

空气槽对微型双通道螺旋型过量焓燃烧器工作特性的影响

李军伟¹, 钟北京², 王宁飞¹, 魏志军¹

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京市海淀区 100081; 2. 清华大学航天航空学院, 北京市海淀区 100084)

Effects of Air Groove on Combustion Characteristics of a Micro Swiss-roll Combustor

LI Jun-wei¹, ZHONG Bei-jing², WANG Ning-fei¹, WEI Zhi-jun¹

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Haidian District, Beijing 100081, China;
2. School of Aerospace, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: To understand effects of air groove on working characteristics of a micro Swiss-roll combustor, combustion of premixed CH₄/air was conducted in two micro Swiss-roll combustors, one with an air groove and the other without an air groove. The results showed that the air groove can enlarge the flammable limits of the combustors, and make the combustor stably work at a larger excess air coefficient and a smaller methane flow rate. Meanwhile, it increases radial surface temperature gradient on outer wall of the combustor. Additionally, the combustor with an air groove was numerically simulated. The numerical results indicated that high-temperature combustion products has a strong role in heating incoming premixed mixtures. On one hand, it makes premixed flame surface tilt across inlet channel; on the other hand, it changes flame position in a micro-combustor with velocity, excess air coefficient and heat loss to the surroundings.

KEY WORDS: micro combustor; excess-enthalpy combustion; premixed combustion; combustion characteristics

摘要: 为了解空气槽对平板微型双通道螺旋型过量焓燃烧器(Swiss-roll 燃烧器)工作特性的影响,采用甲烷/空气预混气,在带有空气槽和没有空气槽的平板 Swiss-roll 燃烧器中进行燃烧实验。实验结果表明:空气槽有助于扩展微燃烧器的可燃极限,使燃烧器在更大的空气过量系数和更小的甲烷流量下工作,同时增加了燃烧器外壁的温度梯度。另外,对带有空气槽的微燃烧器进行了数值模拟。数值结果表明,高温燃气对未燃混合物有很强的加热作用,一方面使预混火焰面发生倾斜,另一方面使预混火焰在微燃烧器内部的位置随着流

速、空气过量系数、外界散热的变化而变化。

关键词: 微小燃烧室; 过量焓燃烧; 预混燃烧; 燃烧特性

0 引言

随着微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)的迅速发展,基于MEMS技术的微型动力系统也受到了人们的关注。微型动力系统将燃料或者推进剂的化学能直接或间接转化为其他形式的能量。能量密度高是其最大优点,因而微动力系统有着非常好的应用前景^[1-3]。基于燃烧的动力 MEMS 中,随着燃烧器尺度的减小,导致火焰向燃烧室壁面的热损失增加,最终导致熄火、燃烧不稳定以及热效率的降低,因此,利用尾气预热未燃气体的过量焓火焰技术受到了广泛关注^[4](由 Weinberg和Lloyd提出^[5-7])。在过量焓燃烧室中,燃烧产物通过通道壁面预热反应物,提高反应物的焓值,扩展燃烧器的可燃极限。双通道螺旋型过量焓燃烧器(Swiss-roll燃烧器)是过量焓燃烧器的一种,具有更大的换热面积。

Jones等^[8]对Swiss-roll结构的换热燃烧器的定量熄火极限进行了模型研究。Ronney^[9]提出了改进的U型逆向流动热循环燃烧模型, Kuo等^[10]对丙烷/空气螺旋型逆流Swiss-roll燃烧器建立了二维数值计算模型,研究了辐射换热、湍流流动和壁面导热对回热式燃烧器性能的影响, Ahn等^[11]在螺旋型逆向流动Swiss-roll燃烧器中进行了丙烷和空气混合物的燃烧实验,主要研究了雷诺数对有催化剂和没有催化剂时熄火极限的影响;但是,他们研究的

