

烟气消白系统中不同形状换热器传热性能的实验和模拟分析

王振环^{1,2}, 崔然成³, 胡红艳⁴, 邓立君^{1,2}

(1. 山东航空学院机电工程学院, 山东 滨州 256600; 2. 山东省先进发动机活塞组件重点实验室, 山东 滨州 256600;
3. 韩国制冷空调认证中心, 韩国 京畿道华城 18608; 4. 浙江三锋实业股份有限公司, 浙江 永康 321300)

摘要:为研究不同形状及级数组合的换热器在烟气消白系统中对传热性能的影响,采用空气焓差法对换热器的综合性能进行测试,并结合 SolidWorks Flow Simulation 软件开展换热性能模拟分析,将换热器的制冷能力、空气出口温度及压降的模拟结果与实验数据进行对比。实验与模拟结果表明:在相同工况下,波纹形换热器的制冷性能优于蜂窝形换热器,提升幅度为 8.8%~39.5%;其空气侧出口温度和压降分别降低了 1.2%~4.8% 和 7.7%~15.1%;随着级数组合数量的增加,对流传热效果增强,空气侧出口温度显著降低,尤其是波纹形换热器的制冷能力提升更为明显。

关键词:换热器;传热;数值模拟;波形;白烟

中图分类号:TK172 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.05.006

[引用本文格式]王振环,崔然成,胡红艳,等.烟气消白系统中不同形状换热器传热性能的实验和模拟分析[J].热能动力工程,2025,40(5):49-56. WANG Zhenhuan, CHOI Younsung, HU hongyan, et al. Experimental and simulation analysis of heat transfer characteristics of heat exchanger with different shapes in white smoke reduction system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025,40(5):49-56.

Experimental and Simulation Analysis of Heat Transfer Characteristics of Heat Exchanger with Different Shapes in White Smoke Reduction System

WANG Zhenhuan¹, CHOI Younsung², HU hongyan³, DENG Lijun^{1,2}

(1. Mechanical Engineering, Shandong University of Aeronautics, Binzhou, China, Post Code: 256600;
2. Shandong Key Laboratory of Advanced Engine Piston Assembly, Binzhou, China, Post Code: 256600;
3. Korea Refrigeration and Air-conditioning Assessment Center, Hwaseong-si, ROK, Post Code: 18608;
4. Zhejiang Sanfeng Industrial Co., Ltd., YONG Kang, China, Post Code: 321300)

Abstract: In order to assess the impact of the heat exchanger with different shapes and stage numbers combinations on the heat transfer performance of the white smoke reduction system, comprehensive performance testing of the heat exchanger was conducted using the air enthalpy difference method. Additionally, Solidworks Flow Simulation software was utilized to analyze the heat exchange performance of the heat exchanger, addressing parameters such as cooling capacity, temperature, and pressure distribution. The simulation results were then compared with experimental test data, yielding an error margin within 15%. The experimental and simulation findings reveal that under identical condition, the wave-shaped heat exchanger exhibits superior cooling performance compared to the honeycomb-shaped heat exchanger,

收稿日期:2024-03-19; 修订日期:2024-07-11

基金项目:国家自然科学基金(52075047);博士科研启动基金(2019Y39)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52075047); Doctoral Research Startup Fund (2019Y39)

作者简介:王振环(1990-),男,山东航空学院讲师.

displaying an increase ranging from 8.8% to 39.5%. Moreover, the outlet temperature and pressure drop on the air side of the wave-shaped heat exchanger are decreased by 1.2% - 4.8% and 7.7% - 15.1%, respectively. Furthermore, with the escalation of stage numbers combinations, the outlet temperature on the air side experiences a significant decrease due to convective heat transfer influences, leading to a more pronounced increase in cooling capacity for the wave-shaped heat exchanger.

