

〈综述与评论〉

紫外像增强器在航空发动机燃烧诊断中的应用

马俊卉¹, 王岭雪^{1,2}, 胡婧玲¹, 郑德智^{1,2}, 闻浩诚³, 王兵³, 蔡毅¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 复杂环境智能感测工信部重点实验室, 北京 100081;

2. 北京理工大学(珠海)复杂环境科学探测中心, 广东 珠海 519088;

3. 清华大学 宇航学院, 北京 100084)

摘要: 航空发动机燃烧过程中, OH*、NO*、NH*等激发态自由基伴随着紫外波段的微弱自发光, 且随燃烧的进程而快速变化。紫外像增强器最高具有百万倍电子增益、纳秒量级快门, 可以实现紫外波段燃烧流场瞬态结构的捕获, 为量化测量、阐释燃烧特性随多物理参数的变化规律奠定基础。本文总结紫外像增强器在航空发动机燃烧光学诊断中的应用, 包括针对OH*自发光进行成像的被动光学诊断技术、利用激光激发OH成像的主动光学诊断技术等。最后, 结合新型航空发动机高时空分辨探测的要求, 指出紫外像增强器在燃烧诊断中的发展方向。

关键词: 紫外像增强器; 航空发动机光学诊断; 紫外燃烧诊断

中图分类号: TN23 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)10-1107-12

Application of Ultraviolet Image Intensifiers in Combustion Diagnostics of Aero-engines

MA Junhui¹, WANG Lingxue^{1,2}, HU Jingling¹, ZHENG Dezhi^{1,2}, WEN Haocheng³, WANG Bing³, CAI Yi¹

(1. MIT Key Laboratory of Complex-Field Intelligent Exploration, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology,

Beijing 100081, China; 2. Complex Environment Sensing Center, Beijing Institute of Technology, Zhuhai 519088, China;

3. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the combustion process of aero-engines, excited-state free radicals such as OH*, NO*, and NH* emit faint self-chemiluminescence in the ultraviolet (UV) band, which changes rapidly with the progress of combustion. UV image intensifiers, featuring up to a million-fold electronic gain and nanosecond-level shutter speed, can capture the transient structure of the combustion flow field in the UV band, laying the foundation for the quantitative measurement and interpretation of the variation rules of combustion characteristics with multiple physical parameters. This paper summarizes the application of UV image intensifiers in optical diagnostics of aero-engine combustion, including passive optical diagnostic techniques for imaging OH* self-chemiluminescence, and active optical diagnostic techniques using laser excitation for OH imaging. Finally, in line with the requirements of high spatial and temporal resolution detection for new types of aero-engines, the development direction of UV image intensifiers in combustion diagnostics is pointed out.

Key words: ultraviolet image intensifier, aero-engines optical diagnosis, ultraviolet combustion diagnosis

0 引言

紫外像增强器是真空成像器件, 最高具有百万倍电子增益、纳秒量级快门, 可以对微弱的光学信号(甚

至单光子)或者高速、瞬态的光学现象进行成像, 在电力设备局部电晕放电检测、燃烧自由基成像、等离子体成像^[1]等极弱紫外探测或高速紫外成像场景中具有广泛应用。航空发动机使用烷烃类气体、氨气、氢

收稿日期: 2024-09-25; 修订日期: 2024-10-10.

作者简介: 马俊卉(1994-), 女, 博士研究生, 主要从事红外气体探测、紫外燃烧诊断的研究工作。E-mail: junhui_m@163.com.

通信作者: 王岭雪(1973-), 女, 博士, 副教授, 主要从事微光、红外与紫外成像、图像处理的研究工作。Email: neobull@bit.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2241226)。

气等作为燃料^[1-7]，其燃烧时 OH*、NO*、NH*^[2] 等激发态自由基伴随着紫外辐射（也称为化学发光、自发光），其中 OH* 主要由反应 $H + O + M = OH^* + M(R1)^{[1]}$ 与 $CH + O_2 = OH^* + CO(R2)^{[4]}$ 产生，其中 M 为参与反应的第三体。OH* 摩尔分数在 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 量级^[1]，单位体积所发出的信号水平较低，因此对 OH* 自由基进行光学成像通常需要采用紫外像增强器对微弱紫外信号进行倍增放大至可视化的程度^[9]。另外，航空发动机中的燃烧反应十分迅速，其火焰锋面的传播速度可至 10^3 m/s 量级，为捕捉瞬态反应过程，要求紫外像增强器具有 μs 甚至 ns 量级的门宽。

对燃烧过程中紫外波段自发光的自由基进行光学成像具有两方面作用：一是得到火焰燃烧当量比^[1]、热释率等参数信息^[8]，二是自由基的三维分布信息可以描述火焰结构^[9]、指示燃烧反应发生位置^[10]、明确燃烧过程^[11]，对促进燃烧过程控制、深入了解燃烧反应机理、分析有害污染物氮氧化物 (NO_x) 生成、优化燃烧过程、降低环境污染等具有重要意义。

本文主要概述航空发动机燃烧诊断中使用紫外像增强器的光学诊断技术，包括被动紫外光学诊断技术、主动紫外光学诊断技术。在此基础上，结合新型航空发动机提出高时空分辨、高量子效率需求，为紫外像增强器在航空发动机燃烧诊断中的发展方向提供参考。

1 航空发动机燃烧的紫外光学诊断原理

航空发动机燃烧是氧化反应，过程由多个基元反应组成，其反应产物与参与燃烧的燃料成分有关，包括碳颗粒、水蒸气、二氧化碳等气体、氮氧化物以及中间反应生成的多种自由基。以氨气为例，其燃烧时的反应路径图如图 1 所示^[12]，可以看出有多条反应路径，伴随紫外辐射的典型自由基包括 NH*、NH₂*、NO*、OH* 等。不同燃烧产物具有不同的辐射特性，按照火焰辐射光谱特性，可以分为线谱、带谱和连续谱 3 种^[1]。线谱是原子在发生状态改变时所辐射或吸收的能量引起，每条线谱都对应着特定能级之间的跃迁，例如 Na*、K* 等碱金属原子辐射。连续谱的产生通常是由于固体颗粒或液滴的发射和吸收，例如燃烧中产生的碳烟辐射，有时也与燃烧中的气相变化过程相关，例如分子电离或重组。紫外和可见光波段的带谱是电子跃迁伴随着分子的振动和转动能级产生的。自由基辐射发光是典型的线谱发射，具有指纹特性，与带谱和连续谱发光相比更便于观测，其探测结果与自由基浓度正相关。处于激发态的自由基在能级跃迁过程中伴随着不同特征波段的发光，图 2 是预混甲

烷空气火焰典型的 CH*、OH*、C₂* 激发态自由基辐射光谱^[13]，其中 OH* 辐射分布于紫外波段 280~350 nm 区间，峰值波长 309 nm，CH* 辐射光谱位于可见光波段 420~440 nm，C₂* 辐射位于 470~550 nm，同时还包含主要位于 340~650 nm 宽波段辐射的 CO₂* 及全波段连续辐射的烟灰黑体辐射。

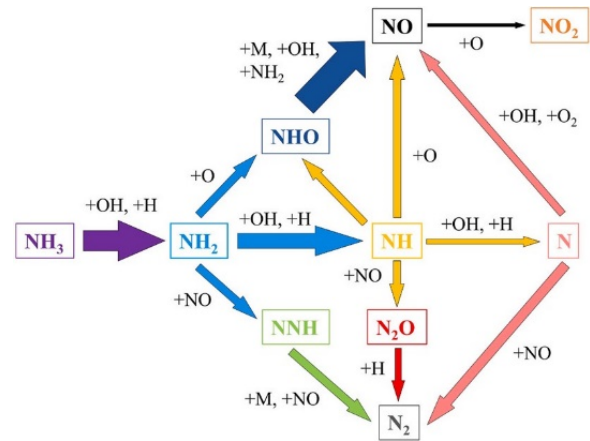


图 1 氨气燃烧反应路径图^[12]

