

汽轮机高位布置超超临界燃煤发电系统 变工况焓经济性分析

李延兵¹, 贾树旺¹, 张军亮¹, 符悦², 刘明², 严俊杰^{2*}

(1. 国能锦界能源有限责任公司, 陕西省 榆林市 719319;
2. 动力工程多相流国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Exergy Economic Analysis of Ultra-Supercritical Coal-Fired Power Plants With High-Level Layout of Turbine Under Load-Cycling Conditions

LI Yanbing¹, JIA Shuwang¹, ZHANG Junliang¹, FU Yue², LIU Ming², YAN Junjie^{2*}

(1. Guoneng Jinjie Energy Co., Ltd., Yulin 719319, Shaanxi Province, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

摘要: 可再生能源的迅速普及给电网的稳定性和可靠性带来了挑战, 为了解决此问题, 燃煤机组承担了调峰调频的主要任务。汽轮机高位布置技术可大幅减少耐高温材料的用量, 从而提高超高参数机组的经济性。为获得汽轮机高位布置超超临界燃煤发电机组的变负荷性能, 建立了焓分析和焓经济性分析模型, 分析了不同负荷下机组的焓经济性, 获得了机组变负荷的不可逆性分布。分析结果表明: 通过对系统参数进行优化, 可以改善高压加热器的焓效率; 采用汽轮机高位布置技术的燃煤机组的度电成本为0.332 4元/(kW·h); 发电的焓价格随着负荷的升高而降低。

关键词: 超超临界; 燃煤发电; 火力发电; 汽轮机; 高位布置; 节能减排; 焓经济性

ABSTRACT: The rapid penetration of intermittent renewable power puts pressure on the stability and reliability of power grids. To address this tissue, coal-fired power plants play an increasingly important role in providing the peak shaving service. Moreover, the high-level layout of turbine can significantly reduce the amount of high temperature resistant materials and thus improve the economics of ultra-supercritical coal-fired power plants. The exergy and exergy economic models were developed to obtain the performance of ultra-supercritical coal-fired power plants with high-level layout of turbine under load-cycling operation conditions. By analyzing the exergy economic of coal-fired power plants under different loads, and the distribution of irreversibilities

was obtained. The results show that the exergy efficiency of the high pressure turbine can be improved by optimizing the parameters. Moreover, the cost of electricity per unit with the high-level layout is 0.332 4 yuan/(kW·h). The exergy price of electricity generation decreases with the increase of load.

KEY WORDS: ultra-supercritical; coal-fired power generation; thermal power generation; turbine; high-level layout; energy saving and emission reduction; exergy economy

0 引言

燃煤发电是电力供应的主要形式, 国际能源署(International Energy Agency, IEA)在《2021年煤炭报告》中称, 2021年电力需求增长超过了低碳能源供给能力, 导致燃煤发电厂的发电量猛增9%^[1]。在经历2021年的能源短缺危机后, 煤炭等传统能源在现阶段的能源系统中仍占据主导地位。然而, 煤炭作为全球电力发展的基石, 发展节能减排技术至关重要^[2-3]。

节能减排作为我国火力发电行业的研究热点, 目前研究主要集中在降低热端不可逆损失、减少系统内部不可逆损失及降低冷端不可逆损失3个方面^[4]。在降低热端不可逆损失的研究中, 以提高主蒸汽和再热蒸汽参数作为优化的主要手段, 高参数超超临界燃煤发电技术能够有效提升机组效率, 并且减少温室气体的排放^[5-8]。但是, 由于

基金项目: 国家自然科学基金项目(52022079)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52022079).

耐高温材料阻碍高参数超超临界燃煤发电技术的发展^[9]，目前的主蒸汽温度最高为605℃，再热蒸汽温度最高达到620℃^[10]。机组的冷端受限于地理条件，这部分不可逆损失的研究主要集中于冷端构型设计^[11]。

除了通过提高热端参数和降低冷端参数来提升机组效率，还可以通过调整机组的三维结构^[12]来提升机组的经济性。采用汽轮机高位布置技术能大幅减少耐高温管道的使用，从而提升机组的经济性^[13-15]。虽然目前汽轮机高位布置技术已经成熟^[16-17]，但是现有研究大多从热力学第一定律的角度进行分析^[18-20]，鲜少对采用汽轮机高位布置技术的机组不可逆性进行分析。

通过烟分析可以评估系统的不可逆性分布，为系统优化提供参考^[21]。采用汽轮机高位布置的燃煤机组热力性能变化规律与常规布置机组相似^[22]，但是就投资成本而言，采用汽轮机高位布置的燃煤机组土建结构投资成本比常规布置机组成本高。因此，有必要对采用汽轮机高位布置的燃煤机组的烟经济性变化规律进行研究。

为此，本文建立采用汽轮机高位布置技术的燃煤机组的烟模型和烟经济性模型，分析机组变工况下的流股、设备烟效率变化以及成本变化，为后续机组的优化研究提供参考。

1 汽轮机高位布置技术的烟和烟经济性分析模型

汽轮机系统由回热加热器、凝汽器、汽轮机本体等设备构成，基于热力学第二定律建立机组的烟模型，统筹汽轮机高位布置技术的实际运行情况，建立烟经济性分析模型。

1.1 烟分析模型

物质的烟表示该物质所具有的最大能量，烟分析从能量的数量和质量2个方面揭示出装置或设备在能量中烟的传递、转换、利用和损失情况，从而分析系统损失的原因、部位，进而提出改进方向。

