

基于吸收光谱技术在线测量煤球热解过程中 CH₄ 气体的浓度

张立芳, 王 飞, 俞李斌, 吴 奇, 严建华

浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 煤粉热解过程中产物及组分的不同会直接影响煤的燃烧特性, 为了进一步研究煤粉热解过程中产物浓度的变化, 采用 1.65 μm 附近的一组 $2\nu_3$ 的 CH₄ 气体吸收谱线, 在利用波长调制技术对原始激光强度修正的基础上, 实现了大同煤和准东煤热解过程中 CH₄ 气体浓度的在线测量。将直径约为 8 mm、质量约为 360 mg 的单颗粒煤球通过金属丝悬挂于石英管中, 为使单颗粒煤球在热解过程中被迅速加热且受热均匀, 采用高功率 CO₂ 激光器与反射镜实现单颗粒煤球的均匀对称加热。可调谐激光光束在单颗粒煤球下方约 10 mm 处经 3 次反射穿过石英管, CH₄ 气体浓度测量的过程从热解开始前一直持续到热解过程完全结束。在热解过程的开始阶段, CH₄ 气体的浓度迅速增加, 之后逐渐下降, 直至最后降为 0, 整个热解过程持续时间约为 60 s。在气体释放速率最大处, 准东煤产生的 CH₄ 气体的体积分数约为大同煤的 2 倍; 准东煤发生热解反应更加迅速, 且产生了较多的 CH₄ 气体。

关键词 光谱学; 可调谐激光吸收光谱; 煤粉热解; CH₄ 气体浓度; 在线测量

中图分类号 O657.38 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.083001

On-Line Measuring Concentration of CH₄ During Coal Particle Pyrolysis Based on Absorption Spectroscopy Technology

Zhang Lifang, Wang Fei, Yu Libin, Wu Qi, Yan Jianhua

State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The pyrolysis products and their components of pulverized coal will directly affect the combustion characteristics. In order to further study the variation of the product concentration during pyrolysis process, a group of CH₄ absorption lines ($2\nu_3$) near 1.65 μm are used for on-line measurement of CH₄ concentration in Datong pulverized coal and Zhundong pulverized coal pyrolysis processes based on wavelength modulation technique. The pulverized coal particle with diameter of 8 mm and mass of 360 mg is hung on the quartz tube, a high power CO₂ laser is applied to rapid and uniform heating of the pulverized coal particle. The tunable laser beam goes through the quartz tube cross section with triple effective reflection, and the laser beam is at 10 mm below the pulverized coal. The measurement process continues until the pyrolysis process is completely over. At the beginning of the pyrolysis process, the volume fraction of CH₄ increases rapidly, then gradually decreases until the concentration is zero, and the whole pyrolysis process lasts about 60 s. The volume fraction of CH₄ of Zhundong coal at maximum release rate is twice of that of Datong coal, and the pyrolytic reaction of Zhundong coal is quicker, and much more CH₄ gas can be generated by Zhundong coal.

Key words spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; pulverized coal pyrolysis; CH₄ concentration; on-line measurement

OCIS codes 300.6260; 140.3490; 140.3600; 040.5160

收稿日期: 2017-02-17; **收到修改稿日期:** 2017-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(51276165)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110101110019)

作者简介: 张立芳(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事可调谐激光吸收光谱技术在线测量及理论分析等方面的研究。

E-mail: 21227023@zju.edu.cn

导师简介: 王 飞(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事利用可调谐半导体激光吸收技术测量气体组分以及火焰辐射的反问题重建等方面的研究。E-mail: wangfei@zju.edu.cn(通信联系人)

1 引言

可调谐激光吸收光谱(TDLAS)技术具有非接触、响应快速、灵敏度高及环境适应性好等特点,在污染物在线监测、工业安全生产、大气环境监测等方面发挥了巨大作用^[1-3]。目前,国内外学者针对 TDLAS 技术开展了多方面研究,如中国科学院安徽光学精密机械研究所^[4-5]利用 TDLAS 技术来检测大气中 CO、NO₂ 等气体的浓度;Lackner^[6]等在实验室的小型流化床上,采用 2.3 μm 附近的吸收谱线在线测量了 3 种不同燃料在整个热解及燃烧过程中生成 CO 与 CH₄ 气体的浓度。

