

泡沫陶瓷多孔介质有效导热特性研究

王关晴, 黄曙江, 丁宁, 罗丹, 黄雪峰, 刘彦, 徐江荣
(杭州电子科技大学数值计算与工程应用研究所, 浙江省 杭州市 310018)

Characteristics of the Effective Thermal Conductivity of Highly Porous Ceramic Foam

WANG Guan-qing, HUANG Shu-jiang, DING Ning, LUO Dan, HUANG Xue-feng, LIU Yan, XU Jiang-rong
(Institute of Applying Mathematics & Engineering Calculating, Hangzhou Dianzi University,
Hangzhou 310018, Zhejiang Province China)

ABSTRACT: The characteristics of effective thermal conductivity of highly porous ceramic foam were investigated experimentally by steady plane heat source technique. The influence of temperature and pore size on the effective thermal conductivity of the porous ceramic foam was analyzed in details by making the SiC and Al₂O₃ ceramic foam as test sample. The results show that at the range of the experimental temperature, the effective thermal conductivity of both SiC and Al₂O₃ foam ceramic decreases slightly at first, and then increases gradually with increase of the temperature. At the condition of constant porosity, the effective thermal conductivity also firstly decreases slightly, and then increases gradually with decrease of the equivalent diameter. Compared with the temperature, the variation pore size of the porous foam ceramic has relative small effects on the thermal conductivity at the constant porosity.

KEY WORDS: ceramic foam; porous media; thermal conductivity; porous media combustion

摘要: 利用稳态平面热源法对泡沫陶瓷多孔介质的有效导热性能进行试验研究。以高空隙率的碳化硅和氧化铝泡沫陶瓷为对象, 在分析温度对泡沫陶瓷有效导热系数影响的基础上, 给出了多孔介质当量孔径变化对泡沫陶瓷有效导热系数的影响变化规律。指出随着温度的升高, 碳化硅和氧化铝泡沫陶瓷有效导热系数均是先略有减小, 随后再逐渐增加; 在空隙率一定的条件下, 随着多孔介质当量孔径孔逐渐减小(孔密度增加), 有效导热系数先是略有减小, 随后逐渐增加; 与温度影响相比, 泡沫陶瓷孔径变化影响相对较小。

关键词: 泡沫陶瓷; 多孔介质; 导热系数; 多孔介质燃烧

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y1090313); 能源清洁利用国家重点实验室开放基金(ZJUCEU2009003)。

The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Y1090313); State Key Laboratory of CEU foundation (ZJUCEU2009003)。

0 引言

近年来, 泡沫陶瓷多孔介质由于具有比表面积大、密度小、耐高温好、空隙率高、透过性强、流动阻力小等大量优点, 被应用于新型多孔介质燃烧技术中。多孔介质的导热、辐射、比热特性远大于气体, 多孔介质燃烧改变了燃烧火焰在传统自由空间燃烧的燃烧方式, 使多孔介质燃烧技术燃烧速率和燃烧强度显著提高, 燃烧器具有体积小, 燃烧负荷调节比大, 稳定性强, 以及 NO_x 和 CO 排放低等优势^[1-3]。国内外学者对其流动和点火燃烧特性研究基础上^[4-5], 对多孔介质传热、燃烧及火焰传播等机制进行了大量研究^[6-9], 在燃烧传热机制研究过程中, 常常需要确定多孔介质有效导热系数。

为确定多孔介质有效导热系数, 研究者们对颗粒堆积床等多孔介质(空隙率为 40%)导热特性进行了充分的研究^[10-12]。这些研究主要是针对低空隙率多孔介质结构导热特性, 有关高空隙率(>80%)泡沫陶瓷多孔介质导热系数的研究相对较少。Nemoto T 等人^[13]对 Al₂O₃ 和 SiC 2 种泡沫陶瓷多孔介质在低温过程中的导热特性进行了研究, 指出 2 种泡沫陶瓷在 4~300 K 升温过程中, 导热系数都是随着温度的升高先逐渐增加, 达到最大值后, 又逐渐降低。Kinoshigta I 等^[14]对 Ni-Cr 材料和 Al₂O₃-MgO 材料的高空隙率(空隙率分别为 0.94 和 0.87)多孔介质的导热和辐射特性进行了试验研究与理论分析, 给出了 2 种材料导热系数随温度的变化规律, 并将试验结果和理论分析进行了对比。吕兆华^[15]依据泡沫陶瓷结构的特点, 建立一个简化的单元体模型, 采用最小热阻法导出泡沫陶瓷有效导热系数与空隙率和辐射衰减系数之间的关联式, 并采用 Kinoshigta I 的

