

75 t/h 循环流化床锅炉性能测试及基于 Aspen Plus 模拟研究

陈宝明, 段钰锋, 耿新泽, 许一凡, 赵士林, 黄天放

(东南大学 能源与环境学院 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:为寻找循环流化床(CFB)燃煤锅炉机组热损失的原因,以额定负荷 75 t/h CFB 燃煤锅炉为试验平台,对其进行热力性能测试,为与实测法对比,利用 Aspen Plus 流程模拟软件对 CFB 锅炉进行建模计算,提出一种基于 Aspen Plus 模型法获得 CFB 锅炉热效率的新思路。试验选取低负荷、满负荷、高负荷 3 种运行工况,利用反平衡法通过热力计算求得各项热损失,探究不同运行工况参数对 CFB 锅炉热效率的影响,并分析了不同运行工况下,飞灰及炉渣中未燃尽碳(UBC)含量的分布规律。通过对 CFB 锅炉的煤热解、煤燃烧、气固分离和热交换 4 个子过程进行建模,利用现场稳定运行的锅炉各级换热设备进出口流股温度、压力、流量等数据,对满负荷(工况 2)条件下锅炉各项热损失、锅炉热效率及炉膛出口烟组分浓度进行计算。根据实测数据与模拟结果的比对,验证建模的准确性、可靠性。结果表明:模型法与实测法数据吻合良好,能够精准预测炉膛出口烟气的组成;通过对比锅炉各项热损失及热效率,发现排烟热损失 q_2 实测结果为 7.75%,模型结果为 6.48%;固体未完全燃烧热损失 q_4 实测结果为 3.72%,模型结果为 3.17%;二者相对误差较小,说明利用 Aspen Plus 建模可以对排烟热损失及固体未完全燃烧热损失进行较为精准的预测;模型计算得到的锅炉热效率为 88.66%,实测锅炉热效率为 87.426%,相对误差仅为 1.41%,实测法和模型法对热效率及各项热损失的计算结果极为接近,验证了建模思路及方法的准确性和可靠性,也印证了基于 Aspen Plus 模型法计算 CFB 锅炉热效率的可行性;3 种工况下锅炉运行存在排烟温度高、飞灰含碳量高、实际热效率偏低未达到锅炉设计值等问题;入炉煤燃烧后飞灰中的 UBC 含量较高,为 13.28%~16.40%,炉渣中 UBC 含量较少,为 2.92%~3.39%;3 种工况下锅炉排烟热损失在 7.64%~7.93%,固体未完全燃烧热损失在 3.72%~4.69%,锅炉热效率在 86.14%~87.43%,且 $\eta_2 > \eta_3 > \eta_1$ 。说明基于 Aspen Plus 对 CFB 锅炉建模进行锅炉热力计算可行、可靠。

关键词:循环流化床锅炉;性能测试;Aspen Plus;流程模拟;热损失;热效率

中图分类号:X511;TK229.6

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)03-0052-08

Performance test of 75 t/h CFB boiler and simulation study based on Aspen Plus

CHEN Baoming, DUAN Yufeng, GENG Xinze, XU Yifan, ZHAO Shilin, HUANG Tianfang

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to find out the causes of heat loss of circulating fluidized bed (CFB) boiler unit, the thermal performance of CFB coal-fired boiler with rated load of 75 t/h was tested. In order to compare with the measured method, a new idea of obtaining the thermal efficiency of CFB boiler based on Aspen Plus model method was proposed, that is, by using Aspen Plus process simulation software to model and calculate CFB boiler. In the experiment, three operating conditions of low load, full load and high load were selected, and the heat loss

收稿日期:2020-03-16;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CFB20031601

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600203)

作者简介:陈宝明(1994—),男,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为模拟电厂热力系统的优化及提效。E-mail:403451708@qq.com。通讯作者:段钰锋,教授,博士生导师,研究方向为洁净煤发电和大气污染控制。E-mail:yfduan@seu.edu.cn

引用格式:陈宝明,段钰锋,耿新泽,等.75 t/h 循环流化床锅炉性能测试及基于 Aspen Plus 模拟研究[J].洁净煤技术,2020,26(3):52-59.

CHEN Baoming, DUAN Yufeng, GENG Xinze, et al. Performance test of 75 t/h CFB boiler and simulation study based on Aspen Plus[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 52-59.



移动阅读

ses was calculated by the anti-balance method, and then the effects of different operating conditions on the thermal efficiency of the CFB boiler were explored, the distribution of unburned carbon (UBC) in fly ash and slag under different operating conditions was analyzed. By modeling the four sub-processes of coal pyrolysis, coal combustion, flue gas-fly ash separation and heat exchange of CFB boiler, and based on the data of inlet and outlet flow unit temperature, pressure, flow rate, etc. in heat exchange equipment at all levels of the boiler, the heat loss, the heat efficiency and the concentration of flue gas at the outlet of the boiler were calculated under the condition of full load (working condition 2). The accuracy and reliability of the model were verified by comparing the measured data with the simulation results. The results show that the model method is in good agreement with the measured data and can accurately predict the composition of flue gas at furnace outlet. Through the comparison of the heat loss and thermal efficiency of boiler, it is found that the measured result of exhaust heat loss q_2 is 7.75%, and the model result is 6.48%. The measured result of solid incomplete combustion q_4 is 3.72% and the model result is 3.17%. The relative error between two methods is small, indicating that Aspen Plus modeling can be used to accurately predict the heat loss of smoke exhaust and the heat loss of incomplete solid combustion. The thermal efficiency of the boiler calculated by the model is 88.66%, the measured thermal efficiency of boiler is 87.426%, and the relative error is only 1.41%, the calculation results of thermal efficiency and heat loss is extremely close between the measured method and the model method, which can verify the veracity and reliability of the modeling idea and method, and the feasibility of CFB boiler thermal efficiency calculation based on Aspen Plus model is also verified. There are some problems in the operation of the boiler under the three operating conditions, such as high flue gas temperature, high carbon content of fly ash, and low actual thermal efficiency that does not reach the boiler design value. The content of UBC in fly ash after coal combustion is relatively high, ranging from 13.28% to 16.40%, while the content of UBC in slag is low, ranging from 2.92% to 3.39% under three operating conditions, the heat loss of boiler exhaust flue gas between 7.64%–7.93%, the heat loss of solid incomplete combustion between 3.72%–4.69%, the boiler thermal efficiency is between 86.14%–87.43%, in which $\eta_2 > \eta_3 > \eta_1$. It shows that it is feasible and reliable to use Aspen Plus to model CFB boiler for thermal calculation.

