

燃煤发电机组机炉耦合系统经济性的对比分析

唐丽丽¹, 谢林贵¹, 赖强¹, 刘明²

(1. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000;

2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了研究燃煤发电机组机炉耦合系统的经济性, 以某典型 660 MW 超超临界燃煤机组为例, 建立了节煤收益与系统投资模型, 对常规低压省煤器系统、采用暖风器的机炉耦合系统以及设置旁路烟道的机炉耦合系统等 3 种机炉耦合系统的经济性进行了对比分析。计算结果表明: 在相同的边界条件下, 3 种机炉耦合系统的净节能效果分别可以达到 1.60、2.64 和 3.32 g/(kW·h), 系统换热设备投资分别为 530、1 146 和 1 177 万元, 系统的年节煤净收益分别达到了 307、501 和 636 万元; 常规低压省煤器系统的投资最低, 但是节能效果最差; 采用暖风器的机炉耦合系统的节能效果有所提高, 但是系统投资高; 设置旁路烟道的机炉耦合系统的经济性最优。

关键词: 机炉耦合; 余热回收; 旁路烟道; 热经济性; 技术经济性

中图分类号: TK11+5

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.10.010

[引用本文格式] 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 Li-li, XIE Lin-gui, LAI Qiang, 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.

Comparison on Economic Performances of Boiler-Turbine Coupling Systems for Coal-fired Power Plants

TANG Li-li¹, XIE Lin-gui¹, LAI Qiang¹, LIU Ming²

(1. Dongfang Turbine Co., Ltd of Dongfang Electric Corporation, Deyang, China, Post Code: 618000; 2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: In order to evaluate the economy of turbine-boiler coupling system of coal-fired power units, a typical 660 MW ultra-supercritical coal-fired power unit was taken as the reference case, economic performances on three coupling systems, i. e., conventional low-pressure economizer system, coupling system with air heater and coupling system with bypass flue, were analyzed comparatively by developing the models of coal-saving benefits and system investments. With the same boundary condition, the calculation results show that the net energy-saving effects of the three types of boilers coupling systems can reach 1.60, 2.64 and 3.32 g/(kW·h), respectively. The system investments for heat exchangers are 5.30, 11.46 and 11.77 million yuan, respectively. The annual net coal-saving benefits of the system are 3.07, 5.01 and 6.36 million yuan, respectively. Among three coupling systems, the conventional low-pressure economizer system has the lowest system investment, while the energy-saving effect is the worst; both the system energy-saving effect and the investment have increased in coupling system with air heater. The economic

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-01-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0604405); 国家自然科学基金(51776146); 四川省工业发展资金项目(川财建[2018]113号)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China(2018YFB0604405); National Natural Science Foundation of China(51776146); Sichuan Industrial Development Foundation Project(Sichuan Finance Department[2018]113)

作者简介: 唐丽丽(1982-), 女, 河南焦作人, 东方电气集团高级工程师。

通讯作者: 刘明(1985-), 男, 河北承德人, 西安交通大学教授。

performances of boiler-turbine coupling system with bypass flue is the best.

Key words: boiler-turbine coupling, waste heat recovery, bypass flue, thermal economy, technical economy

引 言

对于新建机组可以考虑采用更高的蒸汽初参数以及二次再热技术等提高火电机组的能效水平,但是,对于已经建设运行的现役机组来说,需要进一步探索其节能潜力^[1]。其中,回收烟气排烟余热,并将烟气余热梯级利用到汽轮机回热系统的机炉耦合系统,是火电厂节能减排的重要方向之一。

近年来,机炉耦合烟气余热利用系统得到了广泛的应用。在锅炉尾部布置常规低压省煤器是常用方式^[2-3]。谢天等人^[4]通过在空气预热器前布置暖风器对冷空气进行初步预热,使机组煤耗率降低约 $2.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,对比常规低温省煤器,系统的节能效果有所提高。德国 Niederaussem 电厂 $1\,012 \text{ MW}$ 机组布置烟气旁路,利用烟气热量梯级加热给水、凝结水与空气,机组煤耗率下降约 $7 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,节能效果显著^[5]。

虽然多种结构的机炉耦合余热回收系统被提出,并在实际运行电厂中得到了应用,但是在不同电厂中应用的机炉耦合系统经济性指标难以直接进行对比。为此,本文以某 660 MW 机组为例,建立机组热力学模型和经济性模型,以节煤收益与系统投资为指标开展多种机炉耦合系统的经济性对比分析,旨在为机炉耦合系统的实际应用提供指导。

