

平板式微燃烧器内二甲醚催化燃烧与动态火焰研究

周俊虎 周靖松 杨卫娟 王业峰 张彦威 岑可法

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 微型燃烧器是微动力系统的核心,在微型平板燃烧器内进行了二甲醚/空气铂催化燃烧实验,主要研究了燃烧性能和动态火焰,包括稳燃范围、火焰特征、壁面温度、产物含量变化等。实验结果表明,在微型平板燃烧器内,添加石英棉后稳燃范围明显高于未加石英棉的情况。未添加石英棉时,当量比 Φ 为 1.2 ~ 1.4 时,可以让火焰驻定; $\Phi > 1.4$ 时,会产生振荡火焰,振荡过程可分为 3 个阶段; $\Phi < 1.2$ 时,无火焰产生。添加石英棉后,火焰驻定在石英棉处,随着流速的增加,火焰高度增加,壁温分布沿壁面中心线呈对称分布。壁面温度随流速增加而增加,温度峰值向出口处移动。尾气中 CO_2 体积分数在 $\Phi = 1$ 时达最大值 13.44%,在富燃情况下,产物中存在 CO 和 H_2 ,且随当量比增加,二者含量增加。

关键词: 微尺度燃烧; 催化燃烧; 动态火焰; 二甲醚

中图分类号: TK121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0358-05

Catalytic Combustion and Dynamic Flame of Dimethyl Ether in Quartz Microchannels

Zhou Junhu Zhou Jingsong Yang Weijuan Wang Yefeng Zhang Yanwei Cen Kefa

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

Abstract: The microscale combustor is an important part of microscale power system. Experiments on dimethyl ether/air catalytic combustion were carried out in quartz microchannels. The experiments mainly focused on the catalytic combustion and dynamic flame such as the effects of equivalence ratio Φ and inlet flow rate V on the stable combustion range, flame feature, wall temperature and the mole fraction of the exhaust gas. The experimental results showed that the stable combustion range was significantly higher after adding quartz wool in the combustors. When there was no quartz wool, the flame could be stable only under the condition of that the Φ varied from 1.2 to 1.4, and the flame was asymmetric. If $\Phi > 1.4$, the flame would oscillate and the oscillation cycle could be divided into three main stages; when $\Phi < 1.2$, there was no flame. Flame stationed at the quartz wool after adding quartz wool and the height of the flame was increased with the increase of V . The wall temperature distribution along the centerline of the wall was symmetrical and it was increased with the increase of V . Simultaneously, the location of the peak temperature was moved to the outlet of the combustor with the increase of V . The mole fraction of CO_2 of the exhaust gas was first increased and then decreased with an increasing equivalence ratio Φ , and reached a maximum value 13.44% when $\Phi = 1$. The mole fractions of CO and H_2 of the exhaust gas were increased with the increase of equivalence ratio Φ . When $\Phi < 1$, there was little CO and H_2 in the exhaust gas. In contrast, some CO and H_2 existed in the exhaust gas under the rich-fuel conditions.

Key words: microscale combustion; catalytic combustion; dynamic flame; dimethyl ether

收稿日期: 2016-05-26 修回日期: 2016-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51336010)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016FZA4011)

作者简介: 周俊虎(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事热能工程、微尺度燃烧技术等研究,E-mail: enejhzhou@public.zju.edu.cn

引言

微加工技术的进步,极大促进了能源系统的小型化,微尺度燃烧系统以其体积小、能量密度高、供能时间长等优点受到国内外广泛关注,在航空航天、军事、生活等方面都有广泛应用前景^[1-3]。但由于微尺度燃烧器的尺度小,导致燃料和氧化剂在燃烧室的驻留时间很短,燃料完全燃烧困难。同时由于比表面积大,散热损失大,火焰难以稳定,容易熄火^[4-6]。针对如何在微尺度条件下实现燃料持续稳定燃烧的问题,很多学者进行了相关研究^[7-11]。