Key words: heat exchanger, heat transfer, numerical simulation, wave, white smoke

引 言

随着我国经济的快速发展,能源形势和环境问题日益加重。为了解决一次能源环境污染等问题,多个政策针对烟气脱白提出了治理要求,越来越多促使燃煤电厂加快环保技术的应用^[1]。其中,烟气余热回收不仅能降低能源消耗、提高经济效益、推动可持续发展,而且可实现污染物的超低排放,同时可以回收冷凝水,达到节能减排的目的^[2]。

锅炉排出的白烟中存在余热和水资源浪费的情况以及污染环境的现状,为了研究高效的余热回收和烟气消白技术,近年来国内外学者开展了大量的研究工作。王翠华等人^[3]对波纹管螺旋套管换热器壳程流体的流动与换热进行了数值模拟,结果表明,在 $Re = 10\ 000 \sim 24\ 000$ 范围内,波纹管的传热效率较光管提高 22.1%。肖生泽等人^[4]对板式换热器中高粘性流体的传热和流动进行模拟发现,结果与实测值相差在 20% 以内,验证了其可行性。宋源等人^[5]采用 FLUENT 对 4 种不同结构翅片管换热器进行了模拟,发现进口风速增大可显著提高换热器的换热性能。苑云潇等人^[6]研究发现,低气压析湿条件下,平翅片管式换热器的空气侧传质性能随气压升高下降明显,传质因子降幅达 18.2% ~ 23.6%。LI 等人^[7]对板片几何参数进行了模拟和实验,提出基于耦合传热 - 沉积模型的预测方法,用于防垢优化。Yoo 等人^[8]对比了交叉流换热器错列与顺列排列情况下的传热性能,前者传热更优但压降更大。朱晓磊等人^[9]设计了填料喷淋型换热器,较传统空腔喷雾型换热器的换热能力提高 30%,能耗明显降低。郭江峰等人^[10]研究了冷凝对低品位烟气热回收中传热与熵产的影响,指出冷凝显著提高了换热器热回收效率,且存在最优冷却水流量使熵产最小。

Kim 等人^[11]研究了交叉流塑料空气加热器的换热与压降特性,换热器具备良好热性能和结构优势。甘刘意等人^[12]提出了新型缩放板螺旋板式换热器,数值模拟结果表明,该换热器在 $Re = 31\ 429$ 时性能最优,综合系数达 1.34。雷承勇等人^[13]对比了螺旋型鳍片管与 H 型翅片管换热的性能发现,前者更适用于小温差工况。杨婷等人^[14]对比不同纵向翅片结构发现,百叶窗式结构的传热与综合性能最佳。Jun 等人^[15]研究了颗粒掺入对无分布器流化床换热器的影响,结果表明,掺入颗粒可有效强化传热并减少结垢。

烟气消白系统的传热性能与换热器的热流特性密切相关。已有学者对螺旋管换热器、翅片管换热器、热管换热器的传热特性进行了研究,仍然存在换热效率不高的问题。为了提升烟气消白系统中换热器的传热性能,本文以间接换热式空气 - 水换热器为研究对象,在同比例缩小条件下,针对不同结构形状变化及级数组合形式,对其空气侧换热性能进行了研究。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

为了研究换热器对烟气消白系统传热性能的影响,本文利用空气焓差恒温恒湿装置和恒温水箱进行了实验研究,实验设备如图 1 所示。设备主要由空气处理机组、电加热/湿器、风量测量装置、电气设备等组成。室内/外空间均可以通过制冷机组、电加热/湿器 PID 对温度和湿度调节,以保持实验条件的稳定性。在换热器的出入口安装了 RTD 传感器 (PT100 Ω) 和压差传感器 (EJA110),以测量换热前后空气和水的温度和压降。利用实验设备的恒温恒湿功能控制流入换热器的空气干球/湿球温度;恒温

水箱调节水的温度、通过送风机和循环泵的转速控制空气和水的速度。为准确分析波纹形与蜂窝形换热器的热流特性,将换热器尽可能紧密安装在测量装置中,以最大限度减少空气泄漏对实验结果的影响。

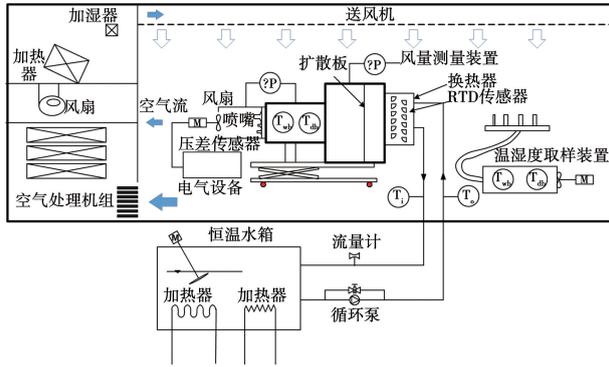


图 1 空气焓差测量装置和恒温水箱

Fig. 1 Airflow enthalpy difference measuring device and constant temperature water tank

