

# 基于中红外吸收光谱技术的燃烧场 CO 浓度测量研究

彭于权<sup>1,2</sup>, 阚瑞峰<sup>1\*</sup>, 许振宇<sup>1</sup>, 夏晖晖<sup>1</sup>, 聂伟<sup>1,2</sup>, 张步强<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院/安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学科学岛分院, 安徽 合肥 230026

**摘要** 燃烧场组分的测量对于燃烧诊断具有重要的研究意义。基于可调谐激光吸收光谱(TLAS)技术,采用中红外带间级联激光器(ICL)扫描一氧化碳(CO)的  $2060\text{ cm}^{-1}$  ( $v=1\leftarrow 0, P_{20}$ ) 吸收谱线,实现了对燃烧场 CO 浓度的测量。实验通过燃烧产物  $\text{H}_2\text{O}$  的  $7154.35\text{ cm}^{-1}$  和  $7467.77\text{ cm}^{-1}$  吸收谱线的谱线强度比值反演燃烧场温度,以此修正测量环境下 CO 谱线强度参数,实现 CO 浓度的精确测量。首先介绍了 TLAS 测温验证实验,温度测量在各个设置温度台阶下的波动均小于 45 K,温度测量具有可靠性;其次开展 CO 浓度测量标定实验,CO 测量浓度与标准气体浓度的误差在 3% 以内;最后针对甲烷/空气平焰炉在不同燃烧状态下进行 CO 浓度测量,实现 0.35%~4.5% 范围内 CO 浓度的测量,检测灵敏度为 0.035%。实验验证了中红外吸收光谱技术实现燃烧场组分浓度测量的可行性和可靠性,有助于燃烧诊断的研究,具有较大的应用价值。

**关键词** 光谱学; 吸收光谱; 一氧化碳; 中红外; 温度; 吸光度

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0911010

## Measurement of CO Concentration in Combustion Field Based on Mid-Infrared Absorption Spectroscopy

Peng Yuquan<sup>1,2</sup>, Kan Ruifeng<sup>1\*</sup>, Xu Zhenyu<sup>1</sup>, Xia Huihui<sup>1</sup>, Nie Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Buqiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science/Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** The measurement of combustion components is significant for diagnosis of combustion. The study on measurement of carbon monoxide (CO) concentration in combustion field is realized with mid-infrared inter-band cascade lasers (ICL) at  $2060\text{ cm}^{-1}$  ( $v=1\leftarrow 0, P_{20}$ ) to cover CO absorption line based on tunable laser absorption spectroscopy (TLAS) technology. In the experiment, the spectral line strength ratio between a pair of absorptions of water vapor ( $7154.35\text{ cm}^{-1}$  and  $7467.77\text{ cm}^{-1}$ ), for  $\text{H}_2\text{O}$  is the product of combustion process, is used to calculate the combustion temperature, that is used to correct spectral line strength of CO to achieve accurate measurement of CO concentration. Firstly, the TLAS temperature verification test is introduced, and the results show that the fluctuation of the test temperature is less than 45 K at each set temperature step, which indicates temperature measurement is reliable. Secondly, the calibration experiment of CO concentration measurement is carried out, and measurement error of CO concentration is under 3% compared with standard gas concentration. Finally, the experiment achieves the CO concentration at the range of 0.35%-4.5% on methane /air flat flame furnace under different combustion conditions, with a detection limit of 0.035%. The experiment proves the feasibility and reliability of mid-infrared absorption spectroscopy technology to measure the concentration components of combustion field, which is helpful to the study of combustion diagnosis and has great application value.

