

# 直线运动下移动火源扩散火焰的分形结构特征

楼波,许建红,林振冠,徐毅

(华南理工大学电力学院,广东广州 510640)

**摘要:**由高速摄像机获得移动火源在匀加速直线运动下的火焰图像序列,利用图像处理技术和分形理论,研究其分形结构特征.结果表明:处于匀加速直线运动状态下的移动火源扩散火焰具有分形维数特征,同一加速度下的分形维数随速度增大而增加,当移动火源运动速度达到一定值以后,火焰的分形维数增大的幅度变缓慢;加速度较大的移动火源扩散火焰的分形维数随火源运动速度上升的趋势较快,影响火焰锋面的褶皱和扭曲;移动火源与静止火源有一定的区别,可通过对比两者火焰的分形维数特征来加以识别.

**关键词:**移动火源;扩散火焰;直线运动;图像处理;分形维数

**中图分类号:**TK16 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2013.08.011

**引用格式:** Lou Bo, Xu Jianhong, Lin Zhenguan, et al. Fractal structure characteristic of the diffusion flame of moving fire on linear motion[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(8):679-686.

楼波,许建红,林振冠,等. 直线运动下移动火源扩散火焰的分形结构特征[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(8):679-686.

## Fractal structure characteristic of the diffusion flame of moving fire on linear motion

LOU Bo, XU Jianhong, LIN Zhenguan, XU Yi

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Image series of a moving fire on linear motion were acquired by a high-speed video camera. Applying image processing technology and the fractal theory, the fractal structure characteristic of the diffusion flame of moving fires was studied. The results revealed that the diffusion flame of moving fires possesses fractal dimension characteristics and it increases with the velocity in the same acceleration. When the velocity of a moving fire reaches a certain value, the fractal dimension of the diffusion flame increases within a small range; under the condition of a large acceleration and velocity, its fractal dimension increase rapidly with the velocity, and can influence the wrinkle and distortion. There are certain differences between a moving fire and a static fire, which can be identified by comparing the fractal dimensions of them.

**Key words:** moving fire; diffusion flame; linear motion; image processing; fractal dimension

收稿日期:2013-03-26;修回日期:2012-05-29

基金项目:广东省绿色能源技术重点实验室(2008A060301002),能源高效清洁利用广东普通高校重点实验室(华南理工大学)(KLB10004)资助.

作者简介:楼波,男,1965年生,博士/副教授.研究方向:燃烧理论和技术. E-mail: loubo@scut.edu.cn

通讯作者:许建红,硕士. E-mail: kinhung\_hui@yahoo.cn

## 0 引言

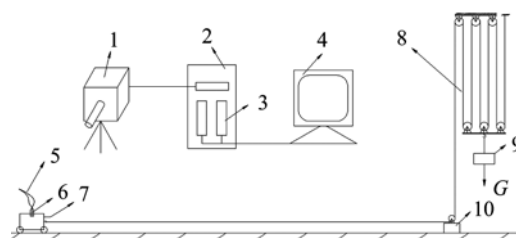
移动火源<sup>[1]</sup>是指着火期间,火源点处于运动状态,如运行中的高速列车、赛车、飞机和航天飞行器 etc 外部着火情形.此时火源与周围空气处于相对运动状态,火源本身的高速运动会引起周围空气的湍动,此项湍动与火源燃烧引起的湍动叠加,加剧火源点的燃烧化学反应,使火焰锋面褶皱、扭曲,变得更加复杂.因此在对其进行定量分析时,传统的欧几里得集已不能给出明确的物理描述和解释.由 Mandelbrot<sup>[2]</sup>发展起来的分形几何学是一种新的数学工具,它是用来描述和研究这些形态极不规则或极为破碎的几何对象. Gouldin<sup>[3]</sup>和 Smallwood 等<sup>[4]</sup>将预混湍流火焰的模型和粗糙表面几何的分形描述联系起来,得到了湍流火焰参数与火焰图像分形维数的关系. Cintosun 等<sup>[5]</sup>采用 3 种不同的分形算法对丙烷空气预混湍流火焰图像进行了分析,确定了丙烷空气预混湍流火焰图像分形维数. Chen 等<sup>[6]</sup>重点研究了湍流预混火焰的分形参数和燃烧模型中参数的关系,修改了 Karlovitz 数,并且还发现本生灯的湍流预混火焰的自相似尺度随时间而线性增加.国内蒋德明等<sup>[7-8]</sup>、胡毅等<sup>[9]</sup>对由高速纹影摄影法获得的容弹内预混湍流火焰照片进行了处理,利用面积法求得火焰图像的分形维数,测得预混湍流火焰结构具有分形特征并可以用分数维数来定量描述其褶皱、扭曲程度.杨宏旻等<sup>[10-11]</sup>通过激光层析技术,获得了雷诺数在 4335~111000 内的湍流预混火焰热图像序列,结合计算机图像处理技术和分形理论,提出了一种基于分形理论的湍流预混火焰传播速度模型.杜青等<sup>[12]</sup>利用高速摄像仪获得发动机内部火焰燃烧图像,并将非线性方法中的分形理论应用于发动机火焰图像结构的研究,得出了湍流预混燃烧火焰的分形维数在燃烧期内随曲轴转角的变化规律.

