

基于多光谱分析的煤粉锅炉火焰温度和光谱发射率的同时测量研究

牛世斌¹, 方顺利², 张越³, 弓慧芳⁴, 闫伟杰³

(1. 兰州铝业有限公司, 兰州 730070; 2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054; 3. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094; 4. 中国矿业大学 低碳能源与动力工程学院, 徐州 221116)

摘要: 针对燃煤电厂锅炉火焰温度和光谱发射率难以精确测量的问题, 提出一种基于多光谱分析的非模型化反演方法, 无需预定义发射率模型即可实现温度和发射率的同步测定。采用光谱仪采集火焰辐射信号, 结合黑体校准数据对各波长波段进行归一化处理, 利用误差平方和算法迭代求解实际火焰温度和光谱发射率分布。通过实验室标定和电厂锅炉炉膛现场试验验证, 结果表明: 该方法温度反演误差小于 1%, 满足工业火焰监测的精度要求; 在固定负荷条件下, 火焰温度和发射率随炉膛高度增加而降低, 主要归因于固体颗粒浓度减小; 在相同高度下, 负荷升高会提高发射率, 但燃烧动力学与颗粒密度效应导致平均发射率与温度呈反比关系。光谱分析显示, 火焰在 600~940 nm 波段呈现近似灰体辐射特性, 发射率与波长无关。该方法为煤粉锅炉的温度与辐射特性精确测量提供了有效技术手段, 对提升锅炉运行安全性、能效及减排具有实际应用价值。

关键词: 煤粉锅炉; 火焰温度; 发射率; 多光谱分析; 灰体辐射

中图分类号: F 830 文献标志码: A

In-situ simultaneous measurement of flame temperature and spectral emissivity in pulverized coal-fired boilers via multispectral analysis

NIU Shibin¹, FANG Shunli², ZHANG Yue³, GONG Huifang⁴, YAN Weijie³

(1. Lanzhou Aluminium Co., Ltd., Lanzhou 730070, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 4. School of Low Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

收稿日期: 2025-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176144)

第一作者: 牛世斌(1974—), 男, 高级工程师。研究方向: 火力发电专业及附属系统。E-mail: 1952800287@qq.com

通信作者: 闫伟杰(1985—), 男, 副教授。研究方向: 燃烧诊断、燃烧测试技术。E-mail: weijieyan@njust.edu.cn

引文格式: 牛世斌, 方顺利, 张越, 等. 基于多光谱分析的煤粉锅炉火焰温度和光谱发射率的同时测量研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(4): 366-375.

Citation: NIU Shibin, FANG Shunli, ZHANG Yue, et al. In-situ simultaneous measurement of flame temperature and spectral emissivity in pulverized coal-fired boilers via multispectral analysis[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(4): 366-375.

Abstract: To address the challenge of accurately measuring flame temperature and spectral emissivity in pulverized coal-fired boilers, this paper proposes a multispectral analysis method that simultaneously determines both parameters without requiring predefined emissivity models. In laboratory experiments, spectral data were acquired using a spectrometer and normalized across wavelength bands by combining blackbody-calibrated temperatures with spectral radiation signals. A sum of squared errors (SSE) algorithm was employed to iteratively retrieve the actual flame temperature and spectral emissivity, with validation tests conducted in a power plant boiler furnace. The results show the temperature inversion error of this method is less than 1%, meeting the accuracy requirements of industrial flame monitoring. Under constant load, increasing furnace height reduces both flame temperature and emissivity due to decreasing solid particle concentrations. At fixed heights, higher loads elevate emissivity, but an inverse relationship exists between average emissivity and temperature, driven by rapid combustion dynamics and particle density effects. Flames exhibit near-gray body behavior within the 600~940 nm wavelength range, where emissivity remains wavelength-independent. This research provides critical technical support for precise temperature and emissivity measurements, enhancing the safety, efficiency, and low-emission operation of coal-fired boilers.

Keywords: *pulverized coal-fired boiler; flame temperature; emissivity; multispectral analysis; gray-body radiation*

火焰温度和光谱发射率是燃煤电厂锅炉燃烧诊断的关键参数^[1],在优化燃烧效率、确保运行安全和减少污染物排放方面发挥着至关重要的作用,所有这些都直接影响锅炉性能^[2-3]。炉膛内的高温和高颗粒环境使得火焰发射率的直接测量具有挑战性,因此,非接触测量方法被广泛采用^[4-6]。由于其非侵入性和对目标无伤害的特点,辐射测温法备受关注^[2,7-8]。

传统的辐射测温方法依赖于假设的发射率模型来解决欠定方程。例如,Hottel等^[9]提出了一种基于经验系数的发射率模型,推导出了烃类燃料火焰的一般经验系数。尽管该模型已被广泛应用,但它仍然受到经验假设的限制^[10-11]。其他方法采用假设为多项式、对数多项式或傅里叶级数形式的模型^[12-13],并将其应用于欠定方程。一旦方程变得确定,温度计算就利用基于方程求解^[14-16]或最小二乘拟合^[17]的数据处理方法。然而,这些方法面临着显著的局限性:预设的发射率模型往往无法适应复杂的工业燃烧环境,导致温度估计误差较大^[18-20]。一些研究人员提出了多波长测温方法,这些方法在假设发射率随波长变化具有特定规律的情况下建立模型。例如,Liu等^[21-22]开发了一种多波长方法来求解发射率、波长和温度之间