Swiss-roll燃烧器通道的尺寸比较大, 大于标准状态下丙烷/空气的熄火距离。Kim等^[12-14]对 3 种不同几何形状的小型Swiss-roll燃烧室的燃烧特性进行了实验, 研究了不同的保温措施对火焰稳定, 温度分布的影响, 并估算了这种燃烧加热器的热效率。Federici等^[15]研究了单通道过量焓微型燃烧器的稳定性, 而且针对特征热损失系数、功率损失和特征入口速度等参数, 与没有回热的单通道燃烧器进行了比较。Scarpa等^[16]研究了回热对丙烷/空气自发维持反应的影响。在国内, 张永生等^[17]研究了微细石英管中火焰温度、流量和燃烧效率的关系, 计算了管壁的散热损失。胡国新等^[18]开展了微细通道内氢气/空气预混燃烧的实验, 研究了火焰稳定的条件, 但没有对壁面散热进行研究。林博颖等^[19]研究不同预混气成分、不同当量比和不同环境对流换热系数等外部条件对微尺度燃烧点火与熄火特性的影响。蒋利桥等^[20]进行了不同直径微小圆管对甲烷在空气中的扩散燃烧实验, 研究了火焰的熄灭极限特点。

为了解空气槽对微型Swiss-roll燃烧器工作特性的影响, 本文加工了 2 种通道宽度为 0.6 mm 的平板型Swiss-roll燃烧器, 采用甲烷/空气预混气体进行了燃烧实验, 研究燃烧器在不同甲烷流量下的可燃极限以及空气过量系数对微型燃烧器壁面温度的影响。另外, 本文还对第 1 种微型Swiss-roll燃烧器进行了数值模拟, 得到了空气槽对其燃烧特性的影响。本文, 空气过量系数定义为实际的空气与甲烷的质量流量比与理论空气与甲烷的质量流量比的比值, 用 α 表示。

1 实验装置的实验模型

本文的实验在微小燃烧器实验台上进行, 实验系统组成及原理图见文献[21]。氧气和甲烷的流量采用D07-7A/ZM质量流量控制器来调节, 测量误差小于满量程的 2%。燃烧室外壁的不同位置焊接了 0.2 mm 直径的镍铬-镍铝热电偶丝, 用来测量外壁温度。为了减小实际使用中存在热电偶自身产生的误差, 如热电偶位置不准确、由于辐射及导热在金属球和导线中传热损失等, 本文在测量壁面温度时, 热电偶测点与燃烧室外壁紧密接触, 使得传热误差很小, 总误差估计在 ± 15 K内。

为了研究空气槽对微型燃烧器可燃极限和壁面温度的影响, 本文加工了 2 个微型Swiss-roll燃烧器, 均为螺旋形状气体通道, 进气通道间隙宽度为

0.6 mm, 小于甲烷和空气在常温常压下的最小熄火距离, 排气通道间隙宽度为 1 mm, 通道之间的室壁厚度为 1.0 mm。在燃烧器的中心, 为了保证甲烷/空气能够在无催化剂的情况下稳定燃烧, 采用较大的空间, 大于甲烷/空气的最小熄火直径。中心的形状近似于椭圆形, 长轴为 6 mm, 短轴为 4 mm。

带有空气槽的燃烧器命名为Model1, 如图 1 所示。在 2 圈通道之间增加一个空气间隙, 用来减少 2 圈之间的散热以及燃烧器机体的热容, 空气槽的径向间隙宽度为 2.0 mm。本实验中, 空气槽内添加了耐热高温胶, 对燃烧器起到的保温作用。没有空气槽的燃烧器命名为Model2, 如图 2 所示。燃烧器的 2 个端面进行密封, 防止气流越过中间壁面流动。

在 2 种燃烧器的中心, 都有氧气管路与燃烧器相连接。实验时, 先采用氧气和甲烷进行点火, 甲烷和氧气在燃烧器中心稳定燃烧, 将燃烧器进行预热, 然后关闭氧气, 打开空气, 最后甲烷和空气预混气体在燃烧器中心稳定燃烧。在实验过程中, 实时采集燃烧器不同位置的壁面温度, 热电偶的布置位置见图 1、2。