Key words: CFB boiler; performance testing; Aspen Plus; process simulation; heat loss; thermal efficiency

0 引 言

循环流化床(CFB)锅炉燃烧技术具有燃料适应性广、燃烧效率高、污染物排放低以及负荷调节方便等优点,被广泛应用于电站锅炉,成为劣质煤商业化最成功的洁净煤燃烧技术^[1-2]。但常规 CFB 电站存在部分炉型可靠性差、热利用率低、供电效率不足等缺点^[3-4],因此,CFB 锅炉热力性能测试对了解锅炉的实际运行状况、优化燃烧、提高锅炉热效率具有重要意义。目前,电站锅炉热效率计算标准有 2 种:DL/T 964—2018《循环流化床锅炉性能试验规程》和美国机械工程师协会颁布的 ASME-PTC4—1998《锅炉性能试验规程》^[5]。二者按照计算的标准分为输入-输出热量法(正平衡法)和热损失法(反平衡法)。反平衡法简单易行,数据可靠,测试结果可为锅炉的运行参数优化和提高锅炉效率提供有效参考^[6-7]。

针对锅炉性能测试的常规热平衡法具有周期较长、成本较大、诸多参数不易获取、核算繁琐且无法实时掌握锅炉热效率等缺点,采用相关软件对 CFB 锅炉进行流程模拟,可快捷获得锅炉工业试验条件下的运行参数。基于 Aspen Plus 强大的物性数据库和灵活且便于计算的单元模块,可方便灵活地模拟煤转化过程中的物料能量变化^[8],近年来被广泛应用于燃烧领域。白慧峰等^[9]借助 Aspen Plus 对某超

超临界机组热力系统进行建模,并对其性能进行预测分析;Ravikiran 等^[10]基于 Aspen Plus 中 Gibbs 自由能最小化原理模拟煤气化过程,研究了加入 H/C 和 O/C 比对气化炉产出气的组成、气化炉内温度及有效气(CO+H₂)产率的影响。段伦博^[11]利用 Aspen Plus 建立气固流动、挥发分析出和燃烧、焦炭燃烧、NO_x生成和脱硫子模型的循环流化床 O₂/CO₂ 燃烧综合模型,研究表明 Aspen Plus 可较为准确地模拟出煤颗粒在 O₂/CO₂ 气氛下的燃烧情况。赵伟刚等^[12]利用 Aspen Plus 从热力学角度对循环流化床煤气化制取合成气进行了模拟及计算分析,根据实测数据验证了模型的准确性。Wayne Doherty 等^[13]使用 Aspen Plus 建立一个 CFB 生物质气化炉的计算模型,基于吉布斯自由能最小化原理,用限制平衡法对试验数据进行了校正,很好地预测了合成气的组分、转换率及热值,模型与数据结果契合良好。王龙飞等^[14]利用 Aspen Plus 对 350 MW 超临界循环流化床进行建模,并通过该模型分析了循环流化床锅炉的烟分布特性和烟损失的影响因素,有效揭示了各种烟损失及其发生的部位。

目前基于 Aspen Plus 对 CFB 的研究大多是关于煤气化炉或污染物排放控制的模拟,而对锅炉能耗诊断与热力性能研究较少。本文以 75 t/h CFB 锅炉为对象,基于 Aspen Plus 软件平台建立 CFB 锅炉模型,预测锅炉在满负荷工况条件下热损失及热

效率,通过模拟结果与试验结果对比,验证了模型算法的准确性与 Aspen Plus 模拟计算锅炉热效率的可行性,为 CFB 锅炉热效率的模拟预测提供了新方法,可用于锅炉运行参数的实时计算及优化。

