

采用优化算法分析燃烧火焰辐射光谱求取火焰温度

(浙江大学 热能工程研究所, 杭州 310027) 周 洁

摘 要:通过对优化算法的尝试利用从气体燃烧火焰发出的辐射光谱拟合分析出火焰燃烧温度的方法,简化了传统测温用双色法所要求的火焰绝对辐射强度的标定,同时有助于了解火焰辐射黑度随波长的变化规律。通过和热电偶测量值的比较,证明经该方法得到的计算结果具有一定的精度,使燃烧火焰温度的在线监测成为可能。

关键词:火焰温度; 优化; 辐射强度

中图分类号: TK313 文献标识码: A

1 引言

采用光学方法测量火焰燃烧温度传统上采用双色法进行^[1],在此方法的使用中,首先,火焰的单色辐射率随波长的变化规律必须作为已知条件,然而这有时是不能被满足的,在这种情况下,经常采取的一种近似处理方法是选择两个较为接近的波长,可以认为在这两个波长上火焰的单色辐射率近似相等,这样一来火焰单色辐射率对温度测量的影响就被消去了。但另一方面,两波长相差的距离太近,容易受到实验测量误差的影响。其次,在运用双色法时应进行绝对火焰辐射强度的标定,得到火焰色温 T_a ,也即将燃烧火焰辐射看成是黑体辐射的火焰温度,这无形中使得测温步骤较为繁琐,而且,实际燃烧系统中的火焰燃烧温度经常是在动态变化的(变化频率大约为 10 Hz 左右),要进行准确的标定较为困难。

综上所述,采用传统的光学双色法测量火焰温度存在着一些缺点,本研究旨在通过对光纤光谱仪所接收到的火焰辐射光谱进行分析,采用优化算法计算出火焰的燃烧温度,同时希望对在一定波长范围内的火焰单色辐射率有所了解。

2 火焰温度优化计算方法原理

碳氢燃料火焰的单色辐射率 ϵ_λ 主要反映炭黑粒子的关于波长的连续辐射特性,可以表达为^[1]:

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp(-KL/\lambda^\alpha) \quad (1)$$

式(1)中 K 和 α 分别为与波长 λ 无关的常数。对甲烷和丙烷燃烧火焰的辐射光谱分析表明^[2], α 的值在 0.9 和 1.1 之间。根据普朗克辐射定律,实验中光纤光谱仪得到的燃烧火焰单色辐射强度信号 S_λ 可表达为:

$$S_\lambda = A_f P_\lambda \epsilon_\lambda I_0(\lambda, T) \Delta\lambda = A_f P_\lambda [1 - \exp(\frac{-KL}{\lambda^\alpha})] \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1} \Delta\lambda \quad (\lambda_m < \lambda < \lambda_n) \quad (2)$$

式中 $I_0(\lambda, T)$ 为温度 T 下的黑体的绝对单色辐射强度; C_1 和 C_2 分别为普朗克第一、二常数; A_f 表示光学测量系统中所有和波长无关的综合信号放大倍数,包括光谱仪光敏原件的感光截面、光电传感器电信号转换系数等; P_λ 为光电传感器及光纤传输对光强度的单色响应系数,应该指出的是, P_λ 随波长而变化; $\Delta\lambda$ 为光谱仪中单色光带宽; (λ_m, λ_n) 为光谱仪的工作波长范围。该实验所用的光纤光谱仪中带有标定用标准钨卤素灯光源,可以将它作为黑体处理,色温为 2960 K,光谱仪所接受到的卤素灯光源单色强信号 $S_{\lambda l}$ 为:

$$S_{\lambda l} = A_f P_\lambda I_0(\lambda, 2960) \Delta\lambda \quad (\lambda_m < \lambda < \lambda_n) \quad (3)$$

结合式(2)和(3)可得

$$S_\lambda = \frac{S_{\lambda l}}{I_0(\lambda, 2960)} [1 - \exp(\frac{-KL}{\lambda^\alpha})] I_0(\lambda, T) \Delta\lambda \quad (\lambda_m < \lambda < \lambda_n) \quad (4)$$

