

文章编号 1004-924X(2025)18-2833-11

## 基于视线效应修正的中红外激光吸收光谱 对冲扩散火焰温度测量方法

万涛<sup>1</sup>, 陆盛曜<sup>1</sup>, 马柳昊<sup>1,2,3\*</sup>, 孙博闻<sup>1</sup>, 黄弈涛<sup>1</sup>, 王宇<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 低碳燃烧与动力研究中心, 湖北 武汉 430070;

2. 佛山仙湖实验室 国家能源氢能及氨氢融合新能源技术重点实验室, 广东 佛山 528200;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**精准测量对冲扩散火焰温度对于构建高保真燃烧化学反应机理、揭示污染物生成机制以及开发高效清洁燃烧技术,具有重要的理论指导意义和工程应用价值。激光吸收光谱技术(Laser Absorption Spectroscopy, LAS)作为一种广泛应用的非接触式测温手段,近年来受到广泛关注。然而,由于吸收路径上热力学和化学参数的非均匀分布,传统基于视线(Line-of-Sight, LOS)积分的测量方法在获取火焰温度信息时存在较大不确定性,影响其测量的准确性和可靠性。尽管传统的层析重建方法和多谱线轮廓拟合技术能够一定程度上恢复火焰中心的温度信息,但这类方法通常实现过程复杂、计算耗时,难以满足高保真测试诊断的需求。本文提出了一种视线效应修正的中红外激光吸收光谱测温方法,该方法通过计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和光谱数值模拟定量不同火焰位置非均匀性对LOS测温结果的偏差影响,最终实现LOS测温修正。为验证该方法,基于H<sub>2</sub>O分子吸收光谱在2.5 μm附近的强吸收谱线对开展系统LOS测温实验,并对比层析重建测量结果和耦合详细化学反应机理的仿真结果。实验结果表明本文提出的温度修正方法对不同燃料燃烧对冲扩散火焰的LOS测温结果可靠性有明显提升,与层析重建实验和CFD结果相比,相对结果差异由修正前的10%~20%降至5%以内,且大部分测量位置小于2%。本文提出的温度修正方法可大幅提高LOS测量方法的可靠性,同时省去了耗时的机械式层析扫描步骤,为对冲扩散火焰温度的快速、准确测量提供了一种有效解决方案。

**关键词:**视线效应;中红外激光吸收光谱技术;温度分布;温度修正

**中图分类号:**O433.5+1 **文献标识码:**A

**doi:**10.3718/OPE.20253318.2833

**CSTR:**32169.14.OPE.20253318.2833

## Line-of-sight effect-corrected mid-infrared laser absorption spectroscopy for temperature measurement in counterflow diffusion flames

WAN Tao<sup>1</sup>, LU Shengyao<sup>1</sup>, MA Lihao<sup>1,2,3\*</sup>, SUN Bowen<sup>1</sup>, HUANG Yitao<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>

(1. Research Center for Low-Carbon Combustion and Propulsion, Wuhan University of Technology,  
Wuhan 430070, China;

2. Foshan Xianhu Laboratory, National Energy Key Laboratory for New Hydrogen-Ammonia Energy

**收稿日期:**2025-07-14; **修订日期:**2025-08-18.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 52476168);佛山仙湖实验室重大项目(No. XHD2024-21000000-03);中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室开放基金项目(No. SKLA02022001A05)

*Technologies, Foshan 528200, China;*

*3. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: liuhaoma@whut.edu.cn*

**Abstract:** Accurate measurement of the temperature in counterflow diffusion flame is crucial for constructing high-fidelity combustion chemical reaction mechanisms, revealing pollutant formation processes, and developing efficient and clean combustion technologies. This holds significant theoretical and engineering application value. Laser Absorption Spectroscopy (LAS), a widely used non-contact temperature measurement technique, has garnered considerable attention in recent years. However, due to the non-uniform distribution of thermodynamic and chemical parameters along the absorption path, traditional Line-of-Sight (LOS) integration-based measurement methods exhibit significant uncertainties when acquiring flame temperature information, affecting their accuracy and reliability. While traditional tomography reconstruction methods and multi-line profile fitting techniques can, to some extent, recover the temperature information of the flame center, these approaches are often complex and computationally intensive, making them difficult to meet the demands of high-fidelity diagnostic testing. This paper proposed a line-of-sight (LOS) temperature measurement method using mid-infrared laser absorption spectroscopy, incorporating a correction strategy for LOS effects. The strategy quantified the deviation in the LOS temperature measurements caused by the non-uniformities at different flame positions, based on computational fluid dynamics (CFD) and spectral numerical simulations. The correction was applied to the LOS temperature measurements. To validate this strategy, systematic LOS temperature measurements were conducted using the strong absorption band of  $\text{H}_2\text{O}$  molecules around  $2.5\ \mu\text{m}$ , with comparisons made against tomography reconstruction measurements and CFD simulation results, which incorporate detailed chemical reaction mechanisms. Experimental results indicate that the proposed temperature correction strategy significantly enhances the reliability of LOS temperature measurements for counterflow diffusion flames with various fuels. Compared to tomography reconstruction experiments and CFD results, the relative differences in the measurements were reduced from  $10\%\sim 20\%$  before correction to within  $5\%$ , with most measurement locations showing discrepancies of less than  $2\%$ . The temperature correction strategy presented in this study substantially improves the reliability of the LOS measurement method, while eliminating the time-consuming mechanical tomography scanning steps. This provides an effective solution for the rapid and accurate measurement of counterflow diffusion flames temperatures.

