

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.006

受限空间下散热对微火焰稳定性的影响*

甘云华¹ 罗燕来¹ 冯清颖² 史艳玲³

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 广州华润热电有限公司, 广州 511455;

3. 华南农业大学工程学院, 广州 510640)

摘要:以无水液体乙醇为燃料,用铁铬合金电热丝为燃烧室内反应物加热,采用实验与数值模拟相结合的方法研究乙醇-空气小尺度层流扩散火焰散热对受限空间微火焰稳定性的影响。结果表明,采用电热丝向受限空间内的燃烧反应物加热,可以减少散热损失的影响,对稳燃有一定的帮助。电加热功率为合适值时,稳定燃烧极限最宽。电加热可提高火焰温度,增大化学反应速率,使火焰中心向上游移动。一定范围内,电加热功率的增幅大于散热的增幅,外加热功率对散热损失有抑制作用,增强微火焰的稳定性。

关键词:微尺度燃烧 受限空间 热损失 火焰稳定性

中图分类号:TK16 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2014)04-0037-05

引言

研制体积小、质量轻、能量密度高且能够持续供能的微能源系统具有重要的意义^[1-4]。20世纪80年代末 Epstein 等^[5]提出微动力机电系统(Power MEMS)概念,基于燃料燃烧的微动力/发电系统具有高能量密度的特点,此类系统在近十年来成为国内外研究热点^[6-9]。

作为微能源系统的核心,微型燃烧器维持稳定燃烧的影响因素成了国内外研究人员关注的重点对象。微型燃烧器的表面积/体积比约为 500 m^{-1} ,产生的表面热损失为传统燃烧器的几百倍,因此热量损失就成为设计中必须考虑的重要因素。Zhou 等^[10]通过实验与数值模拟得出,火焰在低流量(0.08 L/min)时由于热损失发生猝熄,在高流量(0.4 L/min)时由于燃烧速度、气流速度之间不平衡以及热循环不足发生吹熄,而通过电加热可以有效地抑制猝熄。Li 等^[11]对微型管道内的燃烧特性和热损失进行了研究,发现通过管壁的热损失最大。Wang 等^[12]通过实验研究了由石英管制成的微燃烧器的性能,发现降低表面热损失,可以抑制熄灭。文献^[13-16]结合了数值模拟的方法研究了微火焰。

早期研究多以气体燃料为研究对象,而液体燃料与气体燃料燃烧特性有许多不同,液体燃料的能量密度更高^[17]。虽然在实践中大多采用湍流扩散

火焰,但层流扩散火焰在理论和实验上都比湍流更容易处理,传输和反应过程中对层流扩散火焰的理解,可作为了解更复杂的湍流火焰结构的一个必要前提^[18]。本文以乙醇-空气小尺度层流扩散火焰为研究对象,采用实验研究与数值模拟相结合的方法,系统地分析散热对受限空间微火焰稳定性的影响。

1 实验方法

实验系统如图1所示。微量燃料的供应系统由KDS注射泵等组成;微火焰观测系统由体视显微镜和数字摄像头组成;火焰温度由铂铑合金热电偶测量;加热系统由电热丝、电源等组成;受限空间包括陶瓷管出口以上和石英玻璃内壁之间的区域。选取壁厚为0.1 mm、内径为0.7 mm的陶瓷管和长度为80 mm、内径为10 mm的石英玻璃管,使用铁铬合金电热丝。

采用6 mm内径的注射器通过微型注射泵调节实验所需要的流量,提供稳定的、精度高的燃料供应,并记录乙醇流量。与此同时,通过体视显微镜观察微火焰,使用数字摄像头拍摄微火焰的图像传输到计算机上实时显示并记录。采用Origin绘图软件辅助间接计算微火焰的尺寸。铂铑热电偶连接数据采集仪,对微火焰进行多次温度测量,以保证测得数据的准确性。