**Key words** spectroscopy; absorption spectroscopy; carbon monoxide; mid-infrared; temperature; absorbance

**OCIS codes** 300.1030; 300.6260; 140.3600; 120.1740

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-04-06; 录用日期: 2018-04-10

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-16M267)

\* E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

# 1 引 言

燃烧场组分浓度作为燃烧过程中的重要参数,是燃烧效率和污染物产生的指示标志,因此燃烧环境组分浓度的测量对于燃烧诊断具有重要的研究意义<sup>[1-3]</sup>。

燃烧场组分的检测方法按照传感机理主要分为气相色谱(GC)法<sup>[4]</sup>、激光诱导荧光(LIF)法<sup>[5]</sup>、相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)法<sup>[6-7]</sup>和光谱吸收法<sup>[8-19]</sup>。其中:GC法是一种物理分离分析技术,具有较高的灵敏度和可靠性,但存在采样污染、测量周期长、实时在线检测困难等问题;LIF法通过测量受激发原子的荧光来探测物质浓度,检测精度高,但信号易受分子密度和信号猝灭等因素的影响;CARS法具有较高的空间分辨率,适用于点测和台架试验,但系统相对复杂,成本较高。可调谐激光吸收光谱(TLAS)技术具有非接触测量、抗干扰能力强、响应快速、结构简单等优点,并且能够同时测量温度、组份浓度、流速等气体参数<sup>[12-13]</sup>,被广泛应用于燃烧诊断、环境测量、国防安全等领域。

一氧化碳(CO)是碳氢燃料燃烧的主要污染物之一,是一种无色、无味、对血液和神经系统有害的毒性气体。近年来,随着对环境问题的重视,CO等污染气体的快速、实时检测对安全生产、有害气体的再利用及环境保护具有重要意义。目前,CO浓度的测量受到了国内外学者的广泛关注,但研究主要集中在近红外波段和常温条件下的检测,在中红外波段和高温燃烧场方面测量的相关研究相对较少。CO在近红外 $6452\text{ cm}^{-1}$ 处的谱线强度较弱,且受燃烧产物中 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ 的影响<sup>[14-16]</sup>,故在该处测量不能达到较高的检测限要求;而对于 $4348\text{ cm}^{-1}$ 处CO的测量<sup>[17]</sup>,由于谱线强度随温度升高而减弱,故此不能用于更高温度下CO浓度的检测。

本文采用 $2060\text{ cm}^{-1}$ 中红外带间级联激光器(ICL)(与量子计量激光器相比,驱动电流更小,发热量小,便于温度控制,成本相对更低)覆盖CO的基频吸收,其吸收线相对较强,不受其他组分的影响,可以实现短光程高温燃烧场中CO浓度的高灵敏度检测。

## 2 测量原理和谱线选取

### 2.1 TLAS 测量原理

TLAS技术采用窄线宽可调谐激光器作为探测光源,通过温度和驱动电流调谐激光器的输出波长,

使其覆盖目标气体的单条或多条吸收谱线,利用吸收光谱信号反演气体的特性参数,如温度、浓度和压强。基于Beer-Lambert吸收定律,当一束频率为 $\nu$ ,强度为 $I_0$ 的探测光经过气体吸收后,其光强 $I_t$ 为

$$I_t = I_0 \exp[-S(T)\phi(\nu)pxL], \quad (1)$$

式中: $S(T)$ 为吸收谱线的谱线强度; $\phi(\nu)$ 为积分面积归一化吸收线型函数(整个频域上积分为1); $p$ 为测量环境压力; $x$ 为气体的体积分数(目标气体与总气体的体积比); $L$ 为吸收光程。

$S(T)$ 为温度 $T$ 的函数,其随温度的变化为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp\left[-\frac{hcE''}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT_0}\right)\right]^{-1}, \quad (2)$$

式中: $\nu_0$ 为谱线的中心频率; $E''$ 为分子跃迁的低态能级值; $Q$ 为分子总配分函数; $h$ 为普朗克常数; $c$ 为光速; $k$ 为玻尔兹曼常数; $T_0$ 为参考温度,取 $296\text{ K}$ 。

由(2)式可知谱线强度主要受配分函数和低态能级的影响,并且在大部分情形下最后两项乘积几乎保持不变,近似为1。相应的积分吸光度 $A$ 为(在环境压力和浓度均匀的情况下)

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) d\nu = S(T)pxL. \quad (3)$$