**Key words:** line of sight; mid-infrared tomographic absorption spectroscopy; temperature distributions; temperature correction

## 1 引言

火焰温度作为燃烧过程的核心理化参数,是表征燃料基础燃烧特性和燃烧效率的重要指标,并直接影响污染物生成和燃烧控制系统的调控方向<sup>[1]</sup>。实现火焰温度的精确测量,其意义不仅体现在基础燃烧研究中对化学反应速率和路径的微观解析(如温度与化学反应速率的指数关

联),还涉及工程应用中对燃烧器优化设计和污染物调控(如氮氧化物生成)的宏观指导<sup>[2]</sup>。

层流对冲扩散火焰是由两个同轴喷嘴形成的对称流场,燃料与氧化剂通过分子扩散混合燃烧形成的准一维标准火焰结构,因其准一维特性及高可控的边界条件,具备稳定的燃烧流动特性,是最具代表性的标准火焰之一<sup>[3]</sup>。通过改变燃料种类,氧化剂含氧比例和出口流速等条件,

该火焰能提供宽温域燃烧环境<sup>[4]</sup>。近几十年,该火焰逐渐成为开展燃烧化学反应动力学研究和光学诊断方法开发的“理想平台<sup>[5]</sup>”。对于上述标准火焰,温度峰值附近的高温区是化学反应最剧烈的区域,通常对应最大反应速率区,该区域温度和主要中间产物浓度变化最为剧烈。特别地,该区域的中心温度大小、轴向温度分布及最高温度的空间位置信息对于基础燃烧研究中化学反应机理和计算流体动力学模型发展及优化十分重要。

铂铑热电偶是常用的火焰高温测量仪器<sup>[6]</sup>,尽管前期100~300 μm直径的高精度裸线热电偶在层流预混火焰中获得应用,但对冲火焰尺寸小,通常直径约为1.0~1.6 cm,火焰极薄(反应区厚度通常在1 mm以下),侵入式的热电偶测量极易干扰局部燃烧流场,增加测温数值及位置的不确定度。其次,热辐射和潜在的表面催化反应使得测量结果亟须修正,进一步增大测量误差<sup>[7]</sup>。因此,采用非接触光学测量方法是实现对冲扩散火焰高精度测量的替代方案。激光光谱方法被广泛应用于火焰温度测量,最具代表性有激光诱导荧光法(Laser-Induced Fluorescence, LIF),相干反斯托克斯拉曼方法(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering, CARS)和激光吸收光谱(Laser Absorption Spectroscopy, LAS)方法<sup>[8]</sup>。LIF和CARS已成功应用于各类标准火焰的温度测量,但相关方法需要昂贵且运行维护复杂的光源,且光路布置调节较复杂,为了获得高定量性的结果,系统需要频繁地标定校准。

实现LAS方法的光学器件价格相对较低且光路布置简单,通过测量穿过待测火焰前后的光强衰减,耦合光谱模型,可实现温度的免标定、定量测量<sup>[9-13]</sup>。LAS是基于视线效应(Line of Sight, LOS)的测量方法,测得的结果为积分吸收路径的平均结果,在应用于非均匀火焰测量时需要特别注意。通过耦合层析重建方法可以实现火焰非均匀温度分布测量。通常而言,可以利用机械式扫描或者布置复杂的光束配置来实现层析测量<sup>[14]</sup>,但实验过程容易受到机械振动干扰,光路调节耗时,且数据后处理较为复杂,其精度易受到火焰边缘测得低信噪比信号或者算法影响。虽然利用红外探测器阵列(相机)替代上述复杂的探测系统布置,可以实现二维甚至三

维、四维层析测量<sup>[15-16]</sup>,但相关硬件成本极高。因此,开发一种仅依赖LOS测量信息即可实现火焰中心温度高可靠性反演的简便、低成本方法具有重要意义。前期作者团队Cui等人<sup>[17]</sup>利用先验的火焰计算流体动力学仿真信息并评估LOS测量对组分测量的影响,进而修正LOS对组分测量的结果。刘宁博等人<sup>[18]</sup>利用光谱仿真结果定量层流预混火焰非均匀分布对测温结果的影响,Wen等人<sup>[19]</sup>借助高保真计算流体动力学仿真和光谱模拟仿真定量非均匀热化学参数(如温度和气体浓度)分布对基于视线效应测温的影响,再选取其中三组谱线对的LOS测温结果结合温度偏差模型将各谱线对测温结果的等温线叠加求出唯一交点,进而反演得到火焰中心温度。

本文开展了基于视线效应修正的中红外激光吸收光谱对冲扩散火焰温度测量方法。作者基于H<sub>2</sub>O在中红外基频谱带内2.5 μm附近的吸收谱线对<sup>[18]</sup>,实现了甲烷和氨燃料对冲扩散火焰的温度LOS和层析测量,并开展了耦合详细化学反应机理的二维数值模拟研究,用于实验结果的对比验证。作者进一步通过测量纯甲烷燃料和掺氨燃料火焰温度的变化,探索了对冲火焰在轴向方向上的温度分布规律,通过验证LOS结果修正方法,实现了精确的温度测量。

## 2 视线效应双线测温法

一束中心频率为 $\nu(\text{cm}^{-1})$ 的单色激光通过待测高温火焰,入射光强 $I_0$ 和透射光强 $I_t$ 的定量关系遵循比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律<sup>[20]</sup>,定义激光透射率 $\tau(\nu)$ 为 $I_t$ 与 $I_0$ 之比,其具体数学表达式为:

$$\tau(\nu) = \left( \frac{I_t}{I_0} \right) = \exp(-k_\nu L), \quad (1)$$

其中: $k_\nu$ 为光谱吸收系数, $L$ 为有效吸收光程。

定义 $\alpha_\nu$ 为任意一个由单独跃迁形成的吸收谱线在频率 $\nu$ 处的吸光度, $\alpha_\nu$ 与 $k_\nu$ 的关系可表示为:

$$\alpha_\nu = k_\nu L = S(T)PXL\Phi_\nu, \quad (2)$$

其中: $S(T)$ (单位: $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ )为吸收谱线强度(仅与温度有关), $P$ (单位:atm)为绝对压力, $X$ 为作用气体介质的浓度, $\Phi_\nu$ (单位:cm)为吸收线型函数,表征了分子展宽情况与光谱轮廓,通常满

足归一化条件  $\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_v dv \equiv 1^{[21]}$ 。

对于特定的吸收谱线  $j$ , 其谱线强度  $S_j(T)$  与气体温度有关, 可表示为如下函数形式:

$$S_j(T) = S_j(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} e^{\left[ -\frac{hcE_j''}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]} \left[ 1 - e^{-\frac{hc\nu_0}{kT}} \right] \left[ 1 - e^{-\frac{hc\nu_0}{kT_0}} \right]^{-1}, \quad (3)$$

