

文章编号:0253-9993(2012)04-0683-06

取热区蜂窝陶瓷几何特性对换热器取热率的影响

高增丽^{1,2},刘永启²,苏庆泉¹,高振强²

(1. 北京科技大学 机械工程学院,北京 100083;2. 山东理工大学 交通与车辆工程学院,山东 淄博 255049)

摘要:在实验验证数学模型有效性的基础上,数值研究了立式蜂窝陶瓷填充床内取热区蜂窝陶瓷几何特性对填充床内置换热器取热率的影响。热风从取热区下侧的蜂窝陶瓷流出后进入的取热区阻力不匹配,热风会重新分配,一部分进入换热器内置空间,与换热管外壁进行直接的对流换热,另一部分进入取热区蜂窝陶瓷将其加热后与换热管外壁进行辐射换热,取热区蜂窝陶瓷的几何结构影响取热区热风阻力不匹配程度与热风分配,最终影响到换热器取热率。计算结果表明:沿热风流动方向上取热区蜂窝陶瓷几何特性尺寸增大时,换热器取热率减小;垂直热风流动方向上取热区蜂窝陶瓷的两个几何特性尺寸增大时,内置换热器取热率呈现先增大后减小趋势。

关键词:蜂窝陶瓷;取热率;填充床;内置换热器

中图分类号:TD712.63 **文献标志码:**A

The influence of geometry characteristics of honeycomb ceramic in heat extraction zone on heat extraction rate

GAO Zeng-li^{1,2}, LIU Yong-qi², SU Qing-quan¹, GAO Zhen-qiang²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The influence of geometry characteristics of honeycomb ceramic in vertical packed bed heat extraction zone on heat extraction rate was numerically studied using three-dimensional mathematical model on the basis of model validity by experimental validation. Existence of heat extraction zone honeycomb ceramic resulted into different resistance in different positions of heat extraction zone, so gas would redistribute, so one part of the gas entered space where heat exchanger was embedded and there existed directly convective heat transfer between the part of the gas and heat exchanger exterior, while the other part of the gas entered honeycomb ceramic packed in heat extraction zone, heated the honeycomb ceramic through mode of convective heat transfer and then heat was transferred to heat exchanger exterior through thermal radiation. The characteristic sizes of the packed honeycomb ceramic in heat extraction zone had influence on heat extraction zone resistance and gas redistribution, and finally influenced heat extraction rate of heat exchanger. The calculated results show heat extraction rate of heat exchanger decreases with the increasing the characteristic size in the direction of gas flow of heat extraction zone honeycomb ceramic, but when the other two characteristic sizes increase, the heat extraction rate shows a trend of first increase and then decrease.

Key words: honeycomb ceramic; heat extraction rate; packed bed; embedded heat exchanger

每年因采煤而产生的大量乏风瓦斯成为世界一大难题,对空排放不仅污染环境而且浪费能源,甲烷的温室效应是CO₂的21.5^[1]倍,同时又是一种清洁

能源^[2]。由于煤矿乏风中甲烷含量非常低(<0.8%),传统燃烧方法无法将其氧化成二氧化碳后排放,目前广泛采用热逆流氧化。试验研究表明:在

收稿日期:2011-05-11 责任编辑:许书阁

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)重点资助项目(2009AA063202)

作者简介:高增丽(1973—),女,山东临朐人,讲师,博士研究生。Tel:0533-2782616, E-mail: gaozengli_10@163.com。通讯作者:刘永启(1965—),男,山东枣庄人,教授,博士。Tel:0533-2782616, E-mail: liuyq65@163.com

热逆流氧化中,如果甲烷的浓度高于 0.2%^[3],甲烷氧化产生的热量除维持自身反应外还有部分热量剩余,剩余热量可以取出加以利用。从 20 世纪 90 年代 MEGTAC 公司就致力于煤矿乏风处理研究,迄今为止将煤矿乏风中甲烷氧化成二氧化碳后排在技术上已经相对成熟^[4-11],但是对于剩余热量的提取研究^[12-15]则很少。

