

深度回收燃气冷凝锅炉排烟余热实验研究与分析

刘高伟¹, 陈晓林², 崔红社^{1,*}, 周腾德¹

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛联盛创能源科技有限公司, 青岛 266520)

摘要: 针对燃气冷凝锅炉烟气余热残留问题, 提出一种热泵式烟气余热回收系统。该系统以烟气为低温热源, 通过翅片管式换热器和低温水回收烟气余热, 经水源热泵将低位热能提升为高位热能向建筑供热。基于青岛市某办公建筑燃气冷凝锅炉供热系统, 搭建了热泵式烟气余热回收系统实验台, 研究了蒸发器出水温度、蒸发器侧水流量对系统性能的影响。结果表明: 随着蒸发器出水温度的升高, 烟气余热回收量增大, 热泵性能系数 COP 增大; 随着蒸发器侧水流量的增大, 蒸发器出水温度升高, 烟气余热回收量增大, 热泵 COP 和 EER 增大。

关键词: 燃气冷凝锅炉; 锅炉热效率; 烟气余热回收; 水源热泵; COP

中图分类号: TU833⁺.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)02-0099-08

Experimental research and analysis of the deep recovery of the waste heat from gas condensing boiler

LIU Gaowei¹, CHEN Xiaolin², CUI Hongshe^{1,*}, ZHOU Tengde¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Qingdao Lianshengchuang Energy Technology Co., Ltd., Qingdao 266520, China)

Abstract: A heat pump-type flue gas waste heat recovery system is proposed to address the issue of the residue of flue gas waste heat from gas condensing boilers. The system uses flue gas as a low-temperature heat source, recovers flue gas waste heat through finned tube heat exchangers and low-temperature water, and then increases the low-level heat energy to high-level heat energy through a water source heat pump to provide heat to the building. Based on the gas condensing boiler heating system of an office building in Qingdao, an experimental platform for the heat pump-type flue gas waste heat recovery system was built to study the effects of evaporator outlet temperature and evaporator side water flow rate on the performance of the system. The results show that as the outlet temperature of the evaporator increases and the amount of flue gas waste heat recovery increases, and the COP of the heat pump increases; as the water flow rate on the evaporator side increases and the outlet temperature of the evaporator increases, the amount of flue gas waste heat recovery increases, and the COP and EER of the heat pump increase.

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(52204039)

作者简介: 刘高伟(1997—), 男, 山东临沂人。硕士, 研究方向为绿色节能。E-mail: 1044022298@qq.com。

* **通信作者:** 崔红社(1971—), 男, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事人工环境和建筑节能等方面的研究。
E-mail: cuihongshe@sina.com。

Key words: gas condensing boiler; boiler thermal efficiency; waste heat recovery from flue gas; water source heat pump; COP

为响应全球节能减排号召,中国2020年宣布“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”目标^[1]。

当前,节约能源与减少碳排放是整个社会亟待解决的问题,清洁能源天然气的大力开发与投入使用已成为解决上述问题的重要手段。天然气是一种高效、清洁、便捷的能源^[2],随着天然气的大力推广和国家“煤改气”工作的推进,北方燃气供热比例逐渐扩大。然而天然气燃烧后所排放的烟气温度过高,且其中含有大量水蒸气,烟气中仍有大量余热未被回收利用。若能深度回收烟气中的显热和水蒸气凝结潜热,可进一步提升燃气锅炉热效率,降低锅炉燃气耗量,减少燃气燃烧碳排放,对促进建筑供热系统节能减排,推进建筑“碳达峰、碳中和”具有重要意义。

目前国内外研究烟气余热回收方向的典型应用技术有两种,分别为换热器式烟气余热回收技术和热泵式烟气余热回收技术^[3]。换热器式烟气余热回收技术由于冷源温度比较高且不稳定,系统排烟温度会比较高,烟气中的冷凝潜热无法被充分吸收,余热回收效果并不理想。若想深度回收烟气中的余热,需要稳定且温度足够低的冷水来吸收烟气中的余热。因此,可以把热泵技术与烟气余热回收技术相结合,通过热泵制取温度足够低的低温水来吸取排烟中的余热。根据热泵形式可分为电压缩式热泵余热回收技术和吸收式热泵余热回收技术^[4]。