其中:  $T_0$  为参考温度 (取  $T_0 = 296 \text{ K}$ ),  $Q(T)$  为与温度相关的吸收气体分子配分函数,  $E_j''$  为谱线  $j$  的低态能级能量。  $h$  为普朗克常数 ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ),  $c$  为光速 ( $2.997\,924\,58 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ ),  $k$  为玻尔兹曼常数 ( $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $\nu_0$  为吸收谱线中心频率。  $E_j''$  是低态能级能量<sup>[20]</sup>, 决定了在不吸收状态下的分子平衡分布, 控制了特定跃迁谱线的谱线强度随温度的变化。

对于某一特定的谱线  $j$ , 沿波长进行积分即可得到积分吸光度  $A_j$ , 可表示为:

$$A_j = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha(\nu) d\nu = PS(T)XL. \quad (4)$$

若在一定频率范围内可以测到两条相互孤立的谱线, 其积分吸光度分别用  $A_1$  和  $A_2$  表示, 当整个吸收路径上的压力、测量物质浓度与温度不随路径上位置变化 (即在吸收路径上均匀分布) 时, 由公式 (3) 得两条谱线的积分吸光度的比值  $R$  与温度有关:

$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T)PXL}{S_2(T)PXL} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)}. \quad (5)$$

将式 (3) 代入式 (5), 即可得到积分路径平均温度  $T$  的表达式:

$$T = \frac{\frac{hc}{k} (E_2'' - E_1'')}{\ln R + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc(E_2'' - E_1'')}{kT_0}}. \quad (6)$$

### 3 实验系统

本文的目标火焰由对冲燃烧器<sup>[22]</sup>产生, 该燃烧器主要由两个同轴正对的喷嘴组成。喷嘴尺寸相同, 整体几何形状与剖面示意图如图 1(a) 所示。包括扩张段、直管稳流段和收缩段, 面积收缩比为 36, 喷嘴内径为 10 mm, 上下喷嘴的间距为 8 mm。氧化剂 (氧气/氮气混合物) 经上喷嘴

流出, 燃料混合物经下喷嘴流出, 燃料和氧化剂接触后, 经过点火在喷嘴之间稳定燃烧。为避免实验测量时环境气流扰动和非预期的次生扩散火焰形成, 喷嘴外围设有 1.8 mm 宽的同心窄缝提供氮气保护流。整个燃烧器被放置在一个高精度电动位移台上 (位移分辨率 10  $\mu\text{m}$ ), 以满足空间分辨率要求。

实验通过多台高精度质量流量控制计 (七星, D08-4F,  $\pm 1\%$  精度) 对甲烷 ( $\text{CH}_4$ , 99.99% 纯度), 氨气 ( $\text{NH}_3$ , 99.99% 纯度), 氧气 ( $\text{O}_2$ , 99.99% 纯度), 氧化剂端氮气 ( $\text{N}_2$ , 99.99% 纯度) 和燃料端氮气流量进行独立控制。为确保质量流量计的使用精度, 在实验开始前使用标定仪 (MesaLabs, Defender510,  $\pm 0.5\%$  精度) 对所有流量计进行了系统标定。图 1(b) 和图 1(c) 给出了代表性对冲火焰燃烧器甲烷火焰与甲烷掺氨火焰图片。

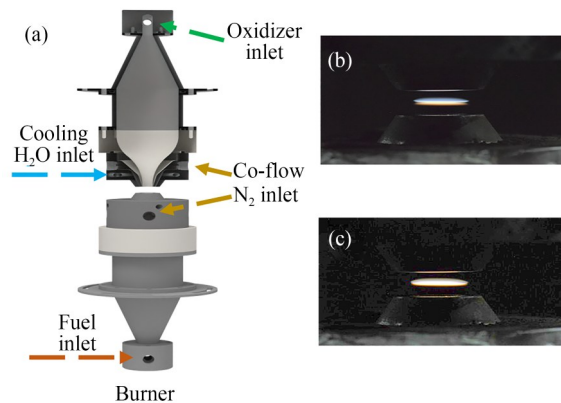


图 1 对冲火焰燃烧器整体几何形状与剖面示意图(a), 甲烷扩散火焰(b)和甲烷掺氨火焰(c)图片

Fig. 1 Schematics of the geometric shape and cross-sectional view of the counterflow diffusion flame burner (a), picture of methane diffusion flame (b) and methane/ammonia co-firing diffusion flame (c)

图 2 展示了用于对冲扩散火焰温度测量的中红外激光吸收光谱实验系统示意图 (DFB: 分布式反馈激光器; PM: 平面镜; BS: 分束器; CCM: 凹透镜; PD: 光电探测器; CCL: 凹透镜; CVL: 凸透镜; NBF: 窄带滤波片; NDF: 中性密度滤波片)。一台中心波长为 2 482 nm, 最大输出功率为 15 mW, TO5 封装的窄线宽 ( $< 3 \text{ MHz}$ ) 分布式反馈激光器 (Nanoplus, DFB) 被用作为可调谐



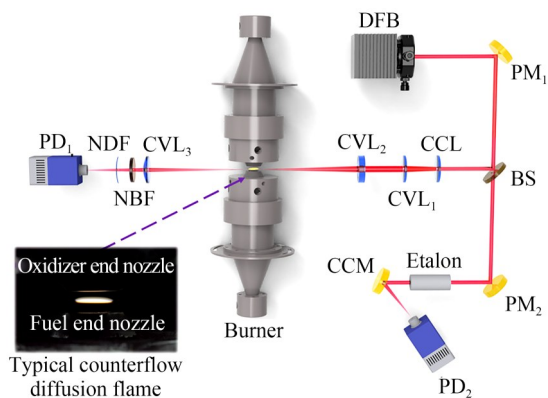


图 2 中红外激光吸收光谱测温系统示意图

Fig. 2 Schematics of the mid-infrared laser absorption spectroscopy system for temperature measurement

