

# 翅片管换热器内烟气对流换热模拟研究

张宇, 刘文仲, 刘小芳

(安徽工业大学能源与环境学院, 安徽马鞍山 243002)

**摘要:**以螺旋翅片管式换热器为研究对象,选取烟气进出口压降表征换热器流动阻力的大小、努塞尔数( $Nu$ )表征换热器对流换热的强弱,利用Fluent软件模拟分析不同烟气流速下翅片结构参数对换热器流动阻力和换热效果的影响,并引入性能因子综合评价翅片结构参数对换热器换热性能的影响。结果表明:烟气流速一定时,翅片高度增加、厚度加厚和间距缩短均会使换热器进出口压降和 $Nu$ 增加,在增大换热器流动阻力的同时,换热效果得到增强;翅片结构参数和性能因子的变化规律与 $Nu$ 相反,选取高度较低、厚度较薄、间距较稀疏的翅片参数时换热器的综合性能更好;此外,与结构参数不同,烟气流速加快时 $Nu$ 和性能因子均增大,能提升翅片管换热器的综合换热性能。

**关键词:**螺旋翅片管;换热器;数值模拟;烟气流速;换热特性

中图分类号:TK 172 文献标志码:A doi: 10.12415/j.issn.1671-7872.23065



## Simulation Study on Convective Heat Transfer of Flue Gas in Fin-and-tube Heat Exchangers

ZHANG Yu, LIU Wenzhong, LIU Xiaofang

(School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

**Abstract:** Taking spiral fin-and-tube heat exchanger as the research object, the inlet and outlet pressure drop and Nusselt number ( $Nu$ ) were selected to characterize the flow resistance of flue gas and strength of convective heat exchange. Fluent software was used to simulate and analyze the influence of fin structure parameters on the flow resistance and heat exchange effect of heat exchanger under different flue gas flow rates. The performance factors were introduced to evaluate the influence of fin structure parameters on heat exchange performance. The results show that the inlet and outlet pressure drop and  $Nu$  increase with the increasing of fin height, thickness and spacing when the flue gas flow rate is constant, and the heat transfer effect is enhanced with the increasing of flow resistance. The variation of fin structure parameters and performance factors is contrary to  $Nu$ . The comprehensive performance of heat exchanger is better when selecting the fin parameters with lower height, thinner thickness and sparse spacing. In addition, different from the structure parameters, both  $Nu$  and performance factor increase when the flue gas flow rate increases, which can improve the comprehensive heat-transferring performance of the fin-and-tube heat exchanger.

**Keywords:** spiral finned tube; heat exchanger; numerical simulation; flue gas flow rate; heat-transferring performance

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(52206226)

作者简介: 张宇(1999—),男,安徽六安人,硕士生,主要研究方向为锅炉余热回收应用。

通信作者: 刘小芳(1976—),男,福建三明人,教授,主要研究方向为系统节能及燃烧污染物排放与控制。

引文格式: 张宇, 刘文仲, 刘小芳. 翅片管换热器内烟气对流换热模拟研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(2):189-194.

工业锅炉尾部排烟温度一般较高(大于 150 ℃), 含大量可供回收的热量, 且因燃烧天然气产生的水蒸气会携带大量潜热。将锅炉尾部烟气降至露点温度以下水蒸气冷凝, 除可吸收部分有害产物外, 还可大幅回收排烟中的显热和潜热, 既可降低污染物排放量, 又可显著提高锅炉热效率<sup>[1-2]</sup>。“十四五”是实现碳达峰、碳中和的关键时期, 构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系是实现能源高质量发展的必然要求<sup>[3]</sup>。因此, 发展绿色高效锅炉机组, 开展工业锅炉尾部烟气的余热回收研究对燃气锅炉的节能减排及能量高效利用具有重要意义。

