

文章编号:1672-9331(2020)04-0100-06

微型多孔介质燃烧器内非预混合成气燃烧特性研究

姜昌伟,李韬海,刘 星,江 怡

(长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要: 微型燃烧器是微型热光电系统(micro-thermophotovoltaic, MTPV)的重要组成部分,其外壁温度的高低及均匀性对 MTPV 系统的能源转换效率有重要影响。本研究提出了一种新型微型多孔介质燃烧器,该燃烧器通过在微型燃烧器内设置多孔介质来增强热量的传递,使更多的热量实现了有效循环,从而提高了燃烧器的换热性能;应用数值模拟方法研究了微型多孔介质燃烧器内 H_2 -CO- CH_4 非预混合成气的燃烧特性,分析了多孔介质、燃料质量流量、当量比及外部环境对燃烧器外壁温度、中心温度及火焰位置的影响。研究结果表明:与自由火焰微型燃烧器相比,微型多孔介质燃烧器具有更高的外壁温度和更低的火焰温度;在当量比为 1 时,微型多孔介质燃烧器具有最高的外壁温度;外壁温度与对流传热系数之间呈线性变化规律。

关键词: 微型燃烧器;多孔介质;非预混合成气;燃烧特性;外壁温度;数值模拟

中图分类号:TK124

文献标志码:A

Study on combustion characteristics of non-premixed syngas in micro porous medium combustor

JIANG Chang-wei, LI Tao-hai, LIU Xing, JIANG Yi

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The micro combustor is an important part of micro-thermophotovoltaic(MTPV) system, the outer wall temperature and its uniformity of combustor have an important influence on energy conversion efficiency of MTPV system. A new type of micro porous medium combustor was proposed in this study. The heat-transfer performance is improved by setting porous medium in micro combustor, and more heat circulates effectively. The combustion characteristics of H_2 -CO- CH_4 non-premixed syngas in micro porous medium combustor were studied by numerical simulation. The effects of porous medium, fuel mass flow rate, equivalence ratio and external environment on outer wall temperature, center temperature and flame position of combustor were analyzed. The study results show that compared with free flame micro combustor, micro porous medium combustor has higher outer wall temperature and lower flame temperature. When the equivalence ratio is 1, the outer wall temperature of micro porous medium combustor reaches the peak. The relationship between the outer wall temperature and the convection heat-transfer coefficient presents a linear change rule.

Key words: micro combustor; porous medium; non-premixed syngas; combustion characteristic; outer wall temperature; numerical simulation

收稿日期:2020-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572056);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3533)

通讯作者:姜昌伟(1973-),男,浙江衢州人,长沙理工大学教授,主要从事传热传质理论方面的研究。

E-mail: jiangcw@csust.edu.cn

微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)和微制造技术等新技术的迅速发展极大加速了人类生活中设备的小型化,这些小型化设备需要紧凑、使用寿命长且能够提供几毫瓦到几百瓦功率的可立即充电电源。如微型热光电(micro-thermophotovoltaic, MTPV)系统,其作为一种微型动力装置,利用气体燃料燃烧的热能激发微型辐射器外壁面产生热辐射,然后被热光电元件接收并转换为电能。微型燃烧器是 MTPV 系统的核心部件,其燃烧特性直接影响着 MTPV 系统的输出效率^[1-2]。因此,要想提高 MTPV 系统的能源转换效率,一方面必须提高微型燃烧器的外壁温度,另一方面必须使外壁温度更均匀。

Li 等^[3]研究表明微型燃烧器内热再循环、局部回流与合适的外部温度可以提高燃烧的稳定性。王明昊等^[4]发现增大微型燃烧器阻塞比能产生更大的回流区,有利于稳定火焰,但也使钝体附近的速度梯度有所增大,进而引起流体剪切力加大,反应区拉伸,不利于稳定燃烧。李欣婷等^[5]利用铂催化二甲醚微型燃烧,发现当量比和入口温度对微型燃烧器的热循环有重要影响。