Fig.1 Reaction pathway diagram of ammonia combustion^[12]

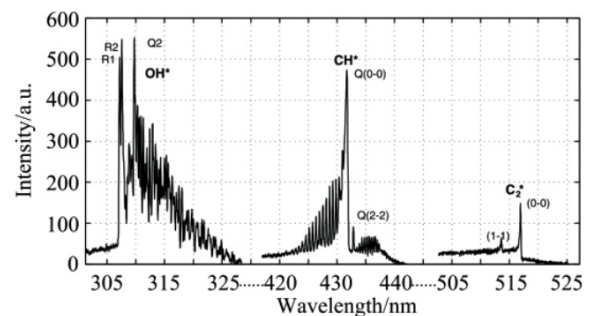


图 2 预混甲烷空气火焰的 CH*、OH*、C₂* 激发态自由基发射光谱^[13]

Fig.2 Emission spectra of CH*, OH*, C₂* in premixed methane-air flame^[13]

使用紫外像增强器的自由基自发光成像原理如图 3 所示，燃烧过程中的自由基紫外波段自发光信号经过紫外窄带滤光片和光学系统传输至紫外像增强器，实现信号增强后转换为荧光信号再耦合到 CCD 或 CMOS 等成像器件，最终转换为图像信号输出。使用紫外窄带滤光片是为了消除其它自由基辐射能量的干扰，以 OH* 自由基为例，根据其辐射的峰值波长 309 nm 选用中心波长 310 nm、带宽 10 nm 的窄带滤光片安装在光学系统前进行成像，在带宽内成像器件接收到的能量包括：OH* 的辐射能量、少量的 CO₂* 的辐射能量及烟灰黑体辐射。OH* 自由基的辐射能量可以表示为：

$$I_n = \frac{1}{4\pi} A_{t,int} K V_{em} [n] \quad (1)$$

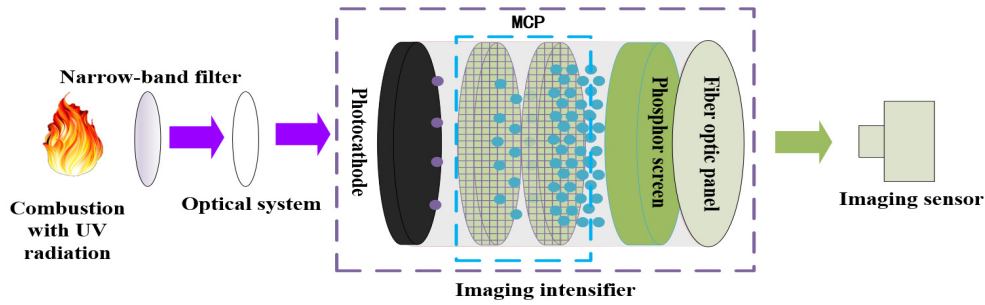


图3 使用紫外像增强器的自由基自发光成像原理

Fig.3 Imaging principle of free radical self-luminescence using ultraviolet image intensifier

式中: n 代表自由基, I_n 即该自由基辐射能量被成像器件接收部分; A 为爱因斯坦系数; t_{int} 为成像器件的积分时间; K 为包含窄带滤光片和光学系统透过率因素的常数; V_{em} 为自由基体积; $[n]$ 代表稳态条件下自由基的数量密度。从式(1)可知, 自由基发光强度与自由基浓度成正比。

烟灰辐射主要为黑体辐射, 符合普朗克定律, 可以表示为:

$$I_{soot} = \int_{\lambda} \varepsilon \tau \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (2)$$

式中: ε 为发射率; τ 为系统透过率; h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为光谱波长; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度。从式(2)可知, 烟灰辐射能量与所测量的波段范围及烟灰的温度有关。

OH* 激发辐射在 305~315 nm 波段上占主导成分, CO₂* 与烟灰辐射为主要干扰因素。根据 Wang^[14] 等人的研究, 紫外波段上 CO₂* 的辐射能量约为 OH* 辐射强度的 3.5%, 可以忽略不计。根据 Yang^[7] 的研究, 烷烃类火焰在 OH* 区域没有强烈的烟尘发光, 相比 OH* 辐射可以忽略。因此 305~315 nm 波段上获取的能量可以全部看作 OH* 自发光辐射, 且其强度直接反映 OH* 的数量与分布情况。

当自由基辐射信号传输进入紫外像增强器时, 像增强器增益可以用以下模型描述^[15]:

$$N_{pout} = N_p \cdot \eta_{PC}(\lambda) g_{MCP}(U_{MCP}) g_{pho} \Omega_{opt} \quad (3)$$

式中: N_{pout} 为经像增强器后输出的光子数量; N_p 为入射到像增强器的光子数量; η_{PC} 为光电阴极的光谱响应; g_{MCP} 为 MCP 电子增益; U_{MCP} 为 MCP 电压; g_{pho} 为荧光屏增益; Ω_{opt} 为光学耦合立体角。

当紫外像增强器荧光屏与成像器件耦合为紫外像增强相机时, 成像过程可以描述为:

$$G = G_0 + K(U_{MCP}) \frac{At_e}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_{\lambda}(\lambda) \eta_{PC}(\lambda) \lambda E_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中: G 为特定像素上探测的灰度值; G_0 为探测器在无信号时的偏置信号; K 为光子到灰度值的转换系数; N_e 为进入系统的光子数量; A 为成像器件单个像元的尺寸; t_e 为曝光时间; h 为普朗克常数; c 为光速; λ_1 和 λ_2 分别为相机的光谱响应区间; η 为成像器件的量子效率; E_{λ} 为自由基自发光的辐照度。

2 航空发动机燃烧紫外光学诊断进展

从光学成像的角度来说, 按照诊断过程中是否需要主动激光照射, 紫外光学诊断分为被动光学诊断与主动光学诊断两类。相应地, 两种诊断技术观察的自由基状态可能有所不同, 以 OH* 自由基为例, 被动光学诊断是对前面提到的激发态 OH* 伴随的峰值波长 309 nm 的窄带辐射进行成像; 主动光学诊断则是通过主动激光照射激发燃烧过程中的 OH 自由基, 例如常用 283 nm 主动激光激发 OH 发生 A²Σ⁺ ← X²Π (1-0) 跃迁, 激发态的 OH* 由于能量不稳定回落至稳定态, 此过程也伴随峰值波长在 309 nm 左右的窄带辐射^[16]。

值得注意的是, 航空发动机内部属于高温高压受限空间, 存在复杂流场结构的气动、燃油雾化、蒸发、油气混合和燃烧化学反应多场耦合过程^[17], 在对航空发动机燃烧进行紫外光学诊断时, 通常采用两种方式: ①燃烧室方式, 使用紫外波段透射率高且耐高温高压的材料制作透明燃烧室; ②航空发动机局部位置开设光学可视窗方式, 用于对该位置的燃烧观察和诊断。另外, 还需要综合考虑航空发动机结构、测量技术、光路布局、数据采集与存储等多方面因素来确定最终的光学诊断方案。

2.1 使用紫外像增强器的被动光学诊断进展

根据所采用紫外像增强器的数量, 被动光学诊断又分为单视角和多视角两大类。

2.1.1 单视角

在单个视角上使用 1 台紫外像增强器相机直接采集燃烧自由基自发光信号是被动光学诊断技术的主

要形式，用于火焰燃烧速度、火焰燃烧机理、火焰燃烧稳定性等多种研究中。

Gerke 等人^[18] 2010 年利用 LaVision IRO 紫外像增强器耦合 LaVision Ultra Speed Star 5 高速相机，在 10 kfps 帧率（像素 512×512）下对 OH* 发光进行成像，研究了单缸压缩机内预混氢/空气火焰的燃烧速度。图 4 为 LaVision IRO 采用的两级像增强结构示意图^[19]，第一级是传统像增强器，第二级称为助推放大（Booster）系统，由光电阴极、荧光屏和光纤面板组成。

