

直线移动火源扩散火焰加速运动下的倾角特性

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: 利用高速摄像实时获得匀加速直线运动下移动火源扩散火焰的图像序列, 结合数字图像处理 and 力场分析研究火焰倾角受速度、加速度影响的变化规律。研究表明: 处于非惯性系的火焰倾角增加规律经历 3 个不同速率的变化阶段; 处于非惯性系的火焰倾角与火焰合力倾角并不是在同一方向上, 火焰合力倾角要先于火焰倾角发生偏移, 二者之间存在夹角, 且大加速度工况下夹角大, 随着速度增加, 空气阻力增加, 夹角减小, 火焰倾角与火焰合力倾角同时趋近 90° 。

关键词: 移动火源; 火焰倾角; 火焰力场; 惯性力

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2015)07-2707-06

Inclination characteristic of diffusion flame of moving fire on linear acceleration motion

LOU Bo, XU Jianhong, LIN Zhenguan, XU Yi

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

Abstract: The image series of the diffusion flame of moving fire on acceleration motion were acquired by using high-speed video camera and the flame inclination characteristic was studied. The results show that flame inclination increase undergoes three stages of changing velocity in non-inertial system. It is not in same direction between flame resultant and flame inclination. In non-inertial system, the flame resultant angle shifts first to the flame inclination and forms an intersection angle. Moreover, the higher acceleration flame is, the more sluggish flame inclination will be. With the increase of flame speed, the air resistance increases and the intersection angle decreases, and the flame resultant angle and the flame inclination finally approach to 90° .

Key words: moving fire; flame inclination; flame force field; inertial force

图像摄像机结合数字图像处理技术是研究燃烧火焰特征的有效方法^[1-7]。Fan 等^[1]利用高速摄像机捕获了火焰在热中尺度石英玻璃制成的径向通道的燃烧动态过程, 分析了非对称火焰的燃烧特征。白卫东等^[4-5]通过对火焰图像处理提取了火焰亮度、质心偏移距离和圆形度等特征量, 借用状态判断算法对火焰进行识

别和检测。吴晋湘等^[6]利用实时摄像的方法分析了不同转速和气流射流角产生离心力和科氏力对火焰结构的实验影响。蒋晓刚等^[7]通过实验对人工扰流条件下的丁烷射流燃烧形成的火焰倾角进行实例分析, 探讨空气扰流速度变化对火焰倾角的影响。但目前国内外学者对移动火源扩散火焰^[8-10]的基础研究较少, 仍未

收稿日期: 2014-07-19; 修回日期: 2014-10-13

基金项目(Foundation item): 广东省自然科学基金资助项目(S2013010016748); 广东省能源高效清洁利用重点实验室项目(KLB10004) (Project(2008A060301002) supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China; Project(KLB10004) supported by Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization of Guangdong Province, China)

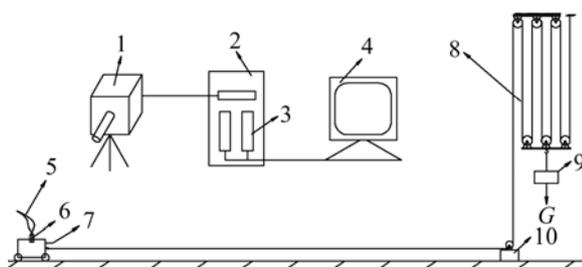
通信作者: 楼波, 博士, 副教授, 从事燃烧理论与应用研究: E-mail: loubo@scut.edu.cn

很清楚了解移动火源扩散火焰的内在本质和燃烧机理, 本文作者通过分析运动速度和力场对火焰形态的影响规律, 为进一步认识移动火源下火焰特性提供一定依据。与静止的火焰不同, 移动火源是指着火时火源点处于运动状态。随着各种交通工具的增多及其速度的加快, 表面起火(移动火源扩散火焰)发生的机率也在增加。Lou 等^[8-10]在移动火源扩散火焰前期研究工作中, 对圆周运动下和直线匀速运动下移动火源进行描述并通过实验揭示周围气流变化对蜡烛扩散火焰影响的规律。本文作者利用无限大空间匀加速直线运动火源燃烧实验平台和美国柯达公司 Motion Corder Analyzer 高速摄像仪对移动火源扩散火焰进行拍摄和记录, 研究其加速运动下的倾角特性。