多项式关系中的未知系数。然而,当高光谱测量噪声较大时,高阶多项式难以收敛。Fu等^[23]引入了交替辐射热源方法,结合多波长测量,仅在不同噪声水平和光谱发射率条件下的近红外光谱区域显示出良好的求解精度。此外,Wen等^[24]使用多波长测温法评估了现有的辐射光谱模型,发现没有单一函数可以准确表示测量光谱的每个波段。他们的研究表明,增加波长数量主要是减少测量噪声引起的误差,而不是提高发射率模型的准确性。通过红外辐射准确测量温度需要事先了解物体的表面发射率来确定其温度,因为发射率和温度是固有的耦合参数。例如,Herve等^[25]在受控实验室条件下开发了一种双色探测器,相对温度误差为3%。然而,由于锅炉火焰的发射率未知,该方法无法应用于电厂锅炉的火焰温度测量。为了满足工业需求,迫切需要开发一种独立于传统发射率建模、无需人工预设参数且适用于各种温度测量场景的测量方法^[26-27]。光谱分析的最新进展引入了规避发射率假设的创新策略。Yan等^[28]证明了使用移动窄带方法在喷气发动机涡轮叶片监测中进行温度测量的可行性。通过同步采集光谱和热电偶信号的光谱辐射数据进行窄带光谱分析,实现了温度重建,解决了由发射率变化引起

的不准确性问题。该方法为电厂锅炉的温度测量提供了有价值的见解。

在煤粉锅炉中,由于颗粒浓度、燃料成分和燃烧阶段的变化,火焰发射率表现出空间和时间的异质性^[16]。现有的发射率建模方法往往忽略这些复杂性,导致在实际环境中的性能不佳^[29]。

本研究提出了一种基于多光谱分析的温度与发射率同步测量方法,以解决传统辐射测温依赖预设发射率模型导致的工业燃烧场测量误差问题。通过构建波长带归一化与误差最小化算法,结合 600~940 nm 波段黑体校准,温度反演相对误差<1%。本文重点研究了工业煤粉锅炉中火焰高度、负荷变化与光谱发射率的关系,定量揭示了燃烧过程发射率-温度动态特性及其空间分布规律。

1 测量原理与设备

1.1 测量原理

光谱仪测量黑体的光谱辐射强度表示方法可以参见文献[30]。对于不同波长的测量,光谱辐射强度 E_b 可表示为

$$E_b(\lambda_i, T) = (E_b(\lambda_1, T), E_b(\lambda_2, T), \dots, E_b(\lambda_l, T)) \quad (1)$$

式中: λ 为波长; i 为光谱仪测量的波长数量, $i = 1, 2, \dots, l$; T 为温度。

对黑体炉在不同温度下的光谱数据进行线性拟合,获得每个温度对应的光谱曲线。将光谱曲线划分为多个波段,每个波段包含 j 个波长,任意波段内的辐射强度可表示为

$$E_b(\lambda) = (E_b(\lambda_1, T), E_b(\lambda_2, T), \dots, E_b(\lambda_j, T)) \quad (2)$$

为了在波段之间归一化辐射强度,将每个波段内的强度除以同一波段中心波长的强度。对于给定温度的光谱曲线,归一化强度计算为

$$E'_b(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{E_b(\lambda_1, T)}{E_b(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{E_b(\lambda_{j+1}, T)}{E_b(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{E_b(\lambda_{(2n+1)j/2}, T)}{E_b(\lambda_{(2n+1)j/2}, T)} \\ \frac{E_b(\lambda_2, T)}{E_b(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{E_b(\lambda_{j+2}, T)}{E_b(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{E_b(\lambda_{(2n+1)j/2+2}, T)}{E_b(\lambda_{(2n+1)j/2+2}, T)} \\ \vdots \\ \frac{E_b(\lambda_j, T)}{E_b(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{E_b(\lambda_{2j}, T)}{E_b(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{E_b(\lambda_l, T)}{E_b(\lambda_{(2n+1)j/2}, T)} \end{bmatrix} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

对于不同温度下归一化的光谱数据,归一化

强度可表示为

$$E'_{b_n}(\lambda) = \begin{bmatrix} E'_{b_1}(\lambda, T_1) \\ E'_{b_2}(\lambda, T_2) \\ \vdots \\ E'_{b_N}(\lambda, T_N) \end{bmatrix} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

光谱仪测量实际物体的辐射强度为

$$S(\lambda_i, T) = (S(\lambda_1, T), S(\lambda_2, T), \dots, S(\lambda_l, T)) \quad (5)$$

对实际物体的光谱数据应用相同的归一化程序,得到下式:

$$S'_m(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{S_1(\lambda_1, T)}{S_1(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{S_1(\lambda_{j+1}, T)}{S_1(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{S_1(\lambda_{(2k+1)j/2}, T)}{S_1(\lambda_{(2k+1)j/2}, T)} \\ \frac{S_1(\lambda_2, T)}{S_1(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{S_1(\lambda_{j+2}, T)}{S_1(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{S_1(\lambda_{(2k+1)j/2+2}, T)}{S_1(\lambda_{(2k+1)j/2+2}, T)} \\ \vdots \\ \frac{S_1(\lambda_j, T)}{S_1(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{S_1(\lambda_{2j}, T)}{S_1(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{S_1(\lambda_l, T)}{S_1(\lambda_{(2k+1)j/2}, T)} \\ \vdots \\ \frac{S_M(\lambda_1, T)}{S_M(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{S_M(\lambda_{j+1}, T)}{S_M(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{S_M(\lambda_{(2k+1)j/2}, T)}{S_M(\lambda_{(2k+1)j/2}, T)} \\ \frac{S_M(\lambda_2, T)}{S_M(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{S_M(\lambda_{j+2}, T)}{S_M(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{S_M(\lambda_{(2k+1)j/2+2}, T)}{S_M(\lambda_{(2k+1)j/2+2}, T)} \\ \vdots \\ \frac{S_M(\lambda_j, T)}{S_M(\lambda_{j/2}, T)}, \frac{S_M(\lambda_{2j}, T)}{S_M(\lambda_{3j}, T)}, \dots, \frac{S_M(\lambda_l, T)}{S_M(\lambda_{(2k+1)j/2}, T)} \end{bmatrix} \quad (m = 1, 2, \dots, M; k = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

