

回热型燃烧辐射器性能实验研究

陆游,刘明侯,徐侃,张龙,许胜

(中国科学技术大学热科学与能源工程系,安徽合肥 230027)

摘要:利用多孔介质高热容和良好的导热特性,设计了带回热侧面辐射式 SiC 多孔介质燃烧辐射器,研究当量比、功率对燃烧辐射器的热负荷、燃烧稳定范围、表面温度均匀性和辐射效率的影响。研究表明:当量比一定时,提高燃烧功率可增大燃烧器表面温度和降低表面温度梯度;功率一定时,存在最佳当量比使得辐射器表面温度梯度最低。回热器可以提高辐射器表面温度均匀性和辐射效率;当量比与功率对多孔介质燃烧器辐射效率都有较大影响。小功率时,功率增大导致辐射效率增加明显。燃烧辐射器功率一定时,存在一个最佳当量比使得辐射效率最佳。本实验研究的燃烧辐射器无回热功率为 7.0 kW,当量比为 0.75 时辐射效率最高达 34.7%;回热后最佳当量比降低到 0.54,其对应的辐射效率提高到 36.9%。

关键词:多孔介质;辐射器;燃烧器

中图分类号:TK16 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.07.013

Experimental study on performance of SiC porous medium radiator

LU You, LIU Minghou, XU Kan, ZHANG Long, XU Sheng

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A SiC porous medium radiator (PMR) with heat recuperator was built and its performance was experimentally studied. The effect of equivalence ratio and combustion power on ignition, combustion characteristics and radiant efficiency were evaluated. The results indicate that increasing the combustion power can lead to higher surface temperature and lower temperature gradient at a fixed equivalence ratio, and that there is an optimal equivalence ratio at which the lowest gradient is gained at a fixed power. Assisted with heat recuperator, uniformity of surface temperature along the axial direction and radiant efficiency increase. Equivalence ratio and combustion power have significant effect on radiant efficiency. At low power, increasing power results in obvious augment in radiant efficiency. There is an optimal equivalence ratio leading to a perfect radiant efficiency for a given operating power. The setup in this paper can gain a radiant efficiency as high as 34.7% at power 7.0 kW and equivalence ratio 0.75 without thermal recuperation. With heat recuperation, however, the optimal equivalence ratio drops to 0.54 and the corresponding radiant efficiency reaches 36.9%.

Key words: porous medium; radiator; combustor

收稿日期:2009-12-21;修回日期:2010-05-01

基金项目:中国高技术研究发展(863)计划(2007AA05Z236)资助。

作者简介:陆游,男,1986年生,硕士。研究方向:多孔介质燃烧。E-mail: lycheery@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:刘明侯,博士/副教授。E-mail: mhliu@ustc.edu.cn