1 锅炉系统及试验方法

1.1 CFB 锅炉概述

以一台额定蒸发量为 75 t/h 的 CFB 锅炉为测

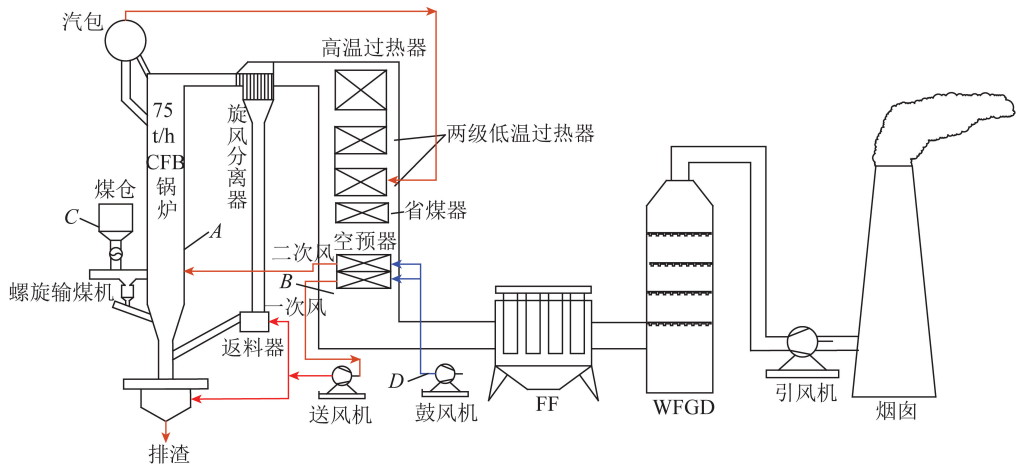


图 1 75 t/h CFB 锅炉系统及取样点布置

Fig.1 Systematic diagram of 75 t/h CFB boiler and sampling point

四周为膜式水冷壁,炉膛出口布置 2 只蜗壳式绝热旋风分离器,尾部烟道布置有高、低温过热器,省煤器及空预器。采用床下热烟气点火技术,一次风经水冷风室及布风板送入炉膛,约占 60%,二次风经空预器加热至 138 °C 后进入炉膛。炉膛烟气经旋风分离器分离飞灰颗粒后,依次经过高、低温过热器、省煤器、空预器、布袋除尘器、湿法脱硫装置后,由引风机排入烟囱。

1.2 试验工况参数

本试验进行了 3 种锅炉不同负荷对 CFB 锅炉效率的影响,分别为高(112.68% BMCR,工况 1)、满(100.87% BMCR,工况 2)、低(84.65% BMCR,工况 3) 3 个负荷。测试期间锅炉负荷稳定,测试工况及锅炉主要参数见表 1。经测量大气压力平均值为 103.437 kPa,大气平均温度为 12 °C。

1.3 测试内容

炉膛温度(A 点)、燃煤量、空气流量等直接选用锅炉 DCS 数据,烟气组分及排烟温度的测点位于一级空预器出口的 B 点,入炉煤样取样位于 C 点,燃烧空气压力及温度测点鼓风机出口的 D 点,如图 1 所示。试验期间各主要参数维持稳定。

试对象,该锅炉采用混合动力煤为燃料,锅炉全流程系统如图 1 所示,主要包含煤和石灰石供给系统、CFB 锅炉燃烧系统、尾部烟道、布袋除尘装置(FF)系统、湿法烟气脱硫(WFGD)系统、烟囱等。该系统具备完善的 DCS 控制系统,可实时调节、控制、记录锅炉运行数据。

该锅炉型号为 TG-75/5.3-M41,系单锅筒、自然循环水管锅炉,炉膛下部为密相区,上部为稀相区,

表 1 测试工况及锅炉主要参数

Table 1 Test condition and main boiler parameters

| 项目 | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 |
|--|----------|----------|----------|
| 锅炉燃煤量/(t·h ⁻¹) | 16.5 | 15.1 | 11.7 |
| 锅炉负荷/(t·h ⁻¹) | 84.51 | 75.65 | 63.49 |
| 占满负荷比/% | 112.68 | 100.87 | 84.65 |
| 试验时间/h | 1 | 1 | 1 |
| 主蒸汽温度/°C | 475 | 474 | 468.4 |
| 主蒸汽压力/MPa | 5.0 | 5.0 | 4.9 |
| 一次风风量/(m ³ ·h ⁻¹) | 38 033.5 | 39 650.9 | 43 070.0 |
| 一次风压力/kPa | 7.92 | 7.32 | 7.24 |
| 二次风风量/(m ³ ·h ⁻¹) | 15 751 | 14 145 | 8 298.4 |
| 二次风压力/kPa | 5.83 | 5.02 | 3.41 |
| 给水流量/(t·h ⁻¹) | 88.6 | 78.9 | 64.8 |
| 给水温度/°C | 127 | 119 | 134 |
| 给水压力/MPa | 7.8 | 7.1 | 7.3 |
| 排烟温度/°C | 212 | 205 | 201 |
| 空气温度/°C | 12 | 12 | 12 |

1.3.1 烟气组分、流量和排烟温度

在空预器出口烟道取样点 B,按网格法设置烟气取样点,使用高精度 M-9000 便携式烟气分析仪

测量烟气组分。测试过程中采用金属过滤网及滤膜对烟气进行除灰过滤,取样管线全程伴热以防止水汽冷凝对烟气组分造成影响。为防止水蒸气进入烟气分析仪产生凝结对设备造成损坏,在烟气分析仪前放置干燥剂去除水分,由于硅胶对 SO_2 、 NO 浓度有较大影响^[15], CaCl_2 在 200 °C 下与 SO_2 、 NO_x 等气体不发生反应且具有良好的除水特性^[16],因此选用 CaCl_2 颗粒做除水剂。测试期间每隔 15~20 min 进行一次烟气成分分析取样测量,排烟温度由取样管上的热电偶直接测得。烟气流量(流速)测定采用等截面积标准毕托管法^[17],S 型毕托管孔径较大,不易堵塞,适用于烟尘含量较高的烟道烟气流速检测^[18]。本文利用 S 型毕托管和 U 型差压计测量动压计算烟气流速,由测点截面面积计算烟气流速。

1.3.2 入炉煤、飞灰、炉渣取样

对烟气进行取样测速时,为保证取样测试的同时性和准确性,同时对入炉煤、炉渣、飞灰进行取样。按照 DL/T 567.5—1995《火电厂燃料试验方法灰及渣中硫的测定和燃煤可燃硫的计算》对上述固样进行含碳量分析。目前,炉渣、飞灰中可燃物含量(UBC)的测定方法主要有元素分析法、灼烧减量法、工业分析法和灼烧减量校正法(IDM)测定^[19-20]。为提高测试精度,保证试验结果的准确性、有效性,UBC 的测定采用 IDM 法^[21]。

