

文章编号:1674-7607(2023)04-0452-09

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2023.04.009

生物质直燃式循环流化床锅炉燃烧 系统建模及预测研究

张开萍¹, 高明明¹, 龙江¹, 张洪福¹, 王亚柯², 岳光溪³

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;
2. 华能新能源股份有限公司, 北京 100036; 3. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084)

摘要: 为了分析生物质循环流化床锅炉的燃烧机理, 实现燃烧控制优化, 通过生物质燃料特性分析以及即燃碳燃烧理论的应用, 对炉内燃烧过程以及燃烧机理进行分析, 同时建立燃烧过程机理模型, 研究了炉内即燃碳动态变化过程, 实现对负荷、炉膛温度、一氧化碳排放以及烟气含氧量的预测。结果表明: 入炉燃料脱挥发分后形成的即燃碳的燃烧速度比挥发分慢, 给料的波动会直接影响炉内即燃碳存量; 作为给料波动时主要热量来源, 即燃碳燃烧所需氧量更少, 燃烧更充分, 此时烟气中的CO体积分数较低、含氧量较高; 炉膛温度、负荷、CO体积分数和烟气含氧量的预测值与实际值的变化趋势基本相同。

关键词: 生物质; 循环流化床; 即燃碳; 机理建模; 负荷预测; 烟气含氧量

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A **学科分类号:** 470.30

Modeling and Prediction of Biomass Direct Fired Circulating Fluidized Bed Boiler Combustion System

ZHANG Kaiping¹, GAO Mingming¹, LONG Jiang¹, ZHANG Hongfu¹,
WANG Yake², YUE Guangxi³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Huaneng Renewables Corporation Limited, Beijing 100036, China; 3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to analyze the internal combustion mechanism of the biomass circulating fluidized bed boiler and realize the optimization of combustion control, the combustion process and combustion mechanism in the furnace were analyzed through the analysis of the characteristics of biomass fuel and the application of the instantaneous carbon combustion theory, and the combustion process was established. The dynamic change process of carbon burning in the furnace was analyzed to realized the prediction of load, furnace temperature, carbon monoxide emission and flue gas oxygen content. Results show that the combustion rate of instant carbon formed after the fuel devolatilization is slower than that of volatile matter, and the fuel feeding fluctuation directly affects the instant carbon stock in the furnace. As the main source

收稿日期:2022-01-26 修订日期:2022-03-10

基金项目: 华能集团总部科技项目基础能源科技研究专项资助项目(二)(HNKJ21-H31); 山西省揭榜招标资助项目(20191101013); 中国华电集团有限公司重大科技项目计划资助项目(CHDKJ19-01-88)

作者简介: 张开萍(1998—), 男, 四川万源人, 硕士研究生, 主要研究方向为循环流化床燃烧发电技术。

高明明(通信作者), 男, 副教授, 工学博士, 电话(Tel.): 13466358881; E-mail: gmm1@ncepu.edu.cn.

of heat when the feed fluctuates, the oxygen required for instant carbon combustion is less and the combustion is more sufficient. At the same time, the CO volume fraction in the flue gas is lower and the oxygen content is higher. the predicted values of furnace temperature, furnace load, CO volume fraction and flue gas oxygen content are basically the same as the actual values.

Key words: biomass; circulating fluidized bed; instant burning carbon; mechanism modeling; load prediction; flue gas oxygen content

在“双碳”背景下,生物质发电技术引起了越来越广泛的关注,其具有零碳排、污染物排放低等优点,大力发展生物质发电,可进一步推进净碳排放量增长减缓直至降低的目标^[1]。生物质发电技术在我国已发展十余年,目前主流的都是小容量发电和热电联产机组。适用于生物质燃烧的锅炉有炉排炉和循环流化床(CFB)锅炉,CFB锅炉对于多种燃料都有较好的适应性,由于其炉内特殊的燃烧方式以及低温燃烧特性,使得污染物初始排放低、燃烧效率高^[2]。

对于CFB锅炉的研究,已有较好的理论基础和工程实践。清华大学的流态化理论和流态重构理论对于锅炉定态设计、燃烧调整、节能减排极具指导意义^[3-4];针对CFB锅炉炉内燃烧的动态研究,“即燃碳”理论的提出,对炉内燃烧机理分析作出了合理的解释,基于此理论的燃烧、污染物排放控制研究在实际工程中效果良好^[5-8]。国内外研究者对不同生物质燃料的着火、热解、燃烧、燃尽、积灰、腐蚀和污染物排放等特性进行了相关研究^[9-11]。生物质燃料的挥发分较高,在炉内高温环境下快速热解并燃烧;固定碳的燃烧类似于“缩核模型”^[12],其燃烧速度与温度、氧量、灰分空隙率有关;农林生物质燃料的污染物排放中以氮氧化物为主,硫氧化物由于本身含量少排放较低;碱金属(Na、K)以及碱土金属(Mg、Ca)含量高,导致受热面高温腐蚀,以及与硅酸盐形成化合物导致结焦较为严重^[13]。李定凯教授最早提出生物质循环流化床锅炉(BCFBB)数学模型构建方法^[14],将炉内总模型分为九大子系统模型,并分别对各子系统模型进行研究。陈炳基^[15]对BCFBB燃烧系统进行建模,由于其非线性、大滞后、强耦合、难以实现自动控制等问题,提出了基于解耦补偿器的模糊控制策略,并实现了快速稳定的控制效果。

整体来看,关于BCFBB燃烧系统建模的研究不多,主要偏向于燃料热解、燃烧和运行过程的优化、污染物和受热面积灰腐蚀的探讨、锅炉设计以及改造等。BCFBB燃烧系统建模不同于燃煤CFB锅