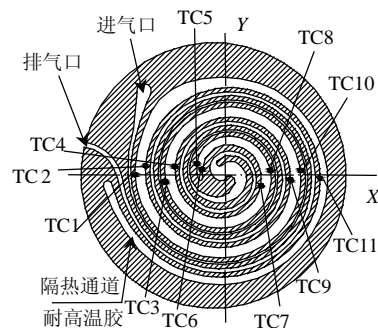


图 1 微小燃烧器 Model1

Fig. 1 Micro combustor Model1

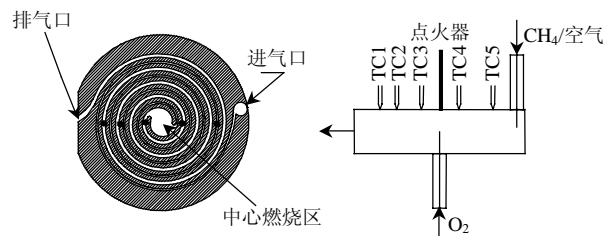


图 2 微小燃烧器 Model2

Fig. 2 Micro combustor Model2

2 结果分析

2.1 实验结果分析

采用甲烷和空气分别对 2 种燃烧器进行多种流量下的燃烧实验, 燃烧器中心能够得到稳定的甲烷/

空气火焰,实现了甲烷-空气混合物的稳定燃烧。图3为2种燃烧器可燃极限的比较,(横坐标 m_{CH_4} 为甲烷流量)。从图中可以看出,燃烧器Model1的可燃极限范围较宽,能够在更大范围的甲烷流量和空气过量系数下工作,富燃极限在0.7左右,富氧极限最大到2.2;而Model2的富氧极限为1.8左右,富燃极限在0.8附近。另外,燃烧器Model1的富燃极限变化较为缓慢,在很大甲烷流量范围内都处于较低的水平;而富氧极限变化是比较显著的,范围扩展的比较迅速。其原因微型燃烧室中心的回流区稳定了甲烷和空气火焰,使之不容易被吹熄。Model1带有空气槽,其可以稳定工作的最小甲烷流量可以到0.5 mg/s,空气过量系数等于1时燃烧器功率为3.7 W;而燃烧器Model2没有空气槽,能稳定工作的最小甲烷流量为1.3 mg/s,空气过量系数为1时的燃烧器功率为9.6 W。这是由于Model2自身热容较大,需要在较大的放热功率,即较高的甲烷流量下才能稳定工作。

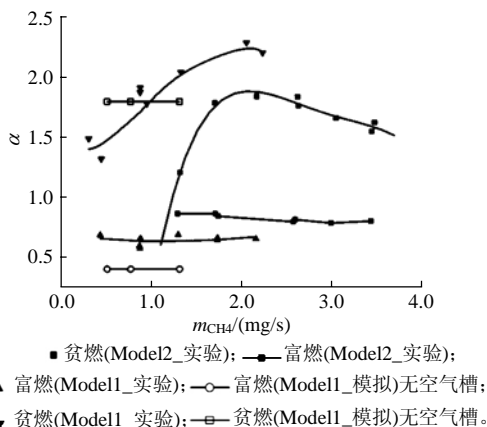


图3 2种燃烧器可燃极限的比较

Fig. 3 Flammable limits of two combustors

图4给出了2个燃烧器在不同空气过量系数时测量得到的壁面温度分布。由图中可以看出,不同 α 下,燃烧器的温度分布规律类似,即燃烧器中心(TC6)温度最高,并沿径向逐渐降低,表明甲烷-空气混合物可以在燃烧器中心稳定燃烧。 $\alpha=1.48$ 时, $T_{\text{TC6}}=1283\text{ K}$, $T_{\text{TC1}}=705\text{ K}$, TC1和TC6的距离为14 mm, 2者之间的壁面温度梯度达到了41.3 K/mm。

对于燃烧器Model2,在甲烷流量等于3.0 mg/s时, α 变化对温度分布的影响如图4(b)所示。可以看出,燃烧器径向温度梯度比较小,距离燃烧室中心3.5 mm的位置上与距中心14 mm位置上的温差只有80 K,温度梯度为7.6 K/mm,因此,微型燃烧器Model2适合作为温度分布均匀的低温热源。

