

# 燃煤发电机组耦合余热利用技术研究进展

郑明辉<sup>1</sup>, 刘蕊菁<sup>2</sup>, 王雪<sup>2</sup>, 赵晗<sup>2</sup>, 胡璿<sup>2</sup>, 王翔<sup>3,✉</sup>

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 河北保定 071003; 2. 河北师范大学中燃工学院, 河北石家庄 050024;  
3. 中国电子信息产业集团有限公司第六研究所, 北京 102209)

**摘要:** [目的]为实现燃煤发电机组进一步扩大其热电比的需求,结合原有机组特点耦合余热利用技术成为了有效方式之一。现有余热利用技术的适应特点以及调节能力具有较大差异。[方法]综合评述了几种余热回收利用方式,同时对比了其原理、优缺点,并通过介绍常用的评价指标进一步评述了当下余热回收技术的关注点。[结果]对于余热回收利用技术方式,目前主要有烟气余热回收,循环水余热回收,空气源余热回收,工业废气回收等方式。其温度区间分别为120~150℃、15~35℃、0~60℃、300℃以下。耦合余热利用技术的评价方法主要包括通过性能评价、经济性评价以及系统参数关联评价,其中以热耗、热效率等评价参数为主。[结论]文章给出了余热回收利用技术的发展方向及相关建议。耦合余热回收利用技术目前主要应用于热泵系统,在未来更高热电比需求下,采用冷端余热供热的低压缸改造技术将成为一大发展重点。

**关键词:** 燃煤发电机组; 热电比; 耦合余热利用技术; 技术经济评价; 发展方向

中图分类号: TM621; X783

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)03-0080-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Research Progress of Coupled Waste Heat Utilization Technology for Coal-Fired Power Generating Units

ZHENG Minghui<sup>1</sup>, LIU Ruijing<sup>2</sup>, WANG Xue<sup>2</sup>, ZHAO Han<sup>2</sup>, HU Yun<sup>2</sup>, WANG Xiang<sup>3,✉</sup>

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;  
2. College of Zhongran, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, Hebei, China;  
3. The 6<sup>th</sup> Research Institute of China Electronics Corporation, Beijing 102209, China)

**Abstract:** [Introduction] To realize the demand of further expanding the thermal power ratio of coal-fired power generating units, coupled waste heat utilization technology combined with the characteristics of the original units has become one of the effective ways. There are great differences in the adaptive characteristics and regulation capacity of the existing waste heat utilization technology. [Method] Several waste heat recovery and utilization methods were comprehensively reviewed and their principles, advantages and disadvantages were compared. Then the current focus of waste heat recovery technology was further reviewed by introducing common evaluation indicators. [Result] For waste heat recovery and utilization technology, there are mainly flue gas waste heat recovery, recycling water waste heat recovery, air source waste heat recovery, industrial waste gas recovery, and so on. The temperature ranges are 120~150℃, 15~35℃, 0~60℃, and below 300℃, respectively. The evaluation methods of coupled waste heat utilization technology mainly include performance evaluation, economic evaluation, and system parameter correlation evaluation, among which the evaluation parameters such as heat consumption and thermal efficiency are the main ones. [Conclusion] The development direction and relevant suggestions of waste heat recovery and utilization technology are pointed out. At present, coupled waste heat recovery and utilization technology is mainly used in the heat pump system. Under the demand for a higher thermal power ratio in the future, the low-pressure cylinder transformation technology using cold end waste heat heating will become a major development focus.

**Key words:** coal-fired power generating unit; thermal power ratio; coupled waste heat utilization technology; technical and economic evaluation; development direction

收稿日期: 2022-04-05 修回日期: 2022-04-14

基金项目: 山东省自然科学基金“CO氧化原位加热辅助脱硝及其温度/反应的双向调控机制研究”(ZR2021QE066)

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

温室效应导致的全球变暖问题增加了碳减排的紧迫性,深化碳减排的阶段性指标已成为国际社会的共识。为实现这一战略目标,中国政府提出了“碳达峰、碳中和”目标,力争使CO<sub>2</sub>排放于2030年前达到峰值,在2060年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。为推进和落实这一目标的实现,出台的《碳排放权交易管理条例》已将碳排放总量控制纳入国家应对气候变化立法体系。国务院发布的《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》文件指出,中国将大力发展可再生能源发电,加快向低碳化社会转型的进程。