试验数据进行了验证。潘洪亮等人^[16]以 Al_2O_3 泡沫陶瓷和波纹板为试样, 采用有限体积法对流场的模拟, 通过对有效导热系数的搜索寻优, 间接确定出泡沫陶瓷多孔介质的有效导热系数, 分析了温度、空气流速、当量孔径变化对其导热系数的影响规律。

以上研究主要是采用简化理论分析和数值模拟方法, 分析了温度、空隙率对泡沫陶瓷有效导热系数的影响, 有关孔径变化对泡沫陶瓷导热特性的影响研究报道相对较少。因此, 本文以高空隙率的 SiC 和 Al_2O_3 泡沫陶瓷为试样, 采用稳态平面热源法对泡沫陶瓷多孔介质有效导热特性进行试验研究, 在分析两试样随温度变化规律的基础上, 详细研究多孔介质孔径变化对泡沫陶瓷有效导热系数的影响, 为进一步研究高空隙率泡沫陶瓷多孔介质传热特性提供有利参考。

1 试验原理与方法

1.1 试验原理

采用稳态平面热源法测量导热系数, 试验传热原理如图 1 所示。在试验时, 通过加热盘加热样品, 热量由样品上表面传递到样品的下表面, 下表面与散热盘上表面紧密接触, 散热盘通过下表面将热量不断向周围环境传递, 当加热盘和散热盘的温度控制显示均稳定时, 散热盘的散热速率近似等于样品的传热速率, 系统达到一个动态平衡状态。在稳态状态下, 样品内温度梯度表示为

$$\frac{dT}{dh} \approx \frac{\Delta T}{\Delta h} = \frac{T_1 - T_2}{\Delta h} \quad (1)$$

样品传热速率为

$$q_1 = \frac{Q_1}{\Delta t} = -\lambda A \frac{dT}{dh} \quad (2)$$

散热盘散热速率为

$$q_2 = \frac{Q_2}{\Delta t} \Big|_{T_2} = mc \frac{\Delta T}{\Delta t} \Big|_{T_2} \quad (3)$$

由于样品传热速率近似等于散热盘散热速率,

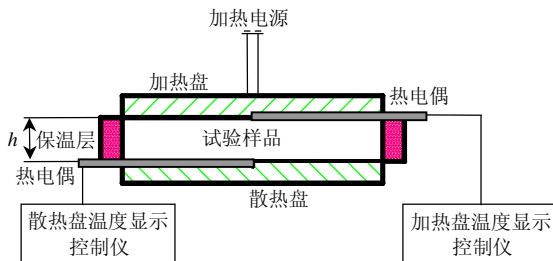


图 1 导热系数试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal conductivity set-up

样品导热系数为

$$\lambda = mc \left(\frac{h}{T_1 - T_2} \right) \frac{1}{A} \frac{\Delta T}{\Delta t} \Big|_{T_2} \quad (4)$$

式中: Q_1 和 Q_2 分别为样品盘和散热盘散热量; m 为散热盘质量; c 为散热盘比热; h 为样品厚度; t 为时间; A 为散热盘的表面积; T 为温度; 下标 1、2 分别表示加热盘下表面和散热盘上表面。

1.2 试验方法

试验仪器为 THQDC-1 型导热系数测定仪, 其加热盘加热功率为 300 W, 温度显示仪精度为 0.1 °C。试验时, 采用硅酸铝纤维对样品侧面保温, 防止热量从侧面传递。加热盘下表面温度 T_1 和散热盘上表面温度 T_2 , 通过铂铑-铂的 S 型热电偶测量, 精度为 0.5%。为保证散热盘散热速率的准确性, 减小周围环境对散热盘散热速率的影响, 整个试验在 24 °C 的空调控制环境中进行。试验样品采用直径为 60 mm, 厚度为 20 mm 的 SiC 和 Al_2O_3 泡沫陶瓷, 结构参数如表 1。