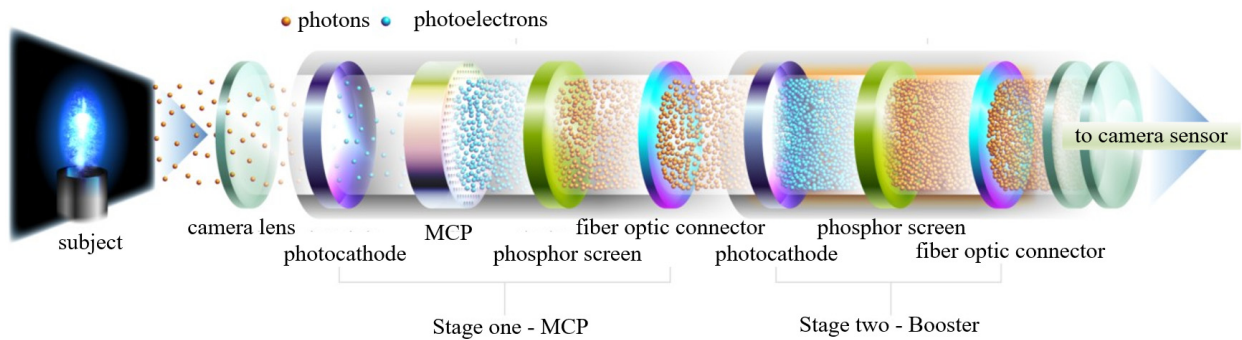


图 4 LaVision IRO 两级像增强结构示意图^[19]

Fig.4 The two-stage image intensifier structure of LaVision IRO^[19]

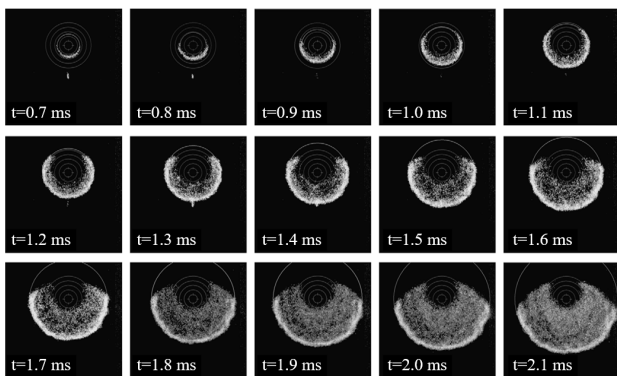


图 5 层流氢火焰点火过程中 OH* 化学发光紫外图像随时间 t 的变化^[18]

Fig.5 Variation of UV images of OH* chemiluminescence in the ignition process of laminar hydrogen flames over time t ^[18]

Kim^[9]等人 2016 年使用 Princeton Instruments 像增强 CCD (ICCD) 相机（像素 1024×1024，具体型号未给出）结合紫外窄带滤光片对 CH₄/O₂ 同轴射流火焰的 OH* 自发光进行成像，图 6(a) 是实验装置示意图，图 6(b) 是 OH* 自由基的紫外图像经过伪彩色处理的结果，从左到右依次为：OH* 图像、20~50 张 OH* 紫外图平均结果、对平均图做 Abel 反演变换结果及二维 OH* 区域轮廓提取。红色区域代表 OH* 的强度较高，说明强度最大的位置位于火焰基部，其位置受喷射气体雷诺数影响。

Ferris 等人^[20] 2019 年利用 LaVision HS-IRO 紫外

第一级像增强器的荧光屏输出耦合到第二级的光电阴极并通过荧光屏增益进行信号的二次放大，同时，使用高性能选通电源使像增强器门控可达 10ns。图 5 是点火过程连续拍摄的层流氢火焰 OH* 化学发光随时间 t 变化的紫外图像，可以看出，OH* 分布区域随点火过程的推进逐渐增大。另外，还研究了不同压强下的 OH* 分布变化情况，研究结果表明，在高压下表面火焰的 OH* 分布不稳定性更为显著，导致火焰速度远高于计算得到的稳定层流火焰速度。

像增强器耦合高速相机 Vision Research Phantom v710 搭建了如图 7 所示的紫外高速成像系统，采集点燃过程的紫外成像。激波管火焰由 532nm 的激光点燃。系统在每秒 1 万（分辨率 752×752）~5 万帧（分辨率 304×304）的帧率下对 OH* 进行成像，首次进行了激波管内高温甲烷和丙烷层流火焰速度测量，测量结果表明，火焰速度在 100~500 cm/s 之间。另外，还发现较低温度 (<600 K) 下火焰速度测量与传统静态火焰测量结果相符，而极高温 (>750 K) 时测量误差较大。

Pugh 等人^[21] 2021 年利用 SIL40HG50 像增强器耦合高速 CMOS 相机 Phantom v1212 也建立了紫外高速成像系统，最高帧率可达 10 万 fps，SIL40HG50 采用 S20 光电阴极，最高增益为 10⁵ 倍，最低曝光时间 10 μs。该系统采集了 NH₃ 燃烧的多种自由基辐射，首次实现 OH*、NH*、NH₂* 自发光的可视化。另外，研究结果表明，NH₂* 强度是富 NH₃ 火焰中 NO 消耗的良好标志。为了获取稳定的图像，Pugh 等人采用 2000 张图像进行平均以获取时域平均图像。图 8 是时域平均后再进行 Abel 变换后的 OH*、NH*、NH₂* 在不同条件下的图像结果，图 8 中的 Premix 是指 NH₃、H₂ 和空气全部预混；H₂Diff 是指 H₂ 中心射流、NH₃ 和空气预混外部伴随射流；NH₃Diff 是指 NH₃ 中心射流、H₂ 和空气预混外部伴随射流。

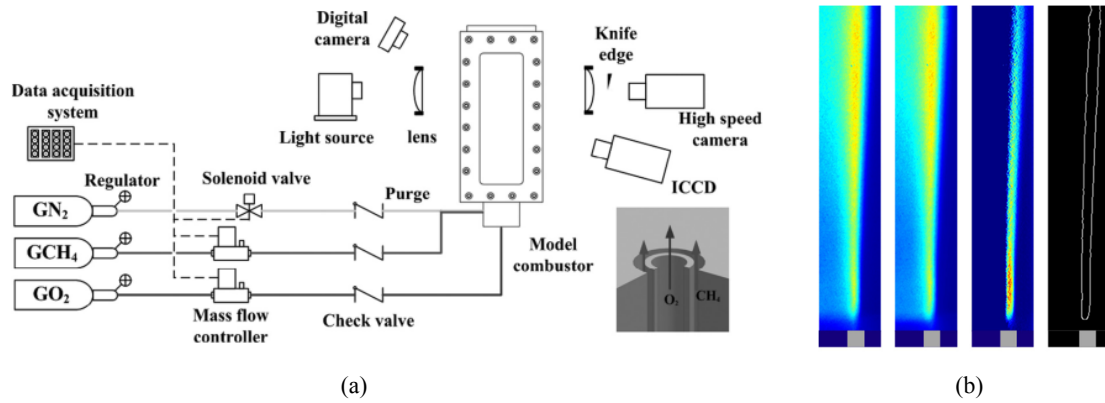


图6 (a)实验装置示意图及(b)从左到右依次为: OH*图像、20~50张 OH*紫外图平均结果、对平均图做 Abel 反演结果及二维 OH*区域轮廓提取^[9]

Fig.6 (a) Schematic of experimental apparatus and (b) from left to right: OH* image, average result of 20-50 OH* UV images, Abel inversion result of average, and 2D OH* area contour extraction, respectively^[9]

