

研究论文

逆流式微通道换热器设计与操作特性分析

曹 彬, 陈光文, 袁 权

(中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要: 采用一维对流-导热耦合模型对逆流式微通道换热器传热特性进行分析和模拟, 考察了结构参数、操作条件和材质热导率对微换热器整体效率的影响。计算结果表明, 由于器壁径向和轴向传热的相互影响, 与常规尺度换热器相比, 微通道换热器的设计和操作特性有许多明显不同的特征。微通道换热器存在最佳操作流量值, 该值可作为标准负荷流量, 微换热器不宜在亚负荷状态下操作; 操作流量越大, 微通道换热器最大换热效率越低; 微换热器结构采用大深宽比通道和适当的间壁厚度为佳。

关键词: 微换热器; 逆流; 轴向导热; 过程强化; 微型化

中图分类号: TQ 021 TK 12

文献标识码: A

文章编号: 0438 - 1157 (2005) 05 - 0774 - 05

Conjugated heat transfer in micro-channel heat exchanger

CAO Bin, CHEN Guangwen, YUAN Quan

(Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: Conjugated heat transfer performance in a countercurrent micro-channel heat exchanger was analyzed and simulated by using the one dimensional gas convection and wall axial heat conduction model. The effects of structural parameters, operating conditions and heat conductivity of wall material on the performance of heat transfer of this micro-channel heat exchanger were investigated. The simulation results indicated that the properties of micro-channel heat exchanger were much different from those of conventional heat exchanger due to the synergetic effect of radial and axial heat conduction in the micro-channel heat exchanger. Low conductivity metal, such as stainless steel, is an excellent wall material and available for micro-channel heat exchanger. There existed an optimal operation flux, which could be used as a standard flux for a given micro-channel heat exchanger, and micro-channel heat exchanger was not suitable when the operation flux was lower than the standard flux. The maximum heat transfer efficiency of micro-channel heat exchanger decreased with increasing operating flux. The calculation results also showed that micro-channel heat exchanger with high aspect ratio channel and optimal wall width had higher efficiency than other configurations.

Key words: micro-channel heat exchanger; countercurrent flow; axial heat conduction; process intensification; miniaturization

2004 - 03 - 03 收到初稿, 2004 - 05 - 10 收到修改稿。

联系人: 陈光文。第一作者: 曹彬 (1975 →), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20176057, 20122201, 20490200); 国际科技合作重点项目计划 (2001CB711203); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (K2003E2)。

Received date: 2004 - 03 - 03.

Corresponding author: CHEN Guangwen. E-mail: gwchen@dicp.ac.cn

Foundation item: supported by National Natural Science Foundation of China (20176057, 20122201, 20490200), Key Program for International Cooperation of Science and Technology (2001CB711203) and the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (K2003E2).

引言

微通道换热器 (microchannel heat exchanger) 和微通道热阱 (microchannel heat sinks) 是 20 世纪 90 年代发展起来的高效换热设备^[1,2], 可广泛应用于化工、能源与环境等领域^[3~8]. 由于特征尺度在微米到亚毫米尺度范围内, 微通道换热器具有许多与常规尺度设备不同的特征, 如体积小、质量轻、效率高、强度大等. 微通道的换热器的设计和操作与常规尺度换热器有明显的不同. Bier 等^[9]对错流式微通道换热器内气-气换热特性进行了数值分析和实验研究, 结果表明, 器壁轴向导热对换热行为有明显的影 响, 不锈钢微通道换热器的换热效率高于铜微换热器. Stief 等^[10]通过分析指出, 存在理论最佳热导率使得微通道换热器的性能达到最优, 他们计算了 3 种不同结构微通道换热器的理论最佳热导率. 但并未对实际设计和操作过程中加工材质的选择和操作特性对换热器性能的影响进行研究.

