

660 MW超超临界燃煤机组烟气余热 深度利用系统经济性分析*

马小晶^{1,2}, 王其微¹, 胡丽娜^{1,2}, 睢洋洋¹, 程泽宁³, 艾克旦·艾尼瓦¹

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 西北能源碳中和教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017;
3. 新疆天池能源有限责任公司 准东能源研究院, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 以某国产典型660 MW机组为案例, 根据能量梯级利用理论, 设计了针对不同季节的烟气余热深度利用系统, 即: 夏季联合烟气旁路系统、冬季联合烟气旁路+常规暖风器、冬季烟气旁路联合暖风器, 建立了系统的经济性分析模型. 与常规烟气余热利用方案进行对比, 分别进行变工况分析. 结果表明: 机组在夏季变工况下最高可降低标准煤耗率2.42 g/kWh; 冬季变工况下采用烟气旁路联合暖风器更优, 最高可降低标准煤耗率3.42 g/kWh. 该烟气余热深度利用系统的总投资约为1 184.10万元, 全年平均可节省6 688.86吨标准煤, 年节煤收益501.66万元, CO₂等气体减排超过1.59万吨, 节能环保效益显著, 在工程上具有可行性.

关键词: 燃煤机组; 余热利用; 烟气旁路; 能量梯级利用; 经济性分析

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.03.19.0001

中图分类号: TU521.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)04-0485-011

引文格式: 马小晶, 王其微, 胡丽娜, 睢洋洋, 程泽宁, 艾克旦·艾尼瓦. 660 MW超超临界燃煤机组烟气余热深度利用系统经济性分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(4): 485-495.

英文引文格式: MA Xiaojing, WANG Qiwei, HU Lina, SUI Yangyang, CHENG Zening, AIKEDAN Ainiwa. Economic analysis of flue gas waste heat deep utilization in 660 MW ultra-supercritical coal-fired unit[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(4): 485-495.

Economic Analysis of Flue Gas Waste Heat Deep Utilization in 660 MW Ultra-Supercritical Coal-Fired Unit

MA Xiaojing^{1,2}, WANG Qiwei¹, HU Lina^{1,2}, SUI Yangyang¹,
CHENG Zening³, AIKEDAN Ainiwa¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Engineering Research Center of Northwest Energy Carbon Neutrality, Ministry of Education, Urumqi Xinjiang 830017, China;
3. Zhudong Energy Research Institute, Xinjiang Tianchi Energy Co. Ltd., Changji Xinjiang 831100, China)

Abstract: This article takes a typical domestic-built 660 MW unit as a case study. Based on the principle of energy cascade utilization, a deep utilization system for flue gas waste heat is designed for different seasons. That is, summer combined flue gas bypass system, winter combined flue gas bypass+conventional heater, and winter combined flue gas bypass with heater. A systematic economic analysis model is established. Compared with conventional flue gas waste heat utilization schemes, variable operating condition analyses are conducted separately. Research results indicate that the unit can reduce the standard coal consumption rate by up to 2.42 g/kWh under variable operating conditions in summer. It is more optimal to use a flue gas bypass combined with a auxiliary heater under variable operating conditions in winter, which can reduce the standard coal consumption rate by up

* 收稿日期: 2024-03-19

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项“超超临界燃用准东煤机组的节能减碳技术研究”(2022A01002-2); 新疆维吾尔自治区“天山英才”培养计划“基于煤炭绿色开采的高矿化度矿井水降膜蒸发多场多相耦合机制研究”(2022TSYCCX0054); 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项“新疆煤矿高矿化度矿井水高效脱盐浓缩技术研究”(2022B03028-5); 国家级大学生创新训练计划“超超临界燃用准东煤机组能耗计算及预测分析平台”(202310755014)。

作者简介: 马小晶(1983—), 女, 博士, 教授, 主要从事计算流体力学、能源高效利用技术、新能源系统控制优化及图像处理技术的研究, E-mail: maxiaojing1983@xju.edu.cn.

to 3.42 g/kWh. The total investment for the deep utilization system of flue gas waste heat is about 11.841 0 million CNY. On average, 6 688.86 tons of standard coal can be saved throughout the year. The annual coal saving income is 5.016 6 million CNY. CO₂ and other gases are reduced more than 15 900 tons per year. This plan has significant energy-saving, economic, and environmental benefits, and is feasible in engineering.

Key words: coal-fired units; waste heat utilization; flue gas bypass; energy cascading utilization; economic analysis

0 引言

近年来,在“双碳”目标驱动下,以风电、光伏为代表的新能源装机规模持续攀升.这种能源结构转型要求传统燃煤机组的深度调峰能力提升,机组在低负荷运行的节能潜力亟待挖掘.在此背景下,国内外学术界围绕燃煤机组的节能改造研究了很多方案及改进措施.根据热力学第一定律,减少设备末端能量损失可以显著改善系统性能,利用烟气余热,减少排烟热损失,可以减少燃煤能量损耗^[1].