煤矿乏风氧化床热量的提取一般在氧化床中心两侧适当温区布置换热器适度取热,通过加热管内的工质水向外输出热量。适度取热决定了这种布置在蜂窝陶瓷内的换热器同传统换热器显著不同。取热过多导致乏风来流得不到良好预热而熄火,影响甲烷的销毁;取热过少将导致氧化床中心区温度随着时间延长而累积升高最终烧坏中心区蜂窝陶瓷,影响装置的可靠性。本文在实验验证数学模型有效的基础上,利用 Fluent 数值模拟研究稳态条件下取热区蜂窝陶瓷几何特性对换热器取热率的影响。由于煤矿乏风中甲烷含量非常低,氧化后 CO₂ 含量很少,模拟时采用热空气代替热烟气。

1 数值模拟方法

1.1 计算模型

计算物理模型依照煤矿乏风热逆流氧化床而建立,如图 1 所示,蛇形管换热器内置于蜂窝陶瓷填充床取热区内,取热区蛇形管间夹填的蜂窝陶瓷将取热区分成了换热器内置空间和蜂窝陶瓷区,进而改变了热气体与换热器的换热方式。取热区两侧填充的蜂窝陶瓷在煤矿乏风的逆流氧化中起到预热乏风来流的作用。取热区蜂窝陶瓷热风流动方向上的特性尺寸为 a ;垂直热风流动方向的蜂窝陶瓷特性尺寸为 b , c ;换热管外直径为 d ;蛇形管直管段长度为 L 。换热管外热风流路与换热管内水流路相互垂直,无法简化为二维模型,本文采用三维模型,考察取热区蜂窝陶瓷 $a/d, b/d, c/L$ 变化对换热器取热率的影响。

计算中包括气相(空气)、液相(水)的流动、传热过程以及固体的传热过程,空气与水的流动区域分别设定两个流体区,将固体与空气共存的蜂窝陶瓷区域设置为多孔介质,流动与传热控制方程如下:

流体质量守恒方程(连续性方程)为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为流体密度; t 为时间; \mathbf{u} 为流体速度矢量。

流体动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} \mathbf{u}) - \frac{\partial \rho}{\partial x} + s_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \mathbf{u}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) - \frac{\partial \rho}{\partial y} + s_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \mathbf{u}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) - \frac{\partial \rho}{\partial z} + s_w \quad (4)$$

式中, u, v, w 为 3 个坐标轴 x, y, z 上的速度分量; μ 为流体的动力黏度; s_u, s_v, s_w 为源相。

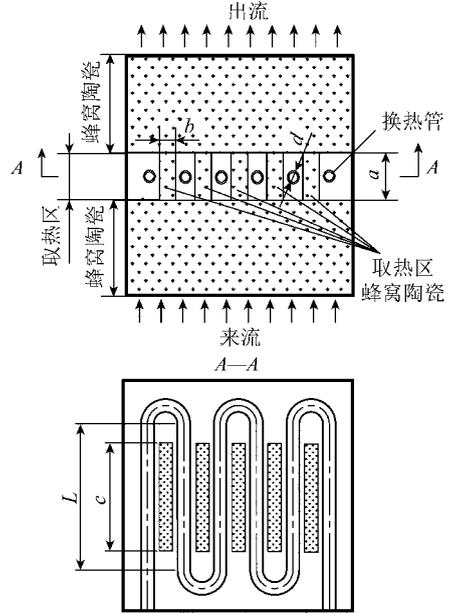


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

流体能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u} T) = \operatorname{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \operatorname{grad} T\right) + S_T \quad (5)$$

式中, T 为流体温度; c_p 为流体定压比热容; S_T 为源相; λ 为流体导热系数。

固体能量方程为

$$\frac{d}{di}\left(\lambda_s \frac{dT_s}{di}\right) + h_a(T_a - T_s) = \frac{dq_r}{di} \quad (6)$$

式中, i 为 x, y, z 方向的坐标距离; λ_s 为管壁导热系数; T_s 为换热管外壁温度; h_a 为对流换热系数; T_a 为气体温度; q_r 为辐射通量。

对于具有吸收、发射、散射性质的介质,在位置 \mathbf{r} 、沿方向 \mathbf{s} 的辐射传播方程为

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} + (\sigma_a + \sigma_s)I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \sigma_a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega' \quad (7)$$

