



Kent Academic Repository

Bai, Xiaojing, Lu, Gang and Yan, Yong (2017) *Fractal Characteristics of Thin Thermal Mixing Layers in Coal-Fired Flame*. *Journal of Combustion Science and Technology*, 3 . pp. 225-230. ISSN 1006-8740.

Downloaded from

<https://kar.kent.ac.uk/63478/> The University of Kent's Academic Repository KAR

The version of record is available from

<https://doi.org/10.11715/rskxjs.R201606021>

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>).

煤粉火焰热混合层分形特性研究

白晓静¹, 卢 钢², 闫 勇^{1,2}

(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: 采用数字图像采集系统在煤粉燃烧实验锅炉中采集湍流火焰图像, 利用形态学图像处理技术提取火焰热混合层的分形特征, 研究了一次、二次和三次风量对火焰热混合层分形特征的影响。研究表明, 火焰热混合层分形维数与一次、二次和三次风量呈现出规律的相关性, 因此有可能根据火焰热混合层分形维数变化来调整一次风量与二次风/三次风量的比值, 为燃烧过程的优化与控制提供参考。

关键词: 煤粉火焰; 热混合层; 分形维数; 火焰图像; 温度梯度

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8740(2017)03-0225-06

Fractal Characteristics of Thin Thermal Mixing Layers in Coal-Fired Flame

Bai Xiaojing¹, Lu Gang², Yan Yong^{1, 2}

(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, Canterbury, Kent CT2 7NT, UK)

Abstract: The images of turbulent flame were acquired by using a digital imaging system on an industry-scale pulverized coal-fired test rig. The fractal dimensions of thin thermal mixing layers in flame were computed through morphology-based flame image processing techniques. The effects of the ratios of primary air and secondary/tertiary air on fractal dimensions were characterized. The results presented in this work show that the variations of fractal dimension are closely related to the ratio changes of primary air and secondary/tertiary air. Therefore, the fractal dimensions of flame thin thermal mixing layers can be used as an important indicator for the control and optimization of a combustion process.

Keywords: coal-fired flame; thin thermal mixing layers; fractal dimension; flame image; temperature gradient

湍流燃烧是主要的工业燃烧模式。湍流燃烧中, 湍流流动、化学反应、传热以及传质同时发生, 导致其过程极其复杂, 为湍流燃烧的测量和研究带来极大困难。

湍流燃烧中, 火焰的动态变化导致其温度分布也

不断变化。火焰温度是燃烧过程中最重要的参数之一, 对火焰温度梯度的研究也受到广泛重视^[1-2]。Everest 等^[3]采用温度梯度来表征热耗散率 $\chi_T = 2\alpha(\nabla T \cdot \nabla T)$, 其中, ∇T 为温度梯度, α 为热扩散系数。结果表明, 火焰温度梯度与热耗散率紧密相

收稿日期: 2016-06-22.

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助项目(B13009); 国家自然科学基金资助项目(61673170;61603135); 中央高校基本科研业务费资助项目(2014XS42).

作者简介: 白晓静(1987—), 女, 博士研究生, x.bai@ncepu.edu.cn.

通讯作者: 闫 勇, 男, 博士, 教授, yongyan@ncepu.edu.cn.

网络出版时间: 2017-01-12 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1240.TK.20170112.1609.002.html>.

关. 在文献[3]中,发现温度梯度较大的区域会有强烈的热混合现象,并将其定义为热混合层(thin thermal mixing layers)^[3]. Wang 等^[4]采用两点激光瑞利法研究非预混湍流火焰温度梯度与湍流中热耗散率的关系; Frank 等^[5-6]也采用高分辨率激光瑞利散射成像技术测量和分析了温度梯度在湍流燃烧中的特性. 以上研究表明,火焰温度梯度的变化与湍流燃烧中传热现象、流体特性等紧密相关. 因此,借助火焰图像技术来研究湍流燃烧过程中的热混合层形态特性,有助于更加深入地认识湍流燃烧中热混合现象,对燃烧过程的研究和优化控制具有重要意义.

分形理论由 Mandelbrot 等^[7]所创立,其采用分形维数和数学方法来研究、描述客观事物. 湍流燃烧火焰自身结构复杂,而分形理论对于复杂结构具有良好的描述能力,因此,有专家学者将分形理论应用于湍流燃烧及火焰描述领域^[8-11],其研究结果也证明,分形理论适用于湍流燃烧火焰的描述. 然而,尚未有研究采用分形理论来分析湍流火焰热混合层特征.

