



Kent Academic Repository

Ge, Hong, Xu, Weicheng, Yan, Yong and Lu, Gang (2019) *Flame stability detection method for co-firing of biomass fuels based on digital image processing*. Thermal Power Generation . ISSN 1002-3364.

Downloaded from

<https://kar.kent.ac.uk/89774/> The University of Kent's Academic Repository KAR

The version of record is available from

This document version

Publisher pdf

DOI for this version

Licence for this version

UNSPECIFIED

Additional information

Versions of research works

Versions of Record

If this version is the version of record, it is the same as the published version available on the publisher's web site. Cite as the published version.

Author Accepted Manuscripts

If this document is identified as the Author Accepted Manuscript it is the version after peer review but before type setting, copy editing or publisher branding. Cite as Surname, Initial. (Year) 'Title of article'. To be published in *Title of Journal* , Volume and issue numbers [peer-reviewed accepted version]. Available at: DOI or URL (Accessed: date).

Enquiries

If you have questions about this document contact ResearchSupport@kent.ac.uk. Please include the URL of the record in KAR. If you believe that your, or a third party's rights have been compromised through this document please see our [Take Down policy](https://www.kent.ac.uk/guides/kar-the-kent-academic-repository#policies) (available from <https://www.kent.ac.uk/guides/kar-the-kent-academic-repository#policies>).

基于数字图像处理的生物质混燃火焰 稳定性检测方法

葛 红¹, 徐伟程¹, 闫 勇^{1,2}, 卢 钢²

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2. 肯特大学工程与数字艺术学院, 坎特伯雷, 肯特 CT2 7NT, 英国)

[摘 要] 低质燃料或混合燃料(如煤粉+生物质等)的燃烧常常出现火焰不稳定现象, 导致燃烧效率低、NO_x排放量偏高等。由于燃烧器火焰本身的复杂性和现有检测方法的局限性, 目前还无法对火焰的稳定性进行定量检测和评估。本文提出一种基于数字图像处理的生物质混燃火焰检测及稳定性评价方法。该方法定义了一个在[0,1]范围内连续取值的通用火焰稳定指数, 并采用数字 CCD 相机采集火焰图像信息, 通过图像分析提取火焰长度/高度、亮度、温度、闪烁频率等特征参数, 经过对火焰特征参数进行统计分析和数据融合, 求得火焰稳定指数, 实现火焰稳定性的定量检测和评估。在生物质燃烧试验台对玉米芯、麦秸、柳木和花生壳 4 种不同生物质两两混合形成的 3 种混合生物质燃料进行了燃烧试验。试验结果表明定义的火焰稳定指数能够有效表征火焰燃烧状态。

[关 键 词] 生物质; 火焰; 特征参数; 火焰稳定性; 火焰稳定指数; 图像处理; 数据融合

[中图分类号] TP391.7 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfed.201907150

[引用本文格式] 葛红, 徐伟程, 闫勇, 等. 基于数字图像处理的生物质混燃火焰稳定性检测方法[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 64-70. GE Hong, XU Weicheng, YAN Yong, et al. Flame stability detection method for co-firing of biomass fuels based on digital image processing[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 64-70.

Flame stability detection method for co-firing of biomass fuels based on digital image processing

GE Hong¹, XU Weicheng¹, YAN Yong^{1,2}, LU Gang²

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Engineering and Digital Arts, University of Kent, Kent CT2 7NT, U.K.)

Abstract: Combustion of low-quality fuels or fuel blends will lead to flame instability, resulting in low combustion efficiency and high NO_x emissions. Due to the inherent complexity of burner flames and the lack of an effective means for flame monitoring and characterization, it is difficult to evaluate the flame stability in a combustion process quantitatively. To solve this problem, a method based on digital image processing for co-firing biomass fuels is proposed in this paper to monitor various characteristic parameters of a burner flame and evaluate its stability. In this method, a general flame stability index with continuous values in the range of [0, 1] is defined, and by using a digital CCD camera, the flame image information is collected. After the collected image is analyzed, the characteristic parameters like the flame length/height, brightness, temperature, flicker frequency and others are extracted. Then, statistical analysis and data fusion are carried out for these characteristic parameters, and the flame stability index is obtained. Thus, the quantitative detection and evaluation of flame stability is realized. Moreover, this method was verified on a laboratory-scale combustion test rig. The combustion behaviours of different biomass blends (corn-cob-wheat straw blend, willow-peanut shell blend and peanut shell-wheat straw blend) were compared. The results show that, the defined flame stability index could effectively characterize the flame combustion state.

Key words: biomass, flame, characteristic parameter, flame stability, flame stability index, image processing, data fusion

收稿日期: 2019-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51827808, 61673170)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51827808, 61673170)

第一作者简介: 葛红(1976—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为燃烧过程监测、火焰三维成像、生物质燃烧等, gehong@ncepu.edu.cn.

