

煤电升级改造背景下烟气余热利用节能效益 对比评估

王华霆, 陈衡*, 徐钢, 安吉振

(热电生产过程污染物监测与控制北京市重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Comparative Evaluation of Energy-Saving Benefits of Flue Gas Waste Heat Utilization Under the Background of Coal Power Upgrading

WANG Huating, CHEN Heng*, XU Gang, AN Jizhen

(Beijing Key Laboratory of Pollutant Monitoring and Control in Thermoelectric Production (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 对火电企业进行节能减排改造, 能够降低火电供电煤耗, 进而有效减少二氧化碳排放量的增长, 对实现碳达峰、碳中和目标具有重要意义。以某630 MW机组为例, 对比4种余热利用方案(低温省煤器方案、二级低温省煤器方案、旁路烟道方案和机炉耦合方案)的系统机组, 进行了关键技术参数与节电效果比较分析, 结果表明: 排烟温度降低为90℃, 供电煤耗率低温省煤器方案降低1.88 g/(kW·h), 二级低温省煤器方案降低2.16 g/(kW·h), 旁路烟道方案降低2.29 g/(kW·h), 而机炉耦合方案降低2.66 g/(kW·h), 节能效果最为显著。

关键词: 煤电; 节能减排; 余热利用; 低温省煤器

ABSTRACT: The energy saving and emission reduction transformation of thermal power enterprises can reduce the coal consumption of thermal power supply, and then effectively reduce the growth of carbon dioxide emissions, which is of great significance to achieve the goal of carbon peak and carbon neutralization. Taking a 630 MW unit as an example, the system units of four waste heat utilization schemes (low-temperature economizer scheme, secondary low-temperature economizer scheme, bypass flue scheme and turbine boiler coupling scheme) were compared, and the key technical parameters and power saving effect were compared and analyzed. Moreover, a reference for the upgrading and technical transformation of energy conservation and emission reduction in China's power industry was put forward. The results show that the exhaust

gas temperature is reduced to 90℃, The coal consumption rate of power supply is reduced by 1.88 g/(kW·h) in the low-temperature economizer scheme, 2.16 g/(kW·h) in the secondary low-temperature economizer scheme, 2.29 g/(kW·h) in the bypass flue scheme, and 2.66 g/(kW·h) in the turbine boiler coupling scheme.

KEY WORDS: coal-fired electricity; conserve energy reduce emissions; waste heat utilization; low temperature economizer

0 引言

煤电行业是燃煤消耗的重点产业之一, 是我国节能减排工作的重点管控产业。“十一五”到“十三五”时期, 中国深入推进煤电节能减排提升技术改造, 火电供电煤耗水平不断降低。2020年我国6 000 kW及以上的火电厂平均供电标准煤耗约为305.5 g/(kW·h), 比2015年、2010年、2005年分别降低9.9、27.5、64.5 g/(kW·h)。以2005年为基础年, 2006—2020年, 我国电力煤耗的降低累计削减CO₂排放量66.7亿t, 对我国电力行业CO₂减排的贡献约为36%, 从而有效降低了我国电力行业CO₂排放量的增幅。目前我国仅供电行业与供热行业排放的CO₂占我国排放量的比例就已经达到40%以上。所以, 进一步提升能源利用效率的最有效措施之一是深入推动我国煤电机组节能降耗工作, 这对于完成我国电力行业碳排放量达峰, 乃至我国

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51821004)。

Project Supported by Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China (51821004).

“碳达峰、碳中和”目标都有着重要意义^[1-2]。一次再热机组由于锅炉排烟温度高，排烟余热资源丰富，若能回收利用排烟余热，机组的节能潜力可进一步提高。国内的研究人员已经对燃煤电站余热利用技术展开了大量的研究^[3-9]，无论是在一次再热机组还是二次再热机组领域都做了大量的研究工作^[10-17]。

本文以某 630 MW 一次再热机组为例，模拟

了低温省煤方案、二级低温省煤器方案、旁路烟道方案及机炉耦合方案 4 种余热利用方式的流程，并对 4 种方案的节能效果与经济效益进行对比，为我国电力行业节能减排的升级改造提供借鉴。