假定烟分析的环境参数如下：压力 $p_0=0.1\text{ MPa}$ ，温度 $T_0=298.15\text{ K}$ 。燃煤发电机组以水为介质，单位质量水的烟计算公式^[23-24]如下：

$$e_x=(h-h_0)-T_0(s-s_0) \quad (1)$$

式中： h 为单位质量水的焓值，kJ/kg； h_0 为环境条件下单位质量水的焓值，kJ/kg； s 为单位质量水的熵值，kJ/(kg·K)； s_0 为环境条件下单位质量水的熵值，kJ/(kg·K)。

燃煤发电机组以煤为载体，单位质量煤的烟计算公式如下：

$$e_{\text{coal}}=q_{\text{net}}(1.0064+0.1519\frac{w_H}{w_C}+0.0616\frac{w_O}{w_C}+0.0429\frac{w_N}{w_C}) \quad (2)$$

式中： q_{net} 为煤的低位发热量，kJ/kg； w_H 、 w_C 、 w_O 、 w_N 分别为煤中H、C、O、N的质量分数，%。

对于整个热力系统，定义系统的燃料烟、成本烟、烟损失和烟耗散，具体烟方程如下：

$$E_{F,\text{tot}}-E_{P,\text{tot}}=E_{D,\text{tot}}+E_{L,\text{tot}}=\sum_k E_{D,k}+\sum_k E_{L,k} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{tot}}=E_{P,\text{tot}}/E_{F,\text{tot}} \quad (4)$$

$$y_{D,\text{tot}}=E_{D,\text{tot}}/E_{F,\text{tot}} \quad (5)$$

$$y_{L,\text{tot}}=E_{L,\text{tot}}/E_{F,\text{tot}} \quad (6)$$

式中： $E_{F,\text{tot}}$ 为系统的燃料烟，kJ/kg； $E_{P,\text{tot}}$ 为系统的产品烟，kJ/kg； $E_{D,\text{tot}}$ 为系统的烟耗散，kJ/kg； $E_{L,\text{tot}}$ 为系统的烟损失，kJ/kg； $E_{D,k}$ 、 $E_{L,k}$ 分别为系统中部件 k 的烟耗散、烟损失，kJ/kg； ε_{tot} 为系统的烟效率； $y_{D,\text{tot}}$ 为系统的烟耗散系数； $y_{L,\text{tot}}$ 为系统的烟损失系数。

对于汽轮机高位布置技术的燃煤发电机组，部件 k 的烟方程表示如下：

$$E_{F,k}-E_{P,k}=E_{D,k} \quad (7)$$

$$\varepsilon_k=E_{P,k}/E_{F,k} \quad (8)$$

$$y_{D,k}=E_{D,k}/E_{F,k} \quad (9)$$

式中： $E_{F,k}$ 为部件 k 的燃料烟，kJ/kg； $E_{P,k}$ 为部件 k 的产品烟，kJ/kg； ε_k 为部件 k 的烟效率； $y_{D,k}$ 为部件 k 的烟耗散系数。

1.2 经济性分析模型

典型的超超临界一次再热的发电机组成本约为5亿美元^[25]，采用汽轮机高位布置技术的发电机组增加了发电机组的购置成本，主要体现在剪力墙的费用上，该费用属于机组的固定成本，假定电厂运行年限为30年，与机组经济分析有关的参数如表1所示。采用总收入(total revenue requirement,

表1 与经济分析有关的参数

Tab. 1 Parameters related to economic analysis

参数	数值
平均年利率 $i_{\text{eff}}/\%$	10
维修名义上升比率 $r_{\text{no}}/\%$	3
燃料名义上升比率 $r_{\text{nf}}/\%$	3.5
电厂运行年限 n/a	30
平均年运行时间 N_{op}/h	4 800

TRR)方法^[26]计算得到采购设备成本 C_{PE} 和固定资本成本 C_{FC} ($C_{\text{FC}}=C_{\text{PE}} F_{\text{BM}}$, 其中 F_{BM} 为模块因子), 成本按照化工工厂成本指数(chemical engineering plant cost index, CEPCI)上升到参考年。

根据火电工程限额设计参考造价指标中的数据^[27], 建立采用汽轮机高位布置技术的机组各部件购置成本($C_{\text{PE},k}$)的模型^[28]。

锅炉的成本一般占燃煤机组购置成本的50%^[29], 其计算公式如下:

$$C_{\text{PE},b} = a_b \exp[0.08 \log(\dot{m}_{\text{sh}})] [1.0 + \left(\frac{1-\eta_{\text{br}}}{1-\eta_b}\right)^7] \exp\left(\frac{p_{\text{sh}}-p_{\text{shr}}}{15}\right) [1.0 + \frac{5 \exp(t_{\text{sh}}-t_{\text{shr}})}{75}] [1.0 + \frac{t_{\text{sh}}-t_{\text{fw}}}{t_{\text{sh}}} + \frac{\dot{m}_{\text{th}}(t_{\text{rho}}-t_{\text{rhi}})}{\dot{m}_{\text{sh}} t_{\text{rho}}}] \quad (10)$$

式中: a_b 为与锅炉面积有关的成本系数; $\dot{m}_{\text{sh}}$ 为机组的主蒸汽质量流量, kg/s; η_b 为锅炉效率; η_{br} 为锅炉的最大效率, 取值为0.98; p_{sh} 为主蒸汽压力, MPa; p_{shr} 为主蒸汽的最大压力, 取值为50 MPa; t_{sh} 为主蒸汽温度, °C; t_{shr} 为主蒸汽的最大温度, 取值为850 °C; t_{fw} 为锅炉给水温度, °C; $\dot{m}_{\text{th}}$ 为再热蒸汽的质量流量, kg/s; t_{rho} 为再热蒸汽的出口温度, °C; t_{rhi} 为再热蒸汽的入口温度, °C。