平板燃烧器结构相对简单,制造装配相对容易,目前已有较多研究^[12-16]。二甲醚(dimethyl ether, DME)作为潜在的汽车及家用燃料便于储存,研究其燃烧特性有实际意义。YANG等^[17]对比研究了二甲醚与乙醇的催化燃烧特性,发现二甲醚具有更高的CO₂收率及壁面温度。ZHONG等^[18]发现在低雷诺数下DME比正丁烷拥有更宽的可燃范围。OSHIBE等^[19]在控制温度下研究了DME/空气在微型反应器中的着火及燃烧特性,发现其氧化过程中存在3种类型的火焰响应。MIHAI等^[20]发现添加水会抑制DME和丙烷的氧化过程,氢再生会促进DME和丙烷的氧化,而对CO氧化的影响却相反。FAN等^[21]对微通道中二甲醚(DME)的火焰动态进行了系统研究,认为不同的火焰形态与DME的低温氧化有关。

本文采用石英材料制作的平板式微燃烧器,在内表面布置金属铂片,对二甲醚/空气的预混气体进行催化燃烧实验,从火焰动态、稳燃范围、火焰特性、温度分布等方面探讨燃烧性能。

1 实验系统

实验系统如图1所示,主要包括供气系统、微燃烧器、测量设备、数据采集系统,图中实线为气路,虚

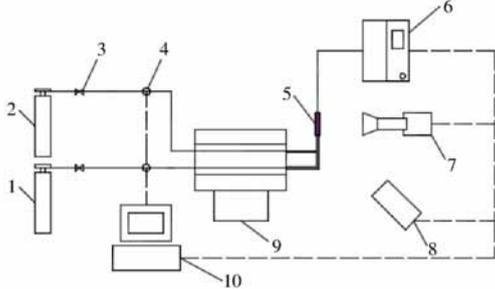


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experiment system

1. 空气 2. 二甲醚 3. 减压阀 4. 流量计 5. 燃烧器 6. 气相色谱仪 7. 红外热像仪 8. CCD 相机 9. 管式炉 10. 数据采集系统

线为信号电路。

二甲醚(DME)、空气(21% O₂/79% N₂)的流量由七星华创CS-200系列质量流量计来控制,精确度 $\pm 1.0\%$ 。采用红外热像仪(ThermaCam S65, FLIR, USA)对燃烧器外壁面温度分布进行测量,其测量精度为 $\pm 2\%$,由于燃烧器为石英玻璃制成,发射率设定为0.87。利用JAI公司生产的CV-M9GE型3CCD相机对平板燃烧器内二甲醚的燃烧情况进行记录,利用探针在燃烧器内距出口4 mm处进行气体取样,然后送入气相色谱仪(Agilent 7890B, USA),采用气体分析方法对尾气中H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄、N₂的含量进行精确测量。用丁烷热风枪在燃烧器出口处点燃实现点火,研究二甲醚/空气预混气的燃烧特性。

平板燃烧器由石英玻璃制成,如图2所示。进气口为圆管,内径为2 mm,外径为4 mm,长度为10 mm,燃烧室尺寸为35 mm \times 20 mm \times 4 mm,壁厚为2 mm。燃烧室入口处添加0.1 g石英棉(图2网状部分),一内表面距燃烧器出口4 mm处放置一块金属铂片(图2灰色部分),另一面观察壁面温度分布及燃烧情况。