烟气消白热交换系统中使用的波纹形和蜂窝形换热器结构如图 2 所示。由图 2 可知,换热器的节距 D 为 5 mm,冷却水流路宽度 w_c 为 13 mm,空气流路宽度 d 为 12 mm,总高度 H 为 350 mm,单层厚度 d 为 0.3 mm,材质为 SUS 304。

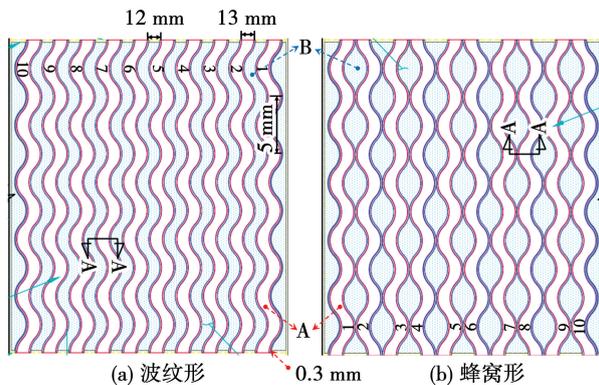


图 2 波纹形和蜂窝形换热器

Fig. 2 Wave and Honeycomb-shaped heat exchangers

换热器内部 A 区域为冷却水流经的方形通道, B 区域为空气流动通道。

由于换热器采用多级组合形式用于烟气消白系统,其综合传热性能对系统的整体效率具有重要影响。因此,为了准确评估不同级数和不同形状换热

器的传热特性,本文采用空气焓差测量装置及恒温水箱,对 1 级、2 级和 3 级组合换热器的换热性能进行实验研究。三级蜂窝形换热器图 3 所示。



图 3 三级蜂窝形换热器

Fig. 3 Three-stage honeycomb heat exchanger

表 1 列出了换热器的实验入口条件。实验过程中,利用 PID 控制风量测量装置的干球和湿球温度,使其波动范围控制在设定值的 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。此外,为了避免外部空气进入实验系统,换热器与风量测量装置的接触表面经过严密密封处理,确保实验数据的准确性和可靠性。

表 1 换热器实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of heat exchanger

参数	空气	水
速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	10.70	0.58
温度/ $^\circ\text{C}$	40	20
相对湿度/%	70	-

注:表中“-”表示无数据。

1.2 数值计算

换热器实验温度和冷却水流量分别保持在 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.0076\text{ m/s}$ 范围内,在满足该实验条件的情况下测得数据。实验数据以 2 s 的间隔存储,并平均 5 min 内的测量值,共测量 5 次,收集 35 min 内的数据以计算总平均值。为研究换热器的性能,根据式(1)和式(2)分别计算空气侧和冷却水侧的换热量 Q_a 和 Q_w ,空气与水之间的热平衡(Heat Balance)根据式(3)进行判断,仅选取热平衡误差在 $\pm 5\%$ 以内的数据进行算术平均处理。

$$Q_a = \dot{m}_a c_{p,a} (t_{a,in} - t_{a,out}) \quad (1)$$

$$Q_w = \dot{m}_w c_{p,w} (t_{w,out} - t_{w,in}) \quad (2)$$

$$HB = |(Q_a - Q_w) / Q_a| \times 100\% \quad (3)$$

式中： \dot{m}_a —空气的质量流量，kg/s； $c_{p,a}$ —空气的比定压热容，J/kg \cdot °C； $t_{a,in}$ —空气的入口温度，°C； $t_{a,out}$ —空气的出口温度，°C； \dot{m}_w —水的质量流量，kg/s； $c_{p,w}$ —水的比定压热容，J/kg \cdot °C； $t_{w,in}$ —水的入口温度，°C； $t_{w,out}$ —水的出口温度，°C。