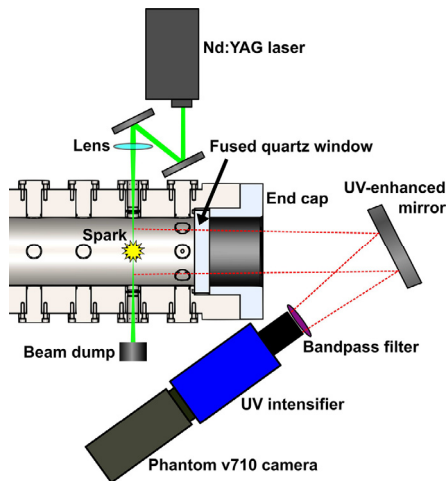


图7 紫外像增强器耦合高速相机的紫外高速成像系统示意图^[20]
Fig.7 UV high-speed imaging system of UV image intensifier coupled with high-speed camera^[20]

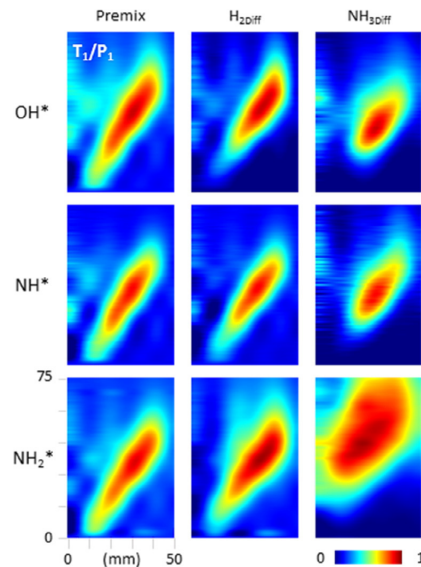


图8 NH₃-H₂ 火焰在不同燃烧条件下的自由基自发光紫外图像伪彩色效果^[21]

Fig.8 Pseudocolor results of free radical luminescence UV images of NH₃-H₂ flame under different conditions^[21]

Li 等人^[22] 2022 年利用 EyeITS-D-HQB 高速成像增强模组对三角形钝体燃烧火焰加速和爆燃-爆轰过渡过程 (deflagration to detonation transition, DDT) 中的 OH* 成像, 像增强器组件使用双 MCP 将最高增益提升至 1.5×10^5 倍, 帧率最高可达百万帧, 光学快门可至 3 ns 甚至 500 ps。图 9 是采用 25.2 万 fps 帧率捕捉到的传播速度 1450~2175 m/s 的火焰锋面紫外 OH* 图像的伪彩色效果, 成像可以清晰捕捉到火焰刷 (见图 9FB 处)、延迟燃烧区 (见图 9P 处) 及爆轰 (见图 9D 处) 现象。研究表明, 等效比 (ϕ) 对火焰加速和 DDT 过程都有较大影响。火焰加速速率先增大后减小, 在 $\phi=1.0$ 时达到最大值, DDT 特征值在 $\phi=1.0$ 和 1.1 处均达到最小值。另外, 该研究提出控制燃料当量比和降低管道中障碍物密度或表面粗糙度是确保氢气运输安全性的可能方法。

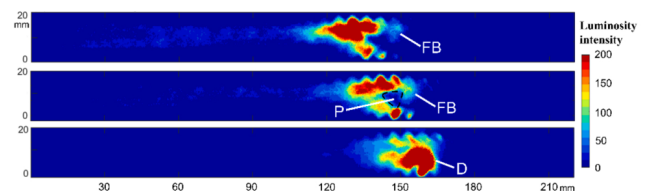


图9 针对火焰加速和 DDT 过程 OH* 发光伪彩色效果, 其中 FB 为火焰刷 (flame brush), P 为延迟燃烧区 (delayed-burning pocket), D 为爆轰 (detonation)^[22]

Fig.9 Pseudo-color images of OH* luminescence during flame acceleration and DDT, where FB is the flame brush, P is the delayed-burning pocket, and D is the detonation^[22]

综上所述,使用紫外像增强器的单视角紫外被动光学诊断系统广泛用于伴随紫外波段自发光的自由基二维分布、反应区域分布、燃烧传播速度、燃烧稳定性研究中。从像增强器性能的角度来看,增益倍数、最小门宽(minimum gate width)都有大幅度提高,增益倍数从 10^3 大幅提升至 10^5 甚至 10^6 量级,最小门宽缩短至500 ps。同时,高速CMOS相机全帧拍摄时的帧率已经达到10万fps量级,其与像增强器通过光学耦合组成高速成像系统已经成为获取燃烧瞬态流场结构的普遍选择。然而,由于二维图像和视场的限制,单视角无法显示燃烧过程中自由基在三维空间的立体分布信息。

2.1.2 多视角

单视角紫外被动诊断技术所获取的图像为三维燃烧场沿成像视角路径的积分值,而利用多台紫外像增强器或一台紫外像增强器+光路分光方法实现多视角的火焰二维成像采集,可以进一步反演得到燃烧场内部自由基分布的三维信息,又称为化学自发光计算层析技术(computed tomography of chemiluminescence, CTC),是燃烧诊断的重要研究方向。可见光波段的CTC方法相对较为成熟^[23-28],相比之下,紫外波段的CTC研究还较少。

Anikin等人^[30-31]在2010年利用一台Princeton Instruments公司的PI MAX紫外ICCD相机(512×512像素,UV光电阴极)结合10个开普勒望远镜(Kepler telescopes)放置在不同角度对OH*自发光进行观测,每台望远镜后耦合由90根单光纤组成光纤束,搭建了多视角紫外CTC系统。在100~200 μs积分时间下采集的OH*紫外图像,经过三维重建算法处理获得的OH*三维强度分布。该研究首次证实了紫外CTC在OH*自发光三维重建的可行性。然而,受限于10个光纤角度同时成像在ICCD相机上,图像分辨率

较小,单个光纤束的图像直径仅为8个像素。

Worth^[32]2012年利用LaVision IRO像增强器耦合Photron SA1.1高速CMOS相机针对具有相互作用的两个钝体稳定火焰,采用手动旋转改变相机位置的方式,如图10(a)所示,共采集15个视角的OH*自由基图像,帧率2880 fps,600×600像素,如图10(b)所示,并利用CTC方法获得OH*发光三维分布,如图10(c)所示。研究表明:碰撞湍流火焰之间会发生复杂的三维漩涡-火焰相互作用,OH*发光三维分布结果也证实了紧密间隔的湍流火焰之间的相互作用。

吕良^[33]等人2016年利用PI-MAX I ICCD相机采用导轨装置,获取37个视角的OH*自由基图像,积分时间50 ms,512×512像素,重建OH*发光三维重建分布结果表明,在强度梯度较大的区域,CTC技术不能高精度地显示火焰结构。

Häber^[34]等人2020年将Anikin等人的系统改进为同时观测OH*和CH*的双波段CTC系统,如图11(a)所示,使用10个开普勒望远镜在10个视角采集湍流火焰中OH*和CH*的自发光信号,每个望远镜后耦合的102根熔融石英光纤组成的光纤束(FF)将观测的光学图像传输至中继透镜(relay optic),中继透镜使用棱镜分光的方式,首先将光纤输出信号经离轴抛物面镜(OPM1)准直,再经短通滤光片(SP)和楔棱镜(WP),由平椭圆镜(EM1)偏转,如图11(b)所示。每根光纤的信号在空间上被棱镜分成不同的波长,并通过另一组反射镜(EM2和OPM2)在ICCD相机上成像。SP防止来自相邻光纤行频谱分离信号的串扰,带通滤光片(BP)用于将检测波长限制为特定自由基,例如OH*_{@308 nm}或CH*_{@431 nm}。ICCD相机是Princeton Instruments公司的升级产品PIMAX 4,其采用第三代无膜像增强器,门控最快可至2 ns,

