

文章编号:0254-0096(2018)01-0076-08

基于焓分析的可再生能源辅助燃煤机组 减排特性研究

王继选

(河北工程大学水利水电学院, 邯郸 056021)

摘 要: 以某 600 MW 燃煤机组为例, 基于热力学第二定律的焓分析方法, 建立太阳能、地热能辅助燃煤机组热力系统的焓平衡矩阵模型, 分析主要设备的焓损失及焓损率。对该耦合系统中 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、Hg、As、Se、Pb 等污染物排放潜力进行研究。结果表明: 可再生能源系统辅助燃煤机组中, 各级加热器的焓损系数随着排挤抽汽比例的增加而成阶梯状递减; 辅助系统取代不同的加热器时, 污染物减排量随着排挤抽汽比例的变化而变化; 在相同排挤抽汽比例情况下, 取代 2 号高压加热器时, 耦合系统的热经济性最好, 污染物减排量最大, 排挤抽汽比为 80% 时, CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、Hg、As、Se、Pb 的减排量为: 149.09、4.55、2.24 万 t/a, 9.48、240.0、272.72 kg/a, 1157.55 g/a。

关键词: 可再生能源; 发电系统; 焓; 环境影响

中图分类号: TK212

文献标识码: A

0 引 言

针对污染物减排主要采取脱硫、脱硝、脱碳等技术。脱除系统的引入一方面降低了机组原有的出力、改变了系统的原有结构, 另一方面使得烟气减排中所使用的化学试剂的用量大大增加, 无形中加重了化工产业的负担。因此, 需要探寻新的减排路径。

目前, 通过提容增效实现燃煤机组节能降耗的潜力受到材料等技术壁垒的束缚。为了实现能源-经济-环境的协调发展, 可再生能源发电应运而生, 但存在发电设备投资成本高, 能源利用效率低等问题。在可再生能源集成于燃煤机组发电层面, 将太阳能与燃煤机组耦合发电可作为新型发电的发展方向。Eric Hu 课题组^[1-3]最早提出用槽式太阳能加热燃煤机组的给水, 并将其应用到澳大利亚的一个燃煤电厂; Zhai 等^[4,5]研究了太阳能辅助燃煤机组发电的 5 种方案, 并分析了不同容量机组的热力性能; 韩中合等^[6,7]研究了太阳能辅助燃煤机组碳捕集系统的不同集成方式, 分析了集成系统的热经济

性; 吴 静等^[8]分析了太阳能与燃煤机组的不同耦合方式, 比较了不同方案的热力特性。上述研究主要集中于采用热力学第一定律对不同集成方案的热经济性进行研究, 而基于热力学第二定律的焓分析法对可再生能源辅助燃煤机组减排重金属及有害气体的研究鲜见报道。本文基于焓分析法, 建立可再生能源辅助燃煤机组热力系统焓平衡模型, 以“质”和“量”的新视野探求耦合发电系统减排 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、Hg、As、Se、Pb 等污染物的潜力所在。

1 可再生能源与燃煤机组耦合方案

槽式太阳集热器在欧美等国已投入商业化运行, 而对地热能的利用, 国内外业已存在相关的电站。当太阳能与地热能组成的辅助系统与燃煤机组组成耦合发电系统时, 辅助系统和燃煤机组之间同时存在质量流和能量流的交换, 耦合发电系统如图 1 所示, 耦合系统中辅助给水加热系统由地热热水换热装置与槽式太阳集热装置组成的辅助系统串联组成, 辅助系统系统与燃煤机组加热器集成方

收稿日期: 2015-11-27

基金项目: 河北省自然科学基金(E2017402084); 博士科研启动项目(20120134); 邯郸市科技局基金(1528102058-2); 河北工程大学教育教学研究项目

通信作者: 王继选(1982—), 男, 博士、副教授, 主要从事燃煤机组热力系统、能源利用及可再生能源应用方面的研究。wangjixuan113@163.com