TLAS测量温度的方法有两种:双线测温法和高斯展宽法<sup>[9]</sup>。其中的高斯展宽法依赖于光谱展宽参数的精确测量,精度的提高受到限制。因此,本研究选取双线测温方法,采用同一物质的两条吸收谱线线强的比值来反推温度,具有灵敏度和精确度高等优点。当吸收介质均匀时,沿同一光路测量的两条吸收谱线经历的气体温度、压力和浓度相同,吸光度比值即为线强之比。

设有两条吸收线谱线(谱线1和谱线2),其积分吸光度之比(环境压力、光程和浓度一致)表示为

$$R(T) = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} =$$

$$\frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp\left[-\frac{hc}{k}(E''_1 - E''_2)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]. \quad (4)$$

由(4)式可知,双线测温法主要是通过测量两条吸收谱线的积分吸光度之比来反推温度,且双线低态能级值之差越大,测温灵敏度就越高。

在测量温度的基础上,可以通过(2)式计算出此温度下的谱线强度,从而进一步求得组分浓度为

$$x = \frac{A}{S(T)pxL}. \quad (5)$$

## 2.2 测温谱线和 CO 浓度测量谱线的选取

TLAS 技术中的关键部分是选取吸收谱线,合适的吸收谱线可以提高探测的灵敏度和精度,从而提升系统的整体性能。 $H_2O$  作为大多数燃烧过程的产物,是一种理想的目标气体,并且在近红外波段有大量较强的吸收谱线。因此,本研究采用  $H_2O$  的吸收谱线作为测温谱线,选取谱线的原则如下<sup>[18]</sup>: 1) 吸收谱线在所测温度范围内具有足够的谱线强度,对温度具有较高的敏感度; 2) 所选谱线周围没有过多邻近吸收谱线的干扰,两条谱线的谱线强度之比是温度的单调函数; 3) 两条吸收谱线的低态能级值之差足够大,以此提高测温的灵敏度。

依据上述原则,结合 HITEMP 光谱数据库选出了  $H_2O$  的两条吸收谱线:  $7154.35\text{ cm}^{-1}$  和  $7467.77\text{ cm}^{-1}$ , 谱线强度采用相关文献的标定值<sup>[18-19]</sup>, 具体参数如表 1 所示。

表 1 测温谱线和 CO 浓度测量谱线参数(296 K)

Table 1 Spectral lines parameters for temperature and CO concentration measurement (296 K)

Molecule	$\nu_0/\text{cm}^{-1}$	$E''/\text{cm}^{-1}$	$S(T)/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1})$
$H_2O$	7154.35	1789.04	$3.71\times 10^{-9}$
$H_2O$	7467.77	2551.48	$1.27\times 10^{-10}$
CO	2059.91	806.41	$8.75\times 10^{-6}$

所选两条测温谱线的谱线强度与谱线强度之比随温度(500~2500 K)的变化曲线如图 1 所示: 两条吸收谱线在中高温段内有较强的谱线强度,能够实现此温度范围内的温度测量; 同时,谱线强度之比在此温度范围内随温度单调变化,满足温度反演的要求。

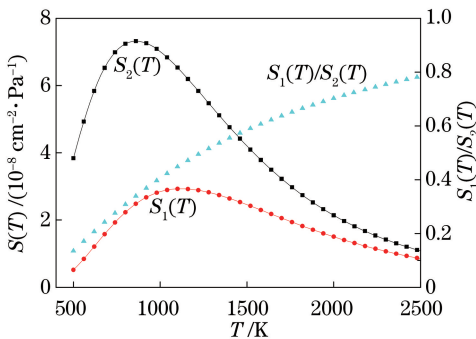


图 1 谱线的谱线强度与谱线强度之比随温度的变化  
Fig. 1 Spectral line strength or spectral line strength ratio vary with temperature

CO 浓度测量谱线的选取主要考虑的是燃烧场中其他组分( $H_2O$ 、 $CO_2$  等)的影响,并且要实现短光程、低浓度、高温燃烧场的浓度测量,因此要求谱线在高温下具有足够的谱线强度。中红外波段对应于

大量分子物质的基频吸收,具有很强的吸收,适合于燃烧场组分的测量。最终,燃烧场 CO 浓度的测量选定中红外  $2059.91\text{ cm}^{-1}$  的( $\nu=1\leftarrow 0, P_{20}$ )吸收谱线,具体参数如表 1 所示。

