

蜂窝陶瓷内置换热器绕流特性

刘晓倩, 高振强, 刘永启, 刘瑞祥, 孟 建
(山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049)

摘 要: 采用大涡模拟方法研究蜂窝陶瓷内置换热器的绕流特性, 并与大空间圆柱绕流进行了对比。结果表明: 在 Re 为 692、1646、2594、3540 时, 在蜂窝陶瓷内置换热器背流面会形成一对小漩涡, 由于蜂窝陶瓷的限制, 边界层分离点位置比大空间圆柱绕流分离点靠前; 蜂窝陶瓷内置换热器在所研究的范围内未出现卡门涡街现象, 换热器受力稳定, 表明蜂窝陶瓷的存在能有效抑制换热器流致振动现象; 同样的来流速度条件下, 蜂窝陶瓷内置换热器的绕流速度更高, 且来流速度越大, 二者的差异越大。

关键词: 蜂窝陶瓷; 换热器; 圆柱绕流; 流致振动

中图分类号: TQ174.75 文献标志码: A 文章编号: 1000-2278(2014)03-0254-06

Numerical Study of Flow around Heat Exchanger Embedded in Honeycomb Ceramics

LIU Xiaoqian, GAO Zhenqiang, LIU Yongqi, LIU Ruixiang, MENG Jian

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China)

Abstract: The flow around the heat exchanger embedded in honeycomb ceramics was studied by using the method of large eddy simulation. And the simulation was compared with the flow around a cylinder in free space. Results show that, when Re was 692, 1646, 2594, and 3540, a pair of small vortexes would be formed at the back of the heat exchanger embedded in honeycomb ceramics, and the separation point was more forward than that in free space because of the limitation of the honeycomb ceramics. There is no Karman vortex street behind heat exchanger embedded in honeycomb ceramics within the research scope. And the stress on the heat exchanger is stable. It means that the existence of honeycomb ceramics can effectively prevent the flow induced vibration. Compared with the flow around a cylinder in free space, the flow speed near the wall of the heat exchanger embedded in honeycomb ceramics is higher under the condition of the same inlet velocity, and the greater the inlet velocity is, the greater the difference is.

Key words: honeycomb ceramic, heat exchanger, flow around cylinder, flow induced vibration

0 引 言

工业用蜂窝陶瓷具有良好的蓄、放热性能, 流动阻力较小, 可以用作蓄热式燃烧器的核心部件。用于煤矿乏风瓦斯的热/催化逆流氧化处理^[1-4]时, 可将稀薄甲烷氧化成水和二氧化碳, 氧化过程释放的热量, 除维持装置自身的运行外, 多余的热量会通过换热器向外输出^[5]。将换热器内置在蓄热式燃烧器的内部, 即构成了燃烧换热器^[6], 其结构紧凑, 功率调节范围大。国外学者已在此方面开展了大量的研究^[7-11], 发现此种燃烧换热器具有热效率高,

污染物排放低的特点。而国内方面, 也有学者对多孔介质为氧化铝小球的燃烧换热器内的速度、压力损失、温度分布等进行了研究^[12]。

迄今为止, 国内外对于燃烧换热器的研究主要从燃烧的角度出发, 围绕其运行特性展开, 多数研究燃烧器内部温度分布或污染物的排放, 考虑的是换热器对燃烧的影响^[6-12]。传热机理研究多针对蜂窝陶瓷(床)内的传热过程^[13-15], 对蜂窝陶瓷内置换热器的传热规律研究较少^[5, 16], 而对换热器传热具有重要影响的流体绕流特性研究尚未有见报道。

收稿日期: 2014-01-10。 修订日期: 2014-03-15。
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(编号: 2009AA063202); 山东省自然科学基金资助项目(编号: ZR2009FQ023); 山东省科技发展计划(编号: 2012GGX10417)。
通信联系人: 刘永启(1965-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2014-01-10. Revised date: 2014-03-15.
Correspondent author: LIU Yongqi(1965-), male, Ph. D., Professor.
E-mail: sdgaozq@163.com

