

基于可见光辐射特性的垃圾焚烧炉膛火焰 温度测量方法与装备

郭天宇 姚心 贺迪龙 刘兵 刘海威

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 火焰温度是表征垃圾焚烧炉膛内燃烧状态的最重要参数之一,测量火焰温度已成为燃烧诊断的主要方式。本文基于城镇生活垃圾火焰特性和 CCD 图像技术,将图像处理技术、图像标定以及辐射测温原理有机结合,提出一种基于可见光辐射特性的垃圾焚烧炉膛火焰温度测量方法与装备,并将该方法应用于生物质火焰实验以检测其测温精度。结果表明,该图像测温法的测量结果准确性较高,与热电偶测量值的误差小于 5%。该方法可以得到焚烧炉火焰的二维温度场分布,具有快速响应、适应能力强、应用范围广等优点。

[关键词] 温度测量; 图像处理; 图像测温; 垃圾焚烧; 火焰温度; CCD 图像技术

[中图分类号] X705 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2023)02-0065-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/lf.2023.02.014

0 前言

如今,我国处理城镇生活垃圾的方式以焚烧为主,该方法能有效规避传统堆放或填埋造成的土地资源浪费及环境污染问题,有效实现垃圾的无害减量化处理,并能利用焚烧产生的热能发电,产生清洁能源^[1]。我国城镇生活垃圾通常具有组分复杂多变、水分含量高、入炉热值低等特点,当这些生活垃圾进入炉排式焚烧炉后,经常出现垃圾偏烧、焚烧污染物超标等问题。因此,开展生活垃圾炉排式焚烧炉炉膛内火焰燃烧诊断对于提高垃圾焚烧效率和减少环境污染十分必要。

垃圾焚烧炉炉膛内的燃烧状态影响焚烧炉的运行状况,炉膛内的温度场分布是火焰燃烧状态的重要表征,因此,准确掌握炉膛内温度十分必要^[2]。目前,多采用热电偶测量焚烧炉内的温度,但受技术

限制,此方法的采集温度往往低于实际值^[3]。由于热电偶受热易腐蚀结焦,使用寿命短,造成维护的工作量大,成本高。此外,这种传统的温度测量方法获得的是单点温度信息,无法测得垃圾焚烧炉整个燃烧区的温度分布。红外测温法所需的传感器,相比于可见光传感器,分辨率较低且成本较高,且红外测温的准确性依赖于被测对象光谱发射率的准确度,而城镇生活垃圾成分复杂,难以准确估计其光谱发射率^[4]。

垃圾焚烧炉的炉排面积相对较大,炉膛内各种物料分布情况变化大,因此,在工程实际应用方面寻找一种稳定可靠、简单快捷、经济实用的方法测量焚烧炉炉膛二维温度场显得尤为重要,对提高焚烧炉的燃烧效率和垃圾焚烧厂的生产效率、节约能源资源、优化焚烧炉膛结构、寻求最优控制策略、降低设备运营成本及减小环境污染等都有重要意义^[5-6]。

1 技术及工艺方案

1.1 技术方案

虽然城镇生活垃圾的燃烧火焰在可见光波段内的 590 nm 处和 767 nm 处分别存在钠和钾强烈的特

[收稿日期] 2022-09-26

[作者简介] 郭天宇(1988—),女,黑龙江安达人,博士,高级工程师,主要从事有色矿冶数字工程研发工作。

[引用格式] 郭天宇,姚心,贺迪龙,等.基于可见光辐射特性的垃圾焚烧炉膛火焰温度测量方法与装备[J].绿色矿冶,2023,39(2):65-69.

征谱线,但经敏感性分析表明,这两条谱线对图像测温法未造成较大干扰^[7]。本文利用可见光信息检测火焰温度,采用彩色 CCD 摄像器件获取图像,基于双色法^[8-10],依据 CCD 器件的光电转换特性,将可见光信息及图像的处理分析相结合,形成一种适用于垃圾焚烧炉膛内的火焰温度检测方法。

