

# 高温窑炉气体红外辐射被动遥测

高乾坤<sup>1,2,3</sup>, 刘文清<sup>1,3</sup>, 张玉钧<sup>1,3</sup>, 高闽光<sup>1,3</sup>, 李相贤<sup>1,3\*</sup>, 童晶晶<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院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, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>安徽省环境光学监测技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 基于傅里叶变换红外光谱技术对高温窑炉内气体红外辐射信号进行了遥测研究。根据工业现场条件, 利用大气辐射原理建立被动辐射模型, 计算了炉膛内高温气体透射率。针对湍流噪声对信噪比的影响, 研究了红外干涉信号光谱转换的数据处理方法, 以零光程差为基准对齐干涉信号, 以实现多次扫描干涉信号的平均, 减小了噪声和计算量, 并提高了光谱数据率。利用 HITRAN 数据库和高温参考谱模型法, 对谱线线强、线宽修正合成的校准光谱与透射谱进行非线性最小二乘拟合, 反演了炉膛内不同吸收波段的高温气体浓度。结果表明该技术在窑炉内及其他工业燃烧过程中对高温气体的在线检测是可行、可靠的。

**关键词** 大气光学; 辐射传输; 数据处理; 光谱分析; 遥感

中图分类号 P247.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0801002

## Infrared Radiation Passive Remote Detection of Gas in High Temperature Kiln

Gao Qiankun<sup>1,2,3</sup>, Liu Wenqing<sup>1,3</sup>, Zhang Yujun<sup>1,3</sup>, Gao Minguang<sup>1,3</sup>, Li Xiangxian<sup>1,3</sup>, Tong Jingjing<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optics for Environmental Monitoring Technology, Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** The remote detection of gas infrared radiation signal in high temperature kiln is carried out based on Fourier transform infrared spectrometry technique. According to industrial site conditions, a passive radiation model is built based on the principle of atmospheric radiation, and the high temperature gas transmittance in the cement-kiln is calculated. Aiming at the influence of turbulence noise on the signal to noise ratio, a data processing method for spectrum inversion of infrared interference signal is studied, and the average signal of multiple scanning interference signal is obtained when we align the interference signal on the basis of zero optical path difference. The noise and the amount of computation are reduced, and the spectral data rate is improved. Based on the HITRAN database and the high temperature reference spectrum model, the nonlinear least square fitting method is used for the spectrum line strength and corrected and transmission spectra obtained by line width correction, and the concentration of high temperature gas in cement-kiln in different absorption bands is inverted. The results show that the proposed method for on-line monitoring of high temperature gas in the cement-kiln and other industrial combustion processes is feasible and reliable.

**Key words** atmospheric optics; radiation transmission; data processing; spectrum analysis; remote sensing

**OCIS codes** 010.5620; 070.4560; 070.4790; 120.0280

收稿日期: 2017-03-06; 收到修改稿日期: 2017-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(41375027)

作者简介: 高乾坤(1985—), 男, 博士, 工程师, 主要从事被动遥测方面的研究。E-mail: 94362018@qq.com

\* 通信联系人。E-mail: lixx@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

工业生产过程中通常采用煤气燃烧加热窑炉,并将其温度控制在  $1000\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间。工业窑炉内的一氧化碳(CO)和二氧化碳( $\text{CO}_2$ )等气体是燃烧过程分析与控制的重要参照气体,其浓度可用于调节空气消耗系数,以达到最高燃烧效率。炉膛内产生的氮氧化物和二氧化硫( $\text{SO}_2$ )是酸雨的主要来源,需要对其进行长期监测与控制。目前传统的窑炉高温气体监测通常采用直接插入式或抽取式气体检测方式,抽取过程中样品受吸附、其他物质污染以及人为因素等干扰,因此该过程对测量精度有一定的影响;此外,由于抽取过程耗时较长,测量结果不能实时反应气体浓度的变化,无法长期适应炉内的高温、粉尘环境。近年来,可调谐激光吸收光谱(TDLAS)技术、全息干涉技术等光学监测技术得到了迅速发展。TDLAS 技术具有装置结构简单、不受测量环境中颗粒物和其他气体成分干扰、响应速度快以及灵敏度高等优势,但该技术无法实现多组分同时检测,且只能进行接触式测量;全息干涉技术具有可实时测量且时间分辨率和空间分辨率高的优点,但其光路比较复杂,对测量系统的防震性能和实验时的工作环境要求较高,且只能进行接触式测量,因此其实际使用受到了限制。

