

文章编号: 1000-8055(2024)12-20230076-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230076

新型开缝翅片管壳侧传热与阻力特性

丁天翔, 彭 浩, 马 杰

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 210009)

摘 要: 设计了一种新型开缝翅片, 通过实验与数值模拟研究新型开缝翅片的流动传热特性, 分析翅片间距与相对开缝高度对新型开缝翅片的传热与阻力特性影响规律, 并采用幂函数多元非线性拟合获得相关的流动传热关联式。研究表明: 新型翅片管相较于平直翅片管壳侧综合传热性能提升了 1.46~1.64 倍。在雷诺数 $Re=9\ 500$ 、相对开缝高度为 0.5 时, 翅片间距从 1.6 mm 减小到 1.0 mm, 空气侧努塞尔数 Nu 增加了 19.44%, 空气侧阻力系数 f 增加了 39.54%, 综合传热性能增强了 6.88%; 在雷诺数 $Re=9\ 500$ 、翅片间距为 1.2 mm 时, 相对开缝高度从 0.4 增大到 0.7, 空气侧 Nu 增加了 11.55%, 空气侧 f 增加了 4.74%, 综合传热性能增强了 9.84%。最后提出了平均偏差在 10% 以内的努塞尔数 Nu 和阻力系数 f 的计算关联式。

关 键 词: 翅片管; 开缝翅片; 综合传热性能; 阻力系数; 无量纲关联式

中图分类号: V231

文献标志码: A

Heat transfer and resistance characteristics of shell side of novel finned tube with slot

DING Tianxiang, PENG Hao, MA Jie

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: A novel type of slotted fin was designed. The flow and heat transfer characteristics of the novel slotted fin were studied by experiment and numerical simulation. The influences of fin pitch and relative slotted height on the heat transfer and resistance characteristics of the novel slotted fin were analyzed. The relevant flow and heat transfer correlation was obtained by power function multivariate nonlinear fitting. Research showed that the shell side comprehensive heat transfer performance of the novel finned tube was 1.46—1.64 times higher than that of the plain finned tube. When Reynolds number $Re=9\ 500$ and relative slotting height was 0.5, the fin pitch decreased from 1.6 mm to 1.0 mm, the air side Nusselt number Nu increased by 19.44%, the air side drag coefficient f increased by 39.54%, and comprehensive heat transfer performance increased by 6.88%. When the Reynolds number $Re=9\ 500$ and fin pitch was 1.2 mm, relative slotting height increased from 0.4 to 0.7, the air side Nu increased by 11.55%, the air side f increased by 4.74%, and comprehensive heat transfer performance increased by 9.84%. The calculation correlations of Nusselt number and resistance coefficient with average deviation less than 10% were finally proposed.

Keywords: finned tube; slotted fin; comprehensive heat transfer performance; resistance coefficient; dimensionless correlation

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(51776095)

作者简介: 丁天翔(1998—), 男, 硕士, 主要从事强化传热研究。

通信作者: 彭浩(1981—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事传热传质设备研究。E-mail: phsight1@hotmail.com

引用格式: 丁天翔, 彭浩, 马杰. 新型开缝翅片管壳侧传热与阻力特性[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20230076. DING Tianxiang, PENG Hao, MA Jie. Heat transfer and resistance characteristics of shell side of novel finned tube with slot[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20230076.

符号表

A_o/m^2	空气侧总传热面积	$h_i/(W/(m^2 \cdot ^\circ C))$	管内表面传热系数
A_i/m^2	管内总传热面积	k/J	湍动能
A_{1}/m^2	翅片间基管的表面积	L/m	空气流动方向长度
A_2/m^2	翅片总表面积	$\dot{m}/(kg/s)$	空气质量流量
a	比耗散率项的衰减系数	H	翅片形状系数
a^*	涡黏度的衰减系数	p/Pa	压力
$c_p/(J/(kg \cdot ^\circ C))$	空气比定压热容	Q_o/W	空气换热量
D_ω	交叉扩散项	S	平均应变率
d_o/m	当量直径	$\theta/^\circ C$	温度
d_o/m	基管外径	$\theta_{in}/^\circ C$	空气进口温度
d_i/m	基管内径	$\theta_{out}/^\circ C$	空气出口温度
f	阻力系数	$\theta'_{in}/^\circ C$	水侧进口温度
F_k	湍动能项	$\theta'_{out}/^\circ C$	水侧出口温度
F_ω	比耗散率项	$\theta_w/^\circ C$	管壁温度
F_1	湍流普朗特数的混合系数	t_f/mm	翅片间距
F_2	涡黏度的混合系数	t_f/mm	翅片间流道间距
$G_{max}/(kg/(m^2 \cdot s))$	最窄流通截面单位面积质量流量	t_s/mm	开缝高度
$h_o/(W/(m^2 \cdot ^\circ C))$	翅片表面传热系数	$u/(m/s)$	空气流速
$\alpha/(^\circ)$	圆弧开缝对应圆弧角	$\lambda/(W/(m \cdot ^\circ C))$	导热系数
β	比耗散率的耗散项闭合系数	$\lambda_f/(W/(m \cdot ^\circ C))$	翅片导热系数
β^*	流动能的耗散项闭合系数	$\mu/(kg/(m \cdot s))$	黏度
$\beta_f/(^\circ)$	开缝倾角	$\mu_f/(kg/(m \cdot s))$	涡黏度
δ/mm	翅片厚度	$\nu_f/(m^2/s)$	涡运动黏度
$\varepsilon_f/\%$	实验不确定度	$\rho/(kg/m^3)$	密度
$\Delta p/Pa$	翅片流道进出口压差	σ_k	湍流动能的普朗特数
η_o	翅片总效率	σ_ω	湍流比耗散率的普朗特数
η_f	翅片效率	ω	比耗散率
Nu	努塞尔数	Re	雷诺数

翅片管换热器作为高效换热器的一种,广泛应用于余热回收、制冷系统、热管理系统等工业领域^[1-2]。由于空气的物理性质,翅片管壳侧的传热系数通常较低。因此,应用不同结构的翅片来提高壳侧综合传热性能是至关重要的。目前针对不同结构翅片管换热器性能已有大量的研究^[3-6],如开缝翅片结构可通过增强翅片管壳侧空气的扰动,破坏并减薄边界层厚度,增强对流换热。