光源,该激光器的驱动电流和工作温度均通过低噪声激光控制器(Stanford Research, LDC501)进行精准调控。为了覆盖水汽( $\text{H}_2\text{O}$ )位于 $4\,029.52\text{ cm}^{-1}$ 和 $4\,030.73\text{ cm}^{-1}$ 处的具备强吸收,高灵敏度,无其他燃烧产物交叉干扰的吸收谱线对,通过基于LabView编制的软件函数发生器生成一个 $100\text{ Hz}$ 的锯齿波扫描信号对激光器波长进行扫描。从光源发出的激光光束首先通过反射镀膜非球面透镜(Thorlabs, C036 TME-D)准直,再经伽利略透镜组进行激光缩束以提高测量空间分辨率,激光由刀片法测量确定光斑直径从准直的 $3\text{ mm}$ 最终在火焰中心位置处聚焦至 $160\text{ }\mu\text{m}$ 。其中,伽利略透镜组由焦距 $200\text{ mm}$ 的双凸透镜(麓邦, MBCX70621)、 $250\text{ mm}$ 的平凸透镜(麓邦, MCX70618)与焦距 $-75\text{ mm}$ 的平凹透镜(恒洋光学, GLH53-025-075-R1)组成。当激光穿过待测火焰区域后,经过窄带滤波片(Favision, NBP-2470-50 nm)和中性滤波片(Thorlabs, NDIR10A),最终汇聚在于中红外碲镉汞探测器(VIGO System, PVI-2TE-3)的敏感区域。该探测器工作于 $1\text{ MHz}$ 带宽的直流模式,窄带滤光片用于抑制火焰低频热辐射,中性密度滤光片则避免探测信号饱和。光电探测器的输出信号每次进行由垂直分辨率为 $16\text{ bits}$ ,最大采样率为 $2\text{ Ms/s}$ 的数据采集卡(NI, USB-6363)进行采集。在系统实验测量之前,会在光路中放置一个长为 $75\text{ mm}$ ,自由光谱范围为 $0.0164\text{ cm}^{-1}$ 的自研定制的锺标准具,用于完成原始实验数据的时频转化。

在本文的计算流体动力学数值模拟中,计算区域包含了喷嘴扩张-收缩流道、保护气体流道、火焰反应区及气体出口区域。考虑目标火焰的轴对称特性,本文通过二维轴对称形式计算,并仅计算轴对称区域的一侧。其中喷嘴出口周边的计算区域充分扩展,并包含部分气体流道,以模拟并复现周围大气环境。在火焰模拟中,首先需在无化学反应的冷态条件下计算流场直至流动稳定,随后在燃料与氧化剂化学当量比对应的网格点处施加高温区域作为数值点火源,直至成功引燃。本文通过laminar-SMOKE开源代码模拟二维对冲火焰,分别使用一阶精确格式、欧拉格式、高斯迎风格式和高斯线性格式离散非定常项、对流项和扩散项。此外,利用PISO算法实现了压力-速度的耦合问题。化学反应动力学采用Okafor机理<sup>[23]</sup>(包含59种组分和356个基元反应),该机理已被验证可精确预测 $\text{NH}_3$ -空气及 $\text{CH}_4$ - $\text{NH}_3$ -空气火焰的传播速度与 $\text{NO}_x$ 排放特性。具体模拟细节,包括网格,燃烧模型选择详见作者团队前期论文<sup>[3]</sup>。

图3展示了基于数值模拟计算得到的代表性甲烷掺氨对冲扩散火焰温度和浓度云图,该工况下氧化剂中氧气体积分数为 $30\%$ ,燃料端气体组成为 $40\%\text{ CH}_4$ 和 $60\%\text{ NH}_3$ 。从图中可以看出火焰中心区域内的温度和 $\text{H}_2\text{O}$ 浓度径向分布较均匀。而在火焰边缘处径向上的热化学非均匀性十分突出。这种差异主要是由于速度梯度/保护气冷却和火焰对外界环境等传热传质流动原因导致的。因此,针对非均匀分布的对冲扩散火焰而言,LOS测量容易出现结果失真,亟须发展可靠的修正方法提高LOS测量结果的可靠性。

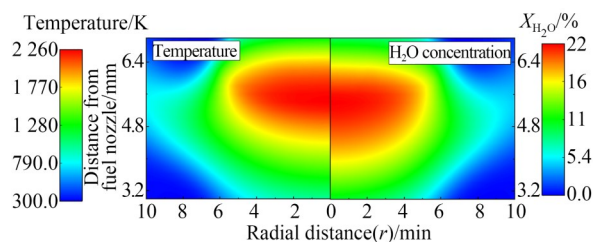


图 3 甲烷掺氨对冲扩散火焰的温度和水汽浓度云图

Fig. 3 Temperature and  $\text{H}_2\text{O}$  concentration contour figure for methane/ammonia counterflow diffusion flame

## 4 视线效应测温修正方法

根据式(6)可以得到火焰沿激光穿过火焰路径的平均温度。然而实际上激光路径上的火焰温度并非均匀分布,而是有明显的低温区域与高温区域划分。对于温度从边缘区域迅速上升,直至中心区域保持稳定的火焰,实验测量的路径平均温度  $T_{\text{LOS}}$  始终小于中心区域温度  $T_{\text{correction}}$ 。

作者团队在前期工作中已经确定可以通过量化修正热化学不均匀性而获得可靠的  $T_{\text{core}}$  的理论可能性。本文提出一种基于计算流体力学和光谱仿真耦合的 LOS 测温修正方法,大幅降低由火焰非均匀性造成的 LOS 测温偏差降低,提高测量结果的可靠性,具体流程如图 4 所示。

步骤 1: 对于本文研究的氮气伴流对冲扩散火焰,火焰中心区域温度和组分浓度分布平坦,从中心到火焰边缘温度和组分浓度逐渐下降。考虑到有效吸收距离  $L$  随距燃料端喷嘴高度 (Distance from fuel nozzle) 不同,且火焰工况变化时  $L$  也会改变。因此,定义火焰中心均匀区域长度为  $L_1$ ,非均匀区域长度  $L_2$  为从 99% 的  $T_{\text{core}}$  位置到火焰边缘室温位置,其中有效吸收距离  $L$  为  $L_1$  与  $L_2$  的。本文通过 CFD 仿真获得目标工况下的火焰温度二维分布,进而获取  $L_1$ ,  $L_2$  及  $L$  的相关信息。

步骤 2: 通过火焰温度分布可以得到火焰距燃料端喷嘴不同高度处的温度径向分布。进而对于实验测量中的每个距燃料喷嘴端不同高度位置,可以计算出对应的火焰中心均匀区域距离  $L_1$  与火焰边缘非均匀区域距离  $L_2$  ( $L = L_1 + L_2$ )。本文定义火焰在距燃料端喷嘴某一高度处的非均匀度为非均匀区域距离在有效吸收距离中的占比为非均匀度  $\Gamma$ ,因此可以计算出火焰距燃料端喷嘴不同高度处的非均匀度  $\Gamma = L_2 / (L_1 + L_2)$ 。

