

## 平板狭缝间 $C_1\sim C_4$ 烷烃/空气预混射流火焰的燃烧特性

曹海亮<sup>1</sup>, 年志远<sup>1,2</sup>, 杨浩林<sup>2,3</sup>, 苏航<sup>1,2</sup>, 汪小慈<sup>2,3</sup>, 赵黛青<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup> 郑州大学化工与能源学院, 河南 郑州 450001; <sup>2</sup> 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640;

<sup>3</sup> 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 对平行平板狭缝间  $C_1\sim C_4$  烷烃预混射流火焰进行了实验研究, 考察了壁面温度、狭缝间距、当量比、燃料种类等对火焰形态和稳定性的影响, 并利用高速相机获得了狭缝间的火焰图像。结果表明, 随着狭缝间距的减小, 火焰经历了稳定、脉动和熄火 3 个阶段。其中, 火焰脉动发生在大于熄火间距的狭小范围内, 其脉动频率随着壁面温度的升高而增加。对同一种燃料, 当预混气当量比和壁面温度保持恒定时, 火焰的脉动频率在脉动发生的区域内保持不变。对比  $C_1\sim C_4$  烷烃预混火焰的脉动频率及脉动火焰持续距离范围, 发现甲烷预混火焰的均最小, 而其他 3 种燃料则比较接近。

**关键词:** 微尺度; 烷烃; 燃料; 燃烧特性; 火焰稳定性; 脉动火焰

中图分类号: TK 16

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 11—4609—06

## Combustion characteristics of premixed $C_1\text{—}C_4$ alkane jet flames between two parallel walls

CAO Hailiang<sup>1</sup>, NIAN Zhiyuan<sup>1,2</sup>, YANG Haolin<sup>2,3</sup>, SU Hang<sup>1,2</sup>, WANG Xiaohan<sup>2,3</sup>, ZHAO Daiqing<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup> School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

<sup>2</sup> Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** The combustion characteristics of premixed  $C_1\text{—}C_4$  alkane jet flames were studied experimentally with a slit burner between two parallel walls. The effects of wall temperature, the distance between two walls, equivalence ratio and fuel type on flame pattern and stability were investigated. The flame images were captured by using a high-speed charge-coupled device camera. The results indicated that the flames experienced three states with the decrease of the distance between the walls, *i.e.*, stable flame, pulsating flame and flame extinction. It was found that the pulsating flames only existed in a very narrow range before reaching the extinction distance. The flame pulsation frequency increased monotonically with the wall temperature. For the same fuel, the frequency was independent to the distance between two walls at a fixed wall temperature and equivalence ratio. Meanwhile, the flame pulsation frequency and the range of the pulsation zone were related to the type of fuel for premixed  $C_1\text{—}C_4$  alkane flames. Generally, the methane flame showed the lowest pulsation frequency and narrowest pulsation zone, while these characteristics were almost the same for  $C_2\text{—}C_4$  alkane flames.

**Key words:** microscale; alkane; fuel; combustion characteristic; flame stability; pulsating flame

2016-02-02 收到初稿, 2016-07-26 收到修改稿。

联系人: 杨浩林。第一作者: 曹海亮 (1976—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51336010, 51176174); 国家重点基础研究发展计划项目 (2014CB239601)。

Received date: 2016-02-02.

Corresponding author: Prof. YANG Haolin, yanghl@ms.giec.ac.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51336010, 51176174) and the National Basic Research Program of China (2014CB239601).