2 基于 Aspen Plus 的模型构建

2.1 物性方法选择

在燃煤锅炉 Aspen Plus 建模中,由于煤裂解燃烧过程涉及烟气组分的转换,因此选用适合 CFB 锅炉燃烧的 PR-BM 法作为建模输入的物性方法。常规组分包括 H_2O 、 N_2 、 O_2 、 CO_2 等,非常规组分包括 Coal 及 Ash,只需对其进行密度和焓的计算,焓计算

模型采用 HCOALGEN,密度计算模型采用 DCOALIGT。

2.2 建模假设

由于 CFB 锅炉实际燃烧过程及运行工况较为复杂,若全面考虑各因素将使建模复杂化,可能增大误差影响模型精度。因此,本文对建模系统做如下假设:① 煤的燃烧和裂解过程为瞬时发生,认为整个过程由化学反应平衡控制;② 非常规组分中仅含有 Coal 与 Ash;③ 过程为稳态模拟,所有变量不随时间变化;不计算流程的压力及压力降,二者作为单元模块的设定输入条件;④ 锅炉实际运行中,未燃烧充分的煤颗粒通过旋风分离回料器与返料灰一起送回炉膛,这里简化为直接接入 RYIELD 模块,再作为 RGIBBS 模块的输入流参与燃烧反应;⑤ 煤燃烧颗粒及气体温度恒定且等于床温。

2.3 CFB 锅炉建模流程

根据以上假设,针对 CFB 锅炉实际运行过程,建立 Aspen Plus 模拟流程如图 2 所示。将循环流化床锅炉炉膛处理为一个收率反应器(RYIELD)和一个吉布斯自由能反应器(RGIBBS),用于模拟燃料的燃烧。煤作为非常规组分,先进入 RYIELD 反应器发生热解反应,该模块将非常规固体物质按照元素质量平衡裂解为常规组分: C 、 H_2 、 O_2 、 N_2 、 S 、 H_2O 及非常规组分灰分,裂解热 DE-COMP 传递至反应单元,裂解组分的收率通过 Aspen Plus 内嵌模块 Calculator 控制。裂解后各组分产生的混合烟气通过 M1 流股进入 RGIBBS 模块中进行燃烧反应,该模块基于 Gibbs 自由能最小化原理可对产物烟气的组成和温度进行预测^[22]。产物通过流股 M2 进入气固分离模块 SSplit 分离后,输出的 2 股物流:一股是全部气体成分及少量固体灰分颗粒的烟气流 FULEGAS,另一股是分离下来的绝大部分灰分颗粒

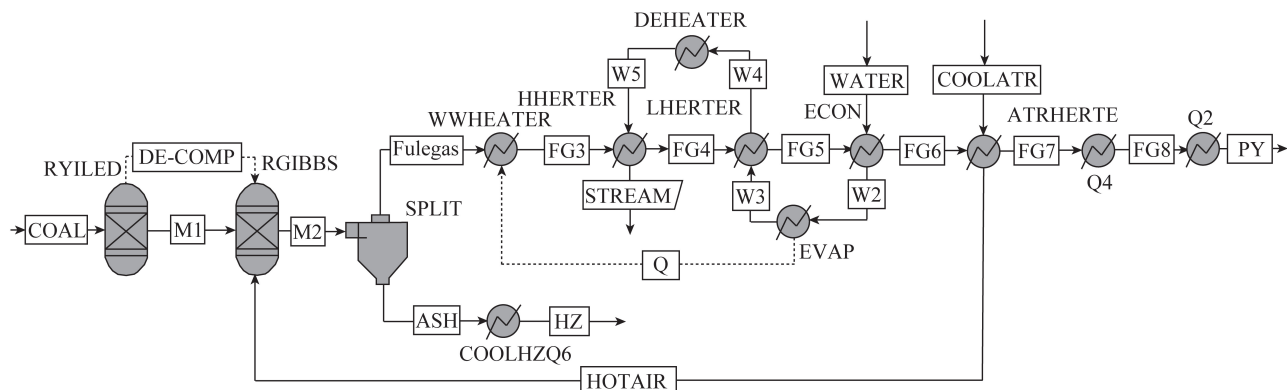


图 2 CFB 锅炉 Aspen Plus 模拟流程

Fig.2 Simulation flow chart of Aspen Plus for CFB boiler

流 Ash, 在其后设置一个 HEATER 换热模块“Q6”来计算分离灰分从排渣温度冷却至室温过程中的焓变, 即为灰渣物理热损失; 烟气流 FULEGAS 进入后续尾部烟道中与各换热模块 HEATER 表示的换热设备进行换热。CFB 锅炉系统模型所用模块与设备对应关系见表 2。注意在尾部烟道出口, 用 2 个 HEATER 模块“Q4”、“Q2”分别计算固体不完全燃烧热损失和排烟物理热损失的热量, 各换热器的数据均来自于现场实测值。

表 2 模型所用模块

Table 2 Modules used in the model

| 设备或模拟过程 | 模块名称 |
|---------|----------|
| 煤的裂解 | RYIELD |
| 煤的燃烧 | RGIBBS |
| 旋风分离器 | SSPLIT |
| 裂解热 | DE-COMP |
| 水冷壁 | WWHEATER |
| 高温过热器 | HHERTER |
| 低温过热器 | LHERTER |
| 减温水换热器 | DEHEATER |
| 省煤器 | ECON |
| 空气预热器 | AIRHERTE |

