

柱状粒子循环流化过程中取向性的数值研究

蔡杰, 吴日亘, 袁竹林

(东南大学 洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 取向性是柱状粒子的一个重要特性, 研究柱状粒子取向性, 对柱状粒子的运动姿态对循环流化具有非常重要的影响。根据实际冷态循环流化床的结构及运行参数, 采用数值模拟方法, 对床内的气固两相流场进行了模拟, 研究并阐述了柱状粒子的运动姿态的一些特性。柱状粒子多以竖直姿态在流场中运动; 流场风速及床高对柱状粒子的取向性有一定的影响, 而柱状粒子的长径比及密度对柱状粒子的取向性没有明显的影响。

关键词: 柱状粒子; 循环流化; 取向性; 数值模拟; 姿态角
中图分类号: TK16 文献标识码: A

引言

柱状粒子的循环流化在工业生产中具有非常广泛的应用背景^[1~3], 比方说生物质秸秆在循环流化床中的流化、燃烧和烟丝在循环流化床中的干燥、加湿等。因此, 研究柱状粒子的循环流化具有非常重要的意义。各种姿态角的柱状粒子的数量百分比分布叫做柱状粒子的取向性。其中, 最重要的为沿柱状粒子运动方向的姿态角分布, 在本文中即为竖直取向性。取向性是柱状粒子在循环流化过程中的一个非常重要的特性^[4~8], 然而, 目前关于柱状粒子取向性的研究还很不成熟, 许多问题亟待研究。本文根据实际冷态循环流化床的结构及运行参数, 采用数值模拟方法, 对床内的气固两相流场进行了数值模拟, 研究并阐述了在循环流化过程中柱状粒子运动姿态的一些特性。研究发现, 柱状粒子的取向性在水平方向上大致成平均分布, 在竖直方向上表现出较强的选择性, $0 \sim 15^\circ$ 夹角范围内的粒子百分含量最高, $75 \sim 90^\circ$ 夹角范围内的粒子百分含量最低, 粒子多以近于竖直的姿态在循环流化床内运动; 柱状粒子的取向性与流场风速、床高有关, 而与柱状粒子的长径比及密度没有明显的关联。由于采用单粒子运动模型(不考虑粒子间的碰撞), 仅有气场对粒子场单向耦合, 因此, 柱状粒子浓度对流化的影响无

法揭示, 这是本文的一个不足。

1 数学模型的构建

1.1 物理模型

循环流化床床体结构如图 1 所示, 空气由风室经由床底部的布风板送入床层, 将在布风板上的油燃料及惰性粒子组成的固体粒子吹起, 在重力的作用下, 被吹升到一定高度的固体粒子又会落下。在一定的空气流速下, 布风板上的一部分或全部固体粒子就会产生双向运动, 即在风压的作用下粒子上升和浮起, 又在重力的影响下下落, 类似于液体在沸腾时的状态一样, 固体粒子床层也膨胀起来, 此时称固体粒子(床料)进入了流化状态^[9]。当有固体粒子从上部溢出时, 会通过循环装置重新由底部进入提升管内。

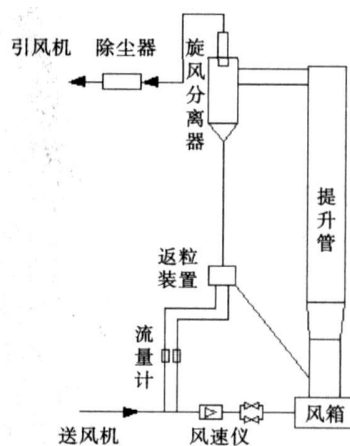


图 1 循环流化床结构示意图

1.2 数学模型

由于流化床内柱状粒子所占体积份额远低于气相场, 柱状粒子对气相场的作用可以忽略不计。因此, 将气相场作为连续相, 采用欧拉方法进行处理; 将柱状粒子作为离散相, 采用拉格朗日方法进行跟踪处

