

DOI: 10.7652/xjtuxb201802020

# 利用流固耦合分析的板翅式换热器 锯齿型翅片多目标优化

文键<sup>1</sup>, 李科<sup>1</sup>, 刘育策<sup>1</sup>, 吴孟琛<sup>1</sup>, 王斯民<sup>2</sup>, 厉彦忠<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安)

**摘要:** 采用数值模拟方法,从流固耦合的角度,对板翅式换热器常用的锯齿型翅片进行了流动、换热和承压能力等综合性能的分析及结构优化。通过分析基于多组参数点计算结果生成的 Full 2nd-Order Polynomial 响应平面,研究了翅高、翅厚、翅距、节距对翅片流动、换热及应力分布的影响。在此基础上,结合响应面和多目标遗传算法,选取  $j$  因子、 $f$  因子和最大应力作为目标函数,对锯齿型翅片进行多目标优化,提出了 3 种优化翅片结构,并将初始结构与优化结构进行了对比。结果表明:最大应力位于第 1 排翅片直角边和隔板相连的部位,翅片节距对换热影响最大,翅厚对流动阻力影响最大,而翅片间距和翅厚对应力影响最大;优化结构 3 相对于常用结构的热性能因子增加了 10.62%,最大应力减少了 7.9%。研究结果为板翅式换热器锯齿型翅片的优化设计提供了理论指导。

**关键词:** 板翅式换热器;锯齿型翅片;应力分析;响应平面;多目标遗传算法

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)02-0130-06

## Multi-Objective Optimization of Serrated Fin in Plate-Fin Heat Exchanger by Fluid Structure Interaction

WEN Jian<sup>1</sup>, LI Ke<sup>1</sup>, LIU Yuce<sup>1</sup>, WU Mengchen<sup>1</sup>, WANG Simin<sup>2</sup>, LI Yanzhong<sup>1</sup>

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

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The comprehensive performances of flow resistance, heat transfer and loading capacity of serrated fin in plate-fin heat exchangers are numerically simulated with CFD method and the structure is optimized. Analyzing full 2nd-order polynomial response surface generated by calculating many combinations of input parameters, the effects of the fin height, fin space, fin thickness and fin interrupted length on flow resistance, heat transfer and stress distribution are investigated. Combining response surface with multi-objective genetic algorithm (MOGA), the fin structure is optimized comprehensively by setting the  $j$  factor,  $f$  factor and maximum stress as the objective functions. Three groups of optimal fin structure are put forward. To demonstrate the effectiveness of optimized structures, the comparison between the original design and optimized structure 3 is performed. The results show that the maximum stress is located on the joint region connecting the right angle of fin structure of first row and clipboard; the effect of fin interrupted length on heat exchange, the effect of fin thickness on flow resistance and the effect

收稿日期: 2017-06-10。 作者简介: 文键(1976—),女,教授,博士生导师;王斯民(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676146)。

网络出版时间: 2017-10-12 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171012.1748.002.html>

of fin interrupted length and fin thickness on stress get the greatest. The  $F_{TEF}$  factor of the optimized structure 3 increases by 10.62%, and the maximum stress decreases by 7.9%.

**Keywords:** plate-fin heat exchanger; serrated fin; stress analysis; response surface; multi-objective genetic algorithm

随着大型空分系统的发展以及国家能源政策的调整,对于板翅式换热器不仅要求提高流动换热性能,而且对承压能力也提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。因此,板翅式换热器综合性能的进一步提升已逐渐成为人们关注的重点之一。

文献[3]通过风洞试验,测试了21种航空用锯齿型翅片的流动换热性能,并较为系统地绘制出了它们的性能参数图表。文献[4]采用了同样的实验方法,测试了5种铝制锯齿型翅片通道的流动换热性能,并基于这些实验数据给出了锯齿型翅片通道的性能预测关联式。文献[5]分别计算考虑了轴向导热模型和不考虑轴向导热模型的换热因子,引入无量纲参数传热恶化率( $\eta$ )来评价轴向导热对于板翅式换热器传热性能的影响程度。文献[6]基于Kriging响应面,通过遗传算法来优化锯齿型板翅式换热器,选取的优化目标是 $j$ 因子最大和 $f$ 因子最小,结果得到了一系列的帕累托最优解。

