doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.047

催化微燃烧室内氢气和氧气预混合燃烧特性

潘剑锋　刘启胜　卢青波　潘振华
(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对带催化的微燃烧室内部氢氧预混合燃烧过程,利用 CFD 计算软件建立模型进行数值模拟,在实验验证的基础上改变入口参数,分析了表面反应与气相反应的相互作用以及催化反应对火焰吹熄极限的影响。结果表明,表面反应对气相反应中间产物的消耗会使气相反应强度减弱;在催化剂表面附近的反应以表面反应为主,在远离催化剂表面的反应以气相反应为主。催化剂的添加能够极大地拓宽火焰吹熄极限,在当量比为 1.0 时,催化燃烧室和无催化燃烧室的吹熄极限分别为 46、22 m/s。在当量比为 1.0 时,表面反应强度最高,此时燃烧室出口截面温度最高。

关键词: 微尺度燃烧; 数值模拟; 吹熄极限; 表面反应; 气相反应
中图分类号: TK16　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)02-0357-07

Combustion Characteristic of Premixed Hydrogen/Oxygen Mixture in Catalytic Micro-combustor

Pan Jianfeng　Liu Qisheng　Lu Qingbo　Pan Zhenhua
(*School of Energy and Power Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: The premixed hydrogen/oxygen combustion process in a catalytic micro-combustor was numerically simulated with CFD software. The interaction between gas-phase and catalytic reaction was analyzed by changing inlet parameters on the basis of experimental verification. Meanwhile, the blow-off limits for combustor with and without catalyst were also investigated. The results showed that gas-phase reaction was subdued with the intermediate products consumed in catalytic reaction. At the same velocity, the flame temperature of catalytic combustor was lower than that of non-catalytic combustor. The OH mass fraction near up-wall of Pt cell in catalytic combustion chamber was also lower than that near up-wall of SiC cell in non-catalytic combustor. While owing to the exothermic surface reaction with Pt cell, the temperature of Pt cell in catalytic combustor was higher than that of SiC cell in non-catalytic combustor. Catalytic reaction was dominant near the surface of catalyst, while gas-phase reaction was dominant away from the surface. The OH mass fraction distribution trend near the inner up-wall in catalytic combustor was consistent with that near the inner up-wall in non-catalytic combustor. The blow-off limit can be widened by adding catalyst. The blow-off limits for combustor with and without catalyst were 46 m/s and 22 m/s, respectively. At equivalence ratio of 1.0, the strongest activity of catalytic was shown, and the gas-phase reaction was obviously restrained. With the increase of equivalence ratio, the mean temperature of out-wall was risen at the beginning and then it was dropped later. The highest mean temperature of out-wall was achieved with equivalence ratio of 1.0.

Key words: micro-scale combustion; numerical simulation; blow-off limit; surface reaction; gas-phase reaction

收稿日期: 2015-07-15　修回日期: 2015-08-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(51376082)、江苏省自然科学基金项目(BK20131253)和江苏省高校优势学科建设工程项目
作者简介: 潘剑锋(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事动力机械燃烧过程和燃烧系统研究,E-mail: mike@ujs.edu.cn

引言

基于碳氢燃料的微动力系统具有廉价、高储能密度等优点,应用前景广阔[1-3]。微燃烧室作为微动力系统的核心部件,减少燃烧室热损失和提高燃烧稳定性是亟待解决的问题[4-6]。催化燃烧具有易燃性、低污染、高效性、可燃极限高、燃烧稳定等优点,因而是解决上述问题的一个途径[7-9]。

针对微尺度下催化燃烧的稳燃极限以及表面反应与气相反应的耦合机理,国内外学者已经做了大量的研究[10-14]。Karagiannidis 等对丙烷/空气混合气和甲烷/空气混合气在微尺度下的气相反应和表面反应的相互作用进行了研究,得到气相反应的引入能够拓展燃料在反应器内的可燃范围。Chen 等对氢气/空气的燃烧过程进行了数值模拟,认为氢气的气相反应和表面反应是同时发生的。流速大时,表面反应占优;流速较小时,气相反应占优。Davis 等研究了甲烷在催化面附近的气相与表面反应特性,得出表面催化反应的放热能加速气相反应的着火。徐侃等对甲烷/空气的催化燃烧进行了模拟计算,得到不同当量比时表面催化反应均使气相燃烧的熄火距离显著缩小。伍亨等对微通道内甲烷/空气在镀 Pt 热表面上的催化燃烧进行了数值模拟,得到空间反应对表面催化反应的影响可以忽略,混合气入口速度的提高会抑制表面催化反应。

