

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160548

微型定容燃烧腔内 C₂~C₄ 烷烃/空气火焰传播

苏航^{1,2}, 蒋利桥¹, 曹海亮², 刘秦飞¹, 李言钦², 赵黛青¹

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

摘要: 在直径 35 mm、高度 2 mm 光学可视的定容燃烧腔内, 实验研究了常温常压静止乙烷/空气、丙烷/空气和正丁烷/空气预混气在燃烧腔中心由电火花点燃后向外传播的火焰传播特性。结果表明: 3 种燃料空气混合气可形成火焰传播的当量比范围不同, 范围由大到小排序为乙烷>丙烷>正丁烷; 3 种燃料均存在由光滑火焰面向褶皱火焰面转变的传播形态; 在微型定容燃烧腔内, 3 种燃料的火焰传播速度均低于常规尺度下定容燃烧室内火焰传播速度, 且火焰传播速度随半径增加而减小; 随着当量比增加, 火焰锋面容易出现褶皱和断裂现象, 在高当量比情况下, 火焰传播会出现短暂停滞。

关键词: 微尺度燃烧; 定容燃烧; 火焰传播; 火焰褶皱; 传播速度

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 11—4574—06

Flame propagation of C₂—C₄ hydrocarbons/air mixture in a constant-volume micro-chamber

SU Hang^{1,2}, JIANG Liqiao¹, CAO Hailiang², LIU Qinfei¹, LI Yanqin², ZHAO Daiqing¹

(¹Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; ²School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: At ambient temperature and pressure condition, the outwardly propagating characteristics of quiescent ethane/air, propane/air and n-butane/air flames were experimentally investigated in a visible constant-volume micro-chamber with 35 mm diameter and 2 mm height respectively. The results showed that the flammable equivalence ratio ranges of these three fuels were different in the micro chamber. The sequence of them was ethane>propane>n-butane. Both smooth flame-front and wrinkled flame-front shapes were observed during flame propagating of these fuels. The flame speed was lower in the micro chamber than that in conventional combustion chamber, and the flame speed declined along the radial direction during flame propagating. With the increase of equivalence ratio, the flame-front was prone to appear wrinkles and crack. In addition, at high flammable equivalence ratio, sometimes, the flame propagation had a brief stagnation.

Key words: micro combustion; constant-volume combustion; flame propagation; flame wrinkles; flame speed

引 言

基于燃料燃烧的微型能源动力系统具有能量

密度高和续能方便的特性^[1-2], 是潜在的高性能便携供能系统^[3]。微小空间内燃料的高效稳定燃烧是微型能源动力系统的关键, 受空间尺度、壁面散热和

2016-04-26 收到初稿, 2016-08-15 收到修改稿。

联系人: 蒋利桥。第一作者: 苏航 (1991—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2014CB239600); 国家自然科学基金项目 (51336010, 51176174); 广东省科技计划项目 (2016A040403095)。

Received date: 2016-04-26.

Corresponding author: Prof. JIANG Liqiao, jiangliq@ms.giec.ac.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China(2014CB239600), the National Natural Science Foundation of China (51336010, 51176174) and the Science and Technology Project of Guangdong Province(2016A040403095).

化学耦合作用的共同影响, 微小空间内火焰传播比常规尺度下更为复杂。研究人员针对微小空间内火焰传播特性与火焰稳定性强化研究方面做了大量工作。Maruta 等^[4-5]研究微小空间内壁面与火焰热耦合作用对传播速度的影响, 从理论和实验上确定了获得微小空间内火焰稳定传播的高速和低速两种情况; Fan 等^[6]研究了微通道内预混气的多种动态火焰形态; Wu 等^[7]发现细长微通道内火焰传播呈现低速、振荡和加速等多种形态; 作者所在课题组^[8-10]也对微燃烧器内火焰稳定性和壁面化学熄火开展了相关研究。

