

CFB 锅炉大型化气固流动非均匀性研究进展

胡 南¹, 徐 梦¹, 张 纉², 杨海瑞², 张守玉³, 赵 冰⁴, 巩太义⁴, 王家林⁴

(1. 长春工程学院 吉林省水利电力工程物理级仿真与安全科技创新中心, 吉林 长春 130012; 2. 清华大学 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084; 3. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 4. 华电国际电力股份有限公司天津开发区分公司, 天津 300270)

摘要:循环流化床(CFB)锅炉大型化发展的必然结果是炉膛截面尺寸和并联回路的增加,流化床锅炉炉内燃烧和传热过程很大程度上取决于炉内气固流动特性,因此横向气固流动均匀性对锅炉的安全运行具有重要影响。笔者从静态和动态 2 个方面分析了大型 CFB 锅炉气固流动横向非均匀性问题。静态非均匀性问题包括布风均匀性和并联回路引起的气固流量沿截面的偏差以及各回路流量分配偏差,在稳定运行条件下不随时间变化。分离器的阻力特性是分离器的重要特性参数,在相同气相流量下,固体颗粒浓度对分离器压降的影响是非单调的,分离器压降随固体颗粒浓度的增加先减小后缓慢增加,理论上并联回路控制方程的解存在多值性,因此多回路并联条件下各分离器循环流率存在偏差。CFB 锅炉炉内悬吊屏影响颗粒局部浓度分布,进而影响各分离器固体颗粒循环流率的分配。分离器出口烟道的形式对分离器气固两相的流量分配存在不容忽视的影响。在布风均匀性方面,两侧进风和后墙进风方式均会引起风室不同程度的布风不均。大型 CFB 锅炉在低负荷运行过程中,存在炉膛两侧床压大幅长周期波动的现象,该现象即为动态气固流动横向非均匀性问题,其产生的主要原因是大截面的布风系统,一次风降低导致的布风失稳以及多回路并联的不均匀性。横向波动数学模型主要是基于气固两相流系统横向波动固有频率的假设,当扰动接近系统固有频率时,会产生较大幅度的横向波动。目前动态非均匀性问题还缺少实验室尺度的深入系统研究,相关机理仍较模糊,是气固流动非均匀性问题的主要研究方向,同时布风不均和密相区气固流动的耦合作用还有待进一步研究。

关键词:大型循环流化床锅炉;气固流动;非均匀性;分离器;横向波动;循环流率**中图分类号:**TK224 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2020)03-0001-08**Research on non-uniformity of gas-solid flow in large-scale CFB boilers**HU Nan¹, XU Meng¹, ZHANG Man², YANG Hairui², ZHANG Shouyu³, ZHAO Bing⁴, GONG Taiyi⁴, WANG Jialin⁴

(1. Jilin Province S&T Innovation Center for Physical Simulation and Security of Water Resources and Electric Power Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 4. Huadian Power International Co., Ltd. TEDA Branch, Tianjin 300270, China)

Abstract: The inevitable result of circulating fluidized bed (CFB) boilers scale-up is the increasing of furnace cross-sectional size and the parallel circuit. The coal combustion and heat transfer in a fluidized bed boiler are determined by the characteristics of gas-solid flow in the furnace. The uniformity of gas-solid flow has an important impact on the safe operation of CFB boiler. In this paper, the static and dynamic lateral non-uniformity of gas-solid flow in large CFB boilers were analyzed. The static non-uniformity problems include the air dis-

收稿日期:2020-02-29; **责任编辑:**张海宁 **DOI:**10.13226/j.issn.1006-6772.20022903**基金项目:**吉林省产业技术研究与开发专项资助项目(2019C056-3); 中国华电集团有限公司重大科技项目计划(CHDKJ19-01-88)**作者简介:**胡 南(1985—),男,江苏泗阳人,教授,从事循环流化床锅炉相关研究。E-mail: hn04@tsinghua.org.cn。通讯作者:张纉(1971—),副教授,从事生物质清洁利用、循环流化床燃烧相关研究。E-mail: zhangman@tsinghua.edu.cn**引用格式:**胡南,徐梦,张纉,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.



