

文章编号 1004-924X(2023)19-2799-10

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

刘宁博¹, 赵逸佳¹, 陆盛曜¹, 马柳昊^{1,2*}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 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)

摘要:针对视线效应(Line-Of-Sight, LOS)的双色激光吸收光谱(Laser Absorption Spectroscopy, LAS)火焰测温技术,研究了热化学参数的非均匀分布对碳烟火焰温度测量的影响。优先选出水汽(H_2O)在 $1.3\sim 3.0\ \mu m$ 内的 6 对典型吸收谱线,针对氮气伴流碳烟火焰和空气伴流碳烟火焰,利用高保真光谱数值模拟仿真系统研究了非均匀温度和浓度分布对所选 6 对谱线的测温结果的影响,得到了氮气伴流碳烟火焰和空气伴流碳烟火焰的非均匀性条件。对于氮气伴流碳烟火焰,仿真得到的谱线对 $4\ 029.52\ cm^{-1}/4\ 030.73\ cm^{-1}$ 和 $5\ 553.86\ cm^{-1}/5\ 554.18\ cm^{-1}$ 的最大相对温度偏差分别是 4.72%(最小)和 12.40%(最大)。空气伴流碳烟火焰的谱线对相对温度偏差有正有负,且其最大正负值均出现在 $\delta/L=80\%$ 的非均匀条件下,谱线对 $5\ 553.86\ cm^{-1}/5\ 554.18\ cm^{-1}$ 相对温差的最大正负值分别为 14.43% 和 -2.51%;谱线对 $4\ 029.52\ cm^{-1}/4\ 030.73\ cm^{-1}$ 相对温差的最大正负值分别为 3.22% 和 -13.21%。最后,通过典型谱线对 $4\ 029.52\ cm^{-1}/4\ 030.73\ cm^{-1}$ 的吸收光谱进行了实验验证。实验结果表明:在两种典型碳烟火焰中,谱线对 $4\ 029.52\ cm^{-1}/4\ 030.73\ cm^{-1}$ 对热化学参数的非均匀性不敏感,可以最大程度上减弱热化学参数非均匀分布对其测温结果的影响。

关键词:激光吸收光谱技术;热化学参数非均匀分布;碳烟火焰;温度测量

中图分类号:TN249 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20233119.2799

Influence of non-uniform distributions of thermochemical parameters on measurement of sooting flame temperature by two-color laser absorption spectroscopy

LIU Ningbo¹, ZHAO Yijia¹, LU Shengyao¹, MA Liuhao^{1,2*}

(1. School of Automotive Engineering, 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)

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

Abstract: The influence of non-uniform distributions of thermochemical parameters on the sooting flame

收稿日期:2023-07-13;修订日期:2023-09-05.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 52106221);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)

measurements was comprehensively studied via the line-of-sight (LOS) dual-color laser absorption spectroscopy (LAS) in flame thermometry. Six representative absorption line pairs of water vapor (H_2O) within the wavelength range of 1.3–3.0 μm were selected as optimal for the investigations. High-fidelity spectral simulations were performed to investigate the influence of the non-uniform temperature and concentration distributions on sooting flames with nitrogen and air co-flows. The non-uniformity conditions for sooting flames with nitrogen co-flow and sooting flames with air co-flow were obtained. For sooting flames with nitrogen co-flow, the maximum temperature deviations of the spectral line pairs (4 029.52 cm^{-1} /4 030.73 cm^{-1} and 5 553.86 cm^{-1} /5 554.18 cm^{-1}) were observed to be the smallest (i. e. , 4.72%) and largest (i. e. , 12.40%), respectively. For sooting flames with air co-flow, the temperature deviations exhibited positive and negative values, with the maximum positive and negative values observed under the non-uniformity condition of $\delta/L=80\%$. In particular, the maximum positive and negative temperature deviations were 14.43% and -2.51% for the line pair 5 553.86 cm^{-1} /5 554.18 cm^{-1} , and 3.22% and -13.21% for the spectral line pair 4 029.52 cm^{-1} /4 030.73 cm^{-1} . The numerical simulation results were subsequently compared with experimental measurements using the line pair near 4 029.52 cm^{-1} /4 030.73 cm^{-1} . The experimental results indicated that, in two typical sooting flames, the line pair 4 029.52 cm^{-1} /4 030.73 cm^{-1} can effectively mitigate the influence of non-uniform distributions of thermochemical parameters on the temperature measurement.

