

# 微喷管甲烷非预混射流火焰燃烧特性实验研究

李星 张京 杨浩林 蒋利桥 汪小憨 赵黛青

(中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

**摘要** 为发展微尺度燃烧器并拓展微尺度燃烧理论, 对具有外部伴流空气的甲烷非预混微喷管射流火焰燃烧特性进行了实验研究。微喷管采用内径为 710  $\mu\text{m}$ 、425  $\mu\text{m}$  及 280  $\mu\text{m}$  的不锈钢管, 通过实验得到了微喷管非预混射流火焰的火焰形态、高度、最小熄灭流速及吹熄极限, 并与常规尺度 (管内径 2 mm) 非预混射流火焰进行了对比。研究表明微喷管射流火焰只有层流火焰一种形态; 微喷管射流火焰高度主要取决于燃料流速而不受外部伴流速度影响; 微喷管射流火焰的吹熄极限随伴流速度先增加后减小, 而微射流火焰的最小熄灭流速受伴流空气速度影响较小, 随管径减小微喷管射流火焰的可燃范围急剧减小。

**关键词** 微喷管非预混射流火焰; 火焰高度; 熄灭极限; 吹熄极限; 可燃范围

**中图分类号:** TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2016)04-0907-05

## Experimental Investigation on Combustion Characteristics of Methane Non-Premixed Micro-Jet-Flames

LI Xing ZHANG Jing YANG Hao-Lin JIANG Li-Qiao WANG Xiao-Han ZHAO Dai-Qing  
(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** The combustion characteristics of methane non-premixed micro-jet-flames in coflow airs were studied experimentally for development of micro-combustor and extension of combustion theory of micro-combustion. Stainless steel tubes with the inner diameters of 710  $\mu\text{m}$ , 425  $\mu\text{m}$  and 280  $\mu\text{m}$  were employed in the study. The flame shapes, heights, blow off limits and minimum extinction limits of the micro-jet-flames were obtained from the experiments, and the results were compared with those of an ordinary non-premixed jet-flames ( $d = 2 \text{ mm}$ ). The results show that the micro-jet-flames by those three micro-tubes are in the laminar non-premixed jet-flame regime, the turbulent flame and transient flame were not observed for the non-premixed micro-jet-flames. The flame height of the non-premixed micro-jet-flame is depended on the flow velocity of the fuel and not affected by the velocity of the coflow air. The blow off limit of the micro-jet-flame increases with the velocity of the coflow air firstly and then decreases. The minimum velocity at the flame extinction of the non-premixed jet-flame is not sensitive to the velocity of the coflow air. The flammable region of the non-premixed micro-jet-flame decreases rapidly with the diameter of the micro-tube.

**Key words** non-premixed micro-jet-flame; flame height; extinction limit; blow off limit; flammable region

## 0 引言

在过去的近十年时间里, 微尺度燃烧装置及微尺度火焰燃烧特性得到了广泛的研究<sup>[1,2]</sup>。MIT 研究团队率先研制了微型的燃气轮机装置, 并对其燃烧特性进行了研究<sup>[1,2]</sup>; Tohoku University 的 Maruta 等人<sup>[1,2]</sup>对微型的 Swiss-roll 燃烧器进行了系统的实验及数值研究, 该研究团队还对具有确定温度边界平板燃烧器内和具有确定温度边界微管内预混火焰燃烧特性进行了基础研究<sup>[1-3]</sup>。

我国研究学者也对微尺度火焰进行了相关研究。作者所在中国科学院广州能源研究所燃烧实验室, 研究了微尺度预混射流火焰的燃烧特性, 给出了火焰的可燃范围随流速及当量比的变化<sup>[4]</sup>。华中科技大学范爱武等人<sup>[5,6]</sup>对具有钝体及凹腔的微型燃烧器内预混火焰的燃烧特性进行了研究, 研究表明采用钝体或凹腔可提高火焰的稳定性。江苏大学的潘剑锋等人<sup>[7]</sup>研究了利用微尺度预混火焰的微型光电

收稿日期: 2016-01-06; 修订日期: 2016-03-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.51336010); 国家重点基础研究发展计划资助 (No.2014CB239601)

