燃区和反应区。已燃区和未燃区 OH-LIF 信号会存在明显的梯度,因此常被用于提取火焰面^[22]。OH-PLIF 火焰图片处理过程^[23]如图 5 所示,基于该结果可逐步提取火焰面,并得到火焰刷统计信息。首先,OH-PLIF 图像转化为 256 灰度等级的灰度图,再用自适应阈值方法转化为图 5(b)所示二值图,该二值图表征了已燃区和未燃区及分界面处的火焰面。灰度图需用中值滤波去除噪声,进一步采用 Otsu's 方法获得每行灰度的局部阈值,每行使用该局部阈值区分已燃区和未燃区,最终提取图 5(c)所示火焰面,可将其视为一个无限薄假设下的火焰面。图 5(b)可用于获取进展

变量分布,将 300 个瞬时进展变量结果进行时间平均,则可以获得湍流火焰刷平均进展变量 c 分布,如图 5(e)所示,其中 $c = 0$ 表征未燃区, $c = 1$ 表征已燃区。对于喷嘴燃烧器的类型火焰,可根据图 5(e)进展变量绕中轴线旋转面积,进而测得湍流燃烧速度 S_T 。火焰面密度定义为燃烧区域单位体积内火焰前锋面面积的大小,常用于表征当地燃烧的剧烈程度,可通过将单位时间内控制面积内的火焰前锋面长度均值除以控制面积得到火焰面密度,结果如图 5(f)所示。

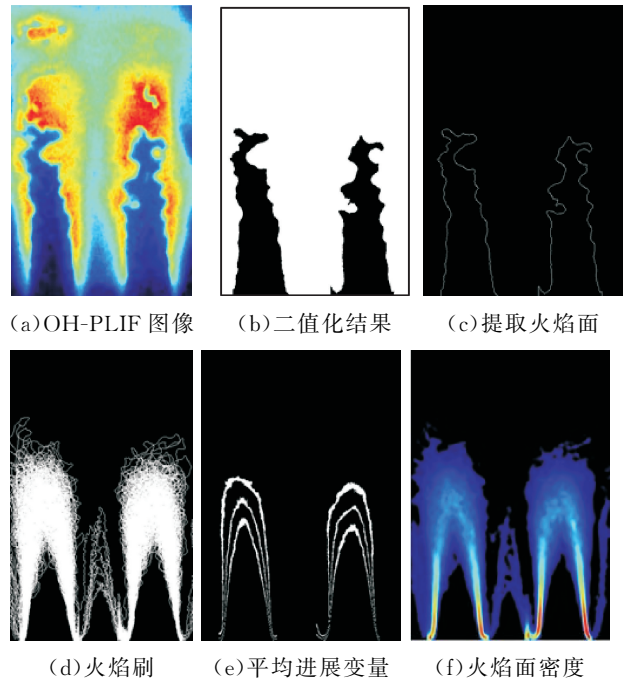


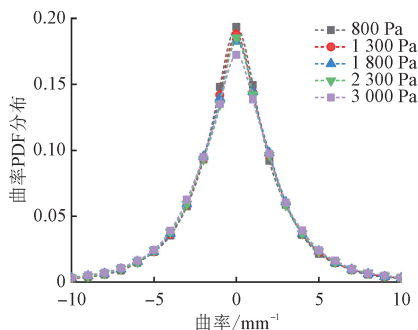
图 5 OH-PLIF 火焰图片处理过程^[23]
Fig. 5 Image processing schemes for OH-PLIF images^[23]

2.2 实验结果分析

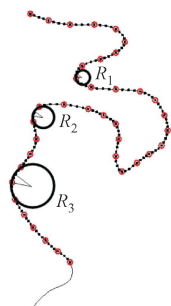
概率密度函数(PDF)是描述随机变量在某个取值范围内的概率分布函数。本文中主要统计了火焰曲率的密度分布函数,表示了火焰面曲率 κ 落在 $-10 \sim 10 \text{ mm}^{-1}$ 之间的概率。概率密度函数通常满足非负性和积分为 1 的性质,可以通过积分计算得到曲率落在该区间内的概率。