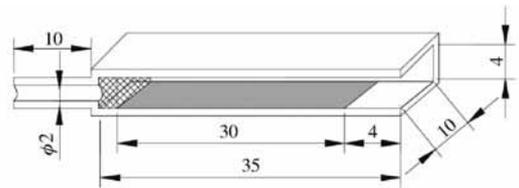


图 2 微型燃烧器结构示意图

Fig. 2 Schematic of microscale combustor

2 实验结果与分析

2.1 未添加石英棉催化燃烧

在不同当量比 Φ 和流速 v 的工况下进行DME催化燃烧实验,用CCD相机观察到了DME火焰的振荡、驻定和回火。图3为 $\Phi = 2, v = 0.1$ m/s条件下DME火焰振荡的图像。从图3中可以看到,整个振荡过程可以分为3个阶段:着火阶段、火焰回传阶段和火焰下移阶段。在0~0.08 s时为着火阶段,预混气接受热量达到着火点后开始燃烧,火焰出现在燃烧器出口处;接着火焰开始往气流上游方向传播,同时火焰区域变大,在时间 $t = 0.28$ s时传播到燃烧室中距燃烧器入口14 mm处,火焰的传播速度为1.05 m/s,这是火焰回传阶段;最后是火焰下移阶段,火焰向燃烧器出口传播,在 $t = 0.36$ s时到达出口。此后开始下一个振荡过程,这样周期性变化形成振荡火焰,其中火焰振幅为21 mm,火焰振荡频率约为3 Hz。FAN等^[22]曾在加热微通道中发现了甲

烷的振荡火焰, FAN 等^[23] 在石英窄通道中进行甲烷/空气预混气的燃烧实验, 同样观察到了稳定火焰和振荡火焰。

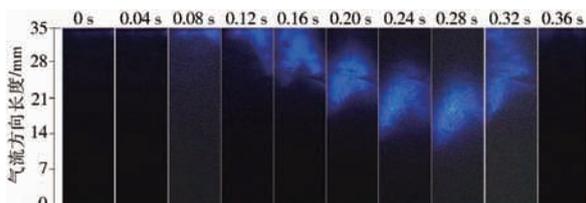
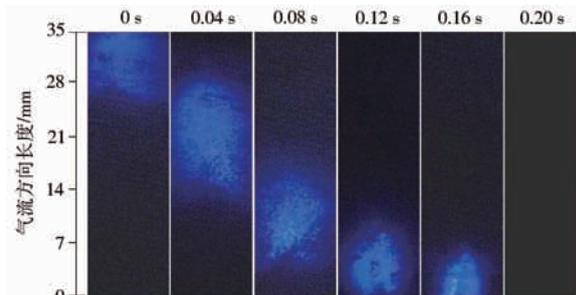


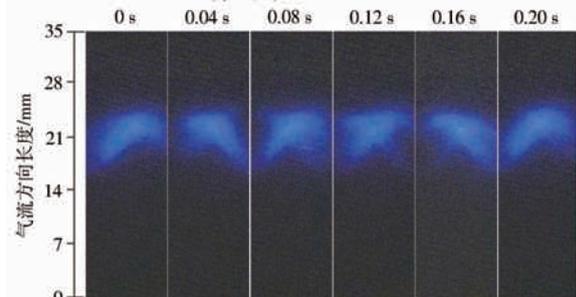
图3 火焰振荡过程 ($\Phi = 2, v = 0.1 \text{ m/s}$)

Fig. 3 Images of oscillating flame

图4为二甲醚在燃烧室内催化燃烧时的火焰回火及驻定图像。其中图4a为 $\Phi = 1.2, v = 0.04 \text{ m/s}$ 时的回火过程, 在 $t = 0 \text{ s}$ 时, 火焰在燃烧器出口处, 接着往气流上游方向传播, 在 $t = 0.20 \text{ s}$ 时在燃烧器进口处淬熄, 在此工况下, 火焰传播速度为 1.75 m/s , 远大于来流速度, 不能稳定燃烧。图4b为 $\Phi = 1.3, v = 0.05 \text{ m/s}$ 时火焰驻定在燃烧器内的图像, 可以看到随时间变化, 火焰位置基本不变, 锋面始终在距燃烧器入口 25 mm 处。WAN 等^[24] 研究发现, 在高度为 4 mm , 无稳燃器的微细通道中几乎观察不到稳定对称的甲烷火焰, 火焰容易倾斜和波动。图4b中的驻定火焰也是一种振荡火焰, 火焰左右振荡, 轴向位置基本不变, 在 $0 \sim 0.16 \text{ s}$ 期间, 火焰形状呈左右不对称, “ Λ ”型-“ X ”型不断变换, 频率约为 6 Hz , 在 $t = 0.20 \text{ s}$ 变回“ Λ ”型。