对蜂窝陶瓷内置换热器而言,来流在垂直流动方向上的动量传递受到限制,烟气外掠换热器壁面时边界层的发展也受到限制,因此导致传统外掠圆柱对流传热公式不适于燃烧换热器的传热计算。

本文将煤矿乏风瓦斯氧化装置取热试验台上的蛇形管换热器通过抽象简化,得到蜂窝陶瓷内置换热器的圆柱绕流模型,在实验验证数学模型有效的基础上,研究蜂窝陶瓷对换热器绕流特性的影响。

1 数值模拟的方法

1.1 物理模型

计算的物理模型是蜂窝陶瓷床内置单个圆柱形换热器,换热器的直径为40 mm,来流雷诺数为692、1646、2594、3540。计算区域为长方形,长为700 mm,宽为150 mm。计算采用二维模型,结构化网格,在换热器周围网格加密以便更好的捕捉换热器周围绕流的变化。为了研究蜂窝陶瓷对圆柱绕流的影响,对没有蜂窝陶瓷时自由空间内的圆柱绕流也进行了计算。图1(a)为无陶瓷时的几何模型,图1(b)是蜂窝陶瓷内置换热器的几何模型。二者的计算区域大小相同。蜂窝陶瓷床中心有80 mm×80 mm的自由空间,换热器位于自由空间的中心,其形心与陶瓷床的形心重合。

1.2 数学模型

由于流体横掠换热器流动雷诺数大于300时,边界层内是层流流动,而在尾流区流动状态已经是湍流,简单的层流模型和湍流模型都不能很好的模拟出流动状况。大涡模拟的基本思想是用瞬时的N-S模型来直接模拟计算大尺度脉动,而通过建立

亚格子模型的方法来模拟小尺度脉动对大尺度脉动的影响,这种方法更具有优势。研究人员通过大量的模型对比试验证实:在研究层流到湍流转换时,大涡模拟效果更贴近实际流动状况^[17-19]。

本文利用大涡模拟的方法研究不同雷诺数下的流体绕换热器流动状况。

(1)流动现象基本都可以用基于连续性假设的纳维—斯托克斯方程来描述,应用大涡模拟方法时假设过滤方程和求导运算可以交换,将N-S方程过滤运算得:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

令 $\bar{u}_i \bar{u}_j = \bar{u}_i \bar{u}_j + (\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j)$, 则式(1)可以写作:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} \quad (3)$$

采用标准Smagorinsky模型的亚格子尺度模型:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 \nu_i \bar{S}_{ij} = -2 (C_s \bar{\Delta})^2 \|S\| S_{ij} \quad (4)$$

式中, S 是应变速率张量, $S = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \|S\|$

是进行过滤后的应变速率张量, $\|S\| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$, ν_i 是涡粘度, $\nu_i = l^2 \|S\|$, 文中计算采用的网格均为四边形的结构网格, 滤过范围取为: $\bar{\Delta} = 2 \nu \text{vol}^{\frac{1}{3}}$ (vol 是计算单元的体积)。亚格子尺度表示为:

$$l = C_s \bar{\Delta} \left(1 - \exp \left(-\frac{y^+}{25} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