1 实验

1.1 实验系统和方法

图 1 所示为匀加速直线移动火源扩散火焰实验系统图, 灯芯固定在滑道小车上, 小车由绳子牵引, 绳子的另一端经过定滑轮和滑轮组, 通过砝码提供动力(图上重物), 使小车做匀加速直线运动。通过调节高速摄像仪与火源距离, 确保能拍摄火源清晰图像。拍摄火源从静止开始移动的整个过程。试验中, 通过改变砝码的质量来改变加速度。在滑道上确定一段拍摄范围, 设置摄像仪拍摄频率, 本实验图像拍摄帧数设置为 500 帧/s, 根据图像的张数和位置确定火源的速度和加速度。本文研究火源速度范围为 0.012~1.560 m/s, 加速度分别为 2.5, 3.6, 5.4 和 6.5 m/s², 探讨了火源运动状态火焰倾角的变化。



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示意图

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

1.2 实验图像

实验中获取了加速度分别为 2.5, 3.6, 5.4 和 6.5 m/s² 的移动火源扩散火焰图像。图 2 所示为加速度为 5.4 m/s², 速度范围为 0.054~1.350 m/s 的移动火源扩散火焰匀加速直线运动图像序列。该序列是从拍摄图像的原始序列中每隔 4 张取出 1 张, 共取 25 张, 相邻两张的间隔时间为 0.01 s, 便于计算火焰倾角。

由图 2 可见: 速度从 0.054 m/s 增加到 0.162 m/s 时, 火焰面基本呈圆柱状形, 火焰逐渐发生偏移, 但较为平缓; 速度从 0.216 m/s 增加到 1.080 m/s 时, 火焰外形变化明显, 偏移程度加快; 而速度从 1.134 m/s 增加到 1.350 m/s 时, 火焰倾斜形态变化较为平缓, 基本与水平方向平行。