Key words: laser absorption spectroscopy; non-uniform distribution of thermochemical parameters; sooting flame; temperature measurement

1 引 言

温度作为表征燃烧流场最重要的热物理化学参数之一,它与燃烧效率、化学反应速率和污染物生成密切相关。精确且高保真的温度数据可以为高温燃烧动力装备的在线监测、性能评估和主动控制提供数据支撑^[1],同时也能给燃烧数值模拟研究中的组分模拟提供可靠的温度边界条件。热电偶是具有代表性的测温技术,操作方便、价格便宜,已被广泛应用于高温火焰温度测量,但侵入式的测量方式会干扰待测目标区域附近的燃烧流场。此外,热电偶与外界也存在显著的辐射热交换,需要修正热损失以获取更可靠的结果。特别地,当应用热电偶测量碳烟火焰温度时,碳烟颗粒在热电偶表面的沉积会加剧热辐射修正的不确定度,同时还会导致热电偶偶丝的直径增大,进一步增大测量结果的不确定度,难以分辨出不同燃烧工况下的细微温度差别。因此,研发精确可靠的非接触式测温方法至关重要。

激光吸收光谱(Laser Absorption Spectroscop-

py,LAS)技术是具有代表性的非接触式测温技术,通过测量特定波长激光穿过待测目标区域前后的光强变化,能够实现温度的快速、定量、免标定以及原位测量^[2-5]。该方法具有高灵敏度、高精度和实验配置布局简单等优点^[6-14],已成功应用于实验级火焰和工业燃烧推进系统的温度测量。当应用LAS技术测温时,由于波长扫描范围较短(1~2 cm^{-1}),碳烟颗粒的消光系数可认为近似不变,因此,由碳烟颗粒导致的激光的强度衰减几乎对扫描波长直接吸收光谱测温技术没有影响,该技术适合碳烟火焰的测量。值得注意的是,LAS是一种基于视线效应(Line-Of-Sight,LOS)的测温方法,适用于均匀燃烧场的温度测量。实际火焰的热物理化学参数沿着光程方向呈现非均匀分布,可能使得LOS测量结果失真。为此,相关学者提出了层析重建技术、非均匀轮廓拟合法和温度分区法来解析光程方向上的温度分布,这些方法已成功应用于火焰温度测量^[2,6,10]。值得一提的是,这些方法往往需要较多的光源以覆盖多波长光谱范围,且需要复杂的信号处理和算法来反演出可靠的温度结果,因此限制了其应用

和普及。

除上述方法外,通过合理的谱线选择来抑制温度和组分浓度非均匀分布的影响也被用于提高 LOS 测温的准确性。Goldenstein 等通过选择谱线强度随温度线性相关的谱线来减小非均匀温度分布的影响^[15],Sepman 等通过利用对温度变化敏感性较低的谱线来最小化非均匀性的影响^[16]。作者团队面向标准层流非碳烟预混火焰^[17]和对冲扩散火焰^[18],基于经典的水汽(H₂O)吸收谱线对,系统研究了非均匀温度和组分分布对双色激光吸收光谱的 LOS 测温结果的影响,发现具备谱线低态能级高、谱线低态能级差异大、低温时谱线强度低和高温时谱线强度高等特征的谱线对适合获得可靠的火焰中心温度。而中心火焰温度是碳烟预混火焰最重要的温度,需要精确且高保真的中心火焰温度来研究化学反应动力学。因此,通过基于视线效应的双色 LOS 来获得可靠的测温结果,需要探索温度和组分非均匀分布对 LOS 测温结果的影响,并发展相关方法以校正该影响。

本文研究了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。首先,基于 H₂O 在 1.3~3.0 μm 内泛频谱带、组合频谱带和基频谱带的若干吸收谱线对,利用光谱数值模拟仿真系统研究了 1 400~2 000 K 内两种层流预混碳烟火焰温度和组分浓度非均匀分布对 LOS 测温的影响。最后,通过典型谱线对(4 029.52 cm⁻¹/4 030.73 cm⁻¹)的激光吸收光谱实验验证了数值模拟结果。

2 双色激光吸收光谱测温基础

LAS 的基本测量原理在文献[19]中已有详细描述,在此仅给出简要介绍。当频率为 ν (cm⁻¹) 的激光穿过长度为 L (cm) 的非均匀待测区域时,根据 Beer-Lambert 定律可以得到透射光强与入射光强的关系:

$$\left(\frac{I_t}{I_0}\right)_{\nu} = \exp(-\alpha_{\nu}) = \exp\left(-\int_0^L S_i(T(r))P(r)X_{\text{abs}}(r)\Phi_{\nu}dr\right), \quad (1)$$

其中: α_{ν} 为光谱吸收度, $S_i(T(r))$ 为谱线强度, $T(r)$, $P(r)$, $X_{\text{abs}}(r)$ 分别为沿光程方向 r 处的温度、压力和浓度, Φ_{ν} 为线型函数且沿着全光谱范围的积分值为 1。因此,光谱的积分吸光度可以表示为:

$$A_i = \int_0^L S_i(T(r))P(r)X_{\text{abs}}(r)dr. \quad (2)$$

对于压力均匀的被测环境,式(2)可简化为:

$$A_i = P \int_0^L S_i(T(r))X_{\text{abs}}(r)dr. \quad (3)$$

因此,双色 LOS 测温技术的温度表达式为:

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_2'' - E_1'')}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) + \ln\left(\frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)}\right) + \frac{hc(E_2'' - E_1'')}{kT_0}}, \quad (4)$$

其中: h 为普朗克常数, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, E'' 表示跃迁的较低状态能量。由式(4)可知,双色 LOS 测温技术受到温度和组分浓度非均匀分布的影响严重。

