

# 微小圆管中分裂火焰的实验与理论研究

范爱武<sup>1</sup> Minaev Sergey<sup>2</sup> Maruta Kaoru<sup>3</sup> 杨浩林<sup>4</sup> 刘伟<sup>1</sup>

- (1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所, 诺沃西比尔斯克 俄罗斯;
3. 日本东北大学流体科学研究所, 仙台 日本;
4. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

**摘要** 对丙烷/空气在内径 2 mm 的圆管内的预混燃烧进行了实验研究, 借助于高速数码摄像机发现了分裂火焰现象, 其中一个为向上游传播的较亮的常规火焰, 另一个为向下游传播的较暗的微弱火焰。这些火焰先后熄灭, 经过一段时间后又重复发生自着火、分裂、反向传播、灭火过程。这种现象在富燃、化学恰当比以及贫燃火焰中都有存在。一维非稳态计算表明化学反应速率的轴向分布曲线存在大小不同的两个峰值, 它们分别对应实验观察到的两个不同亮度的火焰。其中, 常规火焰是由于向上游较冷的壁面散热而熄灭, 微弱火焰则是由于下游燃料耗尽而熄灭的。

**关键词** 微燃烧; 分裂火焰; 微弱火焰; 火焰不稳定性

**中图分类号:** TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)10-1781-04

## Experimental and Theoretical Study on Splitting Flames in a Circular Micro Tube

FAN Ai-Wu<sup>1</sup> MINAEV Sergey<sup>2</sup> MARUTA Kaoru<sup>3</sup> YANG Hao-Lin<sup>4</sup> LIU Wei<sup>1</sup>

- (1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS, Novosibirsk, Russia;
3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, Sendai, Japan;
4. Guangzhou Institute of Energy Conversation, CAS, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** Premixed combustion of propane/air mixture was experimentally and theoretically investigated in a heated micro tube of 2.0 mm inner diameter. Splitting flames were observed with an image-intensified high-speed digital video camera. After auto-ignition of the mixture, the reaction front splits into an ordinary flame and a weak flame. The former propagates upstream whereas the latter moves downstream and finally they both extinguish. After some delay, re-ignition of fuel-air mixture occurs and flame splitting process repeats. This phenomenon was identified in rich, stoichiometric and lean mixtures. It was reproduced by a thermo-diffusive model with global one-step chemistry. The computation results demonstrate that the ordinary flame is quenched by heat loss to the cold wall in the upstream region, while the weak flame is extinguished by consumption of fuel in the downstream region.

**Key words** micro combustion; splitting flame; weak flame; flame instability

## 0 引言

随着微加工技术的发展出现了许多 MEMS 设备。传统的化学电池存在能量密度小、重量大、充电时间长等诸多不足之处, 而碳氢化合物具有比电池高几十倍的能量密度。因此, 基于直接燃烧碳氢化合物的微小型动力系统具有很大的发展潜力, 微尺度燃烧成为新的研究热点<sup>[1]</sup>。

燃烧室缩小后, 其表面积与体积的比值大大增加<sup>[2]</sup>, 通过壁面的散热损失和自由基销毁几率也因此大为增强, 容易导致灭火, 故常需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, 燃烧产物通过螺旋形的固体壁面对低温预混气进行预热, 达到提高燃烧稳定性、扩大可燃

收稿日期: 2011-01-07; 修订日期: 2011-09-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51076054); 湖北省自然科学基金 (No.20092020); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2011TS078)

作者简介: 范爱武 (1973-), 男, 湖南邵阳人, 副教授, 博士, 主要从事微尺度燃烧和微通道冷却方面的研究。

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等通过对透明石英微通道事先进行加热，使其形成类似于热循环型燃烧器的壁温分布，用可视化的方法来观察火焰的稳定性，发现了一些有趣的火焰现象<sup>[4,5]</sup>，如反复熄火、着火的现象。这些新的火焰现象引起了许多研究者的兴趣。随后，Minaev等<sup>[6]</sup>从理论上解释了以上的火焰动态过程，Jackson等<sup>[7]</sup>和Pizza等<sup>[8]</sup>从数值计算的角度也证明了这些现象的存在。Richecoeur和Kyritsis<sup>[9]</sup>通过实验在弯管中也观察到了这种现象。本文利用高速数码摄像机对Maruta等发现的反复熄火、着火的动态燃烧过程进行更加深入细致地观察，发现了一种新的分裂火焰，并从理论上进行了解释。