移动阅读

tribution uniformity, the gas-solid flow deviation along the section caused by the parallel circuit and the flow distribution deviation of each circuit, which does not change with time under the stable operation condition. The resistance characteristic of separator is an important characteristic parameter of cyclone. Under the same gas phase flow rate, the effect of solid concentration on the pressure drop of cyclone is non-monotonic. The cyclone pressure drop decreases first and then slowly increases as the concentration of solid particles increasing. The solutions of the governing equation of multi-cyclone system are multi-valued. Therefore, the solid circulating rate of each cyclone has deviation under the condition of multi loop parallel. The hanging platen superheater in CFB boiler affects the local concentration distribution of particles and then affects the distribution of solid particle circulation flow rate of each separator. In the aspect of air distribution uniformity, the way of air inlet from both sides and the back wall will lead to uneven air distribution in different degrees. The outlet duct of the cyclones has a significant influence on gas-solid flow distribution of the cyclones. The large margin and long-term pressure fluctuation in CFB furnace is discovered during lower load operation, which is the dynamic lateral non-uniformity. The large cross-section air distribution, reduction of the primary air and the multi-circuit parallel are main reasons for this problem. The mathematical model of lateral fluctuation is based on the assumption of natural frequency of lateral fluctuation of gas-solid two-phase flow system. When the disturbance frequency is close to natural frequency, lateral wave will be generated. The dynamic non-uniformity problem is lack of in-depth and systematic research on the laboratory scale, and the mechanism is still relatively vague, which is the main research direction of the gas-solid flow non-uniformity problem. At the same time, the coupling effect of uneven wind distribution and dense phase gas-solid flow needs further study.

Key words: large-scale CFB boiler; gas-solid flow; non-uniformity; cyclone; lateral fluctuation; circulating rate

0 引言

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉具有燃料适用范围广、低成本燃烧中脱硫、低氮氧化物排放等优点,是大规模清洁利用高硫及高灰煤、矸石、中煤、煤泥和生物质等燃料的最佳选择^[1]。CFB燃烧技术始终向大型化、高参数方向发展。近年来,我国在超临界循环流化床锅炉发电技术方面取得了突破,引领世界在该领域的发展^[2-5]。目前我国正在运行的超临界 CFB 锅炉已达 40 台。同时,在超超临界 CFB 锅炉的研发、设计方面已开展大量工作^[6-10]。2019 年初,2 项 660 MW 超超临界 CFB 燃煤发电项目被正式列为国家电力示范项目,标志着我国 CFB 发电开始迈向超超临界阶段。

在 CFB 锅炉大型化发展过程中,随着锅炉参数提高、蒸发量增大,锅炉结构也在不断发展变化。首先,为了保证足够的反应容积和更多受热面的布置,炉膛截面积和高度均相应增加。600 MW 超临界 CFB 锅炉炉膛高度已经超过 52 m,宽度超过 25 m。清华大学^[11-14]通过对超高炉膛纵向气固流动特性的试验和理论研究,实现了炉膛内床压的优化,有效降低了水冷壁的磨损,提高了机组的经济性和可用性。其次,由于二次风穿透能力限制,随着炉膛截面积的增加,二次风无法射入到炉膛中心区域,导致炉膛中心形成贫氧区,严重影响燃烧效率。为了解决该问题,可采用大宽深比的单布风板炉膛,减少二次风穿透所需要的射程,对于 300 MW 以上等级的 CFB 锅炉,布风板的宽深比通常在 5 以上;也可在炉

膛底部从中间分开,形成双布风板的“裤衩腿”式炉膛结构,二次风从支腿内侧和外侧同时注入炉膛^[15]。对于更高参数的 CFB 锅炉,也可考虑双炉膛并联和环形布风的结构形式^[16-19]。第三,旋风分离器的数量和布置方式不断更新。为了保证分离器效率,分离器设计必须满足特定准则,不能简单按比例放大,因此大型 CFB 锅炉均采用多分离器并联布置方案。对于 300~350 MW 的 CFB 锅炉通常为 3 个分离器在一侧并联布置,白马电厂 600 MW 超临界 CFB 锅炉为 6 个分离器;Foster Wheeler 公司紧凑型布置的 CFB 锅炉,采用较小直径的分离器,分离器个数多于其他炉型;波兰 460 MW 超临界 CFB 锅炉,在炉膛两侧共布置 8 个旋风分离器。

由于锅炉结构上的变化,具有超大截面和多分离器并联结构的大型 CFB 锅炉,在运行过程中发现的横向参数非均匀性问题,逐渐成为关注的焦点^[20-25],主要包括热力学横向非均匀性、气固组分的横向非均匀性以及气固流动的横向非均匀性。热力学横向非均匀性主要是指温度和传热系数在水平方向的偏差。张攀等^[24]对国内 2 台 300 MW CFB 锅炉进行了测试,在不同运行工况下炉膛内均存在明显的横向温度偏差和热流密度偏差,同时也发现,在锅炉热负荷下降时,温度和热流密度横向非均匀性更加严重。气固组分横向非均匀性主要是由于给煤进入炉膛密相区后,颗粒横向扩散能力有限,使煤燃烧和放热横向分布不均。李金晶等^[25]在 300 MW CFB 锅炉上发现,沿横向炉膛中间床温明显高于两侧,通过调节给煤点分配,可改变温度分布。胡南