1 案例机组介绍

案例机组系统示意图如图 1 所示。表 1 为机组的热力参数。

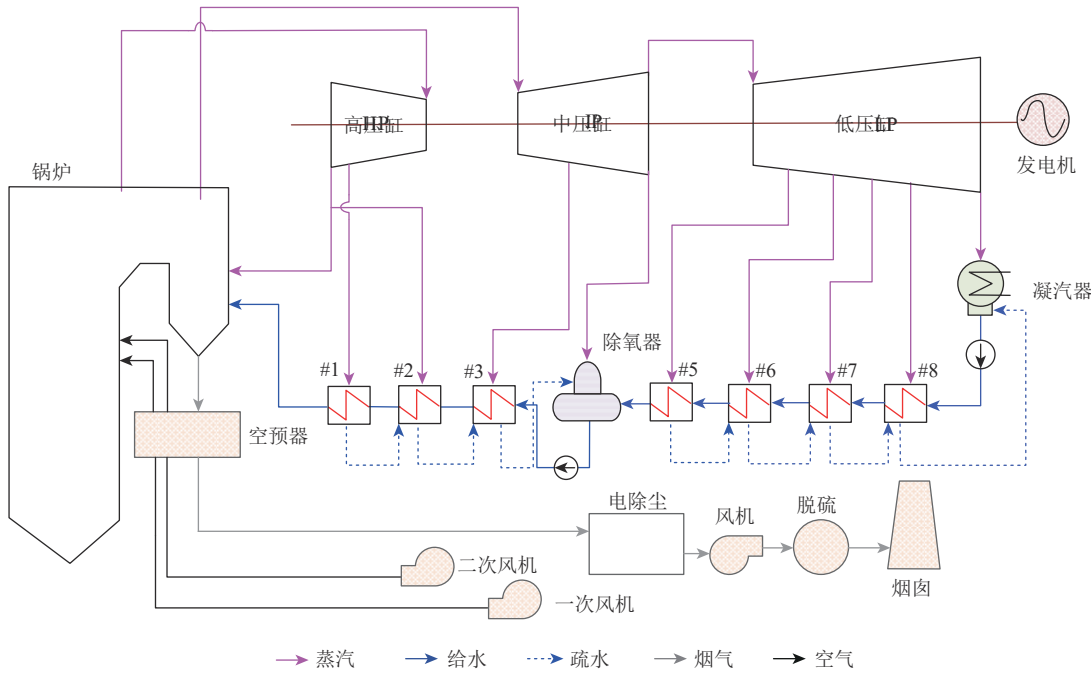


图1 案例机组系统示意图
Fig. 1 Case unit system diagram

表1 案例余热回收机组的基础参数
Tab. 1 Basic parameters of heat recovery unit in case

参数		数值
主蒸汽参数 (进高压缸)	温度/℃	538
	压力/MPa	16.7
	蒸汽流量/(t/h)	1 872.51
再热蒸汽参数 (进中压缸)	温度/℃	538
	压力/MPa	3.323
	蒸汽流量/(t/h)	1 568.89
额定背压/kPa		4
给水温度/℃		276.4
额定功率/MW		630
热耗率/[kJ/(kW·h)]		7 775
发电效率/%		46.35
供电热效率/%		43.66
供电功率/MW		593.56
供电煤耗率/[g/(kW·h)]		281.73

2 余热利用方案

实际生产过程中，为提高朗肯循环的平均吸热温度，从而提高电站发电效率、降低能耗，通常燃煤电站都会设置回热系统，该回热系统可以将部分蒸汽抽取出来用以加热凝结水/给水。虽然回热系统抽取蒸汽加热凝结水提高了凝结水温度，但是抽取的蒸汽也会因此凝结成相应压力下的饱和和水而失去做功能力，从而减少机组总出功。

2.1 低温省煤器方案

本方案主要通过锅炉尾部布置低温省煤器的方式进一步降低锅炉排烟温度，回收排烟余热，将热量注入汽机侧回热系统中，替代加热凝结水，节约汽轮机抽汽，从而起到节能的效果，该方案