本课题组<sup>[13]</sup>前期对无限大空间匀速圆周运动火源燃烧实验平台上获得的移动火焰扩散燃烧火焰图像序进行力场分析,揭示了周围气流变化对移动火源扩散火焰的影响规律.在此基础上,本文对无限大空间匀加速直线运动火源燃烧实验平台,采用高速摄像仪对匀加速直线运动下的移动火源扩散火焰进行拍摄和记录,就直线运动下速度与加速度影响的移动火源扩散火焰分形结构特征进行分析研究.

## 1 实验部分

### 1.1 实验系统和方法

实验系统如图 1 所示.该系统由高速摄像机、计算机主机系统、图像采集卡、图像监视器、移动火源扩散火焰、柴油燃烧器、小车、滑轮组、砝码、定滑轮等组成.将柴油燃烧器安装在光滑轨道里滑行的小车上,小车用非弹性绳子通过定滑轮和滑轮组牵引,滑轮组下悬挂一定质量的砝码.燃料采用 0# 柴油.



1—高速摄像机;2—计算机主机系统;3—图像采集卡;  
4—图像监视器;5—移动火源扩散火焰;6—柴油燃烧器;  
7—小车;8—滑轮组;9—砝码;10—定滑轮

图 1 匀加速直线移动火源扩散火焰实验系统图

Fig. 1 Experimental system of moving fire on uniformly accelerated linear motion

实验将 DRS (美国 Diagnostic/Retrieval Systems Technologies 公司) 高速摄像仪 (型号为 LIGHTNING RDT<sup>TM</sup>) 放置在实验台水平面上,使得小车上的火焰能完整出现在 DRS 图像采集窗口,保持镜头焦距不变,调节图像分辨率为  $1\ 280 \times 1\ 024$  像素,每秒传输帧数为 100 fps. 通过调整砝码质量设定加速度在  $1 \sim 5\ \text{m/s}^2$ , 然后通过记录小车运动某一段固定测试段内的运动时间,可计算出小车的速度. 实验中点燃柴油燃烧器,形成扩散火焰,释放砝码,使火焰在水平光滑轨道上作匀加速直线运动. 利用 DRS 高速摄像仪记录某加速度下不同速度的火焰形态.

### 1.2 实验结果

在本实验中,进行加速度分别为 1, 2, 3, 4 和  $5\ \text{m/s}^2$  移动火源运动实验. 图 2 给出一组移动火源扩散火焰作初速度为  $0\ \text{m/s}$ 、加速度为  $4\ \text{m/s}^2$  的匀加速直线运动的图像序列.

由实验图像可见,速度从  $0.00\ \text{m/s}$  增加到  $0.28\ \text{m/s}$  时,火焰面基本呈柱状形,火焰面大小没有太大变化;速度从  $0.28\ \text{m/s}$  增加到  $0.64\ \text{m/s}$  时,火焰外形发生明显变化,火焰发生偏斜、波动;而速

