

基于 acetone-PLIF 技术的超燃冲压发动机燃烧室燃料/空气掺混特性

王林森^{1,2}, 涂晓波², 王宇航^{1,3}, 陈爽^{1,2}, 宋文艳³, 杨顺华¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000;

2. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000;

3. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 针对超燃冲压发动机燃烧室内燃料/空气掺混特性, 设计了一套以 acetone-PLIF(planar laser-induced fluorescence)为技术手段的流动显示测量系统, 得到了 4 种不同结构交错楔形支板在不同特征截面处的丙酮荧光图像, 研究了喷嘴位置和尾缘角这两个变量对燃料/空气掺混效果的影响。结果表明:“基准”支板 NL1 的流场结构主体上表现为横向“S”形曲线, 燃料/空气的掺混效果相对普通; NL2 支板虽然增大了一些丙酮的扩散范围, 但有荧光信号的掺混区域面积却反而有所下降; 而引入扩张型尾缘角变量的 EL1 支板则是大幅改善了燃料/空气的掺混效果, 54 mm 截面的丙酮分子充满了较大片区域, 掺混区域超过截面的 1/2。

关 键 词: Acetone-PLIF 技术; 超燃冲压发动机; 燃烧室; 涡结构; 掺混效果

中图分类号: V237

文献标志码: A

Fuel/air mixing characteristics of scramjet combustor based on acetone-PLIF technology

WANG Linsen^{1,2}, TU Xiaobo², WANG Yuhang^{1,3}, CHEN Shuang^{1,2},
SONG Wenyan³, YANG Shunhua¹

(1. Science and Technology on Scramjet Laboratory,

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

2. Facility Design and Instrumentation Institute,

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

3. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study fuel/air mixing characteristics in scramjet combustor, a non-invasive flow visualization system was designed based on acetone-PLIF (planar laser-induced fluorescence) technology. The acetone fluorescence images of four kinds of shaped struts were obtained at different sections, and the effects of nozzle position and trailing edge angle on fuel/air mixing were studied. The results showed that the flow field of the “standard” NL1 strut was of a

收稿日期: 2020-10-22

基金项目: 高超声速冲压发动机技术重点实验室开放基金(STS/MY-KFKT-2017-003)

作者简介: 王林森(1993—), 男, 实习研究员, 硕士, 主要从事流场显示及测量研究。E-mail: 1729560285@qq.com

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: 王林森, 涂晓波, 王宇航, 等. 基于 acetone-PLIF 技术的超燃冲压发动机燃烧室燃料/空气掺混特性[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1614-1620. WANG Linsen, TU Xiaobo, WANG Yuhang, et al. Fuel/air mixing characteristics of scramjet combustor based on acetone-PLIF technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8): 1614-1620.

transverse “S” curve, which had normal mixing effect in the four struts. The NL2 strut increased a few acetone diffusion range, but decreased mixing area with fluorescence signals. The EL1 strut with an expanded trailing edge angle can greatly improve effect, since the acetone molecules filled over a half of the cross section at 54 mm downstream the strut.

Key words: Acetone-PLIF technology; scramjet; combustor; vortex structure; mixing effect

20世纪50年代,由于超燃冲压发动机具有快速、灵活、不需携带氧化剂、可重复使用的优点,研究人员就提出飞行器采用超燃冲压发动机及其组合发动机作为推进系统来完成高超声速远程飞行^[1-4]。超燃冲压发动机燃烧室中超声速燃烧是一个极其复杂的流动与燃烧化学反应耦合过程。由于燃烧室长度有限,来流速度也很高(可达到 km/s 量级),燃料在燃烧室中的滞留时间很短(ms 量级),在这么短的时间内要完成燃料的喷射、雾化、掺混、点火和燃烧,将燃料的化学能转化为热能,难度很大^[5-6]。这些问题直接关系到燃烧的稳定性 and 燃烧效率的提高,喷注方式的优化设计直接影响掺混特性,进而决定燃料的燃烧特性。因此,为了揭示不同喷注方式的燃料掺混特性且不破坏燃烧室的流场分布,有必要开展非侵入式的先进激光光谱诊断技术来实现复杂流场的可视化测量^[7]。

