

# 车载紧凑式换热器高效轻质的性能优化研究

杨佳琪<sup>1</sup>, 曹元福<sup>2</sup>, 姜涛<sup>1</sup>, 李明佳<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国北方车辆研究所, 100072, 北京;

3. 北京理工大学机械与车辆学院, 100081, 北京)

**摘要:** 针对当前车载锯齿型板翅式换热器在某新型车辆有限空间内传热与流动阻力性能不足、整机质量大的问题,提出了一种车载锯齿型板翅式换热器的优化方案。首先,对4种具有不同翅片参数的空气-水车载锯齿型板翅式换热器进行了实验测试,探究了已有换热器的传热与流动特性;然后,基于实验数据构建了锯齿型翅片通道的三维数值计算模型,获得了适用结构参数范围更加宽泛且拟合精度良好的换热器流动换热关联式,同时基于换热器几何结构获得了整机质量计算模型;最后,结合非支配排序遗传算法(NSGA II)以及传热与流动阻力综合性能评价图,开展了车载锯齿型板翅式换热器关键翅片结构参数的多目标优化研究,给出了综合性能优异的换热器结构参数。结果表明:优化后锯齿型板翅式换热器的阻力系数降低了14.3%,综合性能评价因子增加了10.7%,整机质量减少了18.2%,实现了换热器高效轻质的优化目标。所提车载锯齿型板翅式换热器优化方案,对提升其综合性能与降低制造成本具有参考价值。

**关键词:** 车载紧凑式换热器;锯齿型翅片;综合性能评价图;遗传算法;综合性能优化

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202401013 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0138-08

## Study on Optimization of High Efficiency and Light Weight Performance for Vehicle-Mounted Compact Heat Exchanger

YANG Jiaqi<sup>1</sup>, CAO Yuanfu<sup>2</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>, LI Mingjia<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China North

Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China; 3. School of Machinery and Vehicle,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In the limited space within new vehicles, current plate-fin heat exchangers with offset-strip fins suffer from issues such as inadequate heat transfer, high flow resistance and heavy weight. To address these challenges, an optimization scheme for vehicle-mounted compact heat exchanger is proposed. The study began by conducting tests on four types of air-water plate-fin heat exchangers, each with varying parameters for the offset-strip fins. These heat exchangers were evaluated to analyze their heat transfer and flow characteristics. Based on the experimental data, a 3D numerical model of the offset-strip fin channel was developed, and this model enabled the acquisition of highly accurate heat transfer and flow correlations applicable to a broader range of structural parameters within the heat exchanger. Additionally, a weight calculation model for

the heat exchanger's core was derived from its geometric structure. A multi-objective optimization process was conducted using the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA II) and a comprehensive evaluation plot considering both heat transfer and flow resistance performance. Through this optimization process, the key parameters related to fin structure of the vehicle-mounted offset-strip plate-fin heat exchanger were refined, resulting in the identification of a set of fin structure parameters that exhibit high comprehensive performance. By optimization, the flow resistance coefficient was reduced by 14.3%, the comprehensive evaluation factor was increased by 10.7%, and the core weight of the heat exchanger was decreased by 18.2%, contributing to a high-efficiency and lightweight design. This paper presents an optimization scheme specifically for the vehicle offset-strip plate-fin heat exchanger, which can serve as a valuable guidance for improving the overall performance and reducing manufacturing costs of similar heat exchangers used in vehicle applications.

**Keywords:** vehicle-mounted compact heat exchanger; comprehensive performance evaluation plot; genetic algorithm; offset strip fin; comprehensive performance optimization

车载紧凑型换热器是发动机冷却系统中实现热量交换的关键设备。随着散热需求的日益增长与布置空间的愈加有限<sup>[1-3]</sup>,对车载换热器高效、轻质、经济的需求更加迫切<sup>[4-6]</sup>。在紧凑型换热器中,锯齿型板翅式换热器具有传热效率高、污染率低、承压能力强<sup>[7-8]</sup>等优点,能够满足现有车载应用场景中对换热器尺寸与性能的需求。

为进一步提出具有更高传热性能、更低阻力损失与制造成本的锯齿型板翅式换热器,国内外学者分别从设计理论、规律分析与性能优化 3 个方面开展了相关的理论与实验研究。在设计理论方面,陶文铨和何雅玲等<sup>[9]</sup>提出了换热器流路优化布置和设计的五大原则,即场协同原理、等热流密度原则、纯逆流原则、减少翅片间的逆向导热原则以及重力作用影响原则,为换热器设计提供了一种优化理论及方法。何雅玲和陶文铨等<sup>[10-12]</sup>进一步提出三场协同理论与三场协同的性能测试和评价方法,该方法可以定量反映出优化构型在等泵功、等压降或等流量约束条件下性能的提升,并在三场协同原理指导下,实现换热器的性能优化及优化构型的快速选取,该评价方法的使用详见国家标准<sup>[13]</sup>。以上理论为换热器的性能提升和优化设计提供了很好的指导。在规律分析方面,Vaneggelen 等<sup>[14]</sup>基于大量仿真数据,获得了空气和水在锯齿型翅片微通道中的  $Nu$  关联式,并探究了锯齿型翅片几何参数对  $Nu$  的影响规律。Yang 等<sup>[15]</sup>对 18 组不同尺寸的锯齿型翅片进行实验测试,并结合翅片效率对已有关联式进行了修正。针对已有关联式无法准确预测低温氮