表 3 3 种工况下入炉煤样工业分析及元素分析

Table 3 Proximate and ultimate analysis of coal samples under three working conditions

| 工况 | 工业分析/% | | | | 元素分析/% | | | | | | $Q_{net,ar}/$ ($MJ \cdot kg^{-1}$) |
|----|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|---|
| | M_{ar} | A_{ar} | V_{ar} | FC_{ar} | C_{ar} | H_{ar} | O_{ar} | N_{ar} | S_{ar} | Cl_{ar} | |
| 1 | 21.25 | 18.39 | 25.43 | 34.93 | 46.36 | 3.16 | 9.64 | 0.76 | 0.44 | 0.066 | 18.12 |
| 2 | 22.39 | 16.89 | 26.89 | 33.83 | 45.81 | 3.10 | 10.66 | 0.73 | 0.41 | 0.068 | 17.79 |
| 3 | 22.92 | 16.28 | 27.65 | 33.16 | 44.94 | 3.03 | 11.73 | 0.74 | 0.36 | 0.068 | 17.57 |

烧条件下, UBC 主要富集于飞灰中, 含量在 13.28%~16.40%; 相比飞灰, 炉渣中 UBC 含量较少, 仅为 2.92%~3.39%。3 种负荷下, 总灰中的 UBC (为飞灰、炉渣按照 2:1 混合后计算的含碳量) 与飞灰中 UBC 含量变化趋势一致, 即高负荷、低负荷工况的 UBC 均高于满负荷。通过运行中 DCS 实时数据发现, 该电厂在调节负荷变化时, 虽然一次风压较稳定维持在 7.3~7.6 kPa, 但二次风则随负荷变化且风压变化幅度较大, 高负荷时二次风压高达 6.29 kPa, 低负荷时二次风压低至 2.1 kPa。风压变化导致流化风速变化, 造成炉膛一、二次风混合不均匀, 燃烧效果较差, 导致入炉煤燃烧不充分。该结果与文献[26]对切圆燃烧锅炉炉渣 UBC 的分析结果一致。

在模拟煤热解过程中, 需对加入的 RYIELD 模块定义各裂解产物的收率, 本文利用 Aspen Plus 的 COMPUST 模型 (Calculator 模块) 编写 Fortran 语句来规定裂解产物的收率^[23]。

3 结果与分析

对 75 t/h CFB 锅炉进行了 3 个不同负荷的试验工况, 每个工况进行 2 组平行测试, 结果取算术平均值。根据 GB/T 10180—2017《工业锅炉热工性能试验规程》要求, 为保证测试结果的可靠性、有效性, 每组工况 2 次反平衡试验所得效率之差不大于 4%。试验在锅炉系统连续稳定工况下运行, 期间锅炉燃烧稳定, 设备运行正常, 各主要参数维持稳定。

3.1 入炉煤样分析

3 种工况下的煤样工业分析和元素分析见表 3, 该数据作为计算锅炉燃料有效利用热的依据。由表 3 可知, $M_{ar} = 21.25\% \sim 22.92\%$, $V_{dar} = 42.13\% \sim 45.48\%$, 远高于锅炉用煤分级标准的 37%^[24], 属高水分高挥发分煤; $A_d = 21.12\% \sim 23.25\%$, $Q_{gr,d} = 21.85 \sim 23.01 MJ/kg$, 属中灰中热值煤^[25]。

3.2 炉渣、飞灰未燃尽碳含量

由灼烧减量校正法 (IDM) 测得 3 种负荷下飞灰、炉渣及总灰中的 UBC 含量如图 3 所示。CFB 燃

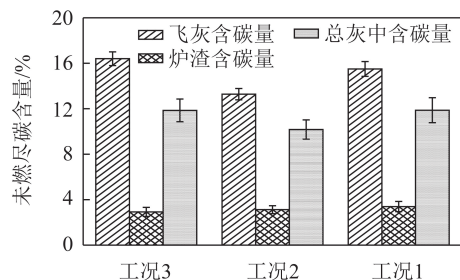


图 3 飞灰、炉渣及总灰中的 UBC 含量

Fig.3 UBC content in fly ash, slag and total ash

3.3 锅炉热损失及热效率

利用反平衡法得出 3 种工况 (超负荷、满负荷、低负荷) 下锅炉的实际热效率, 并与满负荷设计工况进行对比。实际计算获得的 3 种工况下平行测试热效率之差皆小于 4%, 其平均值见表 4。由测试结

果可知,实际各项热损失值与满负荷工况下热损失值基本相近,满足 GB/T 10180—2017《工业锅炉热工性能试验规程》要求。

该锅炉在 3 个工况下的平均效率为 86.83%,略低于满负荷状况下的热效率,误差为 3.5%。由于热

表 4 各工况下锅炉效率及各项热损失

Table 4 Boiler efficiency and heat loss under various load

| 项目 | 工况 1 | | 工况 2 | | 工况 3 | | 满工况设计 |
|------------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | 热效率 | 标准偏差 | 热效率 | 标准偏差 | 热效率 | 标准偏差 | |
| 排烟热损失 q_2 | 7.93 | 0.026 3 | 7.75 | 0.014 1 | 7.64 | 0.007 1 | 6.09 |
| 化学不完全燃烧损失 q_3 | 0.046 | 0.001 4 | 0.048 | 0.001 4 | 0.064 | 0.000 7 | 0.050 |
| 固体未完全燃烧热损失 q_4 | 4.69 | 0.014 1 | 3.72 | 0.014 1 | 4.38 | 0.014 1 | 2.96 |
| 散热损失 q_5 | 0.80 | 0 | 0.70 | 0 | 0.60 | 0 | 0.78 |
| 灰渣物理热损失 q_6 | 0.40 | 0.007 1 | 0.36 | 0.004 2 | 0.37 | 0.002 1 | 0.12 |
| 锅炉效率 η | 86.13 | 0.026 9 | 87.42 | 0.005 7 | 86.95 | 0.026 9 | 90.00 |

