

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.06.006

基于辐射光谱的对冲扩散火焰碳烟温度和体积分数的测量实验研究

李磊¹, 周梦祥¹, 温大新¹, 王宇^{1,2}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 对冲扩散火焰是研究碳烟生成特性的理想平台, 温度是碳烟生成的重要影响因素, 碳烟体积分数是衡量碳烟生成率的重要指标, 因此对冲火焰中碳烟温度和体积分数的准确测量对于开发减少碳烟排放策略至关重要。文章基于碳烟多光谱辐射(soot spectral emission, SSE)方法同步测量对冲火焰中的碳烟温度和体积分数。考虑到对冲火焰空间尺度小, 需要较高测量空间分辨率和位置精度的特点, 开发一种用于对冲火焰精准测量定位的方法, 有效地提高实验测量的位置精度; 同时建立一套基于热电偶的光谱响应函数原位标定系统; 最后使用 SSE 方法对常压环境不同工况下乙烯对冲扩散火焰的碳烟温度和体积分数进行测量。测量结果验证了对冲火焰碳烟温度场和浓度场的准一维性质; 通过与消光法实验数据和采用详细化学反应机理的数值计算结果的对比, 验证了 SSE 方法测量对冲火焰中碳烟温度及体积分数分布的可行性。

关键词: 碳烟; 对冲扩散火焰; 碳烟光谱辐射(SSE); 光谱响应函数

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)06-0753-08

Measurements of soot temperature and volume fraction in counterflow diffusion flames based on spectral emissions

LI Lei¹, ZHOU Mengxiang¹, WEN Daxin¹, WANG Yu^{1,2}

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China)

Abstract: Counterflow diffusion flame is an ideal platform to investigate formation characteristics of soot. Temperature is an important factor to affect the formation of soot, and soot volume fraction is a key index to evaluate the soot formation rate. Hence, the accurate measurements of soot temperature and volume fraction in the counterflow flames are very important for developing strategies to reduce the soot emission. In this paper, soot temperature and volume fraction in ethylene counterflow diffusion flames were measured based on the soot spectral emission(SSE). Considering the requirement for the high spatial resolution and position accuracy due to the small spatial scale of the counterflow flames, a precise positioning method for the counterflow flames was developed, which can effectively improve the position accuracy of experimental measurement. At the same time, a spectral response function calibration system based on thermocouple was established. Finally, SSE method was used to measure the soot temperature and volume fraction of ethylene counterflow diffusion flames at atmospheric pressure under different working conditions. The experimental results verify the quasi one-dimensional properties of the soot temperature field and soot concentration field in the counterflow flames. Compared with the experimental data of light extinction method and the numerical results u-

收稿日期:2020-10-18;修回日期:2020-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51976142);浙江省重点研发计划资助项目(2018C03037)

作者简介:李磊(1995—),男,湖南常德人,武汉理工大学硕士生;

王宇(1985—),男,安徽六安人,博士,武汉理工大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:yu.wang@whut.edu.cn.

sing detailed chemical reaction mechanism, the feasibility of SSE method to measure soot temperature and volume fraction in the counterflow flames is verified.

Key words: soot; counterflow diffusion flame; soot spectral emission(SSE); spectral response function

0 引 言

碳烟是碳氢燃料不完全燃烧所产生的碳质颗粒,是柴油机、航空发动机、锅炉等实际动力装置易产生的主要污染物之一,对环境、气候及人体健康均有不良影响^[1]。深入理解碳烟的形成机理是开发有效减少碳烟排放策略的重要前提。碳烟的形成过程非常复杂,包括燃料裂解、多环芳香烃(PAH)形成、碳烟成核、表面生长、凝结、氧化等复杂物理化学过程^[2]。即使经过数十年的研究^[3-5],人类对碳烟生成具体机制的理解也依然不足。因为实际动力装置内燃烧工况十分复杂,不利于通过控制单一变量来进行机理研究,所以碳烟研究者通常以可控的实验室层流火焰作为研究对象。

为了更加深入地研究碳烟生成规律,为碳烟预测模型的开发提供数据支撑,火焰中碳烟温度场和浓度场的测量十分关键。碳烟多光谱辐射(soot spectral emission, SSE)分析法具有非接触式测量及实验装置简单的特点,是同步测量碳烟温度和体积分数的重要手段。然而,已有的基于 SSE 方法的研究主要针对射流扩散火焰^[6-9],使用 SSE 方法研究对冲扩散火焰中碳烟生成特性的报道并不多。而对冲火焰由于其准一维性、便于单一变量控制以及是层流火焰面模型的具体物理实现等特点,在碳烟生成机理的研究方面日益受到关注^[10]。相对射流火焰而言,对冲火焰空间尺度较小,轴线上的温度梯度和碳烟体积分数梯度较大,因此测量时需要更高的空间分辨率和位置精度。