系统示意图如图2所示。

2.2 二级低温省煤器方案

本方案将低温省煤器分为2级布置，由于经

过引风机会使烟气有一定的温升，所以节能效果略优于低温省煤器方案，该方案系统示意图如图3所示。

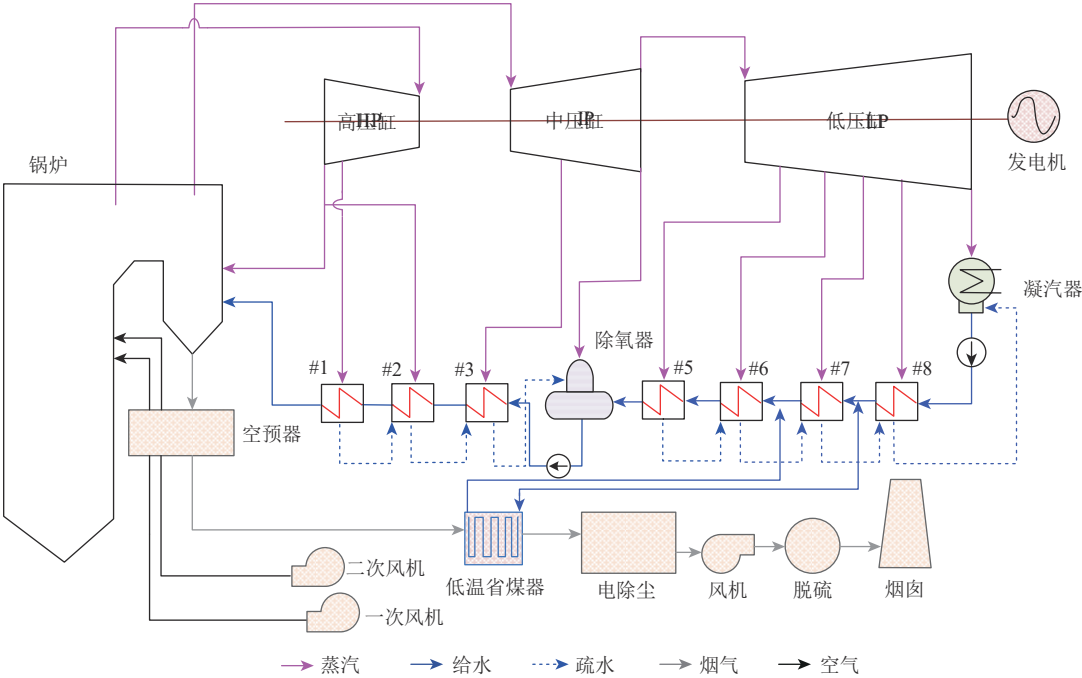


图2 低温省煤器方案系统示意图

Fig. 2 Sschematic diagram of low temperature economizer scheme system

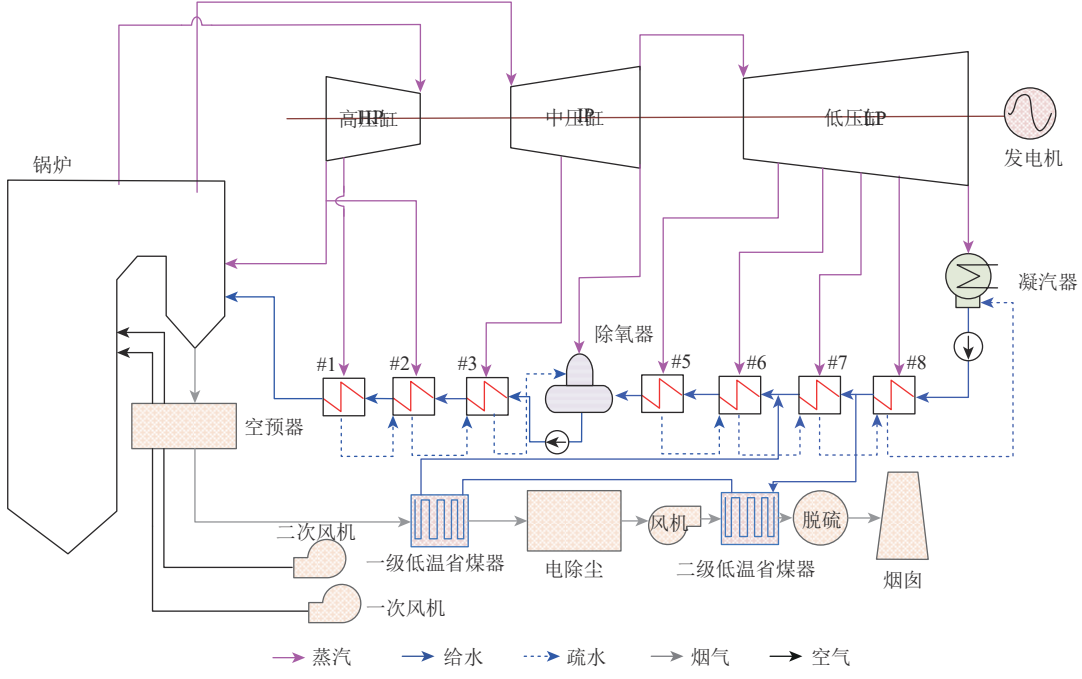


图3 二级低温省煤器方案系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two-stage low temperature economizer system

2.3 旁路烟道方案

根据热力学第二定律，无论回收的烟气能量

有多大，低温省煤器内的介质温度也无法超过锅炉排烟温度，因此至多能替代低温段的抽汽(提高

排烟温度以提高系统节能效果的行为将导致锅炉效率下降, 并不可取), 节能效果相对有限。若能提高可利用烟气的温度, 便可将凝结水加热到更高温度, 从而提升节能效果。由于回热系统的最

高温一般低于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这刚好和空预器的烟气温度相差不大, 在空预器设置旁路烟道形成旁路烟道方案, 可进一步提高节能效果, 该方案系统示意如图4所示。

