

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.019

# 燃料气体预热温度对微燃烧器性能影响的分析\*

周俊虎 汪洋 杨卫娟 刘建忠 王智化 岑可法

(浙江大学能源洁净利用国家重点实验室, 杭州 310027)

**【摘要】** 燃料在直圆管形状的微尺度燃烧器中进行预热燃烧,对比不同预热温度下的燃烧器工作性能,检验强化预热对促进微燃烧稳定的效果。实验选择燃料混合气体流量为 0.12、0.24、0.36 L/min,预热温度分别为室温 23℃ 和 250、500℃。实验结果显示,在室温,燃料混合气体流量 0.12 L/min 下,燃烧器可燃极限当量比为 0.339 ~ 3.639。预热温度上升到 250℃ 时,可燃极限当量比范围增大到 0.317 ~ 4.304。而预热温度 500℃ 时,可燃极限当量比范围减小为 0.453 ~ 1.706。在实验中测量燃烧器壁面温度,结合数值模拟研究内部燃烧过程。模拟结果显示,随预热温度上升,反应区域峰值温度上升。在流量 0.24 L/min,当量比为 1,预热温度由室温上升至 500℃ 时,峰值温度由 1 890 K 上升至 2 013 K。实验结果证明适当预热可以提高反应温度,从而抑制热熄火。

**关键词:** 微燃烧 预热温度 数值模拟 性能分析

**中图分类号:** TK223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0090-04

## Effects of Preheating Fuel Gas to Micro-scale Flame

Zhou Junhu Wang Yang Yang Weijuan Liu Jianzhong Wang Zhihua Cen Kefa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

### Abstract

The effect of preheating was investigated in a straight-tube shape micro combustor. Performances of combustor were compared under conditions with different preheating temperature. The flow rates of the fuel feed amount were 0.12, 0.24, 0.36 L/min, respectively. The preheating temperatures were environmental temperature (23℃), 250℃, 500℃, respectively. Experimental results showed that with environmental temperature and 0.12 L/min, the stability limit was 0.339 ~ 3.639. While the preheating temperature increased to 250℃, the stability limit extended to 0.317 ~ 4.304. At the preheating temperature of 500℃, the stability limit was 0.453 ~ 1.706. The temperature distribution on the combustor wall was measured, which was combined with numeric simulation to investigate the combustion process in the combustor. Simulation results indicated that the peak temperature in the reaction region increased with preheating temperature. At 0.24 L/min and stoichiometry, while the preheating temperature increased from environmental temperature to 500℃, the peak temperature increased from 1 890 to 2 013 K. It proved that the proper preheating could increase the reaction temperature, thus inhibited thermal extinction.

**Key words** Micro combustion, Preheating temperature, Numeric simulation, Performances analysis

### 引言

微型能源装置作为便携式动力系统,其能量密度超过传统电池近 100 倍<sup>[1]</sup>,因此运行效率只需要

高于 1%,其工作时间即可超越电池<sup>[2-4]</sup>。使用微型能源装置供电,微电子产品可工作更久,因此具有巨大的吸引力。

微型能源装置的概念由麻省理工学院最早提

收稿日期: 2009-09-25 修回日期: 2009-11-02

\* 国家自然科学基金资助项目(50606030)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060335124)、高等学校学科创新引智计划资助项目(B08026)和国家杰出青年基金资助项目(50525620)

作者简介: 周俊虎,教授,博士生导师,主要从事热能工程、水煤浆燃烧理论与技术研究,E-mail: enejzhou@public.zju.edu.cn

出<sup>[5]</sup>,但其设计的微型汽轮机由于加工精度和材料机械性能的问题而难以实现。后来陆续有热电和光电转换方式的微型能源装置的研究<sup>[1,6]</sup>,但材料性能限制了转换效率。