利用电厂锅炉排烟余热,即将一部分锅炉尾部烟气能量梯级地运用到回热系统中,是电厂增效减排的重点方向之一.蒋志浩等^[2]针对660 MW燃煤机组额定工况下设计了采用空气预热器烟气旁路烟水复合余热利用系统,可降低机组整体煤耗约1.98 g/kWh; Han等^[3]提出的燃煤电厂锅炉冷端能量转换和脱除NO_x系统,发现1 000 MW机组50%负荷下可增加5.4 MW_e的额外出力,提高了0.47%的热效率;王祝成等^[4]针对机炉深度耦合下的机组性能进行了研究,提出锅炉余热利用收益归类处理的计算方法;为进一步降低机组的能耗,学者们提出多种烟气余热回收利用系统^[5-9],其中联合烟气旁路系统,根据热力学第二定律,遵循能级匹配、能量梯级利用的原则,减少系统各处换热温差,减少换热损失,能够有效减少能量损失^[10],具备最优的热经济性和技术经济性^[11].采用分流空气预热器进口烟气用于加热锅炉给水和凝结水的形式实现烟气回收利用,即在旁路烟道中增设高温省煤器和低温省煤器,以加热部分高压加热器中的给水和部分低压加热器中的凝结水,不仅能够排挤高级别的高温 and 低温热能,使更多的高温 and 低温蒸汽在汽机中继续做功,提高机组效率及发电功率、降低汽轮机热耗率和锅炉排烟温度,还能进一步使发电煤耗量减少,增加发电机组的经济效益^[12].

然而,目前对于烟气余热深度利用系统的研究多集中在额定工况下的节煤效益,对于不同季节变工况下的节煤效益研究较少.同时,在实际运行过程中,发电机组并非一直以设计工况运行,且对各种电站中使用的烟气余热深度利用系统经济性指标难以直观比较.因此,本文以某国产660 MW超超临界燃煤机组为例,开展烟气余热深度利用系统的概念设计,结合现场实际运行数据,基于热力学第一定律和热功转换的等效焓降法,分析改造后的系统在不同季节变工况下的热力性能和经济效益,旨在为燃煤机组深度调峰时的节能降耗提供理论参考.

1 机组概况

新疆某660 MW等级超超临界燃煤锅炉为一次中间再热、超超临界压力变压运行、单炉膛、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢架结构、紧身封闭设计的Π型锅炉.汽轮机采用八级抽汽回热系统,其中:前三级分别抽至三台高压加热器,第四级抽至除氧器,后四级分别抽至四台低压加热器.在热耗率验收工况(Turbine Heat Acceptance, THA)下,发电功率为660 MW、汽轮机热耗率为7 930.67 kJ/kWh、汽耗率为3.11 kg/kWh、发电煤耗率为290.22 g/kWh.锅炉设计排烟温度为128.30 °C,而夏季实际运行工况下排烟温度最高可达149.52 °C,冬季工况下最高可达159.30 °C.因此,对锅炉烟气余热利用势在必行.

2 边界条件及改造原则

机组改造后的收益归系统整体,而对锅炉和汽轮机的影响,应对计算边界进行划分,避免重复计算节能量.本文设计烟气余热利用系统时遵循的原则:1) 机组保持660 MW额定功率、空气预热器入口烟温和出口热风温度不变;现役机组改造时,分流空气预热器旁路烟量为总烟气流量的5%~15%^[13],结合现场实际运行情况,空气预热器出口烟温不低于100 °C.2) 为避免酸腐蚀,高温省煤器出口烟温应不低于205 °C;低温省煤器出口烟温应不低于85~90 °C,此时低温省煤器温度处于硫酸氢铵形成的区域,可从特殊材料、双介质吹灰器等方面应对硫酸氢铵腐蚀问题.3) 空气预热器旁路的烟气换热器应纳入锅炉本体部分,烟气余热梯级利用系统回收的烟气热量应计入汽轮机侧.4) 系统在不影响机组安全运行的前提下,确保余热利用最大化,实现余热深度利用.

3 烟气余热深度利用系统设计

3.1 常规余热深度利用系统

目前, 该机组采用常规烟气余热利用方案 (原方案), 即在空气预热器设备后、电除尘设备前, 增设低温省煤器, 对凝结水进行加热, 从而排挤回热系统的抽汽量, 增加机组热效率和出力, 降低汽轮机热耗和煤耗量, 实现了余热回收利用^[14]. 常规低温省煤器余热利用系统布置如图1所示.