1.3 模拟方法及边界条件

本研究采用 SolidWorks Flow Simulation 软件对换热器的流动与换热特性进行数值模拟分析。计算网格采用自适应直角坐标网格，并进行三维实体网格划分。流场的控制方程为 Navier-Stokes 方程，湍流模型采用标准双方程模型。在近壁区，采用壁面函数的半经验公式进行处理，但误差较大。为提高模拟精度，可通过软件“Result & Geometry Resolution”选项优化网格质量，但网格优化会提高计算收敛要求，显著增加计算时间。在换热器空气侧和冷却水侧流动控制方程的求解过程中，动量方程采用压力-速度耦合计算方法，主要使用计算效率较高的标准 SIMPLE 方法进行求解。湍流模型方程的离散格式采用二阶迎风格式，代数方程的迭代计算采用亚松弛策略，以提高数值稳定性。

边界条件设定为壁面采用无滑移边界条件，入口条件设定为速度入口，出口条件设定为压力出口。为了验证实验结果的可靠性，对数值模拟与实验结果进行对比分析，本研究在数值模拟中采用与实验相同的工况条件，具体参数见表 1。

1.4 网格划分

为了确保计算结果的准确性和仿真效率，需要对复杂区域合理划分网格，并在各计算域生成合适的网格尺寸与分布。通过调整计算域范围、设定初始网格级别，并结合计算资源优化配置，可提高整体模拟效率。本研究中初始网格级别设定为 4，并对狭窄流道及微小特征区域进行了局部加密；同时采用自适应网格控制方法，根据求解过程中流场变化动态优化网格分布。为进一步验证模拟结果的可靠性，参考文献[16]关于螺旋板式换热器的研究，其

指出：当温度、压降等关键参数在不同网格下的变化率小于 1% 时，可视为达到网格无关性。虽然本研究未进行系统的多组网格对比，但在多次求解中结果稳定，结合自适应加密策略，可认为本模型已具备良好的收敛性和计算精度。最终确定模型总网格数约为 460 万，具体划分如图 4 所示。

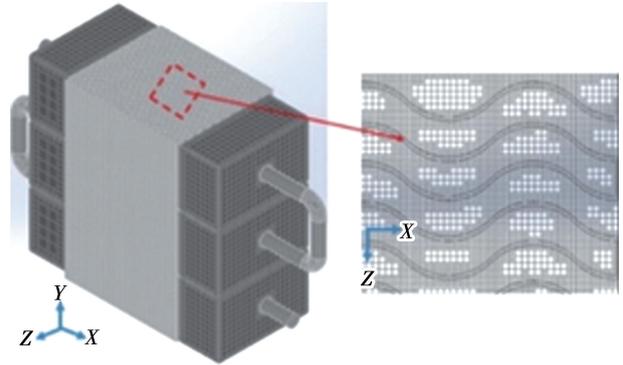


图 4 波纹形换热器网格划分

Fig. 4 Mesh of wave-shaped heat exchanger

为了研究换热器组合级数和形状变化对换热器传热性能的影响，对空气侧热流动进行了数值模拟分析。图 5 为三级波纹形换热器模型及测量截面。通过观察和分析，空气出口处的水平截面 ($z-x$) 和垂直截面 ($y-z$) 的温度和压力，了解换热器空气侧温度和压力的分布情况。

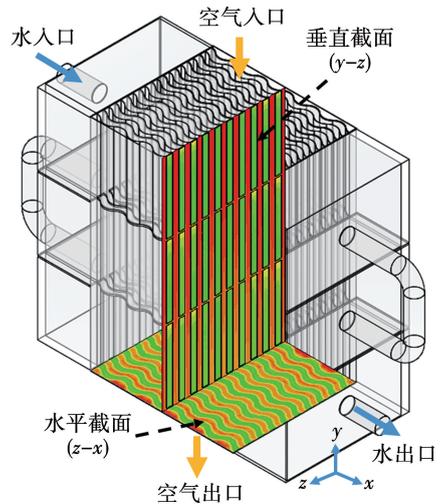


图 5 三级波形换热器模型及测量截面

Fig. 5 Model and measured cross-section of heat exchanger

2 结果与分析

2.1 模拟可视化结果分析

图6给出了三级波纹和蜂窝形换热器水平截面和垂直截面空气侧温度分布云图。由图5可知,空气依次通过三级组合换热器进行热交换后温度明显下降,且波纹形换热器的出口温度更低。这是因为蜂窝形换热器的结构增加了空气的流动阻力,导致流体与换热壁面之间的接触换热不够充分。