火焰的稳定性是化石燃料燃烧过程检测与控制领域的研究重点和难点,特别是在使用低质燃料、混合燃料以及生物质燃料的情况下尤为突出。不稳定火焰将导致燃烧效率低、 NO_x 排放量高和烟气中未燃尽碳含量高等一系列问题^[1]。因此,火焰稳定性的在线检测对于提高燃烧过程的整体质量具有重要意义。然而火焰稳定性在很大程度上与燃料的着火性能、燃烧器结构、空燃比、空气和燃料流速等诸多因素有关,目前有关火焰物理参数和稳定性定量检测的研究十分有限。

火焰的物理特性通常可以用几何、亮度和热力学参数来描述。现有的电站锅炉火焰检测装置一般只进行单点检测,或仅判断是否存在火焰,并不能给出火焰物理参数和稳定性等参数的定量信息。传统的火焰温度传感器,如热电偶和高温计^[2-3]需要侵入火焰或预知火焰中某种物质的发射率,但侵入式测量会对火焰产生影响,同时火焰发射率通常未知,而且这些方法不能提供火焰温度的立体分布。

基于激光和光纤的火焰温度测量由于系统比较复杂,成本较高,通常用于实验室,不适用于工业锅炉长期在线检测^[4-5]。目前电站锅炉普遍安装全炉膛火焰监控系统^[6],但其功能只限于监测炉膛是否存在火焰,并不能实时定量测量火焰参数。

随着光学传感器和数字图像处理技术的快速发展,火焰可视化技术得到广泛重视和应用。由于在性能、结构和成本等方面的优势,数字成像及图像处理技术已被认为是锅炉燃烧器火焰非侵入式测量最有效的方法之一^[7]。过去十几年,火焰的可

视化及二维(2D)、三维(3D)重建技术也得到很大发展^[8]。有学者采用增强相机和高光谱相机来捕捉火焰图像,得到火焰自由基的光谱特性以及火焰温度场^[9],但这些系统结构复杂,成本较高,不适用于在大型锅炉燃烧器上使用。

根据目前燃烧器火焰检测存在的问题,本文提出一种基于数字成像及图像处理技术的火焰稳定性定量评价方法。通过电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)相机采集炉膛的火焰图像,利用数字图像分析算法提取火焰的几何、亮度和热力学参数,获取可反映火焰物理特性及燃烧状态的定量信息,通过统计分析 with 数据融合,建立火焰物理特性与燃烧过程的内在关系,实现火焰稳定性的定量评估。在生物质燃烧试验台上对玉米芯、麦秸、柳木和花生壳4种不同生物质掺杂形成的3种混合燃料进行了一系列燃烧试验,结果验证了本方法的有效性。

1 火焰检测原理

1.1 火焰检测系统

图1为火焰检测系统原理。火焰检测系统主要由光学探杆、高速CCD相机、图像分析处理模块等组成。火焰通过光学探杆在CCD相机形成数字图像,然后传输至图像分析处理模块,对火焰图像进行增强处理后,提取火焰特征参数,并将多个参数进行融合得到火焰稳定性指数,据此判断火焰的稳定性,同时在屏幕上实时显示火焰图像、有关参数及其变化曲线、火焰稳定性等信息。

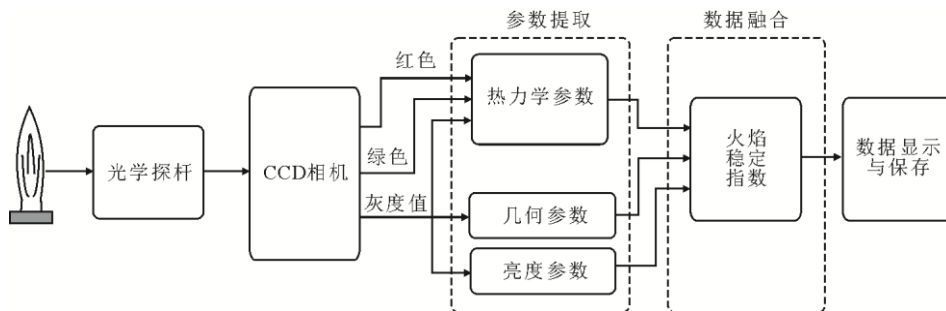


图1 火焰检测原理

Fig.1 Schematic diagram of the flame detection principle

1.2 火焰特征参数

通过分析火焰图像可获得火焰特征参数,该参数取决于燃烧器结构和燃烧工况,因燃烧器结构确定,因此火焰特征参数可反映燃烧工况。研究表明火焰的根部(靠近燃烧器的部位)是燃料燃烧反应