近年来,关于 MTPV 系统的研究更多地集中在对微型燃烧器的热性能与燃烧特性的研究上^[6]。Tang 等^[7]通过对三种碳氢燃料燃烧特性的分析,研究了燃料在微型平面燃烧器中的适用性。Ansari 等^[8]开发出一种内置折流档板的新微型燃烧器,不仅使平均外壁温度有所升高,而且使外壁温度更均匀。Ziani 等^[9]发现外部环境压力的增大会减少轴向和径向的膨胀火焰,并导致火焰温度略有上升。Kim 等^[10]研究了非预混甲烷与空气微型罐状燃烧器中的反应流(该燃烧器带有七孔挡板),并通过转化率和热损失讨论了燃烧效率。

多孔介质由于具有高导热率、高热容量和高发射率而被认为是一种非常有前途的固体基质,并被广泛应用于燃烧领域。许多学者研究发现:在微型燃烧器中添加多孔介质可以加速热量传递,增强火焰稳定性,使其具有更高的外壁温度和更低的火焰温度;同时,多孔介质的孔隙率、填充位置与宽度会影响微型燃烧器的燃烧性能^[11-12]。Peng 等^[13]研究了壁面厚度及多孔介质对微型圆

柱形燃烧器传热性能的影响。刘宏升等^[14]通过试验发现带有预热系统的多孔介质燃烧器能使火焰呈稳定的层状分布,且可以实现自维持燃烧。多孔介质对污染物的控制也能发挥较大的作用。户英杰等^[15]的研究表明,多孔介质不仅提高了燃烧效率,同时对污染物的排放起到了抑制作用。

微型燃烧器换热性能对 MTPV 系统的发展起着至关重要的作用,而多孔介质是增强微型燃烧器内部换热性能的有效方法之一。本研究提出了一种新型微型多孔介质燃烧器,其利用四段管道在燃烧前将燃料与空气充分预混,同时在燃烧室内填充多孔介质以提高燃烧器的外壁温度;分析讨论了多孔介质、燃料质量流量、当量比及外部环境对微型多孔介质燃烧器内 H_2 -CO- CH_4 合成气的燃烧特性与传热性能的影响。

1 数学物理模型

1.1 数学模型

本研究中燃料为 H_2 -CO- CH_4 合成气。将微型多孔介质燃烧器内 H_2 -CO- CH_4 非预混合成气与空气视为连续性流体,同时由于 H_2 -CO- CH_4 非预混合成气与空气的流速较低,可忽略体积力和能量耗散。微型多孔介质燃烧器内 H_2 -CO- CH_4 非预混合成气与空气燃烧的基本控制方程包括连续性方程、动量守恒方程、组分守恒方程和壁面能量守恒方程,气体密度按理想气体取值。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\varphi\rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi\rho_g u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

式中: φ 为多孔介质孔隙率, $\varphi=0.8$; ρ_g 为气体密度; u_i 为 x_i 的速度分量, $i=1,2,3$ 。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\varphi\rho_g u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi\rho_g u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(\varphi p)}{\partial x_i} + S_i. \quad (2)$$

式中: p 为压力; t_{ij} 为应力张量; S_i 为基于达西定律的压力损失的源项。公式(2)仅适用于多孔介质。对于均匀多孔介质, S_i 表示为:

$$S_i = -\left(u_i \frac{\mu}{\alpha} + \frac{1}{2} c \rho_g |u_i| u_j\right). \quad (3)$$

式中： α 为渗透率； c 为惯性阻力系数； μ 为动力黏度。 α 和 c 由下述半经验公式计算得出：

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} \tag{4}$$

$$c = \frac{3.5}{D_p} \frac{(1-\varphi)}{\varphi^3} \tag{5}$$

式中： D_p 为多孔介质颗粒的平均直径。

组分守恒方程：

$$\frac{\partial(\varphi \rho_g Y_l)}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi \rho_g u_l Y_l)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varphi \rho_g D_{m,l} \frac{\partial x_l}{\partial x_j} \right) + \sum R_l \tag{6}$$

式中： Y_l 为组分 l 的质量分数； R_l 为组分 l 的净产生率； $D_{m,l}$ 为组分 l 的扩散系数。

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\varphi \rho_g H)}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi \rho_g u_i H)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_e \frac{\partial T_g}{\partial x_j} \right) + S_h \tag{7}$$

式中： λ_e 为有效热导率（多孔区域由集总参数表示）； T_g 为气体混合物和多孔介质固体基质温度； H 为焓； S_h 为化学反应热和其他热源之和。

壁面能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x_i} \right) = 0 \tag{8}$$

