

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.039

微热光电系统中多孔介质燃烧室性能试验^{*}

潘剑锋¹ 张会峰¹ 唐爱坤¹ 李德桃¹ 丁建宁² 薛 宏³

(1. 江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学微米纳米技术研究中心, 镇江 212013;

3. 美国加州州立工业大学机械工程学院, 洛杉矶 CA91768, 美国)

【摘要】 为优化燃烧室, 设计加工了内径 2.4 mm、外径 3.0 mm 的多种不同孔隙率的多孔介质结构微燃烧室, 并在燃烧室内实现了氢氧混合气的稳定燃烧。改变氢氧体积混合比和混合气入口流量, 对多孔介质微燃烧室进行了相关试验, 分析了各种条件下微燃烧室的燃烧情况及外壁面的温度分布。研究表明, 这些因素对混合气在微燃烧室内的燃烧有重要影响。多孔介质燃烧室在孔隙率为 0.50, 混合气入口流量为 750 cm³/min, 氢氧体积混合比为 2:1 时燃烧效果较好, 外壁面温度高且分布均匀, 适合微热光电系统的应用。

关键词: 微热光电系统 微燃烧室 多孔介质 壁面温度 试验

中图分类号: TK5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0193-05

Experiment on Porous Media Combustor of Micro-thermophotovoltaic System

Pan Jianfeng¹ Zhang Huifeng¹ Tang Aikun¹ Li Detao¹ Ding Jianning² Xue Hong³

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Micro Nano Research Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

3. School of Mechanical Engineering, California Polytechnic State University, Los Angeles CA91768, USA)

Abstract

To improve the efficiency of the micro-thermophotovoltaic system, the radiation energy output of micro-combustor has to be uniform and possibly in the short-wave photon energy range, which requires high and uniform temperature along the micro-combustor's external wall. In order to further optimize the micro-combustor, different porous media combustors with the inner and external diameters of 2.4 mm and 3.0 mm were designed. After stable combustion of hydrogen and oxygen in the porous media combustors, experimental investigation was carried out against micro-combustor with different hydrogen-oxygen volume ratios, mixing gas flux and porosity, the combustion performance and external wall temperature distribution under different conditions were analyzed. The results indicated that the porosity, mixing gas flux and hydrogen-oxygen volume mixing ratio had significant effect on the mixture combustion in micro-combustor. When the porosity, mixing gas flux and hydrogen-oxygen volume mixing ratio were separately 0.50, 750 cm³/min and 2:1, the micro-combustor showed a better combustion performance, including high and uniform temperature distribution along the external wall of micro-combustor, which was suitable for application to micro-thermophotovoltaic system.

Key words Micro-thermophotovoltaic system, Micro-combustor, Porous media, Wall temperature, Experiment

收稿日期:2009-02-26 修回日期:2009-04-23

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50706016)、江苏省基础研究计划资助项目(BK2008245)、江苏省高校自然科学基金资助项目(07KJB470015)、江苏省“青蓝工程”资助项目和江苏大学“拔尖人才培养工程”资助项目

作者简介:潘剑锋,副教授,主要从事微尺度燃烧与微动力系统研究, E-mail: mike@ujs.edu.cn

引言

微热光电系统 (micro-thermophotovoltaic system)^[1-6] 是一种典型的微动力系统^[7-8], 它具有无运动部件, 清洁无污染, 制造加工简单, 能量密度高, 体积质量小等优点。微燃烧室作为微热光电系统的能量释放源, 其燃烧性能及能量转换效率直接决定了辐射能的输出与稳定, 从而影响到微热光电系统的整体效率及稳定性, 是微热光电系统最重要的部件之一。与自由火焰微燃烧室相比, 多孔介质微燃烧室具有火焰温度高, 燃烧速率大, 燃烧稳定性强, 燃烧效率高等优点^[9]。为优化微燃烧室设计, 改善微燃烧室燃烧性能, 提高微热光电转换装置的稳定性及工作效率, 设计加工外径仅为 3.0 mm 的颗粒填充型多孔介质结构微燃烧室。通过试验研究微燃烧室在不同孔隙率、混合气入口流量和氢氧体积混合比条件下的燃烧情况, 分析这些因素对微燃烧室燃烧性能的影响规律, 以期为微热光电系统的改进提供参考依据。