通过仿真模拟出该吸收谱线在 3 个温度下的吸光度曲线,结果如图 2 所示。

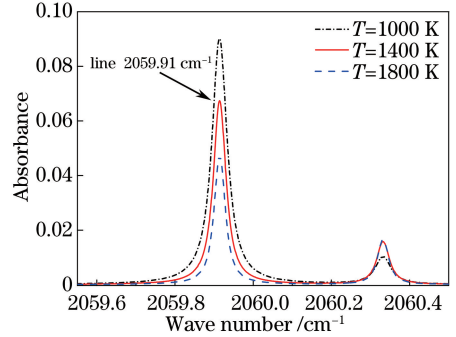


图 2 吸光度模拟曲线( $p=0.1\text{ MPa}, x=1\%, L=6\text{ cm}$ )

Fig. 2 Simulation curves of absorbance ( $p=0.1\text{ MPa}, x=1\%, L=6\text{ cm}$ )

由图 2 可知,随着温度升高,CO 的  $2059.91\text{ cm}^{-1}$  吸收谱线强度下降,吸光度幅值降低。由吸光度的幅值可见,该谱线的吸收较强,可以满足燃烧场内 CO 浓度的测量要求,实现燃烧场短光程、低浓度检测的目标。

## 3 实验装置

实验采用甲烷( $CH_4$ )/空气预混平焰炉中的 CO 作为测量对象,因为这种平焰炉的燃料气体与空气在进入燃烧区域之前会经过充分的预混合,能够产生一维特征稳定的标准火焰(火焰温度和燃烧产物浓度具有高度的时间和空间均匀性)<sup>[11]</sup>,因此广泛地应用于物理化学燃烧研究和诊断技术的标定校准。实验中通过控制平焰炉的进气当量比来控制燃烧状况,模拟出不同状态下的燃烧情况。

实验中,测量光线平行于炉面,穿过待测燃烧区域,选取的测量高度分别距炉面 5, 10, 15 mm,吸收光程为 6 cm。平焰炉在这些区域相对稳定且测量区域较短,可近似认为温度场和浓度场是均匀的。同时,外界采用高纯氮气进行隔离处理,排除了环境中气体的干扰,可认为只存在测量区域内对应物质的吸收。基于 TLAS 技术的 CO 浓度测量系统结构如图 3 所示。

实验装置中有温度测量和浓度测量两路光线。温度测量采用德国 Nanoplus 公司的两台分布式反馈激光器(DFB)(1339 nm 和 1398 nm)作为探测光

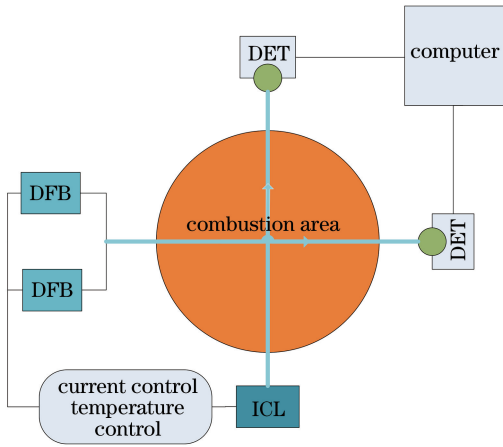


图 3 TLAS 平焰炉测量系统示意图

Fig. 3 Schematic of TLAS measurement system for flat flame burner

源,其输出的激光由光纤合束器合成一束;另一路由德国 Nanoplus 公司的中红外 ICL(4854 nm)实现对 CO 浓度的测量。驱动电路同时对 3 台激光器加载 500 Hz 的分时扫描信号,使其输出的激光波长和强度随扫描信号的变化而变化,从而覆盖检测所需的吸收谱线。两路激光平行于炉面,沿径向通过待测量的燃烧场分别进入探测器(DET),DET 将光信号转化为电信号后再放大采集,传入工控机处理后得到各条吸收谱线的积分吸光度。根据(4)式反演计算出温度,由(2)式计算出对应温度下 CO 的谱线强度,再根据(5)式实现 CO 浓度的测量。整套实验系统搭建在可升降的光学平台上,可以测量不同高度和不同当量比下的燃烧情况。若想提高探测灵敏度,可以使光线多次通过测量区域,通过增加吸收光程来提高吸收强度。

