

某 350 MW 机组循环流化床锅炉 颗粒流动特性数值模拟研究

李 静¹, 申 欣¹, 赵 强¹, 张 曼², 金 燕¹

(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)

[摘 要] 基于计算颗粒流体力学 (CPFD) 方法, 对某超临界 350 MW 机组循环流化床 (CFB) 锅炉的颗粒流动特性进行数值模拟研究, 主要研究了 CFB 锅炉内颗粒及颗粒团聚流动特性及其随炉膛高度和操作条件的变化规律, 并将模拟结果与现场试验结果进行对比, 验证了本次数值模拟的可靠性。结果表明: 沿炉膛宽度方向, 颗粒轴向运动速度呈现中心区域大、近壁区域小的不均匀分布特点, 颗粒质量浓度及团聚物颗粒体积分数则呈现中心区域小、近壁区域大的特点; 沿炉膛高度方向, 随高度的升高, 颗粒质量浓度由 $140 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 迅速减小到 $4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 炉膛中心区域颗粒轴向运动较近壁区域增长迅速; 循环量的增加和一次流化风速的降低均会使得颗粒轴向运动速度降低, 团聚物颗粒体积分数增加。

[关 键 词] 超临界; CFB 锅炉; CPFD; 数值模拟; 颗粒特性

[中图分类号] TK229 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfd.202109201

[引用本文格式] 李静, 申欣, 赵强, 等. 某 350 MW 机组循环流化床锅炉颗粒流动特性数值模拟研究[J]. 热力发电, 2022, 51(4): 62-69. LI Jing, SHEN Xin, ZHAO Qiang, et al. Numerical simulation of particle flow characteristics of a 350 MW CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 62-69.

Numerical simulation of particle flow characteristics of a 350 MW CFB boiler

LI Jing¹, SHEN Xin¹, ZHAO Qiang¹, ZHANG Man², JIN Yan¹

(1. School of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the computational particle fluid dynamics (CPFD) method, numerical simulation on particle flow characteristics of a 350 MW unit supercritical circulating fluidized bed (CFB) boiler is carried out. The flow characteristics of particles and particle clustering in the CFB boiler and the change laws with the height of the furnace and operating conditions are mainly studied. Moreover, the simulation results are compared with the field test results, which verifies the reliability of the simulation. The results show that, along the width of the furnace, the axial movement speed of the particles presents an uneven distribution of high in central area and low in near-wall area, while the particle mass concentration and particle cluster volume fraction present the characteristics of small in central area and large in near-wall area. Along the furnace height direction, as the height increases, the particle mass concentration rapidly decreases from $140 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ to $4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The axial movement speed of particles in the center of the furnace increases faster than that in the area near the wall. The increase of the circulation volume and the decrease of the primary fluidization wind speed will reduce the axial movement speed of the particles and increase the volume fraction of the particles cluster.

Key words: supercritical; CFB boiler; CPFD; numerical simulation; particle characteristics

循环流化床 (circulating fluidized bed, CFB) 作为一种高效洁净的燃煤发电技术, 拥有良好的气固

传热、传质特性, 近些年来发展迅速^[1]。在大型化发展进程中极易出现床温分布不均、排烟温度过

收稿日期: 2021-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1810126)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (U1810126)

第一作者简介: 李静(1997), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 CFB 锅炉颗粒特性, lijing_1009@163.com。

通信作者简介: 金燕(1963), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为燃烧工程、燃煤污染物控制以及气固两相流动等技术, jinyan@tyut.edu.cn。

高、 NO_x 生成量大以及磨损等问题^[2-3],极大地限制了其发展。国内外很多学者针对 CFB 锅炉床料颗粒流动特性进行了大量研究^[4-5],发现在床料颗粒流化过程中极易发生团聚形成颗粒团聚物,使锅炉整体以及局部颗粒浓度与速度分布不均匀,进而影响 CFB 锅炉的整体性能。

Li 等人^[4]将 CFB 内气固流动划分成 3 个尺度,即单个颗粒代表的微尺度,气泡和颗粒团聚物代表的介尺度以及反应器整体代表的宏尺度。一些国内外学者通过设计实验研究 CFB 反应器颗粒特性。陈曦^[6]研究了圆柱颗粒在流化床中 3 个尺度下气固流动特性以及操作条件对其影响,并绘制了圆柱颗粒在共流化过程中的流动相图。胡军军^[7]研究了颗粒团聚物特性随操作条件的变化规律。但是这些研究存在一定的局限性:1) CFB 试验台研究与 CFB 工业锅炉在实际运行过程中差异较大,所获得的试验结论往往不能直接应用于工业实际;2) CFB 锅炉现场试验条件有限且测试难度较大,难以获取一些关键性参数。

近些年来,以计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)为基础的数值模拟技术迅速发展,可以很大程度上弥补实验的不足,节约时间及成本。很多学者开始采用数值模拟的方法研究 CFB 锅炉的颗粒特性。Oschmann 等人^[8]使用 CFD-DEM 方法研究了在流化床中圆柱形、盘状、立方体和球形不同形状颗粒($d=7\text{ mm}$)的混合特性。钱进等^[9]对某 75 t/h CFB 锅炉炉膛进行冷态模拟,得到了气体和颗粒的质量浓度及运动速度分布规律。郑秀平等^[10]通过冷态实验与数值模拟结合,提出在 CFB 锅炉旋风分离器锥形段通入干扰风,使粉尘脱离壁面随中心上升气流进入尾部烟道,控制循环灰量。