1 微热光电系统的工作原理

微热光电系统的基本原理是使用辐射器 (微燃烧室外壁面) 将微燃烧室在燃烧时所产生的热能转换为辐射能输出, 然后通过布置在微燃烧室周围的光电池将辐射能转换为电能输出。该系统主要由微燃烧室、发射器、选择性过滤器、GaSb 光电池组成, 其基本原理如图 1 所示。

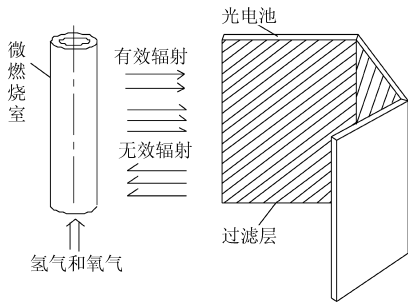


图 1 微热光电系统原理图
Fig. 1 Principle of micro-thermophotovoltaic system

氢气和氧气经减压阀减压后经混合器充分混合后由导管导入微燃烧室内进行燃烧反应。当微燃烧室壁面被加热到足够高的温度时就会以释放光子的形式输出辐射能。光子撞击光电池时激发出自由电子, 从而形成电能输出。光电池表面涂有选择性过滤层, 旨在将有效光子输送到光电池, 同时将无效光子返回到辐射器, 以降低光电池表面的热负荷, 提高系统的能量转换效率。

2 多孔介质燃烧室的试验

试验选用 SiC 作为微燃烧室和多孔介质的材料, 采用直径分别为 1.0、1.2 和 1.5 mm 的陶瓷球在微燃烧室内填充烧结形成多孔介质结构。孔隙率是多孔介质中孔隙容积 V_k 与多孔介质总容积 V_z 之比, 即

$$\varepsilon = \frac{V_k}{V_z}$$

由于空气密度远远低于 SiC 密度, 忽略孔隙容积内空气质量, 此时孔隙率计算公式可简化为

$$\varepsilon = \frac{V_z - V_{SiC}}{V_z} = 1 - \frac{m_{SiC}}{V_z \rho_{SiC}}$$

通过测量 V_z 、 m_{SiC} 就可以计算得到孔隙率。计算得出陶瓷球直径分别为 1.0、1.2 和 1.5 mm 时对应空隙率为 0.72、0.66 和 0.50。多孔介质微燃烧室结构尺寸如图 2 所示。

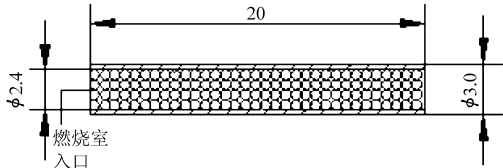


图 2 多孔介质微燃烧室尺寸结构图
Fig. 2 Configuration of porous media micro-combustor

试验中采用孔径 0.7 mm 的喷嘴将氢氧混合气导入多孔介质微燃烧室内进行燃烧。针对不同孔隙率的多孔介质微燃烧室, 通过改变混合气入口流量及氢氧体积混合比进行试验, 观测微燃烧室的燃烧情况, 并测定微燃烧室外壁面温度。壁面温度通过均匀布置于微燃烧室壁面上的 K 型热电偶进行测量, 通过数字温度仪读出温度值。氢氧混合气出口压力设为 0.15 MPa, 环境温度为 300 K。混合气的入口流量及体积混合比通过 MKS 质量流量控制器进行精确控制。具体试验装置如图 3 所示。

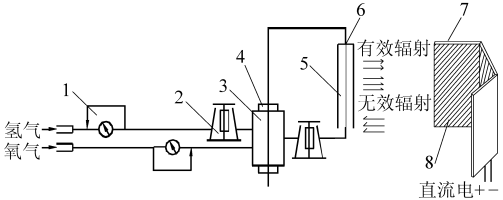


图 3 试验装置示意图
Fig. 3 Configuration of the research equipment
1. 质量流量控制计 2. 回火防止器 3. 预混合室 4. 预热室
5. 燃烧室 6. 数字测温计 7. 光电池 8. 过滤层