朱珊云等^[7]通过数值模拟研究了开缝结构对百叶窗式翅片传热与流动特性的影响,发现翅片间距为 1.4 mm 与相对开缝高度为 0.4 时换热器壳侧综合传热性能最佳。Lin 等^[8]通过数值模拟研究了开缝对人字形波纹翅片传热与流动特性的影响,优化了翅片间距、开缝高度与波纹长度等几何结构参数,翅片管壳侧传热系数提升了 34.2%。袁益超等^[9-12]在实验验证的基础上,通过数值模

拟探究管间距、相对开缝高度、开缝密度以及开缝位置对开缝翅片管壳侧传热性能的影响规律,当开缝密度为 4 且沿流动方向均匀布置、相对开缝高度为 0.5、相对横向管间距为 2.28、相对纵向管间距 1.18 时开缝翅片的综合传热性能最佳。Menéndez Pérez 等^[13]在连续开缝翅片上增加涡流发生器,通过数值模拟与遗传算法优化涡流发生器的位置、尺寸与迎角,翅片管壳侧综合传热性能提升了 5.50%。Moreno 等^[14]将三角形小翼与开缝翅片组合,利用遗传算法优化三角小翼的位置与迎角,将开缝翅片管壳侧传热性能提高了 9.57%,压降提高了 17.3%。Li 等^[15]研究梯形开缝翅片管壳侧传热与流动性能发现:相较于矩形开缝翅片,在相同雷诺数下综合传热性能分别提高了 15.8% 和 4.2%。杨涛等^[16]利用模化实验研究风速与翅片间距对圆弧形翅片管壳侧综合传热性

能的影响,相较于平直翅片提高了 27%~35%。王成刚等^[17]通过数值模拟研究 4 种圆弧形开缝翅片管壳侧传热与阻力特性,分析了不同开缝形式对翅片管换热器综合传热性能的影响。李红智等^[18-19]提出波动强度这一概念,并通过可视化实验发现 X 型开缝翅片的波动强度与流动阻力大于圆弧形开缝翅片,但前者的换热性能和场协同性优于后者。

综上,不同开缝结构翅片作为一种高效的传热单元广泛应用于翅片管换热器强化传热中,本文在前人研究的基础上提出了一种基于圆弧开缝与矩形开缝的新型开缝翅片管结构,通过实验与数值模拟研究翅片间距与相对开缝高度对新型开缝翅片管换热器壳侧传热与阻力特性的影响规律,拟合流动传热幂函数关联式,为新型开缝翅片管换热器的热设计提供依据。

1 实 验

1.1 翅片管结构

实验对象为圆弧形开缝翅片的错列 24 排管换热器,实物图以及翅片结构如图 1 所示。翅片圆孔周围冲压 4 个圆弧形开缝,均匀分布在管孔四周,在圆孔之间冲压矩形开缝,强化空气侧的表面传热系数,主要设计参数如图 2 和表 1 所示。

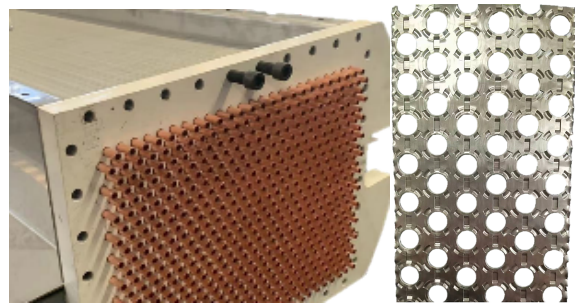


图 1 换热器与翅片实物图
Fig. 1 Physical diagram of heat exchanger and fin

1.2 实验系统

搭建了翅片管换热器对流换热实验平台,实验系统如图 3 所示,由空气压缩系统、循环水系统、数据测量系统 3 部分组成。

空气压缩系统主要流程:空气经离心空压机压缩,产出高温压缩空气进入实验段被循环水冷却后进入气罐存储。循环水系统由循环水泵、恒温水槽、电磁流量计及试件组成。循环水从恒温水槽中引出,保持入口温度恒定,经电磁流量计后进入实验段冷却热空气,经冷却器冷却后回到

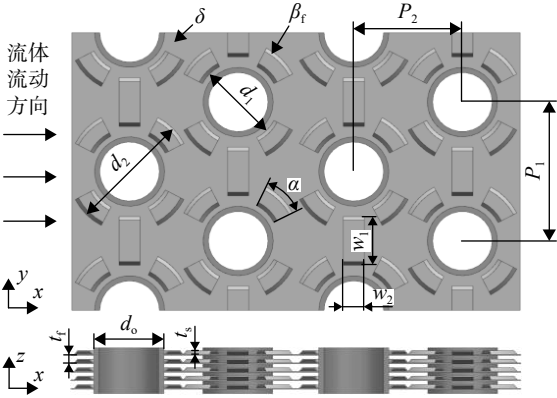


图 2 新型开缝翅片管结构
Fig. 2 Structure of novel finned tube with slot

表 1 翅片管结构参数
Table 1 Structural parameters of finned tube

结构参数	数值
基管规格 $d_o \times \delta_i/\text{mm}$	10 × 0.7
横向管间距 P_1/mm	20.0
纵向管间距 P_2/mm	15.5
翅片厚度 δ/mm	0.15
翅片间距 t_f/mm	1.2
相对开缝高度 t_s/t_f	0.5
矩形开缝横向宽度 w_1/mm	7.0
矩形开缝纵向宽度 w_2/mm	3.0
圆弧开缝内圆弧直径 d_1/mm	11.5
圆弧开缝外圆弧半径 d_2/mm	17.5
圆弧开缝对应圆弧角 $\alpha/(\text{°})$	35
开缝倾角 $\beta_f/(\text{°})$	45

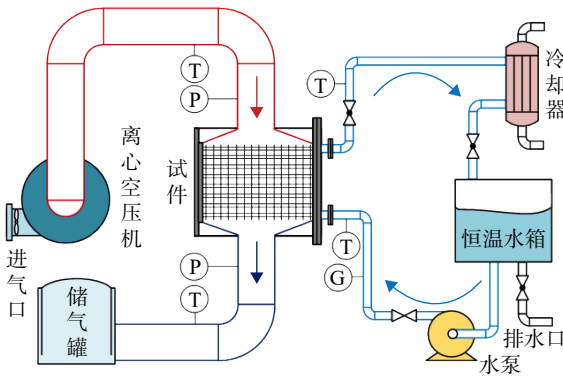


图 3 实验系统流程图
Fig. 3 Schematic diagram of the experiment system

恒温水槽,完成循环。数据测量系统主要由 PLC 系统及测量仪表组成。试件空气侧进出口温度与水侧进出口温度由用标定后的 PT100 铂热电阻测量,空气侧进出口压力采用压力变送器 MIK-P300G 进行测量,循环水体积流量由电磁流量计