1 3 种烟气余热利用系统

1.1 常规低压省煤器

图 1 为常规低压省煤器系统示意图。其原理是在脱硫系统前添加一部分受热面,利用空气预热器出口烟气的热量来加热全部或部分低压加热器凝结水(取决于低压加热器和低压省煤器的连接方式)^[6],从而提高低压加热器凝结水温度,排挤某一级或某级低压加热器的抽汽份额,使得这部分被排挤的抽汽返回到汽轮机中做功。系统的构型简单,并且可以节煤 $2.0 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 左右^[7],目前已广泛应用于国内火电机组。

1.2 采用暖风器的机炉耦合系统

暖风器是火电厂重要的辅助设备,一般在冬季

环境空气温度较低时投入使用,将锅炉送风温度提高至所需的温度(一般为 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右),以满足空气预热器的防腐要求^[8]。在锅炉排烟余热回收利用系统中引入暖风器对空气进行加热,可以大幅度提高进入锅炉空气预热器的送风温度,降低空气预热器烟气与空气之间的温差,减少传热过程中的不可逆损失,从而提高锅炉排烟余热的回收利用效率。

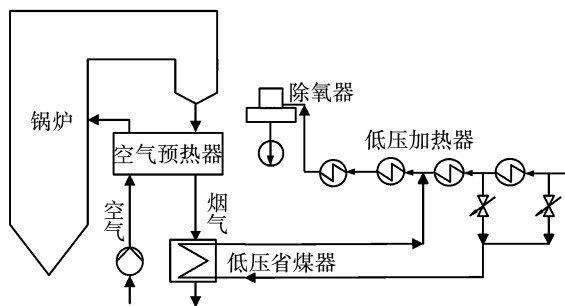


图 1 常规低压省煤器系统

Fig. 1 Conventional low-pressure economizer system

对于常规低温省煤器系统而言,引入暖风器可提高锅炉空气预热器出口烟气温度,从而提升进入低压省煤器系统烟气的余热品位,使所回收的热量可用于替代压力更高的回热抽汽,从而使系统的节煤收益得以提升。采用暖风器的机炉耦合系统如图 2 所示。图中暖风器通过循环热媒水管道与低温换热器连接,通过这种间接换热的方式,控制换热器壁面温度,从而减缓烟气换热器的低温腐蚀速率。

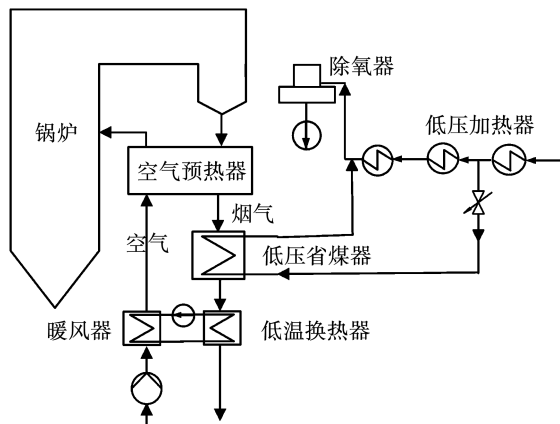


图 2 采用暖风器的机炉耦合系统

Fig. 2 The boiler-turbine coupling system with air heater

1.3 设置旁路烟道的机炉耦合系统

在现代大型燃煤机组设计工况中,空气预热器的进口烟温很高,而进口空气一般来自于自然空气,空气预热器内部换热温差较大。并且由于在空气预热器中烟气的热容量大于空气的热容量,所以烟气的温降较小、空气的温升较大^[9],换热过程中存在较大的不可逆损失。

采用旁路烟道的机炉耦合系统如图 3 所示。在引入暖风器的同时,将部分烟气从空气预热器前引出,使空气预热器内烟气与空气的热容量相匹配,从而实现了烟气能量的梯级利用;所回收的烟气余热不但可用来加热凝结水,还可加热给水,从而大幅度地提高机组的热经济性^[10]。