步骤 3: 作者团队前期的工作已经获得了本文所选谱线对<sup>[18]</sup>适用于对冲扩散火焰各种工况的非均匀性- $T_{\text{core}}$  温度偏差等值线图。但是等值线图的非均匀区域温度跨度较大,难以从图中获取某一较精确非均匀度与温度下的非均匀度。因此首先根据步骤 2 得到的某一火焰高度处非均匀度  $\Gamma$  与对应实验测量结果  $T_{\text{LOS}}$  确定修正系数在等值线图中所处区域,再通过等值线图计算修正

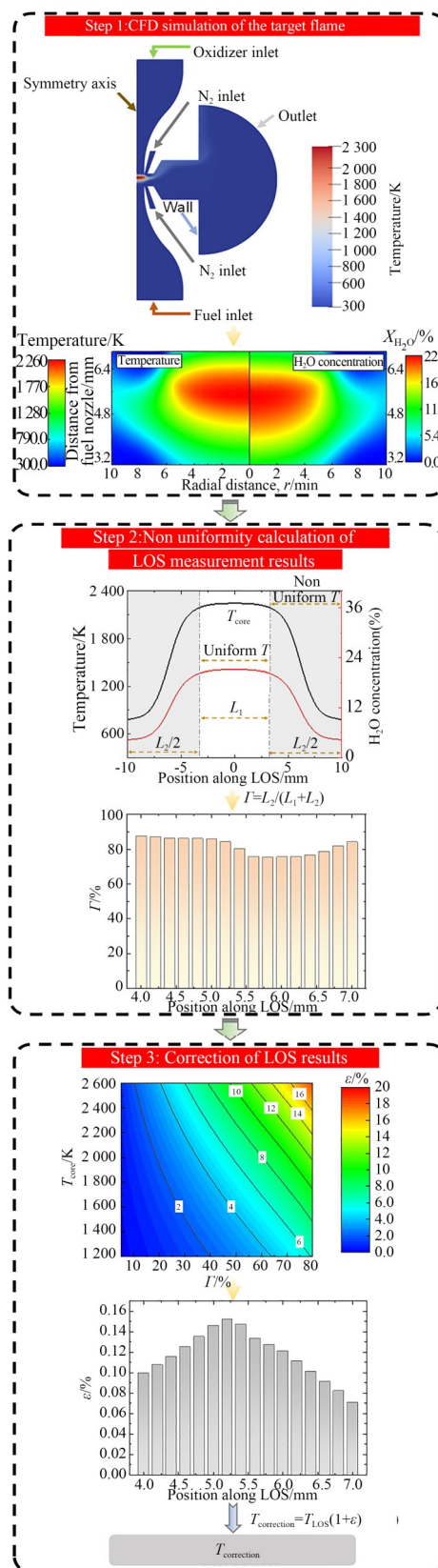


图 4 LOS 测温结果修正过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of correction process for LOS-based temperature measurement

系数 $\epsilon_0$ ,进而最终得到修正后的 $T_{\text{correction}}$ 计算公式如公式(7):

$$T_{\text{correction}} = T_{\text{LOS}}(1 + \epsilon). \quad (7)$$

## 5 结果与讨论

为验证本文所提出的修正方法的可行性,并评估其在不同燃烧工况下的测量效果,设计了两种具有代表性的实验工况。其一为纯甲烷燃烧(T1工况):氧化剂端和燃料端的流速均为10 cm/s,氧化剂中氧气体积分数( $X_{\text{oxidizer-O}_2}$ )为28%。其二为甲烷掺氨燃烧(T2工况):氧化剂端和燃料端的流速均为20 cm/s, $X_{\text{oxidizer-O}_2}$ 为30%,燃料端气体组成为40%  $\text{CH}_4$ 和60%  $\text{NH}_3$ 。

图5展示了测得T1工况的典型吸收光谱信号,具体包括距离燃料端喷嘴不同高度处(3.8~4.6 mm)的吸光度信号和固定某一高度处不同径向位置(0~6.0 mm)的吸光度信号。从图5(a)中可以看出,随着高度位置的降低,吸光度不断

增大,这是因为激光穿过火焰区域的位置逐渐从低温区域向高温区域过渡,而高温区域燃料与氧化剂混合更充分并完全燃烧,生成的 $\text{H}_2\text{O}$ 浓度较高,导致吸收信号增强而低温区域燃料与氧化剂混合不充分,燃料不完全燃烧,生成中间产物(如 $\text{CO}$ )较多,进而导致生成 $\text{H}_2\text{O}$ 的浓度较低。图5(b)展示了火焰某一高度位置时,不同径向位置的光谱吸光度。可以看出随着激光穿过火焰的位置由火焰边缘位置(6.0 mm)转移至火焰中心区域(0 mm),吸光度逐渐变大趋势,且在火焰的边缘位置仍可观察到明显吸收信号。综上所述,无论是高温区域还是低温区域,均可观察到较为明显的吸收峰特征,这表明实验系统可保障高质量实验数据获取,用于后续火焰温度信息的获取。

典型实验吸光度信号和多波长Voigt拟合结果如图6所示。从图中可以看出实验数据可以被多个Voigt函数高精度拟合,且拟合残差较小。在 $4\,029.5\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰的吸收特征范围内拟合残差绝大部分 $<2.0\%$ ,吸收谱线位置处( $4\,029.52\text{ cm}^{-1}$ )的残差为1.6%;在 $4\,030.7\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰的吸收特征范围内拟合残差绝大部分 $<3.0\%$ ,吸收谱线位置处( $4\,030.73\text{ cm}^{-1}$ )的残差为2.1%。高信噪比实验数据与高精度Voigt拟合的结合,可为火焰温度定量分析提供可靠支撑。结合光谱参数的不确定度与Voigt拟合残差,实验测量的不确定度约为3.9%,相关评估方法见参考文献<sup>[24-25]</sup>。