理。数学模型采用单相耦合,即只考虑气相场对柱状粒子的作用,而忽略固相场对气相场的影响。

1.2.1 气相场数学模型

气相场采用数学模型有 $N-S$ 方程和湍流 $k-\epsilon$ 模型。

$N-S$ 方程:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu' - \frac{2}{3} \mu) \text{div} V \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (p'_{ij}) \quad (1)$$

式中: μ' —第二粘性系数, μ 与温度和压力有关, $V = u_i + v_j + w_k$ 。

湍流 $k-\epsilon$ 模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{cases} \quad (2)$$

其中: G_k —由层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b —由浮力产生的湍流动能; Y_M —在可压缩湍流中过渡的扩散产生的波动, $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ —常量; σ_k 和 σ_ϵ — k 方程和 ϵ 方程的湍流 Prandtl 数; S_k 和 S_ϵ —用户自定义气相场边界条件,采用固体边界条件,气相场使用 Fluent 商业软件计算。

1.2.2 离散相数学模型

对于柱状粒子固相场的计算,为避免过大的计算量,以一定量的取样柱状粒子代替数目庞大的真实柱状粒子,通过跟踪计算每一个柱状粒子求解离散场^[10~12]。首先将气相场划分为若干个网格,而将每一个柱状粒子分成若干等分,每分段柱状粒子近似为球形粒子,分别判断每分段柱状粒子处于哪个气相场网格,并在相应气场网格内对每分段柱状粒子进行受力分析;对若干等分柱状粒子所受分力求矢量和得柱状粒子所受合力,并根据力矩公式求柱状粒子所受力矩;最后根据柱状粒子所受合力及力矩求柱状粒子在循环流化床内的运动。

模型中考虑到的力有气流对柱状粒子的携带力 F_D 和重力,相关计算式为^[10]:

$$\begin{cases} F_{Dj} = \pi C_D d_p^2 \rho_c |u_c - u_{ij}| (u_c - u_{ij}) / 8 \\ F_D = \sum_{j=1}^n F_{Dj} \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{ij} = u + \omega_i \times r_{ij} \quad (4)$$

其中, F_{Dj} —每分段柱状粒子所受流体携带力; C_D —

流体曳力系数; u_c —气相场速度; d_j 、 ρ_c 、 u_{ij} —每分段柱状粒子的直径、密度、速度; u_i —柱状粒子基准点速度; ω_i —柱状粒子角速度; r_{ij} —柱状粒子每分段相对于柱状粒子基准点的位置矢量。

对于单个柱状粒子,运动方程为^[11~12]:

$$\begin{cases} f_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \\ \ddot{s}_i = f_i / m_i + g \end{cases} \quad (5)$$

其中: f_i —柱状粒子受到的流体携带力; f_{ij} —每分段柱状粒子受到的流体携带力; $\ddot{s}_i$ —柱状粒子的加速度; m_i —柱状粒子的质量; g —重力加速度。

$$M_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \times r_{ij} \quad (6)$$

$$\begin{cases} J_{\xi\xi} \omega_\xi + (J_{\xi\eta} - J_{\eta\xi}) \omega_\eta \omega_\xi = \sum m_\xi (F) \\ J_{\eta\eta} \omega_\eta + (J_{\eta\xi} - J_{\xi\eta}) \omega_\xi \omega_\eta = \sum m_\eta (F) \\ J_{\zeta\zeta} \omega_\zeta + (J_{\zeta\eta} - J_{\eta\zeta}) \omega_\eta \omega_\zeta = \sum m_\zeta (F) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{\psi} = (\omega_\xi \sin \varphi + \omega_\eta \cos \varphi) / \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega_\xi \cos \varphi - \omega_\eta \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = \omega_\zeta - (\omega_\xi \sin \varphi + \omega_\eta \cos \varphi) / \cot \theta \end{cases} \quad (8)$$