(a) 回火, $\Phi = 1.2, v = 0.04 \text{ m/s}$



(b) 驻定, $\Phi = 1.3, v = 0.05 \text{ m/s}$

图4 火焰回火及驻定过程

Fig. 4 Flame images of stabilization and flashback

当 $\Phi = 1.3, v = 0.05 \text{ m/s}$ 时, 火焰可以驻定在燃烧室内部, 利用红外热像仪获得燃烧器外表面壁温分布, 结果如图5所示。在燃烧室入口 $x = 0 \text{ mm}$ 处,

壁面温度 T 为 51.46°C , 沿气流方向, 壁面温度先升高后降低, 在 $x = 25 \text{ mm}$ 处达最高温度 342.3°C 。

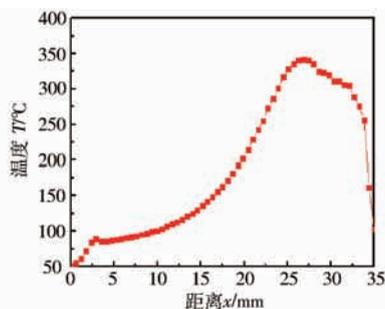


图5 驻定火焰壁面温度 ($\Phi = 1.3, v = 0.05 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Wall temperature of stationed flame

在不同当量比 Φ 的工况下, 改变燃烧室内预混气流速进行实验, 得到二甲醚的稳定燃烧范围如图6所示。

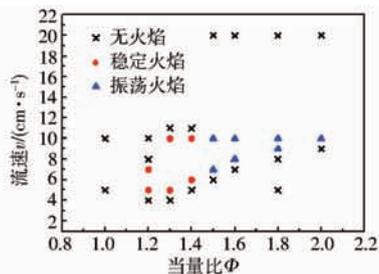


图6 未添加石英棉稳燃范围

Fig. 6 Stable combustion range without quartz wool

单面铂催化的条件下, 稳燃范围很窄。在当量比 $\Phi < 1.2$ 时, 怎样调整DME/空气预混气流速, 均不能燃烧, 分析其原因为二甲醚量较少, 反应产生的热量不足以维持其燃烧, 且二甲醚与氧气存在对催化剂中活性中心的竞争, 在当量比较小时, 二甲醚/空气混合气中氧气分压较高, 使得催化剂表面更多地被氧气分子覆盖, 降低二甲醚被活性中心吸附的可能, 降低了催化效果; 随着当量比的增大, 在 Φ 为 $1.2 \sim 1.4$ 时, 提高了二甲醚分压, 从而降低了氧气在催化剂表面的覆盖率, 提高了二甲醚在催化剂表面的覆盖率, 促进了反应的进行, 通过调整流速, 在合适的工况下, 可以让火焰驻定在燃烧室内。如在 $\Phi = 1.3$, 当流速在 $5 \sim 10 \text{ cm/s}$ 范围内时, 火焰能驻定在平板燃烧室内。当 $\Phi > 1.4$ 时, 调节气体流量, 会产生振荡火焰。如在当量比 $\Phi = 2.0$ 和 $v = 10 \text{ cm/s}$, 此时在出口处点燃, 移走点火源后, 火焰会间断性的往燃烧室内部传播, 形成振荡火焰。

由于未添加石英棉的情况下, 火焰稳定范围较窄, 火焰本身较为脆弱, 尾气取样设备的接入会导致火焰熄灭, 因此无法进行尾气分析, 在后面添加石英棉的实验中会进行尾气分析。

