



《煤炭学报》网络首发论文

题目: 超临界循环流化床锅炉深度调峰特性模拟研究
作者: 刘梁, 高凯旋, 谢德清, 何建乐, 黄中, 金燕, 吕俊复, 柯希玮
DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1418
网络首发日期: 2025-05-27
引用格式: 刘梁, 高凯旋, 谢德清, 何建乐, 黄中, 金燕, 吕俊复, 柯希玮. 超临界循环流化床锅炉深度调峰特性模拟研究[J/OL]. 煤炭学报.
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1418>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1418

超临界循环流化床锅炉深度调峰特性模拟研究

刘梁^{1,2}, 高凯旋³, 谢德清⁴, 何建乐⁵, 黄中^{2,3}, 金燕¹, 吕俊复^{2,3},

柯希玮^{3,*}

(1.太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2.清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084; 3. 怀柔实验室山西研究院, 山西 太原 030032; 4.华电国际电力股份有限公司 朔州热电分公司, 山西 朔州 036032; 5.华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 随着电力生产供应绿色化不断深入, 新能源发电占比不断增加, 火电机组将向基础保障性与系统调节性并重的角色转型, 超临界循环流化床 (Circulating Fluidized bed, CFB) 锅炉因其独特的灵活性优势需要承担深度调峰任务。为此, 基于计算颗粒流体动力学 (Computational Particle Flow Dynamics, CFPD) 方法, 以某 350MW 超临界 CFB 锅炉为研究对象, 针对 30%-90% 范围的宽负荷工况条件, 开展了炉内气固流动、燃烧以及传热特性的详细模拟研究。具体分析了不同负荷下炉内三维颗粒浓度分布、并联多回路流动均匀性、三维温度分布及水冷壁受热面传热系数分布规律, 并探讨了 NO_x 生成排放特性。结果表明: 随着锅炉负荷的升高, 循环流率增加, 炉膛上部颗粒浓度增大, 轴向 S 型物料浓度分布趋于平缓; 同时, 炉膛上下温差减小, 温度分布均匀性增强, 传热系数沿轴向衰减速率减小。在炉膛深度方向上, 后墙壁面处颗粒浓度高于前墙, 温度低于前墙, 传热系数则高于前墙, 且负荷越高, 边壁与中心区的浓度差越大; 宽度方向上, 颗粒浓度、温度分布呈现较明显的对称性, 但在炉膛中上部受水冷屏、过热器等悬吊受热面影响, 各参数呈现波浪型分布。值得注意的是, 中间分离器的气固质量流率低于两侧分离器, 且“一分二”的返料阀结构导致并联回路流动均匀性降低; 低负荷工况下, 并联多回路间颗粒流动均匀性有所改善, 但水冷壁各壁面的传热系数偏差却进一步增大。此外, 沿炉膛高度方向, NO_x 浓度呈现先增加后减小的变化趋势; 随着负荷的降低, NO_x 原始排放浓度呈现先减小后增加的特征, 拐点大约出现在 50% 负荷左右。

关键词: 循环流化床; 深度调峰; 气固流动; 燃烧; 传热; 数值模拟

Numerical investigation on the deep peak regulation characteristics of a supercritical circulating fluidized bed boiler

LIU Liang^{1,2}, GAO Kaixuan³, XIE Deqing⁴, HE Jianle⁵, HUANG Zhong^{2,3}, JIN Yan¹, LYU Junfu^{2,3},
KE Xiwei^{3,*}

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, Taiyuan 030032, China 4. Huadian International Power Co., Ltd., Shuozhou Thermal Power Branch, Shuozhou 036032, China; 5. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: With the continuous deepening of green power production and supply and the increasing proportion of new energy power generation, thermal power units are transitioning to a role that emphasizes both basic security and system regulation. Supercritical circulating fluidized bed (CFB) boilers, due to their unique flexibility advantages, need to undertake deep peak regulation tasks. Therefore, based on the Computational Particle Flow Dynamics (CPFD) method, a 350MW supercritical CFB boiler was taken as the research object, and detailed simulation studies on the gas-solid flow, combustion, and heat transfer characteristics in the furnace were carried out under

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2022YFB4100305); 煤炭分级转化清洁发电协同创新中心(2022ZFJH04)

作者简介: 刘 梁 (2001-), 男, 硕士研究生。E-mail: LiangLiu.01@outlook.com

通讯作者: 柯希玮 (1994-), 男, 博士, 副研究员。E-mail: kexiwei@sxri.hl.ac.cn

wide load conditions ranging from 30% to 90%. The three-dimensional particle concentration distribution, the flow uniformity of parallel multi-loop systems, the three-dimensional temperature distribution, and the distribution law of heat transfer coefficients on water-wall heating surfaces under different loads were specifically analyzed, and the NO_x formation and emission characteristics were discussed. The results show that as the boiler load increases, the circulating flow rate increases, the particle concentration in the upper part of the furnace increases, and the axial S-shaped solid concentration distribution tends to be gentler. At the same time, the temperature difference between the upper and lower parts of the furnace decreases, the uniformity of temperature distribution is enhanced, and the axial attenuation rate of the heat transfer coefficient decreases. In the depth direction of the furnace, the particle concentration at the rear wall is higher than that at the front wall, the temperature is lower than that at the front wall, and the heat transfer coefficient is higher than that at the front wall. Moreover, the higher the load, the greater the concentration difference between the side-wall and central regions. In the width direction, the distributions of particle concentration and temperature show obvious symmetry, but in the middle and upper parts of the furnace, affected by suspended heating surfaces such as water-cooling screens and superheaters, each parameter shows a wave-like distribution. Notably, the gas-solid mass flow rate of the middle separator is lower than that of the side separators, and the "one - to - two" structure of the return valve leads to a reduction in the flow uniformity of the parallel loops. Under low-load conditions, the uniformity of particle flow among the parallel multi-loops is improved, but the deviation of heat transfer coefficients on each wall of the water-wall further increases. In addition, along the height direction of the furnace, the NO_x concentration shows a trend of first increasing and then decreasing. As the load decreases, the original NO_x emission concentration shows a characteristic of first decreasing and then increasing, with the inflection point occurring at approximately 50% load.