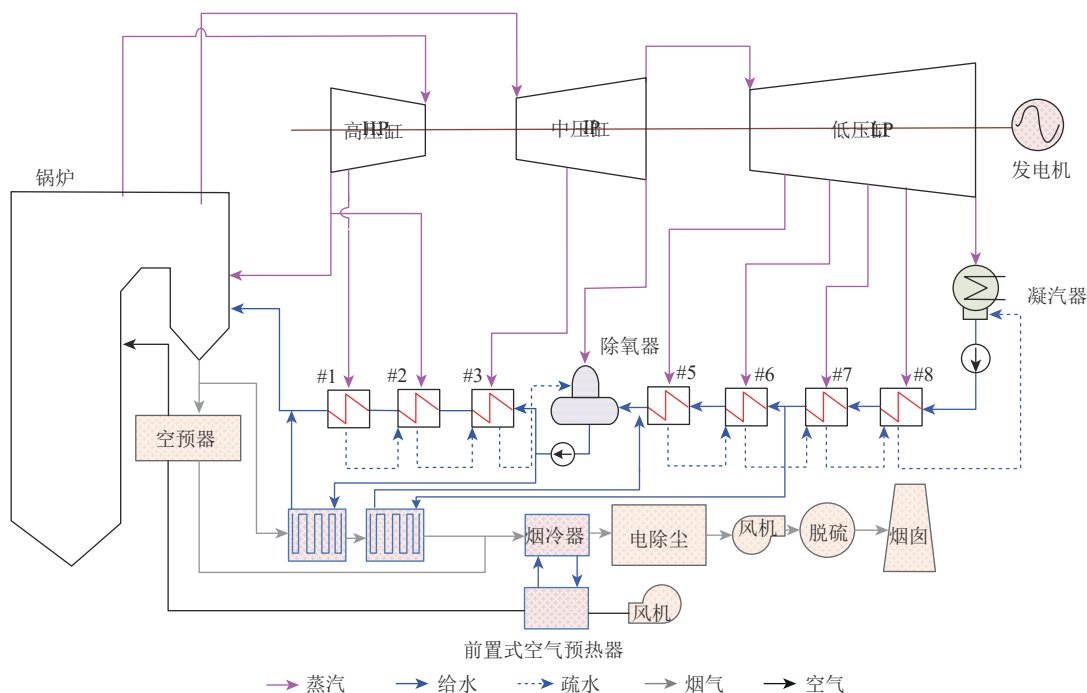


图4 旁路烟道方案系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bypass flue scheme system

旁路烟道系统将锅炉岛与汽机岛之间热质传递过程的流程壁垒打破, 将烟气、空气、给水、凝结水和蒸汽等统一视为系统能量利用过程中的放热和吸热介质进行耦合集成, 实现利用低品位蒸汽或凝结水热量置换出高品位烟气热量的效果。旁路烟道系统将省煤器出口之后的锅炉尾部分隔成主烟道和旁路烟道, 主烟道中布置主空预器, 预热进锅炉之前的冷空气, 在旁路排烟口中布置有高、低温烟-水换热器, 加热锅炉给水和凝结水。在主烟道中与旁路烟道出口的2股烟气汇合流入合流烟道, 并在合流烟道中设有前置式空预器来预热冷空气, 以补偿因烟气分流引起的空气吸热量不足。而旁路烟口系统则利用了省煤器出口的高温排烟热量, 能够预热较高水温的锅炉给水和凝结水, 从而排挤汽轮机的较高品位抽汽。

2.4 机炉耦合方案

该方案主要是在旁路烟道方案的基础上, 通过进一步加强锅炉和汽机之间的耦合集成程度,

从而引出部分低温凝结水对空气进行加热, 进而将空气在高段升温时所需要的热能降低, 排挤更多高温烟气流入旁路烟道, 从而提高旁路烟道方案的节能效益。因此, 相比于旁路烟道方案, 该机炉耦合方案以多抽6号、7号低压抽汽的代价, 置换出了前几级高压抽汽, 而这部分高压抽汽可在汽轮机中继续做功, 从而增加机组的总出功, 进一步减少机组煤耗。

如前所述, 旁路烟道方案中的前置式空预器处依旧有较大的换热温差, 还能继续优化。因此抽引低温凝结水预热空气, 排挤更多高温烟气进入旁路烟道, 该方案系统示意如图5所示。

3 建模与分析方法

本文利用EBSILON软件进行热力建模^[18]。以案例机组的汽水过程原则性热力图(平衡图)为基准, 对此模型进行了精确性验证。该模型最终发电功率为630.10 MW, 发电效率为46.35%, 发电