等^[26]通过总结已有横向扩散系数研究成果,给出了大型 CFB 锅炉密相区固体横向扩散系数的取值范围。

气固流动不均匀性主要是由于炉膛结构、气固流动特性等原因导致,由于气固流动对气固组分分布和局部传热影响显著,因此本文重点针对 CFB 锅炉大型化过程中产生的新的气固流动非均匀性问题,主要包括超大布风截面的布风非均匀性问题、多分离器并联的气固分配非均匀性问题以及特殊工况下产生的横向波动和翻床问题。其中前二者在稳定运行条件下,不随时间变化,属于静态非均匀性问题;床压波动和翻床问题属于动态气固流动横向非均匀性问题。

1 静态气固流动非均匀性

1.1 多分离器并联结构

分离器是 CFB 系统重要的组成部分。分离器阻力特性是分离器设计的重要参数,对于多回路并联的大型 CFB 锅炉,分离器阻力特性决定各并联回路的气固流量分配。气相流量一定的前提下,携带固相颗粒的质量浓度将影响分离器压降。早期试验已发现,分离器压降随颗粒浓度增大呈先减后增的非单调特性^[27-29]。当颗粒浓度小于拐点处颗粒浓度时,固相浓度升高增加了颗粒与壁面撞击的几率,导致两相流的动量损失增加,分离器内湍流强度减小,导致分离器压降减小。当颗粒浓度进一步增加,大于拐点处颗粒浓度时,在分离器内颗粒/颗粒团与气体的相互作用增加,导致分离器压降随颗粒浓度的增加而增加^[27]。

分离器的压降 ΔP_c 一般表述为

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} \rho_g V_i^2 f_p f_g \quad (1)$$

其中 f_g 、 f_p 分别为气相和颗粒相修正系数; V_i 为分离器入口气体速度, m/s; ρ_g 为气相密度, kg/m³。气体修正系数 f_g 主要取决于分离器入口和气体出口的横截面积之比。Baskakov 等^[27]提出了一个简便的关联式表征颗粒浓度对分离器压降的影响,即

$$f_p = \frac{1}{1 + a_1 C_p^{a_2}} + a_3 C_p \quad (2)$$

式中, C_p 为分离器入口处颗粒浓度; a_1 、 a_2 、 a_3 为与分离器结构有关的系数。

基于分离器压降随入口颗粒浓度增加先降后升的关系,在稳定运行时,即使各分离器的压降相等且气体流量相同的情况下,入口颗粒浓度仍有可能不同,如图 1 所示^[30]。在理论研究方面, Grace

等^[31-32]提出并联分离器系统内气固流动的多解方程,认为系统稳定运行的 2 个约束条件是各并联分离器的压降相等及气体和固体的质量守恒。Mo 等^[33]建立了并联多分离器内气固流动的控制方程组。对于双分离器并联系统,气固两相流的控制方程组存在一个自由度,因而具有多值性,从理论上论证了分离器固体循环流率偏差的原因。

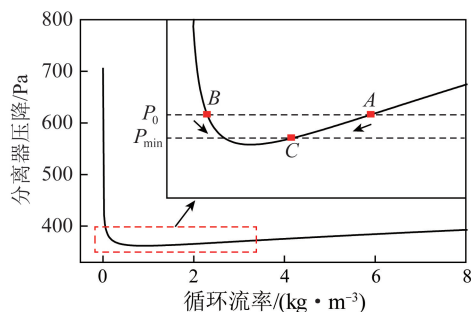


图 1 分离器压降随循环流率变化^[30]

Fig.1 Pressure drop of cyclone changing with solid circulating rate^[30]

许多科研人员在多分离器的模化试验方面开展了相关工作,对于单侧 3 分离器、4 分离器,双侧布置的 6 分离器以及环形布置的 6 分离器结构进行试验研究,见表 1。研究的核心问题是在不同风速、不同床料量的运行条件下,各个回路的循环流率、分离器压降以及提升管内的压力分布。中科院、浙江大学和重庆大学分别针对不同形式的多回路 CFB 锅炉进行了数值模拟^[6,39-40]。

表 1 大型 CFB 锅炉冷态模化试验

Table 1 Experiments of cold model for large scale CFB boiler

分离器	床高/m	截面/(m×m)	风速/(m·s ⁻¹)	来源
3	1.9	1.40×0.40	0.83~1.08	文献[34]
3×2	5.8	0.92×0.42	3.28~4.69	文献[35]
3×2	5.5	0.70×0.40	1.5~1.9	文献[36]
4	5.8	1.20×0.32	2.79~3.98	文献[37]
6(环形)	8.0	1.50×0.96	4.0~5.0	文献[38]