式中： λ_w 为壁面热导率； T_w 为壁面温度。

理想气体方程：

$$p = \rho_g R_0 T_g \sum \frac{Y_l}{W_l} \tag{9}$$

式中： R_0 为通用气体常数。

1.2 物理模型

微型多孔介质燃烧器尺寸对燃烧器燃烧性能及热损失有重要影响。图 1 为微型多孔介质燃烧器的几何形状。为了提高反应物的混合性能与反应效率，微型多孔介质燃烧室设置有射入管 A、混合管 B、扩散管 C、收缩管 D 和燃烧室。燃烧室铺设碳化硅小球，燃烧器壁面材料为钢。微型燃烧器总长度为 17 mm，燃料进气口直径为 0.4 mm，空气进气口内径和外径分别为 0.6 mm 和 0.862 mm。空气进气口面积与燃料进气口面积相同。微型燃烧器出口直径为 1.2 mm，燃料与空气混合段长度为 3.5 mm，燃烧器外壁厚度为 0.2 mm。

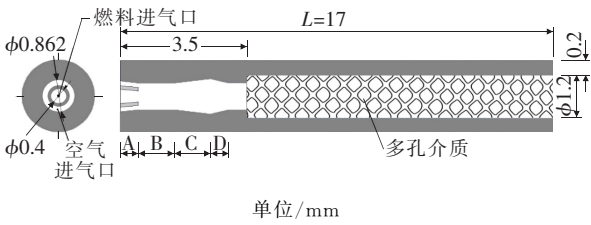


图 1 微型多孔介质燃烧器几何形状

Fig. 1 Geometry of micro porous medium combustor

数值模拟湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型，辐射传热模型采用 DO 模型。燃料与空气进气口边界为质量流量入口，出口边界为压力出口，反应气体为理想气体。环境压力和温度分别为 101 325 Pa 和 298 K。另外，燃烧器壁面发射率 $\epsilon=0.8$ ，燃烧器与环境间对流传热的表面传热系数 $h=20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

微型多孔介质燃烧器网格模型如图 2 所示。取三种网格数分别为 292 800, 763 200, 921 740。在相同工况下，研究网格数对数值模拟结果的影响，并进行网格无关性验证。发现当网格数大于 763 200 时，燃烧器中心温度与三个径向出口温度的温差很小。因此，综合考虑计算精度与计算时间，本研究选取网格数为 763 200 进行燃烧特性与传热性能的研究。



图 2 微型多孔介质燃烧器网格模型

Fig. 2 Mesh model of micro porous medium combustor

1.3 模型验证

为验证数学模型的准确性，本研究以 Li 等^[16]的试验结果为基准，对相同参数条件下的模拟数据进行比对。图 3 给出了本研究数值模拟结果与文献[16]试验结果的对比情况。分析图 3 可知：数值模拟结果与试验结果吻合良好，最大相对误差为 8.2%，数值模拟结果的平均温度比文献[16]试验结果的高 25 K。这说明本研究的数学模型是准确的。

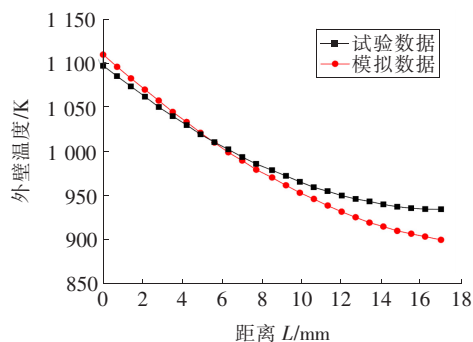


图 3 燃烧器外壁温度数值模拟与试验结果比较

Fig. 3 Comparison between numerical simulation and experimental results of outer wall temperature of combustor

2 结果分析与讨论

2.1 多孔介质对燃烧特性与传热性能的影响

对于有无多孔介质两种情况,为了使燃料燃烧特性的对比具有可比性,两种燃烧器燃料与空气进气口的质量流量分别取相同值,即取相同的进气口燃料质量流量 m_f 和当量比 Ψ 。图 4 给出了有无多孔介质的微型燃烧器内温度场的对比情况。分析图 4 可知,一方面,多孔介质使更多的热量通过固体基质传递到壁面;另一方面,在多孔介质燃烧器内燃烧发生在骨架间的微小空隙中,燃烧火焰不再是传统的锋面火焰,而是分离的小火焰,这就使燃烧反应区有所拓宽。因此,与无多孔介质相比,在有多孔介质的微型燃烧器燃烧室内温度梯度有所减小,温度分布更加均匀。

