

文章编号:0253-4339(2023)03-0087-08

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2023.03.087

竖插翅片微通道换热器空气侧流动换热分析及参数优化

赵日晶¹ 位兴华¹ 黄东¹ 李丰^{1,2} 赵永峰³

(1 西安交通大学制冷与低温工程系 西安 710049;2 美的暖通与楼宇事业部研发中心 佛山 528311;

3 江苏科菱库精工科技有限公司 常州 213200)

摘要 竖插翅片微通道换热器(VMX)具有良好的流动及换热性能和优异的排水性能,应用于空气源热泵可以适应较宽工况。本文使用 CFD 模型计算 VMX 在干工况下的空气侧流动换热,通过实验验证了模型误差小于 20%;对比复合翅片的波纹和开窗的前后顺序及搭接方式,分析翅片间距、翅片长度、扁管间距和翅片厚度对换热器性能的影响,采用 Taguchi 方法寻找最优的参数组合。结果表明:相同泵功下前开窗后波纹逆接翅片的强化换热效果最好;以综合指标 P_{ec} 作为 VMX 的性能评价参数时,扁管间距和翅片长度是主要影响因素;在实际可选的参数范围内,翅片间距 1.8 mm、翅片长度 25.6 mm、扁管间距 12.0 mm、翅片厚度 0.12 mm 的参数组合可使换热器性能最佳。

关键词 空气源热泵;冷凝器;微通道换热器;传热系数

中图分类号:TB657.5;TK124

文献标识码:A

Air-side Thermal-hydraulic Analysis and Parameter Optimization for Vertical-fin Microchannel Heat Exchanger

Zhao Rijing¹ Wei Xinghua¹ Huang Dong¹ Li Feng^{1,2} Zhao Yongfeng³

(1. Department of Refrigeration & Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China;

2. Media HVAC & Building Technologies Division Research and Development Center, Foshan, 528311, China;

3. Jiangsu Clean & Cool Seiko Technology Co., Ltd., Changzhou, 213200, China)

Abstract Vertical-fin microchannel heat exchangers (VMXs) have efficient thermal-hydraulic performance and favorable drainage performance, such that they are capable of being utilized in air-source heat pumps under wide operating conditions. In this study, a CFD (computational fluid dynamics) model was used to analyze the air-side thermal-hydraulic performance of VMXs under dry conditions. The model was verified using experimental results with an error of less than 20%. Subsequently, the sequence and connection of waves and louvers on composite fins were compared, and the effects of fin pitch, fin length, tube pitch, and fin thickness were investigated. Finally, parametric optimization was conducted using the Taguchi method. The results show that under constant pumping power, the heat transfer enhancement of the composite fin with the front louver fin and the reversely connected rear wavy fin is the best. When the comprehensive index performance evaluation criterion (P_{ec}) was used to evaluate the performance of the VMXs, the tube pitch and fin length were determined as the main influencing factors. Within the range of parameters practically available, the best performance is obtained by a combination of 1.8 mm fin pitch, 25.6 mm fin length, 12.0 mm flat tube pitch, and 0.12 mm fin thickness.

Keywords air-source heat pump; condenser; microchannel heat exchanger; heat transfer coefficient

微通道换热器结构紧凑、比表面积大、传热系数高,集管、扁管、翅片采用全铝材质,在近年铜价高位运行的情况下,相比翅片管换热器具有明显的成本优势,是“铝代铜”趋势下铜管换热器的可行替代方案^[1]。传统微通道换热器(horizontal-fin microchannel heat exchanger, HMX)经过数十年的发展已经形成了成熟的工艺,广泛应用于汽车空调,采用的水平翅片

通常带有百叶窗,增强空气侧换热。但目前仍存在结霜^[2]、分液^[3]、腐蚀^[4]等问题,水平翅片波谷处的积水使排水性能较差,在凝露和结霜工况下换热性能明显衰减^[5]。相比而言,日本松下提出的竖插翅片微通道换热器(vertical-fin microchannel heat exchanger, VMX)具有优异的排水能力,在结霜工况下性能可提升 30%^[6],可应用于空气源热泵、热泵热水器、冰箱、

基金项目:国家自然科学基金(51876154)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51876154).)

收稿日期:2022-05-19;修回日期:2022-08-22

空调等制冷系统中。

水平翅片和竖插翅片微通道换热器结构如图1所示,竖插翅片前缘设有延裹侧,在竖直方向上延伸至换热器底部,有利于重力驱动下的融霜水排放。Li Feng 等^[7]测试了 VMX 在空气源热泵中的性能,发现结霜工况下的周期重复性良好,性能无明显衰减。S. H. Hong 等^[8]测试了 VMX 在汽车空调中的性能,发现相比 HMX 结霜周期可延长一倍,峰值能力提高 14%。Zhang Ping 等^[9-11]测试了 VMX 在干/湿/结霜工况下的性能,开发了空气侧流动换热的经验关联式。位兴华等^[12]测试了两种流路的 VMX 应用于热泵系统时在制冷/制热/结霜工况下的性能。N. H. Kim 等^[13-15]测试了 VMX 在干/湿工况下的空气侧换热和压降,对不同的换热器结构和安装倾角进行了对比。上述研究为 VMX 应用于制冷系统提供了实验支撑,但目前在国内产品中尚未得到大量应用,与传统 HMX 相比,VMX 在性能、工艺、可靠性、参数设计等方面仍缺乏足够的研究。