研究表明^[35],忽略并联分离器及入口段间的微小加工差异,理论上对于纯气相的流动,各分离器的气体流量相近,且分离器阻力越大,流量一致性越高,炉膛出口结构偏差所引起的气相流量偏差很小。在两相流条件下,一侧并联 3 个分离器中,中间分离器循环流率和压降均较小,且随着风速增加,循环流率偏差会进一步加大^[6,35,38]。循环流率的偏差原因是内墙边壁处的颗粒浓度高,而两侧分离器附近的炉墙面积更大。王法军等^[37]对单侧 4 分离器进行研究得到了相反的规律,即中间 2 个分离器的循环流率较高,循环流率偏差同样随风速增加而增

加,其主要原因是两侧分离器与中间2个分离器的入口角度不同。

炉内屏式过热器和尾部烟道对气固流量分配的影响不可忽略。许霖杰等^[7]、王超^[39]等通过带有悬吊屏的CFB锅炉炉膛内数值模拟发现,悬吊屏附近颗粒浓度较高,合理布置悬吊屏,可影响内部流场,提高中间分离器的循环流率。郭强等^[41]通过数值模拟研究了分离器出口烟道形式对分离器内流量分配的反作用,研究发现,分离器出口烟道结构对并联三分离器内的烟气流动特性有较大影响。

1.2 超大截面的布风均匀性

CFB锅炉的布风系统是CFB锅炉的重要组成部分之一,包括风室、布风板以及风帽。布风系统的主要作用是使流化气体沿截面均匀流出,同时防止颗粒落入风室。CFB锅炉风室进风方式主要包括两侧进风和后墙进风。相关测试和模拟研究均发现^[42-47],目前大型CFB锅炉的布风均匀性均有待提高,而进风方式对于布风均匀性的影响十分明显。对于两侧进风形式,风量呈两侧风帽流量高、中间风帽流量略低的分布^[44];对于梯形风室后进风形式,表现为远离进风口一侧风帽流量偏大^[45]。布风非均匀程度主要受布风系统压降与炉膛压降之比(压降比)影响。随布风面积的增加,布风非均匀性进一步加剧,甚至出现局部床层压力波动变大、流化死区、漏渣等现象,严重影响锅炉的稳定运行和燃烧效率。在布风不均匀条件下,气固流动横向分布也存在偏差,同时反作用于供风系统,床面气固系统与布风系统的耦合作用研究还较匮乏。

2 动态气固流动非均匀性

2.1 锅炉均匀性动态非均匀现象

对于多分离器并联的大型CFB锅炉,分离器间气固流动偏差是由于炉膛结构、分离器特性产生,而布风均匀性是由于风室结构和风帽阻力等原因产生,在运行过程中偏差客观存在并保持相对稳定,属于静态横向偏差。动态气固流动的非均匀性,主要是指在不做干预的情况下,气固流动的非均匀性不断变化。对于裤衩腿型锅炉,曾发生物料不断在一侧布风板堆积的“翻床”现象,严重阻碍锅炉的正常运行,随着研究人员对该问题的深入认识以及在运行过程中增加了优化控制,“翻床”问题逐渐得到解决^[25,48],近期已鲜有相关研究报道。工程运行经验表明,大型CFB锅炉在低负荷条件下会产生两侧压力大幅度、长周期交替波动的动态横向偏差现象(图2),并引起炉膛温度偏差(图3),对锅炉的安全

运行产生更加严重的危害^[49-50]。

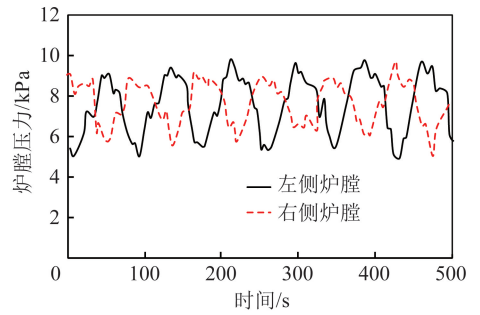


图2 CFB锅炉床压横向波动^[41]

Fig.2 Lateral fluctuation of bed pressure in CFB boiler^[41]

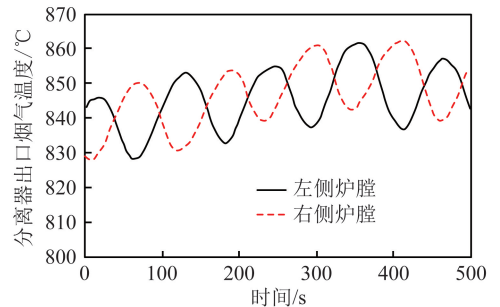


图3 分离器出口烟气温^[41]

Fig.3 Flue gas temperature of cyclone outlet^[41]

