

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-416-06

玻纤厂余热回收系统翅片管式换热器试验研究

鲍玲玲^{1,2} 罗 娜¹ 赵 力¹

(1. 河北工程大学能源与环境工程学院 邯郸 056038;

2. 河北省暖通空调技术创新中心 邯郸 056038)

【摘 要】 我国工业余热资源丰富, 余热回收再利用技术已成为当前研究焦点之一。以河北省某玻纤厂的余热回收系统为研究对象, 利用翅片管式换热器回收的热量用于厂区食堂和宿舍供暖。为分析翅片管式换热器的换热性能与阻力性能设计出一套测试方案, 以验证该系统可靠性与稳定性。结果显示, 厂区生产效率恒定时, 翅片管式换热器的传热性能和阻力性能较为稳定, 其换热量稳定于 583.9kW~651.27kW 之间, 可保证厂区正常供暖。且与燃气锅炉供暖系统相比, 每年运行成本可节省 32.48 万元, 每年可节省标煤 79.9t, 环境价值合计 22430.59 元。在正常供暖的情况下, 有效达成节能减排、节省成本的双重目标。

【关键词】 工业余热; 翅片管式换热器; 传热性能; 环境价值

中图分类号 TK172 文献标志码 A

Experimental Study on Finned Tube Waste Heat Recovery System

Bao Lingling^{1,2} Luo Na¹ Zhao Li¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056038;

2. Hebei province HVAC technology innovation center, Handan, 056038)

【Abstract】 China has abundant industrial waste heat resources. China has abundant industrial waste heat resources, and the technology of waste heat recovery and reuse has become one of the current research focuses. This paper takes the waste heat recovery system of a fiberglass factory in Hebei Province as the research object. The heat recovered by the finned tube heat exchanger is used for heating the factory's canteen and dormitories. A set of test schemes are designed to analyze the heat exchange performance and resistance performance of the system, in order to verify the reliability and effectiveness of the system. The results show that when the production efficiency of the factory remains unchanged, the air velocity and air volume of the finned tube heat exchanger change relatively stably, and the heat exchange quantity is stable between 583.9kW and 651.27kW, which can ensure the normal heating of the factory. Compared with the gas boiler heating system, the annual operating cost can be saved by 324800 yuan, and 79.9 tons of standard coal can be saved annually, with a total environmental value of 22430.59 yuan. Under normal heating conditions, the dual goals of energy conservation and emission reduction and cost savings can be effectively achieved.

【Keywords】 Industrial waste heat; Finned tube heat exchanger; Heat transfer performance; Environmental value

0 引言

2021年, 中国建筑运行能耗和碳排放分别占能源消耗总量与碳排放总量的21.9%与21.6%^[1]。采暖

是建筑能耗重要组成部分之一。传统能源供暖方式主要是化石燃料锅炉供暖^[2], 产热期间伴随生成的大量污染物会破坏和污染大气层, 易造成酸雨、雾

基金项目: 中深层热储温度衰减机制及可再生能源耦合系统研究 (E2023402072)

作者(通讯作者)简介: 鲍玲玲(1982-), 女, 博士, 教授, 研究方向为余热利用、中深层地热等, E-mail: lingling5934@163.com

收稿日期: 2025-08-25

霾等恶劣天气。后经“煤改气”政策的推行,以天然气为燃料的燃气锅炉供暖方式迅速普及,在回水 50°C 的条件下,效率仅达 99°C ,而在回水 30°C 条件下,效率可达到 103% ^[3]。我国工业余热资源总量巨大,具有很大的开发空间与利用价值。工业余热供暖方式主要是依靠换热器对余热消纳利用,将工厂废弃热能回收并用于供暖,由此提高系统能效,减少热岛效应的发生。换热器是一种高效的热量回收装置,通过热对流的方式换热,目前被广泛应用于航空航天、空调制冷、化工、食品及余热利用等行业^[4-7]。其中翅片管式换热器具有结构紧凑多样、重量轻便、换热效率高等优点,是目前工业余热回收领域的核心设备。热流体一般为空气,由于空气的导热系数小导致热阻主要集中在空气侧,其换热热阻约占换热器总热阻的 $50\%-70\%$ ^[8],因此翅片管换热器的研究主要集中在空气侧强化换热方面^[9-11],能效的提高是行业内一门重要的研究课题,此方面的迭代研究将持续推动能源利用率的提升。

