

贫燃预混旋流火焰 PIV 和 OH-PLIF 瞬态同步测量

张 俊, 涂晓波, 陈 爽, 李玉栋, 王林森, 齐新华

(中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为了研究贫燃预混旋流火焰流场与火焰结构特性, 设计了强受限预混旋流燃烧器, 搭建了 PIV (粒子图像测速) 和 OH-PLIF (平面激光诱导荧光) 瞬态同步测量系统。针对典型贫燃工况开展了瞬态同步测量研究, 获得了多个截面的瞬态和时均流场速度和 OH 分布信息。研究表明: 低当量比不稳定燃烧工况下, 伴随着角涡回火现象, 燃烧室底部角落存在明显火焰反应区; 由于旋流拉扯效应导致 OH 分布结构边缘产生褶皱, 并出现多个 OH“孤岛”; 旋流火焰外沿位于喷嘴射流的内侧剪切层; 增加当量比, 火焰流场结构与反应区分布与低当量比类似, 但燃烧更稳定, 火焰高度有所增加; 内部回流区的经典双涡结构分裂为多个旋涡, 存在旋涡进动、破碎的现象。

关 键 词: 火焰流场结构; 火焰反应区; 贫燃预混; 瞬态同步; 粒子图像测速 (PIV); 平面激光诱导荧光 (PLIF)

中图分类号: V235.11

文献标志码: A

Instantaneous and simultaneous PIV and OH-PLIF measurement for lean premixed swirl flame

ZHANG Jun, TU Xiaobo, CHEN Shuang, LI Yudong,
WANG Linsen, QI Xinhua

(Facility Design and Instrumentation Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: To better study the flame flowfield and structure in lean and premixed swirling flames, a premixed swirling burner with strong confined combustor was designed, and the experimental instantaneous and simultaneous system of PIV (particle image velocimetry) and OH-PLIF (planar laser-induced fluorescence) was built. With this system, the measurement research was carried out in swirling flame under typical operating condition, meanwhile time-averaged and instantaneous simultaneous flame velocity flowfield and OH distribution structures in multiple sections were obtained. Results showed that multiple flame reaction zones existed in the bottom corners of combustor under condition of unsteady combustion at low equivalence ratio, accompanied by flash back in corner vortices. Due to shear effect of swirling flow, lots of wrinkles appeared along the edge of OH distribution struc-

收稿日期: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(91641118)

作者简介: 张俊(1982—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光学流场显示及测量研究。

通信作者: 陈爽(1979—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事燃烧流场激光光谱诊断、湍流燃烧实验研究。

E-mail: chenshuang827@gmail.com

引用格式: 张俊, 涂晓波, 陈爽, 等. 贫燃预混旋流火焰 PIV 和 OH-PLIF 瞬态同步测量[J]. 航空动力学报, 2020, 35(10): 2046-2055.

ZHANG Jun, TU Xiaobo, CHEN Shuang, et al. Instantaneous and simultaneous PIV and OH-PLIF measurement for lean premixed swirl flame[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(10): 2046-2055.

ture, and many isolated OH blocks were observed. The root of swirling flame lied at inner side of shear layer of the jet flow. As equivalence ratio increased, the swirling flame velocity flowied and OH distribution structures were similar to low equivalence ratio. But the combustion was more stable, and the flame height increased somehow. It was found that the typical two vortices were split into multiple vortices sometime. There were phenomena with vortex moving and breaking down.

Key words: flame flowfield structure; flame reaction zone; lean premixed; instantaneous synchronization; particle image velocimetry (PIV); planar laser-induced fluorescence (PLIF)

贫燃预混技术能够有效提高燃烧效率、控制燃烧温度,是先进航空发动机和燃气轮机清洁高效燃烧极具潜力的研究方向^[1-4]。而旋流燃烧具有大尺度中心回流区、角涡区、强剪切区等流动特性,对于燃烧室油气掺混、稳焰有着明显的优势^[5-6]。因此,贫燃预混旋流燃烧成为现代先进航空发动机和燃气轮机燃烧室优先采用的燃烧组织形式之一。但是燃烧不稳定性限制了贫燃预混技术的进一步发展,包括火焰吹熄、回火、热声振荡等问题^[7-10]。同时,旋流突扩燃烧室流动呈现强湍流状态,表现出强旋流、强剪切、非定常等特征,从而导致在贫燃预混旋流燃烧中,湍流流动、燃烧释热、传热传质之间的耦合作用进一步加剧,极大地增加了对旋流燃烧机理数值模拟和实验研究的难度。因此,为了解析湍流燃烧多机制强相互作用,有必要开展火焰流场多场多物理量瞬态同步测量研究,从而同时获取高时空分辨的多物理场信息。

PIV (particle image velocimetry) 和 PLIF (planar laser-induced fluorescence) 同步测量技术具有流场光学测量的许多优异特点,如非干扰、面测量、高时空分辨等;之外,该技术能够同时获得燃烧流场某个截面的速度和组分浓度分布结构,为优化旋流燃烧组织形式和数据同化算法提供基础实验数据,在深入理解分析燃烧与流动耦合相互作用方面具有独特的优势。目前,国外多个机构采用 PIV 和 PLIF 同步测量技术在湍流燃烧领域获得了有意义的实验结果,走在了湍流燃烧多场多物理量光学测量的前列。Meyer 等利用 OH-PLIF 和 PIV 技术研究了火焰与涡结构之间相互作用^[11],Donbar 和 Driscoll 应用 OH 和 CH 的 PLIF 联合 PIV 对非预混射流火焰熄火特性进行了研究^[12]。Stohr 等采用 PIV/OH-PLIF 同步测量技术获得了旋流火焰多个截面流场速度和 OH 分布信息,并采用本征正交分解方法进行数据分

析,解释了涡核进动的对流增强混合效应^[13]。Guiberti 针对受限旋流火焰开展了 PIV/OH-PLIF 同步测量研究,对 V 形火焰与 M 形火焰之间相互转化现象进行了阐述^[14]。Boxx 等利用帧频为 5 kHz 的 PLIF 和 PIV 研究了 GT(gas turbine)燃烧器中旋流火焰流场和进动涡核对火焰锋面结构和混合过程的影响^[15]。国内相关研究相对较少,近年上海交通大学王国庆等采用高频脉冲串激光,针对声学激励旋流火焰同步测量了流场速度和 CH_2O 分布,获得了不同条件下的时均速度场、涡量场和火焰分布信息^[16]。可见,PIV 和 PLIF 同步测量技术在燃烧诊断领域的应用逐渐增多,为湍流燃烧机理研究提供了有力手段。