吸收式热泵所需高温热源可由燃气锅炉提供,因此无需引入其他能源,目前对吸收式热泵烟气余热回收技术的研究持续深入^[5-7]。相比于吸收式热泵烟气余热回收系统,电压缩式热泵成本低,占地面积小,制热性能系数高,更适合应用于中小型燃气锅炉烟气余热回收^[8-10]。张迪等^[11]提出了一种应用水源热泵的燃气锅炉烟气余热回收技术,该系统采用双级烟气余热回收方式,工程实测结果表明,该技术可将烟气温度降至30℃以下,燃气消耗量降低10%。张群力等^[12]提出了一种热泵型烟气余热回收方式,该方式可分级回收烟气高温显热和冷凝潜热。热网回水首先进入冷凝器进行第1次换热,然后进入烟气-水换热器进行第2次换热;高温烟气与热网回水进行第1次换热,回收烟气中的显热,而后与热泵蒸发器换热,回收烟气中的潜热。与张迪等提出的系统不同的是,该系统将蒸发器与烟气换热器结合,减少了蒸发器侧循环水这一媒介。实验结果表明,该系统余热利用效率可达15.9%,排烟温度可降至19.8℃,热泵制热性能系数为3.3。

从烟气余热回收技术研究现状可以看出,无论是换热器式还是热泵式,大多数研究聚焦于燃气锅炉高温烟气的余热回收,对燃气冷凝锅炉低温烟气余热回收的研究较少。本研究所用燃气冷凝锅炉以常规燃气锅炉为基础,运用冷凝技术回收高温烟气中的显热和部分水蒸气凝结潜热,可将烟气处理至50℃,热效率可达104%,与李子豪^[13]的研究结果一致。但经冷凝处理后的低温烟气仍处于饱和状态,其中含有大量水蒸气,仍有大量冷凝潜热未被回收利用。若能将烟气由50℃降至35℃以下^[14],深度回收烟气中的热量,可减少燃气燃烧碳排放。

本研究将针对燃气冷凝锅炉,采用翅片管式换热器和压缩式热泵复合系统对低温烟气进行余热回收,通过理论分析和实验的方法,对该系统的烟气余热利用效果和节能减排效果进行研究。

1 烟气余热回收理论分析

1.1 理论计算

燃气充分燃烧后,干烟气组成成分为 N_2 、 CO_2 、 O_2 和其他气体,各组成成分体积分数和质量分数如表1所示。

烟气余热回收评估计算公式如下。

烟气显热回收量:

表1 干烟气组成成分

组成成分	N_2	CO_2	O_2	其他
体积分数/%	84.86	8.82	5.25	1.07
质量分数/%	79.87	13.05	5.65	1.43

$$Q_g = m_y \cdot C_y \cdot (t_1 - t_2) \quad (1)$$

式中: Q_g 为烟气显热回收量, kW; m_y 为干烟气质量流量, kg/s; C_y 为烟气定压比热容, kJ/(kg·°C); t_1 为烟气进口温度, °C; t_2 为烟气出口温度, °C。

烟气中水蒸气凝结潜热回收量:

$$Q_q = m_y \cdot \gamma \cdot \frac{(d_2 - d_1)}{1000} \quad (2)$$

式中: Q_q 为水蒸气凝结潜热回收量, kW; γ 为水蒸气凝结潜热, kJ/kg, 取值为 2382 kJ/kg; d_2 为烟气进口含湿量, 其中, 含湿量定义为每千克干空气中所含的水蒸气质量, g/kg; d_1 为烟气出口含湿量, g/kg。

烟气余热回收总量:

$$Q_{\text{总}} = Q_g + Q_q \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为烟气余热回收总量, kW。

烟气余热回收后锅炉热效率:

$$\eta' = \frac{\eta_{\text{额}}(Q_{\text{额}} + Q_{\text{总}})}{Q_{\text{额}}} \quad (4)$$

式中: η' 为烟气余热回收后锅炉热效率, %; $\eta_{\text{额}}$ 为额定锅炉热效率, %; $Q_{\text{额}}$ 为 2 台锅炉额定制热量, kW。

热泵性能系数 COP 为

$$\text{COP} = \frac{Q_h}{W_h} = \frac{C_p \cdot m \cdot (t_g - t_h)}{W_h} \quad (5)$$

式中: Q_h 为热泵制热量, kW; W_h 为热泵功率, kW; C_p 为水的定压比热容, kJ/(kg·°C); m 为冷凝器侧水流量, m³/s; t_g 为冷凝器出水温度, °C; t_h 为冷凝器进水温度, °C。

