

# 循环流化床回料阀内气固两相流的实验研究

夏晓宇, 李 渊, 朱 彤

(同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

**摘 要:** 对循环流化床回料阀内的气固两相流动进行了冷态实验及数值模拟。根据循环流化床回料阀内的气固两相流的特点, 选用欧拉模型对回料阀中的流动进行模拟, 分析了回料阀内压力场、气相和固相流场结构。研究表明: 立管压差与立管内的物料堆积高度成正比; 回料阀内气、固两相流场结构相似; 配料室内空隙率分布在 0.45~0.55 之间, 输送室内空隙率大部分分布在 0.65~0.9 之间; 气相速度分布对回料阀内空隙率分布有重要影响, 速度较大的区域空隙率较大, 反之亦然。

**关 键 词:** 循环流化床; 回料阀; 气固两相流

中图分类号: TK223.7 文献标识码: A

## 引 言

回料阀是连接流化床密相区和气固分离器的关键部件, 其进出口静压力梯度与回料阀内的物料和气流的方向相反, 内部流动过程比较复杂。国内外许多学者对各种型的回料阀进行了实验研究, 得到了回料阀返料特性的经验式。随着数值计算方法的发展, 许多研究者提出建立多相流的理论模型来模拟气固两相流, 理论模型包括拉格朗日模型、欧拉模型和混合物模型等。研究表明, 在大尺度范围内, 欧拉双流体模型是目前最适合于计算流化床内稠密气固两相流的模型。国内, 王淑彦、刘阳和杨太阳等人对鼓泡床内气固两相流动做过数值模拟研究<sup>[1~3]</sup>, 得到了鼓泡床内空隙率分布和颗粒运动的特点等; 高建民等人对循环流化床气固分离器内的两相流动进行数值分析<sup>[4]</sup>, 得到了气固分离器内颗粒的运动轨迹及分离规律。目前为止, 国内外对循环流化床回料阀内两相流的数值模拟研究还很少。本研究主要根据冷态循环实验对循环流化床回料阀内的气固两相流动进行数值模拟, 探讨立管内物料量、压力和松动风量等对回料阀返料特性的影响。

## 1 实验装置及方法

循环流化床区别于流化床的最大特点是大量固体颗粒在流化床、分离装置和回料装置所组成的固体颗粒循环回路中循环。流化床主床内大致可分为下部的密相区和上部的稀相区, 流化床密相区与分离装置之后回料装置入口的压力差由流化床内物料量和旋风分离器的流动阻力决定。流化床主床内固体颗粒处于完全流化状态, 物料量越多, 产生的压力差越大。回料装置连接分离装置和流化床密相区, 基本任务是既将分离器分离出来的固体颗粒稳定、可控地送回压力较高的流化床密相区, 又要防止流化床密相区的气流通过回料装置反窜入分离器。

回料装置主要包括回料立管、回料阀和回料斜管 3 部分。研究的 U 型回料阀分为左室和右室: 左室为配料室, 上部与回料立管相连, 底部通入松动风; 右室为物料输送室, 其上部与回料斜管相通, 底部通入流化风。

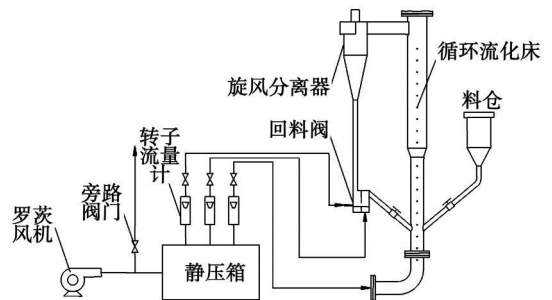


图 1 实验装置

实验装置如图 1 所示。流化主床体采用下部细、上部粗的两段管道组合的方式设计, 利用有机玻璃制造。下部管道规格为内径 100 mm, 长度 800

mm; 上部管道规格内径 150 mm, 长度 1 123 mm; 中间过渡段长 77 mm。回料立管和回料斜管的管径为 30 mm; 回料阀的净尺寸为 110 mm×100 mm×80 mm; 中间挡板厚 10 mm; 中间挡板距离回料阀底部(水平孔口高度)20 mm。

罗茨风机供风至静压箱, 经转子流量计分别分配到流化床主床及回料阀中, 风量大小分别由阀门控制。主床体上及旋风除尘器和回料阀的进出口有多个测压孔, 使用 U 形管测量压差, 测压孔内塞有多孔过滤材料防止物料进入测压管中。