2 实验结果分析

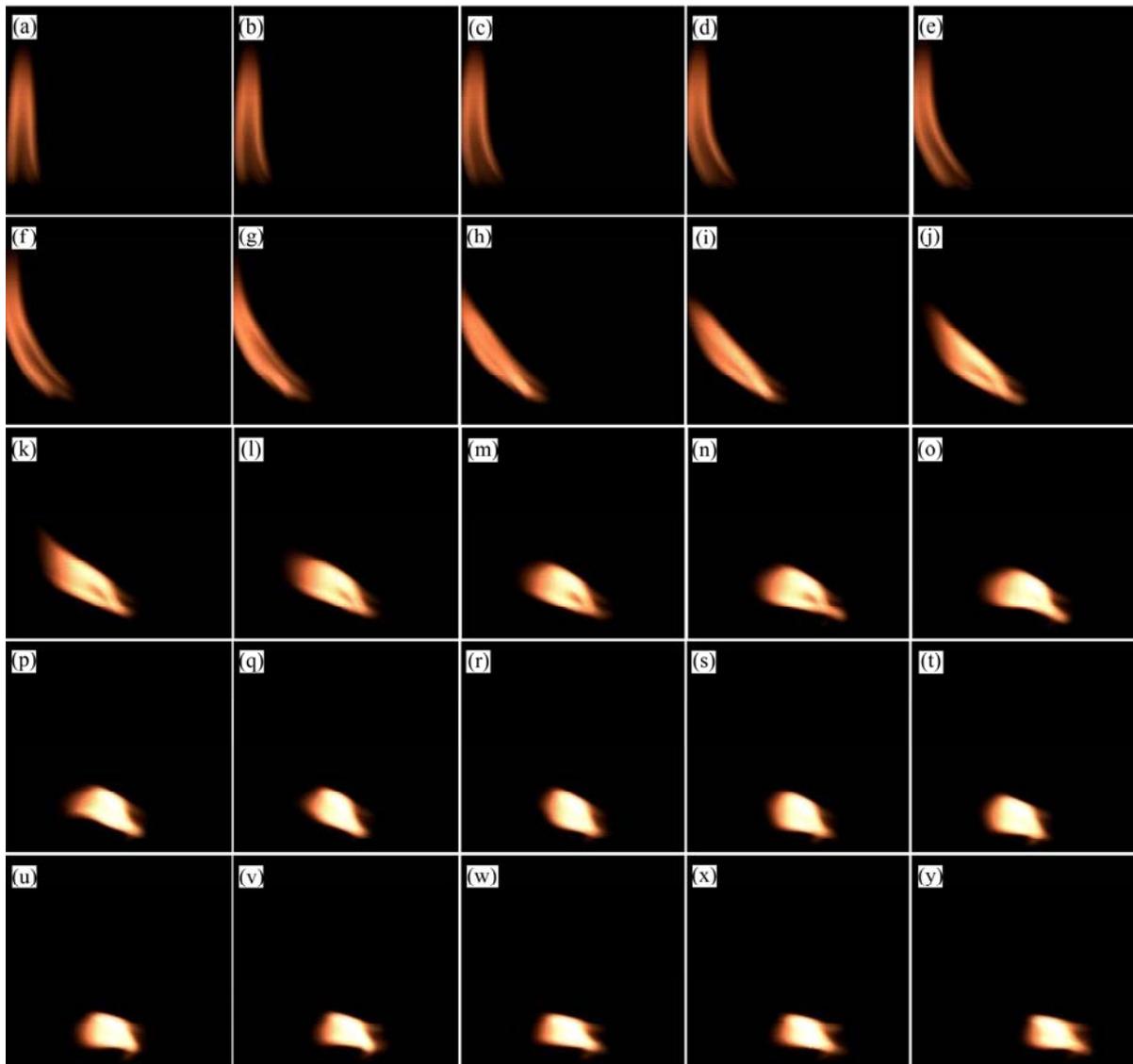
2.1 火焰倾角

火焰在力场的作用下会产生一定的倾角, 楼波等^[8]曾用火焰顶点和底边中点连线直观表示圆周运动的火焰倾斜角度。但直线加速运动时, 火焰受惯性力作用, 火焰弯曲较大, 边缘形状不规则, 无法用直线法确定火焰偏转角度。本文火焰倾角 α 定义为: 火焰区域图像质心 O 与火焰根部中点 O' 的连线, 该连线和垂直方向的夹角即为火焰倾角, 其中火焰根部中点 O' 是火焰根部 A 点与 B 点之间线段的中点, 倾角定义示意图 3(b) 所示。文中通过 matlab 编程对拍摄火焰图片用最大类间方差法^[11-12]迭代出二值化图像并进行边缘提取, 确定和标记火焰质心和火焰根部中点, 后使用 E-Ruler 电子测算角度工具测量并记录火焰倾角。图像质心坐标^[13-14]求解公式如下:

$$x_c = \frac{\sum_{y=y_c}^{y_c} \sum_{x=x_c}^{x_c} xg(x,y)}{\sum_{y=y_c}^{y_c} \sum_{x=x_c}^{x_c} g(x,y)}$$

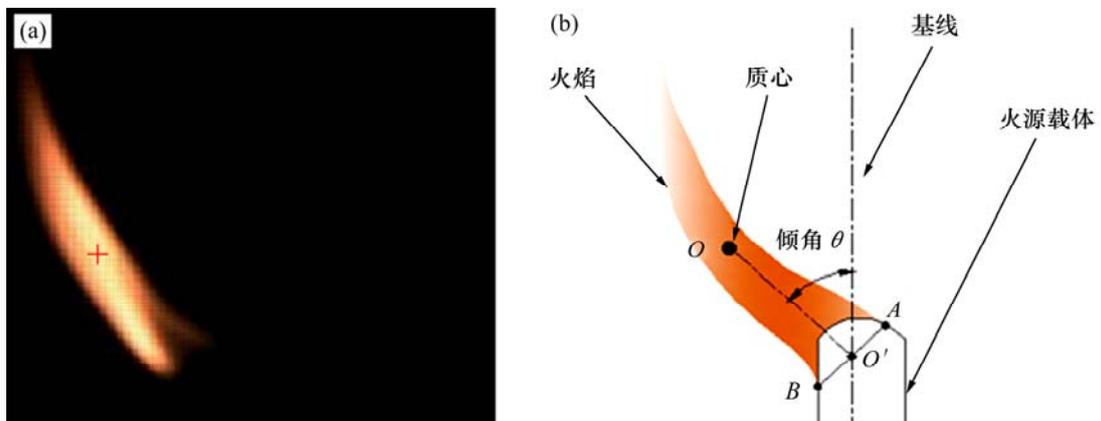
$$y_c = \frac{\sum_{y=y_c}^{y_c} \sum_{x=x_c}^{x_c} yg(x,y)}{\sum_{y=y_c}^{y_c} \sum_{x=x_c}^{x_c} g(x,y)}$$

