

文章编号 1004-924X(2008)11-2214-08

# 氢气/空气当量比对微燃烧器燃烧特性的影响

朱 林<sup>1,2</sup>,徐进良<sup>3</sup>,孔凡让<sup>2</sup>,刘明侯<sup>4</sup>,姜 海<sup>4</sup>

(1. 安徽农业大学工学院,安徽合肥 230036;2. 中国科学技术大学精密机械及仪器系,安徽合肥 230026;  
3. 中国科学院广州能源研究所,广东广州 510640;4. 中国科学技术大学热科学与能源系,安徽合肥 230026)

**摘要:**以美国麻省理工学院(MIT)研制的硅基六晶片微燃烧器为研究对象,采用考虑了基元反应动力学机理燃烧程序的二维计算流体动力学(CFD)数值分析方法,研究了在微尺度燃烧器入口处混合气体流量不变的情况下,改变氢气/空气当量比对微尺度燃烧器燃烧特性的影响。整个模拟计算主要包括混合气体的流动路径、微燃烧器的内部区域以及整个燃烧器的墙壁面;计算过程中考虑了氢气/空气的流体动力学特性、传热学特性和详细的基元反应机理。计算结果显示,当氢气/空气当量比为0.4时,燃烧器发生熄火;当量比为0.5、0.6时,燃烧器内部能维持稳定燃烧;当量比为0.7时,燃烧器的微细通道内出现回燃现象。结果表明,利用二维CFD数值模拟的方法研究微尺度燃烧器燃烧特性是可行的。

**关键词:**当量比;微燃烧器;燃烧特性;计算流体动力学(CFD)

**中图分类号:**TK223.2 **文献标识码:**A

## Effect of hydrogen/air ratio on combustion performance of micro combustor

ZHU Lin<sup>1,2</sup>, XU Jin-liang<sup>3</sup>, KONG Fan-rang<sup>2</sup>, LIU Ming-hou<sup>4</sup>, JIANG Hai<sup>4</sup>

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Department of Precision Machinery & Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** On the basis of the six-wafer combustor used in a micro-gas turbine engine developed by Massachusetts Institute of Technology (MIT), a two-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation was employed in studying the effect of hydrogen/air ratio on the combustion performance in a micro combustor when the mixture mass flow rate was fixed. The CFD modeling includes the hydrogen/air flow path, combustion chamber as well as the solid walls of the micro-combustor, and the simulation analysis involves in the flow mechanics, heat transfer and the numerous chemical reactions occurring in the micro-combustor. The results show that the flame will be quenched finally in the chamber when the equivalence ratio of fuel/air mixture is 0.4 and the combustion is more stable when the equivalence ratio of fuel/air mixture is 0.5 or 0.6; the flame front will propagate to the upstream of the fuel/air mixture flow, burning in the recirculation jacket when the equivalence ra-

**收稿日期:**2007-12-14; **修订日期:**2008-04-27.

**基金项目:**国家自然科学基金国际合作与交流项目(No. 50721140651);广东省自然科学基金重点项目(No. 06104525);安徽农业大学引进与稳定人才资助项目(No. wd2008-6)

tio is increased to 0.7. It comes to a conclusion that the present numerical simulation is helpful for the design and improvement of the micro-combustor.

**Key words:** equivalence ratio; micro combustor; combustion characteristics; Computational Fluid Dynamics(CFD)

### 1 引 言

随着各种微型化机械装置系统的出现,研制作为微系统能量供给的微能源系统(Power MEMS System)一直受到世界各国的普遍重视。1997 年美国麻省理工学院(MIT)首次提出了研制硅基燃烧/透平发动机的设想,希望开发出一种能量密度远高于锂电池数十倍,亚立方厘米体积的微燃烧/透平发动机<sup>[1]</sup>。由于该发动机与其它微能源相比,具有能量密度高、供电时间长、体积小、无污染等优点,有望未来得以广泛的应用,所以其相关技术的研究受到了各国专家的普遍关注。