汽轮机成本计算公式如下:

$$C_{\text{PE},st} = a_{\text{st}} [1.0 + 5 \exp(\frac{t_{\text{sti}}-t_{\text{stir}}}{10.42})] \cdot [1.0 + (\frac{1-\eta_{\text{sr}}}{1-\eta_s})^3] \dot{W}_{\text{st}}^{0.7} \quad (11)$$

式中: a_{st} 为与汽轮机输出功率有关的成本系数; t_{sti} 为汽轮机入口温度, °C; t_{stir} 为汽轮机入口的最大温度, 取值为850 °C; η_s 为汽轮机等熵效率; η_{sr} 为汽轮机的最大等熵效率, 取值为0.95; $\dot{W}_{\text{st}}$ 为汽轮机输出功率, kW。

回热加热器的成本一般与换热器的端差有关,

其计算公式如下:

$$C_{\text{PE},fdh} = a_{fdh} Q_{fdh} \left(\frac{1}{\Delta t_{ut} + 4}\right)^{0.1} \quad (12)$$

式中: a_{fdh} 为与回热加热器换热量有关的成本系数; Q_{fdh} 为回热加热器的换热量, kW; Δt_{ut} 为回热加热器的上端差, °C。

除氧的成本计算公式如下:

$$C_{\text{PE},dc} = a_{dc} \dot{m}_{dc}^{0.7} \quad (13)$$

式中: a_{dc} 为与除氧器中质量流量有关的成本系数; $\dot{m}_{dc}$ 为除氧器的质量流量, kg/s。

凝汽器成本与凝汽器的面积有关, 其计算公式如下:

$$C_{\text{PE},cd} = a_{cd} \sum A_{\text{cond}} \quad (14)$$

式中: a_{cd} 为与面积有关的成本系数; A_{cond} 为凝汽器的面积。

泵的成本一般与泵的功率有关, 其计算公式如下:

$$C_{\text{PE},pump} = a_{pump} \dot{W}_{pump}^{0.71} [1 + (\frac{1-\eta_{\text{psr}}}{1-\eta_{\text{ps}}})^3] \quad (15)$$

式中: a_{pump} 为与回热加热器换热量有关的成本系数; $\dot{W}_{pump}$ 为泵的输入功率, kW; η_{ps} 为泵的等熵效率; η_{psr} 为泵的最大等熵效率, 取值为0.95。

电机的成本计算公式如下:

$$C_{\text{PE},eg} = a_{eg} \dot{W}_{eg}^{0.95} \quad (16)$$

式中: a_{eg} 为与电机输入功率有关的成本系数; $\dot{W}_{eg}$ 为电机的输入功率, kW。

机组的平均年燃料费用计算公式如下:

$$C_{\text{FL}} = \dot{m}_{\text{coal}} c_{\text{coal}} q_{\text{net}} N_{\text{op}} C_{\text{ELF},\text{coal}} \quad (17)$$

式中: $\dot{m}_{\text{coal}}$ 为煤耗量, kg/h; c_{coal} 为基于煤的低位发电量的煤价, 元/kJ; $C_{\text{ELF},\text{coal}}$ 为平均煤价变化系数, 元/kJ。

平均变化系数的计算公式如下:

$$C_{\text{ELF}} = \frac{1+r_n}{i_{\text{eff}}-r_n} [1 - (\frac{1+r_n}{1+i_{\text{eff}}})^n] C_{\text{RF}} \quad (18)$$

式中: 电厂运行年限 n 一般为25~30 a; r_n 为电厂投资成本平均变化系数(计算煤的成本 C_{FL} 时取值为3.5%, 计算电厂维修成本 C_{OML} 时取值为3%); C_{RF} 为资本回收系数, 计算式为

$$C_{\text{RF}} = \frac{i_{\text{eff}}(1+i_{\text{eff}})^{n-1}}{(1-i_{\text{eff}})^n - 1} \quad (19)$$

依据文献[30], 平均工程费用 C_{EL} 和平均维修费用 C_{OML} 依据电厂的总投资成本 C_{Ti} 计算可得,

其中：

$$C_{\text{TI}} = \gamma \sum C_{\text{PE},k} \quad (20)$$

$$C_{\text{EL}} = C_{\text{TI}} C_{\text{RF}} \quad (21)$$

$$C_{\text{OML}} = \varphi C_{\text{TI}} C_{\text{ELF,OML}} \quad (22)$$

式中： $C_{\text{PE},k}$ 为系统中设备 k 的投资成本，元； $C_{\text{ELF,OML}}$ 为电厂维修成本 C_{OML} 的平均变化系数； γ 通常取4.75， φ 通常取0.06^[30]。

1.3 烟经济性分析模型

为了进一步研究系统的烟流情况和设备运行情况，文献[25]提出了通用的烟经济性分析(specific exergy costing, SPECO)方法，通过计算物质、设备的烟以及成本的关系，可以得到每股烟的成本，其中流股 i 的总烟成本计算公式如下：

$$C_i = c_i E_i = c_i \dot{m}_i e_i \quad (23)$$

式中： c_i 为流股 i 单位能量的烟成本，元/kJ； E_i 为流股 i 的烟，kW； $\dot{m}_i$ 为流股 i 的质量流量，kg/s； e_i 为流股 i 的单位烟，kJ/kg。

系统中做功量和热量的成本计算公式分别如下：

$$C_w = c_w W \quad (24)$$

$$C_q = c_q E_q \quad (25)$$

式中： C_w 为做功量的烟成本，元/s； c_w 为做功量的单位烟成本，元/kJ； W 为做功量的烟，kW； C_q 为热量的烟成本，元/s； c_q 为热量的单位烟成本，元/kJ； E_q 为热量的烟，kW。

出入口设备的烟经济性平衡公式如下：

$$\sum (c_{\text{out}} E_{\text{out}})_k + c_{w,k} W_k = c_{q,k} E_{q,k} + \sum (c_{\text{in}} E_{\text{in}})_k + Z_k \quad (26)$$

