

平面预混非发光火焰温度分布的 红外 CT 法测量研究*

杨振中 周重光 方卓毅 楚书华 李径定
(浙江大学机械与能源工程学院, 浙江, 杭州, 310027)

摘要 利用红外辐射在介质中的吸收现象, 结合计算机断层扫描摄影(CT)技术, 提出了红外辐射吸收 CT 法测量火焰温度的概念. 文章详细介绍了测量原理和实现过程, 并利用依据此原理建立的实验台架对平面预混火焰的温度分布进行了测量, 给出了实验结果.

关键词 火焰温度, 计算机断层扫描摄影, 辐射吸收.

INFRARED RADIATION ABSORPTION CT DIAGNOSIS FOR TEMPERATURE DISTRIBUTION OF PREMIXED PLANE FLAME *

YANG Zhen-Zhong ZHOU Chong-Guang FANG Zhuo-Yi
CHU Shu-Hua LI Jing-Ding
(College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Based on absorption phenomena of infrared radiation in medium and CT technology, a two-dimensional flame temperature distribution diagnosis method was proposed, which was named as infrared radiation absorption CT technology. The principle and measurement process were introduced in detail. Finally, temperature distribution of a pre-mixed plane flame was measured by using the principle.

Key Words flame temperature, computed tomography, radiation absorption.

引言

燃烧是当今世界矿物燃料利用的主要方式, 在国民经济中应用十分广泛. 燃烧过程中, 除了产生人类利用的热和光以外, 还产生大量的烟尘、灰分、噪声、各种有害或无害的气体. 在环境保护和能源危机的双重压力下, 提高燃烧效率和减少有害气体的排放已经时不我待. 燃烧过程中, 温度是最重要的参数之一, 是决定燃烧效率的重要因素.

在现有的众多火焰温度测量方法中, 无论是传统的接触式测量方法, 其中包括热电偶测量法, 光纤传感测量法等, 还是近年来发展的非接触式火焰温

度测量方法, 其中包括声速法, 热辐射光谱法(谱线反转法, 双色法, 吸收发光法), 激光测量法(激光干涉法, 激光散射法, 激光诱导荧光技术, 激光散斑法), 要么不能实现火焰温度二维分布测量, 要么测量成本居高不下. 测量技术的局限性在一定程度上限制了燃烧科学的近一步发展. 现在计算机断层扫描摄影(Computed Tomography, 简称 CT)技术已经成功地应用于临床中, 借鉴此技术的基本概念利用介质辐射吸收现象, 本文提出了火焰温度二维分布的新测量方法——红外辐射吸收 CT 法. 本文介绍了该方法的基本原理和实现过程, 并对一平面预混火焰进行了实测研究.

* 中日政府间合作项目(批准号 00001799530)、国家教委博士点基金(批准号 9433527)、河南省自然科学基金(批准号 98402100)资助项目

稿件收到日期 2001-10-10, 修改稿收到日期 2002-05-26

* The project supported by Sino-Japanese Cooperative Project (No. 20001799530), the State Education Commission Doctoral Foundation of China (No. 9433527), the Natural Science Foundation of Henan Province, China (No. 984042100)

Received 2001-10-10, revised 2002-05-26

1 测量原理

1.1 数据采集

我们知道:医学上,一个方向的 X 射线透视是沿射线方向的积分投影过程,不能进行沿射线方向的定量分辨测量,假设在不同方向投影透视,从不同方向反映物体的内部结构特点,在严格的数学分析基础上,可以了解它的内部特点,用多个方向(一般为 360° 范围)上的透射投影数据,用计算机处理后得到物体内部详细信息。借鉴此概念,利用下述数据采集、测量和计算过程来获得火焰内部温度分布。

数据采集的原理图如图 1 所示, xoy 为固定坐标, XoY 为随火焰一起转动的旋转坐标,参考辐射经调制后成为较宽扇形角的发散辐射(实际测量系统中为 30°),其范围包括整个火焰截面。调制光前为一快门,辐射经过快门再穿过火焰,同火焰本身辐射一起被探测器阵检测到,其中一条如图 1 所示,它经过 xoy 坐标中点 (x, y) ,被探测器阵中的一个检测到。设没有火焰,快门打开,探测器能检测到的参考辐射源辐射为 E_0 。快门关闭,火焰存在,此时探测器探测到的由火焰辐射为 E_f 。快门打开,火焰存在,探测器接受到的由参考辐射源和火焰一起引起的辐射为 E_Σ 。在某个特定的方位,在坐标 xoy 中测量各个探测器由辐射 E_0 、 E_f 和 E_Σ 引起的输出信号 D_0 、 D_f 和 D_Σ 。然后,旋转火焰一角度 α ,得到此时每一探测器的另一组 D_0 、 D_f 和 D_Σ 。当 $\alpha = 2\pi$ 时完成对物体的扫描。采用图中所示的扇形束扫描是为了提高数据采集的速度。