式中, I 为辐射强度; \mathbf{r} 为位置向量; \mathbf{s} 为方向向量; s 为沿程长度(行程长度); σ_a 为吸收系数; σ_s 为散射系数; n 为折射系数; σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数; Φ 为相位函数; \mathbf{s}' 为散射方向; Ω' 为空间立体角。

1.2 计算方法与边界条件

由于计算模型尺寸比较大且很不规则,均匀划分

网格会使网格数量增加,计算量增大,对计算机的内存要求较高。为了减少网格数量又不影响计算精度,计算采用分块划分、结构化与非结构化网格相结合的方式对计算区域进行网格划分,结构复杂的换热区采用混合网格进行划分,网格划分较密以增加对不规则空间的适应性。取热区两端蜂窝陶瓷结构规则采用结构化网格,并适当将网格稀疏划分,品质大于0.8的网格为0。近壁点采用壁面函数法处理,稳态隐式格式求解;采用 $k-\epsilon$ 湍流模型计算湍流参数的影响;控制体积截面物理量采用二阶迎风差分格式获取;采用 SIMPLE 算法处理压力与速度的耦合问题;换热器管外流动介质为热空气,物性参数为定性温度下的常量,给定热空气的进口质量流速 ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) 及相应温度;换热器管内流动介质为水,物性参数为入口水温下的常量,给定水的进口流速及相应的温度。蜂窝陶瓷采用多孔介质均质模型,多孔介质辐射模型为 DO 辐射模型,辐射参数根据陶瓷材料的光学性能确定,壁面辐射通过添加壁面发射率实现。根据煤矿乏风热氧化中对蜂窝陶瓷蓄放热要求,蜂窝陶瓷采用孔隙率为 0.64 的莫来石质蜂窝陶瓷。

蜂窝陶瓷垂直蜂窝孔道的两个面一个为平面,另一面具有一定弧度,如图 2 所示,两块陶瓷上下叠放时,陶瓷与陶瓷之间存在一定间隙,为热风重新分配提供了空间,同时有效减小蜂窝陶瓷孔道错位引起的阻力,数值计算时上下相邻陶瓷之间留 5 mm 间隙。

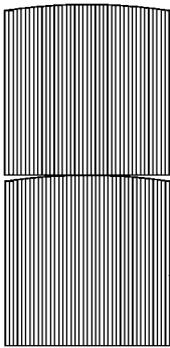


图2 蜂窝陶瓷叠放

Fig. 2 Honeycomb ceramic relative positions

2 计算结果与分析

2.1 数学模型有效性分析

按照 a, b, c, d, L 取定值时摆放蜂窝陶瓷,相应的实验台外观如图 3 所示,数据采集系统主要由 k 型热电偶及 Personal Daq56 数据采集器(内置冷端补偿可直接测量热电偶)、高温皮托管及 MP200 多功能差压仪(用于测量风量,相对误差 0.2%)、孔板流量计及 WL-LK 型智能流量积算控制仪(用于测量水的流

量,相对误差 3%) 组成,调试相应工况后记录该工况下内置换热器的取热率(管内工质水获得热量/热气体进入蜂窝陶瓷填充床时带入物理热)并与模拟结果进行对比,热风工况确定时变化水流量的具体结果如表 1,图 4 所示,从图 4 可以看出,水质量流速为 $1\ 132\ \text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时,实验值与模拟值差别较大,主要因为此工况处于水流量表量程的上限,水质量流速测量出现较大误差所致,其余点实验值与模拟值吻合较好。管内工质水工况确定,热风质量流速 ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) 确定,变化风温工况下的实验结果与模拟结果如表 2,图 5 所示,从图 5 可以看出,实验结果与模拟结果得到较好吻合,从而计算模型有效,计算结果可靠。



图3 实验台

Fig. 3 Experimental apparatus photo

表1 不同水质量流速下取热率的实验值与模拟值对比

Table 1 The comparison of experimental values and simulation values of heat extraction rates with different water mass flow velocity

