

微燃烧器内氢气及甲烷/氢气燃烧的数值模拟

孙心茹, 孙岳, 阎富生, 刘慧
(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为了实现气体在微燃烧器中稳定燃烧的同时还可以获得高且均匀的外壁面温度分布,建立了气体在具有后向台阶微燃烧器中的燃烧模型. 首先研究了后向台阶数量对微燃烧的影响,其次研究了不同氢气比例下,甲烷/氢气在具有3个后向台阶微燃烧器中的燃烧特性. 结果表明:后向台阶结构能够稳定火焰;当气体的入口速度为3 m/s时,具有3个后向台阶微燃烧器可以燃烧的当量比范围(0.3~5.0)比具有1个后向台阶微燃烧器可以燃烧的当量比范围(0.5~4.6)大;后向台阶结构虽提高了外壁面温度,但使外壁面温差变大,降低了温度的均匀性;在氢气中加入一定比例的甲烷,既减缓了混合气的燃烧反应速度,又获得了高的外壁面温度和能量输出.

关键词: 微尺度燃烧;后向台阶;掺混燃烧;燃烧特性;稳定燃烧

中图分类号: TK 16 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)08-1088-08

Numerical Simulation of Hydrogen and Methane/Hydrogen Combustion in Micro-burners

SUN Xin-ru, SUN Yue, YAN Fu-sheng, LIU Hui

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Hui, E-mail: liuh@smm.neu.edu.cn)

Abstract: In order to achieve stable combustion of gas in micro-burners and obtain high and uniform temperature distribution on the outer wall, a combustion model of gas in micro-burners with backward steps was established. Firstly, the influence of the number of backward steps on micro-combustion was studied. Secondly, the combustion characteristics of methane/hydrogen in micro-burners with three backward steps under different hydrogen ratios were studied. The results show that the backward step structure can stabilize the flame. When the inlet velocity of the gas is 3 m/s, the equivalent ratio range (0.3~5.0) of the gas with three backward steps is larger than that (0.5~4.6) with one backward step. Although the backward step structure increases the temperature of the outer wall, the temperature difference of the outer wall becomes larger, and the temperature uniformity is reduced. Adding a certain proportion of methane to hydrogen not only slows down the combustion reaction rate of the mixture, but also obtains higher outer wall temperature and energy output.

Key words: microscale combustion; backward step; blended combustion; combustion characteristics; steady combustion

近年来,随着电子和机械设备不断地向着小型化的方向发展,迫切需要紧凑高效的能源动力系统.微热光伏系统是典型的微型动力系统,广泛应用于需要便携式电源的各种系统中,如:微型卫星推进器、微机电系统、军事和航空航天^[1].微燃烧器作为微热光伏系统的核心部件,承

担着为系统提供能量的关键作用.由于微燃烧器的设计趋向于紧凑型,在发展应用中面临着许多挑战.燃烧器尺寸减小带来了燃烧过程中驻留时间较短的问题;大的表面积与体积之比和高的热损失率会导致火焰不稳定和能量效率低^[2-3].国内外学者采取了许多稳定措施,例如回流区稳定燃

烧、热管理措施、掺混燃烧等,以此来提高微燃烧器的表面温度以及温度均匀性^[4-5]。

后向台阶是稳定火焰的常用措施之一,其突然膨胀形成的再循环区会导致混合气体流速降低,在再循环区内,高温已燃气体与低温未反应气体流动方向相反,高、低温气体迅速混合,提高未燃气体的温度,有利于燃烧的稳定^[6]。Peng等^[7]发现带2个后向台阶微燃烧器的输出功率比带1个后向台阶微燃烧器的输出功率提高了2倍。Yang等^[8]进行了氢气/空气在3种带或不带后向台阶的不锈钢圆柱微燃烧器的实验,结果表明后向台阶为提高燃料混合气的混合性能、延长停留时间提供了一种有效的解决方案。文献^[9-10]指出具有再循环区的微燃烧器外壁辐射效率明显高于没有再循环区的微燃烧器,微热光伏系统的发电取决于发射器的辐射能,其中燃烧器的外部热性能在该系统中起着重要作用。

微燃烧常选用可燃性高、热值高的氢气作为主要反应物,但氢气的热性能较差,导致其壁面温度梯度较大。针对此问题,Peng等开展了混合燃料的研究,在氢气中加入CO或碳氢化合物是改善燃烧特性和热性能的有效方法^[11]。Jiang等^[12]研究了CO添加量对CO/H₂燃烧的影响,结果表明,在低流速下添加少量的CO可以显著提高能效。Tang等^[13]在微燃烧器中观察到C₃H₈/H₂预混燃烧的火焰形状,发现火焰位置随着丙烷的增加向燃烧器出口靠近。Law^[14]证明,加入适当比例的丙烷降低了层流燃烧速度,抑制了H₂火焰的不稳定性,当添加质量分数5%的丙烷时可以使壁面温度高且温度分布均匀。

