

微内燃机点火和燃烧中微尺寸效应的研究

任泰安^{1,2}, 张长富¹, 蒋庄德¹

(1. 西安交通大学精密工程研究所, 710049, 西安; 2. 河南机电高等专科学校机械工程系, 453002, 新乡)

摘要: 从设计的微小空间燃烧室中, 观察微燃烧通道中氢气/空气预混气体的燃烧现象, 当空间尺寸从厘米级减小到毫米级时, 点火和燃烧的不同特征会导致氢气的着火浓度界限变小, 使得燃烧不稳定、不充分, 极易造成淬熄。因此, 提出了选用淬熄距离小、反应速度快、最小点火能小的气体作燃料, 采取催化反应、增压和绝缘等措施促进微小空间内的点火和燃烧。通过分析微小空间对制备微型内燃机内平板电容点火器的限制, 表明采用蒸发工艺制备的电极厚度小, 因此增加电镀工艺, 可使电极厚度达到 $4\ \mu\text{m}$, 明显提高了电容的单次放电能量。

关键词: 微内燃机; 点火; 燃烧; 微尺寸效应

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0776-04

Study on the Micro-Size Effect in Ignition and Combustion in Micro-Engine

Ren Tai'an^{1,2}, Zhang Changfu¹, Jiang Zhuangde¹

(1. Institute of Precision Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002, China)

Abstract: The experimental apparatus of micro-space ignition and combustion are designed to investigate the size effects of micro-space ignition and combustion by reducing the sizes of the combustors with premixed hydrogen/air. The experimental results in the micro-space show that the smaller the ignitable hydrogen concentration range, the shorter the gas fuel residence time. When the sizes of the combustors decrease from centimeter scale down to millimeter scale, the heat transfer loss increases obviously due to the growing of the ratio of surface to volume and the stable combustion is difficult to maintain due to flame quenching. It is suggested to adopt hydrogen possessing low quenching distance and ignition energy associated with pressure, insulation and catalysts. The plate capacitor spark electrodes for micro-space combustion with cantilever beam structures are designed and fabricated by evaporation, where the gap between two spark electrodes gets more than $10\ \mu\text{m}$ and the thickness less than $0.2\ \mu\text{m}$. Smaller capacitance of the electrode leads to a longer igniting time. Electroplating is proposed after evaporation to deposit in relatively large volumes for microfabrication, thus $4\ \mu\text{m}$ thickness of the electrode is obtained with increased single discharge energy.

Keywords: micro-engine; ignition; combustion; micro-size effect

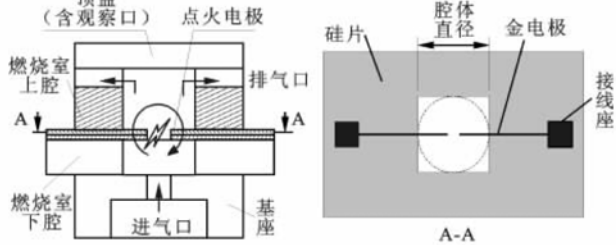
近几年来,微内燃机的研究成了世界范围内微机电系统(MEMS)领域中的一个热点,而微细加工技术的日趋成熟为开展这方面的研究提供了有力的保证,例如目前由南加州大学 Ronney 领导的研究

小组开发的“瑞士面包卷”燃烧器,麻省理工学院的微型燃气轮机燃烧器和加州大学伯克利分校的微型三角转子发动机^[1],新加坡制造技术研究所的Jin、Shan和Wang等人^[2]采用深层反应离子刻蚀方法

制备和组装的微燃烧室. 江苏大学的李德桃教授^[3-4]与新加坡国立大学、美国加州工业大学联合对微燃烧进行微热光电系统模拟,韩国的 Park、Lee 等人^[5]对以氢氧为燃料的微燃烧室,及其点火装置的制造和装配进行了研究. 美国波士顿大学^[6]、加州大学伯克利分校的 Mehra、Zhang 等人^[7-8]对微燃烧室结构工艺及多晶硅绝缘衬底进行研究,研制了用于微型燃气轮机的硅基点火器及温度传感器. 南加州大学、汉诺威和明尼苏达大学、乔治亚理工学院等也均在微燃烧的研究^[9-11]. 由于现有的诸多燃烧理论与点火方法不适合微尺度下的点火与燃烧,因此本文研究的重点是微内燃机点火和燃烧中的微尺寸效应.