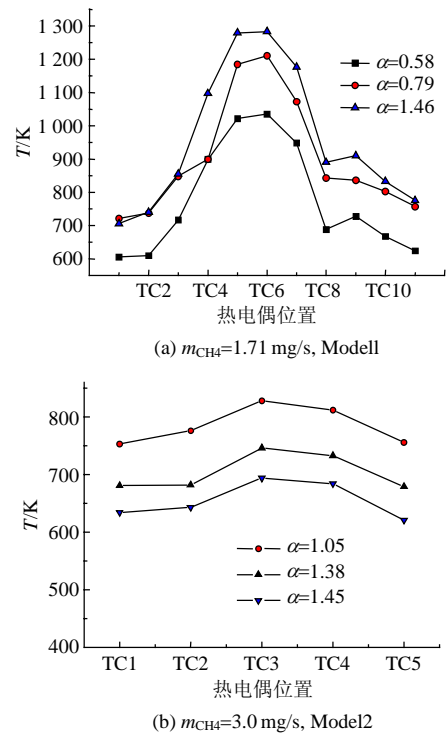


图4 燃烧器的壁面温度分布

Fig. 4 Surface temperature distributions

2.2 数值模拟结果分析

为进一步了解空气槽对微型 Swiss-roll 燃烧器燃烧特性的影响,本文还对实验燃烧器 Model1进行了二维数值模拟研究。在燃烧器的计算模型中,采用了层流多组分输运方程组,甲烷/空气的35个可逆基元反应和17种组分的反应机制,考虑了燃气对固体壁面的辐射换热以及气体与固体壁面的换热。为了使数值计算模型与实验模型具有可比性,保证数值计算模型入口的预混气体质量通量和实验燃烧器的相等。具体的数值模拟方法见文献[22]。

首先,对没有空气槽时的Model1进行研究,得到了甲烷流量为0.5、0.76和1.3 mg/s时的可燃极限,见图3。从图中可以看出,没有空气槽时,数值模拟得到的可燃极限随甲烷流量变化不大。这是由于数值模拟没有考虑燃烧器两个端面的热损失,可燃极限的变化仅随气体流速改变;而实验时燃烧器两端和空气槽有热损失,可燃极限受气体流速和热损失的双重影响。本文分析甲烷流量等于0.76 mg/s时,空气过量系数对微型燃烧器工作状态的影响。

图5是不同空气过量系数时燃烧器内的温度场云图,可以很明显地看出燃烧产物对未燃气体的加热作用。在所有的 α 下,火焰面是一个倾斜的曲面,向着燃烧产物和未燃气体的换热墙壁倾斜,这是由于燃烧产物通过换热墙壁加热了墙壁附近没有燃

烧的预混气体，使这部分气体的焓值要比远离墙壁的未燃烧气体的焓值高，因此这部分气体就更容易被点燃，也就导致了火焰面的倾斜。

从图 5 中还可以看出，当 $\alpha > 1$ 时，随着 α 的增加，最高燃烧温度逐渐下降，在上极限($\alpha=1.8$)时，最高燃烧温度只有 1 647 K。如果继续增加空气流量，燃烧温度还要下降，最终散热量大于燃烧的放热量，火焰熄灭。从图 5 中还可以看出火焰位置在燃烧器中的变化，火焰主要稳定在燃气的温度梯度和组分梯度最大的地方。 $\alpha=1$ 时，火焰面是一条倾斜的直线，将气体通道完全封闭，甲烷和空气完全燃烧，燃烧温度最高，如图 5(c)所示。 $\alpha=0.4$ 时，甲烷过量，空气量不足，火焰面向中心燃烧室内移动，而且火焰面也是一条直线，如图 5(a)所示。由于甲烷流量不变，随着空气流量的增加，燃烧放热量增加，而且入口通道较宽，火焰逐渐向上游移动， $\alpha=0.6$ 时，火焰面移动到距离燃烧器中心很远的地方，见图 5(b)。