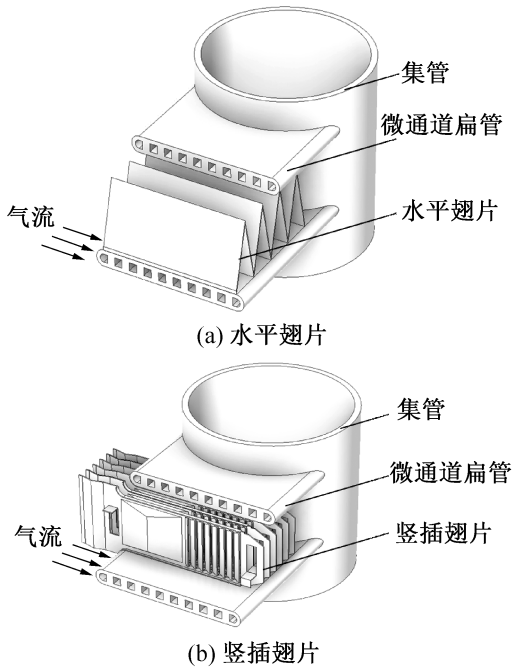


图1 微通道换热器结构

Fig.1 Structure of microchannel heat exchangers

在建模和计算方面,魏文建等^[16]采用 CFD 对翅片管、HMX 以及 VMX 的空气侧流动换热进行了对比。刘璐等^[17]采用 CFD 对百叶窗 VMX 的冷凝排水进行了模拟。J. C. S. Garcia 等^[18]采用遗传算法对 VMX 的结构参数(包括扁管高度、扁管宽度、扁管长度、翅片高度、翅片间距)进行了多目标优化。党聪聪^[19]结合 CFD 和实验开发了 VMX 的计算关联式。徐龙贵^[20]采用 CoilDesigner 软件对 VMX 的结构参数

进行了设计。针对具体的产品型号,参数设计时一般需要结合仿真计算,寻找最优的参数组合或可选的参数范围,随后再制作样件进行实验测试。

已有文献对于 VMX 的翅片研究较少,特别是复合翅片(通常由平片、波纹、开窗三部分组成)的参数设计。本文使用 CFD 计算 VMX 在干工况下的流动换热,通过实验对模型进行验证;同时对比复合翅片的波纹和开窗的前后顺序及搭接方式,分析翅片间距 F_p 、翅片长度 F_d 、扁管间距 T_p 和翅片厚度 δ 对换热器性能的影响,最后采用 Taguchi 方法寻找最优的参数组合,为 VMX 设计提供参考依据。

1 CFD 模型及设置

VMX 通常采用复合翅片,对于翅片参数的设计尚缺乏足够的实验数据。由于制作翅片样品时需要不同的模具,成本较高,因此需要进行 CFD 建模,研究复合结构的组合方式及翅片参数的取值影响,进而确定最佳的参数组合。

1.1 物理模型

图2所示为复合翅片结构,复合翅片沿空气流动方向依次为平片、波纹、百叶窗,翅片前后端设有两个定位孔以控制片间距。本文主要研究的结构参数包括翅片间距、扁管间距、翅片长度、翅片厚度,其余参数均已确定。取一个翅片所在的最小重复单元作为计算域,空气域向上游延伸2倍,下游延伸3倍,以减小进出口边界条件的影响。网格划分及边界设置如图3所示,空气进、出口分别为速度入口和压力出口,平行于翅片的两个侧面为周期边界,扁管中心面为对称边界,扁管内表面为温度边界,取冷凝温度,翅片通过扁管进行导热,忽略接触热阻。

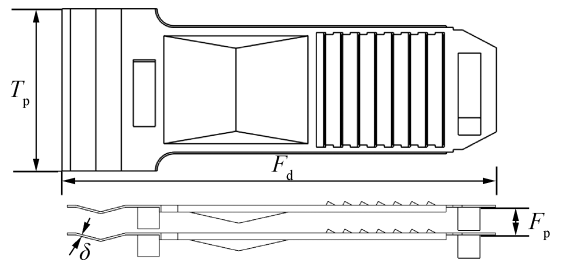


图2 复合翅片结构

Fig.2 Structure of the composite fin

1.2 控制方程与 FLUENT 设置

进口空气流速设置范围为 0.7~7.1 m/s,取翅片间距作为特征长度,各工况下的雷诺数均小于 1 200,因此采用层流模型。控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程以及固体导热方程。

