

红外光谱技术诊断火焰温度和组分浓度的研究*

杨振中 楚书华 李径定

(浙江大学能源系, 浙江, 杭州, 310027)

0643:21
TN215

摘要 基于气体分子辐射吸收指数宽带模型, 分析了火焰温度和组分浓度的诊断原理和计算方法, 建立了红外光谱诊断系统, 并进行了实验研究, 结果表明诊断精度较高, 从而实现了火焰温度和多种组分浓度的同步诊断。

关键词 红外光谱诊断, 火焰温度, 组分浓度。

燃烧

引言

燃烧火焰的温度和组分浓度的准确测量是深入研究燃烧过程的必要手段, 历来受到人们的重视, 但常规的抽气取样等测量方法, 由于只能测取稳定的燃烧产物的浓度, 并且取样时间较长、实量性很差, 近年来利用红外光谱技术测取组分浓度受到了国外研究者的关注^[1-3]。以气体分子光谱辐射吸收的窄带模型诊断火焰组分浓度时, 只能保证个别组分浓度的诊断精度, 为此, 本文基于气体分子辐射吸收指数宽带模型, 提出了红外光谱诊断新技术来实现火焰温度和多种组分浓度的同步诊断。

1 诊断系统

红外光谱诊断系统(见图1)主要包括:(1)由黑体炉和温度控制系统组成的参考辐射源;(2)火焰发生器;(3)由红外透镜、红外滤光片及斩光器组成的光学系统;(4)由红外探测器、信号前置放大器以及数据采集接口卡组成的光电转换及数据采集系统;(5)燃烧压力测量系统、微机及结果输出设备。

由图1可见, 光阑(装在参考辐射源后)限制辐射束的直径, 从而控制诊断的空间分辨率, 红外透镜将光阑限制范围内的平行辐射会聚于透镜焦平面处的红外探测器灵敏元件上, 在红外透镜与红外探测器之间的红外滤光片用于将辐射单色化, 红外探测器将辐射信号转换为电

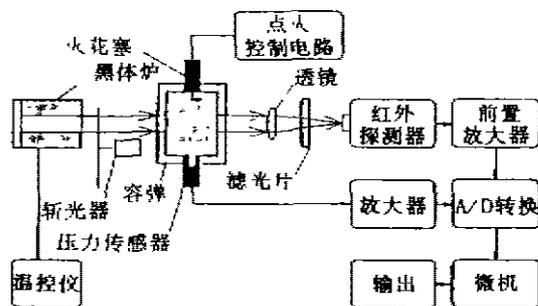


图1 红外光谱诊断系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of infrared spectroscopy diagnosis system

* 国家教委博士点基金(编号: 9533027)及河南省自然科学基金(编号: 984042100)资助项目
稿件收到日期 1998-11-17, 修改稿收到日期 1999-06-01

压信号,经直流前置放大器放大,数字化后输入微机进行数据处理,然后输出结果.

2 诊断原理

2.1 火焰组分浓度的红外光谱诊断原理

气体分子的辐射和吸收具有光谱选择性,亦即它们可在某些谱带处表现出强烈的辐射和吸收,而在其它谱带处不具有辐射吸收的能力,并且气体分子的光谱辐射和吸收能力与其浓度有关.对于碳氢燃料而言,火焰组分含有 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 HC 、 NO_x 等气体成分.测取得到各种组分在其特征吸收谱带处的吸收比,就可得到其浓度值.

在不影响诊断的基本原理前提下,假设火焰为纯吸收介质;火焰处于局部热平衡状态;火焰组分为理想气体混合物.

由系统分别测取参考辐射源、火焰以及参考辐射源和火焰共同作用于红外探测器的电压信号 V_0 、 V_1 及 V_2 ,可求得火焰组分的平均温度 T_f 和光谱吸收比 $\overline{\alpha(\sigma, L)}$.