上述研究均未分析催化剂引入对稳燃极限的影响,燃烧反应过程中表面反应与气相反应之间的主辅关系也没有明确。鉴于此,本文以入口局部催化的微燃烧室为研究对象,对氢氧预混合气体的燃烧过程进行数值模拟,对比分析有无催化时燃烧室的吹熄极限,对微通道内部表面/气相反应特性进行探讨。

1 物理模型及反应机理

模拟对象以内部尺寸为 10 mm × 6 mm × 1 mm 的矩形通道为基础,将 1 mm × 6 mm × 0.2 mm 的碳化硅单元(SiC 单元,无催化)或铂单元(Pt 单元,有催化)嵌置于入口中心处,其示意图见图 1。燃烧室外部尺寸为 10 mm × 10 mm × 1.6 mm,材料为碳化硅材料。预混气体沿 X 轴正方向进入燃烧室;燃烧室高度(1.6 mm),沿 Z 轴方向;宽度(10 mm)沿 Y 轴方向;坐标原点位于入口截面中心。由于燃烧室结构规则,采用了结构化的网格划分方法。为便于表述,文中将燃烧室沿入口单元上表面在 Z 轴方向的整个截面简称入口单元上壁面,而整个燃烧区域上表面简称燃烧室内上壁面;上壁面附近均指沿 Z 轴方向距上壁面 0.001 mm 处。

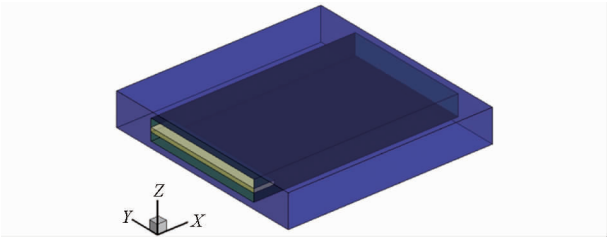

图 1 微通道燃烧室物理模型

Fig. 1 Physical model of micro-combustor

为了减少网格划分对求解结果造成影响,对网格的可靠性进行了检查。如图 2 所示,为 3 种不同数目的网格在相同工况计算收敛后 Pt 单元上表面附近温度分布。图中,网格数目为 225 000 的温度分布与较密网格数目为 450 000 的温度分布比较接近。本文采用网格密度为 225 000,既能节省计算时间,又能获得好的计算精度。

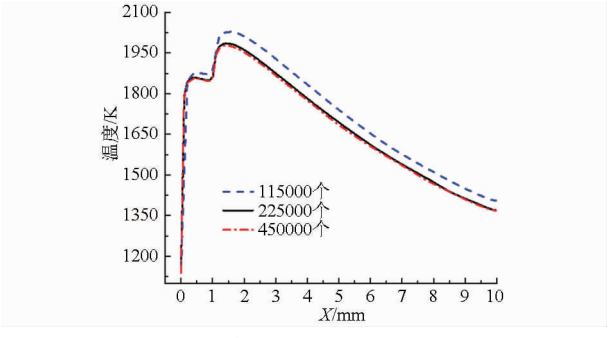

图 2 铂单元上壁面附近温度分布

Fig. 2 Temperature distributions near up-wall of Pt cell at different mesh densities

氢气和氧气的气相反应采用 Miller 等[15]提出的反应机理,包含 8 种组分和 19 步基元反应;表面反应采用 Deutschmann 等[16]提出的氢气在 Pt 表面上的催化反应机理,涉及 5 种表面组分:H(s)、O(s)、OH(s)、H_2O(s)、Pt(s)和 6 种气相组分:H_2、O_2、H、O、OH、H_2O。SiC 的物性参数为:密度为 3 100 kg/m^3,比热为 275 J/(kg·K),导热系数为 92 W/(m·K);Pt 的物性参数为:密度为 21 450 kg/m^3,比热为 130 J/(kg·K),导热系数为 76 W/(m·K)。

数学模型包括以下基本控制方程:连续性方程、组分守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程。通道外壁面采用综合换热边界条件,控制方程具体形式以及综合换热系数计算方法见文献[17]。文中假设忽略体积力、流动耗散和内部气体辐射效应。采用层流有限速率模型,入口取速度边界条件,出口为自由出流边界条件。

2 模型验证

为了验证计算模型可靠性,对内部尺寸为 17 mm ×

10 mm × 1 mm、壁厚为 1 mm 的催化单通道微燃烧室进行了实验。燃烧室上表面靠近入口处镶嵌尺寸为 6 mm × 10 mm × 0.2 mm 的催化条，即燃烧室上壁面有部分催化，下壁面无催化。实验装置见文献[18]，实验中通过质量流量控制器来精确实现混合气流量和氢氧混合比的调节。采用红外热像仪（Thermovision TM A40 型）来测量微燃烧室上、下外壁面温度分布，红外热像仪最大测温温度为 2 273 K，测量精度为 ±2%[19]。