随着激光光谱技术的持续发展,以美国 NASA(美国国家航空航天局)为牵头单位,联合斯坦福大学、奥本大学、普林斯顿大学、弗吉尼亚大学等多家高校及国防科研机构在超燃冲压发动机上应用了平面激光诱导荧光(PLIF)、干涉瑞利散射(IRS)、相干反斯托克斯拉曼光谱(CARS)、可调二极管激光吸收光谱(TDLAS)等诸多先进测量技术。而 PLIF 作为一种共振激发的光谱技术,具有很高的灵敏度,在流场结构尤其是燃烧场可视化测量有着明显的优势。奥本大学的 Reid 等人利用 532 nm 激光器倍频后产生的 266 nm 激光。直接激发在风洞喉道内通过雾化播撒产生的丙酮小液滴,得到测试区域的密度场分布^[8]。弗吉尼亚大学的 Busa 等人利用 TDLAS 和图像断层重建相结合的 TDLAT(tunable diode laser absorption tomography)技术对超声速燃烧室出口处的温度和水汽浓度分布进行了测量^[9]。乔治华盛顿大学的 Cutler 等人在弗吉尼亚大学的超声速燃烧装置(UVaSCF)上利用 CARS 技术得到4个平面的温度和组分摩尔分数

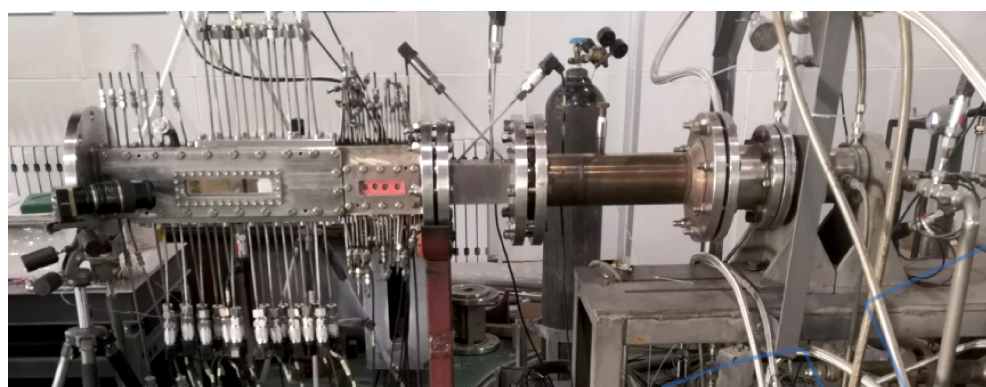
的高时空分辨率测量结果^[10]。NASA 兰利研究中心的 Kidd 等人在超声速冲压喷气式发动机电弧加热试验设备上利用 NO-PLIF 测量不同工况下喷嘴下游处的流场结构^[11],之后,该团队又在弗吉尼亚大学的 UVaSCF 设备上利用 OH-PLIF 测量了超声速和亚声速燃烧条件下的双模运行。密歇根大学的 Allison 等人利用 CH₂O/OH 双组分同步 PLIF 研究了双模态冲压发动机低温燃料分解预热区、火焰反应区 and 高温产物区的结构^[12]。美国空军研究实验室的 Rankin 等人利用 acetone-PLIF 在非预混的旋转爆震发动机上测量了燃料/空气的混合过程^[13]。国外在超燃领域利用丙酮作为示踪分子的发动机台架试验相对较少,而国内由于激光光谱诊断技术起步较晚,对于 acetone-PLIF 的应用主要是停留在实验室条件下的机理性研究:西安航天动力研究所的杨国华等人利用 acetone-PLIF 对同轴直流离心喷嘴的气流混合特性进行了研究^[14]。中国科学技术大学的俞瑜则是利用 acetone-PLIF 对低旋流预混燃烧器出口的混合特性进行了测量^[15]。中国科学院工程热物理研究所的刘存喜等人对某航空发动机用离心喷嘴用 266 nm 激光直接激发航空煤油,得到航空煤油雾锥沿喷射方向的空间分布特性^[16]。哈尔滨工业大学的周森对平焰燃烧器扩散流场开展了常温常压下的 acetone-PLIF 混合比定标试验^[17]。中国科学院力学所的严浩等人对航空发动机的旋流燃烧室模型开展了 OH/CH₂O 双组分同步测量,获得了燃烧室反应区及预热区的瞬态结构信息^[18]。当前国内外对于 acetone-PLIF 技术有了一定的积累,但在发动机台架试验上的工程应用相对较少,这主要是因为外场环境区别于实验室条件下,必须克服高温、高湿、低频强振动等一些不利因素,对激光器、搭建光路和成像系统的性能稳定性、可靠性提出了很高的要求,需要在现场不断地调试、校准仪器设备。本文通过对某超燃冲压发动机台架进行一定的适应性改造,在射流(燃料)中注入丙酮蒸气