将式(4)应用于任意波长 λ_i ($\lambda_m < \lambda_i < \lambda_n$) 上,采用 Levenberg-Marquardt 最优化算法^[3],以优化函数 $\chi^2(KL_{fit}, T_{fit})$ (如式(5)所示)最小为目标函数,优化计算出最佳参数 KL_{fit} 和 T_{fit} , α 取 3.2。

$$\chi^2(KL_{fit}, T_{fit}) = \sum_{i=1}^M \left\{ S_{\lambda i} - \frac{S_{\lambda l}}{I_0(\lambda_i, 2960)} [1 - \exp(\frac{-KL_{fit}}{\lambda_i^\alpha})] I_0(\lambda_i, T_{fit}) \Delta\lambda \right\}^2 \quad (\lambda_m < \lambda_i < \lambda_n) \quad (5)$$

优化计算的迭代初值的选择在一定程度上决定了优化计算的结果,在本研究中,首先假设火焰为黑体辐

射, 也即 $\epsilon_{\lambda_m} = \epsilon_{\lambda_n}$, 这样根据式(4)可以得到:

$$\frac{S_{\lambda_m} S_{\lambda_n} I_0(\lambda_m, 2960)}{S_{\lambda_n} S_{\lambda_m} I_0(\lambda_n, 2960)} = \frac{I_0(\lambda_n, T_{init})}{I_0(\lambda_m, T_{init})} \quad (6)$$

采用两分法解式(6)得到迭代计算所选的初温值 T_{init} , 分别取波长 $\lambda = \lambda_m, \lambda_n$, 将 T_{init} 代入式(4)可以得到 $(KL)_m$ 和 $(KL)_n$, 取它们的平均值作为 KL 的迭代计算初值, 计算结果表明, 这样决定的初值能够很好地保证解的唯一性, 并且使得迭代结果最好地接近真实值。

3 试验系统介绍

试验光学系统主要由美国 Ocean Optics 公司生产的 SD2000 型光纤光谱仪、HL-2000 型标准钨卤素灯光源组成。光纤光谱仪根据光栅分光原理, 将处于 500~1400 nm 之间的可见光分光于 2048 个线性硅 CCD 单元阵列, 形成 2048 个波长单元, 每个单元的波长分辨率为 0.3~10.0 nm FWHM。HL-2000 型标准钨卤素灯光源的色温为 2960 K, 光源的辐射光谱基本上可以把它看成黑体辐射光谱。光谱仪所接收到的标准光源的辐射谱线如图 1 所示, 可以看出接收谱线和理论谱线有着很大的区别, 根据式(3)可以得到光谱仪中光电二极管和光纤传输的综合单色响应系数 P_{λ} 曲线, 如图 1 所示。燃烧气体为丁烷-空气混合气体, 燃烧火焰的温度和颜色通过调节混合气体中的空气流量来实现, 随着空气流量的增加, 燃烧逐渐完全, 火焰的温度逐渐提高, 火焰的颜色也逐渐从黄色而变为蓝色。测量火焰温度前首先对标准光源进行一次校准, 确定光谱仪的单色响应系数和系统放大倍数, 而后对火焰温度的监测无须再进行标定。

4 数据结果分析

图 2 所示的是 20 个不同工况下火焰温度测量值和计算值之间的对比。从图中可以发现, 按式(6)确定的迭代初值 T_{init} 总是大于测量值和优化值, 这是因为采用两分法时, 假定 $\epsilon_{\lambda_m} = \epsilon_{\lambda_n}$, 而事实上火焰的辐射黑度总是随着温度的提高而减小^[4], 也即 ϵ_{λ_m} 大于 ϵ_{λ_n} 。温度较低时, 火焰中的未完全燃烧的炭粒子浓度较高, 辐射黑度大, 发出黄色荧光, 而温度较高时, 炭粒子的燃尽率较高, 炭粒子浓度较低, 辐射黑度小, 呈透明的蓝色。实验中光谱仪测量范围是