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 温度测量验证实验

燃烧场温度的测量采用双线测温法。为了进一步确定测温系统的可靠性,需要对实验系统进行验证实验。验证实验采用高温管式炉,它可以设定一个温度、浓度和压力相对恒定的封闭测量区域,用于测温实验的标定。实验设置了 700~1400 K 范围内的 8 个温度台阶,每隔 100 K 设置一个温度台阶,分别在每一个设置温度状态下测量温度。图 4 示出在不同温度台阶下 TLAS 的测温结果。

由验证实验结果可知:在各个设定的温度台阶下,TLAS 测温系统的测量温度与设定温度的最大偏差在 45 K 以内,验证了 TLAS 双线测温方法的可靠性;高温阶段的测温结果波动较大,这是由选取

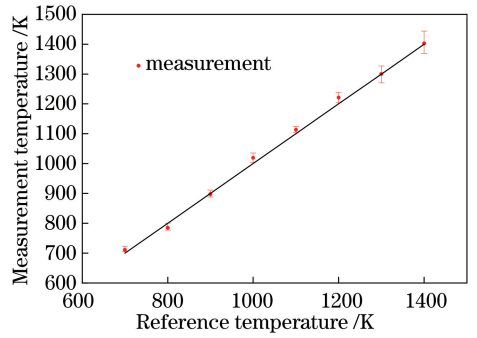


图 4 TLAS 高温管式炉的测温结果

Fig. 4 Results of TLAS temperature measurement in high temperature tube furnace

谱线在高温阶段的测温灵敏度降低导致的。

### 4.2 CO 浓度测量的标定实验

TLAS 技术可以测量燃烧场的组分浓度。为了验证其浓度测量的准确性,需要对系统的浓度测量进行标定实验。采用配气系统配制出 CO 体积分数分别为 0.5‰、1.0‰、1.5‰、2.0‰、2.5‰和 3.0‰的 CO 标准气体(吸收池长度  $L_0 = 25$  cm,  $p = 0.1$  MPa,  $T = 293$  K),采用基于 TLAS 技术的 CO 浓度测量方法进行浓度的测量。测量结果如图 5 所示。

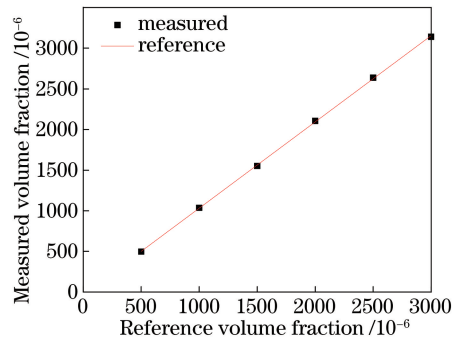


图 5 测量浓度与参考浓度的比较

Fig. 5 Comparison between measured volume fraction and reference volume fraction

从图 5 中可知,CO 浓度测量值与标准气体参考浓度基本吻合,线性度为 0.9998,测量浓度与标准气体浓度的误差在 3% 以内。造成误差的原因有配气精度、谱线强度误差和标定时温度变化等。

### 4.3 TLAS 燃烧场 CO 浓度的测量

在高温管式炉温度测量验证实验和 CO 浓度测量标定实验的基础上,采用图 3 搭建的测量系统测量 CH<sub>4</sub>/空气平焰炉中 CO 的浓度。针对平焰炉在不同当量比和不同高度条件下分别进行温度和浓度的测量。表 2 为不同当量比下平焰炉内空气和燃料的流速数据,当量比为 1.0 代表正好完全燃烧。



表 2 不同当量比下 CH<sub>4</sub>/空气平焰炉内空气和燃料的流速

Table 2 Flow rate of air and fuel at different equivalence ratio in CH<sub>4</sub>/air flat flame furnace

