

DOI: 10.19666/j.rlfed.202405101

煤电饱和烟气余热集中供暖系统特性分析

陈 鸥¹, 滕 达^{1,2}, 路光杰¹, 刘向辉¹, 毕冬雪¹, 韵 潇¹

(1. 国能龙源环保有限公司, 北京 100039;

2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 100096)

[摘 要] 燃煤电站锅炉尾部饱和烟气直接排放会导致大量的低品位余热损失。构建了饱和烟气余热回收集中供暖系统, 分析了燃煤电站供暖抽汽参数, 验证了饱和烟气余热用于加热供热管网回水的可行性, 探究了以不同目标运行时集中供暖系统的经济效益, 揭示了运行参数对集中供暖系统热力性能的影响特性。结果表明: 以饱和烟气余热作为吸收式热泵的低温热源, 经吸收式热泵回收的烟气余热温度可提升 30~40 °C; 以 350 MW 供热机组为例, 吸收式热泵回收再利用饱和烟气余热为 50.23 MW, 提升供暖能力带来的经济效益明显优于增加发电量对应的经济效益, 机组供热能力可提高 13.4%, 年度供暖收益新增 1 975.20~3 442.32 万元。研究成果可为燃煤电站饱和烟气余热回收再利用提供技术参考。

[关 键 词] 湿饱和烟气; 余热回收; 吸收式热泵; 供暖抽汽; 集中供暖; 热力分析

[引用本文格式] 陈鸥, 滕达, 路光杰, 等. 煤电饱和烟气余热集中供暖系统特性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 102-111. CHEN Ou, TENG Da, LU Guangjie, et al. Characteristics analysis for centralized heating system using saturated flue gas waste heat in coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 102-111.

Characteristics analysis for centralized heating system using saturated flue gas waste heat in coal-fired power plants

CHEN Ou¹, TENG Da^{1,2}, LU Guangjie¹, LIU Xianghui¹, BI Dongxue¹, YUN Xiao¹

(1. China Energy Longyuan Environmental Protection Co., Ltd., HN Energy Investment Group, Beijing 100039, China;

2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 100096, China)

Abstract: Direct discharging of saturated flue gas from coal-fired utility boiler can lead to significant low-grade waste heat loss. The saturated flue gas waste heat recovery and utilization for centralized heating system is constructed, the operating parameters of the heating system in coal-fired power plant are analyzed, and the feasibility that the saturated flue gas waste heat can be used to heat the return water of the heating system is verified. Finally, the economic efficiency of the centralized heating system is investigated for operation with different targets, and the influence characteristics of the operating parameters are revealed for the thermal performance of the centralized heating system. The research results show that, the temperature of flue gas waste heat can be increased by 30~40 °C by absorption heat pump. With the 350 MW coal-fired heating unit as an example, the absorption heat pump recovers the saturated flue gas waste heat with 50.23 MW for re-utilization. The economic benefits brought by enhancing the heating capacity are significantly better than those corresponding to the increase in power generation, and the heating capacity of the coal-fired power plant is increased by 13.4%, and the annual heating revenue is increased by 19 752 000~34 423 200 yuan. The research provides technical references for the saturated flue gas waste heat recovery and utilization in coal-fired power plants.

Key words: wet saturated flue gas; waste heat recovery; absorption heat pump; heating vapor extraction; centralized heating; thermodynamic analysis

收稿日期: 2024-05-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3701503); 龙源环保科技项目(LYHB-23-02); 科环集团科技项目(KH-2023-15)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2022YFC3701503); Technology Program of Longyuan Environmental (LYHB-23-02); Technology Program of Technology & Environment Limited (KH-2023-15)

第一作者简介: 陈鸥(1979), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为燃煤电站烟气污染物综合治理, 12091808@ceic.com。

通信作者简介: 滕达(1992), 男, 博士后, 主要研究方向为燃煤电站烟气水分及余热回收利用技术, tengda8013@163.com。

截至 2023 年底, 全国全口径发电装机容量 29.2 亿 kW, 同比增长 13.9%; 火电装机容量 13.9 亿 kW, 占总发电装机容量的 47.6%, 其中煤电装机容量 11.6 亿 kW, 占总发电装机容量的 39.9%; 水电装机容量 4.2 亿 kW, 占总发电装机容量的 14.4%; 风电装机容量 4.4 亿 kW, 占总发电装机容量的 15.1%; 太阳能发电装机容量 6.1 亿 kW, 占总发电装机容量的 20.9%; 可再生能源发电装机容量首次超过火电。考虑到可再生能源发电过程的间歇性对电网稳定性造成的不利影响, 需要充分发挥煤电基础性调节作用, 统筹电力保供和减污降碳^[1-4]。根据最新统计数据, 2023 年煤电机组以不到四成的装机容量供应了六成的发电量, 可见其电力地位依然十分重要。因此, 深入开展燃煤电站节能降耗技术研究对提高电煤利用效率, 降低煤炭资源消耗量, 构建新型电力系统具有重要意义^[5-6]。

目前, 大型燃煤电站煤粉炉的热效率普遍达到 90% 以上^[7-9], 排烟热损失是制约锅炉效率提升的关键因素^[10]。同时为优化环境治理, 我国已完成超低排放改造煤电装机容量 10.5 亿 kW, 建成了全球最大的清洁能源体系。燃煤电站锅炉尾部烟气经石灰石-石膏浆液脱除烟气中硫氧化物, 同时吸收脱硫浆液中水分, 温度降低至湿饱和状态, 最终经烟囱排向大气^[11-13]。湿法脱硫塔出口饱和烟气温度普遍居于 50~53 °C, 且大部分烟气余热以水蒸气汽化潜热的形式存在, 导致对饱和烟气余热回收再利用的技术与场景选取十分困难^[14]。针对燃煤电站饱和烟气余热的回收技术主要有冷凝法、吸收法和膜分离法^[15-16]。文献[17]考虑了饱和烟气的腐蚀特性, 提出在燃煤电站炉后烟道加装两级具有耐腐蚀特性的氟塑料换热器, 回收烟气余热 92 MW。文献[18]通过在 350 MW 燃煤电站湿法脱硫塔顶部加装喷淋层, 构建了集烟气脱硫、水分回收及深度减排的一体化装置, 以接触式冷凝换热的方式回收饱和烟气余热, 同时提取烟气中水分 453.62 t/d。文献[19]依托 330 MW 燃煤机组搭建了陶瓷膜烟气水分及余热回收中试平台, 分析了烟气流量和冷却水温对烟气余热回收效果的影响特性, 烟气流量为 9 715 m³/h、冷却水温为 18.7 °C 时, 陶瓷膜回收热量可以达到 106.31 MJ/(m²·h)。湿法脱硫出口饱和烟气温度较低, 余热再利用场景十分受限。常见的基于温差换热方式难以匹配合适的冷源介质实现饱和烟气余热利用, 而吸收式热泵可以提升废热品质, 扩大了