0 引言

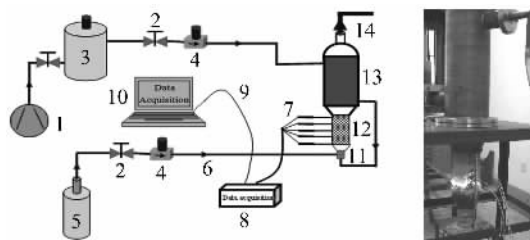
20 世纪 60 年代, Aigrain^[1] 提出了将高温热辐射体发出的辐射能量通过光伏电池(PV)转化为电能的 TPV(Thermophotovoltaic)系统. 由于多孔介质燃烧器具有燃烧效率高、污染物排放低、温度均匀性好、燃烧稳定等优点^[2-4], Adair 等^[5] 提出将多孔介质燃烧技术用于 TPV 系统中, 将燃烧的热能转化为辐射体的辐射能, 再利用热光伏电池接受辐射, 转化为电能. 作为 TPV 系统的核心部件, 多孔介质燃烧辐射器表面温度的均匀性和辐射效率一直是研究者关注的重点. Marc 等^[6] 在多孔介质燃烧器下游出口处加入一层催化剂进行实验, 并进行数值模拟, 研究发现: 加入催化剂有利于增大燃烧热释率, 降低上下游的温差, 获得较好辐射效果; 在当量比为 0.87 时, 该系统获得的最高辐射效率为 28.2%. Qiu 和 Hayden^[7] 利用多孔介质燃烧加热一块选择性辐射板作为 TPV 热源, 并在系统中使用了回热, 实验结果证明了加入回热器可以有效提高辐射效率, 但是由于系统较小, 辐射效率不超过 20%. 2007 年 Qiu 和 Hayden^[8] 发展了一种级联辐射器, 将高温辐射区的辐射能量用于高能带隙的硅太阳能电池, 低温辐射能量用于低能带隙的铟化镓电池. 燃烧热的这种级联利用增大了辐射效率, 使得两级辐射效率总和达 30.96%. 2009 年他们^[9] 又通过实验验证了增大燃烧空气中氧气的浓度也可以提高辐射效率, 但是辐射效率提高的幅度不大, 而且增加了系统的复杂度. Barra 等^[10] 对双层多孔介质燃烧器的辐射输出效率进行了研究, 并分析了不同燃烧器尺寸和燃烧器工作参数对辐射输出效率的影响.

以上研究的重点在于: ①如何通过组织高效燃烧获得高温且温度均匀的辐射热源; ②通过选择性辐射表面和级联辐射器概念, 提高能量利用效率. 本文设计了带回热的侧面辐射式 SiC 多孔介质燃烧辐射器, 实验采用丙烷为燃料, 研究大功率燃烧时多孔介质燃烧辐射器(PMR)外壁面的温度分布和辐射特性, 并研究当量比、燃烧功率、孔隙率等因素对燃烧辐射器壁面温度均匀性、辐射效率和燃烧稳定性的影响.

1 实验装置

实验系统流程如图 1(a)所示. 空气压缩机把新鲜空气注入储气罐作为稳定的空气源, 经回热器加

热后与燃气丙烷进入预混腔充分混合. 混合气再经陶瓷多孔板后在 SiC 泡沫多孔介质燃烧器内组织燃烧. 燃尽气在回热器里跟新鲜冷空气发生热交换, 最后排出. 图 1(b)为实验装置实物图.



(a) 流程图

(b) 带回热的实验装置图

1. 气泵 2. 阀 3. 稳压罐 4. 气体流量计 5. 丙烷钢瓶 6. 丙烷进气管
7. 热电偶 8. 数据采集仪 9. 控制线 10. 计算机 11. 预混腔
12. 多孔介质燃烧器 13. 回热器 14. 尾气管道

图 1 实验装置图

Fig. 1 Flow chart of PMR

辐射表面为 SiC 多孔介质燃烧器的侧面. 实验采用的多孔介质的直径和长度分别为 110 mm 和 170 mm, 其孔密度为 10PPI. 由于回热后的气体温度较高, 为了防止预混气在混合腔中燃烧, 设计中要求混合腔空间小, 流速较高. 混合腔下游直接连接氧化铝(Al_2O_3)小球堆积的多孔介质扩张段. 混合气体经扩张段进入陶瓷多孔板分布器, 均匀地进入 SiC 多孔介质区域组织燃烧. 沿多孔介质侧面, 等距布置 5 个 S 型热电偶; 另外, 在回热后的空气通道和回热器出口的燃尽气通道布置热电偶测量回热后空气的温度及尾气温度. 热电偶连接到 Agilent 34970A 数据采集仪, 以 10 s 的时间间隔对温度进行采集, 并利用 Agilent BenchLink Data Logger 软件在计算机上实时显示结果. 实验中 S 型热电偶测量精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$. 空气和燃料的流量采用北京七星华创公司的 D07 系列质量流量控制器调节, 其精度为 $\pm 1.5\%$.