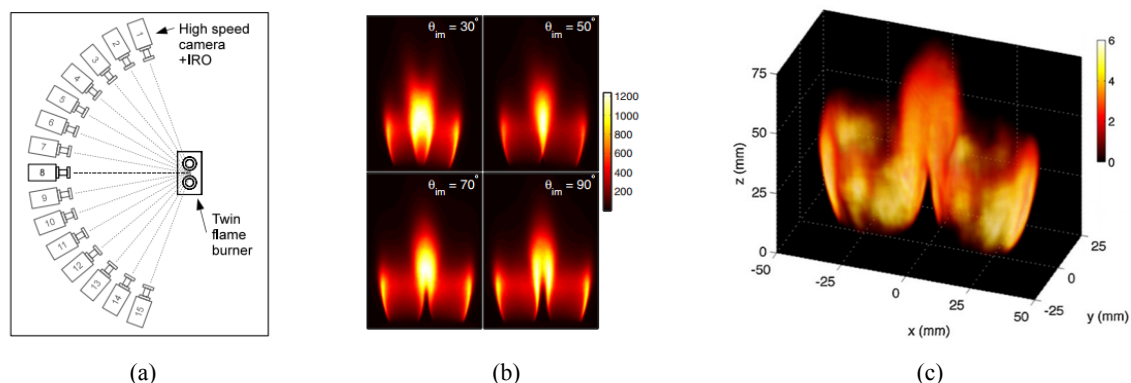


图10 手动改变视角的CTC系统示意图:采集的视角 θ_{fm} (a)为30°、50°、70°和90°的OH*自由基图像的伪彩色效果(b)以及CTC三维重建OH*发光分布(c)^[32]

Fig.10 Schematic diagram of the CTC system with manually changed viewing angle (a), pseudo-color images of the OH* radical collected at viewing angles θ_{fm} of 30°, 50°, 70°, and 90° (b), and CTC 3D reconstruction of OH* distribution (c)^[32]

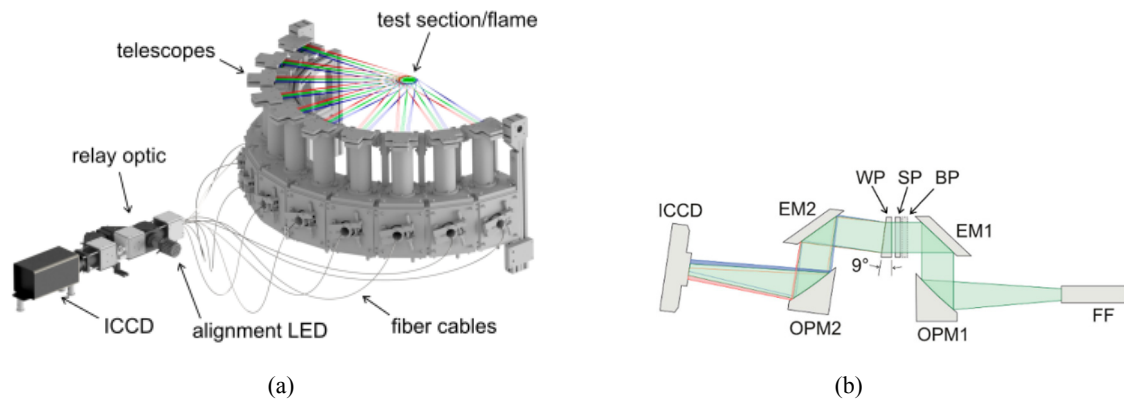


图 11 双波段 CTC 系统示意图(a)及其棱镜分光系统(b),其中 FF 为光纤束 (fiber ferrule); OPM 为离轴抛物面镜 (off-axis parabolic mirror); EM 为平椭圆镜 (flat-elliptical mirror); BP 为带通滤光片 (band-pass filter (optional)); SP 为短通滤光片 (short-pass filter); WP 为楔棱镜 (wedged prism)^[34]

Fig.11 Schematic diagram of the dual-band CTC system (a) and its prism spectrometer system (b), where FF is a fiber ferrule, OPM is an off-axis parabolic mirror, EM is a flat-elliptical mirror, BP is a band-pass filter (optional), SP is a short-pass filter, and WP is a wedged prism^[34]

重复频率 1 MHz。研究发现,采用 1 ms 的积分时间时 OH*和 CH*自发光存在时空耦合,另外,首次提出利用 OH*和 CH*之间强烈的时空相关性,通过实验数据相互评估和量化湍流火焰三维重建质量。

综上所述,多视角研究除了采集不同视角的自由基发光二维图像之外,更重要的是采用 CTC 方法进行三维重建,获取自由基的三维分布信息。值得注意的是,多视角成像需要在 0~180°空间范围内的不同视角上采集二维成像,然而,实际航空发动机结构难以满足全空间无遮挡的条件,会造成部分成像角度数据缺失,无法准确进行三维重构^[35-36],因此,目前多视角研究主要在实验室条件下开展。另外,紫外像增强器的高昂成本也使得多视角二维图像采集难以满足,已有的手动移动及滑轨移动方案均牺牲多视角成像的同时性,因此只能获取燃烧场在一定时间周期内的三维分布积分值,而采用光路分光的方案需要在分辨率与成像视角数量之间做平衡,复杂的光路也进一步削弱了微弱的紫外辐射信号,使得成像的曝光时间增加。将 CTC 技术应用于航空发动机内部燃烧紫外光学诊断仍面临诸多技术难题。

2.2 使用紫外像增强器的主动光学诊断进展

主动光学诊断方法主要包括激光诱导荧光技术 (laser-induced fluorescence, LIF) 和平面激光诱导荧光技术 (planar laser-induced fluorescence, PLIF),二者的差异主要在于 LIF 是点激光激发、PLIF 是平面激光激发。以 OH 自由基为例, LIF 和 PLIF 都需要针对 OH 自由基选取特定电子跃迁共振, OH 能级及跃迁过程如图 12 所示,将激光器的激光波长调整至 282 nm,

OH 自由基吸收光子后从基态 ($X^2\Pi$) 的低能级 $V''=0$ 跃迁至激发态 ($A^2\Sigma$) 的高能级 $V'=1$ 能级,部分能量发生碰撞淬灭,当从 $V'=1$ 能级回到基态 $V''=1$ 能级时,发出波长约 314 nm 的荧光;与此同时,部分能量通过振动能量传输 (vibrational energy transfer) 到达激光态 $V'=0$ 能级,除了发生碰撞淬灭,当从 $V'=0$ 能级回到基态 $V''=0$ 能级时发出波长约 309 nm 的荧光,该荧光是中心波长 309 nm 的窄带辐射,需要使用紫外像增强器进行采集。英国利兹大学^[37]、中国科学院^[38]、国防科技大学^[39-42]及斯坦福大学^[43-45]等机构均展开了大量研究,以下主要简述使用紫外像增强相机的 OH-PLIF 系统。OH-PLIF 可以实现燃烧过程中 OH 组分分布测量,从而进一步研究燃烧的反应模型及反应常数^[46]。

Li 等人^[49]在 2010 年采用多台 ICCD 对湍流甲烷/空气预混射流火焰的多种自由基及中间产物成像,采用 Princeton PI-MAX SB 收集 OH-PLIF 激发辐射,成像分辨率为 512×512。图 13 为不同气体燃料内射流进气速度下 OH-PLIF 成像与甲醛 (CH_2O)-PLIF 的成像对比,可以看到,在进气速度为 10 m/s 时,火焰为层流火焰,而进气速度为 20~150 m/s 时,火焰为湍流火焰。随着进气速度的增加,OH 的分布由边界连续转变为边界不连续,证明反应区的减小。

Malbois 等人^[50]2019 年采用 PI-MAX 4 对航空发动机高压装置 (high pressure facility for aero-engines, HERON) 采集 OH-PLIF 成像信号,结合煤油-PLIF 成像搭建了 ICCD 光学诊断系统,如图 14 所示。HERON 内装有法国 SAFRAN Helicopter Engines 公司开发的