傅里叶变换红外光谱(FTIR)技术可扫描较宽的光谱范围,该技术具有分辨率高、通量大及频带宽等优势,无需对样品进行预处理,可同时监测多种污染气体。鉴于高温气体红外特征辐射与气体浓度之间存在定量关系,炉内高温气体的红外特征辐射为气体浓度检测提供了可行的技术途径<sup>[1]</sup>。通过 FTIR 被动遥测方法获得红外特征辐射光谱,避免了炉内高温复杂环境的影响。然而,国内却缺少相关的深入研究工作,这主要是因为:气体分子吸收线的线强是温度的函数,而燃烧流场的温度分布是不均匀的,随着燃烧的进行,温度一直在变化,从而导致目标吸收线的线强持续改变;目标气体吸收线的展宽系数随着温度的变化而变化(炉膛内一般是低压,不考虑其对展宽的影响);在工业环境在线监测过程中,红外信号易受湍流噪声的干扰,从而对在线测量结果产生影响。

针对上述问题和难点,本文研究了通过遥测炉膛内高温气体红外辐射光谱检测气体浓度的相关技术,提出了针对加热炉工况的红外辐射传输模型和高温气体的红外特征光谱获取,并以零光程差(ZPD)为基准对齐干涉信号,以实现多次扫描干涉信号的平均,从而达到降噪目的,对高温下 FTIR 的线强、线宽温度进行了修正,并通过高温参考谱模型合成校准光谱,应用非线性最小二乘法<sup>[2]</sup>实现了在线气体浓度反演。

## 2 被动遥测辐射原理及模型

对工业气体的被动遥测主要基于对气体红外辐射和吸收的分析。通常情况下,红外探测器前的传输介质可分为多匀质层,每一匀质层都吸收到前一层的辐射并对下一层输出辐射,高温 CO 的被动遥测正是基于这一原理。由于炉膛的尺寸有限,炉膛内的气体一方面吸收来自于炉壁的背景辐射,另一方面产生高温特征辐射,如图 1 所示。

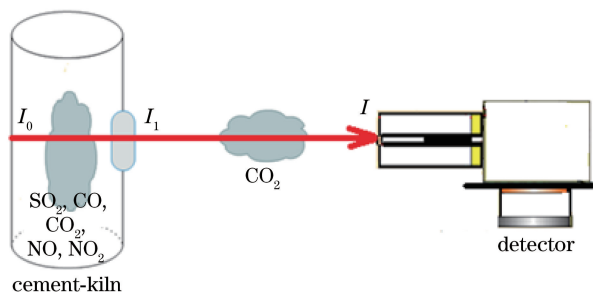


图 1 工业炉膛辐射模型

Fig. 1 Radiation model of industrial cement-kiln

炉膛内的背景辐射强度  $I_0$  为高温炉壁的辐射,  $I_1$  包括  $I_0$  透过炉膛内并被气体吸收后的红外辐射和炉膛内气体自身的能量辐射,  $I$  为被动 FTIR 测量系统最终探测到的相对辐射强度谱,即  $I_1$  透过炉膛外空气并被气体吸收后的辐射。炉膛外空气中含有  $\text{CO}_2$ , 所以将整个模型分为炉膛外和炉膛内 2 个部分,按照从外到里的顺序进行分析研究,以获得气体透射谱的理论表达式。

### 2.1 炉膛外部模型

炉膛外部模型主要是从测量光谱(图 2)中扣除空气中 CO<sub>2</sub> 的吸收,根据仪器测得的  $I(\lambda)$  和空气中 CO<sub>2</sub> 的透射率  $\tau_1(\lambda)$  计算  $I_1(\lambda)$ 。由于炉膛外空气温度与炉膛内空气温度相差很大,忽略空气中 CO<sub>2</sub> 自身的辐射能量(仪器自身辐射也可忽略),则有

$$I_1(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{\tau_1(\lambda)}. \quad (1)$$

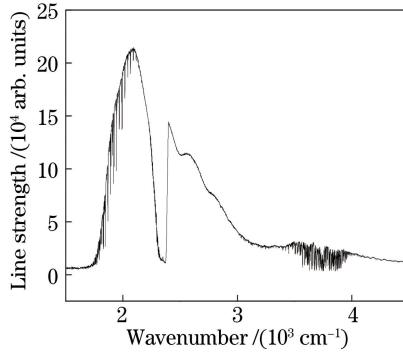


图 2 平均光谱

Fig. 2 Averaged spectrum

根据朗伯-比尔定律,有

$$\tau_1(\lambda) = \exp[-\alpha(\lambda)cl], \quad (2)$$

式中  $\alpha(\lambda)$  为 CO<sub>2</sub> 的吸收系数,  $c$  为空气中 CO<sub>2</sub> 的浓度,  $l$  为炉膛到探测器的距离(实际测量距离为 1.5 m)。