气在锯齿型翅片通道内传热与流动性能这一问题, Jiang 等<sup>[16]</sup>基于实验与仿真数据进行正交试验设计,并提出了新的流动换热关联式。在锯齿型翅片换热器性能优化方面, Li 等<sup>[17]</sup>采用响应面模型与多目标遗传算法,以传热、流阻与应力为优化目标,对工质为液氮的锯齿型翅片换热器展开多目标优化研究。Zhang 等<sup>[18]</sup>以小型液压动力单元锯齿型翅片换热器为研究对象,定义了换热器出口温度与压降的关联式和质量计算模型,基于此,利用遗传算法对换热器关键参数进行了多目标优化,提升了换热器的传热能力,降低了换热器总质量。Wen 等<sup>[19]</sup>结合克里金模型与多目标遗传算法,以总热流量、年总成本和单元熵产为目标函数,对锯齿型翅片换热器的参数优化进行了研究。Jamil 等<sup>[20]</sup>基于焓分析和换热器系统运行成本的计算模型,使用遗传算法对工质为空气的锯齿型翅片展开优化,最终实现了换热器系统运行成本的最小化。

在车载换热器应用研究方面,不仅应该关注换热器的传热与流动性能,还需考虑实际运行中结霜、尺寸、布局、质量等对汽车性能的影响。Hong 等<sup>[21]</sup>为解决电动汽车中空气源热泵换热器结霜,从而导致换热器换热效率下降、流阻增加的问题,开发了一种平直型与百叶窗式相结合的新构型翅片。Yadav 等<sup>[22]</sup>针对车载换热器尺寸过大、限制车内空间布局这一工程问题,将效能传热单元数法与遗传算法相结合,对应用于小型卡车的百叶窗式翅片换热器进行优化,提升了换热器的换热速率和紧凑度。Samiolo 等<sup>[23]</sup>为降低电动跑车制造成本、提升车身气动性

能,基于无翅片换热器提出了新的换热器布局方式,在降低成本的同时增大了车辆的阻力系数与升力系数。Kwon 等<sup>[24]</sup>为提升车辆实际行驶中换热器的平均性能,在车辆动态运行的工况条件下,以传热速率、翅片效率、总质量为优化目标,优化了车载换热器的几何与工况参数。

结合上述分析,大多数文献中换热器的流动换热关联式涵盖的结构参数及运行参数范围有限,且缺乏车载有限空间背景下,换热器传热流动性能与整机质量的综合考虑与优化。鉴于此,本文从换热器高效轻质的性能需求出发,以高热流密度的车载板翅式换热器为研究对象,采用实验与仿真相结合的方法,获得了结构参数范围更加宽泛的流动换热关联式,并在此基础上,对锯齿型翅片的结构参数展开了性能优化研究,获得了车载锯齿型板翅式换热器综合性能优异的翅片结构参数。

# 1 实验介绍

为测试锯齿型板翅式换热器在某新型车辆有限空间内的传热与流动性能,在中国北方车辆研究所制造加工了空气-水板翅式换热器,并进行了实验测试。实验系统主要由水回路、空气回路、测试段与数据采集系统等组成。其中,空气回路主要由闭式循环风洞、空气冷却器、空气流量计等部件组成,为实验工件提供冷空气,且在实验过程中进气温度保持常温状态;水回路主要由循环泵、加热器与流量控制阀等部件组成,为实验工件提供热水。实验测试的叉流板翅式换热器的芯体结构如图 1 所示,芯体由锯齿型翅片与平直型翅片逐层堆叠形成,两种翅片通道由隔板隔开。实验时,热水和冷空气叉流流过板翅式换热器的锯齿型翅片通道和平直型翅片通道

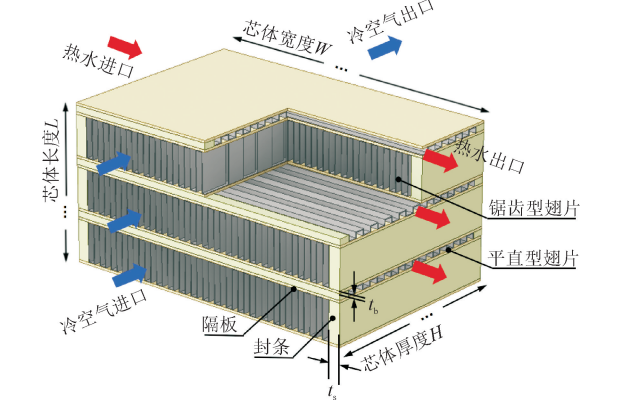


图 1 叉流板翅式换热器芯体结构示意图  
Fig. 1 Diagram of the offset-strip plate-fin heat exchanger

进行换热。其中,锯齿型翅片的几何结构如图 2 所示,平直型翅片的几何结构如图 3 所示。图中, $l$ 、 $h$ 、 $s$ 、 $t$  分别是锯齿型翅片节距、翅片高度、翅片间距、翅片厚度, $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$  分别是平直型翅片高度、翅片间距、翅片厚度。