炉,需要考虑燃料成分的不同,以及燃烧过程差异,同时在实际运行中受到给料系统不稳定、燃料含水量不确定等影响^[16],发电负荷在小范围内波动,不利于并网发电。解决这一问题的根本是燃烧机理的深入研究,对BCFBB炉内燃烧过程建模有助于燃烧控制优化以及设计出基于燃烧机理的控制策略。

笔者针对生物质燃烧系统建模的缺失,从生物质燃料特性出发,对燃料热值、燃烧过程和燃烧机理等进行分析,基于即燃碳理论对生物质的燃烧过程进行建模,提出了发电负荷、炉膛温度、CO浓度等的预测模型,根据生物质燃料特性建立了CO燃烧机理模型,并对模型预测结果和影响因素进行探讨分析。最后利用某130 t/h生物质直燃式CFB锅炉的运行数据进行仿真,分析炉内各部分机理特性,验证所提出的燃烧理论的正确性。

1 燃烧系统分析

1.1 燃烧机理分析

基于对燃煤CFB燃烧过程以及燃烧机理的分析,煤炭颗粒在加入到炉膛后,挥发分优先析出并燃烧,而剩余部分即为固定碳,燃烧较为缓慢,其在炉膛内部保持有一定的存量,这部分即为即燃碳,其燃烧放热是锅炉热负荷的主要来源。即燃碳的燃烧速度与其总量、氧含量、燃烧温度以及即燃碳的平均粒径等有关,作为炉内间接储存的热量,变相来看即燃碳的存量是蓄热的另一种形式。炉膛温度的变化会对锅炉燃烧效率、燃烧速度和污染物排放产生较大影响,燃煤CFB内部有大量床料,其中即燃碳占比约为3%~5%,CFB炉内燃烧可视为即燃碳动态燃烧过程^[17]。

相比于煤炭燃料,生物质燃料的固定碳含量少、密度和硬度低、更容易破碎。但考虑到一、二次风的分布和挥发分燃烧温度的影响,优先燃烧的仍是挥发分,其中的固定碳燃烧较滞后^[18]。煤炭与生物质同为组分类别相同的碳基燃料,固定碳的积累消耗也可视为即燃碳的动态变化过程,但占比更大的挥发分的燃烧促进了即燃碳的积累,两者燃烧呈竞争

关系,由于挥发分占比较大,并且燃烧更快、更容易,在竞争过程中,挥发分燃烧速度要优于即燃碳,其炉内燃烧过程及原理如图 1 所示。

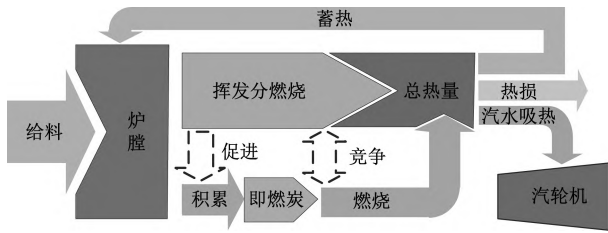


图 1 生物质锅炉燃烧示意图
Fig. 1 Schematic diagram of biomass boiler combustion

1.2 燃烧特性分析

为保持生物质 CFB 锅炉炉内的稳定流化状态,其内部存在大量的高温惰性床料和一定量的即燃碳,短时间内能量不平衡导致的温度变化可由大量高温床料消纳,给料不稳定导致发热量过低可由炉内积累的即燃碳燃烧补充。因此,可将其视为由 2 个响应时间不同的热源构成的蓄热体。

生物质燃料中,快速燃烧的挥发分热值占比较大,固定碳占比较小,分别体现了燃烧的快速性和炉内的蓄热特性。因此,其燃烧特性的分析结合了煤粉炉的燃烧快速性和 CFB 锅炉的蓄热特性。

生物质燃烧过程中,需要经历水分析出、挥发分析出、挥发分燃烧和固定碳燃烧 4 个过程。考虑生物质燃料挥发分与固定碳的竞争燃烧特性,且挥发分燃烧发热量占比较大,燃烧过程存在明显次序,当给料充足时,以挥发分为主,当给料较少时,即燃碳燃烧为炉内提供主要放热量,因此有必要对挥发分和即燃碳的燃烧进行细分。

生物质直燃式 CFB 锅炉由于燃料能量密度较低,机组容量较小^[19],因此其发电负荷不会大幅度变化,仅在一定范围内波动。由于给料系统的波动会引起燃烧发热量波动,从而影响汽包水位和压力,为保证汽包在安全水位限值内,需对给水流量进行控制,因此实际运行过程中锅炉的发电负荷与炉膛温度的变化较为频繁。

1.3 燃料热值分析

燃料热值和给料量是锅炉热负荷的决定因素,生物质燃料热值本身受到燃料组分的影响。灰分和水分的占比较高会使热值降低,其中水分对于燃烧的低位发热量影响更大,燃料含水量可以实现在线测量^[20],因此其测量信号可作为燃料热值修正,实现对炉内发热量的校正。根据前人对于多种秸秆类燃料的研究^[21],其热值 Q_{net} (MJ/kg) 可按下式计算:

$$Q_{net} = 6.22 - 5.38w(M_{ar}) + 11.68w(V_{ar}) - 8.42w(A_{ar}) + 10.89w(FC_{ar}) \quad (1)$$

式中: $w(M_{ar})$ 、 $w(V_{ar})$ 、 $w(A_{ar})$ 、 $w(FC_{ar})$ 分别表示水分、挥发分、灰分、固定碳质量分数, %。