本文采用一维对流-导热耦合模型^[10]对逆流式微通道换热器操作特性进行分析和模拟, 着重考察实际设计过程中加工材质和操作参数对换热器行为的影响.

1 模型

1.1 模型几何结构

逆流式微通道换热器的几何结构如图 1 所示, a、b 分别为冷、热流体的流动通道. 根据结构对称性, 可将器壁固体区分为 4 个不同的特征区域: 1、2 各自表征了相同流体通道间器壁的导热, 3 表征了冷热流体通道间器壁的导热, 4 表征了不同器壁间的导热.

1.2 模型方程

计算时假定换热器绝热良好, 与环境无热交

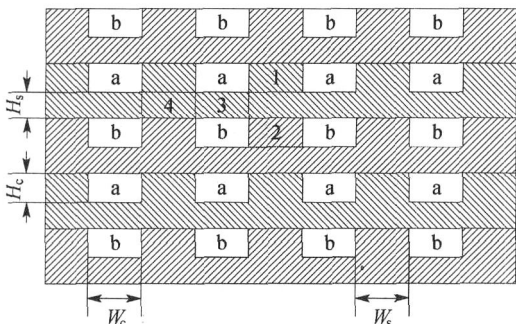


Fig. 1 Schematic diagram of micro heat exchanger

换. a、b 通道内介质的传热行为采用一维对流换热模型进行描述, 假定通道内流体流动为层流, 4 个固体区域内沿流动方向的导热行为采用一维导热方程进行描述^[10].

$$(Gc_p)_a \frac{dT_a}{dz} = 2 H_c K_{a1} (T_1 - T_a) + 2 W_c K_{a3} (T_3 - T_a) \quad (1)$$

$$(Gc_p)_b \frac{dT_b}{dz} = 2 H_c K_{b2} (T_2 - T_b) + 2 W_c K_{b3} (T_3 - T_b) \quad (2)$$

$$s H_c W_s \frac{d^2 T_1}{dz^2} = 2 H_c K_{1a} (T_1 - T_a) + 2 W_s K_{14} (T_1 - T_4) \quad (3)$$

$$s H_c W_s \frac{d^2 T_2}{dz^2} = 2 H_c K_{2b} (T_2 - T_b) + 2 W_s K_{24} (T_2 - T_4) \quad (4)$$

$$s H_s W_c \frac{d^2 T_3}{dz^2} = W_c K_{3a} (T_3 - T_a) + W_c K_{3b} (T_3 - T_b) + 2 H_s K_{34} (T_3 - T_4) \quad (5)$$

$$s H_s W_s \frac{d^2 T_4}{dz^2} = W_s K_{41} (T_4 - T_1) + W_s K_{42} (T_4 - T_2) + 2 H_s K_{43} (T_4 - T_3) \quad (6)$$

$$\text{at } z=0 \quad T_a = T_{a,in} \quad \frac{dT_i}{dz} = 0 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

$$z=L_s \quad T_b = T_{b,in} \quad \frac{dT_i}{dz} = 0 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

式中

$$K_{a1} = K_{1a} = 1 \left/ \left(\frac{1}{h_a} + \frac{W_s}{2} \right) \right.$$

$$K_{a3} = K_{3a} = 1 \left/ \left(\frac{1}{h_a} + \frac{H_s}{2} \right) \right.$$

$$K_{b2} = K_{2b} = 1 \left/ \left(\frac{1}{h_b} + \frac{W_s}{2} \right) \right.$$

$$K_{b3} = K_{3b} = 1 \left/ \left(\frac{1}{h_b} + \frac{H_s}{2} \right) \right.$$

$$K_{14} = 1 \left/ \left(\frac{H_c}{2} + \frac{H_s}{2} \right) \right.$$

$$K_{24} = 1 \left/ \left(\frac{H_c}{2} + \frac{H_s}{2} \right) \right.$$

$$K_{34} = 1 \left/ \left(\frac{W_c}{2} + \frac{W_s}{2} \right) \right.$$

1.3 模型参数及求解

计算时设定换热器通道长度为 5 cm, 冷、热流体中的换热介质均为 N₂, 其中冷流体的进口温度为 20 °C, 热流体的入口温度为 100 °C. 采用有限体积法对模型方程进行求解, 其中一阶对流项采用迎风格式进行离散. 换热器换热效率计算公式为