常规尺度下层流火焰传播中, 火焰会出现不稳定性现象, 表现在火焰面会产生皱褶^[11], 这对于研究传播中火焰形态转变非常重要。Zhou 等^[12]在 $\phi 80\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 定容燃烧装置中测试了常温常压下壁面附近点火丙烷-空气传播速度, 但是没有观察到火焰褶皱产生现象, 认为火焰传播空间半径太小不能形成褶皱。然而, Tsuji 等^[13]在 $22\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times (4\sim 8)\text{ mm}$ 类似于微型 Wankel 发动机定容燃烧室内实验发现, 尺度减小会降低火焰传播速度, 且观察到了火焰传播中产生的皱褶现象。

目前微尺度燃烧的研究对有稳定预混气来流的圆管、狭缝等的微小空间内火焰稳定性关注较多, 而对于封闭定容微小空间内的火焰传播研究较少, 特别是对微尺度下定容燃烧中火焰传播中不稳定特性研究明显不足。因此, 本文采用实验方法对比研究了狭缝间距 2 mm 、直径 35 mm 圆盘状微型定容燃烧腔内乙烷/空气、丙烷/空气和正丁烷/空气火焰的传播特性。

1 实验装置和实验方法

实验所用微型燃烧室如图 1 所示, 其大小为 $\phi 35.0\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$, 高度 2 mm 接近 $C_2\sim C_4$ 烷烃/空气熄火距离。其由两块可视石英玻璃盖板 ($D_0=60\text{ mm}$) 构成, 下盖板开有 3 个圆孔通道, 左侧孔 ($d_1=1.5\text{ mm}$) 距离中心 14 mm , 作为进口; 右侧孔 ($d_2=2.5\text{ mm}$) 距离中心 13 mm , 作为出口; 中心孔 ($d_3=2.5\text{ mm}$) 作为点火电极通道。点火电极由双孔陶瓷管以及钨丝 ($d_4=0.2\text{ mm}$) 组成。上下石英玻璃盖板由两块圆柱形不锈钢盖板和四颗螺栓紧固。在石英玻璃和不锈钢之间垫有铜片防止爆炸冲击损坏玻璃。如图 1 所示。

实验系统如图 2 所示。乙烷 (纯度 $>99.9\%$)、丙烷 (纯度 $>99.9\%$)、正丁烷 (纯度 $>99.9\%$) 作为

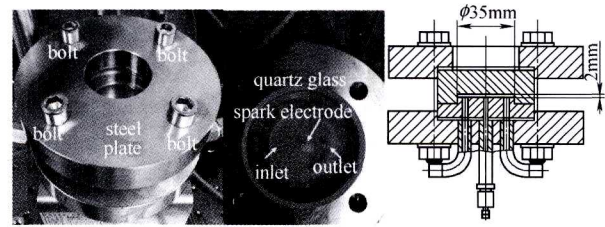


图 1 微型定容燃烧腔结构和装置

Fig.1 Structure of gap constant-volume combustion micro-chamber

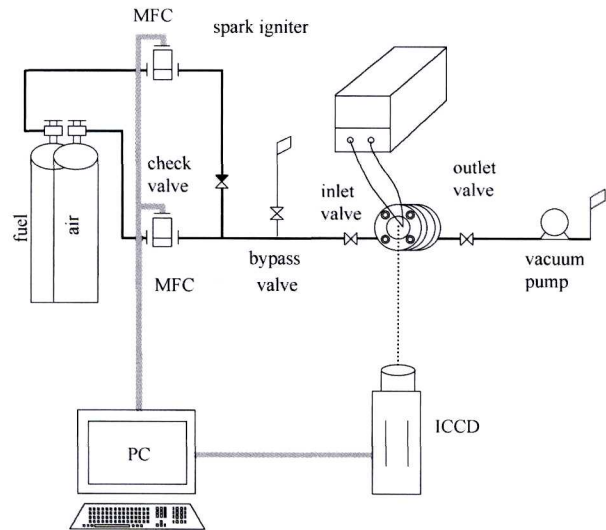


图 2 实验系统

Fig.2 Schematic graph of test rig

燃料, 压缩干空气作为氧化剂, 分别由质量流量计 (MKS GE50a 误差 0.1%) 控制, 在进入燃烧室之前充分预混。点火电极布置在燃烧腔室中心, 由高压线圈通过两根间距 0.5 mm 钨丝放电来实现点火。