(2)蜂窝陶瓷多孔介质的渗透率:

$$\alpha = d^2 \phi^3 / 150 (1 - \phi)^2 \quad (6)$$

粘性阻力系数:

$$K = 1/\alpha \quad (7)$$

惯性阻力系数:

$$C_2 = 3.5 (1 - \phi) / d \cdot \phi^3 \quad (8)$$

ϕ 为蜂窝陶瓷孔隙率, d 为陶瓷孔当量直径。

2 实验系统

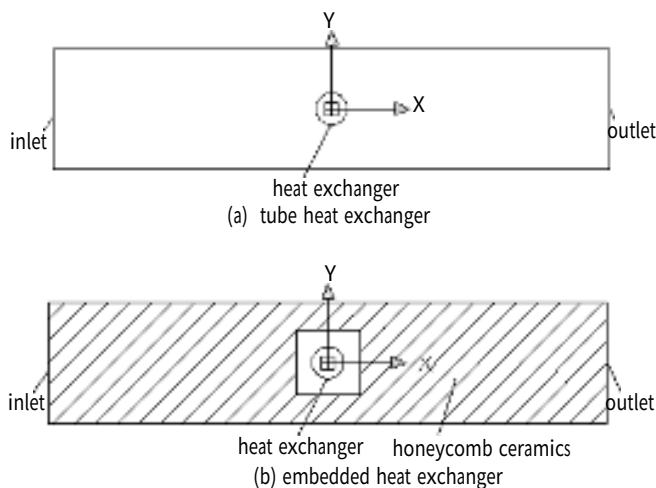


图1 物理模型

Fig.1 Physical model

实验在小型风洞上完成。换热器四周摆放蜂窝陶瓷, 蜂窝陶瓷摆放形成80 mm×80 mm的区域, 使换热器处于中心位置(如图2所示), 在试验台上打孔布置测点, 测点位置如图3所示。调节进风量, 使入口风速为0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s (此时来流雷诺数为692、1646、2594、3540), 在不同的入口流速下, 利用Multichannel CTA 54N81型热线风速仪测量各处风速, 得到实验数据。

3 计算结果与分析

3.1 计算结果的有效性分析

3.1.1 自由空间圆柱绕流计算有效性分析

当流体绕流圆柱体时 $Re_d = 200 \sim 5000$ 范围内, 卡门涡街的交替脱体频率可按下式计算

$$f_k = S_t \frac{V_\infty}{d} \tag{9}$$

式中, S_t 为斯特劳哈尔数; d 为圆柱体直径; V_∞ 为来流速度。

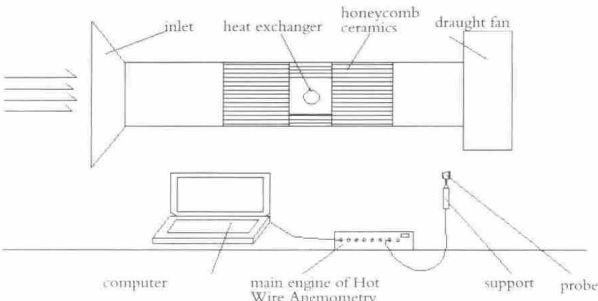


图2 试验台整体结构图
Fig.2 The structure of the test equipment

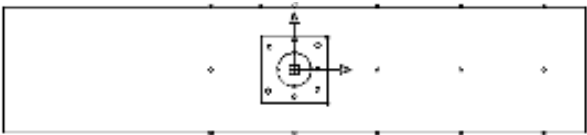


图3 实验测点分布图
Fig.3 The distribution of test points

表1 流速不同时漩涡脱落的周期
Tab.1 Vortex shedding cycle at different velocity

V (m/s)	Calculation of Cycle (s)	Simulation of Cycle (s)	S_t
0.5	0.275	0.277	0.291
1.0	0.152	0.151	0.263
1.5	0.108	0.107	0.248
2.0	0.084	0.0833	0.238

表1为不同流速下计算所得的漩涡脱落周期与模拟所得的漩涡脱落周期结果对比。

模拟结果与计算结果吻合良好, 说明本文模拟计算的模型与方法是准确而可靠的。

3.1.2 蜂窝陶瓷内置换热器绕流计算有效性分析

数值模拟计算所得的瞬时风速分布图4(a)所示, 实验测得的某一时刻瞬时风速分布如图4(b)所示。二者速度分布非常相似, 模拟计算的蜂窝陶瓷多孔介质模型可靠。

3.2 边界层分离

发生圆柱绕流时, 流体在粘滞力和逆压梯度的双重作用下会发生边界层的分离现象, 在圆柱的后部产生漩涡。没有蜂窝陶瓷时, 在0.5 m/s的来流速度下出现周期性的漩涡脱落现象, 产生卡门涡街, 如图5所示。

