单激光单相机双色 PLIF 测量火焰温度场

刘训臣1 王雅瑶2 王 震2 王绍杰2

(1. 山东科技大学机械电子工程学院,青岛 266590;2. 上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240)

摘 要 平面激光诱导荧光是一种重要的湍流火焰成像方法,但火焰中的双色 PLIF 测温技术实验复杂,进行高帧频成像所需 的高能量高重频紫外激光还比较难以产生,常用的双色 OH-PLIF 方法也只能测量火焰面后的高温区。本文发展了一种 355 nm 双色甲醛-PLIF 测温方法,可以测量火焰面前的火焰低温区。本方法直接采用固体激光的三倍频输出,有较高能量。采用波长 切换的高重频脉冲串激光进行了单激光单相机的双色 PLIF 测温,简化了传统方法。在层流扩散火焰、湍流射流火焰和两种不 同喷嘴的热氛围交叉射流火焰中进行了高重频温度场测量。

关键词 湍流火焰温度场,脉冲串激光,甲醛平面激光诱导荧光 中图分类号: V211.7; V231.2+2 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2024)12-3936-08

Two-color PLIF Flame Thermometry Using a Single Laser and a Single Camera

LIU Xunchen¹ WANG Yayao² WANG Zhen² WANG Shaojie²

College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
 Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Planar laser induced fluorescence (PLIF) is an important combustion diagnostic technique. Development of high repetition rate PLIF diagnostic in flames is limited by the lack of high energy high repetition rate ultraviolet laser source. Limitation of two color PLIF thermometry in flames includes two parallel setup and calibration of two laser/cameras. Widely used two line OH-PLIF thermometry is limited to the high temperature post flame front area. Here, we developed a practical two-color formaldehyde-PLIF thermometry scheme that can probe the low temperature pre-flame front area and directly use the high energy 3rd harmonic output of Nd:YAG laser at 355 nm. A high repetition rate wavelength switching burst mode laser and a single camera were used to measure combustion temperature field of a laminar diffusion flame, a turbulent jet flame and a jet in hot crossflow model combustor.

Key words turbulent flame temperature field; burst mode laser; CH₂O PLIF

0 前 言

高温放热是燃烧流场的最显著特征,温度对燃烧反应速率和火焰流场有显著的影响,并直接决定 了发动机的热效率和污染物排放。火焰中原位温度 场测量是燃烧诊断研究的重要任务,但获得高时空 分辨率的火焰温度场数据仍非常困难。常用的激光 测温方法包括 Rayleigh-Brillouin 散射、线积分测 量的激光吸收光谱、平面激光诱导荧光 (PLIF)和 单点测量的相干反斯托克斯拉曼光谱方法。

其中紫外 PLIF 可以对湍流燃烧中含有反应中 间体的火焰面进行成像,并可以采用双波长激发的 PLIF 方法测量湍流燃烧温度场^[1]。常用的羟基平 面激光诱导荧光 (OH-PLIF) 方法可以测量火焰面 后的高温区,多采用染料激光器,单脉冲能量约为 10~20 mJ,成像频率为 10~20 Hz^[2,3]。但研究燃 烧不稳定性、火焰传播和点熄火等燃烧动态问题时, 需要采用高重频的激光诊断成像方法^[4,5]。例如采 用高重频脉冲串激光泵浦光学参量放大器的方法可 以在此波段得到重频 10 kHz,单脉冲能量 5 mJ 的 激光脉冲进行高频动态的火焰温度场测量^[6]。

由于火焰低温区的 OH 自由基含量很低,通过 OH-PLIF 测温得到的温度场在低温区误差较大^[7]。 本文提出一种直接采用 Nd:YAG 激光三倍频输出

收稿日期: 2023-12-13;修订日期: 2024-11-21

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52076137, No.91941301); 上海市自然科学基金 (No.21ZR1431300); 激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (No.SKLLIM2019-10)

作者简介: 刘训臣 (1983-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光燃烧诊断研究 liuxunchen@sdust.edu.cn。

的双色甲醛 (CH₂O)PLIF 测温方法。甲醛是碳氢燃 料燃烧反应中普遍存在的反应中间体,其反应路径 主要为 CH₃→CH₂O→CHO→CO→CO₂,主要存在 于火焰面放热反应之前。同时,含氧燃料热解产生 的甲醛中间体也存在于火焰低温区。因此,通过甲 醛中间体测温可以补充 OH-PLIF 无法测量的火焰 面前低温区温度场。本方法直接采用固体激光的三 倍频输出,无需进行波长转化,有较高的脉冲能量。 本文采用波长快速切换的高重频脉冲串激光和高频 CMOS 相机实现了单激光单相机的双色 PLIF 测 温,并在层流和湍流火焰中进行了二维温度场测量 验证。