图 6(a)为氢气/空气在不同压降/流速下的曲率的 PDF 分布,可知不同条件下,氢气/空气火焰面曲率的 PDF 几乎呈对称分布,即火焰面凸向未燃气与凹向未燃气的概率基本相同。由图 6(b)、(c)可知,随着流速的增大,火焰表面呈现小曲率(对应较大曲率半径 R_3)的区域出现概率降低,而大曲率(对应小曲率半径 R_1)的区域出现频率增加,其中 r 为相对燃烧室对称轴的横向距离, H 为火焰高度。在

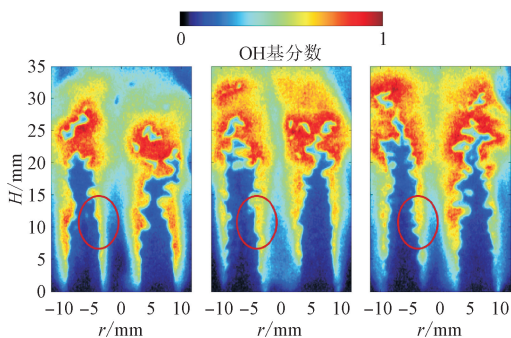
较高流速下,湍流强度加强,湍流涡的尺度减小,涡旋的转速提高,进而加强了湍流对火焰表面的扰动作用。这种扰动的加强使得火焰表面形成更多的小尺度结构,导致火焰呈现更加显著的褶皱现象。



(a)不同压降/流速下火焰面曲率 PDF 分布



(b)火焰锋面曲率半径示意图



(c) $\Delta p = 800, 1800, 3000$ Pa 的火焰锋面瞬时结构

图6 不同压降/流速下火焰面曲率 PDF 分布及结构

Fig. 6 PDF distribution and structure of flame curvature at different pressure drops/flow rates

图7为氢气/空气火焰不同高度下火焰面密度的积分 Ω 随火焰高度 H 的变化。而火焰面密度的积分能表征湍流火焰面积比 A_T/A_L ,其中 A_T 、 A_L 为湍流火焰和对应层流火焰面积。火焰面密度在火焰根部较大,在火焰中部和上部较小,但由于中部和上部火焰刷分布区域大,火焰面密度积分随高度先减小后增加,当达到火焰顶部后急剧减小。在火焰核心区,火焰面密度积分在不同流速下达到3.5~5.5,

即火焰面积比为3.5~5.5。

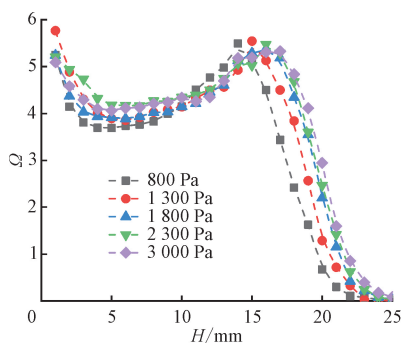


图7 不同压降/流速下火焰面密度积分随火焰高度变化
Fig. 7 Integration of flame surface density with H (height above burner) at different pressure drops/flow rates

图8为氢气/空气微混火焰的火焰面密度 Σ 随进展变量 c 的变化。火焰面密度相对进展变量以 $c = 0.5$ 呈现对称分布并在火焰中心处呈现最大值。由图8可知,火焰面密度即燃烧剧烈程度随着出口流速增加明显变大。火焰面密度一般受两个因素影响:一方面湍流强度变大会使前锋面褶皱程度增加,使得火焰面密度变大;另一方面湍流引起大尺度褶皱结构增加,使得湍流火焰空间分布区域增大,可能导致火焰面密度减小。在二者共同作用下火焰面密度是随着流速增加而单调增加,这说明前锋面褶皱程度为主要影响因素^[24]。火焰面密度曲线与进展变量包含得面积同样能表征湍流火焰面积比,随着流速增加,湍流强度增加,导致湍流火焰面积比增加,这将最终导致湍流燃烧速度增加。