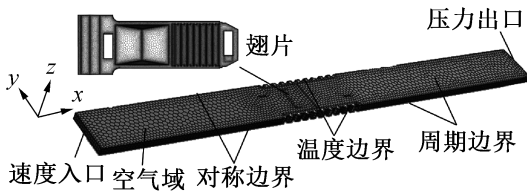


图 3 网格划分及边界设置

Fig.3 Meshing and boundary conditions

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (4)$$

式中： ρ 为空气密度， kg/m^3 ； u 为流速， m/s ； p 为压力， Pa ； T 为温度， K ； λ 、 λ_s 分别为空气、铝的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； c_p 为空气比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； i 和 k 为方向下标。

计算结果处理时主要分析努塞尔数 Nu 、摩擦因子 f 以及综合性能指标 P_{ec} ：

$$Nu = hD_e/\lambda \quad (5)$$

$$f = \frac{2\Delta p}{\rho u^2} \cdot \frac{D_e}{F_d} \quad (6)$$

$$P_{ec} = Nu/f^{1/3} \quad (7)$$

$$D_e = 4V_a/S_f \quad (8)$$

式中： h 为对流换热表面传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； D_e 为当量直径， m ； Δp 为空气压降， Pa ； F_d 为翅片在流动方向上的长度， m ； V_a 为翅片区域的空气体积， m^3 ； S_f 为总传热面积， m^2 。

在 FLUENT 中调用流动及传热模块，选用 Coupled 算法，控制方程采用控制体积法离散，对流项采用幂律格式离散。连续方程和动量方程的误差设为 10^{-6} ，能量方程误差为 10^{-9} 。网格独立性验证表明，306 万网格与 600 万网格计算所得的 Nu 偏差小于 1%，故采用 306 万网格进行计算。

1.3 模型验证

为验证 CFD 模型，制备了 6 种不同参数的 VMX 样品进行实验，翅片为全百叶窗片，开窗角度为 32° ， δ 为 0.1 mm ，其余参数如表 1 所示。翅片与扁管采用钎焊连接，接触热阻较小。图 4 所示为样品 4 的结构示意图，换热器外型尺寸为 $480 \text{ mm} \times 584 \text{ mm}$ ，扁管总数为 74，分上、中、下三个支路，集管直径为 25 mm ，其余样品结构类似。

表 1 实验参数

Tab.1 Experiment parameters

样品	F_p/mm	F_d/mm	T_p/mm	进风温 度/ $^\circ\text{C}$	出风温 度/ $^\circ\text{C}$	冷凝温 度/ $^\circ\text{C}$	风量/ (m^3/s)
1	1.2	27	10.5	21.1	34.9	39.0	0.64
2	1.3	27	10.5	21.1	35.3	40.4	0.62
3	1.4	27	10.5	21.1	33.4	38.8	0.58
4	1.4	23	7.7	21.1	33.9	40.5	0.60
5	1.4	27	7.7	21.1	35.8	40.3	0.62
6	1.4	42	7.7	21.1	35.1	37.7	0.77

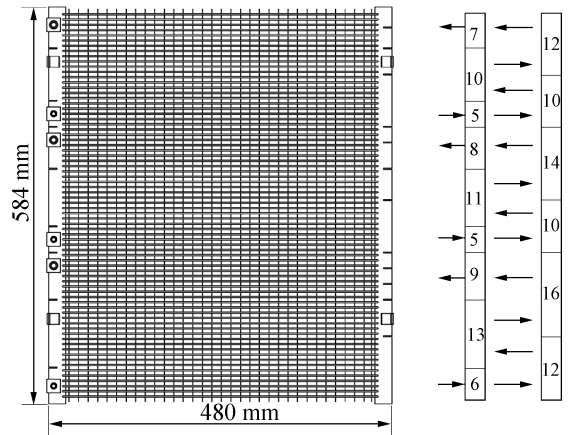


图 4 测试用 VMX

Fig.4 VMX for testing

实验装置如图 5 所示，包括空气源热泵系统、焓差室和数据采集装置。热泵系统的外机采用三折弯 VMX，折弯前的换热器尺寸为 $1904 \text{ mm} \times 573 \text{ mm}$ ，翅片为半波纹半百叶窗片，开窗角度为 28° ， F_p 为 1.4 mm ， T_p 为 10.5 mm ，扁管数为 53，分上、下两支路；内机的 VMX 则为实验测试对象。压缩机采用 LG 涡旋压缩机，型号为 APG025KA，热力膨胀阀型号为 TR6-067U3510。制冷剂为 R410A，充灌量为 3000 g 。热泵系统的额定制冷量为 8.2 kW ，额定制热量为

