

加温加压中心分级旋流液雾火焰 OH/fuel PLIF 同步诊断

罗守博¹, 张 弛¹, 徐晨耕¹, 陶 超^{1,2}, 薛 鑫¹, 安 强¹

(1. 北京航空航天大学 航空发动机研究院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

2. 太行实验室, 成都 610299)

摘 要: 为研究近真实工况下先进航空发动机中心分级燃烧室内部流动反应组分场特性, 在进口压力为 0.5 MPa、进口温度为 600 K 的条件下对中心分级旋流液雾火焰开展同步的 OH 与 fuel(煤油 PAH 荧光)平面激光诱导荧光(planar laser-induced fluorescence, PLIF)测量。为应对加温加压液雾火焰测试的困难与挑战, 在试验流程、光路设计、图像采集与处理等多个环节进行了优化。OH/fuel PLIF 同步测量结果表明: 中心分级旋流液雾火焰存在 4 种典型的火焰结构; 在进口温度、压力及总燃油供给量保持不变的条件下, 随着燃油分级比的降低, 主预燃级火焰耦合减弱, 出现多种火焰结构的变化, 其中预燃级对火焰稳定起到关键作用。

关 键 词: 中心分级燃烧室; 分层旋流液雾火焰; 平面激光诱导荧光; 同步测量; 光学诊断; 火焰形态

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Simultaneous OH/fuel PLIF measurement for centrally-staged swirling spray flames at elevated pressures and temperatures

Luo Shoubo¹, Zhang Chi¹, Xu Chengeng¹, Tao Chao^{1,2}, Xue Xin¹, An Qiang¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,

Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Taihang Laboratory, Chengdu 610299, China)

Abstract: The species distribution of reacting flow was investigated in the staged swirl spray flames under near-realistic conditions for advanced aero-engine applications. Simultaneous planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of OH radicals and fuel (kerosene) were conducted in a centrally staged combustor at an inlet pressure of 0.5 MPa and an inlet temperature of 600 K. To address the difficulties and challenges in PLIF measurements of complex spray flames under engine-relevant conditions, a series of optimization measures were taken in the experimental procedure, optical layout, image acquisition, and post-processing. The simultaneous OH/fuel PLIF results revealed four typical flame structures in the combustor. Under constant inlet temperature, pressure, and total fuel supply, a reduction in the fuel staging ratio weakened the coupling between the pilot and main flames, leading to diverse variations in flame structures, and demonstrating the critical role of the pilot stage in flame stabilization.

收稿日期: 2025-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(52206130); 国家科技重大专项(J2019-III-0014-0057)

作者简介: 罗守博(2001—), 男, 博士生, 研究方向为航空发动机燃烧。E-mail: luoshoubo@buaa.edu.cn

通信作者: 安强(1988—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为发动机燃烧和光学诊断。E-mail: anqiang@buaa.edu.cn

引用格式: 罗守博, 张弛, 徐晨耕, 等. 加温加压中心分级旋流液雾火焰 OH/fuel PLIF 同步诊断[J]. 航空动力学报, 2026, 41(9): 20250328. Luo Shoubo, Zhang Chi, Xu Chengeng, et al. Simultaneous OH/fuel PLIF measurement for centrally-staged swirling spray flames at elevated pressures and temperatures[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(9): 20250328.

Keywords: centrally staged combustor; stratified swirl spray flame;
planar laser-induced fluorescence (PLIF); simultaneous measurement;
optical diagnostics; flame structure

燃烧室是航空发动机的关键部件,随着性能和环保需求的提升,其未来将朝着更高温升及更低排放的方向发展^[1-2]。目前,贫油预混预蒸发(lean premixed pre-vaporized, LPP)燃烧技术因其较低的污染物排放在民航领域得到应用^[3-8]。中心分级 LPP 燃烧室采用多级旋流器组合的方式^[9],主、预燃级分别供油,在不同的供油规律下出现复杂的火焰形态^[10-13]。燃烧室内的组分场可以直接反映燃烧组织情况,在真实或近真实工况下获取的燃油组分场和反应表征物组分场同步数据有助于深入认识航空发动机燃烧室的燃烧组织结构,从而为稳定燃烧的设计与优化提供理论支撑。然而,在近真实工况下对中心分级燃烧室内部进行组分场同步测试仍面临诸多挑战。

与接触式测量手段和自发辐射成像法相比,平面激光诱导荧光(planar laser-induced fluorescence, PLIF)技术具有非扰动、实时原位测量、组分选择性强、灵敏度好、时空分辨率高等优点^[14],广泛应用于燃烧诊断中。本文采用 RP-3 航空煤油燃料,其中含有的多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH)在紫外激光的照射下会发生能级跃迁并随之产生荧光,PAH 荧光分布可以用来表征燃油分布。在燃烧的众多产物中,OH 基团浓度相对较大、寿命长且荧光效率高,荧光信号受火焰背景辐射干扰小,其分布常用来表征火焰的生成物区。因此本文采用同步 OH/fuel PLIF 技术来测量分级旋流火焰中 OH 和 PAH 的分布,进而获得分级旋流火焰结构、释热分布和燃油分布。

本试验采用配有两个不同滤镜的双像器,实现了单相机同步测量,既简化了试验布置,又显著降低了系统成本。PLIF 系统较为复杂,在加温加压条件下对中心分级旋流液雾火焰进行 OH/fuel PLIF 测量,存在诸多技术挑战,包括但不限于:

1) 高压环境下,气体密度增加导致瑞利散射增强,激光能量衰减显著,同时有效荧光信号在传输过程中耗散增加,严重影响图像信噪比。

2) 煤油中的 PAH 在紫外区的激发带覆盖了 OH 基团的激发峰,造成严重 OH 信号干扰,需要进行信号识别和分离,而且 PAH 造成严重的激光能量沿程衰减。

3) 加温加压试验环境恶劣,需构建长距离低

损耗光路以保护激光器,试验准备需考虑试验件热膨胀的空间校正,并处理像增强器白场响应、背景噪声、片光能量分布不均、光学畸变等问题。

近些年国内外一些学者对旋流液雾火焰开展了光学测试,尝试在加温加压工况下探索中心分级旋流液雾火焰组分场的性质。Chterev 等^[15]采用 PIV(particle image velocimetry)、fuel PLIF 和 OH PLIF 同步测量在最大进口压力为 0.51 MPa、进口温度为 577 K 条件下研究了双级径向旋流单液雾火焰的流动特性、燃料液雾分布和火焰结构,发现液雾火焰的位置主要由燃料分布控制,液雾的穿透、分布及火焰位置随工况变化显著,但关键流动特征(如喷流核心轨迹、剪切层位置)基本不随工况的变化而变化。Malbois 等^[16]采用同步 OH/fuel PLIF 方法在最大进口压力为 1.8 MPa、进口温度为 670 K 条件下定量测量了单旋流液雾火焰的煤油摩尔分数与温度分布,采集了轴向和展向的测量结果,揭示了燃料分布、火焰形态及反应区强度之间存在显著关联。Meier 等^[17]采用 PMie、fuel/OH PLIF 和 OH*自发光等方法在最大进口压力为 1.29 MPa、进口温度为 713 K 条件下研究了中心分级燃烧室的预燃级火焰特性、两级火焰相互作用以及主燃级燃油的周向均匀性,发现燃油周向均匀性随着燃油负荷增加而增加,并且液体燃料对激光沿程衰减有影响。Apeloig 等^[18]采用 fuel/OH PLIF 研究了常压、进口温度为 473 K 条件下中心分级旋流燃烧室中液雾的非定常行为及其对燃烧不稳定性的影响,发现当空气流量脉动时,燃烧室液雾分布会受到射流轨迹的影响发生周期性变化。相比之下,国内对于液雾燃烧开展的 OH/fuel PLIF 光学诊断研究较少。国内诸如 Li 等^[19]采用 PIV、fuel PLIF 和 OH PLIF 在近常温常压下分析了双级轴向旋流器旋转方向对燃烧室流场、燃油分布和反应区分布的影响。苏守国等^[20]在常压条件下对不同热功率下单旋流液雾火焰开展了 OH/fuel PLIF 同步测量和 OH PLIF/CH*自发光同步测量,阐述了液雾燃烧贫燃吹熄是流动和燃油雾化蒸发对火焰根部共同作用的结果。Xin 等^[21]对于低燃料温度条件下的单旋流液雾火焰开展了 OH PLIF 和 fuel PLIF 测试,发现燃料低温显著降低了释热强度和雾化质量。除

了旋流液雾火焰,武国华等^[22-23]通过 OH/fuel PLIF 同步测量,揭示了超燃冲压发动机煤油掺混燃烧振荡特性规律和钝体稳定的煤油火焰的贫油熄火特性。

综上,国外在高温高压条件下的旋流火焰光学诊断研究已有一定基础,国内对此方面的研究相对薄弱,特别是在近真实工况下中心分级燃烧室复杂旋流液雾火焰的组分场测量方面。本文采用多种优化策略,实现了加温加压条件下分级旋流液雾火焰的同步 OH/fuel PLIF 精细测量,研究了不同燃油分级比对中心分级旋流液雾火焰结构特征的影响。

1 试验和方法

1.1 试验对象

试验在航空发动机中心分级旋流贫油预混预蒸发模型燃烧室中进行,燃烧室头部结构简化示意如图1所示。图中采用小箭头示意供油,该中心分级燃烧室由中心的预燃级和外围的主燃级组

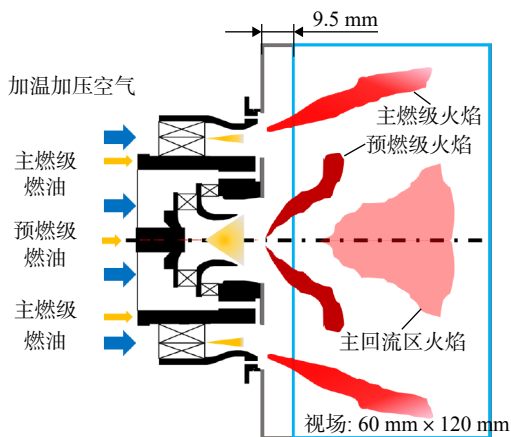


图1 中心分级旋流液雾模型燃烧室示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the centrally staged swirl spray combustor

成,其中预燃级采用双径向旋流器和一个喷雾锥角为 90° 的离心燃油喷嘴。主燃级包含两个同心轴向旋流器,内旋流器叶片上有20个环向布置的孔,每个孔相对于主流方向的喷射角为 15° 。从燃烧室中心线到燃烧室壁面方向,4个旋流器的旋流数分别为0.8、0.6、0.7和0.7。图中大箭头示意供气,加温加压空气经过燃烧室头部结构进行自然分股,大部分(87%)来流空气通过主燃级通道进入燃烧室,实现主燃级的贫油预混燃烧。矩形(60 mm × 120 mm)表示激光诊断的视场,由于火焰筒结构强度设计限制,视窗与火焰筒头部端壁存在9.5 mm的间隔。燃烧室中的红色区域表示主燃级火焰和预燃级火焰,而位于预燃级火焰下游的粉红色区域示意主回流区(primary recirculation zone flame, PRZ)火焰。

1.2 试验系统

本研究中加温加压光学诊断试验台的最大进口空气压力为1 MPa,最高进口空气温度为800 K,空气流量最高可达1 kg/s,满足测试工况所需的要求。匀流段、进口测量段加温加压燃烧光学诊断试验系统如图2所示,试验系统主要由空气及加热系统、测试系统、供油系统、匀流段、进口测量段、光学测量段、冷却段和排气系统等组成。采用孔板流量计测量主路空气的质量流量,其测量精度为1%。进口测量段包含一个K型铠装热电偶和总压传感器,其测量精度为0.1%,传感器误差不超过0.5%,用于实时监测燃烧室进气总温和进气总压。光学试验段包含光学机匣、光学火焰筒、燃烧室头部和点火杆等,在机匣和火焰筒的顶部和侧面开窗分别用于激光入射和图像采集。图像采集通过一个配备了双像器、紫外镜头和像增强器的CMOS相机实现。光学测量段出口采用与进口相同的总压传感器实时监控燃烧室出口

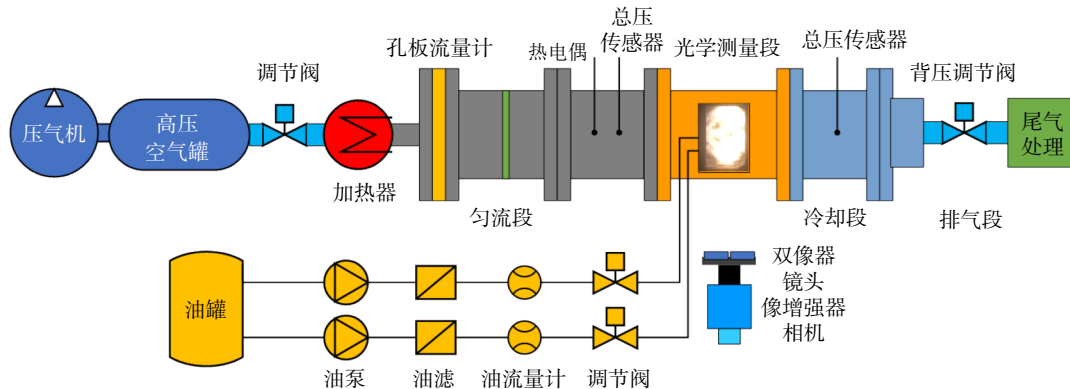


图2 加温加压燃烧光学诊断试验台

Fig. 2 Pre-heated and pressurized combustion test rig for optical diagnostics

总压。在试验台进气段和排气段各安装一个电动调节阀,用于调节燃烧室总压和压降。供油系统由主燃级油路和预燃级油路组成,两者均由同一油箱引出,并使用油泵供给,两条油路的流量均使用电动调节阀进行控制,采用科氏流量计测量燃油质量流量,其测量精度为 0.5%。