通过实验拍摄的图像如图2所示,该工况下的

收稿日期:2013-03-04 修回日期:2013-04-05

*国家自然科学基金资助项目(51376066、50806022)、国家留学基金资助项目(201208440072)、广州市珠江科技新星资助项目(2012J220002)和能源高效清洁利用广东普通高校重点实验室(华南理工大学)资助项目(KLB10004)

作者简介:甘云华,副教授,博士,主要从事微小尺度燃烧与传热研究,E-mail: ganyh@scut.edu.cn

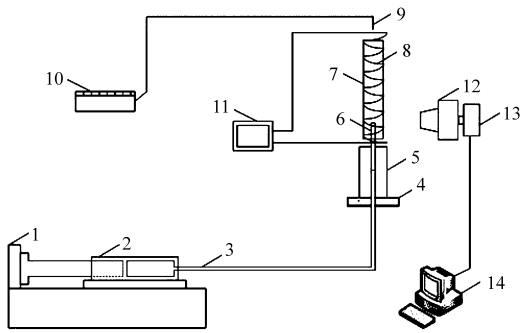


图1 微燃烧实验系统

Fig. 1 Micro-combustion experimental system

1. 注射泵 2. 注射器 3. 塑料软管 4. 基座 5. 铜管套筒
6. 陶瓷管 7. 石英玻璃管 8. 电热丝 9. 热电偶 10. 数据采集仪
11. 直流稳压电源 12. 数字摄像头 13. 体视显微镜
14. 计算机

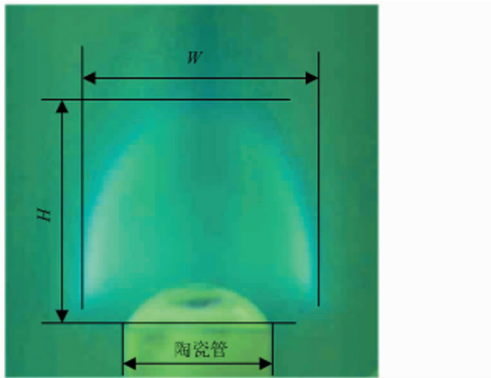


图2 火焰图像

Fig. 2 Flame image

参数:乙醇流量 $q_v = 1.4 \text{ mL/h}$, 电加热功率 $P = 0 \text{ W}$ 。
 并经后处理软件计算微火焰的特征尺寸:火焰宽度 W , 火焰高度 H 。

2 计算模型

根据实验系统,并结合扩散燃烧呈对称性的特点,建立如图3所示的二维物理模型。使用 Fluent 6.3 进行模拟。

数值模拟过程中,考虑到物理模型的固体区和流体区差异较大,将其分成陶瓷管固体区、陶瓷管内流体区和燃烧流体区,乙醇入口附近区域网格加密(图3)。模型结构形状规则,采用 Map 形式的网格,网格元素类型格式选择 Quad。

数值模拟过程中,流体流动遵循质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中 ρ ——密度 t ——时间

u, v —— x, y 方向的速度

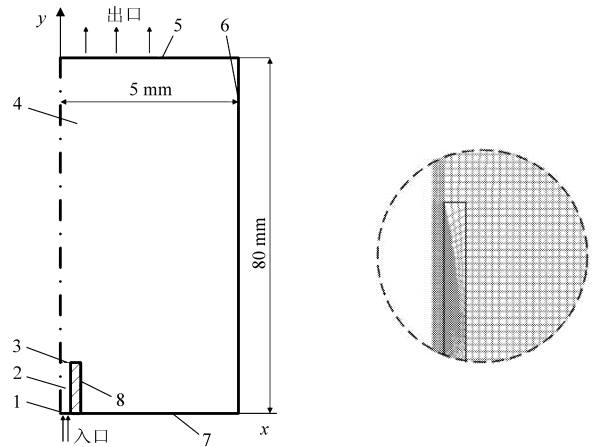


图3 燃烧系统的物理模型

Fig. 3 Physical model of micro-combustion

1. 陶瓷管乙醇入口 2. 乙醇流动区 3. 陶瓷管乙醇出口 4. 燃烧区
5. 燃烧区上端面 6. 受限空间边界(石英玻璃管) 7. 燃烧区下端面 8. 陶瓷管管壁