两种典型碳烟火焰的温度和组分浓度分布均可以通过以下函数描述:

$$f(r) = \begin{cases} \beta_2 + \frac{\beta_1 - \beta_2}{1 + e^{(r - \beta_3)/\beta_4}} & (\text{N}_2\text{-Coflow}) \\ \frac{\beta_1'}{1 + e^{(r - \beta_3')/\beta_4'}} + \frac{\beta_4'}{1 + e^{(r - \beta_5')/\beta_6'}} & (\text{Air-Coflow}) \end{cases}. \quad (5)$$

若 $f(r)$ 为温度分布函数,对于 N_2 伴流碳烟火焰, β_1 和 β_2 分别表示中心和环境温度; β_3 为径向位置,温度为 $(\beta_1 - \beta_2)/2$; β_4 为温度下降区域的梯度;对于空气伴流碳烟火焰, β_1' 和 β_4' 分别表示火焰中心温度和火焰边缘附近的温升; β_2' 和 β_5' 分别表示温度下降和上升的过渡位置; β_3' 和 β_6' 分别为温度下降区域的梯度和逆向温度上升区域的梯度。

3 研究方法

3.1 热化学参数非均匀性及研究案例

两种典型的碳烟火焰图片如图 1 所示(彩图见期刊电子版),图 1(a)是氮气伴流碳烟火焰,图

1(b)为空气伴流碳烟火焰。从图中可以看出显著的高温碳烟辐射以及伴流气体种类对碳烟火焰宽度的影响。在距离燃烧器出口高度 10 mm 的位置,氮气伴流火焰的可视化半径小于 30 mm,空气伴流火焰的可视化半径约为 30 mm 且有蓝色火焰包裹中部高温碳烟,这是由于未燃尽的燃料和可燃中间产物会在燃料流和空气伴流交界面位置燃烧。由于氮气伴流的层流碳烟火焰与伴流氮气和周围环境存在热交换,在火焰边缘附近存在显著的温度和组分浓度非均匀分布。而对于空气伴流的层流碳烟火焰,燃料流和空气伴流交界面位置的局部着火会加剧温度和组分浓度的非均匀分布。

图 2(a)和 2(b)分别给出了氮气伴流和空气伴流层流碳烟火焰温度和组分浓度的分布情况。

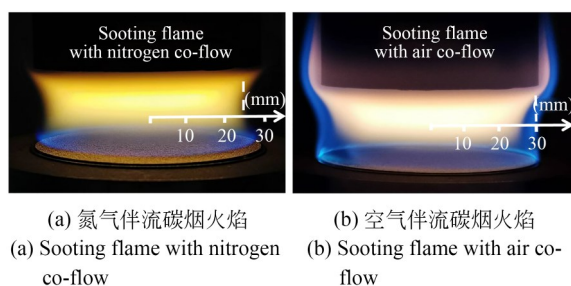


图 1 两种典型碳烟火焰图片

Fig. 1 Images of two typical sooting flame

氮气伴流碳烟火焰的温度和组分浓度在火焰中心区域保持不变,随后沿着光程路径一直下降到环境温度^[20-21]。空气伴流碳烟火焰的温度和组分浓度在火焰中心区域依旧保持不变,但沿着光程路径却呈现出先升高至 2 000 K 左右,再下降至环境温度的趋势。其中,氮气和空气伴流火焰燃烧器的中心多孔介质的直径均为 60 mm,如图 2 中青蓝色阴影区域所示(彩图见期刊电子版)。而图 2 中的灰色阴影区域则表示热化学参数非均匀区域。在氮气伴流碳烟火焰分布中,热化学参数非均匀区域定义为从 99% T_c 的位置到室温位置的距离。在空气伴流碳烟火焰分布中,热化学参数非均匀区域则定义为从 101% T_c 的位置到室温位置的距离。此外,两者的物种浓度非均匀区域均以类似的方式定义。

如图 3 所示,首先输入热化学参数非均匀分布函数,确定的两种火焰分布如图 2 所示,并同步输入来自 HITRAN 数据库^[22]的光谱参数。随后进行光谱仿真,模拟出目标跃迁谱线的吸收特征,并采用 Levenberg-Marquardt (L-M) 算法对吸收特征进行高精度拟合,获取用于计算温度所需的吸收面积。最后,计算拟合得到温度与中心温度的偏差。这里选择典型谱线对 1 进行激光吸收光谱实验,验证数值模拟结果。

