

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305097

# 烟气再循环对大型循环流化床锅炉低负荷运行特性的影响研究

元泽民<sup>1,2</sup>, 柯希玮<sup>1</sup>, 黄中<sup>1</sup>, 杨云凯<sup>3</sup>, 武广剑<sup>3</sup>, 刘青<sup>1</sup>,  
马素霞<sup>2</sup>, 程亮<sup>4</sup>, 赵振宁<sup>4</sup>

(1.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;  
2.太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;  
3.晋能大土河热电有限公司, 山西 吕梁 033000;  
4.国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100054)

**[摘要]** 烟气再循环 (flue gas recirculation, FGR) 是提高循环流化床 (circulating fluidized bed, CFB) 锅炉低负荷运行安全性、减少  $\text{NO}_x$  原始生成的重要手段。以某电厂超临界 350 MW CFB 锅炉为研究对象, 采用一维小室 CFB 燃烧准静态数学模型研究了该锅炉在 20%、30%、40% BMCR (最大连续负荷) 下炉内温度分布, 炉膛出口烟气  $\text{NO}_x$ 、CO 质量浓度,  $\text{O}_2$  体积分数, 飞灰底渣可燃物含量等性能指标与 FGR 流量之间的关系。结果表明: 床层温度、炉膛出口温度均随 FGR 流量的增加而降低, 床层温度相对炉膛出口温度降低幅度较大, 炉膛上下温差随 FGR 流量的增加逐渐缩小, 较低负荷时炉膛上下温差受 FGR 影响更为显著; 炉膛出口烟气  $\text{NO}_x$  质量浓度随 FGR 流量的增加呈现先降低再升高的趋势, 存在最优 FGR 流量可使机组经济环保运行; 随 FGR 流量的增加, 炉膛出口烟气 CO 质量浓度、飞灰及底渣可燃物含量均呈现增加趋势; FGR 的投入在显著降低一次风氧含量同时, 保证密相区流化风量始终高于保护值, 进一步保障了低负荷下锅炉运行安全性。

**[关键词]** 循环流化床锅炉; 低负荷; 烟气再循环; 一维小室 CFB 燃烧模型; 锅炉运行特性

**[引用本文格式]** 元泽民, 柯希玮, 黄中, 等. 烟气再循环对大型循环流化床锅炉低负荷运行特性的影响研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 58-64. YUAN Zemin, KE Xiwei, HUANG Zhong, et al. Influence of flue gas recirculation on operation characteristics of large scale CFB boiler under low load[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 58-64.

## Influence of flue gas recirculation on operation characteristics of large scale CFB boiler under low load

YUAN Zemin<sup>1,2</sup>, KE Xiwei<sup>1</sup>, HUANG Zhong<sup>1</sup>, YANG Yunkai<sup>3</sup>, WU Guangjian<sup>3</sup>, LIU Qing<sup>1</sup>,  
MA Suxia<sup>2</sup>, CHENG Liang<sup>4</sup>, ZHAO Zhenning<sup>4</sup>

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. College of Electric and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
3. Jinneng Datuhe Power Plant Co., Ltd., Lvliang 033000, China; 4. State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100054, China)

**Abstract:** Flue gas recirculation (FGR) is an important technical mean to improve the safety of circulating fluidized bed (CFB) boiler and reduce the generation of  $\text{NO}_x$  under low-load operation. In the present work, the relationships between temperature distribution of the boiler,  $\text{NO}_x$ , CO mass concentration and  $\text{O}_2$  volume fraction of the flue gas at furnace outlet, the combustible matter content of fly ash and bottom slag and the flow rate of FGR under the load of 20%, 30% and 40% BMCR (boiler maximum continuous rating) were studied using one-dimensional chamber

收稿日期: 2023-05-04 网络首发日期: 2023-07-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4100301); 国网冀北电力公司科技资助项目 (SGTYHT/21-HS-225)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFB4100301); Science and Technology Funding Project of State Grid Jibei Electric Power (SGTYHT/21-HS-225)

第一作者简介: 元泽民 (1993), 男, 博士研究生, 主要研究方向为循环流化床锅炉高效清洁燃烧与利用, tyutthermo@foxmail.com.

通信作者简介: 黄中 (1983), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为循环流化床锅炉高效清洁燃烧与利用, huangzhong@mail.tsinghua.edu.cn.

CFB combustion quasi-static model at a supercritical 350 MW CFB boiler. The results show that both the bed temperature and furnace exit flue gas temperature decrease with the increase of FGR flow rate, which the former decreases less than the latter. The temperature difference between the upper and lower furnace gradually decreases with the increase of FGR flow rate, which is more significantly affected by FGR flow rate at lower loads. The  $\text{NO}_x$  mass concentration of flue gas at the furnace exit shows a trend of decreasing first and then increasing with the increase of FGR flow rate, and the existence of the optimal FGR flow rate can make the unit operation economically and environmentally friendly. In addition, with the increase of the FGR flow rate, the CO mass concentration at the furnace outlet, combustible matter content of fly ash and bottom slag shows an increasing trend. The FGR significantly reduces the primary air oxygen volume fraction while ensuring that the fluidized air flow rate in the dense phase area is always higher than the protection value, which ensures the operation safety of the boiler under low load furtherly.