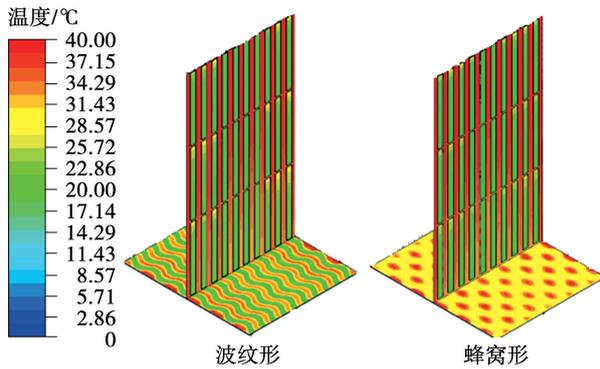


图6 三级波纹和蜂窝形换热器水平和垂直截面温度分布云图

Fig. 6 Temperatures on horizontal and vertical cross-sections of wave and honeycomb-shaped heat exchanger (3-stage)

图7给出了三级波纹和蜂窝形换热器水平截面和垂直截面空气侧压力分布云图。由图7可知,随着空气依次通过三级组合换热器进行热交换,空气的压力略微增加,波纹形换热器的出口压力较低。这是因为蜂窝形换热器的结构复杂,增加了空气的流动阻力,导致蜂窝形换热器的出口压降增加。

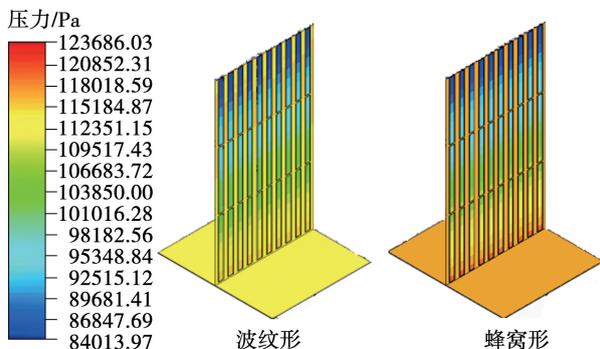


图7 三级波纹和蜂窝形换热器水平和垂直截面压力

Fig. 7 Pressures on horizontal and vertical cross-sections of wave and honeycomb-shaped heat exchanger (3-stage)

2.2 实验与模拟结果比较分析

1、2和3级波纹形和蜂窝形换热器的制冷能力变化如图8所示。由图8可知,实验结果方面:以蜂窝形换热器1、2和3级为基准,对两种形式换热器的制冷能力进行比较发现,波纹形换热器的制冷能力比蜂窝形换热器分别增加了约8.8%、31.5%和38.1%。数值模拟结果方面:波纹形换热器的制冷能力比蜂窝形换热器分别增加了约9.4%、32.6%和39.5%。实验测得的制冷量均高于数值模拟值,对于波纹形换热器,1、2、3级的实验值分别比模拟值高约0.62、0.94和0.90 kW,偏差为9.3%、9.2%和7.1%;对于蜂窝形换热器,实验值分别高出约0.60、0.80和0.80 kW,偏差为9.8%、10.3%和8.7%。与波纹换热器不同的是,具有蜂窝结构的蜂窝换热器由于空气流路中间被阻塞,空气流动不顺畅,从而降低了对流传热性能。

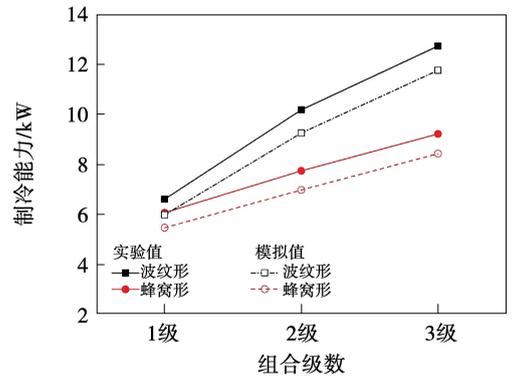


图8 不同组合级数换热器空气侧制冷能力实验和模型结果对比

Fig. 8 Air-side cooling capacity of heat exchanger at different combination stages