如图 1 所示,当火焰不存在,仅有参考辐射作用于红外探测器时,输出的电压信号为 V_0 :

$$V_0 = \tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)\eta(\lambda)F\varepsilon_r(\lambda, T_r)M_f(\lambda, T_r); \quad (1)$$

当斩光器遮住参考辐射源的辐射,且仅让火焰产生的辐射作用于红外探测器时,输出的电压信号为 V_1 :

$$V_1 = \tau_1(\lambda)\tau_3(\lambda)\eta F\varepsilon_f(\lambda, T_f)M_f(\lambda, T_f); \quad (2)$$

当参考辐射源的辐射和火焰的辐射共同作用于探测器时,输出的电压信号为 V_2 :

$$V_2 = \tau_1(\lambda, T_f)V_0 + V_1. \quad (3)$$

若用 $\overline{\alpha(\sigma, L)}$ 代表温度为 T_f 的火焰对参考辐射源入射辐射的光谱吸收比,则有

$$\tau_1(\lambda, T_f) + \overline{\alpha(\sigma, L)} = 1. \quad (4)$$

由基耳霍夫定律和普朗克定律可知

$$\overline{\alpha(\sigma, L)} = \varepsilon_f(\lambda, T_f), \quad (5)$$

$$M_f(\lambda, T_f) = c_1\lambda^{-5}(e^{c_2/\lambda T_f} - 1)^{-1}; \quad (6)$$

由式(1)~(6)可得

$$T_f = \frac{c_2}{\lambda} \left\{ \ln \left[\frac{1}{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\varepsilon_r(\lambda, T_r)} \cdot \frac{V_0 + V_1 - V_2}{V_1} (e^{c_2/\lambda T_f} - 1) + 1 \right] \right\}^{-1}, \quad (7)$$

$$\overline{\alpha(\sigma, L)} = 1 - (V_2 - V_1)/V_0; \quad (8)$$

式中, λ 为选定的工作波长; T_r 为参考辐射源的温度; $\tau_1(\lambda)$ 、 $\tau_2(\lambda)$ 、 $\tau_3(\lambda)$ 为参考辐射源到红外探测器之间有关介质的光谱透射比; $\eta(\lambda)$ 为红外探测器将光谱辐射信号转换为电压信号,并经直流前置放大器放大的比例常数; $\varepsilon_f(\lambda, T_f)$ 为火焰在温度 T_f 下的光谱发射率; F 取决于光学系统的一个常数,它表征了光学系统收集对象的辐射能的能力; $\varepsilon_r(\lambda, T_r)$ 为参考辐射

源(黑体炉)在温度 T_u 时的光谱发射率; $M_b(\lambda, T_u), M_b(\lambda, T_F)$ 为温度是 T_u 及 T_F 黑体的光谱辐射度; $\tau_F(\lambda, T_F)$ 为温度在 T_F 时的火焰对参考辐射源入射辐射的光谱透射比; c_1, c_2 均为辐射常数.

Irvine T F^[1]等在分析分子光谱的振-转结构特征及量子力学特性的基础上,提出了指数宽带模型.其数学表达式为:

当 $\beta < 1$ 时,

$$\overline{\alpha(\sigma, L)} = 0.1, \quad 0 \leq u \leq \beta \quad (9)$$

$$\overline{\alpha(\sigma, L)} = 1 - \sqrt{\beta u} (2\sqrt{\beta u} - \beta)^{-1}, \quad \beta \leq u \leq \beta^{-1} \quad (10)$$

$$\overline{\alpha(\sigma, L)} = 1 - (\ln \beta u - 2 - \beta)^{-1}, \quad \beta^{-1} \leq u \leq \infty \quad (11)$$

当 $\beta \geq 1$ 时,

$$\overline{\alpha(\sigma, L)} = 0.1, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (12)$$

$$\overline{\alpha(\sigma, L)} = 1 - (\ln u + 1)^{-1}, \quad 1 \leq u \leq \infty \quad (13)$$

式中

$$u = \frac{\theta \beta L}{\omega} \quad (14)$$

$$\beta = \gamma \left[\frac{P}{P_u} + \frac{P_s}{P_u} (b-1) \right]^n \quad (15)$$

由理想混合气体分压定律可得

$$P_s = \rho \frac{RT_F}{M} \quad (16)$$

则得

$$\beta = \gamma \left[\frac{P}{P_u} + \rho \frac{RT_F}{MP_u} (b-1) \right]^n \quad (17)$$

式中, β 为压力增宽系数; γ 为谱线宽带参数; P_u 为大气压力; P 为火焰气体总压力; ρ 为浓度; R 为气体常数; M 为摩尔质量; b, n 为压力参数; θ 为积分谱带强度; ω 为带宽参数.