当前,国内外对于板翅式换热器的研究开发主要集中在流体流动、传热、优化设计及制造工艺<sup>[7]</sup>等方面。在强度分析方面,因为板翅结构的复杂性尤其是锯齿型翅片,国内外很少研究。随着工业的发展进步,新工艺及技术的研发,对板翅式换热器板翅结构的承压能力提出了更高的要求,所以对板翅从结构上进行优化以提高其承压能力,这是急需解决的重要问题。

本文以锯齿型板翅式换热器为研究对象,将翅高、翅距、翅厚和节距作为输入参数来驱动几何模型的生成,结合 Full 2nd-Order Polynomial 响应面和遗传算法,选取 $j$ 因子、 $f$ 因子和翅片结构中的最大应力作为目标函数,对翅片结构进行了优化研究。

## 1 几何结构与数值计算模型

### 1.1 几何模型和计算边界条件

在翅片结构的进出口处分别添加延长段。为了维持通道中的雷诺数  $Re$  不变,需要将延长段入口处的速度参数化,每一组几何结构对应不同的入口速度,计算方法如下

$$Re = \frac{uD_h}{\nu} \quad (1)$$

$$u_{in}A_{in} = uA_c \quad (2)$$

式中: $u$ 是翅片结构的入口速度; $\nu$ 是运动黏度; $u_{in}$ 是延长段的入口速度; $A_{in}$ 是延长段入口的横截面积; $A_c$ 翅片通道的横截面积; $D_h$ 是当量直径

$$D_h = \frac{4A_c}{A}$$

$$\frac{4l(h-t)(s-t)}{2(l(h-t)+l(s-t)+t(h-t))+t(s-2t)} \quad (3)$$

其中, $A$ 是翅片通道单元的总换热面积, $h$ 、 $s$ 、 $t$ 、 $l$ 分别是翅高、翅距、翅厚、节距(见图1),在后续计算中选取的优化范围分别是翅高4.7~9.5 mm,翅距1.4~3 mm,翅厚0.1~0.5 mm,节距3~9 mm。

入口处采用速度边界条件,雷诺数为800,入口温度为300 K。出口为压力出口,假定上下隔板被充足的饱和蒸汽加热,所以上下壁面的温度维持在373.15 K。通道中的压强为一个大气压,左右侧面设定为周期性边界条件,工质是空气,换热器的材料是铝。

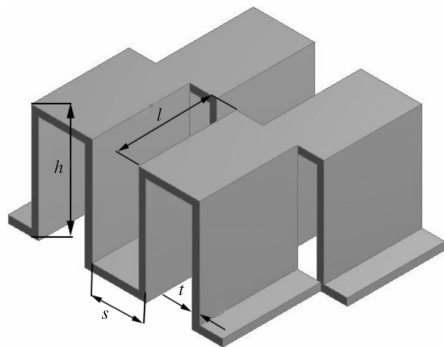


图1 锯齿型翅片几何参数示意图

采用结构化的六面体网格进行网格划分,在壁面处对网格进行边界层加密,流固区域的网格见图2。

固体域的约束设置如下:在底面限制其沿着竖直方向的位移,在上面加载恒定的压力0.601 MPa。由于在实际情况下,空气通道中的压强是一个大气压,而且通道中沿着流动方向的压降非常小,相比于通道中的绝对压强是可以忽略不计的,因此在通道中加载0.101 MPa压力,固体域的温度分布来源于Fluent计算结果。由于靠近入口处固体域中的温度梯度较大,故选取入口处的4个小单元体进行应力计算。

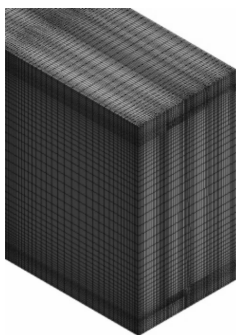


图2 网格划分示意图

## 1.2 数学描写及其数值方法

流场计算的基本方程包括连续性、动量以及能量方程,连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (4)$$