使用平均粒径为 0.46 mm 的细沙作为实验物料, 夹杂 2% 左右的黑色橡胶颗粒作为示踪粒子, 方便测量物料循环量。实验时, 物料从料仓中加入, 关闭回料斜管上的阀门, 启动主床风。物料流化, 并被风夹带出提升管进入旋风分离器, 在旋风分离器的作用下, 固体颗粒沿回料立管落入回料阀内。当固体颗粒落满回料阀并在回料立管中堆积一定的高度后, 打开回料斜管上的阀门, 同时打开流化风与松动风, 在回料阀的作用下完成物料的循环。实验中通过流化风和松动风的通风量大小来调节控制固体颗粒的循环量。

## 2 数值模拟数学模型

### 2.1 欧拉双流体模型

欧拉双流体模型将颗粒作为拟流体, 假设气相和固相都是连续介质, 在空间各点按各自的体积份额共同存在且相互渗透。颗粒和气体间存在相互滑移, 采用类似于 Navier-Stokes 方程的形式来考虑气固两相间的作用。根据质量守恒和动量守恒定律, 建立连续方程和动量方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) = 0 \quad (1)$$

式中:  $\alpha_i$ —各相的体积份额,  $\sum \alpha_i = 1$ 。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \mathbf{v}_i \alpha_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i) = -\alpha_i \nabla P + \nabla \times \tau_i + K_{ij}(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) + \alpha_i \rho_i (F_i + F_{ift,i} + F_{vm,i}) \quad (2)$$

式中:  $j$ —固相或气相;  $F_i$ ,  $F_{ift,i}$ ,  $F_{vm,i}$ —外部体积力、升力和虚拟质量力,  $N$ ;  $\tau_i$ —应力张量,  $\tau_i = \mu_i [\nabla \mathbf{v}_i + (\nabla \mathbf{v}_i)^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{v}_i) \mathbf{I}]$ ,  $N \cdot m^{-2}$ ;  $K_{ij}$ —相间

动量交换系数, 采用 Gidaspow 模型<sup>[6]</sup>:  $K_{ij} = \frac{3}{4} C_{Ds} \times$

$$\frac{\rho_g \alpha_s \alpha_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s|}{d_p \phi_s} \alpha_g^{-2.65}, \alpha_g > 0.8 \quad K_{ij} = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_g}{\alpha_g (d_p \phi_s)^2} + 1.75 \frac{\rho_g \alpha_s |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s|}{d_p \phi_s}, \alpha_g < 0.8$$

### 2.2 计算模型及边界条件

模拟时回料阀几何模型尺寸与冷态实验台尺寸一致, 如图 2 所示, 划分网格数量为 10 万。采用非稳态求解器进行计算, 两相流模型选用欧拉模型, 湍流模型选用  $k-\epsilon-RNG$  模型, 对固相拟流体的属性定义选用  $\mu_{un}-\epsilon_{t-a}$  模型, 气固相作用选用 schiller-er-naumann 模型。模拟中设定循环物料的平均粒径为 0.1 mm; 真实密度为 2 980 kg/m<sup>3</sup>。

计算的初始状态为物料充满输送室及立管中 300 mm 高度以下的区域, 时间步长设为 0.000 1 s。流化风量在流化数 2~4 取值; 松动风量在流化风量的 1/10 左右取值<sup>[7]</sup>; 回料斜管出口压力设置为零, 作为压力参考点; 立管物料进口的压力值取决于主床内的物料量, 根据实验测得结果, 设置范围为 -1.0~-3.5 kPa 对应主床内不同的物料量。边界条件的类型设定及部分设定值范围如表 1 所示。

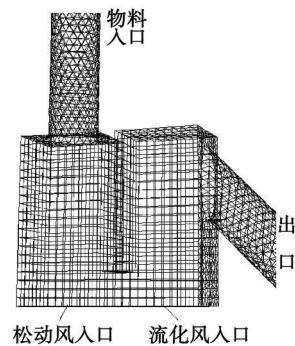


图 2 回料阀几何模型及网格划分

表 1 边界条件类型及部分条件设定

边界	边界条件类型	边界条件设定
松动风入口	速度入口	0.03~0.08 m/s
流化风入口	速度入口	0.3~0.6 m/s
回料斜管出口	压力出口	出口背压 0 Pa(压力参考点)
立管物料入口	质量流量入口	质量流量 10~60 g/s
		入口压力 -1.0~-3.5 kPa