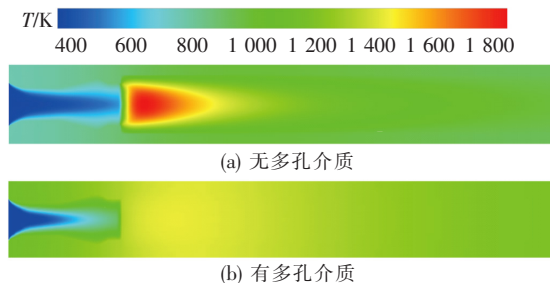


图 4 有无多孔介质的微型燃烧器内温度场对比

Fig. 4 Comparison of temperature fields in micro combustor with or without porous medium

图 5 给出了有无多孔介质的微型燃烧器内中心与外壁温度分布的对比情况。分析图 5 可知,对于有无多孔介质的两种情况,微型燃烧器中心

温度在混合段几乎完全重合。无多孔介质燃烧器中心最高温度要高于有多孔介质燃烧器中心最高温度,且在 $L=7$ mm 之后,无多孔介质燃烧器外壁温度低于有多孔介质燃烧器外壁温度,这是由于多孔介质良好的导热性能与高温辐射性能让燃烧区域内的热量迅速向外壁面传递。

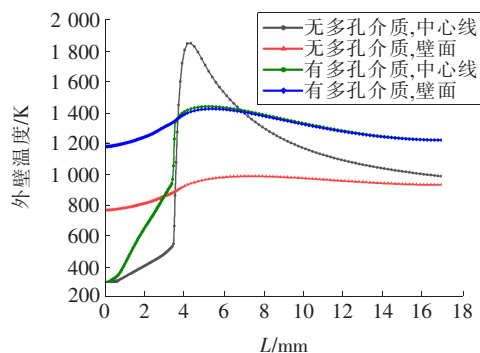


图 5 有无多孔介质的微型燃烧器中心与外壁温度分布对比

Fig. 5 Comparison of center and outer wall temperature distribution in micro combustor with or without porous medium

2.2 燃料质量流量与当量比对燃烧特性与传热性能的影响

燃料质量流量 m_f 与当量比 Ψ 是影响多孔介质燃烧器内温度分布最重要的参数。为探讨燃料质量流量对燃烧特性的影响,本研究比较分析了 4 种燃料质量流量,分别为 1.2×10^{-7} , 1.5×10^{-7} , 1.8×10^{-7} , 2.0×10^{-7} kg/s。图 6 显示了燃料质量流量和当量比对燃烧器外壁温度分布的影响。分析图 6 可知,随着 H_2 -CO- CH_4 合成气质量流量的增大,燃烧过程释放的热量增多,燃烧器外壁温度增高,但燃料质量流量不影响燃烧器外壁温度的分布规律,在不同燃料质量流量下燃烧器外壁温度等温线的形状比较接近。

图 7 至图 9 分别给出了燃料质量流量和当量比对燃烧最高温度和火焰位置的影响。从图 7 与图 8 可以看出,当量比为 1 时的燃烧最高温度高于当量比为 0.9 和 1.1 时的燃烧最高温度。这是由于当量比为 1.1 时空气进气量小于理论空气量,导致燃料燃烧不充分,造成燃烧最高温度低于充分燃烧时的最高温度。当量比为 0.9 意味着在燃料质量流量一定的情况下,更多的未预热空气进入燃烧器使得单位质量燃料放出的热量不能有