由于 CFD 模拟软件中计算模型的局限性,在模拟工业级 CFB 锅炉这样具有大量宽筛分颗粒的气固流动时,大多局限于实验室尺度或中试尺度,对实际 CFB 锅炉的研究很少。李德波等^[11]基于计算颗粒流体力学(computational particle fluid dynamics, CPFD)数值模拟方法,对某 300 MW 机组 CFB 锅炉进行了数值模拟研究,通过与现场试验结果对比,验证了 CPFD 方法的可靠性,并分析了炉内气固流动及温度场分布规律。曾胜庭等^[12-13]基于 CPFD 方法对某 300 MW 机组 CFB 锅炉进行三维全床数值模拟研究,分析了 CFB 锅炉炉膛以及回料阀的气固流动规律,获得炉膛内固相颗粒浓度和速度

场的分布以及影响回料阀的运行情况等关键参数。Wang 等人^[14]对 CFB 实验台进行了 CPFD 模拟研究,主要研究了模型参数以及操作条件对模拟结果的影响。

本文采用 CPFD 数值计算方法研究全回路实际 CFB 锅炉颗粒流化特性,通过将模拟结果与现场试验结果进行对比,验证了本次数值模拟的可靠性,进而研究了 CFB 锅炉内颗粒及颗粒聚团流动特性及其随炉膛高度和操作条件的变化规律。

1 研究对象

本文研究对象为某超临界 350 MW 机组 CFB 锅炉,主要部件几何尺寸见表 1。

表 1 锅炉主要部件几何尺寸 单位: mm
Tab.1 Geometric dimensions of main components of the boiler

主要部件	几何尺寸
炉膛宽度×深度	31 944×9 656
炉膛高度(至布风板)	48 130
旋风分离器直径	10 000
后烟井宽度×深度	21 700×9 200

根据锅炉实际尺寸 1:1 绘制三维模型,同时进行计算网格划分,CFB 锅炉模型及网格划分如图 1 所示。模型由炉膛、3 个单侧布置的旋风分离器、3 台“U”型回料器及回料腿组成。根据现场试验实测工况布置炉膛流化风、二次风以及回料阀的松动风和返料风,模拟工况参数设置见表 2。

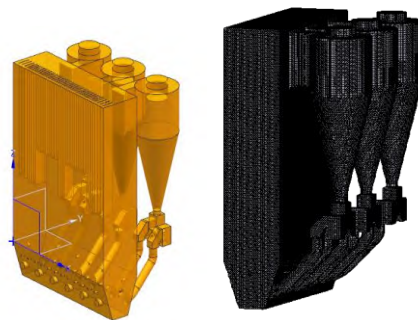


图 1 CFB 锅炉模型及网格划分
Fig.1 Model and grid division of the CFB boiler

表 2 超临界 CFB 锅炉模拟工况参数
Tab.2 Simulated operating parameters of the supercritical CFB boiler

项目	风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	压力/Pa
一次流化风 u_f	36.2×10^4	10 900
上二次风	27.5×10^4	3 300
下二次风	16.5×10^4	10 630
松动风 u_s	2.6×10^4	35 000
返料风 u_r	0.6×10^4	35 000

锅炉整体温度为 1 100 K, 壁面为绝热, 旋风分离器出口设置为压力出口。模拟与锅炉实际运行使用同样的宽筛分床料, 初始床高为 1 m, 体积分数为 0.55, 颗粒粒径范围 0~1 mm, $d_{50}=0.4$ mm, 床料粒径分布如图 2 所示。沿整个回路设置一组瞬态压力点, 以获得模拟过程中的压力分布, 压力测点分布如图 3 所示。气固相间曳力模型选用 WenYu-Ergun 曳力模型, 模拟参数设置参考了 Chen 等人^[15]的取值, 采用 GPU 并行运算。

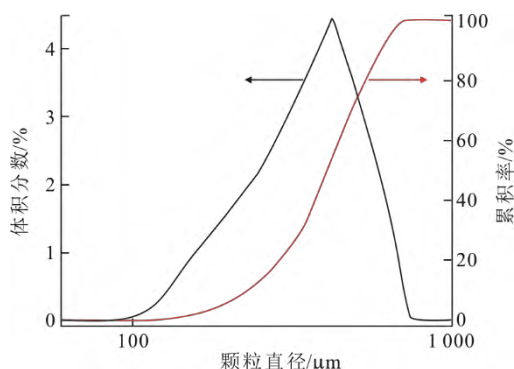


图 2 CFB 锅炉床料粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of bed material of the CFB boiler

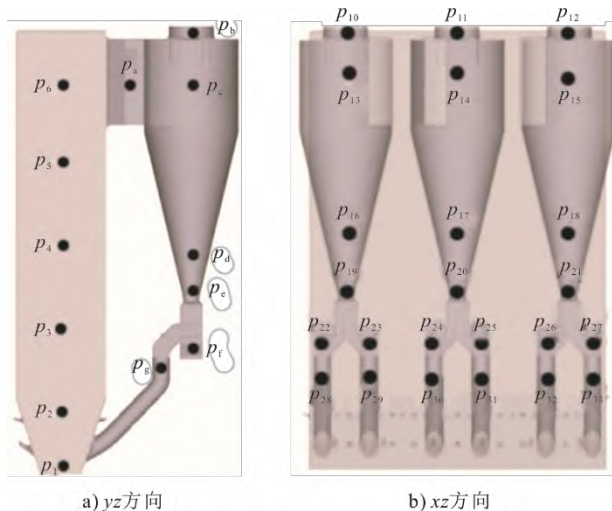


图 3 超临界 CFB 锅炉压力测点分布

Fig.3 Distribution of pressure measurement points for the supercritical CFB boiler