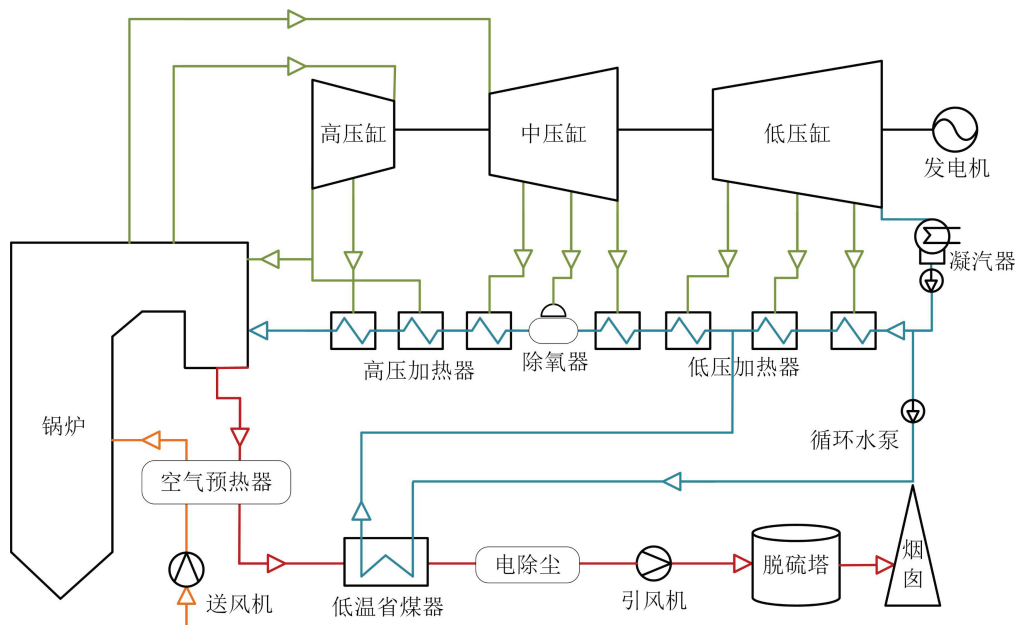


图 1 常规低温省煤器系统 (原方案)

3.2 烟气余热深度利用系统

3.2.1 夏季工况

余热深度利用方案1如图2所示, 参数基于92% THA工况. 根据能量梯级利用理论, 旁路烟道上设置高温省煤器, 高温烟气从空气预热器入口处分流部分烟气进入高温省煤器, 充分利用较高温度的烟气加热抽取的给水; 随后设置低温省煤器, 高温省煤器出口的烟气进入低温省煤器, 利用温度较低的烟气加热抽取的凝结水; 经热平衡核算可得烟气旁路分流量为9%; 然后同空气预热器出口的烟气混合, 排烟温度降至95.06~121.85 °C.

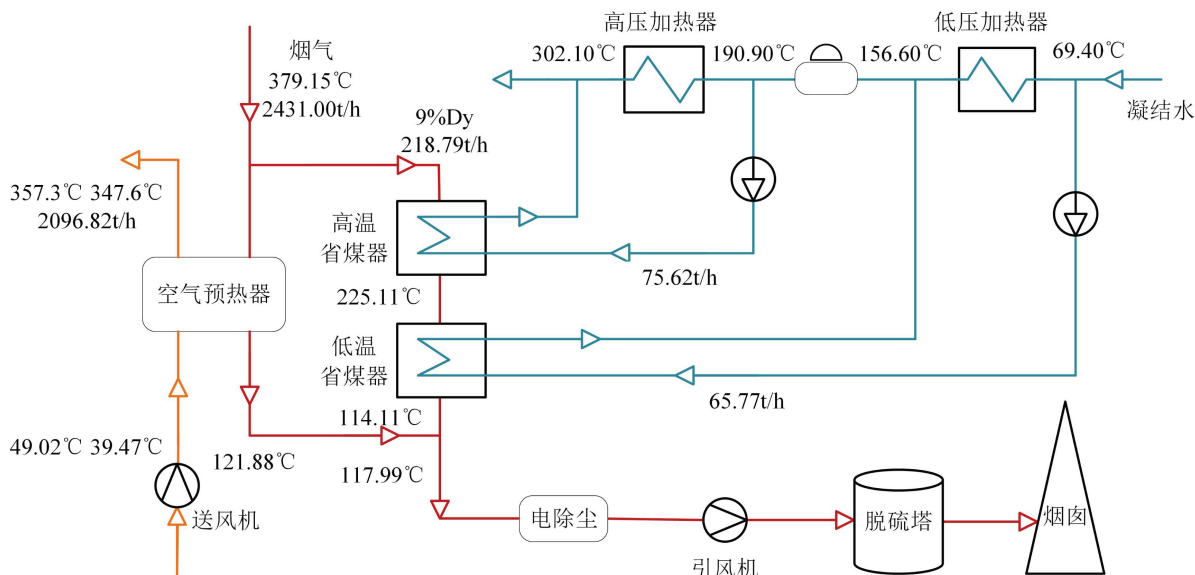


图 2 联合烟气旁路系统 (方案1)

4 系统改造经济性影响分析

4.1 热经济性分析

4.1.1 热经济性计算方法

本文热经济性分析聚焦于烟气热能加热回热系统以及抽取凝结水预热暖风器的影响,故基于热力学第一定律和热功转换的等效焓降法^[15]分析系统的热经济性.

根据等效焓降法,各段抽汽的等效焓降 H_j 为:

$$H_j = (h_j - h_c) - \sum_{r=1}^{j-1} \frac{A_r}{q_r} H_r, \quad (1)$$

式中: h_j 为第 j 级加热器的抽汽焓值, kJ/kg, 通过热力系统设计参数(如主蒸汽压力、温度)及抽汽点状态参数确定; h_c 为汽轮机排汽焓值, kJ/kg; q_r 为每千克抽汽在第 r 级加热器的放热量, kJ/kg; H_r 为第 r 段抽汽的等效焓降, kJ/kg; A_r 的取值根据回热加热器是汇集式还是自流式选取,若为汇集式加热器,则以 τ_r 代之,若 j 为疏水放流式加热器,则从 j 以下直至汇集式加热器用 Y_r 代之,在汇集式加热器以下,不论加热器型式,一律以 τ_r 代之, kJ/kg.