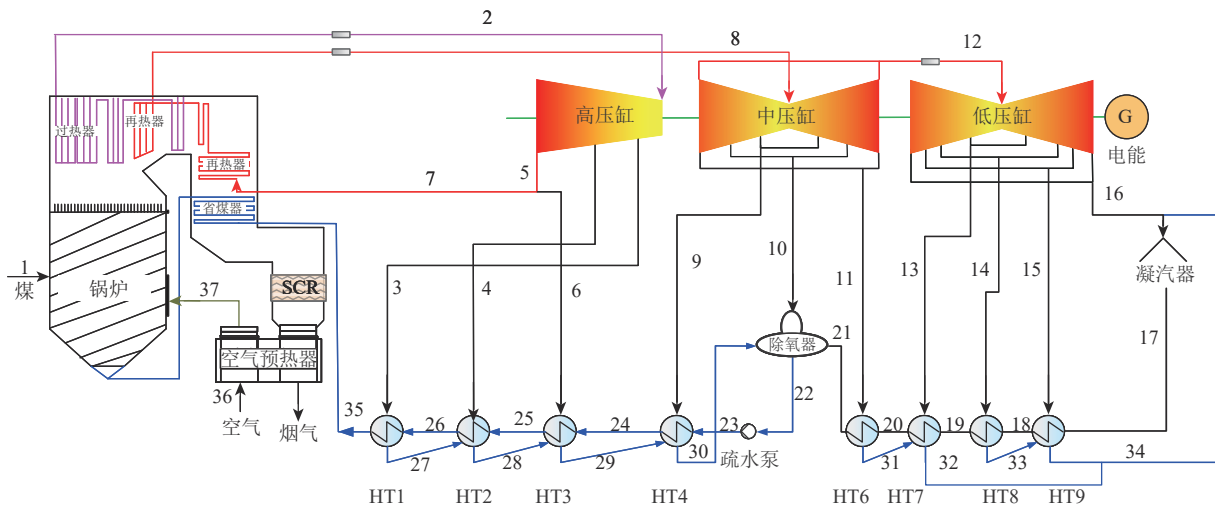
$$Z_k = \frac{C_{\text{OML}} + C_{\text{EL}}}{N_{\text{OP}} \cdot w} \times \frac{C_{\text{PE},k}}{\sum C_{\text{PE},k}} \quad (27)$$

式中： c_{out} 为设备出口的单位烟成本，元/kJ； E_{out} 为设备出口的烟，kW； c_{in} 为设备入口的单位烟成本，元/kJ； E_{in} 为设备入口的烟，kW； $c_{w,k}$ 为设备做功量的单位烟成本，元/kJ； W_k 为设备的做功量，kW； $c_{q,k}$ 为设备热量的单位烟成本，元/kJ； $E_{q,k}$ 为设备的收益烟，kW； w 为机组的年平均负荷率； Z_k 为设备 k 的成本，元/s。

2 汽轮机高位布置技术的机组模型

2.1 机组介绍

采用汽轮机高位布置技术的机组与常规机组的主要区别在于汽轮机运转层和排汽管道层的标高，采用汽轮机高位布置技术的汽轮机运转层的标高为65 m，排汽管道层的标高为43 m。采用汽轮机高位布置技术的发电机组系统图如图1所示，锅炉为一次中间再热、超临界压力、变压运行的 π 型直流锅炉；汽轮机为一次中间再热空冷式机组，主蒸汽压力及温度分别为25.8 MPa、600℃，一次再热蒸汽压力及温度分别为5.4 MPa、620℃，排汽压力为10.5 kPa。



1—37为机组中各流股的编号；HT1—HT4为高压加热器，HT6—HT9为低压加热器，加热器按照抽汽压力由大到小编号；SCR为选择性催化还原。

图1 采用汽轮机高位布置技术的机组系统图

Fig. 1 System diagram of the unit with high-level layout technology of turbine

2.2 汽轮机高位布置技术的模型验证

为了验证采用汽轮机高位布置技术的发电机组变工况计算模型的可靠性,在汽轮机热耗率验收(turbine heat acceptance, THA)、75%THA、50%THA、30%THA 以及汽轮机额定功率(turbine rated power, TRL)工况下,对汽轮机变工况计算结果与原则性热力系统图进行对比,机组的主要参数如表 2 所示,回热系统相关参数如表 3 所示。

表2 机组的主要参数
Tab. 2 Main parameters of the unit

参数	数值
额定功率/MW	660
主蒸汽压力/MPa	25.823
主蒸汽温度/℃	600
再热蒸汽压力/MPa	5.427
再热蒸汽温度/℃	620
额定主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 889.49
额定背压/kPa	10.5

表3 机组100%THA工况下回热系统参数
Tab. 3 Parameters of regenerative system under 100%THA condition of the unit

参数	回热加热器								
	HT2	HT3	HT4	HT5	HT6	HT7	HT8	HT9	
温度/℃	464.10	422.20	365.10	501.60	386.30	294.00	243.20	130.10	
压力/MPa	11.48	8.77	5.90	2.60	1.20	0.59	0.37	0.12	