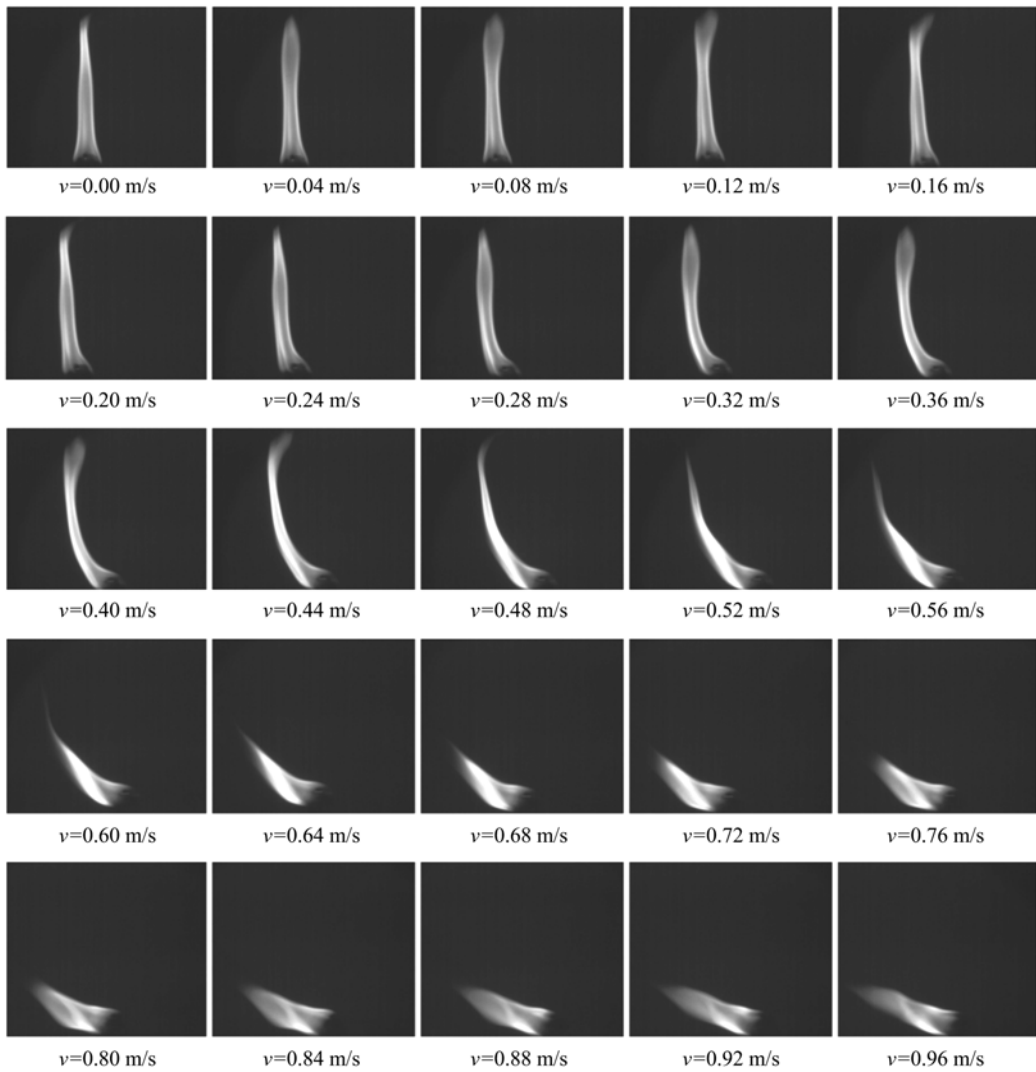


图 2 加速度  $a = 4 \text{ m/s}^2$  时, 25 个速度所对应的火焰图像

Fig. 2 25 images of different flame velocity when  $a = 4 \text{ m/s}^2$

度从 0.68 m/s 增加到 0.96 m/s 时, 火焰锋面形状没有发生明显的变化, 火焰燃烧相对稳定.

## 2 火焰图像处理

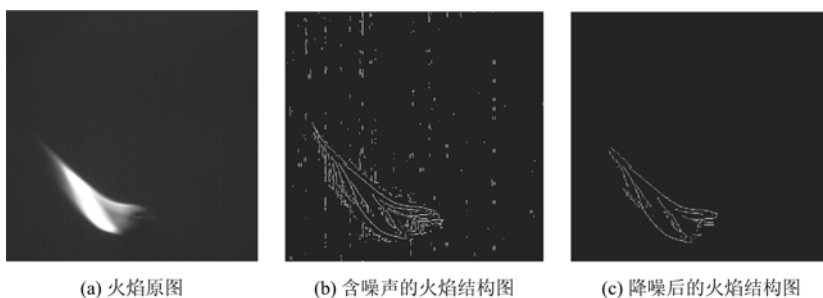
### 2.1 火焰图像去噪

火焰图像噪声降低了火焰图像的质量, 影响图像火焰区域边缘结构的提取, 本文采用均值滤波法<sup>[14]</sup>和中值滤波法<sup>[15]</sup>结合对移动火源运动图像进行图像噪声滤除. 均值滤波是用几个邻域像素灰度的平均值来替代原图像中的各个像素值, 对噪声虽然有抑制作用, 但算法简单, 往往会导致图像变得模糊. 中值滤波器把数字图像或数字序列中心点位置的值用该点邻域的中值替代, 最终选择的数据序列中间位置一般不是噪声点的值, 由此便可达到抑制

