

# 径向微通道中甲烷/空气预混 燃烧的实验研究

范爱武 刘思远 康鑫 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 对底部加热、间距为 2 mm、半径为 25 mm 的径向微通道中甲烷/空气的预混燃烧进行了系统的实验研究, 通过高速数码摄像机发现了圆形的稳定火焰和非稳定火焰、透平叶片形旋转火焰、移动式火焰以及三分叉旋转火焰等多种火焰形态, 在此基础上得到了以预混气进口速度和当量比为坐标的火焰形态谱图, 表明火焰形态的形成与预混气进口速度和当量比之间有着密切的关系。对燃烧产物的测试和分析证实了燃烧效率的高低与火焰形态之间有着直接的联系。

**关键词** 微尺度燃烧; 火焰形态; 旋转火焰; 谱图; 燃烧效率

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2010)05-0891-04

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON PREMIXED COMBUSTION OF CH<sub>4</sub>/AIR MIXTURE IN A RADIAL MICROCHANNEL

FAN Ai-Wu LIU Si-Yuan KANG Xin LIU Wei

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Premixed combustion of methane-air mixture in a radial micro channel with a gap of 2.0 mm and a diameter of 50 mm was experimentally investigated. A variety of flame patterns, including stable circular flame and several unstable flame patterns termed unstable circular flame, single and double pelton-like flames, travelling flame, and triple flame, were observed with an image intensified high-speed video camera. The regime diagram of all those flame patterns is presented in this paper, which demonstrates that flame pattern formation is a function of inlet mixture velocity and mixture equivalence ratio. Major combustion products were measured, which indicates that combustion completeness and efficiency have direct and close relationships with the flame patterns.

**Key words** micro combustion; flame pattern; rotary flame; regime diagram; combustion efficiency

## 0 引言

目前, 各种微电子机械系统 (MEMS) 大都由电池驱动。然而, 电池存在能量密度小、体积和重量大、使用时间短、充电时间长等缺点, 而氢气以及碳氢化合物具有比电池高几十倍的能量密度。因此, 通过直接燃烧碳氢化合物来为 MEMS 提供动力有望在将来成为取代电池的一种方法。从 20 世纪 90 年代开始, 关于微动力系统和微尺度燃烧的研究就得到了世界各国的高度重视<sup>[1~8]</sup>。

在微小尺度下, 由于燃烧室表面积与体积的比值相对于常规尺度来说要大两个数量级<sup>[2]</sup>, 使得通过壁面的散热损失和自由基销毁几率大大增加, 火焰难以稳定维持, 容易发生灭火。因此一般需要采

取某种热管理措施来提高火焰稳定性。譬如, 在微小型“Swiss Roll”燃烧器中, 低温未燃预混气和高温燃烧产物通过螺旋形流道之间的固体壁面进行热循环, 对低温预混气进行预热, 达到提高燃烧稳定性、扩大可燃范围的目的<sup>[3]</sup>。由于实际的燃烧器一般结构较复杂, 不便于对其中的火焰进行直接观察, 为此, Maruta 等通过对透明的石英微通道进行加热, 使其形成类似于热循环型微小燃烧器的壁温分布, 用可视化的方法来研究其中的火焰稳定性, 发现了一些有趣的火焰现象<sup>[4]</sup>。本文借鉴 Maruta 等的实验方法, 对甲烷/空气在间距为 2 mm、半径为 25 mm 的径向微通道中的预混燃烧进行实验研究。

收稿日期: 2009-11-28; 修订日期: 2010-04-19

基金项目: 煤燃烧国家重点实验室开放基金 (No.FSKLCC0816); 华中科技大学自主创新研究基金 (No.M2009007)