## 3 结果分析

### 3.1 回料阀内的压力分布

图 3 为回料阀正常运行下的等压线分布, 工况设

定为：流化风风速为 0.4 m/s, 松动风风速为 0.04 m/s, 回料阀斜管物料出口处的压力为零, 回料阀立管物料进口处的物料质量流量为 30 g/s, 压力为 -3 kPa。模拟计算结果表明, 在立管中随高度的降低压力逐渐增加, 在回料阀配料室底部达到最大值, 为 0.6 kPa, 大于回料阀斜管物料出口处的压力。说明: 松动风和流化风的压力比流化床密相区的压力要大, 否则无法使回料阀内的气流和物料输送至流化床密相区。同时, 尽管回料阀底部与回料阀立管物料进口处的压力差相对回料阀底部与流化床密相区的压力差更大, 但是没有气流通过立管。这就要求立管和回料阀中物料所形成的阻力必须大于 3.6 kPa (回料阀底部与回料阀立管物料进口处的压力差)。

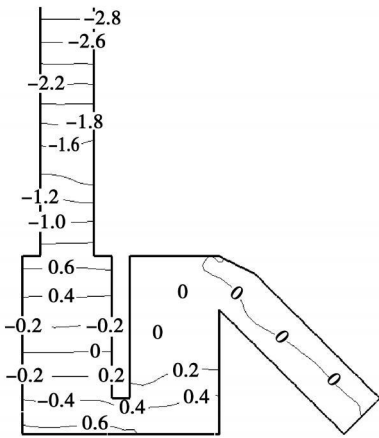


图 3 回料阀压力分布 (kPa)

### 3.2 回料阀立管中物料量对压力分布的影响

立管顶部与回料阀底部之间的压力差为立管压差, 实验中发现其值取决于立管中的物料量。试验结果与模拟结果显示, 立管压差与立管内堆积的物料高度成正比关系, 如图 4 所示。实验值与数值模拟结果吻合很好。

对填充床流动以及移动床流动的大量研究表明, 如果忽略壁面摩擦损失, 压力梯度可以通过 Ergun 方程来表示:

$$\frac{|\Delta P|}{L} = \frac{150\mu_g(1-\epsilon)^2}{(\phi_s d_p)^2 \epsilon^2} U_{s1} + \frac{1.75\rho_g(1-\epsilon)}{(\phi_s d_p) \cdot \epsilon} U_{s1}^2$$

式中:  $\epsilon$ —空隙率;  $\phi_s$ —颗粒球形度;  $U_{s1}$ —气固相对速度, m/s

由上式可知, 在同一管段中, 其它参数不变的情况下, 压力梯度与管内空隙率  $\epsilon$  有关。回料立管中的空隙率分布不均匀, 上部空隙率很大, 下部物料堆积, 空隙率较小。所以在回料立管中, 立管压差的值主要由立管内堆积物料的高度所决定。

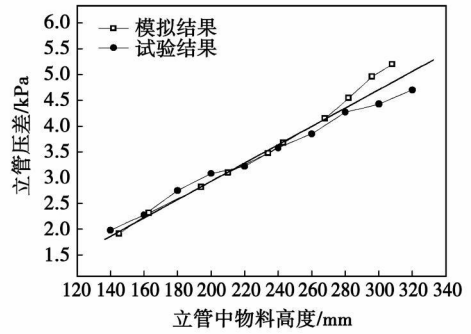


图 4 物料高度与立管压差关系

根据模拟结果及实验结果回归得到立管中物料高度与立管压差之间的关系为:  $\Delta P = 17.568 L$ 。

可见, 立管内的物料量越多, 提供的阻力越大, 越有利于防止气流反窜。但是, 也不能任意增加立管中物料的高度。实验中观察到, 过多的物料量将会堵塞立管, 使立管中的物料无法下落至回料阀, 不利于物料的正常循环。

### 3.3 回料阀内的气固相流场分析

回料阀内的气固两相流为稠密两相流。由于固体颗粒处于半流化状态, 其浓度较流化床中更高。图 5 和图 6 为回料阀内气相和固相的速度矢量分布。由于固相的流动是气体带动的, 而且只有气体的速度达到一定的值才能带动固体颗粒运动, 所以气相比固相流速稍大。气、固相流场的最大差异在输送室及回料斜管顶部 (如图中画圈部分), 此处气体在壁面作用下, 没有向上的速度矢量, 而是贴着回料阀顶壁向回料斜管方向流动; 而固相在这里没有受到气体向上的曳力作用, 尽管有水平方向的曳力作用, 但是部分固体颗粒在重力作用下而回落。因此, 输送室以及回料斜管顶部部分区域没有固相存在, 固相的速度接近零, 速度矢量图显示空白。