## 引 言

微小型燃烧系统具有能量密度高、体积小、使用寿命长、添加燃料方便等特点,但由于比表面积大,壁面与火焰的耦合作用强烈,使得这类燃烧器通常难以维持在稳定的状态<sup>[1-4]</sup>。很多研究人员采用不同的措施来改善这种情况,Sitzki等<sup>[5]</sup>提出了瑞士卷式的燃烧器利用燃气余热循环利用的方法稳定火焰,Cao等<sup>[6]</sup>开发的环状微型透平燃烧器,Jiang等<sup>[7]</sup>提出的多孔壁面进气的微型燃烧器,都有效提升了微燃烧系统的燃烧效率和可燃极限。Gan等<sup>[8-10]</sup>通过采用荷电喷雾燃烧装置促进了微尺度下液体燃料的稳燃。然而,这些研究只是针对物理结构或者系统进行改进,并没有对造成熄火的原因进行考察。通常认为,微燃烧不稳定性和熄火的主要机制有两个方面:散热损失造成的热熄火以及自由基在燃烧器表面淬熄造成的化学熄火。为了考察这两种不同的熄火机制,针对壁面与火焰之间的相互作用机理及现象进行了大量研究。

在熄火机理方面,Sloane等<sup>[11-12]</sup>首先发现影响熄火的壁面自由基淬熄发生在壁面附近 1 mm 以内。Miesse等<sup>[13]</sup>发现火焰向壁面散热而引起的热熄火是低壁温下(300~500 K)火焰熄火的主要原因,与壁面材料无关,而高壁温时(1000 K),不同材料壁面导致的自由基化学失活差异是造成熄火特性显著不同的主要原因。Kim等<sup>[14]</sup>认为火焰熄火特性是热损失、气相反应及自由基失活这 3 个因素相互作用的结果。Fan等<sup>[15-16]</sup>认为热熄火机制是微尺度火焰熄火的主导机制,而Saiki等<sup>[17]</sup>发现普通材料表面的化学吸附系数,即壁面对自由基的吸附作用是壁面化学作用的主要机制,在高温时有显著的作用。Yang等<sup>[18-19]</sup>提出壁面材料的化学吸附氧,以及壁面附近的 OH 自由基浓度是影响熄火机制的重要因素,当 OH 自由基浓度较高时,可以维持较小的熄火间距。

在火焰动力学方面,Ju等<sup>[20-21]</sup>在介观尺度通道内,观察到了由热扩散机制控制的不稳定火焰,如快燃火焰、缓燃火焰以及旋转火焰。Kumar等<sup>[22]</sup>在被加热的介观尺度径向通道中发现由于流场不稳定和壁面淬熄引起的各种不同形式的不稳定火焰。Maruta等<sup>[23]</sup>在加热的石英玻璃管中也发现了不稳定火焰,包括脉动火焰及重复点燃和熄火的火焰(FERI)。此外,Fan等<sup>[24]</sup>在微尺度矩形的石英微

通道中也发现了火焰的熄灭和再点燃现象。

以上研究从不同角度对壁面作用导致熄火的原因进行了详细考察,同时也发现了火焰的不稳定现象。接近熄火阶段的火焰行为对于揭示微小尺度火焰稳定性的机理有重要意义,目前还缺乏深入的研究。因此,本文针对平板狭缝中小火焰的燃烧特性进行了实验研究,考察了影响燃烧特性的不同因素,并对比了不同燃料预混合火焰的稳定性。

## 1 实验材料和方法

平板狭缝火焰实验装置如图 1 所示。喷嘴位于两壁面间的中心位置,通过两壁面的同步相向运动来减小火焰燃烧的空间,直至火焰熄灭,此时两板间的距离即为火焰的熄火距离。壁面材料采用不锈钢板,大小为 50 mm×50 mm×10 mm。固定在钢板内部均匀分布的电加热棒可以将钢板加热到实验所需的温度,并通过布置在钢板内部的热电偶结合可控硅单元来监测并控制壁面的温度。实验中壁面温度控制在 473~873 K 范围,温控误差在±10 K 以内。