采用相同尺寸和材料的微燃烧室，利用现有计算模型对催化燃烧过程进行了数值模拟。在当量比 Φ 为 1、流量 Q 为 600 mL/min 时，模拟与实验所得的外壁面温度分布及外壁面中心线温度对比见图 3。

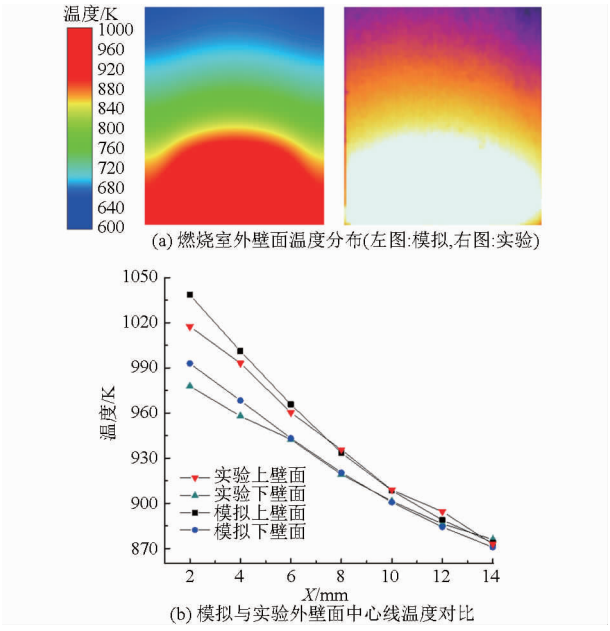

图 3　物理模型的实验验证

Fig. 3　Experimental validation of computational model

图中，模拟和实验的外壁面温度分布吻合很好，模拟所得的结果与实验测得的数据最大误差不超过 3.0%。从图中可看出，模拟所得的结果与实验测得的数据有较好的一致性，从而验证了计算模型的可靠性。实验过程中，燃烧室的金属底座具有很强的导热性能，一部分热量通过底座散失，而模拟没有考虑入口的热耗散，故入口处模拟结果高于实验结果。

3　结果与分析

3.1　流速的影响

当量比 Φ 为 1.0，预混气体流速在 0.5 ~ 2.5 m/s 之间氢气/氧气预混气体中心截面温度分布见图 4。由图 4 可以看出，随着入口流速的增加，不同催化条件和不同流量下高温区域的位置均向燃烧室下游移动。当流速较低时，燃烧主要在入口处进行，高温区域较小；当流速增加时，反应物的总量增加，燃烧所需要的时间增加，更多反应物在离入口稍远的地方反应，整个反应区域扩大，燃烧高温区域位置也相应改变。从图 4 可以明显看出，在相同流速下无催化燃烧室内的火焰温度均明显高于有催化燃烧室内的火焰温度。相比于气相反应，表面反应温度较低。可以推断，表面反应对气相反应具有抑制作用。从图 4 还可以看出，在相同流速下，无催化时燃烧室入口处 SiC 单元的温度低于相同工况下有催化时燃烧室入口处 Pt 单元的温度。这是因为 SiC 单元表面没有参与反应，其温度只能靠气相反应产生的热量传递来维持，而 Pt 单元表面发生了催化反应，催化反应产生的热量使其温度升高。