通常在工业锅炉系统中通过加装余热回收装置如热泵、换热器回收锅炉尾部烟气中的热量<sup>[4]</sup>。回水温度低时, 相比于热泵, 利用换热器回收烟气余热效果更好<sup>[5]</sup>。翅片管换热器作为一种低阻高效的节能设备, 安装简易、运行稳定, 常被用作锅炉排烟的余热回收<sup>[6]</sup>。翅片具有多种样式, 不同样式的翅片应用场景不同<sup>[7-8]</sup>。在锅炉行业多为管翅式和板翅式, 前者多为螺旋翅片管, 流动阻力小于后者且工厂制造方法成熟(基管与翅片通过高频焊连接), 被普遍采用。翅片管强化换热机理主要为增加换热面积、提高换热系数和增大温差<sup>[9]</sup>。影响翅片管换热器传热的因素有多种, 如翅片形状、结构参数等, 现有学者对此进行了大量研究, 如朱珊云等<sup>[10]</sup>针对小管径开缝翅片管, 模拟研究翅片间距和相对翅片高度对换热器空气侧流动传热的影响, 结果表明, 开缝高度和翅片间距之比为 0.4 时换热器综合换热性能最佳; Keawkamrop 等<sup>[11]</sup>针对锯齿型螺旋翅片管, 研究翅片高度、厚度和间距对换热器流动阻力的影响, 结果表明锯齿间距对换热器流动阻力影响最大。也有学者研究翅片管束对换热器换热性能的影响, 如衣志超等<sup>[12]</sup>模拟研究开缝翅片管束的横纵向间距对流动换热的影响, 结果表明管纵向间距对换热性能影响较大; 赵兰萍等<sup>[13]</sup>模拟研究矩形翅片椭圆管束管排和翅片间距对管束间流动换热的影响, 结果表明翅片间距小于 2.5 mm 时空气侧阻力对风速的敏感性显著增加。上述学者主要对翅片管进行开缝处理, 其中翅片间距和管间距对换热影响最大, 但其余结构参数对换热的影响并不一致。

部分学者研究改变翅片异型化方向对换热器性能的影响, 如宋建等<sup>[14]</sup>模拟研究波纹翅片管波纹高度和横纵向间距对换热性能的影响, 结果表明波纹高度和横向间距是翅片管换热性能的主要影响因素;

刘逸等<sup>[15]</sup>模拟研究前开孔后开缝式翅片管的翅片厚度和开缝数对流动换热的影响, 结果表明各因素耦合复杂, 当风速为 3 m/s、开缝数为 6、翅片厚为 0.16 mm 时换热器的综合换热性能最佳; Modi 等<sup>[16]</sup>对比研究平面和圆孔矩形翼翅片的换热性能, 结果表明改进的圆孔矩形翼翅片工况温度越高换热效果提升越好; Kiatpachai 等<sup>[17]</sup>改进一种百叶窗式螺旋翅片管换热器, 发现在阻力性能变化不大的条件下其热力性能较之前提升 10.4%~13.1%; Zhang 等<sup>[18]</sup>引入神经网络和遗传算法研究管翅式换热器的基管外形对流动换热的影响, 优化后椭圆率为 0.34 的翅片管在  $Re$  为 541 时, 压降降低 21% 而换热系数不变。以上研究结论多为特定条件下的翅片最佳结构参数, 应用范围小; 且因翅片异化方向不同难以得到翅片结构参数影响换热效果的一般规律, 未有统一标准为生产制造提供相关参考。故本文以异型翅片的原型为研究对象, 以工业设计参数为基准, 参考锅炉系统中节能器运行工况, 利用 Fluent 软件研究高温工况下不同流速时翅片结构参数对换热器特性的影响, 旨在探寻螺旋翅片管性能变化的一般规律, 为工业制造优化翅片结构尺寸提供参考依据。

## 1 Fluent 模拟仿真

### 1.1 物理模型

翅片管换热器的物理模型如图 1, 翅片管为蛇形管结构, 基管尺寸为  $\Phi 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 管上翅片高度为 10 mm、厚度为 1.2 mm、间距为 5 mm, 相邻翅片管纵向间距为 25 mm、横向间距为 70 mm, 以该参数建立基准模型。考虑到管内水流动情况复杂, 且对整体模型意义不大, 故仅模拟烟气侧的流动换热情况, 保留相邻翅片管间的烟气流域, 并延长烟气进出口端以防发生回流现象, 计算域的物理模型见图 2。