充分了解煤粉颗粒在燃烧及热解过程中气体的生成过程,并实时监测气体的浓度,可以更深入地认识煤粉的热解特性,对煤的高效清洁利用具有很重要的意义。传统的热解或气化实验一般多采用分时段采集产气,再利用气相色谱仪(GC)等仪器进行分析,计算采样时段内气体的累积生成量,仅有少数设备能做到在线分析及连续采集气体。何勇等^[7]采用激光诱导击穿光谱(LIBS)技术对煤粉的热解特性进行了研究,并同时测量了多种碱金属元素的释放过程。为了更好地理解单颗粒煤球的热解过程,本课题组在实验室利用 TDLAS 技术在线测量了不同煤种热解过程中热解产物浓度的变化。由于近红外附近的可调谐激光价格低廉,气体适应性较强,故采用 1.65 μm 附近的 CH₄ 气体吸收谱线来测量单颗粒煤球在热解过程中产生的 CH₄ 气体的浓度,关于可调谐激光的详细信息可参考文献^[8]。

2 吸收光谱的测量原理

激光器发射出的一束单色平行光束穿过测量区域后,单色激光的能量被特定的气体吸收,激光的入射光强与透射光强满足 Beer-Lambert 定律,其具体表达形式如下:

$$\tau(\nu) = \frac{I_1}{I_0} = \exp[-pxS(T)\phi(\nu)L], \quad (1)$$

式中 I_0 和 I_1 分别为单色激光的原始光强和透射光强; x 为气体的体积分数; $S(T)$ 为吸收谱线的线强, T 为被测温度; p 为气体总压力; $\phi(\nu)$ 为吸收谱线的线型函数,满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\nu)d\nu = 1$, L 为气体的吸收光程。

基于 TDLAS 技术,波长调制技术利用锁相放大器能够有效降低测量系统中各种环境噪声的干扰,同时能够提高系统的测量灵敏度,实现更精确及更低浓度的测量。从锁相放大器中得到的二次谐波信号,在扣除背景信号之后与被测气体的浓度成正比,气体浓度与二次谐波信号峰值之间的关系如下(更多关于波长调制技术的信息可参考文献^[9]):

$$x \propto \frac{\Delta\nu \times P_{2f} \times \pi}{I_0 \times S(T) \times L} \left\{ \frac{2}{m^2} \left[\frac{2+m^2}{(1+m^2)^{1/2}} - 2 \right] \right\}^{-1}, \quad (2)$$

式中 m 为调制系数; P_{2f} 为二次谐波信号的峰值; $\Delta\nu$ 为气体吸收谱线的线宽。由于测量得到的二次谐波信号峰值 P_{2f} 与浓度呈线性关系,因此需要经过标准气体标定后才可以得到气体浓度的绝对值。

2.1 CH₄ 谱线的选择

在热解过程中,单颗粒煤球生成 CH₄ 气体的体积分数约为 0.4%,浓度相对较低,因此对于 CH₄ 气体吸收谱线的选择有以下几点需要考虑:1) 所选气体吸收谱线的线强要足够强,能够探测到较低浓度 CH₄ 气体的吸收信号;2) CH₄ 的吸收谱线应远离附近其他吸收谱线,以避免被干扰。煤粉颗粒在热解过程中会产生 H₂、CO、CO₂ 和水蒸气等气体组分,CO₂ 和水蒸气等气体的干扰吸收会降低 CH₄ 气体的探测下限。因此,为了避免其他吸收谱线的干扰,实验选用 1653.72 nm 附近的一组 2ν₃ 的 CH₄ 气体吸收谱线来实时测量单颗粒煤球热解过程中产生的 CH₄ 气体的浓度^[10-11]。