水质量流速/ ($\text{kg} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$)	取热率实 验值/%	取热率模 拟值/%
1 132	7.04	6.09
850	5.99	5.82
570	5.54	5.72
280	4.76	4.80
170	4.66	4.84

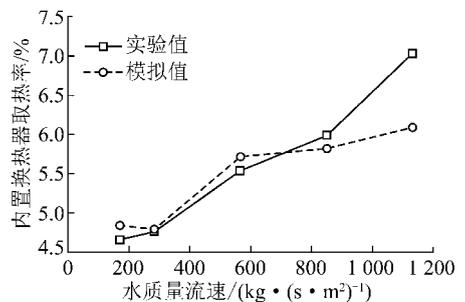


图4 同热风工况、不同水质量流速下取热率的实验值与模拟值比较

Fig. 4 Comparison between experimental values and simulation values of heat extraction rates under the condition that water mass flow velocity is different and gas operation condition is the same

表 2 不同热风温度下取热率的实验结果与模拟结果对比

Table 2 The comparison of experimental values and simulation values of heat extraction rates with different gas temperatures

热风温度/℃	取热率实验值/%	取热率模拟值/%
340	5.62	3.47
440	5.28	5.01
540	5.73	5.89
640	9.96	8.21
740	10.49	9.50

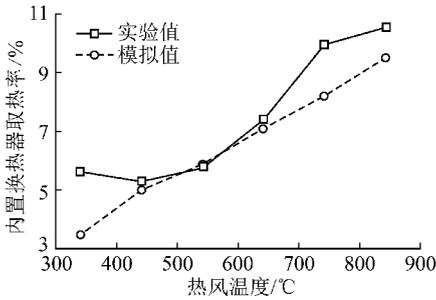


图 5 同热风、水质量流速,不同风温条件下取热率的实验值与模拟值比较

Fig. 5 Comparison between experimental values and simulation values of heat extraction rates under the condition that gas mass flow velocity and water mass flow velocity are the same and gas temperature is different

2.2 取热区蜂窝陶瓷 a/d 变化对换热器取热率的影响

b, c, L 为定值条件下,变化 a/d ,图 6 为 $a/d = 1.25$ (取热率较大)、 $a/d = 5.00$ (取热率较小)时速度矢量局部放大,对应速度等值线局部放大为图 7。从图 7 可以看出,取热区蜂窝陶瓷特性尺寸 a/d 增大时,取热区上下侧的蜂窝陶瓷逐渐远离换热器管壁,换热器内置空间增大,阻力减小,一部分热风开始偏离原来的流动方向进入换热器内置空间,使得换热器左右侧的风速增大,而换热器迎风侧与背风侧的风速则明显减小,如图 7 所示,整体看来,换热器内置空间内风速整体下降,与换热管外壁的对流换热削弱;另一方面取热区蜂窝陶瓷特性尺寸 a/d 增大时,取热区蜂窝陶瓷侧壁与换热管外壁的辐射换热面积增大,强化与换热器外壁的辐射换热。总体看来辐射换热面积的增大引起辐射换热的强化没有弥补风速降低引起的换热器外壁对流换热的削弱,因此随着取热区蜂窝陶瓷 a/d 的增加,取热率降低,如图 8 所示。