热泵性能系数 EER 为

$$\text{EER} = \frac{Q_h}{W_h + W_p} = \frac{C_p \cdot m \cdot (t_g - t_h)}{(W_h + W_p)} \quad (6)$$

式中: W_p 为水泵功率, kW。

1.2 系统性能影响因素理论分析

蒸发器侧水流量升高会增大水侧对流换热系数, 增大换热器传热系数。传热系数的增大, 使烟气-水换热热量升高, 打破其与蒸发器侧吸热量之间的热平衡, 两者的差值作用于水的温升, 使蒸发器出水温度升高。当出水温度升高时, 会增大蒸发器侧吸热量, 同时降低烟气-水换热温差, 减小烟气-水换热热量, 系统在蒸发器侧吸热量的增大和烟气-水换热量的降低中重新达到热平衡。后续的实验研究中, 着重分析这两点对热泵式烟气余热回收系统的影响。

2 热泵式烟气余热回收系统介绍

本实验台搭建于青岛市某办公建筑空调机房内, 该建筑供暖季采用 3 台燃气冷凝锅炉制热, 根据 3 台燃气冷凝锅炉搭建热泵型烟气冷凝余热回收实验台。燃气冷凝锅炉详细参数见表 2。

表 2 燃气冷凝锅炉详细参数

规格型号	性能参数	数量/台	锅炉效率/%	排烟温度/°C
AOCH-1100	制热量:1100 kW;燃气耗量:98.4 m ³ /h	2	104	50
AOCH-700	制热量:700 kW;燃气耗量:63.9 m ³ /h	1	104	50

2.1 实验台系统原理介绍

在原有供热系统的基础上进行改造, 搭建热泵式烟气余热回收实验台, 实验台系统如图 1 所示。来自

建筑热网的回水部分流向水源热泵冷凝器,经冷凝器升温后与板式换热器供水一同流向热网。循环低温水经水泵加压后流入蒸发器,经蒸发器降温后流向翅片管式换热器内部盘管,吸收烟气的余热后回到蒸发器。锅炉烟气经烟道进入换热器,与水换热后温度降低、含湿量降低,经烟道排至大气。

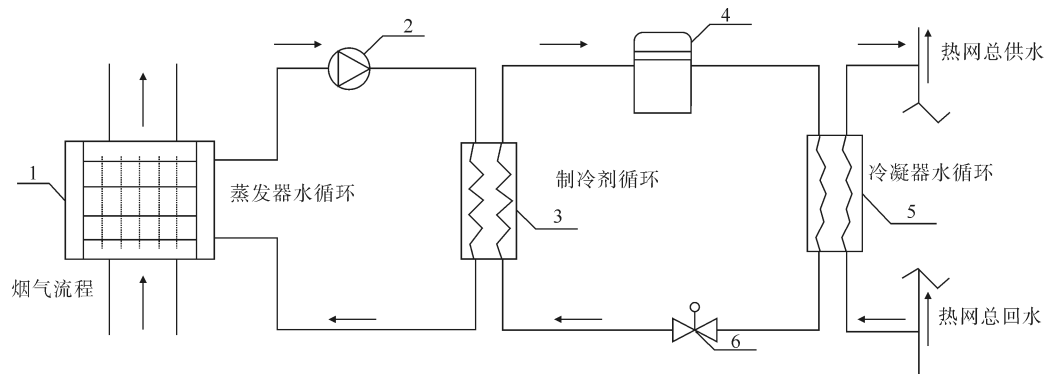


图1 热泵式烟气余热回收系统工作原理

1—翅片管式换热器;2—变频循环水泵;3—蒸发器;4—压缩机;5—冷凝器;6—节流阀

2.2 实验设备选型

1) 水源热泵机组。根据热泵厂家提供的模块式水源热泵机组样本选定麦克维尔 WGZ030B5,其额定制热量为 150 kW,蒸发器侧吸热量为 120 kW,满足实验要求。该热泵采用非共沸混合制冷剂 R410A,它是一种高效且环保的制冷剂^[15],作为冷媒被广泛用来替代 R22。水源热泵机组实物见图 2。