的重要区域,因此本文主要对火焰根部区域进行量化分析。将火焰参数分为3类,即几何、亮度和热力学参数(图2)。几何参数包括火焰长度/高度,亮度参数即火焰亮度或图像的总灰度值,热力学参数包括平均温度、最高温度与闪烁频率。各参数的

定义和计算过程如下。

1) 火焰长度/高度 L 从燃烧器出口平面到火焰最前端的垂直距离。即图 2 中的 $X_1(a,b)-X_2(0,b)$ 直线实际长度, 其值可表示为

$$L = k|a| \quad (1)$$

式中 k 为考虑镜头特性的修正系数, 可以通过系统标定获得。标定过程是在视景中放置已知尺寸 L_1 的物体 (或已知燃烧器出口内径), 用相机获取标定物体图像, 则 k 可计算为

$$k = \frac{L_1}{N_1} \text{ (mm/pixel)} \quad (2)$$

式中, N_1 为标定物体的长度, L_1 为标定物体在图像中对应的像素数量。

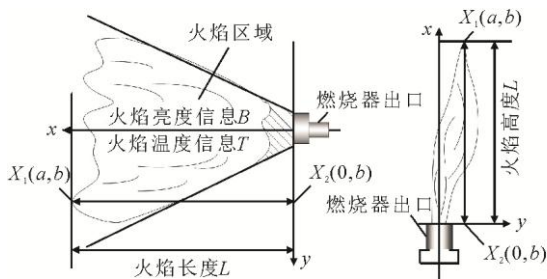


图 2 火焰及其特征参数

Fig.2 The flame and its characteristic parameters

2) 亮度 I 表示火焰区域的平均灰度值, 采用图像的最大灰度 $255^{[10]}$ 归一化, 即

$$I = \frac{1}{A} \sum_{i \in R_f} \sum_{j \in R_f} \frac{1}{255} G(i, j) \quad (3)$$

式中, R_f 为火焰区域, A 为火焰区域像素总数, $G(i, j)$ 为点 (i, j) 的灰度值。

火焰亮度取决于火焰的辐射强度, 也和相机的设置 (光圈、快门等) 有关, 因此在测量过程中需要保持相机的设置不变。

3) 温度 T 采用双色法测定^[11]。由于本文采用 RGB 相机, 所拍摄图像具有 3 个颜色分量, 即红色 (R)、绿色 (G) 和蓝色 (B), 计算中选择 2 个颜色分量, 本文选择 R 和 G 颜色分量。根据双色法求得每个像素点的火焰温度 $T^{[11]}$, 然后计算出火焰平均温度 T_{av} 和最高温度 T_{max} , 即

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} \right)}{\ln \frac{G_R}{G_G} + \ln S + \ln \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right)^5} \quad (4)$$

$$T_{av} = \frac{1}{A} \sum_{i \in R_f} \sum_{j \in R_f} T(i, j) \quad (5)$$

$$T_{max} = \max \{ T(i, j) \} \quad (6)$$

式中: C_2 为第二普朗克常数, $1.438 \times 10^{-2} \text{ m k}$; λ_R 为红色光谱的峰值响应波长, 615 nm ; λ_G 为绿色光谱的峰值响应波长, 540 nm ; G_R 、 G_G 分别为图像 R、G 分量的亮度值; S 为设备因子^[12], 可以利用标准黑体炉对测量系统标定来确定; $T(i, j)$ 为图像中火焰区域每一个像素点的温度信息。

4) 闪烁频率 F 火焰的闪烁频率是与火焰稳定性密切相关的特征参数之一^[13], 反映火焰强度信号或图像灰度的规律性变化。对火焰强度信号 (火焰区域各像素平均灰度) 进行傅立叶变换求得其功率谱, 则火焰的闪烁频率^[12]定义为

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} p_i f_i}{\sum_{i=1}^{N_2} p_i} \quad (7)$$

式中, F 为闪烁频率, f_i 为第 i 个频率值, p_i 为第 i 个频率分量的功率密度, N_2 为频率分量总数。

5) 火焰稳定指数 由于火焰图像序列含有火焰在时间和空间上的动态信息, 因此在一定程度上能够判断火焰的稳定性。然而火焰图像质量不仅与测量系统有关, 还与燃料特性、燃烧器类型、燃烧条件和测量系统安装位置等因素有关。因此, 在不同工况下得到的火焰图像会有很大的差异。对此, 本文提出以火焰稳定指数作为通用的判断标准, 对不同燃烧条件下的火焰稳定性进行评估。该方法不需要事先确定燃料特性、燃烧器类型和其他操作条件。确定火焰稳定指数首先要计算一定时间段内每个火焰特征参数的标准偏差, 分别取其平均值 M_k 和标准差 σ_k , 即:

$$M_k = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} V_{ki} \quad (8)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N_3 - 1} \sum_{i=1}^{N_3} (V_{ki} - M_k)^2} \quad (9)$$