2 数值计算方法

CPFD 方法通过采用欧拉-拉格朗日法分别对颗粒相和流体相进行处理, 同时参考了颗粒单元体积 (Multiphase Particle-In-Cell, MP-PIC) 方法, 引用计算颗粒的概念来处理大量颗粒, 可以有效解决大量颗粒和连续流体在三维空间内的耦合问题^[16]。Barracuda 是基于 CPFD 方法的商业软件。

2.1 流体相控制方程

流体相控制方程可根据气体动力学理论推导得到, 流体相平均体积质量方程和动量方程如下:

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f) = \rho_{c, sf} \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f) = -\nabla p - F + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} + \nabla \alpha_f \tau_f \quad (2)$$

式中: α_f 为流体相体积分数; t 为时间, s; ρ_f 为流体相密度, kg/m³; $\mathbf{v}_f$ 为流体相速度, m/s; $\rho_{c, sf}$ 为在单位控制容积内流体的质量生产率; p 为流体相压力, Pa; F 为其他作用力源项, N; $\mathbf{g}$ 为重力加速度, m/s²; τ_f 为流体应力张量, Pa。

流体应力张量 τ_f 值为:

$$\tau_{ij} = 2\mu \left(S_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial v_j} \right) \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

式中: δ_{ij} 为符号算子; v_i 、 v_j 为 i 、 j 方向的速度, m/s; μ 为流体相的黏度, Pa·s; S_{ij} 为流体相变形张量的值, Pa; x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 方向的位置坐标。

上述流体相控制方程同样适用于混合气体, 其部分参数可以使用质量平均得出。在采用 CPFD 方法时, 气体组分参数通过理想气体状态方程得到, 第 i 种气体组分的压力为:

$$p_i = \frac{\rho_i R T}{m_i} \quad (5)$$

流体相的全压力为:

$$p = \sum_{i=1}^{N_s} p_i \quad (6)$$

式中: R 为通用气体常数; T 为混合气体的温度, K; ρ_i 为流体相第 i 种组分的密度, kg/m³; m_i 为第 i 种组分的分子质量, g/mol; N_s 为组分个数。

2.2 颗粒相控制方程

颗粒的加速度方程为:

$$\frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = D_p (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s) - \frac{1}{\rho_s} \nabla p + \mathbf{g} - \frac{1}{\alpha_s \rho_s} \nabla \tau_s \quad (7)$$

式中: $\mathbf{v}_s$ 为颗粒相的速度, m/s; ρ_s 为颗粒密度, kg/m³; α_s 为颗粒的体积分数; τ_s 为颗粒的法向应力, Pa; D_p 为颗粒的直径, m。

颗粒的运动方程为:

$$\frac{d\mathbf{x}_s}{dt} = \mathbf{v}_s \quad (8)$$

式中: x_s 为颗粒的位置坐标。

颗粒的能量方程为:

$$c_v \frac{dT_s}{dt} = \frac{A_s}{m_s} \gamma_s (T_f - T_s) + \frac{1}{m_s} Q_{C,fs} \quad (9)$$

式中: T_f 为流体相的温度, K; T_s 为颗粒相的温度, K; γ_s 为颗粒与流体之间的传热系数; $Q_{C,fs}$ 为流体和颗粒在化学反应过程中传递的热量, J; c_v 为比热容, J/(kg·K); A_s 为颗粒表面积, m^2 ; m_s 为颗粒质量, kg。

3 模拟结果与讨论

3.1 模型验证

将模拟结果与现场试验数据对比进行准确性验证是模拟计算中非常重要的一环。图 4 为炉膛 10、20、30 m 3 个高度 (H) 截面的累积床料量随时间的变化曲线, 其中曲线的斜率表示通过截面的质量流率。由图 4 可以看出, 在 $t=28$ s 之后 3 条曲线斜率接近相同, 认为 CFB 锅炉的运行达到了稳定状态。

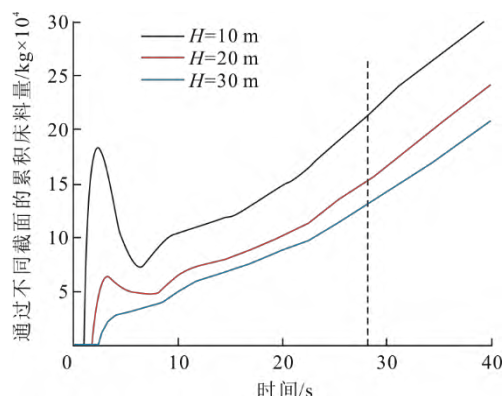


图 4 通过不同高度截面累计床料量变化曲线

Fig.4 Change curves of the cumulative bed material volume in sections at different heights