2) 翅片管式换热器。在实验中,换热器是一个至关重要的设备,其换热效率直接关系到烟气余热回收系统的效果。实验采用山东某公司制作的翅片管式换热器,它由 3 组独立的翅片式换热器组成。每组换热器都有 24 根基管,直径为 25 mm,壁厚为 2 mm,前后交错布置,充分利用了内部空间,增加了循环低温水行程,扩大了换热面积。基管外部有翅片,直径为 50 mm,间距为 2.8 mm,这样设计可以增加管外壁的换热面积,提高烟气湍流强度,降低烟气侧的对流换热热阻,从而增强换热效果。换热器实物见图 3。



图2 水源热泵机组实物

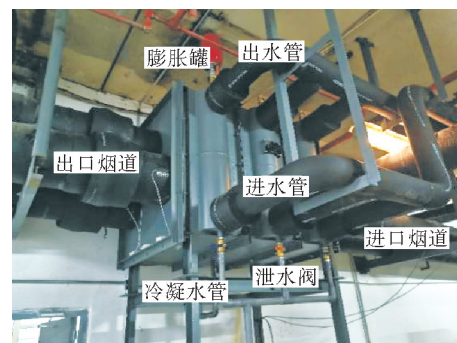


图3 翅片管式换热器实物

2.3 测量参数及设备

本次实验,需要测量的参数有:蒸发器侧水流量、蒸发器进出水温度、冷凝器侧水流量、冷凝器进出水温度、热泵功率、水泵功率、燃气流量和烟气进出口温度,各参数测点布置见图 4。

测量参数及设备具体信息见表 3。

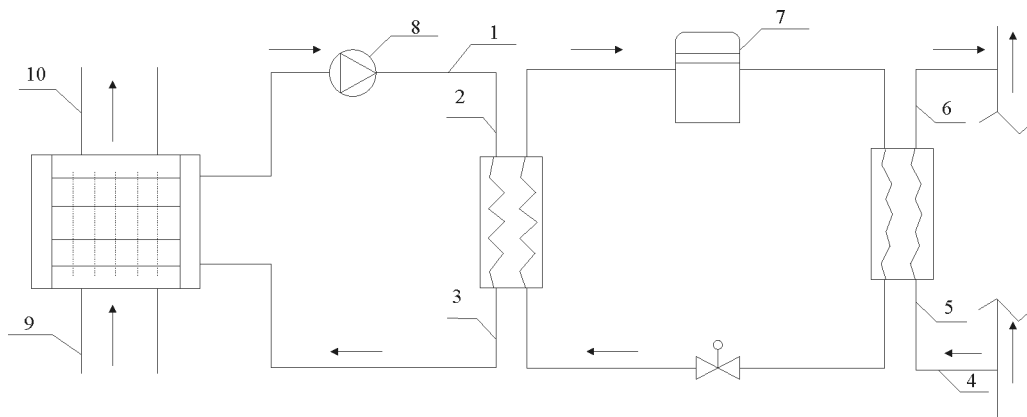


图 4 热泵式烟气余热回收系统测点布置

1—蒸发器侧水流量;2—蒸发器进水温度;3—蒸发器出水温度;4—冷凝器侧水流量;5—冷凝器进水温度;
6—冷凝器出水温度;7—热泵功率;8—水泵功率;9—烟气进口温度;10—烟气出口温度

表 3 测量参数及装置

测量参数	仪器	型号	设备参数
蒸发器侧水流量	超声波流量计	SLC-82	流速范围:0~12 m/s;流量测量精度:±0.001 m ³ /h
蒸发器进出水温度	温度传感器	—	温度测量精度:±0.1 °C
冷凝器侧水流量、 冷凝器进出水温度	超声波热量表	SHARKY 775	流量范围:1~100 m ³ /h;流量测量精度:±0.001 m ³ /h;温度范围:5~150 °C;温度测量精度:±0.1 °C
热泵、水泵功率	电能表	DDS606	测量精度:±0.1%
燃气流量	燃气流量表	FCC 型	流量范围:0.09~100 L/min;流量测量精度:±0.1%
烟气进出口温度	温度记录仪	TR-52i	温度范围:-60~+155 °C;温度测量精度:±0.3 °C

3 实验结果分析

围绕 2022 年 12 月 12 日—23 日的实验结果进行研究,分析不同蒸发器出水温度对系统性能的影响、不同蒸发器侧水流量对系统性能的影响。

3.1 不同蒸发器出水温度对系统性能的影响

3.1.1 对余热回收量的影响

对 12 日—16 日热泵运行数据进行汇总,在蒸发器侧水流量不变的条件下,烟气余热回收量随蒸发器出水温度变化如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,当蒸发器侧水流量一定时,蒸发器出水温度越高,烟气余热回收量也越高。同时,蒸发器出水温度越低,烟气余热回收量衰减越明显。以蒸发器出水温度为 17.3 °C 时的烟气余热回收量 115.12 kW 为基准,当蒸发器出水温度低于 10 °C 时,每升高 1 °C,烟气余热回收量平均增大 3.46%;当蒸发器出水温度高于 10 °C 时,每升高 1 °C,烟气余热回收量平均增大 2.75%。