Equivalence ratio	Flow velocity of air / (L·min <sup>-1</sup> )	Flow velocity of CH <sub>4</sub> / (L·min <sup>-1</sup> )
0.7	13.26	0.975
0.8	13.11	1.100
0.9	12.99	1.230
1.0	12.87	1.350
1.1	12.75	1.470
1.2	12.63	1.590
1.3	12.51	1.700

为了减小随机误差,提高信噪比,将测量光谱进行 20 次平均处理。图 6 为平焰炉在当量比为 1.1 燃烧状态时的测量光谱信号,以及采用铯的标准具进行波长标定的干涉信号波形。

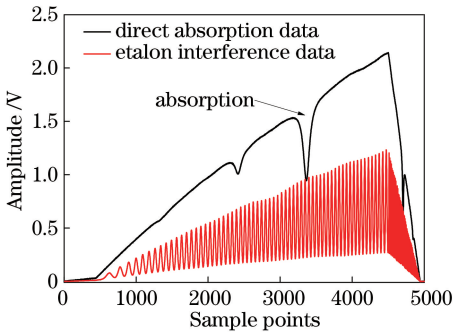


图 6 直接吸收信号及经标准具的干涉信号波形  
Fig. 6 Waveforms of direct absorption signal and etalon interference signal

从图 6 中可以看出,CO 在该条件下出现了较强的吸收。通过测量的光谱信号并结合干涉信号便可以计算出积分吸光度<sup>[16]</sup>。

在温度测量的同时采集了中红外测量 CO 的光强信号,首先将测温数据进行离线处理,计算出燃烧场的温度,然后根据谱线强度公式修正此时此温度下 CO 的谱线强度,计算出 CO 的吸光度信号,从而计算出对应条件下燃烧场中 CO 的体积分数。

基于 TLAS 技术实现了平焰炉内体积分数为 0.35%~4.5% CO 的浓度测量,检测灵敏度为 0.035%。考虑到测温误差和燃烧场温度的不均匀性,根据 TLAS 温度测量验证实验的结果,以 1800 K(各个当量比下的中值温度)的燃烧温度为例,温度波动约为 50 K,根据误差传递公式,温度波动造成的谱线强度误差为 6.1%,由此导致的 CO 体积分数的测量误差为 5.7%。测量结果如图 7 所示。

由图 7 可知:随着当量比增加,燃料的占比增加,氧气的占比减小,因此出现了不完全燃烧的现象,导

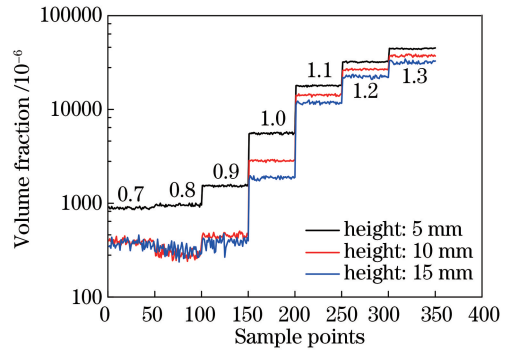


图 7 不同炉面高度下 CO 浓度随当量比的变化  
Fig. 7 CO concentration varies with the equivalent ratio at different height above the furnace surface

致 CO 的浓度不断上升;在相同的当量比下,从炉面不同高度处的 CO 体积分数可以看出,随炉面高度增加,CO 的体积分数逐渐降低,这是因为随着炉面高度上升,燃料燃烧不断进行,导致 CO 体积分数降低;当当量比和炉面高度较高时,CO 体积分数的波动逐渐变大,这是由于在高当量比下,燃料充足,燃烧更加剧烈,且随着炉面高度增加,燃烧场的均匀性逐渐减弱,故而 CO 的体积分数开始出现波动。

通过 CO 浓度的变化可以看出,在当量比为 1.0 (理论上完全燃烧)的燃烧状态下,也出现了较高浓度的 CO(体积分数约为 0.3%)。这可能是因为燃料和空气没有达到理想的均匀混合,出现了局部缺氧燃烧的情况;也可能是因为距离炉面的高度较小,处于燃烧初始阶段,CO 是燃烧过程的中间产物,所以也存在一定的 CO。