作者简介: 李星 (1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事燃烧基础研究。通信作者: 赵黛青, 研究员, zhaodq@ms.giec.ac.cn

转换装置。清华大学钟北京等人<sup>[8]</sup>研究了 Swiss-roll 燃烧器内火焰的燃烧特性。

在非预混火焰的微尺度燃烧方面, Matta 等人<sup>[9]</sup>研究了静止空气中的丙烷 ( $C_3H_8$ ) 微射流火焰, 给出了火焰高度随流量的变化规律; Chao 等人<sup>[10]</sup>对静止空气中的甲烷 ( $CH_4$ ) 非预混微射流火焰的熄火极限 (维持火焰的最小燃料流量) 进行了实验及数值研究; Nakamura 等人<sup>[11]</sup>对静止空气中的非预混微射流火焰的熄灭现象进行了研究; 蒋利桥等人<sup>[12]</sup>对静止空气中不同管径甲烷非预混射流火焰进行了研究。对微尺度非预混火焰相关研究的总结表明, 之前的相关研究主要集中在静止空气中的非预混微尺度火焰方面, 同时对熄火极限附近火焰研究较多。为了进一步拓展微尺度火焰相关理论为设计微尺度燃烧器服务, 需研究外部氧化剂流动特征对微尺度非预混火焰的影响, 包括火焰的可燃范围、及不同流速下火焰形态及其燃烧特性。

本文对具有外部伴流空气的微喷管非预混射流火焰进行研究, 分别考察了不同燃料射流速度下的火焰形态及火焰高度, 与大尺度射流火焰进行了对比, 并研究了不同伴流速度对微喷管非预混射流火焰的可燃范围的影响。

## 1 实验系统

本研究采用实验系统如图 1 所示, 实验装置的主体为不锈钢腔体, 腔体内有陶瓷蜂窝板及陶瓷小球以获得均匀的外部伴流, 腔体中间为不锈钢的燃料管, 腔体上部燃料管外侧为方形石英管, 方管外部尺寸为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ , 壁厚为  $4\text{ mm}$ 。实验中通过质量流量计 (MKS-GE50 系列) 控制干空气及燃料的流量, 实验前采用湿式体积流量计 (Shinagawa WS-2A) 和皂膜流量计对不同量程的质量流量计进行了标定。本研究采用了管内径分别为  $710\text{ }\mu\text{m}$ 、 $425\text{ }\mu\text{m}$  及  $280\text{ }\mu\text{m}$ 。实验中采用单反相机 (Nikon 80D) 对火

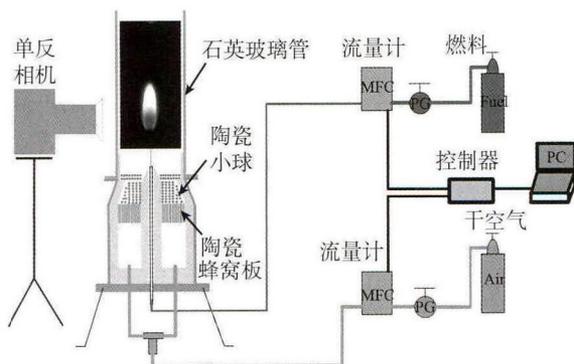


图 1 实验系统图

Fig. 1 Experimental system

焰进行拍照来研究微喷管非预混射流火焰的燃烧特性。为了讨论微喷管非预混射流火焰和常规尺度射流火焰的区别, 对内径为  $2\text{ mm}$  的常规尺度管的非预混射流火焰也进行了研究。