图7分别展示了T1和T2工况火焰层析、

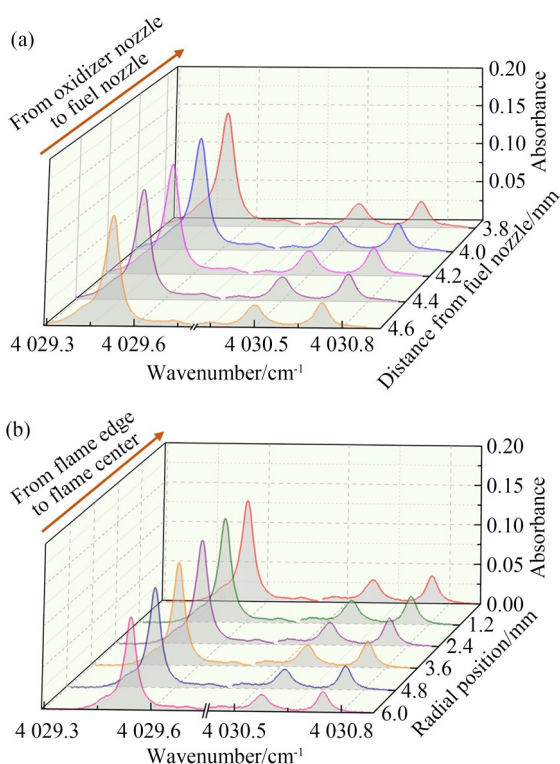


图5 测得的典型距离燃料端喷嘴不同高度(a)以及某一高度不同径向位置(b)的吸光度

Fig. 5 Measured typical absorbances at different heights from the fuel nozzle (a) and absorbances at different radial positions within a certain height

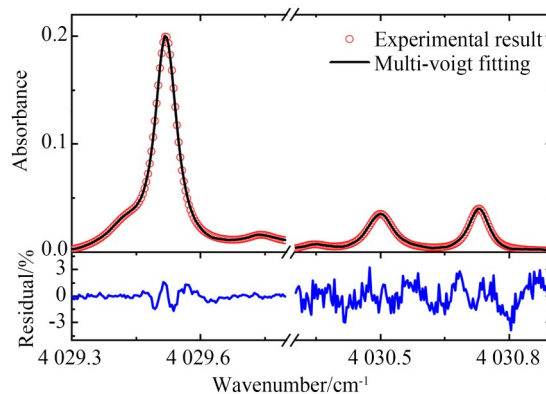


图6 代表性的实验信号与对应多Vogit拟合结果

Fig. 6 Representative experimental absorbance and corresponding multi-Voigt fitting results



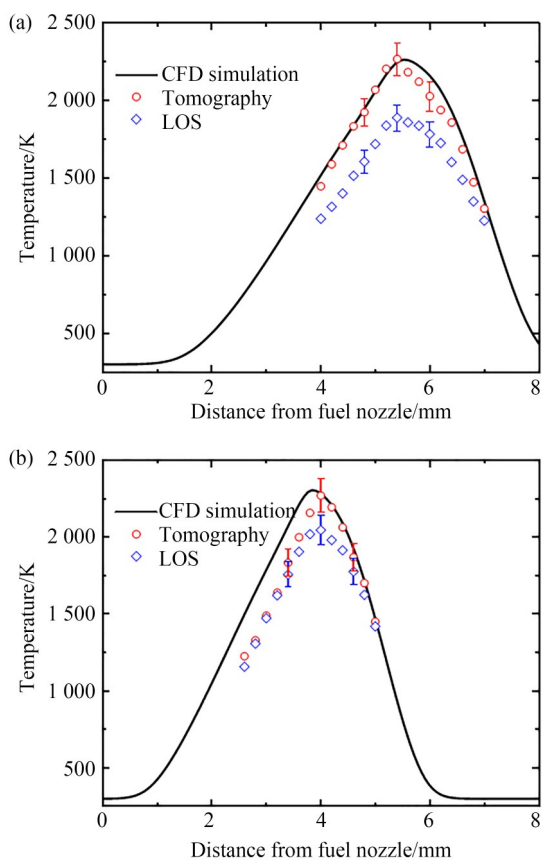


图7 (a) T1火焰与(b) T2火焰层析、LOS测量与CFD仿真结果对比图

Fig. 7 Comparison of tomographic absorption measurement, LOS measurement, and CFD simulation results for flame T1 (a) and flame T2 (b)

LOS测量与CFD仿真结果对比图,并对层析和LOS测量的典型位置添加了误差棒。从图中可以看出,两种火焰的温度轴向分布趋势均能被LOS测量和层析测量较好捕捉,说明两种测量方法均有较好的可靠性。两个工况的层析测量结果与CFD仿真结果的偏差均小于LOS测量结果与CFD仿真结果的偏差。对于T1工况,火焰峰值位置测量偏差为3.4%。氧化剂端测量偏差较小,最大温度相对偏差为4.7%,且位于氧化剂端的边缘位置,火焰峰值位置区域偏差均在1.5%以内。而燃料端最大温度相对偏差较大,均在3%~6%之间。对于T2工况,测量偏差正好相反,火焰峰值位置测量偏差仅为0.5%。对于氧化剂端,测量偏差较大,火焰核心区域误差在6%~10%,靠近氧化剂端的边缘区域测量偏差则为11%~20%。而燃料端最大测量偏差为

2.9%,且大部分位置测量偏差为0.5%~1.3%。两个工况火焰核心区域温度测量偏差均小于靠近氧化剂端和燃料端的边缘区域,这可能是因为靠近两端喷嘴的边缘区域的信噪比较小,吸收信号较弱。

对于测量的每个高度位置,LOS测量结果均低于层析测量结果与CFD仿真结果,这是由于温度和 $H_2O$ 浓度的非均匀性导致。值得注意的是,LOS测温结果与数值模拟和层析吸收光谱测量在不同高度处的持续性测量偏差也间接说明了,尽管LOS测量可以给出轴向温度分布趋势,但数值的可靠性存在问题。对于火焰峰值温度测量,T1火焰LOS测量结果与仿真结果的温差为373.1 K(~16.5%),T2火焰则为259.8 K(~11.3%),这与计算两种火焰不同位置的非均匀度时发现的T1火焰整体的非均匀度要大于T2火焰结论相一致。