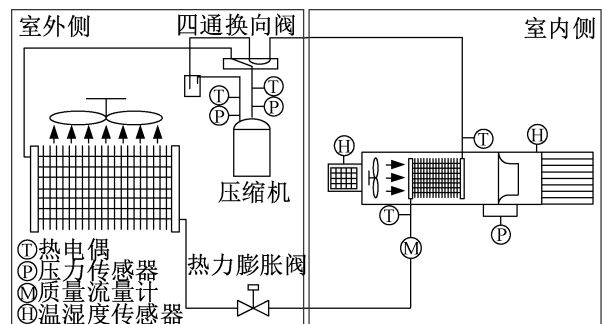


图 5 实验装置

Fig.5 Experimental device

8.8 kW。实验采用焓差法,参考标准 AHRI 210-240。测温采用 T 型热电偶,精度为 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$; 压力传感器相对误差为 $\pm 0.25\%$; 换热量相对误差为 $\pm 1.0\%$ 。数据采集器每隔 10 s 读取一次数据,工况稳定 30 min 开始后记录并取平均。

按照样品实测参数进行仿真设置,对流换热表面传热系数和压降的实验结果和计算结果如表 2 所示,对流换热表面传热系数的最大误差为 16.9%,压降的最大误差为 12.7%,均在可接受范围内。仿真中扁管内壁设定为恒温边界是导致传热系数仿真值偏大的主要原因,而忽略集管风阻和来流风速非均匀是导致压降仿真值偏小的主要原因。

表 2 模型验证
Tab.2 Model validation

样品	$h/[W/(m^2 \cdot K)]$			$\Delta p/\text{Pa}$		
	实验值	仿真值	相对误差	实验值	仿真值	相对误差
1	147.6	166.8	13.0%	259.6	232.5	10.4%
2	141.3	159.5	12.9%	238.4	209.8	12.0%
3	132.4	150.0	13.3%	213.8	186.6	12.7%
4	118.7	133.9	12.8%	226.4	207.8	8.2%
5	126.6	145.8	15.2%	240.5	216.2	10.1%
6	155.0	181.2	16.9%	368.5	339.8	7.8%

2 仿真分析及参数优化

以 VMX 作冷凝器进行计算,取冷凝温度为 $46\text{ }^\circ\text{C}$,来流空气为 $35\text{ }^\circ\text{C}$,来流速度为 $0.7\sim 7.1\text{ m/s}$ 。对比复合翅片的波纹和开窗顺序及搭接方式,并分析翅片间距、翅片长度、扁管间距、翅片厚度 4 种主要结构参数对流动换热的影响,最后采用 Taguchi 方法寻找最优的参数组合。

2.1 复合翅片结构对比

VMX 采用的复合翅片可以通过调整平片、波纹、开窗的顺序及占比来达到所要求的换热和压降。波纹和百叶窗均可强化换热,当两者组合形成复合翅片时有两种搭接方式,百叶窗导向与波纹导向一致时,气流仅在波纹部分进行转折,称为顺接(图 6(a));百叶窗导向与波纹导向不一致时,气流需在百叶窗和波纹衔接处转折,称为逆接(图 6(b))。同时波纹和开窗的前后顺序可交换,因此组成了图 6 所示的 4 种复合结构。

在 $0.8\sim 6\text{ m/s}$ 范围内取不同来流风速进行计算,得到 Nu 和 f 因子随 Re 的变化如图 7 所示, Nu 随

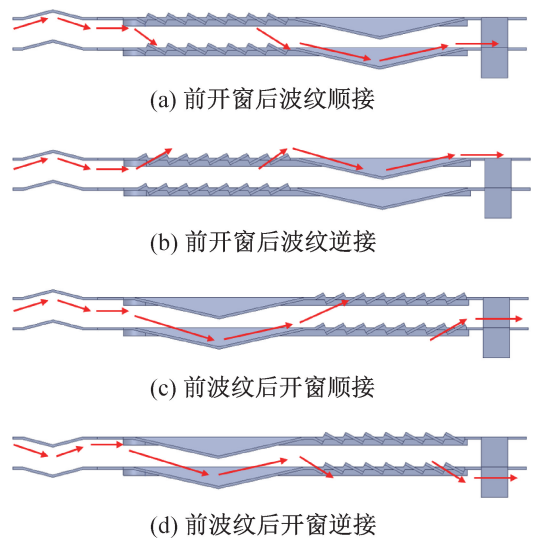


图 6 竖插翅片的四种复合结构

Fig.6 Four composite structures of the vertical fin

Re 增大而增大,前开窗后波纹逆接时 Nu 始终最大。由于沿流动方向温差逐渐减小,且百叶窗的强化换热能力大于波纹,因此当开窗设在波纹前时前半段的换热强度大幅提升,整体 Nu 最大。同时,前开窗后波纹逆接时的换热大于顺接, $Re=1\ 100$ 时 Nu 相对提升 6.3%,由图 8 所示的流线图可知,逆接时空气流经翅片的转折较多,气流路径被延长,空气与翅片发生接触换热更充分。