其中: M_i —柱状粒子受到的流体力矩; ω_ξ 、 ω_η 和 ω_ζ —柱状粒子角速度在连体坐标系 ξ 、 η 、 ζ 3 个轴上的投影; ω_ξ 、 ω_η 和 ω_ζ —柱状粒子解加速度在连体坐标系 ξ 、 η 、 ζ 3 个轴上的投影; $J_{\xi\xi}$ 、 $J_{\eta\eta}$ 和 $J_{\zeta\zeta}$ —柱状粒子相对于连体坐标系 ξ 、 η 、 ζ 3 个轴的转动惯量; ψ 、 θ 和 φ —连体坐标系相对固定坐标系欧拉角中的进动角、章动角和欧拉角; $\dot{\psi}$ 、 $\dot{\theta}$ 和 $\dot{\varphi}$ — ψ 、 θ 、 φ 的时间微分,为了避免出现奇点,计算中使用了四元数^[13]。

柱状粒子壁面碰撞模型为:

$$\begin{cases} m_i (\dot{u}'_i - u_i) = S_n \\ J_i (\dot{\omega}'_i - \omega_i) = r_{ij} \times S_n \end{cases} \quad (9)$$

其中: u'_i 、 u_i —碰撞前后粒子速度; ω'_i 、 ω_i —碰撞前后角速度; S_n —冲量。

柱状粒子的跟踪计算采用 C 语言编程求解。

1.3 计算参数

表 1 计算参数

数值		数值	
空气运动粘度	23.8 × 10 ⁻⁶	计算时间	0.001
/m ² ·s ⁻¹		步长/s	
柱状粒子	0.01	柱状粒子	3 × 10 ³
直径/m		密度/kg·m ⁻³	
柱状粒子入口	0~2	柱状粒子入口	0~2
速度/m·s ⁻¹		角速度/rad·s ⁻¹	

循环流化床提升管高 4.363 m,柱状粒子入口主流方向速度为 0~2 m/s,3 个轴方向的角速度为 0

~2 rad/s, 柱状粒子的速度、角速度和位置均以随机方式给出; 每隔 0.01 s 往流化床内放入一定数量的柱状粒子。数值模拟计算参数条件如表 1 所示。将

0~90° 范围内的夹角分成 6 个取样区间, 如表 2 所示, 与 z 轴方向夹角如图 2 所示。

表 2 计算条件

	1	2	3	4	5	6
姿态角 $\theta/(^{\circ})$	0~15	15~30	30~45	45~60	60~75	75~90
床高区域分布/m	0~0.872 6	0.872 6~1.745 2	1.745 2~2.617 8	2.617 8~3.490 4	3.490 4~4.363	—
长径比	3	5	7.5	9	10	—
入口风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	9	10	11	13	15	—

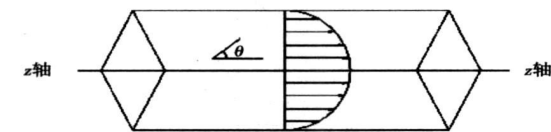


图 2 方形提升管内气场

状粒子在此处大量积聚。



图 4 柱状粒子取向性模拟结果

2 数值模拟结果

2.1 气场数值实验结果

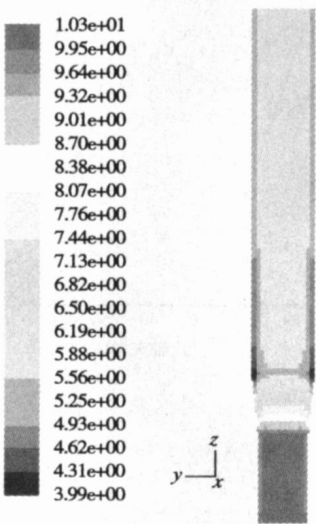


图 3 循环流化床内气相场模拟结果(m/s)