图 1 所示为 1300~1900 nm 波长范围内 CH₄、CO₂、CO 和水蒸气等 4 种气体吸收谱线的强度,该谱线数据来自于 HITRAN 数据库。由图 1 可知:在 1653 nm 附近,CH₄ 气体的吸收谱线几乎不受 CO₂、CO 和水蒸气等谱线的干扰,且 CH₄ 的谱线吸收在此处达到最强;在 1600~1700 nm 范围内,CH₄ 气体谱线的线强约为 CO₂ 和水蒸气线强的 1000 倍;在常温常压下,实验选取的是 1653.72 nm 附近 3 条 CH₄ 吸收谱线叠加在一起互不可分的单个吸收峰,且此处的吸收线强最大。表 1 为所选择的 CH₄ 气体谱线的具体参数,更多关于 CH₄ 谱线的信息请参见文献^[11]。

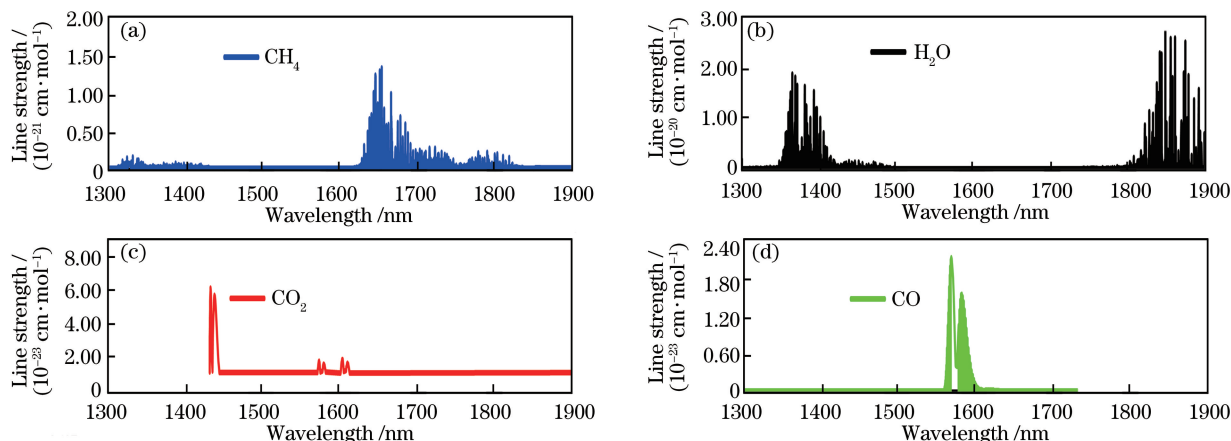


图1 HITRAN 数据库中 296 K 温度下 4 种气体吸收谱线的强度。(a) CH_4 ; (b) H_2O ; (c) CO_2 ; (d) CO

Fig. 1 Line strength of four kinds of gases at 296 K in HITRAN database. (a) CH_4 ; (b) H_2O ; (c) CO_2 ; (d) CO

表1 中心波长在 1653.72 nm 处的 CH_4 气体 R(3) 谱线的具体参数

Table 1 Parameters of selected CH_4 R(3) absorption transition at center wavelength of 1653.72 nm

Wavelength /nm	Wavenumber / cm^{-1}	Line strength (296 K) /($10^{-4} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{kPa}^{-1}$)	Lower state energy / cm^{-1}
1653.7284	6046.9420	2.06	62.8768
1653.7255	6046.9527	2.52	62.8758
1653.7222	6046.9647	3.31	62.8782

图2 给出了常温常压下体积分数为 1% 的 CH_4 气体在 1653 nm 处的 R(3) 吸收谱线, 其中光谱参数来自 HITRAN 数据库。从图2 可以看出, 常温常压下, 在几个波数的扫描范围内, CH_4 的吸收线强非常大, 且谱线附近几乎没有明显的干扰。在单颗粒煤球热解实验系统中, 压力约为 101 kPa, 测量的有效光程为 9 cm, 该光程对于 CH_4 气体浓度的测量来说已足够。