2.3 取热区蜂窝陶瓷 b/d 变化对换热器取热率的影响

a, c, L 为定值条件下, b/d 变化会改变取热区的

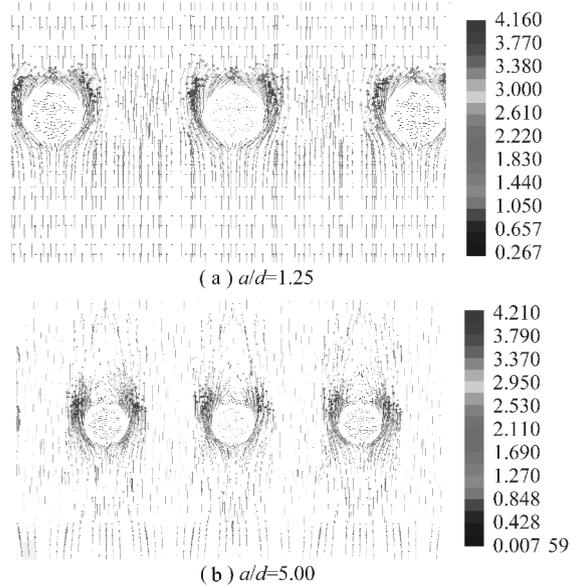


图 6 速度矢量场局部放大

Fig. 6 Velocity vector figures

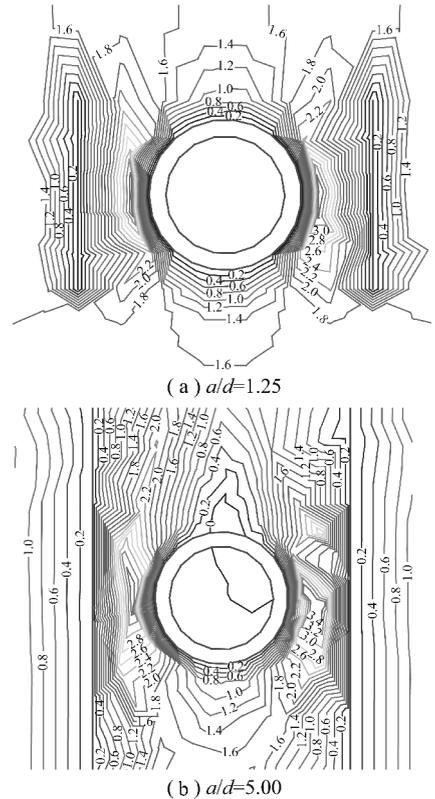


图 7 速度等值线局部放大

Fig. 7 Velocity magnitude figures

阻力不匹配程度,部分气体的速度矢量会偏离原来的流动轨迹,优先选择阻力相对较小区域,见取热率较大($b/d = 1.06$)时对应的速度矢量场(图 9)。

图 10 为定 a, c, L 值条件下换热器取热率随 b/d 的变化, b/d 逐渐增大时,取热效率先增大后减小,存在极大值。取热区蜂窝陶瓷主要通过改变对流与辐射换热方式影响换热器取热率,而且是相互矛盾的两

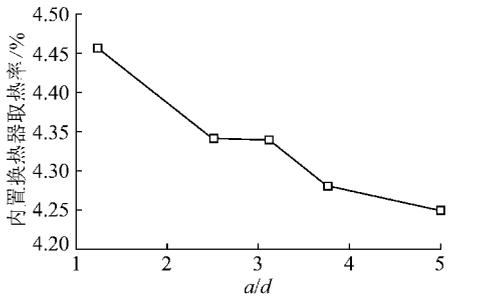


图8 定工况条件下内置换热器取热率随 a/d 的变化
Fig. 8 Influence of a/d on heat extraction rates under the condition that the operation condition is the same

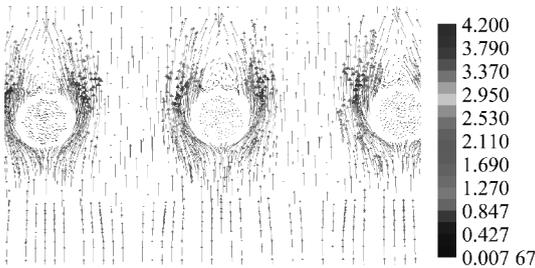


图9 b/d 为 1.06 时速度矢量场局部放大
Fig. 9 Velocity vector figures when $b/d=1.06$

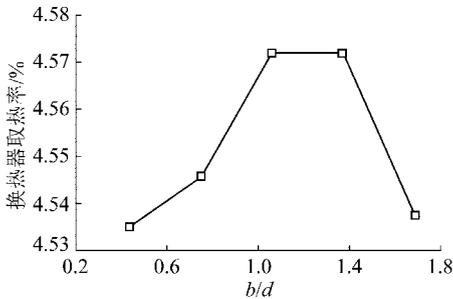


图10 定工况条件下内置换热器取热率随 b/d 的变化
Fig. 10 Influence of b/d on heat extraction rates under the condition that the operation condition is fixed