**Key words:** CFB boiler; low load; FGR; one-dimensional chamber CFB combustion model; boiler operation characteristic

在新能源电力快速发展背景下,实现火电机组灵活性调峰是我国解决新能源消纳矛盾、参与电网深度调峰的有效途径。循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉负荷调节能力强、污染物排放低、煤种适应性广<sup>[1-3]</sup>,在深度电调峰、污染物超低排放方面具有较大优势<sup>[4-5]</sup>。然而,在部分大型CFB锅炉低负荷运行工程实践中发现<sup>[6]</sup>,当机组处于低负荷运行时,为保证流化安全,一次风率较大、炉内氧量偏高,增强了密相区的氧化性气氛,促进了燃烧过程中氮反应的中间产物被氧化为 $\text{NO}$ ;特别地,在30%额定负荷下,部分锅炉平均床温仅为 $690\text{ }^\circ\text{C}$ ,炉膛出口平均温度低至 $519\text{ }^\circ\text{C}$ ,远低于选择性非催化还原(SNCR)脱硝反应的温度窗口,投入脱硝剂后造成氨逃逸超标, $\text{NO}_x$ 排放质量浓度超标,限制了CFB锅炉低负荷运行能力的释放。在火电机组频繁参与深度调峰的背景下,迫切需求解决大型CFB锅炉低负荷运行下 $\text{NO}_x$ 排放偏高的问题,满足现阶段电力市场需求。

一般地,CFB锅炉 $\text{NO}_x$ 减排路线可以遵从“先炉内、后炉外”的方式<sup>[7]</sup>。烟气再循环(flue gas recirculation, FGR)是“炉内”抑制 $\text{NO}_x$ 生成的低氮燃烧技术,其工作原理是将锅炉尾部低温烟气的一部分通过再循环风机与空气混合后送入炉膛,利用尾部烟气低氧的特点,增强密相区还原性气氛,同时确保流化安全<sup>[8]</sup>。FGR燃烧技术被广泛地应用于各种形式的锅炉设备,学者们针对FGR对CFB锅炉运行的影响进行了大量的研究。华海峰等<sup>[7]</sup>针对75 t/h CFB锅炉进行FGR改造,结果表明了FGR结合SNCR脱硝技术路线的可行性;杨国华等<sup>[8]</sup>亦针对75 t/h CFB锅炉提出了FGR结合SNCR脱硝改造方案;陈高峰等<sup>[9]</sup>针对75 t/h CFB锅炉进行了FGR技术改造,比较了改造前后 $\text{NO}_x$ 排放、氧含

量、炉内温度、排烟温度的变化;田震等<sup>[10]</sup>研究了75 t/h CFB锅炉投运FGR后床温、 $\text{NO}_x$ 排放特性;郭佳明等<sup>[11]</sup>对75 t/h CFB锅炉进行了FGR技术改造,研究了FGR率对 $\text{NO}_x$ 排放、床温、尾部烟道烟温的影响,结果表明,料层温度和过渡区温度降低且下降趋势趋于明显,稀相区温度基本保持不变,炉膛出口温度略有下降;张思海等<sup>[12]</sup>以亚临界330 MW CFB锅炉为研究对象,在实炉条件下充分研究了其在超低负荷条件下的运行特性,结果表明,采用FGR技术能在维持密相区流化安全的同时,显著降低一次风量,强化密相区还原氛围,降低密相区温度,延迟炉膛内燃烧,显著提高炉膛出口烟温;折建刚等<sup>[13]</sup>针对亚临界300 MW CFB锅炉对比分析了FGR投停对锅炉 $\text{NO}_x$ 排放、床温、分离器入口温度、排烟温度等主要运行参数及风机电耗、飞灰及底渣可燃物含量经济指标的影响。文献调研结果显示,目前针对大型CFB锅炉特别是超临界CFB锅炉FGR研究内容相对匮乏,在大型CFB锅炉频繁参与深度调峰背景下,亟需研究超低负荷下FGR技术对CFB锅炉运行特性的影响。

本文以某电厂超临界350 MW机组燃煤CFB锅炉为研究对象,采用一维小室CFB燃烧准静态数学模型研究了该锅炉在超低负荷下炉内温度分布,炉膛出口烟气 $\text{NO}_x$ 、CO质量浓度和 $\text{O}_2$ 体积分数,飞灰底渣可燃物含量等性能指标与FGR流量之间的关系,以期FGR燃烧技术应用于大型CFB锅炉提供理论支撑。