式为:从某级加热器给水入口处引出一定量的给水进入辅助系统,经过辅助系统加热后,给水参数达到该级加热器的出口参数,并进入下一级加热器,

由于辅助系统的引入,在机组主蒸汽流量一定的情况下,锅炉吸热量、机组通流部分质量流量等均会改变,从而影响机组的发电量。

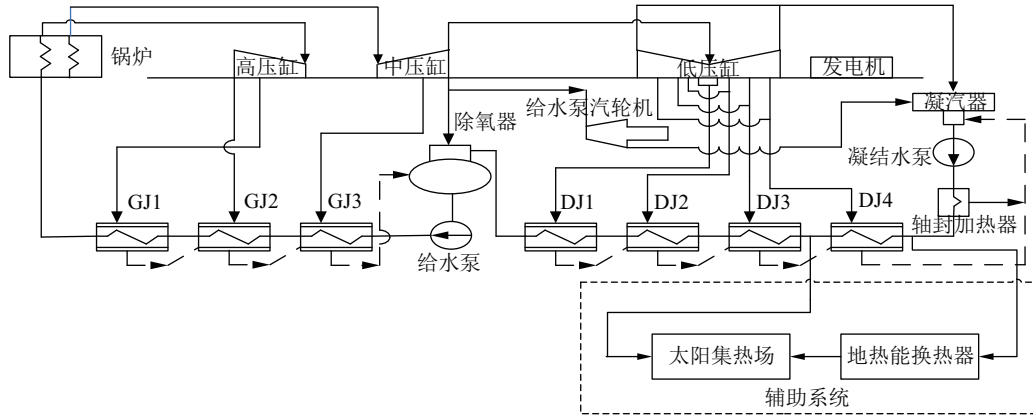


图1 可再生能源与燃煤机组耦合系统

Fig. 1 Scheme of renewable energy aided coal-fired unit

太阳能、地热能联合辅助燃煤机组耦合系统中,地热能的利用已完全进入商业化模式,地热资源按温度可分为:高温地热资源($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$),中温地热资源($90\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$),低温地热资源($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[9]。槽式太阳集热系统是目前商业化程度比较高的技术,直接蒸汽发生系统的蒸汽参数可达 $10\text{ MPa}/400\text{ }^{\circ}\text{C}$,间接蒸汽产生系统无压力参数的限制^[10,11]。由于太阳能辐射具有随机性,在太阳能集热系统中可增设熔融盐储能设备,以便在太阳能辐射强度变化时,可随时调整储能设备及地热能换热装置,使集热场出口的负荷满足用能需求,确保辅助系统所排挤的抽汽份额,保证耦合系统稳定运行^[12,13]。主要的蓄热方式有显热蓄热、潜热蓄热和热化学蓄热^[14],位于美国的Solar Two电站,采

用二元硝酸盐作为蓄热介质,冷罐温度 $290\text{ }^{\circ}\text{C}$,热罐蓄热温度 $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[15]。可见,太阳能、地热能联合辅助燃煤机组耦合系统是可行的。

2 焓分析数学模型

由于可再生能源辅助系统的引入,燃煤机组热力系统的各热力参数及系统的拓扑结构随着负荷的变化而变化,耦合发电系统的热经济性及污染物减排特性将随之改变。可再生能源辅助燃煤发电机组回热系统示意图如图2所示,矩形代表太阳能和地热能辅助系统,辅助系统前安装抽汽流量比例调节阀,可再生能源辅助系统分别作用于GJ1、GJ2、GJ3、DJ1、DJ2、DJ3、DJ4。