## 2 实验结果

### 2.1 常规尺度喷管非预混射流火焰

作为对比分析, 首先对常温空气伴流下常规尺度 (内径  $2\text{ mm}$ ) 不锈钢喷管非预混射流火焰进行了研究。实验中伴流的流速为  $11.0\text{ cm/s}$ , 通过调节燃料气体的流速来获得不同射流速度下的非预混射流火焰。图 2 和 3 分别给出了常规尺度管甲烷非预混射流火焰的火焰照片及火焰高度随  $Re$  变化。可以看到有伴流条件下随  $Re$  数的增加常规尺度非预混射流火焰呈现层流火焰 ( $Re < 1800$ )、层流到湍流过渡火焰 ( $1800 < Re < 2300$ ) 和湍流火焰 ( $Re > 2300$ ) 三种火焰形态。在层流火焰区域, 随着  $Re$  数的增加火焰高度增加; 层流到湍流过渡火焰的高度随  $Re$  增大而减小; 不同燃料流速下的湍流火焰的高度基本维持不

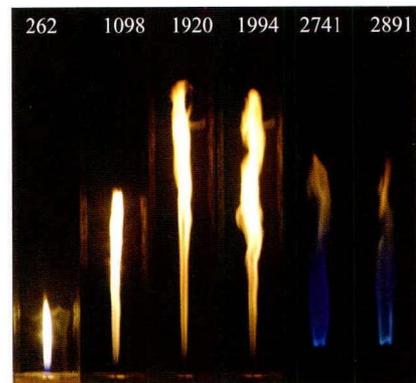


图 2 常规尺度非预混射流火焰随  $Re$  变化 ( $d = 2\text{ mm}$ )  
Fig. 2 Images of non-premixed jet-flames of a tube with ordinary diameter at different  $Re$  ( $d = 2\text{ mm}$ )

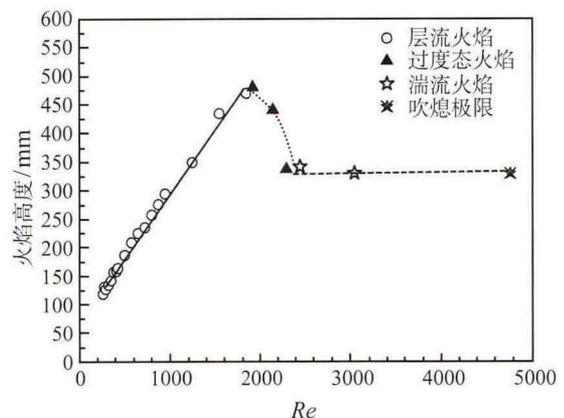
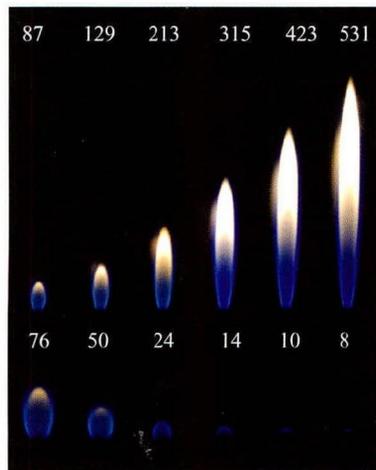


图 3 常规尺度非预混射流火焰高度随  $Re$  变化 ( $d = 2\text{ mm}$ )  
Fig. 3 Variation of flame height of non-premixed jet-flame of an ordinary tube versus  $Re$  ( $d = 2\text{ mm}$ )

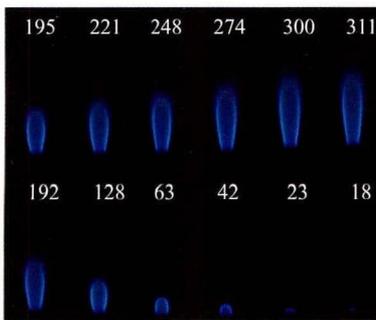
变。同时研究结果表明, 非预混层流火焰及层流到湍流过度火焰的大部分区域为黄色可见光, 而非预混湍流火焰为推举火焰 (lifted flame), 火焰的下部为蓝色火焰而上部为黄色火焰。对常规尺度喷管非预混射流火焰吹熄极限进行了测试, 实验结果表明常温伴流空气中甲烷非预混射流火焰吹熄时  $Re$  为 4758。同时也对维持最小火焰的燃料流速进行了测试, 研究表明常规尺度管甲烷非预混火焰的熄灭极限发生在燃料流速为  $Re = 3.2$  时, 低于该流量无法维持火焰。