## 1 锅炉结构与FGR系统

某厂超临界350 MW直流燃煤CFB锅炉,型号DG1235/25.4-II1,其整体结构布置、锅炉主要构成及在最大连续负荷(boiler maximum continuous

rating, BMCR)和额定负荷(boiler rated load, BRL)条件下的主要汽水参数可参见文献[6]。

图1为锅炉结构示意图及FGR系统方案。再循

环烟气来源于引风机出口引出的部分烟气,经循环风机进入一次风机入口,与空气混合后送入炉膛底部。

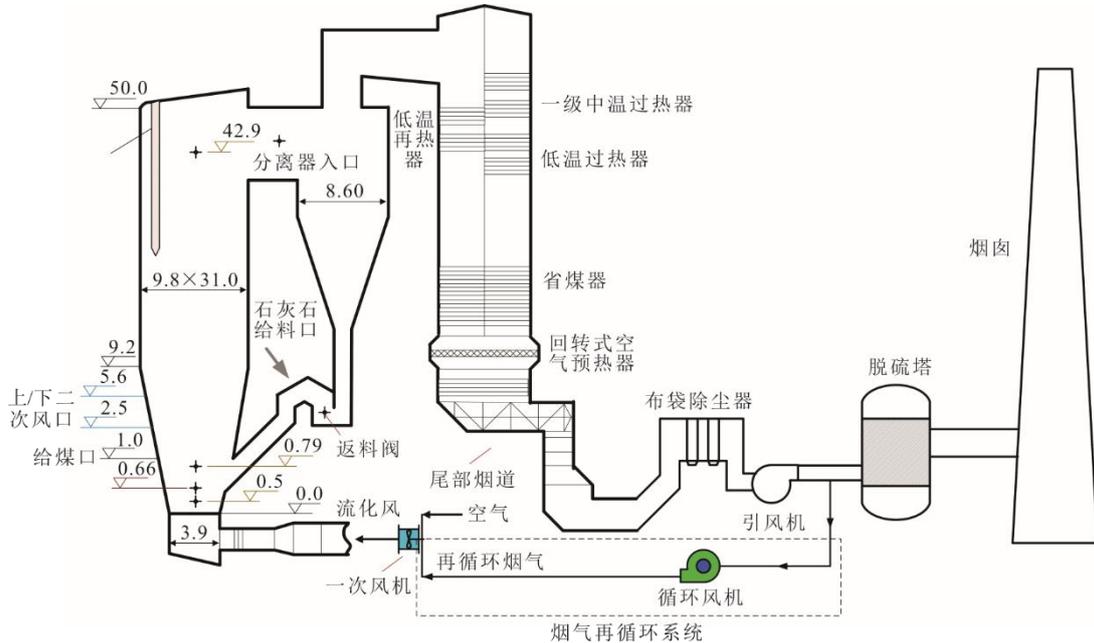


图1 超临界350 MW循环流化床锅炉示意及FGR系统(m)

Fig.1. Schematic diagram of supercritical 350 MW CFB boiler and FGR system (m)

## 2 模拟方法与工况

### 2.1 一维CFB小室模型概述

在一维CFB燃烧准静态小室模型中,将CFB锅炉划分为若干子区域(也称“小室”),相邻小室间存在质量和能量交换,每个小室均需满足物料平衡(气固流动)、气体平衡(化学反应)和能量平衡(传热)。平衡方程中一些关键气固流动状态参数,如物料存量(颗粒浓度沿床高分布)、固体流率、气固传质等,采用相对简单的物理或半经验公式(子模型)进行描述,从而使方程组封闭。该模型充分考虑描述特定工况下炉内床料流率、粒径分布、空隙率轴向分布、颗粒停留时间、气泡及颗粒团行为等CFB物料平衡特性;耦合单颗粒煤传热、热解模型以及流化床燃烧条件下焦炭、石灰石、灰分等固体床料表面反应体系中相应单颗粒反应子模型,可适应大范围工况变化下的CFB燃烧及 $\text{NO}_x$ 排放模拟。详细的一维CFB燃烧准静态数学模型构建及理论可见文献[14-20]。

### 2.2 模拟工况

本文选取机组负荷 $Q_B=20\%、30\%、40\% \text{BMCR}$ ,FGR流量 $q$ 分别为0、20、40、60、80、100  $\text{km}^3/\text{h}$ (标准状态,下同)等多个工况模拟FGR对CFB