此外,与射流火焰中碳烟主要存在于温度较高的火焰面区域不同,对冲火焰中碳烟在成核后会随着气体的流动运动到滞止面附近,而滞止面离火焰面较远温度较低,此处碳烟辐射信号相对较弱,可能导致 SSE 法测量对冲火焰碳烟辐射时存在信噪比低的问题,因此 SSE 方法对对冲火焰的适用性亟待验证。

本文首次建立一套基于 SSE 方法的对冲火焰碳烟测量系统,考虑到对冲火焰尺测量时高空间分辨率和高定位精度的需求,同时开发一套精准测量定位系统,为实现光谱测试系统的响应校准,建立一套利用热电偶进行辐射强度原位标定的系统;该系统装置简单、操作方便,几乎无附加

成本;最后利用 SSE 方法研究对冲火焰中碳烟温度分布和碳烟体积分数分布,并与激光消光法的测量结果进行对比,验证本文方法在对冲火焰中的适用性。

1 实验原理

SSE 方法的基本原理基于普朗克黑体辐射定律,即温度为 T 的黑体在垂直其表面的传输方向上的辐射强度公式为:

$$I_{b,\lambda}(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (1)$$

其中: c_1 为常量, $c_1 = 1.191 \times 10^{-16} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$; c_2 为常量, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; λ 为波长; T 为温度。

对于 380~780 nm 可见光波段内的辐射而言, $hc/(\lambda T) \gg 1$,则(1)式可以简化为:

$$I_{b,\lambda}(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)}} \quad (2)$$

对冲火焰中的高温碳烟同样会向外进行热辐射,而通过测量其热辐射的光谱特征和辐射强度可以获得辐射源(即碳烟)的温度和浓度。

在测量过程中,探测器所获得的信号为沿视线(径向)方向上各点碳烟的辐射强度的积分值,如图 1 所示。

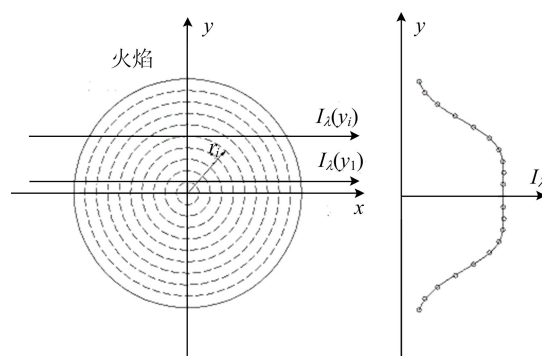


图 1 实验测量示意图

各点碳烟辐射强度的积分值可以通过下式^[5]计算得出:

$$I_{\lambda}(y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} k_{\lambda}(x, y_i) I_{b,\lambda}(T(x, y_i)) A(x, y_i) dx \quad (3)$$

其中: $A(x, y_i) = \exp\left(-\int_x^{\infty} k_{\lambda}(x', y_i) dx'\right)$ 为沿视

线辐射的总衰减,表征 x 点处碳烟辐射在到达探测器值前在火焰中的自吸收; k_λ 为吸收系数。

实验测量值为沿视线方向上的辐射强度积分值,视线方向局部辐射强度值则需要通过层析反演获得。

已有研究表明,当火焰光学厚度小于0.3时,自吸收影响较小^[7],忽略自吸收即可使得对冲火焰辐射具有轴对称的特性,大大简化了层析反演的难度,则(3)式可以相应简化为:

$$I_\lambda(y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} k_\lambda(x, y_i) I_{b,\lambda}(T(x, y_i)) dx \quad (4)$$

利用 Abel 逆变换(剥洋葱法(OP)和 Tikhonov 正则化^[11]),将辐射强度积分值 I_λ 层析反演得到局部辐射强度 G_r ,即 $k_\lambda(x, y) I_{b,\lambda}(T(x, y))$ 。

依据 RDG-FA 理论,吸收系数 k_λ 与碳烟体积分分数 φ 具有如下关系:

$$k_\lambda = \frac{6\pi E(m)_\lambda \varphi}{\lambda} \quad (5)$$

其中, $E(m)_\lambda$ 为碳烟吸收函数,为便于与激光消光法实验数据进行比较,本实验中 $E(m)_\lambda$ 取值均为0.26^[12-13]。

联合(2)式和(5)式,并将方程两边取对数,可得:

$$\ln G_r = \ln \left(\frac{6\pi E(m)_\lambda \varphi}{\lambda} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi e^{c_2/\lambda T}} \right) \quad (6)$$

将(6)式进行相应变换,常数项分离后移到方程右边,用 c_3 表示,可以得到:

$$\ln \frac{E(m)_\lambda}{G_r \lambda^6} = \frac{c_2}{\lambda T} + c_3 \quad (7)$$