### 2.2 炉膛内部模型

炉膛内 CO<sub>2</sub> 等气体温度与炉壁温度接近,气体自身的辐射能量  $I_{CO_2}(\lambda)$  不能忽略,即  $I_1(\lambda)$  包含了  $I_0(\lambda)$  被炉膛内 CO<sub>2</sub> 等气体吸收后的红外辐射和炉膛内 CO<sub>2</sub> 自身的辐射能量,可表示为

$$I_1(\lambda) = \tau_2(\lambda)I_0(\lambda) + [1 - \tau_2(\lambda)]I_{CO_2}(\lambda), \quad (3)$$

式中  $I_0(\lambda)$  为炉壁背景辐射,即  $I_1(\lambda)$  扣除 CO<sub>2</sub> 吸收后的相对辐射强度谱。转换(3)式得到炉膛内 CO<sub>2</sub> 的透射率为

$$\tau_2(\lambda) = \frac{I_1(\lambda) - I_{CO_2}(\lambda)}{I_0(\lambda) - I_{CO_2}(\lambda)}. \quad (4)$$

CO<sub>2</sub> 等气体自身的辐射能量  $I_{CO_2}(\lambda)$  与其辐射亮度有关,在一定范围内辐射亮度变化与相对辐射强度变化一一对应,即

$$\frac{I_0(\lambda)}{I_{CO_2}(\lambda)} \Rightarrow \frac{L_0(\lambda)}{L_{CO_2}(\lambda)}, \quad (5)$$

式中  $L_{CO_2}(\lambda)$  与  $L_0(\lambda)$  分别对应炉膛内 CO<sub>2</sub> 等气体与炉壁背景的相对辐射亮度。

对于每一匀质层而言,在局部热力学平衡条件下,自身所发出的相对辐射亮度的等效黑体辐射温度可由普朗克函数  $B(\bar{\nu}, T)$  (波数形式)定义,即

$$L(\bar{\nu}) = B(\bar{\nu}, T) = C_1 \bar{\nu}^3 / [\exp(C_2 \bar{\nu} / T) - 1], \quad (6)$$

式中  $\bar{\nu}$  为波数,  $T$  为辐射体等效黑体辐射温度,  $C_1 = 1.1911 \times 10^{-12}$  为第一辐射常数,  $C_2 = 1.4388$  为第二辐射常数。

由(6)式可知,相对辐射亮度只与等效黑体辐射温度有关,通过测量炉膛内待测气体与炉壁背景的等效黑体辐射温度即可完成辐射亮度与相对辐射强度的转换计算(辐射体的发射率小于 1,等效黑体辐射温度低于实际温度,测温时对辐射体的发射率进行查表,可对实际温度进行修正),求得  $L_0(\lambda)$  和  $L_{CO_2}(\lambda)$ ,再根据(5)式计算  $I_{CO_2}(\lambda)$ ,最后代入(4)式计算 CO<sub>2</sub> 透射谱,如图 3 所示。

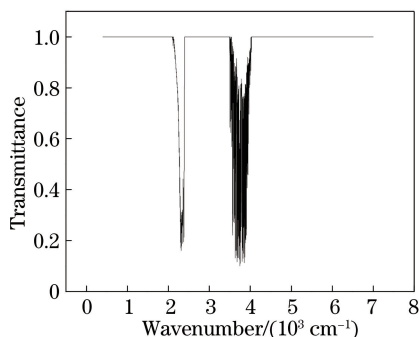


图 3 CO<sub>2</sub> 的透射谱

Fig. 3 Transmittance spectrum of CO<sub>2</sub>

### 3 含湍流噪声的干涉信号平均滤波方法

FTIR 技术发展到现在,红外仪器的自身噪声已经相当低,对于普通的红外测试,基本观察不到基线上的噪声。但是在工业环境在线监测过程中,红外信号易受光源抖动、湍流噪声等的干扰。光谱仪在接收干涉信号的同时,不可避免地叠加了许多噪声信号,尤其是湍流噪声,这就需要对干涉信号进行处理,以在不更换光谱仪的情况下提高光谱的信噪比<sup>[1]</sup>。

图 4 为 FTIR 系统示意图,FTIR 技术的基本原理是:红外辐射通过光学组件进入干涉仪,经干涉仪调制后产生干涉信号,利用软件对干涉信号进行傅里叶变换(FT),得到频谱(复数谱)后再求模,最终得到光谱图(功率谱)。