2.2 添加石英棉催化燃烧

添加石英棉后, 由于石英棉有蓄热作用, 极大地

拓宽了二甲醚的稳燃范围,其结果如图 7 所示。

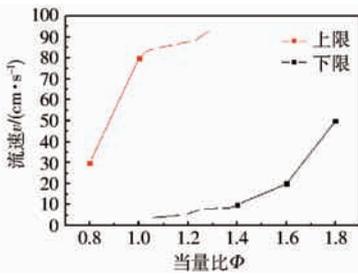


图 7 添加石英棉后稳燃范围

Fig. 7 Stable combustion range with quartz wool

稳燃上限随着当量比的增加呈上升趋势,如在 $\Phi = 0.8$ 时,上限速度 $v = 30 \text{ cm/s}$,当量比增加到 $\Phi = 1.0$ 时,上限增加到 80 cm/s ,由于受流量计测量范围限制,无法进行更大流速实验。对于稳燃下限,在 $\Phi < 1.4$ 时,下限流速很小,在 $v = 2 \text{ cm/s}$ 时仍能燃烧, $\Phi > 1.4$ 时,随着当量比增加,下限流速增加,如 Φ 从 1.4 增加到 1.8 时,下限流速从 10 cm/s 增加到 50 cm/s 。当 $\Phi > 1.8$ 时,燃烧室内氧气不足,二甲醚在出口处与外部氧气反应产生扩散火焰。

LI 等^[25]在平板燃烧器中添加多孔介质进行预混氢气/空气燃烧实验,研究发现即使改变了流速条件,火焰的位置依然能够被多孔介质固定。图 8 为添加石英棉后,在 $\Phi = 0.9, v = 0.2 \text{ m/s}$ 的情况下,火焰传播最后驻定在燃烧器入口处的图像,在 $t = 0.08 \text{ s}$ 时火焰已驻定在燃烧器入口石英棉外围处,火焰锋面位于 7 mm 处。在 $t = 0.12 \text{ s}$ 后可以看到蓝色火焰内出现了明亮的光点,且亮度逐渐加强至稳定,形成了“外蓝内亮”的火焰形态。

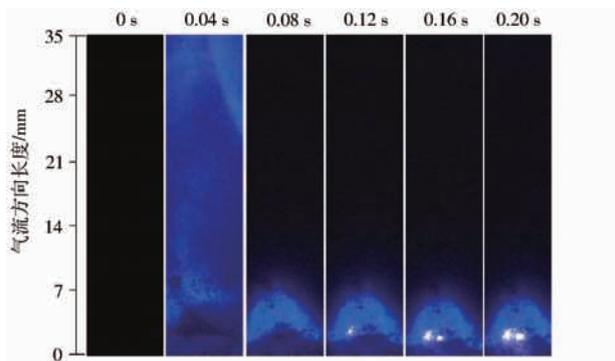


图 8 添加石英棉后火焰传播过程 ($\Phi = 0.9, v = 0.2 \text{ m/s}$)

Fig. 8 Flame images after adding quartz wool

控制当量比 $\Phi = 0.9$,在燃烧室入口处放入适量石英棉后火焰图像与红外图像如图 9 所示。从图 9 中可以看出,随流速的增加,火焰高度增加,由于火焰的不稳定性,火焰锋面受到扰动,火焰锋面形状由椭圆形变为锥形。在 $v = 0.1 \text{ m/s}$ 时,流量很小,因此火焰区域很小,火焰锋面呈圆点形,高温区较小且位于火焰根部; $v = 0.4 \text{ m/s}$ 时,火焰高度明显增

加,火焰形状转变为锥形,淡蓝色轮廓线周围有淡黄色火焰区域,且高温区上移; $v = 0.8 \text{ m/s}$ 时,火焰高度继续增加,高温区靠近燃烧器出口,火焰更加明亮。