1.3 OH/fuel PLIF 系统

本文采用同步 OH/fuel PLIF 技术获得分级旋流火焰结构、释热分布、燃油分布。OH/fuel PLIF 光学诊断系统如图 3 所示,图中蓝色圆形代表球面凸透镜,橙色圆形代表球面凹透镜,淡蓝色圆形代表高反射率反射镜。系统主要包括 Nd:YAG 激光器、使用罗丹明 6G 染料的染料激光器、伽利略望远镜、片光组件、双像器、像增强器、CMOS 相机。

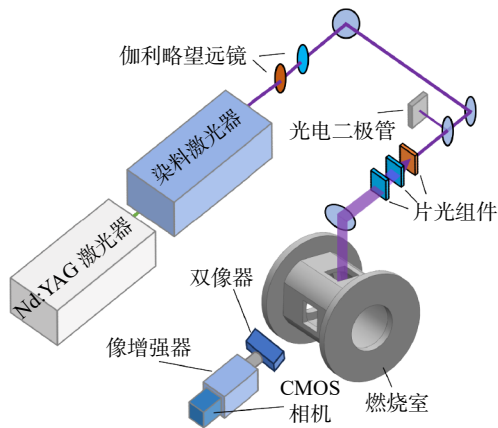


图 3 OH/fuel PLIF 光学诊断系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the OH/fuel PLIF system

在本研究中,将 Nd:YAG 激光器调整到二倍频以输出 532 nm 波长的激光,通过染料激光器中的振荡级和放大级,激光变为中心波长约 566 nm 的宽峰值分布。然后,通过光栅将激光波长精确地调节到所需波长的两倍。最后,β-硼酸钡(BBO)倍频晶体将可见光转换为波长 283.28 nm 的紫外光,以激发 OH 的 A-X(1, 0) 跃迁的 Q₁(7) 谱线。由于光路较长,在染料激光器出口采用焦距 $f=100$ mm 的球面凹透镜和焦距 $f=200$ mm 的球面凸透镜组合构建伽利略望远镜,通过扩大光斑尺寸但降低发散角的方式使光束尽量准直,减小激光长距离传输过程中的光斑扩散。每次试验开始前均测量并调节激光能量,使染料激光器出口的激光单脉冲能量保持在 22 mJ 左右,激光能量波动约±3%。

激光光束通过一个柱面凹透镜和两个柱面凸

透镜构成的片光组件后扩展并形成宽度约 70 mm 的准直片激光,使其穿过燃烧器限制域的几何中心线。片光组件的工作原理如下,焦距 $f=-30$ mm 的柱面凹透镜将光斑在水平方向扩展,紧接着,焦距 $f=500$ mm 的柱面凸透镜将扩展后的片光在水平方向收束,另外一个焦距 $f=2\,000$ mm 的柱面凸透镜将片光在竖直方向上收束,减小准直片光厚度。最后,片光通过高反射率反射镜竖直入射到火焰筒中指定截面,每次试验前比较光学火焰筒上壁面和下壁面的片光展开长度和位置,误差小于 0.1 mm 时认为片光与试验件垂直入射。

图像采集通过配备了一个双像器、一个紫外镜头($f=105$ mm, $f/4.5$)和一个像增强器的 CMOS 相机实现。双像器的作用是将 fuel 信号和 OH 信号投影到相机感光芯片的左侧和右侧,并为每个图像安装各自的滤波片,OH 滤镜((308 ± 5) nm)和 fuel 滤镜((340 ± 5) nm)。相机的拍摄频率为 30 Hz,像素尺寸为 1 920 像素×1 280 像素,在双像器作用下 fuel 图像和 OH 图像各自像素尺寸为 960 像素×1 280 像素。像增强器的增益设置为 75%,像增强器的开门时间为 300 ns。试验过程中,每个工况以 30 Hz 的频率采集 300 对瞬时火焰的 PLIF 图片,总时长为 10 s;此外还遮挡激光采集 300 对瞬时背景图像,用于修正。

1.4 试验工况

在加温加压条件下开展了 OH/fuel PLIF 试验,在保证光学窗口安全前提下采集高质量图像,选取进气温度为 600 K,进气压力为 0.5 MPa,燃烧室空气压降为 3%。试验中头部油气比保持为 0.03,燃油分级比(量符号记为 γ)逐渐降低直至熄火,具体工况见表 1。表中 Φ_{main} 表示主燃级当量比, Φ_{pilot} 表示预燃级当量比, γ 表示预燃级燃油质量流量与总燃油质量流量之比。表中火焰形状记录了火焰瞬时结构在相应工况的出现情况,在 Case 6 中,火焰接近熄灭,出现复燃情况。具体的火焰瞬时结构将在下文展开描述。

表 1 试验工况
Table 1 Test conditions

工况	γ	Φ_{main}	Φ_{pilot}	瞬时火焰结构
1	0.40	0.31	1.31	Ⅱ, Ⅳ
2	0.30	0.36	0.98	Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ
3	0.20	0.41	0.66	Ⅰ, Ⅳ
4	0.15	0.43	0.49	Ⅰ, Ⅲ
5	0.10	0.46	0.33	Ⅲ, Ⅳ
6	0.08	0.47	0.26	Ⅲ, Ⅳ, 复燃

2 结果与讨论

2.1 数据处理

本文利用双像器和单相机组合实现同步采集,在数据采集前的校正准备与多相机同步采集略有区别,因此先对双像器使用进行说明。图4为双像器的 CMOS 相机使用中需要注意的部分操作。使用装有双像器的 CMOS 相机正式采集试验图像前,应分别对左右的视场进行几何标定,用以在后处理时分别校正对应的视场。图4(a)为左右视场分别进行几何标定过程中对 3D 双层标定板的识别结果,用来分别对 OH/fuel PLIF 图像进行校正。使用均匀的白色 LED 光源修正像增强器的白场响应及双像器的空间亮度分布偏差。图4(b)为左右两帧原始白场图像。可以看出,存在明显的中间强边缘弱的亮度偏差,必须校正。在试验中还应注意双像器的串扰,即左右视场画面间存在干扰。图4(c)中左右图像分别展示了 OH/fuel PLIF 时均图像,其中左图框内为 OH 信号中的 fuel 信号串扰,与图4(c)中右图标注框的 fuel 信号形状一致。需要在保证左右视场满足图像采集需求的前提下,调整双像器内的光学件减轻串扰。