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_k} \quad (5)$$

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i t) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial t}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

在固体域,翅片上产生的应力与作用在翅片上的外力互相平衡,平衡微分方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

## 1.3 计算结果的验证

流场计算和固体域应力计算都需要进行网格无关性验证。所采用的几何模型为  $h=7.1 \text{ mm}$ ,  $s=2.2 \text{ mm}$ ,  $t=0.3 \text{ mm}$ ,  $l=6 \text{ mm}$ 。当网格数量分别达到 5 127 936 和 625 235 的时候,  $j$  因子、 $f$  因子和最大应力值不再发生变化。

数值模拟的结果与文献[3]中的实验数据进行了对比(见图3),  $j$  因子和  $f$  因子的均方根误差分别是 9.61% 和 13.78%, 因此认为数值模拟结果是正确的。

## 1.4 优化过程

图4为遗传算法的优化过程<sup>[6]</sup>, 其中  $F_{\text{TEF}}$  为热性能因子。优化过程包括初始试验设计、构造响应面和优化目标函数, 实验设计选取中心组合设计法, 该方法具有试验次数少、精度高、预测性好的特点。实验设计点的数值模拟结果用来构建响应面, 响应面可以近似目标函数与设计变量之间的关系, 大大

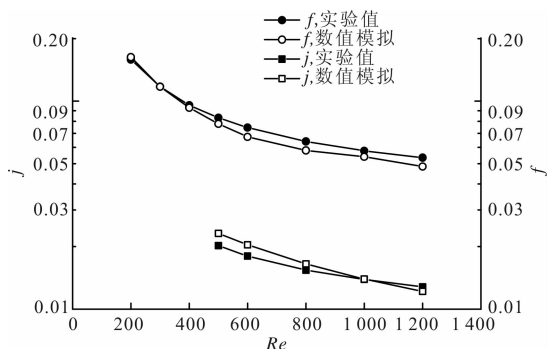


图3 锯齿型翅片实验验证

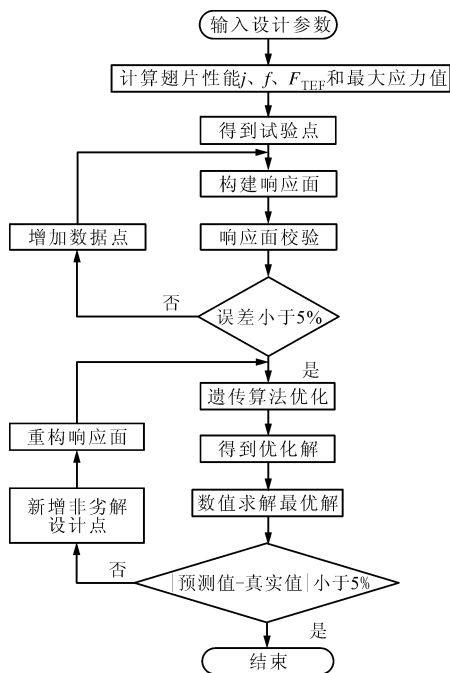


图4 遗传算法的优化过程

减少了源函数的估值次数<sup>[8]</sup>, 克服了传统全局优化方法估值次数多、效率低等问题。构建的 Full 2nd-Order Polynomial 响应平面属于回归分析的一种, 通过方差变化的形式来表达目标函数空间的变化, 确保了预测值空间分布的更小误差<sup>[9]</sup>。在响应平面的基础上, 采用多目标遗传算法(MOGA)对结构进行优化<sup>[10]</sup>, 得到的优化结果是一系列包含输入参数和输出参数的参数点。注意到在流程图中有两次误差分析, 第一次“误差小于5%”是指验证点的误差, 这些验证点是为了研究响应面是否有足够精确的预测能力而生成的, 误差是指验证点的响应面预测值和数值模拟结果之间的误差。在得到了优化点后, 仍然要比较其预测值和真实值(数值模拟值)之间的差异。对于其他一些复杂的工程问题, 只要其几何模型能够参数化, 优化目标能够量化为目标函数, 即可采用多目标遗传算法来进行优化。