3 试验结果与分析

3.1 氢氧体积混合比的影响

当混合气入口流量为 600 cm³/min 时, 不同孔

隙率条件下,多孔介质燃烧室在不同氢氧体积混合比时壁面温度分布曲线如图4所示。

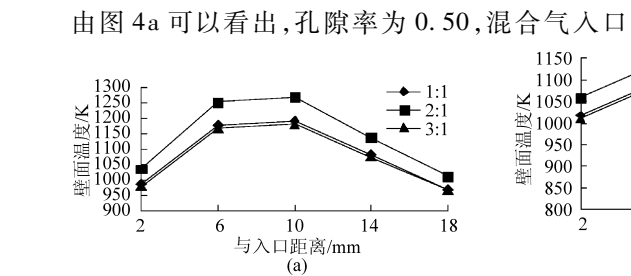


图4 不同氢氧体积混合比时燃烧室的壁面温度分布曲线

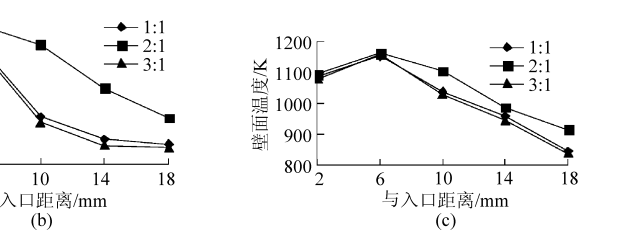
Fig. 4 Temperature distributions along the external wall of micro-combustor under different hydrogen-oxygen volume mixing ratios (a) 孔隙率0.50 (b) 孔隙率0.66 (c) 孔隙率0.72

随后渐降,呈现出中间高两端低的分布趋势。3种混合比条件下,氢氧体积混合比为2:1时燃烧室壁面温度最高,说明混合气在燃烧室内燃烧最充分。这是由于燃烧反应本质上是化学反应,氢气和氧气在体积混合比为2:1时反应最充分,氢气量过多过少都不利于混合气的充分燃烧。当氢氧体积混合比减小到1:1时,由于燃烧室内氢气量较少,燃烧产生热量较少,因此壁面平均温度有所降低。当氢氧体积混合比增大到3:1时,随着氢气量的增多,部分氢气未在燃烧室内燃烧就直接排出燃烧室外,同时还带走了一部分燃烧热,从而降低了微燃烧室的壁面温度。

由图4b可以发现,当孔隙率增大到0.66,混合气入口流量为600 cm³/min时,不同混合比条件下的壁面温度分布规律基本一致,同时燃烧室壁面温度峰值点与孔隙率为0.50时相比相对前移,壁面温度从燃烧室入口处开始升高,在距离燃烧室入口处6 mm左右最高,然后逐渐降低,在燃烧室出口处温度最低。其中2:1时燃烧室壁面温度最高,尤其是在燃烧室后半段要比1:1和3:1时高很多。这是由于随着孔隙率的增大,燃烧室内多孔介质对混合气的阻力作用减弱,混合气在燃烧室内的燃烧空间增大,燃烧过程提前,混合气主要在燃烧室入口附近燃烧。不同氢氧体积混合比条件下,1:1和3:1时燃烧室内有效燃烧反应的氢气量都比2:1时少,燃烧热大大减少,同时部分燃烧热还随未燃混合气的排出而损失,因此在燃烧室后半段温度比2:1时低很多。

由图4c可以发现,孔隙率为0.72,混合气入口流量为600 cm³/min时,不同混合比条件下燃烧室的壁面温度分布基本一致,燃烧室入口附近壁面温度基本相同,在距离燃烧室入口处6 mm左右壁面温度最高,然后逐渐降低,在燃烧室后半段2:1时燃烧室壁面温度要比1:1和3:1时高,尤其是在燃烧室出口附近壁面温度要高出100 K左右。同时,燃烧