将生物质燃料的燃烧过程简化为两部分:第一部分,燃料中水分析出、挥发分完全析出并燃烧,燃烧热值为 $Q_{net,v}$ (MJ/kg); 第二部分即燃碳燃烧阶段,燃烧热值为 $Q_{net,c}$ (MJ/kg)。将总燃烧热值减去固定碳燃烧热值即为第一部分燃烧热值,计算式如下:

$$Q_{net,v} = 6.22 - 5.38w(M_{ar}) + 11.68w(V_{ar}) - 8.42w(A_{ar}) - 17.23w(FC_{ar}) \quad (2)$$

2 炉内燃烧建模

2.1 给料系统模型

由于未经过加工的生物质本身密度低且燃料大小不均匀,难以对锅炉给料量进行实时测量,因此需对给料量进行估算。锅炉给料采用多台螺旋给料机的方式给料,螺旋给料机的输送量受到电流频率的影响^[22]。其给料特性表达式如下:

$$Q_m = A_L V_L \rho_L \quad (3)$$

$$V_L = P_L N_L \quad (4)$$

$$N_L = K_L f_L \quad (5)$$

式中: Q_m 为螺旋给料机给料量, kg/min; A_L 为物料截面积, m^2 ; ρ_L 为物料密度, kg/m^3 ; P_L 为螺旋叶片螺距, m; N_L 为螺旋轴转速, r/min; f_L 为给料机运行频率, Hz; K_L 为给料系数。

根据上述分析,既定的螺旋给料机输送量与电流频率呈正相关。所研究的机组采用 4 台螺旋给料机进行给料,总给料量 $F_b(t)$ (kg/min) 为:

$$F_b(t) = \sum Q_{m,i} \quad (6)$$

式中 $Q_{m,i}$ 为第 i 台螺旋给料机给料量, kg/min; t 为时间, min; $i = 1, 2, 3, 4$ 。

2.2 炉内即燃碳燃烧模型

根据生物质燃烧特性,入炉燃料水分和挥发分快速析出并燃烧,剩余固定碳燃烧较为缓慢,其燃烧速度 $R_C(t)$ 受到炉膛温度、氧浓度、即燃碳总量的影响,具体计算式如下:

$$R_C(t) = K_2 \varphi_{O_2}(t) M_C(t) T \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

式中: K_2 为燃烧系数; E_a 为固定碳燃烧活化能, kJ/mol; R 为气体常数, kJ/(mol · K); φ_{O_2} 为氧体积分率; $M_C(t)$ 为即燃碳量, kg; T 为炉膛温度, K。

炉膛内部储存有一定量的即燃碳,新给入燃料补充即燃碳的同时燃烧消耗,即燃碳量平衡公式

如下:

$$\frac{dM_c}{dt} = F_b(t)\omega(FC_{ar}) - R_c(t) \quad (8)$$

文献[17]的即燃碳燃烧模型中,氧浓度与总送风量线性相关,但由于生物质燃料挥发分含量较高,其完全燃烧所需的氧量与即燃碳燃烧所需的氧量之比约为 7:3,因此即燃碳燃烧时的氧浓度受挥发分的影响较大。若给料系统在短时间内给料中断,挥发分燃烧耗氧下降,此时可供即燃碳燃烧的氧量较高,炉内即燃碳的燃烧速度会明显增大。因此,根据燃料的元素分析得到耗氧占比系数,从而对炉内氧浓度进行修正。氧浓度的修正计算如下:

$$\varphi_{O_2}(t) = (1 - F_b(t)K_5)K_6F_f(t) \quad (9)$$

式中: K_5 、 K_6 为氧量修正系数; $F_f(t)$ 为总风量, m^3/min 。

2.3 炉内能量模型

炉膛的热量主要来源于挥发分燃烧产生和即燃碳燃烧产生。这两部分热量的来源不一样,挥发分直接与给料相关,其释放和燃烧认为是比较短暂的过程,挥发分燃烧释放热量与给料量呈比例关系;而燃烧的即燃碳则是来自炉内储存的即燃碳,因此在建模时燃烧不考虑给料的影响,燃料量只是影响炉内的即燃碳存量。不考虑壁面热损失,炉内热量流向主要是汽水吸热、排渣和烟气,炉内的蓄热量主要在床料中,蓄热量大小直接决定了炉膛温度。综上所述,入炉生物质燃料挥发分燃烧放热量 $Q_1(t)$ (MJ/min) 为:

$$Q_1(t) = F_b(t)Q_{net,v} \quad (10)$$

炉内即燃碳燃烧放热量 $Q_2(t)$ (MJ/min) 为:

$$Q_2(t) = R_c(t)Q_{net,c} \quad (11)$$

炉内能量平衡方程如下:

$$\frac{dT}{dt}K_3 = Q_1(t) + Q_2(t) - Q_3(t) - q(t) \quad (12)$$

式中: K_3 为炉内床料及烟气总蓄热系数, $MJ/^\circ C$; $Q_3(t)$ 为烟气损失热量和排渣损失热量, MJ/min ; $q(t)$ 为汽水吸热量, MJ/min 。