LDG-SUP-DN40 测量,空气体积流量由空压机入口流量计(孔板流量计 SKLG-DN200)测量。测量信号由 S7-1200 PLC 系统进行采集与处理。

实验段进水温度设定为 34 ℃,进气温度为 135 ℃,气侧工作压力为 0.11 MPa,工质空气的体积流量为 9 830~11 360 m³/h,对应雷诺数 Re 范围是 8 350~9 790。实验时,试件与管道需保温,待实验稳定后(各工况热平衡误差控制在 5% 以内)开始记录实验数据。

1.3 实验误差分析

实验的误差主要源自测量误差以及数据处理中的误差传递。本实验中,测量误差包括流量数据误差、温度数据误差、压力数据误差。本实验所用测量仪器的误差,如表 2 所示。

表 2 主要实验仪器误差

Table 2 Error of main experimental instruments

实验仪器	量程	精度
电磁流量计 (LDG-SUP-DN40)	3~30 m ³ /h	±0.5%
空气流量计 (SKLG-DN200)	3 000~30 000 m ³ /h	±1.5%
铂热电阻(PT100)	-20~350 ℃	±0.15 ℃
气侧进口压力变送器 (MIK-P300G)	0~1.6 MPa	±0.3%
气侧出口压力变送器 (MIK-P300G)	0~1.6 MPa	±0.3%

本实验中,计算参数 $Y=f(X_1, X_2, X_3, \cdots, X_n)$,已知直接测量参数 $X_1, X_2, X_3, \cdots, X_n$ 的不确定度,则根据误差传递理论,计算参数 Y 的误差 ΔY 以及不确定度 ε_Y 计算公式如下:

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2}$$

(1)

$$\varepsilon_Y = \frac{\Delta Y}{Y}$$

(2)

实验数据计算得到传热努塞尔数 Nu 、阻力系数 f 的实验不确定度分别为 ±8.87% 和 ±7.93%。

2 数值模拟

2.1 物理模型

翅片管排布具有周期性,为节省计算资源,建立如图 4 所示的周期性单元模型。表 3 为翅片模拟计算区域结构参数,其余结构参数与表 1 相同。此外,为保证来流空气流速充分发展,物理模型

入口处上游延长 20 mm 的空气域;为防止出口处空气回流,物理模型出口处下游方向延长了 60 mm 的空气域。

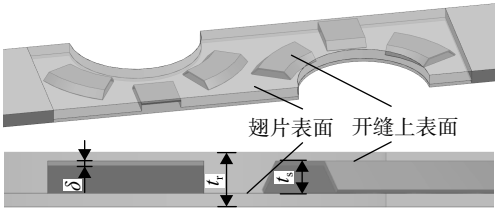


图 4 翅片数值模型

Fig. 4 Numerical model of the novel fin

表 3 翅片数值模型结构参数

Table 3 Structural parameters of the numerical model of fin

结构	翅片 间距 t_f /mm	翅片流道 间距 t_d /mm	相对开缝 高度 t_s/t_f	开缝高度 t_s /mm
1	1.2	1.05	0.5	0.6
2	1.0	0.85	0.5	0.5
3	1.4	1.25	0.5	0.7
4	1.6	1.45	0.5	0.8
5	1.2	1.05	0.4	0.6
6	1.2	1.05	0.6	0.6
7	1.2	1.05	0.7	0.6

2.2 数学模型

本文数值模拟为了简化计算,做出以下假设:

- 1) 流体流动为连续三维稳态流动;
- 2) 流体在试件中不可压缩;
- 3) 流体物理性质不随温度变化;
- 4) 忽略重力与黏性耗散等影响;
- 5) 不考虑热辐射及热损失。

本文控制方程如下:

连续性方程

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

(3)

由于翅片管空气侧流场具有较大曲率壁面和绕流脱体的特点,存在逆压梯度分离流,故本文采用 SST(切应力输运) $k-\omega$ 湍流模型。

动量方程(SST $k-\omega$):

$$\frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + F_k - \rho \beta^* k \omega$$

(4)

$$\frac{\partial (\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + F_\omega - \rho \beta \omega^2 + D_\omega$$

(5)

$$F_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$F_\omega = \frac{aa^*}{\nu_t} F_k \quad (7)$$

$$\mu_t = (\rho k / \omega) \frac{1}{\max[1/a^*, SF_2/(a_1 \omega)]} \quad (8)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\sigma_{k,1} + (1 - F_1) \sigma_{k,2}} \quad (9)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} \quad (10)$$

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (11)$$

能量方程

$$\frac{\partial (\rho u_i \theta)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

2.3 网格划分

计算区域采用混合网格进行划分, 翅片流道区域为四面体网格, 流道延长区域为六面体网格, 翅片近壁面第 1 层网格尺寸为 0.01 mm, 边界层网格层数为 8 层, 尺寸增长率为 1.1, 如图 5 所示。本文选择表 3 中的结构 1 模型, 研究网格数量对数值模拟结果的影响。模型采用 4 种网格尺寸 (除边界层尺寸) 划分了网格, 分别为 0.14、0.12、0.1、0.08 mm, 对应网格数为 1 474 896、2 616 109、3 930 153 与 4 971 729。

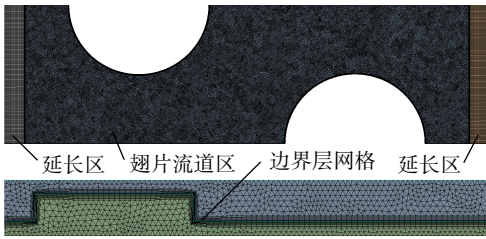


图 5 翅片网格示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mesh of novel fin

2.4 边界条件与数值方法

边界条件设置如图 6 所示。模型沿 z 轴设置周期性边界条件, 沿 y 轴设置对称性边界条件。模拟的主要参数: 入口速度 $u=3.5 \sim 5.5$ m/s, 管壁温度 $\theta_w=34$ °C, 入口温度 $\theta_{in}=44$ °C。

采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)算法, 动量方程、能量方程及 k 、 ω 方程的离散均采用 2 阶迎风格式。连续性方程、 k 与 ω 方程、能量方程的相对残差分别