作者简介: 范爱武 (1973-), 男, 湖南隆回人, 副教授, 博士, 主要从事微尺度燃烧和强化传热方面的研究。

## 1 实验装置与方法

实验系统如图 1 所示。径向微通道由直径为 50 mm、厚度为 1 mm 的两块石英玻璃板所构成。进气管直径为 4 mm，一端与上板中心孔相连，另一端固定在三维坐标架上。此外，进气管外包裹小直径的冷却水管，使其外壁大致保持在室温左右。下板固定在另外一个支架上，两板之间的平行度借助于水平仪可调整达到  $\pm 0.1^\circ$ 。加热炉采用烧结的圆形金属多孔板来产生一个均匀的平面火焰。进行燃烧实验前，先点燃加热炉对径向微通道底部进行加热，同时通入一定速度的常温空气，待形成稳定的壁温分布后，送入甲烷/空气的预混气进行燃烧实验。

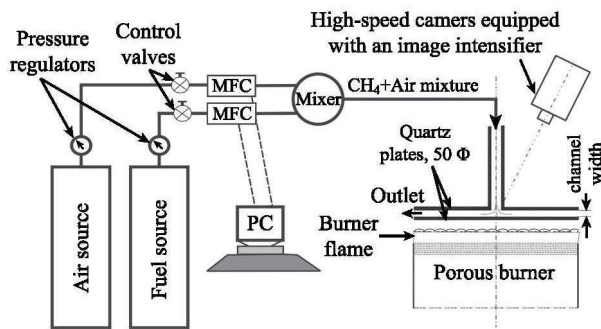


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

图 2 示出了进气速度为 2 m/s 时下板上表面的壁温分布，采用 250  $\mu\text{m}$  的 K 型热电偶测得，壁温最高为 900 K 左右。加热炉和径向微通道的燃料和空气流量 (速度) 均通过气体质量流量控制仪来进行调节，经混合器均匀混合后送入微通道。加热炉使用液化气做燃料，实验过程中其加热功率 (即流量) 保持不变。各种气体的压力由调压计来调节控制，均稳定在 0.1 MPa，以减少压力波动对燃烧的影响。

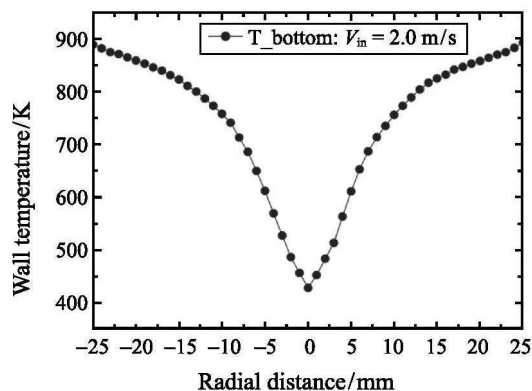


图 2 径向微通道内下表面的壁温分布 (进气速度为 2 m/s)

Fig. 2 Temperature profile of the bottom plate at  $V_{in} = 2.0 \text{ m/s}$

由于垂直进口管的限制，高速数码相机是从斜上方进行拍摄的。为了得到清晰的数码影像，采取了以下两种措施：(1) 加装一个图像增强器；(2) 拍摄前迅速将加热炉熄灭，拍摄完毕后再重新点燃。因为录像时间只有 1~2 s，在这极短的时间内壁温变化非常小，不会对燃烧造成很大的影响。为了使进气管内的流动状态为层流，最大进气速度控制在 7 m/s (管内  $Re$  约为 1800)。预混气进气速度和当量比分别以 0.5 m/s 和 0.05 为间隔进行实验。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 火焰形态形成的实验研究

借助于高速数码相机，在实验中观察到了六种不同的火焰形态，即圆形稳定火焰和非稳定火焰、透平叶片形旋转火焰、移动式火焰以及三分叉旋转火焰，分别如图 3(a)~(f) 所示。

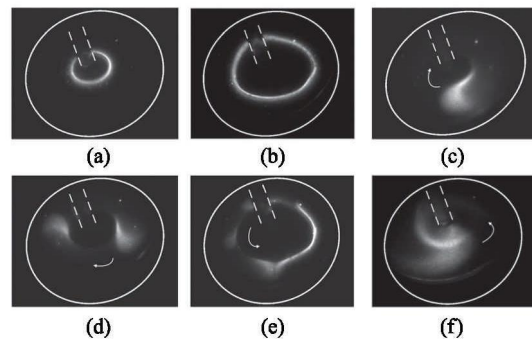


图 3 从高速数码相机截取的不同火焰形态的一帧图像：(a) 稳定圆形火焰，(b) 不稳定圆形火焰，(c) 单个透平叶片形旋转火焰，(d) 两个透平叶片形旋转火焰，(e) 移动式火焰，(f) 三分叉旋转火焰。白色椭圆表示径向微通道的轮廓，白色平行虚线代表进气管，箭头指示火焰的旋转方向