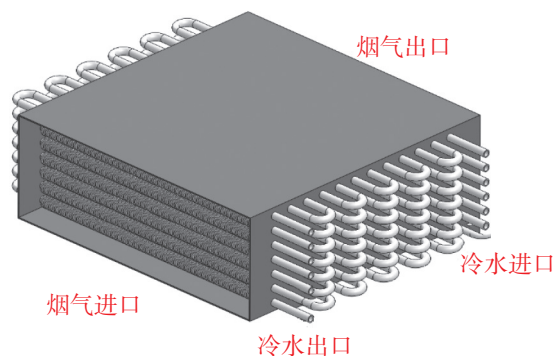


图1 翅片管换热器物理模型

Fig. 1 Physical model of finned tube exchanger

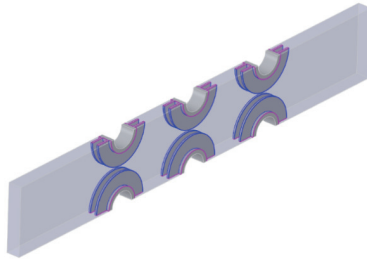


图2 计算域物理模型

Fig. 2 Physical model of computational domain

1.2 网格划分

烟气流经翅片过程中的换热属于流固耦合换热, 在 Fluent Meshing 中采取整体网格划分方法对计算域的物理模型进行网格划分, 设最小面网格尺寸为  $7 \times 10^{-5}$  m、最大面网格尺寸为  $6 \times 10^{-3}$  m, 在近壁处设置 4 层膨胀层进行网格加密, 最后调整相关设置参数, 由面网格生成体网格, 最终网格的最大扭曲度仅 0.46, 网格质量满足计算需求。努塞尔数 ( $Nu$ ) 可反映对流换热的强弱, 为流体跨越边界时对流换热量与传导热量的比值, 即  $Nu = h_c L / \lambda$ ,  $h_c$  为对流换热系数,  $L$  为特征长度,  $\lambda$  为烟气导热系数。文中选取  $Nu$  作为衡量网格无关性的验证指标, 本计算域物理模型划分网络数对应  $Nu$  的结果见表 1。由表 1 可知: 网格数达 897 314 后, 再增加网格数至 1 813 024 时,  $Nu$  变化很小, 说明网格数为 897 314 时可获得与网格无关的解。

表 1 网格无关性验证结果

Tab. 1 Grid independence verification results

网格数	$Nu$
184 222	36.83
640 137	41.91
897 314	42.72
1 813 024	42.98

1.3 求解计算

为简化计算, 对计算域的物理模型作以下假设: 整个流动过程属于稳态传热过程; 流体为热烟气, 视为不可压缩流体, 基于压力基求解; 烟气密度小, 不考虑烟气的重力作用; 将翅片管的基管和翅片看作整体, 材料为碳钢; 视基管管壁为无滑移壁面; 辐射换热热量远小于热对流交换的热量, 忽略辐射换热的影响。材料物性参数见表 2。

表 2 材料物性参数

Tab. 2 Physical property parameters of materials

材料	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	定压比热/ ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )	热导率/ ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )	动力黏度/ ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ )
烟气	1.1	1 190.6	0.031	$2.37 \times 10^{-5}$
碳钢	8 930	386	398	—

雷诺数 ( $Re$ ) 是判断流体运动状态的物理量, 烟气侧的  $Re$  为 11 596.87, 远大于临界  $Re$ , 烟气流动状态为湍流。由此选取 K-Epsilon 湍流计算模型, 近壁面处为 Enhanced Wall Treatment 模型, 同时在 Fluent 中开启能量方程。设置流体域入口烟气流速为 10 m/s、温度为 400 K, 出口条件为自由出口 (Outflow), 翅片管外壁与流体接触的换热壁面属于 Internal, 基管内壁的边界条件为 310 K 恒温壁面, 计算域的上下左右对称面均属于对称边界。计算域内压力与速度的耦合方法采用 Coupled 算法, 其余各项选择二阶迎风格式; 松弛因子保持默认设置, 能量方程的残差为  $10^{-6}$ 、其余残差为  $10^{-3}$ , 适当增大固体计算域步长以加快计算。

文中模拟考察指标为翅片管换热器的流动阻力、换热效果和综合性能, 所需计算的参数有烟气的进出口压降 ( $\Delta p$ )、努塞尔数 ( $Nu$ ) 和性能因子 ( $q$ )。其中性能因子为换热性能与阻力性能的比值, 是流动阻力和换热效果的综合评价指标, 忽略污垢热阻与接触热阻造成的影响, 则  $q = h_c / \sqrt{\Delta p}$  [19]。