以研究燃料/空气在喷嘴附近的掺混效果。

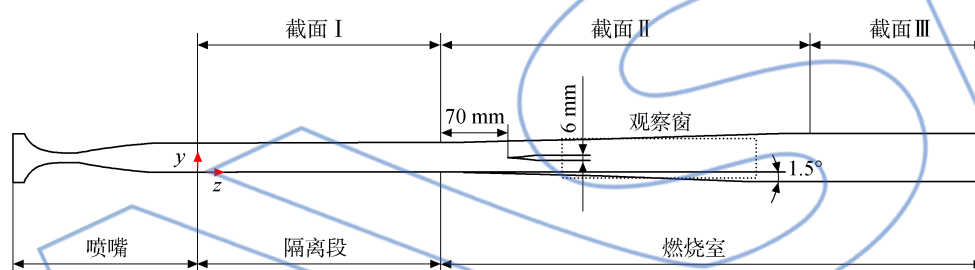
1 试验设备

超燃冲压发动机台架利用 $\text{CH}_4/\text{空气}/\text{O}_2$ 的燃烧来产生高焓气流,通过控制三者之间的配比来获取目标的来流总温和摩尔分数为 21% 的 O_2 。

整套系统可模拟的来流状态总温为 850~2 100 K、总压为 0.8~4.0 MPa、实际飞行马赫数为 4~7,如图 1(a)中所示。燃烧室分为 3 段,依次为等截面积段、扩张段、等截面积段,观察窗开在了扩张段的侧面,窗面大小为 200 mm×40 mm,如图 1(b)中所示。



(a) 超燃冲压发动机试验台架



(b) 燃烧室模型

图 1 试验台架及燃烧室结构示意图

Fig.1 Structure diagram of test bench and combustor

1.1 喷射支板

燃料喷射支板安装在燃烧室的左侧侧板上,改变支板的尾缘角和喷射位置两个变量共设计了 4 套交错楔形支板,支板代号分别为 NL1、NL2、EL1、EL2,如图 2 中所示。通过测试,从 4 种支板喷射出的总流量几乎是相等的,约为 10 g/s(N_2),均为声速喷射。

燃料从支板喷射出来后与主流(空气)开始混合,为研究两者之间掺混的发展过程,选取 4 个典型横向截面作为待测平面: P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ,如图 3 所示。没有选取 0 mm 处的横向截面是由于压缩后的激光片光总是存在一定的厚度,即使是微量的激光照射在支板的尾缘角上也会形成很强的散射光信号。

