

文章编号 1004-924X(2024)18-2733-11

# 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

陆盛曜<sup>1</sup>, 马柳昊<sup>1,2\*</sup>, 张健鹏<sup>3</sup>, 李青<sup>1</sup>, 周吉伟<sup>1</sup>, 万涛<sup>1</sup>, 王宇<sup>1,4</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. 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;

3. 四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065;

4. 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)

**摘要:**氨( $\text{NH}_3$ )是一种代表性的零碳燃料,其完全燃烧产物为水( $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ )和氮气。由于其独特的零碳排放优势,近年来, $\text{NH}_3$ 已在热力锅炉、内燃机和工业窑炉中实现高比例掺烧的减排应用。由于火焰温度与燃烧效率和污染物生成密切相关,因此亟须精准的实验数据以实现燃烧过程的主动控制。本文开发了基于中红外层析吸收光谱技术的测量系统,通过跃迁谱线分析,优选了 $\text{H}_2\text{O}$ 在基频谱带( $\nu_3$ )内 2 482 nm 附近的吸收谱线开展吸收光谱测量。采用多个 Voigt 线型函数实现 $\text{H}_2\text{O}$ 光谱重叠吸收特征的精确拟合,并结合阿贝尔逆变换和正则化技术实现了不同掺氨比燃烧工况下火焰温度的免标定、定量测量。实验结果表明纯氨燃料和甲烷/氨气混合燃料的火焰面位置位于燃烧器上方高度的 0.5~2 mm 之间,当体积掺氨比从 20% 向 100% 增大时,火焰面逐渐远离燃烧器,同时火焰最高温度大约从 1 600 K 上升至 2 000 K。本文开发的测量方法与系统,不仅能捕捉到层流预混火焰沿着轴向和径向的非均匀温度分布,还能分辨出不同燃烧工况下的火焰温度差异,特别适合零碳氨燃料火焰温度测量。

**关键词:**中红外层析吸收光谱技术;温度测量;氨燃料层流预混火焰;温度分布

**中图分类号:**O433.5+1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243218.2733

## Temperature measurement in methane-ammonia co-fired laminar premixed flame using mid-infrared laser absorption tomography

LU Shengyao<sup>1</sup>, MA Lihao<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Jianpeng<sup>3</sup>, LI Qing<sup>1</sup>,

ZHOU Jiwei<sup>1</sup>, WAN Tao<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1,4</sup>

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

Wuhan 430070, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

收稿日期:2024-07-18;修订日期:2024-08-14.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 52106221, No. 52006152);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资助项目(No. SKLA02022001A05);四川省自然科学基金面上项目资助(No. 2023NSFSC0302)

4. National Energy Key Laboratory for New Hydrogen-Ammonia Energy Technologies,  
Foshan Xianhu Laboratory, Foshan 528200, China)

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

**Abstract:** Ammonia ( $\text{NH}_3$ ) is a representative carbon-free fuel, with its primary combustion products being water and nitrogen gas. Due to its unique advantage of zero carbon emissions, high proportions of ammonia co-firing strategy have been successfully implemented in decarbonization of thermal power boilers, internal combustion engines, and industrial furnace. As flame temperature is closely related to combustion efficiency and pollutant generation, it necessitates precise measurements for active control of low-pollution combustion processes. This paper presented the development of a measurement system based on mid-infrared tomographic absorption spectroscopy. By comprehensive analysis of absorption lines, we optimized the selection of absorption lines and finally selected the transitions near 2 482 nm within the fundamental band ( $\nu_3$ ) of  $\text{H}_2\text{O}$ . By employing the multiple Voigt profile function, we achieved accurate fitting of the overlapping absorption features of  $\text{H}_2\text{O}$  spectra. Combining Abel inversion and regularization techniques, we realized calibration-free and quantitative measurements of flame temperature under different proportions of ammonia blending. The experimental results indicate that the flame sheet positions are located between 0.5 and 2 mm above the burner for pure ammonia flame and methane/ammonia co-fire flame. As the proportion of ammonia increases from 20% to 100%, the flame sheet gradually moves away from the burner, while the maximum flame temperature rises from approximately 1 600 K to 2 000 K. The proposed measurement technique and system developed in this study not only capture the non-uniform temperature distribution of laminar premixed flames along the axial and radial directions but also discern subtle differences in flame temperature under various combustion conditions. This system is particularly suitable for measuring the flame temperature of zero-carbon ammonia fuels.

**Key words:** mid-infrared tomographic absorption spectroscopy; temperature measurement; ammonia-fueled laminar premixed flame; temperature distributions

## 1 引 言

“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”战略目标对以航空航天和国防工业等为代表的国家重大战略领域,及以建材、冶金、电力和交通工业等为代表的国家基础民生领域,提出了更高的减碳脱碳要求<sup>[1]</sup>。这些领域的核心装备(如燃气轮机,热电锅炉,内燃机和工业窑炉等)均与高温热工过程密切相关,化石燃料作为这些高温热工装备的主要能量来源,在满足我国不断增长的能源需求的同时,也贡献了绝大部分碳排放<sup>[2]</sup>。

采用可再生零碳燃料是实现高温热工装备源头脱碳的重要技术路径。作为一种高效零碳氢载体,氨气燃烧近年来得到广泛关注,在热力发电锅炉、船舶内燃机和高温陶瓷窑炉中得到示

范应用。但值得注意的是,氨气存在可燃范围窄、点火困难和高氮氧化物排放等问题,为了进一步推动氨燃料的应用,需要对其基础燃烧特性进行充分解析<sup>[3-4]</sup>。温度作为燃烧过程中最需要定量的物理量之一,其精准测量对于开发高保真氨气燃烧化学反应机理、氨燃烧器优化设计和燃烧效率评估等至关重要。此外,火焰温度对于氨燃烧  $\text{NO}_x$  生成及选择性非催化还原(SNCR)过程等密切相关,精准的温度测量结果对于实现高效低污染燃烧过程的主动控制具有重要意义。因此,高保真的温度测量对于实现零碳氨燃料的高效清洁利用至关重要。

