

# 基于二氧化碳红外热成像的火焰起升高度分析

胡宗杰<sup>1</sup>, 张骏捷<sup>1</sup>, 龚慧峰<sup>1</sup>, 李理光<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 中德学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于 CO<sub>2</sub> 红外热成像方法拍摄了可控活化热氛围下的正庚烷液滴群预混射流火焰, 测量了火焰起升高度, 研究了热氛围协流温度、液滴群预混当量比、液滴群射流速度 3 个因素对起升高度的影响规律。结果表明: 射流火焰起升高度主要受到化学着火延迟期控制, 起升高度随着协流温度的升高而降低, 但当协流温度足够高时, 起升高度几乎不再变化; 当量比增大会使物理着火延迟期缩短, 从而使火焰起升高度降低; 在相同的当量比下, 如果协流温度较低, 射流出口速度增加会提高火焰起升高度, 而当协流温度高于某临界温度后, 加大射流出口速度却会降低火焰起升高度。

**关键词:** 红外热成像; 正庚烷; 液滴群; 火焰起升高度; 着火延迟期

中图分类号: TK316

文献标志码: A

## Analysis of Premixed Jet Flame Lift-Off Height of Droplet Streams Based on CO<sub>2</sub> Infrared Thermal Imaging

HU Zongjie<sup>1</sup>, ZHANG Junjie<sup>1</sup>, GONG Hui Feng<sup>1</sup>, LI Liguang<sup>1,2</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Chinesisch-Deutsches Hochschulkolleg, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The CO<sub>2</sub> infrared thermal imaging technology was used to capture the premixed n-heptane droplet stream jet flames in a controllable active thermo-atmosphere. The flame lift-off heights were measured by developing an in-house picture processing code. The effects of co-flow temperature, premixed equivalence ratio and jet velocity were studied. The experimental results showed that the lift-off height of jet flame was mainly controlled by chemical ignition delay, the flame height decreased with the increase of co-flow temperature. Besides, when the co-flow temperature was high enough, the lift-off height almost did not further

decrease. The increasing equivalence ratio shortened the physical ignition delay, making the lift-off height decrease. When the equivalence ratio was fixed, there existed a critical co-flow temperature. Increasing the jet velocity could improve the lift-off height when the co-flow temperatures were lower than the critical value. But the lift-off height would decrease when the co-flow temperature is higher than the critical values.

**Key words:** infrared thermal imaging; n-heptane; premixed jet flame of droplet streams; flame lift-off height; ignition delay

为实现高效、清洁燃烧, 液体燃料需要经过雾化、蒸发, 并与空气充分混合, 这一系列过程都对液体燃料燃烧有重要影响<sup>[1]</sup>。对液体燃料, 无论采用何种雾化方式, 都是使燃油形成射流, 通过增强液流与气流的相对运动, 使射流产生不稳定, 导致破碎雾化成液滴群进行燃烧的<sup>[2]</sup>。因此, 液滴群燃烧的基础研究有重要科学意义和工程指导价值, 也是分析更为复杂火焰和燃烧的必要前提。

Jenny 等<sup>[3]</sup>指出液滴群的燃烧过程中存在液滴湍流弥散、蒸发混合、燃烧化学反应和自燃等现象, 而且与湍流场相互作用, 多种因素紧密耦合。火焰的起升高度表征了射流持续燃烧的稳定位置, 是火焰的重要表征参数之一, 对指导燃烧系统设计也具有重要价值。O'Loughlin 等<sup>[4-5]</sup>采用超声雾化和载气输运技术制成液滴群射流, 将其引入协流燃烧器的热氛围中, 使用普通数码相机拍摄了正己烷、正庚烷和丙酮液滴群射流自燃情况和火焰起升高度。龚慧峰等<sup>[6]</sup>利用数码相机拍摄正庚烷液滴流火焰, 获得了火焰起升高度、火焰高度和宽度等参数的变化规律; 但由于液滴群预混射流火焰基部温度较低, 其发

收稿日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51106113)

第一作者: 胡宗杰(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为液滴群射流蒸发与燃烧。

E-mail: zongjie-hu@tongji.edu.cn

通信作者: 李理光(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制。E-mail: liguang@tongji.edu.cn



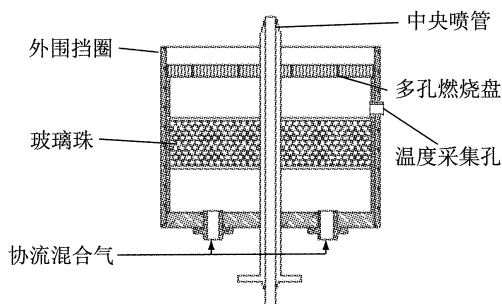
图 2 可控热氛围燃烧器示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 2 Controllable active thermo-atmosphere combustor 所示.

