

研究论文

# 底隙设置挡板内循环流化床水力特性分析

韦朝海, 李 磊

(华南理工大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对流化床反应器中多相流体混合碰撞的复杂性、突变性的问题, 以底隙设置十字形挡板反应器的水力特性改变为研究对象, 采用电导法测定反应器内液体循环速度和混合时间等动力学数据及其变化, 分析新型内构件的强化作用原理。研究结果发现, 两相条件下, 十字形挡板的设置使反应器的升流区及降流区的液体循环速度分别提高  $9.5\% \pm 1.0\%$  和  $11.8\% \pm 1.0\%$ ; 低流速时, 液相混合时间变长, 高流速时, 混合时间反而短缩, 变化范围在  $\pm 5\%$ ; 计算的摩擦阻力系数由 4.13 降低为 2.75, 证明了流体在反应器底部碰撞能量消耗的下降。通过全环路能量衡算得到液体循环速度模型计算参数的实验关联式, 应用于三相条件, 计算值与实验值误差在 8% 以内。表明在急剧湍流内循环流化床底部设置挡板所实现的流态有序、矢量归一的目标能有效改善反应器中流体的水力特性而使流体稳定, 并进一步实现稳态运行条件下的节能。

**关键词:** 十字形挡板; 流化床; 液体循环速度; 摩擦阻力系数

中图分类号: TQ 021

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 10-2480-05

## Hydraulic characteristics of internal loop fluidized bed with baffle setting on bottom

WEI Chaohai, LI Lei

(School of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** An investigation was conducted to study the hydraulic characteristics of internal loop fluidized bed with cross-shape baffle setting on the bottom of the reactor. According to the properties of multi-phase mixing and collision, the cross-shape baffle leads to the transformation of chaotic to orderly, offering a new way for controlling hydrodynamics. The liquid circulation velocity and mixing time of the reactor were measured by the conductivity method, and compared with the conventional fluidized bed to indicate the fact of promoting gas-liquid-solids mixing. It was shown that the liquid circulation velocity in the riser and that in the downcomer were increased by  $9.5\% \pm 1.0\%$  and  $11.8\% \pm 1.0\%$  of those without the cross-shape baffle. When superficial gas velocity was less than  $0.86 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , liquid mixing time increased with setting the cross-shape baffle. Liquid mixing time decreased when superficial gas velocity was above  $0.86 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Frictional loss coefficient at the bottom section reduced from 4.13 to 2.75 with setting the cross-shape baffle, resulting in obvious decrease of energy dissipation due to flow collision. Based on an energy balance over the loop, a correlation equation between liquid circulation velocity and frictional loss coefficient was established. For the three-phase system, the prediction values from the above correlation equation agreed

2006-12-11 收到初稿, 2007-01-29 收到修改稿。

联系人及第一作者: 韦朝海 (1962—), 男, 博士, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50278036); 广东省自然科学基金重点项目 (04105951)。

Received date: 2006-12-11.

Corresponding author: Prof. WEI Chaohai. E-mail: Cechwei@scut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50278036) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province (04105951).

with the measurements within 8%. The result indicated that the cross-shape baffle brought order into the turbulent fluidized flow regime as well as improved the hydrodynamics performance of the reactor.