本文采用形态学图像处理技术获得二维火焰热混合层图像,即湍流燃烧中热混合较强烈的区域,针对火焰热混合层的复杂特性,引入分形理论对火焰热混合层的分形特征进行研究. 本文将该方法用于煤粉火焰的研究中,对不同燃烧条件下(如不同一次、二

次与三次风量)的火焰热混合层分形特征进行研究.

1 火焰热混合层提取

火焰图像灰度值反映了火焰辐射的强度,而辐射强度与温度相关^[12],因此可以采用火焰图像来获得温度梯度特征,进而获得热混合层的二值图像. 火焰辐射亮度与温度之间的映射关系^[13]可以表达为

$$I = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中: I 为辐射强度; T 为温度; ε 为煤粉颗粒表面辐射率; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数. 则可推导出

$$T = [I / (\varepsilon \sigma)]^{1/4} \quad (2)$$

一般来说,CCD 像机输出亮度 G 与辐射强度 I 之间的关系可写为^[14]

$$G = kI \quad (3)$$

式中, k 为比例系数. 由式(2)和(3)可知, $T \sim I^{1/4} \sim G^{1/4}$, 进而有

$$|\nabla T| \sim |\nabla I| \sim |\nabla G| \quad (4)$$

其中, ∇ 表示梯度算子. 因此,可以由数字图像处理技术得到与温度梯度 $|\nabla T|$ 相关的火焰灰度梯度图像 $|\nabla G|$, 进而获得火焰热混合层区域,即 $|\nabla G|$ 较大的区域. 火焰热混合层提取过程如图1所示.

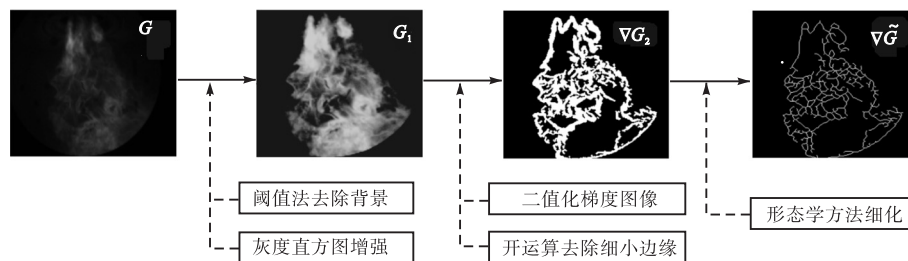


图1 火焰热混合层提取过程示意

如图1所示,在火焰热混合层提取过程中,首先采用 Otsu 阈值法来对火焰图像进行分割,即选取使背景与燃烧区域之间方差最大的阈值作为最佳阈值,实现对原始火焰灰度图像 $G \in \mathbf{R}^{l \times m}$ ($\mathbf{R}$ 为实数域, $l \times m$ 为图像大小)的分割,从而提取出火焰燃烧区域图像 $\tilde{G}$, 即

$$\tilde{G}(x, y) = \begin{cases} g(x, y) & g(x, y) > \delta \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $g(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的灰度值, $0 < x \leq l$, $0 < y \leq m$; δ 为灰度阈值.

为了更精确地提取热混合层,本文采用了灰度直方图统计方法对火焰图像进行增强并获得增强后图像 G_1 , 即

$$S_k = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad (k=0, 1, 2, \dots, M-1) \quad (6)$$

式中: S_k 为增强后图像 G_1 中各像素的灰度值; M 为总灰度级数; p_r 为变换原始图像灰度概率密度函数, $0 < r_j < M$; n_j 是灰度为 j 的像素数量; n 为像素总数量.