本文采用空气与氢气的预混合气作为协流混合

表 2 红外热像仪主要技术参数

Tab. 2 Main parameters of thermal infrared camera

| 红外探测器材质   | 探测器光谱响应范围/ $\mu\text{m}$ | 探测器像素分辨率 | 探测器像元间距/ $\mu\text{m}$ | 噪声等效温差 (NETD)/mK | 拍摄帧频/Hz                               | 积分时间/ $\mu\text{s}$ |
|-----------|--------------------------|----------|------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------|
| MCT (碲镉汞) | 2.5~5.0                  | 640×512  | 15                     | 20               | 115(640×512 分辨率)~<br>1 870(132×3 分辨率) | 10~70 000           |

本文选择 $(3.99 \pm 0.02) \mu\text{m}$ 的窄带滤片,记录火焰面内  $\text{CO}_2$  的红外辐射,积分时间(类似于曝光时间)为  $95 \mu\text{s}$ ,采样频率为 220 Hz. 每个工况连续采样 8 s,获得 1 760 张红外图像,部分典型原始单帧图片如图 3a 所示. 对每个工况获得的所有图片灰度值进行算术平均处理,可得到火焰平均辐射强度图片如图 3b 所示.

从图 3a 可以看出,利用本文的制冷型高速红外热像仪,可以采用极短的积分时间( $95 \mu\text{s}$ ),就能够有效捕捉到射流火焰的瞬态结构特征. 本文重点研究液滴群射流火焰的稳态特征及其影响因素. 因此,利用平均后的图像来分析火焰的起升高度.

#### 1.4 火焰起升高度提取方法

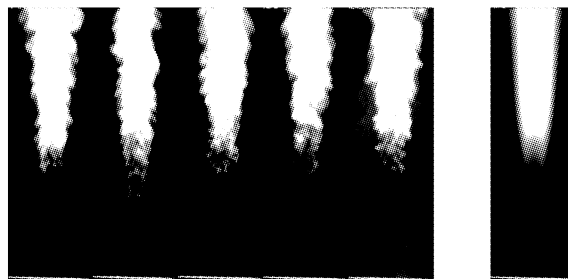
图 4 为  $U_0 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\Phi = 4.0$  时,不同协流温度( $T_c$ )下的火焰平均红外图像. 由于火焰图像的灰度值与其辐射强度呈正相关,本文通过设定灰度阈

气,在多孔燃烧盘上方点燃协流混合气,可以形成数千个均匀平坦的小火焰,从而在多孔燃烧盘上方形成低速流动的高温协流场. 通过调节氢气和空气的流量配比可以获得  $500 \sim 1\,500 \text{ K}$  稳定的热协流,并保证协流中仍含有大量氧气,为液滴群射流燃烧提供充足的氧化剂. 外围挡圈能够减小外界对协流小火焰的影响,使协流温度的波动范围不超过  $2 \text{ K}$ <sup>[14]</sup>.

#### 1.3 火焰热成像

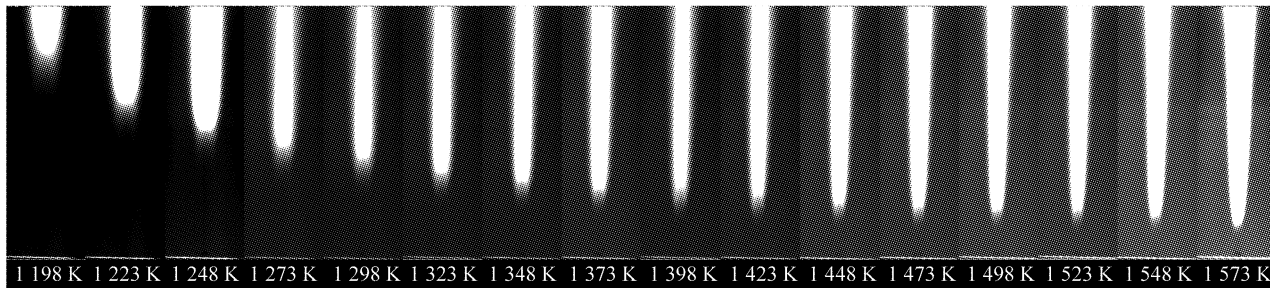
本文采用 FLIR 公司的一款制冷型中波红外热像仪(型号 SC7700BB),其主要技术参数如表 2 所示. 该仪器能够探测出  $20 \text{ mK}$  的温度差异,能够有效区分火焰与未燃射流的边界,确定火焰基部位置.