式中, $M_k (k=1, 2, 3, 4)$ 分别表示 L 、 I 、 T_{av} 和 T_{max} 归一化后在 N_3 个数据点中的平均值, N_3 为计算第 k 个参数平均值所含数据点个数, V_{ki} 为在 N_3 个数据内第 k 个参数的第 i 个数据值, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 分别为 4 个参数的标准差。

基于以上参数, 火焰稳定指数可定义为

$$\delta = \prod_{i=1}^4 \left(\frac{\phi(M_i) - \sigma_i}{\phi(M_i)} \right)^{w_i} \in [0, 1] \quad (10)$$

式中: $\phi(M_i)$ 为 M_i 的理论最大标准差; S_i 为 M_i 的标准差; w_i 为 M_i 的权重, 某个参数越重要, 其权重 w_i

越大。在本文中，所有参数的权重 $w_i=2$ 。由于 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 的动态范围均为 $[0,1]$ ， δ 的范围为 $[0,1]$ 。

火焰稳定指数 δ 的最小值为 0，最大值为 1，“1”表示火焰处于完全稳定状态。当任一个或多个参数的标准偏差达到其理论最大值时， δ 就会趋于“0”，表明火焰处于极不稳定的状态。

2 试验条件及结果

2.1 试验条件

无论是作为主要燃料还是作为混合燃料的一部分，生物质燃烧是降低火电厂排放的有效方法之一^[14]。本文采用所建立的火焰稳定性测量方法来研究火电厂常见的不同类型的生物质混燃火焰的稳定性，试验装置如图 3 所示。

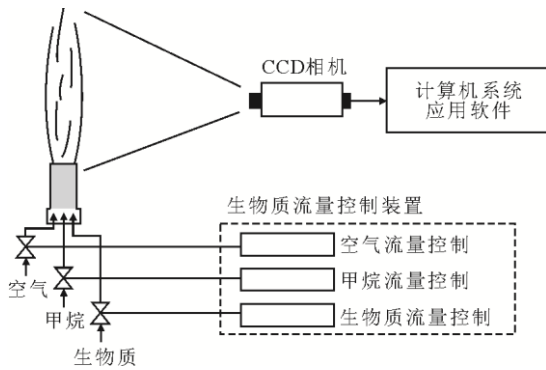


图 3 生物质混燃火焰试验装置示意

Fig.3 Schematic diagram of the experimental setup for biomass mixed combustion flame detection

试验中 4 种不同生物质均研磨为粉状，两两等质量分数均匀掺杂形成 3 种生物质混合燃料，分别为：1) 50%玉米芯与 50%麦秸，2) 50%柳木与 50%花生壳，3) 50%花生壳与 50%麦秸。4 种生物质燃料的有关参数见表 1。由表 1 可见，4 种生物质粒径范围较为接近，均分布在 175~250 μm 之间。

表 1 4 种生物质燃料有关参数

Tab.1 The relevant parameters of four biomass fuels

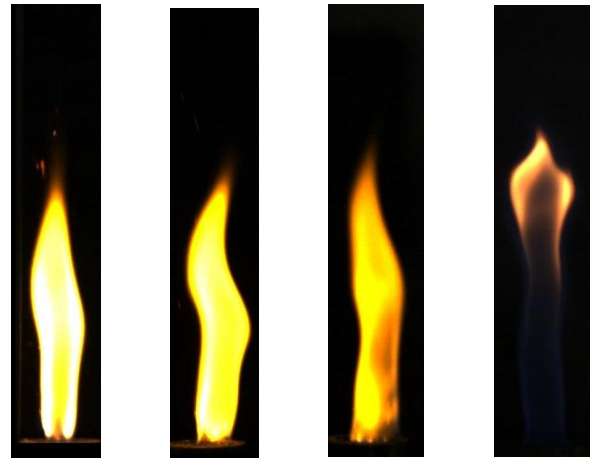
生物质名称	粒径范围/ μm	形态
麦秸	200~250	粉末
柳木	190~210	粉末
花生壳	175~200	粉末
玉米芯	210~230	粉末

3 种混合燃料分别与一定量的甲烷（助燃）混燃。在相同的操作条件下，进行了纯甲烷的对比燃烧试验。在燃烧装置中，甲烷流量为 0.5 L/min，空气流量为 2.0 L/min，给料空气流量为 2.0 L/min，生物质进料器频率为 2.0 Hz。在火焰图像采集中，