为响应“节能减排”的号召,达成“碳达峰,碳中和”的目标,河北某玻纤厂区供暖系统配置余热回收系统以代替原有的燃气锅炉系统进行供暖,提高能效与降低企业运行成本。本文为了解系统设计出一套测试方案,验证余热回收系统的有效性与可靠性,深入分析对比改造前后系统的经济效益与环保效益,为现有技术提供了一个新的应用案例,为相关学术研究和工程实践提供参考。

1 余热回收系统

1.1 工程概况

河北某玻纤厂生产运行过程中产生大量废热,将原本直接排放的废热转化为可利用的清洁能源,代替传统燃气为宿舍、食堂供暖。该厂位于河北省邢台市内,厂房内烘干温度为 120°C ,风量范围为 $36000-40000\text{m}^3/\text{h}$,当地气象参数根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范GB 50736-2012》可得,如表1所示。该厂余热回收系统配置一台翅片管式换热器、两台热水循环泵(一用一备)以及PLC自动控制监测系统。

翅片管式换热器共300根管,每排对应30根管,以正三角形叉排的方式排成10列。针对热水循环泵的选取,供回水温差取 10°C ,循环水泵流量为 $38.7\text{m}^3/\text{h}$,流量富裕系数取1.1,故计算出循环水泵

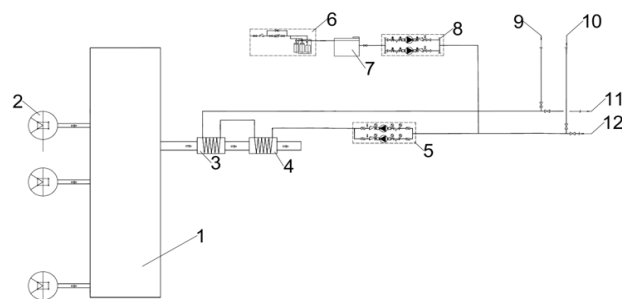
流量为 $42.57\text{m}^3/\text{h}$ 。为确保水泵在实际测试过程的安全性,水泵输送扬程定为 50m ,从而降低压力不稳和流量波动的影响,且留有一定余量以适应厂区突发情况。因此,选用2台流量 $50\text{m}^3/\text{h}$ 、扬程 50m 、功率 15kW 的热水循环泵,为余热回收系统顺利运行提供可靠的保障。PLC自控系统实时监控运行情况,为系统运行状态的监控提供操作上的便利。

表1 当地气象参数

Table 1 Local meteorological parameters

参数	数值	单位
年平均温度	14.8	$^{\circ}\text{C}$
冬季采暖室外计算温度	-8.0	$^{\circ}\text{C}$
冬季通风室外计算温度	-1.6	$^{\circ}\text{C}$
冬季空气调节室外计算温度	-12.0	$^{\circ}\text{C}$
冬季极端最低温度	-20.2	$^{\circ}\text{C}$

1.2 系统运行流程



- 1.烘干室; 2.燃气热风炉; 3.原有光管换热器;
4.翅片管换热器; 5.热水循环泵; 6.软化水处理器;
7.软水箱; 8.定压补水泵; 9.食堂回水管路;
10.食堂供水管路; 11.宿舍回水管路; 12.宿舍供水管路

图1 余热回收供暖系统工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram of waste heat recovery heating system

在燃气热风炉的高温空气输送工况下,玻璃纤维烘干过程产生的中低温烟气(120°C)经风道依次通过光管式换热器与翅片管式换热器进行热量交换。光管换热器通过管壁导热实现烟气与回水的逆流传热,将烟气温度降至 95°C ;翅片管换热器则通过扩展换热表面强化传热,并利用结构优势形成湍流扰动破坏边界层,提高传热系数,进一步将烟气温度降至 65°C ;热水循环泵通过维持管道系统的压力与流速,确保热量均匀分配至用户侧。同时,为维持供暖系统水力稳定和换热高效,定压补水泵会随时给供回水管补充软化水,具体系统工艺流程

如图1所示。该流程既满足了环保排放要求，又实现了显热回收效率最大化。

2 系统测试方案

2.1 测试目的

为了解余热回收系统运行情况，测量翅片管式换热器空气侧进出口的风速与压降、水侧进出口温度及总供水回水温度，由此分析翅片管换热器的换热性能与流动、阻力性能，进而验证系统可靠性与有效性。