研究过程中液体乙醇在陶瓷管内为稳态流动,乙醇密度可视为常数,故式(1)可简化为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

x, y 方向的动量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + F_y \end{cases} \quad (3)$$

式中 μ ——动力粘度

p ——流体微元体上的压力

F_x, F_y ——微元体上的体积力

能量方程为

流体区

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (u(\rho E + p)) =$$

$$\nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + \boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{u} \right) + S_h \quad (4)$$

固体区

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (5)$$

式中 k_{eff} ——有效传热系数

∇ ——向量微分算子

\mathbf{J}_j ——组分 j 的扩散通量

T ——温度 $\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}}$ ——粘性耗散应力

S_h ——体积热源项 λ ——导热系数

式(4)右边的前3项分别表示由于热传导、组分扩散和粘性耗散而引起的能量转移。

乙醇在陶瓷管口燃烧简化为空间单步化学反应。陶瓷管内外壁采用耦合壁面条件。选择通用有限速率化学反应模型计算乙醇的输送和燃烧,乙醇

燃烧不发生在壁面,没有弥散相粒子反应,乙醇燃烧的化学反应为体积反应,考虑计算多组分扩散和热扩散。液体乙醇纯度为99.7%,设供入液体燃料为温度300 K的液体乙醇,密度为 790 kg/m^3 ,比定压热容为 $2470 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热系数为 $0.182 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。当温度超过351 K时,液体乙醇变为气体乙醇,密度为 2.06 kg/m^3 ,比定压热容为 $2407 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热系数为 $0.0145 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

3 结果与分析

3.1 稳定燃烧极限

表1列出了不同电加热功率下,通过实验获得的液体乙醇微火焰的稳定燃烧极限。乙醇燃烧热为 1365.5 kJ/mol ,设完全燃烧,若乙醇流量为 1.2 mL/h 时,乙醇燃烧热功率为 7.81 W ,电加热功率 1.75 W 占其22.4%, 6.75 W 占其86.5%。因此,在本实验范围内,电加热可对微火焰燃烧稳定性产生明显影响。

表1 微火焰的稳定燃烧极限

Tab.1 Stability limits of micro-flame mL/h

稳定燃烧极限	电加热功率 P/W							
	0	1.75	2.75	3.75	4.75	5.75	6.75	7.75
上限	3.0	3.05	3.1	3.2	3.4	3.8	3.6	3.5
下限	0.6	0.6	0.59	0.57	0.54	0.52	0.55	0.57

由以上实验结果可得, P 由 0 W 增至 5.75 W ,液体乙醇的稳定燃烧极限从 $0.6 \sim 3.0 \text{ mL/h}$ 逐渐扩大到 $0.52 \sim 3.8 \text{ mL/h}$,在 $P = 5.75 \text{ W}$ 时达到最大。此时,若继续增大电功率,稳定燃烧极限反而开始缩小。说明通过电加热减小散热可拓宽稳定燃烧极限,但电加热功率过大其效果将降低。

理论研究表明,燃烧能够保持稳定的条件之一就是燃料在燃烧时的发热量要大于向外界的散热量。因此,燃烧过程的能量损失情况与燃烧稳定性关系密切。较小的电加热功率弥补了部分由于壁面散热导致的热损失,也提升了反应速率,微火焰产热量和散热量容易达到平衡,因而稳定燃烧极限拓宽。但过大的电加热功率使反应速率进一步提高,导致尾气带走的热量大幅提高,平衡不易达到,因而微火焰又变得不稳定。尤其在小流量时,受限空间对气体流速产生了较大影响,液体乙醇的热流密度偏大,加速了乙醇的气化,反应速率相当大,乙醇迅速燃尽,微火焰很不稳定,燃烧下限对应的流量迅速上升。