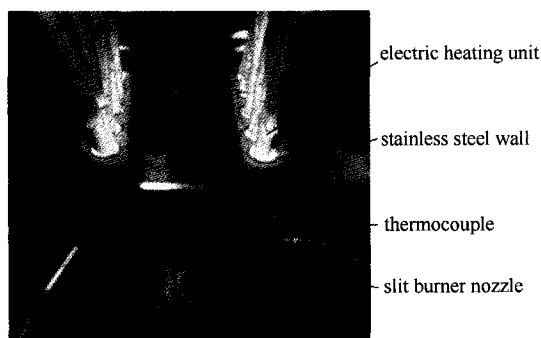


图 1 实验装置图

Fig.1 Photo of experimental equipment

喷嘴的结构如图 2 所示。喷嘴上部由蜂窝陶瓷制成,规格为 18 目,实际单孔大小为 1.0 mm×1.0 mm。多孔陶瓷下部连接均流室,均流室内布满小钢珠,用来稳定及均匀气流。燃料和空气的预混气通过下方的钢管进入均流室。燃料和空气的流量通过质量流量计(MKS-GE50a)来控制。喷嘴出口位置预混气的平均速度为 1 m·s<sup>-1</sup>,当量比  $\phi$  分别为 0.9、1.0、1.1。在喷嘴的侧面布置有一台高速 ICCD 摄像机(MEMRECAM NAC HX-6),以 500 frame·s<sup>-1</sup> 的速度对火焰形态进行拍摄。以两板间距每次 0.1 mm 进行递减,直至火焰熄灭。

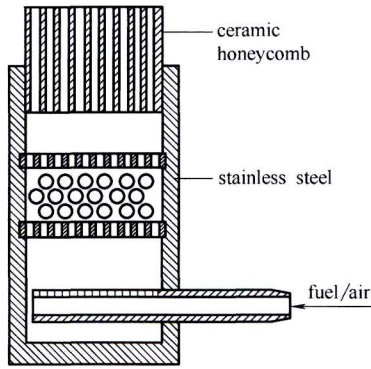


图 2 多孔喷嘴结构

Fig.2 Schematic structure of slit burner nozzle

## 2 结果与讨论

### 2.1 燃烧特性及火焰脉动

对于微小尺度火焰，由于火焰与壁面之间的强烈相互作用，从稳定的火焰到火焰熄灭之间可能存在一个中间区域，即不稳定火焰。图 3 显示了通过高速摄影机捕捉并分区的平板狭缝间正丁烷预混火焰的状态分布。可以看出，随着狭缝间距的变化，火焰有 3 个不同状态区域：虚线右侧大间距条件下为稳定火焰区域，实线左侧小于熄火间距为火焰熄灭区域，实线和虚线之间的部分为不稳定火焰区域，火焰以一定的频率脉动。同时，随着壁面温度的升高，脉动火焰发生的区域向狭缝距离减小的方向移动。

由图可知，火焰脉动发生在狭缝间距接近熄火距离前的小于 1 mm 的很小范围之内。这是因为当狭缝间距足够大时，壁面距离火焰较远，并未对火焰产生实质性的影响，火焰形态和位置都保持稳定；当狭缝间距逐渐减小到某个特定值时，壁面对火焰

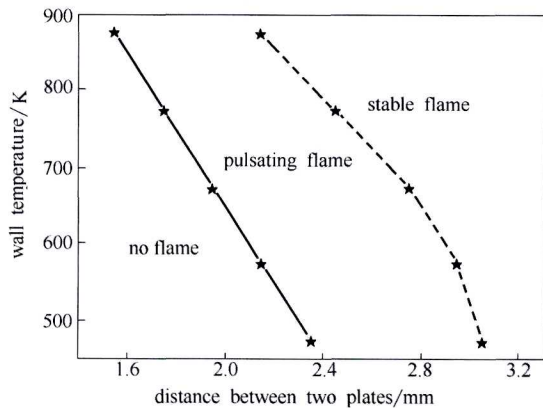


图 3 正丁烷预混火焰 3 种状态区域分布 ( $\phi = 1.0$ )