余热利用场景的选取范围。文献[20]将压缩式热泵应用于锅炉采暖供热系统, 利用电能驱动以热网回水为低温热源加热热网给水, 通过降低烟气冷凝器进口热网水温度, 烟气冷凝器换热量由 1.92 MW 提升至 2.11 MW。

综合分析燃煤电站锅炉尾部烟气污染物治理系统, 湿法脱硫后饱和烟气温度较低, 难以匹配合适的冷源介质回收余热。然而, 结合我国北方地区冬季供暖需求, 基于吸收式热泵提升饱和烟气余热温度, 将低品位废热用于加热热网回水, 存在一定的应用场景^[21-23]。本文在调研燃煤机组饱和烟气余热回收再利用技术研究的基础上, 提出基于吸收式热泵与脱硫浆液热交换器耦合回收烟气余热系统, 并将烟气余热用于加热供热管网回水; 结合某典型 350 MW 燃煤机组, 分别以增加机组发电量或提升供暖能力为目标, 分析机组运行工况、烟气温度等参数对集中供暖系统热力过程的影响特性, 探究不同目标运行模式下的经济收益, 验证烟气余热经提质后再利用的可行性, 揭示烟气余热再利用的节能理论及应用效果。

1 系统模拟

1.1 机组概况

选取某典型 350 MW 高效超临界抽汽凝汽式汽轮机发电机组作为研究对象, 配备 1 110 t/h 固态排渣直流煤粉锅炉, 采暖期热电比 163.5%。燃煤电站锅炉尾部烟气采用石灰石-石膏湿法单塔双循环脱硫工艺脱除二氧化硫, 净烟气经 GGH 加热后排放。汽轮机供暖抽汽位置在中压缸出口, 根据供暖工况可以分为最大供热抽汽工况、低压缸解列供热抽汽工况以及额定采暖供热抽汽工况, 具体供暖抽汽参数见表 1。在不同供暖工况下, 燃煤电站汽轮机主蒸汽温度均为 600 °C, 主蒸汽压力均为 25.6 MPa; 同时该机组采用一次中间再热, 再热蒸汽温度均为 600 °C, 最大供热抽汽工况与低压缸解列供热工况的再热蒸汽压力均为 4.84 MPa, 额定采暖供热抽汽工况的再热蒸汽压力为 4.712 MPa; 该机组供暖抽汽压力均为 0.4 MPa, 最大供热抽汽工况与低压缸解列供热工况的供暖抽汽温度均为 247.9 °C, 额定采暖供热抽汽工况的供暖抽汽温度为 250.9 °C, 因为不同供暖工况下的再热蒸汽压力、温度参数存在差异, 导致在相同供暖抽汽压力条件下的抽汽温度并未保持一致性; 在不同供暖工况下, 供暖抽汽的

疏水温度均为 110 ℃。

表 1 我国北方某典型 350 MW 燃煤电站供热抽汽参数
Tab.1 Heat extraction parameters of a typical 350 MW coal-fired power plant in northern China

供暖工况	最大供热	低压缸解列	额定采暖供热
再热蒸汽温度/℃	600	600	600
再热蒸汽压力/MPa	4.84	4.84	4.71
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	86.20	86.19	83.85
再热蒸汽焓值/(kJ·kg ⁻¹)	3 668.1	3 668.1	3 669.1
供暖抽汽温度/℃	247.9	247.9	250.9
供暖抽汽压力/MPa	0.4	0.4	0.4
供暖抽汽流量/(t·h ⁻¹)	54	65.25	50
供暖抽汽焓值/(kJ·kg ⁻¹)	2 960.3	2 960.3	2 966.5
抽汽疏水温度/℃	110	110	110

1.2 系统介绍

燃煤电站饱和烟气余热回收利用集中供暖系统可以分为余热回收部分、余热提质部分以及余热利用 3 部分（图 1）。余热回收部分以脱硫塔和浆液换热器为主要设备，烟气被脱硫塔内循环浆液洗涤脱除二氧化硫，同时循环浆液吸收烟气余热后温度得到提升，循环热源水利用浆液换热器回收脱硫浆液热量。余热提质部分主要设备为吸收式热泵，其由发生器、冷凝器、蒸发器和吸收器等关键部件组成，溴化锂溶液作为循环介质^[24-25]，利用少量高温蒸汽驱动，回收热源水吸收的脱硫浆液热量，产生大量的中品位热量。余热利用部分供热管网回水依次进入吸收式热泵的吸收器和冷凝器，吸收式热泵生成的中品位热量被供热管网回水吸收，随后供热

管网回水再次进入热网加热器，利用供暖抽汽加热供热管网回水至额定温度后形成供热管网给水。浆液换热器布置有循环浆液旁路，可以保证原有脱硫系统的正常运行；吸收式热泵的吸收器与冷凝器同样布置有热网水旁路，可以保证热网水不经吸收式热泵以原有方式直接进入热网加热器。

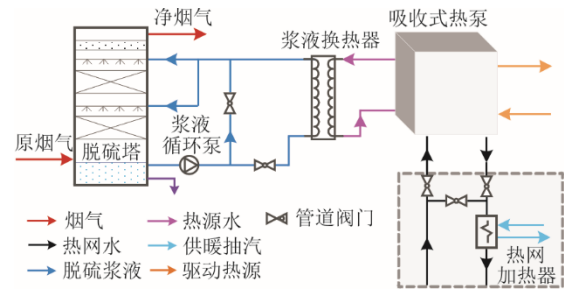


图 1 燃煤电站饱和和烟气余热回收集中供暖系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the centralized heating system with saturated flue gas waste heat recovery