为了确定温度,将实际物体的归一化光谱与预先校准的黑体光谱在不同温度下进行比较。最优温度对应于计算的平方误差和(SSE)最小,计算为

$$d_m(T_n) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S'_m(\lambda_i, T_n) - E'_{b_n}(\lambda_i, T_n)]^2 \quad (7)$$

对于合理范围内的每个候选温度 T , SSE 量化了测量光谱与黑体归一化光谱之间的偏差。选择 SSE 最小的温度作为估计值

$$T_m = T | \min[d_m(T_1), d_m(T_2), \dots, d_m(T_N)] \quad (8)$$

根据热辐射理论,物体的光谱辐射强度可表

示为

$$I(\lambda_i,T)=\varepsilon(\lambda_i)I_b(\lambda_i,T)$$
 (9)

式中： $\varepsilon(\lambda_i)$ 为光谱发射率； I_b 为黑体的光谱辐射强度。

在热辐射波段内，有效发射率为

$$\varepsilon=\frac{S'(\lambda_i,T)}{E'_b(\lambda_i,T)}$$
 (10)

1.2 实验建立

1.2.1 光谱测温系统

实验装置中使用的光谱测温系统如图 1 所示。该系统由光谱仪、光纤、准直透镜、USB 数据线和计算机组成。

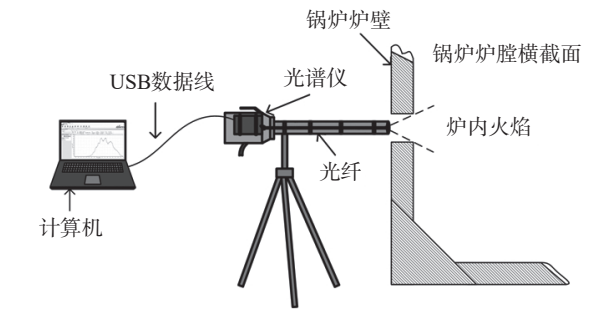


图 1 测量系统
Fig.1 Measurement system

光谱仪将光信号转换为电信号，并处理这些信号以确定跨波长的相对辐射强度。该系统采用 AvaSpec-ULS2048-USB2 光谱仪，其参数如表 1 所示。其中，探测器型号为 HAM S11639，2048 像素线列 CMOS。采样能以每秒 500 个光谱的超高速进行，USB 2.0 接口确保实时火焰辐射数据的采集。

表 1 光谱仪参数表

Tab.1 Spectrometer configuration	
参数	数值
波长/nm	200~1 100
光学分辨率/nm	0.04~20
积分时间/s	$1.1\times10^{-3}\sim600$
信噪比	330 : 1
光谱采集频率/Hz	10
光谱采样速度/ms	1.8

1.2.2 黑体标定

光谱仪的原始输出表示光电转换后的相对辐射强度。为了实现辐射测温，使用 M330 黑体炉进行预实验校准，以建立相对辐射强度与辐射强度之间的转换关系。

黑体炉分阶段加热以加速温度上升。图 2 展示了在指定波长范围内，21 个设定黑体温度下测量的光谱响应曲线。通过将原始信号除以积分时间来归一化，得到光谱辐射强度，确保采集数据的一致缩放。为了校准精度，在 600~940 nm 范围内采集数据，对应煤粉火焰的灰体行为，温度范围为 1373~1773 K，间隔 20 K。

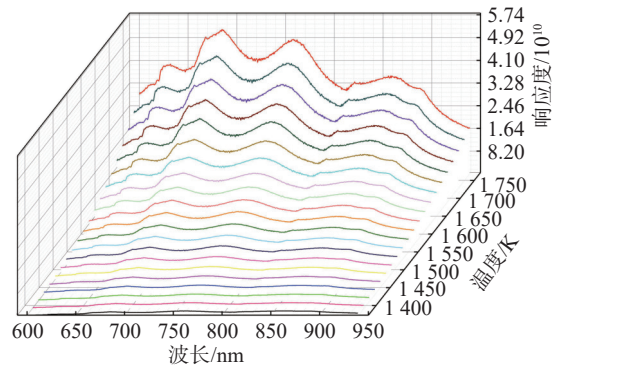


图 2 黑体炉在不同设定温度下的光谱辐射强度曲线
Fig.2 Spectral radiative intensity curves of the blackbody furnace at different setting temperatures

由式(1)~(10)反演黑体温度，并与设定值进行比较，结果如表 2 所示。可以看出，最大相对误差为 1%，这证实了该系统适用于工业火焰测温。由式(1)~(10)和图 2 光谱辐射强度曲线得到表 2 第 2 列的计算温度，表 2 第 1 列为黑体炉设定温度，结果表明：黑体炉在 1100~1450 K 温度范围内相对误差小于 1%，标定过程准确。

表 2 预设黑体温度下的反演温度和相对误差

Tab.2 Inverted temperature values and relative errors at preset blackbody temperatures

设定温度/ K	计算温度/ K	相对误差/ %
1 100	1 106	0.56
1 150	1 149	0.05
1 200	1 201	0.08
1 250	1 244	0.46
1 300	1 293	0.53
1 350	1 363	1.00
1 400	1 406	0.46
1 450	1 450	0.04