Fig. 3 One shot photos of different flame patterns taken with an image-intensified high-speed video camera from a top-side viewpoint: (a) stable circular flame, (b) unstable circular flame, (c) single pelton-like flame, (d) double pelton-like flame, (e) travelling flame, and (f) triple flame. Solid and dashed white lines indicate the positions of top plate and mixture delivery tube, respectively. Arrows were drawn to indicate the rotating direction of the rotating flame patterns

在系统实验的基础上，画出了以预混气进气速度和当量比为坐标的火焰形态谱图，如图 4 所示。

从图 4 可以看出，不同火焰形态的形成与预混气进气速度和当量比有着密切的关系。在进气速度为 1.5~6.0 m/s 的大部分工况下，火焰为常规的稳定圆形火焰。进气速度增大到 6.5 m/s 时，圆形火焰变得不稳定。当进气速度达到 7.0 m/s 时，在当量比为 0.75~1.0 的范围内，出现了一种旋转的三分叉火焰，

其旋转频率范围为 40~60 Hz。进一步分析火焰录像发现, 其旋转方向是随机的, 而且旋转频率随着预混气当量比的增大而增大, 表明燃烧速度与当量比成正比相关。在图 4 的下方和上方存在两种不稳定火焰, 即移动式火焰和透平叶片形旋转火焰, 这表明当预混气当量比接近于燃烧的上下浓度极限时, 火焰变得不稳定。仔细观察图 3(e) 发现, 其实移动式火焰是圆形火焰的一个变种。在圆形火焰锋面的某个地方不断产生透平叶片形小火焰, 这个小火焰沿着圆周方向传播; 与此同时, 另一侧也发出类似的小火焰。从两边发出的小火焰在传播过程中发生碰撞而湮灭, 这个过程持续不断地进行。当富油侧的当量比再增大或者贫油侧的当量比再减小时, 火焰就变成了透平叶片形旋转火焰。小火焰的数目有时为 1 个, 有时 2 个, 与进气速度和当量比均有关系。其旋转方向也是随机的, 旋转频率为 20~70 Hz。

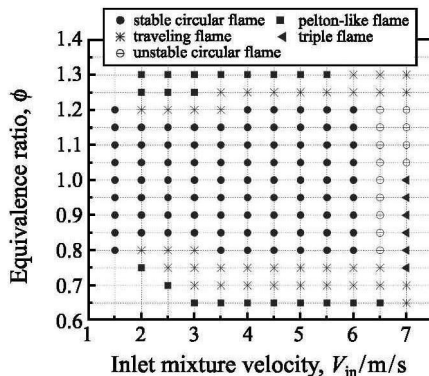


图 4 不同火焰形态的谱图

Fig. 4 Regime diagram of flame patterns

### 3.2 燃烧产物和效率的测试分析

应用气相色谱仪对五种燃烧产物 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ ) 进行了测试分析。在此基础上, 应用公式 (1) 对燃烧效率进行了计算。

$$\text{燃烧效率} = \frac{\text{燃烧过程释放的总焓}}{\text{燃料可能释放的最大焓值}} \quad (1)$$

图 5 和图 6 分别示出了进气速度为 4.0 m/s、不同当量比时燃烧产物中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$  的摩尔分数以及燃烧效率。从图 5 可以看到, 当  $\phi = 0.8 \sim 1.2$  时 (对应稳定圆形火焰), 排气中没有检测到未燃的甲烷燃料。而且  $\phi = 0.8 \sim 1.0$  时, 排气中  $\text{CO}$  的浓度很低, 但在富油工况下 ( $\phi = 1.1 \sim 1.2$ ), 排气中  $\text{CO}$  的浓度迅速增加。因此, 当  $\phi$  从 0.8 增加到 1.2 时, 燃烧效率从 99.9% 降到 90.4% (见图 6)。当  $\phi = 0.70$  和 1.25 时 (对应移动式火焰), 在排气中检