微型燃烧器是微型动力装置的核心部件。微尺度环境对燃烧的主要影响因素包括:自由基熄火、热熄火、没有回流区充当点火源、熄火距离相对变大<sup>[7-10]</sup>。因此,微尺度燃烧器工作稳定性差,易熄火、回火等。现有针对熄火的稳燃方法包括:过焓燃烧<sup>[11-13]</sup>、催化稳燃<sup>[14-17]</sup>、使用化学处理抑制壁面吸收自由基<sup>[18]</sup>等。由于微尺度环境下实验难度大,因此往往使用数值模拟<sup>[19-20]</sup>观察稳燃效果<sup>[21-22]</sup>。

本文在石英圆管制作的微尺度燃烧器中,对燃料气体进行强制预热,并结合数值模拟分析燃烧器内部燃烧过程。

## 1 实验系统

实验系统如图 1 所示,由供气系统、测量仪器、燃烧器、管式炉(SK2-25-13TS型)等组成。由两台质量流量计(D07-7B型)分别控制和测量的氢气和空气流经管式炉加热后混合送入燃烧器中燃烧。使用巡检仪(WSP-D806型)和数模转换模块(I-1075型)组成的数字系统监控流量。红外热像仪(ThermaCam S65型)测量燃烧器壁温。

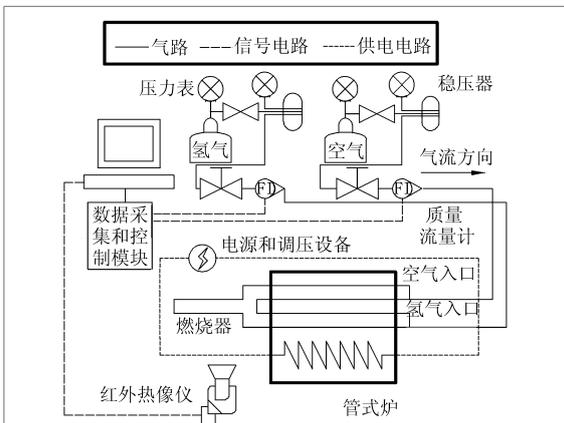


图 1 微尺度预热燃烧实验系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for micro combustion

燃烧器为石英玻璃直圆管,长 35 mm,内径 2 mm,外径 4 mm,入口直径 1 mm,如图 2 所示。使用紫铜管输送空气和氢气,并使用管式炉进行加热。燃料气体最大流量为 0.4 L/min,管内层流换热公式<sup>[23]</sup>为

$$Nu_f = 1.86 \left( \frac{Re_f Pr_f}{l} \right)^{1/3} \left( \frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.14} \quad (1)$$

式中  $Nu$ ——努塞尔数  $Re$ ——雷诺数

$Pr$ ——普朗特数  $l$ ——加热管长  
 $d$ ——加热管直径  $\eta$ ——动力粘度  
 下标 f、w 分别按流体、壁面平均温度计算。

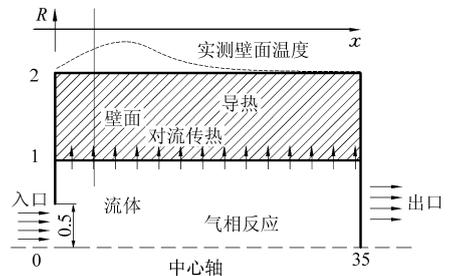


图 2 燃烧器内部结构

Fig. 2 Schematic diagram of the combustor structure

将来流气体加热到 499℃,需要 0.11 m 加热长度。实验中加热段长度为 0.18 m,满足加热要求。实验观察不同预热温度下燃烧器的可燃极限,燃料混合气体流量分别为 0.12、0.24、0.36 L/min,预热温度为 23℃(室温)和 250、500℃。并对化学当量比为 1 时的燃烧器表面温度进行测量。使用数值模拟研究管内火焰时,采用二维柱坐标圆管燃烧器模型,计算半面以节约计算时间(图 2)。入口和出口边界条件分别为恒定质量流量和恒定常压。模拟时导入实验测得的壁温作为壁面边界条件。并将燃烧器壁面作为固体区域与流体进行耦合计算,模拟两相间传热和壁面内部导热作用,比使用简单传热边界条件<sup>[24]</sup>更准确。