3.1.2 对热泵 COP 的影响

在蒸发器侧水流量不变的条件下,不同蒸发器出水温度下的热泵制热量、热泵功率变化情况见图 6。

从图 6 中可以看出,当蒸发器侧水流量一定时,随着蒸发器出水温度的升高,热泵制热量逐渐增大,热泵功率基本不变。以蒸发器出水温度为 17.3 °C 时的热泵制热量 148.12 kW 为基准,当蒸发器出水温度低于 10 °C 时,每升高 1 °C,热泵制热量平均增大 2.03%;当蒸发器出水温度高于 10 °C 时,每升高 1 °C,热泵制热量平均增大 1.55%。

在蒸发器侧水流量不变的条件下,不同蒸发器出水温度下的热泵 COP 变化情况见图 7。

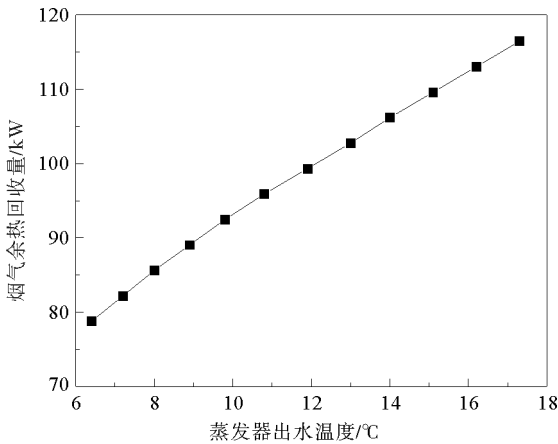


图5 不同蒸发器出水温度下的烟气余热回收量

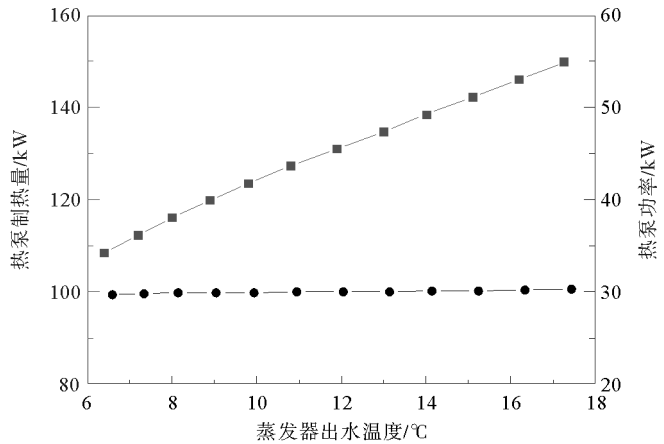


图6 不同蒸发器出水温度下的热泵制热量与热泵功率
—■— 热泵制热量; —●— 热泵功率

从图7中可以看出,当蒸发器侧水流量一定时,随着蒸发器出水温度的升高,热泵COP不断增大。同时,蒸发器出水温度越低,热泵COP衰减越明显。以蒸发器出水温度为17.3℃时的热泵COP=4.8为基准,当蒸发器出水温度低于10℃时,每升高1℃,热泵COP平均增大2.86%;当蒸发器出水温度高于10℃时,每升高1℃,热泵COP平均增大2.19%。

3.2 不同蒸发器侧水流量对系统性能的影响

3.2.1 对蒸发器出水温度的影响

以12月19日12:20—14:20数据为例,该时段燃气流量稳定在150 m³/h,通过改变水泵频率来改变蒸发器侧水流量。蒸发器出水温度变化情况如图8所示。

从图8中可以看出,蒸发器侧水流量变化会导致蒸发器出水温度变化,水流量越大,蒸发器出水温度越高,具体分析如下:在燃气流量不变的情况下,烟气侧对流换热热阻不变,当蒸发器侧水流量降低时,水流速降低,烟气与水之间的传热系数减小,烟气-水换热热量减小,小于蒸发器侧吸热量,为重新达到热平衡,烟气与水之间的换热温差开始增大,蒸发器侧平均水温降低,蒸发器出水温度降低,直至系统重新达到热平衡,蒸发器出水温度不再降低。