图 3 为气相场数值模拟结果。在下部截面积较小区域, 风速较大。上面管径较粗区域, 风速较小。但最小风速度并不是出现在提升管出口处, 而是出现在截面积过渡区管壁附近。图 4 为离散柱状粒子模拟计算结果。由图 4 可以看出, 由于床内过渡区截面积趋于变大, 因而此处的气场风速越来越小, 柱

2.2 柱状粒子取向性

以 0.05 m 长度的柱状粒子作为床料, 当循环流动处于稳定状态时, 每隔 0.2 s 进行一次取样, 然后取它们的平均值, 计算结果如图 5 和图 6 所示。可以看出, 在水平方向上各种姿态角的柱状粒子的数量百分比基本相同, 都在 17% 左右, 姿态角没有明显选择性; 在竖直方向上, 粒子的取向性成不均匀分布, 随着角度增大, 数量百分比越小, 处于 0~15° 夹角范围的数量百分比最高; 超过 45°, 75~90° 夹角范围内的数量百分比最低, 低于 15%。将计算结果与文献[14]实验结果比较, 两者比较吻合, 如图 7 所示。分析可见, 当柱状粒子在气相场中受力运动时, 在水平方向各处所受力矩均匀, 因此取向分布比较平均; 由于竖直方向受到的力矩较大, 柱状粒子在竖直方向具有较大转速; 此外, 可能由于处于竖直姿态的柱状粒子在提升管内受到的阻力较小, 也就是符

合势能最小原则。因此,粒子多以与 z 轴成小角度的姿态角在循环流化床内运动,取向性非常明显。

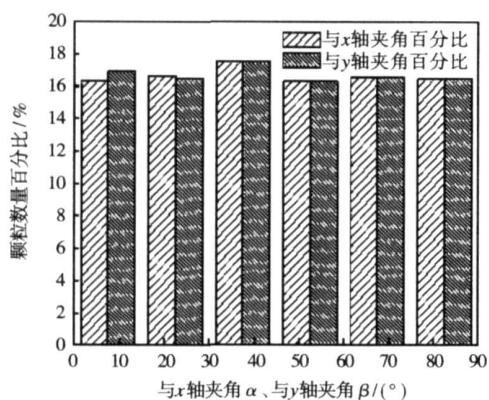


图5 柱状粒子水平取向性模拟

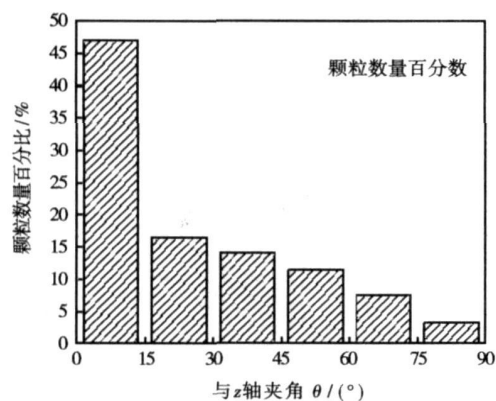


图6 柱状粒子竖直取向性模拟

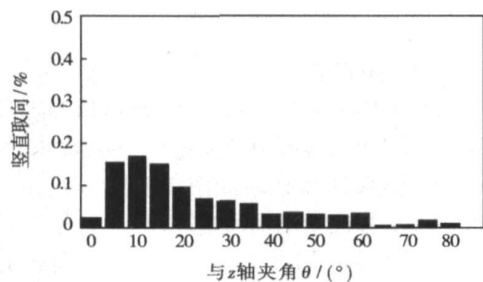


图7 柱状粒子竖直取向性实验统计

2.3 柱状粒子长径比对取向性的影响

柱状粒子的长径比表示柱状粒子的长度与直径比。为了解柱状粒子的长径比对柱状粒子取向性的影响,进行了5种长径比条件下的取向性模拟研究,具体长径比情况如表2所示。由图8可以看出,随着柱状粒子长径比的增大,柱状粒子的姿态角仍多为与 z 轴成小角度,取向性情况始终为 $0 \sim 15^\circ$ 夹