测到大量的  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$ , 燃烧效率分别约为 89.0% 和 74.0% (见图 6)。当  $\phi = 0.65$  和 1.30 时 (对应单个透平叶片形火焰) 排气中的  $\text{CH}_4$  浓度分别比  $\phi = 0.70$  和 1.25 更大, 而  $\text{CO}$  的浓度则分别比  $\phi = 0.70$  和 1.30 时要低。 $\phi = 0.65$  和 1.30 时燃烧效率分别约为 72.4% 和 67.4% (见图 6)。

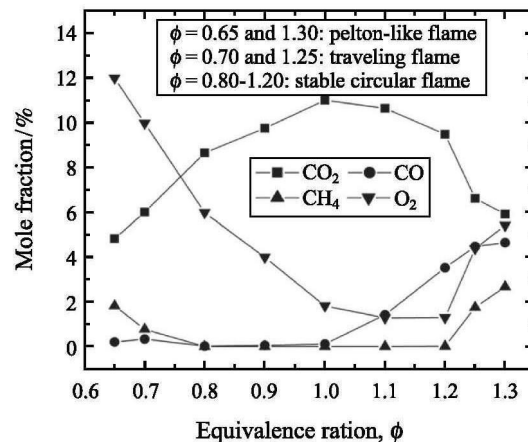


图 5  $V_{in} = 4.0$  m/s、不同当量比时排气中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{O}_2$  的摩尔分数

Fig. 5 Mole fractions of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ , and  $\text{O}_2$  in the exhaust gas versus mixture equivalence ratio when  $V_{in} = 4.0$  m/s

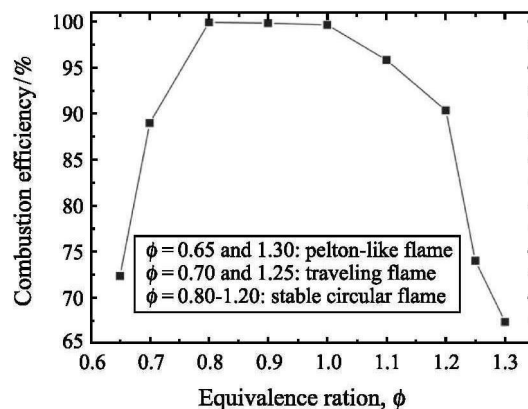


图 6  $V_{in} = 4.0$  m/s、不同当量比时的燃烧效率

Fig. 6 Combustion efficiency versus mixture equivalence ratio when  $V_{in} = 4.0$  m/s

图 7 和图 8 给出了预混气当量比为 1 的情况下, 燃烧产物和效率与进气速度之间的依赖关系。从图 7 可以看出, 当  $V_{in} = 1.5 \sim 6.0$  m/s 时 (对应稳定圆形火焰), 排气中没有检测到未燃的甲烷, 同时  $\text{CO}$  的浓度也非常低, 因此燃烧效率高达 99.6% (见图 8)。然而当  $V_{in} = 6.5$  m/s 时 (对应不稳定圆形火焰), 在排气中检测到了未燃的甲烷气体,  $\text{CO}$  的浓度也有所



升高, 导致  $\text{CO}_2$  浓度降低和  $\text{O}_2$  浓度升高 (见图 7), 燃烧效率也降至 95.1% (见图 8)。当  $V_{\text{in}} = 7.0 \text{ m/s}$  时 (对应三分叉火焰), 排气中未燃的甲烷浓度明显上升,  $\text{CO}$  浓度也略微升高。同时,  $\text{O}_2$  浓度急剧升高,  $\text{CO}_2$  浓度也明显降低, 结果导致燃烧效率降至 78.8%。