Key words: CFB; deep peak regulation; gas-solid flow; combustion; heat transfer; numerical simulation

为实现“碳中和”目标，中国不断深入电力生产供应绿色化，截至 2024 年六月底，全国全口径发电装机容量 30.7 亿千瓦，其中并网风电装机容量 4.7 亿千瓦，并网太阳能发电装机容量 7.1 亿千瓦，合计达 11.8 亿千瓦，占总装机容量的 38.4%，装机规模首次超过煤电^[1]。但新能源电力的间歇性、波动性和随机性对电力系统可靠稳定运行带来极大压力，继而要求火电机组向基础保障性与系统调节性并重转型^[2]。我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋决定了煤电机组在火电机组中的绝对主体地位，大量煤电机组将承担深度调峰任务。煤粉锅炉可通过锅炉精细化运行调整或富氧微油燃烧技术改造等进行调峰任务，但调峰能力有限且发电成本较高^[3]。在这一方面，因燃料适应性广、污染排放控制成本低而快速发展的循环流化床（CFB）锅炉表现出独特优势：采用流态化燃烧方式，床温一般在 850-950°C，炉内大量的高温颗粒使其具备优秀的蓄热能力，低负荷燃烧更稳定，具备更好的调峰能力^[4-6]。

CFB 锅炉的深度调峰，核心在于维持低负荷下安全流化与污染物排放控制^[7-9]，这方面学者也开展了不少研究工作。通过流态重构理论，减小床料粒度，临界流化风速降低，炉膛燃烧份额分配改变，低负荷下一次风量可以进一步减小^[10]，有效改善了深调工况下的流化稳定同时减少氮氧化物生成；清

华大学吕俊复等^[11,12]基于“定态设计”理论开发的粉煤 CFB 锅炉技术，通过降低给煤粒度，极大提高了 CFB 锅炉的循环性能和燃烧效率，提高了 CFB 锅炉在低负荷下的稳燃能力；同时炉内还原性气氛增强， NO_x 原始排放降低约 35%。相关研究表明，煤粉平均粒径由 90 μm 降低至 60 μm ，着火温度从 640°C 降低至 570°C^[13]。Ke 等^[14]借助一维 CFB 模型发现 CFB 锅炉在宽负荷调节过程（35%-100%）中， NO_x 排放趋势并非单调变化，且存在转折点。此外较多实验研究表明深调工况下引入烟气再循环系统可有效保证流态稳定，并且有效提高二次风量，提高脱硫效率，降低 NO_x 排放^[15-17]。

高参数、大容量是包括 CFB 锅炉在内的燃煤发电机组发展趋势之一。2013 年，世界首台 600MW 超临界 CFB 锅炉在四川白马电厂正式投运^[18]。此后，先后开发投运了超过 50 台 350MW 超临界 CFB 锅炉以及两台 660MW 超临界 CFB 锅炉^[2]。目前，中国超临界 CFB 锅炉各项性能指标已经达到世界领先水平，引领了超临界 CFB 锅炉的国际发展。随着锅炉容量放大，其气固流动静态不均匀性、动态不稳定性问题更加突出。例如，大容量 CFB 锅炉中为满足吸热而设的大量悬吊屏及多分离器会导致气固两相流的不均匀分布进而影响炉膛壁面的颗粒流动，导致换热面受热不均、局部超温、污染排放

增加等诸多问题^[19]。而在深度调峰工况下，超临界 CFB 锅炉三维气固流动均匀性随负荷变化规律及其对燃烧、传热特性的影响值得关注。然而，目前针对这方面的研究还比较少。

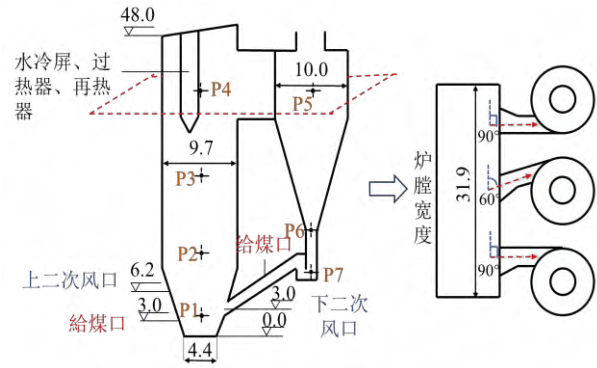
虽然工业锅炉现场实验结果可靠性更高，但其测试难度大、成本高、测点有限^[20]，同时受生产运行及安全限制，难以开展全工况试验。因此，众多学者采用数值模拟方法作为补充研究手段，其中计算颗粒流体动力学 (CPFD) 方法在大型工业设备模拟研究领域适用性良好。

CPFD 是一种典型的欧拉-拉格朗日方法，采用了高效的 MP-PIC (Multiphase Particle-In-Cell) 算法，能够有效解决系统内 4 种气固相互作用所引发的复杂耦合计算挑战^[21]。目前采用 CPFD 方法的模拟研究主要包括单一稳态工况研究以及宽负荷工况研究两类。单一稳态工况研究主要针对稳态下 CFB 锅炉气固流动特性和燃烧、传热特性等方面展开，其中气固流动的研究主要集中在颗粒循环特性、炉膛颗粒分布特性、颗粒停留时间和壁面腐蚀等方面^[22-26]。而燃烧、传热特性的研究主要涵盖了炉膛温度分布、壁面换热、污染物控制等^[27-31]方面。

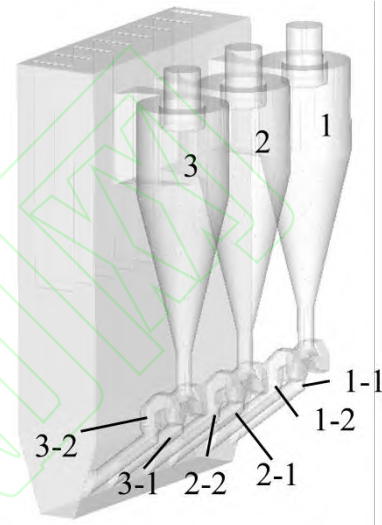
本文采用 CPFD 方法，以某 350MW 超临界 CFB 锅炉作为研究对象，旨在研究讨论深调工况下 CFB 锅炉气固流动特性、燃烧和传热特性差异，重点探究不同负荷下炉膛三维颗粒浓度分布、并联多回路流动均匀性、三维温度分布、受热面传热系数分布以及炉膛出口 NO_x 浓度，以期对超临界 CFB 锅炉深度调峰运行优化提供参考。

1. 模拟对象

本文选择某 350MW 超临界 CFB 锅炉作为模拟对象。图 1-a 为该锅炉结构示意图，该锅炉后墙配有三台汽冷式分离器，外旋布置；前墙布置 6 个给煤口和 12 个上二次风口，后墙布置 7 个下二次风口和 7 个上二次风口；左右墙各布置一个上二次风口；锅炉额定蒸汽温度和额定蒸汽压力设计值分别为 571℃ 和 25.28MPa，锅炉设计热效率为 91.84%。图 1-b 为简化后的 CFB 锅炉 3D 几何模型。



(a) 商业 CFB 锅炉结构简图 (单位: m)



(b) CFB 锅炉 3D 几何模型

图 1 350MW 超临界 CFB 锅炉主要结构

Fig.1 Main structure of 350MW supercritical CFB boiler

2 模型建立与参数设置

2.1 控制方程

本文基于 CPFD 方法，采用 Barracuda 商业软件进行模拟计算。CPFD 方法采用欧拉-拉格朗日法耦合求解气固流动，该方法将流体视为连续相，基于 Navier-Stokes 方程，使用欧拉方法求解流体流动行为，将颗粒视为离散相，采用拉格朗日方法求解颗粒运动行为，并使用 MP-PIC 方法简化计算。