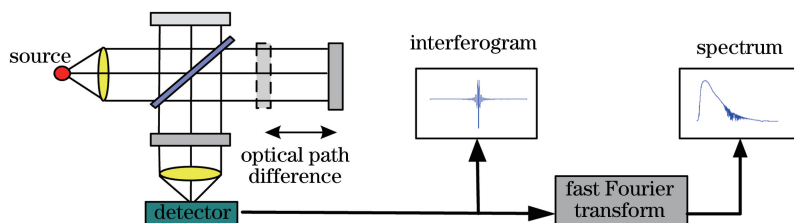


图 4 FTIR 系统示意图

Fig. 4 Schematic of FTIR system

通常在线 FTIR 监测的信号处理方法是:1)对光谱仪采集的干涉图(图 5)加窗(乘以非矩形窗函数);2)进行 FT;3)求模得到光谱图(图 6);4)对多组光谱图求均值,以提高光谱信噪比<sup>[3]</sup>。

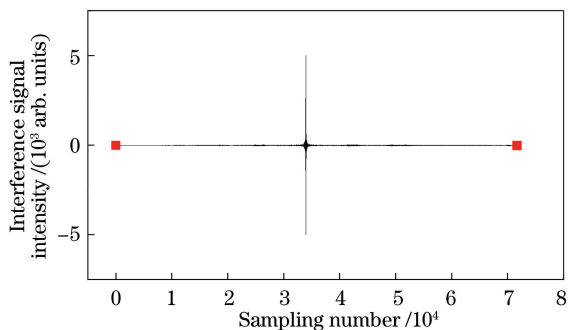


图 5 干涉信号

Fig. 5 Interference signal

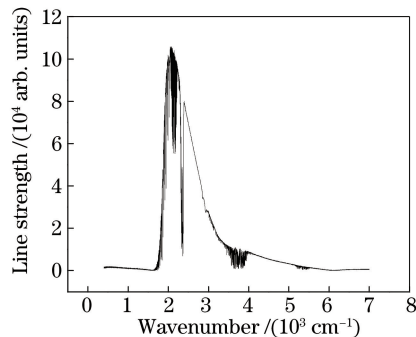


图 6 光谱图

Fig. 6 Spectrogram

传统处理干涉信号的方法流程图如图 7 所示。通过光谱数据平均[即先对干涉信号进行 FT,再求平均]的方法减小噪声影响,但光谱数据只代表功率(复数谱的绝对值),不包含信号的相位信息,利用平均光谱数据可以减小功率估计的偏差,改善存在噪声情况下的信号功率测量精度,但并没有从本质上减小噪声方差<sup>[4]</sup>。

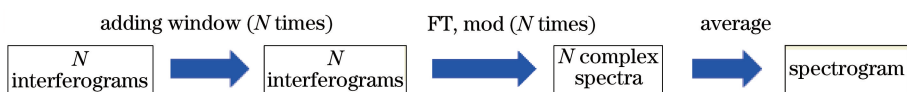


图 7 传统数据处理方法示意图

Fig. 7 Schematic of traditional data processing method

通常,通过在线测量获得的真实干涉信号的相位是相同的,对干涉信号取平均后可得到真正的信号振幅度;湍流噪声信号在各个数据集中的相位是不同的,平均后的信号幅度将趋于 0。因此,对包含湍流噪声的干涉信号进行平均能够减小噪声的方差,并能保存真正相干信号的振幅。借助干涉数据平均可以实际地改善带有噪声信号的信噪比。

实际在线测量时,导致不能直接对干涉信号进行累加平均的因素包括:1) ZPD 在整个干涉数据中的位置不固定;2) 仪器硬件及工业环境等导致干涉图强度产生非线性相位误差。

基于干涉信号的特征,提出对干涉图进行平均的方法:1) 按照采集顺序的奇偶性对干涉图数据组进行分类(不考虑单边采集);2) 将每条干涉数据以各自 ZPD 位置为中心分成左右两部分,以数据大的部分为模板对另一部分补零(相位校正);3) 以干涉数据组中最大采样数的数据为模板、以各自 ZPD 位置为中心对所有干涉数据进行左右对称补零(干涉图对齐)。该数据处理方法可以对干涉数据进行累加平均及 FT。

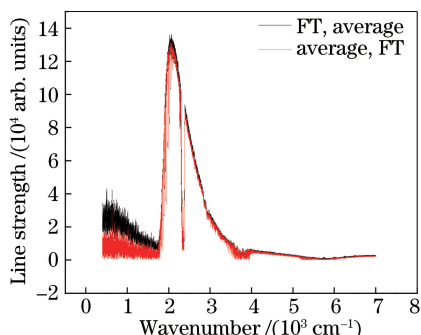


图 8 同组含湍流噪声信号的不同数据处理方法的平均结果

Fig. 8 Averaged results of signal containing turbulence noise in the same group obtained by different data processing methods