1 实验方法

1.1 甲醛分子在 355 nm 附近的光谱

甲醛分子是典型的 C2v 结构的不对称陀螺多 原子分子,其电子激发态 (A¹A₂) 有非平面的几何结 构,与电子基态之间的 A¹A₂-X¹A₁ 跃迁在 250 nm 至 350 nm 波段, 包含分子平面外的弯曲 (v4) 和羰 基的伸缩 (v2) 振动跃迁。其中 355 nm 附近 v4 振 动态的 b-type ¹40 跃迁带与 Nd:YAG 激光的三倍 频输出重叠,比较容易获得高能量的激光脉冲,同 时受其他组分干扰较少,也避免了甲醛分子的光解 离通道,是最实用的 PLIF 激发方案。图 1(a) 是采 用种子注入的窄线宽 NdYAG 激光的三倍频输出, 在平面预混二甲醚 (DME)/空气火焰中得到的高分 辨率甲醛 LIF 激发谱^[8];图 1(b) 为采用相同方法 测量的室温甲醛和在 CH₄/Air 与 DME/Air 火焰 中高温甲醛中间体的 LIF 激发谱 ^[9]。观察可见这 一波段的甲醛 LIF 光谱有分离的转动光谱特征,并 且高温和室温甲醛分子的 LIF 激发谱有明显的谱 线强度变化, 启发我们可以通过测量这些谱线间的 相对强度,得到甲醛分子振动转动能级布局数的变 化,发展双线 PLIF 测温方法。

虽然直接采用 355 nm 激光测甲醛 PLIF 的方 法应用广泛,但还缺乏对这一波段详细的分子光谱 研究和指认。图 2 为通过高分辨傅里叶变化光谱 仪测量的常温吸收截面 ^[10]。我们用文献中分子光 谱数据对此波段高分辨光谱进行了仿真,下能级采 用了通过纯转动光谱和振动转动光谱确定的分子基 态光谱常数 ^[11],上能级采用了高分辨紫外光谱得 到的激发态数据 ^[12]。光谱仿真可以对室温吸收光 谱有较好的复现,谱线可以得到精确的指认,但在 几个高 J 跃迁处的弱吸收线强度与实验值略有不 同,这可能是由于不同振动激发态之间的微扰产生 的。最重要的 355 nm 处也存在弱谱线难以仿真的 情况。未来通过对甲醛分子高分辨紫外光谱的进一步研究,可以厘清这些微扰,进一步提高双线测温 方法的精度。



图 1 窄线宽固体激光三倍频扫描火焰中甲醛荧光谱^[8,9] Fig. 1 Scanned fluorescence spectra of formaldehyde intermediate in flames using narrow linewidth Nd:YAG lasers^[8,9]





图 3 中给出了 355 nm 附近几个较强吸收峰的 指认。主要有三个吸收峰: P12 和 P13 两个吸收峰, 下能级属于 J=8、J=12 和 J=13,因此吸收强度在 火焰燃烧温度范围内变化较小,与文献中对这两个峰 的 LIF 激发谱测量吻合^[8,9],可见这两个波长适合 单波长的甲醛 PLIF 测量,荧光强度受火焰温度影响 较小;而 P24 吸收峰的下能级属于 J=24,属于高 J 跃迁,线强在室温光谱中很弱^[10],而在高温时明 显受到温度变化的影响,适合用于双线 PLIF 测温。



Fig. 3 Simulation and assignment of formaldehyde peaks

图 4 为不同温度下此波段的吸收光谱仿真,可 见不同温度下 355 nm 附近几个吸收峰的相对强度 变化较大,可以作为 PLIF 测温的目标。但在 PLIF 测量中,信号强度也与激发态过程相关。甲醛是四 原子分子,内能级密度大,我们可以假设对于选择的 P13/P24 这对吸收峰其对应的上能级动力学过程与 能级弛豫速率相差不大的,对 LIF 激发谱的相对强 度影响很小,因此可以用吸收光谱的相对强度估算荧 光信号的相对强度。但这个假设需要通过实验标定温 度已知的层流火焰 (见 2.1 节)确定不同吸收峰的荧 光谱强度,研究其用于双线 PLIF 测温的性质。