微尺度燃烧器是微发电系统的核心部件,掌握其间的微尺度燃烧机理是研制高能量密度、基于燃烧的微发电系统的必要环节。当常规尺度的燃烧器缩小为数十立方厘米甚至数立方厘米时,火焰被局限在狭小的空间内,燃烧的完全程度、火焰的稳定性都表现出与常规尺度燃烧不同的特性<sup>[1]</sup>,而这些微燃烧器设计上重要的特性和影响参数目前还未能充分掌握,在开发具有燃烧效率、操作弹性、稳定性等综合良好特性的微小燃烧器方面,还有许多尚未突破的关键问题,加之目前由于微尺度燃烧器尚处于探索阶段,并且具有浓厚的军事背景,相关的数据报道较少<sup>[2]</sup>,因而对其燃烧性能的研究具有非常重要的意义。

由于微燃烧器尺寸过小,再加上相关实验设备功能的限制,所以目前大都采用数值模拟的方法来研究微燃烧器的燃烧特性<sup>[3-4]</sup>。从查阅的相关文献来看<sup>[1,3-6]</sup>,目前以 MIT 研制的硅基六晶片微燃烧器为研究对象,利用实验和数值方法进行其燃烧特性研究的只有美国和新加坡的两所大学,并且只有新加坡一所大学进行了基于三维的微尺度燃烧特性研究。

基于此,本文采用二维 CFD(计算流体动力

学)数值模拟的方法,研究了改变氢气/空气流量当量比对燃烧器燃烧特性的影响程度,并将计算结果与国外相关实验结果进行了比较,结果表明一致性较好。此外,在研究方法上做了一定有意义的探索。

### 2 微燃烧器二维模型的建立

根据相关资料及文献<sup>[3-4]</sup>提供的资料(如图 1,2 所示),采用线框建模的方法,以流体力学仿真软件 FLUENT 的前置模块 Gambit 为平台,构建了微燃烧器的二维模型(由于主要研究燃烧器内部燃烧性能,因而不考虑氢气/空气的预混情况)如图 3 所示。

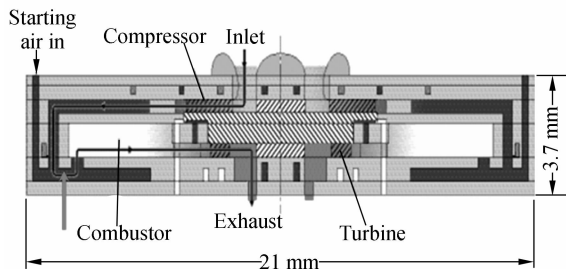


图 1 MIT 研制的硅基六晶片微燃烧室  
Fig. 1 Cross-section of axisymmetric 6-wafer silicon-based micro combustor from MIT

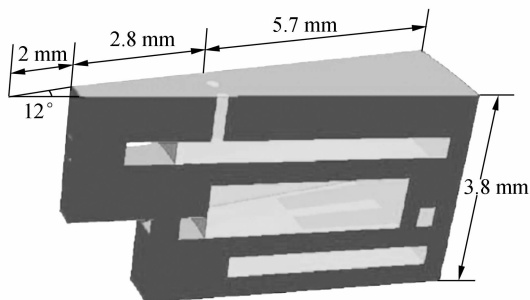


图 2 新加坡高性能计算研究所研制的硅基微燃烧室图  
Fig. 2 Cross-section of axisymmetric 6-wafer silicon-based micro combustor from Singapore

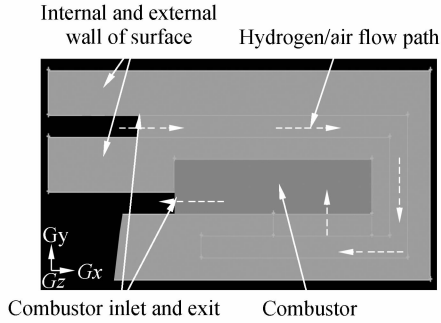


图 3 基于 Gambit 构建的的硅基微燃烧室结构图  
Fig. 3 Structure of silicon-based micro chamber based on Gambit