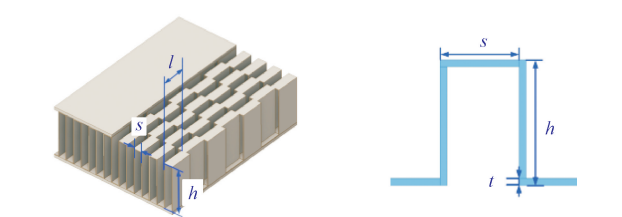


图 2 锯齿型翅片几何结构示意图  
Fig. 2 Geometric diagram of the offset strip fin

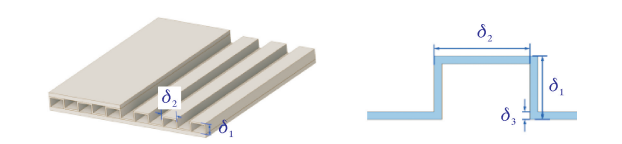


图 3 平直型翅片几何结构示意图  
Fig. 3 Geometric diagram of the plain fin

实验测试了 4 种不同翅片参数的空气-水板翅式换热器,且实验工件的整机尺寸保持不变。工件 1~工件 4 的几何参数取值如表 1 所示。

表 1 换热器实验工件的几何参数  
Table 1 Geometric parameters of the heat exchangers

| 参数                   | 数值    | 参数                          | 数值        |
|----------------------|-------|-----------------------------|-----------|
| 芯体长度 $L/\text{mm}$   | 946.0 | 平直翅片高度 $\delta_1/\text{mm}$ | 1.6~2.5   |
| 芯体宽度 $W/\text{mm}$   | 630.0 | 平直翅片间距 $\delta_2/\text{mm}$ | 2.5~3.0   |
| 芯体厚度 $H/\text{mm}$   | 140.0 | 平直翅片厚度 $\delta_3/\text{mm}$ | 0.2       |
| 封条宽度 $t_s/\text{mm}$ | 8.0   | 锯齿翅片节距 $l/\text{mm}$        | 5.0~10.0  |
| 隔板厚度 $t_b/\text{mm}$ | 0.6   | 锯齿翅片高度 $h/\text{mm}$        | 10.0      |
| 热侧层数 $n_h$           | 69~72 | 锯齿翅片间距 $s/\text{mm}$        | 1.75~2.00 |
| 冷侧层数 $n_c$           | 68~73 | 锯齿翅片厚度 $t/\text{mm}$        | 0.15~0.20 |

表 2 给出了板翅式换热器的实验测试工况,也是车载应用场景中换热器的实际运行工况。通过实验测得板翅式换热器的出口温度和压降等参数,详见表 3,进一步计算验证了空气侧和水侧的热平衡,误差在 5% 以内,证明了实验数据的可靠性。由于各实验工件仍具有一定的性能提升空间,因此本文的重点是针对实验测试的换热器进一步开展优化设计,实验系统及装置、实验数据处理方法以及实验不确定度分析等详细信息不做赘述。

表 2 换热器实验工况参数

Table 2 Experimental parameters of the heat exchangers

| 参数                                                 | 数值范围            |
|----------------------------------------------------|-----------------|
| 热水质量流量 $q_{m,h}/(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$ | 342.0~727.6     |
| 热水进口温度 $t_{h,i}/^{\circ}\text{C}$                  | $100.0 \pm 0.8$ |
| 冷空气质量流量 $q_{m,c}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$  | 3.9~6.5         |
| 冷空气进口温度 $t_{c,i}/^{\circ}\text{C}$                 | $25.0 \pm 0.6$  |

表 3 换热器实验结果

Table 3 Experimental results of the heat exchangers

| 参数                                 | 数值范围        |
|------------------------------------|-------------|
| 热水出口温度 $t_{h,o}/^{\circ}\text{C}$  | 85.3~94.3   |
| 热侧换热量 $Q_h/\text{kW}$              | 266.8~386.7 |
| 热侧压降 $\Delta p_h/\text{kPa}$       | 18.0~46.7   |
| 冷空气出口温度 $t_{c,o}/^{\circ}\text{C}$ | 77.5~92.2   |
| 冷侧换热量 $Q_c/\text{kW}$              | 253.7~373.8 |
| 冷侧压降 $\Delta p_c/\text{kPa}$       | 460.4~858.7 |
| 热平衡误差 /%                           | 3.4~4.9     |
| 气液温差/ $^{\circ}\text{C}$           | 266.1~384.0 |

在实验测试的换热器工件中,锯齿型翅片的结构参数变化范围有限,但换热器不同结构参数间的组合方式众多,如果逐一制造加工并进行实验测试,会耗费大量的成本与时间。因此,本文采用实验与数值模拟相结合的方法,以获得涵盖较宽结构参数范围的换热器流动换热关联式,为锯齿型板翅式换热器的优化设计提供参考。

2 数值方法及关联式

2.1 构建计算模型

考虑到板翅式换热器结构的周期性与对称性,同时为提升计算效率,针对锯齿型翅片单通道开展数值模拟研究,选取的锯齿型翅片通道单元如图 4 所示。为了消除入口效应和回流对结果的影响,分别在翅片通道物理模型的入口与出口设置进出流延长段<sup>[25]</sup>。