气相控制方程可根据气体动力学理论推导得到，其中质量守恒方程和动量守恒方程如式 (1) 和 (2) 所示：

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) = \delta \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) \\ = -\nabla p - F + \alpha_f + \nabla \alpha_f \tau_f \end{aligned} \quad (2)$$

式中: α_f 为气相体积分数; t 为时间, s; ρ_f 为气相密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; u_f 为气相速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\delta\dot{m}_s$ 为在单位控制体积内气固非均相反应引起的气体质量变化, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$; p 为气相压力, Pa; F 为其他作用力源项, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; τ_f 为气体应力张量, Pa。

固相控制方程可通过求解关于颗粒分布函数 PDF (Particle Distribution Function) 的输运方程得到, 颗粒运动方程如式 (3) 所示, 其中颗粒应力采用式 (4) 计算:

$$\frac{du_s}{dt} = \beta(u_f - u_s) - \frac{1}{\rho_s} \nabla p + g - \frac{1}{\alpha_s \rho_s} \nabla \tau_s \quad (3)$$

$$\tau_s = \frac{p_s \alpha_s^\gamma}{\max[(\alpha_{cp} - \alpha_s), \epsilon(1 - \alpha_s)]} \quad (4)$$

式中: u_s 为颗粒相的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; β 为相间曳力系数, s^{-1} ; ρ_s 为颗粒密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; α_s 为颗粒的体积分数; τ_s 为颗粒的法向应力, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$; p_s 为固相压力, Pa; γ 为模型的自有参数, 取值为 2-5; α_{cp} 为颗粒堆积极限, 指颗粒紧密堆积时的最大体积分数; ϵ 为数量级为 10^{-7} 的小量。

2.2 传热模型

流体与壁面之间的对流换热系数由稀相区传热系数式 (5) 和密相区传热系数式 (6) 组成。

$$h_l = (c_0 Re_L^{n_1} Pr^{n_2} + c_1) \frac{k_f}{d_s} + c_2 \quad (5)$$

$$h_s = c_0 Re_s^{n_1} \frac{k_f}{d_s} \quad (6)$$

式中: c_0 、 c_1 、 c_2 、 n_1 和 n_2 为模型常数, $c_0=0.46$, $c_1=3.66$, $c_2=0$, $n_1=0.5$, $n_2=0.33$; k_f 为流体导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$; d_s 为颗粒直径, m。

流体和颗粒之间的传热系数一般表达式如式 (7) 所示:

$$h_l = (c_0 Re_s^{n_1} Pr^{0.33} + c_1) \frac{k_f}{d_s} + c_2 \quad (7)$$

式中: c_0 、 c_1 、 c_2 、 n_1 为模型常数, $c_0=0.37$, $c_1=0.1$, $c_2=0$, $n_1=0.6$ 。

辐射换热只考虑壁面与流体之间及壁面与其附近颗粒之间的辐射换热, 辐射热流量表达式如式 (8) 所示:

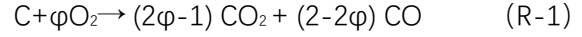
$$q_{ws} = A_w F_{ws} \epsilon_{ws} \sigma (T_w^4 - T_s^4) \quad (8)$$

式中: A_w 为壁面面积, m^2 ; T_w 为壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为颗粒在一个计算单元内的质量加权平均温度, $^{\circ}\text{C}$; F_{ws} 为系数; ϵ_{ws} 为壁面和颗粒的有效辐射率; σ 为

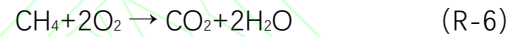
斯忒藩-玻尔兹曼常数, $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-4}$ 。

2.3 燃烧模型

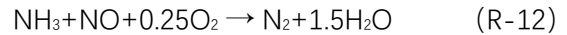
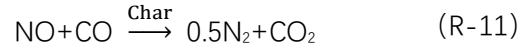
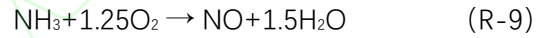
本文中焦炭燃烧模型主要考虑与氧气的燃烧反应 (R-1)、与二氧化碳及水蒸气的气化反应 (R-2)、(R-3):



气相燃烧模型主要是挥发分析出的气体 (甲烷、氢气、一氧化碳等) 以及焦炭燃烧产生的一氧化碳的燃烧, 如式 (R-4) - (R-7) 所示。



含氮反应体系主要包括挥发分氮 (HCN 和 NH_3) 的氧化 (R-8、R-9)、焦炭直接还原 NO (R-10)、焦炭催化 CO 还原 NO (R-11) 和选择性非催化还原反应 (R-12), 各反应方程如下所示:



2.4 模型参数与计算工况

本文中主要计算参数选择如表 1 所示, 取值依据团队研究基础并参考文献^[26,28]; 表 2 为电厂运行用煤的煤质分析; 图 2 为床料以及给煤粒径分布。选择分离器出口作为压力边界, 颗粒从压力边界流出后通过边界连接器进入炉膛保证炉内总床料量稳定。对于流动边界条件, 一、二次风均选择射流边界, 通过设置射流点进风代替实际 CFB 锅炉的风帽、喷口结构。热墙边界分别设置在炉膛收缩段、水冷壁下部、水冷壁上、水冷屏、过热器以及风冷式旋风分离器等壁面。表 3 为本文所研究的四个负荷点 (90%、70%、50% 和 30% 负荷) 下的运行参数设置。

表 1 主要模型参数选择

Table 1 Main model parameter selection

参数	数值
颗粒堆积极限	0.6
最大定向碰撞动量	40%

壁面法向反弹系数	0.2
壁面切向反弹系数	0.99
漫反射反弹指数	2
曳力模型	Wen Yu-Ergun
床料密度 (kg/m ³)	2600
球形度	0.7

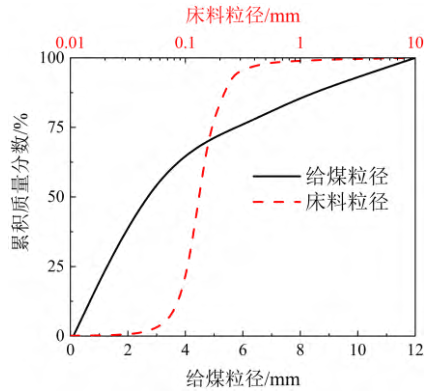


图2 物料粒径分布

Fig.2 Particle size distribution

表2 煤质分析

Table 2 Coal quality analysis

名称	符号	给煤
收到基水分/%	M_{ar}	16.5
空气干燥基水分/%	M_{ad}	2.97
收到基灰分/%	A_{ar}	32.25
干燥无灰基挥发分/%	V_{daf}	42.41
低位发热量/(kJ/kg)	$Q_{net,ar}$	14180
收到基碳/%	C_{ar}	37.87
收到基氢/%	H_{ar}	2.66
收到基氧/%	O_{ar}	9.09
收到基氮/%	N_{ar}	0.68
收到基全硫/%	S_{ar}	0.95

表3 计算工况运行参数

Table 3 Parameters for calculating operating conditions

负荷	90%	70%	50%	30%
一次风率	0.44	0.5	0.56	0.63
总风量/(10 ⁴ ×Nm ³ /h)	110	90	75	62
风温(°C)	305	280	260	240
给煤量/(kg/s)	62.74	46.81	37.8	23.18
静止料层厚度(m)	1.1	1.1	1.1	1.1