2 计算结果分析

2.1 数据处理

计算  $j$  因子、 $f$  因子和  $F_{TEF}$  因子的方法见文献[6],由于铝的导热系数较大,所以计算时不考虑翅片效率的影响。采用 ANSYS workbench 中的 mechanical 求解应力分布,将最大应力作为输出参数及其后续的优化目标函数。

采用的锯齿翅片高  $h=7.1\text{ mm}$ ,翅距  $s=2.2\text{ mm}$ ,翅厚  $t=0.3\text{ mm}$ ,节距  $l=6\text{ mm}$ ,应力计算结果见图 5。图 5 的结果综合考虑了压力场和温度场,可以观察到应力较大的区域位于板翅连接处,主要是这里的几何结构尖锐且发生了突变,但是最大应力点并不在两排翅片的连接处,而是在第 1 排翅片的直角边与隔板相连的部分,即翅片和隔板的钎焊处。由于这里温度分布变化剧烈,使得热应力对综合应力的分布及大小影响较大。焊缝处成为最危险位置,在大温差、高压环境下,裂纹会从焊缝处起裂,沿焊缝扩展。

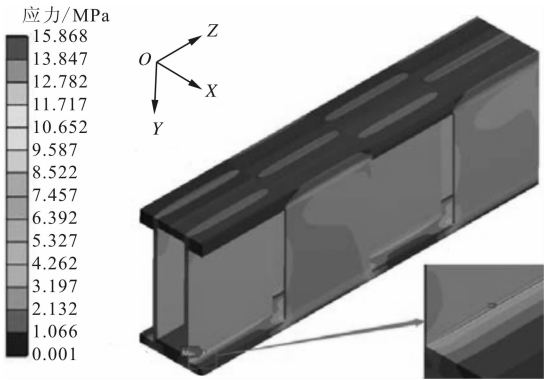


图 5 综合考虑压力场和温度场分布的翅片应力分布

2.2 翅片几何结构参数对目标函数的影响

2.2.1 翅高的影响 如图 6 所示,目标函数都随着翅高的增加而增加, $j$  因子增加了 19.2%, $f$  因子增加了 15%, $F_{TEF}$  因子增加了 13.78%。翅高的增加并不能很明显地改变流态,对于边界层的影响也不是非常明显,翅高增加使得通道中的流速减少,但是在维持通道  $Re$  一定时,通道内的质量流量是增加的,最终导致  $j$  因子和  $f$  因子都有所增加。翅高对于应力的影响较小主要是由于翅片两边都受压,只有在翅片根部产生很微小的随着翅高增加而增大的弯矩。

2.2.2 节距的影响 如图 7 所示,随着节距从 3 mm 增加至 9 mm, $j$  因子降低了 18.36%, $f$  因子降低了 32.5%, $F_{TEF}$  因子降低了 6.9%。节距破坏了

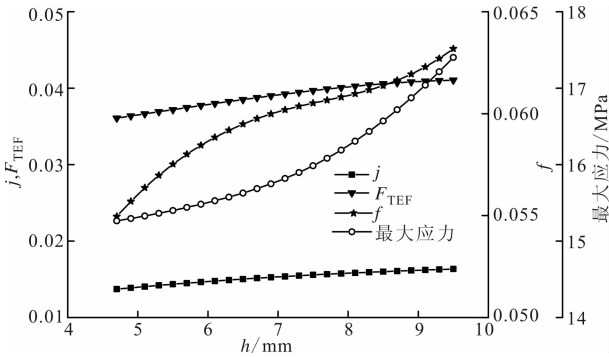


图 6 翅高对目标函数的影响

翅片表面的热边界层,节距越大,热边界层越厚,流动的稳定性越好,换热能力下降,阻力减少。节距从 3 mm 增加至 9 mm,最大应力从 15.30 MPa 增加至 17.18 MPa,几乎没发生变化。这是由于此时应力的变化主要来源于两部分,一部分是翅片根部所产生的弯矩;另一部分是板翅结构上下面的挤压,而节距增加并不会很明显地改变这两部分受力。