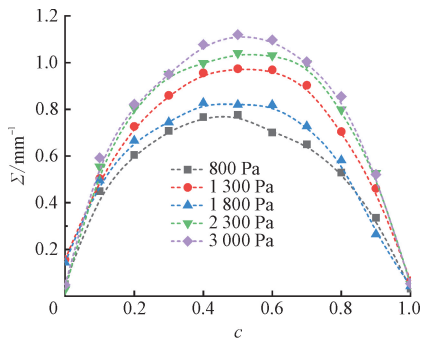


图8 不同压降/流速下火焰面密度与进展变量的关系
Fig. 8 Relationship between flame surface density and progress variable at different pressure drops/flow rates

对于此类火焰,获得湍流火焰速度的常见方法有角度法^[25]和面积法^[26]。面积法根据质量流量守恒可得如下方程

$$\rho_R A_0 U = \rho_R A_T S_T \quad (1)$$

简化后得到

$$S_T = \frac{A_0}{A_T} U \quad (2)$$

式中: ρ_R 为未燃气密度; A_0 为微管出口面积; U 为来流速度; A_T 为平均火焰面面积。计算过程中将进展变量 $c = 0.1$ 曲线用多项式拟合, 引入方差判据, 当拟合线与 $c = 0.1$ 曲线的总方差小于 1 时, 多项式函数随后利用多项式函数在曲线上下限范围内积分, 得到火焰 $c = 0.1$ 侧表面积, 利用面积之比和来流平均速度即可计算得到湍流燃烧速度, 即全局消耗速度。

Kobayashi 等^[26]利用指数关系获得湍流燃烧速度与湍流强度关系式, 以及氢气/空气微混燃烧湍流燃烧速度关系式。图 9 给出了不同流速条件下的湍流燃烧速率数据, 可知 S_T/S_L 与 u'/S_L 可以拟合为指数关系式, $S_T/S_L = \alpha(u'/S_L)^n$, 其中指数 n 为 1.028, 系数 α 为 1.003。 n 表征湍流扰动对湍流燃烧速度的影响强弱程度, 对比文献^[18]的低掺氢比混合气, 纯氢火焰比低掺氢比甲烷/氢气火焰湍流燃烧速度受湍流扰动更为剧烈。这主要是由于, 当量比为 0.6 的纯氢火焰具有更小的路易斯数 $Le = 0.59$, 将导致火焰刷内局部燃烧速度增强, 并最终导致整湍流燃烧速度增加。另外, 氢气火焰 S_T/S_L 达到 7~11, A_T/A_L 为 3.5~5.5 的两倍, $S_T/S_L = I_0 A_T/A_L$, 其中 I_0 为拉伸因子。因此, 稀燃氢气火焰 $I_0 > 1$, 即局部燃烧速率大于层流燃烧速度, 表明稀燃氢气湍流火焰速度增加由火焰面积和局部燃烧速率增加共同决定。