1 微小空间点火及燃烧实验装置的设计

如图 1 所示,设计制作的微小空间点火和燃烧特性实验装置主要由上盖、上下燃烧室及底座 4 层构成,其中上盖可用于观察,并有排气通道,可燃气体经预混后从底座的进气通道进入,在燃烧室内采用内置式电火花电极,电极选用金材料,绝缘层选用 2 μm 厚的氮化硅材料. 微燃烧室结构的截面为正方形的长方体,边长分别取 1、3 和 9 mm,燃烧室通过 2~6 层硅片粘结获得,高度约为 1~3 mm.



(a) 装配图 (b) A-A 剖视图
图 1 实验装置结构示意图

2 氢气着火浓度界限实验

选用微细石英管作为微细通道进行氢气/氧气预混气体的燃烧实验,分别调整空气和氢气的流量 q_v , 获得了微细直通道和环型通道内氢气的着火浓度界限,实验结果如图 2、图 3 所示. 在大尺寸空间,氢气(空气作氧化剂)的可燃浓度界限 r_{H_2} 为 4%~75%,而从图 2、图 3 中可以看出,在微细通道(光滑圆管)中氢气的着火浓度界限与大空间相比明显缩小,但还是有比较宽的着火浓度界限. 气体着火浓度界限缩小的主要原因是受到反应物中活化中心和微

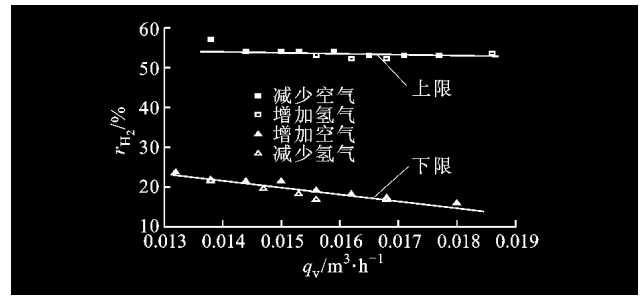


图 2 氢气与空气预混燃烧着火浓度范围($d=6\text{ mm}$)

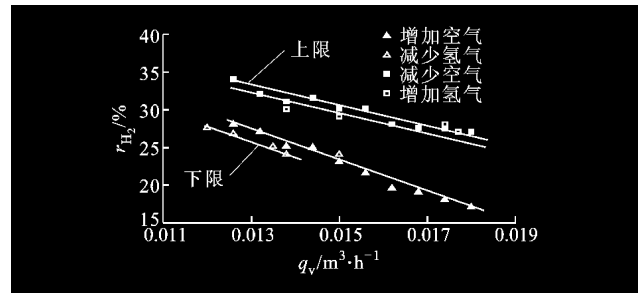


图 3 2 种气体的预混燃烧熄火浓度范围(常压燃烧, $d=6\text{ mm}$)

燃烧室散热的作用,而活化中心数量多、散热量少,有利于气体燃烧.

同时,在实验中发现,若采用有压燃烧,可以增加可燃浓度范围,提高燃烧的稳定性. 对于微细燃烧室(直径 $d \geq 1\text{ mm}$),虽然采用富燃料气氛燃烧火焰不易被吹熄,但选用富燃料气氛燃烧会造成燃烧时间延长,并且在内壁上留有黑色痕迹,说明燃烧效率较低.