根据 H_j 与加入热量 q_j 的比值,可得该段的抽汽效率 η_j :

$$\eta_j = \frac{H_j}{q_j}, \quad (2)$$

若凝结水或锅炉给水吸收的烟气余热加到第 j 级加热器,则新蒸汽等效焓降增加值 ΔH 为:

$$\Delta H = \frac{Q_h}{D_0} \eta_j, \quad (3)$$

式中: Q_h 为旁路烟气换热器回收的热量, kJ/kg; D_0 为主蒸汽质量流量, t/h. 记 $\Delta\eta_i$ 为系统效率的提高比例,计算方式为

$$\Delta\eta_i = \frac{\Delta H}{\Delta H + H}, \quad (4)$$

式中: H 为未增设烟气换热器时新蒸汽的等效焓降, kJ/kg.

假设原煤输入量不变,则出功增加量 ΔW_1 及发电煤耗率降低值 Δb_1 为:

$$\Delta W_1 = \Delta\eta_i W, \quad (5)$$

$$\Delta b_1 = \Delta\eta_i b_0, \quad (6)$$

式中: W 为未增设烟气换热器时机组的功率, MW; b_0 为原发电煤耗率, g/kWh.

本文在联合烟气旁路后,遵循空气预热器入口烟气温度以及一、二次风温度不变的设计原则.因此,锅炉效率不变,可通过计算进行验证,方式为

$$\eta_g = \left(1 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_{qt} - Q_{w1} + Q_{pl,g} + Q_{pl,n}}{Q_{ar,net}} \right) \times 100, \quad (7)$$

式中: η_g 为锅炉效率, %; Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 和 Q_{qt} 为每千克燃煤的排烟热损失、可燃气体未完全燃烧的热损失、固体未完全燃烧的热损失、燃料锅炉的散热损失、灰渣物理显热损失和其他热损失, kJ/kg; Q_{w1} 为每千克燃煤进入系统的外部热量, kJ/kg; $Q_{ar,net}$ 为燃料收到基底位热值, kJ/kg; $Q_{pl,g}$ 和 $Q_{pl,n}$ 为采用烟气余热梯级利用后烟气旁路换热器加热给水及凝结水的热量, kJ/kg. 从水侧进行烟气旁路换热器加热锅炉给水和凝结水的热量:

$$Q_{heater} = D_{hp} (h''_{hp} - h'_{hp}) + D_{lp} (h''_{lp} - h'_{lp}), \quad (8)$$

式中: D_{hp} 、 D_{lp} 为高、低温省煤器水侧质量流量, t/h; h'_{hp} 、 h'_{lp} 为高、低温省煤器水侧进口焓值, kJ/kg; h''_{hp} 、 h''_{lp} 为高、低温省煤器水侧出口焓值, kJ/kg. 计算结果表明锅炉侧热效率不变.

4.1.2 热经济性计算结果及分析

以新疆某660 MW等级超超临界燃煤机组夏季(2022年7月至2022年8月)、冬季(2023年12月至2024年1月)运行数据为基础,夏季数据采集间隔为5 min,将一个时刻的温度、压力、流量等参数组合得到一个样本点,剔除异常数据后共计8 904个样本点;冬季数据采集间隔为1 min,剔除异常数据后共计44 022个样本点;每个样本点包含116个参数信息,原始数据集中部分关键参数见表1.

表 1 原始数据集(部分数据节选)

时间标签	机组负荷 /MW	主蒸汽压力 /MPa	主蒸汽温度 /°C	主蒸汽流量 /(t/h)	再热蒸汽温度 /°C	...	再热蒸汽压力 /MPa
2022-07-01 00:00:00	606.60	27.15	584.18	1 968.76	582.30	...	5.22
2022-07-01 00:05:00	607.37	27.24	582.90	1 972.35	583.00	...	5.24
...
2022-08-01 00:00:00	605.69	25.95	585.03	2 001.80	588.00	...	5.15

基于现场实际运行的历史数据和改造的边界条件及基本假设,根据第3节设计的余热深度利用方案,利用理论热力分析模型,对目标机组进行热经济性指标计算,结果见表2、表3.

表 2 夏季工况下热经济性指标

参数	97% THA		75% THA		50% THA		25% THA	
	原方案	方案1	原方案	方案1	原方案	方案1	原方案	方案1
空预器出口温度/°C	138.93	115.31	139.15	115.90	132.66	110.81	133.08	112.30
排挤抽汽流量/(t/h)	37.21	25.00	28.20	18.91	11.49	12.13	6.86	7.17
等效焓降增加量/(kJ/kg)	1.53	8.01	2.00	7.41	2.46	8.50	3.88	9.31
机组热效率增加量/%	0.06	0.31	0.07	0.28	0.09	0.30	0.13	0.31
机组出功增加量/MW	0.86	4.49	0.88	3.25	0.64	2.22	0.48	1.20
汽机热耗率降低值/(kJ/kWh)	10.69	55.65	14.10	51.99	16.19	55.62	27.13	64.88
发电煤耗率降低值/(g/kWh)	0.39	2.03	0.52	1.91	0.56	2.05	1.01	2.42