## 2.2 微管非预混射流火焰

通过对伴流空气流速 1.35 cm/s 管内径分别为 710  $\mu\text{m}$ 、425  $\mu\text{m}$  及 280  $\mu\text{m}$  不锈钢管的非预混射流火焰的研究, 得到了火焰的形态、高度、熄灭极限及吹熄继续等结果。图 4(a) 给出了管径 710  $\mu\text{m}$  时, 微管射流火焰不同射流  $Re$  数时的火焰图像。图 4(a) 上半部分为火焰随  $Re$  数增大的变化过程, 而下半部分为火焰随  $Re$  数减小的变化过程。实验结果表明  $Re$  数较小的时候微管射流火焰呈现蓝色的火焰, 随着  $Re$  的增加在火焰的上部呈现黄色火焰, 黄色火



(a)  $d = 710 \mu\text{m}$



(b)  $d = 280 \mu\text{m}$

图 4 微管非预混射流火焰随  $Re$  变化

Fig. 4 Non-premixed jet-flame images of the micro-scale tubes versus  $Re$

焰部分随  $Re$  数增加而增加。从稳定火焰逐步增加燃料射流出口  $Re$  数, 微管非预混射流火焰达到吹熄极限而熄灭; 而逐渐降低出口  $Re$  数, 当燃料量无法维持火焰燃烧时火焰熄灭。

图 4(b) 给出了管径 280  $\mu\text{m}$  时, 微管射流火焰不同射流  $Re$  数时的火焰图像。图 4(b) 上半部分为火焰随  $Re$  数增大的变化过程, 而下半部分为火焰随  $Re$  数减小的变化过程。实验结果表明当管径 280  $\mu\text{m}$  时, 微管非预混射流火焰都为蓝色火焰, 没有出现黄色火焰。

图 5 给出了不同伴流空气速度下火焰高度随  $Re$  变化的结果, 其中微喷管的内径为 710  $\mu\text{m}$ 。实验结果表明, 非预混微射流火焰的火焰高度主要决定于燃料流速, 不受伴空气流速度的影响。对另外两个直径微喷管的研究得到了相同的结果。

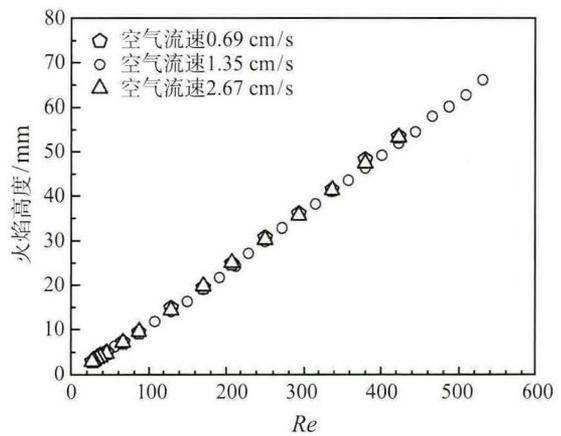


图 5 不同空气伴流速度下微喷管非预混射流火焰高度随  $Re$  变化 ( $d = 710 \mu\text{m}$ )

Fig. 5 Variation of flame height of non-premixed micro-jet-flame versus  $Re$  at different velocities of coflow air ( $d = 710 \mu\text{m}$ )

图 6 给出了伴流空气流速 1.35 cm/s 条件下, 三种不同管对应非预混射流火焰的火焰高度随  $Re$  数的变化。实验数据显示随着  $Re$  数的增大, 火焰高度逐渐增大, 当射流速度增大到一定值以后火焰达到吹熄极限而熄灭。可以看到微喷管对应的非预混射流火焰只有层流火焰一种形态而没有湍流火焰和层流-湍流转变火焰。图 7 给出了伴流空气流速 1.35 cm/s 条件下, 熄灭过程中三种不同内径微管对应非预混射流火焰高度随  $Re$  数的变化。实验数据显示随着  $Re$  的减小, 火焰高度逐渐减小, 当燃料射流速度减小到一定值以后火焰高度急剧减小然后熄灭。