目前微燃烧器的发展仍面临燃烧不稳定、燃烧空间有限、效率低等问题。采用后向台阶结构可以提高火焰稳定性,从而实现微燃烧器的温度高且温度分布均匀。本文建立了H₂在不同后向台阶微燃烧器的预混燃烧模型,探究后向台阶结构对微燃烧的影响,并模拟了具有3个后向台阶的微燃烧器中CH₄/H₂混合气体在不同氢气比例下的燃烧特性及对微热光伏系统性能的影响。

1 数值模型的建立与验证

1.1 微燃烧器物理模型

本文分别选取了具有1,2,3个后向台阶结构的微燃烧器物理模型,基本形状为圆柱形,由内壁上的后向台阶结构组成。

图1为微燃烧器的几何形状。燃烧器的内径 $d_1=1\text{ mm}$,外径 $d_5=2\text{ mm}$,燃烧器总长度 $L_4=10\text{ mm}$ 。第1个后向台阶的长度 $L_1=1\text{ mm}$,内径 $d_2=1.2\text{ mm}$;第2个后向台阶长度 $L_2=3\text{ mm}$,内径 $d_3=1.4\text{ mm}$;第3个后向台阶长度 $L_3=5\text{ mm}$,内径 $d_4=1.8\text{ mm}$ 。

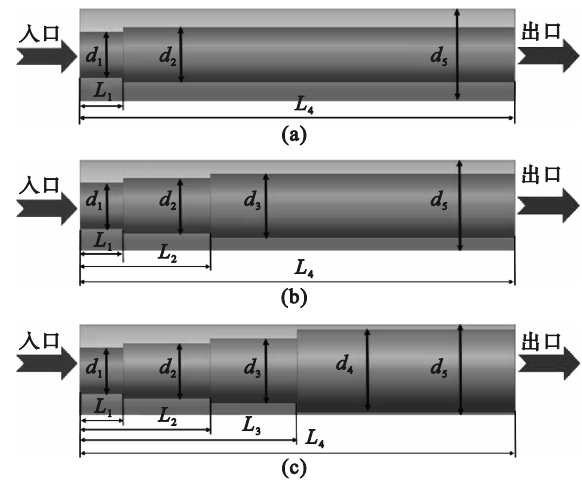


图1 不同后向台阶微燃烧器的几何形状

Fig. 1 The geometry of micro-burners with different backward steps

- (a)—具有1个后向台阶;(b)—具有2个后向台阶;
(c)—具有3个后向台阶。

1.2 数学模型

本文研究气体在微燃烧器中的预混燃烧,具体假设如下:

- 1) 燃料混合气在微燃烧器内作定常流动;
- 2) 混合气视作不可压缩理想气体;
- 3) 忽略微燃烧器内气体辐射影响^[13];
- 4) 忽略体积力和黏性力;
- 5) 无表面反应。

根据以上假设内容,气相中的控制方程如下:

连续性方程为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (1)$$

式中: ρ 为燃料混合气的密度; \mathbf{u} 为燃料混合气的速度。

物种输运方程为

$$\nabla (\rho \mathbf{u} w_j) = -\nabla \mathbf{J}_j + R_j. \quad (2)$$

式中: w_j 为组分 j 的质量分数; \mathbf{J}_j 为组分 j 的扩散通量; R_j 为组分 j 的化学反应生成率。

固体域能量守恒方程为

$$\nabla \cdot (k_w \cdot \nabla T) = 0. \quad (3)$$

式中: k_w 为墙体导热系数; T 为燃料混合气的温度,K。

流体域能量守恒方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u}(\rho E_f + P) = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \left(\sum_j h_j \mathbf{J}_j \right) + \left(\mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{u} \mathbf{I} \right] \cdot \nabla \mathbf{u} \right) \right] + S_f^h \quad (4)$$

式中: E_f 为流体总能量; P 为作用在混合气上的压力; k_{eff} 为有效导热系数; h_j 为组分 j 的焓; μ 为燃料混合气的动力黏度; \mathbf{I} 为单位张量; S_f^h 为流体焓的源项.

动量守恒方程为

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{u} \mathbf{I} \right] \right) \quad (5)$$

1.3 边界条件

利用 Fluent 对气体在微燃烧器内的预混燃烧进行了三维数值模拟, 采用 SIMPLE 方法对压力和速度进行了耦合, 采用 GRI 3.0 化学反应机理, 壁面材料为石英. 当混合气体的入口速度 $v_{\text{in}} < 10 \text{ m/s}$ 时, $Re < 500$, 采用层流模型和稳态模型.