当前,虽然我国已有部分核电机组,但是火电燃煤机组仍占领电力的大部分市场。其中燃煤热电联产机组由于其具有能量高效利用的特点而被我国电力系统广泛应用。然而,可再生能源的不确定性和波动性对现有燃煤机组的灵活性提出了更高的要求。近年来,我国北方部分地区供暖季供热需求不断增加,加剧了燃煤热电联产机组的热负荷需求。但是,“以热定电”的生成模式大大降低了系统的灵活调节能力。另一方面,随着我国北方地区冬季供热需求的不断增加,增加了热电联产机组的供热负荷,但传统的“以热定电”运行模式大大降低了系统发电灵活性<sup>[2]</sup>。我国以煤电为主的火电机组灵活性不足,在调峰深度、爬坡速度、快速启停等方面有很大提升空间。现有提高燃煤热电联产系统灵活性的技术主要包括大型储热技术、汽轮机改造技术、锅炉低负荷运行技术、余热回收技术和一次调频技术<sup>[3]</sup>等。其中,余热回收技术主要是通过燃煤机组冷端余能供热改造,打破原有的热电耦合比例,达到降低电负荷,提高热负荷的双重应用价值。冷端余能供热方式包括高背压汽轮机、热泵余热回收、低压缸“零出力”3种供热改造方式<sup>[4]</sup>。王力等<sup>[5]</sup>针对某300 MW供热机组的汽轮机特性及其所在热电厂的供热背景,分析了高背压改造存在的关键技术问题,提出了汽轮机本体及主要辅机的改造方案;汪可等<sup>[6]</sup>以350 MW超临界供热机组为模型,设计并计算了低压缸“零出

力”运行前后的经济性指标,结果发现低压缸“零出力”可以使得电负荷降低8%,热负荷提升27%,具有良好的经济效益;研究发现,热电联产系统中,储热利用装置和电驱动压缩式热泵的引入都可增加对风电的消纳,但是电驱动压缩式热泵引入后余热回收利用的效果更好,利用现有的区域供热网络可以实现最佳的风电集成<sup>[7]</sup>。

为此,本文将对余热利用技术的分类、参数及评价,以及其未来发展前景和相关建议几个方面进行归纳整理,期望为耦合先进余能利用的燃煤发电机组开发提供参考。

## 1 余热利用技术分类

现有的余热利用技术主要包括烟气余热回收、循环水余热回收、空气源余热回收。各个余热利用技术的余热来源与余热源温度如表1所示。

表1 余热回收技术对比

Tab. 1 Comparison of waste heat recovery technologies

余热回收种类	余热来源	余热源温度	参考文献
烟气余热回收	120~150℃烟气	120~150℃	[8]
循环水余热回收	循环冷却水	15~35℃	[9]
空气源余热回收	60℃以下的烟气	0~60℃	[10]
工业废热回收	高温烟气余热、化学反应余热、可燃气体余热以及高温产品余热(低温热源或者略高于环境温度的废热)	300℃以下	[11]

烟气余热回收的热源为锅炉尾部排放的120~150℃左右的烟气,通过换热器加热冷流体从而达到余热回收的目的。通过烟气余热回收技术理论上可以使得锅炉热效率在原有基础上提升15%左右<sup>[12]</sup>,但由于烟气的腐蚀性,需要定期对换热设备进行防腐处理。

循环水余热回收利用的是循环冷却水的热量,通过热泵加热热网系统的回水,然后通过热网加热器供给热用户,循环水余热回收技术回收了需要通过冷却塔散失的热量,这表明采用余热回收后循环水不需要冷却塔的冷却,减少了循环水的蒸发损失。同时,若采用弃风电为热泵供电则可节水3.64 t/MWh,

提升全厂的能源利用效率<sup>[13]</sup>。

空气源余热回收技术的主要热源为 0~60℃ 的烟气,通过空压机将烟气中的热量提取出来用于预热锅炉的循环水,达到余热回收的目的<sup>[14]</sup>。

余热锅炉本质上是一个气-水/蒸汽的换热器,利用高温烟气余热、化学反应余热、可燃气体余热及高温产品余热等,生产蒸汽或热水,用于工艺流程或进入管网供热<sup>[15]</sup>。

吸收式制冷技术遵循“发生(解析)—冷凝—蒸发—吸收(吸附)”的循环过程,以溴化锂水溶液为工质的吸收式制冷系统应用广泛,该技术采用低品位热能为驱动力,但是实际应用时其性能系数 COP 远低于压缩式制冷系统。并且,如果制冷系统的工质采用的天然制冷剂是具有显著的环保效益的。