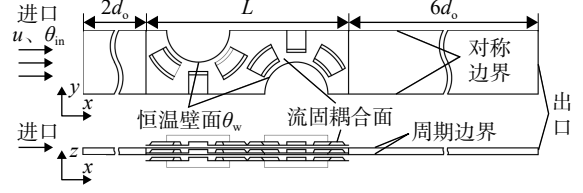


图 6 计算区域以及边界条件

Fig. 6 Calculation domain and boundary conditions

为 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-6} 。

2.5 数据处理

2.5.1 模拟数据处理

新型翅片的热力性能分别用 Nu 、阻力系数 f 与 Re 的关系进行描述, 计算式如下:

$$Nu = \frac{h_o d_e}{\lambda} \quad (13)$$

$$f = \frac{2 \Delta p d_e \rho}{L G_{\max}^2} \quad (14)$$

$$Re = \frac{G_{\max} d_e}{\mu} \quad (15)$$

其中 L 为空气流动方向长度(m); $G_{\max}$ 为最窄流通截面单位面积质量流量($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

通过数值模拟数据计算所得表面传热系数 h_o 与当量直径 d_e [20] 计算式如下:

$$h_o = \frac{Q_o}{A_o \Delta \theta_m \eta_o} \quad (16)$$

$$d_e = \frac{A_1 d_o + A_2 \sqrt{A_2/2}}{A_1 + A_2} \quad (17)$$

其中 A_1 为翅片间基管的表面积(m^2); A_2 为翅片总表面积(m^2); A_o 为物理模型的空气侧总传热面积(m^2), A_1 与 A_2 之和。由于开缝的存在, A_2 的计算较为困难, 为数据处理方便, 故视作未开缝情况下计算 A_2 的值。

通过数值模拟数据计算所得空气侧换热量 Q_o 、对数平均温差 $\Delta \theta_m$ 以及翅片总效率 η_o 的计算式如下:

$$Q_o = m_o c_p (\theta_{in} - \theta_{out}) \quad (18)$$

$$\Delta \theta_m = \frac{(\theta_{in} - \theta_w) - (\theta_{out} - \theta_w)}{\ln \frac{\theta_{in} - \theta_w}{\theta_{out} - \theta_w}} \quad (19)$$

$$\eta_o = \frac{A_1 + A_2 \eta_f}{A_o} \quad (20)$$

通过数值模拟数据计算所得翅片效率 η_f 与

形状系数 H 计算式如下:

$$\eta_f = \frac{\tanh H}{H} \quad (21)$$

$$H = \frac{d_e - d_o}{2} \sqrt{\frac{2h_o}{\lambda_f \delta}} \sqrt{1 + \frac{d_e - d_o}{2d_o}} \quad (22)$$

2.5.2 实验数据处理

通过实验数据计算所得空气侧的表面传热系数 h_o 采用热阻分离法^[21]进行计算, 由于实验段为新换热器, 忽略污垢热阻, 计算式如下:

$$h_o = \frac{1}{\eta_o \left[\frac{A_o \Delta \theta_m}{Q_o} - \frac{A_o}{A_i h_i} - \frac{A_o}{A_i} \cdot \frac{d_o}{2\lambda_f} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) \right]} \quad (23)$$

其中 A_o 、 A_i 、 Q_o 分别为通过实验数据计算所得的空气侧总传热面积(m^2)、管内总传热面积(m^2)、空气侧换热量(W)。水侧表面传热系数 h_i 采用 Gnielinski 公式^[21]进行计算。

实验数据计算所得的对数平均温差 $\Delta \theta_m$ 计算公式如下:

$$\Delta \theta_m = \frac{(\theta_{in} - \theta'_{out}) - (\theta_{out} - \theta'_{in})}{\ln \frac{\theta_{in} - \theta'_{out}}{\theta_{out} - \theta'_{in}}} \quad (24)$$

实验数据计算所得的翅片性能参数努塞尔数 Nu 、阻力系数 f 、 Re 以及翅片总效率 η_o 的计算方式均与模拟数据处理方法相同。

3 结果与讨论

3.1 网格独立性验证

本文对结构 1 的物理模型进行网格独立性验证, 网格独立性验证结果如图 7 所示。网格数由 2 616 109 变化到 3 930 153, 空气侧 Nu 、 f 的大小分别变化了 0.21% 和 0.35%。网格数由 3 930 153 变化到 4 971 729, 空气侧 Nu 、 f 的大小分别变化了 0.12% 和 0.14%。说明网格数达到 2 616 109 后网格数的变化对数值计算结果基本无影响。

3.2 模型验证结果

结构 1 翅片的实验结果和数值模拟的对比如图 8 所示, Re 在 8 350~9 790 范围内, 空气侧 Nu 、 f 的实验结果与数值模拟的最大偏差分别为 5.98% 与 17.46%, 平均偏差分别为 3.94% 与 6.15%。偏差大多在 10% 之内, 验证了数值模型的准确性。