2 在燃煤电站锅炉中的应用

2.1 煤粉锅炉设备

实验在 X 电厂 2 号机组进行。该锅炉为超超临

界燃煤机组，额定容量 660 MW，最大连续蒸发量 1795 t/h，锅炉效率 93.53%。主要运行参数包括煤耗率 230.2 t/h 和炉膛截面 17.4 m(宽)×17.4 m(深)。煤粉燃烧系统包括低 NO_x 燃烧器和带有 A-A 空气分级的 MACT 燃烧器，对称布置在 4 个壁面上。制粉系统采用正压直吹式配置，每台锅炉配备六台 HP1003 中速磨煤机(5 台运行，1 台备用)和两台变桨轴流风机。一次风水平对称，具有垂直入口和水平出口。

实验数据在 X 电厂收集。由于光谱特性和发射率随煤成分而变化^[31]，本文提出的算法无需事先假设光谱发射率，对煤种变化具有自适应性。表 3 给出了测试期间所用煤的工业分析。

表 3 X 电厂混合煤的工业分析

Tab.3 Proximate analysis of coal blends of the power plant

水分/%	灰分/%	挥发分/%	低位发热量/(MJ/kg)
22.01	24.99	40.80	19.41

煤粉锅炉的简化示意图和观察口位置如图 3 所示。火焰测量在 3 个观察口进行：前墙的 A 口(标高 44.30 m)和 B 口(标高 47.15 m)；右墙的 C 口(标高 56.20 m)。检测系统的实际布局如图 4 所示。

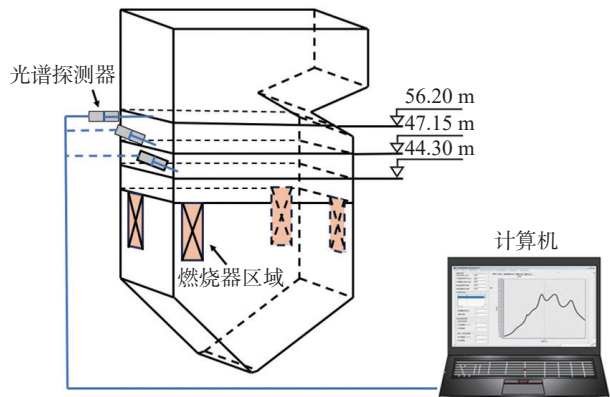


图 3 煤粉锅炉结构示意图及观测口位置

Fig.3 Schematic of pulverized coal-fired boiler structure and observation port locations

2.2 燃煤火焰的光谱分析

图 5 显示了在 X 电厂锅炉额定负荷 330 MW 下收集的煤粉火焰光谱数据。原始数据由该工况下不同时刻 $\tau_1 \sim \tau_5$ 的 50 条单独曲线组成，从中选择 5 条光谱响应曲线进行分析。如图 5 所示，火焰辐射强度没有呈现平滑的轮廓，而是表现为叠加了噪声和碱金属辐射特征的复合光谱。值得注意的是，不同燃料类型的火焰产生不同的辐射光

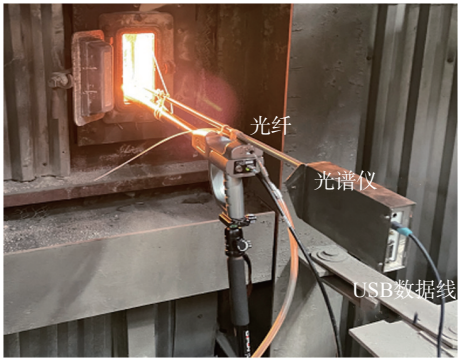


图 4 现场测量系统配置

Fig.4 On-site measurement system configuration

谱。尽管燃烧过程中光谱辐射强度波动，但整体光谱形状表现出一致的相似性^[10,32]。观察到 2 条突出的特征发射线：670.8 nm 处的线对应锂(Li)，766.0 nm 和 769.9 nm 处的双线源自钾(K)^[33]。同样，煤粉火焰的发射率曲线不光滑，尽管其随波长的变化相对较小。重要的是，从 X 电厂收集的火焰辐射数据在 600~940 nm 波长范围内表现出灰体特征，如图 5 中的趋势所示。

3 实验结果分析

3.1 330 MW 负荷下不同高度的光谱响应信号

可见光波长范围内的煤粉火焰辐射光谱主要由高温固体颗粒的热辐射产生，包括炭、飞灰和煤烟颗粒。随着燃烧的进行，炭颗粒逐渐燃尽成灰。理论分析表明^[34]，炭的发射率显著大于灰，实验结果与理论相符。因此，光谱仪检测到的发射率沿火焰垂直高度降低。

在本研究中，采用光谱检测系统在 330 MW 负荷下，在 3 个不同高度(44.30 m、47.15 m 和 56.20 m)收集锅炉的光谱数据。这产生了相同负荷下不同高度的光谱响应信号。为了提高计算精度，将 2 min 内采集的光谱曲线平均，得到每个高度的 10 条代表性光谱曲线，如图 6 所示。值得注意的是，56.20 m 处的光谱响应信号明显低于 44.30 m 和 47.15 m 处的信号。这种差异是因为 56.20 m 位置离燃烧器更远，煤粉燃烧几乎完成。相比之下，44.30 m 和 47.15 m 位置离燃烧器更近，由于燃烧活跃，表现出更高的光谱响应信号。