对于工业中大量废弃的 200℃,甚至 300℃ 以下的低温余热,目前无法利用蒸汽/热水闪蒸系统进行有效回收,更适宜采用经济可行的有机朗肯循环余热发电技术。这是因为工质温度与低温热源换热平均温差大,则不可逆损失较大。为了减小换热不可逆损失,提出了改进的方法,如 Kalina 循环等。Kalina 循环是以氨水混合物为工质的循环系统,最简单的热力循环是一级蒸馏循环,一定浓度的氨水溶液经过水泵加压、预热器升温之后,进入余热锅炉蒸发,形成过热氨水蒸汽进入透平膨胀做功,然后利用复杂的蒸馏冷却子系统解决氨水混合物冷凝问题,使透平乏汽重新形成一定浓度的工质溶液,再到达给水泵,完成一个循环。

简化的余热回收系统示意图如图 1 所示,一个基础的余热系统一般由凝汽器、热泵、蒸发器和换热器组成<sup>[15]</sup>,余热回收系统回收烟气、循环水或其他热源的余热并与换热工质进行热交换,并将重新加热的工质送入炉膛或热网水中,无法再利用的废热则排出至环境中。

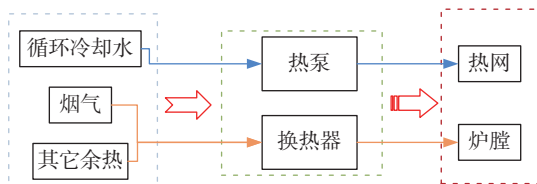


图 1 余热回收系统图

Fig. 1 Waste heat recovery system diagram

## 2 余热回收技术的评价参数

目前对余热回收技术评价参数主要包括性能评价、经济性评价以及系统参数关联评价。其中性能评价包括除尘效率、除湿效率、排烟温度、烟气中氧含量、烟气中液气比、烟气中硫含量等;经济性评价包括锅炉效率、热耗、发电煤耗等;系统参数关联价包括热效率、烟效率、能级等。评价参数与余热回收技术对应情况如表 2 所示。

表 2 余热回收技术种类及其评价参数

Tab. 2 Waste heat recovery technology types and their evaluation parameters

报道年份	余热源种类	回收方式	采用评价参数	参考文献
2017	高温烟气余热	余热锅炉	除尘效率、除湿效率	[16]
2017	烟气余热	烟气余热回收	热耗、发电煤耗	[17]
2019	烟气余热	烟气余热回收	烟气中液气比	[18]
2020	烟气余热	烟气余热回收	烟气中硫含量	[19]
2021	烟气余热	烟气余热回收	烟气中氧含量	[20]
2021	烟气余热	烟气余热回收	排烟温度	[10]

例如,张翼等<sup>[10]</sup>以单位装机容量为 1 MW 的风电功率为最小计算单元,观察抽凝机组每分钟为数据点的变化特性,采用风电特性进行评价时,可以发现,风电功率的特点为其变化范围可从几乎为零开始到全功率运行。因此可以证明,为进一步降低抽凝机组的能量消耗更多地需考虑对风电的消纳能力。李美军等<sup>[21]</sup>采用脱硫技术和低氧燃烧技术对烟气余热回收系统中的余热源进行余热回收,通过烟气中硫含量和氧含量为评价参数进行研究,发现降低硫含量和氧含量后,设备上提高金属壁温降低液态水析出,将烟气低温露点腐蚀破坏程度降到最低,对于余热回收有很大的帮助。

## 3 耦合储热型余热回收利用系统

目前关于余热回收利用系统的一个研究热点是如何进一步的提高余热回收效率。传统余热回收技术的发展已经趋于成熟,如何进一步挖掘回收潜力是亟待解决的问题。通过将余热回收系统与储热装置进行耦合可以加大对余热的利用,尤其是低温余热的回收,因此,耦合余热装置的余热系统的研究已成为一个新的研究热点<sup>[22]</sup>。

烟气余热回收系统如图 2 所示。能源设备中,

很大部分是由燃烧燃料来获取能量。烟气排放是主要的热损失之一。排放温度越高,热损失就越大。考虑热损失时,一般都以燃料的低位发热量来计算热损失。在排烟热损失中,它不仅与排烟温度有关,而且还与排烟处的过量空气系数有关,过量空气系数越大,则热损失越大。低温烟气热量回收就是要将排烟温度降至最佳状态,使投资成本与回收成本(包括回收的经济效益与排放效益)达到最优性价比。在回收烟气中的热量时,尽量能回收烟气中的汽化潜热,减少烟气的热损失和二氧化碳排放量。甄浩然等<sup>[23]</sup>就工程实践中热泵与锅炉容量不匹配的问题提出了储热技术耦合热泵系统的方案,通过运行数据对比,结果发现增加储热系统后,排烟温度下降至22.31℃,热泵运行时间增加了20%。Ouyang Tiancheng等<sup>[24]</sup>通过研究船用发动机的余热利用过程,结果发现采用蓄热装置可以很好的节约燃料,降低燃料成本。郭璞维等<sup>[25]</sup>对多种储能技术与烟气余热回收系统的耦合的可行性进行了研究,结果发现烟气余热回收系统耦合压缩空气储能应用前景广阔,具有较大的发展潜力。