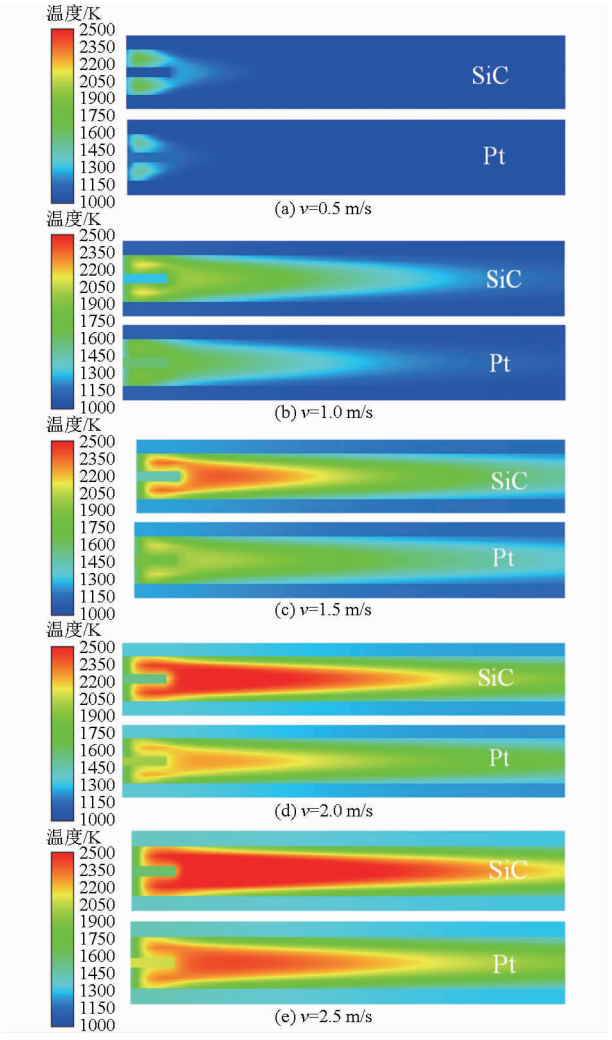

图 4　不同流速下中心截面温度分布

Fig. 4　Temperature distributions on combustor center section at different inlet velocities

图 5 为不同流速下燃烧室入口单元上壁面附近的 OH 分布。在相同工况下，采用 SiC 单元的 OH 质量分数整体上明显高于采用 Pt 单元的 OH 质量分数。这是因为 Pt 单元表面发生了催化反应，催化剂表面对 OH 具有很强的吸附性，燃烧时主要以 OH(s) 的吸附状态参与反应，而气相反应靠中间产

物 OH 来维持。当流速大于 0.5 m/s 时,无催化燃烧室的 OH 分布在距入口 1 mm 处出现一个拐点,拐点后 OH 质量分数会稍微上升,这是因为 SiC 单元置于入口处相当于钝体,其后侧会产生回流区,回流区能够提供一个燃烧反应的中间组分聚集池,故 OH 质量分数会升高。有催化燃烧室的 OH 质量分数在距入口 1 mm 内先增大后减小,在靠近 1 mm 处 OH 曲线也出现一个拐点,从拐点处开始 OH 质量分数迅速增大达到峰值后又逐渐下降,且拐点后 OH 质量分数峰值高于入口 1 mm 内 OH 质量分数峰值。这是由于催化单元布置在燃烧室入口处,表面反应对 OH 的消耗作用,即气相反应产生自由基 OH 速率不足以抵消催化剂表面对自由基 OH 吸附速率,使得在距入口处 1 mm 内 OH 质量分数很低,而入口单元下游没有催化以及入口单元后侧回流区的影响,使得 1 mm 后的 OH 质量分数反而比距入口 1 mm 以内的要高,故 OH 的质量分数会在距入口 1 mm 处附近出现一个拐点。流速越大,流过微通道内的混合气质量流量越高,使得单位时间产生的中间产物也越高,故计算条件下流速越高 OH 质量分数整体也越高。

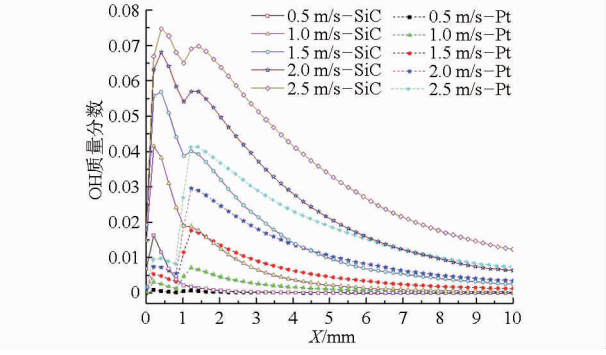

图 5 入口单元上壁面附近 OH 质量分数

Fig. 5 OH mass fractions near up-wall of inlet cell

图 6 为不同类型燃烧室内上壁面附近的 OH 分布。在相同流速下,无催化燃烧室的 OH 质量分数稍微高于有催化燃烧室的 OH 质量分数,但 OH 分布趋势相同。这说明催化反应的存在对整个燃烧室内燃烧反应均产生影响,但催化剂并不会影响燃烧室壁面 OH 大体分布趋势。结合图 5 和图 6 进行分析,在催化剂表面附近的反应以表面反应为主,在远离催化剂表面的反应以气相反应为主。

3.2 吹熄极限

图 7 为当量比 Φ 为 1.0、入口流速为 1.0 m/s 时无催化和有催化燃烧室的中心截面 OH 分布。从图中可以看出,入口处的反应强度大于入口单元下游的反应强度,此时入口单元与反应区相连,燃料主要在入口单元附近消耗。当入口速度增大到 15 m/s