表 1 多孔介质泡沫陶瓷结构参数

Tab. 1 The structure of porous ceramic foam tested

样品	当量孔径(孔密度/PPI)						空隙率
SiC	10	15	20	25	30	40	0.85
Al_2O_3	10	—	20	—	30	40	0.85

注: PPI 表示每英寸上孔的个数。

2 试验结果与分析

2.1 散热速率和试验准确性确定

稳态平面热源法测量物体导热系数时, 需要首先确定散热盘散热速率。散热盘散热速率的准确性对试验结果误差影响较大。图 2 是试验中对 5 种不同当量孔径下的 SiC 泡沫陶瓷加热升温后, 散热盘在相应温度下的散热速率。在不同孔径的加热试验中, 散热盘散热速率在相同温度下基本都是为一定值, 与试验样品无关, 只随加热温度升高, 逐渐增加, 呈现抛物线变化。这因为在从散热盘上移走加热试样, 让散热盘处于散热状态时, 散热盘速率的大小只受周围环境变化的影响。因此, 不同孔径试样下所测得散热速率并非完全相同, 但是基本恒定在一定值上附近变化。为减小试验误差, 采用以上 5 种不同孔径下散热速率的平均值作为散热盘散热速率, 如图中虚线所示。

为验证试验装置的准确性和精确性, 选用某公司生产的氯丁橡胶材料做校核试验, 其在 298 K 时的导热系数为 0.23 W/(m·K), 试验测得导热系数为

0.238 W/(m·K)，相对误差为 3.5%，因此，证明试验装置的准确性可靠。

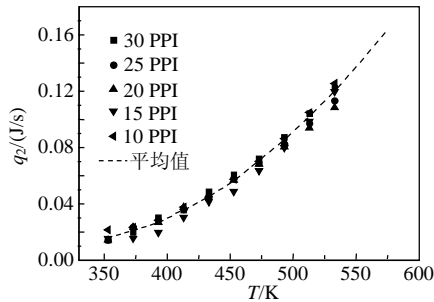


图 2 散热盘散热速率确定

Fig. 2 Calibration of the cooling rate of cooling plate

2.2 温度的影响

图 3 是不同孔径下的 SiC 泡沫陶瓷的有效导热系数随着温度的变化。在试验加热温度范围内，不同孔径下的 SiC 泡沫陶瓷的有效导热系数的变化规律基本一致，即随着温度的升高，有效导热系数略有降低，基本上在温度到达 393 K 后，降低到最小值，随后随着温度升高逐渐增大。这是因为一方面随着温度的升高，SiC 材料本身的导热系数是逐渐减小的，必然导致多孔介质有效导热分量逐渐减小；但是，另一方面，随着温度的升高，SiC 泡沫陶瓷辐射传热作用也会逐渐增加，且温度越高，作用效果越明显。因此，在较低温度下，SiC 泡沫陶瓷辐射传热作用并不明显，材料本身导热系数随温度减小成为主要因素，随着温度升高，有效导热系数逐渐降低；温度高于 393K 后，泡沫陶瓷辐射传热作用成为主要因素，材料本身导热系数减小作用较小，有效导热系数逐渐增加。从图中看出，当量孔径为 10 和 40PPI 泡沫陶瓷时，有效导热系数先降低后增加的趋势更为明显。