1.2 局部吸收系数的计算

对于每一条射线,任一组 E_0 、 E_f 和 E_Σ 以及 D_0 、 D_f 和 D_Σ ,如果我们认为:辐射的开始点 y_0 为参考

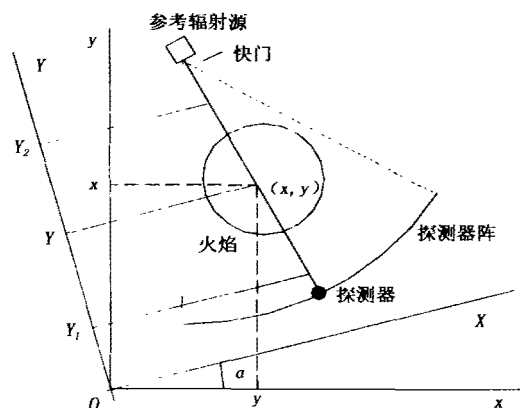


图 1 数据采集原理图

Fig. 1 Principle of data collection

辐射源. 辐射的终点 y_1 为探测器. 根据有关辐射定律,有下列关系:

$$D_0 = \tau_{1\lambda} \tau_{2\lambda} \eta_\lambda F E_{b\lambda}(T_0), \quad (1)$$

$$D_f = \tau_{2\lambda} \eta_\lambda F \left\{ \int_{y_0}^{y_1} (1 - \varepsilon_L) \alpha_\lambda(x, y) E_{b\lambda}(T_x) dy \right\}, \quad (2)$$

$$D_\Sigma = \tau_{1\lambda} \tau_{2\lambda} \eta_\lambda F \left\{ \int_{y_0}^{y_1} (1 - \varepsilon_L) \alpha_\lambda(x, y) dy \right\} + \tau_{2\lambda} \eta_\lambda F \tau_L D_0, \quad (3)$$

式中 $\tau_{1\lambda}$: 参考辐射源与火焰之间的介质(一般为空气)对波长为 λ 的辐射透射比;

$\tau_{2\lambda}$: 探测器与火焰之间的介质(一般为空气)对波长为 λ 的辐射透射比;

η_λ : 红外探测器将光谱辐射转化为电压信号并经直流前置放大器放大的比例常数;

F : 光学系统常数;

$E_{b\lambda}(T_0)$: 温度为 T_0 参考辐射源的辐射强度,由 Plank 定律决定;

T_0 : 参考辐射源温度;

下标 λ : 在波长为 λ 的物理参数值;

$\alpha_\lambda(x, y)$: 火焰内部点 (x, y) 的局部吸收系数;

$E_{b\lambda}(T_x)$: 温度为 T_x 的黑体辐射强度,由 Plank 定律决定;

T_x : 点 (x, y) 火焰的温度;

τ_L : 测量光路 $y_0 \rightarrow y_1$ 上的辐射透射率;

ε_L : 测量光路 $y_0 \rightarrow y_1$ 上的火焰辐射率;

记 $K_0 = \tau_{1\lambda} \tau_{2\lambda} \eta_\lambda F$, $K = \tau_{2\lambda} \eta_\lambda F$. 根据辐射定律,有

$$\tau_L = \exp\left(-\int_{y_0}^{y_1} \alpha_\lambda(x, y) dy\right), \quad (4)$$

假设火焰处于局部热平衡,得到

$$\begin{aligned} \varepsilon_L &= 1 - \tau_L \\ &= 1 - \exp\left(-\int_{y_0}^{y_1} \alpha_\lambda(x, y) dy\right), \end{aligned} \quad (5)$$

从式(1)~式(5),得到

$$\int_{y_0}^{y_1} \alpha_\lambda(x, y) dy = \ln\left(\frac{D_0}{D_\Sigma - D_f}\right). \quad (6)$$

对于任意一条确定的射线, D_0 、 D_f 和 D_Σ 已知,则式(6)的右边是已知的. 式(6)同医学 CT 求解问题相同,可以应用相同的方法来求解 $\alpha_\lambda(x, y)$. 在实际测量中,我们采用卷积反投影法计算,其具体过程可以参阅有关文献. 从上述论述中,我们假设辐射通过火焰时,只存在吸收现象,因此,该测量原理只适合于非发光火焰温度测量,而发光火焰中大量存在的碳使辐射产生衍射和折射现象。