使用 Chemkin 4.0 数据库提供的化学动力学参数和热质运输物理参数,导入到 Fluent 6.0 中模拟详细化学反应动力学过程。气相反应机理包含 8 种组分( $H_2$ 、 $O_2$ 、 $H_2O$ 、 $O$ 、 $OH$ 、 $H$ 、 $HO_2$ 、 $H_2O_2$ )和 20 步反应。

## 2 实验结果

### 2.1 可燃极限

比较不同预热温度下燃烧器可燃极限当量比(表 1)结果显示:在一定范围内提升燃料气体的预热温度可有效抑制热熄火,如总流量 0.12 L/min,室温时,可燃极限当量比为 0.339 ~ 3.639。在 250℃ 预热温度时范围增大到 0.317 ~ 4.304。但随预热温度的进一步上升,可燃极限范围反而变小,预热温度为 500℃ 时,可燃极限当量比为 0.453 ~ 1.706。

比较燃料混合气体流量对燃烧稳定性影响的结果显示:随着流量的上升,熄火受到抑制,如室温下当总流量由 0.12 L/min 上升到 0.24 L/min 过程中,可燃极限当量比由 0.339 ~ 3.639 增大到 0.320 ~ 5.150。但当总流量上升至 0.36 L/min 时,可燃极限范围减小至 0.343 ~ 4.337。此时由于高流量,使流速超过燃烧速度,导致吹脱。

表1 不同预热温度下可燃极限当量比

Tab.1 Equivalence ratio of stability limits under different preheating temperature

预热温度/℃	总流量 /L·min <sup>-1</sup>	稀相可燃极限当量比	现象	浓相可燃极限当量比	现象
23	0.12	0.339	熄灭	3.639	熄灭
23	0.24	0.320	熄灭	5.150	吹脱
23	0.36	0.343	熄灭	4.337	吹脱
250	0.12	0.317	熄灭	4.304	熄灭
250	0.24	0.354	熄灭	5.573	吹脱
250	0.36	0.362	熄灭	4.580	吹脱
500	0.12	0.453	熄灭	1.706	熄灭
500	0.24	0.457	熄灭	1.577	吹脱
500	0.36	0.447	熄灭	1.538	吹脱

## 2.2 数值模拟

通过数值模拟观察燃烧器内不同预热温度对反应过程的影响。

图3给出3种预热温度,0.24 L/min总流量时,燃烧器内的温度等高线。气体进入燃烧器后迅速预热至着火温度847 K后点燃,温度在距入口约2 mm处轴线上达到峰值,在近壁面区域由于散热逐渐降低<sup>[25]</sup>。温度等高线梯度显示由壁面向气相有热扩散,即沿壁面的热回流<sup>[26]</sup>。热量在燃烧区域传递给