CFB 锅炉炉膛压力变化是气固流动的重要动力学特征, 压力变化包含了气固流动的综合信息, 如颗粒特性、气体性质、炉膛几何结构以及操作条件等。图 5 为沿锅炉回路压力模拟值与实测值对比。由图 5 可以看出: 沿炉膛高度方向, 压力值逐渐减小, 单位高度下压降也越来越小; 在炉膛内模拟值与实验值的差值在 100~800 Pa 之间, 旋风分离器处差值在 0~100 Pa 之间, 回料阀处差值在 200~1 000 Pa 之间, 偏离范围均在 5%以内; 回料阀的压降最高, 可以克服 CFB 锅炉内部的系统压差, 有利于锅炉稳定运行; 炉膛压降其次, 可以为床料流化提供动力。可见, 模拟结果具有一定的可靠性。

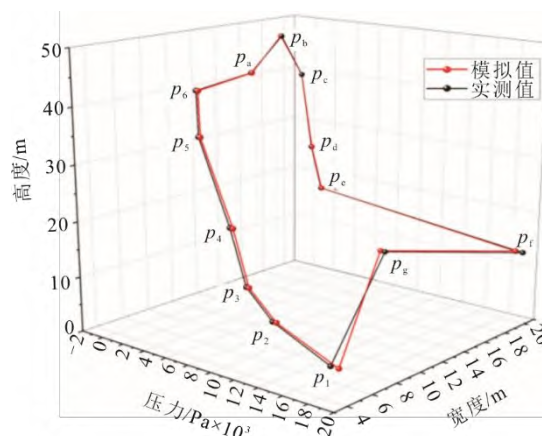


图 5 沿锅炉回路压力模拟值与实测值对比

Fig.5 The simulated value and actual measured value of pressure along the boiler circuit

3.2 CFB 锅炉颗粒尺度特性

3.2.1 颗粒质量浓度分布

CFB 锅炉颗粒质量浓度作为表征 CFB 物料平衡的重要指标, 将直接影响炉内传热、反应过程。颗粒质量浓度是表示单位时间内炉膛单位截面通过的颗粒物质质量。炉膛内床料颗粒质量浓度沿炉膛高度方向的分布如图 6 所示。

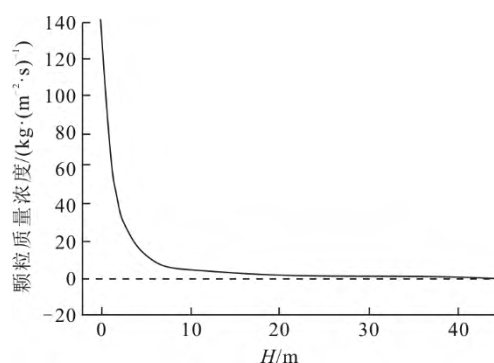


图 6 颗粒质量浓度轴向分布

Fig.6 Axial distribution of particle mass concentration

炉膛被明显分成密相区和稀相区: 在密相区颗粒从静止开始运动, 速度较低, 且大量颗粒经循环回送至炉膛底部, 所以炉膛底部的颗粒质量浓度较高, 且随高度增加迅速从 140 kg/(m²·s)减小到 4 kg/(m²·s), 密相区高度在 10 m 左右; 稀相区由于气体高速流动, 颗粒被气流带至旋风分离器, 颗粒质量浓度较低, 且随高度变化不大。

图 7 为炉膛不同高度截面颗粒质量浓度沿炉膛宽度方向的分布曲线。由图 7 可以看出: 颗粒质量浓度呈对称状分布; 在炉膛截面高度 $H=5$ m 时在炉膛中心区域颗粒质量浓度最大, 由于受到回料阀回

料影响,在回料口处颗粒被吹向两侧,导致颗粒质量浓度较低,而回料口两侧颗粒质量浓度较高,近壁区域向下运动的颗粒增加,即在近壁区域出现了颗粒回流;当炉膛截面高度大于 10 m 时颗粒质量浓度分布相似,没有明显的峰值,颗粒质量浓度分布均匀,近壁区域颗粒随机地上下运动。

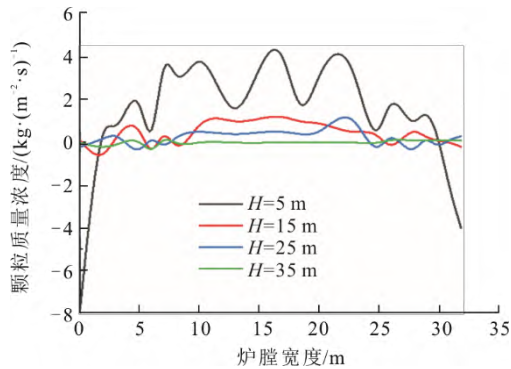


图 7 颗粒质量浓度径向分布
Fig.7 Radial distribution of particle mass concentration

3.2.2 颗粒速度分布

颗粒速度分布对研究 CFB 锅炉磨损问题有重要意义。炉膛不同高度截面颗粒轴向速度沿 CFB 锅炉炉膛宽度方向的分布如图 8 所示。

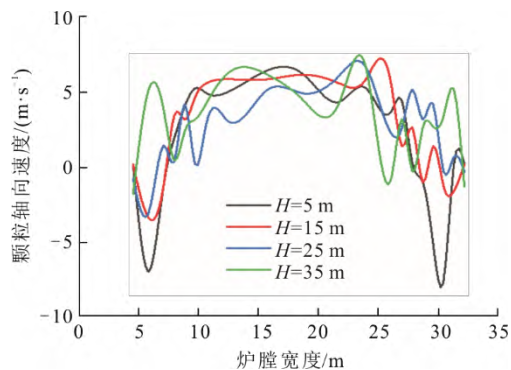


图 8 颗粒轴向速度径向分布
Fig.8 Radial distribution of the particle axial velocity

由图 8 可以看出:在炉膛密相区颗粒轴向速度由中心区域向近壁区域逐渐降低,近壁区域颗粒轴向速度出现负值即颗粒向下运动,出现边壁回流;在稀相区中心区域颗粒轴向速度分布比较均匀,在 5 m/s 上下小幅波动,近壁区域颗粒轴向速度波动幅度变大。