值来确定火焰边界. 对采用相同拍摄参数获得的图像,选用的灰度阈值基准也相同.



a 单帧原始灰度图片

b 平均灰度图片

图 3 典型单帧和平均后的火焰红外成像灰度图片 ( $U_0 = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Phi = 2.0$ )Fig. 3 Single frame images and average image of thermal infrared camera ( $U_0 = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Phi = 2.0$ )图 4 正庚烷液滴群火焰平均灰度图片 ( $U_0 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Phi = 4.0$ )Fig. 4 Average gray images of n-heptane droplet stream jet flame ( $U_0 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Phi = 4.0$ )

在图像处理过程中,首先需要剔除背景部分.

本文选取图片每行像素灰度平均值的 1.2 倍作为背

景环境分割阈值,将小于该阈值的像素值设为零,而后将剩余像素点灰度值的平均值作为火焰边界分割阈值.以图 5b 中白线所在的行为例,像素灰度值分布和阈值分割情况如图 5c 所示,以此分离出来

的主火焰如图 5d 所示,最后将所得的主火焰图片二值化处理,获得了如图 5e 所示的火焰平均灰度图的二值化图片.

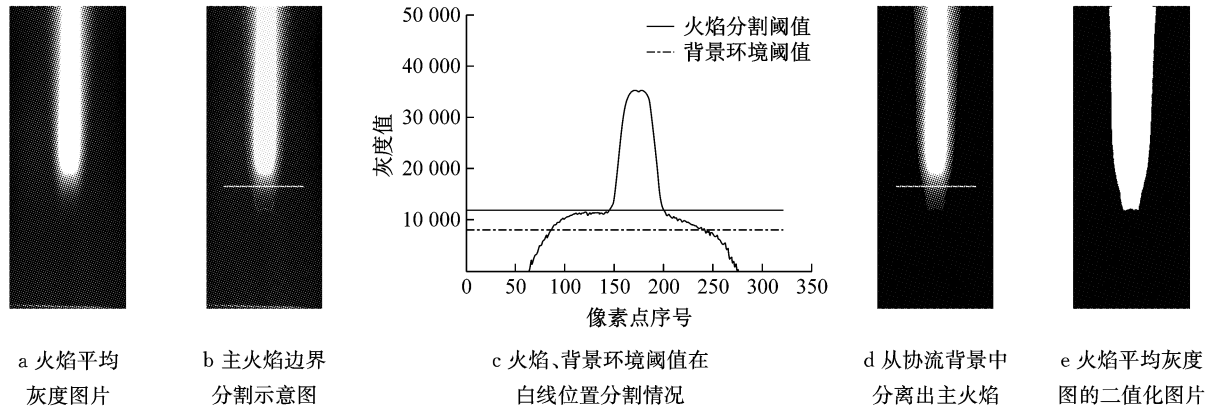


图 5 火焰平均辐射强度图片处理过程

Fig.5 Process of flame average radiation images

本文定义二值化图片中主火焰的最低点与中央喷管出口的垂直距离为射流火焰的起升高度  $L$ ,如图 6 所示.

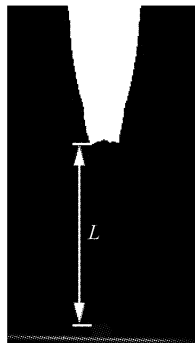


图 6 液滴群射流火焰起升高度的定义

Fig.6 Lift-off height definition of droplet stream jet flame

火焰起升高度是液滴群射流在着火延迟期(即从离开喷管到形成稳定火焰的时间)内向下游发展的距离.本文液滴群射流的着火延迟期主要有两个阶段:第一阶段是液滴群射流离开喷管后,在与周围热协流的相互作用过程中,不断发生卷吸、蒸发、混合而形成燃料与空气的混合气,这一阶段主要是物理作用过程,称为物理延迟期;第二阶段是混合气中各种成分缓慢分解氧化直至温度、浓度等条件合适时形成火焰,并持续燃烧,这一阶段主要是化学作用过程,称为化学延迟期<sup>[1]</sup>.在着火延迟期内,液滴群不断向下游运动,发展一段距离后开始稳定燃烧,火焰起升高度表征了火焰稳定燃烧的位置,是物理和化学延迟期综合作用的结果.