1.3 温度分布计算

将式(2)改写为

$$\int_{y_0}^{y_1} (1 - \varepsilon_L) \alpha_\lambda(x, y) E_{b\lambda}(T_{xy}) dy = \frac{D_f}{K} = P_L, \quad (7)$$

将式(7)左边分解为两项,得到

$$P_L = \int_{y_0}^{y_1} \alpha_\lambda(x, y) E_{b\lambda}(T_{xy}) dy - \int_{y_0}^{y_1} \varepsilon_L \alpha_\lambda(x, y) E_{b\lambda}(T_{xy}) dy, \quad (8)$$

这是一个非线性方程,直接求解比较困难,我们采用数值解的方法.由于 $\varepsilon_L < 1$,那么假如忽略式(8)右边的第二项,方程变为

$$\int_{y_0}^{y_1} \alpha_\lambda(x, y) E_{b\lambda}(T_{xy}) dy = P_L, \quad (9)$$

由于 $\alpha_\lambda(x, y)$ 的值已经由第一步求解出, P_L 值也已知.对比方程(9)和(6),我们发现它们在形式上完全相同,这样可以应用求解式(6)的方法求解式(9),并记此时计算得到的 T_{xy} 为 $T_{xy,1}$.再将其代入式(8)中被忽略的那一项,并将此项移至等式(8)右边,即得下式

$$P_{L2} = \int_{y_0}^{y_1} \alpha_{xy} E_{b\lambda}(T_{xy,1}) dy + \int_{y_0}^{y_1} \varepsilon_L \alpha_{xy} E_{b\lambda}(T_{xy,1}) dy. \quad (10)$$

将式(10)代入式(8),得到 $T_{xy,2}$,重复式(8)和式(9)的迭代过程,直到 $|P_{L,j+1} - P_{L,j}|$ 满足一定的误差要求,再由此时的 $P_{L,j+1}$ 计算得到 $T_{xy,j+1}$,并认为它就是最终此点的温度值.至此,我们就求解出了火焰内部的温度分布 $T_{xy,0}$.

2 测量系统及标定

根据上述原理,建立相应的测量系统,其结构框图如图2所示.在一个固定的位置,由参考辐射源发出的辐射通过火焰后,再经一滤波片被探测器检测到,此信号被输入到计算机,然后转动平台转动一固定的角度,进行下一个方位的数据采集,所有的数据在计算机中进行处理,为了提高数据处理速度,计算过程中卷积和反投影由硬件实现.在求解火焰温度

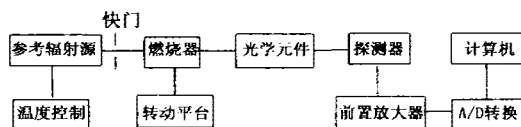


图2 火焰温度分布测量系统结构框图
Fig. 2 Schematic diagram for flame temperature distribution diagnosis system

的原理公式中, D_0 , D_f 和 D_Σ 是测量值, T_0 由温控仪控制,其余常数被认为是已知的,需要对系统进行标定得到.其具体方法如下

从式(1)可以得到

$$K_0 = D_0 / E_{b\lambda}(T_0), \quad (11)$$

记 $RS = \tau_{2\lambda} \eta_\lambda F$, 即有 $K_0 = RS \tau_{1\lambda}$, 将火焰移开, 而将参考辐射源放置于火焰处, 记此时的探测器输出为 D'_0 , 有

$$D'_0 = RSE_{b\lambda}(T_0). \quad (12)$$

可以得到 RS 及 $\tau_{1\lambda}$ 等常数的值.

3 测量结果及分析

利用上述系统对一平面预混火焰温度分布进行测量,实验在环境温度 16°C , 环境大气压 1atm 条件下进行.控制参考辐射源温度为 1800K .燃料为甲烷,控制过量空气系数为 1.0 ,由于甲烷完全燃烧产生大量的 CO_2 ,选取 CO_2 的特征波长之一的 $4.3\mu\text{m}$ 作为系统的工作波长(滤波片的通过波长).距离燃烧器出口下游 3mm 的截面上局部吸收系数和温度分布如图3和4所示.其中一条过火焰中心直线的温度分布如图5所示.

由图3~图5可以看到:

(1) 在测量截面,局部吸收系数基本呈均匀分布,由于气体组分的均匀分布,从理论上可以得知温度分布也是均匀的,这同温度分布的实验结果吻合得很好.事实上,在CT测量法中,在以火焰中心为原点,半径为 13mm 的圆范围内,温度波动值为 37K .