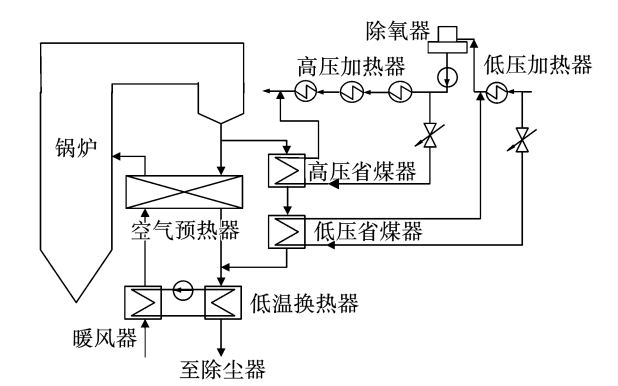


图 3 设置旁路烟道的机炉耦合系统
Fig.3 The boiler-turbine coupling system with bypass flue

2 案例机组余热回收系统设计

2.1 案例机组参数

以某典型 660 MW 超超临界燃煤发电机组为例,应用 3 种机炉耦合烟气余热利用系统。机组的锅炉为尾部双烟道的超超临界直流锅炉,设计煤种为山西大同塔山矿洗精煤;汽轮机为一次中间再热、带有 8 级回热的凝汽式汽轮机。锅炉尾部烟道主要参数如表 1 所示。

2.2 机炉耦合系统设计

在案例机组 THA 工况的基础上,对比分析 3 种机炉耦合系统的经济性。在进行系统的经济性计算之前,首先要确定各个系统的节点参数。在对系统的节点参数进行设计时遵循原则为:为了减少烟气

换热器的低温腐蚀,暖风器出口/低温烟气换热器进口循环水温度取 70 ℃,低温烟气换热器出口烟气温度取 95 ℃^[11];假定空气预热器内漏风率不变,且空气预热器换热面积不变,为简化计算,对空气预热器内的一次风与二次风进行合并,将空气预热器内的非稳态传热过程按照稳态传热过程进行计算^[12]。常规低压省煤器系统的节点参数如图 4 所示。

表 1 空气预热器进出流体参数
Tab.1 Air preheater inlet and outlet fluid parameters

参数	数值
空气预热器烟气进口流量/kg·h ⁻¹	2 213 530
空气预热器烟气出口流量/kg·h ⁻¹	2 352 100
空气预热器进口烟气温度/℃	370
空气预热器出口烟气温度/℃	122.7
空气预热器进口一次风量/kg·h ⁻¹	347 510
空气预热器进口一次风温度/℃	28
空气预热器进口二次风量/kg·h ⁻¹	1 554 850
空气预热器进口二次风温/℃	21
空气预热器出口一次风温/℃	336
空气预热器出口二次风温/℃	345

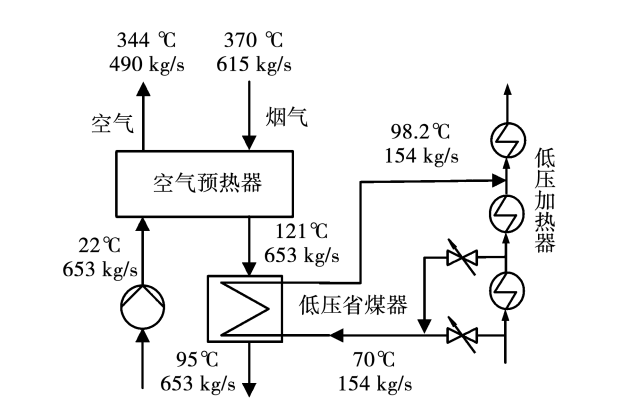


图 4 常规低压省煤器系统节点参数
Fig.4 Key point parameters of conventional low-pressure economizer system

图 5 为采用暖风器的机炉耦合系统。暖风器将空气预热器进口空气温度加热至 75 ℃,进口空气温度提高,造成空气预热器出口空气温度与出口烟气温度均有不同程度的提高,其中出口空气温度由 344 ℃提升至 348 ℃,空气预热器出口烟气温度由 121 ℃提升至 166 ℃。

表 2 热经济性指标

Tab.2 Thermal economy indexes

参数	常规	暖风器	旁路烟道
发电功率增加量/kW	2 934	4 968	12 620
汽轮机侧节能量/g · (kW · h) ⁻¹	1.27	2.15	5.45
厂用电增加量/kW	-757	25	268
厂用电折算煤耗/g · (kW · h) ⁻¹	-0.33	0.01	0.12
空气预热器出口空气温度变化/℃	0	5	-18.9
锅炉侧节能量/g · (kW · h) ⁻¹	0	0.51	-2.01
净节能效果/g · (kW · h) ⁻¹	1.6	2.64	3.32