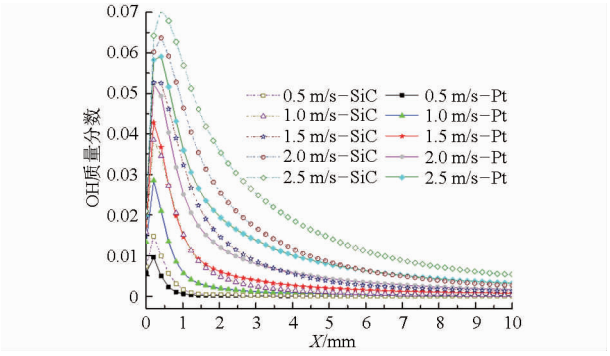

图 6 燃烧室内上壁面附近 OH 质量分数

Fig. 6 OH mass fractions near inner up-wall of micro-combustor

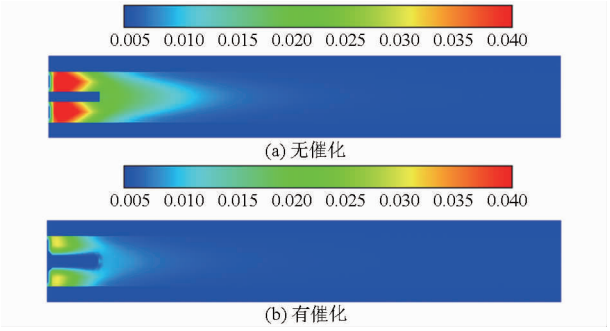

图 7 v = 1.0 m/s 时不同燃烧室内中心截面 OH 质量分数分布

Fig. 7 OH mass fraction distributions on combustor center section of different combustors

时,如图 8 所示,燃料的停留时间减小使得入口处的反应强度减弱而入口单元下游的反应强度增强,火焰将向下游移动。这是由于燃烧室流速较大,入口处不能形成稳定的火焰面,自由基浓度很小,但由于入口单元后会产生回流区,回流区的反应区可以稳定火焰[20],反应区未与入口单元分裂开,火焰在入口单元根部被拉伸。当入口速度进一步增大到一定值时,在入口单元附近的反应区受到剪切层强烈拉伸作用而几乎与入口单元根部分裂开来,此时单纯依靠入口单元回流区内的反应区已不能稳定火焰,火焰将从最薄弱的部位(图 8 箭头所示)被拉断,即火焰被吹熄,这种“吹熄机理”已经得到了实验验证[21-23]。为了便于比较,将燃烧室自由基 OH 与入口单元根部分离时对应的入口速度定义为火焰吹熄极限。

图 9 为无催化和有催化燃烧室在接近吹熄极限时中心截面 OH 分布。自由基 OH 浓度高的区域被用来表示燃烧反应区,图中可以明显看出入口单元后的反应区已经开始与入口单元根部分离(图中箭头所示)。因此,当流速进一步增大时,火焰将被吹熄。图中,催化燃烧室的吹熄极限为 46 m/s,无催化燃烧室的吹熄极限为 22 m/s。结果表明,催化燃烧

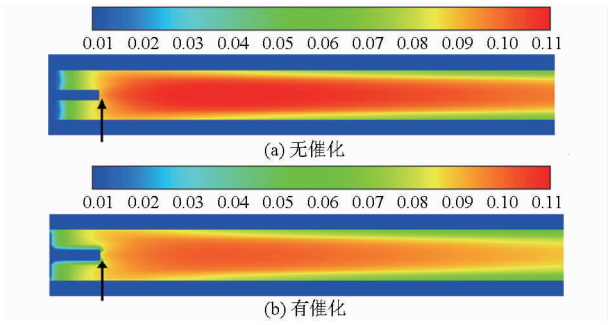

图 8　v = 15 m/s 时不同燃烧室内中心截面 OH 质量分数分布

Fig. 8　OH mass fraction distributions on combustor center section of different combustors

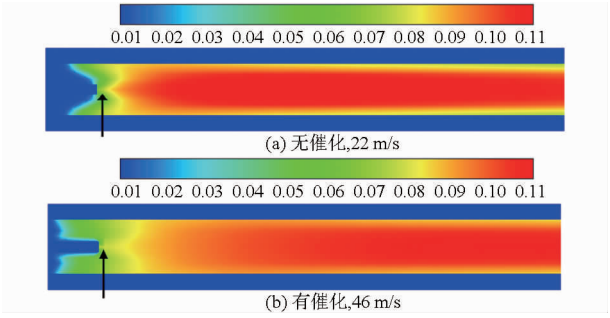

图 9　不同燃烧室在接近吹熄极限时的中心截面 OH 质量分数分布

Fig. 9　OH mass fraction distributions near blow-off limit on combustor center section of different combustors