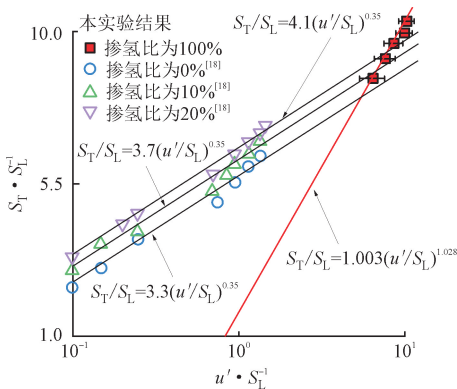


图 9 归一化湍流燃烧速度关系式

Fig. 9 Correlation for normalized turbulent burning velocity

3 结 论

本文采用 PIV 和 OH-PLIF 激光诊断技术研究了纯氢阵列微混火焰在不同流速下 (45~87 m/s) 的

热态流场和火焰结构, 并重点分析了火焰前锋面结构, 测量了纯氢火焰的湍流燃烧速度。得到如下主要结论。

(1) 纯氢阵列微混火焰湍流强度随喷管流速呈线性增加。火焰前锋面凸向未燃气与凹向未燃气的概率基本相同, 并且随湍流强度增强, 小尺度结构增加。火焰面密度同样随湍流强度增强而增加。

(2) 测量了纯氢火焰的湍流燃烧速度, 随湍流强度增加而增加, 并获得湍流燃烧速度关系式。稀燃纯氢微混火焰湍流燃烧速度增加主要由火焰面积增加和局部燃烧速度增强共同决定。

参考文献:

- [1] 潘家华, 廖茂林, 陈素梅. 碳中和: 中国能走多快? [J]. 改革, 2021(7): 1-13.
PAN Jiahua, LIAO Maolin, CHEN Sumei. Carbon neutrality: how fast can China go? [J]. Reform, 2021(7): 1-13.
- [2] 张泽奇, 杜洋, 杨正浩, 等. 不同氢气喷孔直径对汽油掺氢 X 型转子发动机性能及污染物排放的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(2): 66-78.
ZHANG Zeqi, DU Yang, YANG Zhenghao, et al. Impact of different hydrogen nozzle diameters on performance and pollutant emission of X-type rotary engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(2): 66-78.
- [3] 张烨苗, 李倩倩, 闫治宇, 等. 异辛烷掺混乙醇在高温下层流预混燃烧特性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(7): 74-79.
ZHANG Yemiao, LI Qianqian, YAN Zhiyu, et al. Laminar flame premixed combustion characteristics of Ethanol-Isocetane blends at elevated temperatures [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(7): 74-79.
- [4] 欧阳志远, 史作廷, 石敏俊, 等. “碳达峰碳中和”: 挑战与对策 [J]. 河北经贸大学学报, 2021, 42(5): 1-11.
OUYANG Zhiyuan, SHI Zuoting, SHI Minjun, et al. Challenges and countermeasures of "carbon peak and carbon neutrality" [J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2021, 42(5): 1-11.
- [5] 王金华, 张猛, 谢永亮, 等. 合成气纯氧高压预混湍流火焰结构研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(10): 87-90.
WANG Jinhua, ZHANG Meng, XIE Yongliang, et al. Experimental study on turbulent premixed flames of syngas oxyfuel mixtures at high pressure [J]. Jour-