锅炉低负荷运行特性的影响。该厂入炉多元煤种煤质分析列于表1。表2列出了不同模拟工况下给煤量以及一、二次风量。

表1 入炉煤质分析  
Tab.1 Analysis of coal sample

项目	数值	
工业分析 w/%	收到基水分 $M_{t,ar}$	8.46
	收到基灰分 $A_{ar}$	50.09
	收到基挥发分 $V_{ar}$	13.06
	收到基固定碳 $FC_{ar}$	28.39
元素分析 w/%	收到基碳 $C_{ar}$	30.14
	收到基氢 $H_{ar}$	2.04
	收到基氮 $N_{ar}$	0.52
	收到基全硫 $S_{t,ar}$	2.09
	收到基氧 $O_{ar}$	6.66
收到基恒容低位发热量 $Q_{net,v,ar}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	11.56	

表2 不同工况下给煤量与风量  
Tab.2 Coal feed quantity and air quantity at different boiler load

负荷率/%	给煤量/ ( $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ )	一次风量 (含再循环烟气) / ( $\text{km}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )	二次风量/ ( $\text{km}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )
20	50.99	393.85	137.21
30	70.98	393.85	142.21
40	94.28	393.85	150.21

采用“静态燃烧+冷态振筛磨耗”<sup>[20]</sup>实验方法,获得入炉多元煤的成灰磨耗特性,其仅与煤种有关,不受锅炉实际运行条件影响,作为煤种特性及灰颗粒的重要输入参数引入模型中,如图 2 所示。

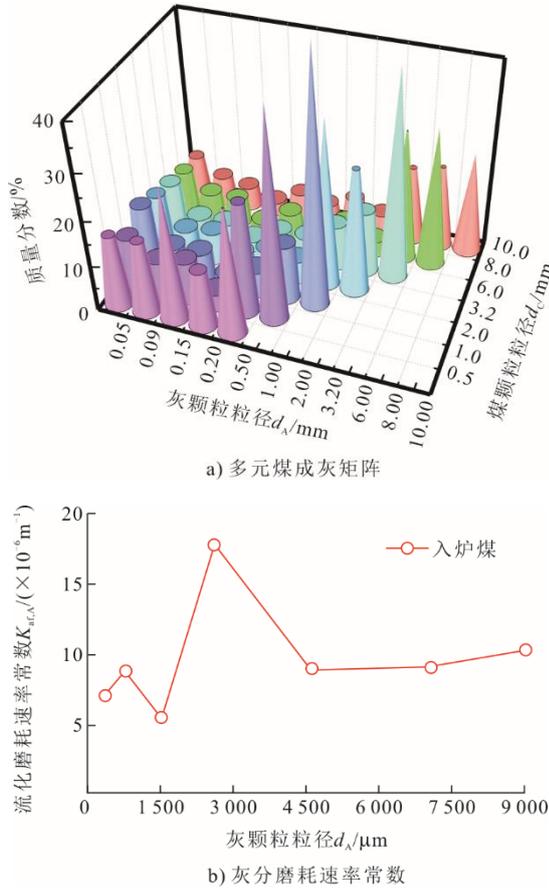


图 2 入炉多元煤种成灰磨耗特性  
Fig.2 Character of ash formation and its attrition

### 3 结果与分析

#### 3.1 FGR 对炉内温度分布的影响

图 3 为不同负荷下炉膛出口温度、床底温度随 FGR 流量的变化趋势。由图 3 可以看出,不同负荷下炉膛出口温度、床温均随 FGR 流量的增加而降低,前者降低幅度显著低于后者。再循环烟气中氧含量较低,与空气混合后形成的一次风氧含量相对偏低,减小了燃料燃烧速率,密相区燃烧份额降低,因此床温下降幅度较大。炉膛出口温度在各个负荷下降低幅度均在 20 °C 以内,其受 FGR 流量增加影响较小的原因在于二次风补入了燃烧所欠缺的氧量,炉内燃烧后延。

图 4 为不同负荷下,炉膛上下温差随 FGR 流量的变化情况。由图 4 可以看出:各负荷下,炉膛上下温差随 FGR 流量的增加而减小,主要原因在

于随 FGR 流量增加,床温下降幅度较大;此外,随着锅炉负荷的降低,炉膛上下温差受 FGR 流量的影响更为显著。

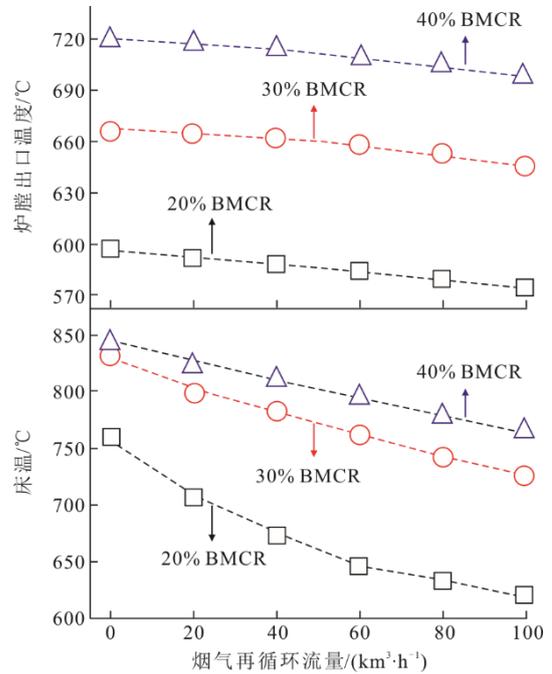


图 3 不同 FGR 流量下炉膛出口温度及床层温度  
Fig.3 Temperature of flue gas at the furnace exit and bottom with the different FGR flow rate