边界条件:

- 1) 入口: 速度入口, 温度 300 K;
- 2) 出口: 压力出口, 氧气质量分数为 23%;
- 3) 气固交界面: 耦合壁面边界条件, 设置静止和无滑移壁面条件;
- 4) 外壁面: 混合壁面边界条件, 外壁面与环境只考虑自然对流和热辐射.

1.4 网格划分和模型验证

Tan 等^[6]通过实验研究了氢气/空气在具有 3 个后向台阶微燃烧器中的燃烧特性, 本文验证中采用的微燃烧器物理模型与实验中所用的完全一致.

图 2 为网格无关性验证. 将具有 3 个后向台阶微燃烧器的模型划分网格数量分别为 84 798, 165 360, 371 200. 分别对以上三种网格模型在气体入口速度为 7 m/s, 当量比为 1 时的氢气/空气的燃烧特性进行模拟, 并分析其中心线气体温度分布. 微燃烧器的网格数量为 165 360 时的中心线温度与网格数量为 371 200 时的中心线气体温度较为接近, 网格数量为 84 798 的结果与其他网格数量的计算结果相差较大, 为了节省迭代计算时间又能保证计算精度, 选用网格数量为 165 360 的计算模型.

图 3 表示气体当量比为 1, 速度在 1~7 m/s 时的出口平均温度的模拟与实验结果的对比, 二者有相似的变化趋势. 入口速度为 7 m/s 时, 误差最大, 约为 8.3%, 在合理范围之内, 因此数值模型和边界条件可应用于本研究. 误差产生的原因主要

有: ①模拟过程中氢气/空气在微燃烧器中的燃烧相比于实验结果更集中在入口段, 所以和实验结果相比, 微燃烧器上游模拟温度较高, 下游温度较低. ②建立数学模型的假设、边界条件和热参数的简化会使模拟结果存在一定误差.

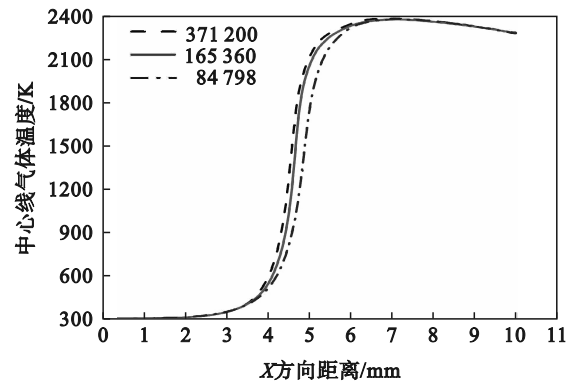


图 2 不同网格数量模型下微燃烧器中心线气体温度分布
Fig. 2 Gas temperature distribution on the center line of micro-burners under models of different grids

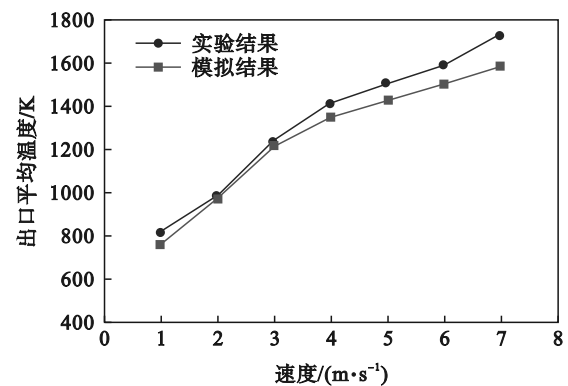


图 3 模拟结果和实验结果的比较

Fig. 3 Comparison between simulation and experimental results

2 结果与讨论

2.1 后向台阶对微燃烧的影响

图 4 为气体入口速度为 3 m/s 时, 氢气在不同后向台阶微燃烧器中 XY 平面气体温度云图及后向台阶处的流线分布. 如图所示, 燃烧火焰呈 V 型, 具有 3 个后向台阶微燃烧器的火焰高温区面积最大, 由于燃烧释放热量会引起突然膨胀, 产生了正压梯度, 混合气的黏度导致了从上到下的负压梯度, 再循环区内导致了正负压梯度的联合, 有利于将热量及燃烧反应物传递到微燃烧器的上游和下游, 从而能够加热未反应的混合气, 构造的回流区可以使气体在其中燃烧更加充分. 由此可见, 后向台阶结构对气体燃烧和燃烧器内

的热传递过程有着积极的影响,可以使燃烧更充分更稳定.