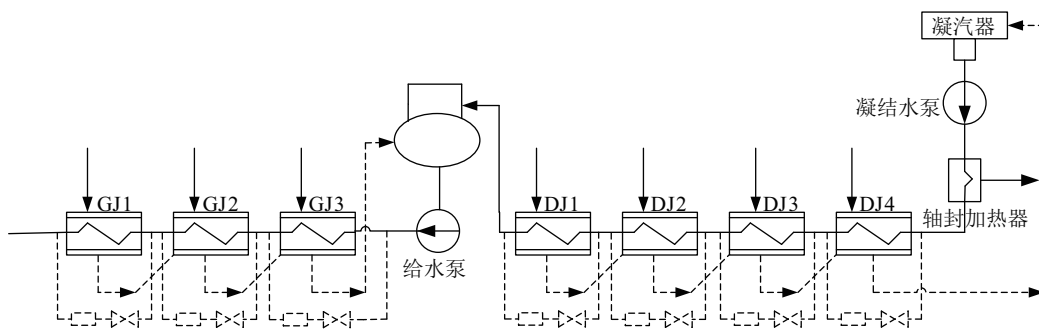


图2 耦合发电机组回热系统示意图

Fig. 2 Regenerative system of coupling system

以耦合发电机组为研究对象,对耦合系统进行组件划分,功能相同的设备划分为一个组件,功能

独立的组件单独划分出来,抽汽管道及其所作用的加热器,分别构成单一组件。

$$E_{fw} = \tau \begin{bmatrix} e_{fw_1}^q & & & & & & & \\ e_2^\gamma & e_{fw_2}^q & & & & & & \\ e_3^\gamma & e_3^\gamma & e_{fw_3}^q & & & & & \\ e_4^\gamma & e_4^\gamma & e_4^\gamma & e_{fw_4}^q & & & & \\ e_5^\tau & e_5^\tau & e_5^\tau & e_5^\tau & e_{fw_5}^q & & & \\ e_6^\tau & e_6^\tau & e_6^\tau & e_6^\tau & e_6^\tau & e_{fw_6}^q & & \\ e_7^\tau & e_7^\tau & e_7^\tau & e_7^\tau & e_7^\tau & e_7^\tau & e_{fw_7}^q & \\ e_8^\tau & e_8^\tau & e_8^\tau & e_8^\tau & e_8^\tau & e_8^\tau & e_8^\tau & e_{fw_8}^q \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, q ——1 kg 蒸汽的凝结放热量, kJ/kg。

由于节能同时要注重“质”和“量”, 通过焓矩阵平衡方程可以计算出耦合系统及各设备的焓效率, 可得出各设备的焓损及焓损系数等指标, 这些参数可以揭示出不同设备处不可逆损失发生的部位及数量的大小, 可为节能改造提供指导。

2.2 污染物减排特性评价指标

可再生辅助燃煤机组发电, 可使燃煤机组的煤耗在原有基础上有所降低, 节煤量可定义为:

$$\Delta b_0 = b_0^0 - b_0 \quad (8)$$

式中, Δb_0 ——节煤量, g/kWh; b_0^0 ——原燃煤机组额定工况煤耗, g/kWh; b_0 ——耦合系统的煤耗, g/kWh。

耦合系统煤耗 b_0 的表达式为^[16]:

$$b_0 = b_{\min} + 122.8 \frac{\Omega_i}{\eta_e} \quad (9)$$

式中, b_{\min} ——理论最低煤耗, g/kWh; Ω_i ——焓损系数, 焓损系数表示各环节焓损失占总燃料焓的比重; η_e ——全厂焓效率, %;

化石燃料的消耗, 使得世界范围内的环境恶化状况频现, 美国环保署 (US Environmental Protection Agency, EPA) 定义了 25 种从燃煤机组中排放的有毒大气污染物。温室效应的主要贡献者 CO_2 ; 酸雨形成的主要贡献者 SO_2 、 NO_x 等; 重金属有害空气污染物 (hazardous air pollutant, HAP) 主要有汞 (Hg)、硒 (Se)、镉 (Cd)、铅 (Pb)、铬 (Cr) 和砷 (As) 等。除尘器可以有效地脱除大部分重金属污染物, 但是具有高挥发性的 Hg、Se、As 等重金属不易被除尘器捕获, 致使其随烟气排入大气。为此国内外制定了相关的减排指标, 美国环保署决定根据《清洁空气法》对燃煤电厂重金属排放进行控制; 欧盟于制定了《大型燃烧装置的最佳可行技术参考文件》; 加拿大环境部颁布了《加拿大燃煤电厂汞排放标准》; 中国

将重金属排放限值列入新《火电厂大气污染物排放标准》。面对国际国内越来越严格的限排标准, 可再生辅助燃煤机组组成的耦合发电系统在降低煤耗的同时可实现大气污染物的减排, 在计算减排量时, 对各污染物的排放系数取均值^[17-21], 则 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、Hg、As、Se、Pb 的减排量模型如式 (10) 所示, 各减排量的单位为 g/a。

$$\begin{aligned} M_{\text{CO}_2} &= 2.46 \Delta b_0 P_e H \\ M_{\text{SO}_2} &= 0.075 \Delta b_0 P_e H \\ M_{\text{NO}_x} &= 0.037 \Delta b_0 P_e H \\ M_{\text{Hg}} &= 2.2 \times 10^{-7} \times 0.711 \Delta b_0 P_e H \\ M_{\text{As}} &= 3.96 \times 10^{-6} \Delta b_0 P_e H \\ M_{\text{Se}} &= 4.5 \times 10^{-6} \Delta b_0 P_e H \\ M_{\text{Pb}} &= 1.91 \times 10^{-8} \Delta b_0 P_e H \end{aligned} \quad (10)$$