图 8 给出了不同伴流空气流速条件下, 三种不同管对应非预混射流火焰吹熄极限和熄灭极限时对应的燃料射流  $Re$  数。吹熄极限和熄灭极限间的范围即为可获得稳定火焰的范围。可以看到对于同一种

管径的射流火焰, 伴流空气由静止逐渐增大的过程中, 火焰的吹熄极限先增大后减小, 在伴流速度适当的条件下非预混射流火焰的吹熄极限较大。同时可以看到在有伴流的条件下, 同一内径微管不同伴流速度下非预混微射流火焰的熄灭极限基本保持不

变, 且有空气伴流条件下的熄灭极限对应燃料流量小于静止空气中对应的熄灭极限。对比不同管径的微管射流火焰可以看大, 随着管径的减小微喷管非预混射流火焰的可燃范围急剧减小。

### 3 火焰高度及吹熄极限理论分析

#### 3.1 火焰高度理论计算

非预混射流火焰高度理论求解的经典理论有 Burke-Schumann 的相关理论<sup>[13]</sup>, 然而, Burke-Schumann 理论中假设气体速度的分布是恒定的并和火焰轴平行。Roper 的相关研究中去掉了恒速这一假设, 得到了圆口和方口射流火焰长度的计算公式。微管射流火焰的射流速度较大, 火焰为动量控制的射流火焰受浮力的影响较小, Roper 理论对应射流火焰高度的计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$L = \frac{Q_F(T_\infty/T_F)}{4\pi D_\infty \ln(1+1/S)} \left(\frac{T_\infty}{T_f}\right)^{0.67} \quad (1)$$

其中,  $Q_F$  为燃料流量、 $T_\infty$  和  $T_F$  分别为氧化剂和燃料温度、 $D_\infty$  为氧的扩散速率、 $S$  为化学当量的氧化剂-燃料摩尔比、 $T_f$  为火焰的平均温度。对于本研究采用  $T_\infty = T_F = 300\text{ K}$ , 假设火焰平均温度为  $1500\text{ K}$ , 取  $D_\infty = 0.2\text{ cm}^2/\text{s}$  可计算得到相关火焰的高度。图 9 给出三种微喷管非预混射流火焰高度的计算结果, 可以看到采用式 (1) 得到计算结果和实验值吻合较好。

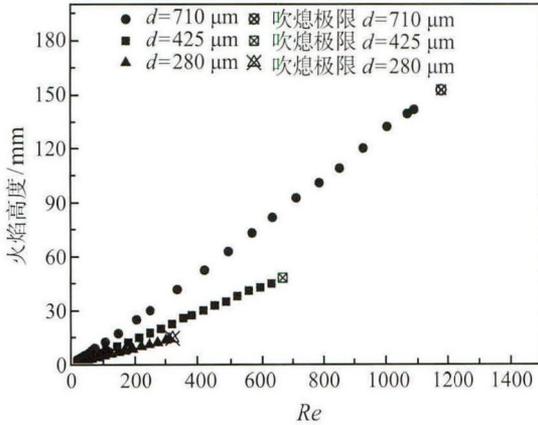


图 6 微喷管非预混射流火焰高度及吹熄极限

Fig. 6 Results of flame heights of non-premixed micro-jet-flames and blow off limits

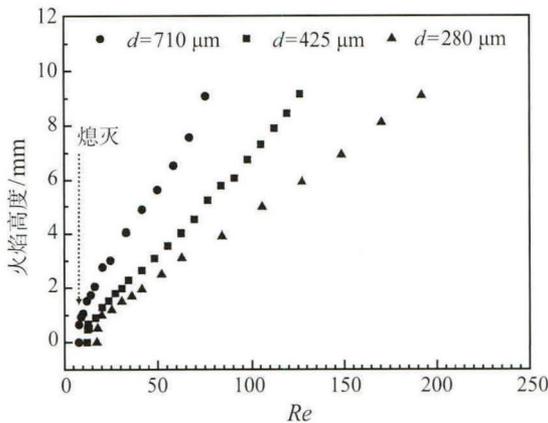


图 7 熄灭过程微喷管非预混射流火焰高度随 Re 变化

Fig. 7 Variations of flame heights of non-premixed micro-jet-flames versus Re till extinction