2.2 测试仪器

在测量过程中，需要以下三种仪器：温度自记仪、分体式风速仪、毕托管压力计，其生产厂家分别为北京天建华仪、希玛仪表、优特科技。温度自记仪与毕托管压力计分别用于测量温度与压力，分体式风速仪用于测量风速与风量，详细参数如表2所示。

表2 主要测试仪器

Table 2 Main test instruments

仪器名称	型号	测量范围	测量精度
温度自记仪	WRZY-1	-20℃~80℃	±0.3%
分体式风速仪	AS856S	0.3~45m/s	±2.5%rdg±0.1
毕托管压力计	K0601	0~2000Pa	±1~2%FS

2.3 测试方法

(1) 温度的测定

PLC自控系统可自动测试各点温度。虽不需要对各测试点设置测量仪器，但需验证PLC自控系统自测温度的准确性，故在换热器空气侧进口管道处与总供水管道处分别布置温度自记仪，温度自记仪需用隔热材料包裹。测出的温度与PLC测出的数据相近，其差值对试验结果无实质影响，因此温度可以PLC测出的数据为准。

(2) 风速、压降的测定

由于在同一截面上风速和压力分布不均匀，需在一个平面上选取多个测点进行测量，并以截面测试值的平均值作为测定的风速和压力。选取的测点越多，数据越精确，但过多的测点会增加测量难度，因此采用等面积法确定测点位置，将换热器面积为3.6m²的截面平分12个0.6m×0.5m的小矩形，测点位置为小矩形中心点，如图2所示。使用测量仪器时，采用匀速移动法，使仪器在测量截面的测点上沿直线缓慢移动，确保仪器不离开测量截面。相同时间段内各点需测量3~4次，取其均值作为该点测

定值，并与PLC自动控制系统测出的风速进行对比，由于其数值相近，差异可忽略，可以将PLC测出的数据作为风速的测定值。对于压降的测定值，用毕托管压力计多次测量，以其平均值作为压降测定值。

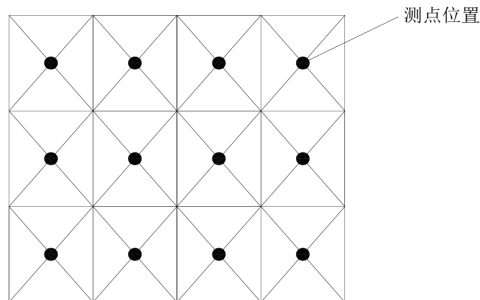


图2 测点布置图

Fig.2 Layout of measuring points

2.4 数据分析

平均风速指空气流过某一截面的速度，等于某一截面所有测点速度的平均值。

$$u = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n} \quad (1)$$

式中： u_n 为代表各矩形中心的平均风速； n 为测点的数量。

风量指单位时间内空气通过某一截面的流量，等于风速与截面面积的积。

$$Q_v = F \cdot u \quad (2)$$

式中： Q_v 为风量，m³/s； F 为换热器截面面积，m²； u 为截面的平均风速，m/s。

3 测试结果分析

3.1 传热性能分析

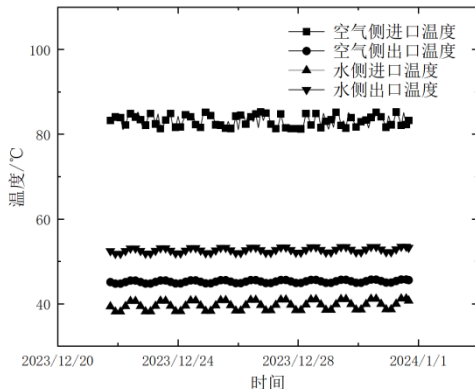


图3 换热器空气侧和水侧的进出口温度变化

Fig.3 Inlet and outlet temperature changes on the hot and cold sides of the heat exchanger

该余热回收系统运行时,PLC自测控制系统全天24小时运行,对测点温度实时监测。本文以2023年12月21日18时~2024年1月1日18时的数据为例,对翅片换热器传热性能进行研究,时间间隔为两小时,翅片管式换热器的具体温度如图3所示。