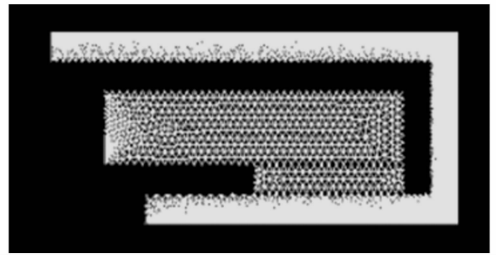
### 3 微燃烧器燃烧计算过程

微尺度燃烧是在微小空间中的燃烧反应,它涉及燃烧热力学、化学动力学、流体力学、传热和传质等多门学科知识<sup>[3]</sup>。经研究<sup>[4]</sup>,随着尺度的减小,混合物流动状况基本上处于层流状态。此时,燃烧在火焰的稳定性、燃烧效率以及燃烧热损失等方面都表现出很多不同于常规尺度燃烧的特殊现象。

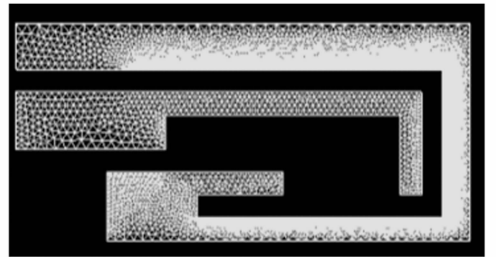
根据微尺度燃烧的特殊性,在利用二维 CFD 方法模拟流动、燃烧计算时,主要考虑了以下主要因素。

#### 3.1 网格划分

在分析微燃烧器燃烧特性之前,首先需要根据氢气/空气的实际流动、燃烧状况,对整个模拟计算区域(如图 4)进行网格划分。经过分析,整个计算由两大区域组成:混合气体流动、燃烧区域;燃烧器和流体的热交换区域(即燃烧器的墙壁面),据此,根据计算区域的结构特点,基于 Gambit 平台,选用较为合适的网格格式完成对整个计算区域的网格划分,共生成单元 76 397 个,如图 4



(b) 微燃烧器流动、燃烧区域 CFD 计算网格图  
(b) CFD mesh for flow and combustion area



(c) 微燃烧器热交换区域 CFD 计算网格图  
(c) CFD mesh for heat exchange area

图 4 整个微燃烧器计算区域网格图

Fig. 4 CFD mesh for micro combustion chamber

所示。同时,所产生的网格被成功地导入到 FLUENT 中,因而可被用来后续的模拟计算。

#### 3.2 计算模型

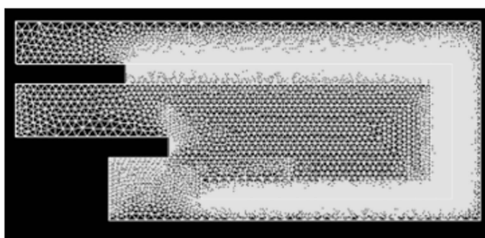
氢气/空气混合物经过流动混合后,在燃烧器内部进行多步基元反应(共 19 步),将化学能转化为热能,它和周围环境及介质有一定的热量交换,这对整个燃烧器的燃烧效率、内部火焰的稳定性以及燃烧器墙壁面的热损失影响较大。所涉及的热交换主要有:燃烧器外墙壁面对周围环境的热传导、对流、辐射;内外燃烧器墙壁面与氢气/空气混合气体之间的热传递等。描述上述物理过程的数学模型主要包括以下控制方程。

##### 3.2.1 质量守恒方程

由于流体分子的不规则运动,在各层流体间交换着质量,整个交换过程必须满足质量守恒定律,质量输送在宏观上表现为扩散现象。该定律可表述为:单位时间内流体微元体中质量的增加等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。其数学表达式为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