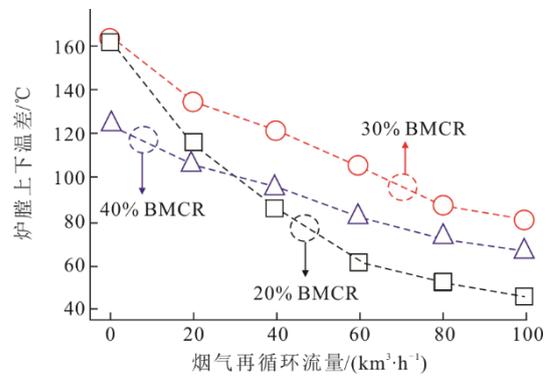


图 4 不同 FGR 流量下炉膛上下温差  
Fig.4 Temperature difference between the furnace exit and bottom with the different FGR flow rate

#### 3.2 FGR 对 NO<sub>x</sub> 质量浓度的影响

图 5 为不同负荷下炉膛出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度(标准状态, φ(O<sub>2</sub>)=6%, 下同)随 FGR 流量的变化曲线。由图 5 可知,各负荷下,炉膛出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度随 FGR 流量的增加均呈现先降低后升高的趋势。呈现该变化趋势的原因在于随着 FGR 流量的增加,降低了一次风氧含量,同时密相区床温降低,抑制了热力型 NO<sub>x</sub> 的生成,从而使 NO<sub>x</sub> 质量浓度降低;然而当 FGR 流量过大时,会出现 NO 循环量的增

加,从而导致  $\text{NO}_x$  的富集,使得  $\text{NO}_x$  质量浓度增加。在 20%、30%、40%BMCR 负荷下,分别当 FGR 流量为 40、55、60  $\text{km}^3/\text{h}$  时,炉膛出口  $\text{NO}_x$  质量浓度达到最低水平,且远低于未投运 FGR 时炉膛出口  $\text{NO}_x$  质量浓度。然而,投运 FGR 系统后,势必导致机组能耗相应升高,且对炉膛温度分布及燃烧效率存在显著影响,因此不同负荷下,存在最优 FGR 风量可使机组经济环保运行。

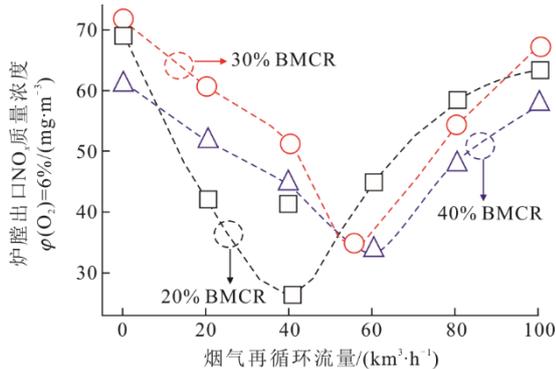


图5 不同 FGR 流量下炉膛出口  $\text{NO}_x$  质量浓度  
Fig.5  $\text{NO}_x$  mass concentration at the furnace exit with the different FGR flow rate

图 6 为 20%、30%、40%BMCR 负荷下炉膛出口  $\text{O}_2$  体积分数随 FGR 流量的变化情况。由图 6 可以看出,炉膛出口  $\text{O}_2$  体积分数随锅炉负荷的升高而降低,与实际运行工况相符,且均随 FGR 流量的增加而降低。 $\text{O}_2$  是造成  $\text{NO}_x$  排放增加的重要原因,这也是采用 FGR 后  $\text{NO}_x$  降低的原因。

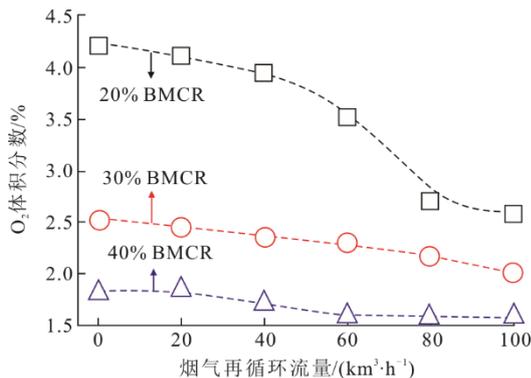


图6 不同 FGR 流量下炉膛出口  $\text{O}_2$  体积分数  
Fig.6  $\text{O}_2$  volume fraction at the furnace exit with the different FGR flow rate