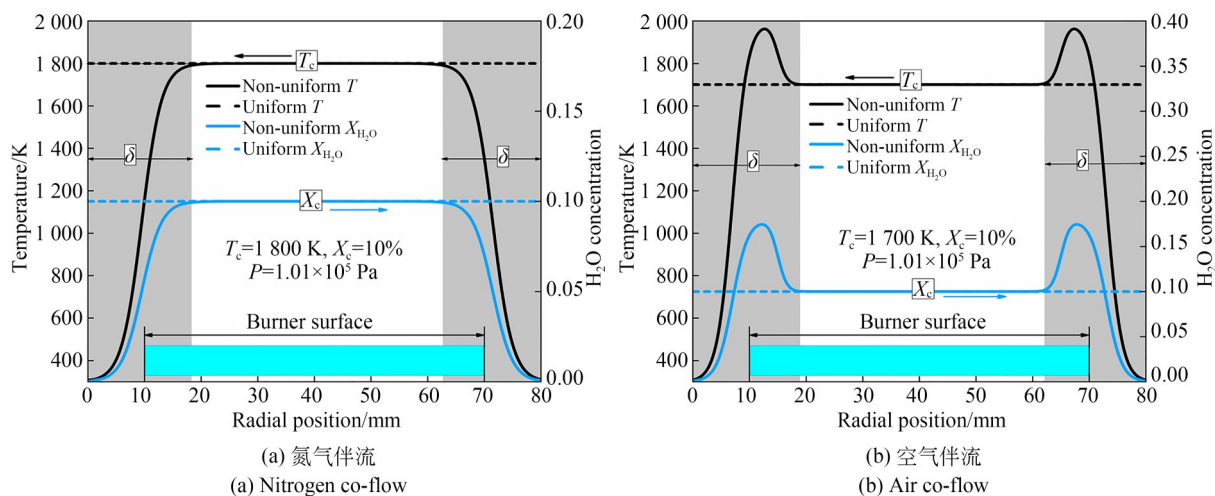


图 2 不同气体伴流碳烟火焰的温度和 H_2O 浓度的径向分布

Fig. 2 Radial distribution of temperature and H_2O concentration of sooting flame with different gas co-flow

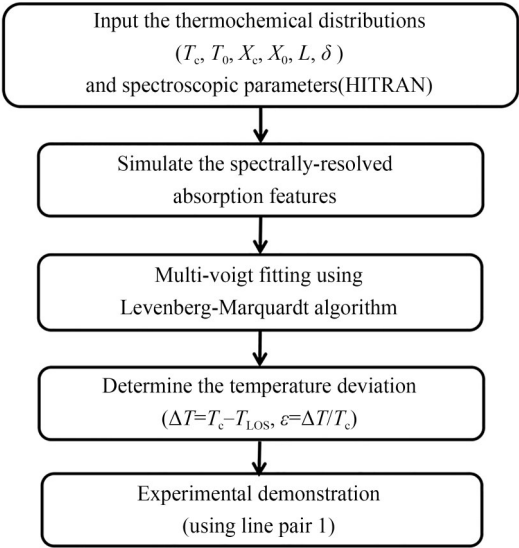


图 3 研究热化学参数非均匀分布对双色激光吸收光谱测温结果影响的流程

Fig. 3 Flow chart to study influence of non-uniform thermochemical distributions on temperature measurement results of two-color laser absorption spectrum

3.2 吸收谱线对选择

双线测温的谱线选择原则在文献[23]已经有很好的描述。本文所选的H₂O吸收谱线,首先应对附近H₂O吸收谱线和其他潜在干扰组分(如CO₂,CO和NO)的吸收谱线有良好的光谱隔离性;其次,在典型火焰工况范围内具有足够大的吸收线强度,以保证足够的探测信噪比;此外,吸收谱线对的低态能级差异要足够大,以保证高测温灵敏度。在数值模拟中,本文选择表1中的所有谱线对。在实验验证时,选择了最具代表性的谱线对1。

4 实验结果与分析

4.1 数值实验

基于表1中的谱线对对两种不同热伴流的碳烟火焰开展数值实验,探究在典型温度范围内(氮气伴流碳烟火焰:1 400~2 000 K;空气伴流碳烟火焰:1 400~1 800 K)热化学参数非均匀性对LOS测量结果的影响。随后,通过实验测量碳烟火焰的激光吸收光谱,研究热化学参数非均匀性对典型谱线对1的影响。

表 1 目标谱线对的光谱参数

Tab. 1 Spectroscopic parameters of target line pairs

Line pair	Frequency/ cm	Wavelength /nm	S@296 K/ (cm ⁻² 10 ⁻⁵ Pa ⁻¹)	
			E''/cm	
1	4 030.73	2 480.94	2.68×10^{-9}	4 889.49
	4 029.52	2 481.69	1.10×10^{-4}	2 660.95
2	3 982.75	2 510.83	5.92×10^{-7}	3 654.04
	3 982.06	2 511.26	9.13×10^{-3}	1 581.33
3	3 459.73	2 890.41	5.14×10^{-6}	3 386.00
	3 460.59	2 889.68	3.32×10^{-3}	2 073.50
4	5 553.86	1 800.57	7.55×10^{-7}	3 314.86
	5 554.18	1 800.45	7.80×10^{-3}	982.91
5	6 806.03	1 469.29	6.40×10^{-7}	3 291.15
	7 185.60	1 391.67	1.96×10^{-2}	1 045.06
6	7 153.74	1 397.87	8.59×10^{-6}	2 552.86
	7 154.35	1 397.75	3.68×10^{-4}	1 789.04