火焰温度的测量方法,主要包括以热电偶测量<sup>[5]</sup>为主的接触式方法和以光学测量(如辐射测温法和激光吸收光谱测温法)为主的非接触式方

法<sup>[6]</sup>。对于传统热电偶测量,其侵入式测量方式会干扰待测目标区域附近的燃烧流场,导致测量结果可靠性偏低,特别是在待测火焰面位置附近时,较低的空间分辨率和对火焰的干扰会导致测量结果失真。此外,热电偶与外界环境也存在显著的辐射热交换,需要开展频繁且复杂的热损失补偿以校正测量结果,对于更高温度( $>1\,900\text{ K}$ )的火焰也难以找到足够高熔点的热电偶材料来满足测量温度区间的要求。因此,热电偶并不适用于高空间分辨率、高保真需求的火焰温度测量。

激光吸收光谱(Laser Absorption Spectroscopy, LAS)技术是一种具有代表性的非接触式气体参数测量技术<sup>[7-10]</sup>,通过测量特定波长激光穿过待测火焰前后的光强变化,来获得温度、浓度和压力等气体参数信息,它具有原位、非接触式、免标定和高灵敏度等显著特点<sup>[11-14]</sup>。此外,通过布置多角度或者平行扫描式光路可以获得不同角度和位置的吸收光谱信息<sup>[15]</sup>,结合阿贝尔逆变换或者代数重构算法可以获得温度的空间分布,因此特别适合高温火焰温度的精密测量。前期,国内外研究团队针对火焰温度测量开展了大量的研究工作,主要集中在:(1)研发新型温度测量方法提高温度测量的灵敏度,降低测量的不确定度<sup>[16]</sup>;(2)研发高空间分辨率火焰温度测量方法<sup>[17-18]</sup>;(3)研究谱线选择标准、策略以及光谱线型函数<sup>[19]</sup>,相关研究成果极大支撑了LAS测温技术的发展。针对氨燃烧研究,前期工作主要集中在燃烧动力学和燃烧产物分析等方面<sup>[20-22]</sup>,但关于氨火焰温度准确测量的相关工作较为稀缺。

本文开展了基于中红外层析吸收光谱技术的天然气掺氨层流预混火焰温度测量系统的研究。基于 $\text{H}_2\text{O}$ 在中红外基频谱带内 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 附近,中心波数分别为 $4\,029.52\text{ cm}^{-1}$ 和 $4\,030.73\text{ cm}^{-1}$ 的谱线对,搭建了层析吸收光谱检测系统,实现了甲烷掺氨层流预混火焰的温度测量,并开展了耦合详细化学反应机理的模拟研究,用于实验结果的对比验证。最后,通过测量纯氨燃料和不同掺氨比下的混合燃料火焰温度的变化,探索了氨燃料层流预混火焰在轴向方向上的温度分布规律。

## 2 层析吸收光谱技术测温原理

一束光强为 $I_0$ ,中心频率为 $\nu(\text{cm}^{-1})$ 的单色激光,穿过待测均匀流场并与目标气体组分发生作用后,激光强度会衰减,其中衰减后的激光光强记为 $I_t$ 。激光强度的衰减程度遵循比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律,如图1所示。

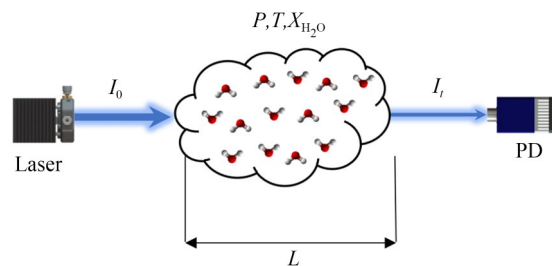


图1 比尔-朗伯定律示意图

Fig. 1 Schematic of Beer-Lambert law

$$\tau(\nu) = (I_t/I_0)_\nu = \exp(-k_\nu L), \quad (1)$$

其中: $\tau(\nu)$ 为激光透射率, $k_\nu$ 为光谱吸收系数, $L$ 为有效吸收距离。

对于任意一个由单独跃迁形成的谱线(以 $\text{H}_2\text{O}$ 吸收谱线为例),在其频率 $\nu$ 处的吸光度 $\alpha_\nu$ 可表示为:

$$\alpha_\nu = k_\nu L = S(T) P X_{\text{H}_2\text{O}} L \Phi_\nu, \quad (2)$$

其中: $S(T)[\text{cm}^{-2}\text{atm}^{-1}]$ 为仅与温度有关的吸收谱线强度, $P[\text{atm}]$ 为气体静态压力, $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水汽摩尔浓度, $\Phi_\nu[\text{cm}]$ 为吸收线型函数,与气体压力、温度和待测环境气体各组分浓度有关,其表征了吸收谱线的形状且沿着全光谱范围的积分值为1,即 $\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_\nu d\nu \equiv 1$ 。

沿着全光谱范围对公式(2)积分可得积分吸收光度(即积分吸收面积):

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_\nu d\nu = S(T) P X_{\text{H}_2\text{O}} L. \quad (3)$$

基于公式(3)可获得两个不同吸收谱线的积分吸光度,通过比值约去压力项 $P$ ,组分浓度项 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 和有效吸收距离项 $L$ ,最后保留仅与温度相关的谱线强度项:

$$R^* = \frac{A_{\nu_1}}{A_{\nu_2}} = \frac{S(T_0, \nu_1)}{S(T_0, \nu_2)} \exp \left[ - \left( \frac{hc}{k} \right) (E_1'' - E_2'') \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (4)$$