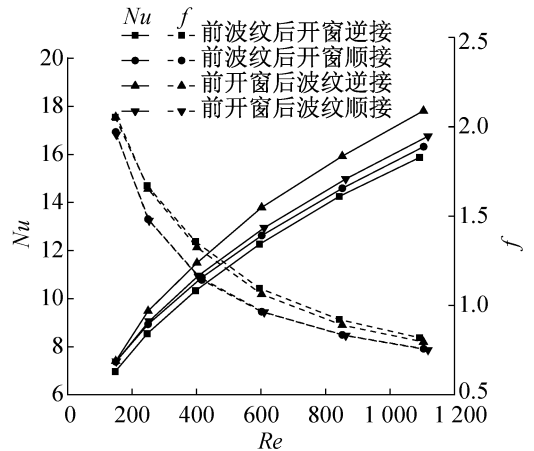


图 7 四种复合结构的 Nu 和 f 随 Re 的变化

Fig.7 Nu and f of four composite structures varying with Re

前波纹后开窗翅片速度分布如图 9 所示。对于前波纹后开窗翅片,顺接时的 Nu 大于逆接,在 $Re=1\ 100$ 时 Nu 相对提升 2.8%。前波纹后开窗顺接使空气直接从波纹部分流向百叶窗而无需转折,承接波纹后的百叶窗上速度边界层变薄,如图 9(a) 所示,其速度边界层厚度明显比图 9(b) 中薄。逆接延长了气流流通路径,但综合前波纹后开窗的流动结果来看,

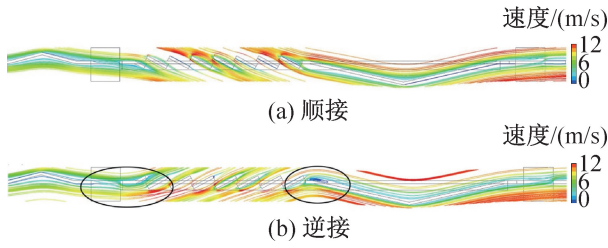


图 8 前开窗后波纹翅片流线图 ($Re=100$)

Fig.8 Flow field of the vertical fin with front louvers and rear waves ($Re=100$)

顺接时百叶窗部分边界层变薄带来的换热提升占主导地位。4 种结构的 f 因子均随 Re 增大而减小,其中逆接的 f 明显大于顺接,而波纹和百叶窗的顺序对 f 影响较小。由于逆接结构使空气流经翅片时转折次数变多,局部压力损失增大,因此总压降较大。

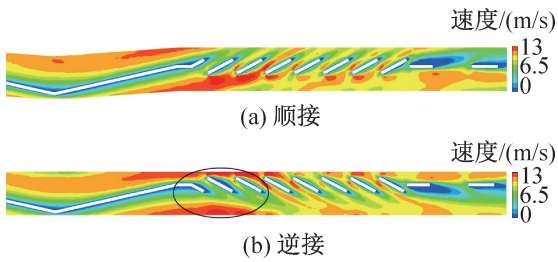


图 9 前波纹后开窗翅片速度分布 ($Re=100$)

Fig.9 Velocity field of the vertical fin with front waves and rear louvers ($Re=100$)

4 种复合结构的 P_{ec} 随 Re 的变化如图 10 所示,综合性能评价指标 P_{ec} 随 Re 的增大而增大,前开窗后波纹逆接的 P_{ec} 最大,前波纹后开窗逆接的 P_{ec} 最小。因此在相同泵功下,为增强换热应优先采用前开窗后波纹逆接翅片。

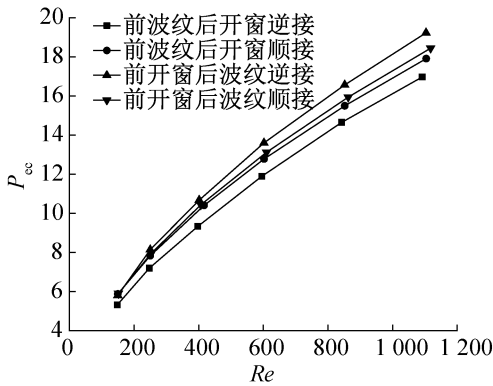


图 10 四种复合结构的 P_{ec} 随 Re 的变化

Fig.10 P_{ec} of four composite structures varying with Re

2.2 翅片参数的影响

以前波纹后开窗逆接翅片为例,通过计算分析 F_p 、 F_d 、 T_p 、 δ 对流动和传热的影响,各参数取值如表 3

所示,以水平 2 为基准,每次只改变一个参数,共 9 组参数组合,每组在 6 种不同来流风速下进行计算。

表 3 翅片参数取值

Tab.3 Fin parameters

参数	F_p	F_d	T_p	δ
水平 1	1.2	20.7	7.0	0.09
水平 2	1.5	25.6	9.5	0.12
水平 3	1.8	32.5	12.0	0.15

图 11 所示为 F_p 对 Nu 和 f 因子的影响, Re 较小时, Nu 相差较小; F_p 越小, f 因子越大,即密集的翅片会增大压降。低流速下主导强化换热的是气流在百叶窗部分的横向窜动。当 Re 较大时, f 因子相差较小,但 1.2 mm 片距的 Nu 明显小于 1.5 mm 和 1.8 mm。高流速下更多的空气流经百叶窗,主导强化换热的是翅片壁面附近的涡旋,大片距更易形成涡旋,使近壁面的热流体与远壁面的冷流体充分混合,从而增加翅片与空气的有效温差,使换热增强。