2.5 网格划分与收敛判据

在网格划分方面,本文采用结构性网格对 CFB 锅炉进行离散,并在炉膛渐扩段进行适当加密,在综合考虑计算精度和计算成本的条件下,确定网格总数约为 200 万。

通过监测返料阀入口、出口处的循环灰质量流率来计算循环流率,认为当循环流率随着时间趋于平稳时模拟达到稳态,并采用稳定后的数据进行分

析。例如,50%负荷下循环流率变化曲线如图 3 所示,稳定时间在 88s 左右,同理得到不同负荷下的计算稳定时间。后文出现的数据均为稳定后的时均数据。

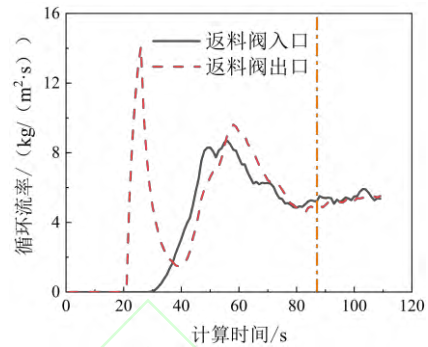


图3 计算稳定判据

Fig.3 Calculation of the stability criterion

3 结果与讨论

3.1 模型验证

本文将 30%负荷时相同试验条件下得到的炉膛实测压力、温度与模拟结果进行对比,如图 4 所示。模拟结果表明压力随高度的升高而降低,由压力变化的剧烈程度可以分为密相区以及稀相区;温度整体随炉膛高度的增加而减小。模拟值与试验值的平均误差在 5%以内,说明了模型计算的准确性。

图 5 为 30%工况下沿炉膛全回路压力变化,压力测点(P1-P7)布置如图 1(a)所示,回路 1-3 代表经过三个分离器的外循环回路。模拟结果表明,炉膛各部分压降变化合理,返料阀底部压力最高,能够形成稳定的料封,以防止炉膛内的气体反窜进入旋风分离器,炉膛密相区的压力次之,为床料流化提供动力,颗粒可以进行稳定的循环。

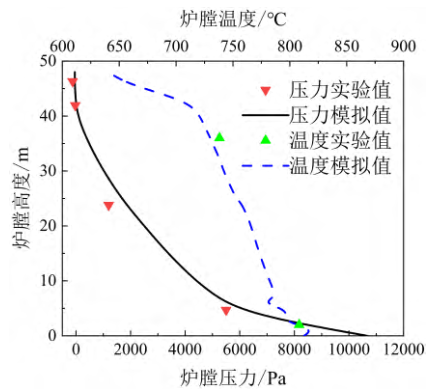


图4 模拟结果可靠性验证

Fig.4 Verify the reliability of the simulation results

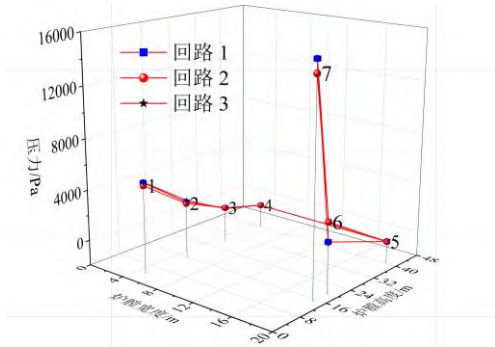


图 5 沿完整回路压力变化

Fig.5 Pressure variation along the complete circuit

3.2 气固流动特性

图 6 为 30% 负荷下炉内三维颗粒浓度分布示意图，可以发现轴向方向，炉膛颗粒分布呈现“下浓上稀”分布规律；而在径向方向，颗粒呈现非均匀分布，且深度、宽度方向颗粒浓度分布有较大差别。

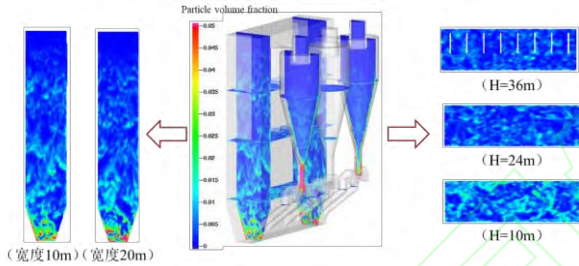


图 6 30% 负荷下炉内颗粒浓度分布

Fig.6 Distribution of particle concentration in furnace at 30% load

3.2.1 轴向气固流动

计算得到 30%、50%、70% 和 90% 负荷下锅炉循环流率（循环倍率）分别为 $3.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (50.7)、 $5.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (41.8)、 $9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (59.5) 和 $11.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (58.2)，即循环流率随锅炉负荷升高而增大。

图 7 为 30%-90% 负荷下压力随炉膛高度的变化曲线，总体上均呈现“上稀下浓”的 S 型物料浓度分布规律。当负荷增大时，总风量增大，参与循环的总颗粒流率增加，更多的颗粒被吹至炉膛上部，导致下部压力和颗粒浓度减小，上部压力和颗粒浓度增加。

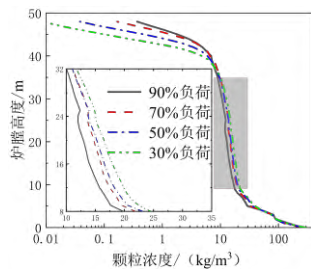
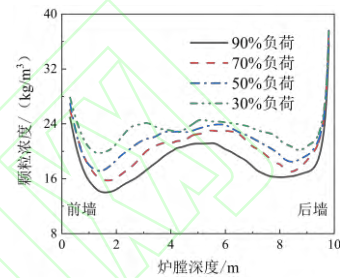


图 7 不同负荷下轴向颗粒浓度分布

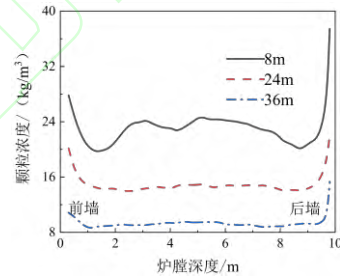
Fig.7 Distribution of axial particle concentrations under different loads

3.2.2 径向气固流动

如图 8 所示，在炉膛 8m 截面，颗粒浓度曲线呈现“W”型分布，而 24m、36m 截面无此分布规律。这是由于炉膛下部锥型段内循环作用强烈，边壁处颗粒下降流受一次风作用，在核心区域形成上升流，导致核心区域颗粒浓度较高。同时由于分离器、返料阀单侧布置于后墙，导致后墙壁面处颗粒浓度显著高于前墙，随着负荷增加，边壁区与核心区颗粒浓度差增大。



(a) 不同负荷 (8m 高度)