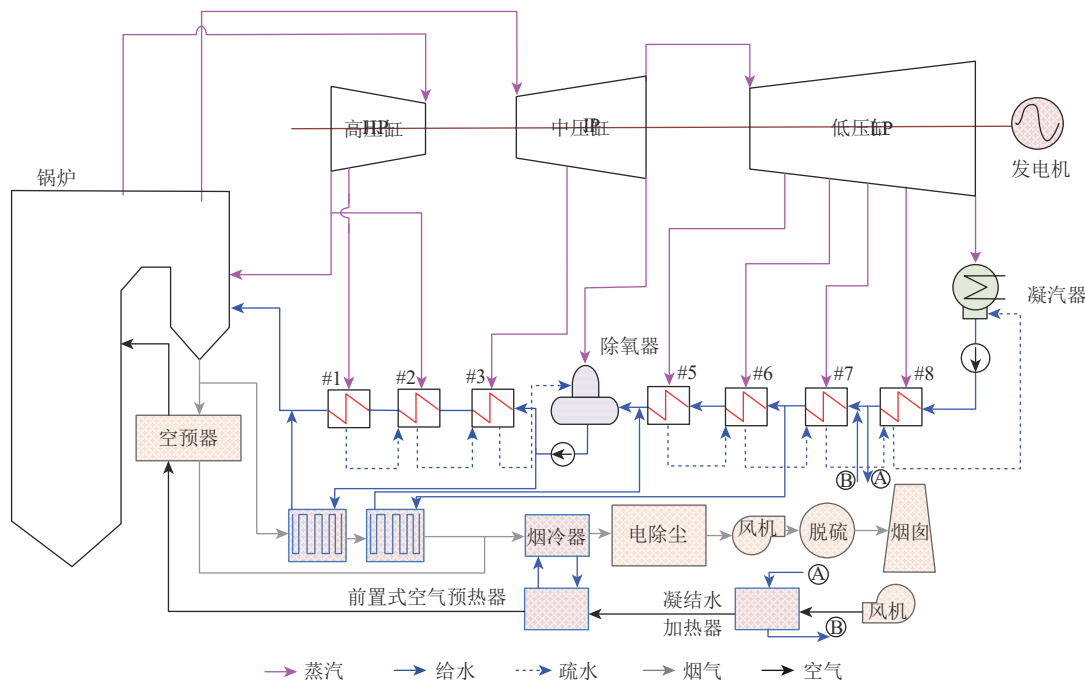


图5 机炉耦合方案系统示意图
Fig. 5 Schematic diagram of machine-furnace coupling scheme system

热耗率为7 767.48 kJ/(kW·h)。

模型参数误差分析如表2所示，其中THA工况指热耗率验收工况。从表2中可以看出，在以机组平衡图初始参数(压力、温度、流量、抽汽及管道压损)及再热蒸汽参数和排汽参数作为模型输入参数对机组进行验证，由模型计算得到的各项参数与设计值相差不大，各段抽汽压力和抽汽流量的误差都在可控的范围内。最终，机组发电功率误差为0.02%，热耗率误差为0.1%，相差很小。由此可知案例机组模型的计算结果基本可靠，可用于后续研究。

4种余热利用方案的节能效果通过供电煤耗率*b*进行表征，其表达式为

$$b = \frac{0.123 \times q}{3\,600 \times (1 - L_{\text{fey}})} \times 1\,000 \tag{1}$$

式中：*q*为机组热耗率，kJ/(kW·h)；*L_{fey}*为厂用电率。

4 结果与讨论

4.1 各余热利用方案参数

4.1.1 低温省煤器方案和二级低温省煤器方案参数

机组布置低温省煤器回收锅炉烟气余热实现

表2 案例机组THA工况模型检验

Tab. 2 Condition model test of case unit THA

参数	THA	模型	误差
主汽温度/℃	538	538	0.00
主汽压力/MPa	16.7	16.7	0.00
主汽流量/(t/h)	1 872.5	1 872.5	0.00
再热蒸汽流量/(t/h)	1 569.6	1 569.6	0.00
小汽机进汽流量/(t/h)	65.201	65.62	-0.419
一抽压力/MPa	6.108	6.108	0.00
二抽压力/MPa	3.692	3.725	-0.033
三抽压力/MPa	1.668	1.668	0.00
四抽压力/MPa	0.766	0.765	0.001
五抽压力/MPa	0.315	0.315	0.00
六抽压力/MPa	0.124	0.124	0.00
七抽压力/MPa	0.055	0.055	0.00
八抽压力/MPa	0.019	0.019	0.00
一抽流量/(t/h)	141.587	140.042	1.545
二抽流量/(t/h)	153.056	155.377	-2.321
三抽流量/(t/h)	76.307	76.294	0.013
四抽流量/(t/h)	77.183	78.984	-1.801
五抽流量/(t/h)	70.600	70.509	0.091
六抽流量/(t/h)	51.171	51.453	-0.282
七抽流量/(t/h)	56.902	56.025	0.877
八抽流量/(t/h)	55.803	57.341	-1.538
排汽压力/MPa	0.004	0.004	0.00
发电功率/MW	630	630.102	-0.102
热耗/[kJ/(kW·h)]	7 775	7 767.48	7.52