**Key words:** cross-shape baffle; fluidized bed; liquid circulation velocity; frictional loss coefficient

## 引 言

内循环生物流化床采纳了化工操作中的流态化技术, 是一种同时具有附着生长法和悬浮生长法特征的生物膜法废水处理高效技术, 在微生物浓度<sup>[1]</sup>、传质条件<sup>[2]</sup>、生化反应速率<sup>[3]</sup>等方面表现出独特的优势。当处理有机废水时需要保证气液固三相充分接触, 提高混合强度和氧传递能力, 除了改善曝气方式之外, 常用的方法是在反应器中设置不同形式和结构的内构件<sup>[4-8]</sup>。内构件通过扰动、剪切、分离流经其表面的气液流体, 造成相界面的连续更新和气液之间的充分接触, 达到流体之间良好的混合与分散的目的。然而, 内构件的引入同时增大了反应器的流动阻力, 减少了液体循环流量, 导致操作能耗增加<sup>[9-10]</sup>, 这是生物流化床反应器处理废水耗能高的原因之一。目前, 对于流化床内设置内构件的研究多数集中在气含率、液体循环速度及传质速率等结果的表达上, 而对内构件设置前后流化床流化状态、相际碰撞的非稳态特性及能量耗散等问题报道较少, 对流型改变的原理和限度分析得不够透彻。基于将强化混合与节省能耗相结合的思路, 设计了十字形挡板作为一种新型内构件设置于反应器底隙区, 采用混沌与分离方法分析了反应器内多相流体与十字形挡板碰撞后流态、流速变化及能量耗散等问题, 并通过全环路能量守恒原理求得液体循环速度与摩擦阻力系数之间的经验关联式, 解析了液体循环速度加快的机理并解决了流化床反应器的稳态偏离问题, 为反应器的工程化应用提供能耗更低的运行方式。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

实验系统包括反应器主体、供气装置和测量装置, 如图 1 所示。流化床反应器由有机玻璃制成, 总体积 39 L, 由升流区、降流区、气体分布区及三相分离区 4 部分组成, 各部分结构参数见表 1。实验的三相介质分别为空气、水及多孔泡沫颗粒。十字形挡板结构尺寸如图 2 所示, 挡板设置在反应

器底部(称底隙区), 将气体分布区平均分为 4 个区域(根据反应器的大小可设置多翅片形挡板而实现多区域), 起到良好的布气、布水作用, 使气液流动平稳、规则。

表 1 内循环流化床反应器主要结构参数  
Table 1 Main structural parameters of internal loop fluidized bed reactor

| Reactor height, $H_T$ /mm | Draft-tube height, $h_r$ /mm | Reactor diameter, $D_D$ /mm | Riser diameter, $D_T$ /mm | Reactor effective volume /L |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1425                      | 1100                         | 160                         | 120                       | 39                          |

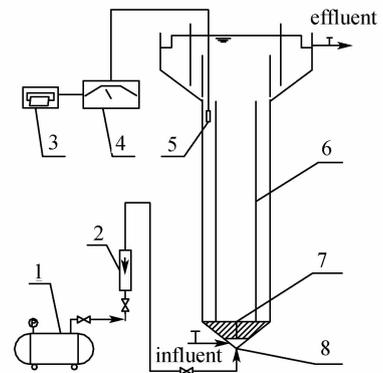


图 1 实验流程

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus  
1—air compressor; 2—rotameter; 3—recorder gauge;  
4—conductivity gauge; 5—conductivity probe; 6—draft-tube;  
7—cross-shape baffle; 8—gas distributor

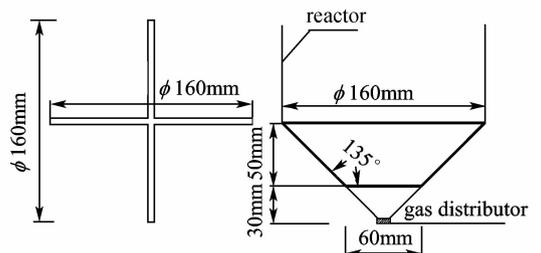


图 2 十字形挡板结构示意图

Fig. 2 Structural sketch of cross-shape baffle

### 1.2 测试内容与研究方法

按照文献 [11] 报道的相关方法, 测定气含率、液相混合时间、液体循环速度等过程参数。气

含率是气相在反应器中平均停留时间和气液传质系数的指示因子，对液体循环速度有重要影响，进而影响反应器的混合特性。实验采用压差法测定反应器升流区气含率  $\epsilon_r$  和降流区气含率  $\epsilon_d$ ，采用电导法测定液体循环速度和液相混合时间。