式中: $\nabla$ 表示散度,其表达式为:



(a) 整个燃烧器的 CFD 计算网格图  
(a) Total CFD mesh

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \text{div}(\mathbf{u}) = \partial u_x / \partial x + \partial u_y / \partial y + \partial u_z / \partial z$$

其中,  $\rho$  是流体的密度,  $\mathbf{u}$  是流体速度矢量。本文描述的是二维状态, 所以,  $\partial u_z / \partial z = 0$ 。

### 3.2.2 动量守恒方程

任何流动系统必须满足动量守恒定律, 动量输送在宏观上表现为粘性现象, 该定律可表述为: 微元体中流体对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力的和。其数学表达式为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u_i) - \frac{\partial p}{\partial i} + S_i, \quad (2)$$

式中:  $i = x, y, z$ , 本文不考虑  $z$  轴分量;  $\mu$  是动力粘度;  $S_i$  是动量守恒方程的广义源项。

### 3.2.3 能量守恒方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律。能量输运在宏观上表现为热传导现象。该规律可表述为: 微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体力与面力对微元体所作的功。其数学表达式为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T, \quad (3)$$

式中:  $c_p$  是流体的比热容;  $T$  为温度;  $k$  为流体的传热系数;  $S_T$  为粘性耗散项。

### 3.2.4 组分质量守恒方程

在一个特定的或确定的系统中, 可能存在质的交换, 或者存在多种化学组分, 每一种组分都需

要遵守组分质量守恒定律。该定律可表述为: 系统内某种化学组分质量对时间的变化率等于通过系统界面净扩散量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和。其数学表达式为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} c_s) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) + S_s, \quad (4)$$

式中:  $c_s$  为组分的体积浓度;  $\rho c_s$  是组分的质量浓度;  $D_s$  为组分的扩散系数;  $S_s$  为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量。

### 3.3 气相反应机理

当氢气/空气在燃烧器内部混合、流动以及燃烧时, 为了得到较为可信的计算结果, 必须考虑其详细的化学动力学过程, 为此, 本文考虑了氢气/空气详细的气相化学反应机理如表 1 所示<sup>[8]</sup>。该汽相反应机理总共有 19 个可逆反应, 所有反应涉及的组分包括:  $\text{H}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}$ 、 $\text{HO}_2$ 、 $\text{OH}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  和  $\text{M}$ 。与文献[3]不同的是, 考虑氢气/空气化学反应机理时, 没有借助其它额外程序, 而是根据混合物的实际反映情况, 利用流体动力学软件 FLUENT 自带的 CHEMKIN 程序, 自己编写 CHEMKIN Mechanism 文件导入 FLUENT 进行计算的。

表 1 氢气/空气化学反应详细步骤

Tab.1 Reaction steps for combustion of hydrogen and oxygen

反应	B	A	E
(1) $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H} + \text{HO}_2$	1.73E12	0.468	55 050
$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$	2.50E13	0.0	693
(2) $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$	1.86E16	-0.61	16 899
$\text{OH} + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}_2$	4.20E13	-0.189	-409
(3) $\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	5.06E04	2.67	6 290
$\text{OH} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}$	3.87E04	2.604	4 481
(4) $\text{H}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	2.16E08	1.51	3 340
$\text{H}_2\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{OH}$	1.36E10	1.192	19 357
(5) $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$	1.50E09	1.14	0
$\text{H}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$	1.24E11	0.888	17 826
(6) $\text{H} + \text{OH} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$	8.62E21	-2.0	0
$\text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{OH} + \text{M}$	7.91E23	-2.192	120 083
(7) $\text{H} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$	7.30E17	-1.0	0
$\text{H}_2 + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{H} + \text{M}$	1.06E18	-0.874	104 066
(8) $\text{H} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{OH} + \text{M}$	2.60E16	-0.6	0
$\text{OH} + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{O} + \text{M}$	2.89E16	-0.54	102 256
(9) $\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$	1.10E17	-1.0	0