Fig.3 Distribution of three states of premixed *n*-butane flame at  $\phi = 1.0$

的物理和化学作用加强，火焰从稳定状态转变为脉动状态。图 4 所示是壁温  $T_w$  为 473 K，狭缝间距  $d$  为 2.4 mm 时，正丁烷预混火焰一个脉动周期内不同时刻的图像。图中粗线代表了喷嘴的外部轮廓，细线代表两个平板内侧的壁面位置。

从图中可看出火焰前锋的位置随时间在火焰的上下游有规律地脉动。以火焰前锋达到最高位置时为初始时刻，火焰前锋先是缩小，之后部分火焰

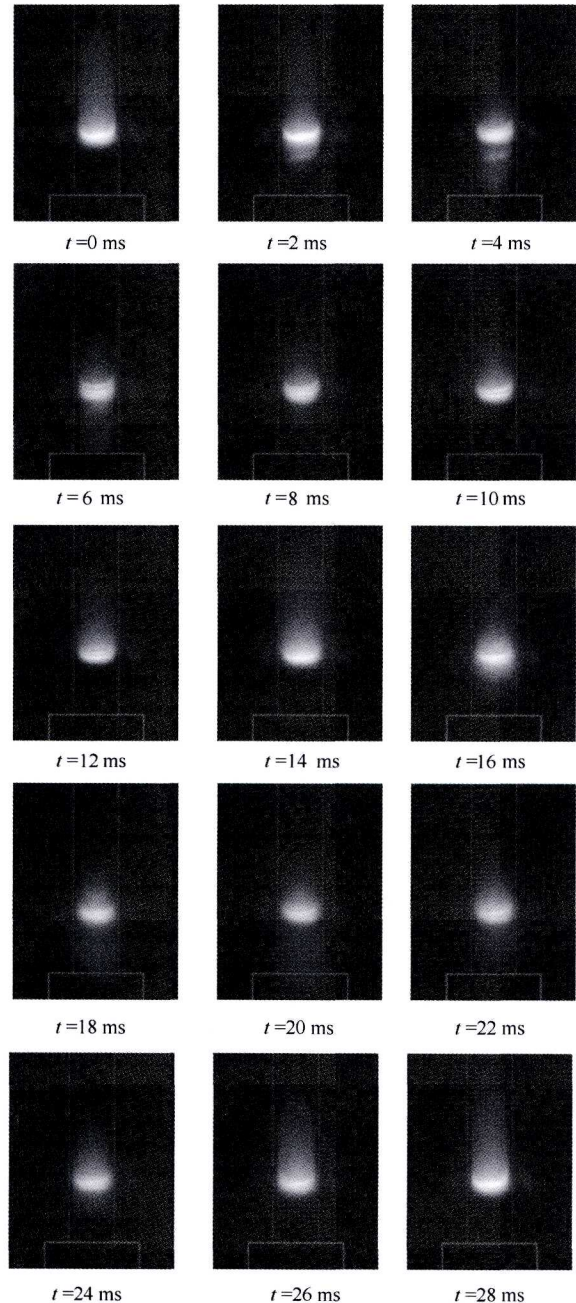


图 4 正丁烷预混火焰周期性脉动图像 ( $T_w = 473$  K,  $d = 2.4$  mm,  $\phi = 1.0$ )

Fig.4 Images of periodic pulsating flame of premixed *n*-butane/air mixture at  $T_w = 473$  K,  $d = 2.4$  mm, and  $\phi = 1.0$

面向上游传播, 到达最大后逐渐缩小, 于  $t=10\text{ ms}$  时火焰最小。当火焰再次逐渐增大, 并且上游和下游的火焰面再完成一次由大到小的转变后, 火焰最终于  $t=28\text{ ms}$  回到与初始时刻相同的形态。尽管不同条件下火焰的脉动频率会发生改变, 但火焰形态会经历类似的变化周期。