室壁面温度与相同混合比条件下孔隙率为0.50时相比明显降低,但比孔隙率为0.66时有所升高,这是两方面作用的结果。一方面随着孔隙率的增大,燃烧室内多孔介质的蓄热和导热作用明显减弱,多孔介质对混合气的预热作用也相应减弱,从而影响混合气的燃烧过程,不利于混合气的充分燃烧。另一方面,孔隙率的增加使燃烧室容积增大,从而使燃烧驻留时间增加,这有利于充分燃烧。



综合比较图4可以发现,不同孔隙率条件下,多孔介质燃烧室在不同氢氧体积混合比时壁面温度分布规律基本一致,都呈现出中间高两边低的趋势,其中,燃烧室在氢氧体积混合比为2:1时壁面温度最高,混合气混合燃烧最充分。

3.2 混合气入口流量的影响

氢氧体积混合比为2:1时,不同孔隙率条件下多孔介质燃烧室在不同混合气入口流量时壁面温度分布曲线如图5所示。

由图5a可以看出,孔隙率为0.50时,多孔介质燃烧室的壁面温度分布规律随混合气入口流量的不同而变化。混合气入口流量为600 cm³/min时,燃烧室壁面温度分布为中间高两边低,壁面温度从入口处开始逐渐升高,在距入口处约10 mm处壁面温度最高,然后逐渐降低。随着混合气入口流量从600 cm³/min增大到650 cm³/min,燃烧室壁面温度随之升高,温度分布也相应改变,在燃烧室入口处温度最高,然后沿燃烧室出口方向逐渐降低。这主要是由于当混合气流量增大时,燃烧室内混合气流速增大,当混合气进入燃烧室时多孔介质的阻力作用使得混合气在入口附近湍流动能增大,混合气主要在燃烧室入口处燃烧反应,因此燃烧室入口附近温度非常高。另外,在高流速情况下混合气在燃烧室内的驻留时间很短,所以在燃烧室后半段未燃混合气不能充分混合燃烧,燃烧室壁面温度比较低。当混合气入口流量增至700 cm³/min和750 cm³/min

时 燃烧室壁面温度继续升高,壁面温度分布规律与 $650\text{ cm}^3/\text{min}$ 时基本一致,说明在大流量情况下混合气主要集中在燃烧室入口附近燃烧反应,在燃烧室后半段反应燃烧的氢气量很少,因此燃烧室入口处壁面温度最高,随后逐渐降低。4 种不同流量情况下 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时燃烧室壁面温度最高,且分布均匀,温度梯度不超过 300 K 。

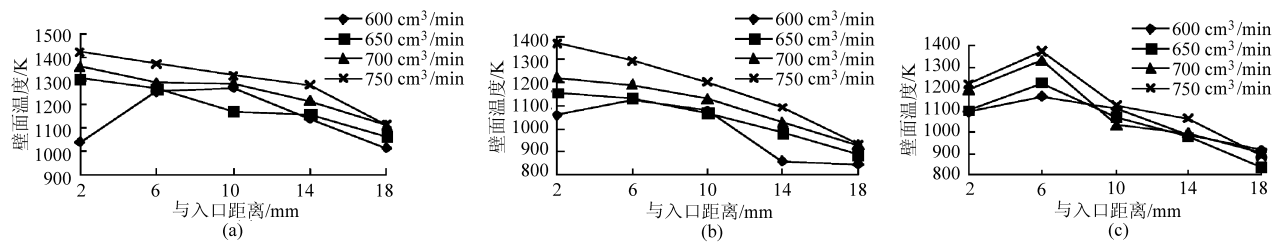


图 5 不同混合气入口流量时燃烧室的壁面温度分布曲线

Fig. 5 Temperature distributions along the external wall of micro combustor under different mixing gas fluxes