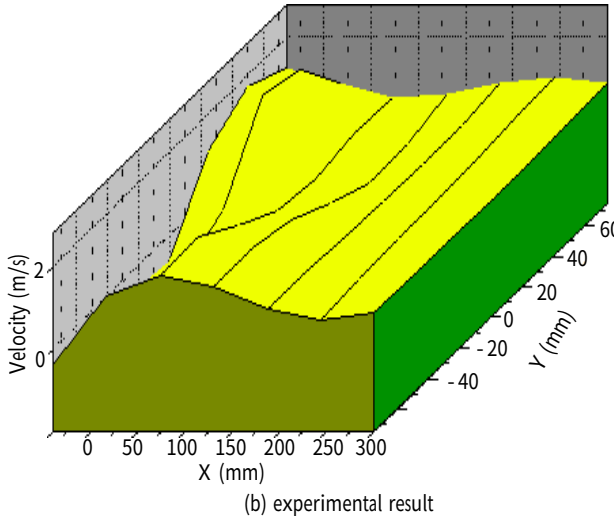
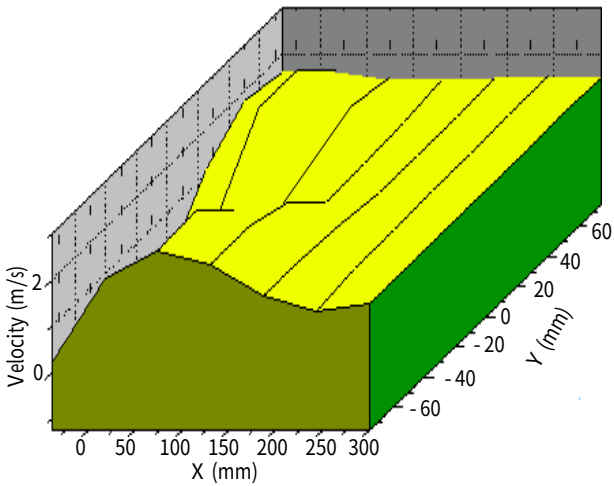


图4 来流速度1.5 m/s时的速度分布三维图
Fig.4 The three-dimension velocity distribution with the inlet velocity of 1.5 m/s

有蜂窝陶瓷时,在蜂窝陶瓷围成的空腔内,圆柱的背面形成两个对称的小漩涡。蜂窝陶瓷阻碍了漩涡的进一步发展和脱落,所以在0.5 m/s的来流速度下未发生卡门涡街现象,如图6所示。

3.3 分离点位置

流体微团在逆压力梯度的作用下被挤离壁面,分离点处满足关系 $dv_x/dy=0$,图7是流体流速为1.5 m/s有无蜂窝陶瓷多孔介质时换热器壁面上 dv_x/dy 的变化曲线。从图中可以清楚地看出,蜂窝陶瓷的存在对换热器迎风面上的速度梯度影响不大,但是对换热器背风面的速度梯度存在显著影响,与没有蜂窝陶瓷的情况相比,分离点位置靠前约20°。

在较大的自由空间内,圆柱绕流边界层从前驻点开始逐渐变厚,同时边界层内的扰动也逐渐增强,到某一位置开始转换为湍流,使得垂直流动方向上的动量交换增强,分离点后移。而在陶瓷床内,由于蜂窝陶瓷的限制,垂直流动方向上的动量交换受到抑制,分离点位置相对稳定,随流速的增