随着我国先进航空发动机和燃气轮机的发展加速,具有典型工业应用背景的强受限旋流火焰成为行业研究的热点之一,但实验研究的精细化和系统化程度还难以满足数值仿真验证的需求,亟需提升实验数据的有效性和丰富程度。为了研究受限旋流火焰流场与火焰结构的复杂特性,设计了强受限旋流燃烧器,发展了 PIV 和 OH-PLIF 瞬态同步测量技术,针对不同工况下的贫燃预混旋流火焰获得了多个截面的瞬态和时均流场速度和 OH 分布图,研究分析了旋流火焰流场与火焰锋面的分布特性。

1 实验装置

图 1 为设计的强受限预混旋流燃烧器结构示意图及实物图,自下而上包括进气口、预混段、整流段、收缩段、旋流器、燃烧室等部段,炉体采用不锈钢材质,燃烧器总高度为 449 mm。旋流器及喷嘴结构如图 2 所示,采用旋流叶片配置中心钝体方式产生规则稳定旋流;旋流叶片角度为 35° ,采用直叶片,共 12 个叶片,计算旋流数 S 为 0.884,计算公式如下^[17]:

$$S = \frac{1}{1 - \psi} \cdot \frac{\tan \alpha}{1 + \tan \alpha \tan\left(\frac{\pi}{n}\right)}$$

(1)

$$\psi = \frac{n\sigma}{2\pi R \cos \alpha}$$

(2)

式中 ψ 为阻塞度系数, α 为旋流叶片角度, n 为旋流叶片数, σ 为旋流叶片厚度, R 为喷嘴内径。燃烧室横截面尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 高为 100 mm , 四面采用高质量石英玻璃, 耐高温, 便于光学实验开展。燃烧实验时, 空气与甲烷分别进气, 而后在预混室内经碰撞板作用之后混合, 甲烷进气管路设置单向阀; 喷嘴结构采用单向流动自来水进行冷却, 确保炉体温度不会升高; 燃烧室出口尾气及粒子气流经过收集和管路传导, 再经雾化液滴对

粒子进行沉降处理, 避免人员不适以及环境污染。

2 实验方法

与单独 PIV 测量和 OH-PLIF 测量相比, PIV 和 OH-PLIF 瞬态同步测量实验方法更为复杂, 在系统调试、光路调节、时序匹配、系统抗干扰能力等方面提出了更高要求。

2.1 实验系统及测量方法

测量系统示意图如图 3 所示。PIV 系统采用 2D-2C(two dimensions-two coordinates)测量方式, 系统组成包括跨帧 CCD(charge coupled device)相机、双脉冲激光器、时序控制器、片光光学组件、图像采集和数据处理计算机。跨帧 CCD 相机分辨率为 $2048\text{ 像素} \times 2048\text{ 像素}$, 像元尺寸为 $7.4\text{ }\mu\text{m}$, 最小跨帧时间为 200 ns ; 激光器采用北京镭宝 Vilit 500 双脉冲激光器, 输出波长为 532 nm , 最大单脉冲能量为 500 mJ , 脉宽为 $6\sim8\text{ ns}$, 频率为 $1\sim15\text{ Hz}$ 。激光器系统提供双脉冲激光光源, 并经由片光组件产生厚度约为 1.5 mm 的激光片光。片光照亮旋流火焰流场中的示踪粒子, 通过跨帧相机获取间隔时间 Δt 的两帧粒子图像, 而后由数据处理系统完成互相关分析及后续数据处理, 得出流场速度。

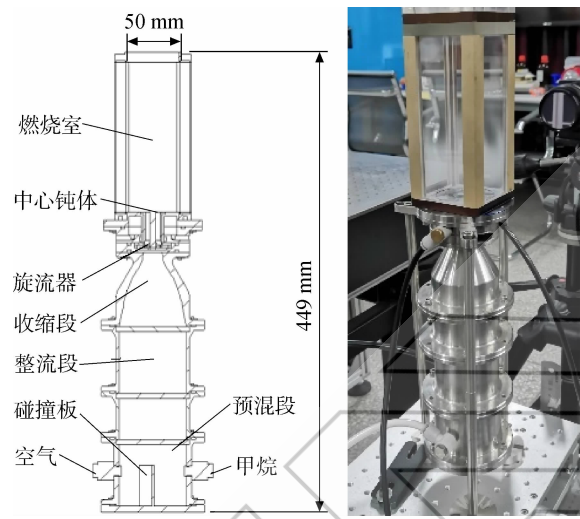


图 1 预混旋流燃烧器结构及实物图

Fig. 1 Structure diagram and real model of premixed swirling burner

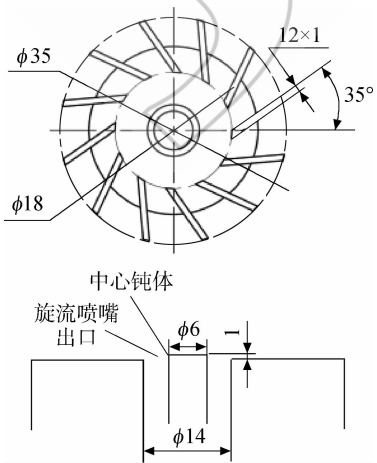


图 2 旋流器及喷嘴结构示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of swirler and nozzle (unit:mm)

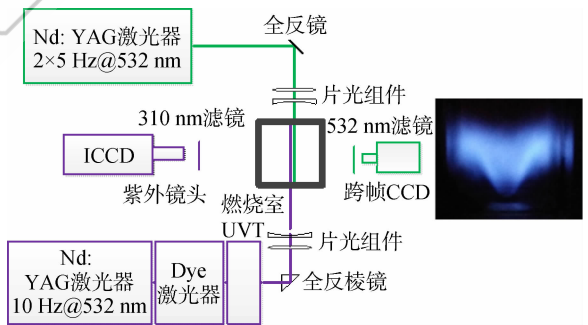


图 3 测量系统示意图和典型 M 火焰

Fig. 3 Schematic diagram of measurement system and typical M-shape flame

PLIF 系统组成包括激发光源系统、光路系统、ICCD(intensified charge coupled device)相机、时序控制器和图像采集计算机 5 个部分。ICCD 相机分辨率为 $1024\text{ 像素} \times 1024\text{ 像素}$, 像元尺寸为 $13\text{ }\mu\text{m}$; 激发光源由 Nd:YAG(掺钕钇铝石榴石)固体激光器、Dye(染料)激光器、UVT(紫外倍频)设备组成。Nd:YAG 激光器输出 532 nm 脉冲激光, 作为泵浦激光进入染料激光器, 之后输出的可调谐激光经 UVT 倍频之后获得紫外激发谱