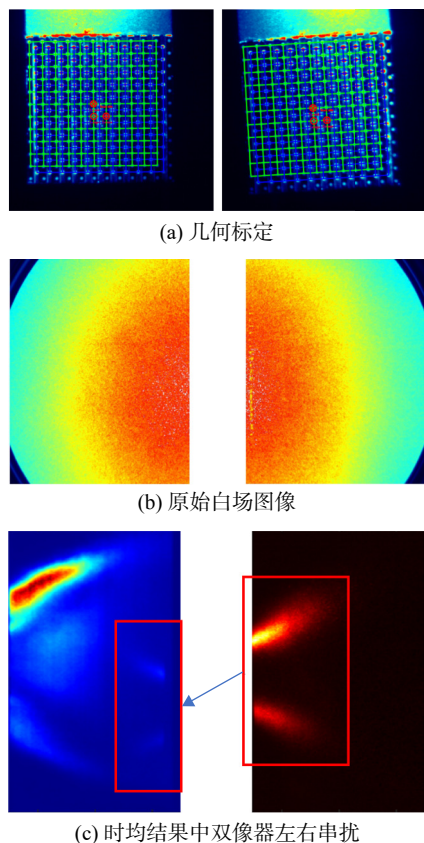


图4 双像器使用中涉及的重要事项

Fig. 4 Important considerations associated with the use of the image doubler

在反应状态下的调整效果最直接有效,但调整后需要重新拍摄标定板进行几何标定。此外,如果机匣玻璃和火焰筒玻璃对双像器拍摄左右视场产生微小的偏差,需要额外进行校正,这是光学试验件本身带来的系统误差,在此不详细展开。

下面简要介绍 OH/fuel PLIF 数据预处理方法。fuel PLIF 原始图像的预处理流程如图5所示,OH PLIF 图像采用与 fuel PLIF 相同的预处理步骤。取得 fuel 燃油浓度场原始图像如图5(a)所示。使用商业软件对原始的 PLIF 图像进行预处理,具体步骤为:第1步进行背景校正,通过软件中减法功能(subtract)将原始 PLIF 图像减去时均背景图像。图5(b)显示了经过背景校正后的图像,背景干扰明显减少,可以初步分辨燃油的分布特征。第2步进行白场校正,先对白场背景图像进行最大值归一化处理,通过软件中除法功能(division)将图5(b)中的图像除以该归一化白场图像,得到图5(c)。可以看出,图像右侧的亮度得以增强。第3步进行片光能量分布校正。光学火焰筒中放置比色皿并滴入丙酮,待其中丙酮挥发均匀充满比色皿后,选取与试验时相同的相机设置采集图像,以获取激光在片光展开方向上的能量分布。然后对该图像进行逐列平均,再利用除法功能将图5(c)图像除以该平均图像,从而修正片光能量分布不均造成的荧光亮度偏差,得到的图像如图5(d)所示。可见修正后图像视场左右两侧对应片光边缘位置的亮度得到提升,中间高亮度区域有所减弱,图像整体亮度趋于均匀。最终进行空间坐标校正,通过软件中标定功能(calibration)将图像的原始坐标(raw)转化为物理坐标(world),得到的图像如图5(e)所示。图中额外标注了竖直虚线,可见几何标定在使得坐标从像素尺度转换为物理尺度的同时,基于标定的坐标修正了图片的拉伸扭转,几何标定误差(小于 ± 1 像素)。

随着试验的进行,受热的试验件会沿流向逐渐向下游移动,导致基于冷态标定所确定的物理坐标原点在流向方向上产生偏差。为此,在试验前需预留激光位置以补偿试验件热膨胀引起的位移,本试验中预留的距离为 5 mm。在图像后处理过程中,需根据图像中试验件视窗的相对位置重新选择参考基准,对试验件的实际物理坐标进行校正,并据此重新确定坐标轴的位置。为体现实际的空间位置,下文图像以旋流器出口端壁为坐标原点展示完整视场,超出视场范围部分以空白填充,纵坐标轴上对主、预燃级出口以黑色短线示意。

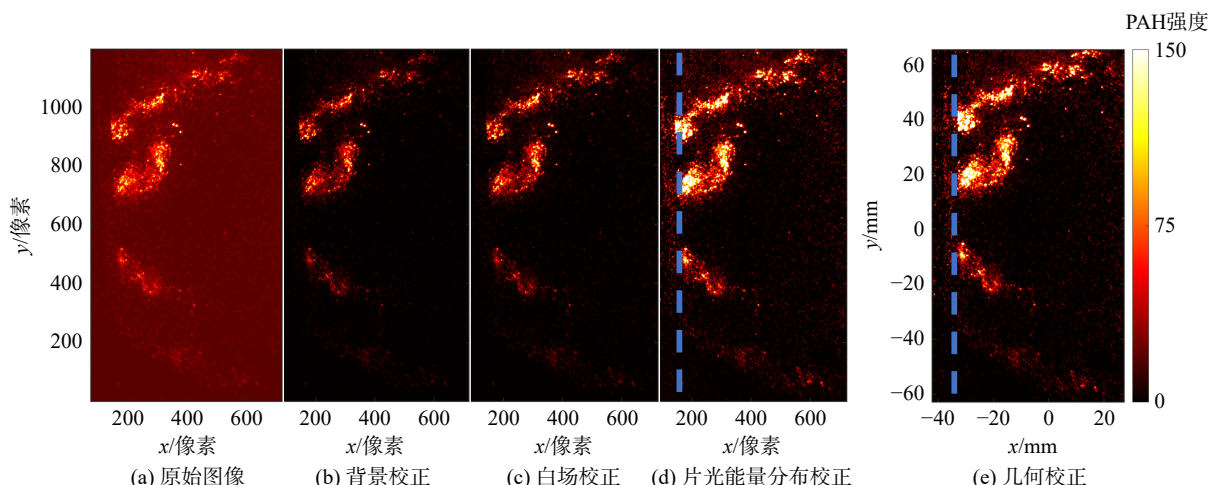


图 5 Fuel PLIF 原始图像的校正过程

Fig. 5 Illustration of corrections performed for a raw fuel PLIF image

激光的沿程能量损失使得图像沿着激光照射方向亮度不均匀, 图 6 对比了相同工况下 RP-3 航空煤油与正庚烷单预燃级火焰的 OH PLIF 结果, 图像以相同色阶展示。可以看出, 相较于 RP-3 航空煤油火焰, 正庚烷火焰的 OH PLIF 结果的激光沿程能量损失更小, 图像沿激光方向亮度更均匀, 瞬时火焰结构展示更详细, 图像整体亮度更高, 解释性更好。这是由于正庚烷为单组分燃料, 不含 PAH, 激光沿程吸收的问题较小。因此采用单组分燃料是提升 OH PLIF 图像质量的一种可行方法, 但是由于其中不含芳香烃, 无法通过测量芳香烃组分场来获得燃油分布。加压煤油液雾火焰中的激光沿程衰减修正可以参考本团队 Ji 等^[24]的研究。另一方面, 由于煤油中的多环芳香烃在紫外区的激发带覆盖了 OH 激发峰, 导致 OH PLIF 存在燃油信号干扰的问题。本团队发展了 OH/fuel PLIF 中信号分离的方法, 具体可参考 Tao 等^[25]的研究。