3.3 流动传热特性

3.3.1 流动特性

图 9 为在进口流速为 4.5 m/s ($Re=9\ 350$) 时圆

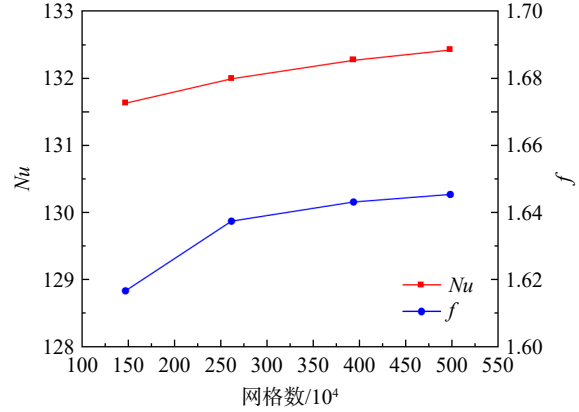


图 7 网格独立性验证

Fig. 7 Grid independence validation

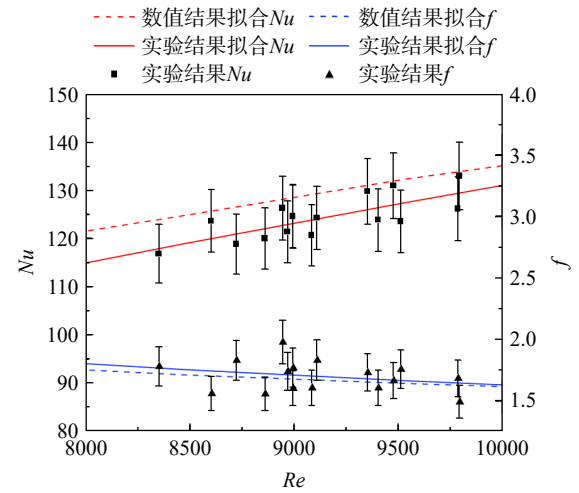


图 8 数值模拟验证

Fig. 8 Numerical simulation validation

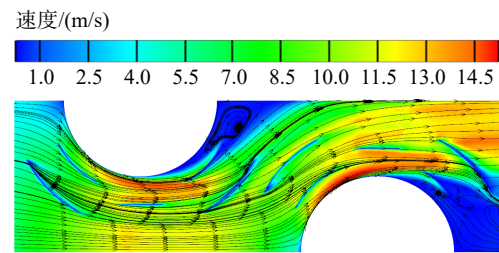


图 9 翅片表面附近速度与流线分布

Fig. 9 Velocity and streamlines distribution near fin surface

弧开缝翅片表面上方 0.35 mm 处的速度云图和流线分布。换热管斜前方的圆弧开缝使流体分流, 进入开缝内部的流体在碰撞到圆弧小翼后形成小涡流, 圆弧小翼与管壁面之间的流体流速增大。换热管斜后方的圆弧开缝起到导流作用, 减小换热管后方回流区域的范围, 同时使换热管后方流动区域形成数个小涡流, 带动后排管间流体扰动。圆弧开缝在破坏边界层的同时, 起到很强的扰流作用, 增强换热管管壁附近流体流动, 促使翅片

间流体的速度分布不均匀。

3.3.2 传热特性

图 10 为在进口流速为 4.5 m/s ($Re=9\ 440$) 时圆弧开缝翅片表面上方 0.35 mm 处的温度分布。由图可知, 圆弧开缝翅片表面的开缝区域温度变化明显。这是由于圆弧开缝结构对边界层产生破坏, 且圆弧开缝侧的圆弧小翼扰乱换热管周围未开缝翅片表面附近的流体流动, 增强对流换热。圆弧开缝翅片未开缝区域表面附近流体温度下降幅度大, 有效地强化了翅片表面的传热能力。

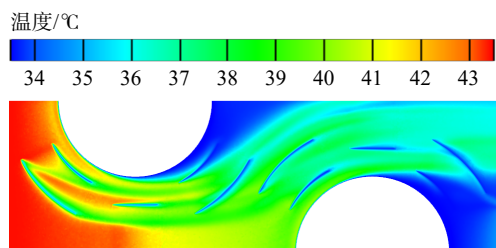


图 10 翅片表面附近温度分布

Fig. 10 Temperature distribution near fin surface

3.4 结构参数对空气侧传热与阻力特性的影响

3.4.1 翅片间距

通过数值计算, 空气侧 Nu 与翅片间距 t_f 的关系如图 11 所示。在相对开缝高度 $t_s/t_f=0.5$ 情况下, 随着 Re 由 7 500 增加到 11 500, 翅片间距 $t_f=1.6, 1.4, 1.2$ mm 和 $t_f=1.0$ mm 的空气侧 Nu 分别增加了 23.79%、21.46%、23.07% 和 18.02%。这表明流量的增加显著增强了对流传热。此外, 在 $Re=9\ 500$ 、 $t_s/t_f=0.5$ 的情况下, 与 $t_f=1.6$ mm 相比, $t_f=1.4, 1.2$ mm 和 $t_f=1.0$ mm 的空气侧 Nu 分别增加了 3.66%、10.11% 和 19.44%。这是由于在进口温度不变以及翅片表面温度基本不变的情况下, 翅片间流道变窄导致翅片表面的温度梯度增大, 提高

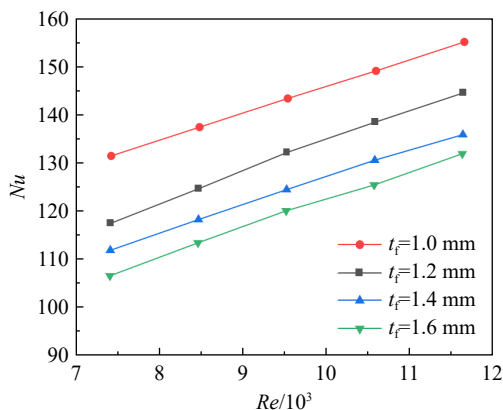


图 11 空气侧 Nu 与 t_f 的关系

Fig. 11 Variation of Nu with t_f at the air side

翅片的表面传热系数。

通过数值计算, 空气侧 f 与翅片间距 t_f 的关系如图 12 所示。在相对开缝高度 $t_s/t_f=0.5$ 情况下, 随着 Re 从 7 500 增加到 11 500, 翅片间距 $t_f=1.6, 1.4, 1.2$ mm 和 $t_f=1.0$ mm 的空气侧 f 分别减少了 12.02%、13.66%、14.77% 和 17.69%。说明空气侧 f 随 Re 的增加而减小, 并且在较小的翅片间距下, f 的变化幅度越大。在 $Re=9\ 500$ 下, 与 $t_f=1.6$ mm 相比, $t_f=1.4, 1.2$ mm 和 $t_f=1.0$ mm 的空气侧 f 分别增加了 7.81%、19.71% 和 39.54%。这是因为翅片间距的减少使得翅片间流道流通截面变小, 开缝结构加剧翅片间流道内流体流动, 增加了翅片间流道的压差与压差所导致的阻力系数。