由于汽水参数基本稳定,炉膛温度根据能量平衡发生变化,炉膛温度决定了汽水总吸热量。汽包水位和压力表征了蒸汽焓值,但给水流量的变化使得汽包水位基本维持稳定,不考虑锅炉蓄热的影响,汽水总吸热量决定了进入汽轮机的总能量,最终决定了机组出力,因此发电负荷可由炉膛温度拟合得到:

$$P_{pre} = f_1(T) \quad (13)$$

其中, P_{pre} 为发电负荷预测值。 f_1 由炉膛温度与实

际发电负荷简单线性拟合得到,此时的发电负荷仅由燃烧热负荷决定,考虑了发电负荷变化规律以及变化速率,不考虑锅炉蓄热特性对发电负荷的影响。

2.4 燃烧产物浓度计算

图 2 给出了生物质燃烧过程中各元素的转换流程,其中燃烧初始物为 C、H、O、N、S 和灰分构成的混合物,燃烧中间产物 CO,燃烧终产物为 CO_2 、 H_2O 、 NO_x 、 SO_2 以及未完全燃烧的 CO 等。

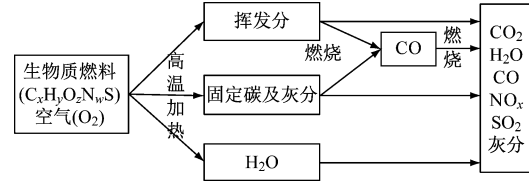
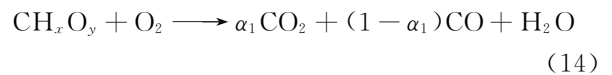


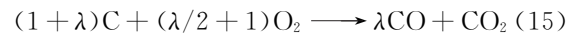
图 2 燃料元素转换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fuel element conversion

挥发分主要元素包括 C、H、O,假设炉内的挥发分燃烧生成的 CO 与挥发分比例,其燃烧过程^[23]简化如下,其中 α_1 通过文献[24]的计算方法确定。



固定碳的燃烧机理为:



式中: λ 为燃烧转换系数,表示 CO 与 CO_2 生成速度的比值。

CO 与 CO_2 生成速度的比值 $r(CO)/r(CO_2)$ 与炉膛温度有关,具体计算式^[25]如下:

$$\lambda = \frac{2[1 + 4.3 \exp(-3390/T)]}{2 + 4.3 \exp(-3390/T)} \quad (16)$$

燃烧最终产物中的 H_2O 来源于燃料中的水分以及挥发分中 H 元素氧化的最终产物。考虑即燃碳燃烧和挥发分燃烧的不同,不考虑未完全燃烧的部分,则 CO_2 来源于挥发分中的 C 元素和炉内即燃碳燃烧。 CO 生成量来源于炉内挥发分和即燃碳燃烧生成以及 CO 氧化减少的部分;对于烟气中的 N_2 ,不考虑其在炉内任何氧化还原过程。主要物质的生成量计算式如下:

$$n_{H_2O} = \frac{\omega(H_{ar})}{2} F_b(t) \times 10^6 \quad (17)$$

$$n_{CO_2} = \left[\frac{(\omega(C_{ar}) - \omega(FC_{ar}))}{12} (1 - \alpha_1) F_b(t) + \frac{1}{1 + \lambda} \frac{R_c(t)}{12} \right] \times 10^6 \quad (18)$$

$$n_{CO} = \frac{\lambda}{1 + \lambda} \frac{R_c(t)}{12} \times 10^6 + \alpha_1 \frac{(\omega(C_{ar}) - \omega(FC_{ar})) F_b(t)}{12} \times 10^6 \quad (19)$$

$$n_{O_2} = \frac{F_f(t) \times 10^3}{22.4} \times 21\% - \frac{\omega(H_{ar})}{4} F_b(t) \times 10^6 - n_{CO_2} - 0.5n_{CO} + \frac{\omega(O_{ar})}{32} F_b(t) \times 10^6 \quad (20)$$

$$n_{N_2} = \frac{F_f(t) \times 10^3}{22.4} \times 79\% \quad (21)$$

$$\varphi_i = \frac{n_i}{\sum n_j} \quad (22)$$

式中： $w(C_{ar})$ 、 $w(H_{ar})$ 、 $w(O_{ar})$ 分别为燃料中 C、H、O 的质量分数； φ_i 为物质 i 的体积分数； n_i 、 n_j 为烟气中各生成物的物质的量；下标 i 、 j 表示 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 N_2 或 O_2 。

2.5 一氧化碳浓度预测模型

根据上述对炉内各组分燃烧过程的分析，认为产生 CO 的主要来源是固定碳和挥发分未完全燃烧产生的。同时 CO 生成后，在炉膛上部、水平烟道以及分离器内继续燃烧，这部分 CO 燃烧速度与烟气中 CO 、 O_2 含量相关。CO 生成速度已知，其燃烧速度 R_{CO} 由经验式^[26] 可得：

$$R_{CO} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(\frac{p}{RT}\right)^{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3} n_{CO}^{\varphi_1} n_{H_2O}^{\varphi_2} n_{O_2}^{\varphi_3} \quad (23)$$

式中： k_0 为适用于循环流化床的 CO 燃烧系数； φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别为 CO 、 H_2O 、 O_2 体积系数； p 为大气压。

计算得到炉膛出口 CO 体积分数 $Y_{CO,out}$ ，其计算式如下：

$$Y_{CO,out}(t) = \frac{n_{CO} - R_{CO}}{\sum n_j} \quad (24)$$

3 模型仿真

3.1 机组介绍

以某 130 t/h 超高压带再热 CFB 锅炉为研究对象，锅炉结构如图 3 所示。采用单炉膛燃烧室，尾部烟道为两段式(高温下行烟道和低温上行烟道)，采用双旋风分离器，两级给料系统，布置 4 组螺旋给料系统。