由表 4 可知, q_2 在 7.64%~7.93%, 高于设计值 6.09%, 主要是由于排烟温度较高所致, 实测中 3 个工况下的排烟温度皆远超出设计值 140 °C, 而排烟温度过大可能是由于换热器积灰老化等原因导致换热效率降低, 且入炉煤种的高水分无疑增加了排烟容积, 使 q_2 增大^[28]。 q_4 在 3.72%~4.69%, 比设计值 2.96% 略高。主要原因在于飞灰中可燃物含量较高, 另外, 飞灰及炉渣粒度较大, 灰分较高, 也导致 q_4 高于设计值。散热损失 q_5 在 0.60%~0.80%, 与设计值相近, 主要与炉膛及烟风汽管道的保温有关。灰渣热物理损失 q_6 在 0.37%~0.40%, 是设计值 (0.12%) 的 3 倍左右。对比工况 1 与工况 3, 煤种灰分越高, 发热量越低, q_6 越大, 同时由于排渣温度较高, 也导致 q_6 增大。灰渣含碳量、排渣温度、煤种灰分及发热量都是 q_6 的主要影响因素。

不同工况下的热效率及热损失分布、不同锅炉负荷对各项热损失比率的影响如图 4、5 所示。

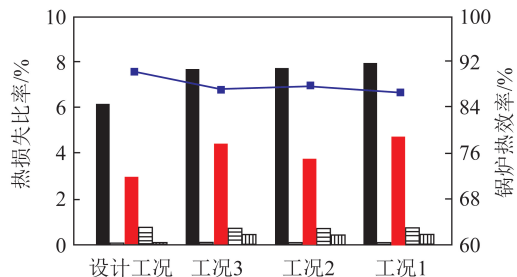


图 4 不同工况下的热效率及热损失分布

Fig.4 Thermal efficiency and heat loss distribution under different boiler load

随着锅炉负荷由超负荷向低负荷变化, 锅炉整体热效率先升后降, 满负荷运行时达到极大值, 相应地锅炉热损失在满负荷运行时达到极小值点。在各项热损失中, 排烟热损失 q_2 占比最大, 其次是机械

效率测试是动态过程, 锅炉运行参数的变化造成耗煤量、汽水参数等波动以及不可避免的人为误差等因素, 认为误差在 0 ~ ±4% 内可信^[27]。因此, 3 种工况测试的热效率均在许可范围内, 说明试验结果准确、可靠。

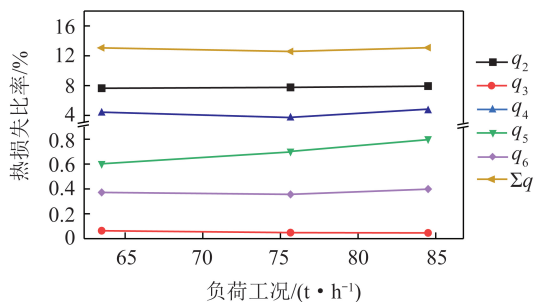


图 5 不同锅炉负荷对各项热损失比率的影响

Fig.5 Effect of different boiler loads on heat loss ratios

不完全燃烧热损失 q_4 , 二者占总热损失的 91%, 成为影响热效率的最主要因素。随锅炉负荷从低到高, q_2 、 q_4 、 Σq 的 3 条曲线变化趋于一致, 且呈很强的正相关性。散热损失 q_5 及灰渣物理热损失 q_6 相对较小, 其中 q_5 变化与负荷呈线性相关, 随锅炉负荷的升高而上升, q_6 的变化趋势与 q_4 相同。化学不完全燃烧热损失 q_3 为热损失中的最小项, 其变化趋势与负荷呈负相关, 随锅炉负荷降低, q_3 略增大。可能是由于炉膛温度降低使燃烧不充分, 且入炉煤挥发分越高, 这部分热损失越大。

3.4 模型验证

利用 Aspen Plus 对 CFB 锅炉进行全流程建模, 选用满负荷条件下 (工况 2) 的初始工况参数得到预测的模拟计算结果。模拟烟气组分与 CFB 锅炉测试结果对比见表 5。

由于试验期间, 锅炉未加入 CaCO_3 进行炉内烟气脱硫, 烟气脱硫在后续的湿法烟气脱硫装置中进行, 因此建模物流输入也未考虑 CFB 炉内脱硫部分。

由表 5 可知, O_2 、 CO_2 、 N_2 、 H_2O 、 SO_2 的模拟结果与实测数据接近, 各组分体积分数的实测值与模拟

值误差在 0.08%~0.26%,验证了建模的准确性、可靠性,因此可利用 Aspen Plus 合理预测煤燃烧过程。

表 5 模拟烟气组分与实测值对比

Table 5 Comparison of field measured and simulated flue gas components

| 项目 | O ₂ 体积分数 | CO ₂ 体积分数 | N ₂ 体积分数 | H ₂ O体积分数 | SO ₂ 体积分数 |
|------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 实测数据 | 4.02 | 14.90 | 77.42 | 3.62 | 0.030 2 |
| 模拟数据 | 3.90 | 14.70 | 77.68 | 3.70 | 0.02 |
| 误差 | 0.12 | 0.20 | 0.26 | 0.08 | 0.010 2 |