李金晶等^[21]认为,形成床压横向波动的条件包括大尺度的炉膛截面、多条主循环回路并联的结构设计、母管制的流化风供给系统和炉膛内特定的流态。运行数据发现,只有当一次风量下降到一定值后,才会发生横向波动现象。由于一次风量的降低,布风系统阻力下降,因此布风稳定性被破坏。另一方面,返料量等于分离器捕捉下来的相对大颗粒流量,但返料阀内存有物料,因此返料阀对返料流量具有迟滞作用,而返料风为母管制供风系统,不同返料阀也会产生相互影响,这也是产生周期扰动的原因之一^[20]。

2.2 床压横向波动理论

在理论方面,姜华伟等^[49]建立了CFB锅炉床压横向波动的非线性浅床长波驻波模型以及密相区气固流态化数学模型,床面椭圆余弦波的波速 C 为

$$C = C_0 K_{gs} \left(\frac{U_{g0}}{U_g} \right)^2 \quad (3)$$

$$C_0 = \sqrt{gH_e \left\{ 1 + \frac{X}{H} \left[-1 + \frac{1}{k^2} \left(2 - 3 \frac{E(k)}{K(k)} \right) \right] \right\}} \quad (4)$$

式中, U_g 为流化风速,m/s; U_{g0} 为满负荷运行条件下的密相床平均流化风速,m/s; K_{gs} 为气固流动修正系数,无量纲; H_e 为密相区膨胀床高,m; H 为静床高,m; X 为波动幅度,m; k 为椭圆积分或椭圆函数的模数 $K(k)$ 和 $E(k)$ 分别为第1类和第2类完全椭圆

圆积分。

对于宽度为 L 的矩形截面流化床,床压横向波动周期 T 为

$$T = \frac{2L}{C} \quad (5)$$

模型分析了静床高对床压横向波动时炉内床压分布、床压波动幅度和周期、活性区和非活性区床高、非活性区空率率分布的影响。认为随着静床高增加,床压横向波动幅度随静床高的增加呈正比增大趋势,从而床面波速增加,床压横向波动往返周期随之减小^[49]。

文献[50]建立了基于气固系统固有频率的压力波动简化模型,预测了平均床压和波动周期的关系。但目前对于横向波动仅停留在大型 CFB 锅炉运行过程中实测数据和理论模型分析上,缺少系统的试验数据支撑。文献[45]中基于横向波动固有频率的假设给出了微分方程,在扰动条件下方程为

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \omega_0^2 X + 2\beta \frac{dX}{dt} = F_0 \cos \Omega t \quad (6)$$

式中, β 为阻尼系数, s^{-1} ; F_0 为横向扰动强度,其物理意义为扰动使密相区所有颗粒产生的最大加速度, m/s^2 ; ω_0 为气固系统横向波动的固有角频率, s^{-1} ; Ω 为扰动角频率, s^{-1} 。

综合考虑床尺寸、颗粒性质、床压以及流化风速等因素,波动固有频率的计算关联式为

$$\omega = a \frac{1}{L'} \sqrt{\frac{P_b}{\rho_s c_s} \left(\frac{U_g}{U_{g0}} \right)^2} \quad (7)$$

式中, ρ_s 为颗粒密度, kg/m^3 ; c_s 为颗粒体积浓度,无量纲; a 为无量纲系数; L' 为横向波动发生方向几何尺寸, m ; P_b 为平均床层压降, Pa 。

式(6)的近似解析式为

$$\Delta P = \frac{2\sqrt{2} P_b F_0}{L \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,扰动 F_0 越强,波动幅度越大;阻尼 β 越小、扰动频率和固有频率越接近,波动幅度越大。模型关键是选择合理选择阻尼系数 β ,理论上阻尼系数与流化风速和颗粒性质有关。由式(8)可以获得波动幅度随扰动频率变化的趋势,如图4所示,扰动频率与固有频率相等时,波动幅度达到最大值。

3 结语与展望

气固流态化,从小截面的化工气固反应装置,发展到具有超大截面的大型 CFB 锅炉,众多科研和工

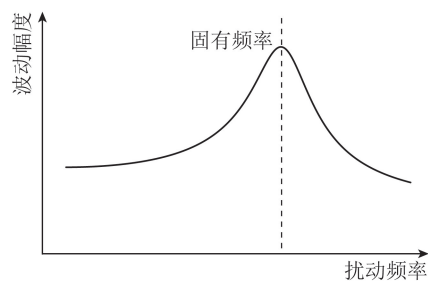


图4 波动幅度与扰动频率的关系

Fig.4 Relationship between pressure fluctuation and disturbance frequency

程技术人员通过理论、试验和实炉测试开展了相关工作。目前中国在 CFB 燃烧大型化、高参数方面取得了世界领先。但 CFB 锅炉大型化过程中,气固流动的横向非均匀性问题仍有部分工作需要进一步开展。