线。激发谱线选择 A-X(1,0)跃迁的 Q1(4)线(波长为 282.522nm),能量为 10mJ。激发荧光主要位于 305~320 nm 波段,因此 ICCD 相机紫外镜头前配置 310nm 滤波片,以提高信噪比。

实验中,采用体式分离的紫外全反射棱镜、凸透镜、柱透镜组合,实现光路布置和光束整形,形成宽度约为 50mm、厚度约为 0.5mm 的紫外激光片光。而后照射旋流燃烧室内的待测火焰截面,激发火焰中的 OH 基团,通过时序匹配的 ICCD 采集 OH 荧光图像,获得 OH 分布信息。实验中典型 M 形旋流火焰如图 3 所示。

为了实现旋流火焰 PIV 测量与 OH-PLIF 测量的瞬态同步开展,必须使得 PIV 系统照明片光、PLIF 激发片光与待测截面空间位置重合。鉴于 PLIF 系统光路体式分布、调试复杂的特点,首先根据实验布局调试好 PLIF 系统光路,确保片光能量、宽度、厚度满足要求;而后采用三维可调节平台,调整燃烧器位置,确保 PLIF 片光与燃烧室待测截面重合;之后,调节高集成度的 PIV 导光臂和片光组件,使得 PIV 系统片光、PLIF 系统片光与待测截面空间位置重合,确保测量截面的空间一致。

2.2 时序匹配

时序一致是 PIV/OH-PLIF 瞬态同步测量的重要环节。实验中,时序控制如图 4 所示。以 PIV 系统的时序控制器初始信号作为信标,通过 TTL(transistor-transistor logic)信号控制脉冲延迟控制器,并设置适当的延迟时间,再进一步触发 PLIF 系统时序控制器,从而确保 PIV 系统与 PLIF 系统协同工作。

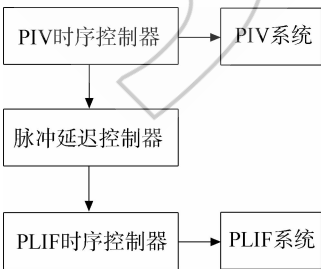


图 4 时序控制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of timing control

脉冲延迟控制器延迟时间设置的准则是:在充分考虑 PIV 系统工作频率及出光时刻和 PLIF 系统工作频率及出光时刻的基础上,确保 PLIF 系统的脉冲激光位于 PIV 系统跨帧时间 Δt 的中间位置,即 A 路与 B 路脉冲激光之间,如图 5 所

示,图中 f_{PLIF} 和 f_{PIV} 分别表示 PLIF 激光器和 PIV 激光器的工作频率。基于 ICCD 与激励光源的 PLIF 系统实际采集周期为 1.2 s,PIV 实际采集周期为 0.2 s,因此调试后瞬态 PIV 和 OH-PLIF 同步测量有效周期为 1.2 s,频率为 0.83 Hz。为了考核 PIV 与 PLIF 测量的瞬态同步的可靠性和稳定性,在整个系统调试完成时和进入实验状态时,均采用光电探测器对双系统三脉冲激光的散射光进行光电转换,而后利用示波器进行脉冲时序观察。结果表明,实际三脉冲激光时序与初始设计一致。

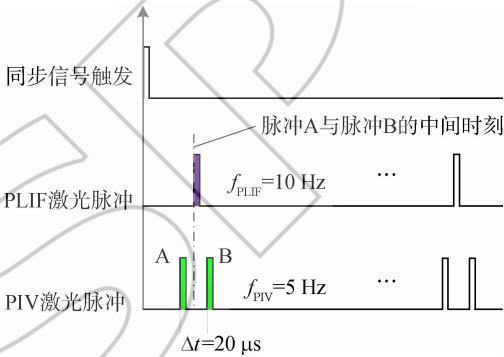


图 5 时序匹配示意图

Fig. 5 Schematic diagram of timing matching

3 测量结果及分析

由于燃烧流场具有高温特点,根据 PIV 实验粒子选取原则^[18],示踪粒子使用 TiO₂ 固体微颗粒,标称粒径为 0.5 μm,密度为 4.26 g/cm³,熔点为 2113 K,物理化学性质稳定。为了确保播撒粒子气流不影响燃烧时总的空气体积流量(文中简称流量)以及避免对流量控制器造成破坏,在空气流量控制器下游接入粒子罐,采用流化床方式将粒子带出,最后通过管路进入燃烧器。2D-2C PIV 和 OH-PLIF 同步测量实验研究针对 2 个工况开展,空气流量均保持为 40 L/min,燃烧室进口压力为 0.102 MPa,进口温度为 298 K,具体如表 1 所示。实验中观察发现,Case 1 工况为该空

表 1 实验工况

Table 1 Experiment conditions

工况	空气流量/ (L/min)	甲烷流量/ (L/min)	体积 当量比
Case 1	40	2.8	0.67
Case 2	40	3.5	0.83

气流量条件下接近吹熄状态,火焰上下抖动十分剧烈;Case 2 工况火焰燃烧比较稳定。因此,选取的工况具有一定代表性。

为了确保测得的流场速度及火焰 OH 基的时均场分布结果的有效性,对不同采样图片数量的时均速度场及 OH 基分布结果进行了比对。结果表明,图片数量超过 30 张时,时均结果具有很好的一致性,能够表征所测的时均场。因此,测得结果中的时均 PIV 数据采用 60 对瞬态图像平均获得,时均 OH-PLIF 数据采用 100 张瞬态图像平均获得,确保了所得时均场的有效性。在测量系统空间分辨率方面,PIV 单点矢量分辨率为 1.6 mm,PLIF 成像分辨率为 49 μm/像素。根据旋流燃烧室对称特点,设定燃烧室测量坐标系如图 6 所示,选择中心钝体上端面圆心为坐标原点, X 轴水平指向右侧, Y 轴垂直指向上方, Z 轴指向跨帧 CCD,满足右手法则。