在温度和浓度测量的基础上,将温度和浓度的实验数据分别绘制成随当量比和炉面高度变化的等高线图,用来分析 CH<sub>4</sub>/空气预混平焰炉在不同状态下的燃烧情况,结果如图 8 所示。

由图 8 可知:燃烧场温度和 CO 浓度的最大值均出现在当量比最大、炉面高度最小的区域,因为该条件下燃烧场中的燃料充足,发生缺氧燃烧,产生大量的 CO;充足的燃料燃烧产生大量的热,且此时处于燃烧的初始阶段,热量损失少,所以温度较高。这与低当量比、高炉面距离的情况正好相反。分析以上的实验结果可以得出,生产中如果要降低燃烧过程中 CO 的产生,应适当增加氧气,即减小当量比,但当量比不能太低,因为氧气足量后,CO 的浓度虽然降低,但同时过量的氧气也带走了大量的燃烧热量,使燃烧温度降低,热量的利用率降低。所以在生产实践中应根据具体的需求选择合适的当量比来控制燃烧。

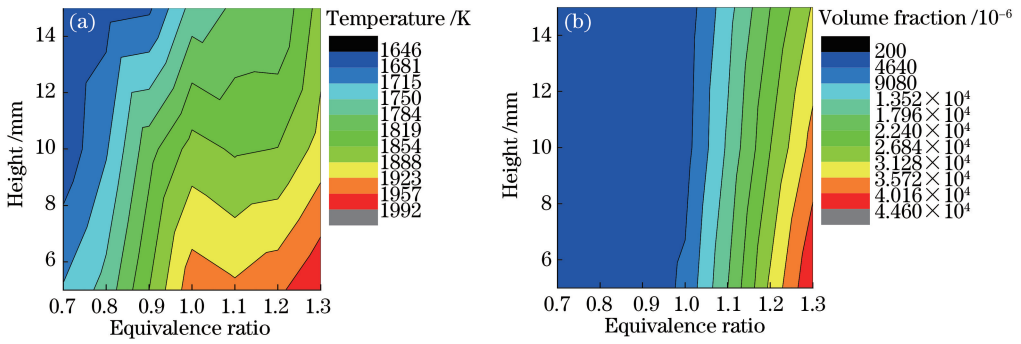


图 8 (a)温度随当量比和炉面高度变化的等高线图;(b) CO 体积分数随当量比和炉面高度变化的等高线图

Fig. 8 (a) Temperature vary with the equivalent ratio at different heights above the furnace surface; (b) volume fraction of CO vary with the equivalent ratio at different heights above the furnace surface

## 5 结 论

基于中红外吸收光谱技术采用 CO 的 2059.91 cm<sup>-1</sup> 的吸收谱线,实现了对平焰炉内体积分数为 0.35%~4.5% 的 CO 的浓度测量,检测灵敏度为 0.035%,测量误差在 5.7% 以内。针对燃烧场 CO 浓度的测量问题,首先分别对温度和浓度测量系统进行标定实验,然后采用中红外 ICL 对燃烧场中的 CO 浓度进行测量,最后进行结果分析。由此可得出以下结论:

1) 提出的基于中红外吸收光谱技术对燃烧场内 CO 浓度的测量是可行的,CO 的产生主要受当量比的影响,且在燃烧场各个位置处的 CO 浓度也有所不同。

2) TLAS 技术可以实现燃烧场温度、浓度的非侵入式原位测量,具有快速和可靠等优点,这对实时监控燃烧状态提供了有力根据,可以在此基础上控制燃料和空气的比例,实现降低 CO 污染物排放,达到节能减排的目的。

3) 本研究对后续进一步开展燃烧场测量方面的工作奠定了基础(例如进行非均匀燃烧场温度与浓度的分布测量),中红外吸收光谱技术可以促进对燃烧诊断的研究,具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

[1] Hanson R K, Davidson D F. Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014, 44: 103-114.  
 [2] Xu Z Y, Liu W Q, Kan R F, *et al.* Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 61 (23): 234204.