图 4 展示了在不同的热化学参数非均匀条件下,各谱线对的相对温差的云图,其中ε表示相对温差,δ/L表示非均匀程度,点划线表示相对温差

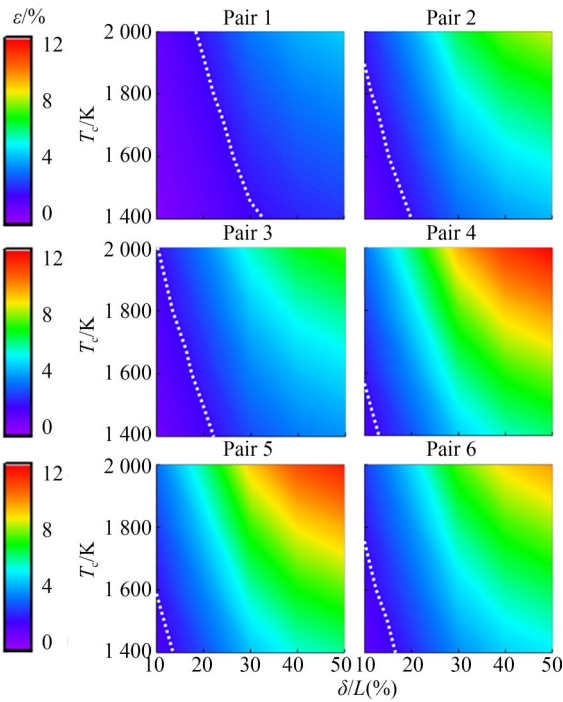


图 4 六组谱线对在测量不同非均匀程度和温度范围的氮气伴流碳烟火焰的温度偏差云图

Fig. 4 Simulated temperature deviation contour of six line pair at different temperatures and non-uniformity level for sooting flame with nitrogen co-flow

为 2% 的等高线。由图 4 可知,在固定的组分浓度非均匀程度下,数值实验得到的相对温差随着 T_c 的增加而增加;在固定的中心温度非均匀程度下,数值实验得到的相对温差也随着组分浓度的增加而增加。总体而言,随着热化学参数非均匀程度的增加,LOS 测量结果所受的影响越大,数值实验得到的相对温差也就越大。具体来说,在数值实验中,同等条件下相对温差最小的是谱线对 1,最大的则是谱线对 4。在最大的非均匀条件 ($\delta/L=50\%$; $T_c=2\,000\text{ K}$; $X_c=10\%$) 下,其相对温差分别为 4.72% 和 12.40%。对于其他谱线对,除谱线对 5 与谱线对 4 的最大相对温差相近外,其余谱线对的最大相对温差均小于 10%。出现上述现象的主要原因是谱线参数中 E''_{Low} 的影响,且 E''_{Low1} 的影响更大。由表 1 可知,相对温差较低的四对谱线 (1, 2, 3, 6) 的 E''_{Low1} 在 $1\,581.33\text{ cm}^{-1}$ 到 $2\,660.95\text{ cm}^{-1}$ 之间,其中相对温差最小的谱线对 1 的 E''_{Low1} 为 $2\,660.95\text{ cm}^{-1}$;而相对温差较为接近的谱线对 4 和谱线对 5 的 E''_{Low1} 分别是 982.91 cm^{-1} 和 $1\,045.06\text{ cm}^{-1}$ 。

图 5 是所选择的谱线对在空气伴流碳烟火焰数值实验中得到的相对温差在不同热化学参数非均匀条件下的云图。其中 ϵ 表示相对温差, δ/L 表示非均匀程度,两条点划线分别是相对温差为 $\pm 2\%$ 的等高线。由图 5 可知,两条白色划线在云图中均有出现,这说明空气伴流碳烟火焰在数值实验中 LOS 确定的温度大于 T_c 。这一现象是由空气伴流碳烟火焰的分布特点导致的,由图 2 可知其特点是沿着光程路径先升高至 $2\,000\text{ K}$ 左右,再下降至环境温度。因此,在数值实验中,通过 LOS 得到的面积比值就会小于 T_c 下的比值,而通过其得到的温度就会大于 T_c ,其相对温差也为负。此外,所有谱线对相对温差的极大正负值均出现在 $\delta/L=80\%$ 的非均匀条件下,且其极大正值出现在 $T_c=1\,800\text{ K}$ 时,极大负值则出现在 $T_c=1\,400\text{ K}$ 时。其中,谱线对 4 相对温差的极大正值为 14.43%,极大负值为 -2.51% ;而谱线对 1 相对温差的极大正值为 3.22%,极大负值为 -13.21% 。特别注意的是,在其余各谱线对中除谱线对 5 与谱线对 4 的数值相差无几外,其余谱线对的相对温差均在 $-10\%\sim 10\%$ 之间。出现上述现象的原因除了谱线参数 E''_{Low} 的影响外,