其中:  $v_1$  和  $v_2$ ,  $E_1''$  和  $E_2''$  分别两根跃迁谱线的中心频率和低态能级,  $S_1(T_0, v_1)$  和  $S_2(T_0, v_2)$  分别为不同谱线在参考温度  $T_0$  (296 K) 下的谱线强度,  $h$ ,  $c$  和  $k$  分别代表普朗克常数 ( $6.626 \times 10^{-34}$  J·s)、光速 ( $2.997\,924\,58 \times 10^{10}$  cm/s) 和玻尔兹曼常数 ( $1.380\,649 \times 10^{-23}$  J/K)。因此, 温度可表达为:

$$T = \frac{\frac{hc}{k} (E_2'' - E_1'')}{\ln R^* + \ln \frac{S_2(T_0, v_2)}{S_1(T_0, v_1)} + \frac{hc(E_2'' - E_1'')}{kT_0}}. \quad (5)$$

值得注意的是, 公式(5)给出的是基于视线效应 (Line of Sight, LOS) 的测温结果。由于待测目标火焰具有轴对称性, 可以通过层析法对沿着光程方向的非均匀火焰温度进行二维重建。本文我们采用 Abel 逆变换和 Tikhonov 正则化对平面火焰进行二维分布重建。

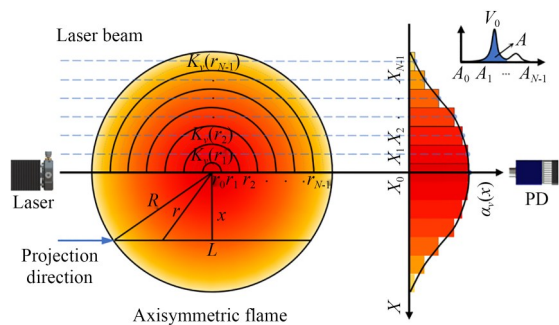


图 2 轴对称火焰 Abel 逆变换示意图

Fig. 2 Schematic of Abel inverse transformation for axisymmetric flame

对于 Abel 逆变换, 如图 2 所示, 记吸光度  $\alpha_v$  为投影数据, 为得到投影数据, 需要得到局部数据, 记局部数据为  $k_v$ , 根据图示得到两者的关系式为:

$$\alpha_v(x) = 2 \int_x^R \frac{k_v(r)r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr, \quad (6)$$

式中,  $R$  表示积分的终止位置, 在本文中即为可探测到吸收信号的极限位置, 一般在 McKenna 火焰可视半径附近 (34 mm 左右)。

同时, 公式(6)没有解析解, 将该公式的离散形式用三点 Abel 反演方式 (ATP) 表示为代数方程组:

$$A_{\text{ATP}} \mathbf{X} = \mathbf{b}, \quad (7)$$

其中: 向量  $\mathbf{b} = \{\alpha_v(x_0), \alpha_v(x_1), \dots, \alpha_v(x_{N-1})\}^T$  和

向量  $\mathbf{x} = \{k_v(r_0), k_v(r_1), \dots, k_v(r_{N-1})\}^T$  分别是最终测得的积分吸收系数和重构光谱积分吸收系数的离散值组;  $A_{\text{ATP}}$  是 ATP 反褶积算子 ( $D_{\text{ATP}}$ ) 的逆矩阵, 即  $A_{\text{ATP}} = \Delta r \cdot D_{\text{ATP}}^{-1}$ 。  $D_{\text{ATP}}$  的完整形式可以在 Dasch<sup>[23]</sup> 的文章中找到。考虑到 ATP 变换的不稳定性和 LOS 测量的噪声问题, 采用 Tikhonov 正则化对公式(7)的解进行平滑处理:

$$\begin{bmatrix} A_{\text{ATP}} \\ \lambda L \end{bmatrix} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

值得注意的是, 正则化参数  $\lambda$  是影响反演结果曲线平滑度以及结果合理性的重要参数,  $\lambda$  值过小会导致对噪声的控制效果不明显,  $\lambda$  值过大则会导致结果曲线过度平滑。为了获得最合适的  $\lambda$  值, 我们根据参考文献<sup>[24]</sup> 的  $L$ -curve 方法综合考虑解的范数和求解残差范数以自动确定  $\lambda$ , 典型的  $\lambda$  值的数量级为 1。  $L$  是平滑矩阵:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}_{K \times N}. \quad (9)$$

关于一维 TAS 算法的更多细节可以在文献<sup>[25-26]</sup> 中找到。为了抑制反演结果因为噪声被放大导致的失真现象, 利用 Tikhonov 正则化方法可以提高反演结果的准确度。

### 3 实验系统

本文所研究的标准层流预混火焰由 McKenna 燃烧器产生, 该燃烧器主要由中心烧结铜多孔介质圆盘 (直径为 60 mm) 和外环烧结不锈钢多孔介质组成, 中心多孔介质圆盘中埋有水冷管用于炉体散热。预混的燃料和空气混合物通过中心圆盘后, 在出口上方稳定燃烧, 外环的伴流氮气 ( $N_2$ ) 将火焰与周围环境隔开, 可以最大限度降低环境中空气扰动对火焰稳定性的影响。燃烧器的顶端固定了一个直径为 60 mm, 厚度为 14 mm 的不锈钢圆形滞止板, 用于进一步降低高比例掺氨工况时的火焰抖动。火焰工况由高精度质量流量控制计 (Sevenstar,  $\pm 1\%$  精度) 调控, 其中甲烷 ( $CH_4$ ), 氨气 ( $NH_3$ ), 氧气 ( $O_2$ ) 和氮气 ( $N_2$ ) 的流量计量程分别为 5 L/min, 2 L/min, 5 L/min 和 15 L/min, 伴流  $N_2$  的流量设定为 10 L/min。质量流量控制计在使用前, 由标定仪 (MesaLabs,