3.2.2 对烟气余热回收量的影响

经测量知水泵频率为35、40、45、50 Hz时,蒸发器侧水流量为20.5、23.5、26.5、29.5 m³/h。不同蒸发器侧水流量下的烟气余热回收量见图9。

从图9中可以看出,随着蒸发器侧水流量的升高,烟气余热回收量增大。以35 Hz时烟气余热回收量为基准,当燃气流量为140 m³/h时,水泵频率每增大5 Hz,即水流量每增大3 m³/h,烟气余热回收量分别增大5.23%、3.22%和2.79%;燃气流量为150 m³/h时,水流量每增大3 m³/h,烟气余热回收量分别增大3.3%、2.76%和2.13%;燃气流量为160 m³/h时,水流量每增大3 m³/h,烟气余热回收量分别增大2.87%、2.47%和1.62%;燃气流量为170 m³/h时,水流量每增大3 m³/h,烟气余热回收量分别增大

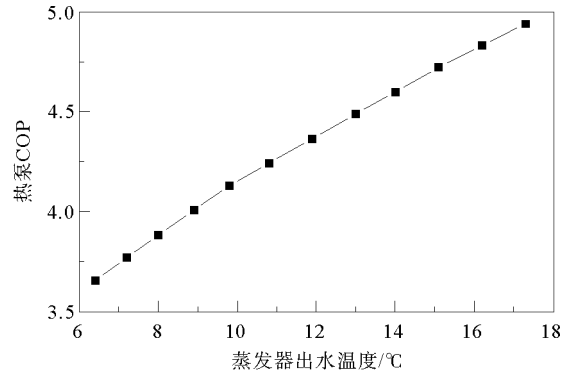


图7 不同蒸发器出水温度下的热泵COP

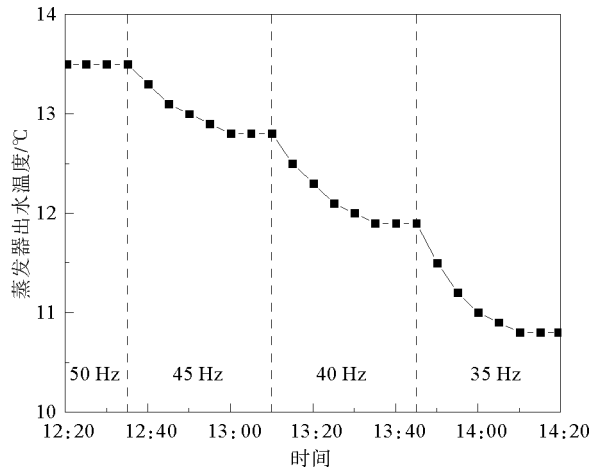


图8 蒸发器出水温度变化情况

2.54%、1.72%和 1.33%。

3.2.3 对热泵 COP、EER 的影响

不同蒸发器侧水流量下热泵 COP 见图 10。

从图 10 中可以看出,随着蒸发器侧水流量的升高,热泵 COP 增大。以 35 Hz 时热泵 COP 为基准,燃气流量为 140 m³/h 时,水泵频率每增大 5 Hz,即水流量每增大 3 m³/h,热泵 COP 分别增大 4.02%、2.48%和 2.15%;燃气流量为 150 m³/h 时,水流量每增大 3 m³/h,热泵 COP 分别增大 2.56%、2.14%和 1.65%;燃气流量为 160 m³/h 时,水流量每增大 3 m³/h,热泵 COP 分别增大 2.24%、1.93%和 1.26%;燃气流量为 170 m³/h 时,水流量每增大 3 m³/h,热泵 COP 分别增大 1.99%、1.35%和 1.05%。