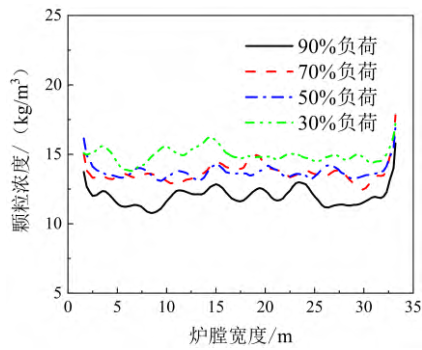
(b) 不同高度 (30% 负荷)

图 8 不同负荷下炉膛深度方向颗粒浓度分布

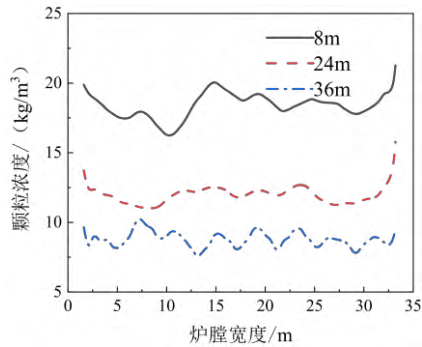
Fig.8 Distribution of particle concentration in the direction of furnace depth under different loads

如图 9 所示，与深度方向颗粒浓度分布相似，炉膛宽度方向颗粒浓度整体同样呈现“两边高、中间低”的分布特征，同时具有较强的对称性，这与宽度方向炉膛结构对称布置有关。值得注意的是，宽度方向上，边壁区与核心区颗粒浓度差较深度方向减小，这是由于宽度方向炉膛尺寸的增大减弱了气固两相流的边壁效应。

此外，90% 负荷下炉膛 36m 截面颗粒浓度分布呈现波浪形，浓度高值与炉膛上部水冷屏、过热器等结构位置对应，说明水冷屏、过热器等结构对宽度方向颗粒浓度分布具有较大影响。



(a) 不同负荷 (24m 高度)



(b) 不同高度 (90% 负荷)

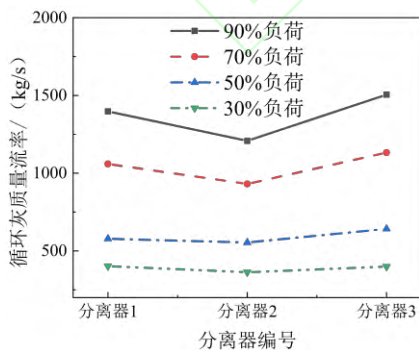
图 9 不同负荷下炉膛宽度方向颗粒浓度分布

Fig.9 Distribution of particle concentration in the width of the furnace chamber under different loads

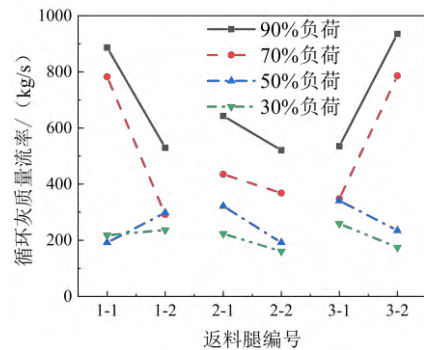
3.2.3 并联多回路流动均匀性

定义相对偏差为某回路颗粒质量流率与平均质量流率的绝对差值再除以平均质量流率，以此来定量说明各回路流动均匀性。

图 10-a 为不同负荷下 CFB 锅炉三个分离器入口颗粒质量流率分布，整体来看，中间分离器具有更小的气、固流率，这与前人研究相符^[32]。同时在流动均匀性方面，30%负荷下平均相对偏差最小，为 0.043；90%负荷下平均相对偏差最大，为 0.079。



(a) 分离器入口



(b) 返料腿出口

图 10 不同负荷下并联回路循环灰流率分布

Fig.10 Distribution of circulating ash flow rate of parallel loops under different loads

本研究中 CFB 锅炉返料阀为特殊的“一分二”结构，即一个返料入口、两个返料出口，这种特殊结构对返料流动均匀性造成影响，图 10-b 为不同负荷下返料腿返料质量流率分布，可以看出，30%负荷下各回路返料流率平均相对偏差为 0.139，高于分离器平均返料相对偏差。同时注意到 90%和 70%负荷下，对于同一立管下的两条返料腿，其流动不均匀性表现出同样的特征：与上方分离器入口同侧的返料腿，其返料质量流率总是较小的。这与分离器结构及布置方式有关，如图 1 所示，颗粒进入分离器后螺旋向下运动，同时立管段较短，颗粒未在立管中均匀分布便进入返料阀，导致入口段一侧返料流率较小。当负荷降低至 50%负荷以下，两侧返料腿的两条返料腿，其返料流率分布特征与高负荷（90%、70%）下相反。

以上结果表明，在“双返料腿”结构下返料腿间的不均匀性远大于分离器间。不过，虽然“一分二”结构下各返料腿间流动不均匀性显著存在，但相比于“单立管单返料腿”结构，炉膛宽度方向返料口个数增加了一倍，对整体返料均匀性仍具有积极影响。

3.3 燃烧和传热特性

图 11 为 70%负荷下炉内温度分布，可以发现，炉膛内部温度场在三维方向上存在不均匀性。

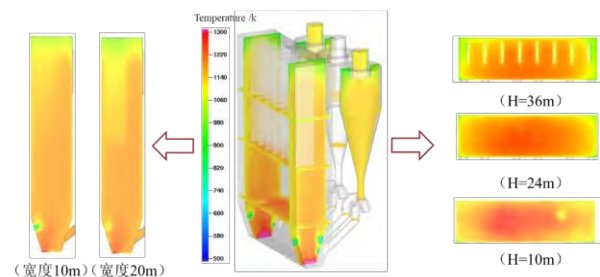


图 11 70%负荷下炉内温度分布

Fig.11 Distribution of temperature in furnace at 70% load

3.3.1 轴向温度分布

图 12 为 CFB 锅炉不同负荷下炉膛轴向温度分布曲线。随着锅炉负荷下降，炉膛温度显著降低。锅炉负荷率每下降 10%，炉内平均温度降低 15-25℃；且由于风量和物料循环量减少，下部燃烧放热不能及时被烟气和固体床料携带向上，炉膛上下温差逐渐增大，轴向温度分布不均匀性增强。

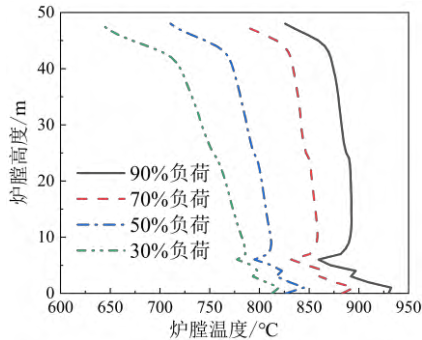
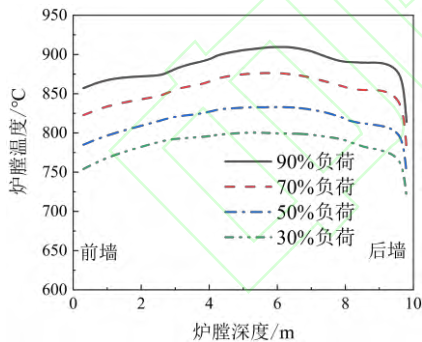