1) 多分离器并联的大型 CFB 锅炉,气固流量分配的均匀性主要取决于分离阻力特性、分离器布置、分离器入口烟道结构、炉膛出口附近的悬吊屏布置以及分离器出口的烟道布置,在锅炉设计过程中需综合考虑,根据气固流动横向分布特性更合理安排受热面的布置。

2) 超大截面的流化布风系统的进风方式对于布风均匀性具有显著影响,大型 CFB 锅炉由于布置和成本原因,侧进风和后墙进风的方式均无法达到均匀性。非均匀布风条件下气固流动特性以及床层与布风系统的耦合作用,还有待进一步研究。

3) 大型 CFB 锅炉低负荷条件下的横向波动问题对锅炉的安全运行威胁极大。大截面的布风系统、一次风降低导致的布风失稳以及多回路并联的不均匀性是导致床压横向波动的主要原因,但目前在实验室尺度还缺少系统研究。波动产生机理以及由此引申的横向波动基础理论仍需进一步深入分析。

参考文献 (References):

- [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] 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.
- [3] 程乐鸣,周星龙,郑成航,等. 大型循环流化床锅炉的发展[J]. 动力工程学报,2008,28(6):817-826.
CHENG Leming, ZHOU Xinglong, ZHENG Chenghang, et al. Development of large-scale circulating fluidized bed boiler[J].

- Journal of Power Engineering, 2008, 28(6): 817-826.
- [4] 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.
- [5] 宋畅, 吕俊复, 杨海瑞, 等. 超临界及超超临界循环流化床锅炉技术研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 338-347.
SONG Chang, LYU Junfu, YANG Hairui, et al. Research and application of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 338-347.
- [6] 聂立, 巩李明, 薛大勇, 等. 超超临界循环流化床外置换热器壁温偏差特性研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(6): 85-90.
NIE Li, GONG Liming, XUE Dayong, et al. Study on wall temperature deviation characteristics of external heat exchanger in ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 85-90.
- [7] 许霖杰, 程乐鸣, 季杰强, 等. 超/超临界循环流化床锅炉整体数值模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 348-355.
XU Linjie, CHENG Leming, JI Jieqiang, et al. Integrated numerical model for ultra/supercritical cfb boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 348-355.
- [8] 李影平, 辛胜伟, 王凤君. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉超低 NO_x 排放研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(5): 86-92.
LI Yingping, XIN Shengwei, WANG Fengjun. Study on ultra-low NO_x emission technology of 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 86-92.
- [9] 吕俊复, 张纆, 杨海瑞, 等. 筒约型 660 MW 超超临界循环流化床锅炉设计开发[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(5): 741-747.
LYU Junfu, ZHANG Man, YANG Hairui, et al. Conceptual design of a simplified 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(5): 741-747.
- [10] 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.
- [11] 张纆, 蔡润夏, 姜孝国, 等. 660 MW 高效超超临界双炉膛循环流化床锅炉的设计开发[J]. 动力工程学报, 2018, 38(5): 341-346.
ZHANG Man, CAI Runxia, JIANG Xiaoguo, et al. Design and development of a 660 MW high efficiency ultra-supercritical double-furnace CFB boiler[J]. Journal of Chinese society of power engineering, 2018, 38(5): 341-346.
- [12] 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性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2515-2523.
LING Wen, LYU Junfu, ZHOU Tuo, et al. Research and development progress of the 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2515-2523.
- [13] 杨石, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 新一代节能型循环流化床锅炉燃烧技术[J]. 动力工程, 2009, 29(8): 728-732.
YANG Shi, YANG Hairui, LYU Junfu, et al. The new generation combustion technology for energy saving circulating fluidized bed boilers[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(8): 728-732.
- [14] 胡南, 王巍, 姚宣, 等. 38 m/54 m 高循环流化床床内流体动力特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 7-12.
HU Nan, WANG Wei, YAO Xuan, et al. Study on gas-solids flow properties in the 38 m/54 m riser of circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 7-12.
- [15] 李金晶, 胡南, 姚宣, 等. 裤衩腿型循环流化床炉膛的翻床实验[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 54-59.
LI Jinjing, HU Nan, YAO Xuan, et al. Experimental study of the bed inventory overturn in pant-legs furnace of CFB boiler[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 54-59.
- [16] 王文毓, 李耀德, 赵云杰, 等. 超超临界循环流化床锅炉内螺旋管水冷壁流动传热特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 373-382.
WANG Wenyu, LI Yaode, ZHAO Yunjie, et al. The Experimental investigation on flow and heat transfer characteristics of the rifled water wall tube of an ultra-supercritical CFB boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 373-382.
- [17] 吕清刚, 宋国良, 王东宇, 等. 新型 660 MW 超超临界环形炉膛循环流化床锅炉技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 3022-3032.
LYU Qinggang, SONG Guoliang, WANG Dongyu, et al. Study on new 660 MW ultra-supercritical CFB boiler technology with an annular furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 3022-3032.
- [18] 王小芳, 帅大平, 吕清刚, 等. 六回路环形炉膛循环流化床试验研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 30-34.
WANG Xiaofang, SHUAI Daping, LYU Qinggang, et al. Experimental study on circulating fluidized bed with annular furnace and six cyclones[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 30-34.
- [19] 许霖杰, 程乐鸣, 邹阳军, 等. 1 000 MW 超临界循环流化床锅炉环形炉膛气固流动特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2480-2486.
XU Linjie, CHENG Leming, ZOU Yangjun, et al. Numerical study of gas-solids flow characteristics in a 1 000 MW supercritical CFB boiler octagonal furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2480-2486.
- [20] 严谨, 卢啸风, 王泉海, 等. 600 MW 超临界 CFB 锅炉炉内稀相区燃烧均匀性的实炉试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 397-405.
YAN Jin, LU Xiaofeng, WANG Quanhai, et al. Field tests on combustion uniformity of the dilute phase in a 600 MW supercritical CFB boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 397-405.
- [21] 李金晶, 龚鹏, 吕俊复, 等. 给煤对大型 CFB 锅炉床温均匀性