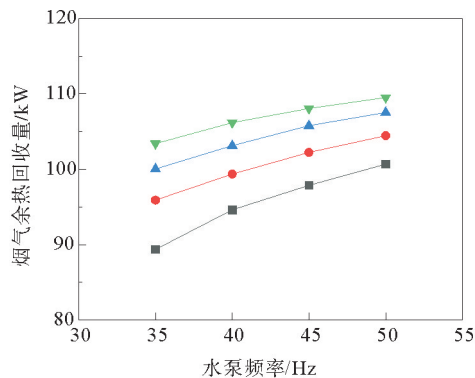


图9 不同蒸发器侧水流量下的烟气余热回收量
—■— 140 m³/h; —●— 150 m³/h; —▲— 160 m³/h; —▼— 170 m³/h

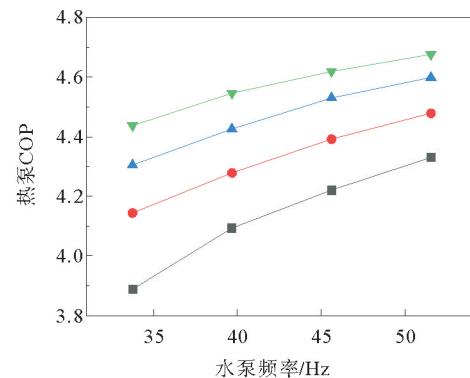


图10 不同蒸发器侧水流量下的热泵COP
—■— 140 m³/h; —●— 150 m³/h; —▲— 160 m³/h; —▼— 170 m³/h

不同蒸发器侧水流量下的热泵 EER 见图 11。

从图 11 中可以看出,随着蒸发器侧水流量的升高,热泵 EER 增大。以 35 Hz 时热泵 EER 为基准。燃气流量为 140 m³/h 时,水泵频率每增大 5 Hz,即水流量每增大 3 m³/h,热泵 EER 分别增大 3.12%、1.64%和 1.28%;燃气流量为 150 m³/h 时,水流量每增大 3 m³/h,热泵 EER 分别增大 1.6%、1.28%和 0.77%;燃气流量为 160 m³/h 时,水流量每增大 3 m³/h,热泵 EER 分别增大 1.14%、1.06%和 0.37%;燃气流量为 170 m³/h 时,水流量每增大 3 m³/h,热泵 EER 分别增大 0.98%、0.46%和 0.15%。

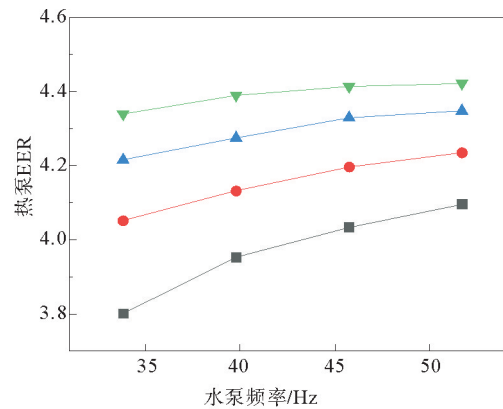


图 11 不同蒸发器侧水流量下的热泵EER
—■— 140 m³/h; —●— 150 m³/h; —▲— 160 m³/h; —▼— 170 m³/h

4 结论

本文基于青岛市某办公建筑燃气冷凝锅炉供热系统,搭建热泵式烟气余热回收系统实验台并制定实验方案,研究蒸发器出水温度和蒸发器侧水流量对烟气余热回收系统的影响,确定系统最佳工况。实验研究结论如下:

1) 不同蒸发器出水温度对系统性能的影响。当蒸发器出水温度升高时,烟气余热回收量增大,热泵 COP 增大。每升高 1 °C,烟气余热回收量增大 2.75%~3.46%,热泵 COP 增大 2.19%~2.86%。

2) 不同蒸发器侧水流量对系统性能的影响。当蒸发器侧水流量增大时,蒸发器出水温度升高,烟气余热回收量增大,热泵 COP 和 EER 增大。水泵频率每增大 5 Hz,即水流量每增大 3 m³/h,烟气余热回收量增大 1.33%~5.23%,热泵 COP 增大 1.05%~4.02%,热泵 EER 增大 0.15%~3.12%。