3.2 火焰特征尺寸

选取 $P = 0, 1.75, 6.75 \text{ W}$ 进行对比分析,微火

焰特性尺寸如图4和图5所示。总体趋势为微火焰宽度和高度都随着乙醇流量的增加而增加。 $P = 1.75 \text{ W}$ 时,微火焰的特征尺寸较 $P = 0 \text{ W}$ 时都有一定的增加,宽度在小流量时增加得较快,在大流量时增长得较为平缓;而火焰高度随乙醇流量的增加近乎呈线性变化。数值计算得到的规律与此相符。因为电加热提高了火焰的温度,使得分子扩散作用增强,同时加热了陶瓷管中液体乙醇,加速了乙醇的气化,所以微火焰的特征尺寸增大。当电加热功率提高到 6.75 W 之后,火焰的特征尺寸反而较功率为 1.75 W 时有所减小。这是因为加热量进一步加大之后,反应温度进一步升高,反应速率增加,导致乙醇更快的燃尽,反应速率的增加比扩散速度增加得更快,于是微火焰尺寸缩小。

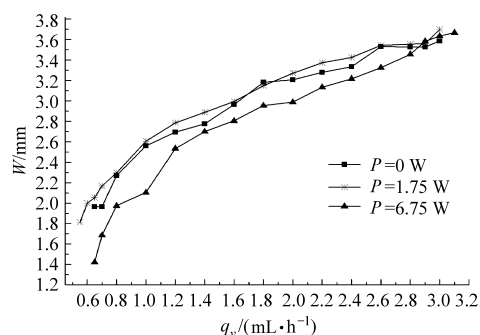


图4 不同电加热功率下火焰宽度随乙醇流量的变化曲线

Fig.4 Flame width varying with ethanol flow rate under different power

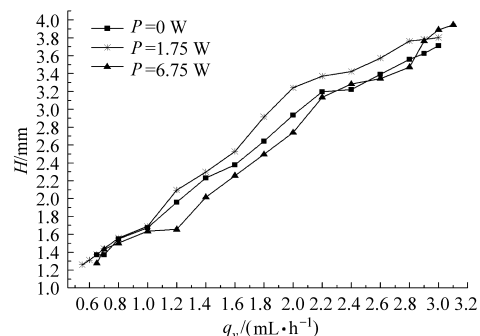


图5 不同电加热功率下火焰高度随乙醇流量的变化曲线

Fig.5 Flame height varying with ethanol flow rate under different power

虽然微火焰尺寸增大会增加火焰表面散热而降低稳定性,但燃烧速率的提高使得产热量增加,故稳定燃烧极限可以得到拓宽。可以看到,电加热功率上升到 6.75 W 时,在燃烧极限附近微火焰特征尺寸迅速增大,此时微火焰表面散热大大增加,热量不平衡,这也证明了过大的电加热功率会使稳定燃烧极限变窄。

3.3 温度分布

微火焰顶端温度最高,称为峰值温度(T_p)。实

验得到不同电加热功率时,微火焰的峰值温度随乙醇流量的变化曲线,如图6所示。从图中可以看出,同一乙醇流量时,反应区域的峰值温度随着电加热功率的上升而上升。在流量为1.6 mL/h情况下,电加热功率为0 W时,火焰的峰值温度1523 K;电加热功率为1.75 W和6.75 W时,火焰的峰值温度分别达到了1529 K和1540 K。热量会在燃烧区域传递给壁面,沿壁面传导至上游,在入口的地方传递给燃烧反应物,对其进行预热。根据反应动力学原理,反应速率会随反应温度的升高而升高,使反应更加剧烈。并且电加热可以弥补由于壁面散热导致的热损失,因此可以使微火焰更稳定。