式中, P_e ——耦合系统发电功率, kWh; H ——耦合系统年运行时间, h。

3 算例分析

以某型号为 N600-24.2/566/566 的超临界燃煤机组为例, 该汽轮机由高中压合缸、2 个低压缸、3 台高加、4 台低加及 1 台除氧器构成。基于能量梯级利用及参数匹配原则, 可再生辅助系统的投入将排挤原有加热器的抽汽量, 改变原热力系统参数的时空分布。模型计算时, 按排挤抽汽的比例不同, 分别进行变工况计算, 耦合系统年运行小时数 H 取为 5500 h, 燃料焓的计算见文献[22]。煤质数据如表 1 所示。结合焓平衡模型及污染物减排特性评价指标模型, 对可再生辅助燃煤机组热力系统的热力性能及污染物减排量进行分析, 分别如图 4、图 5 所示。

表 1 煤质成分

[C] _{ad} /%	[H] _{ad} /%	[O] _{ad} /%	[N] _{ad} /%	[S] _{ad} /%	Q_{net} /kJ·g ⁻¹
60.40	2.89	3.07	0.87	0.68	24209.82

由图 4 知, 耦合系统运行过程中, 当辅助系统排挤的抽汽比为 0% 时, 说明可再生辅助系统中没有给水流过, 随着辅助系统中给水量增加, 其排挤的抽汽量亦呈增加趋势, 各加热器的焓损系数呈逐级递减趋势。各级焓损系数的降低, 主要是因为太阳能和地热能所组成的可再生辅助系统加热了部分或全部给水, 在不改变机组通流面积的

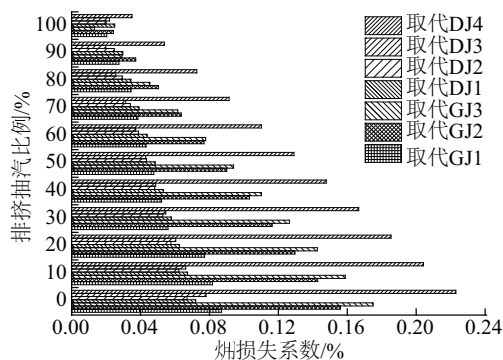
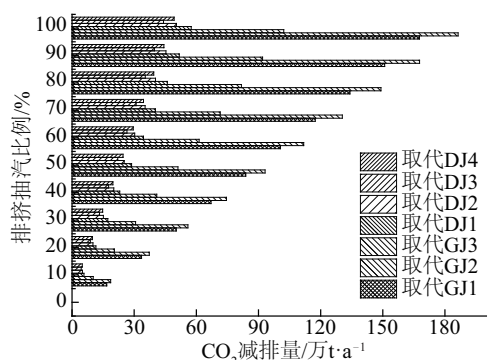
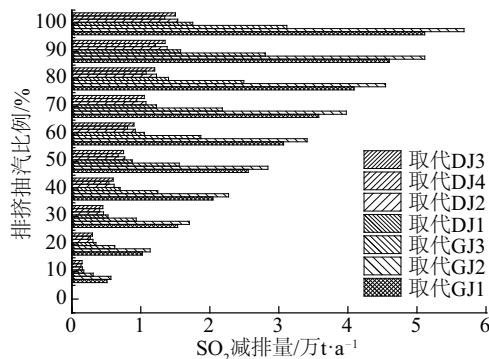
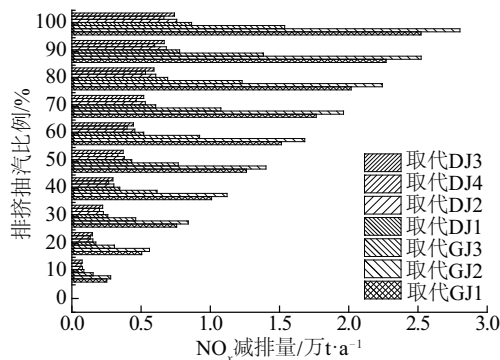
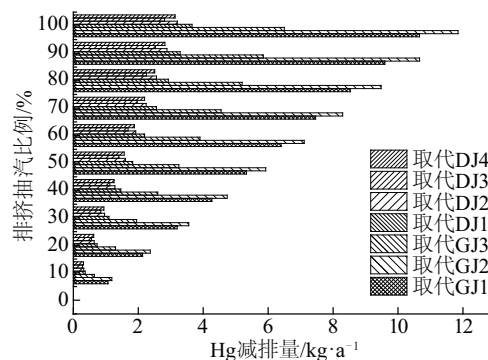
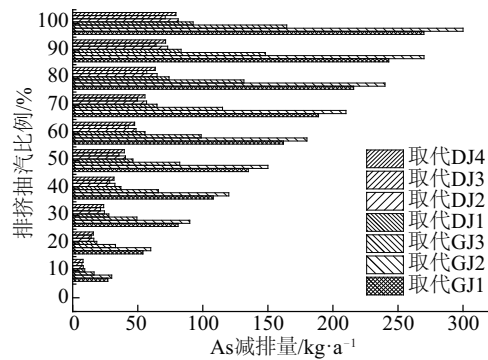