室的吹熄极限远高于无催化燃烧室的吹熄极限。这是因为在流速非常大时，燃烧室内气相反应很弱，壁面反应要远强于气相反应，这与 Chen 等[11]的结论一致。如图 9 所示，在流速为 22 m/s 时，无催化燃烧室的气相反应强度减弱，火焰将很容易吹熄；而对于有催化的燃烧室，入口处有催化单元，在此流速下壁面反应强度依然很强，火焰将不会被吹熄。当流速由 22 m/s 增加到 46 m/s 时，催化燃烧的熄火极限是由高流速下的吹熄造成的，这与 Maruta 等[24]的结论一致。

3.3　当量比的影响

为了分析当量比 Φ 对燃烧反应的影响，入口流速取 1 m/s，氢氧当量比分别取 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4，通过改变入口当量比的大小，分析通道内部温度场和浓度场的变化，以探讨表面反应对气相反应的影响。

图 10 为不同当量比下催化燃烧室中心截面温度分布。在不同当量比下，燃烧高温区域均集中在距入口 1 mm 以内。随着当量比增加，燃烧区域最高温度先增大后减小，火焰面明显是先变宽后变窄。在当量比为 0.4 时，可以发现 Pt 催化单元处温度相对于其周围明显偏低，而在其他当量比下温差不是很明显。导致这种情况的原因是，在富氧的情况下，Pt 表面容易发生钝化作用[25]，这对 Pt 单元表面发生催化反应具有抑制作用。在这种情况下，Pt 表面失活，催化反应产生的热量较少，故其表面温度明显低于附近温度。

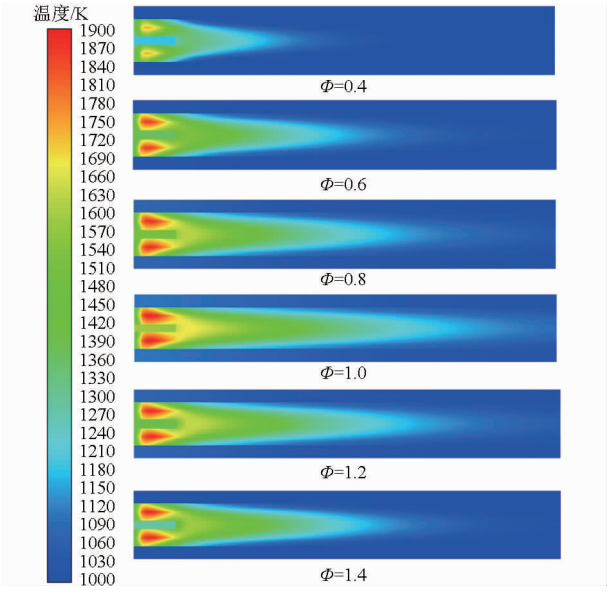

图 10　不同当量比下中心截面温度分布

Fig. 10　Temperature distributions on combustor center section at different equivalence ratios

图 11 为催化燃烧室内 Pt 单元上壁面附近 OH 分布。在距入口 1 mm 以内，OH 质量分数先增加后减少，在当量比为 0.8 时 OH 质量分数出现最大峰值，当量比为 1.0 时的 OH 峰值次之；在距入口 1 mm 以后，OH 质量分数也随当量比增加先增大后减小，但在当量比为 1.0 时 OH 质量分数出现最大峰值，当量比为 0.8 时的 OH 峰值次之。图中，距入口 1 mm 前后 OH 峰值差的绝对值随当量比先增大后减小，并且在当量比为 1.0 时最大，这说明当量比为 1.0 时表面反应对自由基 OH 的消耗速率最大。在距入口 1 mm 内，不同当量比下表面反应对中间产物 OH 的消耗速率不同，使得当量比为 0.8 时 OH 质量分数反而大于当量比为 1.0 时的 OH 质量分