循环量(物料经回料阀返回炉膛的颗粒质量流率)对颗粒轴向速度分布的影响如图 9 所示。由图 9 可以看出:在一次流化风速一定时,在不同高

度下颗粒轴向速度呈现出不同的变化趋势;在炉膛底部密相区,循环量的增加会导致颗粒质量浓度的增大,颗粒间的相互作用增强,更容易形成颗粒团聚物,颗粒的运动速度则逐渐下降;而在炉膛上部稀相区,颗粒质量浓度较低,颗粒轴向运动速度变化不大。另外,在同一截面高度下,循环量对近壁区颗粒轴向速度的影响要大于中心区域,这是由于壁面效应在近壁区更容易发生颗粒团聚。在 $H=15$ m 处,当循环量 G_s 从 $350 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加至 $550 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,炉膛中心区域颗粒轴向速度由 5.3 m/s 降至 4.3 m/s ,而在近壁区域由 3.8 m/s 降至 1.0 m/s 。

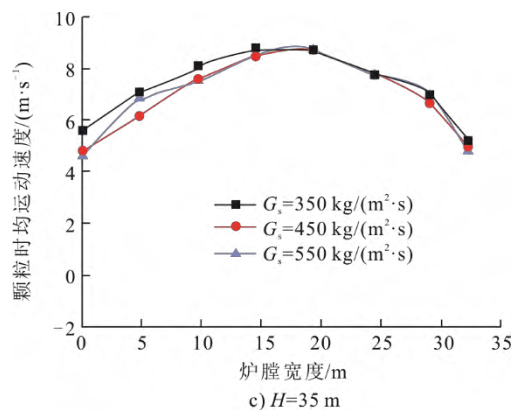
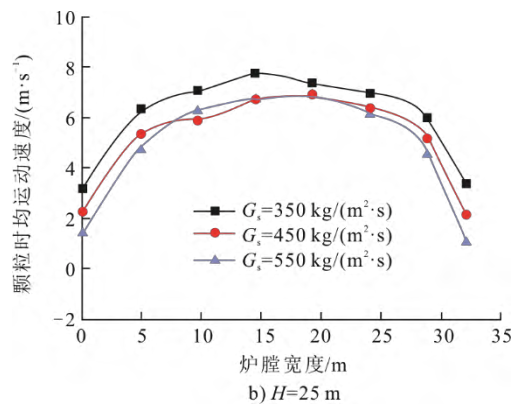
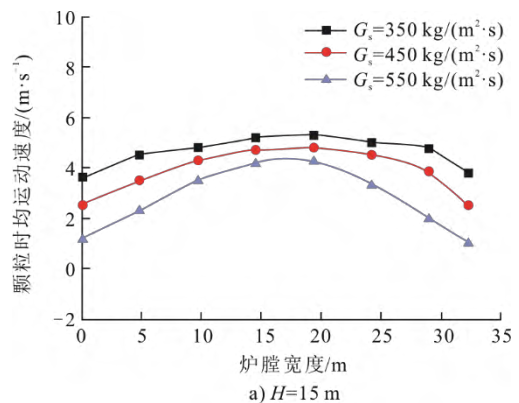


图 9 颗粒轴向速度径向分布
Fig.9 Radial distribution of the particle axial velocity

图 10 为一次风速（风帽出口风速）对颗粒轴向速度分布的影响。由图 10 可以看出：在循环量一定时，颗粒轴向速度在任意位置皆随一次风速的升高而增大，在近壁面处向下运动的颗粒速度却随着一次流化风速的升高而减小，这是由于近壁位置的颗粒要受到更大的曳力；对于向上运动的颗粒，在中心区域受一次流化风速的影响要远大于近壁区域，在 $H=35\text{ m}$ 时，当一次风速 U_f 从 14 m/s 增加至 16 m/s ，炉膛中心区域颗粒轴向速度由 6.4 m/s 增加至 8.7 m/s ，而在近壁区域由 2.7 m/s 增加至 3.2 m/s 。