节能。案例机组排烟温度设置为 90 ℃，而引风机之后的烟气温度为 127 ℃，与排烟温度有 37 ℃的温差^[19]，将 8 号低温加热器之前的凝结水抽引出来回收排烟余热，凝结水被烟气加热后返回 6 号低温加热器入口，这就等于用烟气的热量加热了 8 段抽汽，计算结果如表 3、4 所示。

表 3 低温省煤器方案特性参数及节能效果
Tab. 3 Characteristic parameters and energy saving effect of low-temperature economizer scheme

参数	数值
进口烟气温度/℃	127
出口烟气温度/℃	90
进口烟气流量/(kg·s ⁻¹)	750
出口烟气流量/(kg·s ⁻¹)	750
换热量/MW	29.38
进口凝结水温度/℃	55.085
出口凝结水温度/℃	113.365
凝结水流量/(kg·s ⁻¹)	120
换热温差/℃	22.63

4.1.2 旁路烟道方案参数

由于低温腐蚀和空预器出口烟温等的限制，前 2 种方案节能效果并不是十分理想，而旁路烟

表 4 二级低温省煤器方案特性参数及节能效果
Tab. 4 Characteristic parameters and energy saving effect of secondary low temperature economizer

参数		数值
第 1 个低温省煤器	进口烟气温度/℃	127
	出口烟气温度/℃	108
	进口烟气流量/(kg·s ⁻¹)	750
	出口烟气流量/(kg·s ⁻¹)	750
	换热量/MW	15.11
	进口凝结水温度/℃	91.362
	出口凝结水温度/℃	121.172
	凝结水流量/(kg·s ⁻¹)	120
	换热温差/℃	10.30
	进口烟气温度/℃	113
第 2 个低温省煤器	出口烟气温度/℃	90
	进口烟气流量/(kg·s ⁻¹)	750
	出口烟气流量/(kg·s ⁻¹)	750
	换热量/MW	18.24
	进口凝结水温度/℃	55.085
	出口凝结水温度/℃	91.362
	凝结水流量/(kg·s ⁻¹)	120
	换热温差/℃	27.75
	进口烟气温度/℃	113
	出口烟气温度/℃	90

道方案可以将烟气的利用范围扩大至空气预热器入口，从而替代更高品位的抽汽，取得更加理想的节能效果，计算结果如表 5 所示。

表 5 旁路烟道方案主要换热器性能参数
Tab. 5 Main heat exchanger performance parameters of bypass flue scheme

参数	高温烟水换热器		低温烟水换热器		前置式空预器烟气侧		前置式空预器空气侧		前置式空预器空气侧	
	热流体	冷流体	热流体	冷流体	热流体	冷流体	热流体	冷流体	热流体	冷流体
	烟气	给水	烟气	凝结水	烟气	循环水	循环水	一次风	循环水	二次风
进口温度/℃	334	169.811	174.906	79.645	127	69.7	99.632	27	99.632	23
出口温度/℃	174.906	276.428	127	122.032	90	99.632	69.7	55	69.7	30.85
流量/(kg·s ⁻¹)	70	25	70	20	750	200	107.2	160	92.8	400
换热量/MW	12.12		3.57		29.38		15.74		13.64	
换热温差/℃	21.64		50.06		23.66		43.66		57.03	

从表 5 中数据可以得知，旁路烟道方案重新构建了锅炉空预器之前的烟气—空气换热流程，一、二次风先经过前置式空预器的预热再进入空预器。

4.1.3 机炉耦合方案

旁路烟道方案中的前置式空预器处依旧具有相当大的换热温差，还能够继续进行优化。因此可抽引低温凝结水预热空气，排挤更多高温烟气进入旁路烟道，表 6 为机炉耦合方案主要换热器性能参数。

4.2 各种余热利用方案节能效果对比

4 种方案的节能效果如表 7 所示，与案例机组相比，低温省煤器方案可以降低供电煤耗 1.88 g/(kW·h)；二级低温省煤器方案可以降低供电煤耗 2.16 g/(kW·h)。旁路烟道方案中，系统功率输出增加了 6.12 MW，供电煤耗比案例机组下降 2.29 g/(kW·h)；机炉耦合方案中，系统出功增加了 7.16 MW，供电煤耗为 279.07 g/(kW·h)，比案例机组下降 2.66 g/(kW·h)，节能效果为 4 种方案中最优。