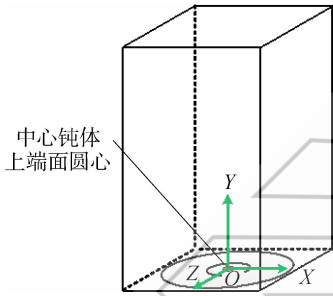


图 6 测量坐标系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of measurement coordinate system

3.1 Case 1 工况的测量结果

图 7 为 Case 1 工况下不同截面速度流线和 OH 时均分布,图 8 为 Case 1 工况下不同截面速度矢量和 OH 时均分布,图中色谱 $I/I_{\max}$ 代表 OH 基荧光信号的归一化强度, v 表示流场速度(文中下同)。由于 PLIF 激光能量及 ICCD 视场分辨率的限制,测得的 OH 分布信息的有效尺寸约为 45 mm×50 mm,速度分布信息的有效尺寸约为 45 mm×90 mm。因此,每一张图下半部分 ($Y<50$ mm) 为速度信息与 OH 分布信息的叠加,每一张图上半部分 ($Y>50$ mm) 为速度信息,其间有明显的颜色差异。由于受限空间内激光反射干扰, X 方向有效测量宽度约为 45 mm。多次不同实验时,均对 PLIF 激光能量进行调节,确保其激发的 OH 荧光分布能够清晰完整地表征火焰反应区的位置和空间结构。

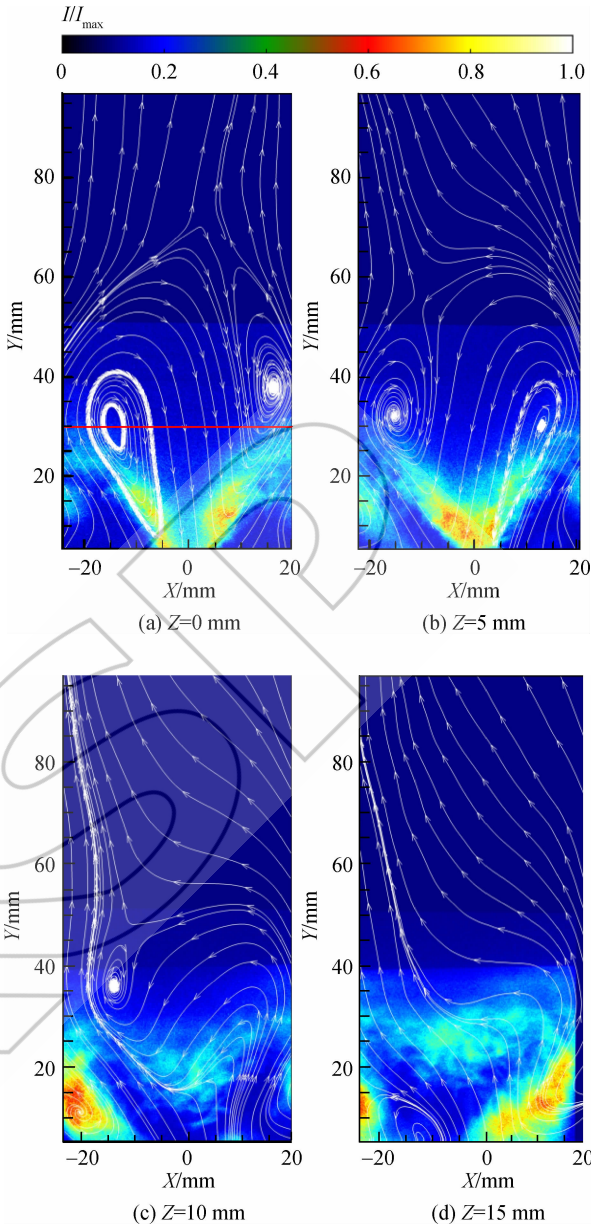


图 7 Case 1 工况下不同截面的时均速度流线和 OH 基分布图

Fig. 7 Time-averaged flowfield velocity streamlines and OH radicals distribution in different sectional planes in Case 1

图 7 和图 8 中图(a)~图(d)分别为 Z 值等于 0、5、10、15 mm 时截面的测量结果。图 7(a)和图 8(a)为旋流燃烧室中心纵截面测量结果,可见,旋流流场喷嘴射流和内外剪切层特征明显,并保持基本对称;具备典型双旋涡大尺寸回流区结构,旋涡左右边缘贴近燃烧室侧壁面,高度从喷嘴出口延展至 $Y=70$ mm;喷嘴出口射流速度量级最大,约为 10 m/s;驻于中心钝体上方的火焰外沿形成锥形杯结构,且火焰反应区位于喷嘴射流的内剪切层,同时由于角涡回流结构与火焰相互作用,火