## 2 液体循环速度理论分析

根据 Chisti 等<sup>[12]</sup> 提出的全能量守恒原理，对内循环流化床反应器全环流路径进行能量衡算，建立如下关系式

$$E_i = E_r + E_d + E_b + E_t \quad (1)$$

取升流区液体作为控制单元进行能量衡算

$$E_i + \text{压力能损失} = \text{势能增加} + E_r \quad (2)$$

$$E_i + m_{L,r}(1 - \epsilon_r)gh_r = m_{L,r}gh_r + E_r \quad (3)$$

$$E_r = E_i - m_{L,r}\epsilon_r gh_r \quad (4)$$

同样，取降流区液体作为控制单元进行能量衡算

$$\text{势能损失} = \text{压力能增加} + E_d \quad (5)$$

$$m_{L,d}gh_r = m_{L,d}(1 - \epsilon_d)gh_r + E_d \quad (6)$$

$$E_d = m_{L,d}\epsilon_d gh_r \quad (7)$$

本文的流化床反应器顶部与底部的流体由于体积膨胀、收缩、流动方向改变而产生局部摩擦阻力，导致流体局部能量损失，其表达式为

$$E_t = m_{L,r}f_t \frac{V_{L,r}^2}{2} \quad (8)$$

$$E_b = m_{L,d}f_b \frac{V_{L,d}^2}{2} \quad (9)$$

式中  $V$  是液体线性速度， $f$  是摩擦阻力系数。液体线性速度与表观速度有如下关系

$$V_{L,r} = \frac{U_{L,r}}{1 - \epsilon_r}$$

$$V_{L,d} = \frac{U_{L,d}}{1 - \epsilon_d} = \left(\frac{A_r}{A_d}\right) \frac{U_{L,r}}{(1 - \epsilon_d)} \quad (10)$$

将式 (2) ~ 式 (10) 代入式 (1) 得

$$U_{L,r} = \left[ \frac{2gh_r(\epsilon_r - \epsilon_d)}{\frac{f_t}{(1 - \epsilon_r)^2} + \frac{f_b}{(1 - \epsilon_d)^2} \left(\frac{A_r}{A_d}\right)^2} \right]^{0.5} \quad (11)$$

$$U_{L,d} = \left[ \frac{2gh_r(\epsilon_r - \epsilon_d)}{\frac{f_t}{(1 - \epsilon_r)^2} \left(\frac{A_d}{A_r}\right)^2 + \frac{f_b}{(1 - \epsilon_d)^2}} \right]^{0.5} \quad (12)$$

Mohamed 等<sup>[13]</sup> 的研究表明，对于内循环流化床，反应器顶部摩擦阻力系数  $f_t$  近似等于 1.8。将  $U_{L,r}$  的实测值根据式 (11) 拟合，经回归得到反应器底部摩擦阻力系数  $f_b$  值。通过分析  $f_b$  值的变化，研究十字形挡板的设置对反应器液体循环速度的影

响规律。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 两相条件下液体循环速度的变化

表观气速  $U_G$  对十字形挡板设置前后内循环流化床反应器升流区和降流区液体循环速度的影响如图 3 所示。可以看出，反应器升流区与降流区液体循环速度随表观气速的提高而增大。在同一表观气速  $U_G$  下，挡板的设置增大了反应器的液相循环速度，升流区、降流区液相速度分别提高了  $9.5\% \pm 1.0\%$  和  $11.8\% \pm 1.0\%$ 。十字形挡板设置前后反应器底部流体流态及流速的变化如图 4 所示。未设置十字形挡板时，降流区流体在流经反应器底部时发生激烈碰撞，由于多相流体碰撞质量的时变性，造成流场突变和不连续，可能呈现出如文献 [14-15] 所报道的混沌动力学特性。多股水流在碰撞合并的过程中体积膨胀、收缩、运动方向改变，造成局部流态结构不稳定，由此产生较大的局部摩擦阻力。刁明军等<sup>[16]</sup> 报道，当两股流体流量比近似于 1、碰撞角接近  $180^\circ$  时，碰撞的能量消耗可达到总能量的 80% 以上，造成液体循环速度降低；此外，多股水流的碰撞在反应器底部会形成环流作用<sup>[17]</sup>，破坏反应器内布水、布气的均匀性，不利于气液两相的充分接触。针对上述问题，在内循环流化床的底隙区设置十字形挡板，使降流区水流在反应器底部与刚性体挡板碰撞，改变水流的运动方向，避免了水流多矢量之间的归一聚而造成能量消耗。由于挡板对流体速度矢量的导流和分离作用，实现了由多矢量流体之间的合力趋于零的碰撞向基于方向力量加强的碰撞过渡，从而实现流态由混沌转化为分离、整个流体向有序化的过程发展。