精益预混喷射系统，燃料为液态煤油（Jet-A1）。研究通过 OH 分布、煤油摩尔分数及温度数据对比分析了高压条件下燃油航空发动机的火焰结构，结果表明燃料分布、火焰拓扑结构与反应区强度之间存在很强的相关性，煤油的主要部分在喷射系统内燃烧，只有小部分喷射燃料在燃烧室内燃烧。

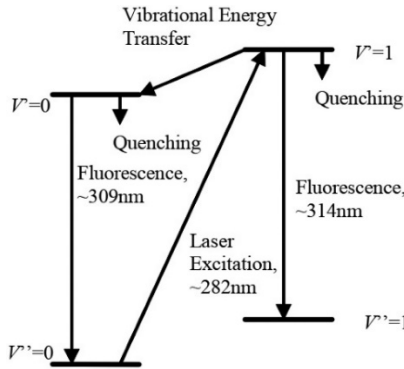


图 12 OH 能级及跃迁过程，其中双撇“”表示低能级，单撇“”表示高能级^[37]

Fig.12 OH energy levels and transition processes, where the double prime “” indicates a low energy level, and the single prime “” indicates a high energy level ^[37]

Litvinov 等人^[51]2021 年使用像增强器 LaVision HS-IRO 耦合 LaVision HSS-8 CMOS 相机采集增压混合燃烧航空发动机模型燃烧室的 OH-PLIF 信号，图 15(a)所示为该燃烧室的示意图，喷射器由一对环形空气旋流喷嘴组成，采用乙烯/丙酮作为燃料，OH-PLIF 的观测面积为 $54\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。图 15(b)为对 OH-PLIF 的成像结果在不同相位的相位平均结果，可以识别出与旋流方向同向旋转并同时发生于内外剪切层的进动涡核（precessing vortex core, PVC）和双螺旋涡（double helical vortex, DHV）。

综上所述，相比于被动光学诊断，OH-PLIF 成像一般对燃烧场中特定区域进行二维成像，具有较高的成像分辨率，可以捕捉到燃烧场的精细结构（特别是涡结构），且无需全向发动机燃烧室光学窗口，因此虽然需要主动激光设备激发 OH，仍然在发动机燃烧诊断中得到成熟应用。对于 OH-PLIF 系统的紫外像增强器而言，存在与主动激光设备进行同步的问题，因此需要高精度脉冲同步控制系统。

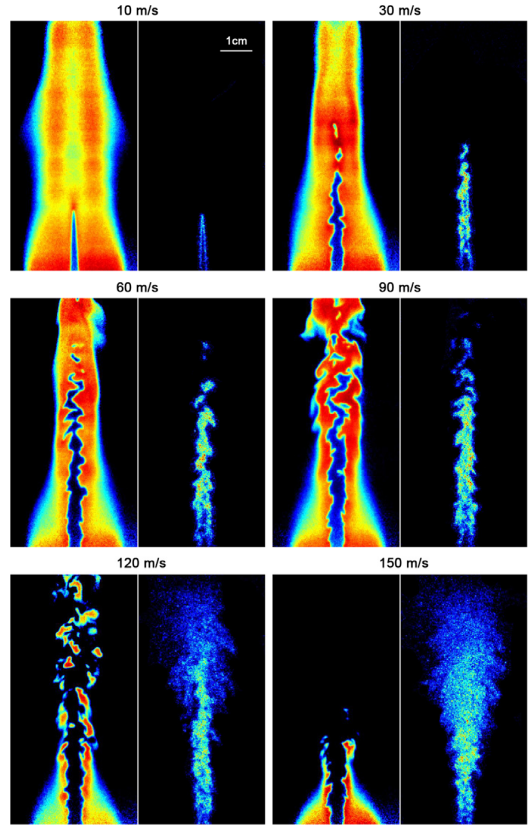


图 13 不同气体燃料内射流进气速度下 OH(左)和甲醛(右)的 PLIF 成像伪彩色效果对比图，6 组图像进气速度分别为 10 m/s、30 m/s、60 m/s、90 m/s、120 m/s 及 150 m/s^[49]

Fig.13 Pseudo-color image comparison of PLIF imaging of OH (left) and formaldehyde (right) at different gas feeding speed in the inner jet, in which the six groups of images are 10 m/s, 30 m/s, 60 m/s, 90 m/s, 120 m/s and 150 m/s respectively ^[49]

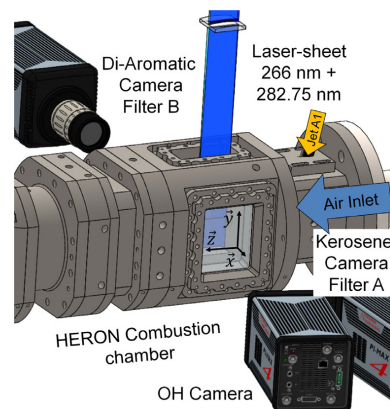


图 14 HERON 的 ICCD 光学诊断系统示意图^[50]

Fig.14 ICCD optical diagnostic system schematic diagram of HERON^[50]

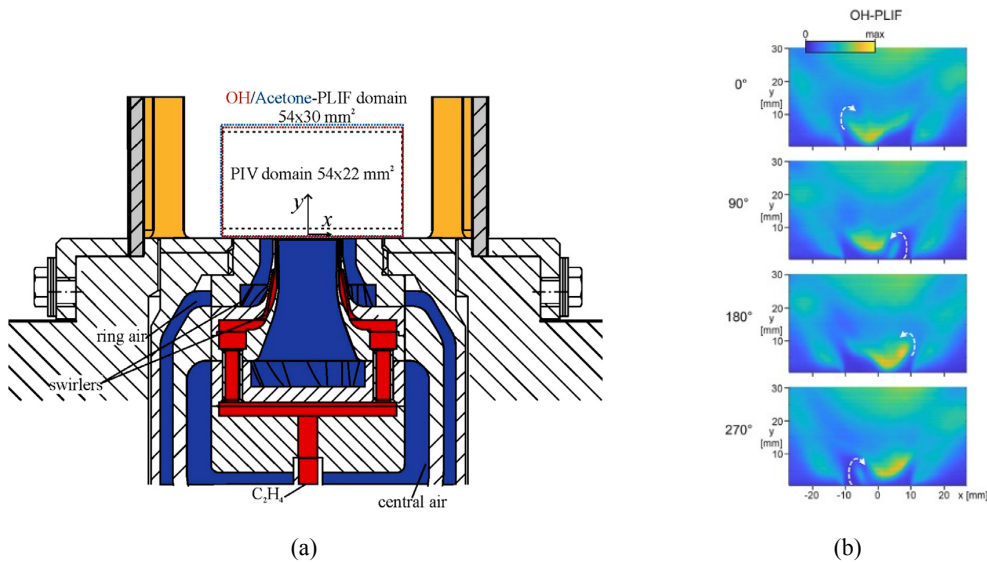


图 15 航空发动机模型燃烧器结构图(a), 以及不同相位下的 OH-PLIF 相位平均结果 (0°, 90°, 180° and 270°) [51]

Fig.15 The burner geometry of aero-engine(a), and phase averages of OH-PLIF at different phases (0°, 90°, 180° and 270°) [51]

3 新型航空发动机燃烧诊断对紫外像增强器的需求

目前国际上航空发动机燃烧诊断领域使用的主流紫外像增强器生产厂家包括英国 Photek、法国 Photonis、德国 ProxiVision、日本 Hamamatsu Photonics 等公司,其紫外像增强器产品及性能参数如表 1 所示。

从表 1 可以看出:

①通常采用宽光谱(又称为全光谱,涵盖紫外、可见光和近红外波段)像增强器加装紫外窄带滤光片的方式对紫外波段的自由基自发光进行成像。使用最多的是 S20 光电阴极的二代像增强器[52-53]。

②紫外波段自由基的自发光较微弱,加装紫外窄带滤光片后能量更低,因此,需要紫外像增强器具有 10^5 甚至 10^6 的电子增益,如此高的电子增益主要通过两级像增强器或双 MCP 的形式获得;