1.2 丙酮蒸气发生器

丙酮的分子式为 CH_3COCH_3 ,其分子直径在 nm 量级,气体分子的随流性非常好。

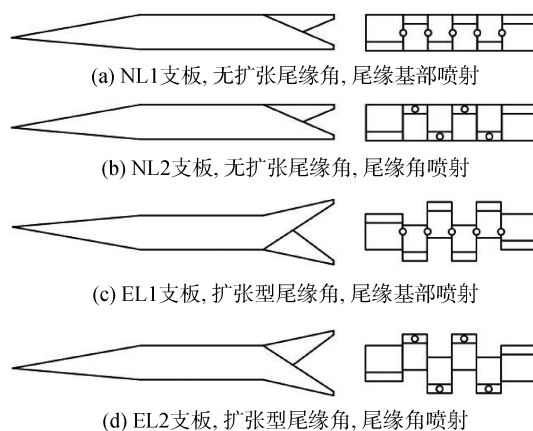


图 2 4 种交错楔形支板的结构示意图

Fig.2 Structure diagram of four kinds of staggered wedge shaped struts

由于丙酮的饱和蒸气压对温度十分敏感,因此在试验条件允许的情况下应可能地提高丙酮溶液的温度。丙酮蒸气发生器的设计要综合考虑到

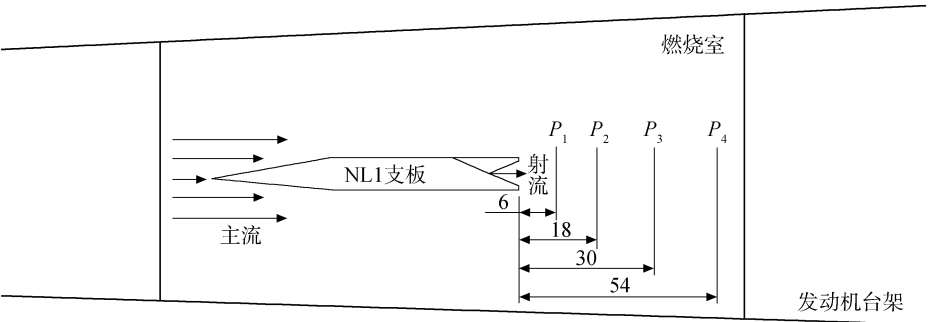


图 3 以 NL1 支板为例的待测平面示意图(单位:mm)
Fig.3 Structure diagram of measured plane of NL1 strut (unit:mm)

罐体的气密性、传热性、抗压性、耐腐蚀(丙酮对有机物的腐蚀性)等特点。

冷态试验为安全起见以 N_2 替代 H_2 燃料通过盛有丙酮溶液的发生器,发生器用电阻式加热带包裹住,用热电偶实时监控罐体的加热温度(加热带的预设温度为 500 K)。在试验过程中,利用洗气瓶的方式在 N_2 中混合丙酮蒸气, N_2 气流通过长通管进入发生器,经过蜂窝板后使得气泡破碎以增大与丙酮溶液的接触面,在逸出丙酮溶液表面后与挥发的丙酮蒸气分子混合,随后一同从短通管输出,如图 4 中所示。对于 4 种不同结构的支板,经过测试,发现从不同支板喷射出的总流量几乎相同(约为 10 g/s,均为声速喷射),由此控制进入到丙酮蒸气发生器的 N_2 流量是恒定的,而丙酮蒸气发生器的加热温度始终稳定在 500 K,故而保证进入到燃烧室的丙酮蒸气浓度是近似相等的。

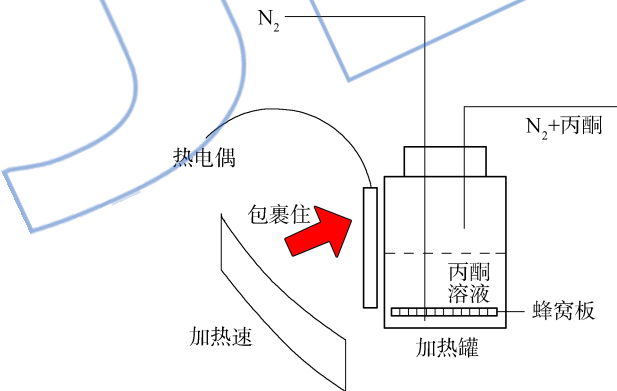


图 4 丙酮蒸气发生器的结构示意图
Fig.4 Structure diagram of acetone steam generator

1.3 Acetone-PLIF 测量系统

Acetone-PLIF 的主要优势在于具有较高的饱和蒸气压,能以较高的浓度注入到气流中;具有较宽的光谱吸收范围(225~320 nm),能被一些常

用的位于紫外波段的激光所激发,吸收峰位于 275 nm;其荧光位于可见光波段(350~550 nm),有两个波峰分别为 445 nm 和 480 nm;荧光效率较高,荧光信号较强且不易被 O_2 淬灭,可由一般的非增强型相机来成像;另外还具有低毒和廉价的特性。考虑到 YAG(yttrium aluminum garnet)激光器泵浦染料激光器后输出的能量较低,所以采用 4 倍频的方法直接输出 266 nm 激光作为激发光源。通过调节 4 倍频晶体的角度使得 266 nm 激光的输出能量约为 40 mJ,光斑直径约为 8 mm。经光束提升器提高光路的水平高度后依次通过小孔光阑、扩束镜、平行镜和压缩镜,最终得到长度约为 40 mm,厚度仅为 0.5 mm 的片光,如图 5 中所示。