500~1400 nm, 属可见光区域, 所以光谱仪测量到的低温火焰的辐射强度比高温火焰强, 但利用优化方法回归火焰温度和绝对辐射强度无关, 只和谱线的相对走势有关。丁烷气体的流量控制在 0.28 l/s, 空气流量的变化范围为: 0~1.30 l/s。随着空气流量的增大, 未燃烧的炭粒子的含量逐渐减少, 火焰温度逐渐升高。图 2 所示的测量值为用镍铬-镍硅热电偶测量火焰温度值, 计算值为采用 Levenberg-Marquardt 最优化算法的结果, 计算值和标准测量值之间的相对偏差在 4.3% 之内, 优化计算方法的准确性得到证实, 同时, 优化的结果和初值的平均偏差在 4.4% 之内, 且优化的结构稳定性较好。

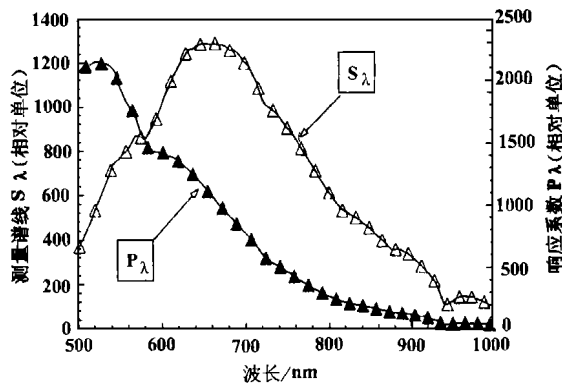


图 1 测量标准光源辐射谱线和光谱仪响应系数曲线

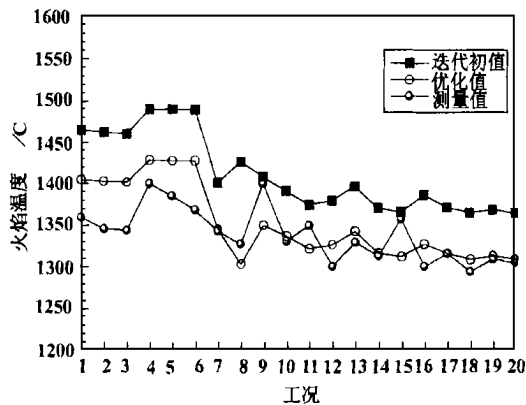
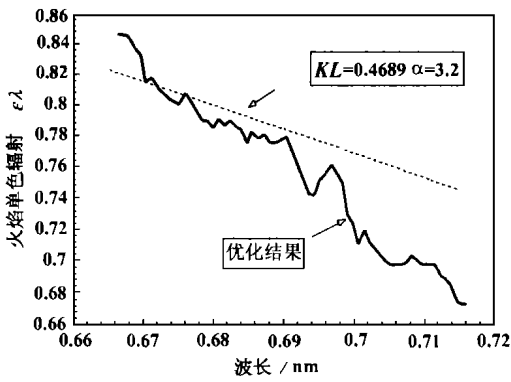


图 2 火焰温度的测量值与计算值的对比

根据式(1)所得到的火焰单色辐射率 ϵ_{λ} 在波长 (500~1400 nm) 范围内大致上随波长增大呈直线递减的趋势, KL 的迭代结果很大程度上取决于 α 的取值, 它们对 ϵ_{λ} 的作用相反, 计算结果表明, 当 $\alpha = 3.2$ 时, 所得的 KL 决定的 ϵ_{λ} 随波长变化的规律最接近火焰的实际单色辐射率变化规律。图 3 中所示一