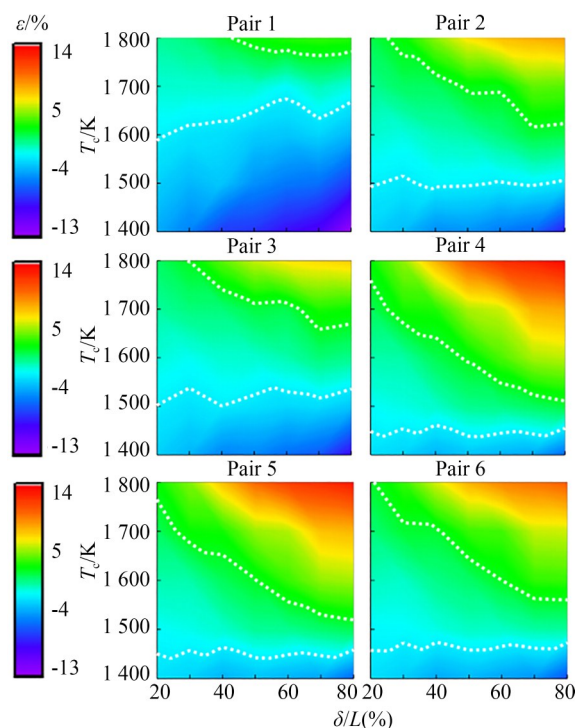


图 5 六组谱线对在测量不同非均匀程度和温度范围的空气伴流碳烟火焰的温度偏差云图

Fig. 5 Simulated temperature deviation contour of six line pair at different temperatures and non-uniformity level for sooting flame with air co-flow

还有各谱线对对热化学参数的敏感性不同。

4.2 实验测量

为了验证数值计算结果,基于 H_2O 在 $2\,482\text{ nm}$ 附近的吸收特征,针对目标碳烟火焰进行了实验测量。目标层流乙烯 (C_2H_4)/空气预混碳烟火焰由标准层流预混 McKenna 燃烧器产生,该燃烧器中心为直径 60 mm 的烧结多孔介质圆盘,经过预混的燃料与空气通过此圆盘,并在圆盘上方稳定燃烧。圆盘外环由环形的烧结多孔介质组成,氮气 (N_2) 伴流经过此环形多孔介质将火焰与外界空气隔离开。高纯度 C_2H_4 (99.95%)、空气 (99.99%) 和 N_2 伴流 (99.99%) 的流量由预先经过标定的质量流量控制器 (Sevenstar, $\pm 1\%$ 的精度) 精准控制。本实验工况与前期研究^[21,23]保持一致,燃料与空气混合物的总流速设置为 10 L/min 。通过将 C_2H_4 和空气流量调节至 $1.174/8.826\text{ L/min}$, $1.282/8.718\text{ L/min}$ 和 $1.387/8.614\text{ L/min}$, 获得 3 组典型化学当量比 ($\Phi=1.9, \Phi=2.1, \Phi=2.3$) 的火焰工况。本文共设计

6 组工况实验,其中氮气和空气伴流碳烟火焰各 3 组。为了避免火焰周围空气流动对火焰稳定性的影响,氮气伴流流量设置为 10.8 L/min。此外,为了削弱火焰抖动以获得更好的火焰稳定性,在多孔介质圆盘上方 21 mm 处放置一块直径为 60 mm 的不锈钢块。

碳烟火焰测量实验系统示意图如图 6 所示。本实验利用一个输出单色、连续光的可调谐中红外分布式反馈激光器,覆盖位于 2 482 nm 附近的吸收特征。激光器的工作温度由低噪声激光驱动与温度控制器(Wavelength Electronics, LDTC 0520)精确控制,在整个实验过程中,温度波动在 $\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。使用函数发生器(TekTronix, AFG3052C)产生的三角波以 2 kHz 扫描激光器驱动电流,从激光器出射的激光穿过火焰,并由凸面镜聚焦到光电探测器上。为了减弱火焰辐射对探测信号的影响,在光电探测器之前放置窄带滤光片。通过高速数据采集卡(National Instruments, PCI-6110)对光电探测器输出的信号进行采样,采样率为 4.96 Ms/s。除了光学测量之外,本实验还采用直径为 0.254 mm 的细线 B 型(Pt-30%Rh 与 Pt-6%Rh)热电偶(Omega)进行对比测量。考虑到热损失校正和读取误差,对测量的原始热电偶数据进行了校正^[24-25]。

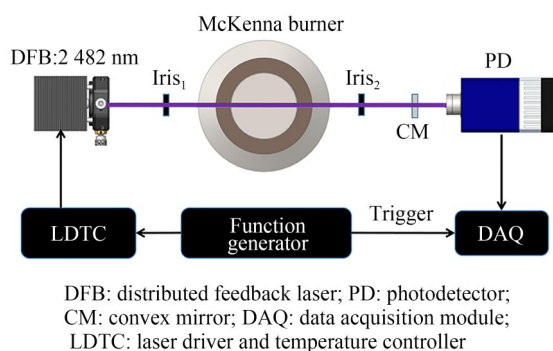


图 6 层流预混碳烟火焰的激光吸收光谱测量示意图

Fig. 6 Schematic of laser absorption measurement setup for laminar premixed sooting flames

具有代表性的吸收光谱原始信号、基线拟合后吸光度和 Voigt 函数拟合结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,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,在整个吸收特征范围内的拟合残差绝大部分

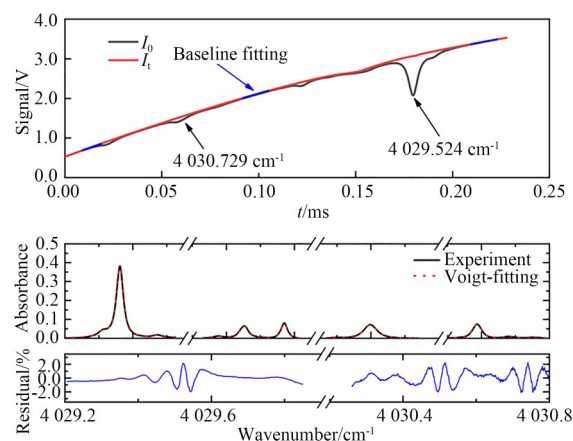


图 7 代表性实验测量的吸收光谱原始信号,基线拟合后吸光度和 Voigt 函数拟合结果

Fig. 7 Representative measurement of raw absorption signals, absorbance and residual with Voigt-fitting profiles