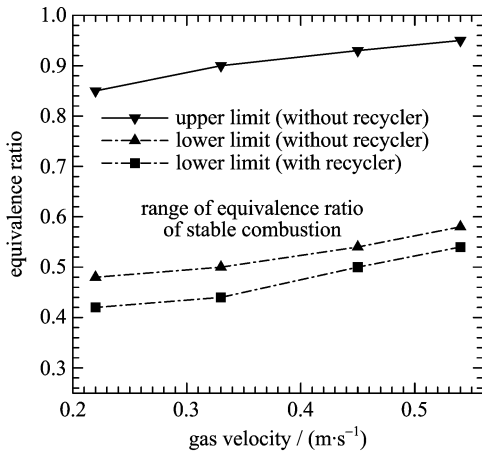
2 实验结果与讨论

2.1 燃烧器稳燃性能

采用孔密度为 10PPI 的多孔介质进行实验, 分析燃烧功率及当量比等对火焰稳定范围、温度分布、辐射效率等性能的影响. 由于燃烧器的尺寸一定, 其热负荷、熄火极限也一定, 因此实验首先测量燃烧器稳定燃烧条件.

假定气流速度一定, 当量比越大, 火焰稳定处温度越高. 为了使火焰驻定在多孔板下游, 则当量比有

一定的限制。当火焰驻定处温度高到一定值时,向上游传递的热量较大,导致上游温度较高,预混燃气在多孔板上游被点燃,发生回火;而当燃料浓度过低,则容易吹熄。如图2所示,随着气流速度的增加,该燃烧器稳定燃烧当量比范围有所偏移,回火点升高了11.8%,吹熄点升高了20.8%。总体看,当量比在0.95到0.48范围内,该燃烧器都能组织非常稳定的燃烧。有回热时,在各个燃烧速度下,稳定燃烧的吹熄当量比都比无回热的低,且最小当量比为0.42。可以看出,回热可以降低燃烧器稳定燃烧的贫燃极限,同时也使得燃烧器更加容易回火。



功率:7.0 kW; 孔密度:10 PPI

图2 燃烧器稳定性能

Fig. 2 Stable performance of combustion

2.2 当量比与功率对燃烧器轴向温度分布的影响

为研究功率一定时,当量比对多孔介质沿轴向温度分布的影响,在距离燃烧器侧表面径向2.0 cm深处布置热电偶。图3为燃烧功率7.0 kW且无回热时轴向温度分布随当量比的变化,保持燃料流率不变,通过改变空气流量来调节当量比。实验结果表明,当量比越大,轴向温差就越大。当量比0.95时,轴向温差达510 K,多孔介质内部轴向平均温度梯度为3.1 K/mm;当量比为0.58时,轴向温差为449 K,平均温度梯度为2.8 K/mm。比较发现,无回热情况下,当量比0.75时,多孔介质轴向温度梯度最小,为2.5 K/mm。图中还可以看出,随着当量比增加,峰值温度增大。当量比0.58时,最高温度为1380 K;当量比为0.95时,最高温度可达1590 K,两者最高温度相差210 K。

当量比为0.85时,改变燃烧器功率,考察功率对燃烧器轴向温度分布的影响。从图4可以发现,增

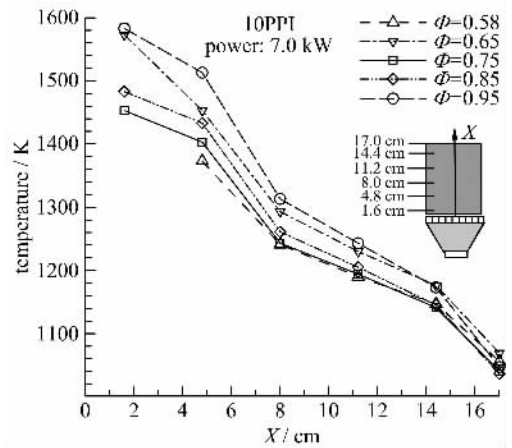


图3 轴向温度分布随当量比的变化

Fig. 3 Temperature profiles along axes direction for different equivalence ratio

大功率明显使多孔介质内部轴向温度升高。当功率为9.5 kW时,温度最高为1680 K。从图4中还可以看出,随着功率的增大,火焰驻定处的温度变化剧烈,而多孔介质出口处的温度变化相对较小。因此,功率增大后,多孔介质内部轴向温度差变大,即轴向温度平均梯度增大。当功率增加到9.5 kW以上后,最高温度升高趋势变缓。