角范围内的粒子百分比最高;以水平姿态角流化的柱状粒子比例非常小,粒子数量百分比随长径比变化很小,粒子的长径比对取向性的影响不明显,此结论与文献[1~2]一致。本文也对粒子密度对取向性分布的影响作了模拟研究,发现粒子取向性与粒子密度关系不大,只是不同的密度的粒子所需要的流化风速不同。

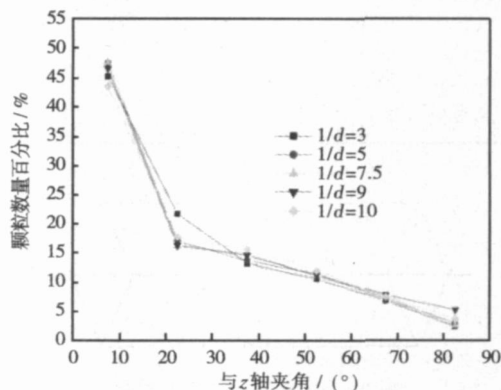


图8 不同长径比条件下柱状粒子竖直取向性模拟

2.4 柱状粒子的取向性随床高变化特性

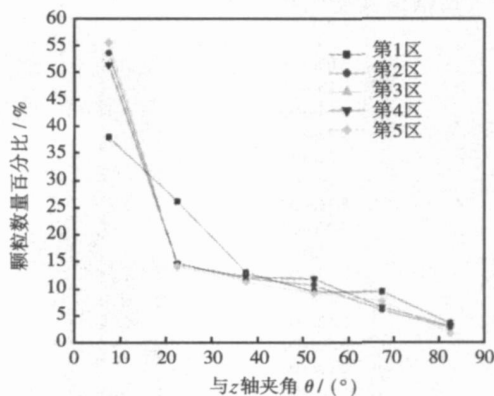


图9 不同床高区域柱状粒子竖直取向性模拟

为了研究提升管内柱状粒子的取向性随高度变化的规律,由低到高将实验循环流化床平均分成5个区域,并分别对这5个区域的取向性进行分析,图9给出了提升管内柱状粒子取向性随高度变化的规律。可以看出,粒子取向性随高度变化呈现一定的紊乱性;在1区,也就是提升管底层, $0 \sim 15^\circ$ 夹角范围的粒子数量百分比虽是最,但比例不到40%;但随着高度增加,以竖直姿态流动的粒子数量百分比逐渐趋于稳定,达到50%以上,除2区可能由于是一段渐扩管从而导致此处粒子取向性略有波动外,其它区域随着管的高度增加, $0 \sim 15^\circ$ 夹角范围

的数量百分比逐渐增加, 但增加幅度非常小, 粒子多以近于竖直的姿态在提升管内流动。

2.5 柱状粒子的取向性随气场风速变化特性

目前还较少针对气场风速对柱状粒子在循环流化床内的取向性影响的研究。本节通过计算 5 个入口流化风速条件下的柱状粒子的运动, 研究柱状粒子的取向性随气相场风速变化的规律, 如表 2 所示。由图 10 可以看出, 不管在什么气场风速条件下, 柱状粒子多以竖直的姿态在流化床内流化运动, 并随着气场风速的增加, 以竖直姿态流动的粒子数量百分比略有下降。