3) 在蒸发器侧水流量为 $29.5 \text{ m}^3/\text{h}$ (水泵频率 50 Hz)工况下,系统日平均烟气余热回收量为 $94.99 \sim 110.20 \text{ kW}$,月平均每日烟气余热回收量为 104.30 kW ,热泵 COP 为 $4.135 \sim 4.637$,热泵 EER 为 $4.080 \sim 4.323$ 。烟气余热回收后锅炉热效率可达 $110.32\% \sim 111.34\%$,锅炉提升热效率在 $6.32\% \sim 7.34\%$,平均锅炉提升热效率为 6.91% ,烟气余热利用效果显著。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国应对气候变化的政策与行动 2022 年度报告[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部,2022.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2022 annual report on China's policies and actions to responding climate change[R]. Beijing:Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China,2022.
- [2] 郝思斯. 积极稳妥推进碳达峰碳中和[N]. 中国纪检监察报,2022-03-15(005).
HAO Sisi. Actively and steadily promote carbon peaking and carbon neutrality[N]. China Discipline Inspection newspaper,2022-03-15(005).
- [3] 张群力,张秋月,曹明凯,等. 燃气锅炉烟气余热回收利用技术研究[J]. 建筑科学,2016,32(6):133-141.
ZHANG Qunli,ZHANG Qiuyue,CAO Mingkai,et al. Research on technologies for the recovery of the flue gas waste heat in gas boilers[J]. Building Science,2016,32(6):133-141.
- [4] 祝侃,夏建军,谢晓云,等. 吸收式热泵及直接接触换热在燃气锅炉全热回收中的应用[J]. 暖通空调,2013,43(9):111-115.
ZHU Kan,XIA Jianjun,XIE Xiaoyun,et al. Application of absorption heat pump and direct-contact heat transfer to total heat recovery for gas boiler[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2013,43(9):111-115.
- [5] 杨波,江亿,付林,等. 用于烟气全热回收的全开式吸收式热泵[J]. 东南大学学报(自然科学版),2018,48(5):789-793.
YANG Bo,JIANG Yi,FU Lin,et al. Full-open absorption heat pump for total heat recovery of flue gas[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2018,48(5):789-793.
- [6] WEI M,YUAN W,SONG Z,et al. Simulation of a heat pump system for total heat recovery from flue gas[J]. Applied Thermal Engineering,2015,86:326-332.
- [7] NIU Y,HUA J,FAN H. Optimization of solution heat exchanger of AHP in flue gas waste heat recovery[J]. Procedia Engineering,2017,205:477-484.
- [8] QU M,ABDELAZIZ O,YIN H. New configurations of a heat recovery absorption heat pump integrated with a natural gas boiler for boiler efficiency improvement[J]. Energy Conversion and Management,2014,87:175-184.
- [9] 穆连波,王随林,朱峰,等. 燃气锅炉烟气冷凝余热深度回收系统应用与节能分析[J]. 暖通空调,2020,50(12):65-69.
MU Lianbo,WANG Suilin,ZHU Feng,et al. Application and energy saving analysis of flue gas condensation waste heat deep recovery systems for gas-fired boilers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2020,50(12):65-69.
- [10] HEBENSTREIT B,SCHNETZINGER R,OHNMACHT R,et al. Techno-economic study of a heat pump enhanced flue gas heat recovery for biomass boilers[J]. Biomass and Bioenergy,2014,71:12-22.
- [11] 张迪,丁琦,魏巍,等. 水源热泵在燃气供热锅炉烟气余热回收中的应用[J]. 暖通空调,2018,48(4):57-60.
ZHANG Di,DING Qi,WEI Wei,et al. Application of water-source heat pump to waste heat recovery of gas-fired heating boilers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2018,48(4):57-60.
- [12] 张群力,张秋月,王明爽,等. 热泵型烟气冷凝余热回收系统实验研究[J]. 建筑科学,2021,37(6):150-154.
ZHANG Qunli,ZHANG Qiuyue,WANG Mingshuang,et al. Experimental study on heat pump type flue gas condensation waste heat recovery system[J]. Building Science,2021,37(6):150-154.
- [13] 李子豪. 燃气冷凝供热锅炉高效运行策略优化研究[D]. 天津:天津大学,2020.
LI Zihao. Optimization of high efficiency operation strategy for gas-fired condensing heating boiler[D]. Tianjin:Tianjin University,2020.
- [14] 付林,孙健,张世钢. 利用吸收式热泵回收烟气余热的集中供热系统:201110110470. X[P]. 2011-04-29.
FU Lin,SUN Jian,ZHANG Shigang. Central heating system using absorption heat pump to recover waste heat from flue gas:201110110470. X[P]. 2011-04-29.
- [15] 赵瑞昌,杨永安,赖锋. 压缩机频率对 R410A/R410A 复叠式制冷系统性能的影响[J]. 制冷学报,2019,40(2):95-99.
ZHAO Ruichang,YANG Yongan,LAI Feng. Effect of compressor frequency on the performance of R410A/R410A cascade refrigeration system[J]. Journal of Refrigeration,2019,40(2):95-99.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)