$O_2 + M \rightarrow O + O + M$	5.42E19	-1.361	119 565
(10) $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$	2.23E15	0.0	-500
$HO_2 + M \rightarrow H + O_2 + M$	5.71E16	-0.365	49 282
(11) $H + HO_2 \rightarrow OH + OH$	1.50E14	0.0	1 000
$OH + OH \rightarrow H + HO_2$	1.47E10	0.846	36 164
(12) $O + HO_2 \rightarrow O_2 + OH$	2.00E13	0.0	0
$O_2 + OH \rightarrow O + HO_2$	8.70E11	0.425	
(13) $OH + HO_2 \rightarrow O_2 + H_2O$	2.00E13	0.0	0
$O_2 + H_2O \rightarrow OH + HO_2$	7.16E13	0.173	70 300
(14) $HO_2 + HO_2 \rightarrow O_2 + H_2O_2$	2.00E12	0.0	0
$O_2 + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + HO_2$	5.33E13	-0.173	38 443
(15) $H + H_2O_2 \rightarrow H_2 + HO_2$	1.70E12	0.0	3 780
$H_2 + HO_2 \rightarrow H + H_2O_2$	3.63E09	0.664	19 620
(16) $H + H_2O_2 \rightarrow OH + H_2O$	1.00E13	0.0	3 580
$OH + H_2O \rightarrow H + H_2O_2$	1.32E08	1.192	70 602
(17) $O + H_2O_2 \rightarrow OH + HO_2$	2.80E13	0.0	6 400
$OH + HO_2 \rightarrow O + H_2O_2$	4.57E10	0.598	20 431
(18) $OH + H_2O_2 \rightarrow H_2O + HO_2$	7.00E12	0.0	1 430
$H_2O + HO_2 \rightarrow OH + H_2O_2$	9.41E11	0.346	33 287
(19) $OH + OH + M \rightarrow H_2O_2 + M$	4.73E11	1.0	-6 370
$H_2O_2 + M \rightarrow OH + OH + M$	3.29E18	-0.384	46 691

表 1 中:  $A$  是化学反应的温度指数;  $B$  是反应的频率;  $E$  是反应的活化能。

## 4 计算结果与讨论

### 4.1 初始条件的设置

按照文献[3-4], 本文设置模拟计算的初始条件为:

(1) 选取氢气/空气混合气体的流量为 0.1 g/s;

(2) 选取氢气/空气混合气体的当量比分别为: 0.4、0.5、0.6、0.7;

(3) 选取整个燃烧器墙壁面材料为硅材料, 并设置外墙壁面的热传递系数为: 200 W/(m<sup>2</sup>·K), 热辐射系数为 0.85, 整个墙壁面的导热系数为 149 W/(m·K);

(4) 假设整个燃烧器外围空间的温度为 300 K, 混合气体进入燃烧器入口温度也为 300 K。

### 4.2 结果分析

分析上述计算结果, 可以看出:

(1) 从图 5 可以清楚地看出: 混合气体刚进入燃烧器微细通道时流动速度较快, 但进入燃烧器

内部后, 其流动速度相对减慢。这主要是因为混合气体邻近燃烧室时, 燃烧室入口处的火焰稳定器开始对其进行点火燃烧, 由于燃烧反应是多步骤的基元反应, 在反应过程中会产生许多中间产物, 同时在微小尺度的燃烧区域中, 分子扩散到壁面的距离被缩短, 这样单位时间内分子与壁面的碰撞频率将增加, 因而延缓了混合气体的流动速度。当量比为 0.4、0.6、0.7 时也出现了上述类似的流动情形。