噪声的目的<sup>[16]</sup>. 图像噪声点上的像素通常比周围非噪声点的像素要亮或暗, 均值滤波和中值滤波两种降噪算法结合互补, 进一步强化了降噪效果. 图 3 (a)是加速度  $a = 4 \text{ m/s}^2$ 、速度  $v = 0.64 \text{ m/s}$  时的移动火源运动实验原图, 图 3(b)为含噪声的火焰图像灰度结构图, 图 3(c)为两种降噪算法结合处理图像后提取的火焰图像灰度结构轮廓.

### 2.2 火焰图像结构提取

Prewitt 算法<sup>[17-18]</sup>是一种边缘样板算法, 通过对图像进行 8 个方向的边缘检测, 将其中方向响应最大的作为边缘幅度图像的边缘, 且对噪声具有平滑作用. 图 4 给出了该 8 个 Prewitt 边缘检测算子模版, 图 5 为采用 Prewitt 边缘检测算法提取出来的加速度  $a = 4 \text{ m/s}^2$  下的 25 个火焰速度所对应的火



(a) 火焰原图 (b) 含噪声的火焰结构图 (c) 降噪后的火焰结构图

图 3 降噪处理后再提取火焰图像的结构

Fig. 3 Extracting the structure of the flame image after noise reduction processing