(2) 在任何位置,CT诊断值比热电偶测量值大.在试验条件下,认为热电偶的测量值是精确的.在用CT方法测量时,探测器不可避免地接收到所测量火焰射流上下气流的辐射,即 D_f 和 D_Σ 的比值

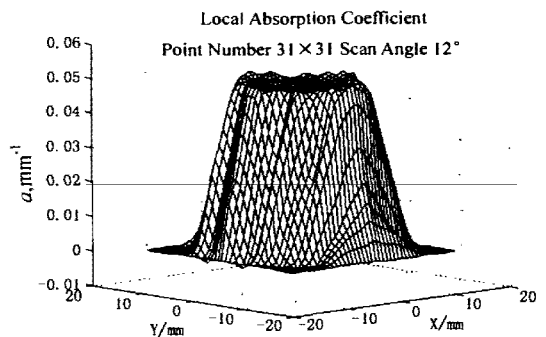


图3 测量截面局部吸收系数分布
Fig. 3 Local absorption coefficient of the measured plane

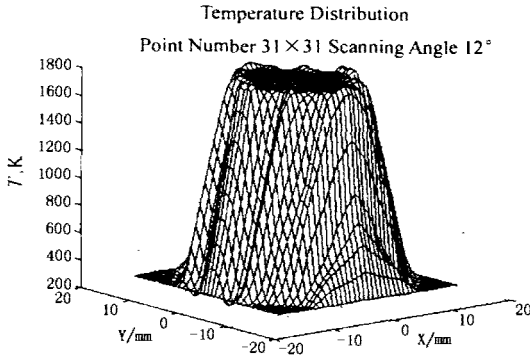


图4 测量截面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of the measured plane

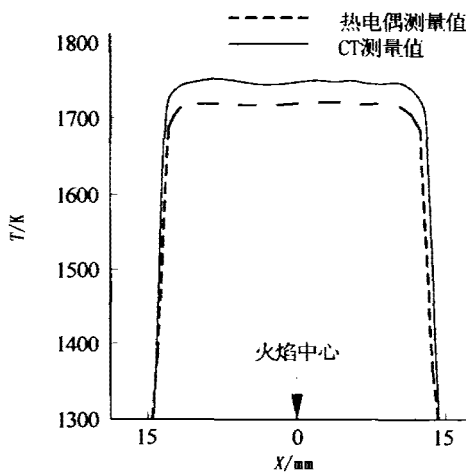


图5 测量截面中一条直线的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of a line in the plane

实际值大,一般认为 $D_{\lambda} - D_f$ 的值没有变化,这是因为在同样试验条件下, D_f 和 D_{λ} 的增加幅度是相同的. 所以可以认为计算得到的局部吸收系数是精确的,而在计算温度分布时, D_f/K 的值比实际值大,计算得到的 $\alpha_{\lambda}(x, y) E_{b\lambda}(T_{xy})$ 值就比实际值大,由于 $\alpha_{\lambda}(x, y)$ 是精确的,所以最后得到的温度分布就偏大.

(3) 参考辐射源(黑体炉)对测量精度有多方面的影响. 主要包括黑体炉温度控制的不稳定而造成的参考温度 T_0 波动、参考温度 T_0 测量不准而造成的误差、黑体炉的光谱发射比不是严格地遵循黑体规律而产生的误差.

由图 6 可以明显地发现,对于所有的 D_f , $\Delta[D_0/(D_{\lambda} - D_f)]$ 的值均随 ΔT_0 增加而增加. 而且随着 D_f 的增加, $D_0/D_{\lambda} - D_f$ 的变化对 T_0 的变化变得不敏感. 即对于同一参考辐射源,测量温度高(对于相同燃料, D_f 大,温度高)的火焰比测量温度低的火焰精度高. 因此,在参考辐射源性能指标允许的前提下,尽量提高黑体炉的工作温度有利于保证测量

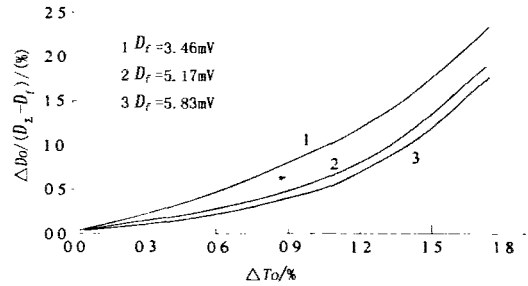


图6 T_0 变化对 $D_0/D_{\lambda} - D_f$ 的影响

Fig. 6 The influence of T_0 variation on $D_0/D_{\lambda} - D_f$

精度. 这是因为,当黑体炉工作温度高时,要达到相同的温度变化率比工作温度低时的可能性小. 当然当黑体炉工作温度偏离火焰温度很大时,测量精度将大大降低,抵消了由此带来的优点. 对于长为 L 和半径为 R 的圆柱形腔体黑体炉,假设它的温度为 T_0 ,根据有关理论,此黑体炉的有效发射率 ϵ_0 为

$$\epsilon_0 = \frac{M(T)}{\sigma T^4} = \frac{\epsilon \left\{ 1 + (1 - \epsilon) \left[\frac{A}{S} - F(x, \Omega) \right] \right\}}{\epsilon \left(1 - \frac{A}{S} \right) + \frac{A}{S}}, \quad (13)$$