效提升燃烧最高温度,从而出现燃烧最高温度低于当量比为1时的燃烧最高温度。从图7与图9

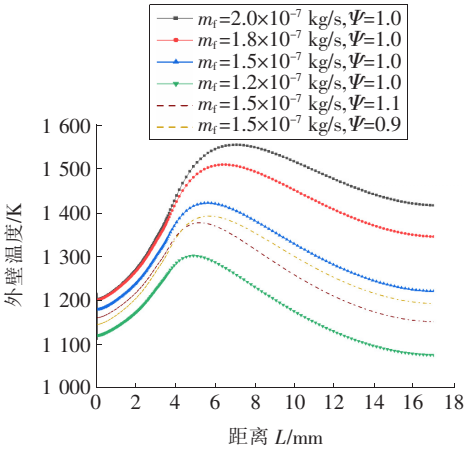


图 6 燃料质量流量及当量比对燃烧器外壁温度分布的影响

Fig. 6 Influence of fuel mass flow rate and equivalent ratio on temperature distribution of outer wall of combustor

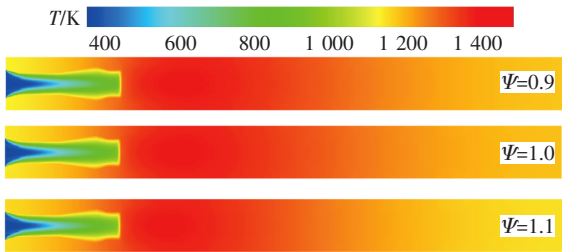


图 7 当量比对燃烧器内温度分布的影响
($m_f = 1.5 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$)

Fig. 7 Influence of equivalence ratio on temperature distribution in combustor($m_f = 1.5 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$)

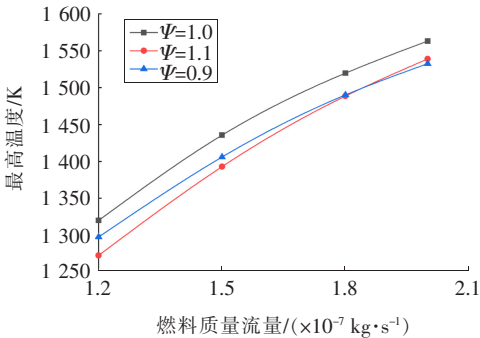


图 8 燃料质量流量及当量比对燃烧器内最高温度的影响

Fig. 8 Influence of fuel mass flow rate and equivalent ratio on maximum temperature in combustor

可以看出,在当量比为 1.1 时火焰位置前移,这是由于空气进气量减少使得火焰位置靠前;在当量比为 0.9 时,火焰位置出现了往后移动的现象,这是由于空气流量的增加使得气流的流动速度比火焰的传播速度快。

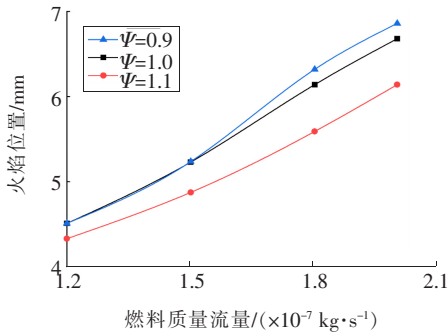


图 9 燃料质量流量和当量比对燃烧器内火焰位置的影响

Fig. 9 Influence of fuel mass flow rate and equivalent ratio on flame position in combustor

2.3 外部热环境对燃烧特性与传热性能的影响

图 10 给出了对流传热系数对燃烧器内温度分布的影响。随着对流传热系数的增大,壁面热损失增大,燃烧着火位置前移,燃烧器温度分布梯度与外壁温度整体降低。图 11 显示了对流传热系数对微型燃烧器外壁温度的影响。燃烧器外壁温度随着对流传热系数的减小而上升,这是由于能量损失的减少使燃烧器外壁温度更高。同时,随着燃料质量流量的减小,燃烧所释放的总能量减少,传递给外部环境的热量相应减少,从而减弱了对流传热系数对燃烧器外壁温度的影响。

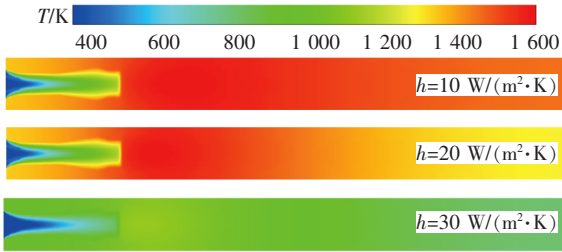


图 10 对流传热系数对燃烧器内温度分布的影响($m_f = 1.2 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$)