每次实验开始前, 预混气通入燃烧室扫气 10 min , 然后关闭进出口静置 20 min 以确保燃烧室内无残留气体以及预混气混合均匀, 初始压力为 1 个大气压, 初始温度为室温。点火后, 通过高速摄像机 (MEMRECAM HX-6) 拍摄火焰传播过程, 曝光时间 $196.6\text{ }\mu\text{s}$, 拍摄记录 5000 幅/秒。对所拍摄每张图片使用 Matlab 编程处理, 通过提取每张图片中心垂直线上的最亮点到中心的像素距离, 将所提取距离进行换算, 可得出火焰传播距离, 其方法与过程如图 3 所示。首先对火焰原始图像提取轴线上每个像素亮度值, 然后运用二值法去噪点, 得到火焰轴线上的亮度分布值, 提取最亮点峰值作为火焰锋面位置, 换算得到火焰锋面实际空间位置。本文提取竖直方向下半径方向传播距离数据来计算火焰传播速度。

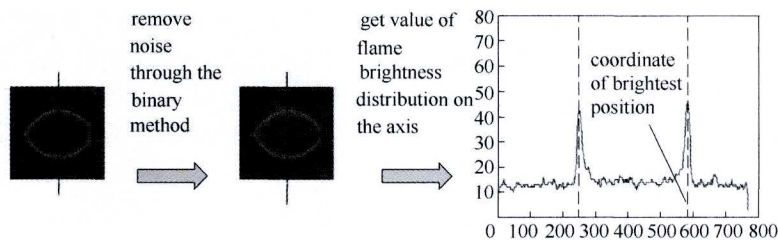


图 3 Matlab 提取火焰半径方法

Fig.3 Method to obtain flame radius by Matlab program

2 实验结果与分析

2.1 火焰传播可燃当量比范围

在固定点火电极位置、间距和点火能条件下，分别测试了乙烷、丙烷和正丁烷 3 种燃料在微燃烧室内能点着并形成火焰传播的当量比 (φ) 范围，结果如图 4 所示。由于微尺度效应的作用，乙烷/空气混合气在本实验装置中能点燃的范围为 $\varphi=0.9\sim 1.6$ ；丙烷/空气混合气在本实验装置中能点燃的范围为 $\varphi=1.0\sim 1.55$ ；正丁烷/空气混合气在本实验装置中能点燃的范围为 $\varphi=1.0\sim 1.5$ 。

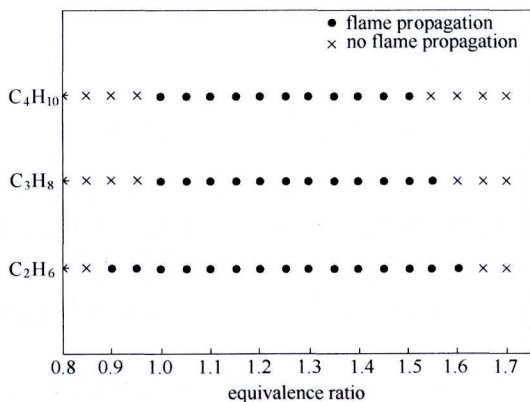


图 4 微型燃烧腔内 3 种燃料可燃当量比范围

Fig.4 Flammable equivalence ratio ranges of three fuels in micro chamber

可燃当量比范围与点火能和熄火距离密切相关。本文中高压线圈固定放电点火能在 100 mJ 左右（不包含线路点火能的损失），远大于 3 种燃料的最低点火能。最低点火能随燃料当量比的变化是开口向上抛物线的变化趋势，随当量比增加，最低点火能先降低后增大，在某一个当量比附近，最低点火能最小。如乙烷/空气，在当量比 $\varphi=1.2$ 时，最低点火能 0.24 mJ，丙烷/空气在 $\varphi=1.3$ 时，最低点火能 0.25 mJ，正丁烷/空气在 $\varphi=1.5$ 时，最低点火能 0.26 mJ^[14]。