1.4 模拟验证

文中模拟的翅片管为顺列排布, 为验证本文建立模型求解的准确性, 取本文模型中翅片管换热器出口处两排翅片管间中线上的温度分布, 与文献 [20] 相应处的实验结果对比, 结果如图 3。由图 3 可看出: 实验温度分布呈波浪状, 两处波谷距翅片管最近, 热量传递快, 烟气温度低, 波峰处距翅片管最远, 热量传递慢, 烟气温度高, 测点温度集中在 40~60  $^{\circ}\text{C}$ ; 与实验结果相同, 模拟结果中也出现波谷, 此处为两排翅片中心处, 整体温度分布在左右两侧, 且均有上升迹象但不明显, 这是由于管排间距过小, 热量传递更快所致; 模拟结果和实验结果出口处整体温差均为 20  $^{\circ}\text{C}$  左右。由此表明本文模拟结果准确可靠。

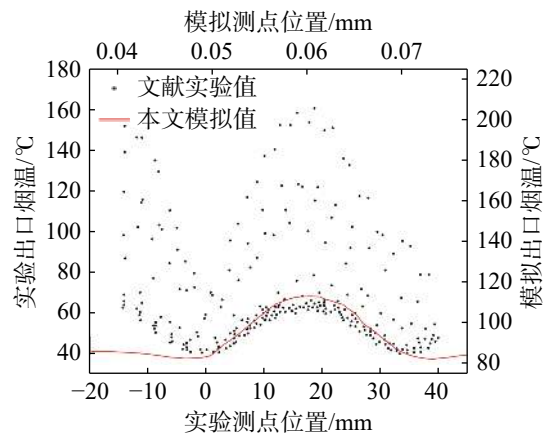


图3 模拟与实验结果对比

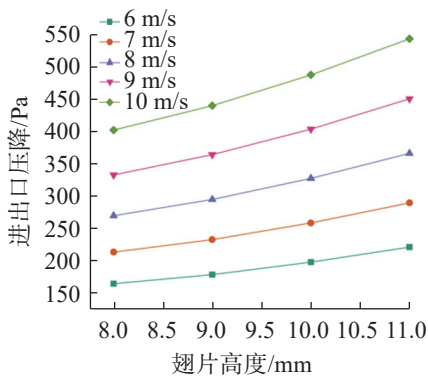
Fig. 3 Comparison of simulation and experimental results

## 2 翅片结构参数对换热器特性的影响

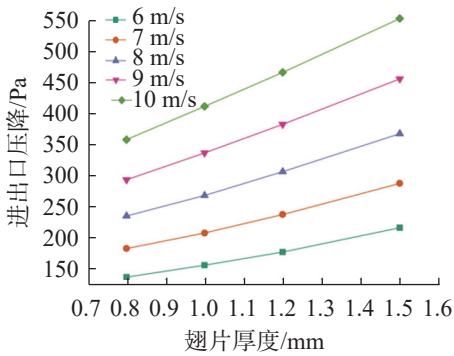
以基准模型中的翅片参数为基础组,通过控制变量,利用 Fluent 软件采用本文提出的求解过程模拟分析烟气流速在 6, 7, 8, 9, 10 m/s 条件下翅片高度 (8, 9, 10, 11 mm)、翅片厚度 (0.8, 1.0, 1.2, 1.5 mm)、翅片间距 (5, 6, 7, 8 mm) 对翅片管换热器流动阻力、换热效果及综合性能的影响。

### 2.1 翅片结构参数对换热器流动阻力的影响

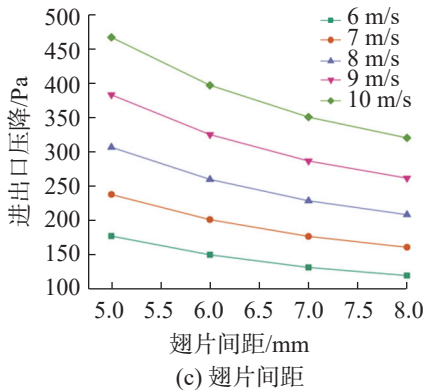
流动阻力会导致烟气流经换热器后压力下降,阻力因子与烟气压降成正比关系,故用烟气进出口压降表征流动阻力的大小。不同烟气流速下翅片结构参数与换热器进出口压降关系的模拟结果如图 4。