Fig. 10 Influence of convective heat-transfer coefficient on temperature distribution in combustor
($m_f = 1.2 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$)

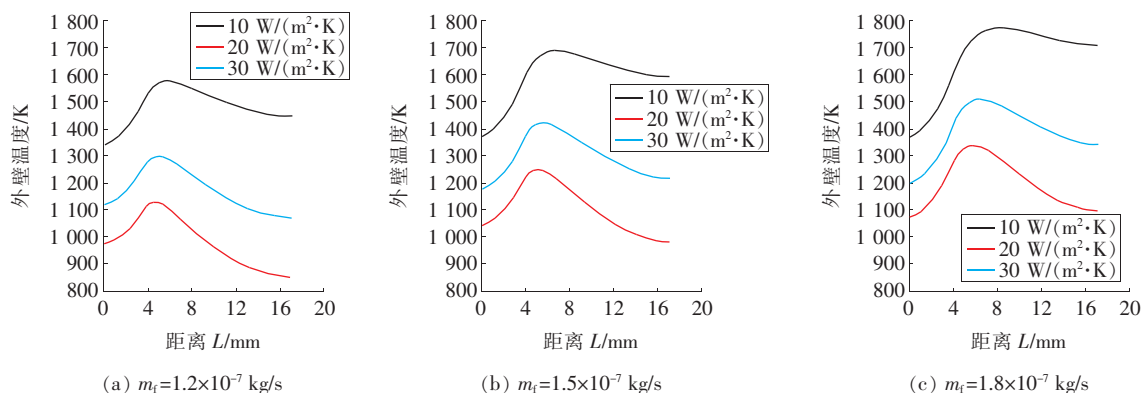


图 11 对流传热系数对燃烧器外壁温度的影响

Fig. 11 Influence of convective heat-transfer coefficient on outer wall temperature in combustor

3 结论

本研究采用数值模拟方法研究了微型多孔介质燃烧器内 H_2 -CO- CH_4 非预混合成气的燃烧特性,并探究了多孔介质、燃料质量流量、当量比及外部环境对燃烧器内燃料燃烧特性与传热性能的影响,得到如下结论:

1) 微型燃烧器内置的多孔介质拓宽了燃料燃烧反应区域,使燃烧器内温度分布更加均匀,从而提高了微型燃烧器的外壁温度;燃料质量流量的增大提高了燃烧器的整体温度,但火焰位置随着燃料质量流量的增大而后移;在当量比为 1 时,微型燃烧器内燃料燃烧具有最佳的燃烧特性与外壁温度分布。

2) 外部环境对微型多孔介质燃烧器换热性能的影响较大,燃烧器外壁温度与对流传热系数总体上呈线性变化关系。随着对流传热系数的增大,燃烧器温度分布梯度与外壁温度整体降低,同时燃烧着火位置前移。

〔参考文献〕

[1] Bani S, Pan J, Tang A, et al. Micro combustion in a porous media for thermophotovoltaic power generation[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 596-605.

[2] Cui D, Ji Y, Chang C, et al. Influence of fuel flow rate on the performance of micro tubular solid oxide fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(24): 459-468.

[3] Li X, Huang Y, Zhao D, et al. Stability study of a nonlinear thermoacoustic combustor: effects of time decay, acoustic loss and combustion-flow interaction index[J]. Applied Energy, 2017, 199: 217-224.

[4] 王明昊, 王飞飞, 王劲勃. 回流与火焰拉伸对氢气微尺度燃烧的影响[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(9): 127-132.

WANG Ming-hao, WANG Fei-fei, WANG Jin-bo. Impact of backward flow and reaction stretch on combustion stability of hydrogen/air mixture in a micro-combustor[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2019, 47(9): 127-132.

[5] 李欣婷, 邓尘, 杨卫娟, 等. 微型填充床燃烧器中二甲醚的铂催化燃烧数值模拟[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 50-54.

LI Xin-ting, DENG Chen, YANG Wei-juan, et al. Numerical simulation of dimethyl ether catalytic combustion over platinum in a micro-scale packed bed combustor[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 50-54.

[6] Lu Q, Pan J, Yang W, et al. Effects of products from heterogeneous reactions on homogeneous combustion for H_2/O_2 mixture in the micro combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 897-903.