随着空气流量增加，火焰面被吹向燃烧器中心，而且变成了一个曲面， $\alpha=1.4$ 时，见图 5(d)。随着空气流量的增加，部分空气参与燃烧，没有参加反应的空气从燃烧区外侧流走， $\alpha=1.6$ 时的情况见图 5(e)。 $\alpha=1.8$ 时，没有燃烧的空气带走了较多热量，能够维持燃烧的区域变得很小，燃烧温度降低。随着空气流量的再增加，空气带走的热量增

大，最终当损失掉的热量大于燃烧放热量时，火焰不能维持，最终熄灭。

从本文分析可以发现：微型 Swiss-roll 燃烧器能够在大的空气过量系数范围内稳定工作，这是因为高温的燃烧产物通过燃烧器壁对未反应的气体加热，提高了未反应气体的焓值，使之能在更广的空气流量下稳定燃烧；另外，中心燃烧室的凹形流动区稳定了偏离正常燃烧极限的火焰，使之不易被吹熄。

甲烷流量为 0.76 mg/s 时，对带有空气槽的 Model1 进行数值模拟，不考虑空气槽的散热。数值模拟得到的燃烧器可燃极限为 0.4~2.8。有空气槽的二维 Model1 燃烧器的可燃极限比没有空气槽的要宽很多，这是由于空气槽减小了燃烧器高温部分向周围室壁的散热，从而扩大了火焰在微燃烧室内的可燃极限。

从图 6 可以发现不同空气过量系数下的温度分布与图 5 相似，不同点在于没有空气槽时，火焰的位置发生了变化。 $\alpha=0.6$ 时，由于减小了壁面的散热，图 6(b)中火焰的位置比图 5(b)中火焰的位置更靠近上游，这是由于中心燃烧区的入口是一个 V 型开口，越向上游，通道开口越小。当热损失很小时，未燃混合物被加热到更高的温度，火焰的传播速度加快，可以在更高的流速下稳定，因此火焰向上游传播的距离就更远。 $\alpha=1.4$ 时，图 6(d)中的火焰仍