表 3 冬季工况下热经济性指标

参数	100% THA			75% THA			40% THA		
	原方案	方案2	方案3	原方案	方案2	方案3	原方案	方案2	方案3
空预器出口温度/°C	152.60	123.30	123.30	145.72	118.09	118.09	142.33	117.82	117.82
排挤抽汽流量/(t/h)	50.85	26.66	78.03	46.72	19.79	61.60	24.79	11.55	40.45
等效焓降增加量/(kJ/kg)	1.71	7.82	10.62	2.86	8.91	11.82	3.81	8.71	12.47
机组热效率增加量/%	0.07	0.30	0.38	0.10	0.33	0.43	0.13	0.30	0.43
机组出功增加量/MW	0.95	4.30	5.49	1.15	3.58	4.73	0.82	1.86	2.66
汽机热耗率降低值/(kJ/kWh)	11.31	51.35	65.62	17.52	54.28	71.83	28.30	64.39	91.87
发电煤耗率降低值/(g/kWh)	0.41	1.87	2.40	0.64	1.97	2.62	1.04	2.40	3.42

表2为夏季工况下不同方案的热经济性指标对比,表3为冬季工况下不同方案的热经济性指标对比,其中数据为该工况下的平均值.由表2、表3可知,联合烟气旁路的改造方案能够显著降低排烟温度、抽汽流量、汽机热耗率和煤耗率,提高机组的出功及热效率.案例机组夏季工况下采用方案1,全工况下平均降低排烟温度22.38 °C、汽机热耗率57.04 kJ/kWh、煤耗率2.10 g/kWh;冬季工况下采用方案3更优,全工况下平均可降低排烟温度27.15 °C、汽机热耗率76.44 kJ/kWh、煤耗率2.81 g/kWh,且低负荷时各指标降低更加明显.

图5为案例机组在不同季节变工况下,烟气余热回收原方案及应用烟气余热深度利用系统方案分别提升的机组效率趋势;图6为案例机组在不同季节变工况下,烟气余热回收各方案分别降低的煤耗趋势,其中数据为

各负荷工况±0.5 MW的平均值. 图5 (a)、图6 (a) 为夏季工况下不同方案机组的效率提升及煤耗降低趋势, 共 8 904个样本点; 图5 (b)、图6 (b) 为冬季工况下不同方案机组的效率提升及煤耗降低趋势, 共44 022个样本点. 由图5、图6可知, 机组效率提升趋势和煤耗降低趋势基本一致, 随着机组负荷的降低呈现逐步上升趋势.

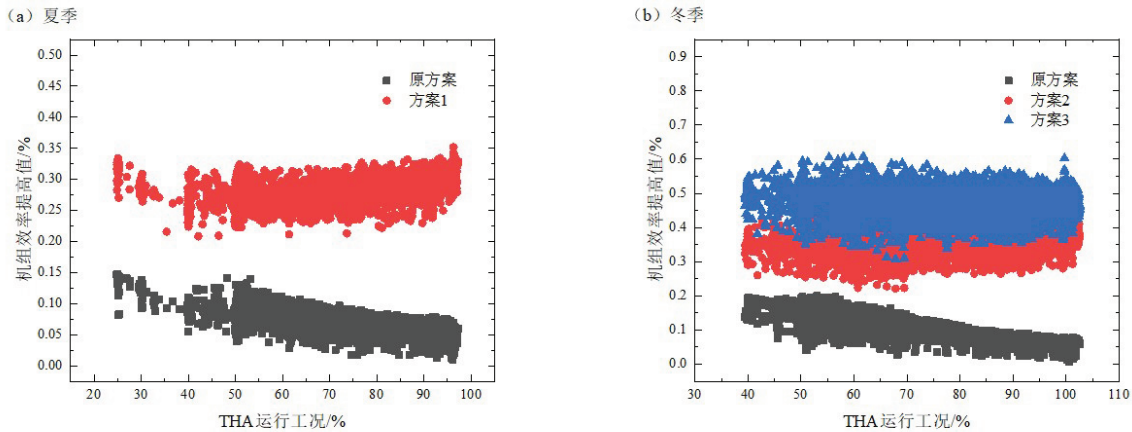


图 5 不同季节变工况下不同方案机组效率提升趋势

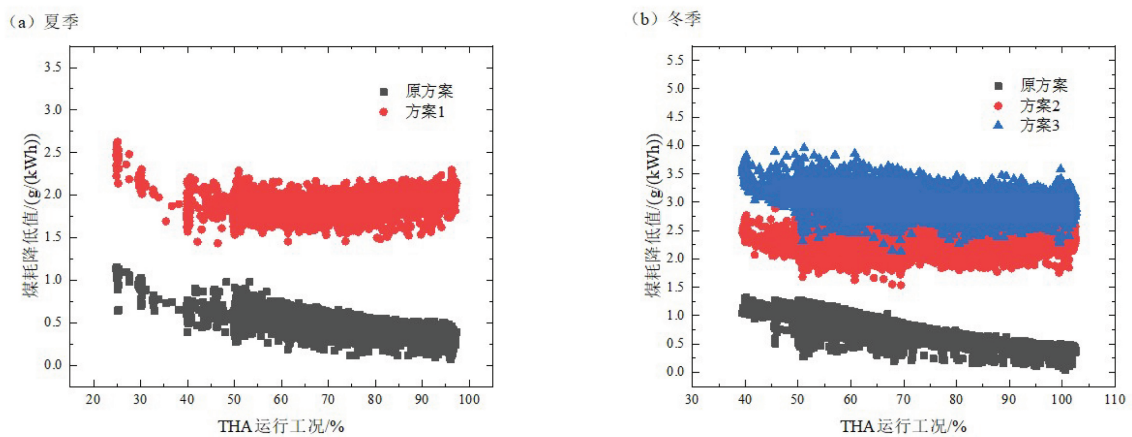


图 6 不同季节变工况下不同方案煤耗降低趋势

4.2 技术经济性分析

4.2.1 技术经济性计算方法

技术经济性分析方法主要用于分析新设计方案的成本及收益^[16-17]. 本文添加了额外的设备, 可以通过换热量得出设备传热元件的换热面积. 初投资可以通过传热面积投资除以0.70计算^[18], 设备总质量约为翅片管总质量的1.6倍^[19], 见表4.