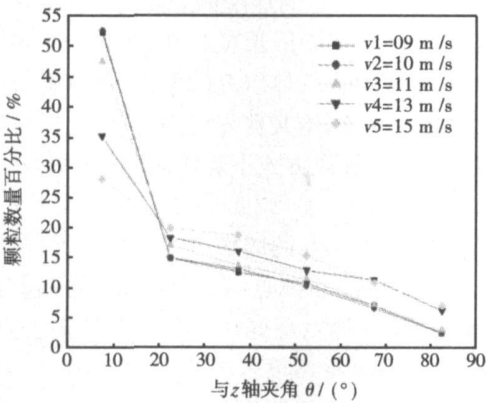


图 10 不同气场风速条件下柱状粒子竖直取向性模拟

3 结 论

采用数值模拟手段, 计算分析了循环流化过程中提升管内柱状粒子的取向性特性, 揭示了柱状粒子在流化过程中的姿态角与流化风速、床高等相关因素的关系。研究发现, 在循环流化过程中, 柱状粒子在水平方向上的取向性没有明显的选择性, 分布均匀, 而在沿粒子流动方向则表现出明显的选择性, 粒子多以与粒子流动方向呈小角度的姿态角流化运动; 柱状粒子取向性与柱状粒子的长径比的关系不明显; 以竖直姿态流动的粒子在提升管内底层的数量百分比小于底层以上部分, 并且, 随着高度的增加, $0 \sim 15^\circ$ 夹角范围的数量百分比逐渐增加, 但增加幅度非常小; 在一定范围内流化速度范围内, 随着气场风速减小, 以竖直姿态角在提升管内流化运动的柱状粒子的数量百分比增大。

参考文献:

[1] 张卫峰, 林建忠. 气固两相管道流中柱状粒子取向的数值研究[J]. 空气动力学学报, 2003, 21(2): 237—243.

[2] 范 磊, 杨 超, 禹耕之, 等. 大长径比柱状粒子的沉降实验和曳力系数的关联[J]. 化工学报, 2003, 54(10): 1501—1503.

[3] 林建忠, 林 江, 石 兴. 两相流中柱状固粒对流体湍动特性影响的研究[J]. 应用数学和力学, 2002, 23(5): 483—488.

[4] 林建忠, 张凌新. 悬浮流中柱状粒子取向分布函数的数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2002, 23(8): 805—810.

[5] ZAK G. Estimation of three-dimensional fiber-orientation distribution in short-fiber composites by a two-section method[J]. Journal of Composite Materials, 2001, 35(4): 316—330.

[6] GIVLER R C, CROCHET M J, PIPES R B. Numerical prediction for fiber orientation in dilute suspensions[J]. J Compos Mat, 1983, 17: 330—343.

[7] GIVLER R C. A numerical technique for the prediction of short fiber orientation resulting from the suspension flow //Transport Phenomena in Material Processing C]. New York: ASME, 1983. 99—103

[8] FOLGAR F P, TUCKER C L. Orientation behavior of fibers in concentrated suspensions[J]. J Reinf Plast Com Pos, 1984, 3: 98—119

[9] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002

[10] 袁竹林. 流化床中颗粒流化运动的直接数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(2): 120—122.

[11] 张劲夫, 秦卫阳. 高等动力学[M]. 北京: 科技出版, 2004.

[12] 曾 凡, 朱建太. 刚体姿态仿真研究[J]. 航空计算技术, 2003, 33(3): 14—18.

[13] 张 帆, 曹喜滨, 邹经汀. 一种新的全角度四元数与欧拉角的转换算法[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(4): 376—380.

[14] BERNSTEIN O, SHAPIRO M. Direct determination of the orientation distribution function of cylindrical bodies immersed in laminar and turbulent shear flows[J]. Aerosol Sci, 1994, 25(1): 113—136.