Fig. 4 Simulation of formaldehyde absorption cross section at different temperature

1.2 脉冲串激光单相机双线 PLIF 测量方法

本实验采用的实验设备如图 5。脉冲串激光采 用主振荡器功率放大器结构,采用两个 1064 nm 半 导体激光作为种子源,两个种子激光的输出通过声 光调制器进行调制,产生时间差间隔为 2.2 µs 的 20 kHz 脉冲对序列。两路种子激光通过光纤耦合器合 为一路并注入高能高频放大器 (Spectral Energies, Quasimodo 1000)进一步放大,倍频产生时间长度 为 0.01 s 的高能量高重频的 355 nm 脉冲串激光。 倍频后的激光波长由高精度波长计测量。在层流火 焰标定实验中,通过两个激光控制器控制半导体种 子激光的温度和电流,改变种子激光的波长,从而得 到图 6 中种子激光的调制特性曲线,在 355 nm 波 段附近对稳定的层流火焰 PLIF 信号进行扫描。在 双线 PLIF 实验中,分别将每个脉冲对中的两个激 光脉冲的波长调至 28183.5 cm⁻¹ 和 28184.3 cm⁻¹。



脉冲串的总能量通过热电堆激光功率记测量,在 所选波长处约为 20 J,脉冲串包含重复频率为 20 kHz 的 200 对脉冲,对应的单脉冲能量约为 50 mJ。 通过带滤波片的光电二极管监测每一个激光脉冲的 光强。脉冲串激光的光强信号由示波器记录,图 7(a) 为一个脉冲串中的典型光强信号。图 7(b) 是通过扫 描种子激光波长得到的脉冲串激光的增益曲线,用于 对所拍摄的 PLIF 信号进行光强归一化处理。

激光经过 3 个倍频选择镜片反射至火焰待测量 区域,通过扩散片将光强的空间分布进行均一化,并 两个柱面镜形成片光。紫外激发产生的平面激光诱 导荧光信号通过像增强器和高速 CMOS 相机拍摄。 甲醛分子在 355 nm 激发后的荧光主要在 400~450 nm 波段,通过这一波段的甲醛滤波片去除环境中 杂散光的干扰,通过可见光镜头进行拍摄。像增强 器工作频率为 20 kHz,快门与激光脉冲串中的每对 激光脉冲同步;高速相机工作频率为 40 kHz,采用 跨帧模式对经过光强放大后的平面荧光信号分别进 行成像。成像像素为 512×1024,空间标定后得到像 素空间分辨率约为 200 µm,在脉冲对成像的 2.2 µs 时间间隔内,对流速为 1~100 m/s 的亚音速燃烧 场移动不超过 2 µm,可以认为成像分子所在的火 焰温度场没有变化。常规的双线 PLIF 测温需要对 两个相机的响应进行矫正,还需要对两个像增强器 的成像不均匀性进行白场校正。但采用单相机测量 方法无需以上复杂步骤,我们发现在 2.2 µs 的像增 强器快门内成像系统的响应也是均匀的。常规双线 PLIF 测量还需对激光片光强度进行矫正,但我们 发现在高频脉冲串激光器产生的间隔 2.2 µs 的两个 激光脉冲光强分布变化很小。因此采用单激光单相 机双线 PLIF 测温方法可以大大简化测量光路,在 空间有限的实际工程台架测量时非常简单实用,可 以将拍摄的 PLIF 原始信号求比例,就可以计算火 焰温度场。



1.3 所测量火焰

采用二甲醚 (DME) 作为燃料,在层流同轴扩散火焰 (coflow) 中通过波长扫描方法和双线 PLIF 方法测量了 355 nm 附近的甲醛分子的激光诱导荧 光信号。同轴扩散火焰炉与标准 ISF 火焰炉相同, 出口直径为 10 mm, 伴流气直径 86 mm^[13]。所测 量工况如表 1。湍流射流火焰为敞开环境,燃烧器 结构类似于 DLR 射流燃烧器 (DLR jet),管口内径 8 mm,伴流气直径 500 mm。DME 和氮气的体积 分数均为 50%,射流雷诺数约为 3×10⁴。



图 7 脉冲串激光光强测量: (a) 典型脉冲串信号; (b) 扫描得到的种子激光波长和脉冲串能量

Fig. 7 Measurement of burst mode laser energy: (a) a typical burst train; (b) scanned burst mode laser wavelength and energy