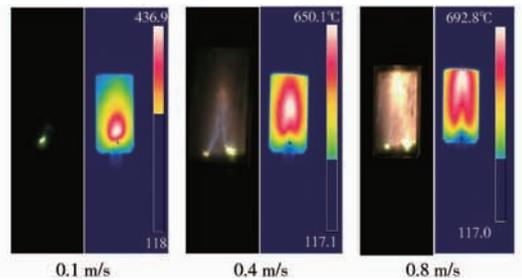


图 9 火焰图像与红外图像 ($\Phi = 0.9$)

Fig. 9 Flame images and infrared images

图 10 为添加石英棉后燃烧器外壁面中心线上的温度分布测量结果。随着气体流速的增加,燃烧室外壁面温度的峰值逐渐升高且向下游移动,峰值温度由 423.99°C 增加至 794.27°C ,高温中心位置由 $x = 9.5 \text{ mm}$ 处下移至 $x = 18 \text{ mm}$ 处,这与图 9 中的红外图像与火焰图像相一致,流速增加,高温区逐渐向燃烧器出口移动。高温区域 ($T \geq 300^\circ\text{C}$ 的区域) 长度增加,说明反应逐渐剧烈。

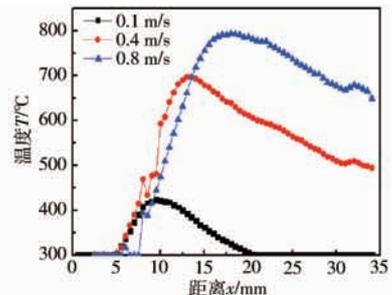


图 10 不同入口流速下的壁面温度 ($\Phi = 1$)

Fig. 10 Wall temperature at different inlet flow rates

图 11 为添加石英棉后二甲醚燃烧后尾气中 CO_2 、 CO 和 H_2 体积分数随当量比的变化情况。从图中可以看出,随当量比增加, CO_2 含量先增大后减小, $\Phi = 0.8$ 时含量为 10.28% ,在当量比 $\Phi = 1$ 处达最大值 13.44% ,继续增加 Φ , CO_2 含量降低。 CO 和 H_2 含量变化与 CO_2 相反,在 $\Phi < 1$ 时,有充足的空气氧化二甲醚,几乎没有 CO 和 H_2 产生,随当量比增

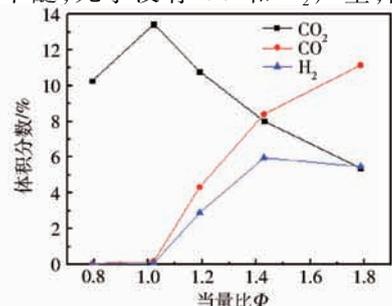


图 11 尾气中物质体积分数变化曲线

Fig. 11 Mole fraction of products versus equivalence ratio

加,空气含量减小,二甲醚过量,燃料得不到充分燃烧,CO和H₂含量逐渐增加。

3 结论

通过对二甲醚在微型平板燃烧器中的铂片催化燃烧实验研究,得到以下结论:

(1)实验用燃烧器中二甲醚稳燃范围较窄,只能在 Φ 为1.2~1.4时驻定, $\Phi < 1.2$ 时无火焰, $\Phi > 1.4$ 时会产生振荡火焰或熄火,添加石英棉后稳燃范围明显提高。

(2)观察到了二甲醚/空气微平板催化燃烧的振荡动态火焰,火焰在距入口14~35 mm内以1.05 m/s速度和3 Hz频率特征振荡。

(3)在微平板燃烧器入口添加石英棉后,研究了DME燃烧中的火焰特征和温度特征,并得到了流速对其的影响。

(4)添加石英棉的催化燃烧中,尾气中CO₂含量在当量比 $\Phi = 1$ 时达最大值13.44%。在富燃情况下,产物中存在CO和H₂,且随当量比增加二者含量增加。