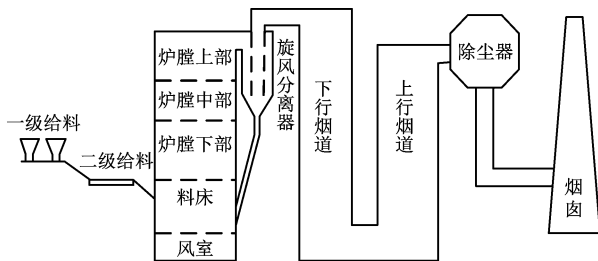


图 3 130 t/h 生物质锅炉结构图

Fig. 3 Structural diagram of the 130 t/h biomass boiler

入炉燃料采用水分较高的生物质，其低位热值为 8 278 kJ/kg，额定入炉燃料量为 50 t/h，入炉燃料粒径 < 100 mm。其中燃料中 N、S 元素质量分数较低，分别为 0.87% 和 0.08%，具体参数见表 1。

表 1 入炉燃料元素分析和工业分析

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of the fuel entering the furnace

参数	数值	参数	数值
$w(A_{ar})$	15.20	$w(C_{ar})$	24.73
$w(M_{ar})$	37.00	$w(H_{ar})$	2.89
$w(V_{ar})$	39.77	$w(O_{ar})$	19.23
$w(FC_{ar})$	8.03	$w(N_{ar})$	0.87
		$w(S_{ar})$	0.08

3.2 即燃碳、炉膛温度及发电负荷预测

根据式(1)~式(24)，采用 Simulink 搭建仿真模型，输入历史数据，得到炉内即燃碳监测值，以及炉膛温度、发电负荷、CO 和烟气含氧量的预测值。

即燃碳作为监测锅炉燃烧状况的重要参数，其动态变化过程和存量与给料量存在明显的因果关系，如图 4 所示。由图 4 可知，当给料量增大时，即燃碳开始积累，总量逐渐增大，给料量减少时，即燃碳燃烧加剧，即燃碳总量减少，若经过一段时间仍未有给料补充，由于即燃碳存量较低，其燃烧速度将下降。即燃碳的动态变化过程主要受给料量影响，并且与给料量的变化存在一定延迟。

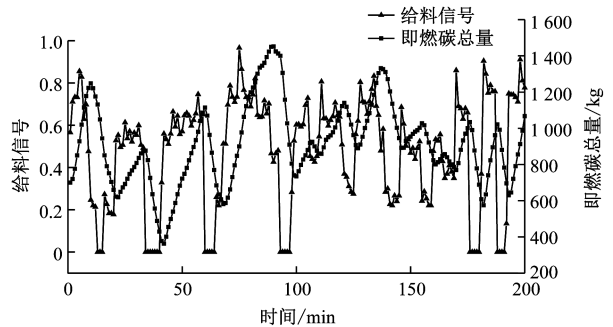


图 4 即燃碳动态响应

Fig. 4 Instantaneous carbon dynamic response

炉膛温度作为 CFB 锅炉一个重要的控制参数，以生物质作为燃料时，其入炉燃料热值和燃料量波动较大，尽管炉内有大量的床料，炉膛温度还是波动较大，因此在预测炉膛温度时误差较大。如图 5 所示，所建立的模型温度的最大相对误差为 6.84%，平均相对误差为 1.84%。温度整体的变化趋势较为相似；以一段时间内的平均温度(该点前后 4 min 内的温度平均值)作为炉膛实际温度的变化趋势(图中实线)，即削弱了短时间内燃料波动对炉膛温度的影响，使其与预测值更加吻合。

发电负荷的预测结果如图 6 所示。可以看出实际值和预测值的最大相对误差为 16.19%，平均相对误差为 5.20%，变化趋势与实际情况基本一致，

预测值能够反映实际值的变化。即本模型的计算锅炉热负荷(通过炉膛温度来表征)可以较好地反映炉膛内部温度以及发热量的变化趋势,证明炉膛温度的实际值可以作为锅炉发热量信号。由上述炉膛温度与发电负荷的预测结果可知,温度预测值比发电负荷预测值更接近相应的实际值。基于炉膛热平衡的发电负荷预测模型,所提出的用炉膛温度表征的锅炉热负荷模型是准确的,并且发电负荷预测值与实际值的变化趋势基本一致。

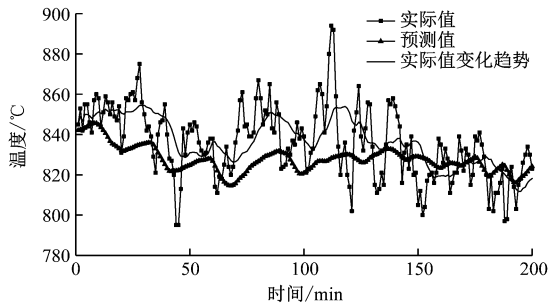


图5 温度预测结果

Fig. 5 Prediction results of temperature

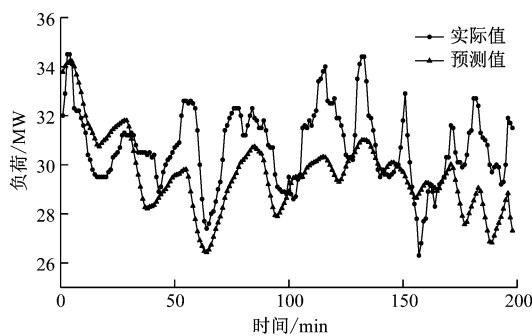


图6 发电负荷预测结果

Fig. 6 Prediction results of load

根据上述预测模型得到的温度、发电负荷预测值在某些时刻与实际值存在较大误差,实际变化情况迅速且幅度较大,预测值更能够反映实际值在一段时间内的平均值。原因主要是燃料尺寸较大并且大小分布不均,使得给料系统进料不均匀,尽管给料机的出力相同,也无法达到相对应的进料量,这也是给料系统进料不稳定的主要原因。其次,燃料含水量和密度不一,即同一时刻进入炉内的燃料的热值和燃烧速度也会不同,因此炉内燃烧在空间上存在不一致以及短时间内的不确定性,从而导致炉内燃烧不稳定,炉膛温度就会发生快速、大幅度的波动。