激光片光透过观察窗后激发燃烧室内混合气体(以 N_2 替代燃料气体,掺混有丙酮分子)中的丙酮分子,产生的荧光信号通过镜头前加装的滤光片后被 ICCD(intensified charge-coupled device)相机接收,滤光片的型号为 Thorlabs 公司的 FESH0550,通光直径为 25 mm,带通为 380~550 nm;ICCD 相机的型号为 Andor 公司的 iStar 340T,分辨率为 2048 像素×512 像素,采集帧频的设置值约为 3 Hz。

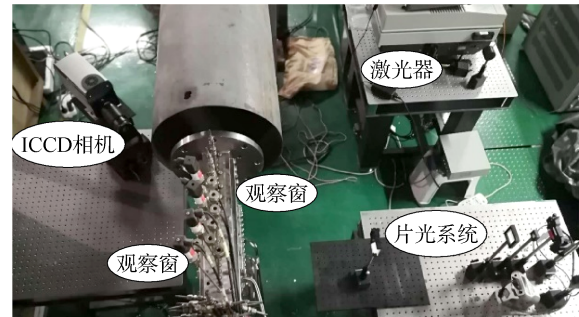


图 5 Acetone-PLIF 测量系统的主要构成部分
Fig.5 Main components of acetone-PLIF measurement system

1.4 斜焦面成像的校正

由于ICCD相机是从燃烧室的侧面倾斜拍摄,斜焦面成像必然引起目标图像的虚焦、畸变等。图像虚焦的问题需要引入由奥地利陆军中尉Scheimpflug提出的沙姆定律,要求待测平面、镜头平面和成像平面三者能够同时满足沙姆定律(Scheimpflug线),再结合铰链定律(hinge线),此时,横向截面上所有区域都能在相机的靶面上清晰成像,如图6所示,图中的PTF平面为通过透镜中心且平行于成像平面的假想平面。

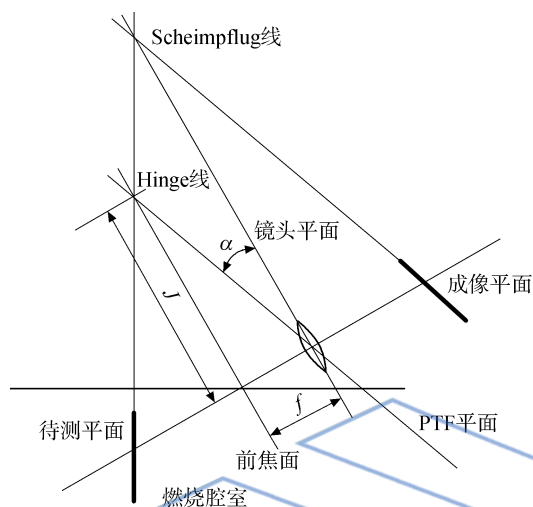


图6 斜焦面成像的校正

Fig.6 Correction of oblique focal plane imaging

为快速调节镜头、机身使其满足沙姆定律和铰链定律的关系,研发设计了一套适配于两者之间,能够实现平移、俯仰、旋转3种调节的移轴转接环,以及相关的荧光图像校正算法。对于斜焦面成像引入的图像畸变问题需要借助标定板(刻画在白板的黑色圆矩阵)建立映射关系,校正后还原横向截面的真实图像。

2 试验结果

本次试验对来流空气不进行加热预处理,即研究冷态条件下(300 K)燃料/空气掺混过程,燃烧室来流空气的实际马赫数为2.5,模拟的飞行器马赫数为5。试验对象包括上述4种支板,每种支板均测量了 $P_1 \sim P_4$ 等4个横向截面,共计16个工况。每次试验结束后,管路内会用清洁空气吹除残余的丙酮蒸气和液滴。

2.1 NL1支板

NL1支板是4种支板的参考“基准”,无扩张尾缘角,喷嘴也设置在尾缘基部,如图7中的白色

圆圈所示(注:图中的白色圆圈仅为示意,喷嘴实际尺寸仅为1 mm量级)。从喷嘴处喷射出来的燃料(丙酮)与来自主流方向的空气相互作用后,沿喷嘴的排列轴向上形成了4个强湍流涡,信号分布主体上表现为较为匀称分布的横向“S”形曲线结构,如图7所示。在 $P_1 \sim P_4$ 平面上,能够清晰地观察到涡的生长从增强到衰弱的过程。