其中: x 和 y 为火焰图片任意点坐标; x_c 和 y_c 为火焰质心坐标; $g(x,y)$ 是二值函数, $g(x,y)=1 (x,y) \in$ 特征区域, $g(x,y)=0 (x,y) \in$ 背景。火焰质心和倾角示意图如图 3 所示。



$v/(m \cdot s^{-1})$: (a) 0.054; (b) 0.108; (c) 0.162; (d) 0.216; (e) 0.270; (f) 0.324; (g) 0.378; (h) 0.432; (i) 0.486; (j) 0.540; (k) 0.594; (l) 0.648; (m) 0.702; (n) 0.756; (o) 0.810; (p) 0.864; (q) 0.918; (r) 0.972; (s) 1.026; (t) 1.080; (u) 1.134; (v) 1.188; (w) 1.242; (x) 1.296; (y) 1.350

图 2 加速度 $a=5.4 \text{ m/s}^2$ 时, 25 个速度所对应的火焰图像
 Fig. 2 25 images of different flame velocity when $a=5.4 \text{ m/s}^2$



(a) 火焰质心图(“+”为火焰质心标记); (b) 火焰倾角定义示意图

图 3 火焰质心和倾角示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of flame centroid and flame inclination

图 4 所示为移动火源在加速度 2.5, 3.6, 5.4 和 6.5 m/s^2 时火焰倾角随速度的变化曲线。由图 4 可知: 火焰倾角变化规律经历 3 个阶段, 特别在加速度高时 ($a=6.5 m/s^2$) 更加明显: 1) 第 1 阶段, 当火源运动速度较低, 火焰倾角变化趋势较快, 如加速度 $a=6.5 m/s^2$ 的工况, 火源速度从 0.06 m/s 增加到 0.65 m/s , 火焰倾角则从 3° 增大到 61° 。2) 第 2 阶段, 火焰倾角变化趋势较第 1 阶段慢, 增加速率降低, 火源速度从 0.71

m/s 增加到 1.1 m/s , 火焰倾角则从 65° 增大到 86° 。3) 第 3 阶段, 此时空气阻力进一步增大, 但火焰倾角并没有继续快速增加, 而是趋于平缓, 火源速度从 1.23 m/s 增加到 1.56 m/s , 火焰倾角接近 90° 。

2.2 火焰力场对倾角的影响

在一个非惯性系中, 当系统存在一加速度 a 时, 则惯性力 F_G 遵循公式: $F_G = -ma$, 负号表示与系统运动方向相反。处于加速度运动状态的火源主要受到 3 个力的作用, 分别是火焰自身重力 F_g , 火焰浮力 F_f , 火焰移动产生的与空气之间的空气阻力 F_z , 由加速度引起的惯性力 F_G 。图 5 所示是加速度为 $3.6 m/s^2$ 下速度分别为 0.14, 0.54 和 1.26 m/s 的火焰受力分析示意图。

当速度为 0.14 m/s 时, 火焰刚从静止开始, 因其速度小, 阻力较小, 相对而言, 作用在火焰的浮力和惯性力较大, 火焰受到合力指向左上方, 火焰倾角较小(倾角 18° , 见图 4, 因火源加速运动速度时刻变化, 火焰受到合力倾角往往大于火焰倾角)。当速度为 0.46 m/s 时, 速度增大, 阻力增大, 火焰合力逆时针偏移, 火焰倾角增大。速度继续增加到 1.26 m/s , 火焰倾角在合力作用下继续增大, 这时空气阻力在火焰的力场中占据主导地位。浮力和惯性力退居其次, 即在火焰高速运动工况下, 火焰的合力可近似看作是火焰所受到的空气阻力, 故使火焰往水平方向偏移, 偏角接近 90° 。