其中, θ, ω, γ 除了与气体组分分子的指数宽带参数有关外, 均是温度的函数. 因此, 只要知道火焰温度沿测量光程的平均温度 T_F 、光谱吸收比 $\overline{\alpha(\sigma, L)}$ 及压力 P , 便可求得火焰组分沿测量光程的平均浓度.

2.2 火焰组分浓度的计算方法

由以上公式直接求取火焰组分浓度的解析表达式是困难的. 为此, 本文采用 C 语言用初值试探法迭代求其数值解. 求解火焰组分浓度的流程图如图 2 所示.

3 实验研究

分别对平面预混稳定火焰发生器产生的稳态火焰与定容燃烧弹产生的非稳态火焰的温度和组分浓度进行了诊断.

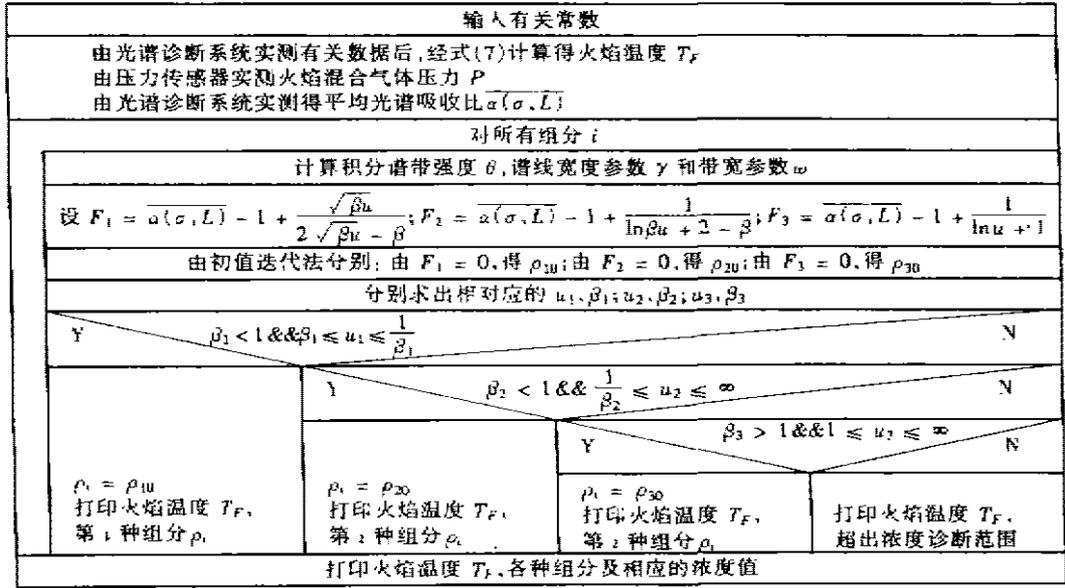


图 2 求解火焰组成浓度流程图

Fig. 2 Flow-chart of solution for concentration of flame composition

有关实验条件和参数是: 燃料为 C_2H_2 ; 黑体炉温度为 $T_b = 1700K$; 调制频率对应两种火焰分别为 1000Hz 和 1500Hz (斩光器转速分别为 3000r/min 和 45r/min); 工作波长分别取 $1.87\mu m/2.35\mu m/4.3\mu m(2.7\mu m)$ 和 $H_2O/CO/CO_2$ 的浓度测量对应; 过量空气系数 $\alpha = 1$; 初始燃烧温度为 373K; 初始燃烧压力为 0.1MPa.