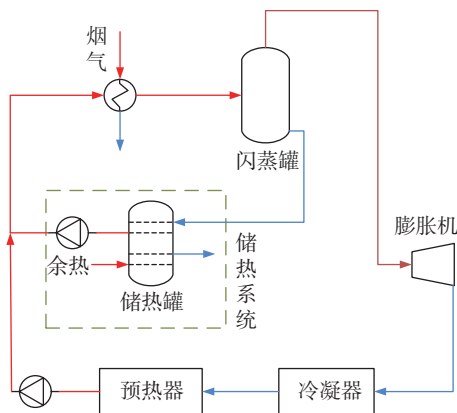


图2 烟气余热回收系统图

Fig. 2 Flue gas waste heat recovery system diagram

#### 4 发展方向与相关建议

目前对耦合余热回收技术的研究目的主要是余热回收利用率的提高,研究关注的要点主要包括热泵系统、朗肯循环等方向。

##### 1) 采用新型热泵系统

热泵系统作为最主要的制热设备,提高其制热效率对发电机组的余热回收利用具有重要意义。例如,刘媛媛等<sup>[26]</sup>对我国北方某200 MW燃煤发电厂

典型热泵供暖系统的节能潜力进行了研究。结果表明,二次换热器的损失占系统总损失的48.6%,热泵制热容量仅占系统总制热容量的63.9%。为此,提出了一种由两级一级溴化锂吸收式热泵串联并联组成的新型系统。刘海云等<sup>[27]</sup>采用层次分析法对唐山某矿区的多种余热资源进行了模拟优化,得出采用多源耦合热泵系统代替锅炉房供暖,既能满足矿区供热需求,又可以达到绿色环保、节能减排目的的重要结论。

##### 2) 朗肯循环的优化

通过采用有机朗肯循环或将朗肯循环与ECCS系统耦合都可以使得机组有效的提高余热回收率。杨灿等<sup>[28]</sup>在基于GT-SUITE的重型柴油机—有机朗肯循环—冷却系统的仿真平台上,讨论了朗肯循环系统产生的功率与冷却系统散热功率的损益关系,并提出了改进的方向,并且从宏观趋势上预测了提高系统净功率输出的可能性和潜力。Liang Youcai等<sup>[29]</sup>提出了一种基于蒸汽朗肯循环和吸收式制冷系统耦合的ECCS系统,用于回收船用发动机的余热。通过发电量、制冷量、等效发电量、效率和等效热效率来评估ECCS的性能。模拟结果表明,恢复吸收式制冷循环的膨胀功是以降低制冷量为代价提高发电量的有效途径。WHR系统的等效电输出为5.223 MW,占船用发动机额定功率输出的7.61%。

##### 3) 多种余热回收技术方案应用

学者们从燃烧方式、排烟温度等角度出发,展开研究,为燃煤机组耦合先进余热回收技术提高机组的余热回收率提出了多种技术路线和解决方案。Timothy J<sup>[30]</sup>研究发现,通常导致发动机效率提高的发动机基本参数(即压缩比的增加、燃油空气等效比的降低和尾气再循环水平的提高)会导致尾气(烟)的减少,从而降低废热回收系统的效率和最大功率容量;而新的燃烧模式(如LTC)的应用可以提高废热回收。又如齐震等<sup>[31]</sup>以某660 MW二次再热机组为例,分析了3种余热利用方案下系统机组的关键参数特性及节能收益,结果表明:将排烟温度降低至90℃,相比于案例机组,机炉深度耦合余热利用方案的发电煤耗降低2.76 g/kWh,节能效果显著;而低温省煤器和旁路烟道余热利用方案的节能效果分别为1.08 g/kWh、2.00 g/kWh;同时,应用图像焓分析法(EUD)对各余热利用方案的节能原理进行分析,

在相同的烟气放热条件下,机炉深度耦合方案的火用效率达 89.29%,高出低温省煤器方案和旁路烟道方案 7.77% 和 2.32%,因而节能效果最为显著。AnkitMoldgy 等<sup>[32]</sup>提出应用相变材料作为余热回收系统中的蓄热材料,并通过实验发现采用相变材料可以极大的提高传热效率,缩短余热回收系统的反应时间。王军御等<sup>[33]</sup>使用离子液体作为余热回收系统中的换热材料,通过实验发现,采用离子液体可以将系统换热率提高至 41.37%,并且离子液体还具有良好的热稳定性。吴彦丽等<sup>[34]</sup>针对供热回水温度高于烟气露点温度和传统烟气余热回收技术的烟气余热回收能力有限的问题,提出利用烟气源/水源 CO<sub>2</sub> 热泵回收燃气锅炉的烟气余热的方案,并对系统效率和天然气消耗以及 CO<sub>2</sub> 热泵供热系数对系统效率和燃料储蓄率的影响规律进行了分析,结果表明,废