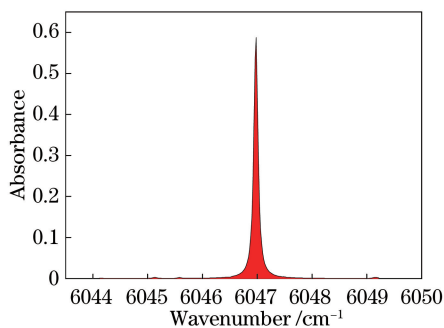


图2 常温常压下体积分数为 1% 的 CH_4 气体在 1 cm 光程中的吸收谱线图

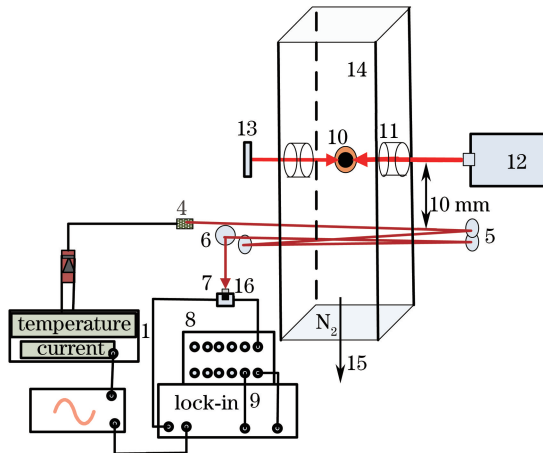
Fig. 2 Absorbance line of CH_4 gas with volume fraction of 1% in 1 cm path-length at ambient temperature and pressure

2.2 煤粉热解测量实验系统

图3 为单颗粒煤球热解过程测量示意图, 实验系统主要包括两部分: 加热装置和光学测量装置。采用高功率 CO_2 激光器加热单颗粒煤球, 激光器的输出功率为 50 W。为了使单颗粒煤球受热均匀, 采用高反射镀膜平面镜来实现激光对称加热, 从而迅速将煤粉加热至 1000 K 左右。在实验中, 采用分布反馈式可调谐 CH_4 气体激光器进行测量, 其中心波长在 1653.72 nm 附近。锁相放大器产生的频率为 10 kHz 的调制信号与信号发生器产生的 200 Hz 的扫描信号混合后, 直接加载至激光控制器的调制电压入口, 用来控制波长的扫描范围及产生调制信号。通过调节激光控制器的温度与电流来控制激光的波长输出, 激光光束通过光纤输出后再经准直器准直, 形成直径约为 2 mm 的近似平行光束。激光束经过 3 次有效反射后, 平行通过石英管, 其测量总光程为 9 cm, 激光能量被 CH_4 气体吸收后衰减, 透射后的激光由 InGaAs 探测器接收并转换为电信号。其中的一路信号输入至锁相放大器中, 以获得二次谐波信号; 另一路信号则直接由数据采集卡进行

采集和数模转换,然后送入计算机中进行分析 and 显示数据,数据采集程序的相应耗时为 1 ms。

在 TDLAS 的光路设计中,通过加装多个反射镜实现了光路的多次反射,使光路交叉穿过测量截面,从而使该测量结果能够较好地反映测量截面内气体的平均浓度。测量过程中采用半导体激光器,但其功率较低,测量过程中需要交叉穿过石英管,且热解过程中会产生一定的热辐射等,干扰激光信号的测量,造成测量过程中存在一定误差。通过在测量过程中加装滤波片,不仅保证了一定的透射率,而且还阻挡了其他不需要的辐射,避免了其他干扰光线的影响。



1: laser controller; 2: signal generator; 3: diode laser; 4: collimator; 5: mirror; 6: focusing mirror; 7: detector; 8: data acquisition system; 9: lock-in amplifier; 10: single coal particle; 11: optical access ports; 12: high power laser; 13: reflection mirror; 14: iron wire; 15: N₂ outlet from tube; 16: transmission filter