## 2 火焰起升高度及其影响因素分析

### 2.1 协流温度对火焰起升高度的影响

对于图 4 中的火焰平均灰度图片,按照 1.4 节的图像处理方法,采用  $L/D$  对火焰起升高度进行量纲一化,结果如图 7 所示.可见起升高度随协流温度的升高而下降,但当协流温度较高时,起升高度几乎不再变化,总体上两者呈指数函数关系.分析认为,协流温度升高,有利于加快液滴的蒸发混合,并加快化学反应速率,使物理和化学着火延迟期缩短,进而导致射流火焰的起升高度降低.当协流温度足够高时,化学延迟期基本已经缩短至最小值,此时起升高度主要由物理延迟期决定,而射流出口速度不变时,

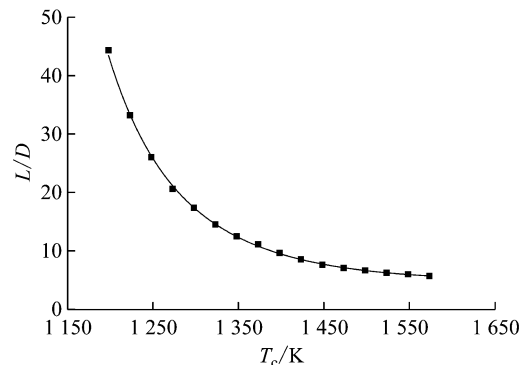


图 7 正庚烷液滴群射流火焰起升高度随协流热氛围温度的变化趋势( $U_0 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Phi = 2.0$ )

Fig.7 Flame height of droplet stream versus co-flow temperature( $U_0 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Phi = 2.0$ )

物理延迟期也基本不变。

为便于分析火焰起升高度与协流热氛围温度的指数关系,进一步比较不同因素对起升高度的影响,借鉴文献[15-17],本文也定义名义起升高度  $L^*$  和名义协流温度  $T^*$  为

$$L^* = \ln(L/D) \quad (1)$$

$$T^* = 1000/T_c \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)对图 7 进行变换,可得该工况下名义起升高度  $L^*$  和名义协流温度  $T^*$  的关系,如图 8 所示。本文将依此进行后续分析,研究不同情况下影响火焰起升高度的主导因素。

## 2.2 预混合当量比对火焰起升高度的影响

图 9 为正庚烷液滴群射流在不同当量比下  $L^*$  随  $T^*$  的变化趋势。可见火焰起升高度随着液滴群射流预混当量比的增大而降低。分析认为,预混合当量比越大,液滴群射流在离开喷管后由蒸发产生的燃料蒸气量也越大,越容易更快达到适合着火的混合

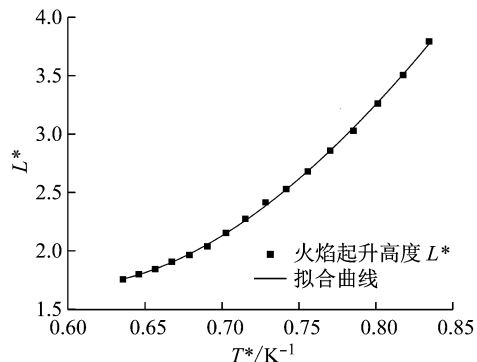


图 8 液滴群射流火焰名义起升高度随名义协流热氛围温度的变化 ( $U_0 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Phi = 2.0$ )

Fig.8 Flame nominal height of droplet streams versus nominal co-flow temperature ( $U_0 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Phi = 2.0$ )