CCD 相机拍摄帧速率 250 帧/s，快门速度 1/250 s，相机距离火焰中心 140 cm。

2.2 试验结果及讨论

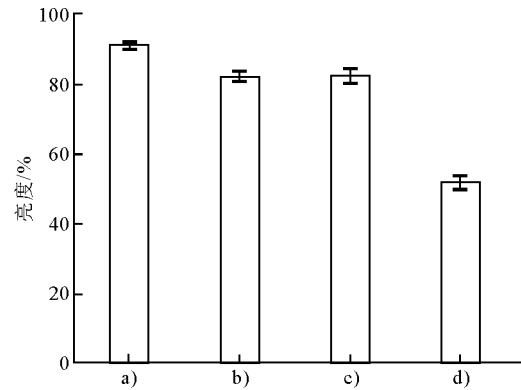
图 4 为甲烷及生物质混燃火焰的典型图像。图 5 为 3 种不同的混合生物质燃烧火焰的亮度均值以及变化范围（标准差）。图 5 中每个数据点为 2 250 个测量值的平均值，测量时间为 9 s。由图 5 可见，在相同的工况下，生物质混燃比纯甲烷燃烧火焰亮度更强。其中，玉米芯和麦秸混燃火焰的亮度最强，并且其亮度波动较小，有较好的稳定性。



a) 玉米芯+麦秸 b) 柳木+花生壳 c) 花生壳+麦秸 d) 甲烷

图 4 甲烷及生物质混燃火焰的典型图像

Fig.4 The typical images of CH₄/biomass co-firing flames



a) 玉米芯+麦秸 b) 柳木+花生壳 c) 花生壳+麦秸 d) 甲烷

图 5 3 种混合生物质燃烧火焰亮度变化

Fig.5 The brightness of three biomass blends' flames

图 6 为 3 种混合生物质燃烧火焰图像经高度归一化后的高度均值以及变化范围（标准差）。图 6 中每个数据点为 2 250 个测量值的平均值，测量时间为 9 s。从图 6 可以看出，在相同工况下，3 种混合生物质燃烧和纯甲烷燃烧的火焰平均高度几乎相同，说明生物质燃料种类对于火焰高度无明显影

响。同时，从图 6 中高度标准差可以看出，在相同工况下，玉米芯和麦秸混燃火焰图像的高度波动较小，有较好的稳定性。

图 7 为 3 种混合生物质燃烧火焰的时间序列幅值和功率谱密度。采样序列为 2 250 个采样点，采样频率为 250 Hz，采样时间为 9 s。有研究表明火焰信号的低频分量是由空气动力学或对流效应引起的火焰几何波动，而高频分量是由中间自由基之间的能量转换或反应物能量释放速率的变化引起的^[13]。从图 7 可以看出，3 种生物质燃烧的闪烁频率主要分布在低频范围，表明生物质燃烧火焰的闪烁频率主要受几何波动影响。其中，玉米芯和麦秸混燃火焰的幅值波动稳定，未发生剧烈变化。其功率谱密度峰值集中在 16 Hz，受火焰几何波动影响较小，火焰稳定性较好。柳木与花生壳和花生壳与