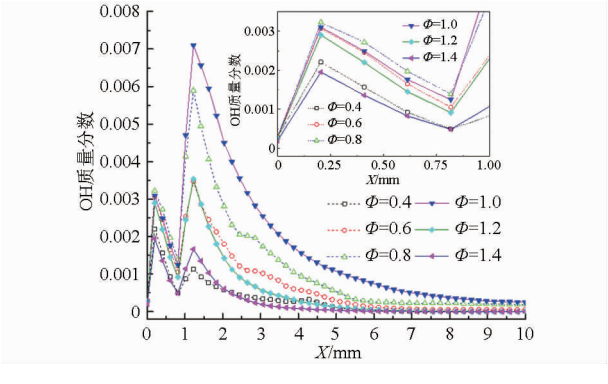

图 11　铂单元上壁面附近 OH 质量分数

Fig. 11　OH mass fraction near up-wall of Pt cell

数。由此可以推断,表面反应在当量比为 1.0 时反应强度最高,此时表面反应对气相反应抑制最强烈。

图 12 为距入口 2.5 mm 内燃烧室内上壁面附近 OH 分布。随着当量比增加,OH 质量分数先增加后减小最后趋于平缓,在当量比为 1.0 时 OH 质量分数整体最高;在不同当量比下,OH 峰值均位于 1 mm 以内。从图 12 看出在不同当量比下,燃烧室内上壁面 OH 质量分数分布趋势一致,并未受到催化剂的影响,这也表明了在催化剂表面附近反应以表面反应为主,在远离催化剂表面的反应以气相反应为主。

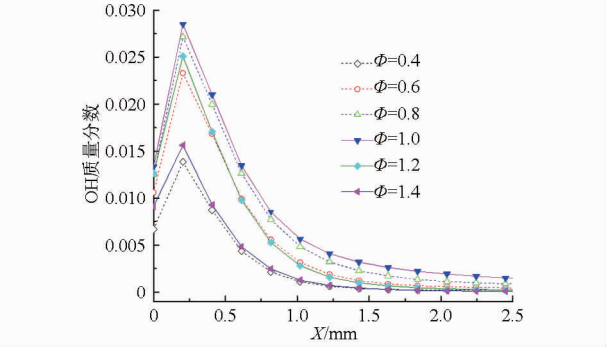

图 12 燃烧室内上壁面附近 OH 质量分数

Fig. 12 OH mass fraction near inner up-wall of micro-combustor

图 13 为不同当量比下出口截面的平均温度以及氢气转化率。在当量比小于 1.0 即富氧条件下氢气转化率接近于 1.0,而在当量比大于 1.0 即贫氧的情况下,氢气转化率急剧降低,在当量比为 1.4 时,氢气转化率不足 0.75。图中,出口截面平均温度随当量比先升高后降低,在当量比等于 1.0 时出口截面平均温度最高。这是因为,在当量比小于 1.0 时,虽然氢气转化率高,但是由于氢气含量较低故产生热量较少,且多余氧气还带走部分热量,使得出口截面平均温度较低;而在当量比大于 1.0 时,其转化率随当量比升高迅速降低,且多余氢气还带走部分热量故产生的热量也较低。因而,在当量比等于 1.0 时,出口截面平均温度最高。

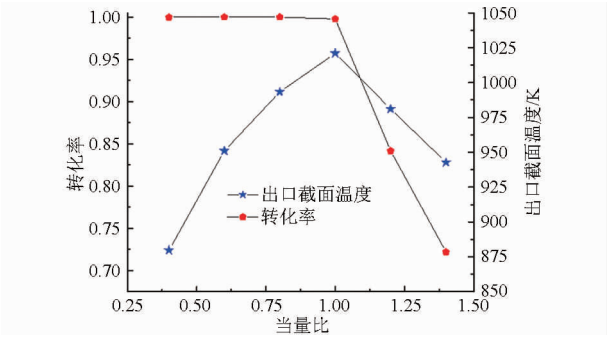

图 13 不同当量比下出口截面平均温度及氢气转化率

Fig. 13 Mean temperature of out-wall and hydrogen conversion at different equivalence ratios

4 结论

(1)表面反应对气相反应中间产物的消耗会使气相反应强度减弱。在相同计算流速下,无催化燃烧室内的火焰温度均明显高于有催化燃烧室内的火焰温度。

(2)在催化剂表面附近反应以表面反应为主,在远离催化剂表面的反应以气相反应为主。在流速 0.5 ~ 2.5 m/s,距入口 1 mm 内时,催化燃烧室 Pt 单元上壁面附近 OH 质量分数明显低于无催化燃烧室 SiC 单元上壁面附近 OH 质量分数。催化燃烧室内上壁面附近 OH 质量分数稍低于无催化燃烧室内上壁面附近 OH 质量分数,但两者曲线分布趋势一致。

(3)催化剂能够显著地扩宽燃烧室吹熄极限。当量比为 1.0 时,催化燃烧室和无催化燃烧室的吹熄极限分别为 46、22 m/s 。

(4)当量比为 1.0 时,表面反应强度最高,此时表面反应对气相反应抑制最强烈。在贫氧条件下,氢气转化率急剧降低。出口截面温度随当量比增大先升高后降低,且在当量比为 1.0 时出口截面温度最高。

参 考 文 献

1 Vican J, Gajdeczko B F, Dryer F L, et al. Development of a microreactor as a thermal source for microelectromechanical systems power generation[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2002,29(1):909 - 916.