首先利用黑体炉对火焰探测器中的传感器进行标定,通过实验分析多种城镇生活垃圾焚烧火焰,定量计算其相关特性参数,构建城镇生活垃圾焚烧火焰特性模型;开发图像测温算法程序,包括初始化模块、参数设置模块、火焰图像采集模块、图像预处理模块、火焰温度计算模块等,通过各个模块的串联实现对摄像机采集到图像的处理、计算、储存和自适应;优化测温算法,去除烟雾等因素的干扰,实现对焚烧炉膛火焰温度的准确测量。基于火焰特性模型和 CCD 图像技术,搭建硬件装备,形成火焰图像测温成套装备;根据垃圾焚烧厂实际焚烧炉设计情况,制定现场实施方案,保证传感器视野范围覆盖炉膛内主要燃烧区域的全部范围。

1.2 实施方案

垃圾焚烧炉膛火焰温度测量系统由在线图像处理程序和火焰探测器系统组成(图 1)。根据实际垃圾焚烧炉情况,火焰探测器可以按照以下两种方案安装实施:1)在焚烧炉侧壁已有观火孔安置火焰探测器;2)在焚烧炉上方打孔安置火焰探测器。

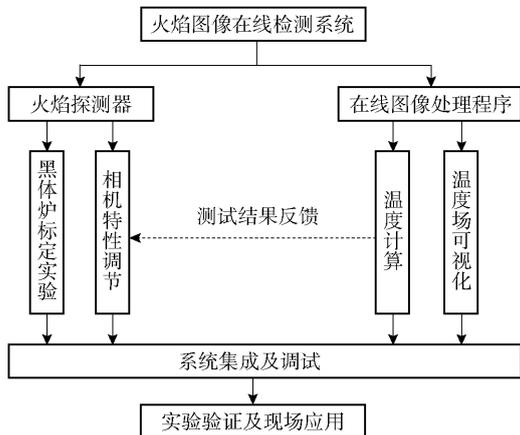


图 1 技术方案简图

火焰图像在线监测系统与火焰探测器通讯,能够同步处理火焰探测器实时采集的火焰视频,并能实现火焰探测器中 CCD 摄像设备的参数在线调节。火焰温度测量结果能够在现场工控机上的在线图像处理程序中实时显示,并且可同步保存到工控机的硬盘中。设备连接如图 2 所示。

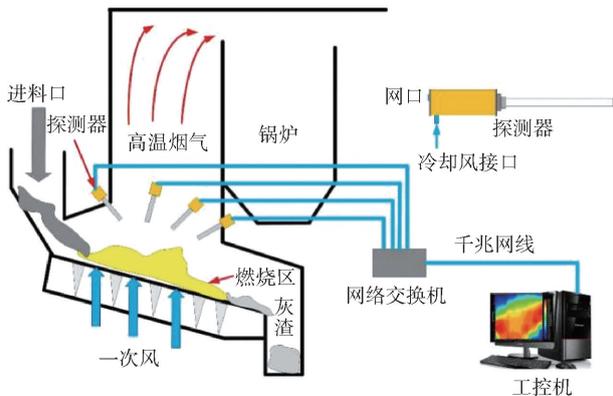


图 2 设备连接示意图

2 火焰探测器标定

2.1 火焰探测器

用于采集图像的火焰探测器主要由 CCD 摄像机、镜杆、风冷系统、自动进退保护装置组成。火焰探测器前端为探头,后侧为 CCD 摄像机。探测器外壳是不锈钢材料,可以较好地保证在高温环境下内部探头不会被损坏。同时为了防止探测器前端结焦和沾污而影响成像质量,探测器被设计为环形吹扫。火焰探测器内的 CCD 摄像机的相关技术参数见表 1。

表 1 CCD 摄像机技术参数

参数	数值
分辨率	1 280(H) × 960(V)
帧率	33.3 fps
传感器	Sony ICX445
像素尺寸	3.75 μm × 3.75 μm
电源端口	7 to 25 VDC AUX or IEEE 802.3at Type 1 PoE
电源	外部电源: 2.9 W at 12 VDC; 内部电源: 3.5 W

该摄像机的红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道的光谱响应曲线如图 3 所示,从中可以得到 CCD 数字摄像机 R、G、B 三通道的中心响应波长(即各曲线峰值对应波长)。由图 3 可知,双色法温度计算要用到的 R、G 通道中心响应波长 λ_r 、 λ_g 波长分别为 610 nm 和 530 nm。