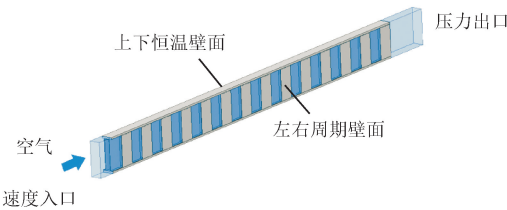


图 4 锯齿翅片通道的物理模型

Fig. 4 Physical model of the offset strip fin channel

采用 ANSYS FLUENT 22.0 进行计算,模拟基于三维稳态流动假设,选用层流黏性模型。同时,边界条件采用速度入口、压力出口、上下恒温壁面、

左右周期壁面。采用 Coupled 算法求解压力和速度的耦合关系,发现当残差达到  $10^{-6}$  时,计算收敛。

使用 FLUENT Meshing 软件对模型进行网格划分。经验证,当网格数由 2 058 万增加至 2 527.3 万时,努塞尔数  $Nu$  与阻力系数  $f$  的变化幅度分别为 1.89% 和 2.34% ( $Nu$  与  $f$  的计算方法可参见文献<sup>[26]</sup>),因此本文采用 2 000 万左右的网格数进行后续的仿真研究。本文将仿真结果与实验数据进行了对比,  $Nu$  的偏差在  $\pm 4.3\%$  以内,  $f$  的偏差在  $\pm 6.8\%$  以内,表明所采用的数值模型是可靠的。

2.2 锯齿型翅片换热器性能关联式

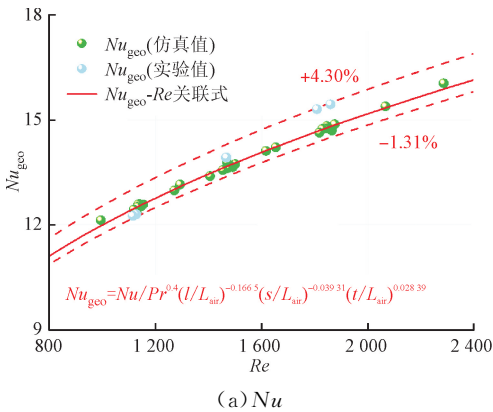
在实验工件的基础上,进一步扩大锯齿型翅片结构参数的设计范围,模拟获得了不同参数组合方案下换热器的传热与流动性能。同时,综合考虑了雷诺数  $Re$  和关键结构参数翅片节距  $l$ 、翅片间距  $s$ 、翅片厚度  $t$ ,并将其各自除以通道长度  $L_{air}$  (此时气侧换热通道长度  $L_{air}$  为换热器芯体厚度  $H$ ,取值 140 mm) 进行无量纲化,基于实验和仿真数据拟合获得空气侧  $Nu$  与  $f$  的关联式为

$$Nu = 1.152 Re^{0.3392} Pr^{0.400} (l/L_{air})^{-0.1665} \cdot (s/L_{air})^{-0.03931} (t/L_{air})^{0.02839} \tag{1}$$

$$f = 76.63 Re^{-0.4800} (l/L_{air})^{-0.3753} \cdot (s/L_{air})^{-0.3512} (t/L_{air})^{0.9600} \tag{2}$$

式中:  $Re = 900.0 \sim 2\,400.0$ ;  $Pr = 0.7037 \sim 0.7042$ ;  $l = 3.0 \sim 10.0\text{ mm}$ ;  $h = 10.0\text{ mm}$ ;  $s = 1.50 \sim 2.25\text{ mm}$ ;  $t = 0.15 \sim 0.30\text{ mm}$ 。

实验和仿真数据与关联式的对比结果如图 5 所示,其中  $Re$  并非影响  $Nu$  与  $f$  的单一变量。为了更加直观地表示  $Re$  与  $Nu$  和  $f$  间的关系,修正获得了  $Nu_{geo}$  和  $f_{geo}$  (定义式可见图 5)。新提出的换热器流动换热关联式,相比于实验工件,其结构参数范围更加宽泛且拟合精度良好,  $Nu$  的误差在  $-1.3 \sim 4.3\%$  之间,  $f$  的误差在  $-9.7\% \sim 10.9\%$  之间。



(a)  $Nu$

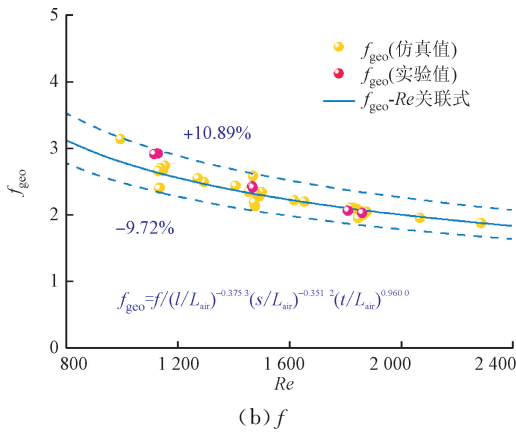


图 5 锯齿翅片通道侧关联式

Fig. 5 Flow and heat transfer correlations of offset strip fin

结合实验工件的几何结构特点,提出了换热器整机质量  $M$  的计算模型

$$M = \rho_{Al} \left[ \left( \frac{(L - t_b) 2t_b}{\delta_1 + h + 2t_b} + t_b \right) HW + \left( \frac{L - t_b}{\delta_1 + h + 2t_b} - 1 \right) \cdot \left( (\delta_1 + \delta_2 - \delta_3) \frac{(H - 2t_s) \delta_3}{\delta_2} + \delta_1 \delta_3 \right) W + \left( \frac{L - t_b}{\delta_1 + h + 2t_b} \right) \left( (h + s - t) \cdot \frac{(W - 2t_s)t}{s} + ht \right) H \right] \quad (3)$$