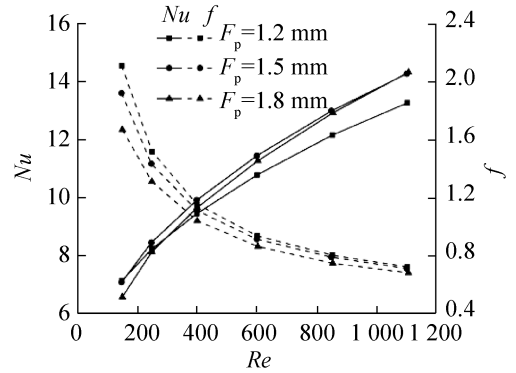


图 11 F_p 对 Nu 和 f 的影响

Fig.11 Effect of fin pitch on Nu and f

图 12 所示为 F_d 对 Nu 数和 f 因子的影响, F_d 对 f 因子影响较小。当 Re 较大时 F_d 越长, Nu 越小,主要因为相同来流温度下,随着流动长度的增加,来流

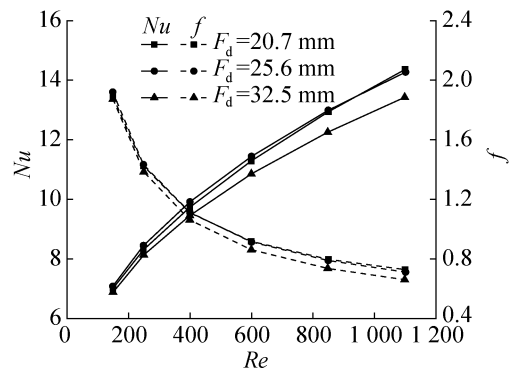


图 12 F_d 对 Nu 和 f 的影响

Fig.12 Effect of fin length on Nu and f

空气与翅片前半段换热较充分,造成后半段的换热较少,翅片与空气之间的有效温差降低,因此整体换热下降。

图13所示为 T_p 对 Nu 数和 f 因子的影响, T_p 为7 mm在不同 Re 下均有较低的 Nu 和较高的 f 。小的 T_p 使风量较小,阻力较大。 Re 较大时 T_p 为12 mm对应的 Nu 也较低,这是由于翅片需要通过扁管导热, T_p 较大时翅片温度分布均匀性降低,特别是翅片中心温度较低,导致翅片效率下降,换热能力减小。

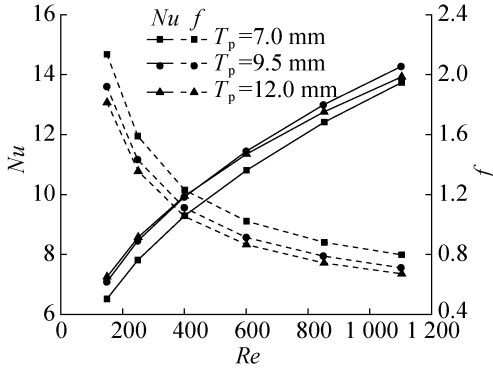


图13 T_p 对 Nu 和 f 的影响

Fig.13 Effect of tube spacing on Nu and f

图14所示为 δ 对 Nu 数和 f 因子的影响,低 Re 下的差异较小。 Re 较大时 δ 越厚, Nu 和 f 越大。由于相同情况下 δ 越厚,导热能力越强,表面温度越均匀,翅片效率较高,因此换热较强。同时 δ 的增加也会减小空气流通面积,使阻力增大。

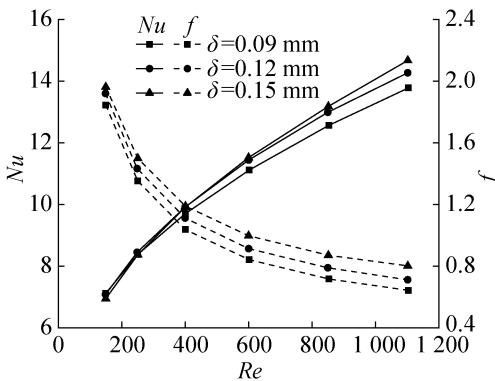


图14 δ 对 Nu 和 f 的影响

Fig.14 Effect of fin thickness on Nu and f

2.3 参数优化

Taguchi方法是依据统计学原理提出的一种优化方法,其定义的信噪比 SN 可以衡量产品质量的稳定性, SN 越大越稳定;信噪比的极差 R 越大,则说明该因素对性能的影响越大。

$$SN = 10\log\left(\frac{S_m - V_e}{rV_e}\right) \quad (9)$$

式中: $r = \sum_{i=1}^n V_i^2$, $S_m = (\sum_{i=1}^n V_i F_i)^2 / r$, $V_e = \frac{S_e}{n-1}$, $S_e = S_T - S_m$, $S_T = \sum_{i=1}^n F_i^2$ 。 V 为风速, m/s, F 为评价指标,选取 Nu 数作为传热指标, f 因子作为压降指标, P_{ec} 作为综合性能指标。