### 3.3 FGR 对燃烧的影响

FGR 对炉内燃烧存在一定影响。本文以炉膛出口 CO 质量浓度、飞灰及底渣可燃物含量 2 个指标分析 FGR 对燃烧的影响。图 7 为不同负荷下炉膛出口 CO 质量浓度随 FGR 流量的变化曲线。从图 7

可以直观看出:相同 FGR 流量下,炉膛出口 CO 质量浓度随锅炉负荷的升高而降低;不同负荷下,CO 质量浓度均随 FGR 流量的增加而增加,主要原因在于随着 FGR 流量增大,炉内整体  $\text{O}_2$  体积分数水平下降,炉膛温度下降,炉内燃烧不充分。这一燃烧状况在 20%BMCR 下表现尤为显著。随着 FGR 流量的增加,CO 质量浓度增幅最大。这一结果表明 FGR 在一定程度上不利于炉内燃烧效率的提高。因此,在投运 FGR 后,可对上下二次风量配比进行调节,降低炉内贫氧区。

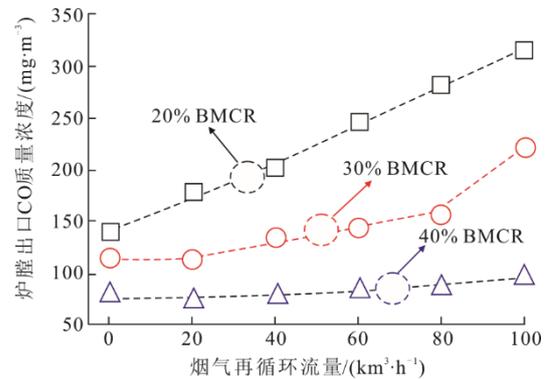


图7 不同 FGR 流量下炉膛出口 CO 质量浓度  
Fig.7 CO mass concentration at the furnace exit with the different FGR flow rate

图 8 为不同负荷下飞灰、底渣可燃物含量随 FGR 流量的变化曲线。

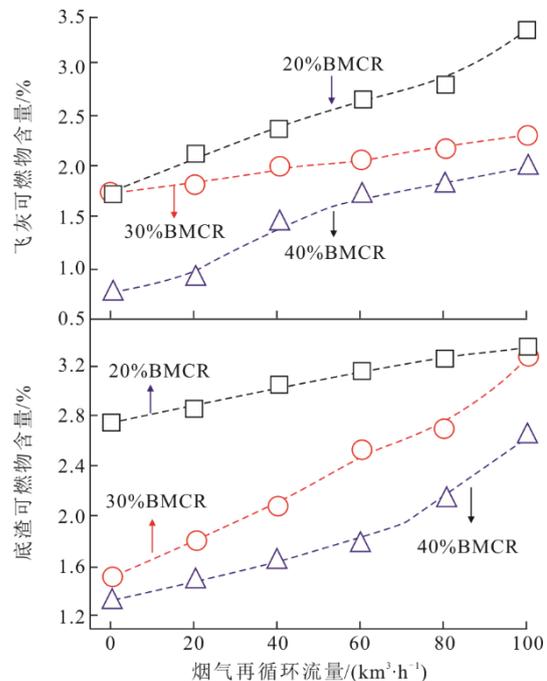


图8 不同 FGR 流量下锅炉飞灰及底渣可燃物含量  
Fig.8 Boiler fly ash and bottom slag combustibles content with the different FGR flow rate

从图8可以看出,不同负荷下飞灰底渣可燃物含量均随着FGR流量的增加而升高。造成飞灰底渣可燃物含量升高的主要原因是床温及燃烧温度下降。

### 3.4 FGR 对流化床安全性的影响

对于该型号锅炉,为保证低负荷下物料处于良好的流化状态,避免长时间运行流化不良结焦风险,按照该型号锅炉设计书,在50%THA及以下负荷工况,空气预热器出口一次流化风量应不低于保护值(373.85 km<sup>3</sup>/h)<sup>[21-22]</sup>。

图9为FGR流量与一次风量的变化。从图9可以得出,在低负荷下投运FGR,使密相区流化风量始终高于373.85 km<sup>3</sup>/h,有效提高了密相区流化质量,进一步保障了低负荷下锅炉运行安全性。