汽轮机抽汽压力模拟数据和实际数据对比如表 4 所示。各级抽汽压力绝对误差均在 0.1 MPa 之

表4 汽轮机抽汽压力模拟数据和实际数据对比

Tab. 4 Comparison of simulated and actual turbine pumping pressure data

工况	参数	汽轮机抽汽压力/MPa								
		p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
THA	原始数据	11.477	8.769	5.899	2.600	1.197	0.591	0.371	0.117	0.046
	计算数据	11.477	8.769	5.899	2.600	1.197	0.591	0.371	0.117	0.046
	绝对误差	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75%THA	原始数据	8.409	6.463	4.360	1.940	0.917	0.455	0.287	0.091	0.036
	计算数据	8.409	6.463	4.360	1.940	0.917	0.455	0.287	0.091	0.036
	绝对误差	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50%THA	原始数据	5.675	4.383	2.959	1.330	0.643	0.321	0.203	0.064	0.025
	计算数据	5.675	4.383	2.959	1.330	0.643	0.321	0.203	0.064	0.025
	绝对误差	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TRL	原始数据	11.477	8.769	5.899	2.600	1.197	0.591	0.371	0.117	0.046
	计算数据	11.477	8.769	5.899	2.600	1.197	0.591	0.371	0.117	0.046
	绝对误差	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注: $p_1, p_2, \dots, p_9$ 分别为 1—9 级抽汽压力(数值由大到小排列)。

内,模型计算精度满足要求。

3 结果与讨论

3.1 焓分析

通过模拟得到了 100%THA 工况下采用汽轮机高位布置技术的燃煤机组的锅炉和汽轮机各设备的焓效率变化情况(在该工况下运行时,去掉了最后一级高压加热器)。锅炉中各设备的温度和焓效率变化如图 2 所示,可以看出,锅炉中炉膛的烟气和水换热的焓效率最低,这是因为该过程中水由液态水转化为气态水,热量主要用于增加水的显热。回热加热器的温度和焓效率变化如图 3 所示,可以看出,回热加热器中高压加热器的焓

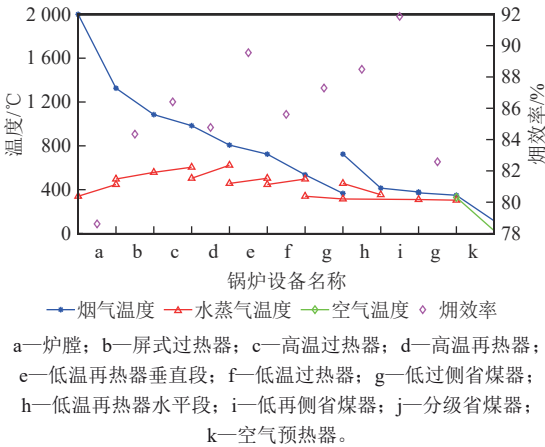


图2 锅炉中各设备的温度和焓效率变化

Fig. 2 Change of temperature and exergy efficiency of each equipment in the boiler

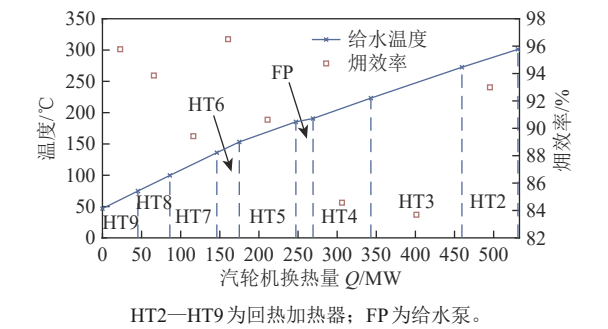


图3 回热器加热器的温度和焓效率变化

Fig. 3 Change of temperature and exergy efficiency of regenerator heater

效率明显低于低压加热器，存在较大的不可逆性，可通过优化高压加热器部分，减小系统的不可逆性，从而提高机组的效率。

3.2 焓经济性分析

选取的煤种为神华煤种，其特性参数如表5所示。根据2019—2021年的平均煤价^[31]，选取的煤价为0.03元/MJ。根据国华锦界电厂的数据建

立成本模型，锅炉中各设备尺寸及材料参数^[32]如表6所示。不同类型组件的质量因子 F_{BM} ^[32]如表7所示。受限于地理环境因素，机组采用空冷凝汽器，具体的布置方案为8×8，每台机组共有640片换热管束，其中顺流管束480片，逆流管束160片。

表5 煤种特性参数

Tab. 5 Characteristic parameters of coal types

参数	设计煤种	校核煤种
低位发热量/(kJ/kg)	19 652	18 057
水分质量分数/%	16.01	21.00
灰分质量分数/%	17.32	16.02
干燥无灰基挥发分质量分数/%	37.66	33.33
C质量分数/%	52.50	49.10
H质量分数/%	3.03	2.86
O质量分数/%	9.96	9.82
N质量分数/%	0.54	0.51
S质量分数/%	0.64	0.68
可磨性系数	63	62

表6 锅炉中各设备尺寸及材料参数

Tab. 6 Dimensions and material parameters of each equipment in the boiler

受热面名称	管道尺寸		受热面积/m ²	材料	总质量/t	质量因子 F_{BM}
	直径/mm	壁厚/mm				
炉膛	螺旋水冷壁	35.0	6.5	9 000	15CrMo	457
	垂直水冷壁	32.0	8.0	4 600	12CrMoG	238
屏式过热器	51.0	8.0/9.0	4 500	SA-213TP347H	300	3.0
高温过热器	51.0	6.0/8.0	6 500	SA-213TP347H	320	3.0
高温再热器	44.5	6.5/9.0	9 000	SA-213T92	350	3.0
低温再热器垂直段	51.0	6.9/9.0	3 000	SA-213T91	600	1.5
低温再热器水平段	51.0	6.9/10.0	2 000	SA-213T92	600	1.5
低温过热器	51.0	8.0/10.0	4 018	12CrMoVG, 15CrMoG	120	1.0
低过侧省煤器	51.0	9.0	15 000	SA-201C	900	0.8
低再侧省煤器	51.0	9.0	15 000	SA-202C	900	0.8
分级省煤器	51.0	9.0	30 000	SA-203C	1 000	0.8