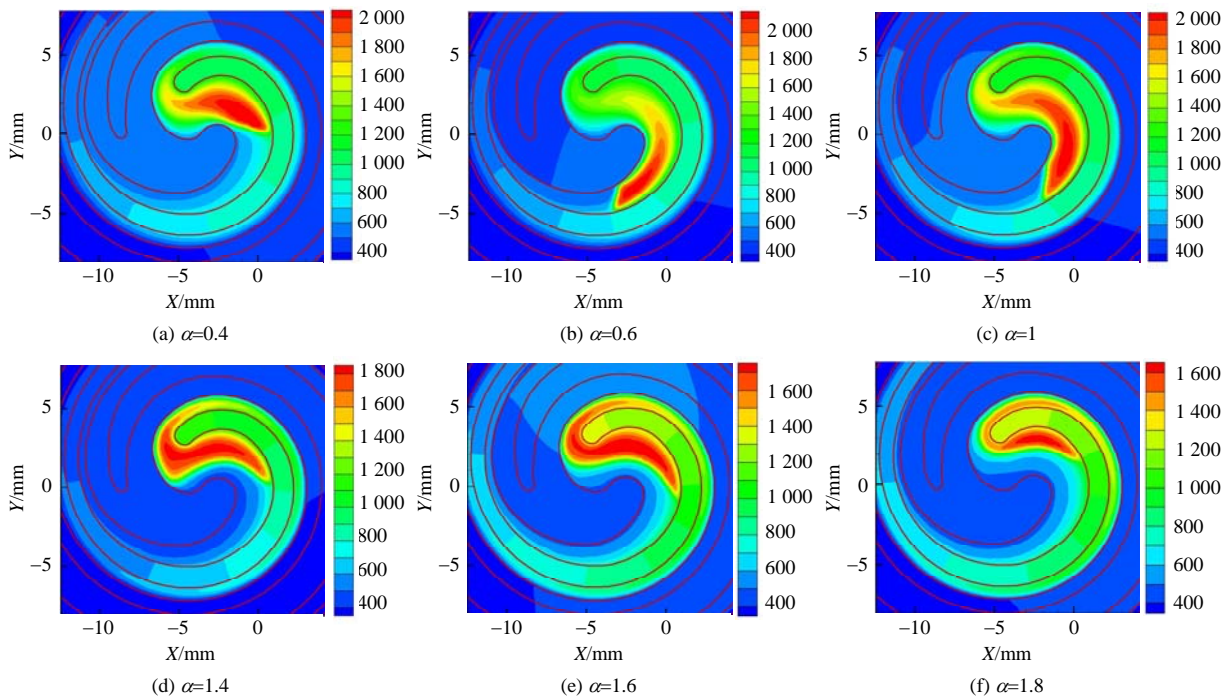


图 5 没有空气槽时的温度云图(K)

Fig. 5 Temperature contour in Model1 without a groove(K)

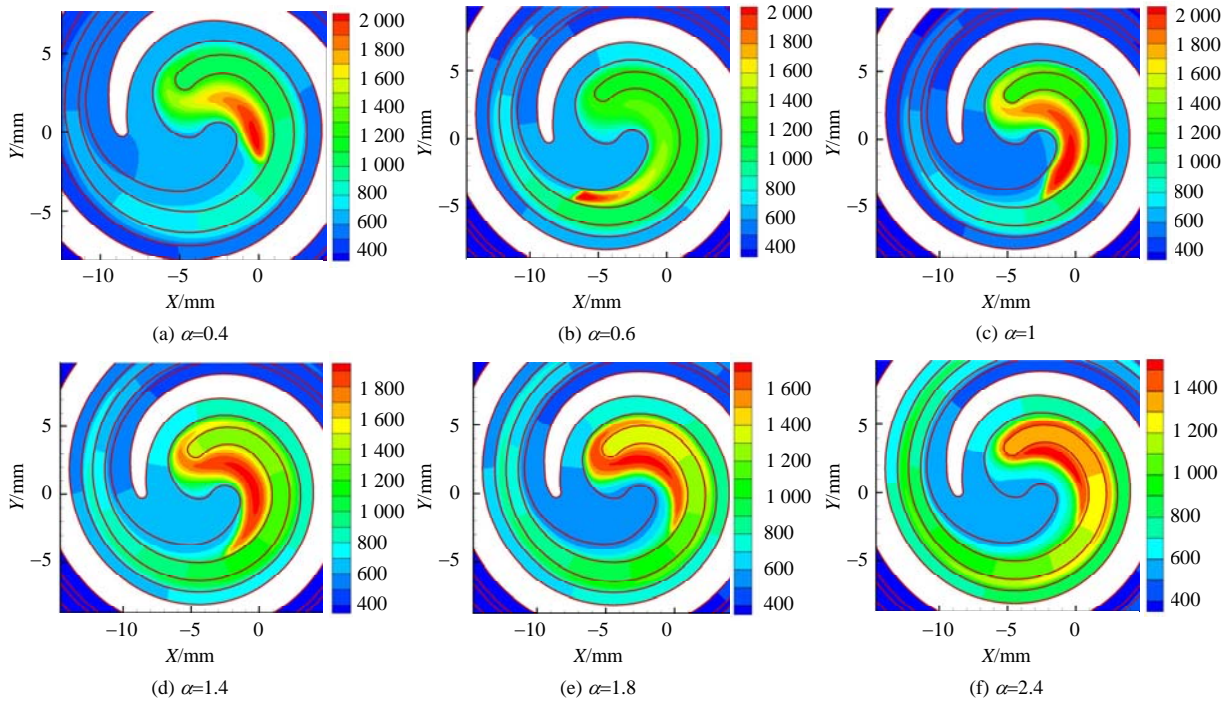
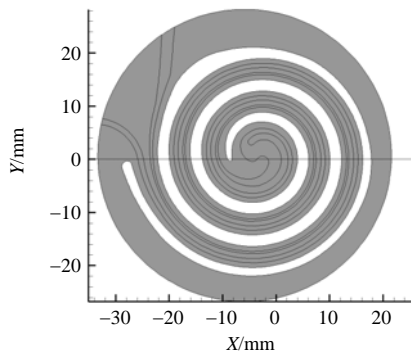