由于本文重点关注锯齿型翅片的优化,因此参数  $L$ 、 $W$ 、 $H$ 、 $t_s$ 、 $t_b$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  均保持不变。

### 3 结果与分析

#### 3.1 多目标优化结果

基于 2.2 节获得的流动换热关联式与质量计算模型,采用 NSGA II 算法开展锯齿型翅片参数的多目标优化研究。优化目标见式(4),各优化目标均包含 4 个优化参数  $Re$ 、 $l$ 、 $s$  和  $t$ 。式(5)是多目标优化过程的约束条件,给出了参数的取值范围。各参数取值为

$$\begin{cases} \max Nu = Y(Re, l, s, t) \\ \min f = Y(Re, l, s, t) \\ \min M = Y(Re, l, s, t) \\ \text{s. t. } 900 \leq Re \leq 2400; \\ 3.0 \text{ mm} \leq l \leq 10.0 \text{ mm}; \\ 1.50 \text{ mm} \leq s \leq 2.25 \text{ mm}; \\ 0.15 \text{ mm} \leq t \leq 0.30 \text{ mm} \end{cases} \quad (4)$$
$$\begin{cases} 900 \leq Re \leq 2400; \\ 3.0 \text{ mm} \leq l \leq 10.0 \text{ mm}; \\ 1.50 \text{ mm} \leq s \leq 2.25 \text{ mm}; \\ 0.15 \text{ mm} \leq t \leq 0.30 \text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

NSGA II 优化算法流程如图 6 所示。通过多目标优化预实验,确定初始种群规模为 900,迭代次数为 400,变异概率为 0.2,交叉概率为 0.8。

多目标优化得到构成 Pareto 前沿的最优解集。为了更加直观定量地比较并筛选优化翅片与基准翅

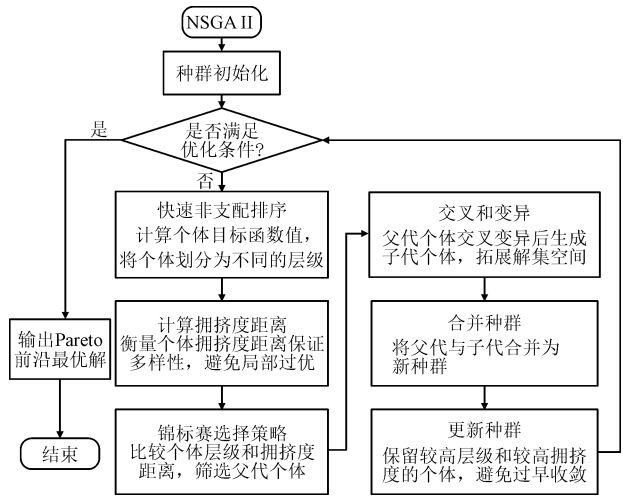


图 6 NSGA II 优化流程图

Fig. 6 Optimization flow chart for NSGA II

片通道在相同工况下的性能提升情况,将最优解集标定在表征温度、压力和速度三场协同性的传热与流动阻力综合性能评价图<sup>[13]</sup>中,如图 7 所示。该综合评价图以强化前后的  $Nu_e/Nu_0$  为纵坐标,  $f_e/f_0$  为横坐标,分别在等泵功、等压降和等流量 3 种约束条件下,绘制三条基准线对综合性能评价图进行分区,其中区域 1~区域 4 表征传热与阻力综合性能越来越好,即温度场、压力场和速度场之间的三场协同性越好,传热性能越好,流体阻力增加比越小,详见文献[13]。虽然实验工件 4 的综合性能较优,但仍具有一定的性能提升空间,因此本文以工件 4 为基准翅片,并在二维综合性能评价图的基础上,增加了表征  $M$  降低程度的  $z$  轴,以更加清晰地对比并指导高效、轻质换热器的选择。