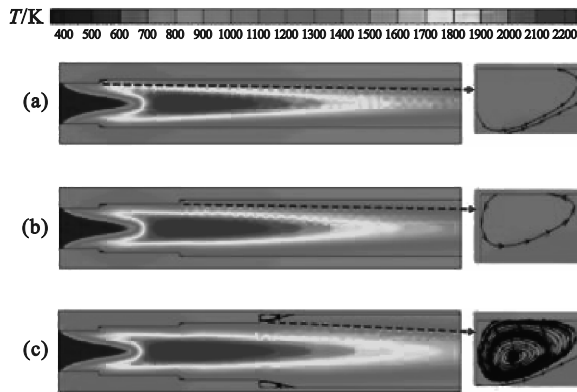


图 4 微燃烧器的 XY 平面温度云图及气体流线分布
Fig. 4 XY plane temperature cloud images and gas streamline distribution of micro-burners
(a)—具有 1 个后向台阶; (b)—具有 2 个后向台阶;
(c)—具有 3 个后向台阶.

图 5a 为中心线气体温度分布.由图可见,具有 3 个后向台阶微燃烧器的中心线气体温度最高,具有 1 个后向台阶微燃烧器的中心线气体温度最低.且 3 种微燃烧器的中心线气体温度峰值位置大致相同,位于 X 方向距离 2.5 mm 附近,可见具有 2 个后向台阶和具有 3 个后向台阶可拉伸火焰燃烧长度,释放更多的热量.具有 3 个后向台阶微燃烧器的内径最大,气体在其中的速度最小,延长了混合气体在微燃烧器中的停留时间.因此,后向台阶结构可以提高燃烧强度,且后向台阶越多,气体燃烧越充分.

图 5b 为中心线羟基摩尔分数分布.羟基是氢气在燃烧时产生的主要自由基,可作为火焰的表征,通常用来反映微燃烧器内是否发生了化学反应,羟基摩尔分数大的区域代表反应的高温区.其中具有 3 个后向台阶的微燃烧器相比于其他两种微燃烧器在 X 方向距离 2.4 mm 处,羟基摩尔分数最先达到峰值,且峰值高于其他两种结构的微燃烧器,并且羟基摩尔分数峰值处也是中心线气体温度达到最高值的位置.可见,后向台阶结构可以使得更多气体燃料在回流区发生反应,促进反应的发生,提高燃料的利用率.

图 6 为气体入口速度为 3 m/s 时,氢气在不同微燃烧器中可以燃烧的当量比范围.在具有 1 个后向台阶的微燃烧器中,当量比为 0.5 时,中心线气体温度在微燃烧器的 X 方向距离为 8.5 mm 处达到最大值,当量比继续下降时,氢气无法燃烧,因此推断 0.5 为本研究中在具有 1 个后向台阶微

燃烧器中可以燃烧的当量比下限;随着当量比的增大,燃烧不足会导致火焰不稳定,当量比大于 4.6 时,燃烧不能进行,推断 4.6 为可以燃烧的当量比上限.在具有 3 个后向台阶的微燃烧器中,可以燃烧的当量比下限从 0.5 下降到 0.3,可以燃烧的当量比上限从 4.6 提高到 5.0.可见,后向台阶结构可以提高可以燃烧的当量比范围,有助于微燃烧器中火焰的稳定.

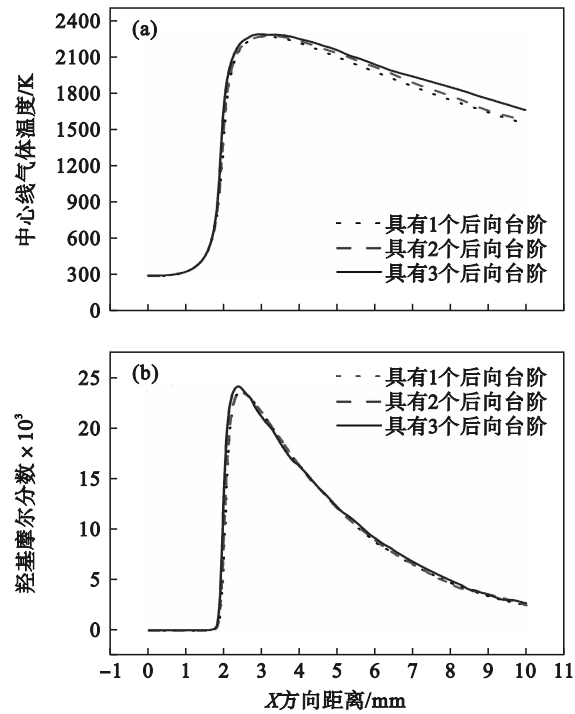


图 5 微燃烧器的中心线气体温度和羟基摩尔分数分布
Fig. 5 Distribution of centerline gas temperature and hydroxyl molar fraction in micro-burners
(a)—微燃烧器的中心线气体温度分布;
(b)—羟基摩尔分数分布.