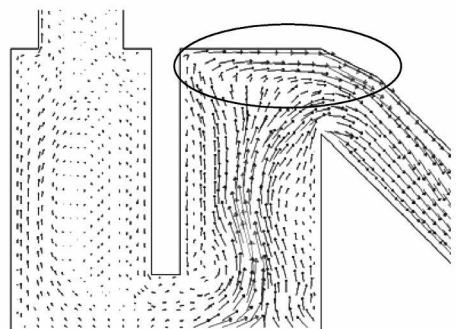


图 5 气相速度矢量分布

与输送室相比, 配料室内速度很小, 只是起到松

动物料的作用。配料室左侧速度方向向上, 靠近配料室的右侧方向向下, 形成局部环流。而在输送室边壁附近, 由于边壁的影响, 气体速度减小, 部分固体颗粒在重力作用下沿边壁回落, 且反作用于气体, 使得靠近中间隔板边壁的气体向下运动。该数值模拟结果与文献 [8] 的结果一致。

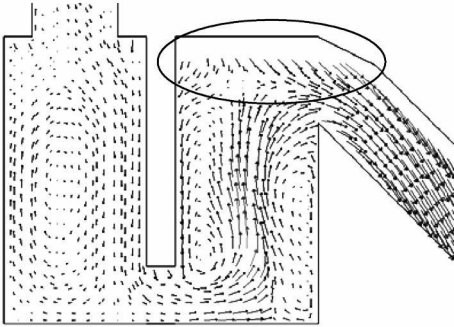


图 6 固相速度矢量分布

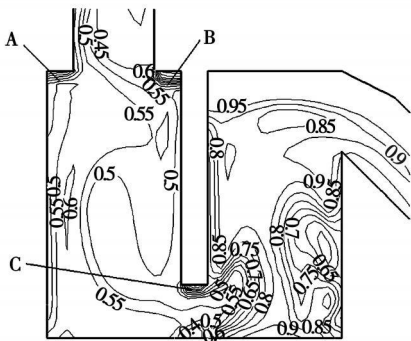


图 7 回料阀内空隙率分布

图 7 为回料阀内空隙率分布。由于回料阀内的物料并未完全流化, 所以空隙率分布并不均匀。配料室内空隙率分布在  $0.45 \sim 0.55$  之间, 处于充气半流化状态; 输送室内空隙率大部分分布在  $0.65 \sim 0.9$  之间, 颗粒完全流化并且被带出; 输送室顶部及回料斜管上部, 空隙率大于  $0.95$  几乎没有固体颗粒, 与速度矢量图分析结果一致。图中所示 A B C 3 处空隙率变化梯度较大, 对比速度矢量图可知, 由于这 3 处都在边壁拐角处, 气流速度较小, 对固体颗粒的作用力较小, 固体颗粒易堆积。输送室的底部以及出口处, 空隙率较大, 这是由于输送室的底部是流化风和松动风的汇流处, 气流速度较大, 而斜管入口处流动截面突然变小, 气流速度也较大, 此两处的气

流对固体颗粒的作用力较强。可见回料阀内速度场分布对回料内的空隙率分布有重要影响, 局部速度大的地方空隙率也较大, 反之亦然。

## 4 结 论

对回料阀内的气固两相流动进行了实验及数值模拟, 得到结论:

(1) 尽管配料室、输送室与立管物料进口处的压力差大于配料室、输送室与斜管物料出口处的压力差, 但是在回料阀、立管堆积的物料所形成的阻力作用下, 气流和物料通过斜管流向流化床密相区。因此, 立管中物料堆积的高度对循环流化床的正常工作有重要的影响。

(2) 立管压差与立管内的物料堆积高度成正比关系, 立管内的物料量越多, 越有利于防止气流反窜。但是也不能任意增加立管中物料的高度, 过多的物料量将会堵塞立管, 使立管中的物料无法下落至回料阀。