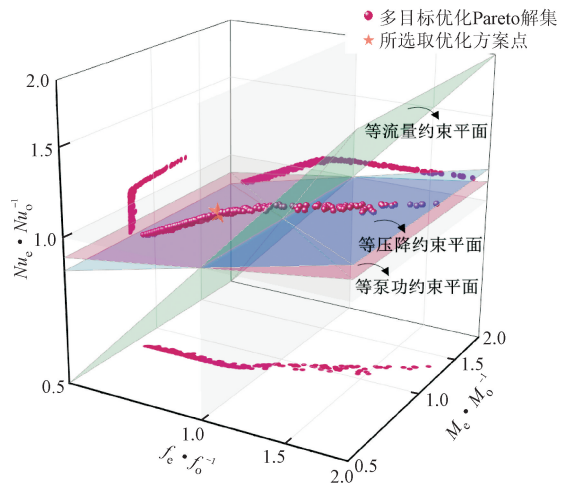


图 7 以  $Nu$ 、 $f$  和  $M$  为目标获得的 Pareto 前沿

Fig. 7 The Pareto frontier obtained by targeting  $Nu$ ,  $f$  and  $M$

由图 7 可以看出,在  $Re$  为 900 ~ 2 400 的研究范围内,  $Nu_e/Nu_0$  的变化范围为 0.77 ~ 1.10,  $f_e/f_0$  的变化范围为 0.54 ~ 1.86,  $M_e/M_0$  的变化范围为 0.82 ~ 1.31。根据当前工程应用需求,在  $Nu_e/Nu_0 > 1$  的强化传热区域内选择解集中  $M$  最小的解作为优化翅片的参数组合方案,其翅片参数如表 4 所示。

表 4 多目标优化前后翅片参数对比

Table 4 Fin parameter comparison before and after optimization

| 翅片   | $l/\text{mm}$ | $h/\text{mm}$ | $s/\text{mm}$ | $t/\text{mm}$ |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 基准翅片 | 5.0           | 10            | 1.75          | 0.20          |
| 优化翅片 | 3.4           | 10            | 2.25          | 0.15          |

结合优化翅片的参数组合方案,绘制锯齿型翅片优化前、后的结构,如图 8 所示。图 8 仅示意两种翅片通道的局部结构,两种翅片通道在长度上按图示结构进行周期排布,且翅片通道总长度一致,均为 140 mm。可以看出,优化后的翅片相比于基准翅片具有相对更短的节距、更宽的间距以及更薄的翅厚。

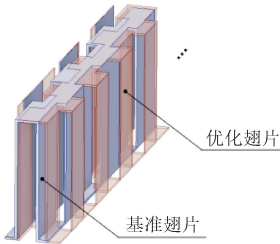


图 8 优化前后翅片的结构对比

Fig. 8 Comparison of fin structure before and after optimization

3.2 传热与流动特性分析

为进一步验证翅片优化参数组合方案的有效性,同时探究换热器综合性能改善的原因,对两种翅片进行数值模拟( $Re=2\ 000$ ),并将其性能进行对比,结果如表 5 所示。由表 5 可知,优化翅片通道的  $Nu$  比基准翅片增加了 5.2%,同时  $f$  降低了 14.3%, $\eta$  提升了 10.7%,且  $M$  减轻了 18.2%(即 8.9 kg),换热器的综合性能得到了提升。

表 5 多目标优化前后换热器性能对比

Table 5 Performance comparison before and after optimization

| 翅片   | $Nu$ | $f$     | $\eta$ | $M/\text{kg}$ |
|------|------|---------|--------|---------------|
| 基准翅片 | 22.9 | 0.057 3 | 1.000  | 49.0          |
| 优化翅片 | 24.1 | 0.049 1 | 1.107  | 40.1          |
| 性能变化 | 5.2% | -14.3%  | 10.7%  | -18.2%        |

注:综合性能评价因子  $\eta=(Nu_e/Nu_0)\cdot(f_e/f_0)^{-1/3}$ ,表示在等泵功条件下,换热器强化传热的效果;角标“0”与“e”分别代表基准翅片与优化翅片。

图 9 为优化翅片与基准翅片通道内的局部流线分布图。由图 9 可见,优化翅片通道内具有更小的流速,且速度均匀性更好,但二者的流线分布规律较为相似;在同一翅片周期内,空气来流冲击到翅片前端存在驻点,导致流速迅速降低后改变流动方向,空气流至两侧通道较窄的翅片交错区时,流体速度快速升高,此时改变流动方向的流束与翅片前端侧壁间存在流体脱离壁面的现象,并产生较小的涡旋,且基准翅片的涡旋区域明显大于优化翅片,造成了更多的能量损失;随着贴壁流动的重新进行,空气在翅片壁面处逐渐发展流动边界层后又在翅片末端被破坏;错列排放的翅片,使空气在截面宽度不断变化的通道内进行周期性流动。

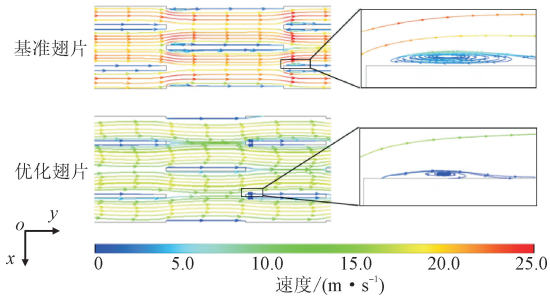


图 9 锯齿型翅片通道的流线分布

Fig. 9 Streamline distribution of offset strip fin

图 10 和图 11 分别为优化翅片与基准翅片通道内局部温度和沿程  $Nu$  的分布情况。由图 10 可见,空气在锯齿型通道内的翅片前端,由于流速迅速增加以及微小涡旋的影响,温度边界层的厚度大幅减小,因此,更短的翅片节距不断加强流体扰动而强化了传热。同时,优化翅片具有更宽的间距和更薄的翅厚,宽间距导致通道中部的流体更难被高温翅片充分传热、薄翅厚导致流体扰动减弱,因此传热又被弱化。结合图 11 可以看出,优化翅片较短节距带来的强化传热效果与宽间距、薄翅厚的弱化传热效果相抵消,因此整体相对于基准翅片通道的传热性能