[7] Tang A, Xu Y, Shan C, et al. A comparative study on combustion characteristics of methane, propane and hydrogen fuels in a micro combustor[J]. Hydrogen Energy, 2015, 40(46): 16 587-16 596.

[8] Ansari M, Amani E. Micro-combustor performance enhancement using a novel combined baffle-bluff configuration [J]. Chemical Engineering Science, 2018, 175: 243-256.

(下转至第 113 页)

- 及试验[J]. 机床与液压,2018,46(11):119-122.
- CHEN Ming-dong. Pressure design and test of accumulator in potential energy recovery system of excavating mobile arm [J]. Machine Tool and Hydraulics,2018,46(11):119-122.
- [11] 齐秀丽,王汉文. 液压挖掘机动臂液压系统的节能研究[J]. 机床与液压,2017,45(3):185-188.
- QI Xiu-li, WANG Han-wen. Research on energy saving of hydraulic system of hydraulic excavator manipulator [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2017,45(3):185-188.
- [12] 熊艳梅,冯倩. 液压挖掘机动臂下降势能回收技术探究[J]. 现代制造技术与装备,2017(6):137,139.
- XIONG Yan-mei, FENG Qing. Research on recovery technology of descending potential energy of hydraulic excavating mobile arm[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017 (6): 137,139.
- [13] 陈明东,赵丁选. 液压挖掘机可回收潜能研究[J]. 机床与液压,2016,44(9):65-68,34.
- CHEN Ming-dong, ZHAO Ding-xuan. Research on recoverable potential of hydraulic excavator[J]. Machine Tool and Hydraulics,2016,44(9):65-68,34.
- [14] 娄帅. 混合动力液压挖掘机动臂液压系统的势能回收研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2018.
- LOU Shuai. Research on potential energy recovery of hydraulic system of hybrid hydraulic excavator manipulator[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2018.
- [15] 权龙,夏连鹏,赵斌,等. 液压驱动机械臂势能回收利用研究工作进展[J]. 机械工程学报,2018,54(20):4-13.
- QUAN Long, XIA Lian-peng, ZHAO Bin, et al. Research progress of potential energy recovery and utilization of hydraulically driven manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(20):4-13.
-
- (上接第 105 页)
- [9] Ziani L, Chaker A. Ambient pressure effect on non-premixed turbulent combustion of CH_4 - H_2 mixture [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016,41(27):11 842-11 847.
- [10] Kim W, Park T. Effects of noncircular air holes on reacting flow characteristics in a micro combustor with a seven-hole baffle[J]. Applied Thermal Engineering,2016,100:378-391.
- [11] Li J, Li Q, Wang Y, et al. Fundamental flame characteristics of premixed H_2 -air combustion in a planar porous micro-combustor [J]. Chemical Engineering Journal,2016,283:1 187-1 196.
- [12] Li J, Wang Y, Chen J, et al. Experimental study on standing wave regimes of premixed H_2 -air combustor in planar micro combustors partially filled with porous medium[J]. Fuel,2016,167:98-105.
- [13] Peng Q G, E J Q, Chen J W, et al. Investigation on the effects of wall thickness and porous media on the thermal performance of a non-premixed hydrogen fueled cylindrical micro combustor[J]. Energy Conversion and Management,2018,155:276-286.
- [14] 刘宏升,王松祥,刘林,等. 电预热多孔介质燃烧器内柴油燃烧的试验研究[J]. 上海交通大学学报,2019,53(10):1 204-1 209.
- LIU Hong-sheng, WANG Song-xiang, LIU Lin, et al. Experimental study on combustion of diesel oil in an electric preheating porous medium burner[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(10):1 204-1 209.
- [15] 卢英杰,王志强,程星星,等. 燃烧处理挥发性有机污染物的研究进展[J]. 化工进展,2018,37(1):319-329.
- HU Ying-jie, WANG Zhi-qiang, CHENG Xing-xing, et al. Recent progress in the removal of volatile organic compounds by combustion[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37 (1): 319-329.
- [16] Li J, Li Q Q, Wang Y T, et al. Fundamental flame characteristics of premixed H_2 -air combustion in a planar porous micro combustor[J]. Chemical Engineering Journal,2016,283:1 187-1 196.