热回收烟气 CO<sub>2</sub> 源热泵的供暖系统方案可以提高系统效率超过 12.54%,高出 0.50% 的废热回收方案水源 CO<sub>2</sub> 热泵,以及每年天然气的消耗量可以节省 13.87% ~ 17.88%;当 CO<sub>2</sub> 热泵的制热系数较小时,有利于提高燃油的节气。

综上所述,耦合余热回收利用技术目前主要应用于热泵系统,未来通过对热泵系统的不断改进,余热回收利用率有望提升。而冷端余热供热的另一大改造方式——低压缸供热改造,通过切除低压缸进汽可大量回收中压缸排汽余热且汽轮机本体基本不需要改造,运行维护费用低,投资少,供热经济性好,运行方式灵活。但其仍处于试探性研究阶段,没有长期运行的经验,因而对低压缸供热改造也是未来研究发展的一大热点。燃煤发电机组耦合先进余热回收技术发展历程如图 3 所示。

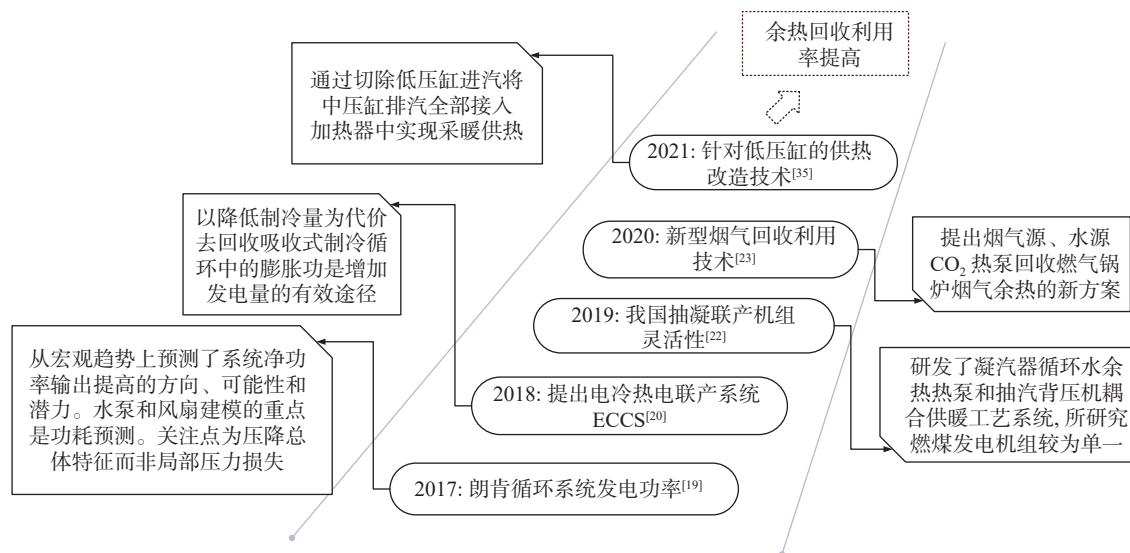


图 3 燃煤发电机组耦合先进余热回收技术发展历程

Fig. 3 Development history of advanced waste heat recovery technology for coal-fired power generating unit

## 5 结论

先进的余热回收技术在烟气回收等方面已取得较大的进展,但是在深度调峰、能源利用率等方面仍需进一步改进。本文首先综述了余热利用技术的分类:烟气余热回收、循环水余热回收、空气源余热回收。工业余热回收技术主要包括热交换技术、热功转换技术、余热制冷制热技术。总结了余热回收技术的评价参数,目前对余热回收技术评价参数主要包括性能评价、经济性评价以及系统参数关联评价。其中性能评价参数主要有:除尘效率、除湿效率、

排烟温度、烟气中硫含量、烟气中氧含量、烟气中液气比等;经济性评价参数主要有锅炉效率、热耗、发电煤耗等;系统参考关联评价主要有热效率、烟效率、能级等。最后介绍了耦合余热回收技术的发展方向及相关建议。期望本研究能够为燃煤发电机组耦合先进余热利用技术的发展提供有用的价值。