加向后移动缓慢。

3.2.3 对换热器受力的影响

图8和图9表示有无蜂窝陶瓷时阻力系数随时间的变化曲线。

从图中可以看出,无蜂窝陶瓷存在时,由于换热器上下表面的漩涡交替脱落会导致换热器受到的作用力不断发生变化,这是流致振动现象产生的原因。当漩涡脱落频率与换热器本身的固有频率接近时会发生共振,严重时可能造成换热器的疲劳破坏。

蜂窝陶瓷的存在阻碍了漩涡的脱落,因此在稳定来流条件下换热器所受的作用力稳定,其阻力系数不随时间变化。

3.4 换热器表面雷诺数比较

雷诺数是表征流体流动的无量纲数,雷诺数越大扰动也就越强烈。取换热器表面所有流体微团速度的平均值,为表面雷诺数的特征速度,在相同

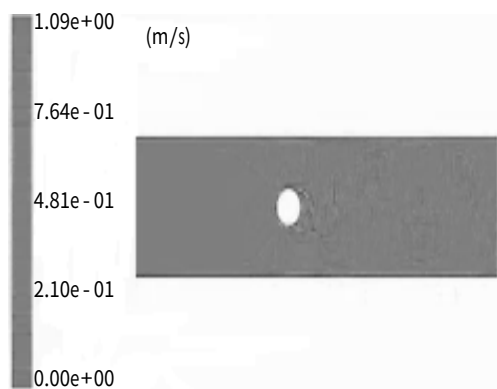


图5 $V=0.5$ m/s 无蜂窝陶瓷速度云图
Fig.5 The velocity contours without honeycomb ceramic $V=0.5$ m/s

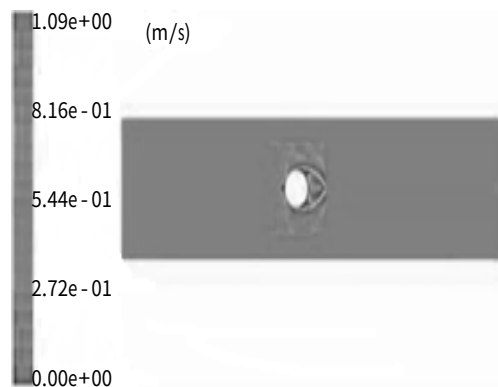


图6 $V=0.5$ m/s 蜂窝陶瓷速度云图
Fig.6 The velocity contours of honeycomb ceramic model $V=0.5$ m/s

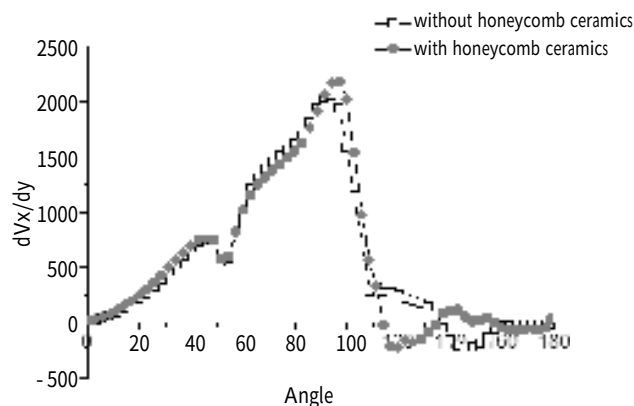


图7 $V=1.5$ m/s时 dv_x/dy 的变化曲线
Fig.7 The dv_x/dy curve with inlet velocity of 1.5 m/s