表 4 受热面传热元件参数

传热元件类型	应用范围	翅化比	单位管长面积 /(m ² /m)	单位管长重量 /(kg/m)	单价 /(万元/吨)	总传热系数 /(W/(m ² ·°C))
单H型鳍片管	高压/低压 省煤器	4.83	0.68	11.70	0.85	28
钢/铝复合 螺旋翅片管	凝结水 暖风器	17.52	1.38	2.25	1.70	25

系统设计时需考虑设备空间布局、管道连接及材料耐高温高压等问题, 应选择高效、可靠的设备, 确保其适应燃煤机组的运行条件. 拟采用单H型鳍片管作为烟水换热器的换热管, 分别用于换热量为13.93 MW的高温省

煤器和换热量为10.21 MW的低温省煤器,需增加静态投资544.09万元.钢/铝复合螺旋翅片管作为暖风器的换热管,分别用于换热量为9.10 MW和20.99 MW的一、二次风暖风器,需增加静态投资152.91万元,并预留10%的预算应对材料价格波动或设计变更等风险,共计766.70万元.同时,还应制定详细的维护计划,定期检查设备状态,及时发现并处理问题.设备的运输、安装及管道阀门等附件的费用也相应增加,可通过乘以系数1.43得到设备投资^[20-21].此外,实际运行过程中,烟道和换热管束的防腐,部分换热管束的更换,以及阀门和控制器的维护都会产生相应的费用,本文考虑实际情况以设备投资的4%作为系统运行维护费用^[22].

以动态投资回收期 and 净现值为发电厂的主要技术经济指标.投资回收期越短,项目获利能力越强,净现值也越大,经济效益也越好.系统的净现值为:

$$NPV = (E_n - I_n)(1 + i_c) - 1 + \sum_{k=2}^n E_n(1 + i_c)^{-k}, \quad (9)$$

式中: NPV 为系统净现值,万元; E_n 为系统年节煤收益,万元; I_n 为系统总投资,万元; i_c 为投资效益系数; n 为系统寿命期,假设为10年; k 为第 k 年.系统的投资回收期为:

$$Y = \frac{I_n}{E_n}, \quad (10)$$

式中: Y 为投资回收期,年.

4.2.2 技术经济性指标结果及分析

核算不同季节变工况下的经济性,分析结果见表5、表6.

表 5 夏季经济性分析结果

季节	发电功率/MW	运行时间/h	节煤量/t
夏季	640.00	179.00	232.56
	495.00	880.00	832.00
	330.00	302.00	204.30
	165.00	14.00	5.59

表 6 冬季经济性分析结果

季节	发电功率/MW	运行时间/h	节煤量/t
冬季	660.00	894.00	1 416.10
	495.00	385.00	499.31
	330.00	82.00	86.05
	264.00	14.00	12.64

假设机组年运行时间为5 500 h,则电厂在100% THA、75% THA、50% THA 和25% THA工况下全年运行时间分别为2 146 h、2 530 h、796 h和28 h;改造后电厂全年平均降低煤耗分别为2.22 g/kWh、2.27 g/kWh、2.62 g/kWh和2.92 g/kWh,节煤量分别为3 144.32 t、2 842.83 t、688.22 t和13.49 t,机组全年技术经济性分析结果见表7.

表 7 电厂全年技术经济性分析结果

项目	数值
系统总投资/万元	1 184.10
标煤价格/(元/吨)	750.00
年节煤量/吨	6 688.86
年节煤收益/万元	501.66
净现值/万元	1 777.26
动态投资回收期/年	2.36

由表7可知,该烟气余热深度利用系统的总投资约为1 184.10万元,系统年节煤量约为6 688.86吨,取标煤价格为750.00元/吨,系统年节煤收益约为501.66万元,净现值为1 777.26万元,系统动态投资回收期约为2.36年.在标煤价格 $\pm 20\%$ 的波动范围内,系统年节煤收益约为401.33万元~601.99万元,净现值为1 210.37万元~2 344.15万元,系统动态投资回收期约为2.95~1.97年.