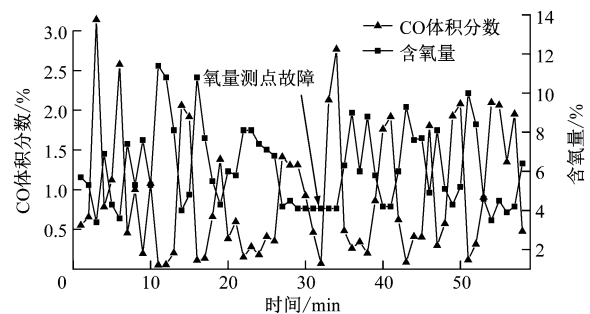
发电负荷的变化与炉膛温度相关联,炉膛温度变化相较于发电负荷实际变化更加频繁,炉膛温度大小可以表征锅炉热负荷,因此锅炉蓄热对热负荷的波动存在一定的吸纳、缓冲作用。

燃煤CFB锅炉中,基于煤炭燃烧和给煤均匀的特性,且煤中挥发分含量较低,所使用的即燃碳燃烧模型中炉内氧浓度与总风量线性相关。但是生物质燃料的挥发分含量较高,在给料波动时2种燃烧需氧量存在明显差异,当中断给料时,即燃碳燃烧速度明显提高,炉内氧浓度明显增大,因此需对炉内氧浓度进行修正,使得模型预测精度提高,平均相对误差均减少,约为0.3%~0.8%,从而更准确地反应炉内燃烧的真实情况。

3.3 一氧化碳及烟气含氧量排放预测

锅炉燃烧效率主要通过飞灰含碳量与烟气CO体积分数来体现。其中飞灰含碳量的测量较为滞后,很难应用于实时控制系统中,而CO的实际排放也取决于燃料是否充分燃烧,当CO体积分数越大,燃烧越不充分,燃料未完全燃烧损失越大,因此将CO体积分数作为监测锅炉燃烧效率的主要参数。

本文机组的CO测点位于下行烟道上端,与CO体积分数联系密切的测量烟气含氧量的烟气在线监测系统(CEMS)测点位于烟道尾部出口位置,两者之间存在一定的烟气流程。在对数据进行横轴方向上移动相应时间后,CO体积分数与O₂体积分数的变化趋势完全相反,如图7所示。当烟气含氧量较高时,炉内处于富氧燃烧状态,此时CO继续氧化的反应速度更大,即炉内的过量空气系数决定了CO燃尽程度,同时短时间的过量空气系数波动会使CO体积分数产生变化,这也说明生物质燃料在燃烧过程中,风燃比(送风量与燃料量的比值)的实时控制受到本身给料不稳定和炉内燃烧不稳定的影响,难以达到高效的燃烧。因此,在改进控制策略时,可加入或者增大烟气含氧量和CO软测量浓度的修正作用。

图7 CO和O₂体积分数的变化Fig. 7 Changes of CO and O₂ concentration

从图8和图9可以看出,CO体积分数、烟气含氧量的预测值与实际值的变化趋势基本接近,证明上述燃烧机理的正确性,给料量大幅度波动周期较长,这对于CO体积分数和烟气含氧量有较大影

响。这种大幅度波动的主要原因是总风量的变化以及燃烧不稳定对于炉内氧化还原环境的明显影响,过量空气系数突增促进了 CO 的进一步燃烧,使得 CO 体积分数大幅度降低,同时烟气含氧量增加。此外,给料不均匀以及炉内燃烧不稳定的情况下,燃烧实际所需含氧量在大幅度变化,总风量不能快速满足实际需求,就会导致过量空气系数的快速变化,进而产生 CO 体积分数的大幅度波动。同理,烟气含氧量也随之变化。

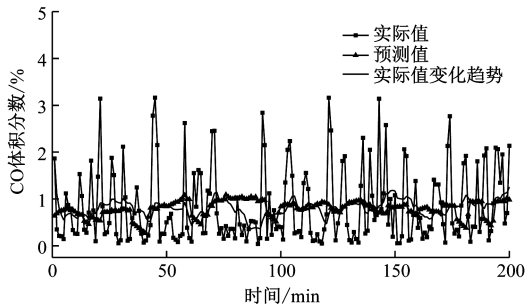


图 8 CO 体积分数预测结果

Fig. 8 Prediction results of CO volume fraction

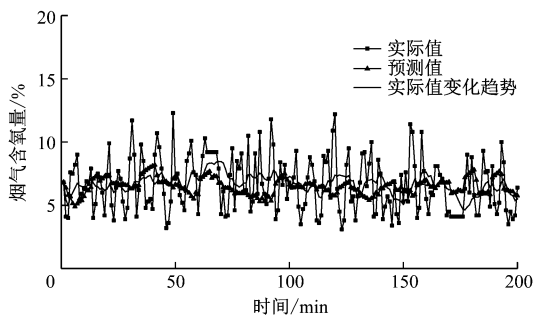


图 9 烟气含氧量预测结果

Fig. 9 Prediction of oxygen content in flue gas

通过上述燃烧模型的预测值仅能反映一段时间内的平均值,而建模时认为给料和燃烧是相对稳定的,因此模型预测值是相对平滑的,其仅与实际值的变化趋势吻合,与实际值大小存在一定差距,不能反应短时间内的大幅度波动。但是预测结果仍然具有利用价值,可以对当前炉内实际风燃比进行判断并作出调整。