同时，2 mm 间距已经接近 3 种燃料的熄火距

离。3 种燃料中，熄火距离按大小排序是正丁烷 > 丙烷 > 乙烷，在相同点火能和微型燃烧腔间距下，熄火距离小的燃料容易点燃并形成火焰传播。上述原因导致图 4 中可燃极限范围当量比排序是乙烷 > 丙烷 > 正丁烷。

2.2 火焰传播基本特性

3 种燃料在不同当量比下火焰传播特性如图 5 所示，火焰传播形态可分为 4 种，以乙烷为例[图 5(a)]：①在当量比较低时 ($\varphi=1.0$)，火焰光亮暗淡，火焰锋面光滑，火焰可传播至燃烧室尽头；② $\varphi=1.2$ ，火焰锋面光滑，火焰可传播至燃烧室尽头；③ $\varphi=1.4$ ，火焰锋面有褶皱，火焰可传播至燃烧室尽头；④ $\varphi=1.6$ ，火焰传播中途熄灭。从图 5 中还可以看到，火焰传播图片中的左右两边先出现皱褶，这是进排气口所在位置导致的。由于进排气通道与燃烧室直接连通，而进排气管上的阀门与燃烧腔有一小段距离，当进排气阀门关闭时，燃烧室封闭空间包含进排气通道这一段管内空间，尽管进排气通道体积占燃烧室体积比例较小（总和约为 0.13 ml，而燃烧室体积为 2 ml），但对燃烧后燃烧室内流场有着明显的影响。当预混气中心着火后向外火焰传播形成，热气体膨胀推动未燃冷气体向外流动，而在进排气口位置处，未燃气体形成汇流进入进排气口通道，从而改变火焰锋面结构，使得火焰传播图像不是一个正圆形，也容易形成皱褶。

通过对比可以发现，3 种燃料火焰传播速度不同，乙烷火焰传播完成稍快，丙烷与正丁烷相当，具体火焰传播速度在后面内容中定量分析比较。随着当量比升高，火焰传播更加不稳定，3 种燃料均出现火焰皱褶。并且在高当量比条件下会出现中途熄灭的情况，如乙烷在 $\varphi=1.6$ 和丙烷在 $\varphi=1.55$ 高当量比下的情况。