4.3 环境效益分析

环境效益分析是衡量技术可行性与社会价值的关键环节.随着全球碳中和目标的推进及环保政策的趋严,需从多维度量化环境效益,揭示技术对生态、经济与社会的综合影响.因此,有必要进行温室气体减排等方面的研究.上述改造方案应用于燃煤机组时,提高了机组整体效率,减少了燃煤消耗,节煤效益最高可达3.42 g/kWh,降低燃煤消耗的同时也会降低CO₂、SO₂排放量,同样供电量下,机组污染物排放(如SO₂、NO_x及PM_{2.5}等)大约可降低1.2%^[23],温室气体CO₂排放也相应减少.使用碳排放计算模型^[24],可得单位质量的煤完全燃烧时产生的CO₂排放量,计算方式为

$$CO_2 = E \cdot NCV \cdot CEF \cdot COF \cdot \frac{44}{12} \quad (11)$$

式中: E 为燃煤消耗量; NCV 为净发热值; CEF 为碳排放系数; COF 为碳氧化因子; $44/12$ 为CO₂与C的分子量比.机组采用烟气余热深度利用系统,年运行时间为5 500 h时,可减少CO₂排放量1.59万吨/年,碳交易价格取50元/吨,系统年环境收益约为79.5万元.SO₂、NO_x等污染物计算方法类似.核算SO₂排放量时,硫转化率取98%,脱硫效率取90%,SO₂与S的分子量比为64/32,可减少4.59吨/年.核算NO_x排放量时转化率取25%,脱硝效率取80%,NO_x与N的分子量比为46/14,可减少54.94吨/年.

节能改造直接影响煤耗,进而影响排放,间接关联减排收益.全国碳市场要求火电企业履约碳排放配额,节能改造创造的配额盈余可直接出售或储备用于未来履约.减排成效可转化为经济价值,收益具有强制性和持续性.因此,本文所提方案的实施不仅能显著降低能源消耗,而且还能深度激活绿色经济价值链条,推动全产业链低碳转型,推动可持续发展,助力国家实现“双碳”目标,实现经济-环保双赢.

5 结论

通过分析660 MW超超临界燃煤机组的运行特点,设计了针对大型燃煤机组不同季节下烟气余热的深度利用方案,并结合现场实际运行数据,对系统进行了经济性分析,主要结论如下.

1) 案例机组在夏季采用烟气余热深度利用系统工作时,不同THA工况下运行平均可降低排烟温度22.38℃、汽机热耗率57.04 kJ/kWh、煤耗率2.10 g/kWh.低负荷时煤耗率降低更加明显,可降低汽轮机煤耗率2.42 g/kWh.根据不同工况下的运行时间可得夏季节煤量达1 274.45吨.

2) 通过对比机组不同THA工况下运行的节煤量,冬季工况下采用烟气旁路联合暖风器系统(方案3)更优,平均降低排烟温度27.15℃、汽机热耗率76.44 kJ/kWh、煤耗率2.81 g/kWh.低负荷时可降低煤耗率3.42 g/kWh.根据不同工况下的运行时间可得冬季节煤量达2 014.10吨.

3) 系统设计时需考虑设备空间布局、管道连接及材料耐高温高压等问题,选择高效、可靠的设备,确保其适应机组的运行条件,以免发生低温腐蚀.该系统的总投资约为1 184.10万元,机组采用烟气余热深度利用系统后,全年平均可节省6 688.86吨标准煤,节煤收益达501.66万元;系统净现值为1 777.26万元,动态投资回收期约为2.36年;CO₂等气体减排超过1.59万吨/年.节能、经济及环保效益显著,在工程上具有可行性.

参考文献:

- [1] 杨名,段立强,刘庆新,等.超超临界二次再热燃煤发电系统优化设计[J].工程热物理学报,2020,41(9):2119-2128.
YANG M, DUAN L Q, LIU Q X, et al. Optimization design design of a new ultra-supercritical double reheat coal-fired power generation system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(9): 2119-2128. (in Chinese)
- [2] 蒋志浩,刘伟,林强.燃煤机组空气预热器烟气旁路烟水复合余热利用系统节能分析[J].锅炉技术,2022,53(4):79-82.
JIANG Z H, LIU W, LIN Q. Energy-saving analysis of air preheater flue gas bypass gas-water compound system for waste heat utilization in coal-fired unit[J]. Boiler Technology, 2022, 53(4): 79-82. (in Chinese)