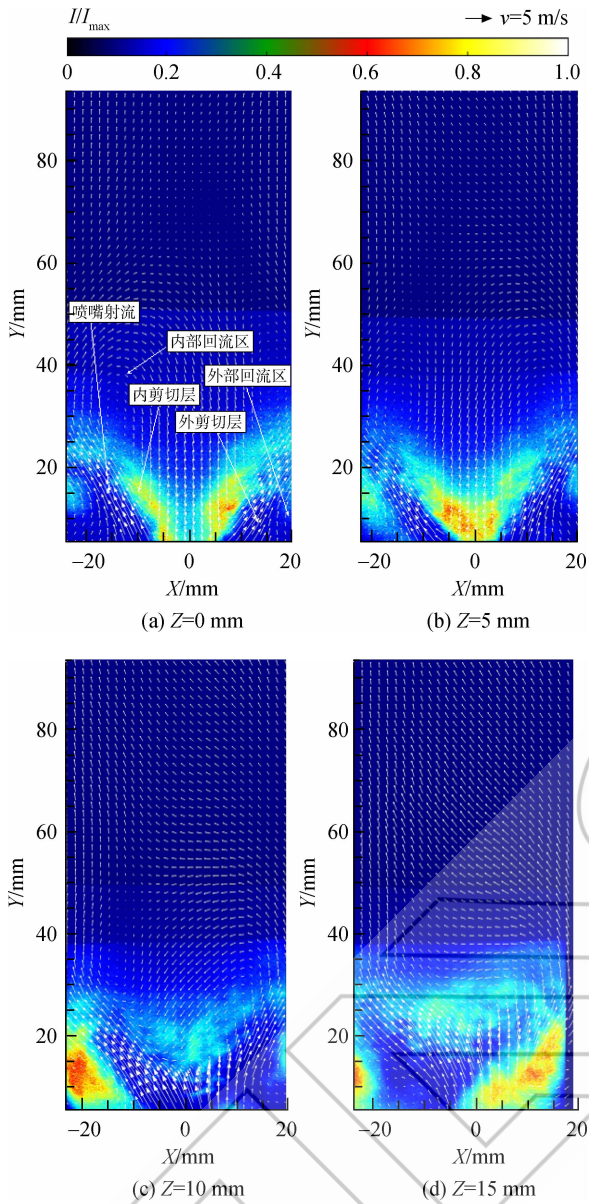


图 8 Case 1 工况下不同截面的时均速度矢量和 OH 基分布图

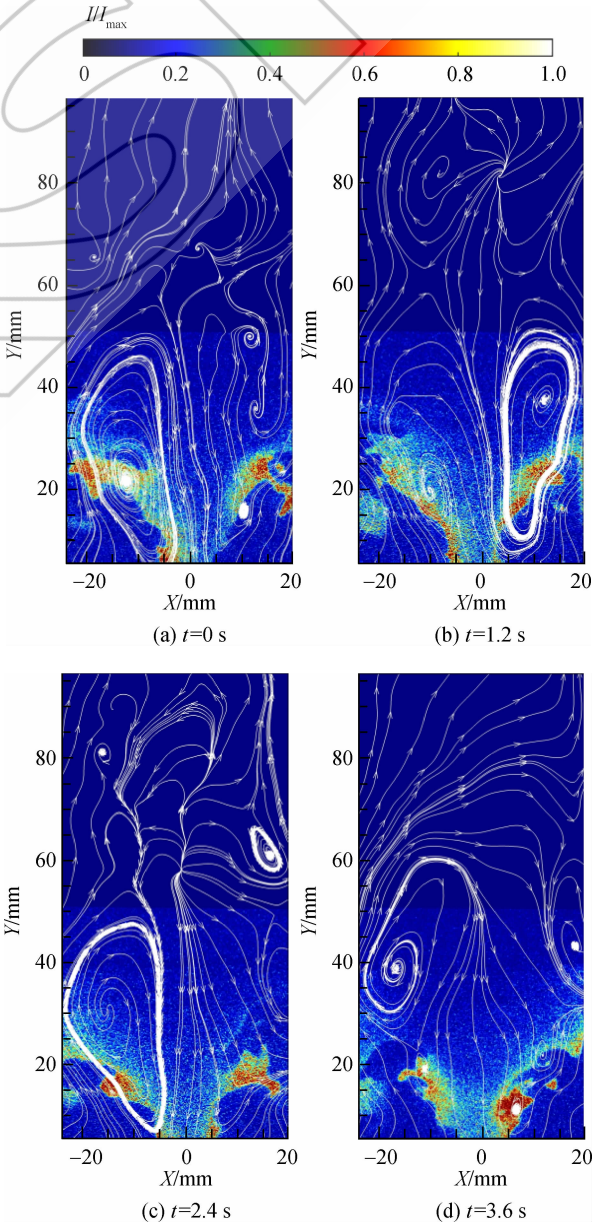
Fig. 8 Time-averaged flowfield velocity vectors and OH radicals distribution in different sectional planes in Case 1

焰反应区触壁之后倒卷,呈 M 形结构。

对比图 7(a)~图 7(d)和图 8(a)~图 7(d),可以发现,随着 Z 值增加,图中下半部分的双涡结构逐渐消失,但仍留有双涡的痕迹,流线方向逐渐统一为由右向左向上。这是由于 Z 值增加,所测截面逐渐沿着圆形喷嘴的径向而外移,此处喷嘴突扩气流受侧壁面限制减弱,测得的截面内的喷嘴顺时针(从燃烧室上方观察)旋流受中心钝体影响变小,因而逐渐呈现出较完整的向左上升气流形态。同样,随着 Z 值增加,图中上半部分流线逐渐由两侧汇聚向中线而后流出燃烧室,变成

单一的从右向左向上。可见,从燃烧室上方观察,流场呈顺时针螺旋上升,不同截面速度分布清晰显示出了流场的大致整体结构;而从图 7(c)和图 7(d)中发现,燃烧室底部角落处存在明显的火焰反应区,显示了角涡回火的大量存在。

图 9 为 Case 1 工况下中心纵截面速度流线和 OH 瞬态分布,图中 t 表示时间。图 10 为 Case 1 工况下中心纵截面速度矢量和 OH 瞬态分布,各子图顺序间隔为 1.2 s。从图 9(a)、图 9(d)、图 9(g)和图 10(a)、图 10(d)、图 10(g)可以观察到喷嘴右侧剪切层内多个小旋涡存在,显示出涡核进动的迹象,同侧内部回流区被挤压变形,不规则,存在涡破碎现象;图 9(f)中,喷嘴两侧内部回流区出现上下共 4 个旋涡,分别位于内剪切层和内部回流区,结合图 9(b)、图 9(h)和图 10(b)、图