结构参数对 Nu 的贡献率和信噪比如表4所示,对换热影响最大是 F_d (33.7%),其次是 T_p (25.8%) 和 F_p (23.4%),影响最小的是 δ (17.1%);对 f 的贡献率和信噪比如表5所示,对压降影响最大的是 F_p (73.7%),其它三个参数的贡献率均较小,影响较弱。

表4 各参数对 Nu 的贡献率及信噪比

Tab.4 SN and contribution rate of parameters to Nu

参数	信噪比 SN			R	贡献率
	水平 1	水平 2	水平 3		
F_p	34.28	35.25	35.53	1.25	23.4%
F_d	33.45	35.25	35.18	1.80	33.7%
T_p	34.45	35.25	35.83	1.38	25.8%
δ	34.84	35.25	34.34	0.91	17.1%

注: $R = SN_{max} - SN_{min}$ 。

表5 各参数对 f 的贡献率及信噪比

Tab.5 SN and contribution rate of parameters to f

参数	信噪比 SN			R	贡献率
	水平 1	水平 2	水平 3		
F_p	46.11	45.56	44.72	1.37	73.7%
F_d	45.58	45.56	45.53	0.06	3.0%
T_p	45.70	45.56	45.49	0.21	11.3%
δ	45.68	45.56	45.46	0.22	12.0%

注: $R = SN_{max} - SN_{min}$ 。

采用式(7)给出的综合指标 P_{ec} 评价传热和压降, P_{ec} 越大说明在相同泵功下换热能力越强。图15

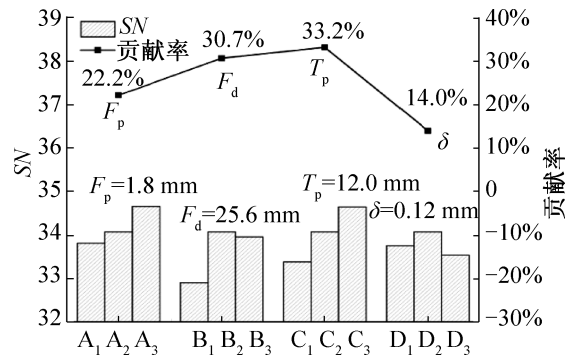


图15 各参数对 P_{ec} 的贡献率及信噪比

Fig.15 SN and contribution rate of parameters to P_{ec}

所示为各参数对 P_{ec} 的贡献率及 SN (横坐标上三个柱状图表示该参数对应的三个水平,与表 4 和表 5 的水平 1、水平 2、水平 3 分别对应),贡献率由大到小依次为 T_p 、 F_d 、 F_p 、 δ ,因此 T_p 和 F_d 可以被认为是 VMX 优化的主要设计参数。当每个参数选取信噪比最高的水平时可使性能达到最佳,因此优化所得的参数组合为 $T_p = 12.0 \text{ mm}$ 、 $F_d = 25.6 \text{ mm}$ 、 $F_p = 1.8 \text{ mm}$ 、 $\delta = 0.12 \text{ mm}$ 。

3 结论

本文采用 CFD 模型分析了 VMX 空气侧的流动换热性能,制作了 6 个换热器样品进行实验测试,仿真与实验所得的对流换热表面传热系数及压降的偏差均小于 20%。利用模型计算对比了复合翅片的波纹和开窗顺序及搭接方式,分析了翅片间距、翅片长度、扁管间距和翅片厚度对换热器性能的影响,采用 Taguchi 方法得到了最优的参数组合。得到如下结论:

1) VMX 通常采用复合翅片,当开窗设在波纹前时 Nu 更大;开窗和波纹逆接时空气流经翅片的转折较多,气流路径延长,换热更充分;相同泵功下,前开窗后波纹逆接翅片的强化换热效果最好。

2) Taguchi 方法表明,对换热和压降影响最大的结构参数分别是翅片长度和翅片间距;以综合指标 P_{ec} 作为 VMX 的性能评价参数时,扁管间距和翅片长度是主要的影响因素。

3) 在实际可选的参数范围内,翅片间距 1.8 mm、翅片长度 25.6 mm、扁管间距 12.0 mm、翅片厚度 0.12 mm 的参数组合可使换热器性能达到最佳。

参考文献

[1] 苏亮. 优化家电产业链供应链:“空调行业铝应用研讨会”在青岛召开[J]. 家用电器, 2022(1): 41-43. (SU Liang. Optimizing the supply chain of home appliances industry chain: "seminar on aluminum application in air conditioning industry" held in Qingdao[J]. Home Appliance, 2022(1): 41-43.)

[2] 熊通, 晏刚, 樊超超, 等. 微通道换热器结霜特性研究现状与展望[J]. 制冷学报, 2020, 41(6): 22-30. (XIONG Tong, YAN Gang, FAN Chaochao, et al. Review on research status of frosting characteristics of microchannel heat exchanger[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(6): 22-30.)