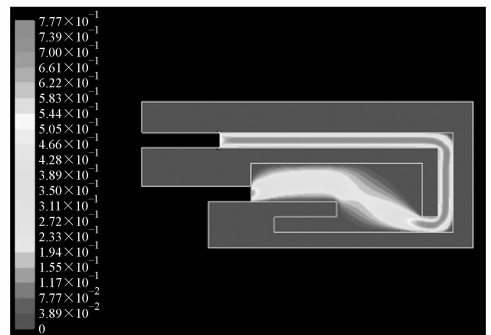


图 5 当量比为 0.5 时氢气/空气速度(m/s)分布图  
Fig. 5 Velocity distribution of fuel/air with equivalence ratio of 0.5

(2) 分析图 7~9 可以看出, 计算结果与文献[3]利用三维模拟计算的结果(如图 10 所示)较为

一致。其中图 8 非常类同;图 7、9 有些差别,但温度场整体分布状况较为相似;图 6 计算情形文献 [3]没有给出相应的温度分布图。

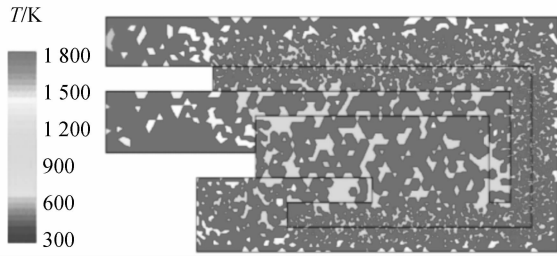


图 6 当量比为 0.4 时微燃烧器温度分布图

Fig.6 Temperature distribution of micro combustor with equivalence ratio of 0.4

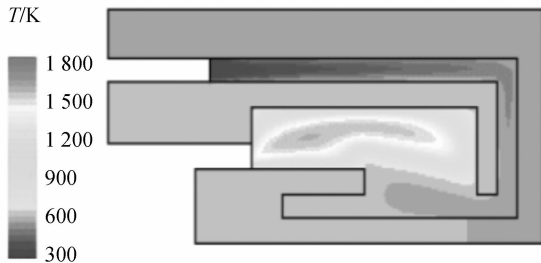


图 7 当量比为 0.5 时微燃烧器温度分布图

Fig.7 Temperature distribution of micro combustor with equivalence ratio of 0.5

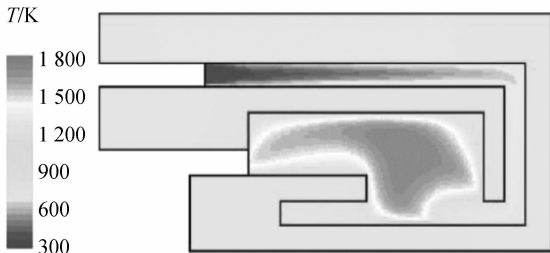


图 8 当量比为 0.6 时微燃烧器温度分布图

Fig.8 Temperature distribution of micro combustor with equivalence ratio of 0.6

分析上述计算结果,可以看出选择不同的初始条件是造成差异的最主要原因。图 6~9 与图 10 不同的初始条件集中在混合气体的流量上,即,新加坡高性能研究所设置混合气体的初始流量为 0.2 g/s,本文设置的混合气体的初始流量为 0.1 g/s。

将上述计算结果与美国麻省理工学院的相关实验结果对比,计算结果与文献[4]给出的实验结

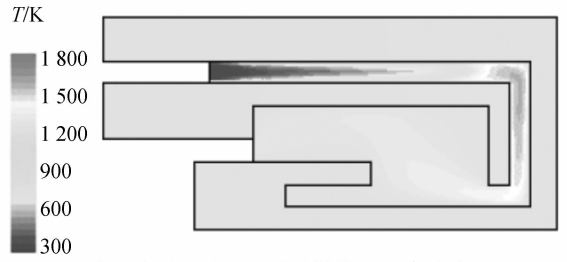
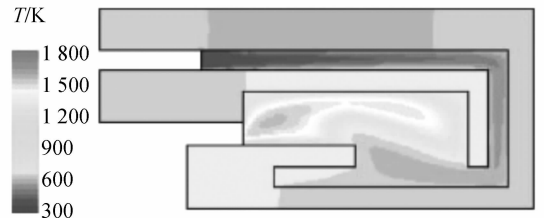
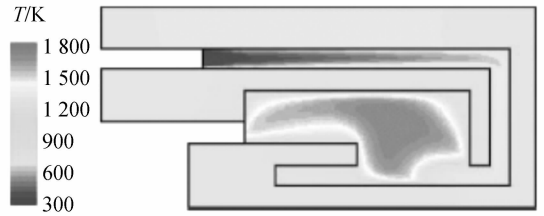