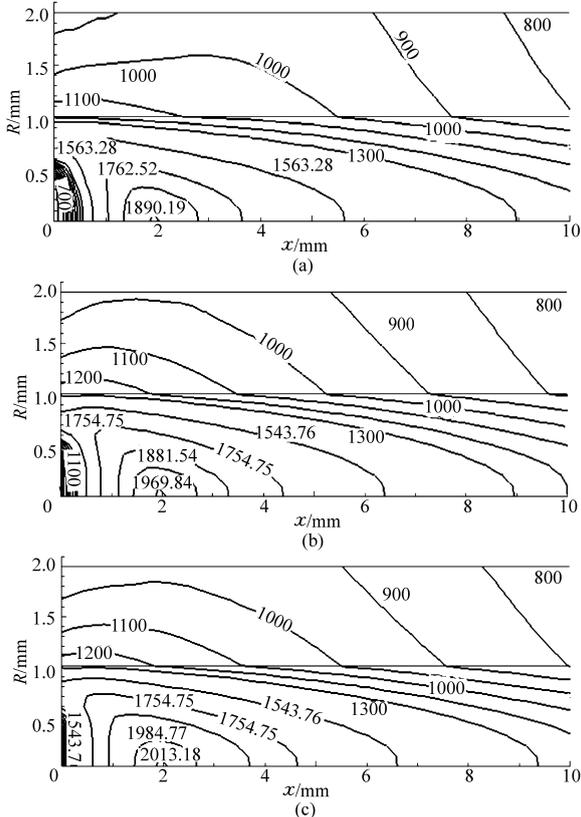


图3 不同预热温度下流量0.24 L/min时温度等高线  
Fig.3 Temperature contour at flow rate of 0.24 L/min  
(a) 23℃ (b) 250℃ (c) 500℃

壁面,沿壁面传导至上游<sup>[27]</sup>,在入口处传递给未燃气体,进行预热和点火<sup>[1]</sup>。在室温下,反应中心的峰值温度约1890 K。250℃预热时,峰值温度上升至1969 K。预热温度500℃时,峰值温度上升到2013 K。因此高预热温度可以提升反应温度,进而促进反应强度<sup>[28]</sup>,抑制热熄火。

## 2.3 壁面散热

不同预热温度下壁面散热损失和烟气余热损失如表2所示。烟气余热损失由fluent软件计算,壁面散热损失由燃烧释放总热量减去烟气余热。壁面散热损失包括自然对流传热和辐射传热<sup>[26]</sup>,即

$$Q_{\text{surf}} = Q_{\text{cov}} + Q_{\text{rad}} = \int_{x_2}^{x_1} [\Delta T h + \delta_b \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4)] dS_w \quad (2)$$

式中  $Q_{\text{surf}}$ ——壁面散热损失

$Q_{\text{cov}}$ ——对流传热率  $Q_{\text{rad}}$ ——辐射散热率

$\Delta T$ ——壁面与环境温差

$S_w$ ——燃烧器外壁面积

$h$ ——对流传热系数

$\delta_b$ ——黑体辐射常数  $\varepsilon$ ——发射率

$T_w$ ——壁面温度  $T_\infty$ ——环境温度

$x_1, x_2$ ——计算区域起始位置

表2 不同预热温度和气体流量下当量比为1时,壁面散热损失和烟气余热损失占总功率的比例

Tab.2 Ratios between surface heat loss, exhaust gas heat loss and total power under different preheating temperatures, gas flow rates at equivalence ratio of 1

预热温度/℃	流量 /L·min <sup>-1</sup>	总功率/W	壁面散热损失/%	烟气余热损失/%
23	0.12	7.61	97.7	2.3
23	0.24	15.22	93.9	6.1
23	0.36	22.82	89.5	10.5
250	0.12	8.21	97.5	2.5
250	0.24	16.42	94.4	5.6
250	0.36	24.63	89.7	10.3
500	0.12	8.81	97.0	3.0
500	0.24	17.62	94.0	6.0
500	0.36	26.43	90.3	9.7

在不同预热温度下,当流量由0.12 L/min增加至0.36 L/min时,随燃料投入量的加大,热量释放更多。散热率增加较慢<sup>[8]</sup>,烟气余热所占份额增加相对较快。如室温下,当气体总流量由0.12 L/min增加到0.36 L/min,总功率由7.61 W增加到22.82 W,散热率占总功率的比例由97.7%下降到89.5%。证明提高燃料投入量,可降低散热份额,进

而提高火焰稳定性。预热温度对于能量分布无明显影响,证明预热产生的热量以一定的比例随壁面散热和烟气余热流失。

### 3 结论

(1) 在微型石英玻璃燃烧器中进行不同燃料气体预热的微燃烧实验。结果显示适度预热可提高燃烧稳定性。总流量 0.12 L/min, 室温时可燃极限当量比为 0.339 ~ 3.639。在 250℃ 预热温度时范围增大到 0.317 ~ 4.304。但预热温度为 500℃ 时,可燃极限当量比反而减小至 0.453 ~ 1.706。提高流量也可抑制熄火,室温下当总流量由 0.12 L/min 增加到 0.24 L/min,可燃极限当量比由 0.339 ~ 3.639 增