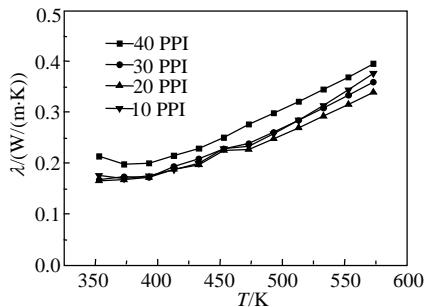


图 3 温度对 SiC 泡沫陶瓷有效导热系数的影响

Fig. 3 Temperature effect on SiC ceramic foam effective thermal conductivity

图 4 是不同孔径下 Al₂O₃ 泡沫陶瓷有效导热系数随着温度的变化。在试验温度范围内，随着温度的升高，不同孔径 Al₂O₃ 泡沫陶瓷有效导热系数同

样是先略有降低，在 373 K 左右出现最低，随后随着加热温度升高，有效导热系数逐渐增加。这同样是由于一方面 Al₂O₃ 泡沫陶瓷材料本身的导热系数随着温度的升高逐渐降低；另一方面，随着温度升高，Al₂O₃ 泡沫陶瓷的辐射传热作用逐渐增强。在较低温度下，前者作用占主要因素，后者作用相对较小，导致有效系数降低；随后，随着温度升高，前者作用相对变小，后者作用逐渐成为导热系数增加的主要因素，且温度越高，作用效果越显著，有效导热系数逐渐增加。

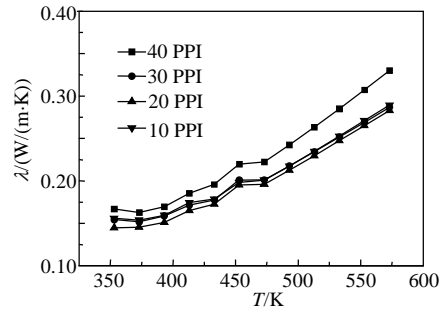


图 4 温度对 Al₂O₃ 泡沫陶瓷有效导热系数的影响

Fig. 4 Temperature effect on Al₂O₃ ceramic foam effective thermal conductivity

多孔介质燃烧中，通常采用 SiC 和 Al₂O₃ 泡沫陶瓷作为燃烧用的多孔介质。对比图 3 和图 4 可以看出，在相同空隙率，相同孔径条件下，SiC 泡沫陶瓷有效导热系数高于 Al₂O₃ 有效导热系数。这主要是由于在相同温度下，SiC 泡沫陶瓷材料本身导热系数高于 Al₂O₃ 泡沫陶瓷，此外，SiC 泡沫陶瓷有效导热系数随温度增加趋势明显高于 Al₂O₃ 泡沫陶瓷，如图 5 所示。

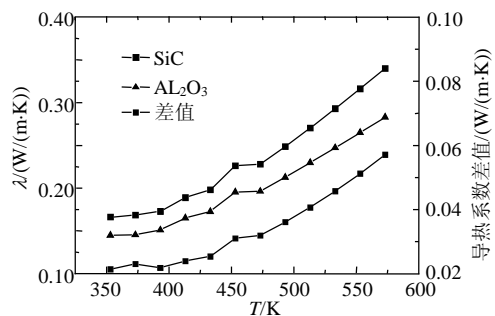


图 5 2 种材料有效导热系数的比较

Fig. 5 Effective conductivity comparison of Al₂O₃ with SiC

该图是 20PPI 时，2 种泡沫陶瓷有效导热系数以及两者差值随温度的变化。SiC 泡沫陶瓷有效导热系数增加趋势明显高于 Al₂O₃ 泡沫陶瓷。因为在其他条件相同时，从材料本身颜色来分析，SiC 泡沫陶瓷颜色为灰绿色，Al₂O₃ 泡沫陶瓷颜色为白色，

SiC 泡沫陶瓷更接近于灰体, 辐射传热效果更加明显, 有效导热系数增加更明显。

2.3 孔径的影响

图 6 是在相同空隙率, 不同加热温度下, 孔径变化对 SiC 泡沫陶瓷有效导热系数的影响。如图所示, 随着多孔介质孔密度增加, 即当量孔径逐渐减小, SiC 泡沫陶瓷的有效导热系数的变化规律基本相同, 都是先降低, 后逐渐增加, 并在孔密度为 40 PPI 时达到最大。其次, 从图中看出, 在不同的温度下, SiC 泡沫陶瓷有效导热系数最小值对应的当量孔径并不相同。在 $T=373\sim 453\text{ K}$ 时, 最小有效导热系数为 15 PPI 泡沫陶瓷; 在 $T=493\sim 533\text{ K}$ 时, 20 PPI 有效导热系数最小。