Defender510,  $\pm 0.5\%$  精度)进行标定,确保流量计的使用精度。

图 3 给出了甲烷/空气火焰、甲烷掺氨/空气火焰和纯氨/空气火焰的典型图片,从图中可以明显看出纯甲烷燃烧的蓝色火焰、甲烷掺氨燃烧的淡黄色火焰和纯氨燃烧的黄色火焰(彩图见期刊电子版)。在进行测量前,燃烧器先点火预热半小时,等待火焰完全稳定后再进行实验数据采集。

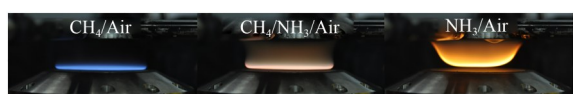


图 3 典型甲烷/空气火焰(左)、甲烷掺氨/空气火焰(中)和纯氨/空气火焰(右)图片

Fig. 3 Typical images of  $\text{CH}_4/\text{air}$  flame (left),  $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{air}$  flame (middle) and  $\text{NH}_3/\text{air}$  flame (right)

图 4 展示了用于甲烷掺氨层流预混火焰温度测量的中红外层析吸收光谱实验系统示意图。使用一台中心波长为  $2.5\ \mu\text{m}$  (DFB, Nanoplus), TO5 封装的窄线宽 ( $< 3\ \text{MHz}$ ) 分布式反馈 (DFB) 激光器作为激光光源来覆盖中心波数在  $4\ 029.52\ \text{cm}^{-1}$  和  $4\ 030.73\ \text{cm}^{-1}$  附近的吸收特征,相应光谱参数见文献[7]。该激光器由低噪音激光器控制器 (LDC501, Wavelength Electronics) 进行电流驱动和温度控制。激光器在不同工作温度下的输出功率与波长随注入电流的变化情况如图 5 所示,输出功率由光功率计 (Ophir Optonics, 3A-ROHS) 标定,输出波长由波长计 (Bristol Instruments, 771B) 标定。通过标定信息,可以粗略估计当开展扫描波长直接吸收光谱测量时的激光器工作温度和波长扫描电流范围。Labview 程序编写的软件函数发生器提供  $100\ \text{Hz}$  的锯齿波扫描信号对激光器进行波长扫描,以覆盖所选的  $\text{H}_2\text{O}$  跃迁谱线(吸收特征),触发采集同步以数据采集卡内部时钟为基准。激光器发射的激光光束直径约为  $3\ \text{mm}$ ,经过伽利略透镜组(凹透镜,焦距为  $-75\ \text{mm}$ ;两个凸透镜,焦距分别为  $200\ \text{mm}$  和  $125\ \text{mm}$ )。经过  $\text{CVL}_2$  准直后的光束,在刚进入火焰位置处的光斑直径约为  $320\ \mu\text{m}$ ,汇聚到火焰中心的光斑直径约为  $250\ \mu\text{m}$ ,刚离开火焰位置处的光斑直径约为  $320\ \mu\text{m}$ ,其中汇

聚到火焰中心的光斑直径由刀片法<sup>[27]</sup>确定。激光穿过待测目标火焰后,经过窄带通滤光片 (Spectrogon, NB-2470-50 nm),最终被汇聚到中红外碲镉汞光电探测器 (VIGO System, PVI-2TE-3) 的敏感区域,其中窄带滤光片被用于降低火焰自发辐射探测信号的影响。垂直分辨率为 16 bits,采样率为每通道  $2\ \text{MS/s}$  的数据采集卡 (NI, USB-6363) 被用于采集光电探测器输出的信号,为了保障吸收特征下充足的数据点数,采样率被设定为  $200\ \text{KS/s}$ 。在每次测量之前,锆标准具(自由光谱范围为  $0.0164\ \text{cm}^{-1}$ )被放置在光学路径中,以将扫描时间转换为相对频率。为了开展具有高空间分辨率的测量,燃烧器被安装在一个高精度线性平移台上,其中平移台在水平和竖直方向上的平移精度为  $10\ \mu\text{m}$ 。本实验在火焰面附近测量的垂直空间分辨率为  $0.25\ \text{mm}$ ,在燃料氧化区后的垂直空间分辨率为  $2\ \text{mm}$ 。值得一提的是,前期通过数值模拟和实验研究发现沿着径向的  $2\ \text{mm}$  的空间分辨率足够用于重建标准层流预混火焰的温度,因此本文对某一高度位置的层析重建分辨率设定为  $2\ \text{mm}$ 。

此外,为了验证测量结果的可靠性,开展了燃烧反应动力学模拟,耦合详细化学反应机理进

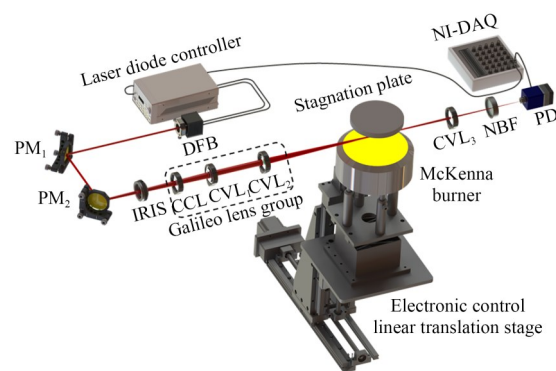


图 4 基于中红外层析吸收光谱的火焰测量实验系统示意图:DFB,分布式反馈激光器;PD,光电探测器;Iris,光阑;CVL,凸透镜;CCL,凹透镜;NBF,窄带滤光片