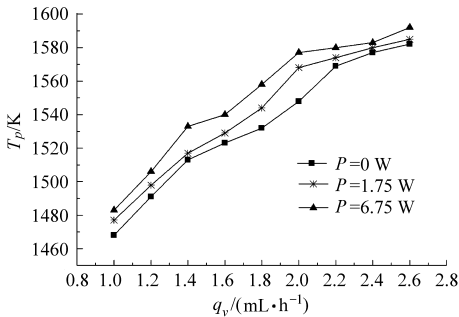


图6 不同电加热功率下火焰峰值温度随乙醇流量的变化

Fig. 6 Flame peak temperature varying with ethanol flow rate under different power

数值计算也得到相同的结果,实验值和模拟值吻合较好。为深入研究,从Fluent计算结果导出实验不易测得的燃烧室中轴线温度(T_m)。图7为乙醇流量为1.6 mL/h、不同电加热功率时的温度曲线。乙醇进入燃烧室中进行燃烧,很快到达峰值温度,由于散热下游气体温度逐渐降低。由于外部加热量的增加,减小了壁面散热影响,温度整体呈现上升, T_m 的峰值温度升高,提升了乙醇的反应温度。反应速率随着反应温度的升高而提高,电加热功率为0、1.75和6.75 W时,反应中心反应速率分别为0.4485、0.4987和0.6582 ($\text{kg} \cdot \text{mol}) / (\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。因此,乙醇在燃烧器中更快地燃尽,从图中观察到火焰

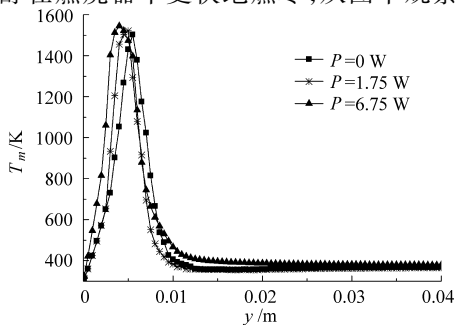


图7 燃烧室中轴线温度曲线

Fig. 7 Temperature of central axis of combustion chamber

的峰值温度位置向上游入口处移动。

实验测得 $P=0$ 、1.75、6.75 W时,燃烧器的尾气温度(T_{ex})随乙醇流量的变化曲线,如图8所示。

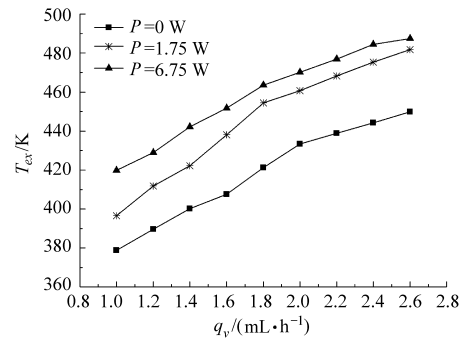


图8 不同电加热功率下尾气温度随乙醇流量的变化

Fig. 8 Exhaust gas temperature varying with ethanol flow rate under different power

3.4 散热损失

燃烧过程的能量损失由壁面散热损失和烟气余热损失组成,而其中壁面散热由自然对流传热和辐射传热组成。

结合实验和数值模拟的结果,计算微燃烧壁面散热量占总热量的百分数。微火焰中由反应物带入热量,一部分热损失由不完全燃烧产生,大部分热量通过壁面散失掉,具有一定温度的尾气带走剩下的热量^[19]。则壁面散热量占总热量的百分数为

$$\Phi = \frac{Q_{in} - L_f - L_{ex}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

式中 Q_{in} ——由反应物带入的全部热量

L_f ——由于不完全燃烧产生的热损失

L_{ex} ——具有一定温度的尾气带走的热量

式(6)简化后,可得到

$$\Phi \approx \frac{C_p(T_1)T_a - T_{ex}}{C_p(T_2)T_a - T_0} - \beta \quad (7)$$