图 3 单颗粒煤球热解过程测量示意图

Fig. 3 Illustration of measuring pyrolysis process of pulverized coal particle

单颗粒煤球的直径约为 8 mm,质量约为 360 mg,是由磨碎的煤粉混合均匀后再经模具压制而成的。将煤球用金属丝垂直悬挂于石英管中,平行的激光光束在单颗粒煤球下方约 10 mm 处平行通过石英管截面,石英管的横截面积约为 30 mm×30 mm。单颗粒煤球被加热后迅速发生热解反应,产生的热解气体随载气(N₂)以 1 L·min⁻¹的速率离开热解区域。实验选取大同煤和准东煤为研究对象,表 2 为大同煤与准东煤的工业分析与元素分析结果。

表 2 大同煤与准东煤的工业分析与元素分析结果(质量分数)

Table 2 Proximate analysis and ultimate analysis results of Datong and Zhundong coals (mass fraction) %

Coal	Proximate analysis			Ultimate analysis			
	Volatile matter	Ash	Fixed carbon	C	H	N	O
Datong coal	23.97	5.47	70.56	79.94	4.65	0.69	8.44
Zhundong coal	30.86	4.34	64.79	75.39	3.48	1.19	15.19

2.3 CH₄ 气体浓度标定

由(2)式可知,采用波长调制技术测量气体浓度时,需要在相同的测量环境下进行气体浓度的标定,因此实验在相同的环境下通过配比不同体积比的 N₂ 与 CH₄,得到了不同浓度的 CH₄ 气体的二次谐波吸收信号,并拟合得到了二次谐波信号峰值与气体浓度的对应关系。图 4 为标定过程中标准 CH₄ 气体浓度与二次谐波峰值信号的对应关系,将 CH₄ 气体与 N₂ 按不同的体积比进行配比,得到了不同浓度的标准 CH₄ 气体。

将得到的 CH₄ 气体的体积分数与其扣除背景信号后对应的二次谐波信号峰值进行线性拟合,便可以得到气体体积分数与二次谐波信号峰值的函数关系:

$$x = 2.893P'_{2f} - 0.1653, R = 0.9945, \quad (3)$$

式中 P'_{2f} 为扣除背景后的二次谐波信号峰值。得到气体体积分数与二次谐波峰值信号的关系后,通过在线测量热解过程中 CH₄ 气体的二次谐波信号峰值,便可以反推出 CH₄ 气体体积分数的变化。

图 5 为采用 TDLAS 技术在线测量单颗粒煤球热解过程的照片,图 6 为单颗粒煤球高温热解过程中测量得到的二次谐波信号。

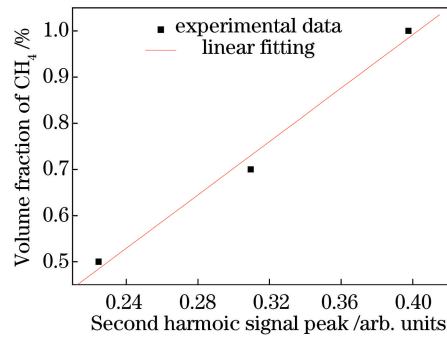
图 4 CH_4 气体体积分数与谐波信号峰值之间的对应关系Fig. 4 Relationship between volume fraction of CH_4 gas and second harmonic signal peak

图 5 采用 TDLAS 技术测量单颗粒煤球热解过程的照片

Fig. 5 Photograph of measuring pyrolysis process of pulverized coal particle by TDLAS technology