### 参考文献:

- [1] 国家电网报. 国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案 [N]. 国家电网报, 2021-03-02 (001).  
State Grid News. State Grid Corporation of China released an

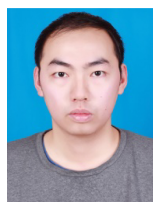
- action plan on peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality [N]. State Grid News, 2021-03-02 (001).
- [2] 裴玥瑶,杜欣慧,李钢,等.考虑需求响应和风电供热的电热联合优化调度[J].太原理工大学学报,2020,51(6):867-873. DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2020.06.013.  
PEI Y Y, DU X H, LI G, et al. Optimal dispatch of combined heat and power systems considering demand response and wind power heating [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(6): 867-873. DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2020.06.013.
- [3] 袁春峰,刘锴慧,张帆,等.火电机组一次调频技术研究进展综述[J/OL].南方能源建设:1-9.(2022-02-17)[2022-04-04]. <https://www.energychina.press/cn/article/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.001>.  
YUAN C F, LIU K H, ZHANG F, et al. Review on the research progress of primary frequency modulation technology for thermal power units [J/OL]. Southern Energy Construction: 1-9. (2022-02-17) [2022-04-04]. <https://www.energychinapress/cn/article/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.001>.
- [4] 方旭,彭雪风,张凯,等.燃煤热电联产系统冷端余热供热改造研究进展[J].华电技术,2021,43(3):48-56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.03.008.  
FANG X, PENG X F, ZHANG K, et al. Development of heating retrofit using waste heat from coal-fired CHP system cold end [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 48-56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.03.008.
- [5] 王力,陈永辉,李波,等.300MW机组高背压供热改造方案及试验分析[J].汽轮机技术,2018,60(5):385-388. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2018.05.019.  
WANG L, CHEN Y H, LI B, et al. Reconstruction scheme and test analysis for heating supply with high back pressure of a 300 MW unit [J]. Turbine Technology, 2018, 60(5): 385-388. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2018.05.019.
- [6] 汪可,田亮.供热机组低压缸零出力工况下热经济性分析[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版):1-7.(2022-01-13)[2022-04-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20220112.1724.004.html>.  
WANG K, TIAN L. Thermal economy analysis of heating unit under zero-output condition of low pressure cylinder [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition): 1-7. (2022-01-13) [2022-04-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20220112.1724.004.html>.
- [7] WANG J D, ZHOU Z G, ZHAO J N, et al. Improving wind power integration by a novel short-term dispatch model based on free heat storage and exhaust heat recycling [J]. Energy, 2018(160): 940-953. DOI: 10.1016/j.energy.2018.07.018.
- [8] 陈云峰.燃煤电厂烟气余热利用节能及环保技术研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017. DOI: 10.7666/d.Y3263175.  
CHEN Y F. Research on the use of energy-saving and environmental protection technologies for flue gas waste heat in coal-fired power plants [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. DOI: 10.7666/d.Y3263175.
- [9] 刘彦.低温循环水余热回收供暖技术[J].煤炭与化工,2014,37(7):129-131.  
LIU Y. Low-temperature circulating water waste heat recovery heating technology [J]. Coal and Chemical Industry, 2014, 37(7): 129-131.
- [10] 张翼,魏书洲,任学武,等.风电-抽凝机组耦合系统供暖方案研究[J].热力发电,2021,50(11):54-60+67. DOI: 10.19666/j.rlfid.202106111.  
ZHANG Y, WEI S Z, REN X W, et al. Heat supply schemes for a coupling system of condensing unit and wind power [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 54-60+67. DOI: 10.19666/j.rlfid.202106111.
- [11] 连红奎,李艳,束光阳子,等.我国工业余热回收利用技术综述[J].节能技术,2011,29(2):123-128. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2011.02.006.  
LIAN H K, LI Y, SHU G Y Z, et al. An overview of domestic technologies for waste heat utilization [J]. Energy Conservation Technology, 2011, 29(2): 123-128. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2011.02.006.
- [12] 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. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2016.06.22.  
ZHANG Q L, ZHANG Q Y, CAO M K, 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. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2016.06.22.
- [13] 高智溥,万逢芳,刘岩,等.耦合弃风和循环水余热的供热系统[J].分布式能源,2017,2(3):1-7. DOI: 10.16513/j.cnki.10-1427/tk.2017.03.001.  
GAO Z P, WAN K F, LIU Y, et al. Heat supply system coupling wind curtailment with waste energy in cooling water [J]. Distributed Energy, 2017, 2(3): 1-7. DOI: 10.16513/j.cnki.10-1427/tk.2017.03.001.
- [14] 原宇豪.浅谈几种余热回收系统及其应用[J].能源与节能,2019(12):53-55+58. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2019.12.023.  
YUAN Y H. Discussion on several waste heat recovery systems and the application [J]. Energy and Conservation, 2019(12): 53-55+58. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2019.12.023.
- [15] 李彦峰,马晓菲.供热系统烟气余热及循环水余热回收方案设计[J].应用能源技术,2015(7):16-20. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2015.07.005.  
LI Y F, MA X F. Scheme design of heat recovery of flue gas