狭缝间火焰发生脉动的主要原因是由于火焰与壁面之间的热交换。当狭缝间距足够大时, 火焰通过壁面的散热以及壁面对低温未燃气的预热保持平衡, 火焰处于稳定状态。当进一步减小狭缝间距时, 气流速度相应增加, 火焰首先向下游传播。当上游低温的未燃气流经高温壁面时, 由于火焰与壁面的强烈热交换使未燃气温度升高, 致使火焰传播速度增加, 火焰面向上游移动。在传播过程中, 由于高温壁面受到未燃气的持续冷却而温度下降后, 未燃气无法继续被预热到此前较高的温度, 因此, 火焰传播速度变慢, 在气流的作用下火焰面又向下游传播直到达到新的平衡位置。狭缝间高温火焰、壁面及低温未燃气之间的热交换和热循环就产生了脉动的火焰。

### 2.2 壁温和当量比对火焰脉动的影响

通过对不同条件下的脉动火焰研究发现, 当火焰进入脉动状态以后, 火焰的脉动频率就不再随狭缝间距的减小而改变, 直到火焰熄灭前, 火焰始终保持固定的脉动频率。然而, 火焰脉动频率受到壁面温度和当量比的影响。

图 5 所示为不同当量比正丁烷预混火焰的脉动频率随壁面温度的变化规律。由图可知, 火焰的脉动频率随着壁面温度的升高而单调增加, 从  $T_w = 473\text{ K}$  时的  $40\text{ Hz}$  增加到  $T_w=873\text{ K}$  时的  $100\text{ Hz}$ 。由于火焰脉动的主要原因是火焰与壁面的热交换, 而相较于低温的壁面, 高温的壁面可以更快地将低温未燃气加热到特定的温度, 使由于气流加速而向下游传播的火焰快速地逆向向上游传播, 从而使脉动加速。壁面温度越高, 对未燃气预热的速度越快, 火焰的脉动频率也越高。另一方面, 由图可知, 当预混气靠近化学当量比时, 当量比对火焰脉动频率的影响较小,  $\varphi=1.0$  和  $1.1$  时火焰的脉动频率略大于  $\varphi=0.9$  的值, 但差值不大于  $20\text{ Hz}$ 。这是由于  $\varphi=1.0$  和  $1.1$  时火焰强度和火焰传播速度更高, 在壁温较低时能够更快实现温度场和速度场的平衡, 而  $\varphi=0.9$  时则需要较长的时间。同时, 当量比较低时, 高温壁面对预混气的预热及火焰散热的减少对火焰稳定性的影响更加显著, 因此火焰脉动频率随壁温的

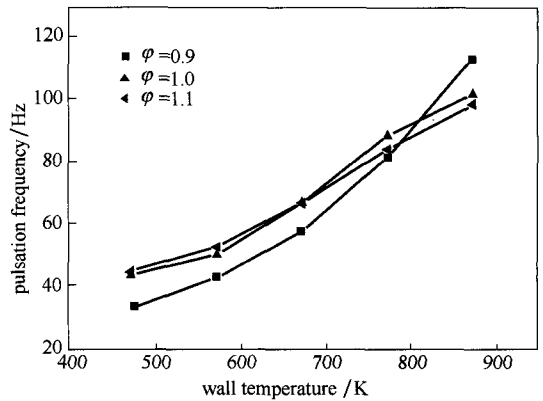


图 5 当量比和壁面温度对正丁烷预混火焰脉动频率的影响  
Fig.5 Effect of equivalence ratio and wall temperature on pulsation frequency of premixed *n*-butane flame