其中

$$T_1 = (T_a + T_{ex})/2$$

$$T_2 = (T_a + T_0)/2$$

式中 T_a ——火焰温度

T_0 ——微火焰周围环境温度

β ——燃料损失分数,通常小于1%,此处忽略 β 值

计算结果如图9所示。从图中可以看到,随着乙醇流量增加,微火焰的散热量占总热量的百分数都呈现下降的趋势。壁面散热量增长速度较慢,烟气带走的热量增长相对较快^[20]。流量增大减小了壁面散热的比例,有利于提高反应温度和增强燃烧稳定性。

乙醇流量相同时,使用电热丝对反应物进行加热,增大了壁面的散热量。但是,电功率大幅提高,而壁面散热量的变化幅度却很小。如电功率从0 W

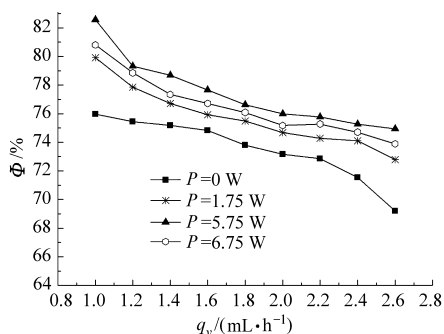


图9 微火焰壁面散热比例

Fig. 9 Proportion of surface heat loss of micro-flame

增加到 5.75 W, 而散热变化只从 74.6% 增长到 75.9%。虽然提高电加热功率后, 温度上升导致壁面散热增加, 但外加的热量弥补了损失的热量, 壁面的散热损失相对降低。电加热功率的增加幅度大于壁面散热的增加幅度, 所以电加热功率对散热损失有抑制作用, 微火焰的稳定性能得到加强。如继续提高电加热功率, 尾气温度进一步升高, 将带走更

多的热量, 此时壁面散热比例有所下降, 即 Φ 曲线 $P = 6.75 \text{ W}$ 低于 $P = 5.75 \text{ W}$ 。若产热量大于散热量, 微火焰热量不平衡, 将容易发生火焰的震荡, 不能稳定燃烧。因而采用适当的电加热功率对散热损失有抑制作用, 微火焰稳定性增强。

4 结论

(1) 选择合适电功率, 加热受限空间燃烧反应物, 可以减少散热损失影响, 稳定燃烧极限拓宽。

(2) 随着电加热功率增加, 微火焰特征尺寸先增大后减小。

(3) 外加电加热可提高微火焰的峰值温度, 高的火焰温度可以提高燃料的化学反应速率, 火焰中心向上游移动。

(4) 当电加热功率小于 5.75 W, 电加热的增加幅度大于壁面散热的增加幅度, 电加热对散热损失有抑制作用, 微火焰的稳定性能增强。

参 考 文 献

- Xu T, Gao X N, Jing Y, et al. Experimental and numerical simulation study of the microscale laminar flow diffusion combustion of liquid ethanol[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(23): 8021 - 8027.
- Ju Y G, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669 - 715.
- Gan Y H, Xu J L, Yan Y Y, et al. A comparative study on free jet and confined jet diffusion flames of liquid ethanol from small nozzles[J]. Combustion Science and Technology, 2014, 186(2): 120 - 138.
- 李铭迪, 王忠, 李立琳, 等. 乙醇/柴油燃烧颗粒状态特征试验研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 28 - 32.
Li Mingdi, Wang Zhong, Li Lilin, et al. Particulate status of diesel engine fueled with ethanol/diesel blends[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 28 - 32. (in Chinese)
- Epstein A H, Senturia S D. Macro power from micro machinery[J]. Science, 1997, 276(5316): 1211.
- Chou S K, Yang W M, Chua K J, et al. Development of micro power generators—a review[J]. Applied Energy, 2011, 88(1): 1 - 16.
- Kaisare N S, Vlachos D G. A review on microcombustion: fundamentals, devices and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(3): 321 - 359.
- 潘剑锋, 唐维新, 黄俊, 等. 微热光电系统燃烧室内截面突变对燃烧的影响[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 44 - 47.
Pan Jianfeng, Tang Weixin, Huang Jun, et al. Effect of sudden step on combustion in a micro-thermo-photovoltaic system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 44 - 47. (in Chinese)
- 潘剑锋, 周俊, 唐爱坤, 等. 微尺度燃烧过程中传热准则数分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 197 - 202.
Pan Jianfeng, Zhou Jun, Tang Aikun, et al. Analysis of criterion number of heat transfer in micro combustion process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 197 - 202. (in Chinese)
- Zhou J H, Wang Y, Yang W J, et al. Improvement of micro-combustion stability through electrical heating[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(11 - 12): 2373 - 2378.
- Li J W, Zhong B J. Experimental investigation on heat loss and combustion in methane/oxygen micro-tube combustor [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(7): 707 - 716.
- Wang Y, Zhou Z J, Yang W J, et al. Instability of flame in micro-combustor under different external thermal environment [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(7): 1451 - 1457.
- 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 - 94.
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 - 94. (in Chinese)
- Lee D H, Kwon S. Heat transfer and quenching analysis of combustion in a micro combustion vessel [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002, 12(5): 670 - 676.
- Kim N I. Numerical study of opposed non-premixed jet flames of methane in a coaxial narrow air tube [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(2): 722 - 733.