表7 机组中各设备的质量因子

Tab. 7 Quality factors of each equipment in the unit

设备名称	质量因子 F_{BM}
锅炉及其各附件	2.8
汽轮机	6.0
电机	1.7
空气式凝汽器	2.5
泵	1.5

整个燃煤机组的成本接近3 400元/kW，低于常规660 MW机组的成本。根据各组分 $C_{PE,k}$ 的占比，得到平均工程费用 C_{EL} 、平均维修费用 C_{OML} 和平均年燃料费用 C_{FL} 占12亿元平均年支出的27%、

7%和66%，最终的度电成本为0.332 4元/(kW·h)，这与电站公布的上网电价0.33元/(kW·h)^[4]相吻合。

各流股的焓和焓经济性数据如表8所示，各设备的焓和焓经济性分析如表9所示。在燃煤系统中，化学反应和传热过程一直是机组中熵产的最大来源。通过分析各流股的成本变化，得到优化程度最大的部件为低压加热器。

3.3 变工况焓经济性分析

采用汽轮机高位布置技术的燃煤机组变工况时，锅炉的焓效率降低，但是回热加热器的焓效

表8 机组的焓和焓经济性数据

Tab. 8 Exergy and exergy economic data of the unit						
流股 编号	压力/ MPa	温 度/℃	质量流量/ (kg/s)	焓值/ (kJ/kg)	焓/MW	价格/ (元/MJ)
2	25.820 0	600	521	3 486	833.78	1
3	11.480 0	464	0	3 259	0	1
4	8.770 0	422	37	3 186	46.87	1
5	5.900 0	365	485	3 088	572.32	1
6	5.900 0	365	51	3 088	60.40	1
7	5.900 0	365	434	3 088	511.92	1
8	5.430 0	620	434	3 710	670.40	0.374 3
9	2.600 0	502	23	3 465	29.80	0.374 3
10	1.200 0	386	20	3 232	20.95	0.374 3
11	0.590 0	294	12	3 050	10.07	0.374 3
12	0.580 0	294	379	2 952	325.79	0.374 3
13	0.370 0	243	23	2 952	17.47	0.374 3
14	0.120 0	130	17	2 735	8.87	0.374 3
15	0.050 0	79	18	2 594	6.68	0.374 3
16	0.010 5	47	230	2 410	35.41	0.374 3
17	0.010 5	47	390	200	4 736.47	0.465 4
18	3.710 0	75	390	316	1.32	0.466 1
19	3.710 0	100	390	421	7.52	0.228 9
20	3.710 0	136	390	575	14.57	0.228 4
21	3.710 0	153	390	648	28.81	0.088 3
22	1.130 0	185	521	787	37.03	0.296 2
23	38.740 0	191	521	829	93.98	0.296 2
24	38.740 0	223	521	971	121.97	0.203 1
25	38.740 0	273	521	1 194	171.72	0.271 8
26	38.740 0	301	521	1 331	205.20	0.115 4
27	10.990 0	307	0	1 381	0.00	1
28	8.520 0	278	37	1 226	11.79	1
29	5.730 0	229	88	985	18.99	1
30	2.470 0	196	111	835	17.32	0.406 6
31	0.560 0	142	12	596	0.91	0.406 6
32	0.350 0	105	35	442	1.36	0.406 6
33	0.110 0	80	17	336	0.33	0.406 6
34	0.040 0	52	35	219	0.17	0.406 6
35	38.740 0	273	521	1 194	171.72	0

率不变，如图4所示。当机组负荷为100%THA时，锅炉的焓效率为48.3%；当机组负荷为40%THA时，锅炉的焓效率为44.7%。

在变工况运行时，发电的平均焓价格变化如图5所示。当机组负荷为100%THA时，发电焓价格为0.030 2元/kJ；当机组负荷为40%THA时，发电焓价格为0.075 8元/kJ。因此，当机组满负荷运

表9 各设备的焓和焓经济性分析

Tab. 9 Exergy and exergy economic analysis of each equipment						
设备 k	$E_{F,k}/\text{kW}$	$E_{P,k}/\text{kW}$	$E_{D,k}/\text{kW}$	$Z_k/(\text{元/s})$	$c_{F,k}/(\text{元/kJ})$	$c_{P,k}/(\text{元/kJ})$
HP1	125.57	118.45	7.12	1.53	1.000 0	1.073 0
HP2	39.15	37.73	1.41	0.65	1.000 0	1.054 7
HP3	49.87	47.55	2.32	0.77	1.000 0	1.065 0
IP1	111.20	106.31	4.89	1.41	0.374 3	0.404 8
IP2	98.80	95.63	3.17	1.33	0.374 3	0.400 6
IP3	68.22	65.74	2.49	1.00	0.374 3	0.403 7
LP1	36.48	34.26	2.22	0.60	0.374 3	0.416 0
LP2	75.71	70.53	5.17	1.04	0.374 3	0.416 5
LP3	47.61	43.61	4.00	0.72	0.374 3	0.425 1
LP4	61.95	53.60	8.35	0.43	0.374 3	0.448 2
HT1	0	0	0	0.53	1.000 0	0
HT2	34.95	33.47	1.48	0.53	1.000 0	0.115 4
HT3	53.01	49.75	3.26	0.87	1.000 0	0.271 8
HT4	31.30	27.99	3.31	0.55	0.374 3	0.203 1
HT5	36.23	34.96	1.26	1.28	0.374 3	0.296 2
HT6	9.07	8.22	0.85	0.21	0.374 3	0.088 3
HT7	16.84	14.24	2.60	0.45	0.374 3	0.228 4
HT8	8.42	7.05	1.37	0.30	0.374 3	0.228 9
HT9	6.67	6.21	0.47	0.34	0.374 3	0.466 1

注： $c_{F,k}$ 、 $c_{P,k}$ 分别为燃料和产品的单位焓成本；HP1—HP3、IP1—IP3、LP1—LP3分别为高、中、低压缸机组；HT1—HT9为回热加热器。