增速大于高当量比条件的火焰, 使得  $\varphi=0.9$  的火焰在  $T_w>800\text{ K}$  后有更高的脉动频率。

壁面温度不仅对火焰脉动频率有影响, 对火焰的熄火距离和脉动开始的壁面间距同样有影响。如图 3 所示, 壁面温度升高时, 熄火距离逐渐减小, 这与前期的研究结果一致<sup>[18]</sup>。火焰脉动发生时刻的壁面间距随壁面温度的升高而减小, 而脉动火焰发生的区域随温度的变化较小, 变化幅度小于  $0.2\text{ mm}$ 。图 6 所示为不同当量比条件下正丁烷预混火焰发生脉动的范围。在当量比  $\varphi=1.0$  和  $1.1$  时, 火焰发生脉动的狭缝间距和脉动区域基本相同, 最大的变化幅度为  $0.1\text{ mm}$ 。然而, 当量比  $\varphi=0.9$  时, 脉动火焰发生和熄火发生的狭缝间距均向右侧, 即较大的狭缝间距方向移动, 尤其在壁面温度较低时, 熄火间距有大幅度的增大。在一定程度上, 由于本实验中, 预混气以相同的流速喷出, 低当量比预混气的燃烧强度和火焰传播速率较低, 稳定性较差, 因此更易于受到壁面的影响而熄火。

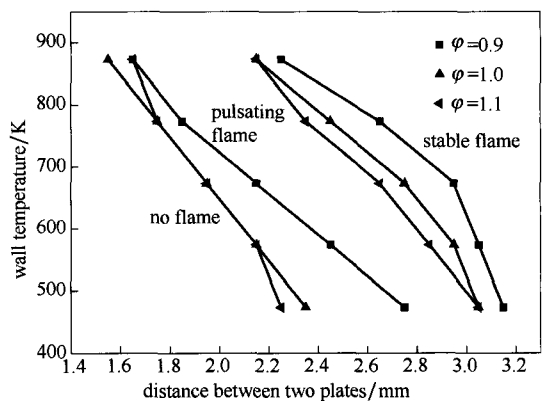


图 6 当量比和壁面温度对正丁烷预混火焰脉动范围的影响  
Fig.6 Effect of equivalence ratio and wall temperature on pulsation range of premixed *n*-butane flame

### 2.3 $C_1 \sim C_4$ 烷烃/空气预混火焰的脉动特性

图 7 所示为  $C_1 \sim C_4$  烷烃预混合火焰脉动频率随壁面温度的变化规律。非常明显, 所有烷烃火焰的脉动频率均随着壁面温度的升高而单调增加。其中,  $C_2 \sim C_4$  烷烃预混火焰的脉动频率相差很小, 为 10~20 Hz, 其中正丁烷预混火焰的脉动频率略小。甲烷预混火焰的脉动频率明显低于其他的烷烃火焰, 频率的差值随壁面温度升高基本保持不变, 为 30~40 Hz。

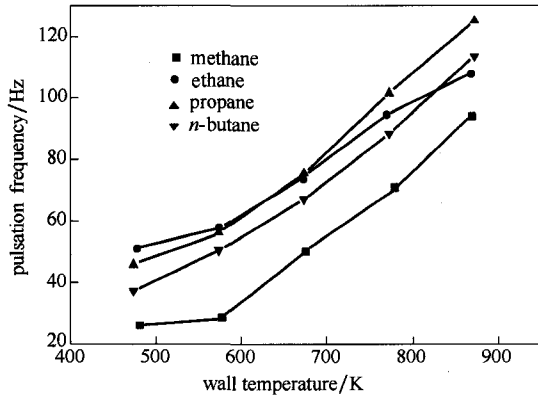


图 7  $C_1 \sim C_4$  烷烃预混火焰的脉动频率 ( $\phi=1.0$ )

Fig.7 Pulsation frequencies of premixed  $C_1 \sim C_4$  alkane flames at  $\phi=1.0$

图 8、图 9 分别为甲烷和  $C_2 \sim C_4$  烷烃预混火焰的脉动范围随壁面温度的变化规律。可以看出, 对于所有的燃料, 脉动火焰均发生在接近熄火间距 1 mm 之内的狭小区域内, 这也是火焰与壁面之间相互的热和化学作用最强烈的区域。其中, 甲烷预混火焰的脉动范围最窄, 最大约 0.3 mm, 乙烷和丙烷预混火焰的脉动范围和位置基本重合, 脉动范围约 0.6 mm, 而正丁烷预混火焰的脉动范围最宽, 约 0.8 mm。