图 12 不同负荷下轴向温度分布

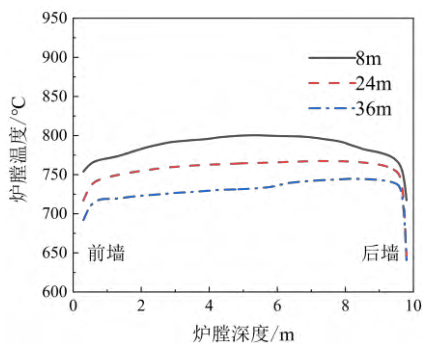
Fig.12 Distribution of axial temperature under different loads

3.3.2 径向温度分布

从图 13 中可得：炉膛深度方向温度分布整体呈现“两边低、中间高”的分布特征，并且由于前墙给煤导致前墙附近温度高于后墙。此外，发现后墙附近存在较大的温度梯度，这与后墙处较高的颗粒浓度有关。



(a) 不同负荷 (8m 高度)

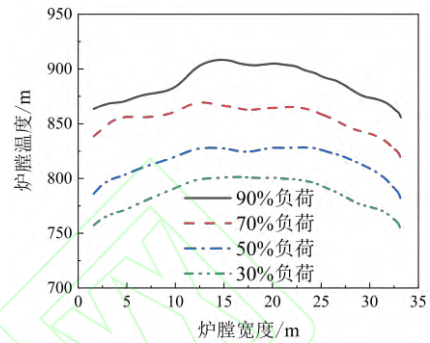


(b) 不同高度 (30% 负荷)

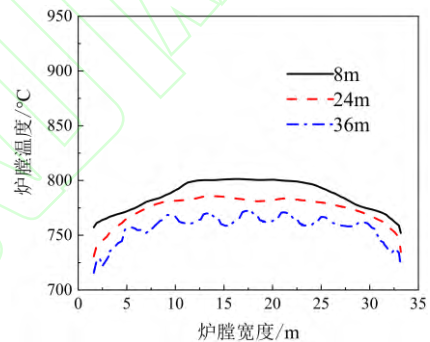
图 13 不同负荷下炉膛深度方向温度分布

Fig.13 Distribution of temperature in the direction of furnace depth under different loads

由图 14 可知，与宽度方向颗粒浓度分布相似，炉膛宽度方向温度分布曲线呈现较强的对称性，左、右墙附近温度梯度接近；并且在 36m 高度同样受水冷屏、过热器影响，换热器壁面温度降低，呈现波浪型分布。



(a) 不同负荷 (8m 高度)



(b) 不同高度 (30% 负荷)

图 14 不同负荷下炉膛宽度方向温度分布

Fig.14 Distribution of temperature in the direction of the width of the furnace chamber under different loads

综合来看，30%-90%负荷工况下，CFB 锅炉流动稳定；低负荷下流场以及温度场均匀性未出现明显降低，30%负荷下并联回路流动均匀性最佳。基于此结果，认为实际锅炉低负荷下流动不稳定以及温度场不均匀问题是由于布风不均以及给煤不均所导致，这一点与相关学者研究结果相符^[33-35]。

3.3.3 传热系数分布

图 15 为不同负荷下 CFB 锅炉轴向传热系数分布。其中，炉膛底部由于敷设大量的耐磨、耐火材料，导致渐缩段壁面的传热系数较低，且随负荷升降变化不十分显著。而在炉膛中上部，随着负荷降低，传热系数沿轴向衰减速率增加。

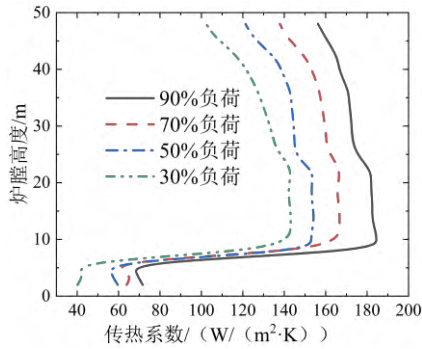


图 15 不同负荷下轴向传热系数分布

Fig.15 Distribution of axial heat transfer coefficients under different loads

图 16 为不同负荷下水冷壁平均传热系数分布, 如图所示, 整体上后墙平均传热系数最大, 这与后墙附近颗粒浓度高有关; 同理, 左右墙平均传热系数接近, 并且低于前墙。随着负荷降低, 30%负荷下, 各壁面传热系数偏差显著增大。

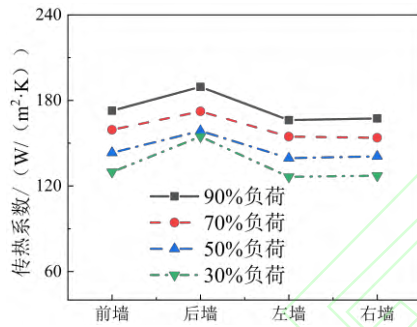


图 16 不同负荷下水冷壁平均传热系数

Fig.16 Average heat transfer coefficient of water wall under different loads

3.4 NO_x 原始排放

图 17 展示了 90%负荷下炉膛内部 NO_x 浓度分布, 发现沿炉膛轴向方向 NO_x 浓度分布存在不均匀性。

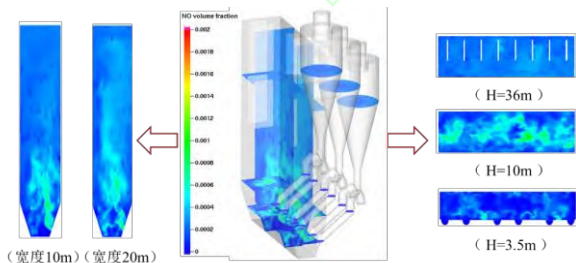


图 17 90%负荷下炉内 NO_x 浓度分布

Fig.17 Distribution of NO_x concentration in furnace at 90% load

进一步分析不同负荷下 NO_x 浓度的轴向分布情况, 如图 18 所示。整体来看, 沿炉膛高度方向, NO_x 浓度呈现先增加后减小的变化趋势, 在炉膛 8m 高

度以下的锥形段区域, NO_x 浓度较低; 在 10m 高度截面附近达到峰值。10-20m 区域内, NO_x 浓度迅速下降, 而在 20m 以上区域, NO_x 浓度的下降趋于缓慢, 整体保持相对稳定。

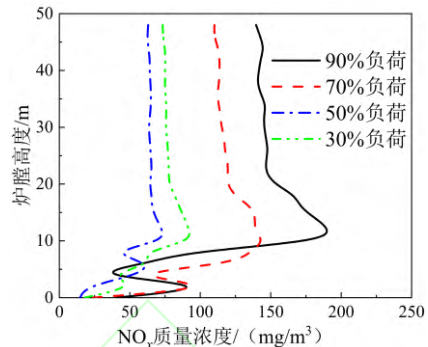


图 18 不同负荷下 NO_x 浓度轴向分布

Fig. 18 Distribution of axial NO_x concentration under different loads

图 19 展示了炉膛出口 NO_x 浓度随负荷的变化关系, 由图可得: 30%-90%负荷范围内, 随着锅炉负荷降低, NO_x 原始排放浓度先减少后增加, 拐点在 50%负荷左右, 这与团队之前的研究结论一致^[14]。