3 驻留时间

燃料的充分混合及燃烧都需要一定的时间,其基本的驻留时间可以通过 Damkohler 数(用 D_{ah} 表示)来确定,即 D_{ah} 为气体驻留时间 τ_L 与特征化学反应时间 τ_F 的比率,为了保证完全燃烧, D_{ah} 必须大于 1,而

$$\tau_L \approx \frac{VP}{mRT} \quad (1)$$

$$\tau_F \approx \frac{[H_2]_0}{A[H_2]^a[O_2]^b e^{-E_a/RT_0}} \quad (2)$$

式中: V 表示容积; P 表示压力; m 表示质量流率; R 表示气体常数; T 表示温度; A 为反应速度的前指因子; a 、 b 为常数; E_a 为活化能; $[]$ 代表反应物的浓度.

从式(1)和式(2)中可以看出,当 V 减小时,燃料在微燃烧室内的驻留时间也减少,为保证 $D_{ah} >$

1, 惟一的方法就是减少化学反应时间. 具体做法为: ①采用预混方式, 即燃料与空气在燃烧室上游混合, 使停留期缩短; ②为了增加预混时间并且更好地利用燃烧发出的热量, 可以增加微燃烧室的结构和尺寸; ③催化燃烧以减少化学反应时间; ④增加预混气体的压力使生成热增加, 因为反应速率会随着压力的增加而增加.

4 微尺寸效应下的散热和燃烧效率

对于传统的气体涡轮发动机, 由燃烧室壁传热所引起的能量损失(3%左右)通常会被忽略. 根据文献[2], 管壁表面散热速率与管内火焰燃烧放热速率之比为

$$i \propto \frac{1}{d^{1.2}}; q_1 = \frac{hS}{V}(T - T_0) \quad (3)$$

式中: h 是对流换热系数; S 为容积表面积; T_0 为外界环境温度. 在微细通道中, $S/V \propto 1/d$, 容器尺寸的减小对应于 S/V 和散热程度的增加, 氢气的着火浓度界限随着散热程度的增大而减小, 点火是否发生取决于生成热与散失热的相对值, 因此 S/V 或者 h 的增加均可导致熄火. 对于给定的 T_0 和反应物浓度, 燃烧室越小, 反应物中的活化中心与燃烧室壁面碰撞的机会以及被销毁的数量越多, 越不利于气体维护燃烧, 若微燃烧室的容积尺寸(如 d) 小于燃料的最小淬熄距离, 点火就不会发生.

5 点火元件的制备

目前, 微内燃机尚处于实验研究阶段, 点火方法主要有电容放电点火和电阻丝加热点火. 点火元件的设计需满足以下要求: ①只需要很小的功率, 就能够使微燃烧室内的环境温度快速升至并超过燃料的燃点; ②点火器应内置于微燃烧室内; ③点火元件材料的熔点高(大于等于 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$); ④点火元件的导电性好且适宜采用 MEMS 工艺. 本文设计制作的电火花点火电极(见图 4)为悬臂梁结构, 就是在硅基上采用蒸发工艺制备的, 其中梁的宽度不大于 $30\ \mu\text{m}$, 厚度不大于 $0.2\ \mu\text{m}$.

采用 MEMS 工艺无论是制备电阻丝还是平板电容, 由于内置的要求, 因此其线宽和厚度都比较小. 对于电阻式点火器, 这样的薄膜结构有两大优点: 一是便于加工; 二是大大提高了薄膜的电阻率, 如蒸发沉积的 $77\ \text{nm}$ 厚的金薄膜, 在 $300\ \text{K}$ 时的电阻率为 $3.99 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$, 大于金块体状态下的电阻率($2.77 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$)^[11]. 对于平板电容器, 由于

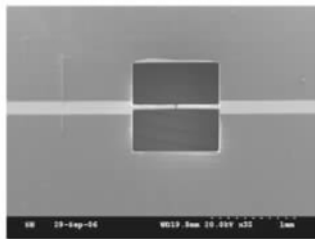


图4 电火花点火电极的电镜照片

所做的电火花电极截面积很小, 因此电容只有 $10^{-4} \sim 10^{-2}\ \text{pf}$, 瞬间释放的能量很小, 尽管氢气的最小点火能很小(只有 $0.019\ \text{mJ}$), 但点火仍不容易发生. 若要增大电容, 只有设法增大电极的厚度, 为此增加了电镀工艺, 使电极厚度达到了 $4\ \mu\text{m}$, 因此明显增大了电容单次放电的能量. 图 5 为电极间击穿电压 v_b 的实验结果, 击穿过程遵守汤逊定律.