3.5 模型法与实测法锅炉热效率对比

基于 Aspen Plus 建立的 CFB 锅炉全流程模型可预测锅炉各项热损失和热效率。锅炉各项热损失与热效率的模拟与实测结果对比见表 6。

表 6 Aspen Plus 模型法与实测法得到的锅炉各项热损失及热效率对比

Table 6 Comparison of heat loss and boiler thermal efficiency between the measured and the Aspen Plus simulated

| 项目 | 实测法/% | Aspen Plus 模型法/% | 相对误差/% |
|------------------|--------|------------------|--------|
| 排烟热损失 q_2 | 7.75 | 6.48 | 16.39 |
| 气体不完全燃烧热损失 q_3 | 0.048 | 0.066 | 37.500 |
| 固体不完全燃烧热损失 q_4 | 3.72 | 3.17 | 14.78 |
| 散热损失 q_5 | 0.7 | 0.7 | 0 |
| 灰渣物理热损失 q_6 | 0.356 | 0.104 | 70.790 |
| 锅炉效率 η | 87.426 | 88.660 | 1.410 |

由表 6 可知,实测法和模型法对热效率及各项热损失的计算结果极为接近, q_2 实测结果为 7.75%,模型结果为 6.48%; q_4 的实测结果为 3.72%,模型结果为 3.17%;二者的相对误差较小,说明利用 Aspen Plus 建模可以对排烟热损失及固体不完全燃烧热损失进行较为精准的预测。 q_3 和 q_6 的相对误差较大,可能是由于这 2 部分占比极小,对锅炉热效率影响较小。散热损失部分未采用 Aspen Plus 模块计算,而是查取电厂性能测试锅炉外部冷却曲线图所得。基于以上模拟结果,模拟计算得到的锅炉热效率为 88.66%,与实测法 87.426% 极为接近,相对误差仅为 1.41%,验证了建模思路及方法的准确性和可靠性,说明基于 Aspen Plus 对 CFB 锅炉建模进行锅炉热力计算可行、可靠。

4 结 论

1) 根据 75 t/h CFB 锅炉实际运行情况,采用不平衡法对锅炉热效率进行性能测试,并基于 Aspen Plus 流程模拟软件对锅炉热力系统进行模拟计算。在 CFB 锅炉超负荷、满负荷和低负荷运行条件下,UBC 主要富集于飞灰中,含量在 13.28%~16.40%;炉渣中 UBC 含量较少,仅为 2.92%~3.39%。3 种负荷下,总灰中 UBC 含量与飞灰中的变化趋势一致,即高负荷、低负荷工况的 UBC 均高于满负荷。

2) 在 CFB 锅炉超负荷、满负荷和低负荷运行条件下,各项热损失中,排烟热损失 q_2 占比最大,为 7.64%~7.93%,高于设计值 6.09%;其次为机械不完全燃烧热损失 q_4 ,占比 3.72%~4.69%,比设计值 2.96%略高;散热损失 q_5 及灰渣物理热损失 q_6 相对较小,二者占比约 1%;气体不完全燃烧热损失 q_3 最小,不足 0.1%。

3) 3 个工况下锅炉的平均热效率为 86.835%,低于设计值 90%。随着锅炉负荷由低到高,锅炉整体热效率先升后降,满负荷时最高,高负荷和低负荷时较低。锅炉负荷从低到高时, q_2 、 q_4 、 $\sum q$ (总热损失)变化趋势一致,呈现很强的正相关性。

4) 基于 Aspen Plus 建立的 75 t/h CFB 锅炉全流程热力系统模型,其烟气组分的模拟结果与实际测试结果基本吻合,误差在 0.08%~0.26%。模拟计算得到的锅炉热效率为 88.66%,与实测法 87.426% 极为接近,相对误差仅为 1.41%。验证了建模思路及方法的准确性和可靠性,说明基于 Aspen Plus 对 CFB 锅炉建模进行锅炉热力计算可行、可靠。

参考文献 (References):

- [1] 毛健雄,毛健全,赵树民.煤的清洁燃烧[M].2版.北京:科学出版社,2000.
MAO Jianxiang, Mao Jianquan, Zhao Shumin. Clean burning of coal [M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 蔡润夏,吕俊复,凌文,等.超(超)临界循环流化床锅炉技术的发展[J].中国电力,2016,49(12):1-7.
CAI Runxia, LYU Junfu, LING Wen, et al. Progress of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology [J]. Electric Power, 2016, 49(12): 1-7.
- [3] 毛健雄.超(超)临界循环流化床直流锅炉技术的发展[J].电力建设,2010,31(1):1-6.
MAO Jianxiang. Development of supercritical and ultra-supercritical CFB boiler technology [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 1-6.
- [4] BURSI J M, LAFANECHERE L, JESTIN L. Basic design studies for a 600 MWe CFB boiler [C]//Proceeding of the 6th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Weisberg: [s.n.], 1999: 913-916.
- [5] 常勇强,刘雪敏.中国锅炉热工性能试验标准与美国 ASME PTC 4-2013 对比研究[J].动力工程学报,2018,38(8):610-616.
CHANG Yongqiang, LIU Xuemin. Comparative study between Chi-