### 1 实验研究

#### 1.1 实验装置与方法

实验装置与文献[5]中使用的一样，试验段示意图如图1所示。采用一根内径为2 mm的石英玻璃管作为燃烧通道，先通入一定速度的冷空气，同时用平面火焰炉对石英管进行加热，约30 min后将形成稳定的壁温分布。圆管内壁温度分布用K型热电偶测量，并进行了误差修正，最后得到如图2所示的壁温分布，其中轴向坐标为零的位置对应于加热段的起始位置。最高壁面温度为1135 K，该温度能够点燃实验用的燃料气体丙烷。气体流量由精度为1%的质量流量控制器进行调节。火焰动态过程采用

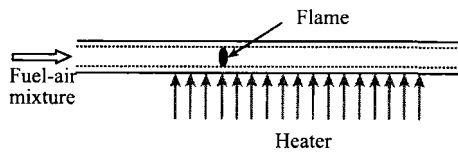


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

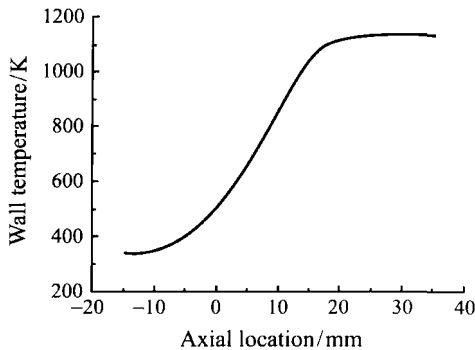


图2 管内壁面温度沿轴向的分布曲线

Fig. 2 Temperature profile of the inner wall surface

高速数码摄像机进行拍摄，速度为4000帧/秒。为了提高对微弱火焰的分辨能力，在高速数码摄像机前加装了一个图像增强器。

#### 1.2 实验结果

实验中除了观察到了稳定火焰之外，还在进气速度为20~30 cm/s范围内发现了一种火焰分裂现象，即火焰在传播过程中分裂为2个火焰的现象。图3给出了化学恰当比的丙烷-空气混合气在自着火后进行传播的8帧图片。从图3(a)、(b)可以看到，燃料在管壁温度较高的某一点着火后即往上游传播。此后，反应锋迅速变厚，并分裂为两个，如图3(c)、(d)所示。图中用白色箭头指出火焰分裂的位置，其中左侧的那个火焰具有较高的发光度，而右侧的那一个则发光度较弱，本文把它们分别称作常规火焰和微弱火焰。同时，从图中可以看出，常规火焰的传播速度要比微弱火焰快很多。左侧的常规火焰在往上游传播的过程中又发生第二次分裂，如图3(e)所示。因此，在图3(f)中可以看到三个火焰同时存在于微通道内不同的位置，其中左侧的那个火焰较亮，而中间和右侧的那两个火焰则较暗。此后，这两个微弱火焰逐渐变得更暗并最终消失，见图3(g)~(h)。与此同时，左侧常规火焰也变薄变暗，其传播速度也慢下来，最后熄灭。一段时间之后，燃料-空气混合物在管壁的加热作用下重新着火，类似的动态过程又周期性地重复上演。