Fig. 4 Schematic of the mid-infrared absorption tomographic spectroscopy for flame measurements, DFB: distributed feedback laser; PD: photodetector; CVL: convex lens; CCL: concave lens; FM, flat mirror NBF: narrow bandpass filter

行了一维火焰的温度模拟。其中 Okafor 机理被用于模拟温度,该机理包含 59 种组分,356 个基元反应<sup>[28]</sup>。在模拟过程中,采用混合平均的方法确定了组分扩散速度,并使用修正后的速度以确保整体质量守恒。在解能量方程时考虑了主要辐射气体组分(如  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}$ )的热辐射损失,并根据光学薄近似进行了计算。有关自适应网格和收敛标准的详细数值设置可参考作者团队前期研究工作<sup>[29]</sup>,在此不再详细阐述。

为了评估中红外层析吸收光谱技术的可靠性,基于典型非均匀预混火焰的温度重建进行了数值实验。具体方法为,先根据 McKenna 氮气伴流火焰的温度分布构造出玻尔兹曼分布<sup>[7]</sup>,将其作为数值模拟研究的对象。如图 2 所示,依据设定的温度分布函数,按照 2 mm 的空间分辨率对有效吸收光程进行等分,并计算各个径向位置处沿着视线方向的温度分布,进而得到相应的光谱

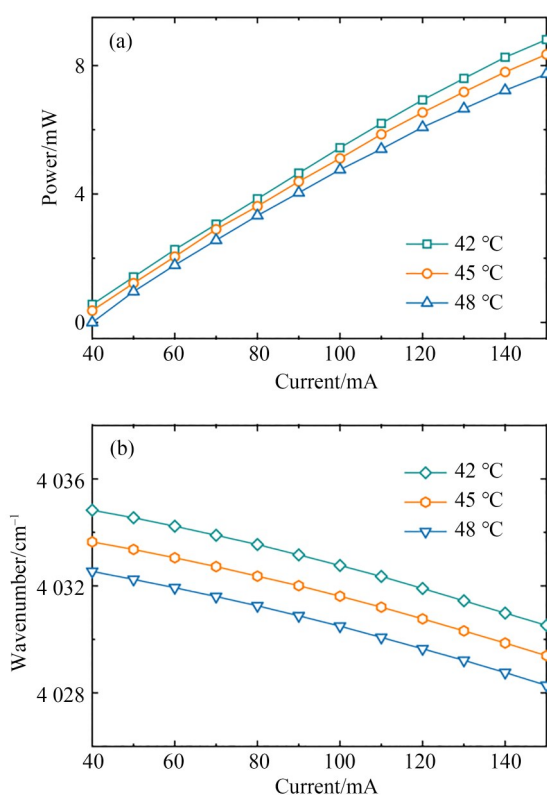


图 5 激光器在不同工作温度(42~48 °C)下(a)功率和(b)波长随注入电流的出光特性

Fig. 5 Output power (a) and emitted wavelength (b) as a function of injection current at different operational temperature

信息。采用 Levenberg-Marquard 算法和 Voigt 线型对光谱进行拟合,得到各径向位置处沿着视线方向的积分吸光度。最后采用离散正则化方法进行 Abel 逆变换,得到投影后的积分吸光度,获取不同径向位置处的温度反演。对中心温度分别为 1 600 K, 1 800 K 和 2 000 K 的火焰温度结果进行了数值模拟研究,模拟结果如图 6 所示。从结果可以看出,层析反演的数值模拟结果与设定的温度结果吻合较好,相对偏差大部分位于 3% 以内,特别是在火焰中心温度区,反演结果具有较高的可靠性。

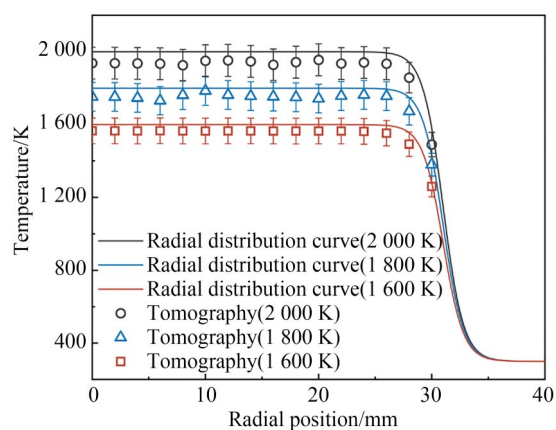


图 6 不同中心温度火焰的反演结果

Fig. 6 Reconstructed results for flames with different central temperature

## 4 结果与讨论

激光通过火焰后,采集到的原始吸收信号如图 7 所示。在这个连续扫描波长的信号中,初始段为低平信号,这是由于此处的激光器电流低于其出光阈值电流,可以利用这部分信号有效扣除外偏置信号。从图中可以看到  $\text{H}_2\text{O}$  分子的多个吸收峰被同时探测,且信噪比好,选定的目标吸收峰在图中被箭头标出。

具有代表性的吸光度和 Voigt 拟合结果如图 8 所示。从图中可以看出甲烷掺氨火焰的吸光度比纯甲烷火焰的吸光度更高,这是因为甲烷掺氨火焰中生成的  $\text{H}_2\text{O}$  更多。目标谱线对吸收特征的实验数据具有良好的信噪比,且能被 Voigt 函数高精度拟合,其中在整个吸收特征范围内拟合残差绝大部分位于 2.5% 以内,在吸收谱线位置