(a) 翅片高度



(b) 翅片厚度



(c) 翅片间距

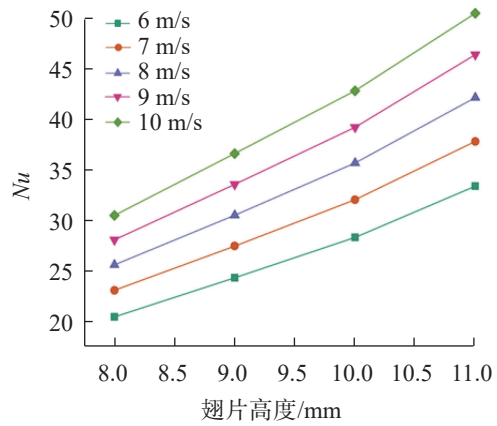
图4 翅片结构参数与进出口压降间的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between fin structure parameters and inlet/outlet pressure drop

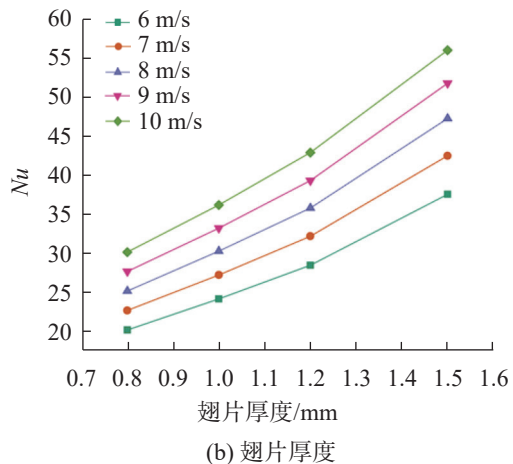
由图 4 可看出:随烟气流速加快,进出口压降均逐渐增大,这是因为烟气流速越快,需克服的流动阻力越大,烟气进出口压降越大;同一烟气流速下,翅片高度增加、厚度加厚和间距缩短均会使进出口压降增大,在高流速下更明显。这是因为在高流速下,翅片结构的微小变化就能导致烟气流动更困难,从而造成极大的流动阻力,直观表现便是烟气进出口压降增大。图 4 中:烟气流速为 10 m/s 时,翅片高度每增加 1 mm,进出口压降依次增加 37.57, 47.33, 55.58 Pa;翅片厚度分别为 0.8, 1.1, 1.2, 1.5 mm 时,压降依次增加 53.25, 54.60, 86.31 Pa;翅片间距每缩短 1 mm,压降依次增加 30.04, 46.09, 69.62 Pa。这是由于翅片结构参数的改变导致烟气流通截面变小,流动更困难,在流动过程中将更多的压力势能转变为动能,导致进出口压降增大。

### 2.2 翅片结构参数对换热器换热效果的影响

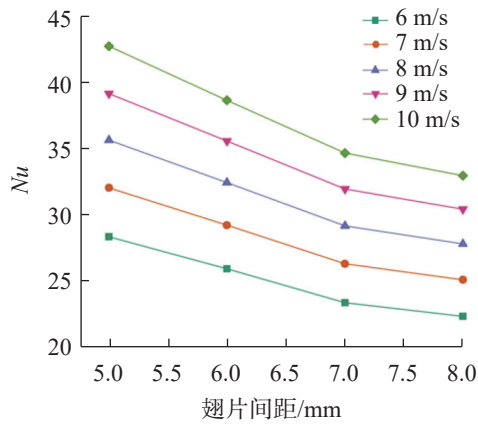
相比于对流换热系数,努塞尔数 ( $Nu$ ) 更易反映流动换热的本质,不同烟气流速下翅片结构参数与  $Nu$  关系的模拟结果如图 5。



(a) 翅片高度



(b) 翅片厚度



(c) 翅片间距

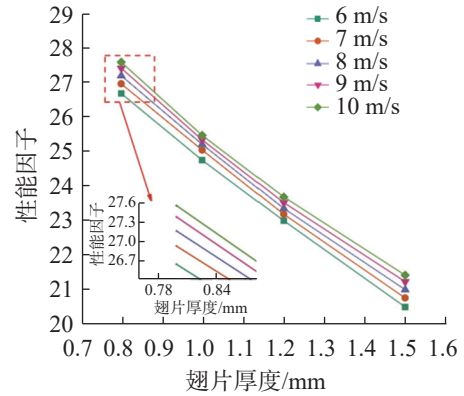
图5 翅片结构参数与 Nu 间的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between different fin structure parameters and Nu