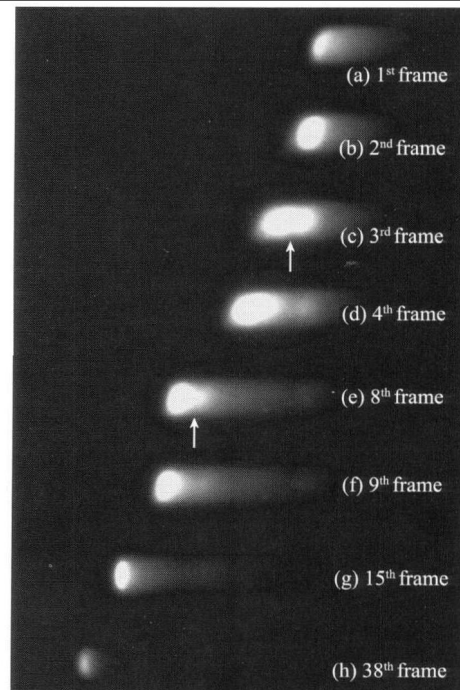


图3 微小圆管内分裂火焰的动态过程

Fig. 3 Dynamic process of the splitting flames in the micro tube

## 2 理论研究

### 2.1 数学模型

由于本文目的只是想定性地从理论上去分析分裂火焰现象, 而不是研究其中详细的化学反应机理, 因此采用一步总包反应机理, 同时假设输运参数为常数, 密度不随温度而变化。气相温度为  $T$ , 燃料和氧化剂的质量分数分别为  $Y_f$  和  $Y_o$ 。能量和组分的一维非稳态守恒方程为:

$$\rho c_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) T \right] = \lambda \Delta T - \frac{4\alpha}{d} (T - \theta) + QW(Y_o, Y_f, T) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_o)}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) (\rho Y_o) = D \Delta(\rho Y_o) - \nu W(Y_o, Y_f, T) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_f)}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) (\rho Y_f) = D \Delta(\rho Y_f) - W(Y_o, Y_f, T) \quad (3)$$

其中, 化学反应速率遵循 Arrhenius 定律:

$$W(Y_o, Y_f, T) = \rho A Y_o^a Y_f^b \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

式中, 取  $A = 5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ,  $E/R = 15042 \text{ K}$ ,  $a = 1.65$ ,  $b = 0.1$ ,  $\rho = 1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $c_p = 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\lambda = 0.026 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $d = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $D = 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $Q/c_p = 33000 \text{ K}$  以及  $\nu = 3.62$ 。这些值对应着化学恰当比的丙烷-空气混合物<sup>[10]</sup>。 $\alpha$  是对流换热系数, 它跟努赛尔数相联系, 即  $Nu = \alpha d/\lambda$ 。考虑到微通道的壁温分布恒定, 为简化计算, 取  $Nu = 4$ 。

由于着火及火焰传播过程很短, 同时石英管热容较大, 因此计算中采用恒定壁温分布的边界条件。根据实验测量结果, 将管壁温度拟合成以下形式:

$$\text{当 } 0 < x < l \text{ 时, } \theta = T_0 + (\Theta_1 - T_0) \frac{\exp(\eta x) - 1}{\exp(\eta l) - 1},$$

$$\text{当 } l < x < L \text{ 时 } \theta = \Theta_1.$$

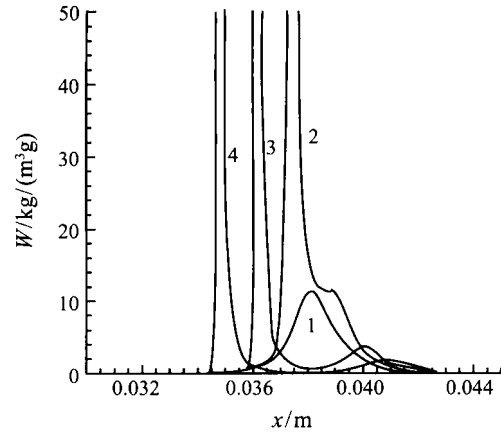
这里,  $l = 0.04 \text{ m}$ ,  $L = 0.065 \text{ m}$ ,  $\eta = 70 \text{ m}^{-1}$ ,  $\Theta_1 = 1150 \text{ K}$ 。计算区域为  $0 < x < L$ 。

边界条件如下:

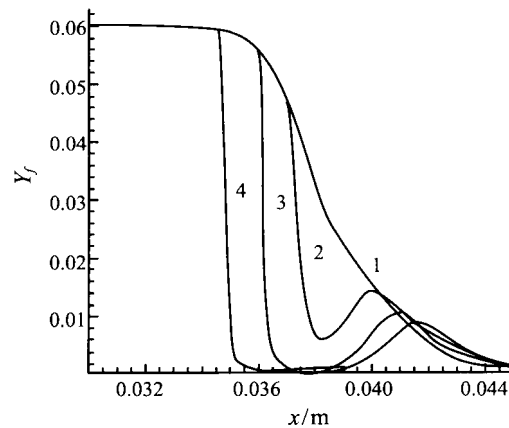
$$x = 0: T = T_0, Y_f = Y_f^0, Y_o = Y_o^0$$

$$x = L: \nabla T = \nabla Y_f = \nabla Y_o = 0$$

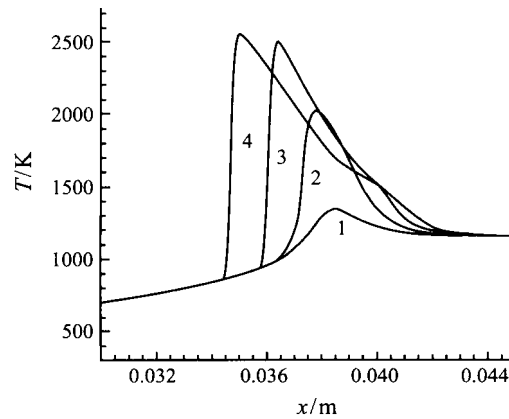
采用隐式、有限差分格式对方程组 (1)~(3) 进行数值求解。进气速度取  $20 \text{ cm/s}$ , 时间步长取  $3.25 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。



(a) 化学反应速度



(b) 燃料浓度



(c) 气体温度

图 4 着火后化学反应速率、燃料浓度以及气体温度的轴向分布随时间的变化, 相邻曲线之间的间隔为  $0.4875 \text{ ms}$ 。

Fig. 4 Temporal variation of the chemical reaction rate, fuel concentration and gas temperature profiles in the tube after re-ignition. The time interval of each curve is  $0.4875 \text{ ms}$ .

### 2.2 计算结果

数值计算结果分别示于图 4, 四条曲线分别代表着着火后每隔  $1500$  个时间步长, 即  $0.4875 \text{ ms}$  的结果。

图 4(a) 为化学反应速率的轴向分布随时间的变化。从中可以看出,着火后化学反应速率出现了两个峰值,并且这两个峰值分别向上游和下游移动,它们分别对应于向相反方向传播的两个火焰,其中较大峰值为向上游传播的常规火焰,而较小峰值为向下游传播的微弱火焰。最后这两个火焰都将熄灭。

### 3 结 论

通过丙烷-空气的微通道预混燃烧实验观察到了两个和三个火焰向不同方向传播的燃烧现象。其中,左侧火焰为较亮的常规火焰,向上游传播;右侧的微弱火焰则向下游传播,最后两个火焰都将熄灭。经过一段延迟时间,相同的着火、分裂、反向传播、灭火过程重复出现。基于一个热-扩散模型,通过非稳态计算发现了化学反应速率和燃料浓度沿轴向的双峰分布现象,分析得出往上游传播的火焰是因壁面的热损失而导致灭火,往下游传播的火焰则是由于燃料耗尽而消失。

此外,计算也表明:本文采用的模型没有复现二次火焰分裂现象,这可能是由于该模型采用简单的一步反应化学机理的结果,在以后的计算中将采用多步反应机理进行计算。

### 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] 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

[6] Minaev S, Maruta K, Fursenko R. Nonlinear Dynamics of Flame in a Narrow Channel With a Temperature Gradient [J]. Combustion Theory and Modelling, 2007, 11: 187-203

[7] Jackson T L, Buckmaster J, Lu Z, et al. Flames in Narrow Circular Tubes [J]. Proc Combust Inst, 2007, 31: 955-962

[8] Pizza G, Frouzakis C E, Mantzaras J, et al. Dynamics of Premixed Hydrogen/Air Flames in Microchannels [J]. Combust Flame, 2008, 152: 433-450

[9] Richecoeur F, Kyritsis D C. Experimental Study of Flame Stabilization in Low Reynolds and Dean-Number Flows in Curved Mesoscale Ducts [J]. Proc Combust Inst, 2005, 30: 2419-2427

[10] Westbrook C K, Dryer F L. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames [J]. Combust Sci and Tech, 1981, 27: 31-43