以波长倒数为横坐标,以(7)式左边项为纵坐标做出散点图,利用最小二乘法拟合出一条线性回归线,该直线的斜率即 c_2/T ,由此便可求出碳烟温度 T 。

在温度已知的情况下可以计算出吸收系数 k_λ ,利用(5)式可最终求出碳烟体积分分数 φ 。

2 实验装置及方法

2.1 对冲火焰燃烧器及测量装置

本文所采用的实验装置如图2所示,所用对冲火焰燃烧器与文献[14]中相同,燃烧器整体放置在电动位移平台上。火焰中碳烟的辐射依次通过光阑、滤光片,由透镜汇聚到光纤上,然后通过光纤传输到光谱仪内部,衍射光栅分光后由光谱 CCD 相机进行不同波长下辐射强度的检测和信号读取。

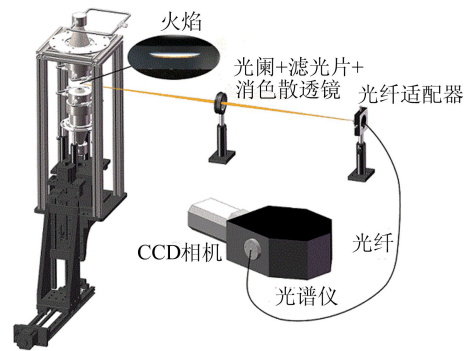


图2 实验装置

在图2实验系统中,通过调节光阑孔径使得系统 f 值(透镜焦距/光阑孔径)为50,以保证系统具备足够大的景深;截止波长为400 nm的滤光片可以过滤掉400 nm以下的辐射信号,消除高阶衍射对550~750 nm波段辐射信号的影响;同时,将整套装置置于暗光环境中,以减少外界光源对实验结果的干扰。

2.2 探测点的定位

虽然对冲火焰空间尺寸较小,但其沿轴线上的温度和碳烟体积分分数梯度较大,因此实验测量需要足够高的空间准确性和空间分辨率。在该套系统中,探测原点的位置为燃烧器下喷嘴(燃料)中心。为了保证实验测量的空间分辨率,选定纤芯为100 μm 的光纤,透镜焦距和物距、像距的选择保证1:1成像,此时测量的空间分辨率约为100 μm 。测量位置的变化通过电动位移平台移动燃烧器实现,而光学系统始终保持不变。

测量位置的确定经过粗定位和精准定位2步实现。进行粗定位时,利用准直激光,将透镜中心、光纤探头以及燃烧器下喷嘴的中心调节至同一水平直线上,此时能确保光纤探头接收到的光信号处于燃烧器轴线上,并且此时测量原点与燃料喷嘴处的中心基本重合。但由于激光的光斑较大(0.6 mm),此时确定的原点位置仍不够精准,还需要进一步提高位置精度。本实验室常用的探针外径很小(直径为0.19 mm),其横截面在受热后形成较小的发光点,较适用于精准定位。

精准定位原理示意图如图3所示。

将探针固定在两喷嘴之间,使得探针端点位于喷嘴中轴线上,且与喷嘴相平行,利用侧面的相机测量并记录探针与下喷嘴的距离。确定好位置后点燃火焰,使探针在无碳烟蓝色火焰中受热发光。通过上下调节电动平移台,记录下信号最强的点,即发光点位置,然后根据相机记录得到的探针和喷嘴的距离,利用两者的差值微调原点位置,

即可保证探测坐标原点与燃料喷口的中心点精准重合。

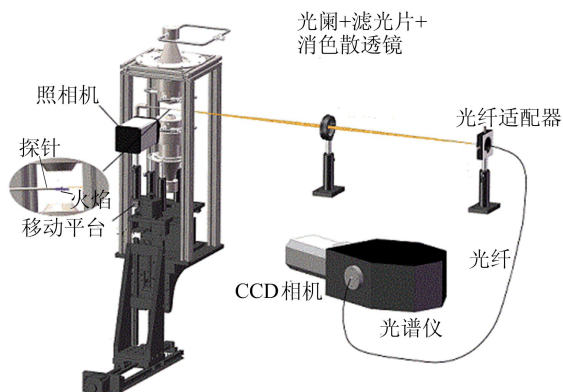


图 3 精准定位原理示意图

2.3 光谱测量系统的辐射响应标定

实验装置中光谱相机的量子效率与波长相关,且所使用的各种光学元件透射率也与波长相关。因此光谱测量系统的响应标定十分关键。一般情况下,将标准黑体炉的理论辐射曲线与所用光谱仪测量出的光谱曲线进行对比,即可得到光谱系统的响应曲线,但黑体炉价格较为昂贵,且体积较大,不方便用于原位标定。

R 型热电偶受热发出的辐射很稳定,在已知其温度和辐射率的情况下可以简单得出辐射强度值,因此成本较低的 R 型热电偶也可以作为标定源^[15]。

当利用热电偶进行辐射强度标定时,将图 3 中的探针替换为热电偶,并将其置入无碳烟蓝色火焰中。通过调节火焰工况和热电偶在火焰中的位置,测量 1 350~1 530 K 范围内多个温度下的热电偶辐射信号值 S_λ 。