2.2 结果与分析

随着分级比的降低, 火焰的 OH/fuel PLIF 时均图像如图 7 所示。在保持总当量比不变(即由燃油流量确定的燃烧室理论热功率恒定)的前提下, 分级比的降低导致主燃级当量比增大, 预燃级当量比减小。在 fuel PLIF 时均图像中表现为主燃级燃油根部高浓度区域逐渐扩大, 下游燃油浓度增强, 预燃级燃油根部浓度减弱到远低于主燃级燃油浓度。在 OH PLIF 时均图像中可以观察到, 随着分级比的降低, 主、预燃级反应区逐渐分离, 主燃级并不能在上游完全燃烧, 主燃级高强度反应区明显减小; 预燃级反应区张角减小, 主回流区火焰向上游移动, 逐渐与预燃级火焰耦合。其中, 当分级比为 0.30 时, 回流区火焰与预燃级火焰分界清晰, 瞬时火焰的宏观结构最丰富, 涵盖了其余工况的结构特征, 下面展开说明。

当分级比为 0.30 时, 时均火焰结构为典型的分层旋流耦合火焰, 即主、预燃级耦合且存在分

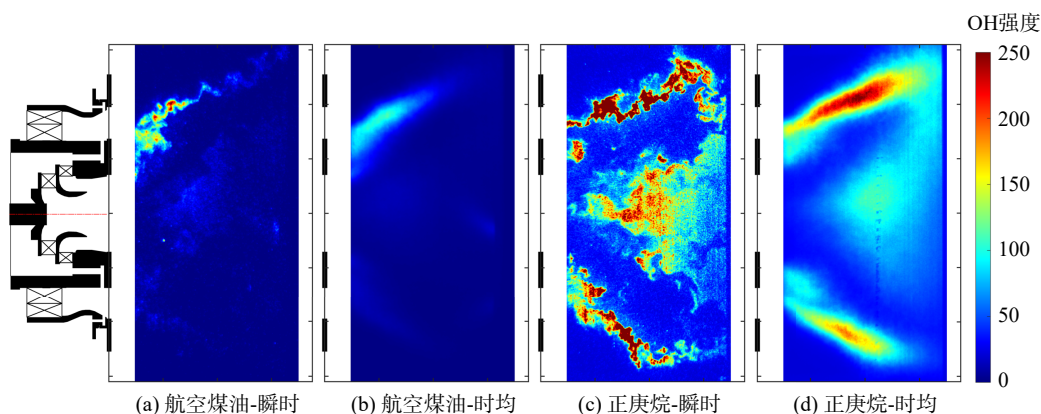


图 6 RP-3 航空煤油与正庚烷预燃级火焰的 OH PLIF 结果对比

Fig. 6 Comparison of OH PLIF results from a pilot flame burning RP-3 kerosene and *n*-heptane

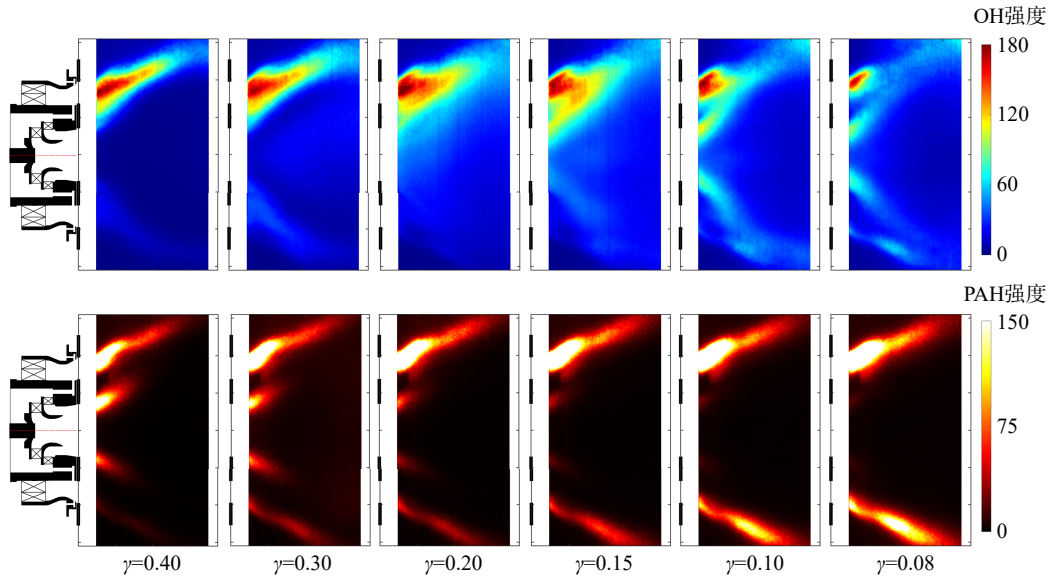


图7 不同分级比下的 OH/ fuel PLIF 时均图像

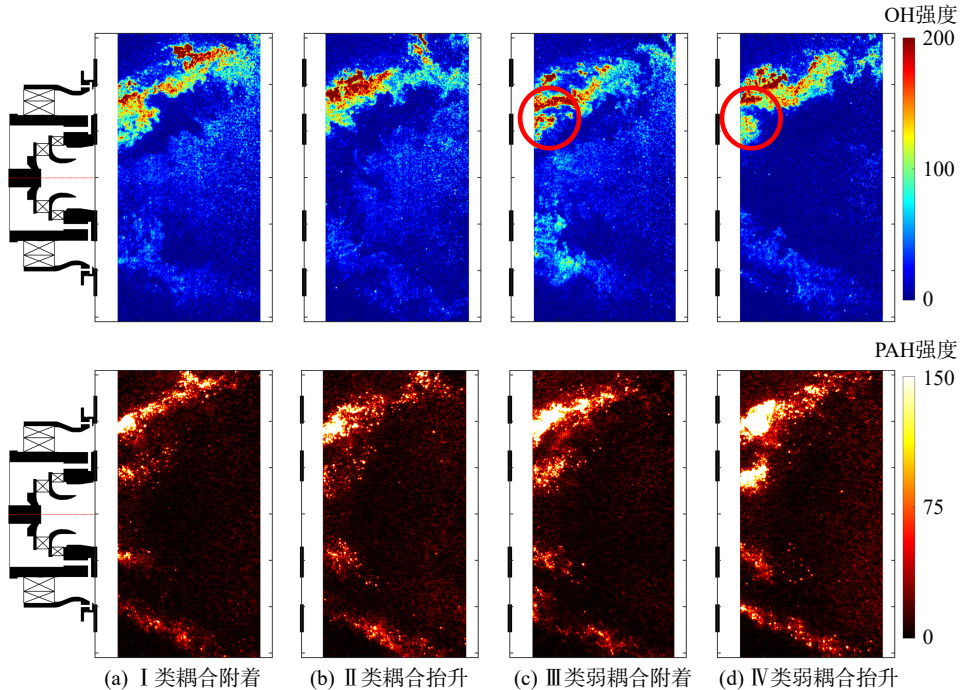
Fig. 7 Time-averaged OH/fuel PLIF images at different fuel staging ratios