2.2 标定过程

CCD 摄像机获取的是经光电转换后的电信号,其 R、G、B 三通道像素的数值大小已经不能准确代表火焰单色辐射强度值,无法直接获知所拍对象的温度信息。因此需在黑体炉上对 CCD 摄像机进行绝对强度标定。本文中的标定对象为火焰探测器,

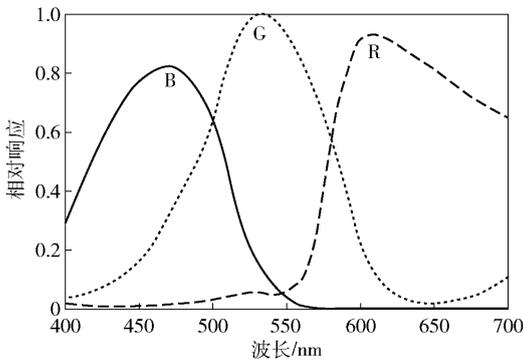


图3 CCD摄像机光谱响应曲线图

将火焰探测器探头对准黑体炉开口,连接计算机采集软件进行图像采集(图4),再对采集到的图像进行分析计算,拟合得到R、G通道的像素值与黑体辐射强度 I_r 及 I_g 的关系式,分别如式(1)和式(2)所示。

$$\ln(I_r) = A_0 + A_1 \ln(R/t) + A_2 [\ln(R/t)]^2 \quad (1)$$

$$\ln(I_g) = B_0 + B_1 \ln(G/t) + B_2 [\ln(G/t)]^2 \quad (2)$$

其中, A_0 、 A_1 、 A_2 、 B_0 、 B_1 、 B_2 是黑体炉标定实验得到的标定系数,与火焰探测器的自身特性有关; R 和 G 分别为彩色相片 R 通道和 G 通道的像素值; t 为摄像机的曝光时间。火焰探测器经标定后,可计算得到图像强度、曝光时间与黑体绝对辐射强度的关系,进而得到标定系数。



图4 黑体炉标定装置图

2.3 实验结果与分析

将计算得到的 I_r 和 I_g 代入双色法测温公式^[7]中,可计算测得火焰温度。针对标定的每个黑体炉设定温度,即 800 ~ 1 700 °C (1 073 ~ 1 973 K),在不同曝光时间下进行误差分析。利用由上述回归方程式(1)、(2)得到的黑体辐射强度计算得出温度值,并与黑体炉设定温度作对比,结果如图5及图6所示。

由图6可看出,该方法的实验室误差在2%以内,在可接受的范围内,说明图像测温法测量结果相

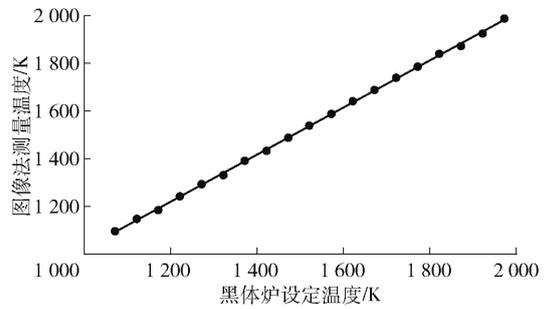


图5 测温结果分析

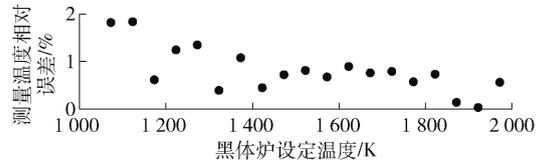


图6 测温误差分析

对可靠。

3 软件开发

软件开发工具包(SDK)的开发环境为 Windows10、VS2013 专业版、QT-5.10.0.exe、Vimba_v4.0.exe;火焰探测器中所用的 CCD 摄像机型号为 PROSILICA GT 1290C;开发语言为 C++。SDK 的主要功能为读取火焰探测器获取图像信号,并根据当前图像状态对 CCD 摄像头的曝光时间进行动态调整,防止摄像头获取的图像过曝或者过暗;对曝光正常的图片采用工艺算法进行温度计算,其基本流程如图7所示。