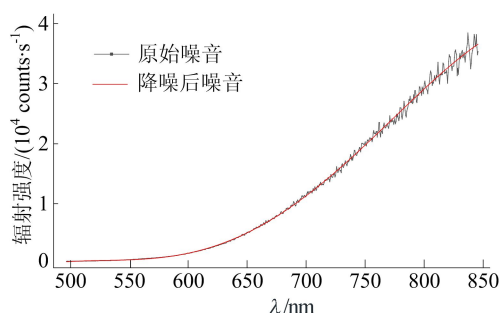
当温度为 1 517 K 时,热电偶的辐射信号如图 4a 所示,波长小于 550 nm 的辐射信号相对过弱,而大于 750 nm 的辐射信号中噪音信号较大(由光谱相机 CCD 光学特性决定),因此为了保证标定精度和实验精度,实验中采用 550~750 nm 波段的信号进行分析计算。

通过基于波长辐射函数的一点标定法^[16]校正标定温度(1 517 K)的辐射信号值后,利用公式即可得到光谱测量系统对不同波长的辐射强度响应 $\eta(\lambda)$,其结果如图 4b 所示。该辐射强度响应 $\eta(\lambda)$ 计算公式为:

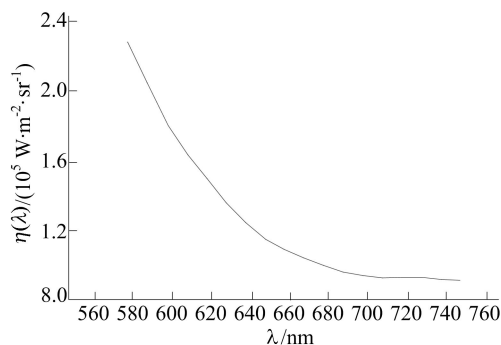
$$\eta(\lambda) = \frac{S_\lambda}{\varepsilon(\lambda) I_{b,\lambda}(T)k} \quad (8)$$

其中: $\varepsilon(\lambda)$ 为 R 型热电偶的辐射率^[15]; k 为无量纲

常数,与热电偶结点发光面积相关,通过对比同一工况、同一位置消光法与 SSE 方法分别测得的辐射率 k_λ ,可得 k 的取值为 0.32。



(a) 热电偶(1 517 K)辐射信号



(b) 光谱仪响应曲线

图 4 光谱仪辐射强度响应标定

为了验证标定的准确性,对不同温度下测量的热电偶辐射信号利用辐射响应函数得到其辐射强度 I_λ 后,使用 SSE 方法测量热电偶的温度,测量结果与热电偶显示温度的偏差见表 1 所列。从表 1 可以看出,两者的偏差在 $\pm 0.37\%$ 以内,表明热电偶的辐射很稳定,利用其标定光谱系统响应的精度较高。

表 1 热电偶显示温度与计算温度的对比

热电偶显示温度/K	SSE 测量温度/K	绝对偏差/K	相对偏差/%
1 353	1 349	-5	-0.37
1 395	1 398	3	0.22
1 436	1 435	-1	-0.07
1 487	1 489	2	0.13
1 529	1 527	-2	-0.13

3 实验结果与分析

3.1 实验工况

在本文实验中,对冲火焰燃烧器燃料端和氧化剂端气体出口流速均为 20 cm/s,温度为室温 298 K。对冲燃烧器的氧化剂端为氧气与氮气的混合气体,其中氧气的体积分数记为 φ_{O_2} ,燃料端

为纯乙烯,该工况下形成的火焰均为 SF (soot formation) 火焰^[17],此类型的火焰结构简图如图 5 所示。

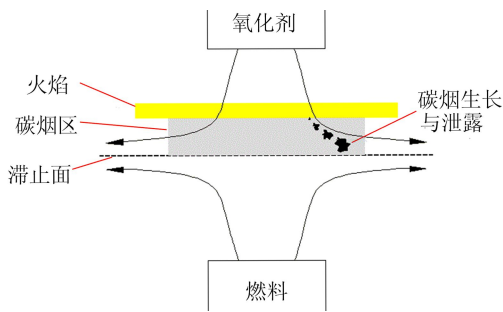


图 5 对冲火焰结构简图

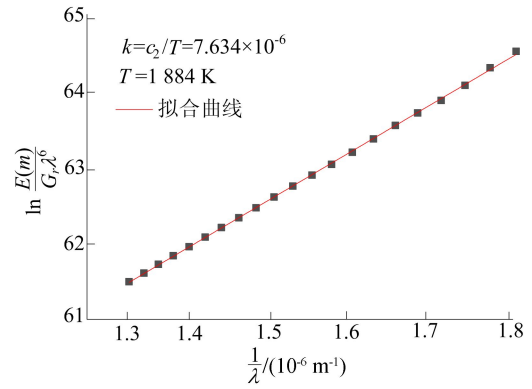
3.2 对冲火焰的径向碳烟温度及体积分数

在之前的研究中,对冲火焰通常被视为准一维火焰,即各种流场变量如轴向速度、温度、组分浓度和碳烟体积分数只沿轴向变化,而在径向保持不变。碳烟体积分数在对冲火焰中的准一维性已经在本实验室基于消光法的研究中得到了验证^[14]。本文拟通过 SSE 方法核实该结论,并且进一步验证对冲火焰中温度的准一维性。为此首先对对冲火焰径向的碳烟温度和碳烟体积分数进行测量。