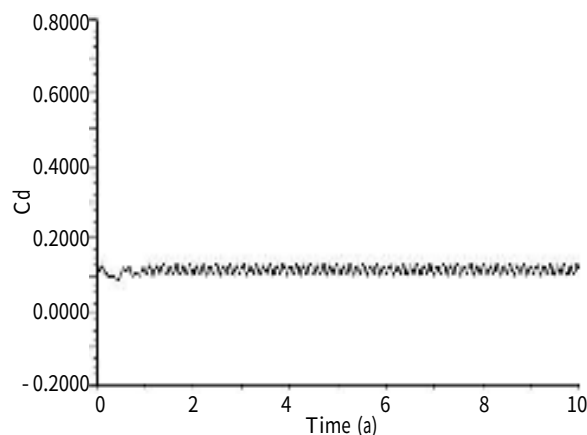


图8 $V=1.0$ m/s无蜂窝陶瓷时阻力系数
Fig.8 Drag coefficient of heat exchanger without honeycomb ceramic, $V=1.0$ m/s

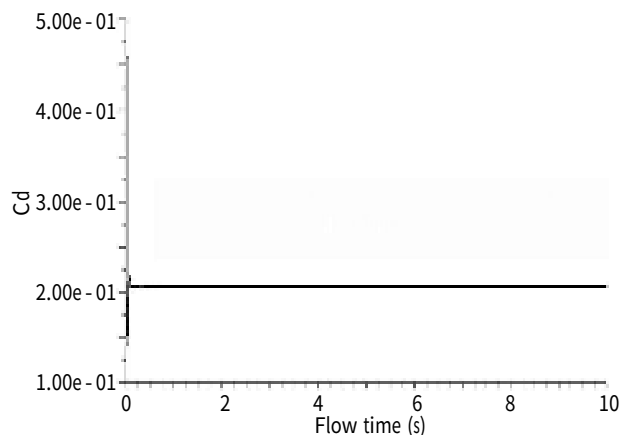
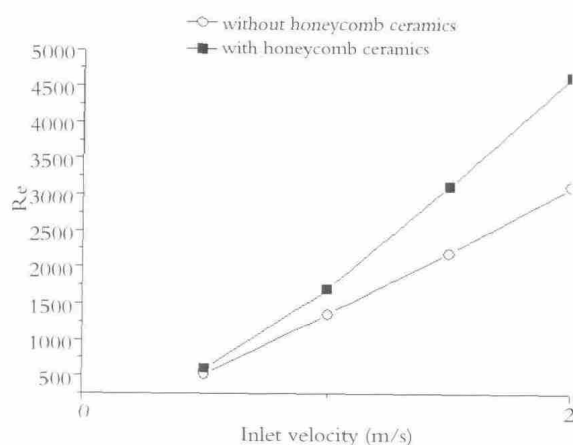
图9 $V=1.0$ m/s蜂窝陶瓷内置换热器阻力系数Fig.9 Drag coefficient of heat exchanger embedded in honeycomb ceramic, $V=1.0$ m/s

图10 换热器的表面雷诺数比较

Fig.10 Comparison of the surface Reynolds numbers of heat exchanger

的来流速度分别为0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 即来流的雷诺数分别为692、1646、2594、3540 下, 换热器周围有无放置蜂窝陶瓷时, 用fluent计算输出换热器表面雷诺数进行比较, 如图10所示。从图中可以看出, 在来流速度相同时, 放置蜂窝陶瓷后换热器表面的雷诺数更大, 而且来流速度越大, 二者的差距也越大。这是由于蜂窝陶瓷的存在增大了流动阻力, 迫使更多流体绕流换热器; 来流速度越大, 受到的阻碍也就越强烈, 绕流换热器的流体越多, 流速越高, 从而雷诺数的差距也就越大。更多的流体流经换热器表面有利于强化对流传热。

4 结 论

采用大涡模拟方法对蜂窝陶瓷内置换热器的圆

柱绕流问题进行了研究, 研究结果表明:

(1)大涡模拟方法可有效的用于圆柱绕流问题的研究;

(2)蜂窝陶瓷抑制了漩涡的发展、脱落, 圆柱绕流分离点位置相对稳定, 流致振动现象得到有效抑制, 换热器受力稳定;

(3)蜂窝陶瓷增大了流动阻力, 迫使更多的流体绕流换热器, 有利于强化对流传热。

参考文献:

- [1] 刘永后, 刘瑞祥, 高振强. 矿井乏风瓦斯热氧化装置[P]. 中国专利: 200810249860.3, 2010-3-10.
- [2] GOSIEWSKI K, MATROS Y S, WARMUZINSKI K, et al. Homogeneous vs. catalytic combustion of lean methane-air mixtures in reverse-flow reactors[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(20): 5010-5019.
- [3] SALOMONS S, HAVES R E, POIRIER M, et al. Flow reversal reactor for the catalytic combustion of lean methane mixtures[J]. Catalysis Today, 2003, 83 (1-4): 59-69.
- [4] SU S, AGNEW J. Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane[J]. Fuel, 2006, 85(9): 1201-1210.
- [5] 高增丽, 刘永后, 苏庆泉, 等. 取热区蜂窝陶瓷几何特性对换热器取热率的影响[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 683-688. GAO Zengli, et al. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 683-688.
- [6] 史俊瑞, 解茂昭, 周磊. 往复流多孔介质燃烧器的二维数值模拟与结构改进[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 03: 280-285. SHI Junrui, et al. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 03: 280-285.
- [7] BINGUE J P, SAVELIEV A V, FRIDMAN A A, et al. NO_x and CO emissions of lean and ultra-lean filtration combustion of methane/air mixtures in an inert porous media[J]. Clean Air, 2002, 3(2): 199-210.
- [8] JUGJAI S, NUNGNIYOM V. Cyclic operation of porous combustion-heater (PCH)[J]. Fuel, 2009, 88(3): 553-559.
- [9] GOSIEWSKI K, WARMUZINSKI K. Effect of the mode of heat withdrawal on the asymmetry of temperature profiles in reverse-flow reactors. Catalytic combustion of methane as a test case[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(10): 2679-2689.
- [10] CONTARIN F, BARCELLOS W M, SAVELIEV A V, et al. Energy extraction from a porous media reciprocal flow burner with embedded heat exchanger[J]. J. Heat Transfer, 2005, 127(2): 123-130.
- [11] CONTARIN F, SAVELIEV A V, FRIDMAN A A, et al.

- A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers: numerical study[J]. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 2003, 46(6): 949-961.
- [12] 史俊瑞, 解茂昭, 韩春福, 等. 多孔介质燃烧-换热器的二维数值研究[J]. *化工学报*, 2009, 05: 1116-1120.
- SHI Junrui, et al. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2009, 05: 1116-1120.
- [13] 骆祥磊, 刘永启, 高振强, 等. 蜂窝陶瓷有效导热系数的试验研究[J]. *陶瓷学报*, 2013, 03: 271-276.
- LUO Xianglei, et al. *Journal of Ceramics*, 2013, 03: 271-276.
- [14] DU L M, XIE M Z. Numerical prediction of radiative heat transfer in reciprocating superadiabatic combustion in porous media[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(Supplement): S26-S31.
- [15] 高振强, 刘瑞祥, 和蒙蒙, 等. 通风故障条件下水平蜂窝陶瓷床传热规律[J]. *陶瓷学报*, 2013, 03: 294-298.
- GAO Zhenqiang, et al. *Journal of Ceramics*, 2013, 03: 294-298.
- [16] GAO Z L, LIU Y Q, GAO Z Q. Heat extraction characteristic of embedded heat exchanger in honeycomb ceramic packed bed[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, 39(10): 1526-1534.
- [17] ONG L, WALLACE J. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder[J]. *Experiments in Fluids*, 1996, 20(6): 441-453.
- [18] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re_D=3900$ [J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(2): 403-417.
- [19] 李霖, 张志国, 王先洲, 等. 低雷诺数圆柱绕流的大涡模拟分析[J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(1): 22-26.
- LI Lin, et al. *Ship Science and Technology*, 2013, 35(1): 22-26.