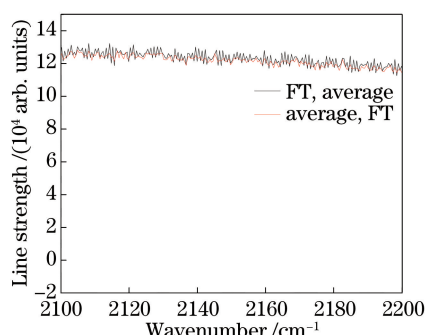


图 9 2100~2200 cm<sup>-1</sup> 波段光谱对比

Fig. 9 Comparison of spectra ranging from 2100 cm<sup>-1</sup> to 2200 cm<sup>-1</sup>

利用两种不同数据处理方法得到同组含湍流噪声的干涉信号,再进行信噪比对比(图 8、9)。图 9 为在 CO 中红外吸收波段的光谱信噪比对比。方法 1 是先对干涉信号取平均,再进行 FT;方法 2 是先对干涉信号进行 FT,再取平均。方法 1 得到噪声的峰-峰值  $R_{SNPP}$  和噪声均方根  $R_{SNMRV}$  分别为 3.78 和 72.98,方法 2 得到的  $R_{SNPP}$  和  $R_{SNMRV}$  分别为 1.25 和 25.88。无论是通过  $R_{SNPP}$  还是  $R_{SNMRV}$  来计算光谱信噪比,方法 1 都好于方法 2,方法 1 得到的信噪比是方法 2 得到的信噪比的 3 倍左右。

图 10 为针对图 7 数据处理方法提出改进方法的流程图。若对  $N$  条光谱求平均,传统方法需要进行  $N$  次 FT,而所提方法只需要进行 1 次 FT,计算量大幅减小,且缩短了仪器的响应时间。



图 10 所提数据处理方法流程图

Fig. 10 Schematic of proposed data processing method

## 4 高温气体浓度定量分析及误差分析

### 4.1 气体浓度定量分析

基于 HITRAN 数据库<sup>[5]</sup>,对高温下 FTIR 的线强和线宽温度进行修正,再通过高温参考谱模型合成校

准光谱,基于非线性最小二乘法从实验测得的透射谱中反演 CO<sub>2</sub> 浓度。将上述过程分为以下 4 步。

1) 校准光谱的合成。基于 HITRAN 标准光谱数据库,建立一个包括测量条件下温度、光程、压力、气体种类等环境参数以及分辨率、视场角和切趾函数等仪器参数的高温数学模型,利用该模型和数值积分法进行逐线积分,计算  $\Delta\gamma$  波段范围内所有经过光程  $L$  (实际炉膛长度为 2 m) 后的气体平均透射率<sup>[6]</sup>,即

$$T(\gamma) = \frac{1}{\Delta\gamma} \int_{\Delta\gamma} \left\{ \exp \left[ - \sum_i^k \int_0^L \sigma_i(x, y) p(x) dx \right] \right\} d\gamma, \quad (7)$$

式中  $\sigma_i(x, y)$  为第  $i$  条谱线在波数  $\gamma$  处的分子吸收系数,  $x, y$  为空间位置,  $p(x)$  为  $x$  处的分子吸收浓度,  $k$  为某一确定波数邻近的所有谱线数。

2) 根据麦克斯韦-玻尔兹曼分布规律、量子论和波动力学,得到吸收线强与实际温度有关,因此需要进行线强修正<sup>[7]</sup>,即

$$S_{\eta\eta}(T) = S_{\eta\eta}(T_{\text{ref}}) \frac{Q(T_{\text{ref}})}{Q(T)} \frac{\exp(-c_2 E/T)}{\exp(-c_2 E/T_{\text{ref}})} \frac{1 - \exp(-c_2 \nu_{\eta\eta}/T)}{1 - \exp(-c_2 \nu_{\eta\eta}/T_{\text{ref}})}, \quad (8)$$

式中  $\nu_{\eta\eta}$  为吸收线的频率,  $E$  为吸收线的低态能量,  $T_{\text{ref}}$  为参考温度,  $Q(T)$  为总配分函数(包括电子态、振动和转动配分函数),  $Q(T_{\text{ref}})$  为总配分函数的参考值(由 HITRAN 数据库提供)。