(编辑 滨)

° 书 讯 °

齿轮机构设计与应用

本书除了介绍一般的圆柱齿轮、锥齿轮和蜗杆传动外, 还介绍了一些特殊形状的齿轮, 如偏心齿轮、变齿厚齿轮、非圆齿轮和准椭球齿轮等。对于每种形状的齿轮, 首先介绍其一对齿轮的设计方法, 然后再介绍以其组成的齿轮机构, 其中又主要介绍这种齿轮组成的行星机构的设计与应用, 实用性非常强。

读者对象: 齿轮设计与应用技术人员, 大专院校师生。

2007 年 6 月出版

柱状粒子循环流化过程中取向性的数值研究=A Numerical Study of the Orientation of Columnar Particles in Their Circulating Fluidization Process[刊, 汉]/CAI Jie, WU Xuan, YUAN Zhu-lin (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(6). — 625~629

The circulating fluidization of columnar particles has extremely wide applications in industrial production. Orientation represents a major characteristic of columnar particles. The movement posture of columnar particles exercises a very important influence on circulating fluidization. Depending on the actual structure and operating parameters of a cold-state circulating fluidized bed, a simulation was performed of a gas-solid two-phase flow field in the bed by using a numerical simulation method along with the study and exposition of some characteristics of the movement posture of columnar particles. In most cases, the columnar particles move in the flow field with an upright posture. The wind speed of a flow field and bed height have a certain influence on the orientation of the columnar particles but the length-diameter ratio and density of the latter have no obvious influence on the orientation of the particles in question. **Key words:** columnar particle, circulating fluidization, orientation, numerical simulation, attitude angle

链条炉中推迟配风方式的特性研究=A Study of the Specific Features of Postponed Air-distribution Mode in a Travelling Grate Stoker[刊, 汉]/JI Jun-jie, LUO Yong-hao, CHANG Bing, et al (Thermal Energy Engineering Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(6). — 630~633

By using gas chromatography a study was conducted of the law governing the distribution of various gas constituents along the length of a chain at the lower coal-layer surface of a 6.5 t/h travelling grate stoker. The study has been performed under the following three different air distribution modes, i. e. at-the-earliest-possible-time, uniform and postponed. The results of the study show that both the first and third air distribution mode can lead to a relatively low oxygen-content level as a whole relative to that of the uniform air distribution mode. However, the postponed air distribution mode can promote the combustion of coke in the middle and later stages of coal combustion and release in a concentrated manner a great quantity of CO and CO₂. Under the postponed air distribution mode, the solid-state carbon has been converted to a maximum amount of gas-state carbon (CH₄, CO, CO₂), indicating the highest burn-out rate of the coal layer. A numerical simulation of in-furnace gas-phase combustion further shows that the postponed air distribution mode is also favorable to the formation of a flame vortex at the lower portion of a front arch on a new type of double-herringbone furnace arch, which directly sweeps the newly-fed coal, thereby guaranteeing and accelerating its ignition and combustion. **Key words:** travelling grate stoker, combustion, air distribution mode, double herringbone type furnace arch

船用增压锅炉的炉膛对流传热计算=Calculation of the Convection Heat Transfer in a Marine Supercharged Boiler Furnace[刊, 汉]/ZHANG Yong (Boiler Design Department, CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(6). — 634~637

The furnace heat transfer calculation of normal pressure combustion boilers has long been mastered by boiler designers, in which the convection heat transfer can be virtually ignored. Due to an increase of combustion pressure in supercharged boilers, the convection heat transfer has been intensified and the neglect of convection heat transfer will directly influence the accuracy of the furnace thermodynamic calculation. The furnace characteristic parameters of supercharged boilers are compared with those of normal-pressure combustion ones along with an analysis of the supercharged boiler test data of the former Soviet Union. The influencing factors on furnace convection heat transfer in a supercharged boiler have been pinpointed. The author has proposed that the furnace heat transfer calculation of a supercharged boiler should be divided into a radiation and convection one. A calculation formula applicable for furnace convection heat transfer in a supercharged boiler was given and a specific case calculation and analysis has been conducted. The calculation results approximate to those obtained from the tests of the supercharged boiler of the former Soviet Union. The foregoing can provide a definite theoretical and practical guidance for improving the furnace thermodynamic calculation of supercharged boilers. **Key words:** supercharged boiler, furnace, convection heat transfer calculation