(a) 孔隙率 0.50 (b) 孔隙率 0.66 (c) 孔隙率 0.72

由图 5c 可以看出,孔隙率为 0.72,氢氧体积混合比为 2:1 时,随着混合气入口流量的增大,燃烧室壁面温度也随之升高。4 种流量条件下燃烧室壁面温度分布规律基本一致,基本都在距离燃烧室入口 6 mm 左右达到峰值,然后逐渐降低。其中,流量为 $600\text{ cm}^3/\text{min}$ 时燃烧室壁面平均温度最低,最高温差也最小,在 200 K 左右。当流量增大到 $650\text{ cm}^3/\text{min}$ 时,燃烧室壁面温度升高,在最高点比 $600\text{ cm}^3/\text{min}$ 时高 50 K 左右,但是在燃烧室后半段壁面温度比 $600\text{ cm}^3/\text{min}$ 时低,在燃烧室出口比 $600\text{ cm}^3/\text{min}$ 时低近 100 K ,温度梯度也比 $600\text{ cm}^3/\text{min}$ 时大,在 300 K 左右。当混合气流量增大到 $700\text{ cm}^3/\text{min}$ 和 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时,燃烧室壁面温度继续升高,但是在燃烧室出口附近壁面温度都比 $600\text{ cm}^3/\text{min}$ 时低,温度梯度在 450 K 左右。说明随着入口流量的增大,混合气在燃烧室内的驻留时间逐渐缩短,从而影响其混合燃烧过程。同时,孔隙率很大时,多孔介质的蓄热和导热能力大大降低,在大流量情况下,混合气在燃烧室内的流速增大,未燃混合气相应增多,它们从燃烧室排出时也带走相当一部分燃烧热,因此在燃烧室后半段壁面温度大大降低。

分析比较图 5 可以发现,孔隙率一定,多孔介质燃烧室在氢氧体积混合比为 2:1 时,不同混合气入口流量条件下壁面温度分布规律基本一致。4 种流量条件下,混合气入口流量为 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时,燃烧室壁面温度最高,且分布均匀。

3.3 孔隙率的影响

综合分析比较不同孔隙率条件下多孔介质燃烧室在不同氢氧体积混合比,不同混合气入口流量情况下的壁面温度可以发现燃烧室在氢氧体积混合比

由图 5b 可以看出,多孔介质燃烧室在孔隙率为 0.66,氢氧体积混合比为 2:1,不同流量情况下燃烧室壁面温度分布与孔隙率为 0.50 时基本一致,只是平均温度比 0.50 时低。这是由于随着孔隙率的增大,单位体积内多孔介质所占空间相应减小,多孔介质的蓄热和导热作用随之减弱,燃烧室热损失增大,因此壁面温度降低。

为 2:1,混合气入口流量为 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时壁面温度高且分布均匀,说明在孔隙率不变时,多孔介质燃烧室在氢氧体积混合比为 2:1,混合气入口流量为 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时燃烧性能最好。

为得到较优化的参数组合,为微燃烧室的设计与改进提供帮助,对不同孔隙率条件下,多孔介质燃烧室在氢氧体积混合比为 2:1,混合气入口流量为 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时燃烧室的壁面温度进行了分析研究。

多孔介质燃烧室在混合气入口流量 $750\text{ cm}^3/\text{min}$,氢氧体积混合比为 2:1 时,不同孔隙率条件下的壁面温度分布曲线如图 6 所示。

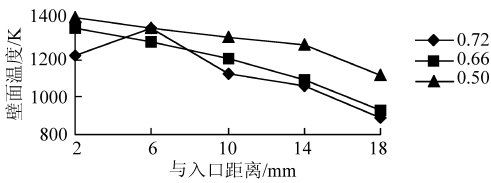


图 6 不同孔隙率条件下燃烧室的壁面温度分布曲线

Fig. 6 Temperature distributions along the external wall of micro combustor under different porosities

分析比较图 6 可以发现,随着孔隙率的增大,燃烧室壁面温度显著降低。3 种条件下,孔隙率为 0.50 时燃烧室壁面温度最高,温度梯度也最小,最大温差为 300 K 左右,更适合微热光电系统的工作需求。当孔隙率增大到 0.66 时,燃烧室壁面温度大大降低,且温度梯度增大,最高温差达 400 K 左右。当孔隙率继续增大到 0.72 时,燃烧室壁面温度继续降低,温度梯度也最高。这说明随着孔隙率的增大,多孔介质自身的蓄热,导热和辐射能力随之减弱,从而使燃烧产生的热量不能有效地传递到壁面,使径