- waste heat and circulating water in heating system [J]. *Applied Energy Technology*, 2015(7): 16-20. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2015.07.005.
- [16] 张诗宜. 烟气净化及余热回收系统优化与评价研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2018.000657.
- ZHANG S Y. Study on optimization and evaluation of flue gas purification and waste heat recovery system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2018.000657.
- [17] 刘永林, 屈杰, 周科, 等. 烟气余热回收利用系统节能效果试验研究 [J]. *热能动力工程*, 2017, 32(4): 76-79. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2017.04.011.
- LIU Y L, QU J, ZHOU K, et al. Experimental study on the energy-saving of flue gas waste heat utilization systems [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*. 2017, 32(4): 76-79. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2017.04.011.
- [18] 刘哲毅. 燃煤烟气余热回收用于集中供热的系统分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003032.
- LIU Z Y. System analysis of coal-fired flue gas waste heat recovery for central heating [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003032.
- [19] 徐承美, 谢英柏, 弓学敏. 燃煤锅炉烟气余热利用途径分析 [J]. *热能动力工程*, 2020, 35(8): 151-157. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.08.020.
- XU C M, XIE Y B, GONG X M. Analysis on utilization of waste heat from flue gas of coal-fired boiler [J]. *Thermal Power Engineering*, 2020, 35(8): 151-157. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.08.020.
- [20] 侯岩, 高杰, 任向东, 等. 烟气余热回收中节能设备的应用 [J]. *石油和化工设备*, 2021, 248(1): 96-98. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8980.2021.01.028.
- HOU Y, GAO J, REN X D, et al. Application of energy saving equipment in flue gas waste heat recovery [J]. *Petroleum and Chemical Equipment*, 2021, 248(1): 96-98. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8980.2021.01.028.
- [21] 李美军. 燃煤工业锅炉余热利用技术及原则概述 [J]. *工业炉*, 2021, 43(1): 6-10+16. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6988.2021.01.002.
- LI M J. Overview of waste heat utilization technology and principles of coal-fired industrial boilers [J]. *Industrial Boilers*, 2021, 43(1): 6-10+16. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6988.2021.01.002.
- [22] 王铁民, 郭朋. 钢铁企业余热利用优化运行实践与探索 [J]. *冶金动力*, 2019(12): 6-9. DOI: 10.13589/j.cnki.yjdl.2019.12.003.
- WANG T M, GUO P. Practice and exploration of optimizing operation of waste heat utilization in steel enterprises [J]. *Metallurgical Power*, 2019(12): 6-9. DOI: 10.13589/j.cnki.yjdl.2019.12.003.
- [23] 甄浩然, 冯文亮, 王帅. 热水储热技术在烟气余热回收中的应用效果分析 [J]. *区域供热*, 2020(5): 150-153+158. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2020.05.023.
- ZHEN H R, FENG W L, WANG S. Analysis of application effect of hot water storage technology in flue gas waste heat recovery [J]. *District Heating*, 2020(5): 150-153+158. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2020.05.023.
- [24] OUYANG T C, WANG Z P, ZHAO Z K, et al. An advanced marine engine waste heat utilization scheme: electricity-cooling cogeneration system integrated with heat storage device [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021(235): 113955. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.113955.
- [25] 郭璞维, 彭跃, 邓靖敏, 等. 烟气余热回收与储能技术耦合应用的可行性研究 [J]. *华电技术*, 2021, 43(9): 62-68. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.09.008.
- GUO P W, PENG Y, DENG J M, et al. Feasibility study on the coupling application of flue gas waste heat recovery and energy storage technology [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(9): 62-68. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.09.008.
- [26] 刘媛媛, 隋军, 刘浩. 燃煤热电厂串并联耦合吸收式热泵供热系统研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(22): 6148-6155. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160674.
- LIU Y Y, SUI J, LIU H. Research on heating system of serial-parallel coupling absorption heat pump for coal fired power plants [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(22): 6148-6155. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160674.
- [27] 刘海云, 李海英, 姬爱民. 煤矿多源耦合热泵进行余热回收方案的研究 [J]. *节能*, 2015, 34(1): 26-29+2. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7948.2015.01.006.
- LIU H Y, LI H Y, JI A M. Research on the multi coupled heat pump system in coal mine [J]. *Energy Conservation*, 2015, 34(1): 26-29+2. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7948.2015.01.006.
- [28] 杨灿, 谢辉, 周奎, 等. 柴油机有机朗肯循环余热回收系统的耦合效应 [J]. *内燃机学报*, 2017, 35(5): 452-459. DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.201705063.
- YANG C, XIE H, ZHOU K, et al. Coupling effects between a diesel engine and a subordinate ORC exhaust heat recovery system [J]. *Transactions of Csice*, 2017, 35(5): 452-459. DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.201705063.
- [29] LIANG Y C, SHU G Q, TIAN H, et al. Investigation of a cascade waste heat recovery system based on coupling of steam Rankine cycle and NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O absorption refrigeration cycle [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018(166): 697-703. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.04.064.
- [30] TIMOTHY J. Waste heat recovery potential of advanced internal combustion engine technologies [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2015, 137(4): 042004. DOI: 10.1115/1.