采用 Aspen Plus 构建燃煤电站锅炉尾部饱和和烟气余热回收集中供暖系统仿真模型（图 2）^[26-27]，该股为溴化锂溶液、石灰石-石膏浆液、液态水、水蒸气和烟气。燃煤电站饱和和烟气余热回收集中供暖系统模型组成见表 2。表 2 中吸收式热泵发生器由 HeatX 和 Flash 模块替代，吸收式热泵冷凝器由 HeatX 模块替代，吸收式热泵节流阀由 Throttle1 替代，吸收式热泵蒸发器由 HeatX 替代，吸收式热泵吸收器由 Mixer 和 HeatX 替代，浆液换热器由 HeatX 替代，湿法脱硫塔由 Mixer、Mixer 和 Flash 组合替代，热网加热器由 HeatX 替代。

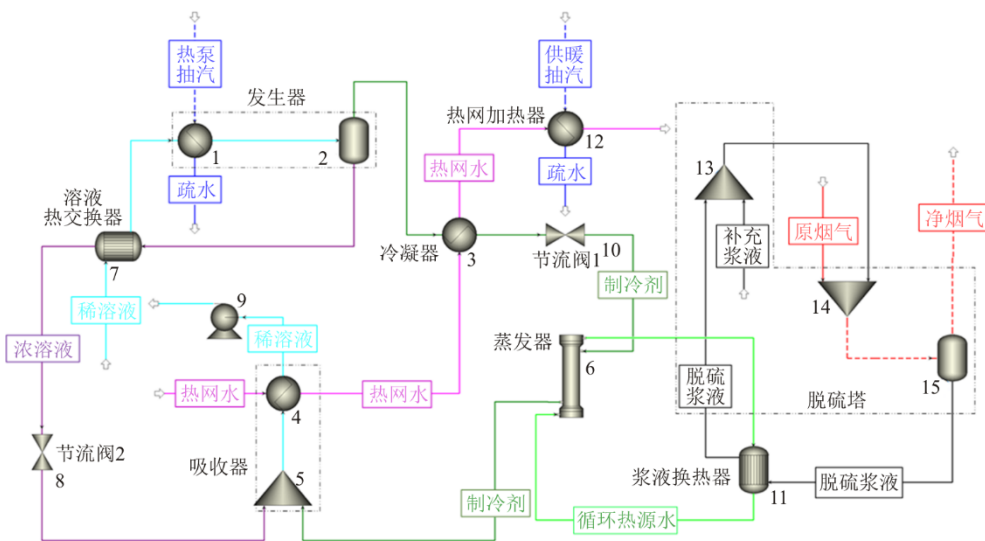


图 2 燃煤电站饱和和烟气余热回收集中供暖系统仿真模型

Fig.2 Simulation model of the centralized heating system with saturated flue gas recovery in coal-fired power unit

表 2 燃煤电站饱和烟气余热回收集中供暖系统模型组成
Tab.2 The modular components of a centralized heating system with saturated flue gas waste heat recovery

系统设备	模块类型	模块序号	进口流股	出口流股
发生器	HeatX+Flash2	1+2	溴化锂稀溶液 驱动热源蒸汽	溴化锂浓溶液 驱动热源疏水 制冷剂高温蒸汽
冷凝器	HeatX	3	供热管网回水 制冷剂高温蒸汽	供热管网回水 制冷剂液态水
吸收式 热泵	HeatX	6	循环热源水 制冷剂汽水混合物	循环热源水 制冷剂低温蒸汽
吸收器	Mixer+Heater	4+5	供热管网回水 溴化锂浓溶液 制冷剂低温蒸汽	供热管网回水 溴化锂稀溶液
节流阀	Throttle1	10	制冷剂高温液态水	制冷剂汽水混合物
溶液热交换器	HeatX	7	溴化锂浓溶液 溴化锂稀溶液	溴化锂浓溶液 溴化锂稀溶液
浆液换热器	HeatX	11	循环热源水 脱硫循环浆液	循环热源水 脱硫循环浆液
热网加热器	HeatX	12	供热管网回水 供暖抽汽	供热管网给水 供暖疏水
湿法脱硫塔	Mixer+Mixer+Flash2	13+14+15	原烟气 脱硫循环浆液 脱硫补充浆液	净烟气 脱硫循环浆液

2 评价方式

2.1 烟气余热供热模型

图 3 为燃煤电站锅炉尾部饱和烟气余热回收集中供暖评价模型。在设计工况下，供热管网回水、给水温度分别为 60、130 °C，原有供热系统仅采用汽轮机供暖抽汽对供热管网回水加热至额定温度。然而在饱和烟气余热回收集中供暖系统中，采用吸收式热泵回收湿法脱硫塔循环浆液热量对供热管网回水进行初步加热，而后再采用汽轮机供暖抽汽对供热管网回水加热至额定温度。后者对供热管网回水的加热方式并不改变供热管网回水及给水温度，但可以增加供热管网热水流量或排挤汽轮机供暖抽汽，提升燃煤电站的供暖能力或者供热工况下机组的发电能力。

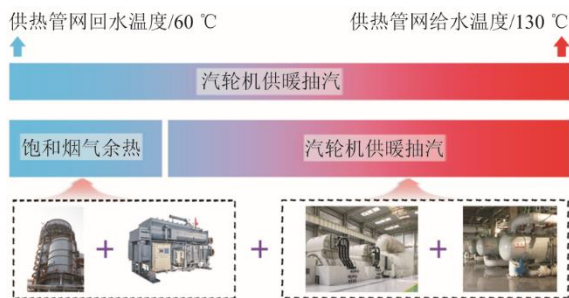


图 3 燃煤电站饱和烟气余热回收集中供暖评价模型
Fig.3 Evaluation model of saturated flue gas waste heat recovery for centralized heating in coal-fired power plant