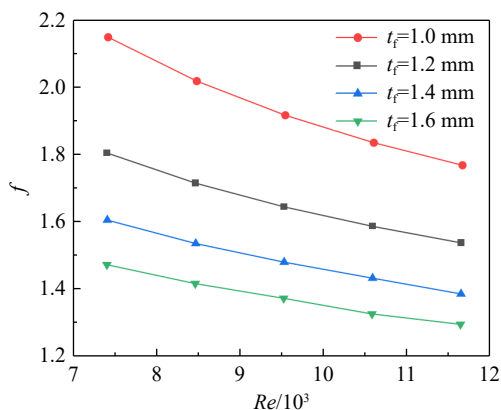


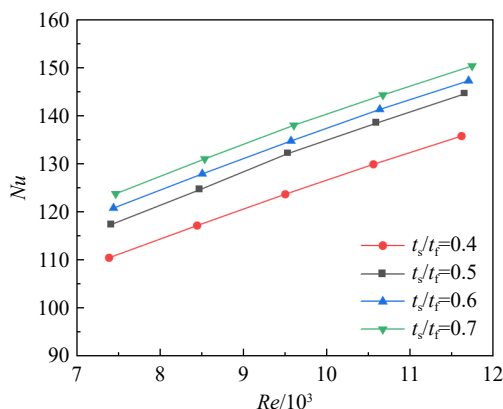
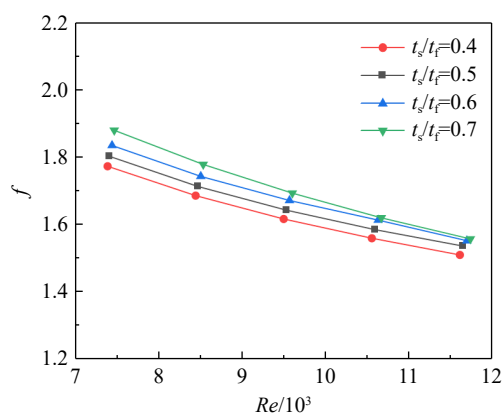
图 12 空气侧 f 与 t_f 的关系

Fig. 12 Variation of f with t_f at the air side

3.4.2 相对开缝高度

通过数值计算, 空气侧 Nu 与相对开缝高度 t_s/t_f 的关系如图 13 所示。在翅片间距 $t_f=1.2$ mm 情况下, 随着 Re 由 7 500 增加到 11 500, 相对开缝高度 $t_s/t_f=0.4, 0.5, 0.6$ 和 $t_s/t_f=0.7$ 的空气侧 Nu 分别增加了 22.81%、23.07%、21.82% 和 21.39%。此外, 在 $Re=9\ 500$ 、 $t_f=1.2$ mm 的情况下, 与 $t_s/t_f=0.4$ 相比, $t_s/t_f=0.5, 0.6, 0.7$ 的空气侧 Nu 分别增加了 6.83%、8.94% 和 11.55%。说明随着相对开缝高度的增加, 圆弧小翼高度增加, 对换热管周围的空气的扰动更加剧烈, 增强了换热管周围对流换热; 圆弧开缝的上表面更加靠近相邻翅片表面, 增强了相邻翅片附近的流体扰动, 进一步增强对流换热, 但对远离翅片流体的强化作用会减弱。

通过数值计算, 空气侧 f 与 t_s/t_f 的关系如图 14 所示。在翅片间距 $t_f=1.2$ mm 情况下, 随着 Re 由 7 500 增加到 11 500, 相对开缝高度 $t_s/t_f=0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 的空气侧 f 分别减小了 14.83%、14.77%、15.40% 和 17.14%。此外, 在 $Re=9\ 500$ 、 $t_f=1.2$ mm

图 13 空气侧 Nu 与 t_s/t_f 的关系Fig. 13 Variation of Nu with t_s/t_f at the air side图 14 空气侧 f 与 t_s/t_f 的关系Fig. 14 Variation of f with t_s/t_f at the air side

的情况下,与 $t_s/t_f=0.4$ 相比, $t_s/t_f=0.5, 0.6$ 和 $t_s/t_f=0.7$ 的空气侧 f 分别增加了 1.60%、3.39% 和 4.74%。说明随着相对开缝高度增加,圆弧开缝对换热管周围空气的扰动加强,整体阻力增大,而且相较于高流速工况,低流速下整体阻力增加更为明显。

3.5 新型开缝翅片空气侧综合传热性能分析

本文引入性能评价准则(PEC, 记为 C_{pe})来评价综合传热性能。PEC 值大于 1, 表明在同等泵功率下强化传热翅片的空气侧综合传热性能优于平直翅片^[21], 式(25)中下标 plain 表示平直翅片。

$$C_{pe} = (Nu/Nu_{\text{plain}}) / (f/f_{\text{plain}})^{1/3} \quad (25)$$

本文采用相同的数值模拟方法对平直翅片管换热单元进行模拟。平直翅片结构除开缝结构, 其余与表 3 的结构 1 相同。

通过数值计算, 本文进一步研究新型开缝翅片不同结构参数对空气侧综合传热性能影响。在 $Re=7\,500 \sim 11\,500$ 新型开缝翅片不同结构参数对空气侧 PEC 的影响如图 15 所示。对于所有结

构参数, 空气侧 PEC 在 1.46~1.64 范围之间。对比结构 1、结构 2、结构 3 和结构 4 发现, 在 $Re=9\,500$ 、 $t_s/t_f=0.5$ 时, t_f 由 1.6 mm 减少到 1.0 mm, 空气侧 PEC 增加了 6.88%。对比结构 1、结构 5、结构 6 和结构 7 发现, 在 $Re=9\,500$ 、 $t_f=1.2$ mm 时, t_s/t_f 由 0.4 增加 0.7, 空气侧 PEC 增加了 9.84%。对比结构 1、结构 4 与结构 5 发现, 结构 1 的 PEC 值最高, 结构 5 的 PEC 值比结构 4 的 PEC 值低。说明增大翅片间距和减小相对开缝高度都削弱换热器空气侧综合传热性能, 但减小相对开缝高度的削弱作用更加明显。对比结构 1、结构 2 与结构 7 发现, 高雷诺数下, 结构 7 的 PEC 值高; 低雷诺数下, 结构 2 的 PEC 值高。这是由于相对开缝高度较大有利于增强换热管周围流体以及邻近翅片附近流体扰动, 能在较小阻力增加的情况下增强空气侧的对流换热, 提高新型开缝翅片管的综合传热性能。

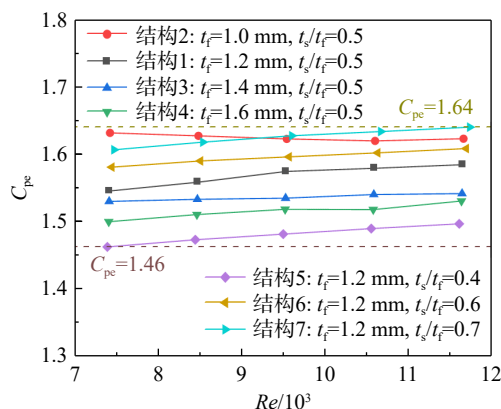
图 15 不同结构参数的空气侧 PEC 随 Re 的变化Fig. 15 Variation of PEC with Re with different structure parameters

图 16 为结构 2 的新型开缝翅片与矩形开缝翅片^[3]、交替开缝翅片^[4]以及连续开缝翅片^[4]在不同雷诺数下 PEC 值的对比。由图可知, 在 $Re=7\,500 \sim 11\,500$ 范围内, 新型开缝翅片的 PEC 值大于其他 3 种开缝翅片的 PEC 值, 说明在研究范围内新型开缝翅片的综合传热性能优于其他 3 种开缝翅片。