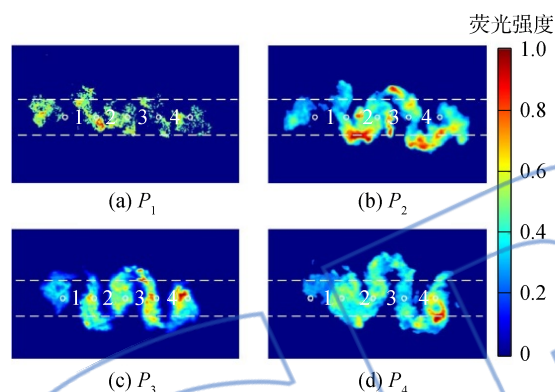


图7 NL1支板 $P_1 \sim P_4$ 横向截面的 acetone-PLIF 荧光图像
Fig.7 Acetone-PLIF fluorescence-images on $P_1 \sim P_4$ cross section of NL1 strut

图7中所示的荧光图像是对其做了降噪去背景以及归一化处理后的伪彩色图像,颜色标尺代表信号的强度值,从蓝到红表示信号的强度由弱到强;荧光的强度(即图像中的颜色)与丙酮的浓度呈正相关关系,荧光信号的颜色越趋近于红色代表该区域富集的丙酮分子越多。

2.2 NL2支板

NL2支板相较于NL1支板改变了喷嘴位置这一变量,将喷嘴位置从尾缘基部挪到了尾缘角,喷孔数量也从5个变为4个(但喷射总流量维持不变)。信号集中分布在4块“月牙”形块状区域,此时的涡结构更为破碎,尤其是位于支板中间位置的2号涡,在主流和射流的作用下很难观察到较为完整、稳定的边界轮廓,如图8中所示。但相较于NL1支板,NL2支板的涡尺寸增加得更快,在 P_3 、 P_4 截面处扩散的区域更大。

2.3 EL1支板

EL1支板相较于NL1支板只改变了扩张型尾缘角这一变量,喷嘴位置仍设在尾缘基部。引入扩张型尾缘角后,燃料/空气的掺混效果急剧提升,如图9中所示。由于支板是贴合左侧的侧板安装,在左侧侧板的作用下,在 P_1 截面形成了5个相互交错的“V”形涡区,且以1号涡信号最强。在后续的 $P_2 \sim P_4$ 横向截面上,涡开始变弱逐渐又

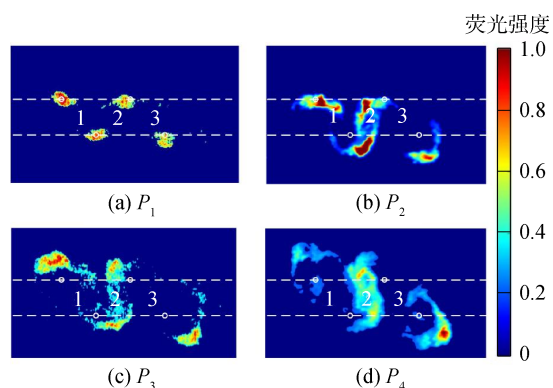


图 8 NL2 支板 $P_1 \sim P_4$ 横向截面的 acetone-PLIF 荧光图像
Fig.8 Acetone-PLIF fluorescence images on $P_1 \sim P_4$ cross section of NL2 strut

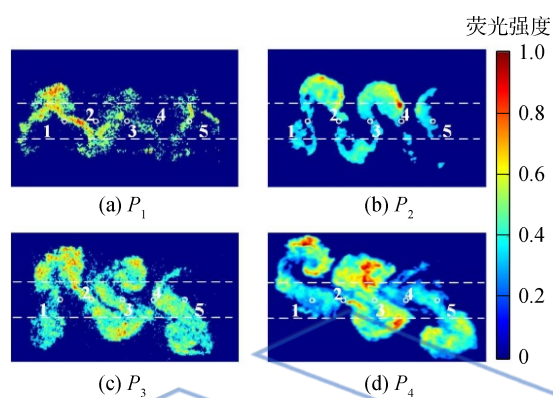


图 9 EL1 支板 $P_1 \sim P_4$ 横向截面的 acetone-PLIF 荧光图像
Fig.9 Acetone-PLIF fluorescence images on $P_1 \sim P_4$ cross section of EL1 strut