综上所述, 甲烷预混火焰的脉动频率和脉动发

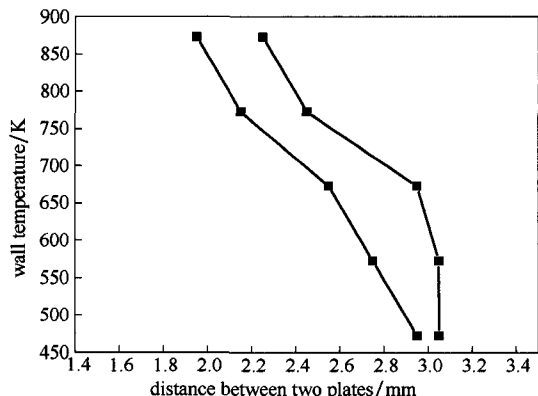


图 8 甲烷预混火焰的脉动范围 ( $\phi=1.0$ )

Fig.8 Pulsation range of premixed methane flame at  $\phi=1.0$

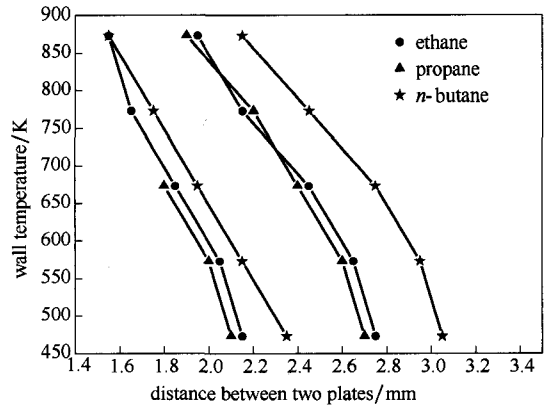


图 9  $C_2 \sim C_4$  烷烃预混火焰的脉动范围 ( $\phi=1.0$ )

Fig.9 Pulsation ranges of premixed  $C_2 \sim C_4$  alkane flames at  $\phi=1.0$

生的范围与其他 3 种烷烃有较明显的差别, 这与不同燃料的物化特性及其燃烧特性有关。一方面, 由于甲烷较高的 C—H 键能和活化能, 甲烷的着火温度较高而火焰传播速度较其他烷烃低, 火焰稳定性较差, 因此熄火距离最大, 火焰在发生脉动后的很小范围内熄灭。对于  $C_2 \sim C_4$  烷烃燃料, 由于 C—C 键的存在, C—H 键能和活化能较低, 因此, 火焰有更好的稳定性, 能够经历较宽的脉动过程。

## 3 结 论

通过对平行平板狭缝间  $C_1 \sim C_4$  烷烃/空气预混射流火焰的研究发现:

- (1) 随着狭缝间距的减小, 火焰将经历稳定、脉动和熄火 3 个阶段。
- (2) 在脉动火焰区域, 火焰脉动均发生在熄火间距前很窄的范围内, 火焰的脉动频率随着壁面温度的升高而增加, 且与狭缝间距的变化无关。
- (3) 对于  $C_1 \sim C_4$  的烷烃, 甲烷预混火焰的脉动发生范围最窄, 脉动频率最低, 并且与其他 3 种烷烃对比差别较大。  $C_2 \sim C_3$  烷烃预混火焰的脉动特性基本接近, 而正丁烷预混火焰的脉动范围最宽。

## References

- [1] FERNANDEZ-PELLO A C. Micropower generation using combustion: issues and approaches [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 883-899.
- [2] WALTHER D C, AHN J. Advances and challenges in the development of power-generation systems at small scales [J]. Fuel and Energy Abstracts, 2011, 37(5): 583-610.
- [3] KAISARE N S, VLACHOS D G. A review on micro combustion: fundamentals, devices and applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(3): 321-359.