麦秸 2 种混合生物质燃烧的幅值波动剧烈，功率谱密度峰值集中在相对较低的频率范围内，受火焰几何波动影响较大，火焰稳定性较差。

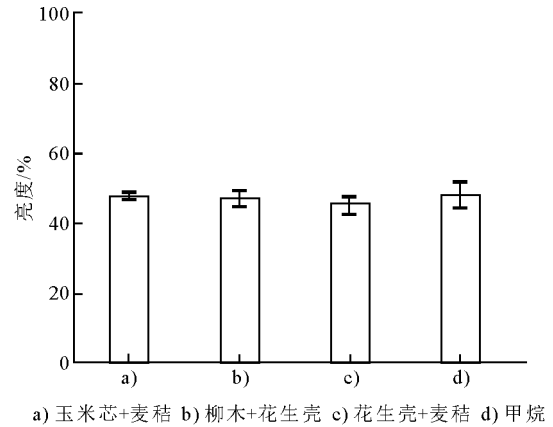


图 6 3 种混合生物质火焰高度变化
Fig.6 The heights of three biomass blends' flames

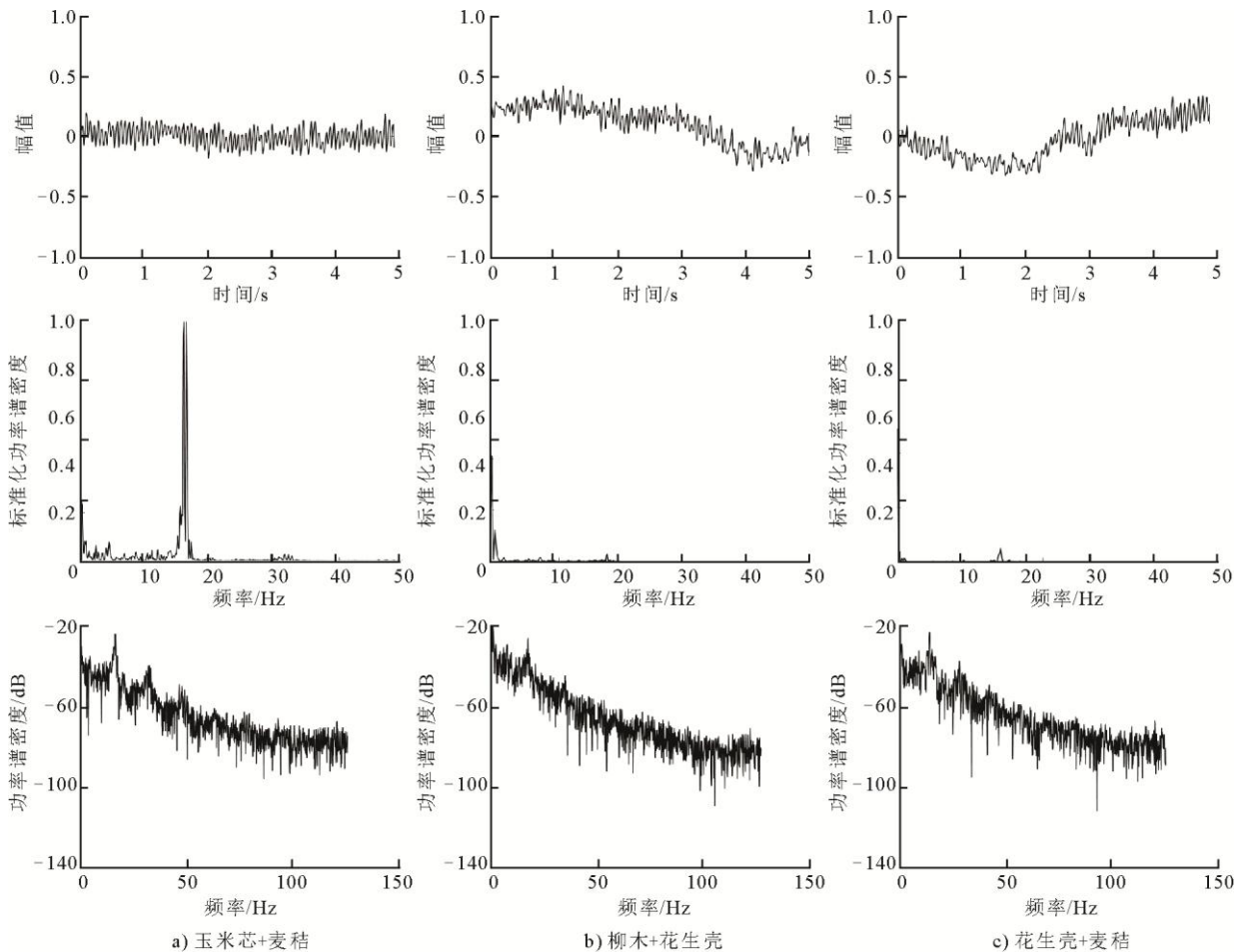
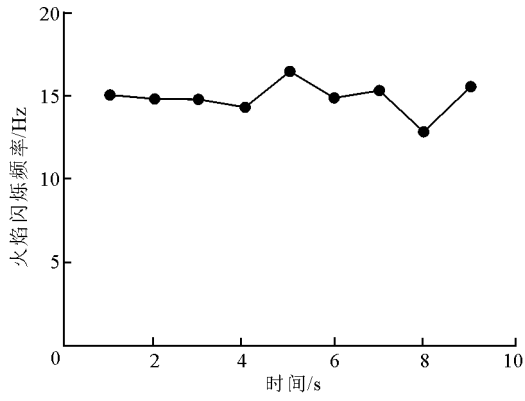


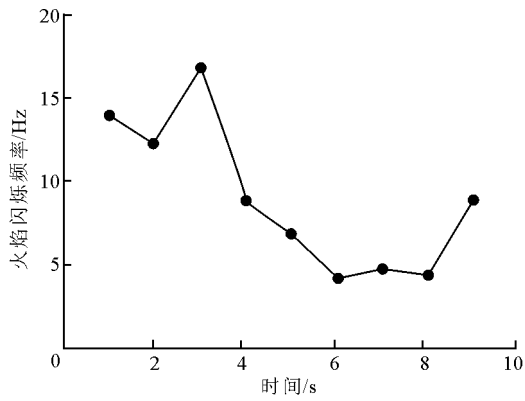
图 7 火焰信号的时间序列和功率谱密度
Fig.7 The time sequences of the flames signal and their PSD estimates