许振宇, 刘文清, 阚瑞峰, 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): 234204.  
 [3] Liu H M, Lok Y L, Wei R. Non-uniform temperature and species concentration measurements in a laminar flame using multi-band infrared absorption spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123: 83.  
 [4] Yu X Y, Zuo S F, Lu J H, *et al.* Determination of the trace CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> in gas by gas chromatography[J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 2014, 32(5): 20-23.  
 于晓艳, 左世芳, 卢菊花, 等. 气体中微量一氧化碳、甲烷、二氧化碳的气相色谱分析[J]. *低温与特气*, 2014, 32(5): 20-23.  
 [5] Schulz C, Sick V. Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005, 31(1): 75-121.  
 [6] Alan C E, Gregory M D, John H S, *et al.* CARS temperature and species measurements in augmented jet engine exhausts [J]. *Applied Optics*, 1984, 23 (9): 1329-1340.  
 [7] Zhang L R, Hu Z Y, Zhang Z R, *et al.* Temperature measurement in stable combustion field with one-dimensional used CARS[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(12): 2035-2038.  
 张立荣, 胡志云, 张振荣, 等. 一维非稳腔空间增强探测 CARS 技术对稳态燃烧场温度的测量[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(12): 2035-2038.  
 [8] Michael E, Douglas S, Hanson R K, *et al.* *In situ* combustion measurements of CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and temperature using diode laser absorption sensors[J]. 28th International Symposium on Combustion, 2000: 407-413.  
 [9] Xu Z Y. Research on temperature measurement and

- 2D distribution for transient combustion process by infrared absorption spectroscopy [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- 许振宇. 瞬态燃烧过程红外激光光谱温度场测量与重构方法研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2012.
- [10] Li F, Yu X L, Chen L H, *et al.* Temperature and water vapour concentration measurements of CH<sub>4</sub>/Air premixed flat flame based on TDLAS[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(2): 40-44.
- 李飞, 余西龙, 陈立红, 等. TDLAS 测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 H<sub>2</sub>O 浓度[J]. *实验流体力学*, 2009, 23(2): 40-44.
- [11] Cui H B, Wang F, Li M Y. Measurements of CO<sub>2</sub> temperature and concentration in high temperature environment based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 083003.
- 崔海滨, 王飞, 李玫仪. 基于 TDLAS 技术同时测量高温环境中 CO<sub>2</sub> 的温度和浓度[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 083003.
- [12] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.* Absorption measurements of ambient methane with tunable diode laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(4): 1927-1930.
- 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法测量环境空气中的甲烷含量[J]. *物理学报*, 2005, 54(4): 1927-1930.
- [13] Peng D, Jin Y, Zhai C. Reconstruction algorithms for 2D temperature field based on TDLAS [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1111002.
- 彭冬, 金熠, 翟超. 基于 TDLAS 的二维温度场重建算法[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1111002.
- [14] Nguyen Q V, Edgar B L, Dibble R W, *et al.* Experimental and numerical comparison of extractive and *in situ* laser measurements of non-equilibrium carbon monoxide in lean-premixed natural gas combustion[J]. *Combust and Flame*, 1995, 100(3): 395-406.
- [15] Bernard L U, David M S, Mark G A. Measurements of CO, CO<sub>2</sub>, OH, and H<sub>2</sub>O in room temperature and combustion gases by use of a broadly current-tuned multi section InGaAsP diode laser[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(9): 1506-1512.
- [16] Mihalcea R M, Baer D S, Hanson R K. A diode-laser absorption sensor system for combustion emission measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(3): 327-338.
- [17] Ebert V, Teichert H, Strauch P, *et al.* Sensitive *in situ* detection of CO and O<sub>2</sub> in a rotary kiln-based hazardous waste incinerator using 760 nm and new 2.3 μm diode lasers [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 1611-1618.
- [18] Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K. Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(5): 711-722.
- [19] Zhang G L. Research on measurement method for one-dimensional temperature non-uniformity based on multiple-line [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 张光乐. 基于多吸收线 TDLAS 的一维温度不均匀性测量方法研究[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2016.