大量研究表明, NO_x 生成与排放对温度和氧量十分敏感^[14,36,37]。图 13 显示, 炉膛温度随负荷降低下降显著; 进一步分析计算数据可知, 此时密相区焦炭含量增加, CO 浓度升高, 还原性气氛增强。从而使挥发分氮氧化生成 NO_x 的选择性降低^[38], 并促进了焦炭对 NO 净还原作用^[39,40], 导致高负荷段内 NO_x 排放降低。

然而, 低负荷下, 出于床料安全流化考虑, 采用较高过量空气系数并维持高一次风量, 削弱了低氧燃烧和空气分级对 NO_x 生成的抑制作用, 炉膛整体氧量较高, 还原性气氛减弱, 又导致 NO_x 排放再次升高。

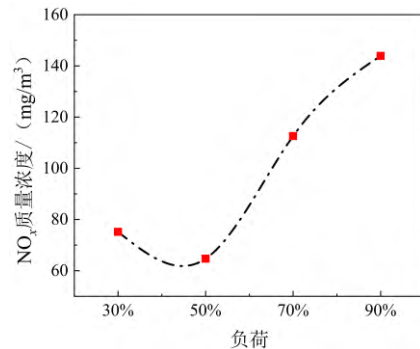


图 19 不同负荷下炉膛出口 NO_x 浓度

Fig.19 NO_x concentration at furnace outlet under different loads

4 结 论

为探究循环流化床锅炉深度调峰特性, 本文采用 CPFD 方法, 研究了某 350MW 超临界 CFB 锅炉 30-90% 宽负荷范围内的气固流动、燃烧和传热特性。主要结论如下:

(1) 随着负荷的升高, 循环流率和稀相区颗粒浓度均有所增加; 同时炉膛上下温差减小, 温度分布均匀性增强, 轴向传热系数的衰减速率降低。

(2) 炉膛后墙的颗粒浓度始终高于前墙, 且后墙温度低于前墙, 传热系数则高于前墙; 颗粒浓度和温度分布在炉膛宽度方向上表现出较强的对称性, 在炉膛中上部受水冷屏、过热器等悬吊受热面影响呈现波浪状分布。

(3) 中间分离器的气固质量流率低于两侧分离器, “一分二”的返料阀结构导致并联回路流动均匀性降低; 在低负荷工况下, 虽然并联回路的流动均匀性有所改善, 但水冷壁各壁面的传热系数偏差却进一步增大。

(4) 沿炉膛高度方向, NO_x 浓度分布呈现先增加后减小的特征; 随着负荷的降低, NO_x 的原始排放浓度先减小后增加, 拐点大约出现在 50% 负荷左右。

参考文献(References)

- [1] 北极星电力新闻网. 中电联发布《2024 年上半年全国电力供需形势分析预测报告》[R/OL]. (2024-07-25) [2024-07-26]. <https://news.bjx.com.cn/html/20240725/1390931.shtml>.
Polaris Power News Network. China Electricity Council released the "Analysis and Forecast Report on the National Electricity Supply and Demand Situation in the First Half of 2024" [R/OL]. (2024-07-25) [2024-07-26]. <https://news.bjx.com.cn/html/20240725/1390931.shtml>.
- [2] 吕俊复, 蒋苓, 柯希玮, 等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51 (1): 514-522.
LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, et al. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51 (1): 514-522.
- [3] 张广才, 周科, 鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46 (9): 17-23.
ZHANG Guangcai, ZHOU Ke, LU Fen, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46 (9): 17-23.
- [4] 王雪瑶, 雷福林, 吴学智, 等. 循环流化床三维全循环模拟及实验验证[J]. 工程热物理学报, 2013, 34 (7): 1287-1290.
WANG Xueyao, LEI Fulin, WU Xuezhi, et al. Three dimensional full-loop numerical simulation of a CFB and experimental verification[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(7): 1287-1290.
- [5] 高明明. 大型循环流化床锅炉燃烧状态监测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
GAO Mingming. Research on Combustion State Monitoring of Large Circulating Fluidized Bed Boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [6] 岳光溪. 循环流化床技术发展与应用(下)[J]. 节能与环保, 2004, 33 (1): 2-5.
YUE Guangxi. Development and application of CFB technology (II) [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2004, 33 (4): 231-235.
- [7] 张缦, 张素花, 郭学茂, 等. 流态对 CFB 燃烧气体污染物排放的影响及其应用[J]. 工业锅炉, 2020, 7 (3): 11-17.
ZHANG Man, ZHANG Suhua, GUO Xuemao, et al. The effect and application of solid-gas-two-phase flow pattern on the emission in the circulating fluidized bed combustion[J]. Industrial Boiler, 2020, 7 (3): 11-17.
- [8] IRFAN N. Control of gaseous emissions by flue gas treatment[D]. West Yorkshire: The University of Lead, 1995.
- [9] 刘强. CFB 锅炉燃烧温度与污染物排放控制技术[J]. 工业锅炉, 2017 (5): 43-45.
LIU Qiang. Combustion temperature and pollutant emission control technology of circulating fluidized bed boiler [J]. Industrial Boiler, 2017 (5): 43-45.
- [10] 王虎, 范浩东, 辛胜伟, 等. 超临界循环流化床锅炉深度调峰技术研究与应用[J]. 洁净煤技术, 2022, 28 (12): 11-17.
WANG Hu, FAN Haodong, XIN Shengwei, et al. Research and application of depth peak regulation technology for supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28 (12): 11-17.
- [11] 吕俊复, 尚曼霞, 柯希玮, 等. 粉煤循环流化床燃烧技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48 (1): 43-437.
LÜ Junfu, SHANG Manxia, KEXIWEI, et al. Powdered coal circulating fluidized bed combustion technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48 (1): 430-437.
- [12] YUE Guangxi, LÜ Junfu, ZHANG Hai, et al. Design theory of circulating fluidized bed boilers[C]//18th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Canada: [s.n.], 2005: 135-146.
- [13] 张广才, 周科, 鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46 (9): 17-23.
ZHANG Guangcai, ZHOU Ke, LU Fen, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46 (9): 17-23.
- [14] KE X, ZHU S, HUANG Z, et al. Issues in deep peak regulation for circulating fluidized bed combustion: Variation of NO_x emissions with boiler load[J]. Environmental Pollution, 2023, 318: 120912.
- [15] 董信光, 孔庆雨, 孙健, 等. 冷烟气再循环对锅炉深度调峰能力影响[J]. 热力发电, 2019, 48 (5): 126-132.
DONG Xinguang, KONG Qingyu, SUN Jian, et al. Influence of cold flue gas recirculation on depth peak - load regulation capacity of boiler [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48 (5): 126-132.
- [16] 段守保, 辛胜伟, 顾从阳, 等. 循环流化床锅炉低负荷下超低 NO_x 排放研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (S2): 299-303.