火焰传播中火焰面轮廓的局部增强或减弱，导致火焰面产生皱褶发生不稳定性传播，火焰不稳定由 3 种不同机制单独或相互作用所导致，分别是热

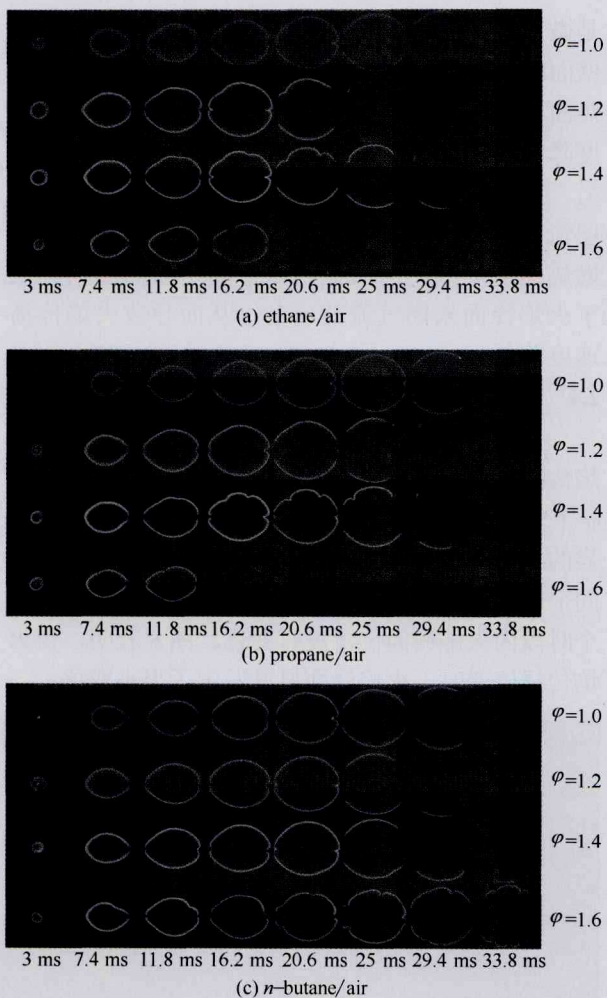


图 5 不同当量比下 3 种燃料火焰传播形态
Fig.5 Flame propagation and its shapes at different equivalence ratios of three kinds of fuels

扩散不稳定性、水动力学不稳定性和因为浮力造成的不稳定性^[15]。由于本文中微燃烧室水平放置，且间距是 2 mm，浮力影响可以忽略。

对于富燃料的乙烷/空气、丙烷/空气和正丁烷/空气预混火焰，它们的 Lewis 数 $Le \neq 1$ ，且随着当量比的增加，总体 Le 增大，非平衡扩散效应增强，因此，非平衡热质扩散容易造成传播中火焰面褶皱的发生^[15]，这与实际观察到的火焰褶皱在高当量比下较早出现现象一致。

水动力学不稳定性是传播后期发生褶皱和断裂的主要原因，在火焰传播后期，受壁面影响，在壁面附近，在黏性无滑移边界层的作用下，小间距的狭缝间流场速度梯度很大，导致火焰拉伸增强，增加了不稳定性。当 Le 随着当量比继续增大，热扩散速度相较于质量扩散速度继续增大，同时，高当量比下燃烧速度降低导致热释放率降低，在微尺度

下大的壁面散热增加的共同作用下，就会出现火焰不能继续传播而发生熄灭现象。

2.3 火焰传播速度特性

根据球形定容弹中火焰传播理论，火焰传播速度等于单位时间内火焰传播半径（距离）的增加量。通过计算不同时刻下火焰照片中提取的距离数据，获得本实验中火焰锋面的传播速度，即火焰锋面相对于固定壁面移动速度。对于 3 种燃料火焰传播速度计算，不考虑出现火焰褶皱和中途熄灭等不稳定燃烧工况，故选取 $\phi=1.0\sim 1.3$ 的火焰传播速度进行对比，结果如图 6 所示。可以看出，在开始时刻，