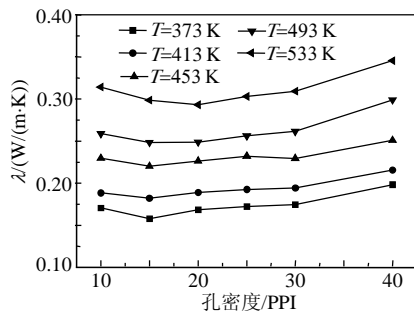
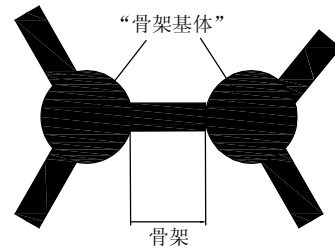


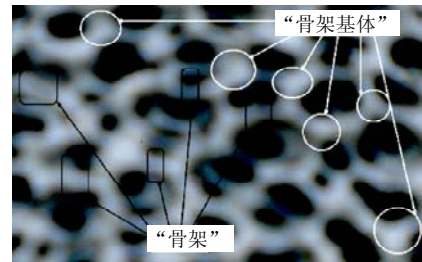
图 6 当量孔径对 SiC 有效导热系数的影响
Fig. 6 Pore density effect on SiC effective thermal conductivity

这是由于泡沫陶瓷交错网格状“骨架结构”造成的(图 7)。空隙率相同时, 在较低温度下, 辐射传热效果作用较小, 多孔介质密度越大, 当量孔径越小, 多孔介质“骨架”之间的空隙越小, 热量通过“骨架之间”传热距离明显逐渐减小, “骨架基体”面积逐渐增大, 数目增多, 导热速率增加, 导热系数逐渐增大。但是, 当孔密度减小到一定程度后, 虽然当量孔径增大, 但多孔介质“骨架结构”明显变粗, “骨架基体”变大, 这样同样导致骨架之间导热能力迅速增加, 导热系数增大, 如图 8 中 10 PPI 泡沫陶瓷, 这样在高低孔密度间必然存在一个最小值(15 PPI)。随温度升高, 辐射传热作用效果逐渐增强, 粗“骨架”和“骨架基体”辐射导热能力明显高于细的, 且温度越高, 这种作用效果越明显, 因此, 较低温度时, 15 PPI 的有效导热系数最小, 较高温度时, 20 PPI 有效导热系数最小。这从另外一个角度反映出, 随温度升高, 泡沫陶瓷多孔介质辐射传热特性将占主要因素, 为多孔介质燃烧技术传热机制研究提供重要参考。

图 9 是在相同空隙率、不同加热温度下, 多孔



(a) 骨架结构示意图



(b) 10 PPI SiC 结构骨架实体

图 7 泡沫陶瓷“骨架结构”分布
Fig. 7 Frame structure of ceramic foam

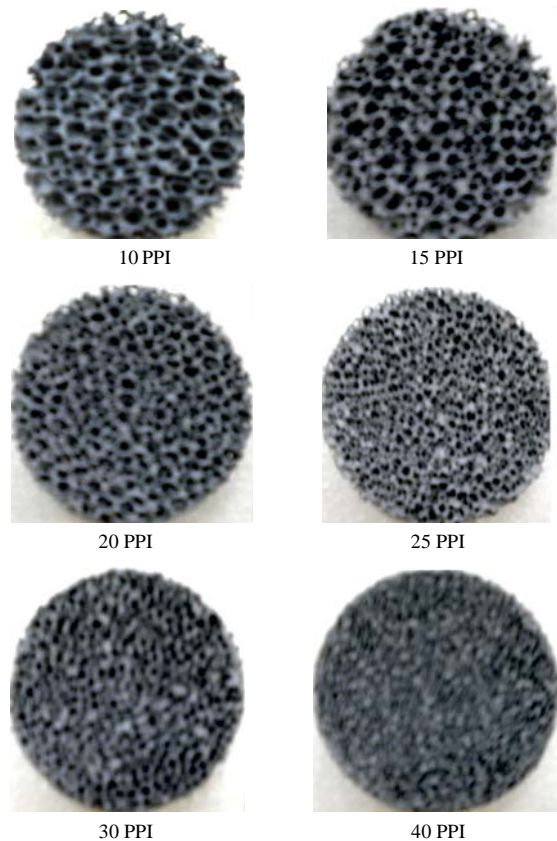


图 8 不同孔径 SiC 泡沫陶瓷结构

Fig. 8 Different pore structure of SiC ceramic foam

介质孔径变化对 Al_2O_3 泡沫陶瓷有效导热系数的影响。如图所示, 在相同空隙率下, 随着多孔介质孔密度的增加, Al_2O_3 泡沫陶瓷有效导热系数的变化规律同样是随着孔密度的增加, 即当量孔径的减小, 先降低后增加。