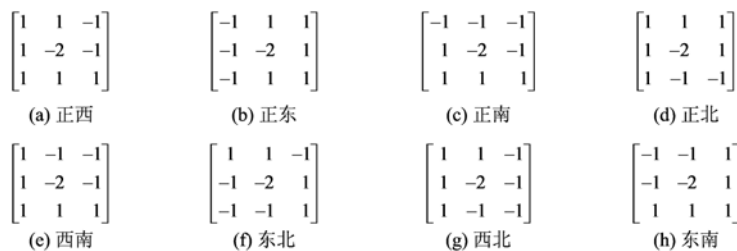


图 4 8 个 Prewitt 边缘检测算子模版

Fig. 4 Eight prewitt templates of edge detection operator

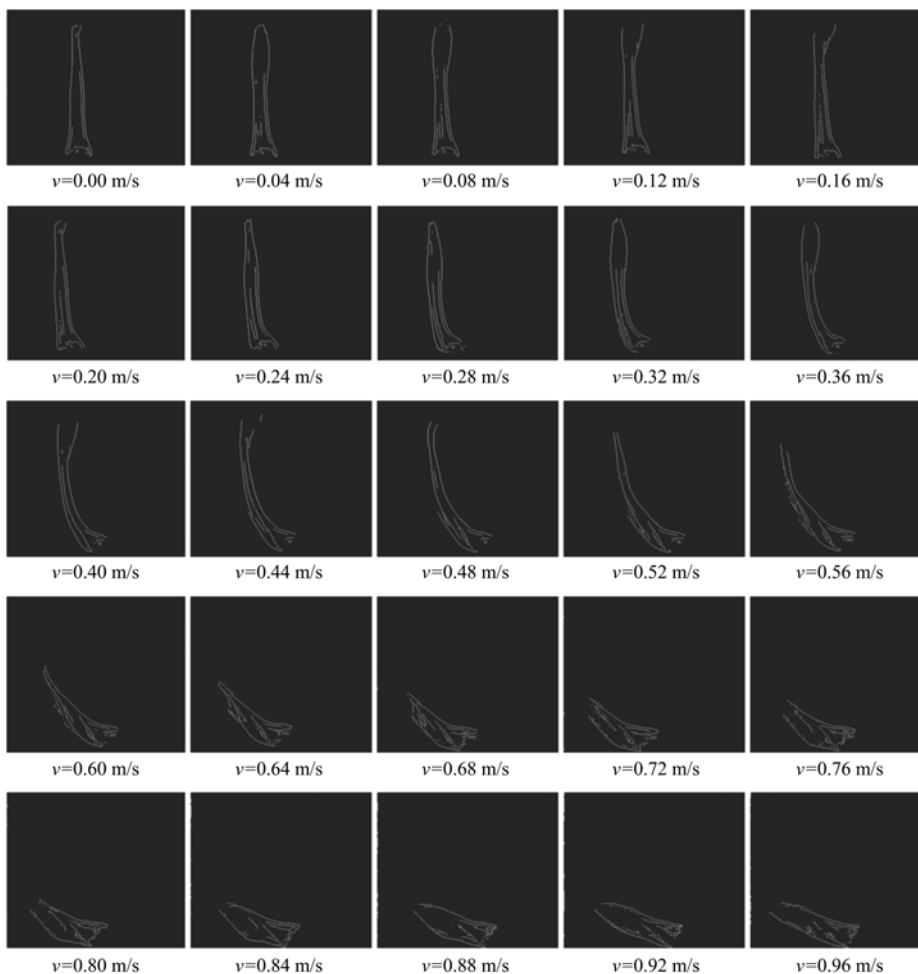


图 5 加速度  $a = 4 \text{ m/s}^2$  时, 经降噪后提取 25 个速度所对应的火焰图像结构

Fig. 5 25 flame structure images of different flame velocity after noise reduction processing when  $a = 4 \text{ m/s}^2$

焰图像结构图像。

### 3 火焰图像分形维数计算

#### 3.1 火焰图像转为矩阵数据

火焰图像是由大小为  $\sigma_s$  的点(像素点)组成. 首先把移动火源运动图像序列进行二值化处理, 使得图像上的每一个像素点为黑或白两种颜色. 图 6 为加速度  $a=4 \text{ m/s}^2$ 、速度  $v=0.64 \text{ m/s}$  时火焰图像中提取的局部区域二值化图. 用 Matlab 编写程序, 把二值化图像数据转化成一个矩阵数据, 其行列数分别对应于二值图的行列数, 而每一个数据取值 1 和 0, 白色矩阵对应的数据取 1, 黑色取 0. 图 7 为二值化的火焰局部区域图像对应的矩阵数据.



图 6 二值化的火焰局部区域图像

Fig. 6 The partial area of the flame binarized image

0 0 0 0	0 0 0 1	0 0 0 0	0 0 0 0
0 0 1 1	0 0 0 1	1 0 0 0	0 0 0 0
0 0 1 1	1 1 1 1	1 1 0 0	0 0 0 0
0 0 1 1	1 1 1 1	1 1 0 0	0 0 0 0
0 0 1 1	1 0 0 1	1 1 1 1	0 0 0 0
0 0 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 0 0 1
0 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 0 0
1 1 1 1	1 0 1 1	1 1 1 1	1 1 1 0
1 1 1 1	0 0 0 0	1 1 1 1	1 1 1 1
1 1 1 1	0 0 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1
0 1 1 0	0 0 0 1	1 1 1 0	0 0 1 1
0 0 0 0	0 0 0 1	1 1 1 1	0 0 0 0
0 0 0 0	0 0 0 1	1 1 1 1	0 0 0 0
0 0 0 0	0 0 0 0	0 1 0 0	0 0 0 0
0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
1 0 0 0	0 0 0 1	1 1 1 1	1 1 1 1

图 7 二值化的火焰局部区域图像对应的矩阵

Fig. 7 Matrix corresponding to the partial area of the flame binarized image

#### 3.2 火焰图像分形维数计算

计算图像分形维数的方法有计盒维数法、Pentland 法、Peleg 法、布朗随机场模型法等<sup>[19-20]</sup>, 以计盒维数法应用最为广泛. 本文采用计盒维数法中的像素点覆盖法估计移动火源扩散火焰的分形维数. 此方法是把 Matlab 处理后的火焰边缘二值化图像矩阵依次划分为若干块, 每一块的行数与列数均为  $r$ , 把包含“1”的块的个数记作  $N_r$ , 通常取  $r=1, 2, 3, 4, \dots, k$ , 即以 1 个、2 个…… $k$  个像素点的尺寸为边长作块的划分, 这样就可以得到盒子数  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$ . 在坐标系里, 以最小二乘法用直线拟合数据点  $(-\log r, \log N_r)$ , 所得到的直线的斜率  $D_s$  就是该图像的分形维数. 如图 8 所示, 用最小二乘法拟合出加速度  $a=4 \text{ m/s}^2$ 、速度  $v=0.52 \text{ m/s}$  时火焰图像的分形维数(含拟合误差分布图).