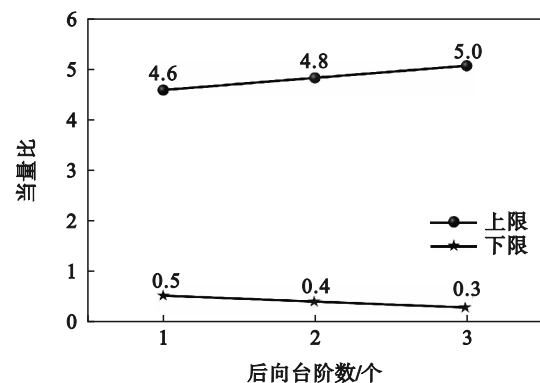


图 6 不同微燃烧器可以燃烧的当量比范围
Fig. 6 The ranges of combustion equivalent ratio for different micro-burners

图 7 为气体入口速度为 3 m/s 时,不同后向台阶结构微燃烧器的外壁面温度分布.具有 3 个后

向台阶微燃烧器的外壁平均温度约为 1 040 K, 具有 1 个后向台阶微燃烧器的外壁平均温度约为 980 K, 可见后向台阶可提高微燃烧器的外壁面温度分布. 通过壁面温差来判断壁面温度的均匀性. 具有 1 个后向台阶微燃烧器的外壁面温差最小, 为 183 K, 温度分布更均匀; 具有 3 个后向台阶微燃烧器的外壁面温差最大, 为 230 K. 因为具有 1 个后向台阶微燃烧器的火焰更靠近出口, 壁面温度分布更均匀. 后向台阶结构虽可提高外壁面温度, 但一定程度上也扩大了外壁面温差, 研究表明, 具有 3 个后向台阶对外壁面温度分布影响较大.

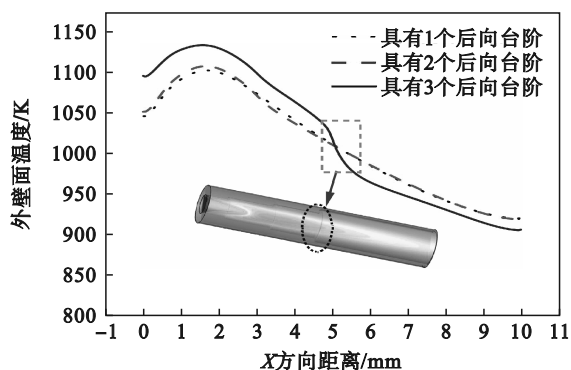


图7 不同后向台阶结构微燃烧器的外壁面温度分布
Fig. 7 Outer wall temperature distribution of micro-burners with different backward steps

燃烧效率 η 影响微燃烧器性能, H_2 的燃烧效率公式为

$$\eta_{H_2} = \left(1 - \frac{w_{H_2}^{out}}{w_{H_2}^{in}} \right) \times 100\%. \quad (6)$$

式中: $w_{H_2}^{out}$ 为出口氢气质量分数; $w_{H_2}^{in}$ 为入口氢气质量分数.

图 8 表示气体入口速度为 1~6 m/s 时, 氢气在不同后向台阶结构微燃烧器中的燃烧效率. 燃烧效率随气体入口速度的增大而减小, 具有 3 个后向台阶微燃烧器内, 气体入口速度为 6 m/s 比 1 m/s 时的燃烧效率减小了约 3%. 因为入口速度增加时, 更多的气体燃料会被吹出微燃烧器, 气体停留时间缩短, 反应不完全, 燃烧效率下降. 氢气在具有 3 个后向台阶微燃烧器中的燃烧效率最大, 当气体入口速度为 6 m/s 时, 具有 3 个后向台阶微燃烧器的燃烧效率比具有 1 个后向台阶微燃烧器的燃烧效率高 1.5%. 因为后向台阶构造的回流区可使更多的气体燃料在其中参与反应, 释放的热量更多, 在一定程度上提高了气体的燃烧效率.

由此可得, 后向台阶结构可以提高燃料的燃烧效率, 改善微燃烧器内气体的流动, 稳定燃烧. 后向台阶结构对微燃烧器的燃烧特性和热性能的影响很敏感, 针对微燃烧, 核心是获得高而均匀的外壁面温度分布, 提高燃料的利用效率. 所以对于微燃烧器的结构设计, 应综合考虑后向台阶的数量、长度、位置等因素.