大到 0.320 ~ 5.150。但当总流量上升至 0.36 L/min 时,由于吹脱的影响,可燃极限范围反而减小至 0.343 ~ 4.337。

(2) 对燃烧器内部的数值模拟结果证明,对燃料气体进行预热可以提升反应温度,进而抑制热熄火。在 0.24 L/min 燃料气体流量下,当预热温度为室温、250、500℃ 时,反应区域峰值温度分别为 1 890、1 969、2 013 K。

(3) 比较燃烧器壁面散热,证明提高燃料量可降低散热率占总功率的比例,而抑制热熄火。室温下,当燃料气体流量由 0.12 L/min 增加到 0.36 L/min 时,散热率占总功率的比例由 97.7% 下降到 89.5%。

### 参 考 文 献

- Ahn J, Eastwood C, Sitzki L, et al. Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2 463 ~ 2 472.
- Pello C F. Micropower generation using combustion: issues and approaches[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 883 ~ 899.
- Jacobson S A, Epstein A H. An informal survey of power mems[C] // The International Symposium on Micro-Mechanical Engineering, Tsukuba, Japan, 2003.
- Spadaccini C M, Mehra A, Lee J, et al. High power density silicon combustion systems for micro gas turbine engines[C] // 2002 Proceedings of ASME Turbo Expo, Amsterdam, Netherlands. 2002.
- Epstein A H, Dsenturia S, Anathasuresh G. Power mems and microengines[C] // Proceeding of International Conference on Transducer, Chicago, 1997.
- Yang W M, Chou S K, Shu C, et al. Microscale combustion research for application to micro thermophotovoltaic systems[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(16): 2 625 ~ 2 634.
- Churchill S W. Thermally stabilized combustion[J]. Chemical Engineering & Technology, 1989, 12(1): 249 ~ 254.
- Yuasa S, Oshimi K, Nose H, et al. Concept and combustion characteristics of ultra-micro combustors with premixed flame [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2 455 ~ 2 462.
- Waitz I A, Gauba G, Tzeng Y S. Combustors for micro-gas turbine engines[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1998, 120(1): 109 ~ 117.
- Chia L C, Feng B. The development of a micropower (micro-thermophotovoltaic) device[J]. Journal of Power Sources, 2007, 165(1): 455 ~ 480.
- Lloyd S A, Weinberg F J. A burner for mixtures of very low heat content[J]. Nature, 1974, 251: 47 ~ 49.
- Kaisare N S, Deshmukh S R, Vlachos D G. Stability and performance of catalytic microreactors: simulations of propane catalytic combustion on Pt[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(4): 1 098 ~ 1 116.
- Ronney P D. Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors[J]. Combustion and Flame, 2003, 135(4): 421 ~ 439.
- Vican J, Gajdeczko B F, Dryer F L, et al. Development of a microreactor as a thermal source for micro-electro-mechanical systems power generation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 909 ~ 916.
- Boyarko G A, Sung C J, Schneider S J. Catalyzed combustion of hydrogen-oxygen in platinum tubes for micro-propulsion applications[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2 481 ~ 2 488.
- Holladay J D, Jones E O, Phelps M, et al. Microfuel processor for use in a miniature power supply[J]. Journal of Power Sources, 2002, 108(1 ~ 2): 21 ~ 27.
- Jeongmin A, Craig E, Lars S, et al. Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2 463 ~ 2 472.
- Masel R I, Shannon M. Microcombustor having submillimeter critical dimensions; US, 6193501[P]. 2001-02-27.
- Leach T T, Cadou C P. The role of structural heat exchange and heat loss in the design of efficient silicon micro-combustors [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2 437 ~ 2 444.