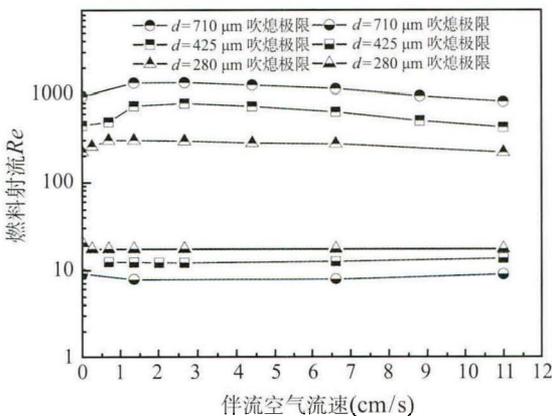


图 8 不同流速伴流下微射流火焰可燃范围

Fig. 8 Flammable regions of non-premixed micro-jet-flames at different coflow air velocities

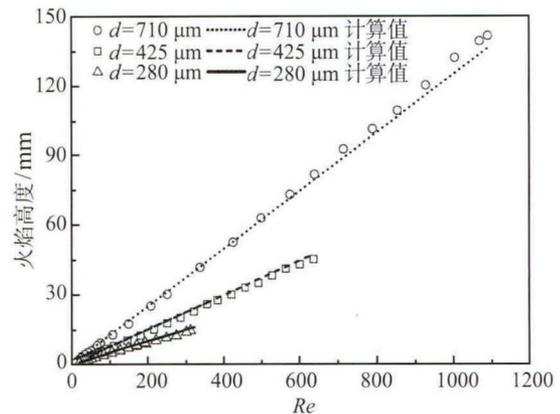


图 9 微喷管射流火焰高度计算结果

Fig. 9 Calculated flame height of non-premixed micro-jet-flame versus Re

#### 3.2 火焰吹熄极限理论分析

燃料高流速条件下非预混射流火焰吹熄是由于局部流动特征时间远小于化学反应特征时间。微喷管非预混射流火焰和常规尺度非预混射流火焰吹熄现象发生的控制机理基本是一致的。因此可借鉴常规尺度非预混射流火焰吹熄的相关理论来对微喷管

非预混射流火焰的吹熄现象进行分析。常规尺度非预混射流火焰的研究中定义局部混合时间与化学反应时间的比值为下式<sup>[15]</sup>:

$$\varepsilon = \frac{t_m}{t_c} \sim \frac{\sigma/u}{\kappa/S_L^2} \quad (2)$$

其中,  $\sigma$  和  $u$  为火焰宽度及射流速度,  $\kappa$  为热扩散率,  $S_L$  为层流火焰速度。相关研究认为当混合时间与化学反应时间的比值小于  $\varepsilon$  的特征值 (4.3) 时火焰发生熄灭<sup>[15]</sup>。

对于微喷管层流火焰, 不存在湍流效应来强化混合过程, 同时由于火焰宽度及混合强度的减小, 其吹熄极限对应的速度会远小于常规尺度非预混射流火焰的吹熄极限。前面图 6 实验结果显示伴流空气速度 1.35 cm/s 时, 710  $\mu\text{m}$ 、425  $\mu\text{m}$  及 280  $\mu\text{m}$  三种微喷管非预混射流火焰对应的吹熄  $Re$  为 1178、671 及 322, 这三个吹熄极限都远小于常规尺度喷管非预混射流火焰的吹熄极限 ( $Re = 4758$ )。

同时式 (2) 表明熄灭极限与火焰宽度成正比, 而微喷管火焰的实验结果表明火焰的宽度与管径成正比, 因此可以预测微喷管火焰的吹熄极限与管径成正比。图 6 及图 8 关于微喷管非预混射流火焰的吹熄极限实验结果表明, 相同伴流速度下随着管径的减小微喷管射流火焰的吹熄极限减小, 该实验现象和该理论分析得到的结论一致。