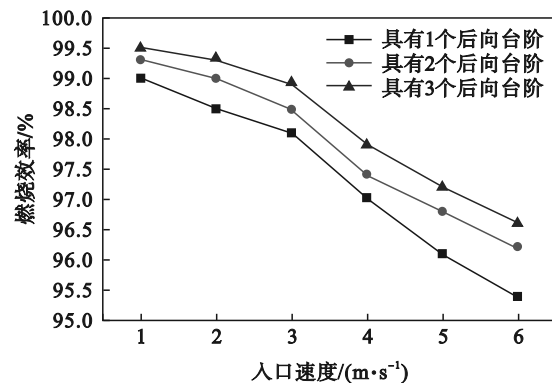


图8 不同后向台阶结构微燃烧器中氢气的燃烧效率
Fig. 8 Combustion efficiency of hydrogen in micro-burners with different backward steps

2.2 氢气比例对燃烧特性的影响

对于气体掺混燃烧, 混合气体的掺混比对燃烧有很大的影响^[15], 本文将对不同氢气比例下的甲烷/氢气混合气体在具有 3 个后向台阶微燃烧器内的燃烧特性进行对比研究.

定义氢气比例为

$$\varepsilon = \frac{M_{H_2}}{M_{H_2} + M_{CH_4}} \times 100\%. \quad (7)$$

式中: M_{H_2} 为混合气体中氢气的摩尔质量; M_{CH_4} 为混合气体中甲烷的摩尔质量.

图 9 为气体入口速度为 2 m/s 时, 不同氢气比例下的 XY 平面气体温度云图和等值线分布. 由图可见, 随着氢气比例减小, 混合气发生反应的位置逐渐向微燃烧器的中下游段移动. 氢气的单位体积燃料低热值为 10.78 MJ/m³, 甲烷的单位体积燃料低热值为 35.8 MJ/m³, 甲烷燃烧时的最低温度比氢气高, 随着甲烷所占比例的增加, 混合气燃烧越困难, 燃烧时的火焰锋面逐渐靠近微燃烧器的出口, 因此也会导致微燃烧器出口平均温度增大.

图 10 为气体入口速度为 2 m/s 时, 不同氢气比例下的动力学反应速率, 采用化学反应 ($O+H_2 \rightarrow H+OH$) 的动力学速率进行比较. 氢气比例为 75% 时, 中心线处的混合气体在 X 方向距离 3.5 mm 处才会被点燃, 动力学速率在 X 方向距离 3.6 mm

处达到最大值.在氢气比例位于 80%~100%时,气体开始发生反应的区域明显向微燃烧器入口方向靠近,氢气比例分别为 80%,85%,90%,95%和 100%的最大反应速率分别位于微燃烧器 X 方向距离的 2.5,2.2,2,1.8 和 1.2 mm 处.当甲烷添加比例(摩尔分数)为 20%时,动力学速率最大约为 $3.8 \text{ kg}\cdot\text{mol}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$;氢气占比为 100%时,动力学速率最大约为 $5.2 \text{ kg}\cdot\text{mol}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$.由此可见混合气中甲烷的加入可以明显使燃烧反应变缓,使得燃烧更稳定.

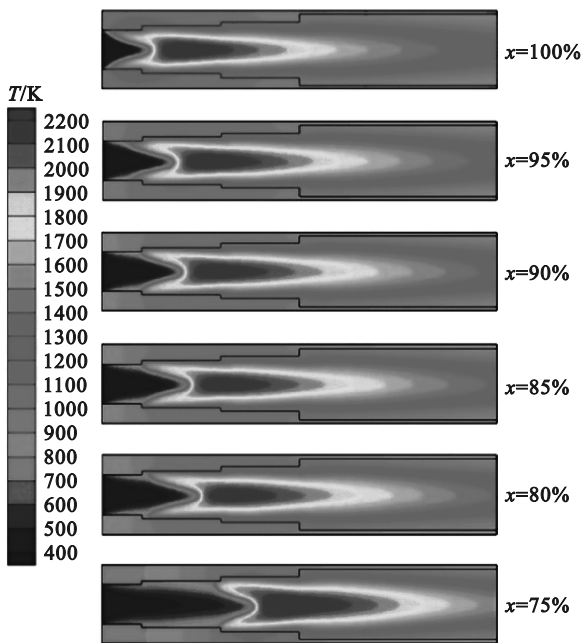


图 9 不同氢气比例下的 XY 面温度云图和等值线分布
Fig. 9 Temperature cloud map and contour distribution of XY plane at different hydrogen ratios