- 20(2):584~597.
- 8 De Castro Nero M, Rodrigues M BL, Pinto P A, et al. Traceability on the Web—a prototype for the Portuguese beef sector [C]//EFITA 2003 Conference, 2003(2):5~9.
- 9 Mousavi A, Sarhadi M, Lenk A, et al. Tracking and traceability in the meat processing industry: a solution[J]. British Food Journal, 2002, 104(1):7~19.
- 10 DeeVon B. The evolution of identity preservation in red meat markets[J]. Managing for Today's Cattle Market and Beyond, 2002:1~4.
- 11 尤克滨. UML 应用建模实践过程[M]. 北京:机械工业出版社,2003:38~39,56~139.
- 12 Chen Changxi, Guo Lihong. Modeling of C<sup>3</sup>I system in laser countermeasure weapon system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 15(2):261~265.
- 13 胡于进,张志峰. 基于 UML 的对象-关系数据库设计[J]. 机械与电子,2004(3):42~44.  
Hu Yujin, Zhang Zhifeng. Design of object-relation database based on UML[J]. Machine & Electronics, 2004(3):42~44. (in Chinese)
- 14 李刚. 轻量级 Java EE 企业应用实战[M]. 北京:电子工业出版社,2009:156~268.
- 15 思志学. 整合详解与典型案例-J2EE[M]. 北京:电子工业出版社,2008:178~245.
- 16 Jeff Tapper 等. Flex 3 权威指南[M]. 北京:人民邮电出版社,2009:278~324.
- 17 刘中兵. 开发者突击:Java Web 主流框架整合开发[M]. 北京:电子工业出版社,2008:161~317.
- 18 Charles P Pfleeger, Shari Lawrence Pfleeger. Security in computing[M]. 北京:机械工业出版社,2004:629~691,253~258.
- 19 中华人民共和国农业部. 畜禽标识和养殖档案管理办法[S]. 2006.  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Livestock identification and breeding archives management measures [S]. 2006. (in Chinese)
- 20 杨信廷,孙传恒,钱建平,等. 基于 UCC/EAN-128 条码的农产品质量追溯标签的设计与实现[J]. 包装工程,2006, 27(3):113~114.  
Yang Xinting, Sun Chuanheng, Qian Jianping, et al. Design and implementation of quality traceable label for farm products based on UCC/EAN-128 bar code[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(3):113~114. (in Chinese)
- 21 张欣露,王成,吴勇,等. 集成传感器电子标签在农产品溯源体系中的应用[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):129~133.  
Zhang Xinlu, Wang Cheng, Wu Yong, et al. Sensors integration in RFID tags for agricultural traceability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):129~133. (in Chinese)

(上接第 93 页)

- 20 Hua J, Wu M, Kumar K. Numerical simulation of the combustion of hydrogen-air mixture in micro-scaled chambers part II: CFD analysis for a micro-combustor[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(13):3507~3515.
- 21 Norton D G, Vlachos D G. A CFD study of propane/air microflame stability[J]. Combustion and Flame, 2004, 138(1~2):97~107.
- 22 Norton D G, Vlachos D G. Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(21):4871~4882.
- 23 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.
- 24 Poinsot T, Candel S, Trouw A. Applications of direct numerical simulation to premixed turbulent combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1995, 21(6):531~576.
- 25 Chen G B, Chen C P, Wu C Y, et al. Effects of catalytic walls on hydrogen/air combustion inside a micro-tube[J]. Applied Catalysis A: General, 2007, 332(1):89~97.
- 26 Kim N I, Kato S, Kataoka T, et al. Flame stabilization and emission of small swiss-roll combustors as heaters[J]. Combustion and Flame, 2005, 141(3):229~240.
- 27 Barra A J, Ellzey J L. Heat recirculation and heat transfer in porous burners[J]. Combustion and Flame, 2004, 137(1~2):230~241.
- 28 Chen G B, Chao Y C, Chen C P. Enhancement of hydrogen reaction in a micro-channel by catalyst segmentation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(10):2586~2595.