在燃煤机组湿法脱硫工艺系统内，脱硫进口烟气温度较高，为不饱和状态；脱硫出口烟气温度较低，为含湿饱和状态^[28]。湿法脱硫塔的热平衡公式为：

$$Q_i = Q_o + Q_r \quad (1)$$

式中： Q_i 为脱硫塔进口烟气热量，MW； Q_o 为脱硫塔出口烟气热量，MW； Q_r 为脱硫浆液吸收的热量，MW。

2.2 余热回收利用分析

按实际运行目标不同，燃煤电站锅炉尾部低温饱和烟气余热回收集中供暖系统可以分为 2 种模式，增加机组的供暖能力或提高机组的发电量。

在不改变供热管网回水/给水温度的前提下，采用蒸汽型吸收式热泵回收饱和烟气余热，提升供热管网的给水流量，达到增加供暖能力的目的。根据热力学第一定律，饱和烟气余热回收集中供暖系统应用后新增供热面积的计算方法为：

$$S = \frac{Q_1}{q_h} \quad (2)$$

式中： S 为机组新增供暖面积， m^2 ； q_h 为我国严寒或寒冷地区单位建筑面积的供暖热指标，分别取 61、43、35 W/m^2 ； Q_1 为吸收式热泵回收的饱和烟气余热量，W。

吸收式热泵利用湿法脱硫塔循环浆液余热制取中品位热量对供热管网回水进行初步加热，相应

的排挤供暖抽汽,增加机组发电量^[29]。排挤供暖抽汽流量的计算方法为:

$$m_h = \frac{Q_i}{H_5 - H_{j5}} \quad (3)$$

采用蒸汽型吸收式热泵回收饱和烟气余热,并排挤供暖抽汽返回汽轮机内继续做功,机组新增发电量与供暖抽汽参数有重要关联。采用等效焓降的方式分析汽轮机抽汽的做功能力^[30],抽汽等效焓降及新增发电量的计算方法为:

$$\Delta H_i = H_i - H_c - \sum_{r=i+1}^8 \left(\frac{A_r}{H_r - H_{jr}} \right) \times \Delta H_r \quad (4)$$

$$P = \Delta H_i \times m_h \quad (5)$$

式中: ΔH_i 、 ΔH_r 均为各级加热器的等效焓降, kJ/kg; H_c 为汽轮机乏汽焓值, kJ/kg; H_i 、 H_r 均为各级加热器对应的抽汽焓值, kJ/kg; H_{jr} 为各级加热器对应的凝结水焓值, kJ/kg; A_r 为排挤抽汽影响后续加热器输入热量的减少值, kJ; P 为饱和烟气余热回收集中供暖系统对机组发电量的影响, MW; m_h 为饱和烟气余热回收再利用排挤供暖抽汽的流量, kg/s; 下标 i 为加热器序号 8、7、6、5 等, 下标 r 为第 i 级加热器的下一级加热器序号。

3 结果讨论

基于 Aspen Plus 构建的溴化锂吸收式热泵回收再利用饱和烟气余热,排挤供暖抽汽返回汽轮机继

续做功或提高供热管网给水流量增加供热能力。本文以典型 350 MW 燃煤电站为例,湿法脱硫塔入口烟气温度的 130 °C,烟气体积流量为 120 万 m³/h (标况下),对饱和烟气余热回收集中供暖系统进行研究分析。

以提高机组供热能力为目标时,耦合系统运行的关键节点参数见表 3。吸收式热泵发生器利用高温蒸汽作为驱动热源加热低浓度的溴化锂溶液,抽汽流量为 92.0 t/h,出口汽相分率为 0.16,产生的水蒸气流量为 81.0 t/h;吸收式热泵冷凝器利用供热管网回水吸收水蒸气的汽化潜热,保证在吸收式热泵冷凝器出口的水蒸气全部转化为液态水;吸收式热泵节流阀通过降低阀后压力,为后续液态水的吸热蒸发创造条件;吸收式热泵蒸发器吸收循环热源水热量,保证在吸收式热泵内部蒸发器出口的汽相分率为 1.00;吸收式热泵吸收器利用供热管网回水吸收水蒸气的溶解热,保证高浓度溴化锂溶液与蒸发器出口水蒸气充分融合成低浓度溴化锂溶液;浆液换热器回收湿法脱硫循环浆液余热用于加热吸收式热泵蒸发器出口的循环热源水,脱硫塔内循环浆液温度降低至 50.5 °C,有助于降低湿法脱硫烟气对水蒸气的携带量,同时回收再利用饱和烟气余热 50.23 MW;热网加热器对吸收式热泵冷凝器出口的热网回水进一步加热至设定温度 130 °C,热网循环水流量由 4 590 t/h 增加至 5 205 t/h,供热能力提高了 13.4%。

表 3 饱和烟气余热回收集中供暖系统模拟参数 (以供暖为目标)

Tab.3 Simulation parameters of the centralized heating system with saturated flue gas waste heat recovery (heating as target)

项目	冷流体介质				热流体介质			
	进/出口 温度/°C	压力/ MPa	流量/ (t·h ⁻¹)	汽相分率	进/出口 温度/°C	压力/ MPa	流量/ (t·h ⁻¹)	汽相分率
发生器	105.0/132.0	0.050 0	500.0	0~0.16	247.9/110.0	0.400 0	92.0	1.00~0
冷凝器	71.3/81.5	0.150 0	4 590.0	0	132.0/74.3	0.050 0	81.0	1.00~0
节流阀	74.3/38.5	0.006 8	81.0	0~0.06				
蒸发器	38.5/38.5	0.006 8	81.0	0.06~1.00	51.1/42.4	0.150 0	5 000.0	0
吸收器	60.0/71.3	0.150 0	5 205.0	0	79.9/63.0	0.006 8	500.0	0.22~0
溶液热交换器	63.0/105.0	0.050 0	500.0	0	132.0/77.1	0.500 0	419.0	0
浆液换热器	42.4/51.1	0.100 0	5 000.0	0	54.1/50.5	0.100 0	12 026.8	0
热网加热器	81.5/130.0	0.150 0	5 205.0	0	247.9/110.0	0.400 0	448.0	1.00~0
原系统 热网加热器	60.0/130.0	0.150 0	4 590.0	0	247.9/110.0	0.400 0	540.0	1.00~0

饱和烟气余热回收集中供暖系统在以不同目标运行时,其重要区别是用于供暖系统的抽汽流量。以提高机组发电量为目标时,耦合系统运行的关键节点参数见表 4。饱和烟气余热回收集中供暖系统供暖抽汽共计 467 t/h,原供暖系统供暖抽汽为