图4 加热器焓损系数随排挤抽汽比例系数的变化

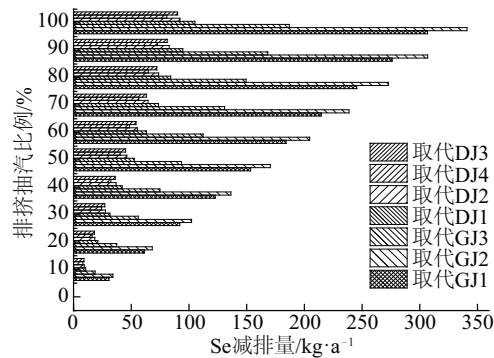
Fig. 4 Exergy loss coefficient of heaters has a descending trend with the increase of exclude extraction

a. CO₂减排量b. SO₂减排量c. NO_x减排量

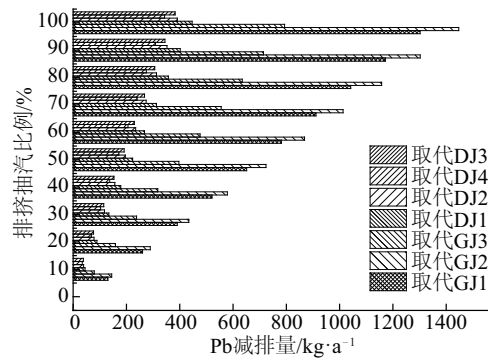
d. Hg减排量



e. As减排量



f. Se减排量



g. Pb减排量

图5 污染物减排量随排挤抽汽比变化

Fig. 5 The emission reductions vary with the exclude extraction ratio

情况下,使得各级加热器所需的抽汽量低于原燃煤机组,同时导致各级加热器的焓效率均有不同程度的提高。4号低压加热器即DJ4在所有加热器中的换热温差最大,造成的不可逆损失也最大,故其焓损系数高于其余加热器,DJ4的焓损系数随着可再生能源辅助系统排挤抽汽比例的增加而减小。3号高压加热器即GJ3抽汽温度最高,其换热器内部也存在较大的换热温差,其焓损系数低于DJ4,但高于其余加热器的焓损系数。由此可知,随着可再生能源系统的引入,可在一定程度上减少因不可逆性造成的各级加热器的损失,提高各级加热器的焓效率。

烟气中有害气体 CO_2 、 SO_2 和 NO_x ,重金属Hg、As、Se和Pb的减排量见图5。由图5可知,太阳能、地热能组成的可再生能源辅助系统引入到燃煤机组中, CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、Hg、As、Se、Pb等污染物减排量呈阶梯状分布,减排量随着辅助系统排挤抽汽比例的增加而增大。取代高压加热器的热经济性和污染物减排量均优于取代低压加热器的情况,其中,取代GJ2的热经济性最显著,此时各环境污染物的减排量也最高。耦合系统中,抽汽压力低的加热器其焓效率越低,焓损系数将会越大。