对于两种火焰,均可观察到峰值区域LOS测量结果温度偏差较大,这是因为温度对测量偏差的影响较显著,确切地说,更高的火焰中心温度和更大的非均匀性将导致更大的温度测量偏差。值得注意的是,两种火焰均观察到实验测量的峰值位置对比仿真结果发生偏移的现象,对于T1火焰,峰值位置更偏向于燃料端,这是由于氧化剂端喷嘴附近的非均匀性比燃料端喷嘴附近更显著,导致氧化剂端喷嘴附近区域的温度测量偏差更大。而T2火焰的峰值位置更偏向于氧化剂侧,除了非均匀性程度的影响外,真实火焰中燃烧产物气体的高温导致其密度降低,浮力效应会形成向上的对流,从而将火焰高温区域向上抬升,使温度峰值位置更靠近氧化剂侧。总而言之,层析测量结果与仿真结果一致性较好,而由于火焰的非均匀性,甲烷火焰与甲烷掺氨火焰的LOS测量结果与层析结果和CFD仿真结果差别较大,尤其在温度峰值附近更为明显。

进一步地,将本文提出的LOS测量修正方法应用于T1火焰和T2火焰LOS温度测量结果修正。图8所展示了LOS修正结果与LOS测量结果,层析结果和数值模拟结果的对比。从图中可以看出,对于T1火焰,修正结果较未修正的LOS测量结果而言与层析测量结果的偏差明显减小,最大的温度相对偏差仅为4.2%,大部分温度差



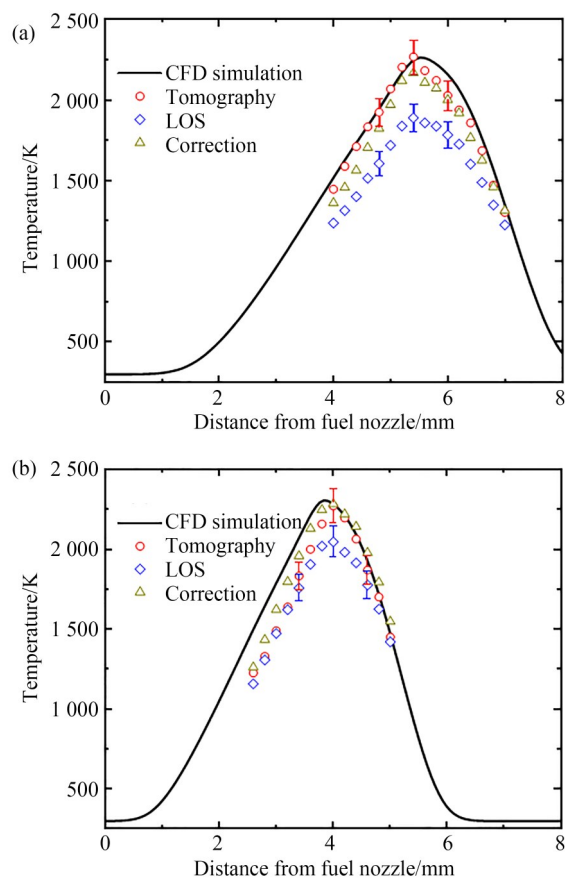


图8 (a) T1火焰与(b) T2火焰 LOS修正温度与层析、LOS测量和CFD仿真结果对比图

Fig. 8 Comparison of LOS-corrected measurement and tomographic absorption measurement, LOS measurement, and CFD simulation results between (a) T1 flame and (b) T2 flame

异在2%以内。此外,与层析结果一样,修正的LOS测量结果能精准地捕捉沿火焰轴向方向的温度变化趋势。对于T2火焰,LOS修正结果与层析测量相比和数值模拟结果吻合较好,在火焰峰值温度位置的偏差为~23K(相对偏差1.0%)。T1火焰与T2火焰相比,T2火焰温度修正结果与CFD仿真结果的偏差更小,这可能是因为T2火焰的反应物气体流量更大,氧气浓度也更高,因此燃烧更剧烈、更充分,生成的H<sub>2</sub>O气体浓度更高,实验测量时可以获得更高信噪比的吸收信号,进而减小了测量误差。结果表明,本文提出的修正方法对层流对冲扩散火焰轴向温度定量测量和温度分布趋势的捕捉是有效可行的,该方法能够实现层流对冲火焰

轴向温度分布的准确,快速测量,省略了耗时的机械式层析扫描步骤。

## 6 结 论

本文提出了一种基于视线效应修正的中红外激光吸收光谱对冲扩散火焰温度测量方法,该方法有效降低了LOS测温结果因火焰热化学非均匀性影响导致测量值与火焰中心温度的偏差程度。对于测温准确性,不同测量位置普遍提升10%以上,使得火焰核心区域测温偏差大部分位于5%以内,边缘区域大部分位于10%以内。为了验证该修正方法的可行性,基于H<sub>2</sub>O在2.5 μm附近基频谱带内的强吸收谱线开展实验得到LOS测温结果与层析测温结果,同时开展耦合详细化学机理的数值模拟研究。根据数值模拟得到的火焰温度分布结果计算火焰不同轴向高度位置的温度非均匀度,再结合实验测得的LOS温度结果与对“非均匀性- $T_{\text{correction}}$ ”温度偏差等值线图,得到火焰不同轴向高度位置的温度修正系数 $\epsilon$ ,并进行最终的LOS测温结果的修正。将修正结果与数值模拟结果对比,验证修正方法的可行性,得到的相关结论如下:

(1)本文提出的温度修正方法大幅提高了LOS测温方法的可靠性,并成功应用于甲烷和甲烷掺氨对冲扩散火焰中心温度及轴向温度分布测量。相较于传统层析方法避免了复杂的机械扫描过程,该方法在保证精度的同时提高了测量效率;

(2)在火焰温度峰值的轴向高度区域,LOS测温结果与CFD仿真数据呈现显著差异,这是因为该区域为燃烧反应核心区域,温度梯度变化最为显著,非均匀性最强;

(3)本文建立了 $\Gamma$ - $T_{\text{correction}}$ - $\epsilon$ 修正矩阵,同时修正结果能准确捕捉轴向温度梯度变化。该技术为非均匀温度场诊断提供了“仿真指导-实验修正”的新模式,解决了小尺度火焰(直径1.6 cm)非均匀性导致的测温失真问题,为非均匀火焰的中心温度测量提供了新技术路径。

### 作者贡献声明:

万涛:实验方法设计与测量,论文撰写;

陆盛曜:测量实验数据处理;

马柳昊:课题和方法提出,论文撰写和修订;  
孙博闻:火焰数值模拟研究;