540 t/h,在保证燃煤电站供暖能力不变的前提下,排挤供暖抽汽流量为 73 t/h,排挤抽汽温度为 247.9 °C,排挤抽汽压力为 0.4 MPa。供暖抽汽的等效焓降为 356.7 kJ/kg,抽汽效率为 0.14,排挤的供暖抽汽对应增加了机组约 7.23 MW 发电量。

表 4 饱和烟气余热回收集中供暖系统模拟参数 (以发电为目标)
Tab.4 Simulation parameters of the centralized heating system with saturated flue gas waste heat recovery (power generation as the target)

项目	冷流体介质				热流体介质				
	进/出口温度/°C	压力/MPa	流量/(t·h ⁻¹)	汽相分率	进/出口温度/°C	压力/MPa	流量/(t·h ⁻¹)	汽相分率	
发生器	105.0/132.0	0.050 0	500.0	0~0.16	247.9/110.0	0.400 0	92.0	1.00~0	
冷凝器	71.3/81.5	0.150 0	4 590.0	0	132.0/74.3	0.050 0	81.0	1.00~0	
节流阀	74.3/38.5	0.006 8	81.0	0~0.06					
新系统	蒸发器	38.5/38.5	0.006 8	81.0	0.06~1.00	51.1/42.4	0.150 0	5 000.0	0
	吸收器	60.0/71.3	0.150 0	4590	0	79.9/63.0	0.006 8	500.0	0.22~0
	溶液热交换器	63.0/105.0	0.050 0	500.0	0	132.0/77.1	0.500 0	419.0	0
	浆液换热器	42.4/51.1	0.100 0	5 000.0	0	54.1/50.5	0.100 0	12 026.8	0
	热网加热器	81.5/130.0	0.150 0	4 590.0	0	247.9/110.0	0.400 0	375.0	1.00~0
原系统	热网加热器	60.0/130.0	0.150 0	4 590.0	0	247.9/110.0	0.400 0	540.0	1.00~0

3.1 经济效益分析

燃煤电站饱和烟气余热回收集中供暖系统以提升供暖能力为目标时,对其经济效益进行分析。参照现行行业标准《城镇供热管网设计标准》(CJJ/T34—2022),居民建筑供暖热指标分别选取未采取节能措施 61 W/m²;采取二步节能措施 43 W/m²;采取三步节能措施 35 W/m²。在燃煤电站饱和烟气余热集中供暖系统应用前后,机组的供热能力见表 5。以河北地区为例,年供暖天数为 122 天,供暖价格为 24 元/(m²·a),燃煤电站饱和烟气余热回收集中供暖系统的供暖能流增加了 50.23 MW,相应的新增供暖面积为 82.34~143.51 万 m²,折合新增年度供暖收益 1 976.26~3 444.34 万元。

燃煤电站饱和烟气余热回收集中供暖系统以提

升机组发电量为目标时,对其经济效益进行分析。通过回收饱和烟气余热用于供暖系统,达到相同供暖能力的同时降低机组供暖抽汽流量,排挤供暖抽汽约 73 t/h 返回汽轮机继续做功,相应的增加了机组发电量约 7.23 MW。同样,以河北地区为例,年供暖天数为 122 天,供暖周期新增发电量共计 2 116.94 万 kW·h,按燃煤电站售电价格 0.38~0.45 元/(kW·h)计算,供暖周期新增发电量带来的经济效益约 804.44~952.62 万元。对比于以提升供暖能力来看,增加发电量的经济效益较低,因此应着重考虑饱和烟气余热回收集中供暖系统以提升机组供暖能力为目标的运行特性。这与文献的研究结论是一致的,文献[31]通过降低热网回水温度吸收低品位烟气余热,余热回收方式虽有所不同,但均具有显著的经济效益。

表 5 最大供热抽汽工况下饱和烟气回收余热集中供暖经济效益
Tab.5 Economic benefits of centralized heating with saturated flue gas waste heat recovery under maximum heating extraction condition

项目	饱和烟气余热回收集中供暖系统应用前			饱和烟气余热回收集中供暖系统应用后		
	61 W/m ²	43 W/m ²	35 W/m ²	61 W/m ²	43 W/m ²	35 W/m ²
供暖天数/d		122			122	
供暖价格/(元·(m ² ·a) ⁻¹)		24			24	
供热能流/MW		375.78			426.01	
供暖面积/万 m ²	616.03	873.91	1 073.66	698.38	990.72	1 217.17
供暖收益/(万元·a ⁻¹)	14 784.79	20 973.77	25 767.77	16 761.05	23 777.30	29 212.11
新增供暖面积/万 m ²				82.34	116.81	143.51
新增供暖收益/(万元·a ⁻¹)				1 976.26	2 803.53	3 444.34

3.2 供热工况的影响

根据选取的典型燃煤机组,图 4、图 5 分别展示了燃煤机组供热工况对供暖能力和供热管网热水流量的影响。从图 4 可以看出,燃煤电站原有供

暖系统采用汽轮机供暖抽汽直接加热热网回水,且不同工况下的供热能力差异较大。在额定采暖供热抽汽工况、最大供热抽汽工况和低压缸解列供热抽汽工况下,供暖能流分别为 347.95、375.78、

454.07 MW；热网加热器能流分别为 283.93、311.76、390.05 MW，吸收式热泵驱动热源能流均为 64.02 MW，饱和烟气余热回收能流均为 50.23 MW。在设定供、回水温度为 60、130 °C 的前提下，供热管网的热水量代表了其供暖能力。从图 5 可以看出，原有供暖系统在额定采暖供热工况、最大供热抽汽工况和低压缸解列供热抽汽工况下的热网水流量分别为 4 260、4 590、5 548 t/h；饱和烟气余热回收集中供暖系统对供热管网热水流量均有不同程度的提升，分别提升了 14.20%、13.40% 和 11.03%，提升比例受供热工况影响较为明显。

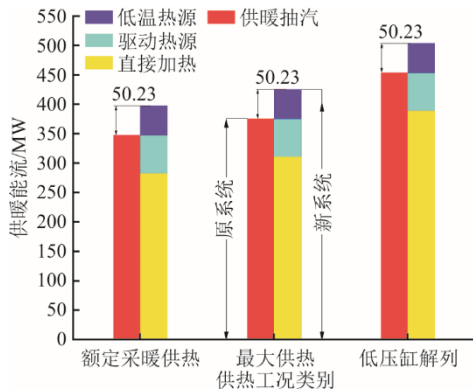


图 4 燃煤机组供热工况对供暖能流的影响

Fig.4 The heating energy changes under different heating conditions of the coal-fired power plant