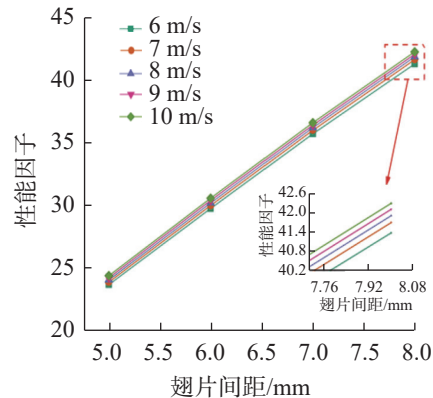
由图 5 可知: 不同烟气流速下, 随烟气流速加快 Nu 均逐渐增大, 这是因为流速增加会加剧扰动, 强化换热效果; 与压降的变化趋势相同, 在同一烟气流速下, 随翅片高度增加、厚度加厚和间距缩短, Nu 均增大, 且烟气流速越高 Nu 变化越大, 表明烟气对流换热的强弱与流动阻力相关。烟气流速为 10 m/s 时, 翅片高度每增加 1 mm, Nu 依次增加 6.07, 6.16, 7.62; 翅片厚度分别为 0.8, 1.1, 1.2, 1.5 mm 时, Nu 依次增加 6.03, 6.70, 13.08; 翅片间距每缩短 1 mm, Nu 依次增加 1.71, 3.98, 4.09。这是由于翅片结构参数改变时烟气流通截面积减小, 通道结构变得复杂, 导致流动困难、流动扰动加剧, 破坏了边界层, 换热效果增强。

### 2.3 翅片结构参数对换热器综合性能的影响

由上文分析知流动阻力与换热效果变化趋势相同, 故引入性能因子对换热器性能进行综合评价。不同烟气流速下翅片结构参数与性能因子关系的模拟结果如图 6。



(b) 翅片厚度



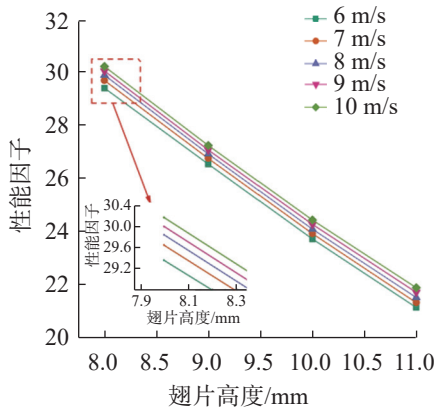
(c) 翅片间距

图6 翅片结构参数与性能因子间的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between fin structure parameters and performance factors

由图 6 可知: 烟气流速对性能因子的影响很小, 在翅片高度为 10 mm、翅片厚度为 1.2 mm、翅片间距为 8 mm, 烟气流速由 6 m/s 增加到 7 m/s 时, 性能因子增幅最大, 仅 0.33, 表明烟气流速对性能因子的影响不显著。翅片高度增加导致性能因子减小, 烟气流速为 10 m/s 时, 翅片高度每增加 1 mm, 性能因子依次降低 2.96, 2.79, 2.54, 表明翅片高度对性能因子影响较大, 根据图中的变化曲线拟合出翅片高度  $h$  和性能因子  $q$  的函数关系式  $q = -2.77h + 51.87$ ; 翅片厚度增加同样导致性能因子减小, 烟气流速为 10 m/s、翅片厚度分别为 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 mm 时, 随厚度增加性能因子依次降低 2.11, 1.78, 2.26, 翅片厚度  $t$  和性能因子  $q$  的函数关系式  $q = -8.79t + 34.04$ ; 翅片间距增加导致流动阻力降低和换热效果减弱, 但性能因子代表的换热效率在提高, 当烟气速度为 10 m/s、翅片间距每增加 1 mm, 性能因子依次增加 6.19, 6.04, 5.66。与另 2 个因素类似, 根据图 6 中数据可拟合出翅片间距  $s$  和性能因子  $q$  的函数关系式  $q = 5.94s - 5.52$ 。

比较图 6 中 3 个拟合函数可知: 翅片高度、厚度因素与性能因子正相关, 间距因素与性能因子负



(a) 翅片高度

相关,翅片厚度对性能因子的影响最大、翅片间距次之、翅片高度最小。综上,在翅片高度低时,性能因子较大,但  $Nu$  较小,换热效果较差,所以翅片高度不宜过低,基于材料成本,综合考虑选取较低的翅片。同样的,实际应用中可选取厚度较薄(为保证长期稳定使用也不宜过薄)、间距较为稀疏的翅片尺寸,在保证换热效果前提下节省材料。