表6 机炉耦合方案主要换热器性能参数

Tab. 6 Main heat exchanger performance parameters of machine-furnace coupling scheme

参数	高温烟水换热器		低温烟水换热器		前置式空预器 烟气侧		前置式空预器 空气侧		前置式空预器 空气侧		凝结水-空气 换热器		凝结水-空气 换热器	
	热流体	冷流体	热流体	冷流体	热流体	冷流体	热流体	冷流体	热流体	冷流体	热流体	冷流体	热流体	冷流体
	烟气	给水	烟气	凝结水	烟气	循环水	循环水	一次风	循环水	二次风	凝结水	一次风	凝结水	二次风
进口温度/℃	334	169.811	245.579	79.645	127	69.7	99.632	32.018	99.632	37.579	55.085	27	55.085	23
出口温度/℃	245.579	276.428	127	154.588	90	99.632	70.363	70	69.037	51.698	32	32.018	28	37.579
流量/(kg·s ⁻¹)	150	30	150	60	750	200	100	160	100	400	40	160	260	400
换热量/MW	14.54		19.09		29.38		14.41		14.97		3.86		29.42	
换热温差/℃	66.25		66.81		23.66		33.80		39.12		11.82		9.98	

表7 4种余热利用方案节能效果汇总

Tab. 7 Summary of energy saving effect of four heat utilization schemes

项目	案例机组	低温省煤器方案	二级低温省煤器方案	旁路烟道方案	机炉耦合方案
发电功率/MW	630	634.33	634.97	636.22	637.26
出功增加/MW	—	4.33	4.97	6.22	7.26
供电煤耗率/[g·(kW·h) ⁻¹]	281.73	279.85	279.57	279.44	279.07
节能效果/[g·(kW·h) ⁻¹]	—	1.88	2.16	2.29	2.66

5 结论

利用EBSILON对4种方案的节能效果进行了模拟计算和对比，得出结论如下：

1) 一次再热机组拥有非常丰富的排烟余热资源，通过4种余热利用方式，机组的节能效果显著，经计算，4种方案供电煤耗率分别降低了1.88、2.16、2.29、2.66 g/(kW·h)。

2) 4种余热利用方案中，低温省煤器方案和二级低温省煤器方案的节能效果相对较差，但系统结构简单，仅增设了低温省煤器，改造投资少；机炉耦合方案虽然节能效果相对最佳，但是增设了高温烟水换热器、低温烟水换热器、前置式空预器、凝结水-空气换热器等多个换热器，系统结构更加复杂，因此改造投资也会增加。

参考文献

[1] 国家发展改革委，国家能源局. 关于开展全国煤电机组改造升级的通知[EB/OL]. (2021-10-29)[2022-12-25]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211103_1302856.html?code=&state=123. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on carrying out the transformation and upgrading of coal-fired power

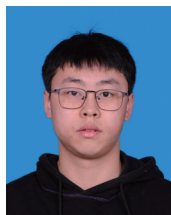
units nationwide[EB/OL]. (2021-10-29) [2022-12-25]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211103_1302856.html?code=&state=123.
[2] 冯伟忠，李励. “双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J]. 发电技术，2022，43(3): 452-461.
FENG W Z, LI L. Research and practice on development path of low-carbon, zero-carbon and negative carbon transformation of coal-fired power units under “double carbon” targets[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 452-461.
[3] 张国柱，张钧泰，文钰，等. 燃煤机组烟气余热及水回收系统变工况特性和调控策略[J]. 中国电力，2022，55(4): 214-220.
ZHANG G Z, ZHANG J T, WEN Y, et al. Study on off-design condition characteristics and control strategy of fluegas waste heat and water recovery system of coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 214-220.
[4] 潘晓伟，彭烁，李硕，等. 余热锅炉烟气低温余热回收塔流场均匀性研究[J]. 中国电力，2022，55(3): 159-166.
PAN X W, PENG S, LI S, et al. Research on the uniformity of flow field in the low-temperature waste heat recovery tower of waste heat boiler flue gas[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 159-166.
[5] 张健，甄辉，向柏祥，等. 1 000 MW 机组烟气余热利用方案对比[J]. 发电设备，2021，35(5): 370-374.
ZHANG J, ZHEN H, XIANG B X, et al.