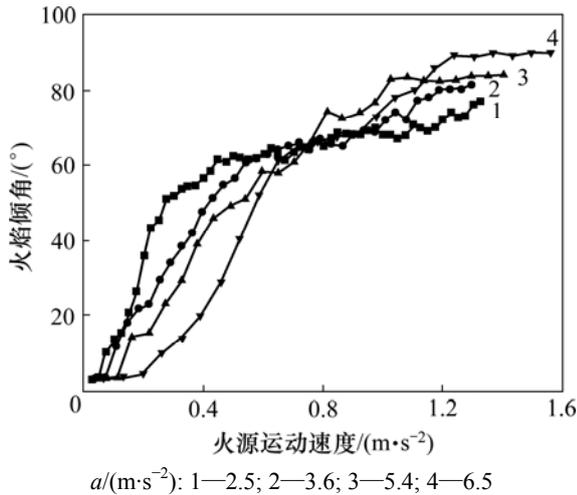


图 4 火焰倾角随速度和加速度变化曲线

Fig. 4 Flame inclination variation curves with velocity and acceleration

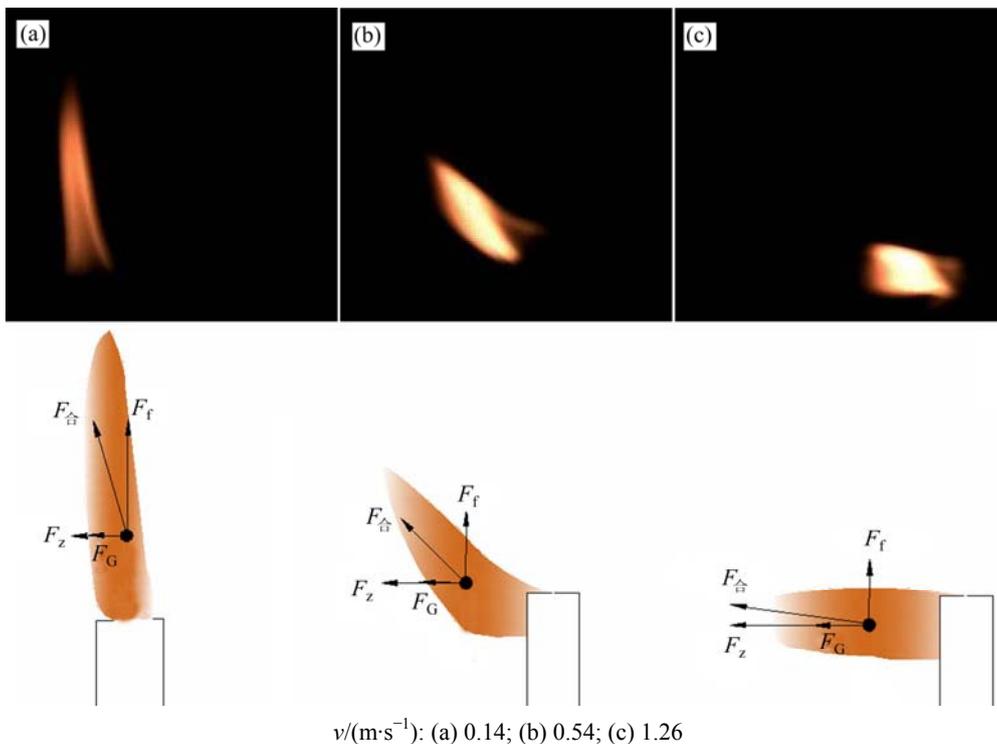
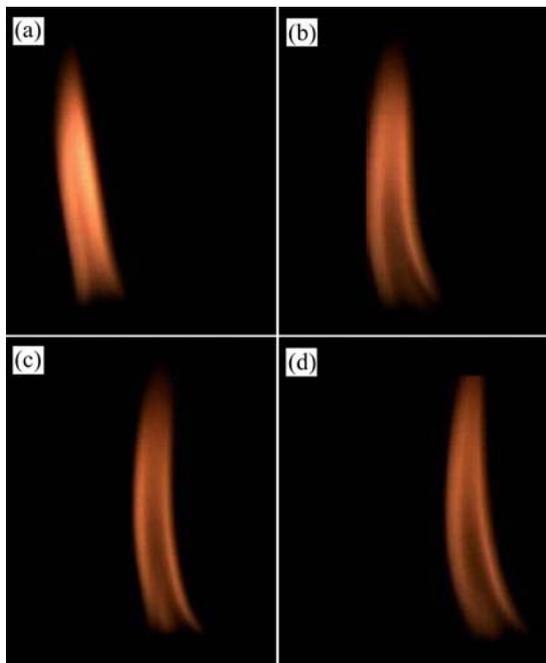