测试期间,空气侧入口温度波动范围为 81.2°C ~ 85.3°C ,均值 83.19°C ,其温度梯度主要受生产车间生产量及玻纤烘干时间的双重耦合影响;水侧入口温度变化区间为 37.92°C ~ 41.42°C ,均值 39.68°C ,其波动性与室外环境温度呈强相关性。空气侧出口温度稳定在 44.72°C ~ 45.8°C (均值 45.26°C),水侧出口温度维持在 51.74°C ~ 53.6°C (均值 52.68°C),影响二者的关键因素是入口温度,且温度波动度均小于 1°C ,总体上变化趋势平缓。

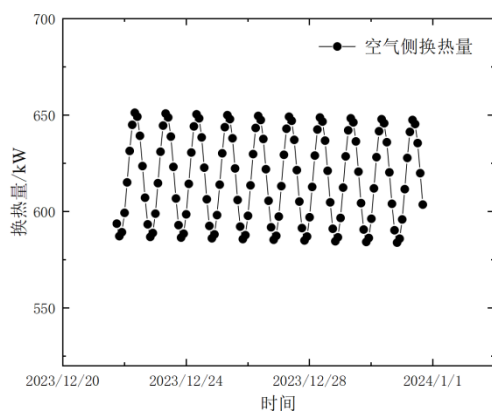


图4 换热器空气侧换热热量变化

Fig.4 Changes in heat transfer on the hot side of the heat exchanger

在系统运行期间,翅片管式换热器在运行过程中呈现显著的稳态传热特性。如图4所示,该换热器的换热量波动范围为 $583.9\sim 651.27\text{kW}$,平均换热量为 617.53kW ,其性能波动主要受空气侧与水侧入口温度的影响。当空气侧的入口温度越高,与水侧的温差越大时,换热量随之越大;当空气侧的入口温度越低,与水侧的温差越小时,换热量随之越小。当水侧的入口温度越高,与空气侧的温差越小时,换热量随之减少;当水侧的入口温度越低,与空气侧的温差越大时,换热量随之增加。根据热力学第二定律与傅里叶定律可知,温差作为传热驱动力,直接影响换热量的变化。当空气侧的入口温度与水侧的差值降低时,换热器的换热量呈下降趋势;当空气侧的入口温度与水侧的差值增加时,换热器的换热量呈上升趋势。考虑到室外管网传输过

程中的10%热损耗,为满足厂区 530kW 的供暖负荷需求,传送负荷端的平均换热量需达到 555.78kW 。这一结果表明,当前换热器设计在热负荷传递方面具有足够的裕度,能够有效应对实际运行中的温度波动与热损耗。

3.2 流动及阻力性能分析

在PLC自动控制系统全天运行的情况下,通过分析收集到的风速数据来研究翅片管式换热器的流动及阻力性能。本文以2023年12月21日18时~2024年1月1日18时测得的数据为例,时间间隔为两小时,对翅片管式换热器风速变化进行监测。

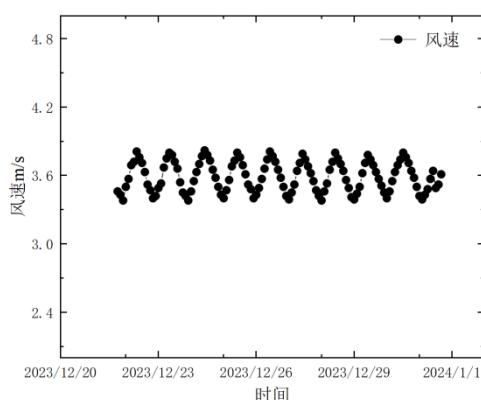


图5 换热器空气侧风速变化

Fig.5 Changes in wind speed on the hot side of the heat exchanger

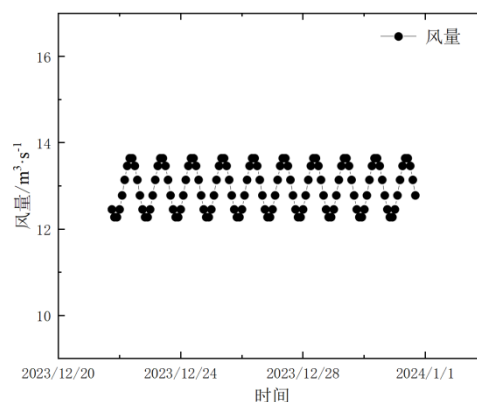


图6 换热器空气侧的风量变化图

Fig.6 Diagram of the air volume on the hot side of the heat exchanger

由图5、图6可知,翅片管式换热器的风速与风量动态变化稳定,变化范围分别为 $3.38\text{m/s}\sim 3.82\text{m/s}$ 、 $12.28\text{m}^3/\text{s}\sim 13.64\text{m}^3/\text{s}$,其性能波动的直接因素是排潮风室的变频风机运行功率,而根本原因在于厂房的生产效率。测试期间厂区的生产效率保