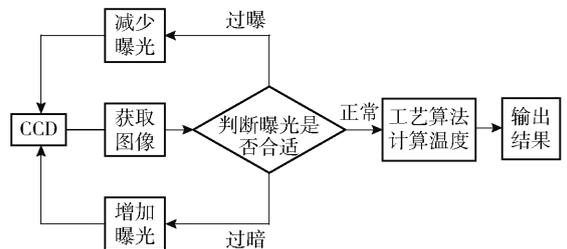


图7 软件开发工具包的开发流程图

为实现对火焰温度的实时显示,方便验证工艺算法,开发了相应的显示界面,从而实现测温结果可视化,实时展示温度场伪色彩图像、最高温度、平均温度、最低温度等信息。显示界面如图8所示。

本界面共分为6个区域:

- 1) A区主要用于启动软件测温功能和各种控制参数的输入,并且实现对 CCD 摄像机曝光时间的手动调节;
- 2) B区主要用于显示 CCD 采集到的原始图像和经过测温算法转换后的温度场伪色彩

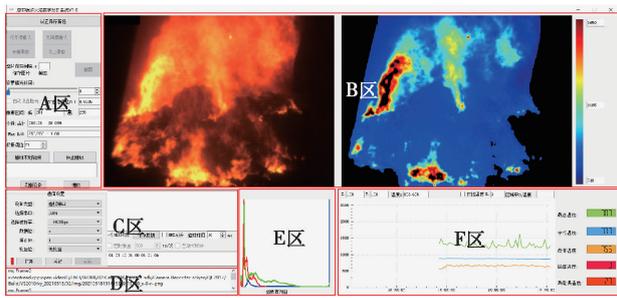


图 8 软件界面示意图

图像;3)C区主要用于图像测温验证时连接热电偶,能够读取热电偶的数值并且实时显示到对应的曲线;4)D区主要用于识别过程中日志信息的输出;5)E区用于显示当前图像的直方图信息;6)F区用于显示图像测温法获得的实时温度曲线,包括最高温度、最低温度、平均温度以及热电偶测得的温度。

4 工艺实验验证

为验证火焰图像在线检测系统的测温精度是否符合工业要求,需要在设备安装到现场前进行实际燃烧的验证。实验中以生物质火焰作为拍摄目标,在燃烧条件控制合适的情况下,生物质火焰燃烧过程中会出现不完全燃烧的现象,产生淡黄色火焰,出现碳粒子的明亮燃烧辐射,在原理上是可行的。生物质火焰的测温验证示意图如图 9 所示。

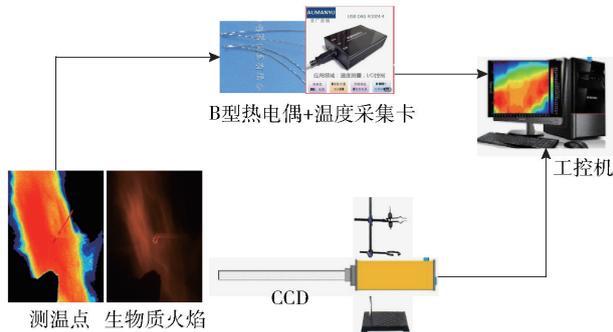


图 9 生物质火焰测温验证示意图

为验证测温系统精度是否满足要求,可在火焰的内焰、中焰和外焰等不同区域设置采样点,采用标定好的铂铑热电偶测量采样点温度,同时使用图像测温系统测量此时的火焰温度场,并记录热电偶所在区域的温度,最后比对两种测量方法的结果,验证图像测温系统精度。图像测温系统测得的平均温度、最高温度及与热电偶测得的温度对比如图 10 所示。结果表明,该火焰图像测温法准确性较高,与热电偶测量值的偏差不会超过 5%。

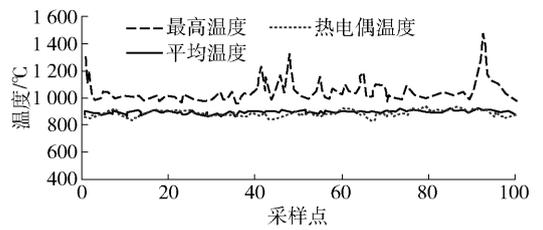


图 10 图像测温与热电偶测温结果对比

5 结论

本文介绍了一种基于可见光辐射的垃圾焚烧炉炉膛火焰温度测量方法与装备,结合 CCD 图像分析、图像处理技术、黑体炉标定和双色法测温技术,成功测量出火焰燃烧的二维温度场分布情况。该方法的测温精度得到了实验级别的验证,误差小于 5%。中国恩菲工程技术有限公司将该技术应用于某垃圾焚烧发电厂,实际应用效果均达标,未来可进一步推广。