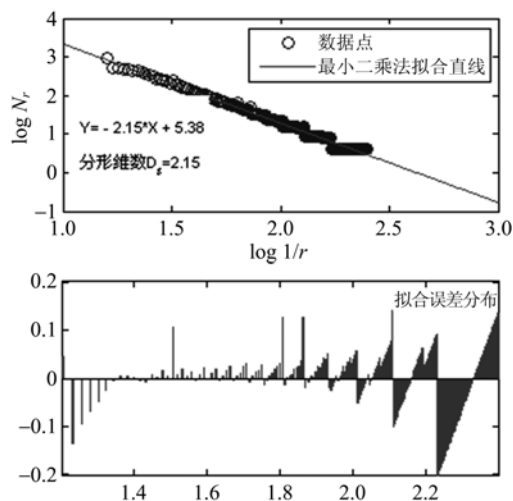


图 8 移动火源扩散火焰图像的分形维数

Fig. 8 Fitting curve of fractal dimension of the diffusion flame image of moving fire

### 4 结果与分析

图 9 为移动火源扩散火焰分形维数在加速度  $a=1, 2, 3, 4, 5 \text{ m/s}^2$  的条件下随速度的变化规律曲线.

(I) 从图 9 可以看到, 火源刚运动时, 火焰分形维数随速度的增加而增大, 而当移动火源运动速度达到一定值以后, 火焰的分形维数增大的幅度变缓慢. 综合图 9 中 5 条火焰分形维数随速度的变化曲线, 以火焰的分形维数首次达到 2.00 以上(进入非二维平面的曲面维)为临界值, 对于加速度  $a=1$ ,

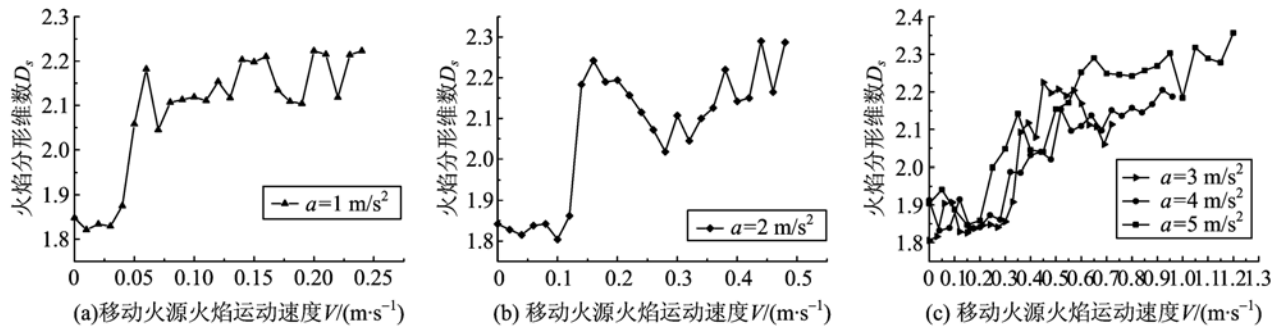


图 9 不同加速度条件下火焰分形维数随火焰速度的变化规律曲线

Fig. 9 variation curves of flame fractal dimension with the velocity for different acceleration conditions

2.3, 4, 5  $m/s^2$  的情况, 火焰分形维数临界值为 2.06, 2.18, 2.09, 2.03, 2.05, 此时移动火源的速度  $v=0.06, 0.16, 0.39, 0.44 m/s, 0.35 m/s$ . 这表明, 不同加速度的移动火源在速度较低的情况下都可达到大于 2.00 的分形维数, 即火焰面开始出现扭曲和褶皱. 移动火源运动速度增大到一定程度时, 火焰进入曲面维状态后, 不同加速度的火焰分形维数随速度在 2.02~2.36 范围内波动. 火焰分形维数之所以波动, 是因为燃烧加剧时, 火焰内外温度差较大造成浮升力<sup>[21]</sup>增加效果比较明显, 浮升力驱动高温气流的流动方向与燃料喷射燃烧的方向不一致, 形成不稳定的流场结构, 影响燃烧过程的稳定性. 当然也可能与燃烧火焰的本身脉动有关. 从图 9 中还可看出, 对于  $a=4 m/s^2$ 、速度在 0.40~0.96  $m/s$  范围的火焰分形维数平均值为 2.11; 对于  $a=5 m/s^2$ 、速度在 0.50~1.20  $m/s$  范围的火焰分形维数平均值为 2.26. 表明加速度和速度较大的工况下, 移动火源的分形维数上升的趋势较快, 即大的加速度和较大的速度会加剧移动火源扩散火焰锋面的褶皱、扭曲.