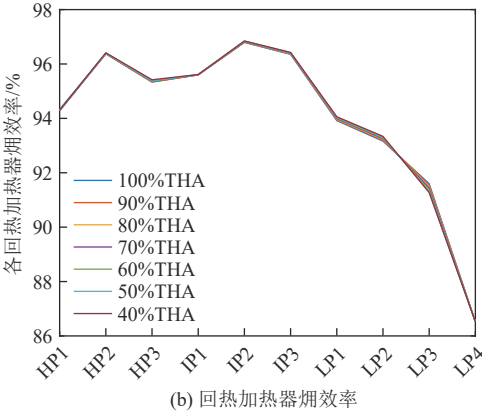
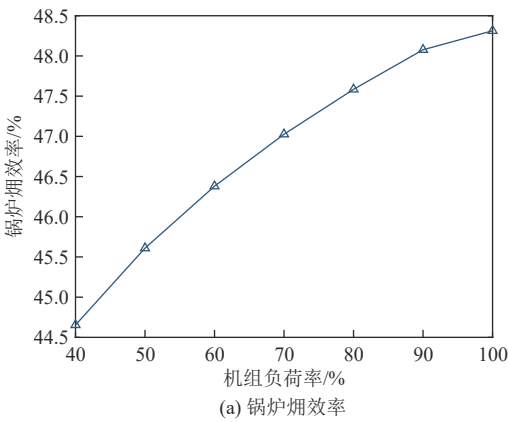


图4 变负荷工况下的焓效率

Fig. 4 Exergy efficiency under variable load conditions

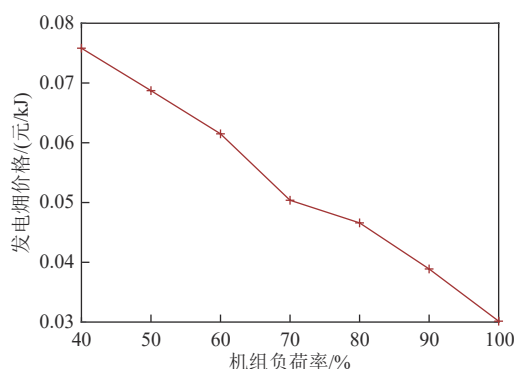


图5 变负荷工况下的发电烟价格

Fig. 5 Exergy cost of electricity under variable load conditions

行时, 机组的经济性更优。

4 结论

建立了采用汽轮机高位布置技术的燃煤机组的烟模型和烟经济性模型, 得到了机组不可逆性分布, 分析了燃煤机组变工况下的流股、设备烟效率变化以及成本变化, 得到如下结论:

1) 通过对锅炉各部件的烟效率进行分析发现, 炉膛的烟效率最低, 这主要是由化学反应以及辐射传热的损失过大导致的。

2) 从机组的不可逆性分布可知, 回热加热器中高压加热器的烟效率存在较大的不可逆性, 可通过优化该部分来减小系统的不可逆性, 从而提高机组的效率。

3) 通过对流股和设备的烟成本进行分析, 得到采用汽轮机高位布置技术的燃煤机组度电成本为0.332 4元/(kW·h)。

4) 发电的烟价格随着负荷的下降而升高, 下一步可通过减小低负荷运行时机组的不可逆性来降低低负荷的发电烟价格。

参考文献

- [1] HE F, LIU X, WANG M, et al. Energy, exergy, exergoeconomic, and environmental analyses and multi-objective optimization of a biomass-to-energy integrated thermal power plant[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(7): 5629-5648.
- [2] 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.

- [3] 石志鹏, 石祥建, 蔡丹, 等. 绿电与绿氢耦合煤化工的系统建设方案[J]. 南方能源建设, 2023, 10(3): 143-149.

SHI Z P, SHI X J, CAI D, et al. Construction scheme for the system coupling coal chemical industry with green electricity and green hydrogen[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(3): 143-149.

- [4] 符悦, 雷宇, 刘明, 等. 不同进汽温度火电机组多压冷端系统综合性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 229-238.

FU Y, LEI Y, LIU M, et al. Performance evaluation on multi-pressure cold-end systems of thermal power plants with different inlet temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 229-238.

- [5] 陈娜娜, 韩小渠, 穆祺伟, 等. 1 000 MW燃煤机组变负荷环境影响评价[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(1): 22-27.

CHEN N N, HAN X Q, MU Q W, et al. Environmental impact assessment on 1 000 MW coal-fired power plant under off-design conditions[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(1): 22-27.

- [6] 宋畅, 尹武昌, 余学海, 等. 1 000 MW近零排放燃煤机组细颗粒物及SO₃排放和分布特征[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1867-1875.

SONG C, YIN W C, YU X H, et al. Emission and distribution characteristics of fine particulate matter and SO₃ in 1 000 MW near-zero emission coal-fired unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1867-1875.

- [7] 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.

- [8] 张全斌, 周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154.