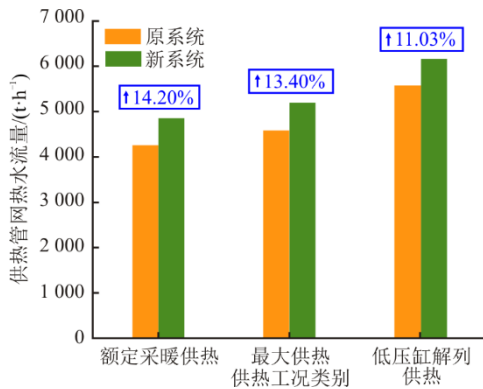


图 5 燃煤机组供热工况对供热管网热水流量的影响

Fig.5 The hot water flow changes of the heating network under different heating conditions of coal-fired power plant

3.3 烟气温度的影响

燃煤机组锅炉尾部烟气经湿法脱硫塔洗涤净化达到饱和状态，其饱和烟气温度和脱硫浆液温度具有直接联系（图 6）。吸收式热泵的驱动热源为 92 t/h 的供暖抽汽，耦合系统模拟过程中始终保持吸收式热泵蒸发器出口汽相分率为 1，制冷剂温度为 38.5 °C。从图 6 中可以看出：在脱硫塔进口烟温为 90~135 °C 时，饱和烟气余热回收集中供暖系

统能流保持不变；然而，脱硫塔进口烟温降低对吸收式热泵蒸发器出口热源水温度有明显影响，当脱硫塔进口烟温降低至 90.0 °C 时，吸收式热泵蒸发器传热上端差仅为 1.3 °C；此外，随脱硫塔进口烟温不断升高，脱硫后饱和烟气温度的由 51.4 °C 升高至 54.8 °C，过高的排烟温度加剧烟气水分损失^[32]。因为在设定条件下，在选取的脱硫塔进口烟气温度的范围内，饱和烟气余热足以提供吸收式热泵蒸发器所需的低温热量，但是随着脱硫塔进口烟气温度的降低导致脱硫浆液温度也下降，影响循环热源水温度水平，对吸收式热泵蒸发器的换热效果造成不利影响。

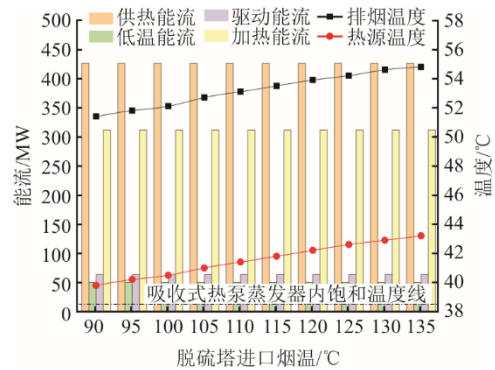


图 6 脱硫塔进口烟温的影响规律

Fig.6 Influence regulation of flue temperature on component energy flows at the desulfurization inlet

图 7 探讨了脱硫塔内液气比对浆液温度、排烟温度等参数的影响规律。从图 7 中可以看出随着脱硫塔内液气比由 8 L/m³ 增加到 22 L/m³，循环热源水温度与排烟温度基本不受影响，而脱硫塔内喷淋浆液温度由 51.0 °C 升高至 53.2 °C。根据能量守恒定律，吸收式热泵蒸发器吸收的低温热源热量为定值，在脱硫塔进口烟气温度的也保持定值的情况下，排烟温度便不受影响。

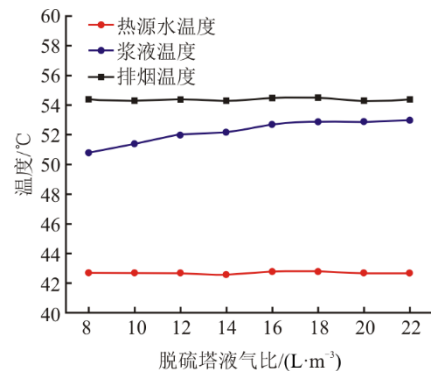


图 7 脱硫塔内液气比对关键节点温度的影响规律

Fig.7 Influence regulation of liquid-gas ratio on critical node temperatures in desulfurization tower

3.4 热源水流量的影响

吸收式热泵蒸发器与浆液换热器之间的热源水为饱和烟气余热的转移提供了基本保障。以脱硫塔进口烟气温度 130 °C，脱硫塔内液气比 8 L/m³ 为例，重点分析循环热源水流量变化的影响特性（图 8）。

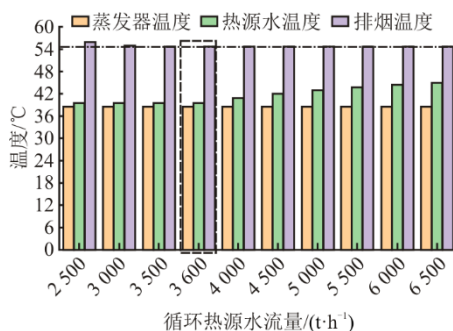


图 8 循环热源水流量对关键节点温度的影响规律

Fig.8 Influence regulation of low-temperature heat source flows on critical node temperature