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{实际换热量}}{\text{最大换热量}} \\ &= \frac{(Gc_p)_a (T_{a,out} - T_{a,in})}{\min[(Gc_p)_a, (Gc_p)_b] (T_{b,in} - T_{a,in})} \quad (7) \end{aligned}$$

由于计算中冷、热流体的流量相同, 换热器换热效

率公式可简化为

$$= \frac{T_{a,out} - T_{a,in}}{T_{b,in} - T_{a,in}} \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 操作流量对换热器行为的影响

图 2 给出了几种不同材质换热器的换热效率随换热介质质量流率的变化规律。低流量时，低热导率材料换热器（如玻璃）的换热效率要明显高于诸如金属等具高热导率的换热器；随介质流量的增加，换热效率逐渐减小。对于金属换热器，材质热导率越高，换热器效率越低，总体而言，不锈钢换热器的性能最佳。在低介质流量时，由于径向热阻和器壁轴向热反馈共同作用，金属换热器的换热效率随介质流量的变化存在一个最大值，亦即对于确定结构的换热器而言，存在一个最佳的操作流量值。对于确定结构的不锈钢材质换热器，若以其最优流量定义为其标准负荷流量，那么在相同的流量偏差下，系统效率在亚负荷操作时，效率降低幅度要比在超负荷操作时大得多。因此，在一定范围内，不锈钢微通道换热器可超负荷运行，不宜在亚负荷状态下操作，这点与常规尺度换热器系统有明显的不同。

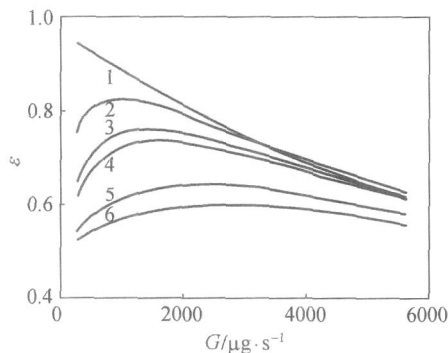


Fig. 2 Heat exchanger efficiency vs gas flux
 $H_c = H_s = 200 \mu\text{m}$, $W_c = W_s = 300 \mu\text{m}$
 1—glass; 2—stainless steel; 3—steel;
 4—east iron; 5—aluminum; 6—copper

根据径向热阻和器壁轴向热传导的影响，换热器效率随热导率的变化可分为 3 个区域（见图 3）：低热导率时，径向导热是影响过程换热的主要因素，随热导率的增加，径向热阻的影响逐渐减弱，换热器效率增大，该区域可称为热阻控制区；热导率增加到一定程度时，换热器效率随热导率增加的趋势逐渐减弱，增至最大值后开始逐渐减小，称为

高效换热区；热导率进一步增加时，器壁轴向导热对换热过程的影响逐渐增强，换热器效率随之减小，并逐渐趋近于器壁完全等温时的换热效率 50%，称为热传导控制区。对于结构参数一定的换热器，随操作流量的增加，导热热阻对换热效率的影响逐渐增强，热阻控制区的范围逐渐向高热导率方向拓展，与此同时，高效换热区也向高热导率方向移动，换热器效率最大值逐渐减小；另一方面，流量的增加也使得器壁轴向导热对换热效率的影响逐渐减弱。