表 1 实验测量的层流火焰工况

 Table 1 Experimental conditions of coflow
 diffusion flame

Cases	压力/	氮气流	二甲醚流	体积稀	燃料流速/	伴流流速/
	MPa	量/(mg/s)	量/(mg/s)	释比/%	$(\mathrm{cm/s})$	$(\mathrm{cm/s})$
CF1	0.1	1.71	5.24	65		
$\rm CF2$	0.1	2.46	4.04	50	5.5	83
CF3	0.1	3.44	2.43	30		

为进一步验证单激光单相机双色 PLIF 方法的 模型燃烧室测温表现,我们对以燃料轴向分级燃烧 为背景的热氛围交叉射流火焰 (jet in hot crossflow) 进行了温度场测量。在燃料轴向分级燃烧中,二级 火焰的抬升可以促进二次燃料和主燃室高温烟气的 混合,在热点火燃烧过程中避免产生局部热点,有 利于充分发挥分级燃烧的减排优势。抬升火焰的近 场结构对火焰稳定机制非常重要,甲醛双色 PLIF 测温方法可以很好地捕捉抬升段火焰的低温区温度 场。本文所设计加工的交叉射流模型燃烧室分为主 燃室和交叉射流燃烧室两部分^[15]。主燃室内的贫 燃平面燃烧器产生热氛围横流,由收缩段整流后进 入二级燃烧室;二次燃烧室横截面为 40 mm×115 mm,通过石英视窗进行测量。主入口温度为 1600 K,入口速度为 10 m/s,二次射流温度 300 K,速 度 50 m/s。本文比较了两种喷嘴对抬升段火焰温度 场的影响,分别为垂直于主流的 2 mm 圆形喷嘴和 向下游倾斜 30°的 3 mm×1 mm 扁喷嘴两种情况, 出口都与壁面齐平。

2 结果与讨论

2.1 层流火焰测温验证

图 8 为同轴扩散火焰 (CF1-CF3) 的可见光拍 照和典型 PLIF 测量结果。甲醛 PLIF 信号主要出 现在出口处的燃料热解低温区。同时在燃料含量较 高的 CF2 和 CF3 中可以拍摄到明显的 PAH 和 soot 产生的 PLIF 和 LII 信号。以干扰较少的 CF1 为例,通过扫描种子激光波长进行 PLIF 测量,即 可得到成像平面内火焰中不同位置甲醛分子的 LIF 激发光谱。经过光强校正后的火焰中轴线上不同高 度位置的 LIF 激发谱如图 9, 与图 3 和图 4 中的吸 收谱仿真有较好的对应关系。





图 9 所测量的光谱强度反映了火焰温度,通过比 较两个特征峰位置的 PLIF 信号的相对强度即可得 到火焰的温度场。图 10(a) 为 28283.5 cm⁻¹ (P13) 和 28184.5 cm⁻¹ (P24) 两个不同位置的同轴扩散火焰 PLIF 图像比值。可见高温吸收峰与低温吸收峰的比 值很好地反映了火焰的温度场,可以用于双线 PLIF 测温。图 10(b) 为对此层流火焰温度场的 CFD 仿真 ^[14],可以确认实验测量区域对应火焰的燃料热解低 温区,温度最高可达 1400 K 左右。图 10(c) 比较了 实验和仿真得到的 PLIF 比值和 CFD 温度场关系, 可见通过荧光强度比值与火焰温度的单值函数关系, 即可用于双线 PLIF 测温的标定。







图 10 层流火焰的双线 PLIF 温度场标定: (a) P13/P24 PLIF 信号强度比; (b) CFD 仿真温度场; (c) 实验和仿真得到的 PLIF 比值和 CFD 温度场关系

Fig. 10 Laminar flame calibration of two-line PLIF thermometry technique: (a) P13/P24 PLIF intensity ratio from measurement; (b) CFD simulation of temperature field; (c) Measured and simulation of PLIF ratio temperature relation