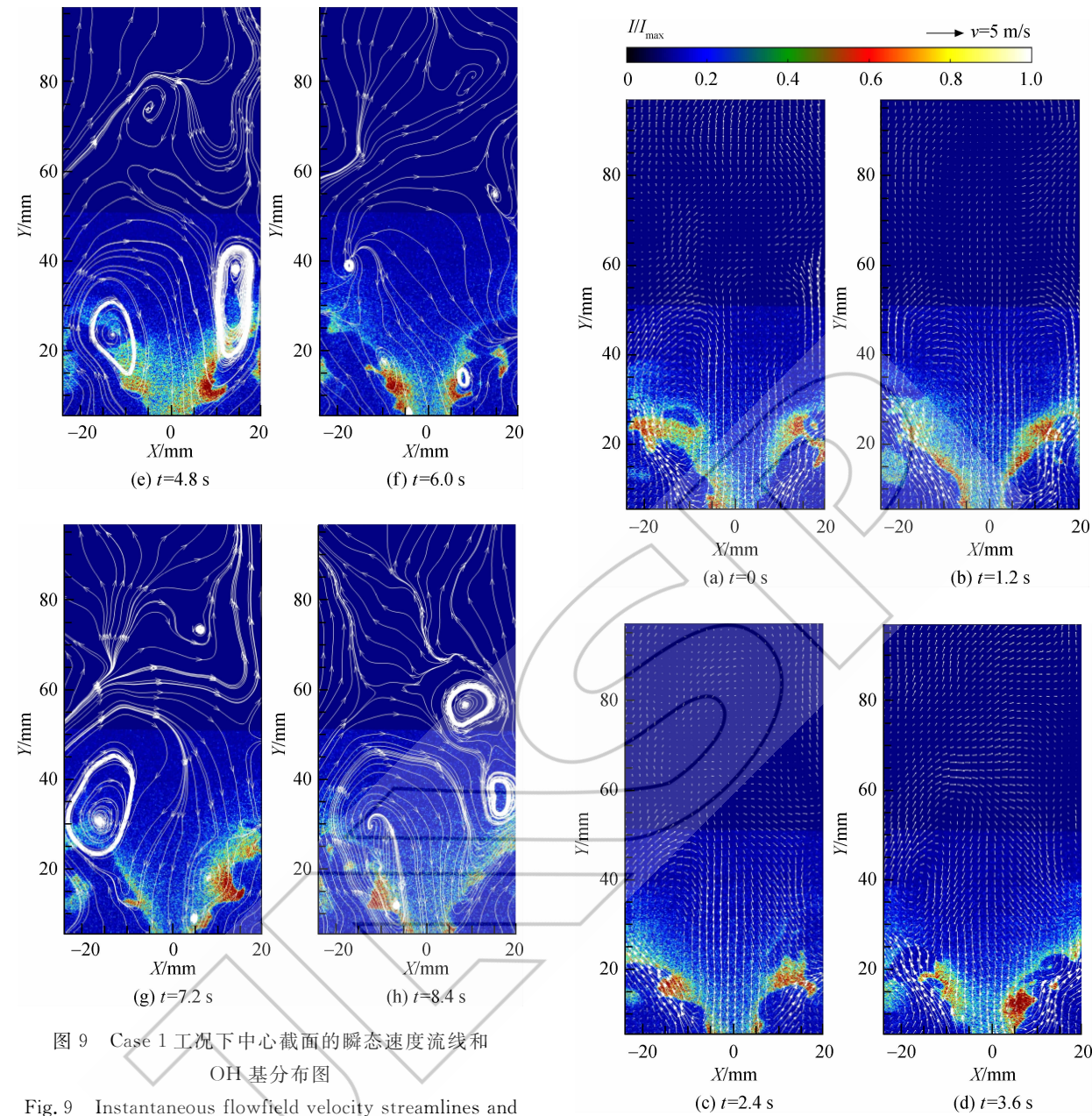
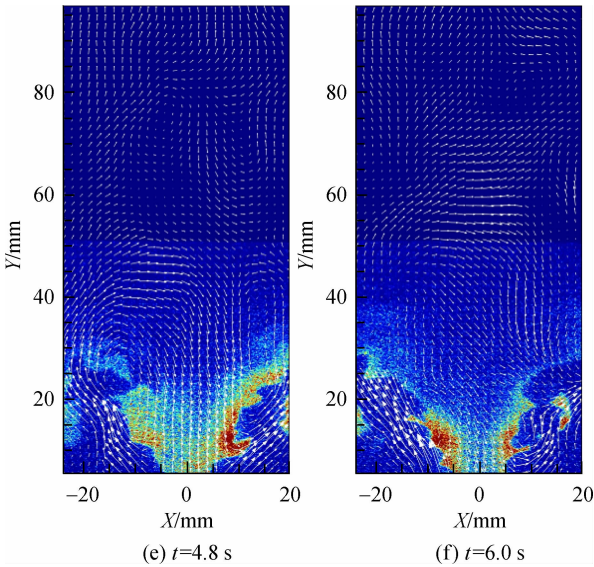


图 9 Case 1 工况下中心截面的瞬态速度流线和 OH 基分布图

Fig. 9 Instantaneous flowfield velocity streamlines and OH radicals distribution in center sectional planes in Case 1

10(h),发现普遍存在上下多旋涡结构,且位置从上游剪切层向下游回流区的进动。从图 10 可发现,由于火焰旋转燃烧,OH 荧光激发信号呈“八”字形分布,遇见燃烧室内壁之后倒卷,产生 M 形火焰,同时旋流拉扯造成 OH 分布结构的边缘出现褶皱,且由于当量比较低,火焰不稳定,产生局部熄火,出现多个 OH“孤岛”,显示了受限旋流火焰流场的极端不稳定性;喷流速度极值与 OH 分布并不重合,火焰分布于喷流内侧剪切层,主要是由于喷流速度过大,火焰难以在其中稳燃,而通过下游旋涡回流作用,将热量回传,将旋流火焰稳定在内剪切层附近。



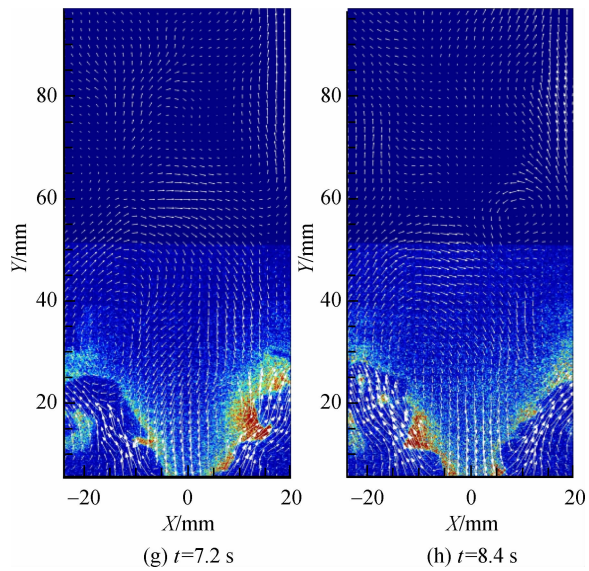


图 10 Case 1 工况下中心截面的瞬态速度矢量和 OH 基分布图

Fig. 10 Instantaneous flowfield velocity vectors and OH radicals distribution in center sectional planes in Case 1