由表 2 可以看出,3 种机炉耦合系统的热经济性结果对比,设置旁路烟道的机炉耦合系统的净节能效果最好,达到了 3.32 g/(kW · h)。但是,由于系统中设置旁路烟道,使空气预热器出口空气温度有较大的下降;采用暖风器的机炉耦合系统的净节能效果为 2.64 g/(kW · h)。同时,由于设置暖风器,空气预热器出口空气温度提高了 5 ℃,常规低压省煤器系统的净节能效果为 1.6 g/(kW · h)。

3.2 技术经济性计算与对比

系统设计中涉及了烟气-水换热器、空气-水换热器以及空气预热器,其中空气预热器为电厂原用设备。3 种机炉耦合系统均未对空气预热器本体进行改造,因此不计算空气预热器的投资。系统采用 H 形翅片管作为烟气-水换热器的换热管,螺旋翅片管作为空气-水换热器的换热管。

考虑到换热设备部件的成本,根据设计经验,换热设备整体质量与换热管束的比值为 1.2;在得到设备成本后,考虑到设备运输、安装以及管道阀门等附件的成本,乘以系数 1.43 得到设备投资;设备维护包括烟气侧受热面的耐腐蚀,管道的更换以及其他附件的维护,将设备投资的 2% 作为机炉耦合系统的设备维护费用^[15]。

系统年节煤净收益为:

$$En = 29\,270sN_d\Delta bP_{\text{coal}}/10^{10}/Q_{\text{net,ar}} - 0.02In$$

(8)

式中;s—机组年运行小时数,h;P_{coal}—燃用煤种价格,元/t;Q_{net,ar}—燃煤低位发热量,kJ/kg;In—系统总投资,万元。

系统的净现值为:

$$NPV = (En - In) (1 + i_c)^{-1} +$$

$$\sum_{k=2}^n En (1 + i_c)^{-k}$$

(9)

式中:i_c—投资效益系数;n—系统的寿命期,年;k—第 k 年。

表 3 为典型 660 MW 燃煤发电机组应用 3 种机炉耦合烟气余热利用系统的技术经济性指标的汇总。

表 3 技术经济性指标

Tab.3 Technical economy indexes

参数	常规	暖风器	旁路烟道
系统总投资/万元	530	1 146	1 177
节煤净收益/万元	307	501	636
净现值/万元	1 261	1 807	2 543

由表 3 中 3 种机炉耦合系统的技术经济性结果对比可知,常规低压省煤器系统的系统总投资最低,而采用暖风器的机炉耦合系统和设置旁路烟道的机炉耦合系统总投资基本相同;设置旁路烟道的机炉耦合系统的年节煤净收益最高,达到了 636 万元,而常规低压省煤器系统的年节煤净收益最低,为 307 万元;以系统的运行寿命为 10 a 进行计算,常规低压省煤器系统的净现值为 1 261 万元,采用暖风器的机炉耦合系统的净现值为 1 807 万元,设置旁路烟道的机炉耦合系统的净现值为2 543万元。

4 结 论

基于典型 660 MW 机组对比分析了 3 种机炉耦合烟气余热回收系统的经济性:

- (1) 常规低压省煤器系统、采用暖风器的机炉耦合系统以及设置旁路烟道的机炉耦合系统的净节能效果分别可以达到 1.6,2.64 和 3.32 g/(kW · h);
- (2) 常规低压省煤器系统、采用暖风器的机炉耦合系统以及设置旁路烟道的机炉耦合系统的总投资分别为 530,1 146 和 1 177 万元,系统的净现值分别为 1 261,1 807 和 2 543 万元;
- (3) 对比 3 种机炉耦合系统的经济性指标,常规低压省煤器系统的系统所需投资最小,但是年投

资净收益最低;采用暖风器的机炉耦合系统的年节煤净收益有所增加,但是系统总投资也大幅增加;设置旁路烟道的机炉耦合系统的年节煤净收益最高,经济性最优。

参考文献:

- [1] 马有福,杨丽娟,吕俊复. 电站锅炉尾部烟气余热利用系统技术经济性比较[J]. 动力工程学报,2017,37(4):321-328.
MA You-fu, YANG Li-juan, LYU Jun-fu. Techno-economic comparison of three processes for boiler waste heat recovery[J]. Journal of Power Engineering,2017,37(4):321-328.
- [2] 刘永林,屈 杰,周 科,等. 烟气余热回收利用系统节能效果实验研究[J]. 热能动力工程,2017,32(4):76-79.
LIU Yong-lin, QU Jie, ZHOU Ke, et al. Experimental research on energy saving effect in waste heat recovery system of flue gas[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and power,2017,32(4):76-79.
- [3] 赵 亮,高 峰. 600 MW 机组加装低低温省煤器改造[J]. 内蒙古电力技术,2016,34(2):59-62.
ZHAO Liang, GAO Feng. Reconstruction application of lower temperature economizer on 600 MW unit[J]. Inner Mongolia Electric Power,2016,34(2):59-62.
- [4] 谢 天,范庆伟,房 瑾,等. 暖风器与低温省煤器联合系统变参数热力特性模拟[J]. 热力发电,2018,47(7):58-63.
XIE Tian, FAN Qing-wei, FANG Jin, et al. Simulation on variable parameter thermal characteristics of the combined system of air heater and low temperature economizer[J]. Thermal Power Generation,2018,47(7):58-63.
- [5] International energy agency. Fossil fuel-fired power generation: case studies of recently constructed coal- and gas-fired power plants [R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 2007.
- [6] 刘 军,孟贵祥,王祝成,等. 国内外低温省煤器技术应用研究进展[J]. 热能动力工程,2017,32(11):122-127.
LIU Jun, MENG Gui-xiang, WANG Zhu-cheng, et al. Progress in investigation of low temperature economizer technology application at home and abroad[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and power,2017,32(11):122-127.
- [7] 康晓妮,马文举,马 涛,等. 320 MW 机组锅炉加装低温省煤器的经济性研究[J]. 热力发电,2012,41(5):8-11.
KANG Xiao-ni, MA Wen-ju, MA Tao, et al. Economic study on adding low temperature economizer on a 320 MW unit[J]. Thermal Power Generation,2012,41(5):8-11.
- [8] 张华东,张知翔,贾兆鹏,等. 低温省煤器与暖风器联合系统应用[J]. 热力发电,2016,45(10):127-132.
ZHANG Hua-dong, ZHANG Zhi-xiang, JIA Zhao-peng, et al. Application of combined system of low pressure economizer and air heater[J]. Thermal Power Generation,2016,45(10):127-132.
- [9] 李沁伦,王璐凯,刘银河,等. 300 MW 一次再热亚临界燃煤发电站系统改进研究[J]. 西安交通大学学报,2018,52(9):54-63.
LI Qin-lun, WANG Lu-kai, LIU Yin-he, et al. Novel system design for a 300 MW single reheat subcritical coal-fired power plant[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2018,52(9):54-63.
- [10] 陈 洁,陈 勇. 余热回收原理在电厂节能降耗中的应用[J]. 汽轮机技术,2004,46(2):145-146.
CHEN Jie, CHEN Yong. The usage of waste heat recovery principle in energy saving and consumption reduction for power plants[J]. Turbine Technology,2004,46(2):145-146.
- [11] 季鹏伟,孙 石,王 旭,等. 低压省煤器在电站锅炉中的应用[J]. 东北电力大学学报,2003,23(1):76-78.
JI Peng-wei, SUN Shi, WANG Xu, et al. Application of low pressure economizer in power plant boiler[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2003,23(1):76-78.
- [12] 李 杨,周元祥,谢 天,等. 三分仓空气预热器热力计算的简化方法[J]. 动力工程学报,2013,33(1):37-41.
LI Yang, ZHOU Yuan-xiang, XIE Tian, et al. A simplified method for heat balance calculation of tri-sectional regenerative air heater[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2013,33(1):37-41.
- [13] 张才稳. 加热器等效热降分析模型研究[J]. 汽轮机技术,2011,53(6):459-461.
ZHANG Cai-wen. Research on equivalent entropy drop analysis model for heaters in steam cycle[J]. Turbine Technology,2011,53(6):459-461.
- [14] 刘宇钢,莫春鸿,冉桑铭,等. 大型煤电机组机炉深度耦合系统对锅炉效率影响研究[J]. 能源与环保,2019,41(6):82-85.
LIU Yu-gang, MO Chun-hong, RAN Shen-ming, et al. Study on boiler efficiency influence of deep coupling system of machine and furnace for large coal-fired power unit[J]. China Energy and Environmental Protection,2019,41(6):82-85.
- [15] YAN Min, ZHANG Liang, SHI Yue-tao, et al. A novel boiler cold-end optimization system based on bypass flue in coal-fired power plants: heat recovery from wet flue gas[J]. Energy,2018,152:84-94.