3.1 稳态火焰的诊断结果及分析

图 3 为火焰发生器出口平面上方 2mm 处的火焰温度, CO_2 浓度 H_2O 浓度的诊断结果. 由图 3 可见: 火焰温度沿径向分布比较均匀, 最大诊断值为 2075K, 最小诊断值为 2045K. 诊断值与热电偶测量值基本一致, 二者之间差别在 100K 以内. CO_2 浓度、 H_2O 浓度沿径向分布也比较均匀, 其平均值分别为 $0.025kg \cdot m^{-3}$ 和 $0.0144kg \cdot m^{-3}$, 二者之比为 1.74. 由理论混合气完全燃烧的化学平衡反应方程式可以计算得到二者的平稳浓度比值为 1.83. 由

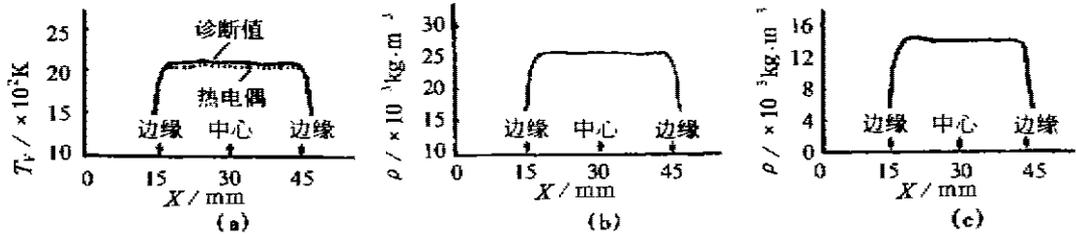


图 3 稳态火焰温度和 CO_2, H_2O 浓度的诊断结果

(a) 火焰温度 (b) CO_2 浓度 (c) H_2O 浓度

Fig. 3 Diagnosis results of the temperature of steady flame and concentration of species CO_2 and H_2O (a) the temperature of steady flame (b) the concentration of species CO_2 (c) the concentration of species H_2O

此可见, 诊断结果与理论分析结果相当吻合(相对误差在 5% 以内)。

3.2 非稳态火焰的诊断结果及分析

测点选在定容燃烧弹的中心, 点火位于容弹半径 29mm 处。

图 4 为非稳态火焰温度, H_2O 、 CO 和 CO_2 浓度的诊断结果; 图 5 为 H_2O 平衡浓度随燃烧初温及初压的变化结果。由图 4(a) 可见: 最高火焰温度的最大值出现在过量空气系数 α 稍小于 1 处, 这同理论计算结果相一致。在整个过量空气系数变化范围内, 火焰最高温度的计算值稍小于诊断值。(相对误差为 5%)。其原因是计算最高火焰温度时, 没有考虑传热和辐射损失, 并且认为放热反应完全发生在火焰前锋区域内。从图 4(a) 还可见, 随过量空气系数的增加, 混合气变稀, 传热损失减小, 从而计算值和诊断值误差减小。由图 4(b) 可见: 在火焰到达测点后 H_2O 和 CO_2 的浓度迅速上升至最大值后基本保持不变, 它们分别是 $0.09\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.155\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。由理论计算可以得到二者的平衡浓度分别为 $0.0937\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.1700\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。(相对误差分别为 4% 和 9.6%)。由此可见, 诊断结果和理论计算结果相符得较好。诊断结果比理论值较小的原因是实际燃烧不完全所致。而 CO 的浓度先迅速上升至最大值后, 又迅速下降至最小值后保持稳定, 这同燃烧理论的观点相一致。燃烧理论认为: 对

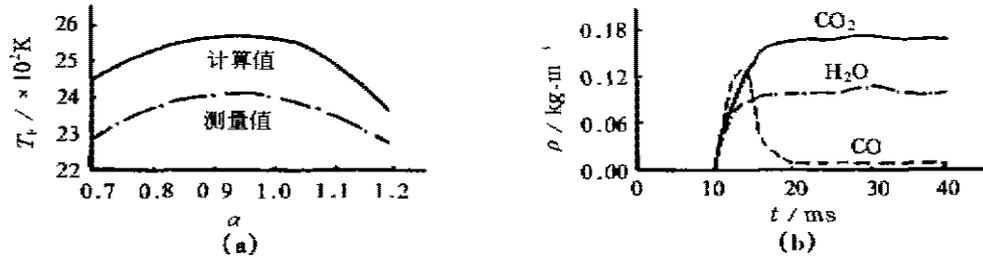


图 4 非稳态火焰温度和 H_2O 、 CO 、 CO_2 浓度的诊断结果

(a) 火焰温度, (b) H_2O 、 CO 和 CO_2 浓度

Fig. 4 Diagnosis results of the temperature of unsteady flame and concentration of species H_2O , CO and CO_2 . (a) the temperature of unsteady flame, (b) the concentration of species H_2O , CO and CO_2 .