不同高度的发射率如图 7 所示。在此负荷下，火焰发射率满足灰体特征。通过计算每个高度的平均发射率和温度，确定了不同的燃烧区

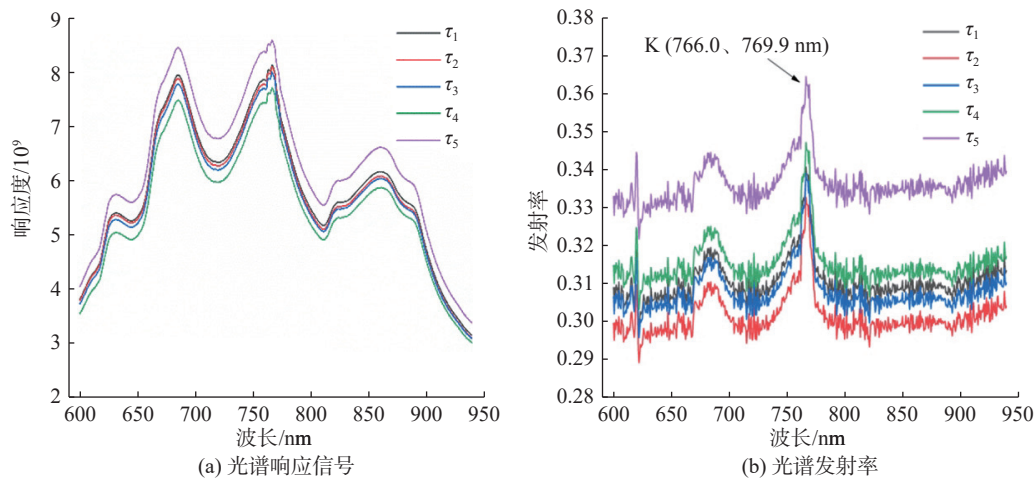


图 5 330 MW 负荷下光谱响应信号和光谱发射率

Fig.5 Spectral response signals and spectral emissivity at 330 MW load

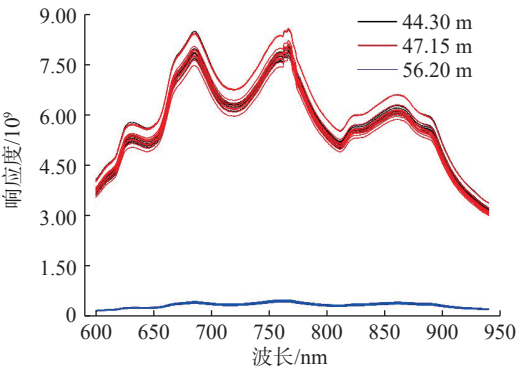


图 6 330 MW 负荷下不同高度的光谱响应信号

Fig.6 Spectral response signals of the spectrometer at different heights at 330 MW load

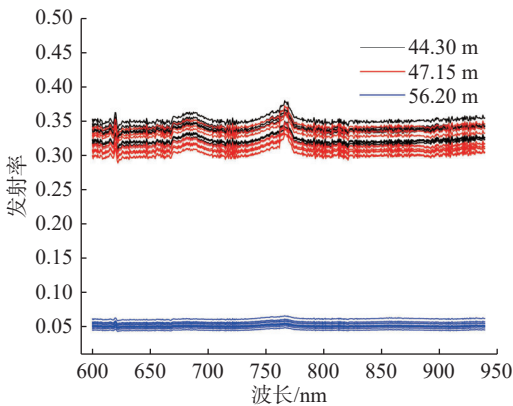


图 7 330 MW 负荷下不同高度的光谱发射率

Fig.7 Spectral emissivity at different heights at 330 MW load

域: 在 44.30 m (着火区), 煤粉处于燃烧初期, 产生较高的平均发射率 0.326 和温度 1492 K。在 47.15 m (主燃烧区), 煤的燃尽率更高, 导致平均发射率降低至 0.311, 但温度升高至 1560 K。在 56.20 m (燃尽区), 燃烧几乎完成, 发射率和温度均显著下降至 0.031 和 1520 K。

随着高度的增加, 火焰中固体颗粒(如炭、煤烟)的浓度逐渐降低, 导致发射率下降。值得注意的是, 47.15 m 处的温度超过着火区和燃尽区的温度, 这是由于主燃烧区燃烧活动强烈且煤燃尽效率较高。这些趋势与图 7 中观察到的灰体行为一致。

3.2 同一高度下不同负荷的光谱响应信号

电厂负荷不仅受电力需求影响, 还受季节变化影响。提高锅炉负荷的灵活性可以减轻可再生能源转换效率降低导致的电网波动^[35]。为了研究负荷对光谱辐射强度的影响, 使用光谱检测系统在固定高度 47.15 m 下, 在 3 个不同负荷(330 MW、390 MW 和 500 MW)下收集光谱响应信号。处理原始光谱数据以计算每个负荷条件下的发射率、平均发射率和温度。更高的锅炉负荷与更高的光谱辐射强度相关, 这是由于燃烧温度和颗粒浓度升高。发射率值表现出与负荷的依赖性变化, 通常负荷增加, 随着燃烧效率的提高, 发射率会略有降低。计算显示温度随着负荷增加而逐渐升高, 与燃烧活动加剧一致。这些结果突出了负荷调整在调节火焰特性中的关键作用, 并强调了光谱分析在可变运行条件下优化锅炉性能的实用性。

如图 8(a) 所示, 光谱响应强度随负荷显著变化。在 500 MW 时, 光谱响应强度明显高于 330 MW 和 390 MW, 对应更高的发射率(图 8(b))。值得注意的是, 火焰发射率随着负荷的增加而增加, 高负荷条件(如 500 MW)的发射率明显高于低负荷。

实验中辐射光谱源自煤粉燃烧火焰。尽管环境温度变化, 固定高度(47.15 m)的燃烧过程保持一致, 导致各负荷下火焰温度相当。计算的平均发射率为 0.124(330 MW)、0.138(390 MW)和