(3) 回料阀内气、固两相流场结构相似, 且气相速度分布对回料阀内空隙率有重要影响。速度大的区域空隙率大, 反之亦然。配料室速度较小, 空隙率分布在  $0.45 \sim 0.55$  之间, 处于半流化状态; 输送室内速度大, 空隙率在  $0.65 \sim 0.9$  之间, 流化并被带出。

## 参考文献:

- [1] 王淑彦, 赵云华, 姜健, 等. 数值模拟颗粒旋转对流化床内气固两相流动特性的影响 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 262-264
- [2] 刘 阳, 陆慧林, 刘文铁, 等. 循环流化床多组分颗粒气固两相流动模型和数值模拟 [J]. 化工学报, 2003, 54(8): 1065-1071.
- [3] 杨太阳, 王安仁, 张锁江, 等. 气固鼓泡流化床的流动特性数值模拟 [J]. 计算机与应用化学, 2005, 22(3): 206-210.
- [4] 高建民, 秦裕瑞, 高继慧, 等. 循环流化床脱硫塔内流场及气固分离特性数值模拟 [J]. 热能动力工程, 2006, 21(5): 487-490.
- [5] 王 擎, 骆仲决, 岑可法, 等. 循环流化床锅炉回路压力平衡理论的分析 [J]. 动力工程, 2001, 21(1): 1022-1026
- [6] GIDASPOW D. Continuum and kinetic theory descriptions [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [7] 王 擎, 孙 键, 李绚天, 等. 循环流化床锅炉 Loop Seal 型返料装置的试验研究 [J]. 化工机械, 1999(4): 187-191
- [8] 安恩科, 徐通模. 循环流化床锅炉 (CFB) 边壁下降流的生成机理 [J]. 动力工程, 1997, 17(6): 69-72

循环流化床回料阀内气固两相流的实验研究 = Experimental Study of the Gas-solid Two-Phase Flow Inside the Material Return Valve of a Circulating Fluidized Bed [刊, 汉] / XIA Xiao-yu, LI Yuan, ZHU Tong (College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 201804) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5), —510 ~513

A cold state test and a numerical simulation were performed of the gas-solid two-phase flow inside the material return valve of a circulating fluidized bed. According to the features of the gas-solid two-phase flow under discussion, the Euler model was used to simulate the foregoing two-phase flow with the configuration of the pressure field and the gas and solid phase flow field inside the return valve being analyzed. It has been found that the pressure difference in the vertical tube is in direct proportion to its material piling height. The configuration of the gas phase flow field inside the material return valve is similar to that of the solid phase one. The porosity rates inside the material distribution chamber are scattered in a range from 0.45 to 0.55 while those in the transmission chamber are distributed mostly in a range from 0.65 to 0.9. The gas phase velocity distribution exercises an important influence over the porosity rate distribution inside the material return valve. The greater the speed in the area, the greater the porosity rate and vice versa. Key words: circulating fluidized bed, material return valve, gas-solid two-phase flow

基于自抗扰控制的循环流化床锅炉床温系统的研究 = Study of the Bed Temperature System for a Circulating Fluidized Bed Boiler Based on a Self Disturbance-resistant Control [刊, 汉] / LN Yong-jun, GUAN Zhi-min, WANG Bing-shu (College of Control Science and Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), PENG Gang (Hebei Provincial Electric Power Research Institute, Shijiazhuang, China, Post Code: 050021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2009, 25(5), —514 ~516

The bed temperature is an important parameter for a CFB (circulating fluidized bed) boiler in a thermal power plant. On the basis of analyzing the dynamic characteristics of the objects controlled by the bed layer temperature of the boiler, proposed was a method for designing a second-order self disturbance-resistant bed temperature control system and compared were the simulation results with those obtained by use of the PID (proportional, integral and differential) control method. It has been found that the overshooting and regulation time duration of the self disturbance-resistant control (ADRC) are superior to those of the conventional PID method. Under various operating conditions and with an increase of disturbance from the outside, the ADRC version enjoys a good robustness and disturbance-resistant capability, thus solving the difficulties in controlling the time variation and long time delay of the system in question. Key words: circulating fluidized bed boiler, bed temperature system, ADRC (active disturbance-resistant control), non-linear, robustness

直流式低热值煤气燃烧器稳燃特性研究 = Study of the Combustion Stability Characteristics of a Direct flow Type Low-heating-value Coal Gas Burner [刊, 汉] / ZHAO Zhen-xing, CAO Zidong, CHANG Yong-qiang (College of Energy Source and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5), —517 ~520