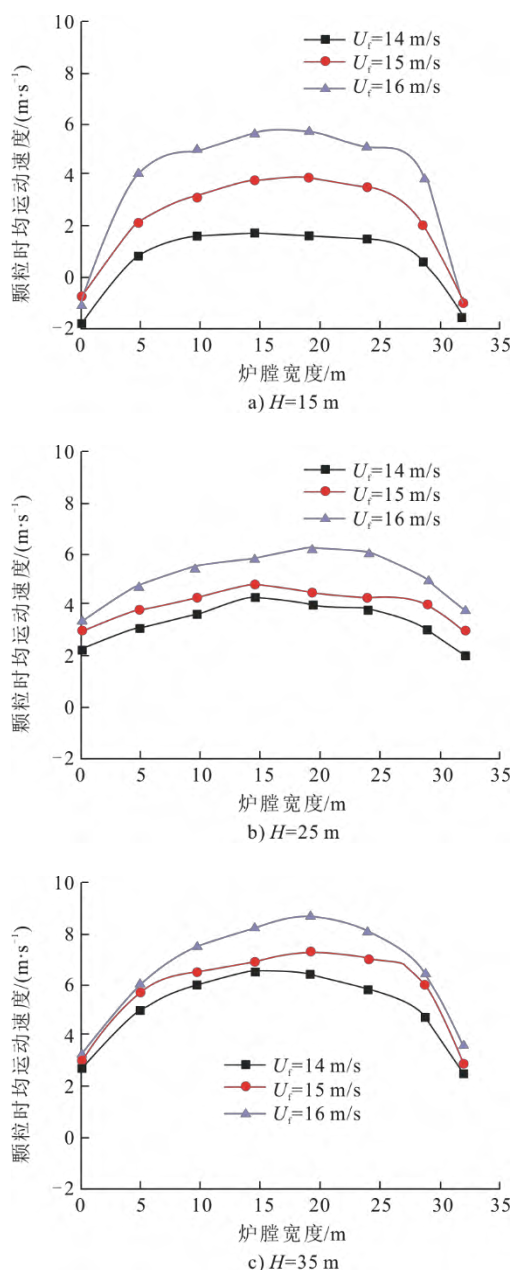


图 10 不同一次流化风速下颗粒轴向速度径向分布
Fig.10 Radial distribution of the particle axial velocity at different primary fluidization wind speeds

3.3 CFB 锅炉颗粒团聚特性

颗粒团聚特性对炉膛截面的氧体积分数分布、碳的燃尽等具有重要的工程意义。团聚物颗粒体积分数是表征炉膛内某局部位置处所有团聚物内颗粒体积分数的平均值。图 11 为沿 CFB 锅炉炉膛宽度方向团聚物颗粒浓度的分布曲线。由图 11 可以看出：随炉膛轴向高度的升高团聚物颗粒浓度在中心区域逐渐减少，而在近壁区域基本稳定；当炉膛截面高度由 10 m 增加至 40 m 时，中心区域团聚物颗粒体积分数由 0.118 降低至 0.042 ，而在近壁区域由 0.162 减少至 0.158 ，基本保持稳定；在相同截面高度下，由于炉膛中心区域颗粒体积分数比近壁区域低，颗粒间相互作用较弱，且气速较高，颗粒不易发生团聚，故团聚物颗粒体积分数呈中心区域低而近壁区域高的类抛物线分布，且在近壁区域沿炉膛宽度方向颗粒团聚物体积分数增长幅度更大。

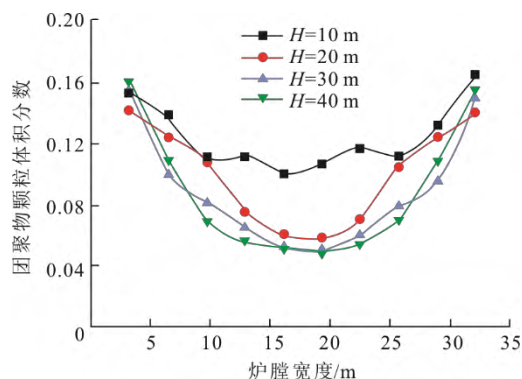


图 11 团聚物颗粒体积分数径向分布
Fig.11 Radial distribution of the cluster particle volume fraction

图 12 为循环量对团聚物颗粒体积分数分布的影响。由图 12 可以看出，当一次流化风速一定（ 15 m/s ）时，随着床料循环量增加，在各个高度下团聚物颗粒体积分数变化相似，即炉膛近壁区域团聚物颗粒体积分数的增加幅度大于中心区域。这是由于颗粒质量浓度的增加使颗粒间的相互作用加剧，团聚现象更容易发生，从而团聚物颗粒体积分数增加。在近壁区域团聚物颗粒体积分数随循环量增加而增大的幅度要大于炉膛中心区域。在炉膛高度 $H=20\text{ m}$ 处，当循环量从 $350\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加到 $650\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时，炉膛中心区域团聚物颗粒体积分数由 0.042 增加到 0.063 ，增加幅度为 0.021 ，而在近壁区域由 0.061 增加到 0.163 ，增加幅度为 0.102 。