### 3 结论

采用 Fluent 软件建立翅片管换热器计算域物理模型,选取烟气进出口压降( $\Delta p$ )表征换热器流动阻力的大小、努塞尔数( $Nu$ )表征换热器对流换热的强弱,并引入性能因子( $q$ )综合评价换热器的综合性能,模拟分析不同烟气流速下翅片结构参数对 $\Delta p$ 、 $Nu$ 和 $q$ 的影响,探讨翅片结构参数对换热器换热性能影响的一般规律,得到以下主要结论:

1) 翅片高度增加、厚度加厚和间距缩短均会造成进出口压降与  $Nu$  增加,即换热效果加强,伴随流动阻力增加。

2) 翅片结构参数对性能因子  $q$  的影响大小依次为翅片厚度、翅片间距、翅片高度,且3种因素改变时性能因子的变化趋势与进出口压降、 $Nu$ 变化趋势相反。故实际确定翅片参数时,可适当选取高度较低、厚度较薄、间距较为稀疏的翅片结构尺寸,在保证换热效果的同时尽可能提高综合性能。

3) 随着烟气流速加快,流动阻力和换热效果提升,性能因子也略有增长。实际工况中,烟气流速加快使更多的烟气参与换热,换热器的综合性能得到提升,总换热量也将增加。

#### 参考文献:

[1] 李小飞. 燃气锅炉烟气余热回收技术探析[J]. 冶金与材料, 2022, 14(1):69-70.

[2] 白凤臣, 马文姝, 宋海江. 燃气锅炉烟气余热回收潜力及影响因素分析[J]. 工业锅炉, 2019(3):5-9.

[3] 李莉. 《2030年前碳达峰行动方案》发布碳达峰十大行动[J]. 环境与生活, 2021(11):24-32.

[4] 曹亮, 窦蕾, 杨钦海. 燃气锅炉烟气余热深度回收利用的分析研究[J]. 节能与环保, 2021, 328(11):73-75.

[5] 陈为花. 燃气锅炉余热回收浅析[C]//中国燃气运营与安全研讨会(第十届)暨中国土木工程学会燃气分会2019年学术年会论文集(下册). 天津: 煤气与热力杂志社, 2019:49-51.

[6] 王璐. 冷凝式节能器在燃气锅炉余热回收中的应用[J]. 中国设备工程, 2017, 14:202-203.

[7] 刘妮, 李欢, 单小丰, 等. 百叶窗翅片管换热器空气侧传热和流动特性数值模拟[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6):70-77.

[8] SHI S S, NIU J Y, WU Z H, et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer enhancement of vertical triplex tube heat exchanger with fractal fins for latent thermal energy storage[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 198:123386.

[9] SADEGHIANJAHROMI A, WANG C C. Heat transfer enhancement in fin-and-tube heat exchangers: a review on different mechanisms[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137:110470.

[10] 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.

[11] KEAWKAMROP T, MESGARPOUR M, DALKILIÇ A S, et al. Effect of the segmented fin height on the air-side performance of serrated welded spiral fin-and-tube heat exchangers[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 35:102128.

[12] 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.

[13] 赵兰萍, 宋亚军, 杨志刚. 矩形翅片椭圆换热管束性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(7):1096-1100,1129.

[14] 宋建, 蔡家斌, 熊贤沙, 等. 翅片管式换热器换热性能研究[J]. 热带农业工程, 2021, 45(4):7-10.

[15] 刘逸, 陈培强, 陈鑫, 等. 组合式翅片管换热器传热与阻力性能影响因素研究[J]. 节能技术, 2021, 39(6):498-504.

[16] MODI A J, RATHOD M K. Experimental investigation of heat transfer enhancement and pressure drop of fin-and-circular tube heat exchangers with modified rectangular winglet vortex generator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 189:122742.

[17] KIATPACHAI P, KEAWKAMROP T, ASIRVATHAM L G, et al. An experimental study of the air-side performance of a novel louver spiral fin-and-tube heat exchanger[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(12):9811-9818.

[18] ZHANG T Y, CHEN L, WANG J. Multi-objective optimization of elliptical tube fin heat exchangers based on neural networks and genetic algorithm[J]. Energy, 2023, 269:126729.

[19] 秦力峰. 翅片管换热器传热性能的数值模拟研究[D]. 常州: 常州大学, 2021.

[20] 吴超. 天然气锅炉烟气余热深度回收凝结换热方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.