参 考 文 献

- MARUTA K. Micro and mesoscale combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011,33(1):125-150.
- JU Y, MARUTA K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011,37(6):669-715.
- 陈俊杰,王谦. 微尺度催化燃烧的研究进展[J]. 应用化工, 2008,37(11):1376-1380.
CHEN Junjie, WANG Qian. Research progress of micro-scale catalytic combustion[J]. Applied Chemical Industry, 2008,37(11):1376-1380. (in Chinese)
- MARUTA K, TAKEDA K, AHN J, et al. Extinction limits of catalytic combustion in microchannels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002,29(1):957-963.
- 冯耀勋,王勇,蒋利桥,等. 多孔介质表面火焰最小稳燃空间实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(20):46-51.
FENG Yaoxun, WANG Yong, JIANG Liqiao, et al. The smallest distance for stable combustion experimental study of flames on porous surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(20):46-51. (in Chinese)
- 周俊虎,汪洋,杨卫娟,等. 燃料气体预热温度对微燃烧器性能影响的分析[J]. 农业机械学报, 2010,41(8):90-93.
ZHOU Junhu, WANG Yang, YANG Weijuan, et al. Effects of preheating fuel gas to micro-scale flame[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):90-93. (in Chinese)
- 杨卫娟,周俊虎,汪洋,等. 微尺度燃烧中的温度及热回流分布[J]. 中国电机工程学报, 2010,30(20):28-32.
YANG Weijuan, ZHOU Junhu, WANG Yang, et al. Temperature and heat-recirculation distribution in micro-scale combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(20):28-32. (in Chinese)
- 张永生,周俊虎,杨卫娟,等. 微燃烧稳定性分析和微细管道燃烧实验研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2006,40(7):1178-1182.
ZHANG Yongsheng, ZHOU Junhu, YANG Weijuan, et al. Burning stability analysis of micro-combustion and experiments research of combustion in microscale tube[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006,40(7):1178-1182. (in Chinese)
- 潘剑锋,刘启胜,卢青波,等. 催化微燃烧室内氢气和氧气预混合燃烧特性[J]. 农业机械学报, 2016,47(2):357-363.
PAN Jianfeng, LIU Qisheng, LU Qingbo, et al. Combustion characteristic of premixed hydrogen/oxygen mixture in catalytic micro-combustor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(2):357-363. (in Chinese)
- 焦健,钟北京. 甲烷微通道内催化燃烧有关转化率的讨论[J]. 工程热物理学报, 2007,28(2):357-359.
JIAO Jian, ZHONG Beijing. Discussion on CH₄ conversion ratio of catalytic combustion in microtubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007,28(2):357-359. (in Chinese)
- 潘剑锋,范宝伟,吴庆瑞,等. 微尺度下氢氧预混合气催化燃烧的研究[J]. 机械工程学报, 2011,47(24):111-116.
PAN Jianfeng, FAN Baowei, WU Qingrui, et al. Study on catalytic combustion of premixed hydrogen and oxygen in the micro-scale[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(24):111-116. (in Chinese)
- FAN A, WAN J, LIU Y, et al. Effect of bluff body shape on the blow-off limit of hydrogen/air flame in a planar micro-combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2014,62(1):13-19.
- TANG A, XU Y, PAN J, et al. Combustion characteristics and performance evaluation of premixed methane/air with hydrogen addition in a micro-planar combustor[J]. Chemical Engineering Science, 2015,131:235-242.
- SAIKI Y, SUZUKI Y. Effect of wall surface reaction on a methane-air premixed flame in narrow channels with different wall materials[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013,34(2):3395-3402.
- 潘剑锋,万彦辉,李德桃,等. 甲烷和氢气在亚毫米微燃烧室内燃烧的试验对比[J]. 热科学与技术, 2010,9(4):333-338.
PAN Jianfeng, WAN Yanhui, LI Detao, et al. Experiments on methane and hydrogen combustion in the sub-millimeter microscale combustion chamber[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2010,9(4):333-338. (in Chinese)