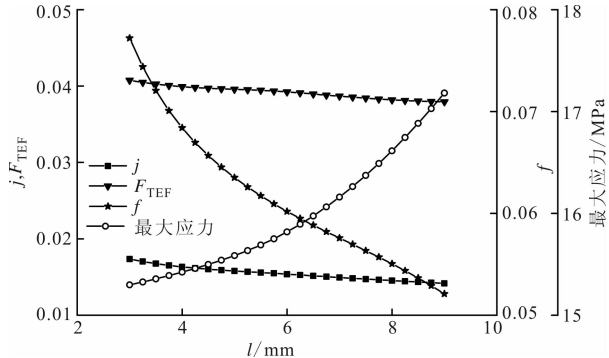


图 7 节距对目标函数的影响

2.2.3 翅厚的影响 如图 8 所示,随着翅厚从 0.1 mm 增加至 0.5 mm, $j$  因子先略微减少后稍有增加, $f$  因子增加比较剧烈,增加了 161.3%。翅厚增加会明显地破坏流体的稳定性,对边界层破坏更加明显,流态的变化强化了换热,但是随着翅厚的增加,通道中的质量流量和换热面积都减少了,几方面

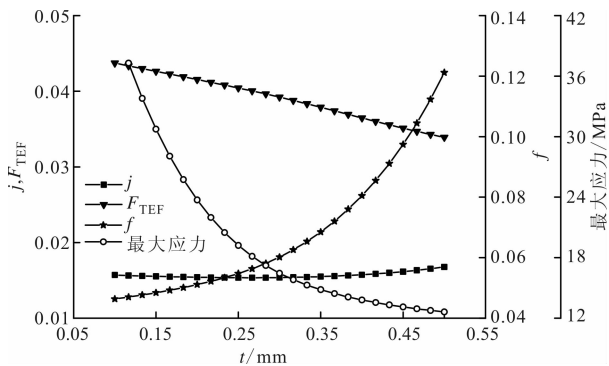


图 8 翅厚对目标函数的影响

综合因素导致  $j$  因子几乎不变。同样的,翅厚的增加导致阻塞率的增大,流动稳定性的破坏极大地增大了  $f$  因子。翅厚对应力的影响较大(从 37.37 MPa 变化至 12.44 MPa),是由于翅片区域主要承担垂直方向的应力(这部分应力来源于板翅结构上下面的加压),可以近似认为翅片横截面区域的应力与翅片横截面积呈反比例关系。

2.2.4 翅距的影响 如图 9 所示,当翅距从 1.4 mm 增加至 3.0 mm 的时候, $f$  因子减少了 27.5%, $j$  因子首先增加了 6.2%,然后又减少了 5.8%, $F_{TEF}$  因子首先增加了 11.1%,然后基本稳定不变。翅距增加意味着流体部分在宽度方向产生较大的温度梯度,远壁面流体得不到充分加热,导致换热系数下降。当量直径随着翅距的增加而增加,结果导致  $Nu$  的变化不是很明显,所以  $j$  因子( $Pr$  和  $Re$  都是恒定不变的, $j$  因子随着  $Nu$  的变化而变化)的变化量非常小。翅距的增加使得流道更加空旷,而且远壁面流体受壁面剪切力的影响较小,因此通道对流体的阻塞作用减小,结果  $f$  因子发生了大幅度的下降。翅距增加使得沿着板翅式换热器宽度方向的翅片密度减小,在沿着宽度方向的单位长度上,更少的翅片承担上下两侧的压力,结果导致应力有较明显