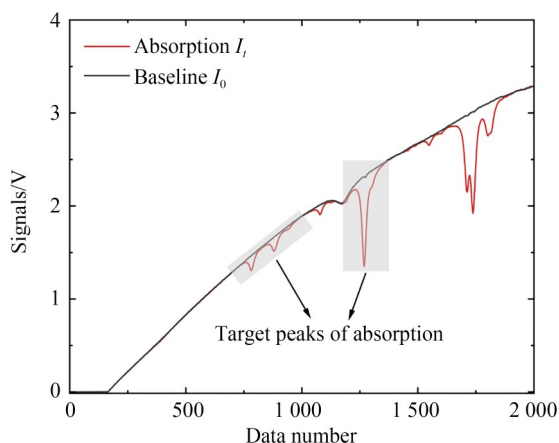


图 7 典型背景基线与吸收光谱的原始信号

Fig. 7 Typical raw baseline and absorption signals

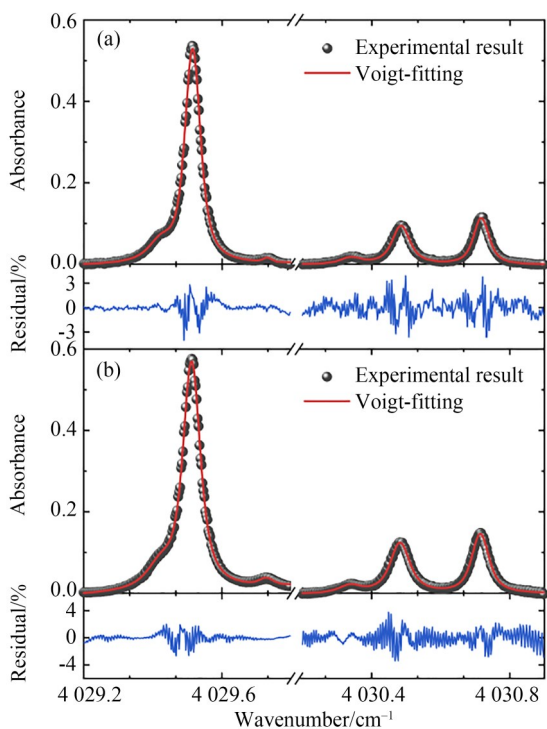


图 8 甲烷火焰(a)和甲烷掺氨(80%)火焰(b)的代表性实验信号与 Voigt 拟合结果

Fig. 8 Representative experimental data and Voigt-fitting profiles in  $\text{CH}_4$  (100%) (a) and  $\text{CH}_4$  (80%)/ $\text{NH}_3$  (20%) (b) flame

处的残差均小于 2.2%。高信噪比的实验数据和高精度的拟合结果表明积分吸光度信息可被高保真地获取。结合 Voigt 拟合残差和光谱参数不确定度,实验测量的不确定度范围在 3.0%~4.5% 之间,相关评估方法见文献<sup>[25, 30]</sup>。

在图 9 给出了混合燃料总流量为 15.8 L/min,化学当量比为 0.8,掺氨比为 60% 时,位于燃烧器上方高度 (Height above the burner, HAB) 为 5 mm 处的径向温度分布。我们通过控制电动平移台往复平移燃烧器进行了 4 次重复实验,从图中可以看出测量到的结果重复性好,且测得的火焰中心温度与化学反应动力学模拟结果吻合较好,初步证实了该方法的可靠性。值得注意的是,在测量结果展示中,给出的是测量信号原始数据经过了 100 次平均的结果,从图 9 的重复性来看,重复性误差低,大部分在 0.5% 以内,由于测量目标火焰是稳定的层流火焰,不存在火焰波动影响的问题。此外,通过图 9 可以看到带有滞止板的层流预混火焰的均匀性较好,沿着径向方向,温度先保持恒定,在距离火焰径向向中心约 27 mm 处开始逐渐下降。从文献中可知<sup>[31]</sup>,对于不带滞止板的自由空间层流预混火焰而言,中心火焰温度开始下降的径向位置在 20~21 mm 附近,本文的测量系统可以解析出该火焰在有无滞止板时的均匀性差异。

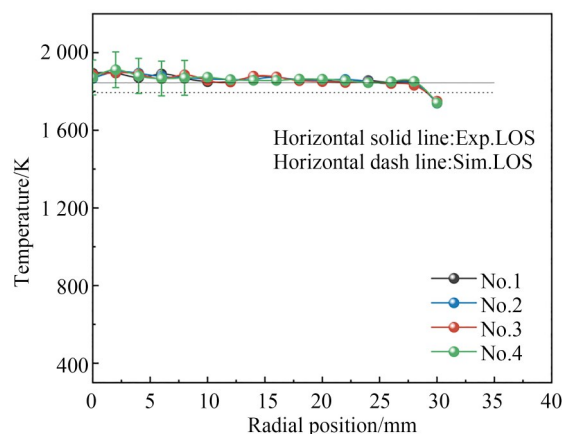


图 9 甲烷掺氨火焰在同一高度下的重复实验结果

Fig. 9 Repeatability measurement results at a fixed HAB for methane-ammonia flame

图 10 展示的沿着火焰径向的温度分布结果表明,当化学当量比变为 0.9 时,掺氨 20% 后的火焰温度分布会随径向距离增加呈现较为缓慢的下降态势。对于 LOS 结果,可以看出实验值与仿真值大体相近且与层析结果保持在 50 K 左右的偏差。对于不同高度的温度分布,可以看出随着高度的增加,火焰温度逐渐下降,这也与仿真