Anti-drive System Design and Hierarchy Control Strategy of Electric Drive Vehicle

Jin Chun Zheng Shuyang Tian Haiyong

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the problems of high idle speed and fuel consumption of wheeled electric drive vehicle on long downhill condition, an anti-drive energy feedback system was designed. The wheeled motors regenerative braking energy was feedback to DC bus and switched from rectifier to inverter module. The synchronous traction generator was driven by inverter as traction motor, which dragging the engine speed to the rated state, and at this time, the throttle was closed. Based on the hierarchical control idea, a three layers control algorithm of anti-drive feedback system, the up layer control algorithm of vehicle state estimation, middle layer of tracking generator rotor frequency and underlying layer of double fuzzy, was put forward. Bench test result showed the anti-drive energy feedback system could provide continuous braking force which equal to 20% of engine power, and save 15% of fuel. The control strategy has good robustness and strong driver intention recognition.

Key words: Vehicle Electric drive Regenerative braking Anti-drive

(上接第 41 页)

- 16 徐涛, 杨泽亮, 甘云华. 液体乙醇微尺度层流扩散燃烧的数值模拟[J]. 华南理工大学学报, 2011, 39(3): 90-94.
Xu Tao, Yang Zeliang, Gan Yunhua. Numerical simulation of microscale laminar-flow diffusion combustion of liquid ethanol[J]. Journal of South China University of Technology, 2011, 39(3): 90-94. (in Chinese)
- 17 Maruta K. Micro and mesoscale combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 125-150.
- 18 Datta A. Effects of gravity on structure and entropy generation of confined laminar diffusion flames[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(5): 429-440.
- 19 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.
- 20 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): 2455-2462.

Effect of Heat Loss on Micro Flame Stability in Confined Space

Gan Yunhua¹ Luo Yanlai¹ Feng Qingying² Shi Yanling³

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

2. Guangzhou China Resources Thermal Power Co., Ltd., Guangzhou 511455, China

3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The characteristics of ethanol-air microscale laminar-flow diffusion combustion were investigated. Combined with experimental study and numerical simulation, the effects of surface heat loss on the flame stability in the confined space were systematically analyzed. The surface heat loss was controlled by electrical heating inside. According to the results, the electrical heating reduced the effects of heat loss and enhanced the stability effectively. Using the appropriate electrical heating power, it reached the widest stability limits of combustion. The flame feature size and temperature distribution were both changed by the electrical heating. The electrical heating raised the flame temperature. The chemical reaction rate became bigger, and the micro-flame shifted upstream. Within a certain range, the electrical heating increase was greater than the increase of the heat loss. The electrical heating inhibited the heat loss and enhanced the stability.

Key words: Micro-combustion Confined space Heat loss Flame stability