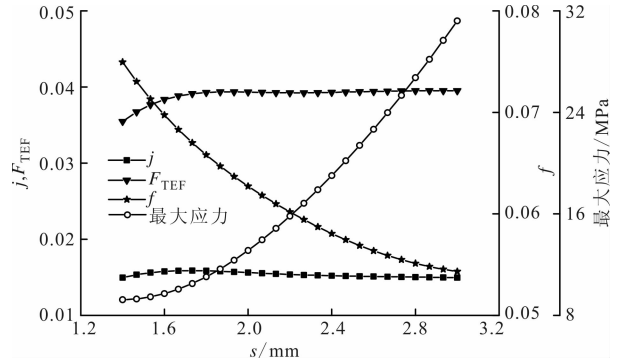


图 9 翅距对目标函数的影响

表 1 常用翅片结构以及 3 组优化结构的数值模拟结果

| 结构     | $h/\text{mm}$ | $s/\text{mm}$ | $l/\text{mm}$ | $t/\text{mm}$ | $j$     | $f$     | $F_{TEF}$ | 最大应力/MPa |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|---------|-----------|----------|
| 常用结构   | 6.5           | 2.0           | 5.0           | 0.3           | 0.015 5 | 0.064 7 | 0.038 6   | 13.45    |
| 优化结构 1 |               |               |               |               | 0.017 9 | 0.082 3 | 0.041 2   | 12.18    |
| CFD 验证 | 8.62          | 1.49          | 3.15          | 0.27          | 0.017 6 | 0.086 5 | 0.039 8   | 11.71    |
| 偏差/%   |               |               |               |               | 1.8     | 5.1     | 3.5       | 4.0      |
| 优化结构 2 |               |               |               |               | 0.017 9 | 0.068 3 | 0.043 8   | 14.59    |
| CFD 验证 | 7.93          | 1.57          | 3.10          | 0.18          | 0.018 1 | 0.066 7 | 0.044 6   | 15.29    |
| 偏差/%   |               |               |               |               | 1.1     | 2.4     | 1.8       | 4.6      |
| 优化结构 3 |               |               |               |               | 0.017 1 | 0.067 5 | 0.042 0   | 11.95    |
| CFD 验证 | 5.97          | 1.53          | 3.01          | 0.19          | 0.017 2 | 0.065 2 | 0.042 7   | 12.47    |
| 偏差/%   |               |               |               |               | 0.58    | 3.5     | 1.6       | 4.2      |

的增大(从 8.99 MPa 变化至 30.03 MPa)。

2.3 敏感性分析

在响应面的基础上得到几何参数的敏感性分析结果,可将几何参数对于换热、阻力以及应力的影响程度量化。由图 10 的敏感性因子分析结果可知,节距对于  $j$  因子的影响最大,翅厚对于  $f$  因子的影响最大,翅厚和翅距对最大应力的影响最大。

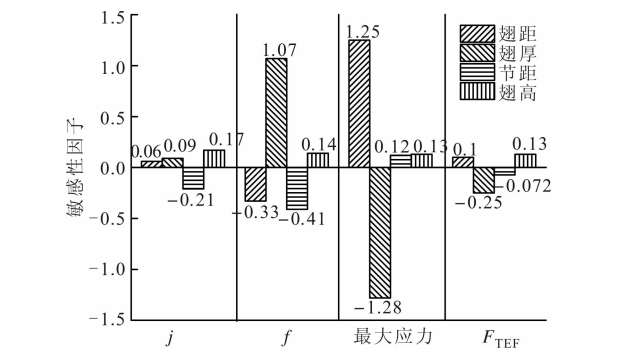


图 10 敏感性因子分析结果

3 优化结果

这里的优化过程包括 3 个目标,分别是强化换热(增大  $j$  因子)、减少压降(减少  $f$  因子)和减小应力(即减少翅片中的最大应力)。根据上述分析,翅高增加、节距减小意味着更好的换热效果,但是翅高增加、节距减小会增加阻力。从应力的角度分析,更低的翅高、更小的翅距、更大的翅厚、更大的节距意味着更小的应力,这 3 个目标函数相互冲突。事实上,多目标优化所得到的结果只是一系列的帕累托最优点,至于具体选取那个参数点,需要结合实际情况来对几个目标函数权衡。表 1 列出了一组常用翅片结构的数值模拟结果和 DesignXplorer 默认选取的 3 组翅片优化结构的响应面分析结果及其数值模拟结果。相对于初始结构来说,优化结构 3 的  $F_{TEF}$