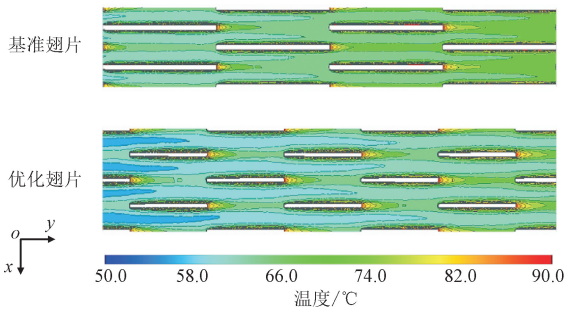


图 10 锯齿型翅片通道的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of offset strip fin

几乎一致。同时两种翅片通道的  $Nu$  均在进口处最高,随后  $Nu$  沿翅片流动方向( $y$  轴正向)与阵列方式呈周期性逐渐下降的趋势。

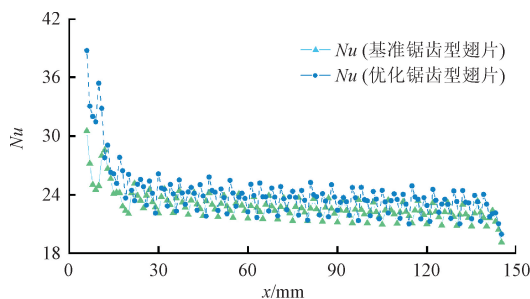


图 11 锯齿型翅片的沿程  $Nu$  分布

Fig. 11 Distribution of  $Nu$  along the offset strip fin

图 12 和图 13 分别展示了优化翅片与基准翅片通道内的局部压力和沿程  $f$  的分布情况。由图 12 可以看出,锯齿型通道的阻力损失主要发生在翅片前端与翅片交错区,且优化翅片具有更小的阻力损失。结合图 13 发现,压力在翅片前端驻点附近明显降低,且流体在翅片尾部存在逆压梯度,导致  $f$  在翅片交接处先增大至峰值后又降低为负值。同时,优化翅片更短的节距,加强了流体扰动频率, $f$  峰值出现的次数多于基准翅片,但是更宽的间距与更薄的翅厚大幅降低了流体的局部阻力损失,使得优化翅片通道  $f$  的峰值低于基准翅片。综合来看,优化翅片通道整体的流动性能显著改善。

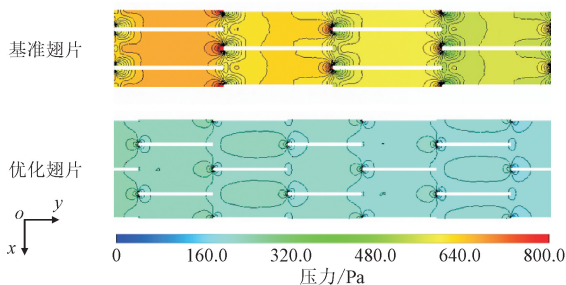


图 12 锯齿型翅片通道的压力分布

Fig. 12 Pressure distribution of offset strip fin

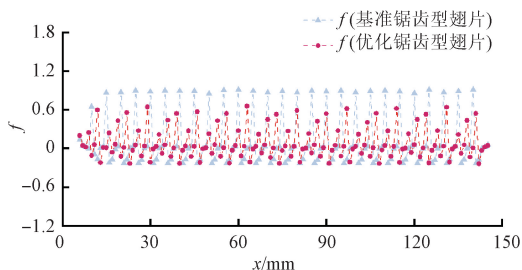


图 13 锯齿型翅片的沿程  $f$  分布

Fig. 13 Distribution of  $f$  along the offset strip fin

结合上述分析以及换热器流动换热关联式可知,在本文研究的翅片参数范围内, $l$  对换热器  $Nu$  的影响最为显著,且二者为反比例关系; $s$  与  $t$  对  $f$  的影响远大于对  $Nu$  的影响,且  $s$  越大、 $t$  越小时,换热器的流动性能越好,单位体积内铝合金耗材越少,因此当前的翅片优化方案,在保证换热器良好换热性能的前提下,有效降低了  $f$  与  $M$ ,验证了优化方案的可靠性,满足了工程应用需求。

## 4 结 论

(1)所提出的流动换热关联式,综合考虑了更宽范围的翅片结构参数且拟合精度良好,为新型车载有限空间内的紧凑型锯齿型板翅式换热器的设计与选型提供了依据。

(2)基于非支配排序遗传算法(NSGA II),得到的锯齿型翅片参数组合方案为翅片节距  $l$ 、翅片高度  $h$ 、翅片间距  $s$  和翅片厚度  $t$  分别取 3.4、10.0、2.25 和 0.15 mm。

(3)锯齿型翅片通道的传热强化与阻力损失主要发生于翅片的交错区,各几何参数的变化对各目标性能的影响相互冲突,最终优化得到的锯齿型板翅式换热器阻力系数  $f$  降低了 14.3%,综合性能评价因子增加了 10.7%,整机质量减少了 18.2%,较好地实现了高效轻质的优化目标。