2.2 湍流火焰测量结果

非预混的湍流射流 DME 火焰结构类似于 DLR 火焰,火焰吹脱高度约为 400 mm。采用双 线 PLIF 方法对火焰根部的点火核产生区域进行测 温。图 11 为典型的双线 PLIF 测温数据。图 11(a) 和图 11(b) 为采用单相机间隔 2.2 μs 曝光测得的 PLIF 原始信号,分别对应甲醛分子的 P13 和 P24 激发。PLIF 信号为典型的点火核结构。P3 激发的 PLIF 信号较强,但 P24 激发的 PLIF 信号属于高 温激发,分布在火核的高温区。图 11(c) 为取一切线 比较两组数据,可见其比值的空间分布反映了火核 的温度分布,但噪音较大,噪音来源主要是 PLIF 成 像所用高速像增强器的像素噪音。对原始图像进行 3×3 高斯滤波后求比例,即可得到火焰温度场,反映 了 DME 非预混射流火焰的点火核中热解产生甲醛 的温度场结构。如图 11(d) 所示,测量结果明显地展示了火核向下游传播时火核内部热解产生的甲醛温度约为 500 K 左右,而边缘温度约为 1000 K 左右。 点火后高温处甲醛体积分数迅速减少,PLIF 信号 消失。

图 12 展示了 20 kHz 帧频的动态温度场测量数



图 11 单相机高重频双线 PLIF 湍流射流火焰测温: (a)、(b) P13/P24 PLIF 数据; (c) 比值示意图; (d) 求得火焰低温区温度场 Fig. 11 Single camera high repetition rate two line PLIF thermometry of a jet flame: (a), (b) PLIF image of P13/P24 line; (c) PLIF ratio image; (d) 2D temperature field



Fig. 12 Time resolved 2D temperature field measurement of DME jet flame measured at 20 kHz



图 13 喷嘴对交叉射流火焰低温区温度场的影响: (a) 圆形喷嘴瞬态温度场; (b) 斜喷嘴瞬态温度场; (c) 圆形喷嘴平均温度场; (d) 斜喷 嘴平均温度场

Fig. 13 Influence of nozzle geometry on lift-off jet in hot crossflow: (a) Instantaneous temperature field of round nozzle; (b) oblique nozzle; (c) Average temperature field of round nozzle; (d) oblique nozzle

据,反映了火焰面在向下游发展过程中火核低温区 的演化过程。双线 PLIF 测量数据可以清晰地观 察到火核中燃料热解产生的甲醛在逐渐向火焰面发 展过程中温度逐渐升高到消失的过程。二维测量的 PLIF 温度场是火核低温区在运动过程中的切面。前 人的 10Hz 低频测量数据无法区分平面内的火焰发 展或者离开二维测量平面的过程。对这一类射流火 焰的测量结果,一般认为多数情况为平面内发展。 本文得到的高重频测温结果可以观察到火核在二维 平面内的发展,例如 4.6 ms 至 5.0 ms 的数据是典 型的小火核的脱落和消失过程,进一步验证了前人 假设基本可靠^[16]。

图 13(a)、(b) 给出了交叉射流燃烧室内在 1600 K 来流条件下,二次燃料射流产生抬升火焰的瞬态 温度场。可以清楚地观察到抬升段温度场沿交叉射 流的轨迹逐渐升高,在与主流混合过程中形成明显 的剪切层涡。甲醛 PLIF 信号在下游涡边缘达到所 测量的最高温并消失于火焰面前。两种喷嘴出口速 度接近,但倾斜角度导致动量通量比不同,喷嘴几何 结构导致回流区结构不同。图 13(c)、(d) 给出了一 个脉冲串内平均的温度场,可以比较在相同工况下不 同喷嘴对抬升段温度场的影响。观察到正圆喷嘴的剪 切层涡结构较明显,高温区主要位于迎风侧;而扁形 斜喷嘴的剪切层混合较弱,可见点火前混合较差,更 容易出现局部热点,在背风侧也出现高温区,可以考 虑通过双喷嘴设计对燃烧室壁面进行保护^[15]。

图 14 给出了来流温度降低到 1400 K 时的 DME 低温热解区温度场,体现出了低温区火核的 发展过程和温度场变化,进一步验证本方法可以有 效地测量火焰低温区温度场。





3 总结与展望

本文报道了直接采用 Nd:YAG 激光三倍频的 双线 PLIF 火焰温度场测量方法。通过对 355 nm 附 近甲醛中间体的光谱指认与模拟,选取了双线 PLIF 测温波长,通过层流火焰温度场测量进行了验证。

基于高能脉冲串激光,采用种子激光波长切换 方法,进行了单激光单相机的双线 PLIF 二维测温, 成功实现了湍流射流火焰和热氛围交叉射流模型燃 烧室的 20 kHz 帧频温度场成像,方法可靠,简单 实用。

本文报道的种子激光切换的 MOPA 结构激光 器也可以用于其他多波长切换的激光成像方法。波 长快速切换的 355 nm 激光做为泵浦源结合光学参 量放大器或者染料激光器,即可在其有效增益的区 间内产生双色切换的可见波段激光用于双线 CARS 成像,或倍频合频到紫外波段进行其他组分的单相 机高重频双线 PLIF 或 PLIF/LII 同步测量等多波 长切换成像方法。