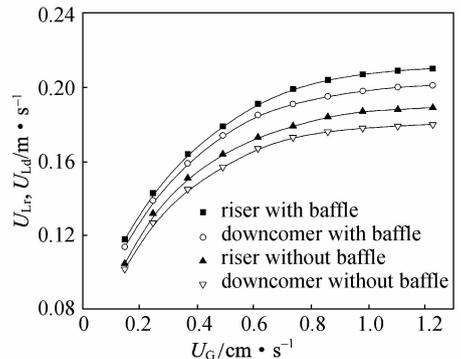


图 3 十字形挡板对升流区、降流区液体循环的影响

Fig. 3 Effect of cross-shape baffle on  $U_{L,r}$  and  $U_{L,d}$

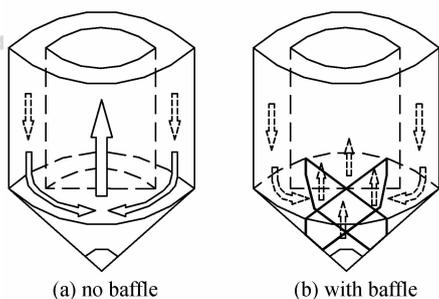


图 4 十字形挡板设置对反应器底部流态的影响

Fig. 4 Effect of cross-shape baffle on flow pattern at bottom of reactor

将液体循环速度的实验值代入式 (11) 进行数值拟合, 得到  $f_b$  值。设置十字形挡板前,  $f_b = 4.13$ ; 设置挡板后,  $f_b = 2.75$ , 由计算结果看出, 设置挡板后反应器液体循环速度提高是由于摩擦阻力系数  $f_b$  显著降低引起的。

### 3.2 三相条件下液体循环速度与液相混合时间的变化

三相条件下, 设置十字形挡板对反应器升流区与降流区液体循环速度的影响如图 5 所示。在同一表观气速下, 设置十字形挡板使升流区及降流区液体循环速度增大, 同时在实验范围内, 液体循环速度随表观气速的增大而增大, 随固相颗粒含量的增大略有降低, 与 Hwang 等<sup>[18]</sup>的研究结果相同。实验中观察到, 十字形挡板在增大三相体系液体循环速度的同时, 对流体进行纵向分割, 降低了反应器底部流态的紊动强度, 从而抑制流体的径向混合。为进一步阐明十字形挡板对反应器水力特性的影响, 研究了十字形挡板设置前后反应器液相混合时间  $T_M$  的变化, 如图 6 所示。固含率  $\varepsilon_s$  分别为 0、5%、10%、15%, 表观气速  $U_G < 0.86 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 液相混合时间变长, 表观气速  $U_G > 0.86 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 混合时间反而短缩, 变化范围在  $\pm 5\%$ , 且固含率对液相混合时间的影响不明显。这是由于挡板的设置一方面减少了流体之间在反应器底部的碰撞, 降低床层的径向混合强度; 另一方面增大了液体循环速度, 强化流体的轴向混合。

三相条件下, 对反应器液体循环速度预测公式的可行性及准确性进行验证, 将两相中拟合得到的反应器底部摩擦阻力系数  $f_b$  值代入式 (11), 计算出升、降流区液体循环速度, 结果见图 5。与实验值比较发现, 随着固含率增大, 计算误差略有增大, 但误差范围均在 8% 以内, 可以认为实验值与