图 5 加速度为 $3.6 m/s^2$ 时不同速度的火焰受力分析示意图

Fig. 5 Flame force analysis at different velocities when $a=3.6 m/s^2$

2.3 惯性力对火焰倾角的影响

火源载体以加速度 a 开始运动的一瞬间, 由于速度近乎为零, 火焰在水平面上空气阻力非常小, 主要受惯性力作用, 方向与火源载体运动方向相反。图 6 所示是 $t=0.04\text{ s}$, 加速度分别为 $2.5, 3.6, 5.4$ 和 6.5 m/s^2 的火焰开始运动的一瞬间倾斜形态, 在同一速度下, 加速度越小的火焰在开始运动的一瞬间, 所受的惯性力则越小, 火焰上下形态整体偏移均匀, 偏移角度较大。加速度大的火焰在开始运动的一瞬间, 所受的水平向左的惯性力也越大, 导致火焰下部部分移动, 而中上部区域未开始发生偏移, 整个火焰质心偏离不大, 即大加速度工况下的火焰倾角发生偏移较迟滞。图 4 中火焰倾角随速度和加速度变化曲线的初始运动阶段正是反映了这种规律。



$a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$: (a) 2.5; (b) 3.6; (c) 5.4; (d) 6.5

图 6 $t=0.04\text{ s}$ 时不同加速度的火焰倾斜形态

Fig. 6 Flame tilted form of different accelerations when $t=0.04\text{ s}$

2.4 火焰合力倾角

火焰载体做匀速直线运动, 火焰所受的合力与火焰倾角在同一方向上, 这时火焰合力倾角和火焰倾角保持一致。而本文研究的非惯性系的匀加速直线运动中, 火焰倾角与火焰合力倾角并不是在同一方向上, 火焰合力倾角要先于火焰倾角发生偏移, 两者之间的夹角记为 γ , 如图 7 所示。在图 4 中, 例如对加速度 $a=6.5\text{ m/s}^2$ 的倾角特性曲线, 大加速度下水平方向惯性力大, 合力倾角 α 较大, 但这时火焰下部移动较快,

中上部基本不动, 整个火焰质心偏离不大, 火焰倾角 β 较小, 两者之间的夹角 γ 较大。随着运动进行, 到第 2 阶段, 在加速度大的工况下, 惯性力使火焰图像倾角快速增加, 很快赶上并超过加速度小的工况下的火焰倾角。第 3 阶段由于速度较快, 空气阻力起决定作用, 惯性力的影响减弱, 合力与火焰倾角之间的夹角 γ 减小并趋近于 0° , 最后的火焰偏角接近并稳定在 90° 位置。

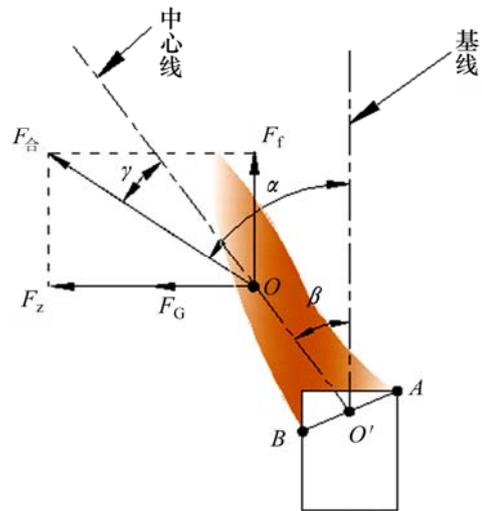


图 7 火焰合力倾角 α 、火焰倾角 β 和合力与火焰倾角之间的夹角 γ 的示意图

Fig. 7 Sketch map of joint flame resultant angle α , flame inclination β and intersection angle γ

3 误差分析

本研究的火焰倾角是通过实验平台和高速摄像机得到火焰图像, 然后在 MATLAB 软件编程获取火焰图像的质心和倾角。但是在火焰图像的采集和处理的过程中, 由于火焰载体的速度、拍摄角度、现场气流干扰、火焰图像预处理等因素的影响, 实测数据存在误差。

3.1 系统误差

方法误差主要包括: 1) 拍摄的图像是二维且垂直于水平面的, 高速摄像机固定于某一位置, 火焰运动发生位移时, 镜头轴线并不总是垂直于火焰, 因此拍摄到的图像是火焰面在拍摄平面上的投影, 比实际火焰倾斜形态小些。2) 最大类间方差法迭代出二值化图像分割阈值会影响获取的火焰二值化图像, MATLAB 软件环境下计算出的火焰倾角, 计算出的火焰倾角与真实火焰倾角相比, 会存在误差。