对比图 6 和图 8 可知,在 30 min、50 min 和 75 min 左右时给料充足,挥发分燃烧占比较大,炉膛温度较高,炉内整体呈现过量空气系数较低的状况,燃烧生成的 CO 更多,CO 继续氧化速度降低,即 CO 体积分数更高,即印证了 CO 生成与继续燃烧机理模型的正确性。与此反应机理不同的是,燃煤 CFB 锅炉不考虑挥发分生成的 CO,CO 仅由即燃碳燃烧产生,所以给煤量增大对 CO 的生成并不会太大影响,送风量以及一、二次风的分配会对燃煤 CFB

锅炉产生更显著的影响。而 BCFBB 则是在给料较多的情况下,CO 体积分数会有明显增加。

4 结 论

(1) 燃烧过程中挥发分燃烧和即燃碳燃烧存在明显的先后次序,炉内即燃碳是一个动态累积的过程,当给料波动时,炉内即燃碳燃烧提供所需热量,此时的 CO 生成量明显低于挥发分燃烧为主的燃烧阶段,燃烧耗氧量更低。炉内即燃碳的动态变化过程与给料波动存在明显的关联,给料波动后,即燃碳快速燃烧以补充热负荷,即燃碳存量随之减少,但其也有一定限度,表现为发电负荷在给料中断后快速下降。

(2) 所建立模型的温度、发电负荷预测结果的相对平均误差分别为 1.84% 和 5.20%,温度较好地反映了实际温度,而用炉膛温度表征的热负荷可以较好地反映发电负荷预测值的变化,能够实现提前预测的效果,可作为控制信号对汽包水位、主蒸汽压力等进行预测控制。

(3) CO 主要由挥发分和即燃碳未完全燃烧产生,生成的 CO 继续燃烧,其速度与炉膛上部烟气含氧量密切相关。CO 体积分数在一段时间内的变化趋势与锅炉给料量有关,挥发分燃烧时所需氧量增加,导致 CO 未充分燃烧,其体积分数增加,CO 体积分数短时间内大幅度波动的原因是燃烧不稳定和过量空气的影响,同时导致烟气含氧量偏高。在实际控制系统中,可引入 CO 软测量浓度或烟气含氧量作为风量控制修正信号,以降低给料不稳定造成的实际风燃比偏差。

参考文献:

- [1] 胡南,谭雪梅,刘世杰,等. 循环流化床生物质直燃发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 32-40.
HU Nan, TAN Xuemei, LIU Shijie, et al. Research progress on power generation of biomass direct combustion in circulating fluidized bed[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(3): 32-40.
- [2] 岳光溪,吕俊复,徐鹏,等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 1-13.
YUE Guangxi, LÜ Junfu, XU Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology[J]. *Electric Power*, 2016, 49(1): 1-13.
- [3] 姚禹歌,黄中,张缦,等. 中国循环流化床燃烧技术的发展与展望[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 13-19.