(II) 由图 9 看出, 加速度一定时, 随着火源速度的增加, 移动火源扩散火焰会出现分形维数大于 2.00 的情况, 即为非欧几里得平面概念的曲面维. 对于移动火源的加速度是  $a=5 m/s^2$  的情况, 移动火源处于低速 (0.05~0.30  $m/s$ ) 时, 火焰分形维数

较小, 范围在 1.85~1.98, 火焰并未出现曲面维状态; 而移动火源的速度在 0.35~1.25  $m/s$  时, 火源的分形维数值较大, 进入了曲面维状态, 在 2.04~2.36 范围内变化, 而后随速度增加趋于平稳. 这是因为在一定加速度条件下, 随着移动火源速度增加, 引起火焰周围局部气流变化, 即火源四周气流湍动加剧, 使更多的空气与燃料接触反应, 燃烧化学反应增强, 此阶段移动火源速度的增大是有利于火焰燃烧的, 这就进一步加剧移动火源扩散火焰锋面的褶皱和扭曲. 当移动火源速度继续增大到一定的限度时, 空气的扰动加快散热, 气流带走燃料反应中的热量, 减弱火焰燃烧反应, 即气流散热制约了大加速度和较大速度加剧火焰锋面的褶皱, 因此后一阶段的火焰分形维数并没有继续随速度增加而增大, 而是稳定在一定范围内.

(III) 表 1 为静止瞬间加速移动时火焰的分形维数以及该加速度下运动的最大分形维数. 静止瞬间加速移动时火焰分形维数的值比较低, 最小的为 1.80, 这是因为火焰静止时, 与周围气流没有相对运动, 附近气流对火焰的扰动较弱, 火焰锋面尚未发生严重的扭曲和破碎; 而当火源运动时, 会使燃烧火焰的分形维数有不同程度的增加, 最大可达 2.36, 这是因为随着加速度和速度增大, 火焰受到的空气阻力 (附近空气团对火焰锋面的黏性力) 增大, 火源四周气流湍动加剧, 火焰锋面受湍动气流团挤压, 形状

表 1 不同加速度下的移动火源火焰速度  $v=0.00 m/s$  的分形维数和运动过程中火焰分形维数最大值Tab. 1 Fractal dimension of moving fire when  $v=0.00 m/s$  and the maximum fractal dimension of flame during exercise for different acceleration conditions

	$a=1 m/s^2$	$a=2 m/s^2$	$a=3 m/s^2$	$a=4 m/s^2$	$a=5 m/s^2$
速度 $v=0.00 m/s$ 的分形维数	1.84	1.84	1.80	1.91	1.90
运动过程中分形维数的最大值	2.22	2.29	2.23	2.20	2.36

更为复杂,火焰锋面褶皱严重.说明移动火源与静止火源有一定的区别,可通过对比两者火焰的分形维数特征来加以识别.

## 5 结论

以匀加速直线运动情形下的移动火源扩散火焰为研究对象,从分形维数角度研究移动火源扩散火焰的结构特征,得到以下结论:

(I) 作匀加速直线运动下的移动火源扩散火焰具有分形结构特性,且无论是在加速度较低的工况下,还是在加速度较高的工况下,由静止瞬间加速移动时,火焰分形维数随速度的增加而增大,而当移动火源运动速度达到一定值以后,火焰的分形维数因气流散热制约了火焰锋面的褶皱,增大的幅度较为缓慢.

(II) 不同加速度的移动火源扩散火焰的分形维数变化规律具有相似性,但加速度和速度较大的移动火源,其分形维数在运动过程中上升的趋势较快,表明较大加速度和速度可影响移动火源扩散火焰燃烧.

(III) 火源静止时,附近气流没有对火焰产生相对运动,火焰锋面不存在严重的扭曲和破碎,其分形维数较低;火源运动时,由于火源四周气流湍动加剧,火焰锋面受湍动气流团挤压,形状更为复杂,火焰锋面褶皱严重,其分形维数较高.