③由于紫外波段自由基的微弱自发光随燃烧进程而快速变化,因此,需要紫外像增强器具有 ns 量级的门宽,结合高速相机进行高速成像或结合普通相机进行瞬态成像。

近年来,爆震发动机[54-55]凭借高体积效率、高推力密度和紧凑结构优势,成为世界强国抢战科技制高点的大国重器,其中的旋转爆震发动机(rotating detonation engine, RDE)发展最为迅速,其采用同轴

环形结构爆震室,一端封闭用于注入燃料,起爆后爆震波垂直于燃料注入方向,沿径向连续旋转传播,最终爆震产物与未燃混合物一起从排气端高速甩出产生推力,等效频率(1s 旋转圈数)最高可达 50kHz,如图 16[55]所示。RDE 通过超声速行进的爆震波迅速燃烧燃料,在小体积、极短时间内产生大量动能,接近等容燃烧过程,一次起爆便可产生连续爆震燃烧,因此也被称为连续爆震发动机。

旋转爆震发动机工作条件复杂,流动与燃烧高度耦合,尤其对于采用多级旋流器的燃烧室头部结构,流动结构及特征更加复杂,湍流强度高,释热强度大,燃烧流场组织技术更加严苛。旋转爆震波的等效频率最高达 50kHz,相应的周期仅为 $20\mu\text{s}$,爆震波传播速度则超过 1800 m/s。因此,旋转爆震发动机等新型发动机对极端条件高瞬态燃烧诊断提出要求:

①从系统角度而言,需要使用多台紫外像增强器建立多台联动的测量系统完整捕获一个爆震周期内的自由基紫外自发光;

②对于紫外像增强器而言,迫切需要突破传统真空成像器件的空间分辨力限制,进一步提高紫外图像的空间分辨力,更精细地呈现燃烧流场结构。另外,也需要从根源上提升紫外像增强器的灵敏度,围绕自由基紫外自发光峰值波长,优化光电阴极在该波段的量子效率。

表1 国际主流高性能紫外像增强的主要性能指标^[52-53]

Table 1 Key performance of mainstream high-performance UV image intensification globally^[52-53]

Image intensifier or ICCD/ICMOS	Intensifier parameters				
	MCP	Spectral range/nm	Gain	Size/mm	Minimum optical gate width /ns
EyeiTS-D	2-stage MCP	200-900	$>10^6$	18	3
HiCAM5000 3n	2-stage MCP	200-900	-	18	3
Photek ICMOS 160	muti-MCP	200-900	2×10^6	18/25	3
Andor iStar sCMOS	-	180-850	1000	18	2
Invisible vision UVi	-	200-600	3×10^5	18/25	5
Specialised-imaging SIL3	-	200-900	5×10^5	25/40	50
Lavision HS-IRO	2-stage MCP	190-800	-	25	10
Princeton PI-MAX 4	-	140-900	-	18/25	2

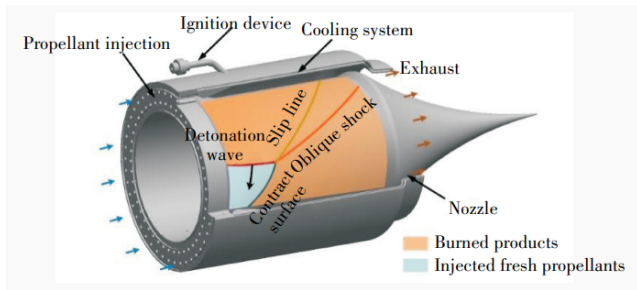


图16 旋转爆震发动机 RDE 工作原理^[55]

Fig.16 Working principle of rotary detonation engine RDE^[55]

4 总结

紫外像增强器耦合 CCD/CMOS 成像器件, 可将航空发动机燃烧中快速变化的微弱紫外信号转换为可见光图像, 实现 OH*、NH*、NO* 等自由基的可视化, 在航空发动机燃烧的无干扰紫外诊断、获取燃烧的火焰锋面传播速度、反应区结构、燃烧组分分布、热释率等重要信息研究中发挥重要作用, 为燃烧机理研究、发动机设计、燃烧策略优化及污染物排放降低提供依据。旋转爆震燃烧发动机等新型发动机的发展, 对紫外像增强器提出高时空分辨力和高灵敏度的要求。未来, 可围绕自由基紫外自发光峰值波长优化光电阴极的量子效率, 开发新型高增益 MCP, 以及在系统层面开发多台紫外像增强器联动的测量系统。

参考文献:

[1] 张猛蛟, 蔡毅, 江峰, 等. 紫外增强硅基成像探测器进展[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 19-37.
ZHANG Mengjiao, CAI Yi, JIANG Feng, et al. Silicon-based ultraviolet photodetection: progress and prospects[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 19-37.

[2] Gaydon A G, Wolfhard H G. *Flames, Their Structure, Radiation and Temperature*[M]. London: Chapman & Hall, 1960.

[3] Gutman David. Shock-tube study of the recombination rate of hydrogen atoms with oxygen molecules[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1967, 47(11): 4400-4407.

[4] Pietzka G. *The Spectroscopy of Flames*[M]. London: Chapman & Hall, 1974.

[5] Panoutsos C S, Hardalupas Y, Taylor A. Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* and CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(2): 273-291.

[6] ZHU H, GONG Y, HE L, et al. Effects of CO and H₂ addition on OH* chemiluminescence characteristics in laminar rich inverse diffusion flames[J]. *Fuel*, 2019, 254: 115554.

[7] YANG J, GONG Y, WEI J, et al. Chemiluminescence diagnosis of oxygen/fuel ratio in fuel-rich jet diffusion flames[J]. *Fuel Processing Technology*, 2022, 232: 107284.

[8] Lauer M, Zellhuber M, Sattelmayer T, et al. Determination of the heat release distribution in turbulent flames by a model based correction of OH* chemiluminescence[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(12): 121501.

[9] Kim T Y, Choi S, Kim H K, et al. Combustion properties of gaseous CH₄/O₂ coaxial jet flames in a single-element combustor[J]. *Fuel*, 2016, 184: 28-35.

[10] HE L, GUO Q, GONG Y, et al. Investigation of OH* chemiluminescence and heat release in laminar methane-oxygen co-flow diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 201: 12-22.

[11] Kojima J, Ikeda Y, Nakajima T. Basic aspects of OH (A), CH (A), and C₂ (d) chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 140(1-2): 34-45.

[12] NI S, ZHAO D, YOU Y, et al. NO_x emission and energy conversion efficiency studies on ammonia-powered micro-combustor with ring-shaped ribs in fuel-rich combustion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320: 128901.