气浓度,因此缩短了着火的物理延迟期,使火焰起升高度降低。该结果与龚慧峰等<sup>[6]</sup>采用数码相机拍摄到的正庚烷射流火焰起升高度的变化规律一致。

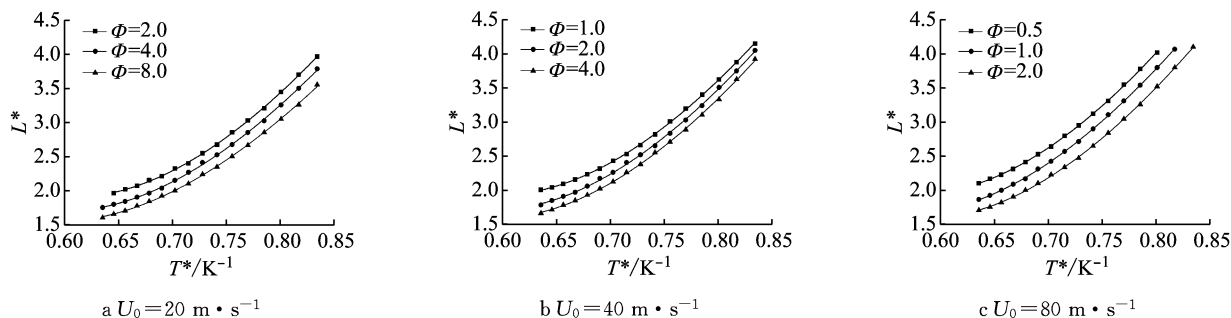


图 9 正庚烷液滴群火焰名义起升高度随当量比的变化

Fig.9 Flame nominal height of droplet streams versus equivalence ratio

## 2.3 射流出口速度对火焰起升高度的影响

图 10a、b、c 分别表示在  $\Phi = 1.0$ 、 $2.0$ 、 $4.0$  时,正庚烷液滴群射流出口速度对火焰起升高度的影响。由图 10 可知,液滴群射流出口速度对火焰起升高度的影响存在一个临界温度,低于临界温度时,火焰起

升高度随着射流出口速度的增大而增大;高于临界温度时,则相反。在  $\Phi = 1.0$  时,如图 10a 所示,临界协流温度约为  $1430 \text{ K}$ ;在  $\Phi = 2.0$  时,如图 10b 所示,临界协流温度约为  $1315 \text{ K}$ ;在  $\Phi = 4.0$  时,如图 10c 所示,临界协流温度约为  $1370 \text{ K}$ 。

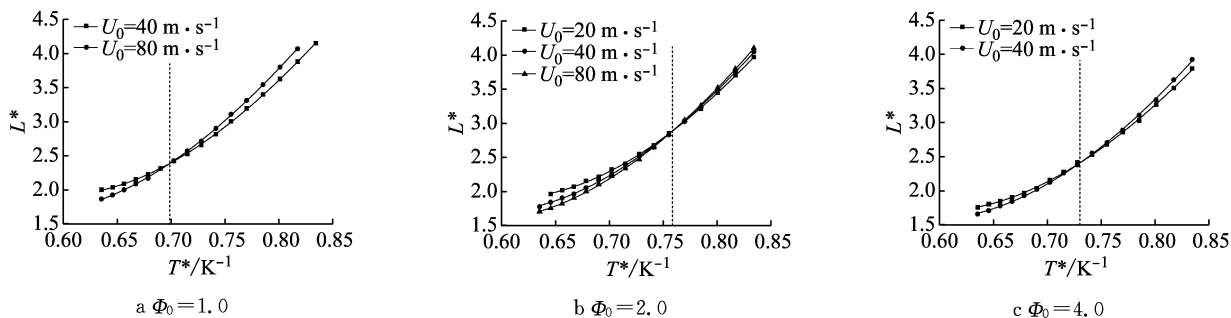


图 10 正庚烷液滴群火焰名义起升高度随出口速度的变化

Fig.10 Flame nominal height of droplet streams versus jet velocity

分析认为,当协流温度较低时,尽管射流出口速度增加有利于强化液滴群弥散和蒸发而缩短物理延

迟期,但混合气化学反应速率比较缓慢,液滴群混合气需要较长时间才能着火燃烧,因此火焰起升高度

仍会随出口速度增大而升高。但随着协流温度升高,化学反应速率呈几何级数增大,化学延迟期迅速缩短到最小值附近,导致火焰起升高度急剧降低,同时射流出口速度增加强化了与协流的卷吸等,更早地形成了可燃混合气,使液滴群射流的物理延迟期缩短,因此火焰起升高度进一步降低。