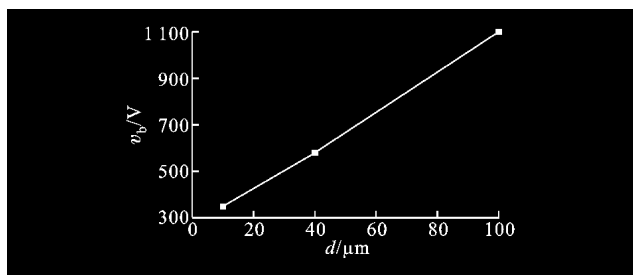


图5 击穿电压的实验结果

6 结论

本文讨论了微燃烧室的微尺寸对于点火、燃烧及点火元件制备带来的诸多不利影响, 为促进微燃烧室内点火及燃烧的顺利实现, 需要采取以下措施:

- (1) 选用淬熄距离小、反应速度快、最小点火能小的气体作燃料, 比如将氢气作为微燃烧室的燃料;
- (2) 采用催化和增压, 有利于可燃气体在微小空间的稳定燃烧;
- (3) 为减少散热损失, 需在微燃烧室内壁上制备绝热材料, 如氮化硅、二氧化硅等;
- (4) 尽可能地增大电极的宽度和厚度, 这样不仅增大了电极的面导电率, 而且还增大了电容.

参考文献:

- [1] 李德桃, 邓军, 潘剑锋, 等. 微动力机电系统和微发动机的研究进展 [J]. 世界科技研究与发展, 2002(1): 24-27.

Li Detao, Deng Jun, Pan Jianfeng, et al. Development

- of research on power MEMS and micro-engine [J]. World Science-Technology Research and Development, 2002(1):24-27.
- [2] Jin Yufeng, Shan Xuechuan, Wang Zhenfeng, et al. Research on a seven-wafer Si-based combustor for micro power generation[C]//Proceedings of the IEEE Solid-State and Integrated Circuits Technology (ICSICT). Piscataway, USA: IEEE, 2004:1863-1867.
- [3] Li Detao, Pan Jianfeng, Deng Jun, et al. Combustion model and numerical simulation of micro-engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(2):183-185.
- [4] 薛宏, 杨文明, 潘剑锋, 等. 微型发动机燃烧室的模拟研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10):59-61.
Xue Hong, Yang Wenming, Pan Jianfeng, et al. Simulating research on combustion chamber of micro engines[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10):59-61.
- [5] Park D E, Lee D H. Design and fabrication of micromachined internal combustion engine as a power source for microsystems[C]//Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Piscataway, USA: IEEE, 2002: 272-275.
- [6] Spadaccini C M, Zhang Xin, Cadou C P, et al. Development of a catalytic silicon micro-combustor for hydrocarbon-fueled power MEMS[C]// Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Piscataway, USA: IEEE, 2002:228-231.
- [7] Mehra A, Zhang Xin, Ayón A, et al. A six-wafer combustion system for a silicon micro gas turbine engine [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2000, 9(4):517-527.
- [8] Zhang Xin, Mehra A, Ayón A, et al. Development of polysilicon igniters and temperature sensors for a micro gas turbine engine[C]//Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Piscataway, USA: IEEE, 2002:280-283.
- [9] Bechtold T, Rudnyi E B, Korvink J G, et al. Automatic order reduction of thermo-electric model for micro-ignition unit[C]//Proceedings of the IEEE Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Piscataway, USA: IEEE, 2002:131-134.
- [10] Suzuki Y, Horii Y, Kasagi N, et al. Micro catalytic combustor with tailored porous alumina[C]//Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Piscataway, USA: IEEE, 2004:312-315.
- [11] Zhang Kaili, Chou S K, Ang S S, et al. A MEMS-based solid propellant microthruster with Au/Ti igniter [J]. Sensors and Actuators: A, 2005 (122):113-123.

(编辑 管咏梅)