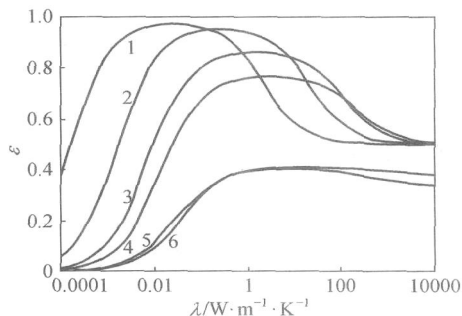


Fig. 3 Heat exchanger efficiency vs conductivity
 $H_c = H_s = 200 \mu\text{m}$, $W_c = W_s = 300 \mu\text{m}$
 $G/\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$: 1—28; 2—280; 3—1400;
 4—2800; 5—8400; 6—14000

2.2 加工材质对换热器行为的影响

随着器壁（包括底板和间壁）厚度的减小，径向热阻和轴向热反馈对换热过程的影响逐渐减弱，高效换热区的范围逐渐扩大，但最大换热效率值变化不大（图 4）。图 5 给出了几种不同材质换热器的换热效率随器壁厚度的变化规律。对于玻璃换热器，当器壁厚度大于 $40 \mu\text{m}$ 时，器壁厚度对换热效率基本没有影响；而当器壁厚度小于 $40 \mu\text{m}$ 时，随着器壁厚度的减小，间壁传热能力逐渐减弱，换热效率也随之而降低。对于不锈钢换热器，随器壁厚度的减小，换热效率增大，这是由于厚度减小导致轴向导热影响逐渐减弱；当器壁厚度减小到约 $10 \mu\text{m}$ 时，由于间壁厚度的减小导致侧壁换热热阻的增加，换热效率开始缓慢变小。对于钢、铸铁、铝、铜等高热导率材质的换热器，轴向热反馈对过程换热的影响占支配地位，随器壁厚度的减小，换热效率增大并趋于同一数值。

图 6 给出了不同操作流量下器壁厚度对最佳热导率的影响。由图可见，操作流量越大， λ_{opt} 越高。对于确定的操作流量，当 H_s 小于 $20 \mu\text{m}$ 时，随着

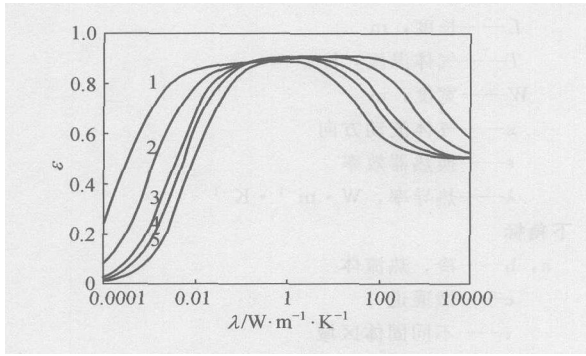


Fig. 4 Heat exchanger efficiency vs conductivity of wall

$W_s/H_s = 1$; $H_c = 200 \mu\text{m}$, $W_c = 300 \mu\text{m}$, $G = 840 \mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
 $H_s/\mu\text{m}$: 1—10; 2—40; 3—120; 4—200; 5—400

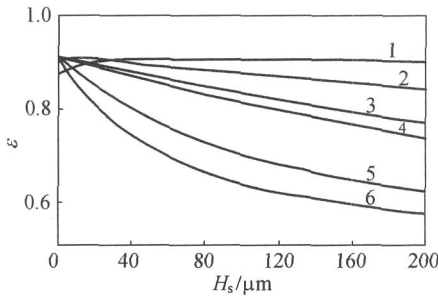


Fig. 5 Heat exchanger efficiency vs H_s

$W_s/H_s = 1$, $H_c = 200 \mu\text{m}$, $W_c = 300 \mu\text{m}$, $G = 840 \mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
 1—glass; 2—stainless steel; 3—steel;
 4—cast iron; 5—aluminum; 6—copper