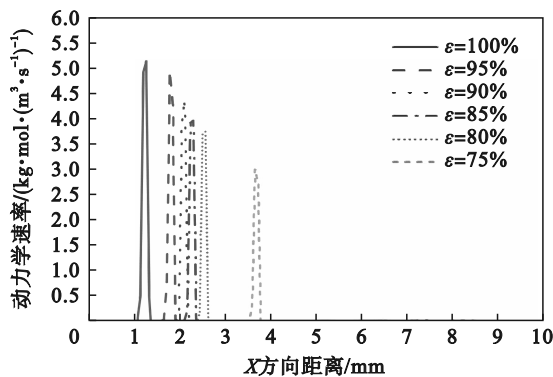


图 10 不同氢气比例下的动力学速率
Fig. 10 Kinetic rate under different hydrogen ratios

图 11 为不同氢气比例下,在气体入口速度 2 m/s 时的微燃烧器外壁面温度分布.燃烧器入口处的外壁面温度随氢气比例的减小而减小,出口处的外壁面温度逐渐增大.因为甲烷着火时需要

的热量高于氢气,导致混合气体在微燃烧器内未反应区域变大,发生燃烧时的位置向着出口方向移动.氢气比例在 75%~100%之间变化时,微燃烧器的外壁面温度先减小后增大. 1 mol 甲烷断裂需要吸收 1656 kJ 的热量; 1 mol 氢气断裂需要吸收 436 kJ 的热量.等比例甲烷与氢气相比,发生反应时需要吸收更多的热量.甲烷的燃烧热为 889.6 kJ/mol ,氢气的燃烧热为 241.8 kJ/mol .甲烷的比例从 20% 到 25% 时,由于燃烧释放的热量大于反应吸收的热量,导致了外壁面温度的升高.氢气比例为 90% 时,外壁面平均温度约为 949 K ,外壁面温差约为 245 K .既比氢气比例为 100% 时的外壁面平均温度高,又比其外壁面平均温差小.氢气比例为 75% 时,外壁面温差增大,此时混合燃料燃烧放出的热量远大于反应吸收的热量,且因混合气体在微燃烧器中的未反应区域变大,导致入口处壁面温度减小,出口处壁面温度增大,因此壁面温差变大.由此可见,在氢气中添加一定量的甲烷,可以有效地提高外壁面平均温度的同时并降低外壁面温差,使外壁面温度分布更均匀.

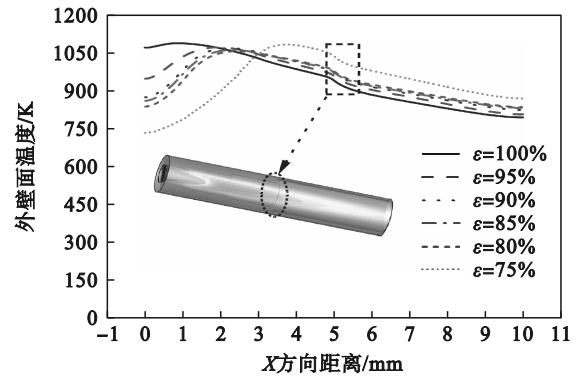


图 11 不同氢气比例下微燃烧器外壁面温度分布
Fig. 11 Temperature distribution on the outer wall of micro-burners under different hydrogen ratios

2.3 氢气比例对微热光伏系统性能的影响

微热光伏系统的工作原理是利用光电元件将微燃烧器的高温壁面辐射能转换为电能.

如图 12 所示,微热光伏系统由微燃烧器、光学滤波器和光伏电池组成.在运行过程中,燃料的化学能在燃烧过程中释放出来,微燃烧器的外壁可以达到高温状态并发射电子,然后短波辐射将通过过滤器到达光伏电池的表面,最后由于光电效应可以产生自由电子.微燃烧器作为微热光伏系统的核心部件,其能量输出对微热光伏系统十分重要.对于微燃烧器的能量输出,是将外壁面和环境之间的对流换热 Q_0 与辐射热量 Q_f 结合

起来,外壁面温度决定微燃烧器的能量输出.

外壁面的能量输出为

$$Q = h_0 \sum A_{w,k} (T_{w,k} - T_0) + \delta \sigma \sum A_{w,k} (T_{w,k}^4 - T_0^4). \quad (8)$$

式中: Q 为单位时间总热量, J ; h_0 为对流换热系数,为 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $T_{w,k}$ 为外壁面温度; T_0 为环境温度, 300 K ; δ 为壁面发射率,为 0.92 ; σ 为斯蒂芬玻尔兹曼数,值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; $A_{w,k}$ 为外壁面面积.