其次, 当温度为 $T=373\text{ K}$ 时, 20PPI 泡沫陶瓷的有效导热系数最小; 当温度升高到 $T=533\text{ K}$ 时, 30PPI 泡沫陶瓷的有效导热系数最小。随着温度升高, AL_2O_3 泡沫陶瓷最小有效导热系数变化规律, 同 SiC 泡沫陶瓷一样, 也是逐渐向小孔径方向发生偏移。这同样是由于 AL_2O_3 泡沫陶瓷的多孔介质网格状“骨架结构”造成的, 如图 10 所示。

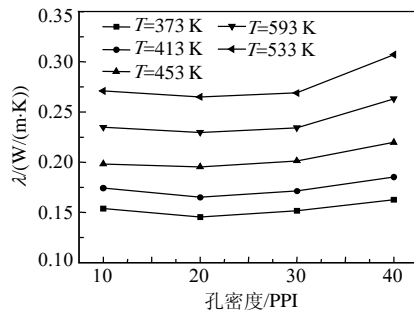


图 9 当量孔径对 AL_2O_3 有效导热系数的影响
Fig. 9 Pore density effect on AL_2O_3 effective thermal conductivity

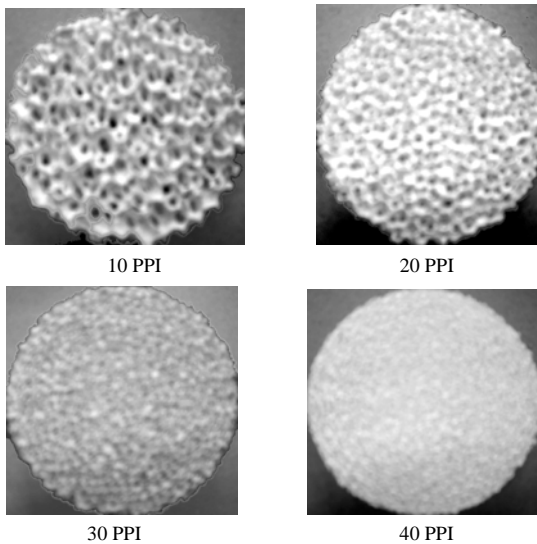


图 10 不同孔径 AL_2O_3 泡沫陶瓷结构

Fig. 10 Different pore structure of AL_2O_3 ceramic foam

此外, 通过图 6 和图 9 对比, 可以看出, 在相同温度下, 不同孔径泡沫陶瓷的有效导热系数变化幅度并不大, 基本上都小于 0.05, 当量孔径明显小于温度对有效导热系数的影响。因此, 与温度影响相比, 在空隙率相同条件下, 多孔介质当量孔径变化对有效导热系数的影响相对较小。

3 结论

通过稳态平面热源法对泡沫陶瓷多孔介质有效导热系数进行试验研究, 主要得到以下结论:

1) 随着温度升高, SiC 和 AL_2O_3 泡沫陶瓷有效导热系数均是先略有降低, 然后逐渐升高, 近似

呈抛物线变化;

2) 随着泡沫陶瓷当量孔径减小, SiC 和 AL_2O_3 泡沫陶瓷的有效导热系数均是先减小, 然后逐渐增加;

3) 泡沫陶瓷最小有效导热系数在不同加热温度下, 对应泡沫陶瓷当量孔径并不相同, 随着温度升高逐渐向小孔径偏移;