器壁厚度的减小，轴向导热的影响逐渐减弱， ϵ_{opt} 迅速增加；当 H_s 大于 $20 \mu\text{m}$ 时， ϵ_{opt} 随器壁厚度的增加而缓慢减小并渐趋于一定值。图 7 给出了与图 6 相对应的最佳热导率时的最大换热效率，由图可见，操作流量对最大换热效率有显著影响，操作流量越大，最大换热效率越低，而器壁厚度对最大换热效率影响很小。

2.3 通道深宽比对换热器行为的影响

图 8 给出了不锈钢和铝两种换热器在不同深宽比时，换热效率随操作流量的变化关系，由图可见，采用大深宽比通道可减弱轴向导热对换热过程的影响，显著提高过程系统的换热效率。

2.4 通道宽度比对换热器行为的影响

由图 9 可见，对于高深宽比（深窄型）通道，间壁厚度的增加虽然使低流量时换热效率有所降低，但由于间壁导热性能增强，反而大幅度地提高了中高流量时换热器的整体换热效率。而对于浅宽型通道（图 10），由于轴向导热对过程的

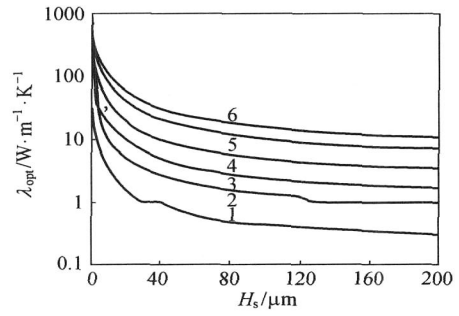


Fig. 6 λ_{opt} vs H_s under different gas flux

$W_s/H_s = 1$, $H_c = 200 \mu\text{m}$, $W_c = 300 \mu\text{m}$
 $G/\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$: 1—280; 2—840; 3—1400;
 4—2800; 5—5600; 6—8400

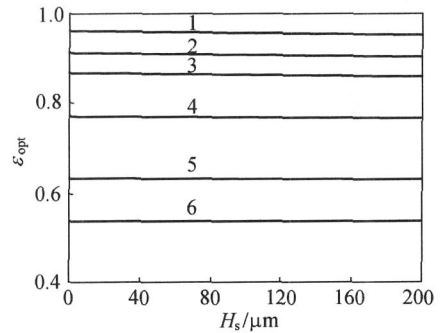


Fig. 7 ϵ_{opt} vs H_s under different gas flux

$W_s/H_s = 1$, $H_c = 200 \mu\text{m}$, $W_c = 300 \mu\text{m}$
 $G/\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$: 1—280; 2—840; 3—1400;
 4—2800; 5—5600; 6—8400

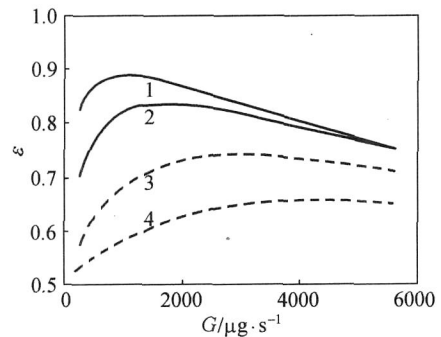


Fig. 8 Heat exchanger efficiency vs gas mass flow

$W_s/W_c = 1$
 $H_c/W_c (\mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1})$: 1, 3—600/100; 2, 4—100/600
 1, 2—stainless steel; 3, 4—aluminum