- nese and American boiler performance test codes [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(8): 610-616.
- [6] 高剑, 薛渝, 肖宁强. 锅炉热效率测试正与反平衡法的不确定度比较[J]. 能源与节能, 2012(9): 41-42.
- GAO Jian, XUE Yu, XIAO Ningqiang. Comparison of boiler thermal efficiency test positive and counter balancing method[J]. Energy and Energy Conservation, 2012(9): 41-42.
- [7] LI X W. Optimal operation of boiler based on anti-balance algorithm [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 716/717: 771-775.
- [8] Aspen Technology. Aspen plus12.1 user guide[M]. Cambridge, MA, USA: Aspen Technology Incorporated, Chemical Industry Press, 2003.
- [9] 白慧峰, 徐越, 陈德龙. 基于 Aspen Plus 平台的超超临界机组热力系统性能预测模型开发[J]. 热力发电, 2006, 35(4): 21-23.
- BAI Huifeng, XU Yue, CHEN Delong. Development of thermal system performance predicting model for over supercritical units based on Aspen Plus platform[J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(4): 21-23.
- [10] RAVIKIRAN A, RENGANATHAN T, SUBRAMANIAM P. Generalized analysis of gasifier performance using equilibrium modeling [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(4): 1601-1611.
- [11] 段伦博. O₂/CO₂ 气氛下循环流化床煤燃烧及 SO₂/NO 排放特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- DUAN Lunbo. Coal combustion and SO₂/NO emission characteristics in circulating fluidized bed combustor under O₂/CO₂ atmosphere[D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [12] 赵伟刚, 范飞, 李建仓, 等. ASPEN PLUS 对循环流化床煤气化模拟研究[J]. 计算机与应用化学, 2018, 35(5): 400-406.
- ZHAO Weigang, FAN Fei, LI Jiancang, et al. Simulation of coal gasification in a circulating fluidized bed using Aspen Plus [J]. Computers and Applied Chemistry, 2018, 35(5): 400-406.
- [13] DOHERTY W, REYNOLDS A, KENNEDY D. The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN Plus simulation[J]. Biomass & Bioenergy, 2009, 33(9): 1158-1167.
- [14] 王龙飞, 兰勇, 解雪涛, 等. 基于 Aspen Plus 的超临界循环流化床锅炉特性分析[J]. 锅炉技术, 2018, 49(3): 27-32.
- WANG Longfei, LAN Yong, XIE Xuetao, et al. Exergy analysis of supercritical circulating fluidized bed boiler based on Aspen Plus [J]. Boiler Technology, 2018, 49(3): 27-32.
- [15] 欧阳子区, 朱建国, 矫维红, 等. 煤气化与燃烧生成烟气中含氮化合物的测试方法[J]. 计测技术, 2013, 33(3): 37-40.
- OUYANG Ziqu, ZHU Jianguo, JIAO Weihong et al. Analytical methods of nitrogen compounds in coal gasification and combustion generation of flue gas [J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(3): 37-40.
- [16] 苏利鹏, 杜谦, 王义德, 等. 二氧化硫在氯化钙盐吸法应用中的反应特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(11): 184-190.
- SU Lipeng, DU Qian, WANG Yide, et al. Reactive characteristics of sulfur dioxide in the application of calcium chloride absorption method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(11): 184-190.
- [17] 王世龙, 郑财. 利用速度场常数测量烟气平均流速方法的研究[J]. 环境污染与防治, 2004(10): 1-2.
- WANG Shilong, ZHENG Cai. Study on the method of measuring the average velocity of flue gas using velocity field constant [J]. Environmental Pollution and Control, 2004(10): 1-2.
- [18] 高庆亭, 沈振平, 李耀梅. S 型皮托管的特性试验[J]. 气象水文海洋仪器, 1998(4): 25-28.
- GAO Qingting, SHEN zhenping, LI Yaomei. Characteristic tests of S-type pitot tube [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 1998(4): 25-28.
- [19] 许绍良, 吕金福. 用型煤装置回收锅炉固体不完全燃烧损失 (q₄) 的效益分析[J]. 节能技术, 1997(1): 20-22.
- XU Shaoliang, LYU Jinfu. Benefit analysis of recovery of boiler solid incomplete combustion loss by briquette unit [J]. Energy Saving Technology, 1997(1): 20-22.
- [20] 中国特种设备检测研究院. 工业锅炉能效测试与评价规则: TSG G0003—2010[S]. 北京: 新华出版社, 2010.
- China Special Equipment Inspection and Research Institute. Energy Efficiency Test and Evaluation Regulation for Industrial Boiler: TSG G0003—2010 [S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2010.
- [21] 孙刚, 齐国利. 工业锅炉能效测试的炉渣和飞灰含碳量测定方法[J]. 节能技术, 2014(2): 155-157.
- SUN Gang, QI Guoli. Analysis methods on total carbon content of bottom ash and fly ash for industrial boiler energy efficiency test [J]. Energy Conservation Technology, 2014(2): 155-157.
- [22] LI X, GRACE J R, WATKINSON A P, et al. Equilibrium modeling of gasification: A free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier[J]. Fuel, 2001, 80(2): 195-207.
- [23] 宋志春. 兖州煤气化过程的数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- SONG Zhichun. Numerical simulation of yanzhou coal gasification process [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [24] 周强泰. 锅炉原理[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- ZHOU Qiangtai. Principles of boiler [M]. 3rd edition. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [25] 涂华, 罗隽飞, 刘淑云. 国家标准《煤炭质量分级》修订要点与解析[J]. 煤质技术, 2011(3): 17-19.
- TU Hua, LUO Yunfei, LIU Shuyun. Key points and analysis on revision of national standard "Classification of quality of coal" [J]. Coal Quality Technology, 2011(3): 17-19.
- [26] 王春昌. 切圆燃烧锅炉炉渣可燃物高的原因分析及解决措施[J]. 锅炉制造, 2009(5): 1-4.
- WANG Chunchang. Cause analysis and resolving measure of high slagging combustible matter in tangential firing boiler [J]. Boiler Manufacturing, 2009(5): 1-4.
- [27] 夏里扬. 锅炉热平衡测算结果误差分析[J]. 节能技术, 1991(6): 9-10.
- XIA Liyang. Error analysis of boiler heat balance calculation results [J]. Energy Saving Technology, 1991(6): 9-10.
- [28] YAN W, MA K, LI C. Economical effect of lignite coal drying on coal-fired electric power plant [J]. Electric Power, 2010, 43(3): 35-37.