[参考文献]

- [1] 杜军,王怀彬,金霄. 城市垃圾焚烧发电现状概述[J]. 节能技术, 2003, 21(5):25-26.
- [2] 孙成永,尚江伟. 垃圾焚烧厂炉膛温度监测技术探讨[J]. 北方环境, 2019,31(9):138-140.
- [3] 孙志强,周子民,张宏建. 热电偶测温系统的不确定度评定与分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(5):1061-1063.
- [4] POKORNI S. Error analysis of surface temperature measurement by infrared sensor[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 25(10):1523-1533.
- [5] 王亚飞. 城镇生活垃圾焚烧火焰辐射特性及其燃烧优化的研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [6] 薛祯祯. 基于可见光辐射的垃圾焚烧炉火焰温度检测与燃烧诊断[D]. 北京:中国矿业大学,2016.
- [7] 闫伟杰. 基于光谱分析和图像处理的火焰温度及辐射特性检测[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- [8] 余震,曾晓雁. CCD 传感器在工业测控中的应用现状及展望[J]. 计量与测试技术, 2002, 29(3):30-32.
- [9] 姜凡,刘石,卢钢. 双色法火焰监测分析技术用于火焰温度场的实验研究[C]//第七届北京青年科技论文评选获奖论文集,2003:254.
- [10] SUN Y, LOU C, ZHOU H. A simple judgment method of gray property of flames based on spectral analysis and the two-color method for measurements of temperatures and emissivity[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1):735-741.

Flame Temperature Measurement Method and Equipment of Waste Incinerator Based on Visible Light Radiation Characteristics

GUO Tianyu, YAO Xin, HE Dilong, LIU Bing, LIU Haiwei

Abstract: Flame temperature, as one of the most important parameters characterizing the combustion state in the furnace of a garbage incinerator, has become the main method of combustion diagnosis by measuring flame temperature. Based on the flame characteristics of urban household waste and CCD image technology, combining image processing technology, image calibration, and radiation temperature measurement principles, a method and equipment for measuring the temperature of waste incineration furnace flames based on visible light radiation characteristics was proposed, and was applied to biomass flame experiments to detect its temperature measurement accuracy. The results show that the measurement accuracy of the image temperature measurement method is high, and the error with the thermocouple measurement value is less than 5%. This method can obtain the two-dimensional temperature distribution of the incinerator flame, which has the advantages of fast response, strong adaptability, and wide application range.

Key words: temperature measurement; image processing; image temperature measurement; waste incineration; flame temperature; CCD image technology

(上接第 59 页)

Discussion on the Process of Steam Stripping Ammonia from Ternary Precursor Wastewater

ZHANG Xu

Abstract: At present, there are two common types of ternary precursor wastewater stripping and deamination processes. One is to use a distillation tower equipped with a reboiler and condenser, and inject saturated steam into the reboiler as a heat source. The other is to use a distillation tower equipped with only a condenser but no reboiler, and directly inject saturated steam from the bottom of the distillation tower as a heat source. These two processes have the problem of high energy consumption or a large amount of wastewater treatment discharged downstream. Therefore, this article proposed an optimized process route, which is to use a distillation tower with a reboiler and no condenser for ammonia distillation operation, fully utilizing the steam at the top of the distillation tower and the outlet liquid from the tower kettle for reasonable heat exchange with raw material wastewater, and the raw material liquid after heat exchange enters from the top of the distillation tower. And Aspen Plus process simulation software was used to simulate and compare the optimized process with the two traditional processes mentioned above. When modeling, ELECNRTL thermodynamic model and equivalent transformation were used to accelerate convergence. The simulation results indicate that the optimized process combines the advantages of two traditional processes, not only avoiding direct contact between steam heat sources and materials, but also reducing the amount of waste water in the ammonia tower kettle; Moreover, it fully utilizes the residual heat of the steam at the top of the ammonia distillation tower and the effluent from the tower kettle, thereby reducing the energy consumption of the entire system.

Key words: lithium battery; ternary precursor; wastewater; steam stripping ammonia; Aspen Plus; process simulation