- nal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(10): 87-90.
- [6] 巨翊宇, 梁红侠, 索建秦, 等. 某航改燃机氢燃料燃烧室污染排放特性研究 [J]. 推进技术, 2024, 45(3): 194-206.
- JU Hongyu, LIANG Hongxia, SUO Jianqin, et al. Pollution emission characteristics of hydrogen-fueled combustor of an aero-engine conversion gas turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 194-206.
- [7] 李苏辉, 张归华, 吴玉新. 面向未来燃气轮机的先进燃烧技术综述 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1423-1437.
- LI Suhui, ZHANG Guihua, WU Yuxin. Advanced combustion technologies for future gas turbines [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(12): 1423-1437.
- [8] HAJ A A, KUSTERER K, FUNKE H H W, et al. Improvement study for the dry-low- NO_x hydrogen micromix combustion technology [J]. Propulsion and Power Research, 2015, 4(3): 132-140.
- [9] 陈昊. 富氢燃料微混燃烧组织方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [10] 莫姐, 林宇震, 韩啸, 等. 氢气微混燃烧技术研究现状和未来展望 [J]. 航空学报, 2024, 45(7): 31-57.
- MO Da, LIN Yuzhen, HAN Xiao, et al. Research progress and future prospect of hydrogen micromix combustion technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(7): 31-57.
- [11] 邱朋华, 卢成, 张林瑶, 等. 氢燃料微混燃烧技术研究进展 [J]. 热能动力工程, 2023, 38(5): 14-23.
- QIU Penghua, LU Cheng, ZHANG Linyao, et al. Research progress of hydrogen micromix combustion technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 14-23.
- [12] FUNKE H H W, BECKMANN N, KEINZ J, et al. 30 Years of dry-low- NO_x micromix combustor research for hydrogen-rich fuels—an overview of past and present activities [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(7): 071002.
- [13] FUNKE H W, BOERNER S, KEINZ J, et al. Experimental and numerical characterization of the dry low NO_x micromix hydrogen combustion principle at increased energy density for industrial hydrogen gas turbine applications [C]//ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA; ASME, 2013: V01AT04A055.
- [14] FUNKE H H W, KEINZ J, KUSTERER K, et al. Experimental and numerical study on optimizing the DLN micromix hydrogen combustion principle for industrial gas turbine applications [C]//ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA; ASME, 2015: V04AT04A008.
- [15] YORK W, HUGHES M, BERRY J, et al. Advanced IGCC/hydrogen gas turbine development: DE-FC26-05NT42643[R]. Schenectady, USA; GE Power and Water, 2015.
- [16] YORK W D, ZIMINSKY W S, YILMAZ E. Development and testing of a low NO_x hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(2): 022001.
- [17] 刘勋伟. 含氢燃料多微混射流火焰的燃烧特性与稳焰机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [18] 张猛, 王金华, 谢永亮, 等. 利用 OH-PLIF 测量 CH_4/H_2 /空气混合气湍流燃烧速率 [J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(6): 512-516.
- ZHANG Meng, WANG Jinhua, XIE Yongliang, et al. Measurement of turbulent burning velocity of CH_4/H_2 /air mixtures using OH-PLIF [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(6): 512-516.
- [19] 俞森彬, 王金华, 聂要辉, 等. CH_4 /空气和 C_3H_8 /空气预混湍流火焰结构及湍流火焰速度测量 [J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(4): 329-334.
- YU Senbin, WANG Jinhua, NIE Yaohui, et al. Measurement of flame front structure and burning velocity of premixed turbulent flames of CH_4 /air and C_3H_8 /air [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(4): 329-334.
- [20] 严浩, 张榛, 耿金越, 等. 利用平面激光诱导荧光对旋流火焰 OH 自由基的定量研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(2): 31-38.
- YAN Hao, ZHANG Zhen, GENG Jinyue, et al. Quantitative investigation of OH radical in swirling flame by planar laser-induced fluorescence [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(2): 31-38.
- [21] PETERS N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion [J]. Symposium (International) on Combustion, 1988, 21(1): 1231-1250.
- [22] 王霜, 李法社. 不同氧化程度生物柴油的燃烧特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(4): 348-353.
- WANG Shuang, LI Fashe. Combustion characteristics of biodiesel with different oxidation degrees [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(4): 348-353.

[23] JU Rongyuan, WANG Jinhua, ZHANG Meng, et al. Experimental study on burning velocity, structure, and NO_x emission of premixed laminar and swirl NH₃/H₂/air flames assisted by non-thermal plasma [J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2023, 14: 100149.

[24] ZHANG Meng, WANG Jinhua, WU Jin, et al. Flame front structure of turbulent premixed flames of syngas oxyfuel mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(10): 5176-5185.

[25] BOUVET N, HALTER F, CHAUVEAU C, et al. On the effective Lewis number formulations for lean hydrogen/hydrocarbon/air mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(14): 5949-5960.

[26] KOBAYASHI H, TAMURA T, MARUTA K, et al. Burning velocity of turbulent premixed flames in a high-pressure environment [J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(1): 389-396.

(编辑 赵炜)