丁烷—空气混合燃烧气体燃烧火焰的 ϵ_λ 的优化结果, 火焰温度的计算

图 3 火焰单色辐射率优化计算及 KL 值结果为 1567 K, KL 的迭代结果为 0.4689。图中虚线所示的根据 KL 值和式(1)得到的理想 ϵ_λ 变化规律, 实线所示的是根据火焰温度计算值及实测值所得到的 ϵ_λ , 可以看出两者是基本符合的, 实际燃烧火焰的单色辐射率整体上随波长呈下降的趋势, 但局部有许多波折, 这已被许多研究所证实^[4]。

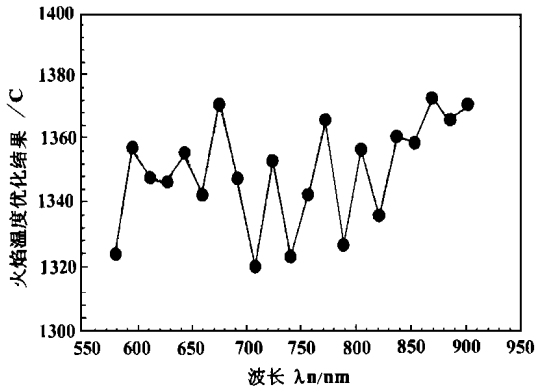


图 4 波长范围的选择和火焰温度计算结果的关系

图 4 显示优化计算结果和波长范围选择的关系, 取波长 λ_m 为 548.3 nm, 依次将波长 λ_n 确定为 580.4 nm, 596. nm, ... 直至 902.3 nm。对于每对 λ_m 和 λ_n , 应用优化算法计算火焰温度, 可以发现, 波长的选择对于 Levenberg-Marquardt 最优化算法的影响不大。这可能是由于该试验中所取的波长范围本身不是很大的缘故。

5 结论

利用最优化方法从火焰的辐射光谱中提取信息计算火焰温度和传统的双色法相比存在着以下优点: 试验中采用标准卤素灯光源进行一次性校准以得到光学测量系统的总的响应系数, 来代替传统双色法所采用的火焰绝对辐射强度校准, 适当地简化了测量程序, 而且采用优化方法还有助于了解火焰的单色辐射率的变化规律。

参考文献

- [1] Beatrice C, Bertoli C, Cirielli N C. Two-color pyrometry measurements of soot loading in a diesel engine burning model fuels of varying quality. *Combust. Sci. and Tech.* 1995, 110~111, 321~339.
- [2] Hamadi M Ben, Vervisch P, Coppalle A. Radiation properties of soot from premixed flat flame. *Combustion and Flame.* 1987. 68, 57~67.
- [3] Press William H, Teukolsky Saul A, Vetterling William T, Flannery Brian P. *Numerical Recipes in C.* Cambridge University Press, 1988.
- [4] Lee S C, Tien C L. Optical constants of soot in hydrocarbon flames. *Eighteenth Symposium (International) on Combustion.* 1981.

(渠 源 编辑)

(上接 212 页)

参考文献

- [1] Crowe. Orderly structure in jet turbulence. *J. Fluid. Mech.* 1971, (48): 547~591.
- [2] Paul. Structure and dynamics of round turbulent jets. *Physics of Fluid* 1983, 26(9): 3185~3192.
- [3] Crowe. Particle dispersion by coherent structures in Free shear flows particulate. *Sci Tech.* 1985, (3): 149~188.
- [4] Pelesen. On the preferred mode of jet instability. *J. Fluid. Mech.* 1988, (194): 153~173 Dahm. Measurement of Entrainment and Mix-

ing in Turbulent Jets. *AIAA* 1987 7(25): 1216~1223.

- [5] 林建忠. 湍流的拟序结构. 北京: 机械工业出版社, 1995 年第一版.
- [6] 朱炳煌. 四角燃烧的特点及冷炉空气动力场试验方法. *技术通讯* 1980 (5): 1~5.
- [7] 盛春华. 射流横向流相互干涉下漩涡的形成与衰减. *空气动力学学报.* 1988 6(1).
- [8] 吴生来. 电站锅炉四角切圆燃烧技术议. *中国电力.* 1999 32 (1): 15~21.
- [9] 李之光. 相似与模化. 北京: 国防工业出版社, 1982.