图 8 为根据式(7)计算出的 3 种混合生物质燃烧火焰闪烁频率的典型图像。图 9 为 3 种混合生物质燃烧火焰稳定指数的典型图像。由于采样频率为

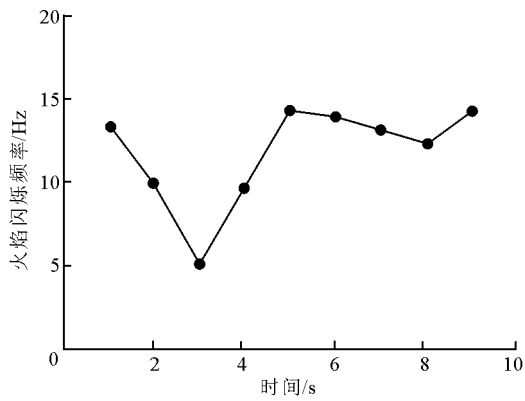
250 Hz，通过计算 1 s 内 4 个参数的测量值的平均值及标准差，再利用式(10)进行数据融合，可得到火焰稳定指数。



a) 玉米芯+麦秸

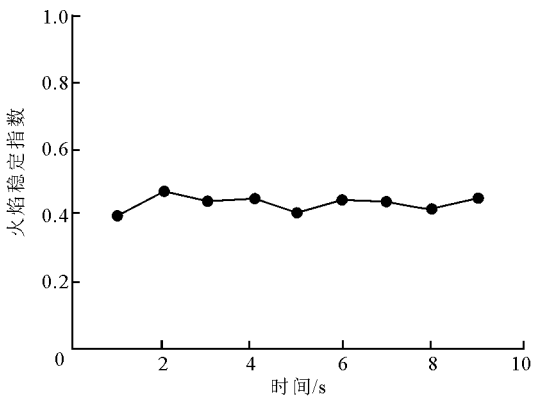


b) 柳木+花生壳

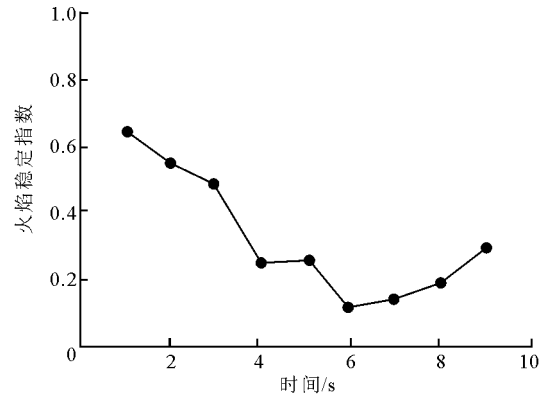


c) 花生壳+麦秸

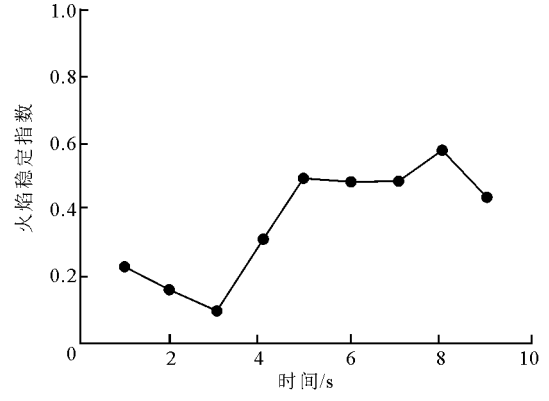
图 8 3 种混合生物质燃烧火焰闪烁频率
Fig.8 The flicker frequencies of the three biomass blends' flames



a) 玉米芯+麦秸



b) 柳木+花生壳



c) 花生壳+麦秸

图 9 3 种混合生物质燃烧火焰稳定指数
Fig.9 The flame stability indexes of the three biomass blends' flames

从图 8a)和图 9a)可以看出，玉米芯和麦秸的混燃火焰闪烁频率约 15 Hz，稳定指数约 0.45，2 个参数基本不随时间变化，表明火焰处于较稳定的状态。同样，图 8b)和图 9b)表明柳木和花生壳混燃火焰的闪烁频率和稳定指数随时间变化的趋势基本相同，在第 3 s 时，火焰闪烁频率上升，火焰稳定指数下降。这是因为火焰稳定指数融合了火焰的几何、亮度和热力学参数，因而火焰闪烁频率虽然上升，但当火焰的其他参数不稳定时，其整体稳定性是下降的。从图 8c)和图 9c)也可得知，花生壳和麦秸混燃火焰稳定指数和闪烁频率的变化趋势基本一致。同时还观察到，虽然火焰闪烁频率在第 1 s 和第 5 s 时相近，但火焰稳定性却完全不同。即第 1 s 时火焰闪烁频率较高，但稳定指数较小，表明火焰处于不稳定状态；第 2 s 和第 3 s 时，闪烁频率和稳定指数均有下降趋势，也表明火焰处于不稳定的过渡状态；当第 5 s 时，火焰稳定指数和闪烁频率均为较大值，表明火焰处于稳定状态。总之，玉米芯和麦秸混燃火焰在测量时间范围内稳定指数高且变化小，整体稳定性较好；柳木与花生壳混燃火