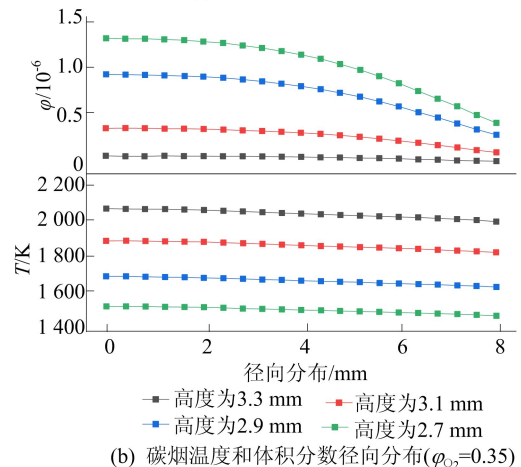
将视线上的辐射强度积分值反演后可以得到径向局部辐射强度,再利用(7)式拟合得到不同位置的碳烟温度, $\varphi_{O_2} = 0.35$ 工况下某一点的温度拟合如图 6a 所示。根据 $\varphi_{O_2} = 0.35$ 工况下乙烯对冲火焰中不同轴向高度下的测量结果,如图 6b 所示,碳烟温度沿径向变化幅度较小,仅在远离火焰中心处温度略有下降。因此,可以认为在靠近火焰中轴线处对冲火焰中的碳烟温度是具有准一维性的。

此外,当半径在 3 mm 以内时,碳烟的体积分数在径向上也基本不变,这与文献^[14]中基于消光法得到的对冲火焰具有准一维性的结论是一致的。

根据第 1 节所述,在 SSE 方法中,局部辐射强度值需要将视线辐射强度积分值进行层析反演得到,而获取火焰中每个高度平面上的碳烟辐射数据十分耗时。当仅需火焰轴线上的局部辐射值时,考虑到对冲火焰的准一维性质,可以将视线通过火焰轴线时测量的辐射强度积分值不进行反演,直接除以火焰光程 L ^[14],以得到轴线上的局部辐射强度值,再利用该值求解得到碳烟温度和体积分。



(a) 温度拟合曲线



(b) 碳烟温度和体积分数的径向分布($\varphi_{O_2}=0.35$)

图 6 温度拟合曲线及碳烟温度与体积分数的径向分布

基于层析反演和准一维假设分别得到的轴线处碳烟温度和体积分数的结果如图 7 所示。

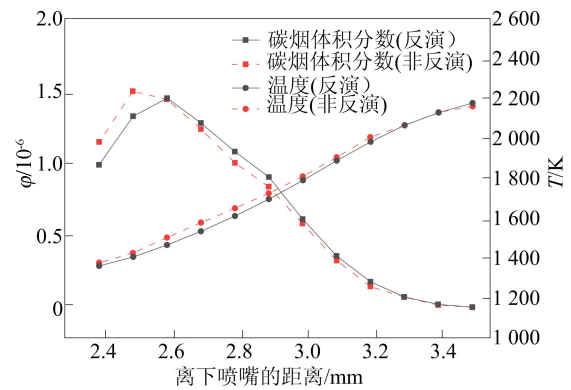


图 7 层析反演与准一维假设轴向碳烟温度和体积分数的对比($\varphi_{O_2} = 0.35$)

从图 7 可以看出,2 种方法得到的碳烟温度和体积分数的差距不大,吻合度较高^[18]。因此,可以基于准一维假设,仅测量轴线位置处的辐射强度求得碳烟温度和体积分,此方法在保证实验结果较为可靠的情况下大幅度提高了实验效率。

3.3 对冲火焰的轴向碳烟温度及体积分

在验证了对冲火焰具有准一维性的基础上,

对不同工况下的对冲火焰轴向碳烟温度分布和体积分数进行测量,并与其他独立方法得到的结果进行比较,以验证 SSE 方法测得的碳烟温度和体积分数的可行性。

3.3.1 轴向碳烟温度分布

温度是影响碳烟生成的重要因素。在对冲火焰中,碳烟的生成演化与火焰轴向的温度分布密切相关。因此测量对冲火焰中温度轴向分布尤为重要。

将测得的视线上辐射强度积分值反演,可以得到轴线上局部辐射强度分布,然后利用(7)式拟合得到轴线上的温度分布。2种工况下($\varphi_{O_2} = 0.30$ 、 $\varphi_{O_2} = 0.35$)测得的温度数据如图8所示,其中实线为利用 Chemkin 程序包并采用乙烯详细化学反应机理(KM2 机理^[18])模拟所得的火焰气体温度。