## 参考文献:

- [1] YADAV J P, SINGH B R. Study on performance evaluation of automotive radiator [J]. Samridhi A Journal of Physical Sciences Engineering and Technology, 2015, 2: 47-56.
- [2] IKHTIAR U, HAIRUDDIN A A B H, ASARRY A B, et al. Experimental assessment of lamella heat exchanger as cold intake air system for spark ignition engine by utilizing vehicle air conditioning system [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 148: 106989.
- [3] DA SILVA R P P, MORTEAN M V V, DE PAIVA K V, et al. Thermal and hydrodynamic analysis of a compact heat exchanger produced by additive manufacturing [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 193: 116973.
- [4] PARK Y, KIM J, OH J, et al. Multi-objective optimization of an offset strip fin heat exchanger for waste heat recovery in electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 228: 120533.
- [5] SUBHEDAR D G, RAMANI B M, GUPTA A. Experimental investigation of heat transfer potential of  $Al_2O_3$ /Water-Mono Ethylene Glycol nanofluids as a

- car radiator coolant [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2018, 11: 26-34.
- [6] OLIVEIRA G A, CONTRERAS E M C, FILHO E P B. Experimental study on the heat transfer of MWCNT/water nanofluid flowing in a car radiator [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 1450-1456.
- [7] KAYS W M, LONDON A L. Compact heat exchangers [M]. 3rd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1984.
- [8] JIANG Qingfeng, ZHUANG Ming, ZHU Zhigang, et al. Thermal hydraulic characteristics of cryogenic offset-strip fin heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 150: 88-98.
- [9] 西安交通大学. 一种换热器流路的布置方法及其装置: CN200210014653.2 [P]. 2003-01-08.
- [10] HE Yaling, TAO Wenquan. Convective heat transfer enhancement: mechanisms, techniques, and performance evaluation [J]. *Advances in Heat Transfer*, 2014, 46: 87-186.
- [11] 何雅玲, 雷勇刚, 田丽亭, 等. 高效低阻强化换热技术的三场协同性探讨 [J]. *工程热物理学报*, 2009, 30 (11): 1904-1906.
- HE Yaling, LEI Yonggang, TIAN Liting, et al. An analysis of three-field synergy on heat transfer augmentation with low penalty of pressure drop [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30 (11): 1904-1906.
- [12] 何雅玲, 陶文铨. 强化单相对流换热的基本机制 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 27-38.
- HE Yaling, TAO Wenquan. Fundamental mechanism of enhancing single-phase convective heat transfer [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 27-38.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 制冷系统及热泵用换热器 温度、压力和速度三场协同的性能测试和评价方法: GB/T 41872—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 1-14.
- [14] VANGHEFFELN A, BUCKINX G, DE SERVI C, et al. Nusselt number for steady periodically developed heat transfer in micro-and mini-channels with arrays of offset strip fins subject to a uniform heat flux [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 195: 123145.
- [15] YANG Yujie, LI Shimin, LIU Hantao. Experimental investigation on the heat transfer behavior of water in offset strip fin channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 202: 123656.
- [16] JIANG Qingfeng, PAN Chongyao, CHEN Yidan, et al. Improved heat transfer and friction correlations of aluminum offset-strip fin heat exchangers for helium cryogenic applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192: 116892.
- [17] LI Ke, WEN Jian, WANG Simin, et al. Multi-parameter optimization of serrated fins in plate-fin heat exchanger based on fluid-structure interaction [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176: 115357.
- [18] ZHANG Yayun, PENG Jinghui, YANG Rui, et al. Weight and performance optimization of rectangular staggered fins heat exchangers for miniaturized hydraulic power units using genetic algorithm [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 28: 101605.
- [19] WEN Jian, YANG Huizhu, TONG Xin, et al. Configuration parameters design and optimization for plate-fin heat exchangers with serrated fin by multi-objective genetic algorithm [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 117: 482-489.
- [20] JAMIL M A, GORAYA T S, UR REHMAN A, et al. A comprehensive design and optimization of an off-set strip-fin compact heat exchanger for energy recovery systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 14: 100191.
- [21] 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.
- [22] YADAV M S, GIRI S A, MOMALE V C. Sizing analysis of louvered fin flat tube compact heat exchanger by genetic algorithm [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 125: 1426-1436.
- [23] SAMIOLO M, VERDIN P G. Numerical modelling of a finless heat exchanger layout for electric vehicle application [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118506.
- [24] KWON H, PARK S, CHOI J, et al. A study on the optimization of the louver fin heat exchanger for fuel cell electric vehicle using genetic algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(4): 2539.
- [25] JIANG Tao, LI Mingjia, WANG Wenqi, et al. Fluid-thermal-mechanical coupled analysis and optimized design of printed circuit heat exchanger with airfoil fins of S-CO<sub>2</sub> Brayton cycle [J]. *Journal of Thermal Science*, 2022, 31(6): 2264-2280.
- [26] LI Ke, WEN Jian, LIU Yuce, et al. Application of entransy theory on structure optimization of serrated fin in plate-fin heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173: 114809.

(编辑 亢列梅)