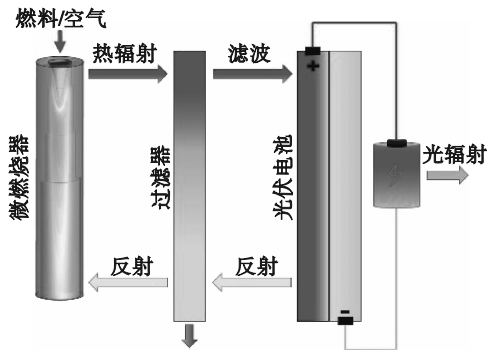


图 12 微热光伏系统示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the micro-thermophotovoltaic system

图 13 为在入口速度 2 m/s 时,氢气比例对能量输出的影响. 氢气比例在 75% 到 100% 之间变化时, Q_0 , Q_r 和 Q 均为先增大后减小,且 Q_r 明显高于 Q_0 ,这说明辐射换热是向外界环境传热的主要方式. 氢气比例为 90% 时,此时能量输出达到最大值,随后在氢气比例小于 90% 时,能量输出又减少,这是因为此刻燃烧释放的热量又小于吸收的热量,所以导致外壁面温度的降低,进而导致能量输出减少.

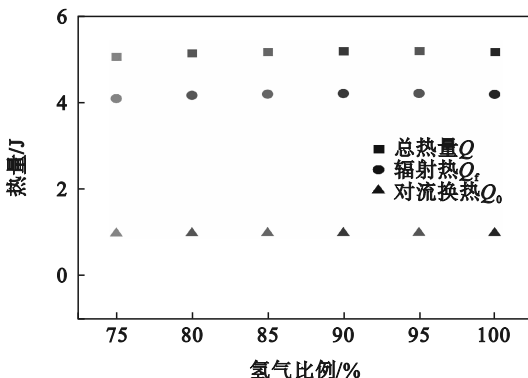


图 13 氢气比例对能量输出的影响

Fig. 13 Influence of hydrogen ratio on energy output

能量效率为外壁能量输出与反应热速率之比,即

$$\gamma = \frac{Q}{m_{in, fuel} Q_{fuel}}. \quad (9)$$

式中: γ 为能量效率; $m_{in, fuel}$ 为入口燃料质量; Q_{fuel} 为混合燃料的低热值.

图 14 为不同氢气比例对能量效率的影响,当气体入口速度为 2 m/s ,氢气比例在 75% 和 100% 之间变化时,能量效率逐渐增大.由此可见,混合气中甲烷的增多会导致能量效率逐渐减小.

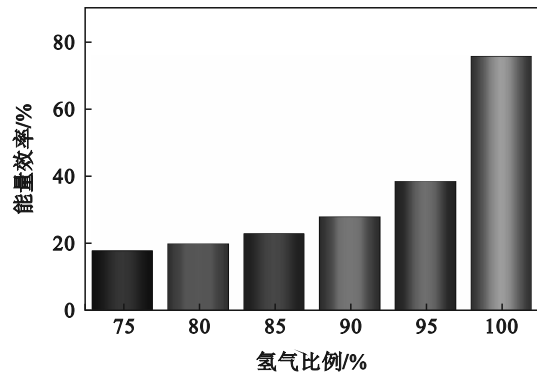


图 14 不同氢气比例下的能量效率

Fig. 14 Energy efficiency under different hydrogen ratios

3 结 论

1) 后向台阶结构能够提高燃烧火焰的稳定性,增强燃烧效率.在气体入口速度为 3 m/s 时,氢气在具有 3 个后向台阶微燃烧器中可以燃烧的当量比范围 ($0.3 \sim 5.0$) 比具有 1 个后向台阶微燃烧器中可以燃烧的当量比范围 ($0.5 \sim 4.6$) 大.

2) 后向台阶结构提高了微燃烧器的外壁面平均温度,降低了壁面温度的均匀性.在气体入口速度 3 m/s 时,氢气在具有 3 个后向台阶微燃烧器中燃烧时的外壁面平均温度最大,为 1040 K ; 其外壁面温差为 230 K ,比具有 1 个后向台阶微燃烧器的外壁面温差大了 47 K .

3) 气体入口速度为 2 m/s ,氢气比例在 $75\% \sim 100\%$ 之间时,外壁面平均温度及能量输出先增大后减小,在氢气比例为 90% 时最大.氢气比例为 90% 时,外壁面温差约为 245 K ; 外壁面平均温度约为 949 K .

4) 氢气比例在 $80\% \sim 90\%$ 之间时,甲烷的加入既可以明显减缓氢气的燃烧反应速率,使燃烧更稳定,又可以获得高的外壁面温度及能量效率.

参考文献:

[1] Yang W M, Chou S K, Shu C, et al. Development of a prototype micro-thermophotovoltaic power generator [J].