持恒定,因此风速和风量变化维持在波动度较小的区间内。

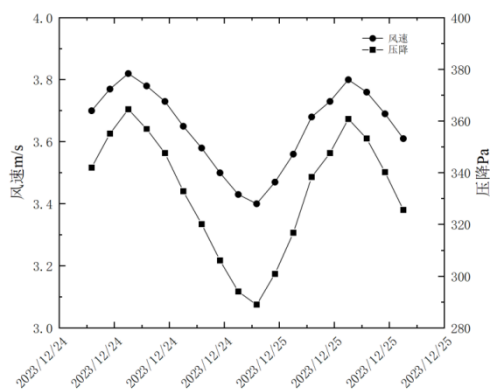


图7 换热器空气侧压降与风速随时间变化图

Fig.7 Plot of pressure drop and wind speed on the air side of a heat exchanger over time

对于换热器风阻的测定,可通过毕托管压力计在一个气流均匀稳定的风道口对空气侧前后室进行多次测量。以2023年12月24日-2023年12月25日的风速与压降为例,对翅片管式换热器的风速与风阻进行分析。结果显示,风速与压降二者的变化趋势一致。

3.3 环境价值分析

根据项目所给数据,采暖期按105天计算,则余热回收系统的运行期间设备用电量为1.32万kW。改造前该厂采用燃气锅炉系统供暖,为方便研究,以同等余热供热负荷作燃气锅炉供热负荷,选择一台容量为0.52t/h的燃气锅炉,燃气锅炉系统以天然气为燃料,单位时间内耗气23.4m³/h,单位时间内耗电量是10kWh。为确保对照结果具有科学性,采暖期同余热回收系统的保持一致。经计算,燃气锅炉系统总耗气量为58968m³,总耗电量为25200kW。根据《GB/T 2589-2020 综合能耗计算通则》可知,天然气折标煤系数为1.1kgce/m³~1.33kgce/m³,一般取1.33kgce/m³,电力折标准煤系数0.1229kgce/(kWh),由于综合能耗等于统计期内实际消耗的能源经统一折算后的总和,可得余热回收系统综合能耗为1.62t,燃气锅炉系统综合能耗为81.52t。

对比两套系统运行的综合能耗,采用翅片管式余热回收系统每年可节省标煤量79.9t,系统寿命按20年算,则在系统整个运行过程中可节省标煤量1598t,达到了节能减排的目的。

据统计,每节省一吨标煤,对应二氧化碳的排放可减少2.6t,二氧化硫的排放可减少8.5kg,氮氧化物的排放可减少7.4kg,粉尘颗粒物的排放可减少11kg^[12]。已知污染物当量值^[13]、邢台环保税价格^[14]及2025年9月全国碳交易市场配额成交价格为72元/吨左右^[15],根据公式:1000÷污染物当量值×环保税价格=环境价值单价得出减排一吨的污染物所对应的环境价值。再经详细计算,采用翅片管式余热回收系统的年减排量与环境价值^[16]如表3所示。

表3 每年减排环境价值

Table 3 Annual environmental value of emission reduction

污染物种类	减排量/吨	环境价值单价/元·吨 ⁻¹	环境价值/元	环境价值合计/元
二氧化碳	207.74	72	14957.28	22430.59
二氧化硫	0.68	5053	3436.04	
氮氧化物	0.59	5053	2981.27	
粉尘	0.88	1200	1056	

3.4 经济性分析

余热回收系统的费用包含初投资和运行费用,其中,初投资包括设备采购费、系统安装费、室外管改装费、用户侧改装费。运行费用包含运行电费、维修费及运行人员工资。单位供电电价为0.7元/kWh。本系统基本实现全自动运行且运维工作少,但考虑到部分潜在的安全因素影响系统运行,故在采暖期运行人员数量按一人计算。本系统具体费用如表4所示。