在所有高压加热器中,GJ3对应的抽汽温度最高,其对应的蒸汽品质也最高,但是GJ3内的换热温差最大,结合图4知,其焓损系数明显高于GJ2及GJ1,即在相同排挤抽汽比例情况下,取代GJ3的经济性较GJ2和GJ1要低,其污染物的减排量在高压加热器中也是最低的。例如当排挤抽汽比例为50%时,GJ3、GJ2和GJ1所排挤的抽汽量分别为33.45、70.39、57.05 t/h。由此可知,可再生能源辅助系统作用于高品质抽汽段时,其热经济性和污染物减排量不一定最好,因此要综合考虑辅助系统取代加热器的位置及排挤的抽汽比例才能确定较为理想的耦合方案。

在所有低压加热器中,DJ4中的换热温差最大,结合图4,DJ4的焓损系数均高于DJ3、DJ2及DJ1,即在相同排挤抽汽比例情况下,取代DJ4的经济性较DJ3、DJ2及DJ1要低,其热经济性及污染物的减排量在低压加热器中也是最低的。例如当排挤抽汽比例为50%时,DJ1、DJ2、DJ3和DJ4所排挤的抽汽量分别为22.67、22.07、22.00、39.10 t/h。由此可知,可再生能源辅助系统作用于低压加热器抽汽段时,在相同排挤抽汽比例的前提下,排挤的抽汽量

越大其热经济性和污染物减排量不一定最好,取代品质高的抽汽段时,其热经济性和污染物减排量比较好。因此,在低压加热器段要综合考虑辅助系统取代蒸汽的品质及排挤的抽汽比例才能确定较为理想的耦合方案。

取排挤抽汽比例一定时,对各加热器污染物减排量进行分析。在高压加热器中,以排挤比例50%为例,可再生能源系统辅助燃煤机组的耦合系统 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、Hg、As、Se、Pb的减排量为:取代GJ1时,分别为83.85、2.56、1.26万t/a,5.33、134.97、153.38 kg/a,651.0 g/a;取代GJ2时,污染物减排量最高,分别为93.18、2.84、1.40万t/a,5.92、150.0、170.45 kg/a,723.47 g/a;取代GJ3时,分别为51.1、1.56、0.77万t/a,3.25、82.26、93.48 kg/a,396.76 g/a;在低压加热器中;取代DJ4时,由于该加热器的换热温差最大,其焓损系数在所有低压加热器中也是最大的,其污染物减排量相对其他低压加热器来说较低,分别为:22.09、0.67、0.33万t/a,1.40、35.56、40.41 kg/a,171.5 g/a。由于高压加热器的抽汽源自机组的高中压缸抽汽,低压加热器的抽汽来自低压缸抽汽,各加热器所对应的抽汽量及抽汽品质不同,致使取代高压加热器时污染物减排的效果要优于取代低压加热器的减排量。

当可再生能源系统辅助燃煤机组的位置一定时,污染物的减排量随着排挤抽汽比例的增加而增加。以辅助系统分别取代GJ2和DJ4为例,当排挤抽汽比例为20%时, CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、Hg、As、Se、Pb的减排量为:取代GJ2时,分别为37.27、1.14、0.56万t/a,2.37、60.00、68.18 kg/a,289.39 g/a;取代DJ4时,分别为8.84、0.27、0.13万t/a,0.56、14.22、16.16 kg/a,68.6 g/a。当排挤抽汽比例增加到80%时,取代GJ2时,各污染物的减排量分别为149.09、4.55、2.24万t/a,9.48、240.0、272.72 kg/a,1157.55 g/a;取代DJ4时,分别为35.34、1.08、0.53万t/a,2.25、56.89、64.65 kg/a,274.4 g/a。可见,由于排挤抽汽比例的增加,使得机组的出力有所增加,同时耦合系统的煤耗有所降低,节煤量较为显著。从图5整体分析结果来看,当取代GJ2时,机组的热经济性和污染物减排量最理想,且随着排挤抽汽比例的增加,热经济性效果越明显,污染物减排量越显著。综上所述,将太阳能、地热能组成的可再生能源系统引入到传统燃煤机组中,可为机组的节能减排提供新思路、新方向,有助于实