4) 在相同温度下, 不同孔径的 SiC 和 AL_2O_3 泡沫陶瓷有效导热系数变化幅值较小, 说明与温度影响相比, 多孔介质当量孔径变化影响相对较小。

参考文献

- [1] Mujeebua M A, Abdullah a M Z, Abubakar b M Z, et al. Applications of porous media combustion technology: a review[J]. Applied Engeries, 2009, 86(9): 1365-1375.
- [2] Howell J R, Hall M J, Ellzey J L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media[J]. Progress Energy Combustion Science, 1996, 22(2): 121-145.
- [3] Trimis R, Durst F. Combustion in porous medium advances and applications[J]. Combustion Science and Technology, 1996, 121(1): 153-168.
- [4] 王关晴, 程乐鸣, 杨春, 等. 往复式热循环多孔介质燃烧系统冷态阻力特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 52-58.
Wang Guanqing, Cheng Leming, Yang Chun, et al. Pressure drop profiles in porous media combustion system with reciprocating flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 52-58(in Chinese).
- [5] 王关晴, 程乐鸣, 徐江荣, 等. 往复式热循环多孔介质燃烧点火特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 26-33.
Wang Guanqing, Cheng Leming, Xu Jiangrong, et al. Ignition characteristics in a reciprocal porous media combustion system with heat recirculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 26-33(in Chinese).
- [6] Barra A J, Ellzey J L. Heat recirculation and heat transfer in porous burners[J]. Combustion and Flame, 2004, 137(12): 230-241.
- [7] 王关晴, 程乐鸣, 郑成航, 等. 往复式热循环多孔介质燃烧超焓燃烧特性[J]. 化工学报, 2009, 60(2), 435-443.
Wang Guanqing, Cheng Leming, Zheng Chenghang, et al. Excess enthalpy combustion characteristics in reciprocal porous media combustion system with heat recirculation[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(2): 435-443(in Chinese).
- [8] Sivashinsky G, Brailovsky I. On propagation limits in porous media combustion[J]. Combustion Theory and Modelling, 2002, 6(4): 595-605.
- [9] 郑成航, 程乐鸣, 李涛, 等. 多孔介质燃烧火焰面特性数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 48-53.
Zheng Chenghang, Cheng Leming, Li Tao, et al. Numerical simulation of combustion fronts in porous media[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 48-53(in Chinese).
- [10] Tsotsas E, Martin H. Thermal conductivity of packed beds: a review[J]. Chemical Engineering and Processing, 1987, 22(1): 19-37.
- [11] Yagi S, Kunii D, Wakao N. Studies on axial effective thermal conductivities in packed beds[J]. AIChE Journal, 2004, 6(4):

- 543-546.
- [12] Bahrami M, Yovanovitch M M, Culham J R. Effective thermal conductivity of rough spherical packed beds[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(19-20): 3691-3701.
- [13] Nemoto T, Sasaki S, Hakuraku Y. Thermal conductivity of alumina and silicon carbide ceramics at low temperatures [J]. Cryogenics, 1985, 25(8): 531-532.
- [14] Kinoshita I, Kamiuto K, Hasegawa S. Study of simultaneous conductive and radiative heat transfer in high porosity materials [J]. Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, New York, 1982(2): 505-510.
- [15] 吕兆华. 泡沫型多孔介质有效导热系数的计算[J]. 南京理工大学学报, 2001, 25(3): 257-261.
Lü Zhaohua. Calculation of effective thermal conductivity of foam porous media[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2001, 25(3): 257-261(in Chinese).
- [16] 潘宏亮, Pickenabcker O, Trimis D, 等. 空隙率对 Al_2O_3 高空隙率多孔介质 EHC 的影响[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(3): 479-485.

Pan Hongliang, Pickenabcker O, Trimis D, et al. Effects of porosity on effective heat conductivity of highly porous media of Al_2O_3 [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(3): 479-485(in Chinese).



王关晴

收稿日期: 2009-11-18。

作者简介:

王关晴(1975—), 男, 博士, 讲师, 主要从事燃料高效清洁燃烧技术研究, gqwang@hdu.edu.cn;

黄曙江(1956—), 女, 高级实验师, 主要从事流动传热和物理实验教学与研究;

丁宁(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水煤浆燃料制备和大型锅炉燃烧, 以及计算机软件技术开发研究;

徐江荣(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事两相流动、传热以及燃烧理论与数值模拟研究。

(责任编辑 车德竞)