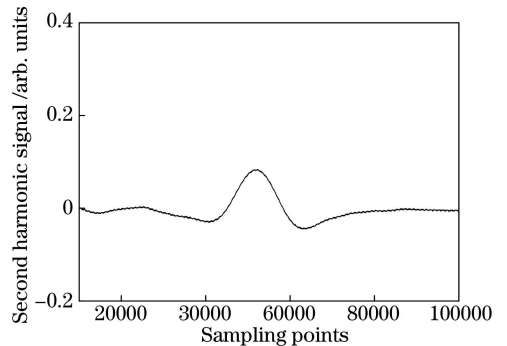


图 6 单颗粒煤球热解过程中测量得到的二次谐波信号

Fig. 6 Second harmonic signal measured during pyrolysis process of pulverized coal particle

3 结果与分析

实验分别在线测量了大同煤和准东煤在热解过程中产生的 CH_4 气体的体积分数。 CH_4 气体浓度在线测量开始于单颗粒煤球加热热解之前,且直到煤球热解过程完全结束为止。在测量过程中发现,煤球被迅速加热至热解温度,并产生大量的热解气,热解气里面包含有一定的焦油与炭黑颗粒,这会使激光的出射光强有所降低。由(2)式可知,气体的体积分数不仅与二次谐波信号峰值成正比,还与激光出射光强成反比,因此直接利用二次谐波信号峰值与体积分数的拟合关系得出的气体的体积分数会有一些的误差,因此在测量二次谐波信号峰值的同时,也实时记录了激光的强度值 I_0 ,经过修正后利用(3)式就可计算得到测量过程中气体的体积分数。

图 7 和图 8 分别是单次测量得到的热解过程中 CH_4 气体体积分数的变化情况,测量过程中会存在一定的误差,这主要是由于每次热解过程中所采用的煤球质量会有微小的差别,从而造成 CH_4 气体体积分数的最大值上下波动。此外,热解过程中激光强度的变化亦会使测量结果产生一定的误差。在微弱信号的测量中,采用波长调制技术测量气体浓度时,1%的二次谐波信号峰值测量误差或者是 1%的激光强度测量误差只会引起 1%的浓度测量误差,这主要是因为二次谐波信号峰值正比于气体浓度,激光强度反比于气体浓度。

煤球颗粒热解后产物的组成与热解反应活性、碳化程度有关。一般来说,与碳化程度高的煤种相比,碳化程度低的煤种的热解产物中含有更多的煤气(H_2 和 CH_4),且热解产物的热解反应活性更高。煤中的脂肪侧链受热易热解,生成气态烃,如 CH_4 、 C_2H_6 等,且煤中脂肪结构的低分子化合物在受热时也会分解生成气态烃类^[12]。图 7 和图 8 显示的是不同煤种的煤球颗粒在整个热解过程中产生的 CH_4 气体的体积分数曲线,实验进行了多次重复测量,且测量结果为相邻处 3 次的有效平均值。从图中可以看到,不同煤种的单颗粒煤球在整个热解过程中产生 CH_4 气体的过程非常相似;在热解过程的开始阶段, CH_4 气体的释放速度迅

速增加,之后释放速度逐渐下降,直至最后为0,整个测量过程持续约80 s,其中热解过程持续约60 s。在准东煤热解过程开始约20 s时, CH_4 气体的释放浓度达到最大,而大同煤球颗粒则在13 s时便达到最大,之后逐渐降低。其中,在气体释放速率最大处,准东煤所释放的 CH_4 气体的体积分数约为大同煤的2倍,且准东煤热解过程持续的时间比大同煤的长。这主要是因为准东煤属于比较年轻的煤种,碳化程度较低,热解反应容易发生,且热解过程中挥发分的含量较高,较多的氢原子以 CH_4 的形式热解析出。

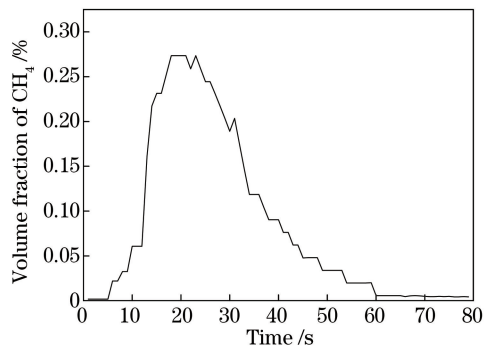


图7 大同煤在热解过程中产生 CH_4 气体的体积分数曲线

Fig. 7 Measured curve of volume fraction of CH_4 gas generated during pyrolysis process of Datong coal