黄弈涛:测量实验数据分析;  
王宇:数据讨论、论文修改与审核。

### 参考文献:

- [1] EGOLFOPOULOS F N, HANSEN N, JU Y, *et al.* Advances and challenges in laminar flame experiments and implications for combustion chemistry [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014, 43: 36-67.
- [2] BALLESTER J, GARCÍA-ARMINGOL T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(4): 375-411.
- [3] JIANG P, ZHOU M X, WEN D X, *et al.* An experimental multiparameter investigation on the thermochemical structures of benchmark ethylene and propane counterflow diffusion flames and implications to their numerical modeling [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 234: 111622.
- [4] WEN D X, WANG Y. Spatially and temporally resolved temperature measurements in counterflow flames using a single interband cascade laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37879-37902.
- [5] WANG Y, CHUNG S H. Soot formation in laminar counterflow flames [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 74: 152-238.
- [6] HEITOR M V, MOREIRA A L N. Thermocouples and sample probes for combustion studies [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1993, 19(3): 259-278.
- [7] SHADDIX C R, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL E. Correcting thermocouple measurements for radiation loss: a critical review [C]. *Proceedings of the 1999 National Heat Transfer Conference: August 15-17, 1999, Albuquerque, New Mexico*, 1999.
- [8] FAROOQ A, ALQUAITY A B S, RAZA M, *et al.* Laser sensors for energy systems and process industries: Perspectives and directions [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2022, 91: 100997.
- [9] 聂伟, 许振宇, 阚瑞峰, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术测量低温流场水汽露点温度 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1862-1869.
- NIE W, XU Z Y, KAN R F, *et al.* Measurement of low water vapor dew-point temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 1862-1869. (in Chinese)
- [10] 聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展 [J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 9-29.
- NIE W, KAN R F, YANG C G, *et al.* Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 9-29. (in Chinese)
- [11] 曹章, 高欣, 陆方峰, 等. 激光吸收光谱层析成像及复杂燃烧场动态监测 [J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 117-138.
- CAO Z, GAO X, LU F H, *et al.* Laser absorption spectral tomography for dynamical combustion monitoring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 117-138. (in Chinese)
- [12] HUANG W J, GAO G Z, ZHANG M K, *et al.* Simultaneous detection of soot, temperature, and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> in laminar premixed flames using a multi-pass diode laser absorption spectrometer [J]. *Optics Express*, 2024, 32(23): 41445.
- [13] 李金义, 赵航, 杨晓涛, 等. 激光吸收光谱 2D 和 3D 成像测量技术及其应用研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(19): 71-84.
- LI J Y, ZHAO H, YANG X T, *et al.* Research and application progress on laser absorption spectroscopy technology for 2D and 3D imaging measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(19): 71-84. (in Chinese)
- [14] 陆盛曜, 马柳昊, 张健鹏, 等. 中红外层析吸收光谱技术应用于甲烷掺氨层流预混火焰温度测量 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(18): 2733-2743.
- LU S Y, MA L H, ZHANG J P, *et al.* Temperature measurement in methane-ammonia co-fired laminar premixed flame using mid-infrared laser absorption tomography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(18): 2733-2743. (in Chinese)
- [15] WEI C Y, PINEDA D I, GOLDENSTEIN C S, *et al.* Tomographic laser absorption imaging of combustion species and temperature in the mid-wave infrared [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 22445-22460.

- 20944-20951.
- [16] WEI C Y, SPEARRIN R M. Four-dimensional laser absorption cinematography of species and temperature dynamics at 2 kHz in reacting flows [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(1): 141-144.
- [17] CUI B, MA L H, SUN B W, *et al.* Mid-infrared absorption spectroscopy for *in-situ* and spatially resolved measurements of nitric oxide in premixed ammonia-methane co-fired flames [J]. *Optics Express*, 2025, 33(2): 3262.
- [18] 刘宁博, 赵逸佳, 陆盛曜, 等. 热化学参数非均匀分布对双色激光吸收光谱测量碳烟火焰温度的影响 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(19): 2799-2808.
- LIU N B, ZHAO Y J, LU S Y, *et al.* Influence of non-uniform distributions of thermochemical parameters on measurement of sooting flame temperature by two-color laser absorption spectroscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(19): 2799-2808. (in Chinese)
- [19] WEN D X, MA L H, WANG Y. Effects of thermochemical non-uniformity on line-of-sight laser absorption thermometry in counterflow diffusion flames [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 277: 107990.
- [20] HANSON R K., MITCHELL SPEARRIN R, S. GOLDENSTEIN C. *Spectroscopy and Optical Diagnostics for Gases* [M]. New York: Taylor & Francis, 2002.
- [21] 李劲松. 现代激光光谱技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2022: 321.
- LI J S. *Modern Laser Spectroscopy Techniques and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2022: 321. (in Chinese)
- [22] XU L, YAN F W, ZHOU M X, *et al.* Experimental and soot modeling studies of ethylene counterflow diffusion flames: non-monotonic influence of the oxidizer composition on soot formation [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 197: 304-318.
- [23] OKAFOR E C, NAITO Y, COLSON S, *et al.* Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of  $\text{CH}_4\text{-NH}_3$ -air premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 187: 185-198.
- [24] WEI C Y, PINEDA D I, PAXTON L, *et al.* Mid-infrared laser absorption tomography for quantitative 2D thermochemistry measurements in premixed jet flames [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(6): 123.
- [25] SHENG G, MA L H, WEN D X, *et al.* Simultaneous measurements of temperature,  $\text{CO}_2$  concentration and soot volume fraction in counterflow diffusion flames using a single mid-infrared laser [J]. *Applied Physics B*, 2022, 128(3): 62.

## 作者简介:



万 涛(2001—),男,江西九江人,硕士研究生,2023年于武汉理工大学获得学士学位,主要方向为基于中红外激光吸收光谱技术的燃烧诊断方法研究。E-mail: 300073@whut.edu.cn

## 通讯作者:



马柳昊(1990—),男,湖北荆州人,博士,副教授,博士生导师,分别于2012年、2015年在华中科技大学获得学士、硕士学位,于2019年在香港中文大学获得博士学位,主要研究方向为大载荷、强辐射、非均匀燃烧流场光学诊断技术,新型激光光谱高温传感技术和工业激光传感器与激光雷达设计。E-mail: liuhaoma@whut.edu.cn