图6 有空气槽时的温度云图(K)

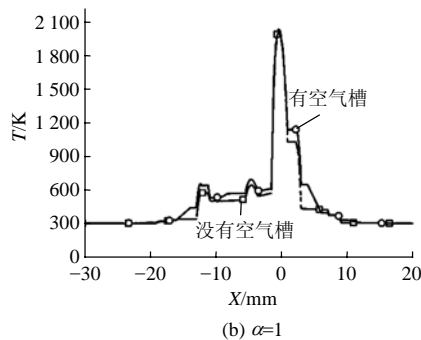
Fig. 6 Temperature contour in Model1 with a groove(K)

然在中心燃烧区的入口，而图 5(d)中的火焰已经移动到中心燃烧区内。 $\alpha=1.8$ 时，没有空气槽的燃烧器的可燃区域已经缩小到非常小的一个区域，见图 5(e)，而有空气槽的燃烧器的火焰仍稳定在中心燃烧区，见图 6(e)。 $\alpha=2.4$ 时，有空气槽的燃烧器仍稳定工作。

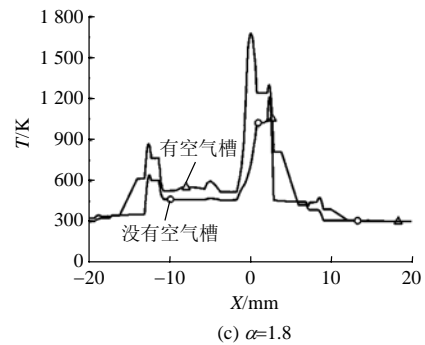
图 7(a)是微小燃烧器 Model1 的计算模型，为



(a) 燃烧器计算几何模型



(b) $\alpha=1$



(c) $\alpha=1.8$

图7 Model1 在有空气槽和没有空气槽时的壁面温度比较

Fig. 7 Temperature distributions in Model1 with and without a groove

了能够比较燃烧器内部的温度分布，取 $Y=0$ 截面上的温度分布进行比较。从图 7 中可以看出：当空气过量系数等于 1 时，2 种燃烧器中的火焰位置相同，而且最高燃烧温度相同。但是有空气槽燃烧器内的温度要高于没有空气槽的燃烧器内部温度；当空气过量系数增加到 1.8 时，没有空气槽燃烧器中的火焰缩小到一个非常小的区域内，它的最高温度比有空气槽燃烧器的最高温度低了 450 K，这是由于没有空气槽燃烧器内部的散热量要高于有空气槽的燃烧器的散热量。

3 结论

1) 空气槽可以减小微燃烧器的散热，使微燃

烧器的可燃极限变宽,使之能够在较大的空气过量系数下工作。空气槽能够减小燃烧器的热容,使之能够在更小的甲烷流量下稳定工作。

2) 有空气槽的微燃烧器,燃烧器中心壁面温度最高,沿径向存在较大的温度梯度。没有空气槽的微燃烧器,端面温度分布比较均匀,相差不大。

3) 在微型燃烧器内部,高温燃气对未燃混合物有很强的加热作用。一方面使预混火焰面发生倾斜,不与气体来流方向垂直,受预热较多的可燃混合气比受预热较少的气体先着火。另一方面使预混火焰在微燃烧器内部的位置不固定,随着流速、空气过量系数、外界散热而变化。