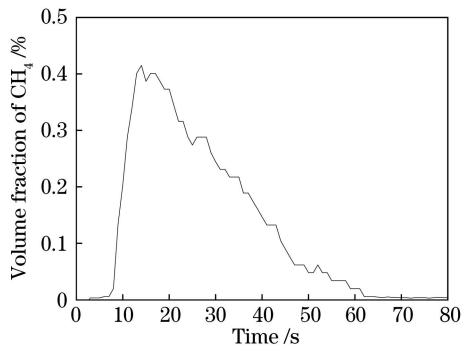


图8 准东煤在热解过程中产生 CH_4 气体的体积分数曲线

Fig. 8 Measured curve of volume fraction of CH_4 gas generated during pyrolysis process of Zhundong coal

Lackner等^[13]采用TDLAS技术并利用 $2.3\ \mu\text{m}$ 附近的吸收谱线,在线测量了烟煤在小尺寸流化床燃烧室中于整个热解过程和焦炭燃烧过程中产生 CO 和 CH_4 的体积分数,结果如图9所示。具体工况:床温为1073 K,通入体积分数为10%的 O_2 ,烟煤质量为0.5 g。在热解开始阶段, CH_4 气体被迅速释放出来,热解速率最大时 CH_4 气体的体积分数约为1.25%;随着时间延长,气体浓度逐渐降低,在后半段焦炭燃烧过程中 CH_4 气体浓度表现出了一定的上升趋势,这主要是由其测量范围接近于该吸收谱线的探测下限引起的。

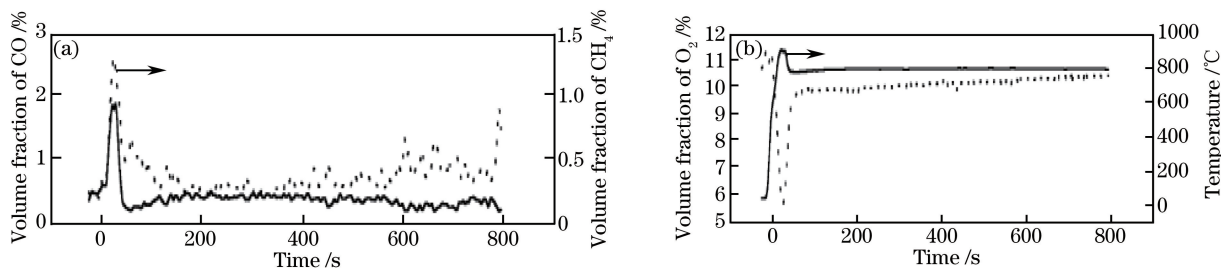


图9 (a)烟煤在热解过程及焦炭燃烧过程中产生 CH_4 与 CO 体积分数的变化曲线及(b)实验工况^[13]

Fig. 9 (a) Variations of volume fraction of CH_4 and CO gases generated during pyrolysis and char combustion and (b) experiment conditions^[13]

将本文得到的 CH_4 气体体积分数的变化与Lackner等的实验结果对比后发现,在煤粉热解过程中, CH_4 气体浓度变化的趋势基本是一致的,都是先逐渐升高,之后逐渐降低,最终降为0;Lackner等得到的热解过程中 CH_4 气体浓度的变化趋势与本课题组得到的实验结果类似,不同之处在于Lackner等的实验中通入了 O_2 ,虽然 O_2 的通入会对不同组分的浓度有一定影响,但对热解过程中气体浓度变化趋势的影响不大。此外,对比结果也表明了采用TDLAS技术实现热解过程中气体浓度在线测量的准确性与实用性。