现我国能源结构的优化,改善能源结构布局,实现能源-经济-环境的协调发展。

4 结 论

1)耦合系统中,太阳能、地热能组成的可再生能源辅助系统加热部分或全部给水,使各加热器的焓损系数随着排挤抽汽比例的增加而呈阶梯状降低趋势。DJ4的换热温差最大,造成的不可逆损失也最大,故其焓损系数高于其余加热器。GJ3抽汽温度最高,其换热器内部也存在较大的换热温差,其焓损系数低于DJ4,但高于其余加热器的焓损系数。随着可再生能源辅助系统的引入,在一定程度上可减少因不可逆性造成的各级加热器的损失,提高各级加热器的焓效率。

2)耦合系统中, CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、Hg、As、Se、Pb等污染物减排量随着辅助系统排挤抽汽比例的增加而呈阶梯状增加,取代GJ2的热经济性及污染物减排特性最显著。在排挤抽汽比例相同情况下,由于各级加热器抽汽量及蒸汽品质的不同,可再生能源系统取代高压加热器段向低压加热器段变化过程中,耦合系统中污染物减排量呈梯度递减趋势。可再生能源系统辅助某级加热器时,耦合系统的污染物减排量随排挤抽汽比例的增加而升高,辅助低压加热器向高压加热器过渡时,随着排挤抽汽比例的不同,各取代方案中污染物减排量增减幅度不尽相同。当可再生能源系统辅助GJ2时,耦合系统的热经济性和污染物减排量最理想,并且随着排挤抽汽比例的增加,热经济性效果越明显,污染物减排量越显著。

[参考文献]

- [1] Hu E, Yang Yongping, Nishimura A, et al. Solar thermal aided power generation[J]. Applied Energy, 2010, 87(9): 2881—2885.
- [2] Montes M J, Abánades A, Martinez-Val J M, et al. Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors[J]. Solar Energy, 2009, 83(12): 2165—2176.
- [3] Yan Qin, Hu E, Yang Yongping, et al. Evaluation of solar aided thermal power generation with various power plants[J]. International Journal of Energy Research, 2011, 35(10): 909—922.
- [4] Zhai Rongrong, Zhao Miaomiao, Tan Kaiyu, et al. Optimizing operation of a solar-aided coal-fired power system based on the solar contribution evaluation method[J]. Applied Energy, 2015, 146: 328—334.
- [5] Zhu Yong, Zhai Rongrong, Zhao Miaomiao, et al. Evaluation methods of solar contribution in solar aided coal-fired power generation system[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 102: 209—216.
- [6] 韩中合,王继选,刘小贞,等.太阳能辅助火电机组燃烧后碳捕集的集成方式研究[J].太阳能学报, 2014, 35(2): 311—319.
- [6] Han Zhonghe, Wang Jixuan, Liu Xiaozhen, et al. Study on integration system of post-combustion carbon capture of solar thermal aided coal-fired power plant[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(2): 311—319.
- [7] 韩中合,王继选,王莹莹,等.太阳能辅助燃煤机组碳捕集系统性能研究及技术经济分析[J].中国电机工程学报, 2014, 34(5): 724—732.
- [7] Han Zhonghe, Wang Jixuan, Wang Yingying, et al. Performance study on thermodynamic systems and techno-economic analysis of carbon capture for solar thermal aided coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(5): 724—732.
- [8] 吴静,王修彦,杨勇平,等.太阳能与燃煤机组混合发电系统集成方式的研究[J].动力工程学报, 2010, (8): 639—643.
- [8] Wu Jing, Wang Xiuyan, Yang Yongping, et al. Study on integrated modes of solar-coal hybrid power generation systems[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, (8): 639—643.
- [9] 付文成.中低温地热能双吸收Kalina循环系统热力学优化与实验研究[D].天津:天津大学, 2014.
- [9] Fu Wencheng. Thermodynamic optimization and experimental study on dual-absorption Kalina cycle system for low-and medium-grade geothermal energy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [10] Odeh S D, Morrison G L, Behnia M. Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors[J]. Solar Energy, 1998, 62(6): 395—406.
- [11] 杨宾.槽式太阳能直接蒸汽热发电系统性能分析与实验研究[D].天津:天津大学, 2011.
- [11] Yang Bin. Performance analysis and experimental research on direct steam generation parabolic trough solar thermal power plant[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [12] Kopp J E. Two-tank indirect thermal storage designs for solar parabolic trough power plants[D]. Nevada Las Vegas: University of Nevada, 2009.
- [13] Gaal J. A comparison of thermal storage models with a solar electric generation system using trnsys[D]. Nevada