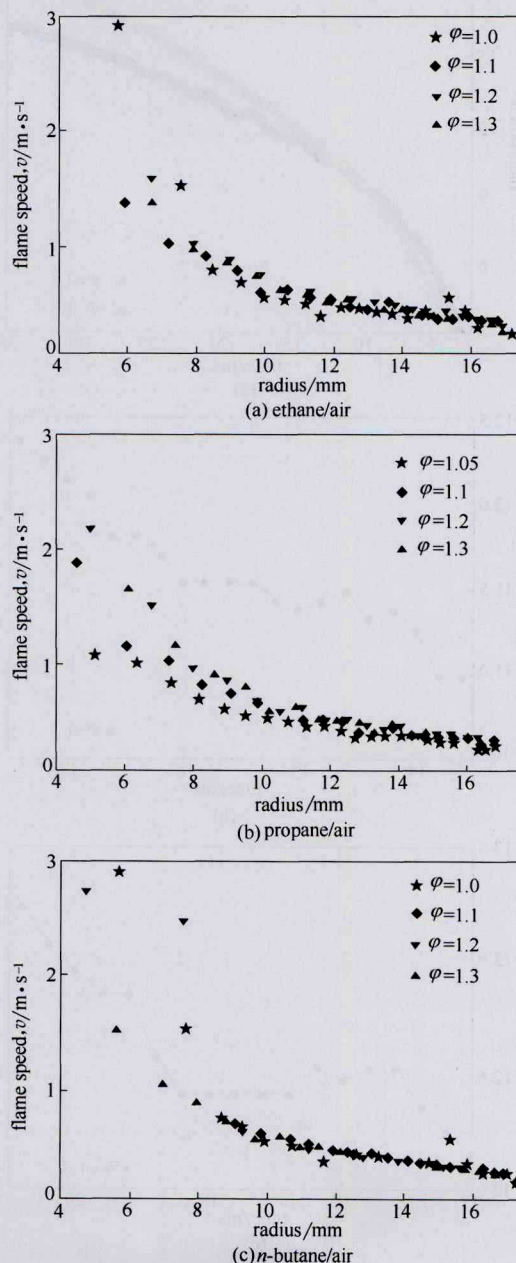


图 6 火焰传播速度随燃烧室半径变化
Fig.6 Flame radius varied with radius of chamber

受点火能量影响, 火焰传播速度远高于各自燃料的层流燃烧火焰传播速度。Liao 等^[16]和 Bradley 等^[17]的研究表明球形定容弹中, 在火核半径 6 mm 范围内, 火焰传播速度会受到点火能量影响。在半径超过这个临界点, 不同点火能量的层流燃烧速度趋于一致, 当火焰传播半径超出点火能量影响范围时, 传播速度随传播半径增大呈现下降的特性。图 6 表明火焰传播速度在 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 如丙烷[图 6(b)], 这比常规尺度定容燃烧腔中的火焰传播速度低 (高于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)^[12]。产生这一现象的主要原因

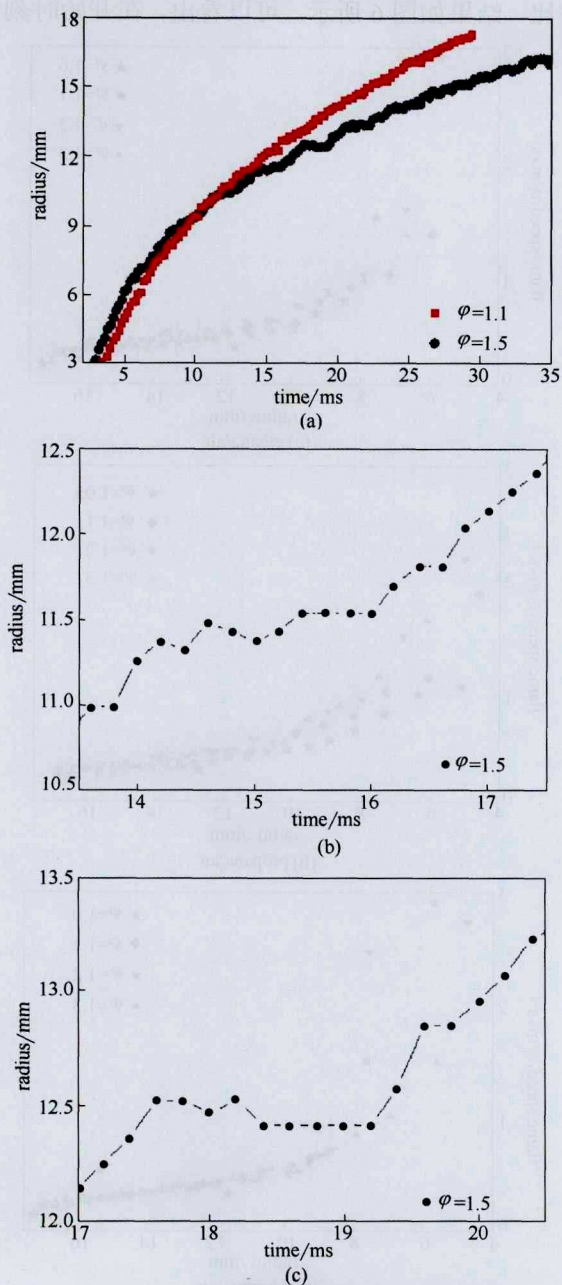


图 7 丙烷/空气预混气火焰传播半径随时间变化
Fig.7 Flame radius of propane/air premixed varied with radius