个方面:一方面取热区蜂窝陶瓷 b/d 逐渐增大时,换热器内置空间的气体流速增大,如图 11 所示,这是因为取热区蜂窝陶瓷的存在将取热区分成了换热器内置空间(无陶瓷)与蜂窝陶瓷区,两区域阻力不匹配,换热器内置空间阻力小,蜂窝陶瓷区阻力大,气体从下侧蜂窝陶瓷流出进入取热区后会优先选择进入阻力相对小的换热器内置空间,随着 a/d 的增大,阻力不匹配程度加剧,换热器内置空间气体平均流速增大,换热器内置空间气体流速增大会强化气体与换热器的对流换热;另一方面取热区蜂窝陶瓷 b/d 逐渐增大时,更多的热体会进入取热区蜂窝陶瓷,无法同换热器直接进行对流换热,而是通过将这部分陶瓷加热后通过陶瓷侧壁面以辐射的形式同换热器进行间接换热,这种间接换热增大了气体与换热管外壁面的换热热阻,同时随着 b/d 的增大,取热区上下侧蜂窝

陶瓷同换热器发生辐射的面积会减小,辐射换热削弱。因此 b/d 变化对换热器取热率的影响取决于上述矛盾两方面的综合作用,呈现先增大后减小趋势。

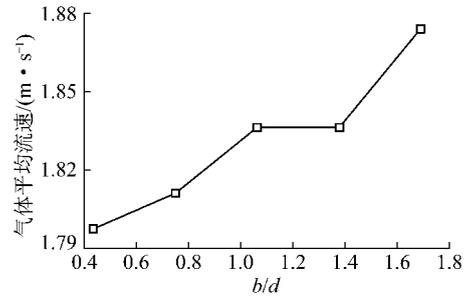


图11 换热器内置空间热气体平均流速随 b/d 的变化
Fig. 11 Influence of b/d on the hot gas velocity in the space where the heat exchanger is embedded

2.4 取热区蜂窝陶瓷 c/L 变化对换热器取热率的影响

图 12 为 a, b, d 为定值条件下换热器取热率随 c/L 的变化, c/L 逐渐增大时,取热效率先增大后减小,存在极大值。主要原因同样是因为取热区蜂窝陶瓷 c/L 变化对热气体与换热器换热方式(对流与辐射)的矛盾影响。图 13 为 $c/L=0.78$ 时局部放大速度矢量场,图中大框中区域为取热区蜂窝陶瓷区,小框内区域为取热区换热器内置空间,可以看出在两区域的交界处,一部分气体由于两区域阻力不匹配明显偏离了原来的流动方向,但是换热器取热率不仅取决于 c/L 变化引起换热器内置空间流速变化而导致的对流换热的变化,还取决于 c/L 变化引起的辐射换热的变化,二者的综合作用决定了取热率随 c/L 的变化趋势。

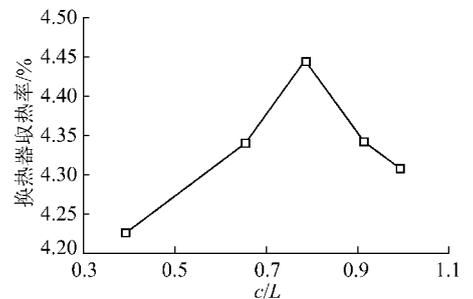


图12 定工况条件下内置换热器取热率随 c/L 的变化
Fig. 12 Influence of c/L on heat extraction rates under the condition that the operation condition is fixed