由图 8 可知：循环热源水流量自 2 500 t/h 增加至 6 500 t/h，循环热源温度先保持在 39.5 °C 随后增加至 44.9 °C，而排烟温度由 55.9 °C 下降至 54.6 °C 后保持不变；吸收式热泵蒸发器内水蒸气饱和温度受节流阀控制，不受循环热源流量的影响，因此保持 38.5 °C 不变，这与文献[33]的研究结果是一致的。当循环热源水流量为 3 600 t/h 时，正处于排烟温度与循环热源水温度发生变化的临界条件，这是因为循环热源水流量低于 3 600 t/h 时，循环热源水温度会低于吸收式热泵蒸发器内水蒸气饱和温度，影响吸收式热泵的正常运行；此时必须调节吸收式热泵驱动热源流量进而引发排烟温度变化。图 9 展示了烟气余热回收集中供暖系统的能流变化。由图 9 可以看出：循环热源水流量由 2 500 t/h 增加至 6 500 t/h，驱动热源能流先由 49.20 MW 升高至 64.02 MW 后保持不变；吸收式热泵热源水能流先由 38.74 MW 增加至 50.23 MW 后保持不变；在供暖抽汽保持一定的前提下，热网加热器能流先由 326.56 MW 降低至 311.74 MW 而后保持不变。烟气余热回收集中供暖系统的总供热能流由吸收式热泵驱动热源能流、吸收式热泵循环热源水能流和热网加热器能流共同影响。同时可以看出饱和烟气余热回收集中供暖系统总供热能流随循环热源水流量增加，先由 414.50 MW 增加至 425.99 MW，而后保持不变。在图 9 中供热管网给水流量与驱动热源流量均随循环热源水流量的增加呈现出先升高

后保持不变的变化规律，吸收式热泵驱动热源流量与驱动热源能流、饱和烟气余热回收集中供暖系统热网给水流量与总供热能流具有相同的本质意义，因此变化特性也基本一致。

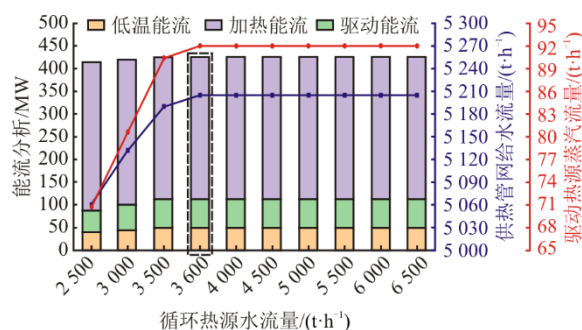


图 9 循环热源水流量对各部分能流的影响规律

Fig.9 Influence regulation of low-temperature heat source flow on the component energy flow

4 结 论

本文讨论了燃煤电站饱和烟气直接排放会造成大量的余热损失，结合北方地区客观存在的供暖需求，利用吸收式热泵提升饱和烟气余热温度，对供热管网回水进行初步加热以提升机组的供暖能力或排挤供暖抽汽增加机组发电量。结合某典型 350 MW 热电联产机组，分析了热网加热器供暖抽汽的关键参数，重点探究了饱和烟气余热回收集中供暖系统的运行特性和经济效益。本文的主要研究结论如下。

1) 基于吸收式热泵技术提升饱和烟气余热品质，构建的饱和烟气余热回收集中供暖系统应用于燃煤电站在提升供暖能力或增加发电量两方面均有明显效果；通过回收湿法脱硫塔内循环浆液热量，供热管网给水流量增加了 615 t/h，供暖能力提升了 13.4%，或者实现燃煤电站的发电量增加了 7.23 MW。

2) 考虑到燃煤电站饱和烟气余热回收集中供暖系统的投资决策，分别对增加供暖能力和提升发电量 2 种运行模式下的经济效益进行了分析；以提升供暖能力为目标时折合年度新增收益 1 975.20~3 442.32 万元，以增加发电量为目标时折合年度新增收益 804.44~952.62 万元；以收益最大化为决策依据，应首先考虑饱和烟气余热回收再利用系统在提升供暖能力模式下运行。

3) 饱和烟气余热回收集中供暖系统的供暖能流主要由驱动热源能流、循环热源水能流和抽汽加热能流 3 部分组成，供热工况类别对供暖能力的提

升比例有影响,但供暖能力提升的绝对值保持不变;湿法脱硫塔入口烟气温度对浆液温度和排烟温度影响较大,同时湿法脱硫塔内液气比直接影响浆液温度;循环热源水流量过低会降低饱和烟气余热回收集中供暖系统的供热能力,循环热源水流量的临界值为3 600 t/h。

[参考文献]