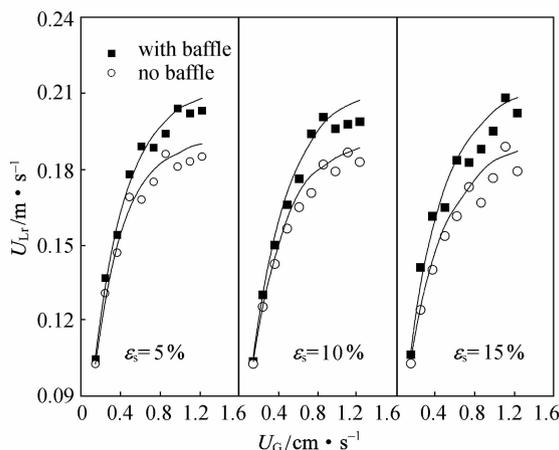


图 5 十字形挡板对升流区液体循环速度的影响

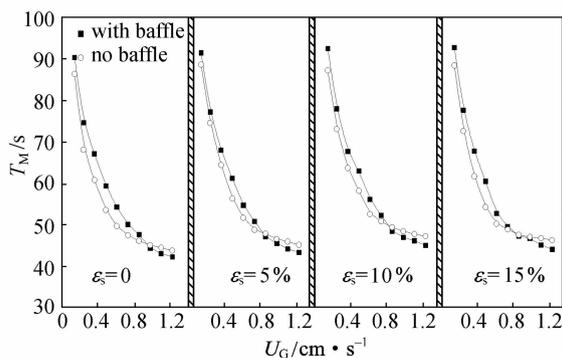
Fig. 5 Effect of cross-shape baffle on  $U_{Lr}$ 

图 6 十字形挡板对混合时间的影响

Fig. 6 Effect of cross-shape baffle on mixing time

计算值吻合较好。因此, 两相条件下, 反应器底部摩擦阻力系数  $f_b$  的计算值同样适用于气液固三相系统, 式 (11) 的计算方法在一定范围内能够比较准确地预测反应器升流区与降流区的液体循环速度。

## 4 结 论

(1) 在内循环流化床的底隙区设置挡板能够明显改善反应器中流体的水力特性, 十字形挡板的添加因降低反应器底部的摩擦阻力系数而提高了液体循环速度。两相条件下升流区及降流区的液体循环速度与不设挡板情形相比分别提高了  $9.5\% \pm 1.0\%$  和  $11.8\% \pm 1.0\%$ ; 反应器底部摩擦阻力系数  $f_b$  由 4.13 降低为 2.75。三相条件下挡板的设置使液体循环速度提高的规律与两相情况类似, 固含率的变化对反应器液相混合时间影响不明显。将由两相条件测试求出的内循环流化床反应器液体循环速度与摩擦阻力系数的关联式应用于三相条件, 预

测值与实验值吻合良好, 误差在 8% 以内。

(2) 针对内循环流化床液体流化状态的复杂性、相际碰撞的非稳态特性及能量耗散的多因素影响, 在流化床底隙区设置挡板能够实现反应器的流态由混沌到分离、流体矢量由离散到归一的转变, 使反应器中的流体速度加快的同时其流体结构更加稳定, 在工程应用中取得明显的节能效果。