ZHANG Q B, ZHOU Q F. Research on the development path of China's thermal power generation technology based on the goal of "carbon peak and carbon neutralization" [J]. Power Generation

- Technology, 2023, 44(2): 143-154.
- [9] 周港宝, 卞双, 陈震宇, 等. 先进超超临界机组用 Inconel 617 与 C-HRA-2 合金高温低周疲劳性能试验研究[J]. 动力工程学报, 2022, 42(5): 475-483.
- ZHOU G B, BIAN S, CHEN Z Y, et al. Experimental study on high-temperature low cycle fatigue performance of inconel 617 and C-HRA-2 alloys for advanced ultra-supercritical units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(5): 475-483.
- [10] XIONG J, ZHAO H, ZHANG C, et al. Thermoeconomic operation optimization of a coal-fired power plant[J]. Energy, 2012, 42(1): 486-496.
- [11] XU C, GAO Y, XU G, et al. A thermodynamic analysis and economic evaluation of an integrated coldend energy utilization system in a de-carbonization coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 218-230.
- [12] 王婧, 段立强, 杨金福, 等. 集成 BEST 的 700 °C 一次再热超超临界机组回热系统节能优化[J]. 动力工程学报, 2022, 42(7): 632-641.
- WANG J, DUAN L Q, YANG J F, et al. Energy saving optimization study on regenerative system of 700 °C single reheat ultra-supercritical unit with BEST [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(7): 632-641.
- [13] 张宏涛, 张翼, 焦林生, 等. 高位布置 660 MW 汽轮机组设计特点与安全性研究[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(3): 167-169.
- ZHANG H T, ZHANG Y, JIAO L S, et al. Design characteristics and research on safety of high-level layout 660 MW steam turbine[J]. Turbine Technology, 2021, 63(3): 167-169.
- [14] 刘森林, 周光炳, 王晓, 等. 高位布置 H 级燃机基础多点位移 SRSS 法可靠概率研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 159-166.
- LIU S L, ZHOU G B, WANG X, et al. Research on reliability probability of srss method for multi-point displacement of foundation of H-class gas turbine in high position[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(4): 159-166.
- [15] 郑开云. 低温场景超临界 CO₂ 循环燃煤发电系统研究[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 126-130.
- ZHENG K Y. Study on supercritical CO₂ cycle coal-fired power generation system for low temperature scenario[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 126-130.
- [16] 张精桥, 杜小军, 张研. 超超临界 2×660 MW 汽轮机高位布置给水泵选型与优化研究[J]. 能源科技, 2021, 19(2): 49-52.
- ZHANG J Q, DU X J, ZHANG Y. Study on selection and optimization of feedwater pump for high level arranged ultra-supercritical 2×660 MW steam turbine[J]. Energy Science and Technology, 2021, 19(2): 49-52.
- [17] 罗建松, 叶勇健. 700 °C 先进超超临界机组概念设计方案研究[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 99-107.
- LUO J S, YE Y J. Study on conceptual design scheme of 700 °C advanced ultra supercritical unit[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 99-107.
- [18] YE X, DONG Z, LU J, et al. Thermoeconomic evaluation of double-reheat coal-fired power units with carbon capture and storage and waste heat recovery using organic Rankine cycle[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 105(1): 103247.
- [19] WU X, SHEN J, LI Y, et al. Flexible operation of post-combustion solvent-based carbon capture for coal-fired power plants using multi-model predictive control: a simulation study[J]. Fuel, 2018, 220: 931-941.
- [20] 付亦葳, 谢天, 屈杰. 一次、二次再热机组汽轮机高低位布置方案热经济性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(7): 1-4.
- FU Y W, XIE T, QU J. Thermal-economic analysis for scheme of steam turbine generator placement in high and low platform separately[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(7): 1-4.
- [21] AMROLLAHI Z, ERTESVÅG I S, BOLLAND O. Optimized process configurations of post-combustion CO₂ capture for natural-gas-fired power plant: exergy analysis[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(6): 1393-1405.
- [22] 孙宇贞, 唐毅伟, 李帅. 基于改进粒子群算法的超超临界燃煤机组负荷系统建模[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 875-882.
- SUN Y Z, TANG Y W, LI S. Load system modeling of ultra-supercritical coal-fired power unit based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 875-882.
- [23] AHMADI G R, TOGHRAIE D. Energy and exergy analysis of montazeri steam power plant in Iran[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 454-463.
- [24] KIM S, LIM Y I, LEE D, et al. Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO₂ capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts[J]. Energy Conversion and

- Management, 2022, 273: 116361.
- [25] ZHOU L, XU G, ZHAO S, et al. Parametric analysis and process optimization of steam cycle in double reheat ultra-supercritical power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 652-660.
- [26] YAN H, LIU M, WANG Z, et al. Flexibility enhancement of solar-aided coal-fired power plant under different direct normal irradiance conditions[J]. Energy, 2023, 262: 125349.
- [27] ZHANG Z, ZHOU R, GE X, et al. Perspectives for 700 °C ultra-supercritical power generation: thermal safety of high-temperature heating surfaces[J]. Energy, 2020, 190: 116411.
- [28] FU Y, ZHAO Y, LIU M, et al. Optimization of cold-end system of thermal power plants based on entropy generation minimization[J]. Frontiers in Energy, 2022, 16(6): 956-972.
- [29] LAZZARETTO A, TSATSARONIS G. SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems[J]. Energy, 2006, 31(8/9): 1257-1289.
- [30] BARTELA L, SKOREK-OSIKOWSKA A, KOTOWICZ J. An analysis of the investment risk related to the integration of a supercritical coal-fired combined heat and power plant with an absorption installation for CO₂ separation[J]. Applied Energy, 2015, 156: 423-435.
- [31] SU Z, YANG L. A novel and efficient cogeneration system of waste heat recovery integrated carbon capture and dehumidification for coal-fired power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 255: 115358.
- [32] Chemical Engineering World Group. Analysis, synthesis and design of chemical processes[J]. Chemical Engineering World, 2016, 51(12): 129.
-
- 收稿日期: 2023-02-20。
- 作者简介:
- 
- 李延兵
- 李延兵(1979), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事燃煤电厂节能和污染控制技术研究, 16850099@chnenergy.com.cn;
- 
- 严俊杰
- 严俊杰(1967), 男, 博士, 教授, 主要从事热力系统节能控制与仿真、汽液两相流方面的研究, 本文通信作者, yanjj@mail.xjtu.edu.cn。
- (责任编辑 尚彩娟)