- YAO Yuge, HUANG Zhong, ZHANG Man, et al. Development and prospect of circulating fluidized bed combustion technology in China[J]. **Thermal Power Generation**, 2021, 50(11): 13-19.
- [4] 谭雪梅,刘世杰,赵冰,等. 循环流化床锅炉气固两相流换热研究进展[J]. **华电技术**, 2021, 43(10): 61-67.
- TAN Xuemei, LIU Shijie, ZHAO Bing, et al. Research on heat transfer of gas-solid two-phase flow in CFB boilers[J]. **Huadian Technology**, 2021, 43(10): 61-67.
- [5] 高明明,刘伟,严国栋,等. 循环流化床锅炉床温动态模型[J]. **热力发电**, 2018, 47(3): 45-50.
- GAO Mingming, LIU Wei, YAN Guodong, et al. Dynamic model of bed temperature for circulating fluidized bed boilers [J]. **Thermal Power Generation**, 2018, 47(3): 45-50.
- [6] 高明明,洪烽,牟犇,等. 循环流化床机组大气污染物排放运行优化研究[J]. **中国电机工程学报**, 2018, 38(10): 3033-3041.
- GAO Mingming, HONG Feng, MOU Ben, et al. Study on the operation optimization of air pollutant emission in circulating fluidized bed units[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2018, 38(10): 3033-3041.
- [7] 常太华,张琦,高明明. 循环流化床锅炉燃烧系统床温优化控制[J]. **自动化技术与应用**, 2017, 36(6): 22-25.
- CHANG Taihua, ZHANG Qi, GAO Mingming. Optimal control in circulating fluidized bed combustion systems[J]. **Techniques of Automation and Applications**, 2017, 36(6): 22-25.
- [8] 高明明,岳光溪,雷秀坚,等. 超临界CFB锅炉主蒸汽压力控制系统研究[J]. **动力工程学报**, 2015, 35(8): 625-631.
- GAO Mingming, YUE Guangxi, LEI Xiujian, et al. Research on main steam pressure control of supercritical CFB boilers [J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2015, 35(8): 625-631.
- [9] LIU Xiaorui, YANG Xudong, XIE Guilin, et al. NO emission characteristic during fluidized combustion of biomass with limestone addition[J]. **Fuel**, 2021, 291: 120264.
- [10] 刘强. 循环流化床生物质直燃锅炉运行问题与设计优化[J]. **工业锅炉**, 2019(6): 19-22.
- LIU Qiang. Application status and optimal design of biomass direct-fired CFB boiler[J]. **Industrial Boilers**, 2019(6): 19-22.
- [11] 赵小军,孙锦余,薛东发,等. 混合生物质燃料循环流化床锅炉受热面结焦机理研究[J]. **洁净煤技术**, 2021, 27(4): 117-122.
- ZHAO Xiaojun, SUN Jinyu, XUE Dongfa, et al. Study on slagging mechanism of multiple biomass co-combustion on heating surface in a circulating fluidized bed boiler[J]. **Clean Coal Technology**, 2021, 27(4): 117-122.
- [12] SIDDIQUI H, GUPTA A, MAHAJANI S M. Non-equimolar transient grain model for CO₂-gasification of single biomass char pellet [J]. **Fuel**, 2021, 293: 120389.
- [13] 范浩东,单雄飞,张纆,等. 生物质流化床结渣、沾污特性及抑制方法研究进展[J]. **洁净煤技术**, 2020, 26(增刊1): 1-6.
- FAN Haodong, SHAN Xiongfei, ZHANG MAN, et al. Research progress on slagging, fouling characteristics and its prevention method of biomass fluidized bed[J]. **Clean Coal Technology**, 2020, 26(Sup 1): 1-6.
- [14] 王智微,李定凯,唐松涛,等. 生物质燃料循环流化床锅炉的模型化设计[J]. **能源研究与信息**, 2002, 18(1): 21-29.
- WANG Zhiwei, LI Dingkai, TANG Songtao, et al. Modeling approach for the biomass-fuelled circulating fluidized bed boiler[J]. **Energy Research and Information**, 2002, 18(1): 21-29.
- [15] 陈炳基. 生物质循环流化床锅炉燃烧过程建模与优化控制[D]. 长沙:长沙理工大学, 2018.
- [16] 张建春,顾君苹,张纆,等. 纯燃生物质循环流化床锅炉设计与运行[J]. **锅炉技术**, 2018, 49(1): 28-32, 64.
- ZHANG Jianchun, GU Junping, ZHANG Man, et al. The design and operation of a pure biomass-fired circulating fluidized bed boiler[J]. **Boiler Technology**, 2018, 49(1): 28-32, 64.
- [17] 牟犇,高明明,洪烽,等. 循环流化床锅炉机组变负荷过程能量变迁研究[J]. **动力工程学报**, 2017, 37(12): 945-949.
- MOU Ben, GAO Mingming, HONG Feng, et al. Research on energy conversion of a CFD boiler unit during load change process[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2017, 37(12): 945-949.
- [18] 张开萍,张洪福,高明明,等. 生物质循环流化床发电技术研究进展[J]. **华电技术**, 2021, 43(10): 43-49.
- ZHANG Kaiping, ZHANG Hongfu, GAO Mingming, et al. Research progress on biomass power generation in CFB boilers[J]. **Huadian Technology**, 2021, 43(10): 43-49.
- [19] 包绍麟,杨召,刘丰怀,等. 130 t/h超高压带再热生

- 物质直燃 CFB 锅炉设计与运行[J]. *工业锅炉*, 2021(6): 24-26.
- BAO Shaolin, YANG Zhao, LIU Fenghuai, et al. Design and operation on 130 t/h CFB boiler with ultra-high pressure, reheat and biomass direct combustion[J]. *Industrial Boiler*, 2021(6): 24-26.
- [20] 李云龙, 燕德国, 邓永强, 等. 基于螺旋式电容传感器的生物质含水量测量[J]. *可再生能源*, 2020, 38(5): 585-590.
- LI Yunlong, YAN Deguo, DENG Yongqiang, et al. Measurement of biomass moisture content based on helical capacitance sensor[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(5): 585-590.
- [21] 王晓东, 朱雁军, 刘长瑞, 等. 基于工业分析的生物质低位热值和理论空气量快速预测[J]. *电站系统工程*, 2021, 37(4): 54-56.
- WANG Xiaodong, ZHU Yanjun, LIU Changrui, et al. Rapid prediction of biomass low calorific value and theoretical air volume based on proximate analysis[J]. *Power System Engineering*, 2021, 37(4): 54-56.
- [22] 闫桂焕, 许敏, 孙荣峰. 生物质螺旋给料机的设计[J]. *可再生能源*, 2007, 25(1): 73-74, 76.
- YAN Guihuan, XU Min, SUN Rongfeng. Design of a screw feeder for biomass[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(1): 73-74, 76.
- [23] WU Ying, LIU Daoyin, MA Jiliang, et al. Effects of gas-solid drag model on Eulerian-Eulerian CFD simulation of coal combustion in a circulating fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 2018, 324: 48-61.
- [24] MERRICK D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal: 1. The evolution of volatile matter[J]. *Fuel*, 1983, 62(5): 534-539.
- [25] XU Yao, ZHAI Ming, JIN Shuai, et al. Numerical simulation of high-temperature fusion combustion characteristics for a single biomass particle[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 183: 27-34.
- [26] 高明明, 于浩洋, 吕俊复, 等. 循环流化床氮氧化物排放预测模型及优化控制研究[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(3): 46-51.
- GAO Mingming, YU Haoyang, LYU Junfu, et al. Study on prediction model and optimal control of nitrogen oxides emission of circulating fluidized bed[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(3): 46-51.