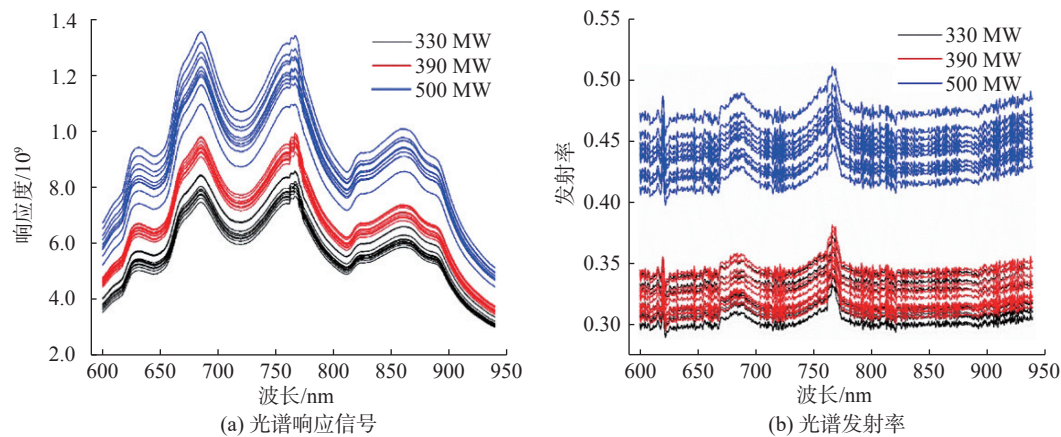


图 8 不同负荷下光谱响应信号和光谱发射率

Fig.8 Spectral response signals and spectral emissivity under different loads

0.355(500 MW)。可见，随着负荷的增加，发射率显著增加。在 330 MW 和 390 MW 之间，发射率变化最小，表明颗粒浓度或燃烧稳定性存在阈值效应。

然而，温度趋势与发射率呈反比关系：在 500 MW 时，快速的颗粒燃烧和强烈的火焰波动导致平均温度较低(855 ℃)，但由于颗粒密度增加和辐射贡献，发射率较高。在 390 MW 时，稳定的燃烧条件产生最高温度(1030 ℃)和中等发射率。在 330 MW 时，不完全燃烧降低了温度(390 ℃)和发射率。

平均发射率与温度之间的这种反比关系(图 8(b))表明，尽管更高的负荷会增加辐射颗粒浓度(从而提高发射率)，但也可能引入湍流或冷却效应，抑制火焰峰值温度。这些发现与前几节中观察到的灰体行为一致，并突显了负荷动态、燃烧效率和辐射特性之间的复杂相互作用。

3.3 光谱响应信号数据

在煤炭燃烧过程中，煤衍生辐射的脉动频率因燃料成分而异。煤中碱金属和杂质的存在，以及与炉膛吹灰器的距离等因素，都会影响火焰的脉动频率和辐射强度。

为确保测量准确性，使用 30 min 内收集的数据计算了 X 电厂 330 MW 额定负荷下煤粉火焰的温度和平均发射率。图 9 显示了平均发射率的时间变化，其值虽有波动但总体相对稳定，在 0.25~0.57 之间振荡。发射率的概率密度分布如图 10 所示，84.19% 的发射率值集中在 0.28~0.37 范围内，表明数据具有较强的集中趋势。

这些结果表明，尽管由于燃烧过程的动态性，发射率会出现短期波动，但系统在较长观察

期内表现出统计稳定性。发射率集中在窄带内，进一步支持了使用光谱分析监测工业环境中燃烧特性的可靠性。

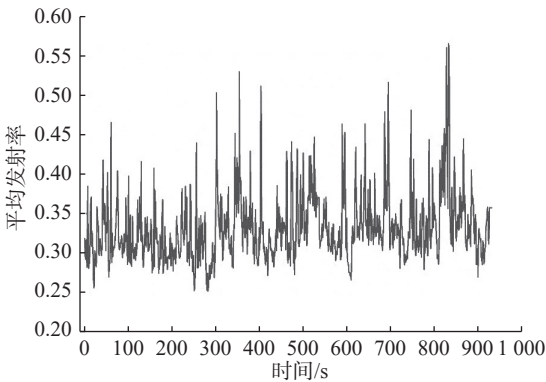


图 9 330 MW 平均发射率随时间的变化

Fig.9 Temporal variation of average emissivity at 330 MW

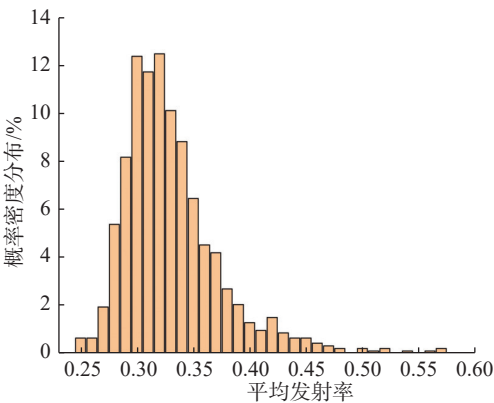


图 10 平均发射率的概率密度

Fig.10 Probability density distribution of average emissivity

如图 11 所示，330 MW 额定负荷下火焰温度的时间演变表现出明显的脉动特征：大振幅波动(~60 K)以 16~25 s / 周期的频率发生，可能由间歇性燃烧湍流或颗粒浓度变化驱动。中等波动