3) 温度影响分子谱线的展宽。一般分子谱线是洛伦兹线型和多普勒线型的综合应用,表现为沃伊特线型,其理论展宽<sup>[8]</sup>可表示为

$$r_v = 0.5 \left( 1.0692 r_L + \sqrt{0.86639 r_L^2 + 4 r_D^2} \right), \quad (9)$$

式中  $r_L$  为洛伦兹线型展宽,  $r_D$  为高斯线型展宽。

4) 非线性最小二乘拟合。对合成的校准光谱与测量光谱进行拟合,通过改变初始浓度值来重复计算并判断两者的残差是否为最小,即

$$x^2(a) = \sum_{j=1}^N [\tau_j - \tau_{\text{cal}}(\nu_j, a)]^2, \quad (10)$$

式中  $\tau_j$  为测量的透射率,  $\tau_{\text{cal}}(\nu_j, a)$  是计算的透射率,  $j$  对应于数字光谱  $\tau$  中的  $N$  个数据点,参数  $a$  包括各条谱线的位置、线强  $S$  和展宽系数  $\gamma$ 。

以 CO 为例,依据炉膛内测量温度(1200 °C 左右),从 HITRAN 数据库中调出 CO 在 1200 °C 时的吸收谱线(图 11),针对 CO 透射谱线进行线强、线宽温度修正[(8)、(9)式,图 12]。如图 13 所示,选择 2142~2240 cm<sup>-1</sup> 吸收波段,根据(10)式与校准光谱进行拟合计算。拟合后的残差谱如图 14 所示,由图可得到炉膛内 CO 气体的浓度。

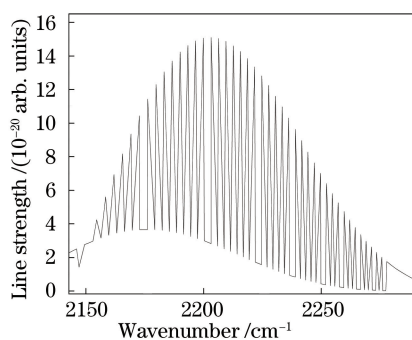


图 11 CO 在 1200 °C 时的吸收光谱

Fig. 11 Absorption spectrum of CO at 1200 °C

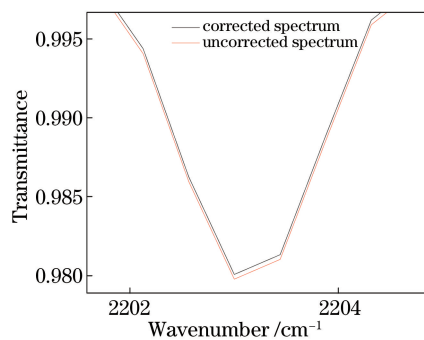


图 12 在 2203 cm<sup>-1</sup> 处校正和未校正的透射光谱

Fig. 12 Corrected and uncorrected transmittance spectra at 2203 cm<sup>-1</sup>

实验结果表明,在实际现场对炉膛内气体进行测量时,只要系统能够获得含有气体信息的辐射亮度谱,并且能够精确测量炉膛内温度,就可以根据此拟合计算方法精确地反演气体浓度。

#### 4.2 测量误差分析

工业燃烧是一个复杂的多相反应过程,其中燃烧场(炉膛)内高温气体温度在一定范围内(1200 °C 左右)是随机变化的,需要对炉膛内气体温度进行连续实时精确测量,否则反演气体浓度会受到测量温度误差的影

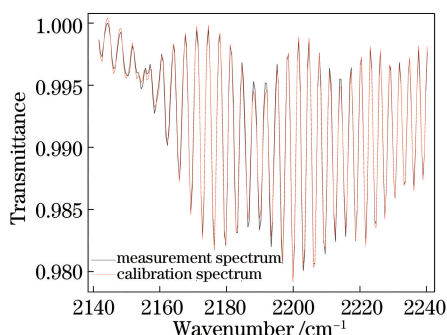


图 13 CO 校准光谱与测量光谱的非线性最小二乘拟合  
Fig. 13 Nonlinear least square fitting between calibration spectrum and measurement spectrum of CO

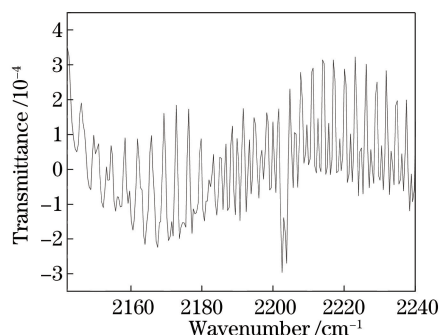


图 14 拟合后的残差谱  
Fig. 14 Residual spectrum after fitting

响。表 1 以温度为 1200 °C、体积分数为  $5 \times 10^{-5}$  的 CO 透射谱为标准,通过设定 CO 温度误差来分析其产生的浓度误差的变化。图 15 为不同温度测量误差下的浓度误差计算结果,由图 15 可见,如果测量指标要求 CO 浓度测量误差小于 5%,则温度误差需小于 31 °C。