- 的影响[J]. 热能动力工程,2012,27(1):82-86.
- LI Jinjing,GONG Peng,LYU Junfu, et al. Influence of the coal feed on the bed temperature uniformity of a large-sized CFB boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012,27(1):82-86.
- [22] 胡南,徐梦,杨海瑞,等. 循环流化床锅炉炉膛横向温度非均匀性模型研究[J]. 洁净煤技术,2019,25(2):102-107.
- HU Nan, XU Meng, YANG Hairui, et al. Modeling study on lateral temperature non-uniformity in CFB boiler furnace[J]. Clean Coal Technology, 2019,25(2):102-107.
- [23] 莫鑫,蔡润夏,吕俊复,等. 基于返料灰温偏差的 600 MW(e) 循环流化床锅炉内气固不均匀分布[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(8):2175-2180.
- MO Xin, CAI Runxia, LYU Junfu, et al. Analysis of non-uniform distribution of gas-solid flow in the 600 MW(e) CFB boiler based on the non-uniform distribution of returning ash temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2175-2180.
- [24] 张攀. 循环流化床锅炉炉膛传热的测量研究[D]. 北京:清华大学,2009.
- ZHANG Pan. Heat Transfer Measurement and Analysis in the Furnace of CFB Boiler[D]. Beijing:Tsinghua University,2009.
- [25] 李金晶,吕俊复,龚鹏,等. 大型循环流化床锅炉炉膛内床压摆动的机理[J]. 动力工程学报,2013,33(4):245-249.
- LI Jinjing, LYU Junfu, GONG Peng, et al. Wobble mechanism of pressure drop in furnace of a large scale CFB boiler[J]. Journal of Chinese society of Power Engineering, 2013,33(4):245-249.
- [26] 胡南,郭兆君,杨海瑞,等. CFB 锅炉炉膛内颗粒横向扩散系数研究[J]. 动力工程学报,2016,36(3):168-171.
- HU Nan, GUO Zhaojun, YANG Hairui, et al. Study on enlarging lateral dispersion coefficient for CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016,36(3):168-171.
- [27] BASKAKOV A P, DOLGOV Y N, GOLDOBIN Y M. Aerodynamics and heat transfer in cyclones with particle-laden gas flow[J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 1990,3:597-602.
- [28] DRY R J, WHITE R B, JOYCE T. Correlation of solids circulation rate in circulating fluidized bed systems[C]//4th Int. CFB Conference. 1993:732-737.
- [29] YANG Shi, YANG Hairui, ZHANG Hai, et al. A transient method to study the pressure drop characteristics of the cyclone in a CFB system[J]. Powder Technol., 2009,192:105-109.
- [30] 胡南,杨石,刘雪敏,等. 双分离器并联 CFB 系统的稳定性分析[J]. 动力工程学报,2013,33(7):497-501.
- HU Nan, YANG Shi, LIU Xuemin, et al. Study on stability of CFB system with two cyclones in parallel[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013,33(7):497-501.
- [31] GRACE J R, CUI H, ELNASHAIE S S. Non-uniform distribution of two-phase flows through parallel identical paths[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2007,85(5):662-668.
- [32] GRACE J R. Maldistribution of flow through parallel cyclones in circulating fluidized beds [C]//Circulating Fluidized Bed Technology. Hamburg, Germany, 2008:969-974.
- [33] MO X, CAI R, HUANG X, et al. The effects of wall friction and solid acceleration on the mal-distribution of gas-solid flow in double identical parallel cyclones[J]. Powder Technology, 2015, 286:471-477.
- [34] YANG Shi, YANG Hairui, LIU Qing, et al. Research on flow non-uniformity in main circulation loop of a CFB boiler with multiple cyclones [C]//Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Xi'an: [s. n.], 2009:341-344.
- [35] 廖磊,那永洁,吕清刚,等. 六个旋风分离器并联布置循环流化床的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(11): 11-16.
- LIAO Lei, NA Yongjie, LYU Qinggang, et al. Experimental study on a circulating fluidized bed with six cyclone separators[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(11):11-16.
- [36] ZHOU X, CHENG L, WANG Q, et al. Non-uniform distribution of gas-solid flow through six parallel cyclones in a CFB system: An experimental study [J]. Particuology, 2012, 10(2): 170-175.
- [37] 王法军,宋国良,王小芳,等. 四旋风分离器单侧并联布置循环流化床冷态实试验[J]. 电站系统工程, 2014, 30(2): 17-19.
- WANG Fajun, SONG Guoliang, WANG Xiaofang, et al. Cold experimental study on a CFB with four cyclone separators on the same side[J]. Power System Engineering, 2014,30(2):17-19.
- [38] 王小芳,帅大平,吕清刚,等. 六回路环形炉膛循环流化床试验研究[J]. 洁净煤技术,2015,21(2):30-34.
- WANG Xiaofang, SHUAI Daping, LYU Qinggang, et al. Experimental study on circulating fluidized bed with annular furnace and six cyclones[J]. Clean Coal Technology, 2015,21(2):30-34.
- [39] 王超,程乐鸣,周星龙,等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉炉膛气固流场的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(14):1-7.
- WANG Chao, CHENG Leming, ZHOU Xinglong, et al. Numerical simulation of gas-solid hydrodynamics in a 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(14):1-7.
- [40] ZHANG N, LU B, WANG W, et al. 3D CFD simulation of hydrodynamics of a 150 MWe circulating fluidized bed boiler [J]. Chem. Eng. J., 2010,162:821-828.
- [41] 郭强,王泉海,卢啸风,等. 大型 CFB 锅炉并联布置分离器烟气流动特性的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13):3851-3858.
- GUO Qiang, WANG Quanhai, LU Xiaofeng, et al. Numerical study on gas flow characteristic in three parallel separators of a large-scale CFB boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13):3851-3858.
- [42] GUO Qingjie, WERTHER J, CORNELIS A, et al. Flow maldistribution at bubble cap distributor in a plant-scale CFB riser[J]. AIChE, 2005,51(5):1359-1366.
- [43] MIREK P, NOWAK W. The influence of air distributor's geometry on combustion conditions in large-scale CFB boilers [J]. Archives of Thermodynamics, 2008,29(3):37-44.
- [44] 田元. 大型循环流化床锅炉风室与布风板联合布风均匀性数