(渠 源 编辑)

—215~216, 222

Through the use of a finite element method and a substructure technology a dynamic model of technological base-frame system is set up for a GT25000 gas turbine test. Calculated in detail are the natural characteristics and the dynamic response of the above-cited system. Also discussed is the effect on the system vibrations of a damper and damping action. The results of an analysis show that the technological base-frame possesses relatively good dynamic characteristics and features a rational design. **Key words:** gas turbine test, technological base-frame, substructure, natural frequency, dynamic response

两相流动对流化床燃烧行为的影响 = **The Effect of a Two-phase Gas-solid Flow on the Combustion Behavior of a Fluidized Bed** [刊, 汉] / Lu Junfu, Jin Xiaozhong, Zhang Jiansheng, *et al* (Department of Thermal Engineering, Qinghua University, Beijing, China, Post Code 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 217~219, 238

The measurement along a circulating fluidized-bed boiler height of the gas concentration and the combustion fraction distribution has demonstrated that the major difference between a bubbling fluidized bed and a circulating fluidized one consists in their radically different combustion behavior in a dense-phase zone. Due to a relatively low average particle diameter of the bed material the dense-phase zone flow of the circulating fluidized bed is different from that of the bubbling bed. This will lead to an increase in mass transfer resistance between the gas and solid phase, thus affecting the combustion reaction. The combustion behavior in the dense-phase zone is characterized by a shortage or lack of oxygen. The combustion reaction exists along the height of the circulating fluidized bed boiler and even in a cyclone separator. A combustion model for the fluidized bed dense-phase zone is set up, which takes into account the mass transfer resistance between the gas and solid phase. A comparison with the measured data obtained on an actual circulating fluidized bed boiler indicate that the calculated results are in relatively good agreement with the measured ones. **Key words:** circulating fluidized bed, bubbling bed, dense-phase zone, combustion behavior

非流线型体的滞止浓缩与弥散过程 = **Stagnation Concentration Process and Diffusion Process of a Bluff Body** [刊, 汉] / Jin Yan, Wei Yonghua, Xiong Fanfan (Department of Thermal Engineering, Qinghua University, Beijing, China, Post Code 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 220~222

The authors have come up with a new concept, proposing that both a stagnation concentration process and a diffusion process of particles constitute a basis for the concentrated pulverized-coal combustion technology. An analysis of the mechanism of the above-mentioned two processes is given in the present paper. With the help of a particle dynamic analyzer a study has been conducted of both the concentration process and the diffusion process of a bluff body which assumes the form of a damper, demonstrating for the first time the existence of the stagnant concentration process. The experimental test results show that through the use of the bluff body a concentration or enrichment of the pulverized coal can be readily attained. **Key words:** concentrated pulverized-coal combustion technology, pulverized coal burner, stagnation concentration process, diffusion process, bluff body

采用优化算法分析燃烧火焰辐射光谱求取火焰温度 = **Determination of a Flame Temperature from the Analysis of a Combustion Flame Radiation Spectrum through the Use of an Optimized Algorithm** [刊, 汉] / Zhou Jie (Institute of Thermal Power Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 223~225

A flame temperature can be determined from an analysis of the radiation spectrum emitted by a gas-burning flame in conjunction with the use of an optimized algorithm. This approach simplifies the calibration of the absolute radiation intensity of a flame as demanded by the conventional two-color method. Meanwhile, it is conducive to a better understanding of the variation relationship of the flame radiation emissivity versus wavelength. The measured temperature values are in good agreement with those obtained by a thermocouple, demonstrating the fairly high precision of the method. Moreover, this also makes it possible to conduct the on-line monitoring of a combustion flame temperature. **Key words:** flame temperature, optimization, radiation intensity

蒸汽动力系统可调节性分析 = **An Analysis of the Regulation Possibility of Steam Power Systems** [刊, 汉] / He