2 Ju Y G, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2011,37(6):669 - 715.

3 黄俊,潘剑锋,唐维新,等. 微热光电系统中柱型燃烧室的试验[J]. 农业机械学报,2006,37(3):119 - 121,118.
Huang Jun, Pan Jianfeng, Tang Weixin, et al. Experimental research on cylindrical combustor of micro thermophotovoltaic system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(3):119 - 121,118. (in Chinese)

4 Walther D C, Ahn J. Advances and challenges in the development of power-generation systems at small scales[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2011,37(5):583 - 610.

5 甘云华,罗燕来,冯清颖,等. 受限空间下散热对微火焰稳定性的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(4):37 - 41,27.
Gan Yunhua, Luo Yanlai, Feng Qingying, et al. Effects of fuel rate and burner nozzle diameter on small flame characteristic in confined space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):37 - 41,27. (in Chinese)

6 Chou S K, Yang W M, Chua K J, et al. Development of micro power generator—a review[J]. Applied Energy, 2011, 88(1): 1 – 16.

7 Maruta K. Micro and mesoscale combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 125 – 150.

8 Kyritsis D C, Arias I G, Roychoudhury S, et al. Mesoscale power generation by a catalytic combustor using electrosprayed liquid hydrocarbons[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 965 – 972.

9 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.

10 Karagiannidis S, Mantzaras J, Boulouchos K. Stability of hetero-/homogeneous combustion in propane- and methane-fueled catalytic micro-reactors: channel confinement and molecular transport effects[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 3241 – 3249.

11 Chen G B, Chen C P, Wu C Y, et al. Effects of catalytic walls on hydrogen/air combustion inside a micro-tube [J]. Applied Catalysis A, 2007, 332(1): 89 – 97.

12 Davis M B, Pawson M D, Veser G, et al. Methane oxidation over noble metal gauzes: an LIF study[J]. Combustion and Flame, 2000, 123(1 – 2): 159 – 174.

13 徐侃,刘明侯,张先锋,等. 表面催化反应对小尺度空间气相燃烧的影响[J]. 燃烧科学与技术,2009,15(2):187 – 191.
Xu Kan, Liu Minghou, Zhang Xianfeng, et al. Effect of surface catalytic reaction on gas phase combustion inside miniscale combustor[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(2): 187 – 191. (in Chinese)

14 伍亨,钟北京. 空间反应和入口速度对甲烷催化反应的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(5):670 – 672,676.
Wu Heng, Zhong Beijing. Influence of the gas-phase reaction and the inlet velocity on the catalytic reaction of CH_4[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(5): 670 – 672, 676. (in Chinese)

15 Miller J A, Bowman C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1989, 15(4): 287 – 338.

16 Deutschmann O, Schmidt R, Behrendt F, et al. Numerical modeling of catalytic ignition[C] // Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, 1996: 1747 – 1754.

17 唐爱坤. 平板式微热光电系统能量转换过程的研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
Tang Aikun. Study of energy transition process in the plane cell type micro-thermophotovoltaic system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)

18 Pan Jianfeng, Yang Wenming, Tang Aikun, et al. Micro combustion in sub-millimeter channels for novel modular thermophotovoltaic power generators[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(12): 125021.

19 Tang Aikun, Pan Jianfeng, Yang Wenming. Numerical study of premixed hydrogen/air combustion in a micro planar combustor with parallel separating plates[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(5): 2396 – 2403.

20 万建龙,范爱武,刘毅,等. 固体材料对微型钝体燃烧器吹熄极限的影响[J]. 化工学报,2014,65(3):1012 – 1017.
Wan Jianlong, Fan Aiwu, Liu Y, et al. Effects of solid material on blow-off limit in micro bluff body combustor[J]. CIESC Journal, 2014, 65(3): 1012 – 1017. (in Chinese)

21 Fan A W, Wan J L, Liu Y, et al. The effect of the blockage ratio on the blow-off limit of a hydrogen/air flame in a planar micro-combustor with a bluff body [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(26): 11438 – 11445.

22 Fan A W, Wan J L, Maruta K, et al. Interactions between heat transfer, flow field and flame stabilization in a micro-combustor with a bluff body[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 72 – 79.

23 Wan J L, Fan A W, Maruta K, et al. Experimental and numerical investigation on combustion characteristics of premixed hydrogen/air flame in a micro-combustor with a bluff body [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(24): 19190 – 19197.

24 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.

25 Men Y, Kolb G, Zapf R, et al. Total combustion of propane in a catalytic microchannel combustor[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(1): 91 – 96.