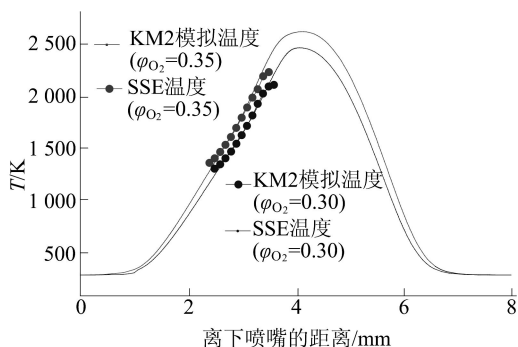


图8 不同工况下的碳烟温度轴向分布

从图8可以看出,不同工况下 SSE 方法测得的温度均与 KM2 模拟温度的差值很小。这表明本文基于 SSE 方法测量的对冲火焰碳烟温度是可靠的,且从侧面证明了使用热电偶作为光谱系统原位标定源的方法是可行的。另一方面,需要注意到 SSE 方法只能测得对冲火焰轴向上其中一部分区域的碳烟温度。例如,当工况为 $\varphi_{O_2} = 0.35$ 时,基于 SSE 方法只能得到距离下喷嘴的距离在 2.4~3.5 mm 之间的碳烟温度数据。当离下喷嘴距离小于 2.4 mm 时,温度较低,碳烟辐射信号很弱,而此时噪音信号与其只相差 1 个量级,故使得该处的温度严重失真;当离下喷嘴的距离大于 3.5 mm 时,温度也无法准确测量,这是由于此处碳烟刚开始形成,碳烟体积分数很小,碳烟辐射信号很弱,温度测量失真。当工况为 $\varphi_{O_2} = 0.30$ 时,测量结果显示类似情况,这说明 SSE 方法测量碳烟温度有一定的限制,这种限制与碳烟温度和碳烟体积分数有关。

碳烟温度或体积分数减小,均会使得辐射信号大幅减弱,当辐射信号过弱,信噪比低于 20 dB 时,很难去掉叠加在其中的噪音信号,导致温度测量失真。

3.3.2 轴向碳烟体积分数分布

对冲火焰中碳烟体积分数的轴向分布是研究碳烟生成演化的重要参数。在求得温度 T 后,便可以得到吸收系数 k_λ ,进一步利用(5)式可以求出碳烟体积分数 φ 。本文将同一工况下 SSE 方法与消光法测得的轴线上的碳烟体积分数进行比较,结果如图9所示。

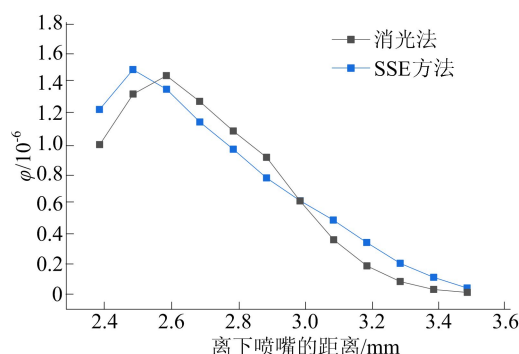


图9 碳烟体积分数的轴向分布($\varphi_{O_2} = 0.35$)

从图9可以看出,SSE方法与消光法测得的轴线碳烟体积分数变化趋势是一致的,但有一定的偏差。当离下喷嘴的距离在 2.4~3.0 mm 区域内,偏差基本在 20% 范围内,由文献[19]的研究结果可知,此偏差在合理范围内的,在进一步分析发现,该偏差主要来源于碳烟吸收函数 $E(m)$ 的不确定性。 $E(m)$ 的取值取决于碳烟颗粒的大小、成熟度以及形成碳烟的物理化学环境^[20],在火焰不同位置, $E(m)$ 的取值会发生变化。然而 $E(m)$ 变化的规律至今仍然没有定论。但从总体来看,采用 $E(m) = 0.26$ 得到的温度与 Chemkin 模拟温度吻合度较高,而碳烟体积分数与消光法有一定的偏差,这说明温度对于 $E(m)$ 变化的敏感性小于碳烟体积分数的。

最后,本文分别测量了不同工况下($\varphi_{O_2} = 0.30$ 、 $\varphi_{O_2} = 0.35$ 、 $\varphi_{O_2} = 0.40$)的碳烟温度和体积分数,并进行了对比分析,结果如图10所示。

由图10可知,随着 φ_{O_2} 的增加,碳烟温度随之增加,碳烟体积分数也随之增加,且碳烟体积分数最大值增加的幅度在不断扩大。这一结果与 LE 法测得的趋势相同^[14],因此 SSE 方法也能较好地捕捉工况变化时碳烟温度和体积分数的变化趋势。