- [4] JU Y, MARUTA K. Microscale combustion: technology development and fundamental research [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, **37**(6): 669-715.
- [5] SITZKI L, BORER K, SCHUSTER E, *et al.* Combustion in microscale heat-recirculating burners [C]// *The Third Asia-Pacific Conference on Combustion*. Seoul, Korea, 2001: 11-14.
- [6] CAO H L, XU J L. Thermal performance of a micro-combustor for micro-gas turbine system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, **48**(5): 1569-1578.
- [7] JIANG L Q, ZHAO D Q, WANG X H, *et al.* Development of a self-thermal insulation miniature combustor [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**(5): 1308-1313.
- [8] GAN Y H, LUO Z B, CHENG Y P, *et al.* The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **87**: 595-604.
- [9] GAN Y H, LUO Y P, WANG M, *et al.* Effect of alternating electric fields on the behaviour of small-scale laminar diffusion flames [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **89**: 306-315.
- [10] 甘云华, 佟洋, 罗智斌. 乙醇在微尺度单电极燃烧器内的雾化与燃烧[J]. *化工学报*, 2015, **66**(11): 4597-4602.
- GAN Y H, TONG Y, LUO Z B. Electro-spraying and combustion of alcohol in micro-combustor with single electrode [J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(11): 4597-4602.
- [11] SLOANE T M, RATCLIFFE J W. A molecular beam mass spectrometer study of side-wall flame quenching at low pressure by cooled noncatalytic and catalytic surfaces [J]. *Combustion and Flame*, 1982, **47**(1): 83-92.
- [12] SLOANE T M, SCHOENE A Y. Computational studies of end-wall flame quenching at low pressure: the effects of heterogeneous radical recombination and crevices [J]. *Combustion and Flame*, 1983, **49**(1): 109-122.
- [13] MIESSE C M, MASEL R I, JENSEN C D, *et al.* Submillimeter-scale combustion [J]. *AIChE Journal*, 2004, **50**(12): 3206-3214.
- [14] KIM K T, LEE D H, KWON S. Effects of thermal and chemical surface-flame interaction on flame quenching [J]. *Combustion and Flame*, 2006, **146**(1): 19-28.
- [15] FAN Y, SUZUKI Y, KASAGI N. Experimental study of micro-scale premixed flame in quartz channels [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, **32**(2): 3083-3090.
- [16] FAN Y, SUZUKI Y, KASAGI N. Quenching mechanism study of oscillating flame in micro channels using phase-locked OH-PLIF [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, **33**(2): 3267-3273.
- [17] SAIKI Y, SUZUKI Y. Effect of wall surface reaction on a methane-air premixed flame in narrow channels with different wall materials [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, **34**(2): 3395-3402.
- [18] YANG H, FENG Y, WU Y, *et al.* A surface analysis-based investigation of the effect of wall materials on flame quenching [J]. *Combustion Science and Technology*, 2011, **183**(5): 444-458.
- [19] YANG H, FENG Y, WANG X, *et al.* OH-PLIF investigation of wall effects on the flame quenching in a slit burner [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, **34**(2): 3379-3386.
- [20] JU Y, XU B. Theoretical and experimental studies on mesoscale flame propagation and extinction [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, **30**(2): 2445-2453.
- [21] XU B, JU Y. Experimental study of spinning combustion in a mesoscale divergent channel [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, **31**(2): 3285-3292.
- [22] KUMAR S, MARUTA K, MINAEV S. On the formation of multiple rotating Pelton-like flame structures in radial microchannels with lean methane-air mixtures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, **31**(2): 3261-3268.
- [23] MARUTA K, KATAOKA T, KIM N I, *et al.* Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, **30**(2): 2429-2436.
- [24] FAN A, WAN J, MARUTA K, *et al.* Flame dynamics in a heated meso-scale radial channel [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, **34**(2): 3351-3359.