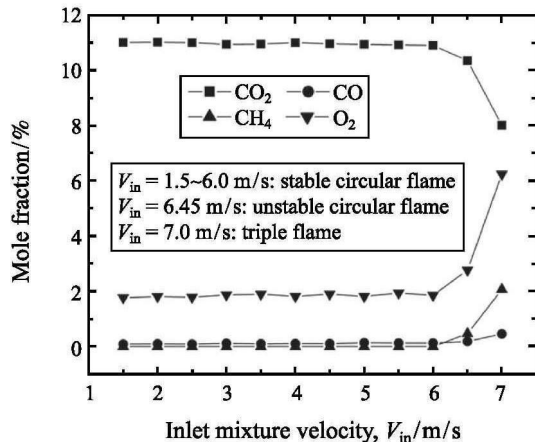


图 7  $\phi = 1.0$ 、不同进口速度时排气中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{O}_2$  的摩尔分数

Fig. 7 Mole fractions of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ , and  $\text{O}_2$  in the exhaust gas versus inlet mixture velocity when  $\phi = 1.0$

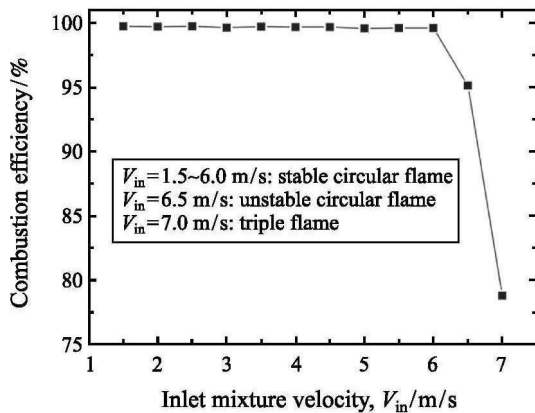


图 8  $\phi = 1.0$ 、不同进口速度时的燃烧效率

Fig. 8 Combustion efficiency versus inlet mixture velocity when  $\phi = 1.0$

## 4 结 论

通过对底部加热、间距为 2 mm、半径为 25 mm 的径向微通道中甲烷/空气预混燃烧的实验研究, 发现了除常规的圆形火焰之外的一些形状奇特的旋转火焰, 它们的形成跟进气速度和当量比之间有着密切的关系。同时, 由于这些旋转火焰的锋面不是一个完整的圆环, 部分燃料会未经燃烧而泄漏出来, 导致排气污染和燃烧效率的降低。此外, 本实验得到的火焰形态谱图, 给我们以启发: 通过适当改变预混气进气速度或者当量比, 可以实现由不稳定火焰到稳定火焰的转变, 从而为微小型燃烧器的高效运行提供指导。

## 参 考 文 献

- [1] Fernandez-Pello A C. Micro Power Generation Using Combustion: Issues and Approaches [J]. Proc. Combust. Inst., 2002, 29: 883-899
- [2] Waitz I A, Gauba G, Tzeng Y S. Combustors for Micro Gas Turbine Engines [J]. ASME J. Fluids Eng., 1998, 120(1): 109-117
- [3] Kim N I, Kato S, Kataoka T, et al. Flame Stabilization and Emission of Small Swiss-Roll Combustors as Heaters [J]. Combust Flame, 2005, 141: 229-240
- [4] Maruta K, Kataoka T, Kim N I, et al. Characteristics of Combustion in a Narrow Channel with a Temperature Gradient [J]. Proc. Combust. Inst., 2005, 30: 2429-2436
- [5] Fan A W, Minaev S, Kumar S, et al. Experimental Study on Flame Pattern Formation and Combustion Completeness in a Radial Microchannel [J]. J. Micromech Microeng, 2007, 17(12): 2398-2406
- [6] Fan A W, Minaev S, Kumar S, et al. Regime Diagrams and Characteristics of Flame Patterns in Radial Microchannels with Temperature Gradients [J]. Combust Flame, 2008, 153(3): 479-489
- [7] Fan A W, Minaev S, Sereshchenko E, et al. Experimental and Numerical Investigations of Flame Pattern Formations in a Radial Microchannel [J]. Proc. Combust. Inst., 2009, 32: 3059-3066
- [8] Fan A W, Minaev S, Sereshchenko E, et al. Dynamic Behavior of Splitting Flames in a Heated Channel [J]. Combust Explos and Shock Waves, 2009, 45: 245-250