图 13 为一次流化风速对团聚物颗粒体积分数分布的影响。

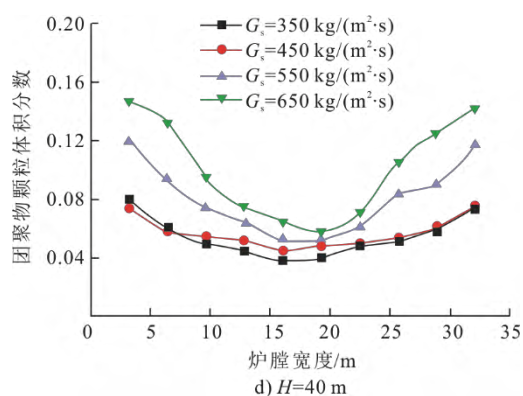
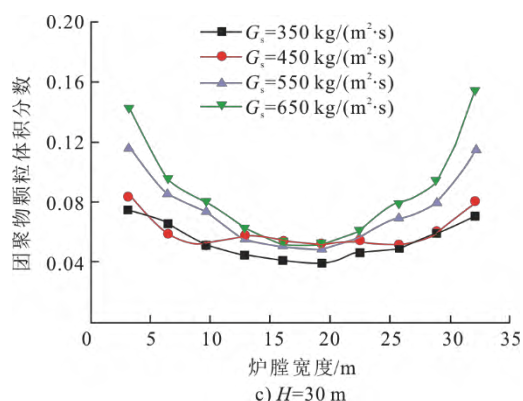
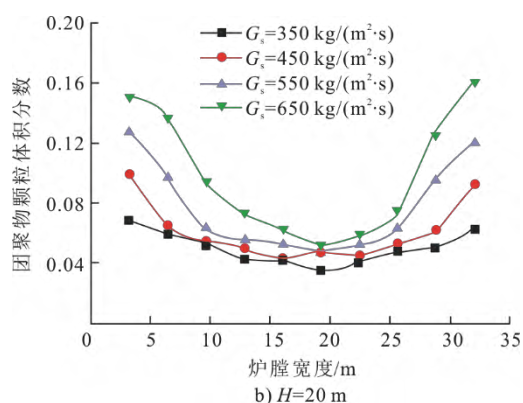
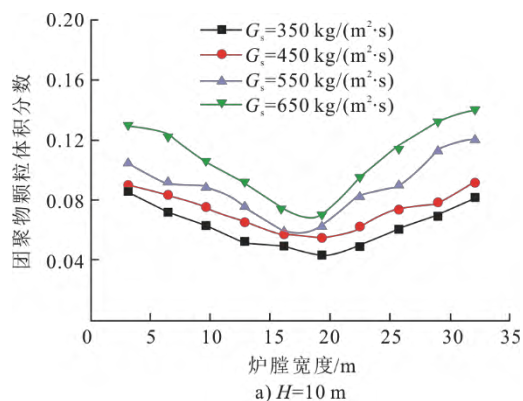


图 12 不同循环量下团聚物颗粒体积分数径向分布
Fig.12 Radial distribution of the cluster particle volume fraction at different circlation rates

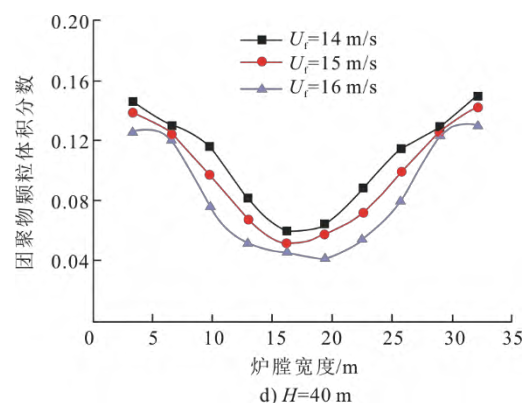
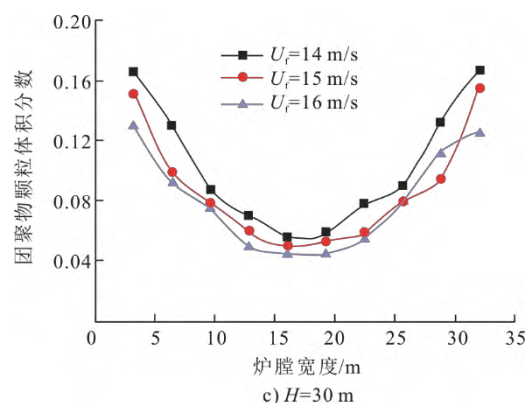
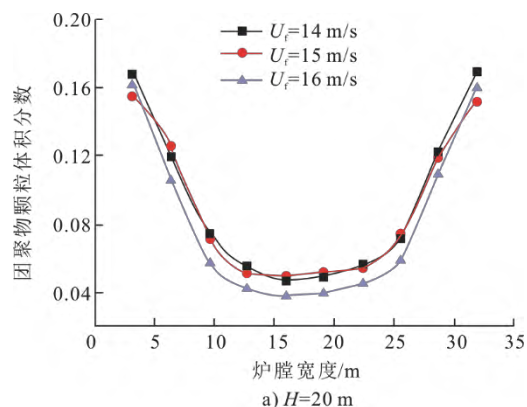
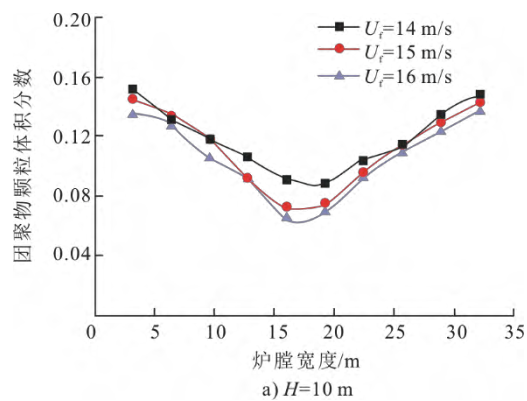


图 13 不同一次流化风速下团聚物体积分数径向分布
Fig.13 Radial distribution of the cluster particle volume fraction at different primary fluidization wind speeds

由图 13 可以看出, 循环量一定 ($500\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 时, 当一次流化风速升高时, 团聚物颗粒体积分数