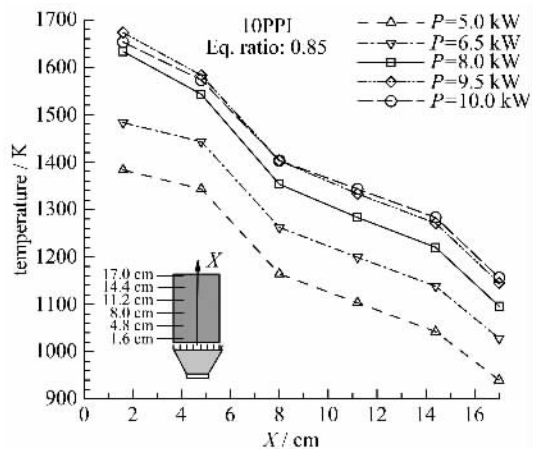


图4 轴向温度分布随功率的变化

Fig. 4 Temperature profiles along axes direction for different power

2.3 当量比与功率对燃烧器表面温度的影响

实际燃烧中,轻微的低燃能获得较完全的燃烧和较高的燃烧温度。因此,需要考虑当量比对燃烧器辐射表面温度分布的影响。图5给出了功率7.0 kW,10PPI的SiC多孔介质燃烧器侧面温度轴向分布随当量比的变化。图中发现,当量比为0.75时,测得的温度最高;当量比在0.85以上时,随着当量比

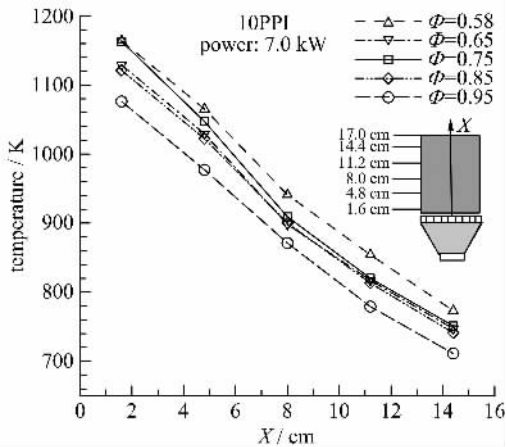


图 5 燃烧器表面轴向温度分布随当量比的变化
Fig. 5 Surface temperature profiles along axes for different equivalence ratio

的增大,温度有所降低.这个结果与燃烧器结构设计有关.因为当量比大于 0.85 时火焰面向上游移动,穿过多孔板进入预混腔内部,并稳定在多孔板上游位置;由于火焰驻定(最高温度)位置变化,测点温度有所下降.

实验还研究了功率对燃烧器温度分布的影响,如图 6 所示.固定当量比为 0.85,采用 10PPI 多孔介质,燃烧器表面温度随功率增大而增大,但当功率超过 9.5 kW 时,表面温度增高趋势变缓.可以发现,随着功率增大,表面温度差变小,即温度均匀性较好.如功率为 10.0 kW 时,温度的均匀性最好.这主要是由于当量比一定,功率增大时气体流速变大,高温气体跟固体换热增强,使得燃烧器内部的温度趋于均匀而减小了外壁面温度梯度.从图 6 中还可