## 4 结 论

对管内径为 710  $\mu\text{m}$ 、425  $\mu\text{m}$  及 280  $\mu\text{m}$  的微喷管甲烷非预混射流火焰燃烧特性进行了实验研究, 得到以下相关结论:

1) 微喷管对应的非预混射流火焰只有层流火焰一种形态, 而没有出现常规尺度非预混射流火焰对应的湍流火焰和层流 - 湍流转变火焰;

2) 微喷管非预混射流火焰的高度取决于燃料射流速度, 不受伴流空气速度影响;

3) 对于同一种管径的微喷管射流火焰, 伴流空气流速逐渐增大的过程中, 火焰的吹熄极限先增大后减小;

4) 不同伴流速度下微喷管非预混射流火焰的熄灭极限基本保持不变;

5) 随着管径的减小微喷管非预混射流火焰的可燃范围急剧减小。

## 参 考 文 献

[1] Ju Yiguang, Maruta K. Microscale combustion: Technology Development and Fundamental Research [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669-715

[2] Maruta K. Micro and Mesoscale Combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 125-150

[3] Li Xing, Jia Li, Maruta K, et al. Study on Flame Responses and Ignition Characteristics of  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$  Mixture in a Micro Flow Reactor With a Controlled Temperature Profile [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 84: 360-367

[4] 赵黛青, 蒋利桥, 山下博史, 等. 微尺度预混合火焰结构和熄火特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 711-713  
Zhao Daiqing, Jiang Liqiao, Yamashita H, et al. Structure and Extinction Characteristics of Premixed Micro Flames [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(4): 711-713

[5] 万建龙, 范爱武, 姚洪, 等. 微型钝体燃烧器中氢气燃烧的实验与模拟 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 2198-2201  
Wan Jianlong, Fan Aiwu, Yao Hong, et al. Experimental and Numerical Studies of Hydrogen/Air Combustion in a Micro-Combustor with a Bluff Body [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(11): 2198-2201

[6] Wan Jianlong, Fan Aiwu, Yao Hong, et al. Experimental Investigation and Numerical Analysis on Flame Stabilization of  $\text{CH}_4/\text{air}$  Mixture in a Mesoscale Channel With Wall Cavities [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(4): 1035-1045

[7] 潘剑锋, 杨文明, 李德桃, 等. 微热光电系统原型的设计制造和测试 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 887-890  
Pan Jianfeng, Yang Wenming, Li Detao, et al. Design, Fabrication and Testing of a Prototype Microthermophotovoltaic System [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(5): 887-890

[8] 钟北京, 王建华, 李军伟. 甲烷在过量焓燃烧器内的燃烧特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(6): 481-486  
Zhong Beijing, Wang Jianhua, Li Junwei. Combustion Characteristics of  $\text{CH}_4$  in an Excess Enthalpy Combustor [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(6): 481-486

[9] Matta L M, Neumeier Y, Lemon B, Zinn B T. Characteristics of Microscale Diffusion Flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 933-939

[10] Cheng T S, Chen C P, Chao Y C, et al. Characteristics of Microjet Methane Diffusion Flames [J]. Combustion Theory and Modelling, 2006, 10(5): 861-881

[11] Nakamura Y, Yamashita H, Saito K, A Numerical Study on Extinction Behaviour of Laminar Micro-Diffusion Flames [J]. Combustion Theory and Modelling, 2006, 10(6): 927-938

[12] 蒋利桥, 赵黛青, 汪小慈. 微尺度甲烷扩散火焰及其熄灭特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2007 13(2): 183-186  
Jiang Liqiao, Zhao Daiqing, Wang Xiaohan. Structure and Extinction Characteristics of Methane Micro-Diffusion Flames [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(2): 183-186

[13] Law C K. Combustion Physics [M]. New York: Cambridge University Press, 2006: 202-208

[14] Roper F G. The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes: Part I. Theoretical Model [J]. Combustion and Flame, 1977, 29: 219-226

[15] Dahm W J A, Dibble R W. Coflowing Turbulent Jet Diffusion Flame Blowout [J]. Symposium (International) on Combustion, 1989, 22(1): 801-808