1、2和3级波纹形和蜂窝形换热器的冷却水侧出口温度变化如图9所示。由图9可知,实验结果方面:以蜂窝形换热器1、2和3级为基准,对两种形式的换热器的出口温度进行比较发现,波纹形换热器比蜂窝形换热器温度分别升高了约0.8%、3.4%和3.0%。数值模拟结果方面:波纹形换热器比蜂窝形换热器温度分别升高了约1.9%、2.8%和4.2%。实验结果均低于数值模拟结果,波纹形换热器1、2和3级温度分别低约1.77、2.36和3.14 °C,偏差分别约为8.0%、0.2%和11.5%;蜂窝换热器

1、2 和 3 级温度制冷能力分别低约 1.50、2.42 和 2.74 °C,偏差分别约为 6.8%、10.8% 和 11.9%。原因是蜂窝结构如波纹结构具有更优的热流组织能力。蜂窝形换热器主要依靠通道间的热传导实现换热,而波纹形换热器通过增强流体扰动,提高了空气侧的对流换热效果,对流传热在整体换热中占主导作用。随着换热器级数的增加,两种结构的水侧出口温度均略有上升,表明多级换热有助于提升换热器的整体传热性能。

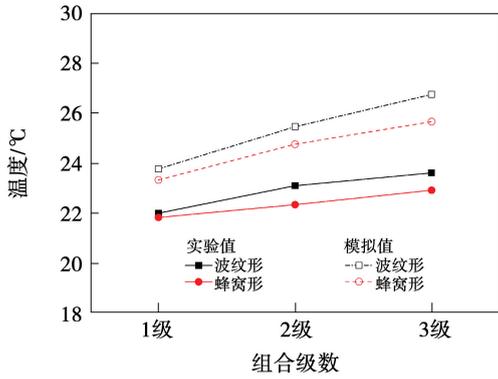


图 9 不同组合级数换热器冷却水出口温度实验和模拟结果对比

Fig.9 Cooling water outlet temperature of heat exchanger at different combination stages

1、2 和 3 级波纹形和蜂窝形换热器的压降变化如图 10 所示。由图 10 可知,实验结果方面:以蜂窝形换热器 1、2 和 3 级为基准,对两种形式换热器的压降进行比较发现,波纹形换热器压降比蜂窝形换热器分别减少约 15.1%、14.0% 和 7.7%。数值模拟结果方面:波纹形换热器的压降比蜂窝形换热器分别减少约 15.1%、15.1% 和 11.8%。实验结果均高于数值模拟结果,波纹形换热器 1、2 和 3 级压降分别低约 9.5、9.9 和 15.8 Pa,偏差分别约为 9.6%、6.3% 和 7.7%;在蜂窝换热器 1、2 和 3 级,压降分别低约 11.1、9.3 和 7.7 Pa,偏差分别约为 9.5%、5.1% 和 3.5%。随着级数的增加,波纹形和蜂窝形换热器空气侧压降呈线性增加。压降主要由空气通过换热器通道时产生的流路摩擦损失和结构形状引起的阻力造成,相对于波纹换热器,蜂窝结构的换热器更容易受到流路堵塞的影响,因此压降更大。