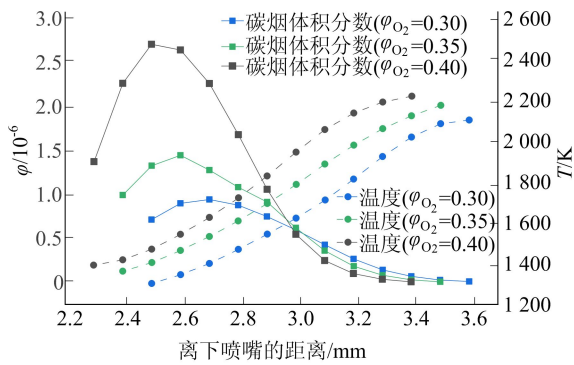


图 10 不同工况下的碳烟温度和体积分数的轴向分布

综上所述,基于 SSE 方法测量对冲火焰中的碳烟温度具有较高可行性。但 SSE 方法测量碳烟体积分数对 $E(m)$ 的敏感度较高,若能进一步提高 $E(m)$ 的准确性,SSE 方法测量的碳烟体积分数准确性也能进一步提高。总体而言,SSE 方法能准确地捕捉到碳烟体积分数的相对变化,因此,采用 SSE 方法测量碳烟体积分数也是可行的。

4 结 论

本文基于 SSE 方法对对冲火焰中碳烟温度和体积分数的进行了实验研究,开发了一种适用于对冲火焰测量的精准定位方法,提高了系统测量位置精度,同时建立了一套利用热电偶进行光谱响应原位标定的系统,使利用 SSE 方法测量对冲火焰成为了可能;基于 SSE 方法对对冲火焰的碳烟温度和体积分数的径向分布进行测量,验证了对冲火焰准一维的性质;同时,研究了反演与否对实验结果的影响,结果表明,两者得到的碳烟温度和体积分数差距均较小,验证了非反演方案的可行性,也为提高实验效率提供了一种可行的实验方案。

本文测量了对冲火焰碳烟温度的轴向分布,并与 Chemkin 模拟温度进行了对比。结果表明:SSE 方法能较为可靠地测得碳烟温度,但对于辐射强度较弱的位置(信噪比小于 20 dB)难以准确测量。与此同时也进一步验证了用热电偶作为标定源的可行性,为降低 SSE 测量系统的标定成本提供了一种可行的方案。

最后,本文测量了对冲火焰碳烟体积分数的轴向分布,并与消光法得到的实验结果进行了对比。结果表明:SSE 方法能够很好地捕捉碳烟体积分数的变化趋势,但是碳烟体积分数与消光法测得的结果有一定的偏差,经过分析可知,该偏差主要来源于碳烟吸收函数 $E(m)$ 的不确定性。

在未来的研究中,若能很好地考虑不同位置

碳烟吸收函数 $E(m)$ 的变化,SSE 方法测量碳烟温度和体积分数的精度将进一步得到提高。

[参 考 文 献]

- [1] FIORE A M, NAIK V, LEIBENSPERGER E M. Air quality and climate connections [J]. Air Repair, 2015, 65 (6): 645-685.
- [2] LOU C, CHEN C, SUN Y P, et al. Review of soot measurement in hydrocarbon-air flames [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53: 2129-2141.
- [3] CHEN D, AKROYD J, MOSBACH J, et al. Surface reactivity of polycyclic aromatic hydrocarbon clusters [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35: 1811-1818.
- [4] CHEN C, JIANG X. Molecular dynamics simulation of soot formation during diesel combustion with oxygenated fuel addition [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2020, 22(36): 20829-20836.
- [5] LLY C S, PFEFFERLE L D, ATAKAN B, et al. Studies of aromatic hydrocarbon formation mechanisms in flames: progress towards closing the fuel gap [J]. Progress in Energy Combustion Science, 2006, 32: 247-294.
- [6] SNELLING D R, THOMSON K A, SMALLWOOD G J, et al. Spectrally resolved measurement of flame radiation to determine soot temperature and concentration [J]. AIAA Journal, 2002, 40(9): 1789-1795.
- [7] LIU F, THOMSON K A, SMALLWOOD G J. Soot temperature and volume fraction retrieval from spectrally resolved flame emission measurement in laminar axisymmetric coflow diffusion flames: effect of self-absorption [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(9): 1693-1705.
- [8] LIU H, ZHENG S. Measurement of temperature and wavelength-dependent emissivity distributions using multi-wavelength radiation thermometry [J]. Optics Communications, 2020, 472: 125895.
- [9] ZHENG S, YANG Y, LI X Y, et al. Temperature and emissivity measurements from combustion of pine wood, rice husk and fir wood using flame emission spectrum [J]. Fuel Processing Technology, 2020, 204: 106423.
- [10] WANG Y, CHUNG S H. Soot formation in laminar counterflow flames [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 74: 154-238.
- [11] DASCH C J. One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered back-projection methods [J]. Applied Optics, 1992, 31(8): 1146-1152.
- [12] WANG Y, RAJ A, CHUNG S H. Soot modeling of counterflow diffusion flames of ethylene-based binary mixture fuels [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(3): 586-596.
- [13] WANG Y, CHUNG S H. Strain rate effect on sooting characteristics in laminar counterflow diffusion flames [J]. Combustion and Flame, 2016, 165: 433-444.