降低。这是由于气体对颗粒的曳力增大,颗粒被带离炉膛,炉膛内颗粒体积分数降低,颗粒之间的相互作用减弱,不易形成颗粒团聚物,同时团聚物在高流速下更容易发生解体,因此团聚物颗粒体积分数降低。炉膛高度为 10 m 时,当一次流化风速由 14 m/s 升高到 16 m/s 时,炉膛中心区域团聚物颗粒体积分数由 0.092 下降到 0.065,而在近壁区域由 0.148 降低到 0.137。

4 结 论

1) 对于压力分布,回料阀的压降最大,可以克服 CFB 锅炉内部的系统压差,有利于锅炉稳定运行;炉膛压降其次,压降为床料颗粒的流化提供了动力。

2) 对于颗粒质量浓度和速度分布,径向上颗粒质量浓度在炉膛中心区域小、近壁区域大,颗粒运动速度则呈现出中心区域大、近壁区域的不均匀分布特点;轴向上随炉膛高度升高,颗粒质量浓度在密相区迅速降低,在稀相区变化不大,颗粒运动速度炉膛中心区域增长幅度大于近壁区域。循环量减少和一次流化风速提高均使得颗粒质量浓度减小、颗粒轴向速度增大。

3) 对于颗粒团聚物内部颗粒体积分数,轴向上随轴向高度增加而降低;径向上由炉膛中心区域到近壁区域逐渐增加。循环量增加和一次流化风速降低均使得团聚物颗粒体积分数有不同程度的增加。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 潘昕,孟洛伟,江建忠.东锅自主开发型 300 MW 循环流化床锅炉运行分析及完善[J]. 电力建设, 2010, 31(5): 108-110.
PAN Xin, MENG Luowei, JIANG Jianzhong. Operation and improvement of 300 MW circulating fluidized bed boiler developed by Dongfang Boiler Group[J]. Power Construction, 2010, 31(5): 108-110.
- [3] 李斌,李建锋,吕俊复,等.我国大型循环流化床锅炉机组运行现状[J]. 锅炉技术, 2012, 43(1): 22-28.
LI Bin, LI Jianfeng, LYU Junfu, et al. Status of large scale circulating fluidized bed boiler operation in China[J]. Boiler Technology, 2012, 43(1): 22-28.
- [4] LI J, KWAK M. Exploring complex systems in chemical engineering: the multi-scale methodology[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(3): 521-535.
- [5] AGRAWAL K, LOEZOS P, SYAMLAL M, et al. The role of meso-scale structures in rapid gas-solid flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 445: 151-185.
- [6] 陈曦.气固流化床圆柱颗粒的多尺度运动机制研究[D].

南京:东南大学, 2018: 63-147.

- CHEN Xi. Research on multi-scale movement mechanism of cylindrical particles in gas-solid fluidized bed[D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 63-147.
- [7] 胡军军.循环流化床提升管颗粒团聚特性的实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017: 30-48.
HU Junjun. Experimental study on the cluster characteristics of circulating fluidized bed riser[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 63-147.
 - [8] OSCHMANN T, HOLD J, KRUGGEL-EMDEN H. Numerical investigation of mixing and orientation of non-spherical particles in a model type fluidized bed[J]. Powder Technology, 2014, 258: 304-323.
 - [9] 钱进,覃海波,龚德鸿,等.75 t/h 双速 CFB 锅炉炉膛结构优化数值模拟[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 67-81.
QIAN Jin, QIN Haibo, GONG Dehong, et al. Numerical simulation on furnace structure optimization for a 75 t/h double-speed CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 67-81.
 - [10] 郑秀平,袁东辉,孙世超,等.循环流化床锅炉效率可调旋风分离器数值模拟与试验研究[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 132-139.
ZHENG Xiuping, YUAN Donghui, SUN Shichao, et al. Numerical simulation and experimental study on efficiency adjustable cyclone separator of CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 132-139.
 - [11] 李德波,孙超凡,冯永新,等.300 MW 循环流化床气固流动及燃烧过程数值模拟研究及工程应用[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 56-65.
LI Debo, SUN Chaofan, FENG Yongxin, et al. Numerical simulation research on gas-solid flow and combustion process of 300 MW circulated fluidized bed and related engineering applications[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 56-65.
 - [12] 曾胜庭,陈曦,马琰晨,等.300 MW 循环流化床锅炉气固流动特性的 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.
 - [13] 曾胜庭,陈曦,马琰晨,等.CFB 锅炉回料阀低频喘振的计算颗粒流体力学模拟[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 22-30.
ZENG Shengting, CHEN Xi, MA Jinchun, et al. CPFD simulation on low-frequency vibration of loop seal in CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 22-30.
 - [14] WANG Q, YANG H, JEAN R, et al. Application of CPFD method in the simulation of a circulating fluidized bed with a loop seal[J]. Powder Technology, 2014, 253: 814-821.
 - [15] CHEN C, WERTHER J, HEINRICH S, et al. CPFD simulation of a circulating fluidized bed risers[J]. Powder Technology, 2013, 235: 238-247.
 - [16] 陈鸿伟,张巍,刘拓,等.流化床布风板部分堵塞对床内气固流动影响的 CPFD 模拟研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(4): 323-329.
CHEN Hongwei, ZHANG Wei, LIU Tuo, et al. CPFD simulation study on the effects of partial blockage in air distribution plate on the gas-solid two-phase flow in the fluidized bed[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(4): 323-329.

(责任编辑 马昕红)