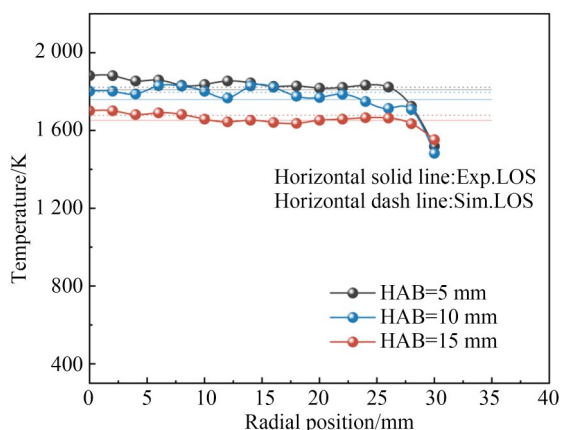


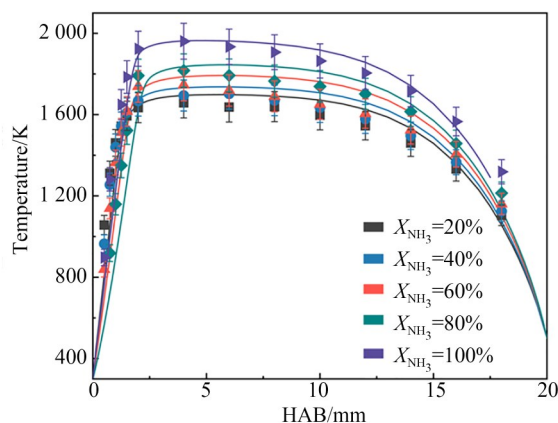
图 10 在 20% 掺氨比下,甲烷掺氨火焰径向温度分布实验结果

Fig. 10 Measured radial temperature distribution in methane-ammonia flames with an ammonia proportion of 20%

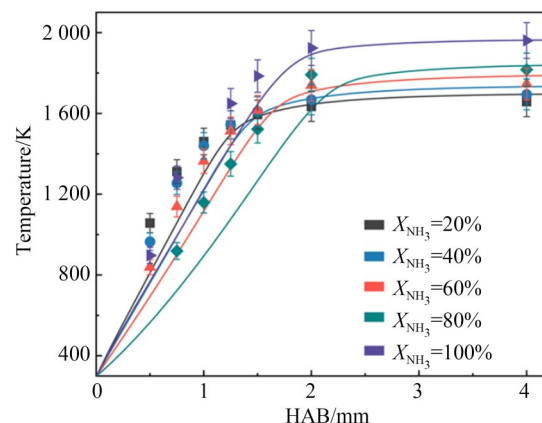
结果展示的趋势一致。

为了探究不同掺氨比( $X_{\text{NH}_3}$ )下火焰沿着轴向

的温度变化规律,我们测量了甲烷掺氨火焰在不同掺氨比( $X_{\text{NH}_3}=20\%\sim 100\%$ )下的燃烧工况,并同时开展了基于详细化学反应机理的 Chemkin 数值模拟研究。由于沿着火焰轴向方向的温度变化是化学反应动力学研究最为关注的信息之一,我们在图 11 中展示了不同工况下的火焰温度轴向分布。从实验和仿真的对比结果可见,实测的温度分布结果趋势在测量不确定度范围内与仿真结果吻合较好(相对偏差在 0.5%~2.1% 之间),火焰的温度起初在较小的高度变化范围内迅速上升,大致在 2~3 mm 范围内到达最大值,随后又逐渐下降。对于甲烷掺氨火焰,掺氨比越高,温度越高,这是由于氨气层流燃烧速度低,此时火焰面更远离燃烧器,对燃烧器的散热量减少,使得温度升高。可以看出本文所发展方法及搭建系统实现了对轴向温度分布和火焰面位置的精准捕捉,实现了对不同燃烧工况温度细微差别的精准解析。



(a) 轴向温度分布实验与仿真结果对比  
(a) Simulated and measured axial distribution



(b) 火焰面附近温度的放大图  
(b) Zoom-in image of the temperature near the flame sheet

图 11 甲烷掺氨火焰在不同掺氨比下

Fig. 11  $\text{CH}_4$  flames with different  $\text{NH}_3$  blending ratios

## 5 结 论

本文开发了一种基于中红外层析吸收光谱技术的甲烷掺氨层流预混火焰温度测量系统,该系统利用  $\text{H}_2\text{O}$  在  $2.5\ \mu\text{m}$  附近的基频谱带内的强吸收谱线实现火焰宽温度范围的探测,解决了甲

烷掺氨火焰热化学结构不明晰,层流预混火焰温度数据较少的问题,并进一步探究了纯氨火焰的温度分布规律。在搭建层析吸收光谱实验系统对典型甲烷掺氨层流预混火焰进行系统性测量之前,基于所选谱线对开展了数值仿真研究,初步验证了方法的可行性,之后进一步开展了耦合

详细化学反应机理的化学动力学模拟进行了对比验证,相关结论如下:

(1)本文开发的测量系统重复性和稳定性好,不仅能捕捉到层流预混火焰沿着轴向和径向的温度分布,还能分辨不同燃烧工况及火焰位置中宽温域范围(800~2 000 K)内的温度细微差别;

(2)纯氨燃料和甲烷/氨气混合燃料的火焰面位置高度在 0.5~2 mm 之间。混合燃料的体

积掺氨比从 20% 到 100% 变化时,火焰的温度范围在 1 600~2 000 K 之间;

(3)通过对火焰温度场的解析,可以看出甲烷掺氨层流预混火焰的均匀性较好,随着掺氨比的增加,火焰中心温度升高;