### 参考文献(References)

- [1] Lou Bo, Ding Li, Long Xinfeng, et al. Mobile fire combustion experiment and numerical simulation during linear motion [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1 240-1 245.  
楼波,丁利,龙新峰,等.直线运动下移动火源燃烧实验和数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(3):1 240-1 245.
- [2] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [3] Gouldin F C. An application of fractals to modeling premixed turbulent flames [J]. Combustion and Flame, 1987, 68(3): 249-266.
- [4] Smallwood G J, Gulder O L, Snelling D R. Characterization of flame front surfaces in turbulent premixed methane-Air combustion [J]. Combustion and Flame, 1995, 101(4): 461-470.
- [5] Cintosun E, Smallwood G J, Gulder O L. Flame surface fractal characteristics in premixed turbulent combustion at high turbulence intensities [J]. AIAA Journal, 2007, 45(1): 2 785-2 789.
- [6] Chen Y C, Mansour M S. Geometric interpretation of fractal parameters measured in turbulent premixed Bunsen Flames [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27(4): 409-416.
- [7] Jiang Deming, Ma Fanhua, Yang Di. The fractal nature of turbulent premixed flame structure [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 1999, 33(2): 22-24.  
蒋德明,马凡华,杨迪.预混湍流火焰结构的分形特征[J].西安交通大学学报,1999,33(2):22-24.
- [8] Jiang Deming, Ma Fanhua, Yan Xiaojun. The experiment study on premixed turbulent combustion [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1999, 20(1): 1-5.  
蒋德明,马凡华,阎小俊.预混湍流燃烧的实验研究[J].内燃机工程,1999,20(1):1-5.
- [9] Hu Yi, Liao Shiyong, Jiang Deming. Fractal nature of turbulent premixed flame [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(1): 1-3.  
胡毅,廖世勇,蒋德明.湍流预混火焰的分形特性[J].内燃机工程,2004,25(1):1-3.
- [10] Yang Hongmin, Gu Fan, Liu Yong, et al. The investigation on fractal model of the propagating speed of turbulent premixed flame [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(4): 507-510.  
杨宏旻,顾幡,刘勇,等.湍流预混火焰传播速度的分形模型研究[J].工程热物理学报,2001,22(4): 507-510.
- [11] Yang Hongmin, Tang Xiaojun, Liu Yong, et al. Investigation on structure of premixed turbulent flame based on measure fractal theory [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1998, 4(1): 75-80.  
杨宏旻,唐晓军,刘勇,等.湍流预混火焰结构的测度分型研究[J].燃烧科学与技术,1998,4(1):75-80.
- [12] 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.  
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.
- [13] Lou Bo, Xu Yi, Lin Zhengguan. Image characteristic analysis of moving fire diffusion flame in circular motion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(1): 60-66.  
楼波,徐毅,林振冠.圆周运动下移动火源扩散火焰的

- 图像特征分析[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(1): 60-66.
- [14] Yan Bing, Wang Jinhe, Zhao Jing, et al. Research of image de-noising technology based on mean filtering and wavelet transformation[J]. Computer Technology and Development, 2011, 21(2): 51-53.  
颜兵, 王金鹤, 赵静, 等. 基于均值滤波和小波变换的图像去噪技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 51-53.
- [15] Chang Ruina, Mu Xiaomin, Yang Shouyi, et al. Adaptive weighted average filtering algorithm based on medium value[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(16): 4 257-4 259.  
常瑞娜, 穆晓敏, 杨守义, 等. 基于中值的自适应均值滤波算法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(16): 4 257-4 259.
- [16] Van De Ville D, Nachtgael M, Van der Weken D, et al. Noise Reduction by Fuzzy Image Filtering [J]. IEEE Transactions on fuzzy systems, 2003, 11(4): 429-436.
- [17] Kang Mu, Xu Qinggong. Adaptive edge-detection method based on Prewitt algorithm [J]. Application Research of Computers, 2009, 26(6): 2 383-2 386.  
康牧, 许庆功. 基于 Prewitt 理论的自适应边缘检测算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(6): 2 383-2 386.
- [18] Bao Guanjun, Ji Shiming, Zhang Li, et al. An image-segment algorithm based on Prewitt method and its applications [J]. Computer Engineering and Design, 2003, 24(3): 7-9.  
鲍官军, 计时鸣, 张利, 等. 基于 Prewitt 算法的图像分割法及其应用[J]. 计算机工程与设计, 2003, 24(3): 7-9.
- [19] Dong Yuan, Hu Guangrui. Technology of counting image fractal dimension [J]. Computer Applications and Software, 2001, 18(1): 61-64.  
董远, 胡光锐. 图像分形维数计算技术[J]. 计算机应用与软件, 2001, 18(1): 61-64.
- [20] Feng Zhigang, Zhou Hongwei. Computing method of fractal dimension of image and its application [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2001, 22(6): 92-95.  
冯志刚, 周宏伟. 图像的分形维数计算方法及其应用[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2001, 22(6): 92-95.
- [21] Wu Jinxiang, Wang Enyu, Liu Liansheng, et al. Influence of volume force field on the premixed flame shapes [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(6): 535-538.  
吴晋湘, 王恩宇, 刘联胜, 等. 体积力场对预混火焰面形状的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(6): 535-538.