计算火焰梯度图像并设置阈值去除梯度较小的像素点,从而获得梯度图像 ∇G_1 . 采用形态学运算中腐蚀和膨胀算子去除 ∇G_1 中细小梯度和噪声^[15],从而获得梯度二值图像 ∇G_2 . 运算表达如下:

$$\nabla G_1(x, y) = \begin{cases} \nabla g(x, y) & \nabla g(x, y) > \delta_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\nabla G_2 = (\nabla G_1 \oplus B) \otimes B \quad (8)$$

式中: $\nabla g(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 处的梯度值; δ_1 为

梯度阈值;符号“ $\oplus$ ”与“ $\otimes$ ”分别表示目标图像的腐蚀与膨胀运算; B 为用来进行腐蚀与膨胀的结构元素,为了有效去除噪声,根据火焰图像的特征选取 $B = [0\ 1\ 0; 1\ 1\ 1; 0\ 1\ 0]$ 。

为了研究其形态变化,进一步对火焰梯度图像二值图像 ∇G_2 进行细化,采用 Matlab Simulation 中的细化函数对火焰梯度图像进行细化^[16],并记细化后的图像为火焰热混合层图像 $\nabla \tilde{G}$,如图 1 所示。

2 分形特征理论及计算

湍流燃烧可以看作不同尺度的涡团连续扭曲、扩张、产生和消失所引发的过程,其热混合层则随之发生复杂的形态变化,分形维数适用于对复杂图形的描述,因此分形维数适用于火焰热混合层描述。盒子分形维数法的思想为采用不同尺度(即边长大小不同)的盒子来覆盖所研究火焰热混合层图像,大尺度的盒子包含较少的细节信息,尺度越小,包含的细节信息越多^[9]。采用不同尺度的盒子可以实现对不同尺度下火焰热混合层复杂程度的度量,进而得到其分形维数 D ,火焰热混合层形态越复杂,其分形维数则越大,如式(9)所示。

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg(1/r)} \quad (9)$$

式中: $r(r>0)$ 为盒子的尺寸; $N(r)$ 为对应的盒子个数。

为了更精确地描述火焰热混合层的分形特征,研究中采用分形维数的盒子尺度选取为 1、2、4、8、16、32、64、128 以及 256。

3 实验和结果分析

3.1 实验火焰图像采集

为验证本文提出方法的有效性,本文利用火焰成像系统在某工业煤粉燃烧实验炉上采集不同燃烧条件下序列火焰图像,对其热混合层分形特征进行分析。燃烧实验炉为单燃烧器顶部燃烧炉。其送风系统中,一次风用于吹送煤粉,二次风/三次风用于旋流和助燃。二次风/三次风由挡风板位置确定,挡风板置于 0 时,三次风量为 0,随着其位置的增大,二次风量减少,三次风量增加。实验炉的炉壁面上设置了观察窗口,用于火焰图像采集。实验中所采用的火焰成像系统主要由光学探杆,保护管套、CCD 相机和嵌入式计算机等组成,如图 2 所示^[17]。实验过程中将光学探杆及保护套管插入炉壁的观察窗口内并固定,用于将炉膛内部的火焰亮度信息传送至炉膛外部的相机,最后

通过相机获取火焰图像。CCD 相机采样速率为每秒 200 帧,图像分辨率为 256(H)×320(W)像素^[17]。

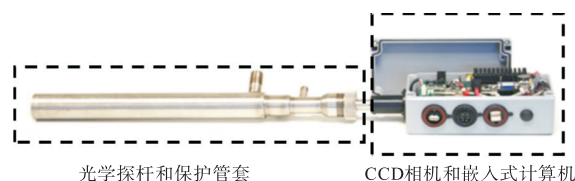


图 2 火焰图像采集系统

本文在 7 种不同实验条件下分别进行火焰图像采集。主要实验参数(包括一次风量、挡风板位置等)如表 1 所示。

表 1 实验工况参数表

工况	一次风量/%	挡风板位置(二次风/三次风)
1	18	3
2	20	3
3	22	3
4	20	0
5	20	2
6	20	3
7	20	4

3.2 实验结果

为了研究不同燃烧条件下分形特征及其变化,在每一实验条件下采集 1 000 幅火焰图像,采样时间间隔为 5 ms。图 3 为在实验工况 2(一次风量为 20%,挡风板位置为 3)采集到的火焰图像以及处理后的火焰热混合层图像。可以看出,在不同时刻,火焰外围轮廓没有发生明显的变化。由于湍流火焰面具有复杂的动态特性,火焰热混合层的形态随时间产生明显的变化。

图 4 为图 3 对应实验条件下的热混合层分形维数。分析结果表明,随着时间变化,火焰热混合层分形维数发生波动。其主要原因在于,在燃烧过程中,气体与煤粉颗粒两相流场产生湍流现象,流场内部存在不同尺度的涡团,火焰受到湍流的影响,无法在湍流中均匀稳定传播,不断出现火焰面的褶皱现象,引发温度场变化,从而引发火焰热混合层结构的波动及其分形维数的波动。