### 3 结论

本文成功采用基于CO<sub>2</sub>红外热成像法记录了正庚烷液滴群射流火焰瞬态结构,开发了有效的图像处理方法,获取了射流火焰起升高度,并研究了热氛围协流温度、液滴群预混当量比、液滴群射流出口速度对液滴群射流起升高度的影响规律。研究结果表明:协流温度是化学延迟期的主要影响因素,而火焰起升高度主要受着火化学延迟期控制,因此协流温度成为主导起升高度的关键参数;协流温度越高起升高度越低,但当协流温度足够高时,起升高度几乎不再变化;较大的预混当量比有利于更快地形成可燃混合气,从而使火焰起升高度降低。另外,在相同的当量比下,存在临界协流温度现象:低于临界协流温度时,由于化学延迟期较长,射流出口速度增加会缩短物理延迟期,从而提高火焰起升高度;在高于临界协流温度时,化学延迟期基本不再降低,而加大射流出口速度可进一步缩短物理延迟期,从而降低火焰起升高度。

### 参考文献:

- [1] 徐通模,惠世恩. 燃烧学[M]. 北京:机械工业出版社,2015.  
XU Tongmo, HUI Shien. Combustion [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [2] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.  
GAN Xiaohua. Aero gas turbine engine fuel nozzle technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [3] JENNY P, ROEKAERTS D, BEISHUIZEN N. Modeling of turbulent dilute spray combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38: 846.
- [4] O'LOUGHLIN W, MASRI A R. A new burner for studying auto-ignition in turbulent dilute sprays[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(8): 1577.
- [5] O'LOUGHLIN W, EDAKATT R A, MASRI A R. Variation of lift-off heights with fuel mixtures for flames in vitiated co-flows [EB/OL]. [2018-05-20]. [http://people.eng.unimelb.edu.au/imarusic/proceedings/17/303\\_paper.pdf](http://people.eng.unimelb.edu.au/imarusic/proceedings/17/303_paper.pdf).
- [6] 龚慧峰,胡宗杰,张青,等. 可控热氛围下正庚烷液滴流燃烧火焰特性研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5):1134.  
GONG Huifeng, HU Zongjie, ZHANG Qing, *et al.* Flame characteristics of n-heptane droplet streams in a controllable active thermo-atmosphere [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(5):1134.
- [7] O'LOUGHLIN W, MASRI A R. The structure of the auto-ignition region of turbulent dilute methanol sprays issuing in a vitiated co-flow[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2012, 89(1): 13.
- [8] YON S, SAUTET J C. Flame lift-off height, velocity flow and mixing of hythane in oxy-combustion in a burner with two separated jets [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 32:83.
- [9] 杨立,杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京:科学出版社,2012.  
YANG li, YANG Zhen. Infrared thermal imaging temperature measurement theory and technology [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [10] MARCOTTE F, DE CHAMPLAIN A. Detailed ignition sequence studied with a fast infrared camera[EB/OL]. [2018-05-20]. <https://applied-infrared.com.au/images/pdf/Ignition%20Sequence%20Study%20%20Combustion%20Institute.pdf>.
- [11] LAGUEUX P, TREMBLAY P. High-speed infrared imaging for analysis of a diesel engine supplied with a premixed methane-air charge[J]. Measurement Automation Monitoring, 2017, 63(2):60.
- [12] WEI Zeng, MAGNUS S. High-speed PIV, spray, combustion luminosity, and infrared fuel-vapor imaging for probing tumble-flow-induced asymmetry of gasoline distribution in a spray-guided stratified-charge DISI engine[J]. Science Direct, 2017, 36: 3459.
- [13] 高乾坤. 工业燃烧高温气体红外辐射光谱检测技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.  
GAO Qiankun. Detection of infrared radiation gas with high temperature in industrial combustion[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [14] 邓俊,吴志军,李理光,等. 可控活化热氛围燃烧试验系统的研发[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(2):307.  
DENG Jun, WU Zhijun, LI Liguang, *et al.* Development of experimental system of novel controllable active thermo-atmosphere combustor [J]. Journal of Jilin University (Engineer and Technology Edition), 2007, 37(2):307.
- [15] ROTHAMER D A, MURPHY L. Systematic study of ignition delay for jet fuels and diesel fuel in a heavy-duty diesel engine [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3021.
- [16] PICKETT L M, SIEBERS D L, IDICHERIA C A. Relationship between ignition processes and the lift-off length of diesel fuel jets[R]. Detroit: SAE Technical Paper, 2005.
- [17] JOSHI U, ZHENG Z, SHRESTHA A, *et al.* An investigation on sensitivity of ignition delay and activation energy in diesel combustion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(9): 091506.