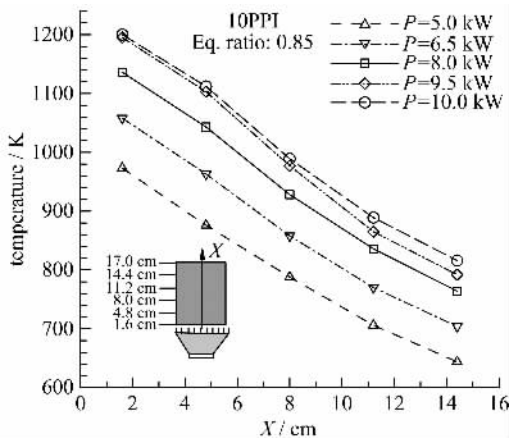


图 6 燃烧器表面轴向温度分布随功率的变化
Fig. 6 Surface temperature profiles along axes for different power

以看出,功率大于 9.5 kW 时,表面的温度分布随功率而变化的趋势变缓.

为了研究回热对燃烧性能的影响,实验还测量了功率为 7.0 kW 时,不同当量比条件下回热对温度分布的影响,如图 7 所示.从图中可以看出,回热后多孔介质表面温度比无回热时的温度高 40 K 左右.另外,当量比为 0.65,无回热时多孔介质轴向温差为 390 K,有回热时温差为 363 K.这说明在低当量比时,回热有利于辐射器表面温度的均匀分布.图 8(a)和(b)分别为当量比为 0.65、功率为 7.0 kW 时,无回热和有回热时燃烧器燃烧的状态图像.

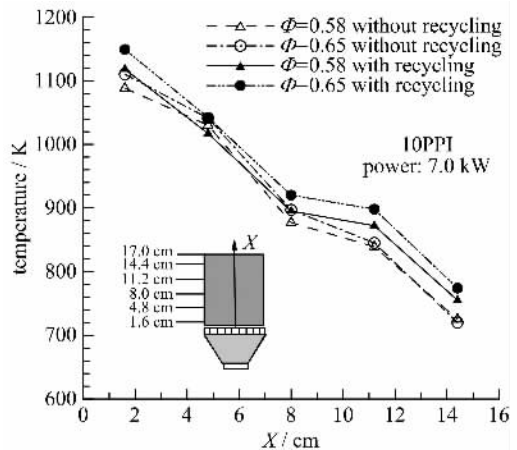


图 7 回热对辐射器表面温度的影响
Fig. 7 Effect of heat recycling on surface temperature

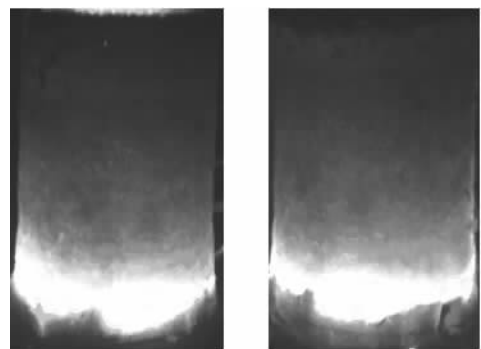


图 8 无回热与有回热时辐射器表面图像

Fig. 8 Comparison of non-recycling and heat recycling

2.4 燃烧器辐射性能

通过辐射器外表面的温度分布可以计算燃烧器表面的辐射能量,从而得到燃烧辐射器的辐射效率.多孔介质燃烧辐射器的辐射效率定义为:

$$\eta_{\text{radi}} \equiv \frac{E_{\text{out}}}{\rho V \Delta H_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中,分母为燃烧的释热量,其中 ρ 为常温常压下丙烷的密度, V 为丙烷的体积流量, ΔH_c 为丙烷的燃烧焓;分子 E_{out} 为燃烧器侧壁面向外辐射的能量. 鉴于侧面发出的辐射通量直接进入周围环境,因此可以认为是大环境中小物体的辐射. 由于侧壁面在轴向上存在温度梯度,因而需要在轴向方向分段计算辐射热流密度,总辐射能量为

$$E_{out} = \sum_i \epsilon \sigma (T_{surf,i}^4 - T_0^4) \Delta S_i \quad (2)$$

式中, ϵ 为辐射表面的发射率, SiC 的表面发射率随温度变化不大,认为是常数 0.87; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; $T_{surf,i}$ 和 T_0 分别为实验测得的辐射面的温度和环境的温度; ΔS_i 为对应于温度 $T_{surf,i}$ 的辐射面积. 因此,只要测量出辐射器表面轴向温度分布就可以通过式(2)计算出辐射能量,再利用式(1)计算辐射效率.