- [3] HAN Y, SUN Y Y. Collaborative optimization of energy conversion and NO_x removal in boiler cold-end of coal-fired power plants based on waste heat recovery of flue gas and sensible heat utilization of extraction steam[J]. *Energy*, 2020, 207: 118172.
- [4] 王祝成, 胡方楼, 韩国庆, 等. 机炉深度耦合下机组性能试验方法[J]. *热力发电*, 2020, 49(12): 95-99+134.
WANG Z C, HU F L, HAN G Q, et al. Performance test method for unit suffering deep coupling of turbine and boiler[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(12): 95-99+134. (in Chinese)
- [5] 李帅, 李贵鹏, 鲁希振. 1 000 MW二次再热机组烟气余热深度利用技术[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(S2): 352-359.
LI S, LI G P, LU X Z. Deep utilization technology of flue gas residual heat for a 1 000 MW double-reheat unit[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(S2): 352-359. (in Chinese)
- [6] 陈珣, 徐曙, 杨益, 等. 660 MW燃煤发电机组烟气余热梯级利用系统性能分析与优化[J]. *热能动力工程*, 2021, 36(3): 1-12.
CHEN X, XU S, YANG Y, et al. Performance analysis and optimization for the flue gas waste heat cascade utilization system of 660 MW coal-fired generating unit[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36(3): 1-12. (in Chinese)
- [7] 翟洪振. 燃煤电站烟气余热梯级利用系统优化及热经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
ZHAI H Z. Optimization and thermoeconomic analysis of flue gas waste heat cascade utilization system in coal-fired power plants[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. (in Chinese)
- [8] 孙亦鹏, 刘建华, 程亮, 等. 火电厂空气预热器旁路余热利用系统经济性分析[J]. *热能动力工程*, 2021, 36(3): 93-99.
SUN Y P, LIU J H, CHENG L, et al. Economic analysis for the flue gas waste heat utilization system of air preheater bypass in thermal power plant[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36(3): 93-99. (in Chinese)
- [9] 肖卓楠, 张斌, 霍立伟, 等. 1 000 MW超超临界机组烟风系统余热利用的研究[J]. *锅炉技术*, 2022, 53(2): 1-5.
XIAO Z N, ZHANG B, HUO L W, et al. Research on waste heat utilization of flue gas system in 1 000 MW ultra-supercritical unit[J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(2): 1-5. (in Chinese)
- [10] 周璐瑶. 二次再热燃煤发电机组系统优化与能量梯级利用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
ZHOU L Y. Research on system optimization and energy cascade utilization of double reheat coal-fired power generation units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [11] 马有福, 杨丽娟, 吕俊复. 联合旁通烟道与暖风器的锅炉烟气余热利用系统[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(18): 5359-5366.
MA Y F, YANG L J, LYU J F. Analysis of an exhaust heat recovery process of integrating bypass flue and condensate air heater for efficient power generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(18): 5359-5366. (in Chinese)
- [12] 蒋晓锋, 邵睿喆, 张贤, 等. 火电机组烟风水复合余热利用系统[J]. *锅炉技术*, 2020, 51(2): 37-40+63.
JIANG X F, SHAO R Z, ZHANG X, et al. Gas-air-water composite waste heat utilization system for thermal power unit[J]. *Boiler Technology*, 2020, 51(2): 37-40+63. (in Chinese)
- [13] 靖长财, 杨富鑫, 谭厚章, 等. 1 000 MW机组锅炉烟气余热利用空气预热器烟气旁路方案关键技术问题研究[J]. *锅炉技术*, 2017, 48(4): 19-22.
JING C C, YANG F X, TAN H Z, et al. Study on heat recovery from flue gas in 1 000 MW power plant by using the system of gas bypass of air preheater[J]. *Boiler Technology*, 2017, 48(4): 19-22. (in Chinese)
- [14] 董伟, 许继东, 刘双白, 等. 燃煤电站两种烟气余热利用方式的对比分析[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(4): 350-358.
DONG W, XU J D, LIU S B, et al. Comparative study on two utilization methods of flue gas waste heat in coal-fired power plants[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(4): 350-358. (in Chinese)
- [15] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
LIN W C. Energy-saving theory of thermal system in thermal power plant[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1994. (in Chinese)
- [16] FAN C H, PEI D S, WEI H Q. A novel cascade energy utilization to improve efficiency of double reheat cycle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 1388-1396.
- [17] LIN X L, LI Q L, WANG L K, et al. Thermo-economic analysis of typical thermal systems and corresponding novel system for a 1 000 MW single reheat ultra-supercritical thermal power plant[J]. *Energy*, 2020, 201: 117560.
- [18] MA Y F, YANG L J, LU J F, et al. Techno-economic comparison of boiler cold-end exhaust gas heat recovery processes for efficient brown-coal-fired power generation[J]. *Energy*, 2016, 116: 812-823.
- [19] 刘纪福. 翅片管换热器的原理与设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
LIU J F. Theory and design for fin-tube heat exchangers[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013. (in Chinese)
- [20] 唐丽丽, 谢林贵, 赖强, 等. 燃煤发电机组机炉耦合系统经济性的对比分析[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(10): 81-86.

- TANG L L, XIE L G, LAI Q, et al. Comparison on economic performances of boiler-turbine coupling systems for coal-fired power plants[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(10): 81-86. (in Chinese)
- [21] 张晓东, 唐丽丽, 翟璇, 等. 燃煤发电机组烟气余热回收系统优化与经济性分析[J]. *锅炉技术*, 2022, 53(4): 74-78.
- ZHANG X D, TANG L L, ZHAI X, et al. Optimization and economic analysis of flue gas waste heat recovery system of coal-fired power plants[J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(4): 74-78. (in Chinese)
- [22] YAN M, ZHANG L, SHI Y T, et al. A novel boiler cold-end optimisation system based on bypass flue in coal-fired power plants: Heat recovery from wet flue gas[J]. *Energy*, 2018, 152: 84-94.
- [23] 马有福, 王涛, 吕俊复, 等. 基于过热蒸汽干燥开式制粉的燃准东煤电技术[J]. *煤炭转化*, 2022, 45(6): 72-79.
- MA Y F, WANG T, LYU J F, et al. A novel Zhundong-coal-fired power generation technology based on superheated-steam-dried open pulverizing system[J]. *Coal Conversion*, 2022, 45(6): 72-79. (in Chinese)
- [24] 李宏舟, 何礼飞, 李姝. 可再生能源视阈下“三改联动”政策的成本成因与定量测度: 基于CGE模型的分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(11): 3501-3519.
- LI H Z, HE L F, LI S. The cost causes and quantitative measurements of the “Triple Reform” policy under the perspectives of renewable energy: A CGE model analysis[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2024, 44(11): 3501-3519. (in Chinese)

责任编辑: 刘 敏