- Comparison of flue gas waste heat utilization schemes of 1 000 MW unit[J]. Power Generation Equipment, 2021, 35(5): 370-374.
- [6] 袁迪, 柴艳琴. 某1 000 MW锅炉烟气余热利用方案研究[J]. 产业科技创新, 2020, 2(28): 58-59.
- YUAN D, CHAI Y Q. Study on the utilization scheme of flue gas waste heat of a 1 000 MW boiler[J]. Industrial Scientific and Technological Innovation, 2020, 2(28): 58-59.
- [7] 王光磊, 高绪栋, 王宗群, 等. 新建660 MW机组烟气余热利用方案及经济性分析[J]. 山东电力技术, 2020, 47(10): 78-80.
- WANG G L, GAO X D, WANG Z Q, et al. Utilization scheme and economic analysis of flue gas waste heat of new 660 MW unit[J]. Shandong Electric Power Technology, 2020, 47(10): 78-80.
- [8] 张卿. 某600 MW机组烟气余热利用经济性分析[J]. 热力透平, 2019, 48(4): 290-293.
- ZHANG Q. Economic analysis of flue gas waste heat utilization of a 600 MW unit[J]. Thermal Turbine, 2019, 48(4): 290-293.
- [9] 孙亦鹏, 曹红加, 白秀春, 等. 火电厂烟气余热利用系统改造经济性分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(11): 140-145.
- SUN Y P, CAO H J, BAI X C, et al. Economic analysis of the transformation of flue gas waste heat utilization system in thermal power plant[J]. Thermal Power Engineering, 2019, 34(11): 140-145.
- [10] 杨义, 郑莆燕, 齐同磊, 等. 二次再热机组烟气余热利用与抽汽参数优化研究[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(1): 5-10.
- YANG Y, ZHENG P Y, QI T L, et al. Study on utilization of flue gas waste heat and optimization of steam extraction parameters of secondary reheat unit[J]. Journal of Shanghai Electric Power University, 2021, 37(1): 5-10.
- [11] 杨勇平, 张晨旭, 徐钢, 等. 大型燃煤电站机炉耦合热集成系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 375-382.
- YANG Y P, ZHANG C X, XU G, et al. Turbine-boiler coupled thermal integration system for large coal-fired power station[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 35(2): 375-382.
- [12] 李沁伦, 王璐凯, 刘银河. 燃煤发电机组烟气余热利用系统改进研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(12): 1019-1026.
- LI Q L, WANG L K, LIU Y H. Study on improvement of flue gas waste heat utilization system of coal-fired generator set[J]. Journal of Power Engineering, 2019, 39(12): 1019-1026.
- [13] 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.
- 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.
- [14] 杨美, 周云龙, 杨金福, 等. 700 ℃超超临界一次再热发电系统优化[J]. 发电技术, 2021, 42(4): 509-516.
- YANG M, ZHOU Y L, YANG J F, et al. Optimization of 700 ℃ ultra-supercritical single reheat power generation system[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(4): 509-516.
- [15] 刘烨, 刘占淼, 杨楠. 大型燃煤电站锅炉烟气余热利用系统节能研究[J]. 中国设备工程, 2021(21): 216-218.
- LIU Y, LIU Z M, YANG N. Study on energy saving of flue gas waste heat utilization system of large coal-fired power station boiler[J]. China Equipment Engineering, 2021(21): 216-218.
- [16] 於震跃, 徐红波, 郑应霞, 等. 提高二次再热机组参数的技术经济研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(9): 101-106.
- YU Z Y, XU H B, ZHENG Y X, et al. Technical and economic study on improving parameters of double reheat units[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(9): 101-106.
- [17] 郑明辉, 刘蕊菁, 王雪, 等. 燃煤发电机组耦合余热利用技术研究进展[J]. 南方能源建设, 2022, 9(3): 80-87.
- ZHENG M H, LIU R J, WANG X, et al. Research progress of coupled waste heat utilization technology for coal-fired power generating units[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(3): 80-87.
- [18] 麻国倩. 基于EBSILON二次再热百万机组机炉耦合建模仿真及热经济性研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- MA G Q. Based on EBSILON, modeling and simulation of turbine boiler coupling of secondary reheating million unit and research on thermal economy [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [19] 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.
- QI Z, CHEN H, XU G, et al. Thermodynamic analysis and optimization of flue gas waste heat

utilization of secondary reheat unit[J]. Power Technology and Environmental Protection, 2019, 35(2): 1-7.

收稿日期: 2023-03-02。

作者简介:



王华霆

王华霆(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为火电机组余热利用, 120202202292@ncepu.edu.cn;



陈衡

陈衡(1989), 男, 博士, 副教授, 研究方向为热力系统优化、固体废弃物能质梯级利用, 本文通信作者, heng@ncepu.edu.cn;



徐钢

徐钢(1978), 男, 博士, 教授, 研究方向为能源动力系统优化与节能、污染物控制及温室气体减排, xgncepu@163.com;

(责任编辑 辛培裕)