- Electrotechnical Society, 2014, 29(5):104-117. (in Chinese)
- 7 李槐树, 周羽, 曹晴, 等. 永磁同步电机开环控制系统稳定性的数学推导与分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊1): 36-43.
LI Huaishu, ZHOU Yu, CAO Qing, et al. Mathematical deduction and stability analysis of PMSM open-loop control system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(Supp.1):36-43. (in Chinese)
- 8 叶志伟. 电动汽车用对转双转子电机的设计与开发[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
YE Zhiwei. Design and development of anti-directional-dual-rotor motor for electric vehicles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- 9 SU Kalin, LI Chunlai. Chaos control of permanent magnet synchronous motors via unidirectional correlation [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(14):3693-3696.
- 10 吴忠强, 吴昌韩, 赵立儒, 等. 基于哈密顿函数的永磁同步电机混沌系统鲁棒控制[J]. 物理学报, 2015, 64(9): 221-226.
WU Zhongqiang, WU Changhan, ZHAO Liru, et al. Robust control for permanent magnet synchronous motors based on Hamiltonian function[J], Acta Physica Sinica, 2015, 64(9):221-226. (in Chinese)
- 11 罗晓署, 韦笃取. 复杂电机与电力系统非线性动力学行为与控制研究[M]. 北京:科学出版社, 2015:35-36.
- 12 吴志红, 武四辈, 朱元, 等. 车用内置式永磁电动机转矩多参数统一控制方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6):30-34.
WU Zhihong, WU Sibe, ZHU Yuan, et al. Torque control method of multi-parameter integrated for IPMSM in vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):30-34. (in Chinese)
- 13 邹国棠. 混沌电机驱动及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2009:59-61.
- 14 BI Qinsheng, ZHANG Zhengdi. Bursting phenomena as well as the bifurcation mechanism in Lorenz with two time scales[J]. Physics Letters A, 2011, 375(8):1183-1190.
- 15 ZHENG Song, HAN Xiuqing, BI Qinsheng. Bifurcations and fast-slow behaviors in a hyperchaotic dynamical system [J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2011, 16(4):1998-2005.
- 16 刘秉正. 非线性动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.

~~~~~

(上接第 362 页)

- 16 CHOI W, KWON S, DONGSHIN H. Combustion characteristics of hydrogen-air premixed gas in a sub-millimeter scale catalytic combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(9):2400-2408.
- 17 YANG W, DENG C, ZHOU J, et al. Mesoscale combustion of ethanol and dimethyl ether over Pt/ZSM-5: Differences in combustion characteristics and catalyst deactivation[J]. Fuel, 2016, 165:1-9.
- 18 ZHONG B, YANG F, YANG Q. Catalytic combustion of n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> and DME in swiss-roll combustor with porous ceramics[J]. Combustion Science and Technology, 2012, 184(5):573-584.
- 19 OSHIBE H, NAKAMURA H, TEZUKA T, et al. Stabilized three-stage oxidation of DME/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(8):1572-1580.
- 20 MIHAI O, FATHALI A, AUVRAY X, et al. DME, propane and CO: The oxidation, steam reforming and WGS over Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The effect of aging and presence of water[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, 160-161:480-491.
- 21 FAN A, MARUTA K, NAKAMURA H, et al. Experimental investigation on flame pattern formations of DME-air mixtures in a radial microchannel[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(9):1637-1642.
- 22 FAN A, MINAEV S, SERESHCHENKO E, et al. Dynamics of splitting flames in a heated channel[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2009, 45(3): 245-250.
- 23 FAN Y, SUZUKI Y, KASAGI N. Experimental study of micro-scale premixed flame in quartz channels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2):3083-3090.
- 24 WAN J, FAN A, LIU Y, et al. Experimental investigation and numerical analysis on flame stabilization of CH<sub>4</sub>/air mixture in a mesoscale channel with wall cavities[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(4):1035-1045.
- 25 LI J, CHOU S K, LI Z W, et al. Experimental investigation of porous media combustion in a planar micro-combustor[J]. Fuel, 2010, 89(3):708-715.