(下转第 773 页)

- risk assessment by accelerometry [J]. *BioMedical Engineering OnLine*, 2011, 10(1):1.
- [11] FERRARI A, CUTTI A G, GAROFALO P, et al. First in vivo assessment of "Outwalk": a novel protocol for clinical gait analysis based on inertial and magnetic sensors [J]. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2010, 48(1):1-15.
- [12] AMINIAN K, NAJAFI B. Capturing human motion using body-fixed sensors: outdoor measurement and clinical applications [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2004, 15(2):79-94.
- [13] MORRIS J R W. Accelerometry: a technique for the measurement of human body movements [J]. *Journal of Biomechanics*, 1973, 6(6):729-736.
- [14] ATALLAH L, WIJK A, JONES G G, et al. Validation of an ear-worn sensor for gait monitoring using a force-plate instrumented treadmill [J]. *Gait & Posture*, 2012, 35(4):674-676.
- [15] ATALLAH L, AZIZ O, GRAY E, et al. An ear-worn sensor for the detection of gait impairment after abdominal surgery [J]. *Surgical Innovation*, 2012, 20(1):86-94.
- [16] DEJNABADI H, JOLLES B M, AMINIAN K. A new approach to accurate measurement of uniaxial joint angles based on a combination of accelerometers and gyroscopes [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2005, 52(8):1478-1484.
- [17] KOBASHI S, KAWANO K, TSUMORI Y, et al. Wearable joint kinematic monitoring system using inertial and magnetic sensors [C]//IEEE Workshop on Robotic Intelligence in Informationally Structured Space. [S. l.]: IEEE, 2009:25-29.
- [18] GUO Y W, ZHAO G R, LIU Q Q, et al. Balance and knee extensibility evaluation of hemiplegic gait using an inertial body sensor network [J]. *BioMedical Engineering OnLine*, 2013, 12(1):83.
- [19] 孟琳, BERND P, HENRIK G. 功能性电刺激在步态功能恢复中的技术进展 [J]. *仪器仪表学*, 2017, 38(6):1319-1334.
- [20] BRAZ G P, RUSSOLD M, DAVIS G M. Functional electrical stimulation control of standing and stepping after spinal cord injury: a review of technical characteristics [J]. *Neuromodulation: Journal of the International Neuromodulation Society*, 2009, 12:180-190.
- [21] LIBERSON W T, HOLMQUEST H J, SCOT D, et al. Functional electrotherapy: stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patients [J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1961, 42(8):101-105.
- [22] SHEFFLER L R, TAYLOR P N, GUNZLER D D, et al. Randomized controlled trial of surface peroneal nerve stimulation for motor relearning in lower limb hemiparesis [J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2013, 94(6):1007-1014.
- [23] 陈建国, 杨徐, 李玉榕. 角速度信号在功能性电刺激系统步态分段算法中的应用 [J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(2):216-222.
- [24] 苏海龙, 张峻霞. 步态周期关键节点描述方法研究 [J]. *信息系统工程*, 2011(9):122-124.
- [25] 杨雅琴, 张通. 正常步态和偏瘫步态的特点及对比 [J]. *中国康复理论与实践*, 2003, 9(10):608-609.
- [26] ANDERSSON O, GRILLNER S. Peripheral control of the cat's step cycle: II entrainment of the central pattern generators for locomotion by sinusoidal hip movements during fictive locomotion. [J]. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1983, 118(3):89-101.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 759 页)

- [14] YAN F, ZHOU M, XU L, et al. An experimental study on the spectral dependence of light extinction in sooting ethylene counterflow diffusion flames [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 100:259-270.
- [15] YAN W, PANAHI A, LEVENDIS Y A. Spectral emissivity and temperature of heated surfaces based on spectrometry and digital thermal imaging-validation with thermocouple temperature measurements [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 112:110017.
- [16] 戴景民, 杨茂华, 褚载祥. 基于波长函数的辐射温度计一点标定法及其精度的理论估计与实验验证 [J]. *计量学报*, 1999, 20(1):3-5.
- [17] KANG K T, HWANG J Y, CHUNG S H, et al. Soot zone structure and sooting limit in diffusion flames; comparison of counterflow and co-flow flames [J]. *Combustion and Flame*, 1997, 109(1):266-281.
- [18] WANG Y, RAJ A, CHUNG S H. A PAH growth mechanism and synergistic effect on PAH formation in counterflow diffusion flames [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(9):1667-1676.
- [19] MOHAMMAD R K, YASHAR A, ANTON D S, et al. Comparison of multiple diagnostic techniques to study soot formation and morphology in a diffusion flame [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 176:567-583.
- [20] EREMIN A, GURENTSOV E, POPOVA E, et al. Size dependence of complex refractive index function of growing nanoparticles [J]. *Applied Physics B*, 2011, 104:285-295.

(责任编辑 胡亚敏)