参考文献

- [1] Carlos F A. Micro-power generation using combustion: issues and approaches[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 883-899.
- [2] Jacobson S A, Epstein A H. An informal survey of power MEMS [C]. Proceedings of International Symposium on micro-mechanical Engineering, Tsuchiura and Tsukuba, Japan, 2003.
- [3] 黄俊, 薛宏, 潘剑锋, 等. 微动力系统的若干研究动态和进展[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 1(1): 5-9.
Huang Jun, Xue Hong, Pan Jianfeng, et al. Recent trends and development on micro power systems[J]. World Science Technology Research and Development, 2005, 1(1): 5-9(in Chinese).
- [4] Ju Y, Choi C W. An analysis of sub-limit flame dynamics using opposite propagating flames in mesoscale channel[J]. Combustion and Flame, 2003, 133(4): 483-493.
- [5] Weinberg F J. Combustion temperatures: the future[J]. Nature, 1971, 233(5317): 233-239.
- [6] Lloyd S A, Weinberg F J. Limits to energy release and utilisation from chemical fuels[J]. Nature, 1975, 257(5525): 367-370.
- [7] Lloyd S A, Weinberg F J. A recirculating fluidized bed combustor for extended flow ranges[J]. Combustion and Flame, 1976, 27(3): 391-394.
- [8] Jones A R, Lloyd S A, Weinberg F J. Combustion in heat exchangers[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1978, 360(1700): 97-115.
- [9] Ronney P D. Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors [J]. Combustion and Flame, 2003, 135(4): 421-439.
- [10] Kuo C H, Ronney P D. Numerical modeling of non-adiabatic heat-recirculating combustors[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3277-3284.
- [11] 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): 2463-2472.
- [12] Kim N, Kato S, Takuya K. Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters[J]. Combustion and Flame, 2005, 141(3): 229-240.
- [13] Kim N, Aizumi S, Yokomori T, et al. Development and scale effects of small Swiss-roll combustors[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3243-3250.
- [14] Kim N, Maruta K. A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes[J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1-2): 283-301.
- [15] Federici J A, Vlachos D G. A computational fluid dynamics study of propane/air microflame stability in a heat recirculation reactor [J]. Combustion and Flame, 2008, 153(1-2): 258-269.
- [16] Scarpa A, Pirone R, Russo G, et al. Effect of heat recirculation on the self-sustained catalytic combustion of propane/air mixtures in a quartz reactor[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(5): 947-953.
- [17] 张永生, 周俊虎, 杨卫娟, 等. T型微细管道内氢气空气预混燃烧实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 128-131.
Zhang Yongsheng, Zhou Junhu, Yang Weijuan, et al. The experimental study of hydrogen and air premixed combustion in microscale T style tube[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 128-131(in Chinese).
- [18] 胡国新, 王明磊, 李艳红. 一种微细型腔内氢气与空气预混燃烧的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 201-204.
Hu Guoxin, Wang Minglei, Li Yanhong. Experimental study on combustion of premixed hydrogen-air gas in annular microchamber [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 201-204(in Chinese).
- [19] 林博颖, 张根烜, 刘明侯, 等. 微小空腔内气体的预混燃烧[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(3): 269-274.
Lin Boying, Zhang Genxuan, Liu Minghou, et al. Premixed combustion in micro-chamber[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(3): 269-274(in Chinese).
- [20] 蒋利桥, 赵黛青, 汪小慈. 微尺度甲烷扩散火焰及其熄灭特性[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(2): 183-186.
Jiang Liqiao, Zhao Daiqing, Wang Xiaohan. Structure and extinction characteristics of methane micro-diffusion flames[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(2): 183-186(in Chinese).
- [21] 李军伟, 钟北京. 微细直管燃烧器的散热损失研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 59-64.
Li Junwei, Zhong Beijing. Investigation on heat loss of microtube combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(20): 59-64(in Chinese).
- [22] 李军伟, 钟北京. 微小型 Swiss-roll 燃烧器的数值模拟研究[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(6): 533-539.
Li Junwei, Zhong Beijing. Numerical simulation of micro swiss-roll combustor[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(6): 533-539(in Chinese).



李军伟

收稿日期: 2009-06-14。

作者简介:

李军伟(1978—), 男, 副教授, 研究方向为微尺度燃烧、火箭发动机中的燃烧与流动, david78lee@gmail.com。

(责任编辑 王庆霞)