位于 2.0% 以内,在波数为 $4\,029.52\text{ cm}^{-1}$ 和 $4\,030.73\text{ cm}^{-1}$ 时,其数值分别为 2.18% 和 2.24%。高质量的实验数据和高精度的拟合结果表明,从实验测量光谱中能获取高保真的积分吸光度信息。

图 8 给出了燃烧器出口上方 3 mm 位置处,不同化学当量比(Φ)下两种碳烟火焰的 LOS 和热电偶测量结果。在典型碳烟火焰工况下,双色激光吸收光谱测量捕捉到火焰中心温度随 Φ 的增加而降低的现象,这是因为随着当量比升高,空气越来越少,燃料愈加不充分燃烧。此外,

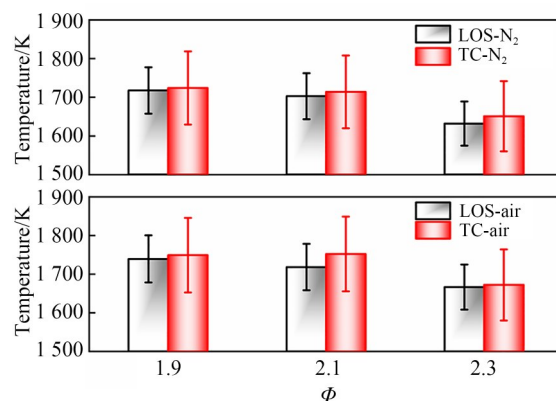


图 8 基于视线效应的 LAS 与热电偶测量不同化学当量比下火焰中心温度的对比

Fig. 8 Comparison of flame center temperature at different Φ using LOS-LAS and thermocouple measurement

LOS测得的中心温度均略低于热电偶测量值,这来源于非均匀温度和水汽浓度分布。值得注意的是,两种测温结果的偏差较小,在氮气伴流火焰中为0.41%~1.23%,在空气伴流中则为0.36%~1.98%,均在可接受范围内,进一步证明了4 029.52 cm^{-1} 和4 030.73 cm^{-1} 吸收谱线对的可靠性。依据文献[18],碳烟火焰在3 mm处的非均匀性较小,从图4和图5中谱线对1的温度偏差结果云图可知,在1 631~1 739 K内,非均匀温度和组分浓度分布带来的误差为0.8%~1.8%。这解释了基于LOS的LAS测量结果与热电偶测量结果差异较小的原因。

5 结 论

在氮气伴流碳烟火焰数值实验中,谱线对的相对温差随着热化学参数非均匀分布的增大而增大。此外,由于谱线参数 E''_{Low} 的影响,谱线对1和4在同等条件下的相对温差分别最小和最

大,其数值分别为4.72%和12.40%。在余下谱线对中,除谱线对5的相对温差超过10%外,其余谱线对的相对温差均小于10%。在空气伴流碳烟火焰数值实验中,由于火焰分布的自身特点,谱线对的相对温差结果有正有负。又受谱线对对热化学参数的敏感性不同和谱线参数 E''_{Low} 数值的综合影响,数值实验得到的谱线对相对温差的极大正值均出现在 $\delta/L=80\%$ 的非均匀条件下,极大正值出现在 $T_c=1\ 800\text{ K}$ 时,极大负值出现在 $T_c=1\ 400\text{ K}$ 时。具体而言,谱线对4相对温差的极大正值为14.43%,极大负值为-2.51%;谱线对1相对温差的极大正值为3.22%,极大负值为-13.21%。除此之外,谱线对5的极大相对温差正值超过10%,其余谱线对的相对温差则在-10%~10%。随后,本文对代表性谱线对1进行了碳烟火焰的激光吸收光谱实验,实验结果证明了数值实验的可靠性,也论证了4 029.52 cm^{-1} 和4 030.73 cm^{-1} 吸收谱线对在测量碳烟火焰中心温度上的可靠性。

参考文献:

- [1] 吴军,宋丰成,潘智祥,等.采用干涉条纹影法的轴对称温度场测量[J].光学精密工程,2023,31(2):150-159.
WU J, SONG F CH, PAN ZH X, *et al.* Measurement of axisymmetric temperature field by interference fringe Schlieren method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(2):150-159. (in Chinese)
- [2] 洪廷姬,宋俊玲,王广宇,等.激光吸收光谱技术测量非均匀燃烧流场研究进展[J].航空学报,2015,36(3):724-736.
HONG Y J, SONG J L, WANG G Y, *et al.* Review on the research of non-uniform combustion field measurement using laser absorption spectroscopy technique [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3):724-736. (in Chinese)
- [3] 彭于权,阚瑞峰,许振宇,等.基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的甲烷/空气预混平焰炉温度测量[J].大气与环境光学学报,2019,14(3):229-234.
PENG Y Q, KAN R F, XU ZH Y, *et al.* Temperature measurement of CH_4/Air premixed flat flame burner based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(3):228-234. (in Chinese)
- [4] 洪廷姬.燃烧场吸收光谱诊断技术研究进展[J].实验流体力学,2014,28(3):12-25.
HONG Y J. Progress in absorption spectroscopy diagnosis techniques for combustion flowfields [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(3):12-25. (in Chinese)
- [5] 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 ZH 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)
- [6] 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 ZH, 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)
- [7] 李明星,陈兵,阮俊,等.近海大尺度区域二氧化碳的激光在线探测技术[J].光学精密工程,2020,28(7):1424-1432.

- LI M X, CHEN B, RUAN J, *et al.* On-line detection of carbon dioxide in large scale offshore by laser technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(7): 1424-1432. (in Chinese)
- [8] 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): 0911001.
- NIE W, KAN R F, YANG CH G, *et al.* Application and research progress of tunable diode laser absorption spectroscopy technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911001. (in Chinese)
- [9] 许超, 王辽, 钟晨光, 等. 吸收光谱法冲压发动机隔离段来流质量的流量测量[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1888-1895.
- XU CH, WANG L, ZHONG CH G, *et al.* Measurement of flow flux for scramjet isolator inflow based on absorption spectroscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 1888-1895. (in Chinese)
- [10] 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): 1900005.
- 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]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2022, 59(19): 1900005. (in Chinese)
- [11] 潘云, 李颐, 颜昌翔. TDLAS—一氧化碳浓度检测系统误差分配[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(7): 1539-1548.
- PAN Y, LI Y, YAN CH X. Error distribution for TDLAS carbon monoxide concentration measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(7): 1539-1548. (in Chinese)
- [12] 许振宇, 刘文清, 刘建国, 等. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的温度测量方法研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(23): 232-239.
- XU ZH Y, LIU W Q, LIU J G, *et al.* Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 232-239. (in Chinese)
- [13] 贾良权, 祁亨年, 胡文军, 等. 种子呼吸CO₂浓度检测系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(6): 1397-1404.
- JIA L Q, QI H N, HU W J, *et al.* CO₂ concentration detection system for seed respiration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6): 1397-1404. (in Chinese)
- [14] 袁峰, 高晶, 姚路, 等. 球载CRDS高灵敏度甲烷测量系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1881-1892.
- YUAN F, GAO J, YAO L, *et al.* Development of highly sensitive balloon-borne methane measurement system based on cavity ringdown spectroscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1881-1892. (in Chinese)
- [15] GOLDENSTEIN C S, SCHULTZ I A, JEFFRIES J B, *et al.* Two-color absorption spectroscopy strategy for measuring the column density and path average temperature of the absorbing species in nonuniform gases[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(33): 7950.
- [16] SEPMAN A, ÖGREN Y, QU ZH CH, *et al.* Real-time *in situ* multi-parameter TDLAS sensing in the reactor core of an entrained-flow biomass gasifier[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4541-4548.
- [17] MA L H, CHEONG K P, YANG M, *et al.* On the quantification of boundary layer effects on flame temperature measurements using line-of-sight absorption spectroscopy[J]. *Combustion Science and Technology*, 2022, 194(16): 3259-3276.
- [18] 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.
- [19] HANSON R K, SPEARRIN R M, GOLDENSTEIN C S. *Spectroscopy and Optical Diagnostics for Gases* [M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [20] MA L H, DUAN K, CHEONG K P, *et al.* Multispectral infrared absorption spectroscopy for quantitative temperature measurements in axisymmetric laminar premixed sooting flames[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 28: 101575.
- [21] OLOFSSON N E, BLADH H, BOHLIN A, *et al.* Are sooting premixed porous-plug burner flames one-dimensional? A laser-based experimental investigation[J]. *Combustion Science and Technology*, 2013, 185(2): 293-309.
- [22] GORDON I E, ROTHMAN L S, HARGREAVES R J, *et al.* The HITRAN2020 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 277: 107949.

- [23] WU Q, WANG F, LI M Y, *et al.* Simultaneous *In-situ* measurement of soot volume fraction, H_2O concentration, and temperature in an ethylene/air premixed flame using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Combustion Science and Technology*, 2017, 189(9): 1571-1590.
- [24] MCENALLY CS, KÖYLÜ ÜÖ, PFEFFERLE LD, *et al.* Soot volume fraction and temperature measurements in laminar nonpremixed flames using thermocouples[J]. *Combustion and Flame*, 1997, 109(4): 701-720.
- [25] MA L H, NING H B, WU J J, *et al.* In situ flame temperature measurements using a mid-infrared two-line H_2O laser-absorption thermometry [J]. *Combustion Science and Technology*, 2018, 190(3): 393-408.

作者简介:



刘宁博(2001—),男,河南项城人,主要从事燃烧激光吸收光谱诊断和高温传感器研发方面的研究。E-mail: liu313555@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,2012年、2015年于华中科技大学分别获得学士和硕士学位,2019年于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