采用统计分析的方法研究一次风量对热混合层分形维数的影响。分别取一次风量为 18%、20% 以及 22% 的煤粉燃烧火焰热混合层分形维数进行统计分析。火焰闪烁频率(闪频)与火焰的结构、热传送等紧密相关,被广泛用于火灾检测及燃烧稳定性监测中,是最常用的表征火焰动态特性的参数^[18]。为了研究分形维数特征与燃烧状况的关系,按照文献[18]中的方法对图像灰度均值计算其闪频特征,不同一次风量

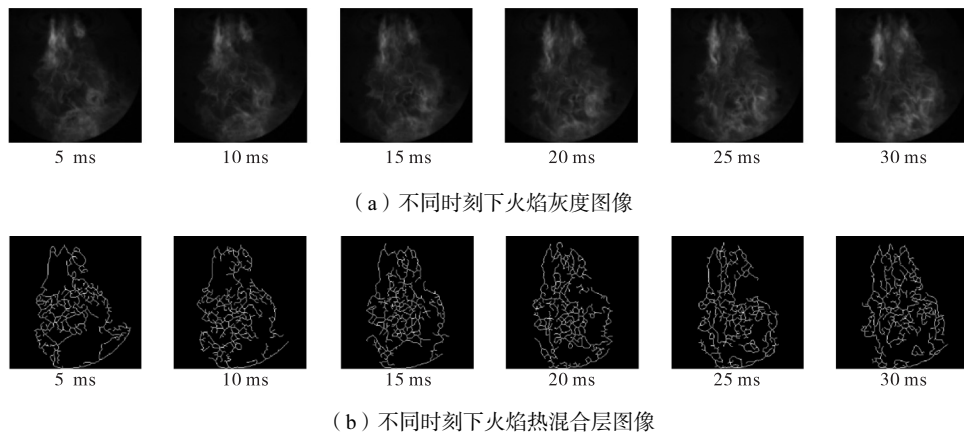


图 3 不同时刻下的火焰灰度及热混合层图像

下的火焰热混合层分形维数的均值变化情况与火焰闪频的变化情况如图 5 所示. 分形维数的均值随着一次风量的增加而减小, 火焰闪频增加. 这表明在一次风量改变的情况下, 热混合层分形维数与火焰闪频呈现出规律特性, 且火焰热混合层分形特征与一次风量呈现出近似线性的关系. 一次风量引发分形维数变化的原因主要有以下几个方面: ①一次风用于传送燃料, 在传送过程中与燃料充分混合, 燃烧火焰面受到燃料与氧化剂的混合情况影响, 发生改变, 而混合情况越好, 则越利于燃烧, 其温度分布越均匀, 因此, 热混合层形态简单, 其分形维数减少; ②由于一次风量改变, 影响了炉内湍流场的特性, 从而改变了火焰特性^[19], 导致火焰热混合层结构发生改变; ③由于一次风与二次风、三次风总量不变, 一次风量增加的同时二次风及三次风量相应减少, 从而导致炉内流场发生改变, 进而影响到火焰动态特性.