是微尺度下较高的表面积体积比加剧了微燃烧器的壁面散热, 随着火焰锋面半径的增大, 燃烧区域散热面积呈平方增大, 这导致散热急剧增大, 火焰温度降低, 从而降低了燃烧反应强度和火焰传播速度。另一方面, 火焰传播速度是当地未燃气流动速度和层流火焰燃烧速度叠加的结果, 压力的增加使得燃烧速度降低, 而后期封闭空间壁面的影响降低了火焰锋面未燃气流动速度, 从而导致火焰传播速度降低。

2.4 火焰传播的短暂停滞现象

在接近火焰传播熄灭上限当量比时, 会出现火焰传播短暂停滞现象。以丙烷为例, 图 7 表明, 在 $\phi=1.5$ 时, 火焰的传播半径随时间变化曲线出现明显的不光滑现象。在 14.6~16 ms 和 18~19.4 ms 时间范围内, 火焰传播半径基本没有变化, 说明这两个时段内火焰锋面位置没有变化。图 8 表明, 在火焰传播停滞时, 火焰锋面厚度发生了很小变化。

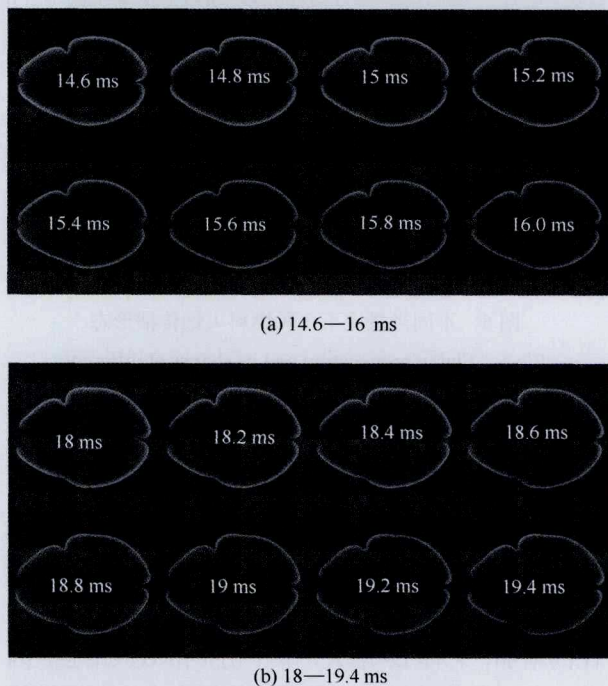


图 8 两段时间内的火焰传播形态
Fig.8 Flame shapes during two periods

壁面与火焰之间的非均衡换热是造成这种现象的原因之一, 在封闭空间内, 火焰传播方向与未燃气体质量扩散方向相反^[18]。在热辐射和壁面散热的作用下, 火焰温度降低, 燃烧反应强度降低, 火焰传播速度逐渐下降。当在某一时刻, 火焰面中燃烧所消耗的反应物质的量刚好等于未燃烧气体质量扩散的物质的量, 此时火焰面不再向前传播而停滞。

当火焰停滞不动时, 固定位置的持续放热使得附近壁面温度上升, 高温壁面对火焰面前未燃预混气的预热作用增强, 这种壁面回热作用有利于增强燃烧^[19-20], 导致火焰停滞后继续向前传播。