(~ 40 K)更频繁地出现在 7~11 s/周期,可能与局部燃料-空气混合动态或碱金属发射的间歇性有关。

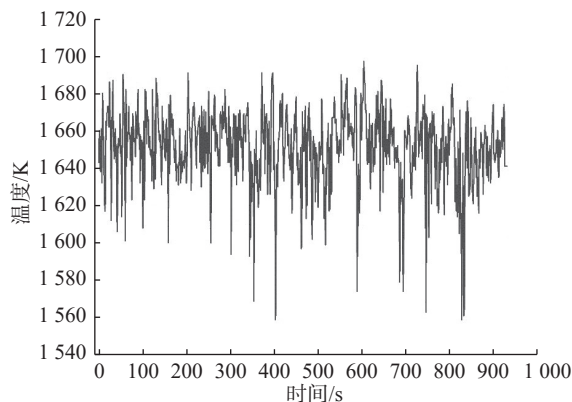


图 11 330 MW 负荷下温度随时间的变化

Fig.11 Temporal variation of flame temperature at 330 MW

火焰温度的概率密度分布(图 12)显示出较强的集中趋势,83.54%的温度值主要集中在 1631~1675 K 范围内。这种窄分布突显了稳定负荷条件下燃烧过程的稳定性,尽管存在瞬态脉动。

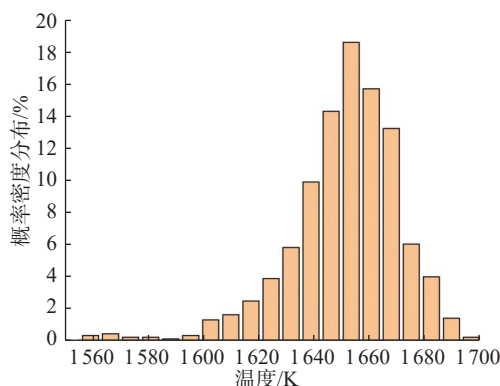


图 12 火焰温度的概率密度分布

Fig.12 Probability density distribution of flame temperature

4 结 论

本研究提出了一种通过光谱仪测量的多光谱数据反演物体真实温度的方法,无需预定义发射率。该方法通过将波长划分为不同波段并将反演温度与黑体炉的实际温度数据进行比较来验证。对 X 电厂收集的实验数据进行分析,得出以下结论:

a. 煤粉火焰在 600~940 nm 波长范围内近似灰体特性,其中光谱发射率随波长变化不大。

b. 在固定负荷(如 330 MW)下,随着炉膛高度的增加,煤焦的燃尽度逐渐升高,飞灰含碳量逐渐降低,这导致发射率和火焰温度降低。

c. 在固定高度(如 47.15 m)下,更高的负荷会导致发射率升高。然而,不同负荷下的温度变化显示平均发射率与温度之间存在反比关系:发射率越高,温度越低,这可能是由于温度越高煤焦的燃尽率越高,飞灰含碳量越低。

d. 对于本文研究的煤粉炉,84.19%的发射率值集中在 0.28~0.37 之间;83.54%的温度值落在 1631~1675 K 范围内,以上检测信息能够为锅炉燃烧数值模拟提供数据支撑。

本方法相比于其他方法在工业应用中展现显著优势的同时,仍要应对的挑战是探头的冷却及吹扫,以便能够长期在恶劣的工业环境下稳定工作。本方法采用的无需假设固定发射率的模型,理论上对燃料类型、炉型具有普适性。未来会尝试将该方法应用到更多燃料及炉型中。在指导锅炉运行工况调整方面,在未来工作中将在锅炉不同高度上布置光谱探测器,可实现炉膛高度方向上温度、发射率的同时监测;监测结果可用于控制每层燃烧器的出力,从而控制炉膛高度方向的高温中心,优化燃烧。

参考文献:

- [1] SU S, POHL J H, HOLCOMBE D, et al. Techniques to determine ignition, flame stability and burnout of blended coals in p. f. power station boilers[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27(1): 75-98.
- [2] HUANG Y, YAN Y, RILEY G. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two-colour method[J]. *Measurement*, 2000, 28(3): 175-183.
- [3] CIGNOLI F, DE IULIIS S, MANTA V, et al. Two-dimensional two-wavelength emission technique for soot diagnostics[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(30): 5370-5378.
- [4] ZHENG S, CAI W G, ZHAO C, et al. On the measurement of flame temperature and emissivity based on multispectral imaging technique[J]. *Measurement*, 2022, 196: 111272.
- [5] LOU C, PU Y, ZHAO Y G, et al. An in-situ method for time-resolved sodium release behaviour during coal combustion and its application in industrial coal-fired boilers[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4199-4206.
- [6] LU G, BHEEMUL H C, YAN Y. Concurrent measurements of temperature and soot concentration of pulverised coal flames[C]//Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics

- (Cat. No. 01CH 37188). Budapest: IEEE, 2001: 1221–1226.
- [7] XU W C, YAN Y, HUANG X B, et al. Quantitative measurement of the stability of a pulverized coal fired flame through digital image processing and statistical analysis[J]. *Measurement*, 2023, 206: 112328.
 - [8] LÜ Y, HE X, WEI Z H, et al. Ambient temperature-independent dual-band mid-infrared radiation thermometry[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2169–2174.
 - [9] HOTTEL H C, BROUGHTON F P. Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 1932, 4(2): 166–175.
 - [10] LI K Y, YAN W J, YU L B, et al. Simultaneous determination of Na concentration and temperature during Zhundong coal combustion using the radiation spectrum[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(4): 3348–3359.
 - [11] DRAPER T S, ZELTNER D, TREE D R, et al. Two-dimensional flame temperature and emissivity measurements of pulverized oxy-coal flames[J]. *Applied Energy*, 2012, 95: 38–44.
 - [12] ZHAO Y Z, LV J G, ZHENG K F, et al. Multispectral radiometric temperature measurement algorithm for turbine blades based on moving narrow-band spectral windows[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 4405–4421.
 - [13] XI Z Y, FU Z G, HU X T, et al. An experimental investigation on flame pulsation for a swirl non-premixed combustion[J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1757.
 - [14] ZHENG S, CAI W G, SUI R, et al. In-situ measurements of temperature and emissivity during MSW combustion using spectral analysis and multispectral imaging processing[J]. *Fuel*, 2022, 323: 124328.
 - [15] DANIEL K, FENG C, GAO S. Single wavelength and ratio pyrometry reflection errors in temperature measurement of gas turbine blade[J]. *Measurement*, 2016, 86: 133–140.
 - [16] ARAÚJO A, SILVA R. Surface temperature estimation in determined multi-wavelength pyrometry systems[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(5): 054901.
 - [17] DANIEL K, FENG C, GAO S. Application of multispectral radiation thermometry in temperature measurement of thermal barrier coated surfaces[J]. *Measurement*, 2016, 92: 218–223.
 - [18] KHOLGHI M R, AFARIN Y, SEDIK A D, et al. Comparison of multiple diagnostic techniques to study soot formation and morphology in a diffusion flame[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 176: 567–583.
 - [19] XU Z W, ZHAO H B, CHEN X B, et al. Multi-parameter measurements of laminar sooting flames using thermophoretic sampling technique[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 180: 158–166.
 - [20] YAN W J, ZHOU H C, JIANG Z W, et al. Experiments on measurement of temperature and emissivity of municipal solid waste (MSW) combustion by spectral analysis and image processing in visible spectrum[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(11): 6754–6762.
 - [21] LIU H W, ZHENG S. Measurement of temperature and wavelength-dependent emissivity distributions using multi-wavelength radiation thermometry[J]. *Optics Communications*, 2020, 472: 125895.
 - [22] LIU H W, ZHENG S, ZHOU H C. Measurement of soot temperature and volume fraction of axisymmetric ethylene laminar flames using hyperspectral tomography[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(2): 315–324.
 - [23] FU T R, DUAN M H, TANG J Q, et al. Measurements of the directional spectral emissivity based on a radiation heating source with alternating spectral distributions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90: 1207–1213.
 - [24] WEN C D, MUDAWAR I. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(17/18): 3591–3605.
 - [25] HERVE P, CEDELLE J, NEGREANU I. Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(1): 1–10.
 - [26] LI K Y, YAN W J, HUANG X L, et al. In-situ measurement of combustion characteristics and potassium release concentration during torrefied biomass burning based on spontaneous emission spectroscopy[J]. *Fuel*, 2022, 328: 125249.
 - [27] LI T J, HU Z C, YAN W J, et al. In-situ measurement of cross-section temperature field of pulverized coal boiler based on solving radiative transfer equation using a single image sensor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1/4): 105655.
 - [28] YAN W J, LI T J, XING X Y, et al. Experimental study on surface temperature and emissivity of rotating turbine blades of a micro turbojet engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 259: 124811.
 - [29] ZHENG S, WANG C Q, CAI W G, et al. Measurement of slagging thickness on the heating surfaces of a 330 MW subcritical boiler based on mid-infrared imaging technology[J]. *Measurement*, 2025, 241: 115673.
 - [30] YAN W J, LI K Y, YU T Z, et al. Determination of flame temperatures and soot volume fractions during combustion

of biomass pellets[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(3): 2313–2325.

- [31] YAN Y H, PENG Z K, SUN L T, et al. Effects of blending ratio on combustion and NO emission characteristics during co-firing of semi-char and lignite in a 350 kW pulverized coal-fired furnace[J]. *Journal of Thermal Science*, 2023, 32(3): 1292–1305.
- [32] ZHANG K H, LIU Y F. Modified two-temperature calibration method for emissivity measurements at high temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 168: 114854.
- [33] ZHENG S, YANG Y, LI X Y, et al. Temperature and

emissivity measurements from combustion of pine wood, rice husk and fir wood using flame emission spectrum[J]. [Fuel Processing Technology](#), 2020, 204: 106423.

- [34] JIANG Y, LEE B H, OH D H, et al. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NO_x emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler[J]. *Fuel*, 2021, 306: 121727.
- [35] 姚禹歌, 蒋苓, 张缦, 等. 煤燃烧成灰发射率研究进展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 1170–1178.

(编辑：董 伟)

(上接第 365 页)

- [22] GAO W H, HAN B Y, SUN Z Y, et al. A novel system for precise identification and explainability analysis based on multimodal learning combining laser-induced breakdown spectroscopy and laser-induced plasma acoustic signals[J]. *Talanta*, 2025, 293: 128182.
- [23] 许玉麟. 基于光声效应及 LIBS 的金属材料定性分析 [D]. 福州: 福州大学, 2017.
- [24] 李久林, 梁新邦. GB/T2039—1997 金属拉伸蠕变及持久试验方法国家标准编制说明 [J]. 冶金标准化与质量, 1998, (3): 4—8.

- [25] FISHER R A. The use of multiple measurements in taxonomic problems[J]. [Annals of Eugenics](#), 1936, 7(2): 179–188.
- [26] VAPNIK V N. An overview of statistical learning theory[J]. [IEEE Transactions on Neural Networks](#), 1999, 10(5): 988–999.
- [27] KARZOVA M M, YULDASHEV P V, KHOKHLOVA V A, et al. Characterization of spark-generated N -waves in air using an optical schlieren method[J]. [The Journal of the Acoustical Society of America](#), 2015, 137(6): 3244–3252.

(编辑：丁红艺)