层特征。瞬时火焰的宏观结构可通过火焰根部形态进行分类,具体根据主、预燃级是否耦合以及主回流区火焰是否附着,归纳为以下四种结构,如图8所示。

图8(a)为Ⅰ类耦合附着火焰,特征为中心回流区点燃且根部附着于上游,主、预燃级耦合;图8(b)为Ⅱ类耦合抬升火焰,特征为中心回流区点燃且根部抬升,主、预燃级耦合;图8(c)为Ⅲ类弱耦合附着火焰,特征为中心回流区点燃且根部抬升,

主、预燃级存在明显分离,在图中用圆圈标注,下同;图8(d)为Ⅳ类弱耦合抬升火焰,特征为中心回流区点燃且根部抬升,主预燃级弱耦合。这里需要说明的是,结果中 fuel PLIF 图像的亮度与 OH PLIF 图像接近,这是因为试验中为了将燃油分布可视化而特意使用了其他滤镜,若采用 OH 滤镜,燃油荧光信号的强度总体上要低一个数量级。

进一步地,图9展示了不同分级比下典型火

图8 $\gamma=0.30$ 时4种典型火焰结构的 OH/fuel PLIF 瞬态图像Fig. 8 Instantaneous OH/fuel PLIF images showing four typical flame structures at $\gamma=0.30$

焰结构的瞬时 OH/fuel PLIF 图像,随着分级比降低,火焰逐渐变得不稳定,当分级比低于 0.08 时,分层旋流火焰发生熄灭。随着分级比变化,火焰的形态出现了明显的改变,不同工况下存在的火焰结构类型详见表 1。

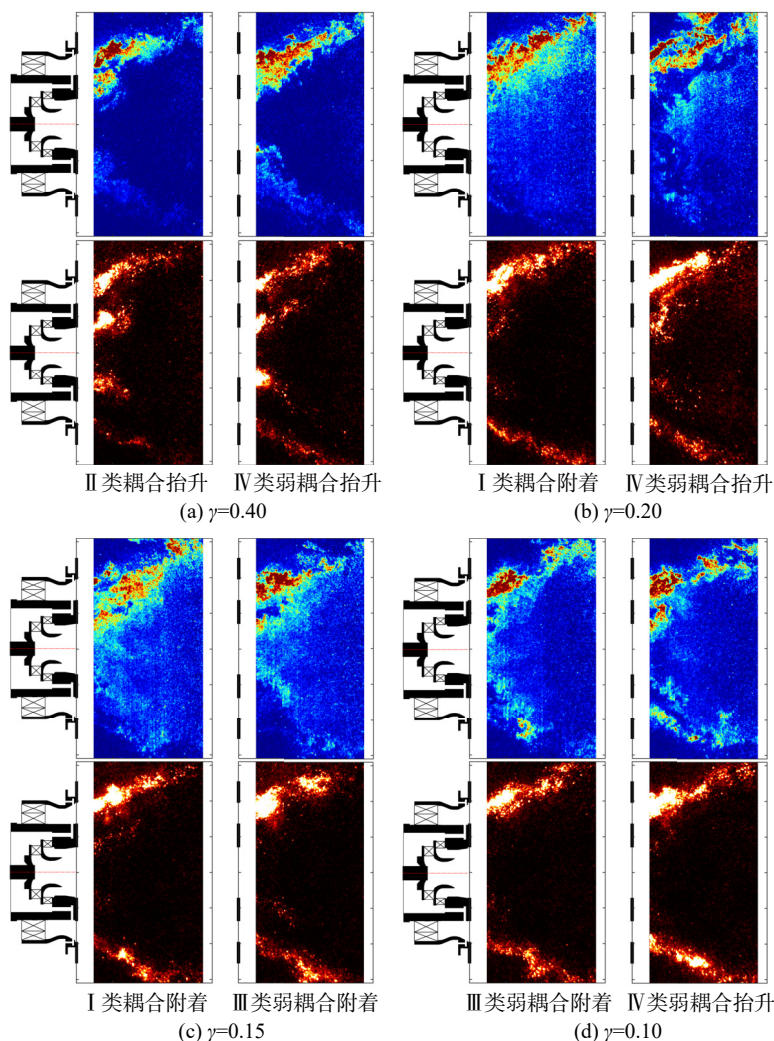
图 9(a)展示了分级比为 0.40 时的火焰瞬时图像,视场中无明显的主回流区火焰,火焰结构上主、预燃级呈现耦合与分离两种状态,主要存在 II 类耦合抬升和 IV 类弱耦合抬升两种结构。当分级比降低至 0.30 时(见图 8),火焰结构最为丰富,出现了 I 类耦合附着、II 类耦合抬升、III 类弱耦合附着和 IV 类弱耦合抬升 4 种典型结构。

分级比为 0.20 时,火焰瞬时图像如图 9(b)所示,火焰宏观结构上主要为 I 类耦合附着结构,主回流区火焰与主、预燃级火焰之间无明显分界,仅在极少情况下观察到 IV 类弱耦合抬升结构。当分级比为 0.15 时,火焰瞬时图像如图 9(c)所示,主、预燃级火焰间耦合减弱,火焰根部之间出现明显的孔隙和间隔,主回流区火焰附着,与预燃

级火焰无明显分界。此时预燃级燃油流量较小,在燃油浓度场中难以观察到预燃级燃油分布,火焰结构以 III 类弱耦合附着为主,亦可见少量 I 类耦合附着结构。

分级比为 0.10 时,火焰瞬时图像如图 9(d)所示,瞬时火焰以主要特征为主预燃级弱耦合,火焰为 III 类弱耦合附着火焰和 IV 类弱耦合抬升火焰,火焰主回流区火焰较弱。燃油浓度场中预燃级只有少部分油滴在视野中,火焰根部波动较大,预燃级火焰与主燃级火焰耦合较小。此时预燃级维持火焰稳定的能力明显减弱,主燃级火焰仅在根部受预燃级引燃,在下游无法持续稳定燃烧,火焰中出现孔隙和局部淬熄现象,火焰形态不连续。

分级比为 0.08 时,火焰瞬时图像如图 9(e)所示,预燃级火焰接近贫燃极限,火焰出现熄灭复燃现象。火焰主要为 IV 类弱耦合抬升结构,未观察到大范围主回流区火焰,也存在 III 类弱耦合附着火焰;对比 OH/fuel PLIF 图像发现,OH PLIF 图像中主燃级根部出现明显的高浓度燃油区域,预