参考文献

- Kostka S, Roy S, Lakusta P J, Meyer T R, Renfro M W, Gord J R, Branam R. Comparison of Line-peak and Line-scanning Excitation in Two-color Laser-inducedfluorescence Thermometry of OH [J]. Applied Optics, 2009, 48(32): 6332
- [2] Dulin V, Sharaborin D, Tolstoguzov R, Lobasov A, Chikishev L, Markovich D, Wang S, Fu C, Liu X, Li Y, Gao Y. Assessment of Single-shot Temperature Measurements by Thermally-assisted OH PLIF using Excitation in the A2Σ+-X2Π (1-0) Band [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(1): 1877-1883
- [3] Grib S W, Fugger C A, Hsu P S, Jiang N, Roy S, Schumaker S A. Two-dimensional Temperature in a Detonation Channel using Two-color OH Planar Laser-induced Fluorescence Thermometry [J]. Combustion and Flame, 2021, 228: 259–276
- [4] Roy S, Jiang N, Hsu P S, Stauffer H U. 4D Imaging of Fast Flow Dynamics: From Challenging Dream to Reality
 [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2121(1): 020002
- [5] Slipchenko M N, Meyer T R, Roy S. Advances in Burstmode Laser Diagnostics for Reacting and Nonreacting Flows [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(1): 1533–1560

- [6] Hsu P S, Jiang N, Lauriola D, Grib S W, Schumaker S A, Caswell A W, Roy S. Optical Society of America, 2021.
 10 kHz 2D Thermometry in Turbulent Reacting Flows Using Two-color OH Planar Laser-induced Fluorescence [J]. Applied Optics, 2021, 60(15): C1–C7
- [7] Chrystie R S M, Burns I S, Kaminski C F. Temperature Response of an Acoustically Forced Turbulent Lean Premixed Flame: A Quantitative Experimental Determination [J]. Combustion Science and Technology, 2013, 185(1): 180–199
- [8] Brackmann C, Li Z, Rupinski M, Docquier N, Pengloan G, Aldén M. Strategies for Formaldehyde Detection in Flames and Engines Using a Single-Mode Nd: YAG/OPO Laser System [J]. Applied Spectroscopy, 2005, 59(6): 763–768
- [9] Gabet K N, Sutton J A. Narrowband Versus Broadband Excitation for CH2O PLIF Imaging in Flames Using a Frequency-Tripled Nd: YAG Laser [J]. Experiments in Fluids, 2014, 55(7): 1–11
- [10] Co D T, Hanisco T F, Anderson J G, Keutsch F N. Rotationally Resolved Absorption Cross Sections of Formaldehyde in the 28100-28500 cm-1 (351-356 nm) Spectral Region:? Implications for in Situ LIF Measurements [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2005, 109(47): 10675– 10682
- [11] Winnewisser G, Cornet R A, Birss F W, Gordon R M, Ramsay D A, Till S M. Determination of the Ground State Rotational Constants for Formaldehyde: H₂¹²CO and H₂¹³CO [J]. Journal of Molecular Spectroscopy, 1979, 74(2): 327–329
- [12] Clouthier D J, Ramsay D A. The Spectroscopy of Formaldehyde and Thioformaldehyde [J]. Annual Review of Physical Chemistry, 1983, 34(1): 31–58
- [13] Liu X, Zhang G, Huang Y, Wang Y, Qi F. Two-Dimensional Temperature and Carbon Dioxide Concentration Profiles in Atmospheric Laminar Diffusion Flames Measured by Mid-infrared Direct Absorption Spectroscopy at 4.2 μm [J]. Applied Physics B, 2018, 124(4): 61
- [14] Jin H, Guo J, Li T, Zhou Z, Im H G, Farooq A. Experimental and Numerical Study of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Formation in Ethylene Laminar Co-flow Diffusion Flames [J]. Fuel, 2021, 289: 119931
- [15] Wang Z, Wang Y, Liu X. Experimental Study of a Novel Twin-Nozzle Configuration for Reacting Jet in Hot Crossflow [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2022, 144(9): 092105
- [16] Komiyama M, Miyafuji A, Takagi T. Flamelet Behavior in a Turbulent Diffusion Flame Measured by Rayleigh Scattering Image Velocimetry. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26: 339–346