图 9 当量比为 0.7 时微燃烧器温度分布图

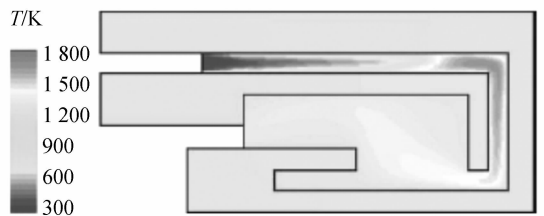
Fig.9 Temperature distribution of micro combustor with equivalence ratio of 0.7



(a)0.5



(b)0.6



(c)0.7

图 10 新加坡计算的微燃烧器温度分布图

Fig.10 Temperature distribution of micro combustor with different equivalence ratios from Singapore

果较为吻合,即,微燃烧器出口温度和外墙壁面的温度分布状况与 MIT 实验结果接近,如图 11、12 所示。经过分析,相关数据缺乏导致的计算误差是实验与数值分析差异的主要原因:

① 数值计算前,对微燃烧器的结构进行了一定的简化处理;

② 进行数值计算时,设置的边界条件与实际实验条件可能存在不同。

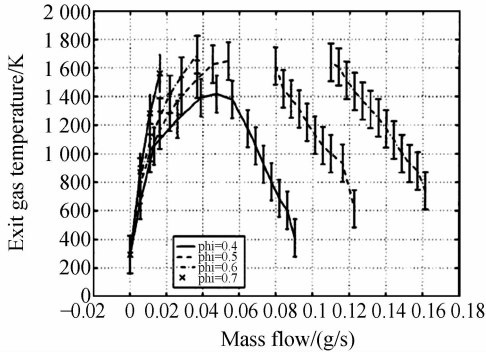


图 11 MIT 微燃烧器出口温度与混合气体流量的关系  
Fig. 11 Exit temperature measurements vs mass flow rates for different fuel-air equivalence ratios

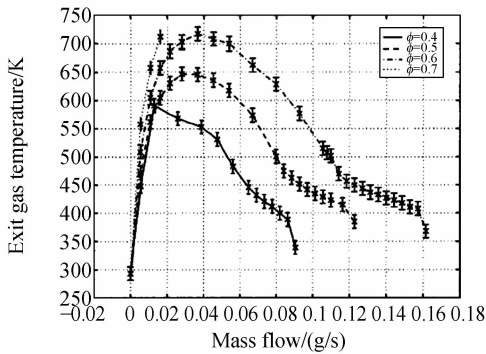


图 12 MIT 微燃烧器外墙壁面温度与混合气体流量的关系  
Fig. 12 Outer wall temperature measurements vs mass flow rates for different fuel-air equivalence ratios

(3)图 6 中出现的燃烧器熄火现象是由于在微小尺度的燃烧区域中,面积体积比的增大加剧了微尺度燃烧器的热量损失,从而降低了反应区的温度。根据阿累尼乌兹公式<sup>[1]</sup>,温度的指数效应对反应速率影响很大,因此,温度降低,延缓了燃烧反应速率,使燃烧反应的运行界限减小,混合气体的可燃性急剧降低,迫使整体反应趋缓甚至停止,导致熄火现象的出现。