(4)低碳或零碳氨燃烧系统的研发和改造升级均需要参考准确的温度数据,可以预见,本工作提出的中红外层析吸收光谱检测系统具有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 张莉,薛勃飞,刘玉新,等. 氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究[J]. 科学通报, 2023, 68(23): 3107-3112.  
ZHANG L, XUE B F, LIU Y X, *et al.* A strategic study of ammonia-hydrogen new energy interdisciplinary science frontiers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(23): 3107-3112. (in Chinese)
- [2] 金之钧,张川,王晓峰,等. 关于中国碳中和与能源转型实现路径的思考[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 593-599.  
JIN Z J, ZHANG C, WANG X F, *et al.* A pathway to China's energy transition in a carbon neutrality vision [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 593-599. (in Chinese)
- [3] VALERA-MEDINA A, VIGUERAS-ZUNIGA M O, SHI H, *et al.* Ammonia combustion in furnaces: a review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 1597-1618.
- [4] ZHU X R, DU J G, YU Z, *et al.* NO<sub>x</sub> emission and control in ammonia combustion: state-of-the-art review and future perspectives[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(1): 43-60.
- [5] 康涵,李明海,杨灿,等. 基于裸装热电偶的开放油池火焰测温误差修正方法[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(12): 3474-3479.  
KANG H, LI M H, YANG C, *et al.* Error correction method of pool fire temperature measurement in open space based on bare-bead thermocouple [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(12): 3474-3479. (in Chinese)
- [6] 张天宇,吴嘉雯,方弘毅,等. 航空涡轮叶片表面红外温度测量[J]. 节能技术, 2023, 41(3): 195-202, 223.  
ZHANG T Y, WU J W, FANG H Y, *et al.* Infra-
- red temperature measurement of aircraft turbine blade surface [J]. *Energy Conservation Technology*, 2023, 41(3): 195-202, 223. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 刘英,胡迈,王兴平,等. Ppb级探测灵敏度的CO<sub>2</sub>腔衰荡光谱仪[J]. 光学精密工程, 2023, 31(20): 2921-2929.  
LIU Y, HU M, WANG X P, *et al.* Cavity ring-down spectrometer of CO<sub>2</sub> with ppb detection sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(20): 2921-2929. (in Chinese)
- [9] 杨舒涵,乔顺达,林殿阳,等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(1): 151-157.  
YANG S H, QIAO S D, LIN D Y, *et al.* Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 151-157. (in Chinese)
- [10] 杨天悦,宫廷,郭古青,等. 氨气高精度激光光谱检测装置的设计及实现[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(5): 1129-1136.  
YANG T Y, GONG T, GUO G Q, *et al.* Design and achievement of a device for high-precision ammonia gas detection based on laser spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1129-1136. (in Chinese)

- [11] 余西龙, 曾微, 林鑫, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱诊断技术: 原理和应用[J]. 气体物理, 2016, 1(5): 52-63.  
YU X L, ZENG H, LIN X, *et al.* Tunable diode laser absorption spectroscopy: principle and application[J]. *Physics of Gases*, 2016, 1(5): 52-63. (in Chinese)
- [12] 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): 1904002.  
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): 1904002. (in Chinese)
- [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] 阚瑞峰, 夏晖晖, 许振宇, 等. 激光吸收光谱流场诊断技术应用研究与进展[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911005.  
KAN R F, XIA H H, XU Z Y, *et al.* Research and progress of flow field diagnosis based on laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911005. (in Chinese)
- [15] 王倩, 蔡伟伟, 陶波. 基于层析成像的激光强度分布测量方法[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(4): 743-752.  
WANG Q, CAI W W, TAO B. Laser intensity distribution measurement method based on tomographic imaging[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 743-752. (in Chinese)
- [16] CAI W W, KAMINSKI C F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 59: 1-31.
- [17] LIU C, XU L J, CHEN J L, *et al.* Development of a fan-beam TDLAS-based tomographic sensor for rapid imaging of temperature and gas concentration[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22494-22511.
- [18] LIU C, CAO Z, LIN Y Z, *et al.* Online cross-sectional monitoring of a swirling flame using TDLAS tomography[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(6): 1338-1348.
- [19] CAI W W, KAMINSKI C F. A tomographic technique for the simultaneous imaging of temperature, chemical species, and pressure in reactive flows using absorption spectroscopy with frequency-agile lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(3): 034101.
- [20] 刘博文, 郭晓阳, 胡二江, 等. 氨气掺混乙烯层流燃烧速度测量及动力学分析[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(2): 558-568.  
LIU B W, GUO X Y, HU E J, *et al.* Measurement and kinetic analysis on laminar burning velocities of ammonia/ethylene/air flames[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(2): 558-568. (in Chinese)
- [21] ZHU D H, RUWE L, SCHMITT S, *et al.* Interactions in ammonia and hydrogen oxidation examined in a flow reactor and a shock tube[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2023, 127(10): 2351-2366.
- [22] LIU J X, GAO Q, LI B, *et al.* Ammonia measurements with femtosecond two-photon laser-induced fluorescence in premixed  $\text{NH}_3$ /air flames[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(2): 1177-1183.
- [23] DASCH C J. One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(8): 1146-1152.
- [24] HANSEN P C, O'LEARY D P. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1993, 14(6): 1487-1503.
- [25] SHENG G, MA L, WEN D, *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.
- [26] 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.
- [27] DISO D, PERRONE M R, PROTOPAPA M L. Beam width measurements of asymmetric multi-mode laser beams[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, 31(6): 411-418.
- [28] OKAFOR E C, NAITO Y, COLSON S, *et al.*

- Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of  $\text{CH}_4\text{--NH}_3\text{--air}$  premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 187: 185-198.
- [29] XU L, YAN F W, ZHOU M X, *et al.* An experimental and modeling study on sooting characteristics of laminar counterflow diffusion flames with partial premixing [J]. *Energy*, 2021, 218: 119479.
- [30] 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.
- [31] CHEONG K P, MA L H, WANG Z, *et al.* Influence of line pair selection on flame tomography using infrared absorption spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2019, 73(5): 529-539.

## 作者简介:



陆盛曜(1996—),男,江苏泰州人,硕士研究生,2019年于武汉理工大学获得学士学位,主要研究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: lac-wut-lsy@whut.edu.cn

## 通讯作者:



马柳昊(1990—),男,湖北荆州人,博士,副研究员,硕士生导师,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