### 符 号 说 明

$A_d$ ——降流区面积,  $m^2$

$A_r$ ——升流区面积,  $m^2$

$E_b$ ,  $E_t$ ——分别为反应器底部、顶部能量损失,  $W$

$E_d$ ,  $E_r$ ——分别为降流区、升流区能量损失,  $W$

$E_i$ ——反应器能量输入,  $W$

$f_b$ ,  $f_t$ ——分别为反应器底部、顶部摩擦阻力系数

$m_{Lr}$ ,  $m_{Ld}$ ——分别为升流区、降流区控制单元液体质量,  $kg$

$T_M$ ——液相混合时间,  $s$

$U_G$ ——表观气速,  $cm \cdot s^{-1}$

$U_{Ld}$ ,  $U_{Lr}$ ——分别为降流区、升流区液体表观速度,  $m \cdot s^{-1}$

$\epsilon_d$ ,  $\epsilon_r$ ——分别为降流区、升流区气含率, %

### References

- [1] Wlodzimierz Sokol. Treatment of refinery wastewater in a three-phase fluidized bed bioreactor with a low density biomass support. *Biochemical Engineering Journal*, 2003, **15** (1): 1-10
- [2] Wei Chaohai, Xie Bo, Xiao Hongliang. Hydrodynamics in an internal loop airlift reactor with a convergence-divergence draft tube. *Chem. Eng. Technol.*, 2000, **23** (1): 38-45
- [3] Wei Chaohai (韦朝海), Wu Jinhua (吴锦华), Fu Jiamo (傅家谟). To treat wastewater of gas from petroleum manufactory by predominance inoculum coupling with internal loop three-phase fluidized bed. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2002, **22** (2): 45-50
- [4] Kaustubha M, Das D, Biswas M N. Hydrodynamics of a novel multi-stage external loop airlift reactor. *Chem. Eng. Sci.*, 2006, **61** (14): 4617-4624
- [5] Peter M K, Argyrios M, Bergougnou M A, et al. Influence of the baffle clearance design on hydrodynamics of a two riser rectangular airlift reactor with inverse internal loop and expanded gas-liquid separator. *Chem. Eng. J.*, 2006, **121** (1): 17-26
- [6] Heyouni A, Roustan M, DoQuang Z. Hydrodynamics and

- mass transfer in gas-liquid flow through static mixers. *Chem. Eng. Sci.*, 2002, **57** (16): 3325-3333
- [7] Bosma J C, Hoffman A C. On the capacity of continuous powder classification in a gas-fluidized bed with horizontal sieve-like baffles. *Powder Technology*, 2003, **134** (1/2): 1-15
- [8] Wei Chaohai (韦朝海), Wu Jinhua (吴锦华), Wu Chaofei (吴超飞). Study on the characteristics of oxygen transfer in new-type structure inner loop three-phase fluidized bed. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2001, **21** (6): 507-510
- [9] Thanathorn V, Porntip W, Prasert P. Performance of airlift contactors with baffles. *Chem. Eng. J.*, 2001, **84** (3): 551-556
- [10] Wang Weifen (王卫芬), Xu Zhigang (徐志刚), Shu Zhongming (束忠明). The flow characteristics of internal airlift reactor with whorl. *Chemical Reaction Engineering and Technology* (化学反应工程与工艺), 2006, **22** (1): 78-82
- [11] Wei Chaohai (韦朝海), Xie Bo (谢波). Relationship between reactor performances and structural parameters of inner-loop three-phase fluidized bed. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities* (高校化学工程学报), 2001, **15** (3): 236-241
- [12] Chisti M Y, Halard B, Moo-Young M. Liquid circulation in air-lift reactor. *Chem. Eng. Sci.*, 1988, **43** (3): 451-457
- [13] Mohamed E A, Udi N, Andre E, et al. Hydrodynamic flow regimes, gas holdup, and liquid circulation in airlift reactors. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1998, **37** (4): 1251-1259
- [14] Ellis N, Briens L A, et al. Characterization of dynamic behaviour in gas-solid turbulent fluidized bed using chaos and wavelet analyses. *Chem. Eng. J.*, 2003, **96** (1/2/3): 105-116
- [15] Coppen M C, Ommen J R. Structuring chaotic fluidized beds. *Chem. Eng. J.*, 2003, **96** (1/2/3): 117-124
- [16] Diao Mingjun (刁明军), Yang Yongquan (杨永全). Experimental study on two jets impact in air for energy dissipation. *Journal of Sichuan University: Engineering Science* (四川大学学报: 工程科学版), 2002, **34** (2): 13-15
- [17] Baiyinbaoligao (白音包力皋), Sun Dongpo (孙东坡), Li Guoqing (李国庆). Adjustment of flow momentum in cruved channel by using diversion grid. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2001 (1): 1-5
- [18] Hwang S J, Cheng Y L. Gas holdup and liquid velocity in three-phase internal-loop airlift reactors. *Chem. Eng. Sci.*, 1997, **52** (21/22): 3949-3960