3.2 Case 2 工况的测量结果

图 11 和图 12 分别为 Case 2 工况下中心截面的时均和瞬态测量结果。对比图 7(a)与图 11(a)中的红线,以及参考图 9 和图 12,发现随着当量比增加,火焰高度增加约 2.5 mm。对比图 9

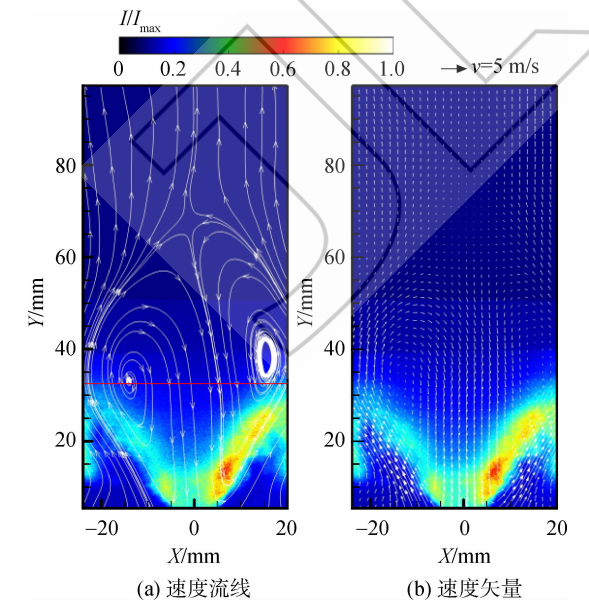
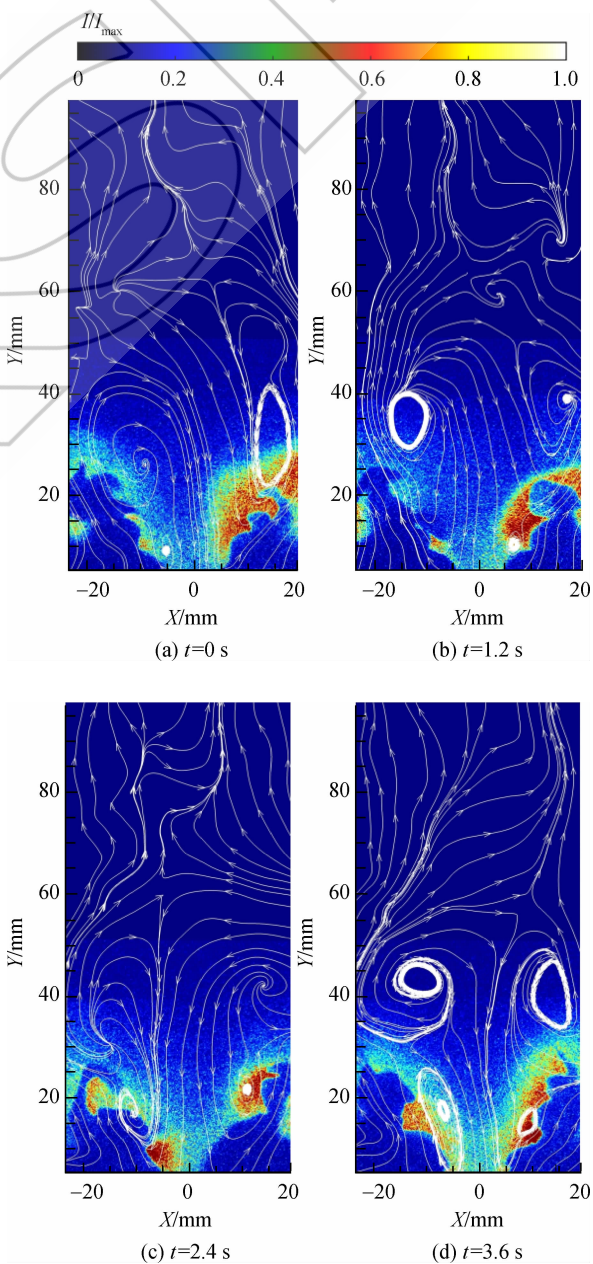


图 11 Case 2 工况下中心截面的时均速度和 OH 基分布图

Fig. 11 Time-averaged flowfield velocity and OH radicals distribution in center sectional plane in Case 2

发现,由于当量比增加,火焰燃烧脱离吹熄边界,燃烧更加稳定,瞬态 OH 分布中基本没有 OH“孤岛”;比较有意思的是,在多个瞬态图中更明显地观察到喷嘴射流下游的双涡分裂为多个旋涡结构,比较对称的如图 12(c)、图 12(d)所示;结合其他多个瞬态图像,发现不同时刻的旋涡数量、位置及形状都存在一定差异,可以推测位于燃烧室内部回流区的双涡结构并不稳定。这是由于在喷嘴射流与中心回流区之间形成的剪切层内,较高的速度梯度诱发多个旋涡生成,而这些小尺度旋涡在随主流流动中,因黏性耗散作用发生膨胀,并最终脱落、破碎;同时,燃烧时产生的热膨胀效应会加速气体流动,增强与壁面作用,结合旋涡进动引发大涡低频震荡,导致回流区长度变化,因而双涡