- DUAN Shoubao, XIN Shengwei, GU Congyang, et al. Research on ultra-low NO_x emission of CFB boiler under low load[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27 (S2): 299-303.
- [17] 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.
- [18] CAI Runxia, KE Xiwei, LYU Junfu, et al. Progress of circulating fluidized bed combustion technology in China: a review[J]. *Clean Energy*, 2017, 1 (1): 36-49.
- [19] 程乐鸣, 许霖杰, 夏云飞等. 600MW 超临界循环流化床锅炉关键问题研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35 (21): 5520-5532.
- CHENG Leming, XU Linjie, XAI Yufei, et al. Key Issues and Solutions in Development of the 600 MW CFB Boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35 (21): 5520-5532.
- [20] 杨照, 刘雪敏, 张肖阳, 等. 循环流化床锅炉炉膛流动特性数值模拟进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46 (10): 3365-3376.
- YANG Zhao, LIU Xuemin, ZHANG Xiaoyang, et al. Numerical simulation progress of flow characteristics in a CFB boiler[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46 (10): 3365-3376.
- [21] W K H Ariyaratne, C. Ratnayake, M C Melaen. Application of the MP-PIC method for predicting pneumatic conveying characteristics of dilute phase flows[J]. *Powder Technol*, 2017, 310: 318-328.
- [22] WANG Q, YANG H, WANG P, et al. Application of CPFD method in the simulation of a circulating fluidized bed with a loop seal Part II—Investigation of solids circulation[J]. *Powder Technology*, 2014, 253: 822-828.
- [23] 曾胜庭, 陈曦, 马琨晨, 等. 300MW 循环流化床气固流动特性的 CPFD 模拟[J]. *新能源进展*, 2018, 6 (3): 208-216.
- ZENG Shengting, CHEN Xi, MA jinchun, et al. CPFD Simulation on Gas-Solid Hydrodynamics of a 300 MW Circulating Fluidized Bed Boiler[J]. *Advances in new and renewable energy*, 2018, 6(3): 208-216.
- [24] Shi X, Sun R, Lan X, et al. CPFD simulation of solids residence time and back-mixing in CFB risers[J]. *Powder Technology*, 2015, 271, 16-25.
- [25] LEE B H, KIM M K, BAE Y H, et al. Effect of bed particle size on the gas-particle hydrodynamics and wall erosion characteristics in a 550 MWe USC CFB boiler using CPFD simulation[J]. *Energy*, 2022, 254: 124263-124278.
- [26] GAO K, KE X, DU B, et al. Simulation of gas-solid flow characteristics of the circulating fluidized bed boiler under pure-oxygen combustion conditions[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2024, 70: 9-19.
- [27] 侯跃华, 刘海玉, 申欣, 等. 低负荷下 CFB 锅炉二次风优化对 NO_x 排放影响的数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(9): 3588-3598.
- HOU Yuehua, LIU Haiyu, SHEN Xin, et al. Numerical Simulation of the Influence of CFB Boiler Secondary Air Optimization on NO_x Emission Under Low Load[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44 (9): 3588-3598.
- [28] 李静. 基于 CPFD 某 350 MW 循环流化床锅炉颗粒多尺度特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- LI Jing. Study on multi-scale characteristics of particles in a 350 MW circulating fluidized bed boiler based on CPFD[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [29] CHANG J, MA X, WANG X, et al. CPFD modeling of hydrodynamics, combustion and NO_x emissions in an industrial CFB boiler[J]. *Particology*, 2023, 81: 174-188.
- [30] 张瑞卿, 杨海瑞, 吕俊复. 应用于循环流化床锅炉气固流动和燃烧的 CPFD 数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33 (23): 75-83.
- ZHANG Ruiqing, YANG Hairui, LÜ Junfu. Application of CPFD Approach on Gas-solid Flow and Combustion in Industrial CFB Boilers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33 (23): 75-83.
- [31] 沈宇帆, 韩诚良, 柯希玮, 等. 烧结烟气的循环流化床焚烧处理方法[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(10): 4051-4059.
- SHEN Yufan, HAN Chengliang, KE Xiwei, et al. Circulating fluidized bed incineration treatment of sintering flue gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49 (10): 4051-4059.
- [32] 莫鑫, 黄逸群, 向柏祥, 等. 燃煤循环流化床锅炉中并联分离器的性能实验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41 (10): 2503-2507.
- MO Xin, HUANG Yiqun, XIANG Baixiang, et al. Experimental study on the performance of parallel cyclones in a coal-fired CFB boiler[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41 (10): 2503-2507.
- [33] PAIVA J M, PINHO C, FIGUEIREDO R. Influence of the distributor plate and operating conditions on the fluidization quality of a gas fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2008, 196 (3): 342-61.
- [34] KONG D, WANG S, YU J, et al. Investigation of non-uniform characteristics in a 300 MW_{th} circulating fluidized bed with different coal feeding modes[J]. *Advanced Powder Technology*, 2023, 34(7): 104036.
- [35] 胡南, 徐梦, 张曼, 等. CFB 锅炉大型化气固流动非均匀性研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26 (3): 1-8.
- HU Nan, XU Meng, ZHANG Man, et al. Research on non-uniformity of gas-solid flow in large-scale CFB boilers[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26 (3): 1-8.
- [36] TOURUNEN A, SAASTAMOINEN J, NEVALAINEN H. Experimental trends of NO in circulating fluidized bed combustion[J]. *Fuel*, 2009, 88 (7): 1333-1341.
- [37] 么瑶, 朱建国, 欧阳子区, 等. 细粉半焦预热燃烧过程中氮的迁移特性实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36 (8): 2188-2194.
- YAO Yao, ZHU Jianguo, OUYANG Ziqu, et al. Experimental study on nitrogen transformation in pulverized char during preheated combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36 (8): 2188-2194.
- [38] 欧阳子区, 朱建国, 吕清刚. 无烟煤粉经循环流化床预热后燃烧特性及 NO_x 排放特性实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34 (11): 1748-1754.
- OUYANG Ziqu, ZHU Jianguo, LYU Qinggang. Experimental study on combustion and NO_x emission of pulverized anthracite coal preheated by a circulating fluidized bed [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34 (11): 1748-175.

- [39] 柯希玮, 蔡润夏, 杨海瑞, 等. 循环流化床燃烧的 NO_x 生成与超低排放[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (2): 390-396.
KE Xiwei, CAI Runxia, YANG Hairui, et al. Formation and Ultra-low Emission of NO_x for Circulating Fluidized Bed Combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (2): 390-396.
- [40] 李竞岌, 张翼, 杨海瑞, 等. 煤中灰成分对 CO 还原 NO 反应影响的动力学研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41 (10): 2448-2453.
LI Jingji, ZHANG Yi, YANG Hairui, et al. Study of the effect of ash composition in coal on the kinetic parameters of NO reduction reaction by CO[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41 (10): 2448-2453.