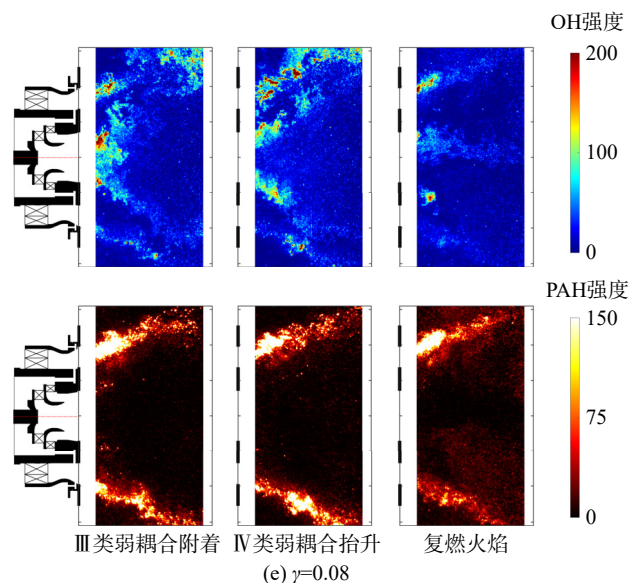


图9 不同分级比下典型火焰结构的瞬时 OH/fuel PLIF 图像

Fig. 9 Instantaneous OH/fuel PLIF images illustrating typical flame structures at different fuel staging ratios

燃级火焰张角减小, 瞬时火焰结构主要为弱耦合抬升火焰, 且主、预燃级几乎不耦合, 主燃级燃油在下游发生反应。视场中几乎无法观察到主燃级火焰、主回流区火焰以及预燃级燃油出口处的燃油分布, 但在预燃级出口下游仍存在明显释热反应, 表明此时预燃级无法维持主燃级持续稳定燃烧时, 火焰逐渐接近熄灭边界, 预燃级对火焰稳定起到了关键作用。

此外, 图中复燃火焰展示了主预燃级火焰熄

灭后复燃过程中的瞬时图像, 可以观察到主回流区火焰附着且伴随少量预燃级火焰, 主燃级释热反应较弱。在燃油浓度场中, 主燃级燃油内侧区域内, 除主回流区火焰和预燃级火焰反应区域外的部分充满待引燃的燃油。这说明主回流区火焰对维持火焰稳定可能起持续引燃作用, 这需要在未来结合高频多物理场结果进一步分析。

图10给出了耦合火焰(上半部分)与弱耦合火焰(下半部分)的火焰与燃油分布特征, 图中右

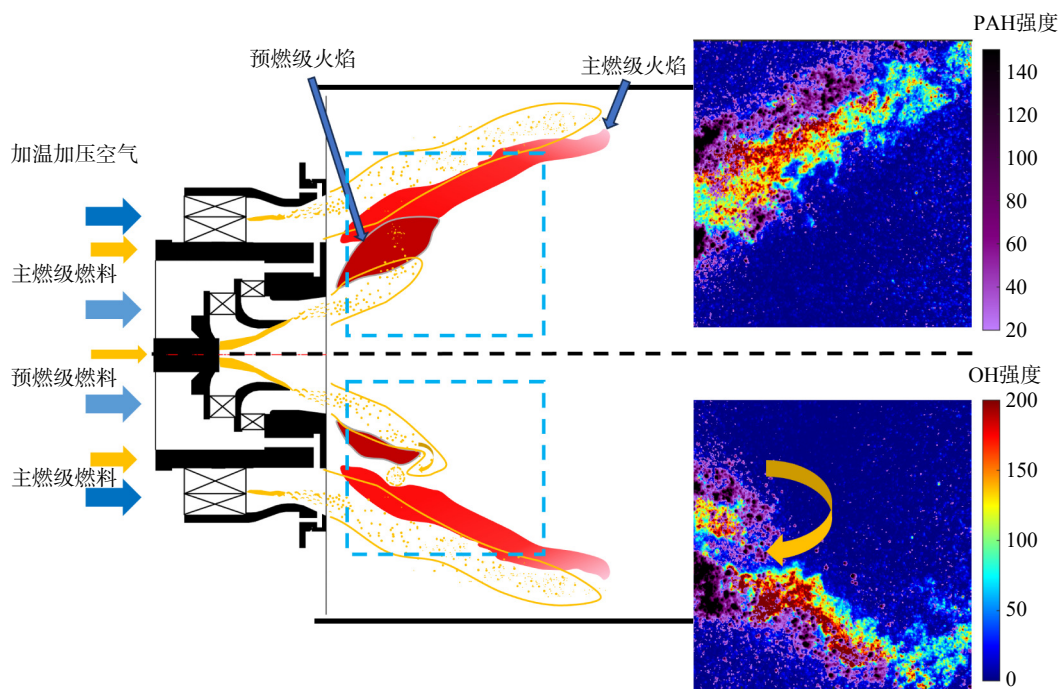


图10 主预燃级耦合的火焰与燃油分布特征

Fig. 10 Illustration of flame and fuel distribution associated with the main-pilot coupling

侧叠加展示了 $\gamma=0.4$ 时对应的瞬时图像。图中以紫色示意燃油分布,其中滤去了低于平均背景噪声强度的信号,以彩色示意 OH 分布。观察到,主、预燃级火焰分布在主、预燃级燃油之间,预燃级燃油向下游输运的过程中伴随着径向向外的扩展,且存在局部液滴群破碎向主燃级输运的现象,少量输运有助于主、预燃级火焰耦合,如图 10 上方所示。当预燃级燃油减少时,局部液滴输运减弱,因此当分级比降低时,火焰主要为弱耦合。当存在大量液滴群输运时,可以明显观察到燃油分隔了主预燃级火焰,这可能是燃油蒸发吸热使得火焰局部淬熄,火焰瞬时表现为弱耦合,如图 10 下方黄色弧形箭头示意。此外,对于 OH PLIF 中观察到的回流区火焰的附着抬升现象,由于回流区内燃油浓度较低,在现有试验结果中未观测到显著区别,将在后续的研究中结合流场特征给予分析说明。

3 结 论

本文在燃烧室进口温度为 600 K、进口压力为 0.5 MPa 条件下,针对加温加压中心分级旋流液雾火焰的油雾场与释热场开展了光学测试。特别地,本研究通过在试验系统、流程设计、光路布置、图像处理等方面的精心设计和优化,成功应对了 OH/fuel PLIF 同步测试技术在高温高压复杂旋流液雾火焰中应用的诸多技术挑战,得到了中心分级燃烧室油雾场与火焰释热场分布,并总结了不同分级比下火焰形态的演变规律。主要结论如下:

1) 基于双像器和单 CMOS 相机,设计了适用于高温高压旋流液雾试验的同步 OH/fuel PLIF 同步光学诊断系统,有效简化了试验系统。通过对双像器操作中的几何标定、白场校正、串扰问题等方面进行优化,保证了带有双像器的相机获取图像的质量;通过精细化光路布置,保证了激光在长距离传输中的准确性;结合多种图像校正方法,进一步提升了数据准确性。通过以上措施,成功获取了加温加压状态下中心分级旋流液雾火焰的 OH/fuel 组分场数据。

2) 通过对比中心分级旋流液雾火焰油雾场和释热场的数据可以发现,保持燃烧室进口温度、压力和总燃烧功率不变,随着分级比的降低,主燃级当量比上升,预燃级当量比下降,主、预燃级火焰耦合减弱。结合火焰根部耦合形态与主回流