表 1 不同温度误差下的 CO 浓度误差

Table 1 CO concentration error with different temperature error

Parameter	Value							
Temperature of CO /°C	1000	1100	1150	1190	1210	1250	1300	1400
Temperature error /°C	-200	-100	-50	-10	10	50	100	200
Concentration of CO /%	35.3	42.3	46.1	49.2	50.8	54.1	58.32	67.4
Concentration difference /%	14.7	7.7	3.9	0.8	0.8	4.1	8.32	17.4
Relative error /%	29.4	15.4	7.8	1.6	1.6	8.2	16.60	34.8

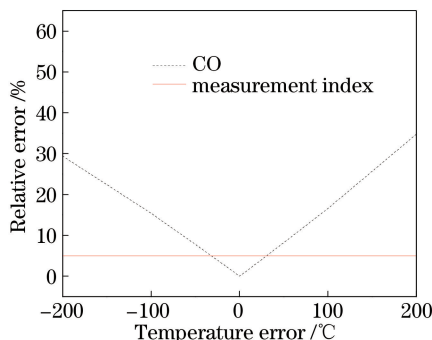


图 15 不同温度误差下 CO 浓度误差

Fig. 15 CO concentration error under different temperature errors

从实验模拟数据处理过程中发现,炉膛内 CO 温度误差对浓度计算结果影响很大,表 1 中显示了 CO 在不同温度误差下对应浓度的相对误差,说明 CO 测量温度误差越大,反演出的浓度误差就越大,所以精确测量炉膛内的气体温度对于其浓度的反演计算至关重要,现阶段需通过红外光谱测温法获得 CO 浓度误差。

## 5 红外辐射被动遥测实验

实验地点选在池州海螺水泥厂,实验装置包括分辨率为  $1 \text{ cm}^{-1}$  的红外光谱仪、响应波段为  $500 \sim 7000 \text{ cm}^{-1}$  的热电制冷型红外探测器、卡塞格林式望远镜和 personal 电脑。进行 16 次扫描,并取 16 次扫描结果的平均值,结果如图 16 所示。

基于红外气体光谱吸收特征和 HITRAN 数据库,考虑到测量气体之间的吸收谱线与目标特征谱线的干扰问题,分别选择如下炉膛内气体吸收波段进行定量分析:二氧化硫的吸收波段为  $2440 \sim 2532 \text{ cm}^{-1}$ ,一氧化氮的吸收波段为  $1835 \sim 1920 \text{ cm}^{-1}$ ,二氧化氮( $\text{NO}_2$ )的吸收波段为  $2790 \sim 2962 \text{ cm}^{-1}$ , $\text{CO}_2$ 的吸收波段

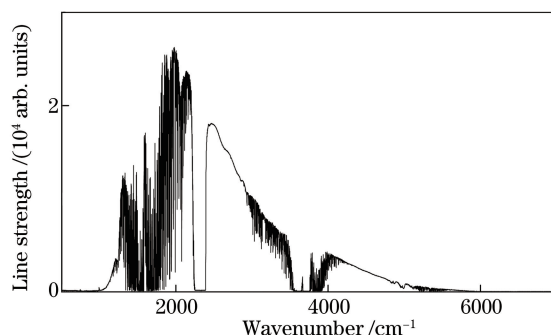


图 16 工业现场 16 次平均光谱数据

Fig. 16 Averaged spectrum data of 16 times in industrial site

为  $2256\sim 2350\text{ cm}^{-1}$ , CO 的吸收波段为  $2142\sim 2240\text{ cm}^{-1}$ 。

工业燃烧是一个高温、瞬态、快速的过程,燃烧气体浓度随着时间和空间位置的变化而变化。图 17 为炉膛内气体浓度的在线监测结果,实验说明此光谱仪对高温炉膛进行在线被动遥测是可行的,气体浓度监测结果随炉膛内工况的变化而变化。但是,炉膛内  $\text{NO}_2$  浓度太低会导致仪器浓度反演显示为 0,说明仪器对  $\text{NO}_2$  低浓度的测量灵敏度还不够,这将在接下来的工作中予以改进。