焰和花生壳与麦秸混燃火焰在测量时间范围内稳定指数变化较大,处于较不稳定状态。3种混合生物质燃烧火焰的亮度与高度标准差也可以反映该结论的正确性。同时,在试验中观察到,玉米芯与麦秸混燃和柳木与花生壳混燃有火星从火焰中射出,也表明生物质混燃存在较大的不稳定性。

3 结 论

本文提出了一种通用的混燃火焰稳定性的在线测量方法。该方法通过对火焰的物理特性参数如几何形状、亮度、温度和闪烁频率的检测以及特性参数的统计分析和融合,提出了以火焰稳定指数对火焰稳定性进行定量描述的方法。该方法在生物质燃烧试验台上对玉米芯、麦秸、柳木和花生壳4种不同生物质两两掺杂形成的3种混合生物质燃料燃烧进行试验和评估。试验结果证明了该方法的有效性。同时,试验结果表明,在相同工况下,不同生物质的混燃对火焰稳定性的影响有明显的不同,这是由于生物质理化性质不同导致的。

[参 考 文 献]

- [1] SAHU S G, CHAKRABORTY N, SARKAR P. Coal-biomass co-combustion: an overview[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 575-586.
- [2] 黄希桥,李前翔,王苗苗,等. CCD测温中火焰温度与颜色的关系[J]. *西北工业大学学报*, 2017, 35(3): 442-447.
HUANG Xiqiao, LI Qianxiang, WANG Miaomiao, et al. The relation of the temperature and color of the flame of the CCD temperature measurement[J]. *Journal of Northwest Polytechnic University*, 2017, 35(3): 442-447.
- [3] 程智海,蔡小舒,岳俊,等. 燃烧状态及煤粉粒径对火焰光谱的影响[J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(增刊 2): 147-150.
CHENG Zhihai, CAI Xiaoshu, YUE Jun, et al. The effect of flame spectrum by combustion state and size of pulverized coal[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(Suppl.2): 147-150.
- [4] BALLESTER J, GARCÍA-ARMINGOL T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical

- flames[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(4): 375-411.
- [5] LI L, MOSTOVSHCHIKOV A V, ILYIN A P, et al. Monitoring of nanopowder combustion ignited by laser radiation[C]//*Proceedings of the 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium*. 2018: 311-316.
- [6] 安静宇,马宪民. 火电厂炉膛火焰视频图像燃烧稳定性监测仿真[J]. *计算机仿真*, 2017, 34(4): 373-376.
AN Jingyu, MA Xianmin. Simulation of flame video image combustion stability monitoring in thermal power plant[J]. *Computer Simulation*, 2017, 34(4): 373-376.
- [7] KRABICKA J, LU G, YAN Y. Profiling and characterization of flame radicals by combining spectroscopic imaging and neural network techniques[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(5): 1854-1860.
- [8] YAN Y, QIU T, LU G, et al. Recent advances in flame tomography[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2012, 20(2): 389-399.
- [9] 宋旭东,郭庆华,张婷,等. 甲烷同轴射流扩散火焰中自由基的辐射特性[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(35): 50-57.
SONG Xudong, GUO Qinghua, ZHANG Ting, et al. Radiation characteristics of radicals in methane co-flowing jet diffusion flame[J]. *Journal of Electrical Engineering of China*, 2013, 33(35): 50-57.
- [10] LU G, YAN Y, COLECHIN M. A digital imaging based multifunctional flame monitoring system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(4): 1152-1158.
- [11] LU G, YAN Y, RILEY G, et al. Concurrent measurement of temperature and soot concentration of pulverized coal flames[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(5): 990-995.
- [12] SUN D, LU G, ZHOU H, et al. Flame stability monitoring and characterization through digital imaging and spectral analysis[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(11): 114007.
- [13] LU G, YAN Y, COLECHIN M, et al. Monitoring of oscillatory characteristics of pulverized coal flames through image processing and spectral analysis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(1): 226-231.
- [14] JASMIN K. Biomass and carbon dioxide capture and storage: a review[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 401-430.

(责任编辑 杜亚勤)