图 9 中给出了一定功率下辐射效率随当量比变化和当量比一定时随功率变化的两种情况. 由式(2)可知,当表面发射率取定值时,表面温度越高辐射功率越大. 但是辐射效率不仅与表面温度有关系,还与燃烧功率有关. 从图中圆点曲线可以看出,当量比小于 0.75 时,辐射效率随当量比增大而线性增加;当量比为 0.75 时,7.0 kW 功率的辐射效率最高,可以达到 34.7%. 继续增大当量比,辐射效率迅速减小. 这是因为燃烧功率增大,燃烧温度过高而发生回火,火焰位置驻定在多孔板上游,热流损失在扩张段增大,因此多孔介质表面温度降低,辐射效率降低.

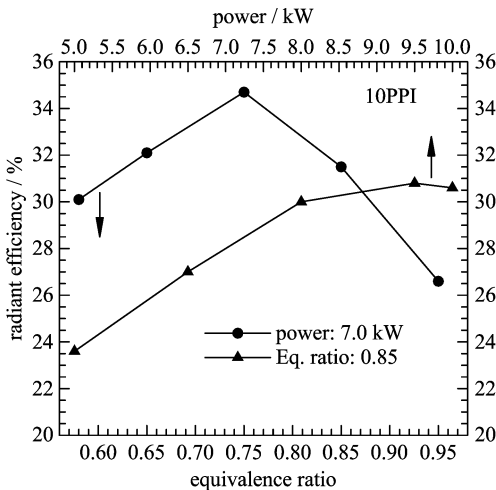


图 9 辐射效率随当量比和功率的变化

Fig. 9 Effect of equivalence ratio or power on radiation efficiency

燃烧功率也影响辐射器的辐射效率. 图 9 中实心三角形点给出当量比 0.85 时辐射效率随功率的变化情况. 从图中可以发现,当功率较低时 (< 8.0 kW), 功率增大燃烧器辐射效率增加明显. 但当功率增大到 9.5 kW 时,功率增大会导致辐射效率降低. 整个过程都没发生回火,说明该辐射器的热负荷在 9 kW 左右时候能获得比较理想的辐射效率. 因此,对于一个固定孔隙率的多孔介质,存在最佳功率和当量比使得辐射器具有最佳辐射效率.

研究中发现,回热可以明显增大辐射效率,尤其在小当量比时效果更明显. 如图 10 所示,有回热燃烧功率 7.0 kW 时,10PPI 的 SiC 多孔介质燃烧器最大辐射效率达 36.9%,其所对应的当量比为 0.54;当没有回热时,燃烧辐射器最大辐射效率为 34.7%,其对应的当量比是 0.75. 虽然二者稳定的当量比范围不一样,但有相同的趋势,即辐射效率都随当量比先增加后减小. 因此,回热不仅仅使得辐射效率增大,而且使最佳辐射效率所对应的当量比下降. 系统有回热器后,空气入口温度升高,导致燃烧器壁面温度升高,辐射能量密度增大. 在相同燃烧功率的条件下,辐射效率增加. 由于回热后,多孔介质内部温度升高导致其向上游预热来流能力加强,在更小当量比时火焰也能在多孔板下游处稳定,导致最佳辐射效率所对应的当量比降低. 因此,在不导致回火的条件下尽量提高回热温度有利于在更小当量比或更低功率条件下获得最大的辐射效率,提高能量利用率.