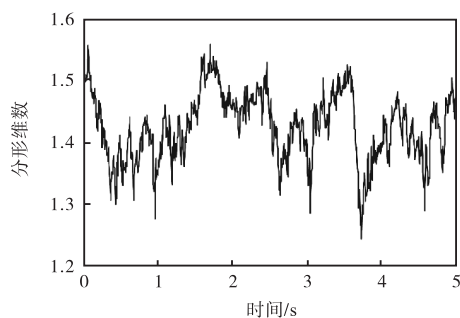


图 4 不同时刻火焰热混合层分形维数

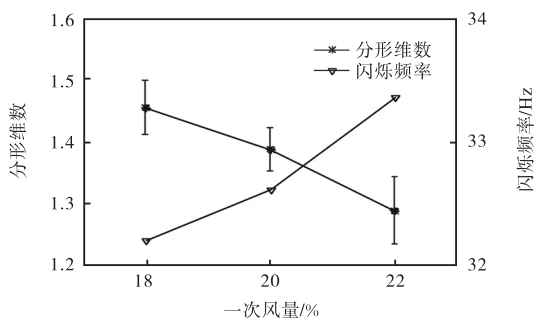


图 5 一次风量与热混合层分形维数、火焰闪频的关系

二次风和三次风主要用于旋流和助燃, 在一次风量固定的情况下, 二次风量和三次风量的大小由挡风板的位置来决定. 为了研究二次风量和三次风量对火焰热混合层分形维数的影响, 在一次风量为 20% 的情况下, 对不同挡风板位置的火焰热混合层分形特征进行对比分析. 分形维数和闪频随挡风板位置变化情况如图 6 所示, 图 6 中, 挡风板位置分别为 0、2、3、4, 随着挡风板位置增加, 二次风量减少, 三次风量增加. 火焰热混合层分形维数随二次风/三次风变化呈现出规律变化情况, 随着三次风量增加, 分形维数减小, 火焰闪频则随之增大. 这主要是由于二次风/三次风改变的情况下, 改变了炉内湍流场气相特性, 从而引发湍流燃烧的改变, 热混合层随之发生改变. 由此可见, 挡风板位置对火焰面产生规律性的影响, 火焰热混合层结构的分形特征可以作为控制挡风板位置的参考依据.

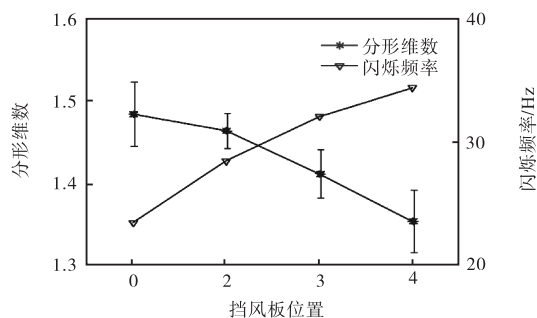


图 6 挡风板位置与热混合层分形维数、火焰闪频关系

为了验证火焰热混合层分形维数的稳定性, 在图 5 和图 6 对应的实验条件下, 连续采集 10 000 幅火焰图像, 按照时间顺序分为 10 组, 重复实验 10 次. 图 7 和图 8 为 10 次实验中火焰热混合层分形维数的均值和标准差. 图 7 中, 随着一次风量增加, 热混合层分形维数均值降低, 标准差减少. 图 8 中, 随着二次风/三次风变化, 分形维数均值减小. 可见重复实验中, 分形维数的变化趋势与以上研究呈现出一致

性. 因此, 火焰热混合层分形维数随一次风与挡风板位置的变化呈现出固定的规律性.

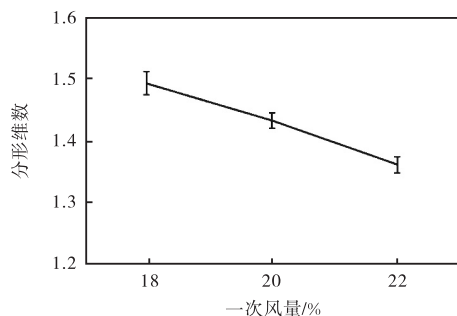


图7 重复实验下热混合层分形维数与一次风量关系

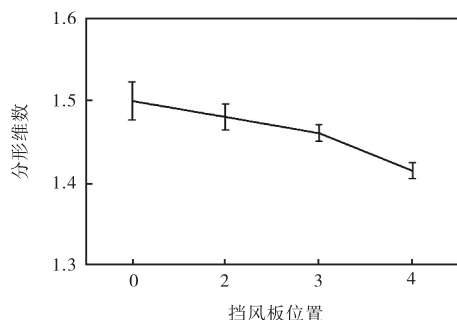


图8 重复实验下热混合层分形维数与挡风板位置关系

4 结 论

(1) 煤粉燃烧过程中, 火焰热混合层与湍流燃烧紧密相关, 具有复杂的动态特性. 采用图像处理技术可以获得火焰热混合层图像, 进而可用分形特征来描述湍流火焰热混合层的复杂特性.

(2) 实验结果表明, 在煤粉燃烧中, 火焰热混合层分形维数分布在 1.2 ~ 1.6 之间. 一次、二次和三次风量对火焰热混合层分形维数有十分明显的影响. 随着一次风量的增加, 分形维数均值减小, 表明燃料与氧化剂混合效率提高, 火焰面复杂度降低, 其温度分布发生变化, 热混合现象减弱.