- [13] Docquier N, Sébastien Candel. Combustion control and sensors: a review[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, **28**(2): 107-150.
- [14] WANG T, WANG Z, TAN J, et al. Combustion characteristics of a confined turbulent jet flame[J]. *Fuel*, 2022, **323**: 124228.
- [15] Weber V, Bruebach J, Gordon R L, et al. Pixel-based characterization of CMOS high-speed camera systems[J]. *Applied Physics B*, 2011, **103**(2): 421-433.
- [16] ZHANG Z, YANG A, WANG J, et al. OH planar laser-induced fluorescence imaging system using a kilohertz-rate 283 nm UV Ti laser[J]. *Applied Optics*, 2023, **62**(8): 1915-1920.
- [17] 王于蓝, 范雄杰, 高伟, 等. 航空发动机燃烧室光学可视模型试验件及其流场测量研究进展[J]. *实验流体力学*, 2021, **35**(1): 18-33.
WANG Yulan, FAN Xiongjie, GAO Wei, et al. Development of optically accessible gas turbine model combustor and its flow field testing[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, **35**(1): 18-33.
- [18] Gerke U, Steurs K, Rebecchi P, et al. Derivation of burning velocities of premixed hydrogen/air flames at engine-relevant conditions using a single-cylinder compression machine with optical access[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, **35**(6): 2566-2577.
- [19] Handland Imaging. LaVision HighSpeed IRO X Image Intensifier [EB/OL]. [2024-10-15]. <https://hadlandimaging.com/lavision-highspeed-iro-x-image-intensifier/>.
- [20] Ferris M, Susa J, Davidson F, et al. High-temperature laminar flame speed measurements in a shock tube[J]. *Combustion and Flame*, 2019, **205**: 241-252.
- [21] Pugh D, Runyon J, Bowen P, et al. An investigation of ammonia primary flame combustor concepts for emissions reduction with OH*, NH₂* and NH* chemiluminescence at elevated conditions[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, **38**(4): 6451-6459.
- [22] LI X, DONG J, JIN K, et al. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in a channel with continuous triangular obstacles: effect of equivalence ratio[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, **167**: 576-591.
- [23] Ishino Y, Ohiwa N. Three-dimensional computerized tomographic reconstruction of instantaneous distribution of chemiluminescence of a turbulent premixed flame[J]. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 2005, **48**(1): 34-40.
- [24] Unterberger A, Röder M, Giese A, et al. 3D instantaneous reconstruction of turbulent industrial flames using computed tomography of chemiluminescence (CTC)[J]. *Journal of Combustion*, 2018, **2018**(1): 5373829.
- [25] JIN Y, SONG Y, WANG W, et al. An improved calculation model of weight coefficient for three-dimensional flame chemiluminescence tomography based on lens imaging theory[C]//*Real-Time Photonic Measurements, Data Management, and Processing II of SPIE*, 2016, **10026**: 139-147.
- [26] JIN Y, SONG Y, QU X, et al. Three-dimensional dynamic measurements of CH* and C₂* concentrations in flame using simultaneous chemiluminescence tomography[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(5): 4640-4654.
- [27] Upton T, Verhoeven D, Hudgins D, et al. High-resolution computed tomography of a turbulent reacting flow[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, **50**: 125-134.
- [28] CAI W, LI X, LI F, et al. Numerical and experimental validation of a three-dimensional combustion diagnostic based on tomographic chemiluminescence[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(6): 7050-7064.
- [29] CAI W, Kaminski C. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, **59**: 1-31.
- [30] Anikin N, Suntz R, Bockhorn H. Tomographic reconstruction of the OH*-chemiluminescence distribution in premixed and diffusion flames[J]. *Applied Physics B*, 2010, **100**: 675-694.
- [31] Anikin N B, Suntz R, Bockhorn H. Tomographic reconstruction of 2D-OH*-chemiluminescence distributions in turbulent diffusion flames[J]. *Applied Physics B*, 2012, **107**: 591-602.
- [32] Worth N A, Dawson J R. Tomographic reconstruction of OH* chemiluminescence in two interacting turbulent flames[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(2): 024013.
- [33] LV L, TAN J, HU Y. Numerical and experimental investigation of computed tomography of chemiluminescence for hydrogen-air premixed laminar flames[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, **2016**(1): 6938145.
- [34] Häber T, Suntz R, Bockhorn H. Two-dimensional tomographic simultaneous multispecies visualization—Part II: Reconstruction accuracy[J]. *Energies*, 2020, **13**(9): 2368.
- [35] LIU H, YU T, ZHANG M, et al. Demonstration of 3D computed tomography of chemiluminescence with a restricted field of view[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(25): 7107-7115.
- [36] WANG Q, YU T, LIU H, et al. Optimization of camera arrangement for volumetric tomography with constrained optical access[J]. *JOSA B*, 2020, **37**(4): 1231-1239.
- [37] Hughes K J, Pourkashanian M, Wilson C W. OH concentration measurements in a jet engine exhaust[J]. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2007, **8**(4): 305-320.
- [38] 杨仕润, 赵建荣, 俞刚, 等. 超音速燃烧室氢氧基平面激光诱导荧光测量[J]. *激光技术*, 2004, **28**(1): 20-22.
YANG Shirun, ZHAO Jianrong, YU Gong, et al. Planar laser-induced fluorescence imaging of OH radical in supersonic combustor[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1): 20-22.

- [39] 王宁. 定量测量OH基浓度的PLIF技术研究及应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
WANG Ning. Quantitative OH-PLIF Technology Research and Application[D]. Changsha: National University of Defense, 2009.
- [40] 李麦亮, 周进, 耿辉, 等. 测量火焰中氢氧基分布的激光诱导荧光技术[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 10-13.
LI Mailiang, ZHOU Jin, GENG Hui, et al. Laser induced fluorescence technology for measurements of OH distribution in flames[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2003, 25(3): 10-13.
- [41] 耿辉, 翟振辰, 桑艳, 等. 利用OH-PLIF技术显示超声速燃烧的火焰结构[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(2): 1-6.
GENG Hui, ZHAI Zhenchen, SANG Yan, et al. Reveal the flame structure of supersonic combustion using OH-PLIF technology[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(2): 1-6.
- [42] 李麦亮, 周进, 耿辉, 等. 平面激光诱导荧光技术在超声速燃烧中的应用[J]. 推进技术, 2004, 25(4): 381.
LI Mailiang, ZHOU Jin, GENG Hui, et al. Application of PLIF in research on supersonic combustion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(4): 381.
- [43] Ben Yakar A, Kamel M, Morris C, et al. Hypersonic combustion and mixing studies using simultaneous OH-PLIF and schlieren imaging[C]//36th AIAA Aerospace Sciences Meeting And Exhibit, 1998: 940.
- [44] Ben Yakar A, Hanson R. Hypervelocity combustion studies using simultaneous OH-PLIF and schlieren imaging in an expansion tube[C]//35th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999: 2453.
- [45] Morris C, Kamel M, Ben Yakar A, et al. Combined schlieren and OH PLIF imaging study of ram accelerator flowfields[C]//36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1998: 244.
- [46] 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.
- [47] Paschal T, Parajuli P, Turner M A, et al. High-speed OH* and CH* chemiluminescence imaging and OH planar laser-induced fluorescence (PLIF) in spherically expanding flames[C]//AIAA Scitech 2019 Forum, 2019: 574.
- [48] Smith J D, Sick V. High-speed fuel tracer fluorescence and OH radical chemiluminescence imaging in a spark-ignition direct-injection engine[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6682-6691.
- [49] LI Z S, LI B, SUN Z W, et al. Turbulence and combustion interaction: High resolution local flame front structure visualization using simultaneous single-shot PLIF imaging of CH, OH, and CH₂O in a piloted premixed jet flame[J]. *Combustion & Flame*, 2010, 157(6): 1087-1096.
- [50] 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.
- [51] Litvinov I, Yoon J, Noren C, et al. Time-resolved study of mixing and reaction in an aero-engine model combustor at increased pressure[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 231: 111474.
- [52] 李晓峰, 何雁彬, 常乐, 等. 超二代与三代像增强器性能的比较研究[J]. 红外技术, 2022, 44(8): 14.
LI Xiaofeng, HE Yanbin, CHANG Le, et al. Performance comparison between super second generation and third generation image intensifiers[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(8): 14.
- [53] 潘京生. 像增强器的迭代性能及其评价标准[J]. 红外技术, 2020, 42(6): 509-518.
PAN Jingsheng. Image intensifier upgraded performance and evaluation standard[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(6): 509-518.
- [54] 王兵, 谢峤峰, 闻浩诚, 等. 爆震发动机研究进展[J]. 推进技术, 2021, 42(4): 721.
WANG Bing, XIE Qiaofeng, WEN Haocheng, et al. Research progress of detonation engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(4): 721.
- [55] 芮长胜, 武郁文, 王晓东, 等. 旋转爆震燃烧航空涡轮发动机研究综述[J]. 航空发动机, 2023, 49(2): 1-12.
RUI Changsheng, WU Yuwen, WANG Xiaodong, et al. Review of research on rotating detonation turbine engine[J]. *Aeroengine*, 2023, 49(2): 1-12.