- 值模拟与试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
- TIAN Yuan. Numerical Simulation and Experimental Investigation of Air Flow Uniformity in the Windbox of Large-Scale CFB Boiler [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [45] 马有福,王凡,袁益超,等. 循环流化床锅炉一次风布风均匀性数值研究[J]. 锅炉技术, 2018, 49(6): 35-41.
- MA Youfu, WANG Fan, YUAN Yichao, et al. Numerical study of uniform air distribution in a primary air supply system of CFB boilers[J]. Boiler Technology, 2018, 49(6): 35-41.
- [46] YAN Jin, LU Xiaofeng, WANG Quanhai, et al. Experimental and numerical study on air flow uniformity in the isobaric windbox of a 600 MW supercritical CFB boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 311-321.
- [47] BHASKER C. Simulation of air flow in the typical boiler windbox segments[J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33(11): 793-804.
- [48] 杨志伟,王哲,李政,等. 裤衩腿循环流化床“翻床”过程影响因素研究[J]. 动力工程学报, 2010, 30(12): 904-908.
- YANG Zhiwei, WANG Zhe, LI Zheng, et al. Factors influencing bed turning process of circulating fluidized bed with breeches legs [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 904-908.
- [49] 姜华伟,吕俊复,胡南,等. 静床高对大截面流化床锅炉床压横向波动影响的模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2533-2540.
- JIANG Huawei, LYU Junfu, HU Nan, et al. Modeling research on effects of static bed height on lateral bed pressure fluctuations in large cross-section circulating fluidized bed boilers[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2533-2540.
- [50] 胡南,李金晶,刘雪敏,等. 大型CFB锅炉床压横向波动的机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(20): 1-7.
- HU Nan, LI Jinjing, LIU Xuemin, et al. Mechanism study of lateral bed pressure wave of large scale CFB boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(20): 1-7.