3.2 随机误差

摄取火焰运动图像序列的现场是大空间封闭的环境,但也可能出现气流干扰,影响到火焰燃烧的正常形态,导致高速摄像机输出的火焰图像可能出现随机误差。因此,在实验中,一方面尽量减少干扰气流的存在;另一方面,通过增加实验次数取平均值消除随机误差。

4 结论

1) 火焰倾角变化规律经历 3 个阶段:第 1 阶段,火源速度从 0.06 m/s 增加到 0.65 m/s,火焰倾角则从 3° 增大到 61° ,火焰倾角变化趋势较快;第 2 阶段,火源速度从 0.71 m/s 增加到 1.1 m/s,火焰倾角则从 65° 增大到 86° ,火焰倾角变化趋势变为平缓;第 3 阶段,当火焰速度达到高速度 1.56 m/s 以后,火焰倾角逐渐接近或等于 90° 。在加速度大的工况下,火焰倾角第 1 阶段滞后,第 2 和第 3 阶段增速明显。

2) 处于非惯性系的火焰倾角与火焰合力倾角并不是在同一方向上,火焰合力倾角大于火焰倾角,两者之间存在夹角。速度小时惯性力作用显著,夹角较大,而速度大时阻力起决定作用;夹角减小,火焰倾角与火焰合力倾角同时趋近 90° 。

参考文献:

- [1] Fan A W, Wan J L, Maruta K, et al. Flame dynamics in a heated meso-scale radial channel[J]. Proceedings of Combustion Institute, 2013, 34: 3351-3359.
- [2] Fan A W, Minaev S, Kumar S, et al. Experimental investigation on flame pattern formations of DME-air mixtures in a radial microchannel[J]. Combustion and Flame, 2010, 157: 1637-1642.
- [3] Fan A W, Minaev S, Kumar S, et al. Regime diagrams and characteristics of flame patterns in radial microchannels with temperature gradients[J]. Combustion and Flame, 2008, 153: 479-489.
- [4] 白卫东, 严建华, 马增益, 等. 基于支持向量机的火焰状态识别方法[J]. 动力工程, 2004, 24(4): 548-551.
BAI Weidong, YAN Jianhua, MA Zengyi, et al. Method of flame identification based on support vector machine[J]. Power Engineering, 2004, 24(4): 548-551
- [5] 段悦, 袁昌明. 火灾探测中动态火焰的数字图像处理[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(1): 55-58.
DUAN Yue, YUAN Changming. Digital image processing of dynamical flame in fire detection[J]. Journal of China University of Metrology, 2009, 20(1): 55-58.
- [6] 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.

- 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.
- [7] 蒋晓刚, 金良安, 迟卫, 等. 人工扰流条件下喷射火焰的倾角计算[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(11): 987-990.
JING Xiaogang, JIN Liangan, CHI Wei, et al. Calculative method for oblique angle of ejecting flame interfered by man-made jet flow[J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(11): 987-990.
- [8] 楼波, 徐毅, 林振冠. 圆周运动下移动火源扩散火焰的图像特性分析[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(1): 60-66.
LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan. Images characteristic analysis of moving fire diffusion flame in circular motion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(1): 60-66.
- [9] 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): 1240-1245.
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): 1240-1245.
- [10] 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.
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.
- [11] 齐丽娜, 张博, 王战凯. 最大类间方差法在图像处理中的应用[J]. 无线电工程, 2006, 36(7): 25-26.
QI Lina, ZHANG Bo, WANG Zhankai. Application of the OTSU method in image processing[J]. Radio Engineering of China, 2006, 36(7): 25-26.
- [12] 王磊, 段会川. Otsu 方法在多阈值图像分割中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(11): 2844-2845.
WANG Lei, DUAN Huichuan. Application of Otsu' method in multi-threshold image segmentation[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(11): 2844-2845.
- [13] 白卫东, 严建华, 池涌, 等. PCA 和 SVM 在火焰监测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 186-191.
BAI Weidong, YAN Jianhua, CHI Yong, et al. A research on application of PCA and SVM to flame monitoring[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 186-191.
- [14] 方舟, 张君安. 基于小波分析实现图像重心位移的检测[J]. 空军工程大学学报, 2004, 5(6): 1009-3516.
FANG Zhou, ZHANG Junan. Based on wavelet analysis to realize the image center of gravity displacement detection[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2004, 5(6): 1009-3516.

(编辑 杨幼平)