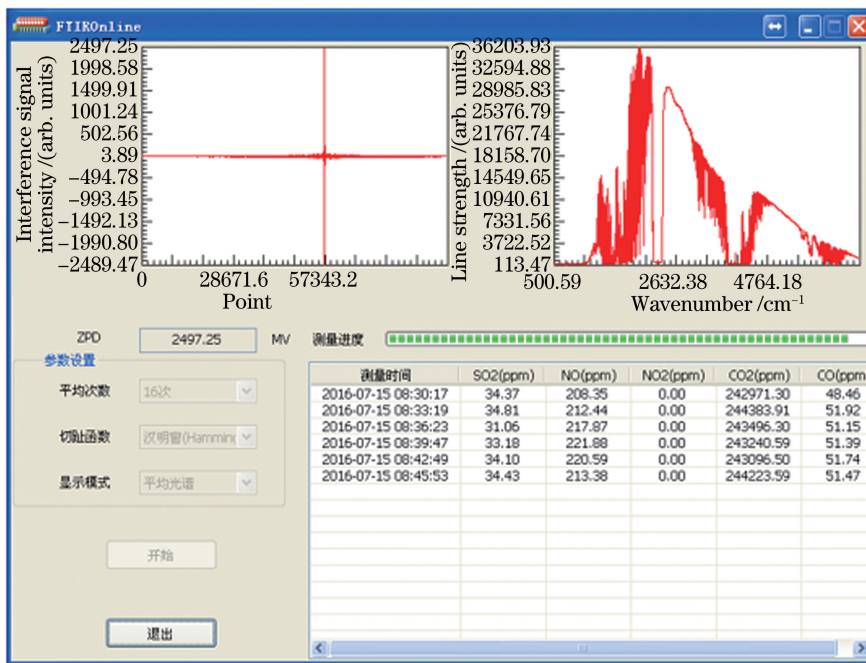


图 17 炉膛内气体浓度在线监测结果

Fig. 17 On-line monitoring results of gas concentration in cement-kiln

## 6 结 论

利用 FTIR 法进行被动遥测分析时,在建立辐射模型后对光谱仪获取的带有仪器线型的相对辐射能量谱进行定标,再将相对辐射能量谱转换为标准辐射亮度谱或辐射亮温谱,通过计算得到待测气体的透射率。考虑到仪器长期处在工业环境中,仪器状态可能发生改变,从而导致无法定标。根据气体在红外波段的吸收特征,扣除气体吸收并进行拟合,利用辐射亮度变化与相对辐射强度变化一一对应的关系计算透射谱,从而避免了相对辐射能量谱转换成辐射亮度谱过程的计算。针对工业环境在线监测过程中湍流噪声的问题,与目前常用的 FTIR 数据处理方法相比,新的数据处理方法得到光谱反演浓度的精度更高,且缩短了计算机的工作量。



## 参 考 文 献

- [1] Gao Q K, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.* Remote detection of carbon monoxide by FTIR for simulating field detection in industrial process[C]. SPIE, 2016, 10156: 101561G.
- [2] Fang jing, Liu Wenqing, Zhang Tianshu. A line-by-line trace gas absorption model and its application in FTIR gas detection[J]. *Infrared*, 2007, 28(8): 27-32.  
方 静, 刘文清, 张天舒. 逐线积分气体吸收模型及其在 FTIR 气体检测中的应用[J]. *红外*, 2007, 28(8): 27-32.
- [3] Gao M G, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Passive remote sensing of VOC in atmosphere by FTIR spectrometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(7): 1042-1044.
- [4] Richard G L. Understanding digital signal processing[M]. 3<sup>rd</sup> ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010: 424-426.
- [5] Rothman L S, Jacquemart D, Barbe A. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 96(2): 139-204.
- [6] Zhang Hua, Shi Guangyu. A fast and efficient line-by-line calculation method for atmospheric absorption[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(1): 581-593.  
张 华, 石广玉. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法[J]. *大气科学*, 2000, 24(1): 581-593.
- [7] Cheng Siyang, Zhang Tianshu, Gao Minguang. Concentration inversion of high temperature air from FTIR spectra and analyzing residual error structure[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(1): 82-85.  
程巳阳, 张天舒, 高闽光. FTIR 光谱高温气体浓度反演方法及残差结构分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(1): 82-85.
- [8] Lin Jieli, Huang Yiqing, Lu Hong. Determination of relative error of pressure-broadening linewidth for the experimentally indistinguishable overlapped spectral lines with Voigt profile[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(1): 128-132.  
林洁丽, 黄义清, 路 洪. 实验不可分辨的 Voigt 线型重叠谱线的压致展宽线宽的偏差确定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(1): 128-132.