(4)在图 9 中出现了混合物在微细通道中发生燃烧的现象,按照燃烧学理论<sup>[9]</sup>,混合物燃烧的

速度是随着其当量比的增加而变大的。当混合物流量不变,而当量比增加时,燃烧器内部的燃烧火焰会在微细通道中发生回燃。这样,来流的氢气/空气混合物就可能被急剧加热,使其温度迅速升高,并超过其着火点温度(858 K<sup>[3]</sup>),进而在微细通道中发生燃烧;另外,从图 9 中还可以看到,混合气体发生回燃时,微细通道墙壁面的温度达到甚至超过了 1 200 K,这对整个燃烧器的结构危害极大,因为当硅材料受到的温度超过 900 K 时,其屈服强度将急剧降低,发生软化,进而出现蠕变失效现象<sup>[10]</sup>,致使整个微发动机无法继续工作,因此,这种现象应避免发生。

## 5 结 论

以美国麻省理工学院研制的硅基六晶片微燃烧器为研究对象,在考虑氢气/空气的流体动力学特性、传热学特性及其详细化学反应机理的基础上,采用二维 CFD 数值模拟的方法,研究氢气/空气当量比对微尺度燃烧器燃烧特性的影响程度,结果表明:

(1)利用二维 CFD 数值模拟的方法研究微尺度燃烧器燃烧特性是可行的,虽然所得到的计算结果与相关文献有些差别,但差别不大,得到的温度场分布状况与国外相关实验结果较为吻合。

(2)在固定混合气体流量,改变其当量比的情况下,较低的当量比容易使燃烧器内部发生熄火现象,但当量比过高则容易使混合气体在微细通道中发生回燃,导致燃烧器墙壁面温度过高,燃烧室材料软化,整个结构发生蠕变失效,因而选择合理的运行参数对实现燃烧器内部的稳定燃烧至关重要。

(3)采用 CFD 数值模拟的方法研究微尺度燃烧器的燃烧特性,可以获得目前实验设备无法得到的数据资料(如图 11、12 中出现的由于测量设备、手段限制,造成测量数据不完整),从而可以交互地对整个燃烧器的运行参数进行调整和改进,这一方面对了解微尺度燃烧器的燃烧特性、稳燃机理、燃烧效率提供帮助,另一方面也大大提高了工作效率,降低了开发成本。

## 参考文献:

- [1] SPADACCINI C M, MEHRA A, LEE J. High power density silicon combustion systems for micro gas turbine engines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003(7):709-719.
- [2] JIN S H, MENG W, KURICHI 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):3507-3515.
- [3] MEHRA A, ZHANG X, AYÓN A A. A six-wafer combustion system for a silicon micro gas turbine engine[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000(4):517-527.
- [4] EPSTEIN A H. Millimeter-scale, MEMS gas turbine engines[J]. *Proceedings of ASME Turbo. Expo. 2003 Power for Land, Sea, and Air, Atlanta, Georgia, USA*, 2003(6):16-19.
- [5] NORTON D G, VLACHOS D G. A CFD study of propane air microflame stability [J]. *Combustion and Flame*, 2004,138:97-107.
- [6] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.  
WANG F J. *Computational Fluid Dynamics: The Basic Theory and Application with CFD Softwares*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [7] TIEN J H, STALKER R J. Release of chemical energy by combustion in a supersonic mixing layer of hydrogen and air[J]. *Combustion and Flame*, 2002,130:329-348.
- [8] 俞佐平. 传热学[M]. 北京:人民教育出版社,1982.  
YU Z P. *Heat Transfer*[M]. Beijing: The People's Education Press, 1982. (in Chinese)
- [9] 徐泰然. MEMS 和微系统—设计与制造[M]. 北京:机械工业出版社,2005.  
XU T R. *MEMS & Microsystems—Design and Manufacture*[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)

作者简介:朱 林(1971—),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为微尺度燃烧器燃烧特性及其结构优化、Microturbine 和虚拟设计。E-mail:zl009@mail.ustc.edu.cn

徐进良(1966—),男,教授,研究员,主要从事微纳流动与传热方面的研究。

孔凡让(1951—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为机械故障诊断技术、先进设计方法、光机电一体化技术。