形成了 3 个分布均匀“S”形结构,在丙酮到达 P_4 截面时已扩散到了燃烧室的腔壁面附近。

2.4 EL2 支板

EL2 支板则是同时改变了扩张型尾缘角、喷嘴位置两个变量,得到的信号分布与 NL2 支板相似,但由于引入了扩张型尾缘角,燃料/空气的掺混效果更好,如图 10 中所示。而 EL2 支板相较于 EL1 支板则是有了明显的削弱,这是因为从尾缘角喷出的射流与主流形成的湍流作用更强,在 EL2 支板中间位置分布着大量零散的破碎小涡。

从支板喷嘴处喷射出来的丙酮蒸气射流在与主流的空气掺混后,在喷嘴或喷嘴之间会形成主涡,并且会随着发展从主涡上脱落越来越多的破碎小涡。从发动机燃烧室燃料/空气掺混效果的需求上讲,希望对支板引入几何变量后能够加速两者的掺混速率。综合上述试验结果,不难发现 EL1 支板是 4 种支板的最优选择,此时的掺混区域已超过截面的 1/2,如图 11 中所示。图中横坐

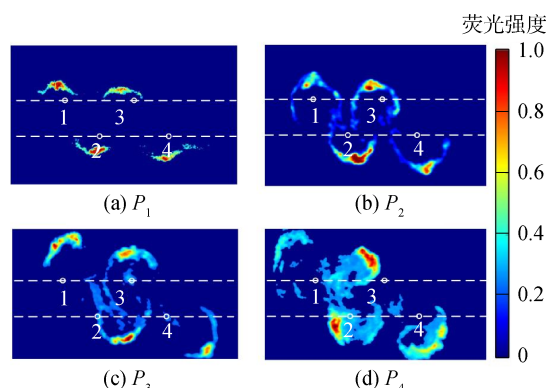


图 10 EL2 支板 $P_1 \sim P_4$ 横向截面的 acetone-PLIF 荧光图像
Fig.10 Acetone-PLIF fluorescence images on $P_1 \sim P_4$ cross section of EL2 strut

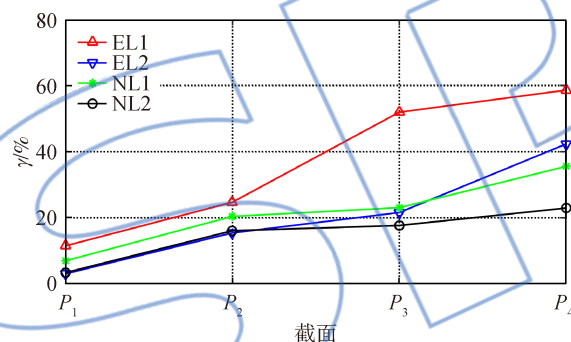


图 11 4 种支板在 $P_1 \sim P_4$ 截面的燃料扩散区域占比
Fig.11 Fuel diffusion proportion area of four struts on $P_1 \sim P_4$ cross section

标表示测量截面,纵坐标表示有荧光信号像素点(燃料扩散区域)与画幅总像素点的比值(γ)。

3 结 论

为了深入研究超燃冲压发动机燃烧室内燃料的喷射、与空气掺混的过程,本文设计并搭建了一套以 acetone-PLIF 为技术手段的非接触式光谱测量系统,针对 4 种不同结构的交错楔形支板,选取了 $P_1 \sim P_4$ 四个特征截面作为待测平面,利用沙姆定律克服斜焦面的虚焦问题,得到了共计 16 种工况条件下的 acetone-PLIF 试验结果如下:

1) “基准”支板 NL1 的流场结构呈现典型的横向“S”形曲线,发展到发动机燃烧室下游的 P_4 截面,燃料/空气的掺混效果也很普通,仅仅扩散到截面的 30% 左右。

2) 通过改变喷嘴位置这一变量对改善燃料/空气的掺混效果并不理想, NL2 支板虽然增大了一些丙酮的扩散范围,但有荧光信号的掺混区域面积却反而有所下降。

3) 引入扩张型尾缘角变量的EL1支板大幅改善了燃料/空气的掺混效果,在 P_4 截面丙酮分子已经充满了较大片区域,掺混区域面积超过截面的1/2,而在此基础上再改变喷嘴位置的EL2支板则是有些削弱了两者的掺混效果。

参考文献:

- [1] 张俊,陈柳君,胥崧,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 flow field in aero turbine engine combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6):1289-1295. (in Chinese)
- [2] 刘小勇.超燃冲压发动机技术[J].飞弹导弹,2005(2):38-42.
LIU Xiaoyong. Technology of scramjet [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2005(2):38-42. (in Chinese)
- [3] 贺武生.超燃冲压发动机研究综述[J].火箭推进,2005,31(1):29-32.
HE Wusheng. Research review of scramjet [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(1):29-32. (in Chinese)
- [4] 李建平,宋文艳,肖隐利.超燃冲压发动机/机体一体化优化设计[J].航空动力学报,2011,26(4):874-879.
LI Jianping, SONG Wenyan, XIAO Yinli. Research on the optimization design of integrated scramjet/airframe [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4):874-879. (in Chinese)
- [5] 鲍文,郭林春,崔涛,等.超燃冲压发动机燃烧室传感器最佳位置选择[J].航空动力学报,2007,22(3):475-479.
BAO Wen, GUO Linchun, CUI Tao, et al. Optimal sensor location of scramjet combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3):475-479. (in Chinese)
- [6] BAKOS R J, TAMAGNO J, RIZKALLA O, et al. Hypersonic mixing and combustion studies in the hypulse facility [J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(4):900-906.
- [7] 迟鸿伟,魏志军,李彪,等.燃烧室构型对固体燃料超燃冲压发动机自点火的影响[J].航空动力学报,2016,31(8):1985-1994.
CHI Hongwei, WEI Zhijun, LI Biao, et al. Influence of combustor shape on self-ignition in solid fuel scramjet [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(8):1985-1994. (in Chinese)
- [8] REID J Z, LYNCH K P, THUROW B S. Density measurements of a high-speed, compressible flow field using acetone planar laser induced fluorescence [R]. AIAA-2011-987, 2011.
- [9] BUSA K M, BRYNER E, MCDANIEL J C, et al. Demonstration of capability of water flux measurement in a scramjet combustor using tunable diode laser absorption tomography and stereoscopic PIV [R]. AIAA-2011-1294, 2011.
- [10] CUTLER A D, MAGNOTTI G, CANTU L, et al. Dual-pump CARS measurements in the University of Virginia's dual-mode scramjet: configuration "A" [R]. AIAA-2012-0114, 2012.
- [11] KIDD F G, DANEHY P M, CABELL K F, et al. Characterization of the NASA Langley arc heated scramjet test facility using NO PLIF [R]. AIAA-2014-2652, 2014.
- [12] ALLISON P, FREDERICKSON K, KIRIK J W, et al. Investigation of flame structure and combustion dynamics using CH_2O PLIF and high-speed CH chemiluminescence in premixed dual-mode scramjet combustor [R]. AIAA-2016-0441, 2016.
- [13] RANKIN B A, FUGGER C A, RICHARDSON D R. Evaluation of mixing processes in a non-premixed rotating detonation engine using acetone PLIF imaging [R]. AIAA-2016-1198, 2016.
- [14] 杨国华,洪流,李鳌,等.丙酮平面激光诱导荧光技术在喷嘴混合研究中的应用[J].实验流体力学,2008,22(4):23-28.
YANG Guohua, HONG Liu, LI Ao, et al. Application of acetone planar laser-induced fluorescence in research on mixing characteristics of injector [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(4):23-28. (in Chinese)
- [15] 俞瑜.气体引射式无焰燃烧的数值模拟和实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
YU Yu. Experimental study and numerical simulation of gas flameless combustion induced by the inner structure [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [16] 刘存喜,刘富强,毛艳辉,等.某型航空发动机用离心喷嘴燃油空间分布特性试验[J].航空动力学报,2013,28(4):783-791.
LIU Cunxi, LIU Fuqiang, MAO Yanhui, et al. Experiment of fuel distribution of pressure-swirl atomizers for aero-engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4):783-791. (in Chinese)
- [17] 周森.基于丙酮平面激光诱导荧光气流混合比测量研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
ZHOU Miao. Research on measurements of air mixing ratio using acetone planar laser induced fluorescence [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] 严浩,张少华,余西龙,等.OH与 CH_2O 双组分平面激光诱导荧光对旋流燃烧室火焰结构与脉动特征的研究[J].航空动力学报,2019,34(4):894-907.
YAN Hao, ZHANG Shaohua, YU Xilong, et al. Flame structure and dynamics characters investigation by OH and CH_2O planar laser-induced fluorescence in the swirl combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4):894-907. (in Chinese)

(编辑:陈越)