4 结 论

煤粉热解产物中组分的不同直接影响着煤的燃烧特性,对煤热解产物的准确测定可以有效地优化燃烧,使燃烧系统设备的运行与煤的燃烧特性相适应,从而进一步提高燃烧效率。在单颗粒煤球的热解过程中, CH_4 气体是最为常见的气体产物。采用TDLAS技术实现了直径相同但煤种不同的煤球颗粒在热解过程中产生的 CH_4 气体浓度的在线测量,通过增加反射镜使 CH_4 气体浓度的测量结果能够很好地反应整个测量截面内的气体浓度,采用滤波片有效降低热解过程中辐射光的影响。以中心波长为 $1653.72\ \text{nm}$ 的 CH_4 气

体激光器作为测量系统,激光在单颗粒煤球下方 10 mm 处测量煤球的热解过程。TDLAS 测量技术非常适合气体浓度的在线测量,且整个测量过程不存在延时等问题;同时,TDLAS 技术非常适合于在线检测热解过程中气体的组分,为实时在线测量煤粉热解过程中其他气体组分的变化提供了依据。

参 考 文 献

- [1] Allen M G. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows[J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(4): 545-562.
- [2] Baer D S, Nagali V, Furlong E R, *et al.* Scanned- and fixed-wavelength absorption diagnostics for combustion measurements using multiplexed diode lasers[J]. *American Institute of Aeronautics Astronautics Journal*, 1996, 34(3): 489-493.
- [3] Liu Lifu, Zhang Han, Wen Zuole, *et al.* Application of TDLAS technique to HCl online monitoring in waste incineration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 110101.
刘立富, 张 涵, 温作乐, 等. 基于 TDLAS 技术在垃圾焚烧中 HCl 的在线监测应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 110101.
- [4] Yao Lu, Liu Wenqing, Liu Jianguo, *et al.* Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0215003.
姚 路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0215003.
- [5] Hu Renzhi, Wang Dan, Xie Pinhua, *et al.* Diode laser cavity ring-down spectroscopy for atmospheric NO₂ measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0230006.
胡仁志, 王 丹, 谢品华, 等. 二极管激光腔衰荡光谱技术测量大气 NO₂ [J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0230006.
- [6] Lackner M, Totsching G, Winter F, *et al.* *In situ* laser measurements of CO and CH₄ close to the surface of a burning single fuel particle[J]. *Measurement Science & Technology*, 2002, 13: 1545-1551.
- [7] HE Yong. Study on alkali release and OH radicals during coal and syngas combustion using laser diagnostic techniques [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 41-57.
何 勇. 煤及气化煤气燃烧过程中的碱金属及 OH 自由基激光在线测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 41-57.
- [8] Werle P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 1998, 54: 197-236.
- [9] Zhang Lifang, Wang Fei, Yu Libin, *et al.* The research for trace ammonia escape monitoring system based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(6): 1639-1642.
张立芳, 王 飞, 俞李斌, 等. 基于可调谐激光吸收光谱技术的脱硝过程中微量逃逸氨气检测实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(6): 1639-1642.
- [10] Xing Dawei, Wang Fei, Jiang Zhishen, *et al.* Two-dimensional reconstruction for gas concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(3): 241-246.
邢大伟, 王 飞, 姜洽深, 等. 可调谐激光吸收光谱应用于气体二维浓度分布重建研究[J]. *光学技术*, 2013, 39(3): 241-246.
- [11] Yao Hua. Research on remote sensing of methane based on tunable diode laser absorption spectroscopy technique[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011: 34-60.
姚 华. 采用可调谐激光吸收光谱技术遥测甲烷气体浓度的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 34-60.
- [12] Xie Kechang. Coal structure and its reactivity[M]. Beijing: Science Press, 2002: 210-268.
谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 210-268.
- [13] Lackner M, Loeffler G, Totsching G, *et al.* Carbon conversion of solid fuels in the freeboard of a laboratory-scale fluidized bed combustor-application of *in situ* laser spectroscopy[J]. *Fuel*, 2004, 83: 1289-1298.