[3] 熊通, 晏刚, 樊超超, 等. 微通道换热器两相流分布研究现状与展望[J]. 制冷学报, 2021, 42(1): 23-35. (XIONG Tong, YAN Gang, FAN Chaochao, et al. Review

on research status and prospects of two-phase flow distribution in microchannel heat exchanger[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(1): 23-35.)

[4] 刘志孝, 王磊, 曹勇, 等. 翅片管换热器与微通道换热器腐蚀对比分析[J]. 制冷与空调(北京), 2015, 15(7): 78-81. (LIU Zhixiao, WANG Lei, CAO Yong, et al. Comparative analysis of corrosion of fin-tube heat exchanger and micro-channel heat exchanger[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2015, 15(7): 78-81.)

[5] PU Liang, LIU Ran, HUANG Hai, et al. Experimental study of cyclic frosting and defrosting on microchannel heat exchangers with different coatings[J]. Energy and Buildings, 2020, 226: 110382.

[6] 丁国良, 庄大伟, 李智强, 等. 制冷空调换热器的研究进展(二)——紧凑型换热器[J]. 家电科技, 2019(5): 38-46. (DING Guoliang, ZHUANG Dawei, LI Zhiqiang, et al. Development of heat exchanger for refrigeration and air-conditioning(2)—compact heat exchangers[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2019(5): 38-46.)

[7] LI Feng, WU Siyuan, MA Zhiheng, et al. Effect of surface coating on defrosting water drainage characteristics of vertical-fin microchannel frosting evaporator[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 208: 118220.

[8] HONG S H, JANG D S, YUN S, et al. Performance improvement of heat pumps using novel microchannel heat exchangers with plain-louver fins during periodic frosting and defrosting cycles in electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 223: 113306.

[9] ZHANG Ping, HRNJAK P S. Air-side performance of a parallel-flow parallel-fin (PF2) heat exchanger in sequential frosting[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(6): 1118-1128.

[10] ZHANG Ping, HRNJAK P S. Effect of some geometric parameters on performance of PF2 heat exchangers in periodic frosting[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(2): 334-346.

[11] ZHANG Ping, HRNJAK P S. Air-side performance evaluation of three types of heat exchangers in dry, wet and periodic frosting conditions[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(5): 911-921.

[12] 位兴华, 赵日晶, 黄东. 新型微通道换热器流路设计及翅片开窗实验研究[J]. 制冷, 2022, 41(1): 24-29. (WEI Xinghua, ZHAO Rijing, HUANG Dong. Experimental study of flow path design and fin window for a novel microchannel heat exchanger[J]. Refrigeration, 2022, 41(1): 24-29.)

[13] KIM N H. Effect of inclination on thermal performance of a louver-finned aluminum heat exchanger having a drainage

- channel[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(1): 381–389.
- [14] KIM N H. Airside heat transfer and pressure drop of an aluminum heat exchanger having a new louver fin with leading edge extension[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2021, 16(2): JTST0020.
- [15] KIM N H, CHO H. Airside heat transfer and pressure drop of louver-finned parallel flow heat exchanger having a drainage channel[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2018, 13(1): JTST0018.
- [16] 魏文建, 常守金, 丁二刚, 等. 不同结构风冷换热器风侧特性对比分析[J]. *制冷技术*, 2020, 40(5): 53–57. (WEI Wenjian, CHANG Shoujin, DING Ergang, et al. Comparison and analysis on air-side characteristics for air-cooling heat exchangers with different structures[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2020, 40(5): 53–57.)
- [17] 刘璐, 丁国良, 庄大伟, 等. 微通道换热器百叶窗翅片排水性能的 CFD 模拟[J]. *化工学报*, 2021, 72(增刊 1): 91–97. (LIU Lu, DING Guoliang, ZHUANG Dawei, et al. CFD simulation of water drainage performance of louver-typed microchannel heat exchanger[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(Suppl. 1): 91–97.)
- [18] GARCIA J C S, TANAKA H, GIANNETTI N, et al. Multiobjective geometry optimization of microchannel heat exchanger using real-coded genetic algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 202: 117821.
- [19] 党聪聪. 插片式微通道换热器换热特性实验研究与三维参数化设计平台开发[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019. (DANG Congcong. Experimental research on heat transfer characteristic of plate-fin microchannel heat exchanger and development of three-dimensions parametric design platform[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.)
- [20] 徐龙贵. 微通道换热器用于热泵空调室外机的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. (XU Longgui. Research on outdoor unit of heat pump air conditioner using micro-channel heat exchangers[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.)

通信作者简介

黄东, 男, 教授, 西安交通大学能源与动力工程学院, 029-82668738, E-mail: d_huang@mail.xjtu.edu.cn。研究方向: 微通道换热器设计。

About the corresponding author

Huang Dong, male, professor, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, +86 29-82668738, E-mail: d_huang@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: microchannel heat exchanger design.