表4 余热回收系统费用汇总

Table 4 Cost summary of waste heat recovery system

系统费用类别	费用	合计
初投资	145.5 万元	145.5 万元
电费	0.93 万元/年	
维修费	2 万元/年	4.93 万元/年
运行人员工资	2 万元/人	

燃气锅炉系统的总运行费用中主要包括燃料费、电费、设备维修保养费、人工工资费用。燃气锅炉以气体为燃料,燃气费单价为4.5元/m³,单位供电电价是0.7元/kWh。燃气锅炉系统包含设备较多,运维工作难度较大。为确保结果具有科学性,运行人员数量与余热系统的保持一致,为1人。具体的费用如表5所示。

表 5 燃气锅炉系统费用汇总

Table 5 Cost summary of gas boiler system

运行费用类别	费用	合计
燃气费	26.65 万元	37.41 万元
电费	1.76 万元/年	
维修费	3 万元/年	
运行人员工资	6 万元/人	

相比于锅炉燃气系统的运行成本, 余热回收系统运行成本低, 其影响因素主要在于用能成本, 其次是运行人员费用。余热回收系统是在已有热量的基础上运行, 燃气锅炉系统则需要运用燃料单独产热。锅炉供暖系统比余热回收系统更为复杂, 运维工作量更大, 需要管理人员进行更专业的控制与操作。每年运行成本可节省 32.48 万元, 在余热回收系统正常运行 20 年的情况下, 可以节省 649.6 万元的运行成本。从长期来看, 运用余热回收系统可增大经济效益。

4 结论

在企业生产效率稳定的情况下, 按照测试方案对翅片管式换热器进行测试。本文根据玻纤厂余热回收系统的工程实例提供的数据, 验证了换热器在设计工况下的热稳定性, 其换热量稳定于 583.9kW~651.27kW 区间内, 满足厂区正常供暖。与燃气锅炉系统相比, 采用余热回收系统每年可节省 32.48 万元, 每年可节省标煤 79.9t, 环境价值为 22430.59 元。在系统整个寿命周期内可节省运行成本 649.6 万元; 可节省标煤量 1598t, 环境价值合计为 448611.8 元。在生产效率恒定情况下, 余热回收系统具有可靠性和稳定性, 相较于传统燃气锅炉系统其经济效益与环境效益显著。

余热回收供暖技术充分利用余热资源, 在提升企业经济效益的同时积极践行绿色可持续发展战略, 有效解决传统供暖系统的热效率瓶颈, 降低环境承载负荷。由于测试条件有限, 本文未对翅片管式换热器在高风速工况下的传热性能开展实测研究。此外, 在系统实际运行过程中, 观察到部分玻璃纤维材料受风机影响随气流卷入风道, 这一现象可能影响设备正常运行, 干扰传热效果。

参考文献:

- [1] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023 年)[J]. 建筑, 2024,(2):46-59.
- [2] 王春兰. 基于环境和能源约束的区域供暖优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [3] 邓世丰, 张浩远, 郭辉, 等. 压缩式热泵回收燃气锅炉烟气余热的实验研究[J]. 动力工程学报, 2025, 45(7): 1144-1152.
- [4] 朱彭杰, 李荫彪, 贺福祥, 等. 低温空分系统压缩余热回收利用技术浅析[J]. 中氮肥, 2025, (4): 74-77.
- [5] 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.
- [6] 杨艳霞, 马晴婵, 左玉清. 人字形板式换热器流道传热特性及参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 210-215.
- [7] 杨金霖, 李灿, 魏小清, 等. 气-气板式换热器丁腈板片板型改进设计的数值研究[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 79-87.
- [8] 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): 8.
- [9] 谭裕锋, 刘小琴, 马迪, 等. 翅片管式换热器翅片结构对空气侧性能的影响[J]. 制冷与空调, 2024, 24(10): 79-84, 96.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 荣雅静. 矿井回风源热管换热器传热及阻力特性模拟研究[D]. 河北: 河北工程大学, 2018.
- [13] 中华人民共和国环境保护税法[L]. 2018-10-26.
- [14] 段丽茜. 环保税就要来了! 河北省税额标准将分三档征收[N]. 河北日报, 2017-12-07.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 顶层设计擘画市场发展蓝图 碳排放权交易活力加速释放[碳市场建设解读⑥][EB/OL]. (2025-09-08)[2025-11-1]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202509/t20250908_1127083.shtml
- [16] 汤玲玲. 矿井回风源热泵系统的设计与性能分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.