( $F_{\text{TEF}} = j/f^{1/2}$ )增加了 10.62%,最大应力减小了 7.9%。

## 4 结 论

本文将参数化建模和基于响应面分析的多目标遗传算法结合起来,综合从流动换热、阻力压降和应力分析 3 个方面对锯齿型翅片结构进行了多目标优化。

(1)几何结构、网格尺寸、入口工况均采用参数化驱动,对锯齿型板翅式换热器进行了流固耦合分析,得到了翅片结构中的应力分布,发现应力最大点位于第 1 排翅片直角边和隔板相连的部位。

(2)借助响应面,量化分析翅高、翅距、翅厚和节距对目标函数  $j$  因子、 $f$  因子、 $F_{\text{TEF}}$  因子和最大应力的影响,结果表明,翅片节距对于换热的影响最大,翅厚对于流动阻力的影响最大,而翅片节距和翅厚对于应力的影响最大。

(3)选取  $j$  因子、 $f$  因子和最大应力作为目标函数,在响应面的基础上采用遗传算法对锯齿型翅片进行多参数优化,得到了 3 组翅片优化结构,发现优化结构 3 相对于常用结构的  $F_{\text{TEF}}$  增加了 10.62%,最大应力减小了 7.9%。

### 参考文献:

- [1] SHAH R K, WEBB L. Compact and enhanced heat exchangers; heat exchangers theory and practice [M]. Washington, DC, USA: Hemisphere, 1983: 425-468.
- [2] ZHANG Lingjie, QIAN Zuoqin, DENG Jun. Fluid-structure interaction numerical simulation of thermal performance and mechanical property on plate-fins heat exchanger [J]. Heat and Mass Transfer, 2015, 51 (9): 1337-1353.
- [3] KAYS W M, LONDON A L. Compact heat exchanger [M]. 2nd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1964:

97-112.

- [4] MOCHIZUKI S, YAGI Y, YANG W J. Transport phenomena in stacks of interrupted parallel-plate surfaces [J]. Experimental Heat Transfer, 1987, 1(2): 127-140.
- [5] 康蕊, 厉彦忠, 杨宇杰, 等. 轴向导热对板翅式换热器传热性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51 (2): 140-148.  
KANG Rui, LI Yanzhong, YANG Yujie, et al. Performance evaluation of plate-fin heat exchanger considering effect of axial heat conduction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2): 140-148.
- [6] 杨辉著, 文键, 童欣, 等. 板翅式换热器锯齿型翅片参数的遗传算法优化研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 90-96.  
YANG Huizhu, WEN Jian, TONG Xin, et al. Optimization design for offset fin in plate-fin heat exchanger with genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 90-96.
- [7] FEHLE R, KLAS J, MAYINGER F. Investigation of local heat transfer in compact heat exchangers by holographic interferometry [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1995, 10(2): 181-191.
- [8] WANG G G, SHAN S. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization [J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129 (4): 370-380.
- [9] SACKS JWELCH W J, MITCHELL T J, et al. Design and analysis of computer experiments [J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409-435.
- [10] KONAK A, COIT D W, SMITH A E. Multi-objective optimization using genetic algorithm; a tutorial [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(9): 992-1007.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 129 页)

- [8] SUN Wan, NIU Lu, CHEN Shuangtao, et al. Numerical investigation of nitrogen spontaneous condensation flow in cryogenic nozzles using varying nucleation theories [J]. Cryogenics, 2015, 68: 19-29.
- [9] GYARMATHY G. Grundlagen einer theorie der nass-dampfturbine [D]. Zürich, Swiss: Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 1962: 206-225.
- [10] ANSYS Inc. ANSYS CFX-solver theory guide [M]. Canonsburg, USA: ANSYS Inc., 2010: 210-211.
- [11] SUN Wan, NIU Lu, CHEN Liang, et al. Numerical study of spontaneous condensation flow in an air cryo-

genic turbo-expander using equilibrium and non-equilibrium models [J]. Cryogenics, 2016, 7: 42-52.

- [12] 孙皖, 马斌, 牛璐, 等. 低温透平膨胀机内平衡凝结两相流动数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47 (7): 36-39.

SUN Wan, MA Bin, NIU Lu, et al. Numerical simulation of equilibrium condensation two-phase flow in cryogenic turboexpander [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(7): 36-39.

(编辑 杜秀杰)