- 4030108.
- [31] 齐震, 陈衡, 徐钢, 等. 二次再热机组烟气余热利用热力学分析及优化 [J]. *电力科技与环保*, 2019, 35(2): 1-7. DOI: [10.3969/j.issn.1674-8069.2019.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8069.2019.02.001).
- QI Z, CHEN H, XU G, et al. Thermodynamic analysis and optimization of flue gas waste heat utilization of secondary reheating unit [J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2019, 35(2): 1-7. DOI: [10.3969/j.issn.1674-8069.2019.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8069.2019.02.001).
- [32] MOLDGY A, PARAMESHWARAN R. Study on thermal energy storage properties of organic phase change material for waste heat recovery applications [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(8): 16840-16848. DOI: [10.1016/j.matpr.2018.05.137](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.05.137).
- [33] 王军御, 刘汉涛, 梁骁聪. 基于离子液体的烟气余热回收存储系统研究 [J]. *机械设计与制造工程*, 2021, 50(4): 97-100. DOI: [10.3969/j.issn.2095-509X.2021.04.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-509X.2021.04.021).
- WANG J Y, LIU H T, LIANG X C. Research on waste heat recovery and storage system of flue gas based on ionic liquid [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2021, 50(4): 97-100. DOI: [10.3969/j.issn.2095-509X.2021.04.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-509X.2021.04.021).
- [34] 吴彦丽, 陈赞林, 赵子萱, 等. CO<sub>2</sub>热泵耦合燃气锅炉供暖系统研究 [J]. *热力发电*, 2021, 50(5): 133-138. DOI: [10.19666/j.rlfid.202008242](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202008242).
- WU Y L, CHEN Z L, ZHAO Z X, et al. Research on CO<sub>2</sub> heat pump coupled gas boiler heating system [J]. *Thermal power generation*, 2021, 50(5): 133-138. DOI: [10.19666/j.rlfid.202008242](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202008242).
- [35] 刘永. 600 MW超临界机组抽汽供热改造在工业供热中的应用分析 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021. DOI: [10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001425](https://doi.org/10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001425).
- LIU Y. Analysis of the application of 600MW supercritical unit in industrial heat supply [D]. Xuzhou: China University of

Mining and Technology, 2021. DOI: [10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001425](https://doi.org/10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001425).

#### 作者简介:



郑明辉

郑明辉 (第一作者)

1999-, 男, 四川泸州人, 能源与动力工程专业本科在读 (e-mail) [proveash@ncepu.edu.cn](mailto:proveash@ncepu.edu.cn)。

#### 刘蕊菁

2002-, 女, 河北衡水人, 建筑环境与能源应用工程专业本科在读 (e-mail) [lrj\\_2002@163.com](mailto:lrj_2002@163.com)。

#### 王雪

2001-, 女, 河北衡水人, 建筑环境与能源应用工程专业本科在读 (e-mail) [2783085638@qq.com](mailto:2783085638@qq.com)。

#### 赵晗

2001-, 女, 河北邯郸人, 建筑环境与能源应用工程专业本科在读 (e-mail) [3511154364@qq.com](mailto:3511154364@qq.com)。

#### 胡望

2002-, 男, 浙江杭州人, 建筑环境与能源应用工程专业本科在读 (e-mail) [2508448322@qq.com](mailto:2508448322@qq.com)。



王翔

王翔 (通信作者)

1989-, 男, 山东淄博人, 工学博士, 博士后, 高级工程师, 主要从事多场协同下燃煤污染物协同脱除及系统优化设计研究 (e-mail) [wangxiang\\_1113@126.com](mailto:wangxiang_1113@126.com)。

(编辑 叶筠英)