- [1] 于伟静,杨鹏威,王放放,等.双碳战略背景下中国煤电技术发展与挑战[J].煤炭学报,2023,48(7):2641-2656.
YU Weijing, YANG Pengwei, WANG Fangfang, et al. Research and challenge of coal power technology development in China under the background of dual carbon strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2641-2656.
- [2] 马汀山,王伟,王东晔,等.基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统设计及容量计算方法研究[J].热力发电,2023,52(7):113-118.
MA Tingshan, WANG Wei, WANG Dongye, et al. Research on system design and capacity calculation method for deep peak shaving of coal-fire unit based on molten salt heat storage assistance[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 113-118.
- [3] XUE X, LIU X, ZHANG A, et al. Performance and economic analysis of a molten salt furnace thermal energy storage and peaking system coupled with thermal power units for iron and steel gas waste heat recovery[J]. Applied Energy, 2024, 363(1): 12301.
- [4] WANG Y, XIA P, LIU J. Research on green and low-carbon development path of the electric power industry[J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, 2023, 11(2): 2350007.
- [5] 冯伟忠,李励.“双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J].发电技术,2022,43(3):452-461.
FENG Weizhong, LI Li. Research and practice on development path of low-carbon zero-carbon and negative carbon transformation of coal-fired power units under “double carbon” targets[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 452-461.
- [6] JIANG D. Transformation and development of the coal-based energy industry under the goals of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, 2022, 10(2): 2250008.
- [7] 王爱军,韩伟哲,武艺超,等.660 MWe 机组煤粉炉耦合生物质气燃烧污染物排放分析[J].洁净煤技术,2023,29(5):98-104.
WANG Aijun, HAN Weizhe, WU Yichao, et al. Analysis of pollutant emissions from 660 MWe pulverized coal boiler combustion coupled with biomass gas[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(5): 98-104.
- [8] 董琨,谭厚章,许鑫玮,等.我国工业锅炉技术特点和发展方向[J].洁净煤技术,2019,25(增刊2):1-6.
DONG Kun, TAN Houzhang, XU Xinwei, et al. Technical characteristics and development direction of industrial boilers in China[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(Suppl.2): 1-6.
- [9] 徐大广,李沁瑶.国产亚临界600 MW 机组煤粉炉优化技术[J].热力发电,2012,41(6):36-37.
XU Daguang, LI Qinyao. Optimization technologies for pulverized coal boilers of home-made sub-critical 600 MW units[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(6): 36-37.
- [10] 夏志强,李雨辰,朱新源.降低煤粉锅炉排烟温度研究进展[J].电站系统工程,2009,25(6):55.
XIA Zhiqiang, LI Yuchen, ZHU Xinyuan. Development of reducing gas temperature of a pulverized coal boiler[J]. Power System Engineering, 2009, 25(6): 55.
- [11] 高凡翔,刘阳,张贵泉,等.燃煤烟气湿法协同脱硫脱硝技术研究进展[J].化工进展,2024,43(5):2324-2342.
GAO Fanxiang, LIU Yang, ZHANG Guiquan, et al. Research progress of wet process synergistic desulfurization and decarbonization technology for coal-fired flue gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(5): 2324-2342.
- [12] 詹卓轩,赵刚,苏志刚.基于不确定性补偿的湿法脱硫系统二氧化硫超低排放控制[J].热力发电,2023,52(12):164-172.
ZHAN Zhuoxuan, ZHAO Gang, SU Zhigang. Ultra-low sulfur dioxide emission control of wet desulphurization system based on uncertainty compensation[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 164-172.
- [13] LI W. Research on effect evaluation of flue gas desulfurization transformation for coal-fired power plants[J]. Economic Management Journal, 2013, 2(3): 93-98.
- [14] 闫敏.燃煤烟气中潜热的回收及利用路径研究[D].济南:山东大学,2019:8-12.
YAN Min. Study on recovery and utilization way of latent heat in coal-fired flue gas[D]. Jinan: Shandong University, 2019: 8-12.
- [15] 薄恩多,高军龙,武超,等.燃煤机组湿法脱硫后饱和湿烟气余热利用技术[J].节能,2023,42(11):81-85.
BO Enduo, GAO Junlong, WU Chao, et al. Heat utilization technologies of saturated wet flue gas after wet desulfurization in coal-fired power plants[J]. Energy Conservation, 2023, 42(11): 81-85.
- [16] SHAMSIS, NEGASH A, CHO G, et al. Waste heat and water recovery system optimization for flue gas in thermal power plants[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 1-20.
- [17] XIONG Y, TAN H, WANG Y, et al. Pilot-scale study on water and latent heat recovery from flue gas using fluorine plastic heat exchangers[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161(10): 1416-1422.
- [18] 伊超,滕达,宋绍伟,等.喷淋法燃煤电站烟气冷凝水回收系统应用分析[J].中国电力,2023,56(11):226-235.
YIN Chao, TENG Da, SONG Shaowei, et al. Application analysis of flue gas condensation recovery in coal-fired power plants by spraying method[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 226-235.
- [19] 米大斌,郭江龙,张衡.陶瓷膜法的烟气水分及余热回收中试研究[J].中国电力,2021,54(4):199-206.
MI Dabin, GUO Jianglong, ZHANG Heng. Pilot study of flue gas moisture and waste heat recovery based on ceramic membrane method[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 199-206.
- [20] ZAJACS A, BOGDANOVICS R, BORODINECSA A. Analysis of low temperature lift heat pump application in a district heating system for flue gas condenser efficiency improvement[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 57: 102130.
- [21] 白涛,靳智平.基于烟气余热回收的热泵供热系统热

- 力学分析[J]. 电力学报, 2023, 38(2): 117-126.
BAI Tao, JIN Zhiping. Thermodynamic analysis of heat pump heating system based on flue gas waste heat recovery[J]. Journal of Electric Power, 2023, 38(2): 117-126.
- [22] 高昕玥, 范高峰, 刘爱平, 等. 湿法脱硫后烟气和浆液余热回收技术研究进展[J]. 化工进展, 2024, 43(8): 4307-4319.
GAO Xiyue, FAN Gaofeng, LIU Aiping, et al. Research progress on waste heat recovery technology for flue gas and slurry after wet desulphurization[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(8): 4307-4319.
- [23] 徐继松. 燃煤电厂低品位烟气余热回收与排放物控制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022: 1.
XU Jisong. Research on low-grade waste heat recovery and emission control of coal-fired power plant[D]. Nanning: Guangxi University, 2022: 1.
- [24] SUN J, FU L, ZHANG S, et al. A mathematical model with experiments of single effect absorption heat pump using LiBr-H₂O[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(17/18): 2753-2762.
- [25] SHAHZAD M K, DING Y, XUAN Y, et al. Modelling and performance analysis of a single stage open absorption heat pump system in aspen plus using aqueous LiBr and HCOOK: a waste moist heat recovery application[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2022, 236(3): 538-554.
- [26] WU Z, JIANG Y, WANG Y, et al. Investigating the performance of heat exchangers in absorption heat pump systems using both numerical and experimental methods[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 278(2): 116744.
- [27] WANG X, ZHANG H, CUI L, et al. Simulation study of an open compression absorption heat pump in water and heat recovery of low-temperature and high-humidity flue gas[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 269(10): 116180.
- [28] 贾晨辉, 刘培, 李政. 燃煤机组烟气水分回收系统设计及运行最优化[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 151-157.
JIA Chenhui, LIU Pei, LI Zheng. Design and operation optimization of water recovery system from flue gas for coal-fired power plants[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 151-157.
- [29] THIYAGU S, NAVEEN T K, SIDDHARTHAN B, et al. Numerical investigation and performance enhancement of 210 MW boiler by utilization of waste heat in flue gas[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33(1): 756-762.
- [30] WANG Y, CHEN Y, WANG K, et al. Performance evaluation and thermal analysis of heat pipe flue gas waste heat utilization system[J]. Energy Reports, 2022(8): 210-217.
- [31] 时国华, 林俊华, 田志敏, 等. 降低热网回水温度的钢厂余热回收供暖分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15035-15042.
SHI Guohua, LIN Junhua, TIAN Zhimin, et al. Analysis of waste heat recovery from steel plant for heating by reducing return water temperature[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 15035-15042.
- [32] JUN Y M, JUN X L. Numerical investigation of water and heat recovery from flue gas by using nanoporous ceramic membrane tubes[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 192(10): 108425.
- [33] TENG D, LU G, CHEN O, et al. Research on thermodynamic characteristics of the saturated flue gas waste heat recovery to reduce turbine extraction steam[J]. ACS Omega, 2023, 8(48): 46205-46217.

(责任编辑 邓玲惠)