- Las Vegas: University of Nevada, 2001.
- [14] Adinberg R, Zvegilsky D, Epstein M. Heat transfer efficient thermal energy storage for steam generation[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(1): 9—15.
- [15] 汉京晓, 杨勇平, 侯宏娟. 太阳能热发电的显热蓄热技术进展[J]. 可再生能源, 2014, 32(7): 901—905.
- [15] Han Jingxiao, Yang Yongping, Hou Hongjuan. Review on sensible heat thermal energy storage in solar thermal generation[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(7): 901—905.
- [16] 闫丽涛. 300 MW 火力发电机组热力系统焓分析及优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [16] Yan Litao. Thermal exergy analysis and system optimization for 300 MW power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [17] 王明仕, 杨娜娜, 朱建明, 等. 中国燃煤砷排放量估算[J]. 煤炭转化, 2008, 31(2): 1—3.
- [17] Wang Mingshi, Yang Nana, Zhu Jianming, et al. Estimation of arsenic emission from coal combustion in China[J]. Coal Conversion, 2008, 31(2): 1—3.
- [18] 王起超, 沈文国. 中国燃煤汞排放量估算[J]. 中国环境科学, 1999, 19(4): 318—321.
- [18] Wang Qichao, Shen Wenguo. The estimation of mercury emission from coal combustion in china[J]. China Environmental Science, 1999, 19(4): 318—321.
- [19] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 燃煤电站汞排放量的预测模型[J]. 动力工程, 2005, 25(4): 587—592.
- [19] Ren Jianli, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang. Forecasting model for mercury emission by coal-fired power plants[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2005, 25(4): 587—592.
- [20] 吴文俊, 蒋洪强. 重点源大气砷铅污染排放模型及特征[J]. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1950—1956.
- [20] Wu Wenjun, Jiang Hongqiang. Atmospheric arsenic and lead emissions from primary anthropogenic sources and related analytical inventory models[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(12): 1950—1956.
- [21] 段宁, 降林华, 朱春雷, 等. 我国环境中硒排放量增加趋势与科学对策[J]. 环境保护, 2010, (21): 31—33.
- [21] Duan Ning, Jiang linhua, Zhu Chunlei, et al. Selenium emissions increasing trend and scientific countermeasures in Chinese environment[J]. Environmental Protection, 2010, (21): 31—33.
- [22] 王继选, 吴智泉, 韩中合, 等. 基于高位热值的燃料焓模型及计算分析[J]. 动力工程学报, 2012, 25(4): 805—808.
- [22] Wang Jixuan, Wu Zhiquan, Han Zhonghe, et al. Calculation and analysis of the chemical exergy based on high heating values of fuel[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 25(4): 805—808.

EMISSION REDUCTION PERFORMANCE STUDY ON RENEWABLE ENERGY AIDED COAL-FIRED UNIT BASED ON EXERGY ANALYSIS

Wang Jixuan

(School of Water Conservancy and Electric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

Abstract: This paper took a 600 MW unit for instance and established general matrix model based on exergy analysis when renewable energy auxiliary system preheats feed water. Exergy analysis of the coupling system was conducted by this new model. CO₂, SO₂, NO_x, Hg, As, Se and Pb emission reductions of the coupling system were investigated. Analysis indicated that the exergy loss ratio of each heater has a descending trend with the increase of exclude extraction. The emission reductions vary with the exclude extraction ratio when coupling system replaces different heaters. If the exclude extraction ratio is same, the coupling system has the potential of a higher thermo-economy. Therefore the fuel saving rate was improved when No.2 heater was replaced. When the exclude extraction ratio reaches the value of 80%, emission reductions of CO₂, SO₂, NO_x, Hg, As, Se and Pb reach 1490900 t/a, 45500 t/a, 22400 t/a, 9.48 kg/a, 240.0 kg/a, 272.72 kg/a and 1157.55 g/a, respectively.

Keywords: renewable energy; power generation; exergy; environmental effect