式中 ϵ 为腔体材料的发射率;对于圆柱形腔体,当黑体炉的工作温度 T_0 改变 dT_0 时,由此引起 $F(x, \Omega) = \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}$ 的有效发射率 ϵ_0 的变化 $d\epsilon_0$ 为

$$\frac{d\epsilon_0}{\epsilon_0} = 5 \frac{dT_0}{T_0}. \quad (14)$$

由此可见,实验中黑体炉的温度波动为 1% 时,可知黑体炉有效辐射率的波动不大于 5%,因此必须尽可能地降低黑体炉温度波动.

4 结论

(1) 利用 CT 技术,结合传统的吸收发光温度测量法,阐述了测量火焰温度分布的原理,将测量所得的温度空间平均效应,经严格的反转计算,得到温度的空间分布. 并建立了实验台架,通过成功地对平面预混火焰温度进行测量,证明该方法是可行的.

(2) 对于平面预混非发光火焰,主要的误差来自黑体炉的温度波动带来的测量误差,其不超过 5%.

(3) 由于本实验控制过量空气系数为 1.0,燃烧比较完全,可看作非发光火焰. 其燃烧产物是气体,主要是 CO_2 和 H_2O 蒸汽,此外还有高温时产生的氮氧化物. 所以,非发光火焰的辐射吸收特性就

是混合气体的辐射吸收特性。本文选取 CO_2 特征波长之一波长为 $4.3\mu\text{m}$ 的红外波段作为系统的工作波长,从多方面考虑:工作波长不要选在不同组分的重叠谱带上,此外,尽量选择短的工作波长有利于保证测量精度。

REFERENCES

- [1] Klassen M, Sivathanu Y R, Gore J P. Simultaneous emission absorption measurements in Toluene - Fueled pool flames: mean and RMS properties. *Combustion and Flame*, 1992, **90**:34 — 44
- [2] Wei Yao, Donglou Wu, Anzhi He. Real three - dimensional reconstruction of temperature field based on wavefront Retrieval. *Chinese Journal of Lasers*, 1999 **26**(4) 337 — 342
- [3] 志水昭史,坂井丞司,野村丰史,若井和宪. 赤外線 CTによる燃烧ガスの温度分布測定. 日本机械学会论文集(B编), 1987, **53**(12):496 — 505
- [4] Robert E Pierson, David F Olson, Ellen Y Chen, *et al.* Comparison of reconstruction algorithm performance for optical - phase tomography of a heated air flow. *Optical Engineering*, 2000, **39**(3) *Society of Photo - Optical Instrumentation Engineers*. 838 — 846 0091 — 3286
- [5] Li Jingding, Jiang Xiawen, Luo Zhizhong, *et al.* Measurement and rehabilitation of flame temperature field by tomography technology. *Proceedings of the 4th Asian—Pacific International Symposium on Combustion and energy Utilization*, Bangkok Thailand; 1997
- [6] Arroyo M P, Hanson R k. Absorption measurements of H_2O vapor concentration, temperature and line - shape parameters using a tunable In GaAsp diode laser. *Applied Optics* 1993, **32**(30) : 6104 — 6116, 6003 — 6935
- [7] Santoro R J, Semerjian H G, Emmerman P J, *et al.* Optical tomography for flow field diagnostics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, **24** (7): 1139 — 1150
- [8] Hentschel, W Schindler. K P Flow. Spray and combustion analysis by laser techniques in the combustion chamber of a direct injection diesel engines. *Optics and Lasers in Engineering*, 1996, **25** (6): 401 — 413
- [9] Robert L Mckenzie. Progress in laser spectroscopic techniques for aerodynamic measurements; An Review. *AIAA-Journal*, 1993, **31** (3): 465 — 477
- [10] Penner S S, Wang C P, Bahadori M Y. Laser Diagnostics Applied to Combustion Systems. *Proceedings of 20th Symposium (international) on Combustion*, The Combustion Institute, U. S. A: Pittsburg, 1984