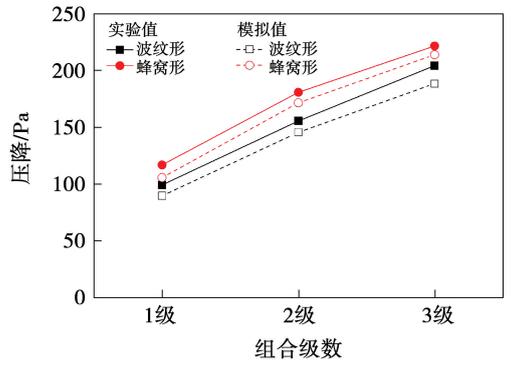


图 10 不同组合级数换热器空气侧压降实验和模拟结果对比

Fig.10 Air-side pressure drop of heat exchanger at different combination stages

1、2 和 3 级波纹形和蜂窝形换热器的空气侧出口温度实验与模拟结果对比如图 11 所示。由图 11 可知,波纹形和蜂窝形换热器在 1、2、3 级条件下的空气侧出口温度均呈下降趋势。以蜂窝形换热器为基准,实验结果表明波纹形换热器的出口温度分别降低约 1.2%、2.9% 和 4.8%;数值模拟结果分别降低约 1.3%、2.9% 和 4.5%。总体来看,实验测得的温度值普遍低于数值模拟,其中波纹形换热器在 1、2、3 级条件下分别偏低约 1.62、1.74 和 2.04 °C,相对偏差为 4.4%、5.0%、6.3%;蜂窝形换热器则分别偏低 1.61、1.68 和 2.73 °C,偏差为 4.4%、4.5%、8.1%。原因是空气流动增强引发的湍流效应,强化了矩形通道内的对流换热,提升了除湿能力,导致空气温度进一步降低。随着换热器级数的增加,两种结构的出口温度下降幅度均更显著,表明多级换热器能有效提升热湿交换效果。

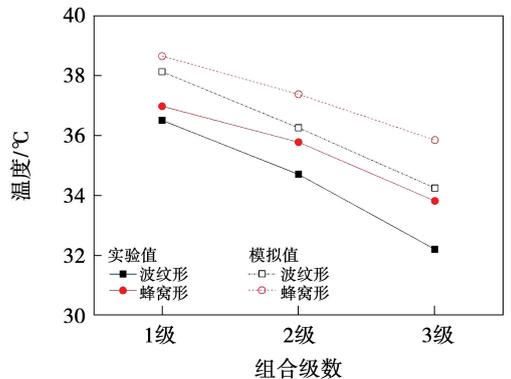


图 11 不同组合级数换热器空气侧出口温度

Fig.11 Air-side outlet temperature of heat exchanger at different combination stages

由图8~11可知,数值模拟值和实验值偏差在15%以内。数值模拟结果与实验值吻合良好,误差在合理范围内,故可用数值模拟方法检验换热器换热性能实验数据的研究可靠性。在相同实验条件下,波纹换热器相比蜂窝形换热器的制冷能力更强,同时空气侧出口温度和压降也有所降低。原因是蜂窝形换热器的方形通道具有相互面对的结构特性,并且在焊接波纹板时可能存在焊缝不饱满、夹渣等问题导致焊接点处的波纹板出现结构性问题,进而影响空气流动,增加流动阻力,导致热交换效率下降。此外,随着换热器级数的增加,由于对流传热效应以及空气侧温差的作用,波纹形换热器的冷却能力相较于蜂窝形换热器提升更明显。

3 结 论

本文通过实验与数值模拟分析,针对烟气消白系统中换热器的传热性能进行了研究,重点探讨了换热器形状变化及组合级数对传热性能的影响。通过对比实验和数值模拟数据,得出以下结论:

(1) 波纹形换热器的制冷能力优于蜂窝形换热器。蜂窝结构通道形状易导致局部流体停滞,削弱了对流传热性能;相比之下,波纹结构有助于增强扰流,提升换热效率。随着换热器级数的增加,波纹形换热器的制冷能力提升更明显,最大增长幅度达到38.1%,显著高于蜂窝结构。

(2) 波纹形换热器的压降低于蜂窝形换热器。蜂窝结构中空气流路易被阻挡,导致流动阻力增大,从而造成较高的压降;而波纹结构则有助于改善流动通畅性,降低系统阻力。尽管如此,随着级数的增加,两种结构的空气侧压降均呈线性增长趋势。

(3) 波纹形换热器的流动阻力较小,具有较好的对流传热特性。随着换热器级数的增加,两种结构在冷却水侧出口温度均出现小幅上升,增幅约为3.0%;而空气侧出口温度则整体下降,其中波纹形换热器的下降幅度达到4.8%,压降低于蜂窝结构,进一步验证其更优的热流特性。

参考文献:

- [1] 中国环境保护产业协会脱硫脱硝委员会. 脱硫脱硝行业2014年发展综述[J]. 中国环保产业, 2015(12): 4-23.
Desulfurization and Denitration Committee of CAEPI. China Development report on desulfurization and denitration industries in 2014 [J]. China Environmental Protection Industry, 2015(12): 4-23.
- [2] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Department of Energy Statistics, Nation Albureau of Statistics of the People' Srepublic of China[M]. China Energy Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [3] 王翠华, 李光瑜, 苏方正, 等. 螺旋套管换热器壳程流体湍流换热热力性能数值研究[J]. 过程工程学报, 2022, 22(7): 935-943.
WANG Cuihua, LI Guangyu, SU Fangzheng, et al. Numerical study on the thermodynamic performance of turbulent fluid flow in shell side of spiral casing heat exchanger[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(7): 935-943.
- [4] 肖生泽, 杨紫娟, 何婷婷, 等. 板式热交换器高粘性流体传热与流动模拟研究[J]. 机械研究与应用, 2019, 32(4): 12-16, 20.
XIAO Shengze, YANG Zijuan, HE Tingting, et al. Study on heat transfer and flow simulation of high viscosity fluid in plate heat exchanger[J]. Mechanical Research & Application, 2019, 32(4): 12-16, 20.
- [5] 宋 源, 李士雨. 平直开缝翅片和波纹翅片管换热器换热特性的数值模拟[J]. 化学工业与工程, 2019, 36(2): 66-72.
SONG Yuan, LI Shiyu. Numerical simulation on heat transfer performance of slit split and wavy fin-and-tube heat exchanger[J]. Chemical Industry and Engineering, 2019, 36(2): 66-72.
- [6] 苑云潇, 张 良, 柳建华, 等. 低气压下翅片管换热器空气侧传质特性实验研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(5): 104-110.
YUAN Yunxiao, ZHANG Liang, LIU Jianhua, et al. Experimental study on airside mass transfer characteristics of fin-and-tube heat exchangers at low ambient pressure[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(5): 104-110.
- [7] LI Wei, LI Hongxia, LI Guanqiu, et al. Numerical and experimental analysis of composite fouling in corrugated plate heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 63: 351-360.
- [8] YOO J H, YOON J K. A study on heat transfer characteristics for cross flow heat exchanger of staggered srangement[J]. Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 2012, 36(8):

- 1016 - 1023.
- [9] 朱晓磊,张 磊,孟继安. 烟气余热回收中填料喷淋换热器的实验分析[J]. 工程热物理学报,2020,41(12):3061 - 3067.
ZHU Xiaolei, ZHANG Lei, MENG Jian. Experimental analysis of packed spraying heat exchanger in waste heat recovery from flue gas [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(12): 3061 - 3067.
- [10] 郭江峰,张海燕,崔欣莹,等. 低品位烟气余热回收换热器热力学分析[J]. 工程热物理学报,2020,41(1):39 - 45.
GUO Jiangfeng, ZHANG Haiyan, CUI Xinying, et al. The thermal analysis of low grade flue gas heat recovery heat exchanger [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(1): 39 - 45.
- [11] KIM N H. Heat transfer and pressure drop characteristics of cross-flow plastic air heater for a cooling tower [J]. Korean Society of Industrial Technology, 2013, 14(12): 6072 - 6081.
- [12] 甘刘意,陆 怡,查涵清,等. 新型螺旋板式换热器及其传热特性研究[J]. 流体机械,2021,49(6):36 - 43.
GAN Liuyi, LU Yi, ZHA Hanqing et. al. Research on new type spiral plate heat exchanger and its heat transfer characteristics [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(6): 36 - 43.
- [13] 雷承勇,刘家斌,陈志华. 螺旋鳍片管在烟气余热回收换热器中的应用[J]. 锅炉技术,2021,52(3):31 - 35.
LEI Chengyong, LIU Jiabin, CHEN Zhihua. Application of spiral fin tube in flue gas waste heat recovery unit [J]. Boiler Technology, 2021, 52(3): 31 - 35.
- [14] 杨 婷,赵秉文,李 婉. 烟气余热回收不同形式纵向翅片管模拟研究[J]. 节能,2019,38(9):46 - 50.
YANG Ting, ZHAO Bingwen, LI Wan. Simulating study on different forms of longitudinal finned tubes for flue gas waste heat recovery [J]. Energy Conservation, 2019, 38(9): 46 - 50.
- [15] JUN Y, LEE K, KO S. Effect of particle ingestion on the fouling reduction and heat transfer enhancement of a No-Distributor-Fluidized heat exchanger [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2008, 22(5): 965 - 972.
- [16] 王 健. 螺旋板式换热器强化传热与压降性能的数值研究 [D]. 天津:天津大学,2012.
WANG Jian. Numerical study on enhanced heat transfer and pressure drop performance of spiral plate heat exchangers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

(刘 颖 编辑)