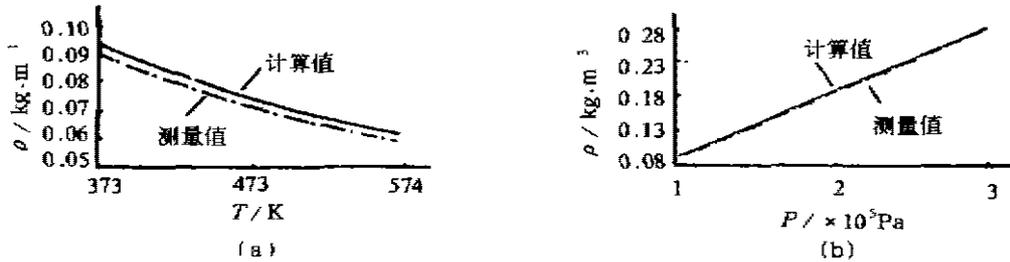


图 5 H_2O 平衡浓度随燃烧初温及初压变化结果

(a) H_2O 平衡浓度随燃烧初温变化结果 (b) H_2O 平衡浓度随燃烧初压变化结果

Fig. 5 Variation of equilibrium concentration of species H_2O with initial temperature and initial pressure of combustion

(a) Variation of equilibrium concentration of species H_2O with initial temperature (b) Variation of equilibrium concentration of species H_2O with initial pressure

于碳氢燃料,CO的初始浓度高,随后又在高温下转化为CO₂。由图5可见,H₂O平衡浓度与燃烧初始温度成反比,而与燃烧初始压力成正比。图5中同时给出了理论计算值,可见,诊断结果和理论计算结果相一致。

4 结语

以气体分子辐射吸收指数宽带模型为基础,应用红外光谱诊断技术实现了火焰温度和多种组分浓度的同步诊断,克服了应用分子辐射吸收窄带模型只能保证个别组分浓度诊断精度的局限性,而且,实验装置结构简单、耗费较低、测量精度和时空分辨率较高,因此,该诊断技术将成为具有良好应用前景的一种新技术。

REFERENCES

- 1 Bianchi D, *et al.* Determination of efficiency of exhaust gas catalyst by FTIR spectroscopy, *AIAA SAE Paper*, 1991, **100**:112
- 2 Robert E, *et al.* A comparison of FTIS with traditional analyzers for enhanced inspection and maintenance testing, *SAE Trans*, 1995, **104**(4): 184~189
- 3 Shimizu S, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and density of burnt gases by infrared radiation computed tomography, *in: Proc of Eurotherm Seminar*, 1990, **17**:20~29
- 4 Irvine T F, *et al.* *Advances in heat transfer*, New York: Academic Press, 1976, 11b~192

INFRARED SPECTROSCOPY DIAGNOSIS FOR FLAME TEMPERATURE AND SPECIES CONCENTRATION*

YANG Zheng-Zhong CHU Shu-Hua LI Jin-Ding

(Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Based on the theory of exponential wide-band model of radiation-absorption of gas molecules, the principle formulas of infrared spectroscopy diagnosis for flame temperature and composition concentration were deduced and a kind of practical calculating method was given. An infrared spectroscopy diagnosis system was established, and the experimental research was carried out with the system. The results show that the accuracy is relatively high. Thus, the aim to measure the flame temperature and composition concentration synchronously has been achieved.

Key words infrared spectroscopy diagnosis; flame temperature; composition concentration.

* The project supported by the Ph. D Program Foundation of State Education Commission of China and by the Natural Science Foundation of Henan Province of China
Received 1998-11-17, revised 1999-06-01