综上, 在实际工程应用中, 新型开缝翅片管可以通过适当减小翅片间距或增大相对开缝高度来提高换热器的综合传热性能。

3.6 关联式拟合

流动传热关联式对于圆弧开缝翅片管换热器的设计具有重要的指导意义, 且大多以幂函数关

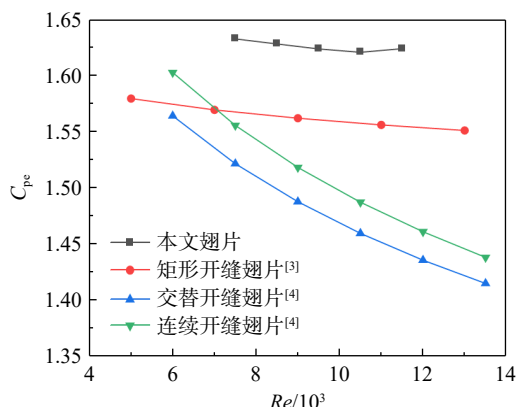


图 16 新型开缝翅片与其他 3 种开缝翅片在不同雷诺数下 PEC 值的对比

Fig. 16 Comparison of PEC values between novel slotted fin and three types of slotted fins at different Re

联式来预测流动传热模型^[21]。

根据数值计算结果, 利用当量直径 d_e 将翅片间流道间距 t_f (即 $t_f - \delta$) 进行无量纲化, 采用多元非线性回归方法来拟合努塞尔数 Nu 、阻力系数 f 与雷诺数 Re 、翅片间流道间距无量纲数 t_f 和相对开缝高度 t_s/t_f 之间的幂函数关联式, 拟合结果如下:

$$Nu = 1.1418 Re^{0.43313} \left(\frac{t_f - \delta}{d_e} \right)^{-0.32935} \left(\frac{t_s}{t_f} \right)^{0.15438} \quad (26)$$

$$f = 9.02599 Re^{-0.37033} \left(\frac{t_f - \delta}{d_e} \right)^{-0.6495} \left(\frac{t_s}{t_f} \right)^{0.06937} \quad (27)$$

式中各参数的取值范围: $7500 \leq Re \leq 11500$, $1.0 \text{ mm} \leq t_f \leq 1.6 \text{ mm}$, $\delta = 0.15 \text{ mm}$, $d_e = 15.11 \text{ mm}$, $0.4 \leq t_s/t_f \leq 0.7$; 公式的适用条件: $d_o = 10 \text{ mm}$, $P_1 = 20.0 \text{ mm}$, $P_2 = 15.5 \text{ mm}$, 管束排布形式为错排。

图 17、图 18 分别为圆弧开缝翅片管空气侧 Nu 与 f 拟合的偏差分布。空气侧 Nu 关联式拟合

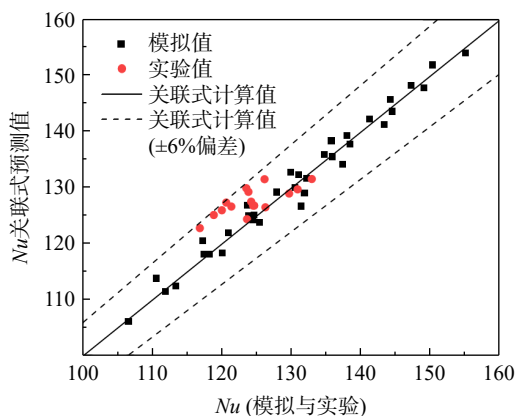


图 17 空气侧 Nu 关联式拟合偏差分布

Fig. 17 Distribution of fitting deviation of Nu correlation at the air side

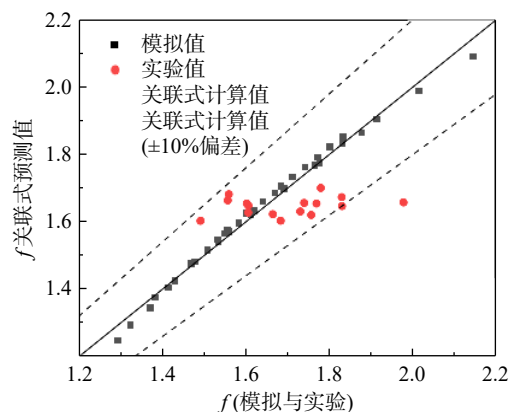


图 18 空气侧 f 关联式拟合偏差分布

Fig. 18 Distribution of fitting deviation of f correlation at the air side

偏差基本控制在 6% 以内, 而空气侧 f 关联式拟合偏差基本控制在 10% 以内。空气侧 Nu 关联式与模拟计算值和实验计算值的最大偏差分别为 3.88% 和 5.35%, 平均偏差绝对值分别为 1.16% 和 2.96%。空气侧 f 关联式与模拟计算值和实验计算值的最大偏差分别为 3.77% 和 19.27%, 平均偏差绝对值分别为 0.93% 和 6.64%。因此, 本文拟合的流动传热关联式都较为准确地预测圆弧开缝翅片空气侧传热与阻力系数。

4 结 论

本文对新型圆弧开缝翅片传热与阻力开展了数值研究, 并采用实验进行了验证, 分析了不同结构对其空气侧传热与阻力性能的影响规律, 主要结论如下:

1) 在研究范围内, 翅片间距从 1.6 mm 减小到 1.0 mm, 空气侧 Nu 增加了 19.44%, 空气侧 f 增加了 39.54%, 综合传热性能增强了 6.88%; 相对开缝高度从 0.4 增大到 0.7, 空气侧 Nu 增加了 11.55%, 空气侧 f 增加了 4.74%, 综合传热性能增强了 9.84%。在实际工程应用中, 可以通过适当减少翅片间距或增大相对开缝高度来提高圆弧开缝翅片管换热器的综合传热性能。

2) 具有周期性排布的圆弧开缝结构在破坏边界层的同时, 增强流体扰动的不均匀性, 从而提高温度的均匀性。相较于平直翅片, 圆弧开缝翅片综合传热能力提升 1.46~1.64 倍。

3) 在研究范围内, 通过多元非线性回归方法来拟合相应的幂函数关联式, 用于预测圆弧开缝翅片空气侧周期性传热单元的 Nu 与 f , 偏差绝对值的平均值在 10% 以内。研究结果可为高效翅