(3) 二次和三次风量变化会影响湍流场的气相特性, 火焰热混合情况随之发生改变, 研究发现火焰热混合层分形维数随着二次风与三次风的比值减小而减小.

(4) 依据火焰热混合层分形维数与一次、二次和三次风量呈现出的规律相关性, 有可能根据火焰热混合层分形维数变化来调整燃烧过程(如一次风量, 二次和三次风比值等), 为燃烧过程的控制与优化提供参考.

参考文献:

[1] 刘德新, 王天友, 刘书亮, 等. 用剪切干涉高速摄影

法测量内燃机缸内温度场的实验研究[J]. 内燃机学报, 2002, 20(4): 317-323.

Liu Dexin, Wang Tianyou, Liu Shuliang, et al. Study on in-cylinder temperature field measurement with shearing-interferometry high speed photography for spark ignition engines [J]. *Transactions of CSICE*, 2002, 20(4): 317-323 (in Chinese).

[2] 杨卫娟, 周俊虎, 汪 洋, 等. 微尺度燃烧中的温度及热回流分布[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(20): 28-32.

Yang Weijuan, Zhou Junhu, Wang Yang, et al. Temperature and heat-recirculation distribution in micro-scale combustion [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(20): 28-32 (in Chinese).

[3] Everest D A, Driscoll J F, Dahm W J, et al. Images of the two-dimensional field and temperature gradients to quantify mixing rates within a non-premixed turbulent jet flame [J]. *Combustion and Flame*, 1995, 101(1): 58-68.

[4] Wang G, Clemens N, Varghese P. High-repetition rate measurements of temperature and thermal dissipation in a non-premixed turbulent jet flame [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 691-699.

[5] Frank J H, Kaiser S A. High-resolution imaging of dissipative structures in a turbulent jet flame with laser rayleigh scattering [J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44(2): 221-233.

[6] Kaiser S A, Frank J H. The effects of laser-sheet thickness on dissipation measurements in turbulent non-reacting jets and jet flames [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(4): 045403.

[7] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. United States: W H Freeman and Co Ltd, 1983.

[8] 杜 青, 张 军, 尹 君, 等. 湍流预混燃烧火焰结构的分形维数特征研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(3): 214-220.

Du Qing, Zhang Jun, Yin Jun, et al. Study on the flame structure of turbulent premixed combustion of engines using fractal method [J]. *Transactions of CSICE*, 2008, 26(3): 214-220 (in Chinese).

[9] Chatakonda O, Hawkes E R, Aspden A J, et al. On the fractal characteristics of low Damköhler number flames [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(11): 2422-2433.

[10] Yenerdag B, Fukushima N, Shimura M, et al. Turbulence-flame interaction and fractal characteristics of H₂-air premixed flame under pressure rising condition

- [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 1277-1285.
- [11] 梁俊杰, 李格升, 张尊华, 等. 球形火焰分形维数的计算方法[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(1): 26-32. Liang Junjie, Li Gesheng, Zhang Zunhua, et al. Calculation method for fractal dimension of spherical flames[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(1): 26-32(in Chinese).
- [12] 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.
- [13] Lee H, Choi S. An observation of combustion behavior of a single coal particle entrained into hot gas flow [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(6): 2610-2620.
- [14] 周怀春. 炉内火焰可视化检测原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. Zhou Huaichun. *Detection Principle and Technology of Flame Visualization in Furnace* [M]. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese).
- [15] 葛平俱, 苏平, 王秀丽, 等. 基于数学形态学的混合消噪法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(7): 1584-1585. Ge Pingju, Su Ping, Wang Xiuli, et al. Hybrid method in noise removing based on mathematical morphology [J]. *Computer Engineering and Design*, 2007, 28(7): 1584-1585(in Chinese).
- [16] Lam L, Lee S W, Suen C Y. Thinning methodologies: A comprehensive survey [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(9): 869-885.
- [17] 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.
- [18] Huang Y, Yan Y, Lu G, et al. On-line flicker measurement of gaseous flames by image processing and spectral analysis [J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(8): 726-733.
- [19] 许开龙, 俞伟伟, 吴玉新, 等. 一次风速度对煤颗粒群着火特性影响的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(4): 313-318. Xu Kailong, Yu Weiwei, Wu Yuxin, et al. Experimental study on effects of primary flow velocity on ignition of coal particles [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2014, 20(4): 313-318(in Chinese).