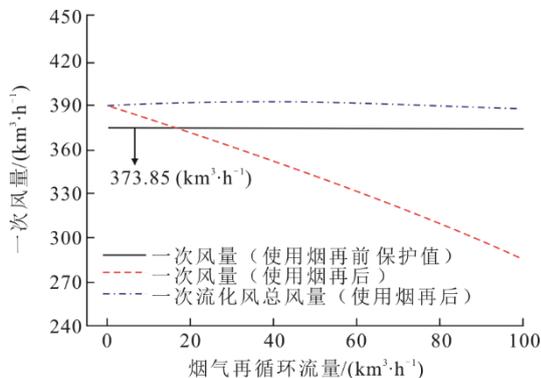


图9 FGR 流量与一次风量变化关系

Fig.9 Relationship between the FGR flow rate and primary air

### 3.5 FGR 的燃烧方案设计建议

为使得机组能够在经济环保下运行,基于FGR对炉内温度、NO<sub>x</sub>质量浓度、燃烧和安全性的影响计算结果,建议低负荷下FGR率要控制在10%~15%内,在达到最佳的NO<sub>x</sub>去除率以及流化安全性的同时,最大化保证炉内温度稳定和燃烧效率。此外,FGR系统需要注意SO<sub>2</sub>的腐蚀,因引风机出口所引出的烟气中SO<sub>2</sub>含量较高,与一次风混合前烟温在100℃左右,虽未达到酸露点,但在停运时烟道中残留的烟气和漏入的烟气会对系统造成轻微的腐蚀。与一次风混合后介质温度在60℃左右,低于酸露点,会对一次风机及冷一次风道造成腐蚀,影响锅炉安全运行。在改造中应对相应的烟道、风道、风机、阀门等设备做好防腐处理。

## 4 结 论

本文以超临界350 MW CFB锅炉为研究对象,

采用一维CFB燃烧准静态数学模型分析锅炉燃用多元低热值煤低负荷下投运FGR对炉内温度分布、NO<sub>x</sub>排放、燃烧及运行安全性的影响,结果表明:

1) 床温、炉膛出口烟气温度均随FGR流量的增加而降低,前者降低幅度高于后者;炉膛上下温差随FGR流量的增加逐渐缩小,较低负荷时炉膛上下温差受FGR影响更为显著。

2) 各负荷下,炉膛出口O<sub>2</sub>体积分数均随FGR流量的增加而降低;炉膛出口NO<sub>x</sub>质量浓度随FGR流量的增加呈现先降低后升高的变化趋势,在20%、30%、40%BMCR负荷下,当FGR流量为40、55、60 km<sup>3</sup>/h时,NO<sub>x</sub>质量浓度达到最低水平;在考虑机组能耗及燃烧效率情况下,存在最佳FGR风量范围使得机组经济环保运行。

3) 低负荷下,FGR在实现NO<sub>x</sub>原始排放降低目标的同时,相对不利于炉内燃烧,炉膛出口CO质量浓度、飞灰及底渣可燃物含量均随FGR流量增加而增加;燃烧中可对上下二次风量配比进行调节,降低炉内贫氧区,避免燃烧效率降低。

4) FGR的投入在显著降低一次风份额同时,保证密相区流化风量高于始终高于保护值,有效提高了密相区流化质量,进一步保障了低负荷下锅炉运行安全性。

### [参 考 文 献]

- [1] 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, LYU 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.
- [2] 黄中,杨娟,车得福. 大容量循环流化床锅炉技术发展应用现状[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 1-8.  
HUANG Zhong, YANG Juan, CHE Defu. Application and development status of large-scale CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 1-8.
- [3] HUANG Z, DENG L, CHE D F. Development and technical progress in large-scale circulating fluidized bed boiler in China[J]. Frontiers in Energy, 2020, 14(4): 699-714.
- [4] 厉彦民,严谨,孙荣岳,等. 新型烟气再循环在流化床中的行为特性及NO<sub>x</sub>排放分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(7): 71-80.  
LI Yanmin, YAN Jin, SUN Rongyue, et al. Behavior characteristics and NO<sub>x</sub> emission analysis of new flue gas recirculation in fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(7): 71-80.
- [5] 凌文,吕俊复,周托,等. 660 MW超超临界循环流化床锅炉研究开发进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2515-2524.  
LING Wen, LYU Junfu, ZHOU Tuo, et al. Research and development progress of the 600 MW ultra-supercritical

- circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CESS, 2019, 39(9): 2515-2524.
- [6] 元泽民, 黄中, 武广剑, 等. 350 MW 超临界循环流化床锅炉 SO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub> 及粉尘排放特性试验研究[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(2): 163-171.  
YUAN Zemin, HUANG Zhong, WU Guangjian, et al. Emission characteristics test of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and dust from a 350 MW supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(2): 163-171.
- [7] 华海峰, 宋立臣, 任海. 利用烟气再循环技术降低 CFB 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放研究[J]. 科学技术创新, 2019(24): 147-148.  
HUA Haifeng, SONG Lichen, REN Hai. Study on reducing NO<sub>x</sub> emissions from CFB boilers using flue gas recirculation technology[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(24): 147-148.
- [8] 杨国华, 陈艳艳, 吕刚, 等. CFB 锅炉烟气再循环与 SNCR 联合脱硝技术[C]//中国动力工程学会. 2014 年卷, 燃煤电厂“超低排放”新技术交流研讨会论文集. 2014: 155-160.  
YANG Guohua, CHEN Yanyan, LYU Gang, et al. Combined denitration technology of CFB boiler flue gas recirculation and SNCR[C]. Chinese Society of Power Engineering. Vol. 2014, Meeting Proceedings of Coal-fired Power Plant “Ultra-low Emission” New Technology Exchange Seminar. 2014: 155-160.
- [9] 陈高峰, 李新旗. 循环流化床锅炉烟气再循环技术应用总结[J]. 小氮肥, 2016, 44(4): 10-11.  
CHEN Gaofeng, LI Xinqi. Application summary of flue gas recirculation technology for circulating fluidized bed boilers[J]. Small Nitrogenous Fertilizer Plant, 2016, 44(4): 10-11.
- [10] 田震, 任瑞. 烟气再循环在降低 NO<sub>x</sub> 排放中实践应用[C]//西安热工研究院有限公司. 2016 年卷, 火电厂污染物净化与节能技术研讨会论文集. 2016: 112-116.  
TIAN Zhen, REN Rui. Practical application of flue gas recirculation in reducing NO<sub>x</sub> emissions[C]//Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. Vol. 2016, Meeting Proceedings of Thermal Power Plant Pollutant Purification and Energy Saving Technology Seminar. 2016: 112-116.
- [11] 郭佳明, 张光学, 池作和, 等. 75 t/h 循环流化床锅炉烟气再循环改造及试验研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(11): 73-77.  
GUO Jiaming, ZHANG Guangxue, CHI Zuohe, et al. Flue gas recirculation retrofit and experimental study for 75 t/h circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2017, 32(11): 73-77.
- [12] 张思海, 张双铭, 张俊杰, 等. 330 MW 亚临界 CFB 锅炉烟气再循环深度调峰运行性能研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 291-298.  
ZHANG Sihai, ZHANG Shuangming, ZHANG Junjie, et al. Performance research on deep peak regulation with flue gas recirculation in a 330 MW subcritical CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 291-298.
- [13] 折建刚, 谢国威, 郭万竹. 烟气再循环对循环流化床锅炉燃烧影响的对比研究[J]. 能源科技, 2021, 19(5): 84-89.  
SHE Jiangan, XIE Guowei, GUO Wanzhu. Comparative study on influence of flue gas recirculation on combustion of circulating fluidized bed boiler[J]. Energy Science and Technology, 2021, 19(5): 84-89.
- [14] KE X, ENGBLOM M, YANGH, et al. Prediction and minimization of NO<sub>x</sub> emission in a circulating fluidized bed combustor: a comprehensive mathematical model for CFB combustion[J]. Fuel, 2022, 309: 122133.
- [15] KE X, ENGBLOM M, ZHANGM, et al. Modeling of the axial distributions of volatile species in a CFB boiler[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 233: 116436.
- [16] KE X, LI D, LI Y, et al. 1-Dimensional modelling of in-situ desulphurization performance of a 550 MWe ultra-supercritical CFB boiler[J]. Fuel, 2021, 290: 120088.
- [17] YANG H, YUE G, XIAO X, et al. 1D modeling on the material balance in CFB boiler[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(20): 5603-5611.
- [18] 刘雪敏. 循环流化床锅炉流态优化对其经济运行的影响[D]. 北京: 清华大学, 2014: 1.  
LIU Xuemin. Effect of flow-pattern optimization on economical operation of circulating fluidized bed boiler [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 1.
- [19] 柯希纬. 循环流化床燃烧 NO<sub>x</sub> 排放特性整体数学模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2021: 1.  
KE Xiwei. Comprehensive modeling study on NO<sub>x</sub> emission characteristics of circulating fluidized bed combustion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021: 1.
- [20] 杨海瑞, 肖显斌, 吕俊复, 等. CFB 锅炉内成灰特性的实验研究方法[J]. 化工学报, 2003, 54(8): 1183-1187.  
YANG Hairui, XIAO Xianbin, LYU Junfu, et al. Experimental technique on coal ash formation in CFB combustion[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(8): 1183-1187.
- [21] 黄中. 循环流化床锅炉优化改造技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 193-194.  
HUANG Zhong. Optimization technologies of circulation fluidized bed boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 193-194.
- [22] 黄中. 循环流化床锅炉技术标准与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021: 39-58.  
HUANG Zhong. Technical code and application of circulating fluidized bed boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021: 39-58.

(责任编辑 刘永强)