影响非常显著，因而，采用较小间壁厚度才能获得高的换热效率。总体比较分析可知，采用深窄型通道和适当的间壁厚度结构的换热器具有高的换热性能。

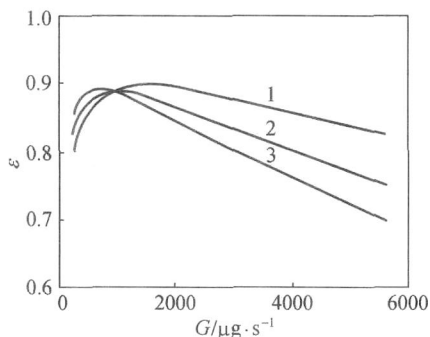


Fig 9 Heat exchanger efficiency vs gas flux stainless steel; $H_s = 200 \mu\text{m}$; $H_c = 600 \mu\text{m}$
 $W_c/W_s (\mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1})$: 1—50/150;
 2—100/100; 3—150/50

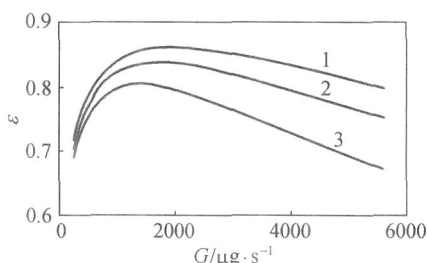


Fig 10 Heat exchanger efficiency vs gas mass flow stainless steel; $H_s = 200 \mu\text{m}$; $H_c = 100 \mu\text{m}$
 $W_c/W_s (\mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1})$: 1—900/300;
 2—600/600; 3—300/900

3 结 论

根据加工和换热性能综合比较分析,低热导率金属(如不锈钢)适宜作为微通道换热器的加工材质。微通道换热器存在一个最佳的操作流量值,可用该流量作为其标准负荷流量;换热器不宜在亚负荷状态下操作,这一点与常规换热器有明显不同,裕量过大反而达不到预定换热效果。操作流量越大,最大换热效率越低,而器壁厚度对最大换热效率影响较小。换热器结构采用大深宽比通道和适当的间壁厚度为佳。

符 号 说 明

c_p ——气体比定压热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 G ——质量流率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 H ——高度, m
 h ——对流传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 K ——总包传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

L ——长度, m
 T ——气体温度, K
 W ——宽度, m
 z ——气体流动方向
 ——换热器效率
 ——热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

下角标

a, b——冷、热流体
 c——微通道
 i——不同固体区域
 in——流体入口
 out——流体出口
 s——器壁

References

- [1] Jensen K F. Microchemical systems: status, challenges, and opportunities. *AIChE J.*, 1999, 45 (10): 2051—2054
- [2] Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权). Microchemical technology. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, 54 (4): 427—439
- [3] Wegeng R S, Drost M K, Brechley D L. Process intensification through miniaturization of chemical and thermal systems in the 21st century. In: *Proc. 3rd Int. Conf. Microreaction Technology (IMRET3)*, Springer, 2000. 2—13
- [4] Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权), Li Shulian (李淑莲). Microchannel reactor for methanol autothermal reforming. *Chinese Journal of Catalysis* (催化学报), 2002, 23 (6): 491—492
- [5] Ehrfeld W, Hessel V, Löwe H. *Microreactors: New Technology for Modern Chemistry*. New York: Wiley-vch, 2000
- [6] Chen Guangwen, Yuan Quan, Li Hengqiang, Li Shulian. CO selective oxidation in a microchannel reactor for PEM fuel cell. *Chem. Eng. J.*, 2004, 101 (1—3): 101—106
- [7] Hessel V, Kolb G. Micro-structured reactors for gas phase reactions. *Chem. Eng. J.*, 2004, 98: 1—38
- [8] Cao Bin (曹彬), Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权). Catalytic combustion of hydrogen/air in microchannel reactor. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2004, 55 (1): 42—47
- [9] Bier W, Keller W, Linder G, Seidel D, Schubert K, Martin H. Gas to gas heat transfer in micro heat exchangers. *Chem. Eng. Proc.*, 1993, 32: 33—43
- [10] Stief T, Langer Otto-Ulrich, Schubert K. Numerical investigations of optimal heat conductivity in micro heat exchangers. *Chem. Eng. Technol.*, 1999, 22: 297—303