3 结 论

本文在常温常压下分别对比实验研究了不同当量比的乙烷、丙烷、正丁烷和空气的预混气在 2 mm 间距、35 mm 内径圆形定容燃烧腔内的火焰传播特性, 得到如下结论。

(1) 3 种燃料可形成火焰传播的燃料当量比范围不同, 乙烷当量比范围最宽, 丙烷次之, 正丁烷最窄, 与 3 种燃料各自的层流燃烧速度由大到小次序排列一致。

(2) 在微尺度定容燃烧腔中, 火焰传播中火焰呈现光滑、褶皱与断裂 3 种形态。随当量比增加, 火焰容易发生褶皱, 热质扩散不稳定性是褶皱发生时变化的主要原因; 火焰传播后期, 水动力学拉伸是褶皱发展的主要原因。

(3) 实验中乙烷、丙烷和正丁烷火焰传播速度在 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 且随着火焰向外传播逐渐降低, 比常规尺度定容燃烧腔中的火焰传播速度要低。

(4) 微尺度下火焰传播过程中会出现火焰面短暂停滞驻留现象, 火焰与壁面的非平衡换热是主要原因。

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] CHIA L C, FENG B. The development of a micropower (micro-thermophotovoltaic) device [J]. Journal of Power Sources, 2007, **165**(1): 455-480.
- [3] VICAN J, GAJDECZKO B F, DRYER F L, *et al.* Development of a microreactor as a thermal source for microelectromechanical systems power generation [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, **29**(1): 909-916.
- [4] 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.
- [5] JU Y, MARUTA K. Microscale combustion: technology development and fundamental research [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2011, **37**(6): 669-715.
- [6] FAN A, MINAEV S S, SERESHCHENKO E V, *et al.* Dynamic behavior of splitting flames in a heated channel [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2009, **45**(3): 245-250.
- [7] WU M, WANG C. Reaction propagation modes in millimeter-scale tubes for ethylene/oxygen mixtures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, **33**: 2287-2293.
- [8] 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.
- [9] YANG H L, FENG Y X, WANG X H, *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.
- [10] JIANG L Q, SU H, YANG H L, *et al.* Flame propagation characteristics of *n*-butane/air mixture in a micro gap constant volume chamber [C] // 10th Asia-Pacific Conference on Combustion. Washington D C: Combustion Institute, 2015.
- [11] BRADLEY D, SHEPPART C G W, WOOLLEY R, *et al.* The development and structure of flame instabilities and cellularity at low Markstein numbers in explosions [J]. Combustion and Flame, 2000, **122**(1): 195-209.
- [12] ZHOU M, GARNER C P. Direct measurements of burning velocity of propane-air using particle image velocimetry [J]. Combustion and Flame, 1996, **106**: 363-367.
- [13] TSUJI H, SPRAGUE B, WALTHER D C, *et al.* Effect of chamber width on flame characteristics in small combustion chamber [C] // 43rd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit. Reno, NV, 2005.
- [14] IRVIN G, YETTER R A. Combustion [M]. Academic Press, 2008: 401.
- [15] LAW C K. Combustion Physics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [16] LIAO S Y, JIANG D M, GAO J, *et al.* Measurements of Markstein numbers and laminar burning velocities for natural gas-air mixtures [J]. Energy & Fuels, 2004, **18**(2): 316-326.
- [17] BRADLEY D, GASKELL P H, GU X J. Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: a computational study [J]. Combustion and Flame, 1996, **104**(1): 176-198.
- [18] MANTON J, VON ELBE G, LEWIS B. Nonisotropic propagation of combustion waves in explosive gas mixtures and the development of cellular flames [J]. The Journal of Chemical Physics, 1952, **20**(1): 153-157.
- [19] RONNEY P D. Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors [J]. Combustion and Flame, 2003, **135**(4): 421-439.
- [20] JU Y, CHOI C W. An analysis of sub-limit flame dynamics using opposite propagating flames in mesoscale channels [J]. Combustion and Flame, 2003, **133**(4): 483-493.