3 结 论

(1)取热区填充蜂窝陶瓷沿热风流动方向的特性尺寸增加时,取热率呈现下降趋势,主要因为此方向上特性尺寸增大时,辐射换热面积的增大引起的换

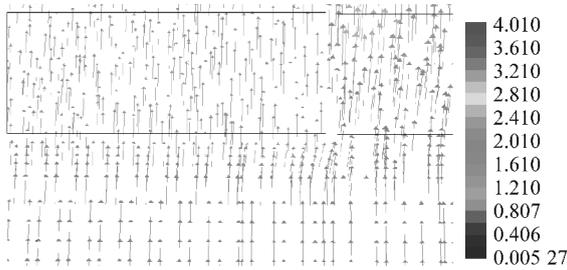


图 13 c/L 为 0.78 时速度矢量场局部放大

Fig. 13 Velocity vector figure when $c/L=0.78$

热器辐射换热的强化没有弥补气体流速降低引起的换热器对流换热的削弱,因此取热率降低。

(2)取热区蜂窝陶瓷垂直热风流动方向的两特性尺寸增大时,换热器取热率呈现先增大后减小趋势,主要是因为此方向上两特性尺寸增大对热气体与换热器换热方式(对流与辐射)的矛盾影响。一方面,取热区蜂窝陶瓷垂直热风流动方向上特性尺寸增大时,换热器内置空间气体流速增大,对流换热强化;另一方面取热区蜂窝陶瓷此特性尺寸增大时,更多的热气体进入取热区蛇形管间填充的蜂窝陶瓷,不能同换热器进行直接对流换热,只能采取将取热区蜂窝陶瓷加热通过陶瓷侧壁辐射与换热器进行换热,间接换热热阻增大,同时更多取热区两侧填充蜂窝陶瓷与换热器外壁的辐射被遮挡,辐射换热削弱,取热区蜂窝陶瓷垂直热风流动方向的两特性尺寸增大对换热器取热率的影响取决于上述矛盾两方面的综合作用,呈现先增大后减小趋势。

参考文献:

- [1] Özgen Karacan C, Felicia A Ruiz. Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction greenhouse gas reduction[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86: 121-156.
- [2] Izzet Karakurt, Gokhan Aydin. Mine ventilation air methane as a sustainable energy source[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 1042-1049.
- [3] 杨仲卿, 张 力. 超低浓度煤层气能源化利用技术研究进展[J]. 天然气工业, 2010, 30(2): 115-118.
Yang Zhongqing, Zhang Li. Research progress of resource utilization technology of super-low concentration coal bed methane [J]. Natural

Gas Industry, 2010, 30(2): 115-118.

- [4] Juan Yin, Shi Su. Thermodynamic characteristics of a low concentration methane catalytic combustion gas turbine[J]. Applied Energy, 2010, 86(6): 2102-2108.
- [5] Shi Su, Jenny Agnew. Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane[J]. Fuel, 2006, 85(9): 1201-1210.
- [6] Krzysztof Gosiewski, Anna Pawlaczyk. A study on thermal combustion of lean methane-air mixtures; simplified reaction mechanism and kinetic equations[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 154: 9-16.
- [7] Xie Maozhao, Shi Junrui, Deng Yangbo, et al. Experimental and numerical investigation on performance of a porous medium burner with reciprocating flow[J]. Fuel, 2009, 88: 206-213.
- [8] Krzysztof Gosiewski. Effective approach to cyclic steady state in the catalytic reverse-flow combustion of methane [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59: 4095-4101.
- [9] Mendes M A A, Pereira J M C, Pereira J C F. A numerical study of the stability of one-dimensional laminar premixed flames in inert porous media[J]. Combustion and Flame, 2008, 153: 525-539.
- [10] 郑 斌, 刘永启. 煤矿乏风的蓄热逆流氧化[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1475-1478.
Zheng Bin, Liu Yongqi. Oxidation of coal mine ventilation air methane in thermal reverse-flow reactor[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1475-1478.
- [11] Song Zhengchang, Lin Boquan. Numerical simulation of excess-enthalpy combustion flame propagation of coal mine methane in ceramic foam[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(2): 248-253.
- [12] Fabiano Contarin, Alexei V Saveliev, Alexander A Fridman, et al. A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers; numerical study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 949-961.
- [13] Krzysztof Gosiewski, Krzysztof Warmuzinski. 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: 2679-2689.
- [14] Liu Ruixiang, Liu Yongqi, Gao Zhenqiang, et al. Simulation of inner cooling of a reverse flow reactor for lean methane thermal oxidation [A]. Proceedings of the IASTED International Conference Modeling, Simulation, and Identification (MSI2009) [C]. Beijing, 2009: 658-665.
- [15] Liu Ruixiang, Liu Yongqi, Gao Zhenqiang. Methane emission control by thermal oxidation in a reverse flow reactor [A]. 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering [C]. ICBBE, 2008: 3952-3955.