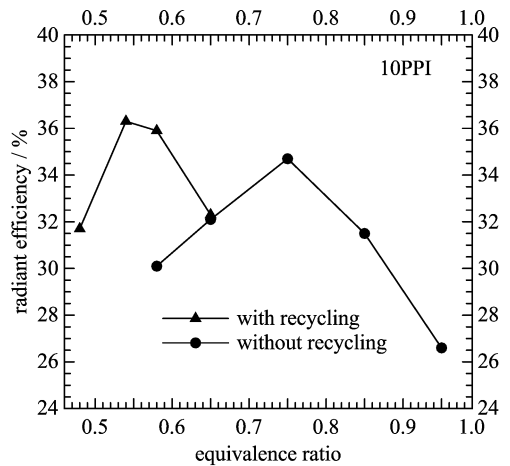


图 10 辐射效率随当量比的变化

Fig. 10 Effect of heat recycling on radiation efficiency

3 结论

本文设计了带回热 SiC 多孔介质燃烧辐射器, 利用圆柱形多孔介质侧面做 TPV 辐射源, 研究当量比、功率对燃烧器稳定范围、燃烧特性和辐射效率的影响, 主要结论如下:

(I) 当量比一定时, 增大燃烧器功率可以明显提高辐射器内部和表面的温度. 功率越小时, 增加趋势越明显. 当功率增加到一定值时, 辐射器表面温度上升趋势变缓, 还会导致回火.

(II) 功率一定, 大当量比有利于提高燃烧器内部或表面峰值温度, 但辐射表面温度梯度较大. 存在最佳当量比使辐射表面温度均匀性最好. 本文研究的燃烧器当功率为 7.0 kW、当量比 0.95 时, 峰值温度可达 1 590 K, 其辐射表面温度梯度达 3.1 K/mm; 当量比为 0.75 时, 表面温度均匀性最好, 其温度梯度仅为 2.5 K/mm.

(III) 增加回热环节可以提高辐射器表面温度均匀性和辐射效率. 在小当量比时, 回热可以使表面温度均匀性更好; 大当量比时, 燃烧器比不加回热环节时更加容易回火, 应当通过降低当量比和提高多孔介质孔隙率来防止回火. 本文研究的回热燃烧器当功率为 7.0 kW、当量比为 0.54 时, 辐射效率最高为 36.9%; 而在无回热条件下, 当量比为 0.75 时最高辐射效率仅为 34.7%.

参考文献(References)

- [1] Aigrain P. The Thermo-Photovoltaic Converter; Unpublished lectures given at Department of Electrical Engineering, M I T [R]. Cambridge, MA: MIT, 1 960-1 961.
- [2] Howell J R, Hall M J, Ellzey J L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1996, 22 (2): 121-145.
- [3] Hanamura K, Echigo R, Zhdanok S A. Superadiabatic combustion in a porous medium [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36 (13): 3 201-3 209.
- [4] Zhao Pinghui, Chen Yiliang, Liu Minghou et al. Numerical Simulation of Laminar Premixed Combustion in a Porous Medium [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(1):46-50.
赵平辉, 陈义良, 刘明侯, 等. 多孔介质内层流预混燃烧的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(1): 46-50.
- [5] Adair P L, Chen Z, Rose M F. TPV power generation prototype using composite selective emitters[J]. AIP Conf Proc, 1997, 401: 277-290.
- [6] Rumminger M D, Hamlin R D, Dibble R W. Numerical analysis of a catalytic radiant burner: effect of catalyst on radiant efficiency and operability [J]. Catalysis Today, 1999, 47:253-262.
- [7] Qiu K, Hayden A C S. Premixed gas combustion stabilized in fiber felt and its application to a novel radiant burner[J]. Fuel, 2006, 85: 1 094-1 100.
- [8] Qiu K, Hayden A C S. Thermophotovoltaic power generation systems using natural gas-fired radiant burners[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2007, 91:588-596.
- [9] Qiu K, Hayden A C S. Increasing the efficiency of radiant burners by using polymer membranes [J]. Applied Energy, 2009, 86: 349-354.
- [10] Barra A J, Ellzey J L. Heat recirculation and heat transfer in porous burners [J]. Combustion and Flame, 2004, 137: 230-241.