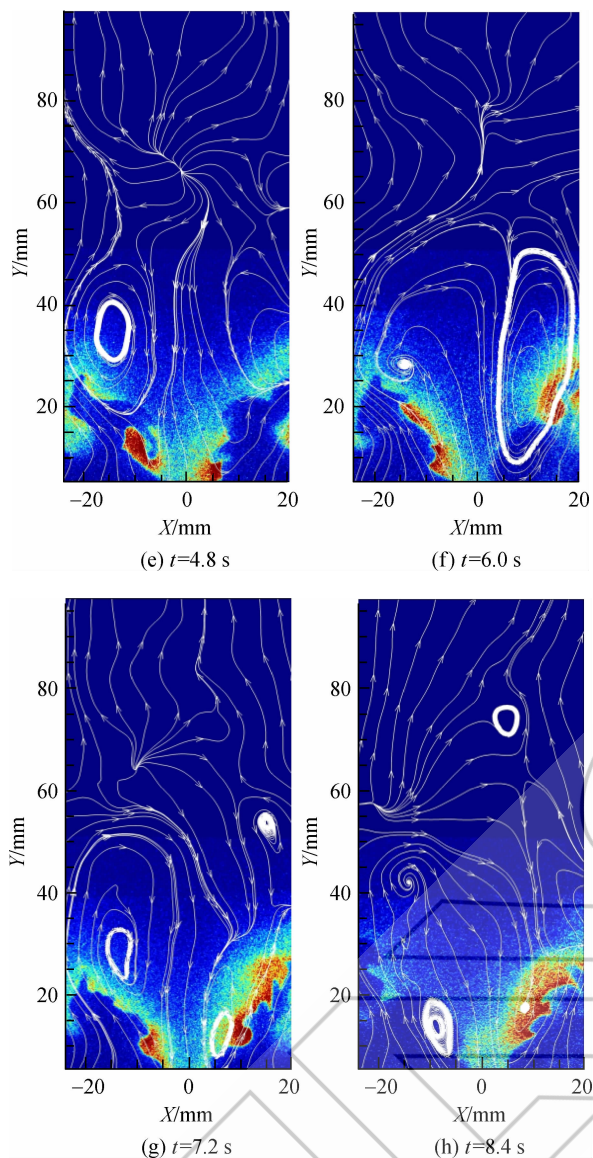


图12 Case 2工况下中心截面的瞬态速度流线和OH基分布图

Fig. 12 Instantaneous flowfield velocity streamlines and OH radicals distribution in center sectional planes in Case 2

结构变得不稳定。

4 结 论

为了研究受限贫燃预混旋流火焰流场结构与火焰反应区的分布特性,设计了一种强受限预混旋流燃烧器,搭建了PIV/OH-PLIF瞬态同步测量系统;通过复杂的系统调试、时序设定及验证,确保了瞬态同步的稳定性和可靠性;针对不同工况下的贫燃预混旋流火焰,测量获得了多个截面的瞬态和时均流场速度矢量、流线和OH同步分布信息。测量结果表明:

1) 低当量比不稳定燃烧工况下,火焰中心截

面呈M形状,燃烧室底部角落存在明显火焰反应区,伴随着角涡回火现象;由于旋流拉扯效应导致OH分布结构边缘产生褶皱,并出现多个OH“孤岛”。

2) 时均条件下,旋流火焰外沿位于喷流内侧剪切层位置;燃烧室内双涡结构清晰,喷嘴射流和内外剪切层特征明显,并保持基本对称;气流呈螺旋上升状流动。

3) 增加预混气体当量比,火焰流场结构与反应区分布与低当量比类似,但是燃烧更加稳定,火焰高度有所增加;同时,瞬态条件下观察到内部回流区的经典双涡结构分裂为多个旋涡,存在旋涡进动、破碎的现象。

参考文献:

- [1] 杨甫江,郭志辉,曾宇晖. 贫燃预混旋流火焰热声特性研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2854-2861.
YANG Fujiang, GUO Zhihui, ZENG Yuhui. Study on thermoacoustic characteristic of lean premixed swirling flames[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2854-2861. (in Chinese)
- [2] 于丹,郭志辉,杨甫江. 贫燃预混燃烧室中的分布式火焰传递函数分析[J]. 推进技术, 2016, 37(12): 2210-2218.
YU Dan, GUO Zhihui, YANG Fujiang. Experimentally study on distribution of flame transfer function in a lean premixed combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(12): 2210-2218. (in Chinese)
- [3] 张扬,张海. H_2/CO /空气贫燃预混火焰的临界熄灭条件研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(1): 222-225.
ZHANG Yang, ZHANG Hai. Critical extinction condition of lean premixed H_2/CO /air flames[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(1): 222-225. (in Chinese)
- [4] 杨帆,林博颖,隋春杰. 湍流强旋流预混火焰大涡模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(4): 895-900.
YANG Fan, LIN Boying, SUI Chunjie. Large eddy simulation of turbulent strongly swirling premixed flame[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(4): 895-900. (in Chinese)
- [5] 王成军,江平,辛欣,等. 基于PIV技术对三级旋流杯燃烧室流场的测量[J]. 航空动力学报, 2015, 30(5): 1032-1039.
WANG Chengjun, JIANG Ping, XIN Xin, et al. Measurement of triple stage swirler cup combustor flow field based on PIV technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(5): 1032-1039. (in Chinese)
- [6] GUPTA A K, LILLEY D G, SYRED N. Swirl flows, energy and engineering science series[M]. London: Abacus Press, 1984.
- [7] LIEUWEN T, TORRES H, JOHNSON C, et al. A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine

combustors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(1): 182-189.

[8] RUSS M, MEYER A, BUCHNER H. Scaling thermo-acoustic characteristics of LP and LPP swirl flames[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Montreal, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2007: 587-596.

[9] COHEN J M, ANDERSON T J. Experimental investigation of near-blowout instabilities in a lean, premixed step combustor[R]. AIAA 96-0819, 1996.

[10] MEIER W, WEIGAND P, DUAN X R, et al. Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame[J]. Combustion and Flame, 2007, 150(1/2): 2-26.

[11] MEYER T R, FIECHTNER G J, GOGINENI S P, et al. Simultaneous PLIF/PIV investigation of vortex-induced annular extinction in H₂-air counterflow diffusion flames [J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(2): 259-267.

[12] DONBAR M, DRISCOLL J F, CARTER C D. Reaction zone structure in turbulent non-premixed jet flames-from CH-OH PLIF images[J]. Combustion and Flame, 2000, 122(1/2): 1-19.

[13] STOHR M, SADANANDAN R, MEIER W. Phase-resolved characterization of vortex-flame interaction in a turbulent swirl flame[J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(4): 1153-1167.

[14] GUIBERTI T. Analysis of the topology of premixed swirl-stabilized confined flames[D]. Paris: Ecole Centrale Paris, 2015.

[15] BOXX I, HEEGER C, GORDON R, et al. On the importance of temporal context in interpretation of flame discontinuities[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(1): 269-271.

[16] WANG Guoqing, LIU Xunchen, LI Lei, et al. Investigation on the flame front and flow field in acoustically excited swirling flames with and without confinement[R]. Beijing: Global Power and Propulsion Society Beijing Conference, 2019.

[17] BEËR J, CHIGIER N. Combustion aerodynamics [M]. London: Applied Science Publishers Limited, 1972.

[18] 张俊, 陈柳君, 胥頔, 等. 航空涡轮发动机燃烧室内流程的 PIV 测量[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1289-1295.

ZHANG Jun, CHEN Liujun, XU Di, et al. PIV measurement for inner flowfield in aero turbine engine combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1289-1295. (in Chinese)

(编辑:王碧珺)