区火焰附着特征,总结出 4 类典型火焰结构并对耦合特征进行了解释。结果表明,预燃级对火焰稳定起到关键作用,分级比降低导致瞬时火焰结构显著变化,预燃级对火焰稳定的维持能力减弱,当主燃级无法持续稳定燃烧时,火焰逐渐接近熄灭边界。

本研究为近真实工况下航空发动机燃烧室光学诊断提供了参考。未来将进一步开展多物理场协同耦合与具备高时间分辨率的光学诊断研究,以深入揭示真实工况下非定常旋流液雾火焰中的复杂物理机制,为先进航空发动机燃烧室设计优化提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 钟世林, 邓远灏, 马存祥, 等. 航空发动机燃烧技术与展望[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(2): 33-44.
ZHONG Shilin, DENG Yuanhao, MA Cunxiang, et al. Development and prospects of advanced combustion technologies for aero-engines[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(2): 33-44. (in Chinese)
- [2] 索建秦, 梁红侠, 黎明, 等. 航空发动机燃烧室设计研发体系[J]. 航空发动机, 2021, 47(3): 29-34.
SUO Jianqin, LIANG Hongxia, LI Ming, et al. Design and development system of aeroengine combustor[J]. Aeroengine, 2021, 47(3): 29-34. (in Chinese)
- [3] 桂韬, 房人麟, 邓远灏, 等. 弱旋流对 LPP 燃烧室下游流场影响的数值研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(5): 14-18.
GUI Tao, FANG Renlin, DENG Yuanhao, et al. Numerical study of the influence of low-swirl on downstream flow fields of lean pre-mixed pre-vaporized combustor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(5): 14-18. (in Chinese)
- [4] FOUST M, THOMSEN D, STICKLES R, et al. Development of the GE aviation low emissions TAPS combustor for next generation aircraft engines[R]. AIAA-2012-0936, 2012.
- [5] KOBAYASHI M, OGATA H, ODA T, et al. Improvement on ignition performance for a lean staged low NOx combustor[R]. ASME Paper GT2011-46187, 2011.
- [6] STOUFFER S, BALLAL D, ZELINA J, et al. Development & combustion performance of high pressure WSR and TAPS combustor[R]. AIAA-2005-1416, 2005.
- [7] WANG Zhichao, LIN Yuzhen, WANG Jianchen, et al. Experimental study on NO emission correlation of fuel staged combustion in a LPP combustor at high pressure based on NO-chemiluminescence [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(2): 550-560.
- [8] 高健庭, 张弛, 安强, 等. 加温加压条件下复杂旋流液雾火焰流场测量[J]. 航空动力学报, 2025, 40(12): 20230621.
Gao Jianting, Zhang Chi, An Qiang, et al. Flow field measurements for complex swirl spray flames at elevated pressures and temperatures[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(12): 20230621. (in Chinese)
- [9] 左世豪, 邵彦博, 赵宁波, 等. 中心分级旋流燃烧室燃烧性能试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2024, 37(3): 10-17.
ZUO Shihao, SHAO Yanbo, ZHAO Ningbo, et al. Experimental study on combustion performance of centrally-staged swirl combustor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2024, 37(3): 10-

17. (in Chinese)
- [10] HAN X, LAERA D, MORGANS A S, et al. Flame macrostructures and thermoacoustic instabilities in stratified swirling flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 5377-5384.
- [11] WANG Xinyao, HAN Meng, HAN Xiao, et al. Flame structures and thermoacoustic instabilities of centrally-staged swirl flames operating in different partially-premixed modes[J]. *Energy*, 2021, 236: 121512.
- [12] FENG Xiangzhou, LIANG Hongxia, SUO Jianqin, et al. OH* chemiluminescence characteristics of the RP-3 fueled dual-swirl direct-mixing combustor[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(33): 30716-30726.
- [13] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J F. Unsteady aspects of lean premixed prevaporized gas turbine combustors: flame-flame interactions[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(3): 631-641.
- [14] 朱家健, 万明罡, 吴戈, 等. 激光诱导荧光技术燃烧诊断的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401005.
- ZHU Jiajian, WAN Minggang, WU Ge, et al. Research progress of laser-induced fluorescence technology in combustion diagnostics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401005. (in Chinese)
- [15] CHTEREV I, ROCK N, EK H, et al. Simultaneous imaging of fuel, OH, and three component velocity fields in high pressure, liquid fueled, swirl stabilized flames at 5 kHz[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 186: 150-165.
- [16] MALBOIS P, SALAÜN E, ROSSOW B, et al. Quantitative measurements of fuel distribution and flame structure in a lean-premixed aero-engine injection system by kerosene/OH-PLIF measurements under high-pressure conditions[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 5215-5222.
- [17] MEIER U, HEINZE J, LANGE L, et al. Characterisation of the combustion performance of low emission fuel injectors with laser measurements[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2012, 3(1): 45-53.
- [18] APELOIG J M, D'HERBIGNY F X, SIMON F, et al. Liquid-fuel behavior in an aeronautical injector submitted to thermoacoustic instabilities[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(1): 309-319.
- [19] LI Jie, XIA Tao, SUN Bolun, et al. Experimental study of rotating direction for dual-axial swirlers on the flow field and combustion characteristics of aero-engine combustor[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 61: 105135.
- [20] 苏守国, 苏利民, 蔡骁, 等. 近吹熄 RP-3 旋流喷雾火焰结构实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(5): 536-542.
- SU Shouguo, SU Limin, CAI Xiao, et al. RP-3 swirl spray flame structure near lean blow-out[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(5): 536-542. (in Chinese)
- [21] XIN Shirong, WANG Wenyu, HE Yong, et al. Effect of low fuel temperature on combustion deterioration of kerosene swirling spray flames using OH-PLIF[J]. *Fuel*, 2024, 358: 130098.
- [22] WU Guohua, YU Xin, PENG Jiangbo, et al. Experimental investigation of lean blow-out on bluff-body stabilized flames using simultaneous OH/kerosene-PLIF measurements in partially vapourised kerosene[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2025, 166: 111458.
- [23] 武国华, 于欣, 彭江波, 等. 超燃冲压发动机羟基/煤油-PLIF 同步测量研究[J]. *推进技术*, 2024, 45(1): 2210098.
- WU Guohua, YU Xin, PENG Jiangbo, et al. Simultaneous measurements of OH/kerosene-PLIF in scramjet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(1): 2210098. (in Chinese)
- [24] JI Kexin, HUI Xin, TAO Chao, et al. Laser absorption correction for hydroxyl planar laser induced fluorescence measurements in a centrally staged combustor at elevated pressures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(11): 113104.
- [25] TAO Chao, ZHANG Chi, AN Qiang, et al. Temperature field measurements in swirl spray flames using two-line planar laser induced fluorescence thermometry[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2025, 147(3): 031009.

(编辑: 陈 越)