向温度梯度增大,燃烧室燃烧性能降低,不利于微热光电系统稳定高效地工作。

综合比较,多孔介质燃烧室在孔隙率 0.50,氢氧体积混合比 2:1,混合气入口流量 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时壁面温度最高,分布也最均匀,燃烧性能最好,更适合微热光电系统稳定高效地工作。当然,如果孔隙率过小,不能使燃烧室内的混合气有足够的驻留时间和燃烧空间,也不能使外壁面温度分布达到好的效果。

图 7 为试验得到的多孔介质燃烧室在孔隙率为 0.50,氢氧体积混合比为 2:1,混合气入口流量为 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时的混合气燃烧照片。可以看出,在燃烧室前半段温度明显比燃烧室后半段高,说明混合气主要在燃烧室前半段燃烧,这与前面的分析结果相一致。总体来说,多孔介质燃烧室在孔隙率 0.50、氢氧体积混合比 2:1、混合气入口流量为 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时燃烧效果比较理想,可以满足微热光电系统的工作需要。

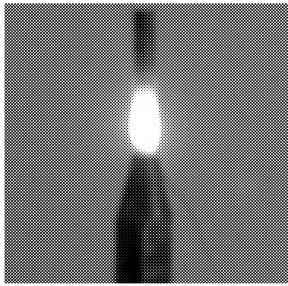


图 7 燃烧室照片

Fig. 7 Photo of combustor

试验中,当混合气入口流量小于 $600\text{ cm}^3/\text{min}$ 或大于 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时,混合气不能在燃烧室内稳定燃烧,这可能与加工精度和燃烧室结构有关。

4 结论

(1) 氢氧混合气在多孔介质微燃烧室内能实现稳定燃烧。

(2) 氢氧体积混合比对多孔介质微燃烧室的微尺度燃烧有重要影响,试验研究结果表明,在孔隙率和混合气入口流量一定时,氢氧体积混合比为 2:1 时多孔介质微燃烧室燃烧效果最好,壁面温度高且分布均匀,适合用于微热光电系统。

(3) 混合气入口流量也是影响多孔介质微燃烧性能的重要因素。试验证明,多孔介质微燃烧室在混合气入口流量为 $750\text{ cm}^3/\text{min}$ 时壁面温度最高,有利于提高微燃烧室的辐射能输出,从而提高微热光电系统的整体效率。

(4) 多孔介质孔隙率对微燃烧室内的燃烧传热过程有重要影响,孔隙率过大或过小都会降低微燃烧室的能量转换效率,从而影响微热光电系统整体效率。试验结果表明,多孔介质孔隙率 0.50 时更适用于微燃烧室的改进与微热光电系统效率的提高。

参 考 文 献

- 1 Laroche M, Carminati R, Greffet J. Near-field thermophotovoltaic energy conversion[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(6):1~12.
- 2 Xue Hong, Yang Wenming, Chou S K, et al. Micro thermophotovoltaics power system for portable MEMS devices[J]. Microscale Thermophysical Engineering, 2005, 9(1):85~97.
- 3 Basu S, Zhang Z M. Microscale radiation in thermophotovoltaic devices[J]. International Journal of Energy Research, 2007, 31(6~7):689~716.
- 4 Pan J F, Huang J, Li D T, et al. Effects of major parameters on micro combustion for thermophotovoltaic energy conversion [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5~6):1 089~1 095.
- 5 李德桃,潘剑锋,薛宏,等. 能源对内燃机和其它动力装置发展的巨大影响[J]. 小型内燃机与摩托车, 2008(4):88~90. Li Detao, Pan Jianfeng, Xue Hong, et al. Influence of energy source on internal combustion engines and other dynamical systems[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2008(4):88~90. (in Chinese)
- 6 Cook-Chennault K A, Thambi N, Sastry A M. Powering MEMS portable devices——a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems[J]. Smart Mater. Struct., 2008, 17(4):1~33.
- 7 Loy Chuan Chia, Bo Feng. The development of a micropower (micro-thermophotovoltaic) device [J]. Journal of Power Sources, 2007, 165(1):455~480.
- 8 Zhang Z M, Basu S. Entropy flow and generation in radiation transfer between surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(3~4):702~712.
- 9 Brenner G, Pickenacker K, Pickenacker O, et al. Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media[J]. Combustion and Flame, 2000, 123(1~2):201~213.