片管换热器设计提供设计依据。

参考文献:

- [1] 刘启航, 闻洁, 吕璐璐, 等. 紧凑翅片管式空气-燃油换热器试验[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 2848-2860.
LIN Qihang, WEN Jie, LYU Lulu, et al. Experiment of compact finned-tube air-fuel heat exchanger[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 2848-2860. (in Chinese)
- [2] 张浩, 李金波, 赵夫峰, 等. 制冷剂种类与翅片管换热器管径的匹配特性[J]. 制冷学报, 2019, 40(2): 56-61.
ZHANG Hao, LI Jinbo, ZHAO Fufeng, et al. Matching characteristics of refrigerant species and tube diameters of finned-tube heat exchanger[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(2): 56-61. (in Chinese)
- [3] KONG Y Q, YANG L J, DU X Z, et al. Air-side flow and heat transfer characteristics of flat and slotted finned tube bundles with various tube pitches[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 99: 357-371.
- [4] KONG Y Q, YANG L J, DU X Z, et al. Effects of continuous and alternant rectangular slots on thermo-flow performances of plain finned tube bundles in in-line and staggered configurations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 93: 97-107.
- [5] 屠琦琅, 袁益超, 胡晓红. 翅片结构对双向开缝翅片管换热器性能的影响[J]. 化工学报, 2016, 67(11): 4615-4622.
TU Qilang, YUAN Yichao, HU Xiaohong. Effects of fin structure on heat transfer and resistance characteristics of super slit finned tube heat exchangers[J]. CIESC Journal, 2016, 67(11): 4615-4622. (in Chinese)
- [6] 杜鹏, 钱作勤, 陈昌, 等. 多种平直开缝翅片换热特性的数值研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(4): 612-617.
DU Juan, QIAN Zuoqin, CHEN Chang, et al. Numerical study on heat transfer characteristics of plate slit fins[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(4): 612-617. (in Chinese)
- [7] 朱珊云, 戴源德, 曹杰, 等. 小管径开缝翅片管式换热器空气侧传热综合性能研究[J]. 流体机械, 2022, 50(5): 68-75.
ZHU Shanyun, DAI Yuande, CAO Jie, et al. Analysis of comprehensive heat transfer performance at air-side of slotted fin-and-tube heat exchangers with small diameter[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(5): 68-75. (in Chinese)
- [8] LIU Xiaoqin, WANG Min, LIU Hengheng, et al. Numerical analysis on heat transfer enhancement of wavy fin-tube heat exchangers for air-conditioning applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 199: 117597.
- [9] 施兴兴, 袁益超. 翅片结构对单向开缝翅片管换热器传热与阻力性能的影响[J]. 热能动力工程, 2020, 35(6): 150-157.
SHI Xingxing, YUAN Yichao. Effects of fin structure on heat transfer and resistance characteristics of unidirectional slit finned tube heat exchangers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 150-157. (in Chinese)
- [10] 袁益超, 衣志超, 王学刚. 开缝布置方式对开缝翅片管换热器传热与阻力特性的影响[J]. 热科学与技术, 2015, 14(6): 462-469.
YUAN Yichao, YI Zhichao, WANG Xuegang. Effects of slit arrangement on heat transfer and resistance characteristic of slotted fin-and-tube heat exchanger[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2015, 14(6): 462-469. (in Chinese)
- [11] 衣志超, 袁益超, 王学刚. 管间距对开缝翅片管换热器传热与阻力特性的影响[J]. 能源工程, 2015(5): 9-14, 27.
YI Zhichao, YUAN Yichao, WANG Xuegang. Influences of tube pitch on heat transfer and resistance characteristics of the slotted fin and tube heat exchanger[J]. Energy Engineering, 2015(5): 9-14, 27. (in Chinese)
- [12] 李猛, 袁益超. 翅片参数对开缝翅片管换热器换热与阻力性能的影响[J]. 热能动力工程, 2020, 35(4): 153-162.
LI Meng, YUAN Yichao. Effects of fin parameters on heat transfer and resistance characteristics of slit finned tube heat exchangers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(4): 153-162. (in Chinese)
- [13] MENÉNDEZ PÉREZ A, FERNÁNDEZ-ABALLÍ ALTAMIRANO C, BORRAJO PÉREZ R. Parametric analysis of the influence of geometric variables of vortex generators on compact louver fin heat exchangers[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 27: 101151.
- [14] MORENO R R, PÉREZ A M, PÉREZ R B. Numerical optimization of a heat exchanger with slit fins and vortex generators using genetic algorithms[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 119: 247-256.
- [15] LI Jiong, WANG Shuangfeng, CHEN Jinfang, et al. Numerical study on a slit fin-and-tube heat exchanger with longitudinal vortex generators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(9/10): 1743-1751.
- [16] 杨涛, 袁益超, 于洋洋. 圆弧形开缝翅片管空气冷却器传热与阻力特性试验研究[J]. 能源工程, 2018(2): 22-26.
YANG Tao, YUAN Yichao, YU Yangyang. Experimental study on heat transfer and resistance characteristic of slotted fin-and-tube air coolers[J]. Energy Engineering, 2018(2): 22-26. (in Chinese)
- [17] 王成刚, 郑晓敏, 谢小恒, 等. 4种圆弧形开缝翅片特性数值模拟[J]. 石油化工设备, 2012, 41(3): 29-33.
WANG Chenggang, ZHENG Xiaomin, XIE Xiaoheng, et al. Numerical simulation on characteristics of four arc-type slotted fin[J]. Petro-Chemical Equipment, 2012, 41(3): 29-33. (in Chinese)
- [18] 李红智, 罗毓珊, 王海军, 等. 圆弧形与X型开缝翅片空气侧流动与传热特性可视化试验[J]. 化工学报, 2008, 59(8): 1936-1941.
LI Hongzhi, LUO Yushan, WANG Haijun, et al. Visualization experiments on air side heat transfer and fluid flow characteristics of arc-type and X-type slotted fin surfaces[J]. CIESC Journal, 2008, 59(8): 1936-1941. (in Chinese)
- [19] 李红智, 罗毓珊, 王海军, 等. 空间波动参数在开缝翅片结构优化设计中的应用[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(3): 445-448.
LI Hongzhi, LUO Yushan, WANG Haijun, et al. Space fluctuation parameters and its application in configuration optimization design for slotted fin surfaces[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(3): 445-448. (in Chinese)
- [20] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
QIAN Songwen. Heat exchanger design manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [21] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)