



脉动流化床气泡特性的研究

黄 颖, 李占勇, 叶京生, 刘 玲
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘 要: 为了研究脉动流化床气泡特性, 对流化床内气泡的特性进行了二维冷态模拟实验. 利用摄像机捕捉流化床气固瞬间的流动状态, 通过对图像进行分析, 比较了脉动流化床和传统流化床内气泡尺寸, 探讨了气泡平均上升速度和气泡尺寸受脉动参数和物料特性的影响. 从实验可知, 脉动气流可以抑制大气泡的形成, 促进气固间的接触, 且气泡的平均上升速度随脉动频率的增加有降低的趋势.

关键词: 脉动流化; 气泡; 气泡上升速度

中图分类号: TQ 051.1⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1672-6510(2007)-01-0041-03

Study of Bubble Characteristics in a Pulsed Fluidized Bed

HUANG Ying, LI Zhan-yong, YE Jing-sheng, LIU Ling

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to study bubble behavior in a pulsed fluidized bed, experiments for bubble behavior in a two-dimensional pulsed fluidized bed (PFB) were carried out. The instantaneous state of gas-solid flows in fluidized bed was caught by means of camera. By the medium of analysis of the images, the bubble size along the PFB was compared with that in a conventional fluidized bed. The bubble size and rising velocity were affected by the pulse parameters and the particle properties by image analysis. Results show that pulsating stream is possible to restrain large bubble formation and promote gas-solid contacting. And the bubble rising velocity was reduced with the frequency increased.

Keywords: pulsed fluidization; bubble; bubble rising velocity

流化床与固定床、移动床相比具有显著的优点, 被广泛地应用于化工、石油加工、能源、环境、食品加工、药品生产等领域^[1]. 气固流态化的一个显著特点是气泡的存在. 气泡的形成、生长、聚合及破裂, 促进了颗粒的混合, 强化了热质传递过程^[2,3].

脉动流化床是将传统流化床流量稳定的进气改为流量周期性波动的脉动气流. 自 20 世纪 70 年代以来, 研究者们采用不同方式对脉动流化床流体动力学及传热、传质性能进行了研究, 一般认为, 引入强制振荡气流可以明显减少流化床沟流的发生, 而且气泡变小, 气泡发生频率降低, 气体和固体颗粒及构件表面间的传热、传质效率大为提高, 可以处理的颗粒粒径范围变宽, 在通常条件下难以流化的物料也变得较易流化^[4]. 但是, 脉动流化床的流体动力学特性比传统流

化床更复杂, 针对气泡和粒子的运动特性在理论和实验上的研究还不够深入, 在一定程度上影响了脉动流化技术的发展^[5], 进一步的研究气泡运动特性对于理解脉动流化床流化特征, 使脉动流化床自身独特的优点在工业应用中发挥更多的作用极为重要. 本文对脉动流化床中影响气泡尺寸和气泡上升速度的因素进行了实验和分析.

1 实验

脉动流化床实验装置如图 1 所示. 流化气流分为两路, 一路是流量恒定的稳定气流, 一路是流量周期性变化的脉冲气流. 气流经过稳压罐达到输出稳定气流的作用, 用转子流量计来测量气流流量, 通过电磁阀的

收稿日期: 2006-05-09; 修回日期: 2006-11-06

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目 (20041208)

作者简介: 黄 颖 (1979—), 女, 吉林人, 硕士研究生.

关闭使其脉动,用时间继电器调整脉动气流的频率($f=1/(t_{on}+t_{off})$)和脉宽($I=t_{on}/t_{off}=1$)。

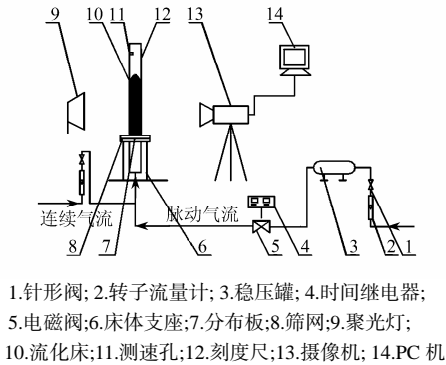
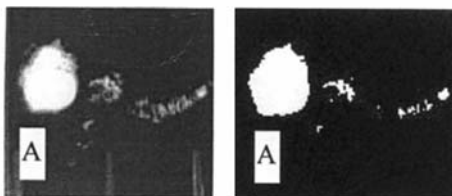


图1 实验设备系统示意图

Fig.1 Schematic of the experimental system

实验用聚光灯照明,在强光照下,床层的流化状态能够较清晰地区分,用摄像机捕捉床内气泡与粒子的运动情况^[6].对图片进行二值化处理,处理前后的图片对比见图2,图2中A为参照物,通过对比参照物的真实尺寸与图片中的尺寸,可以计算出该图片的比例因子,进而得出气泡的大小及其移动距离.根据气泡的上升距离 Δh 以及连续两张图像之间的时间间隔 Δt (本实验为 $1/24$ s),可求得气泡的平均上升速度

$$v_b = \frac{\Delta h}{\Delta t}$$



(a) 灰度处理前 (b) 灰度处理后

图2 气泡图像灰度处理前后对比

(芥末籽: $v=0.8$ m/s, $d_p=1.2$ mm)

Fig.2. Comparison of bubbles image by gray treatment

(mustard seed: $v=0.8$ m/s, $d_p=1.2$ mm)

对于形状规则的气泡,可通过直接分析图像得到气泡平均直径 d_b 的大小.对于形状不规则的气泡,可以使用气泡的当量直径.对于二维气泡,当量直径定义为与二维气泡面积相等的圆的直径.

2 结果与讨论

2.1 脉动流化床中气泡尺寸的变化

气泡平均直径沿床高的变化如图3所示.由于气

泡在脉动流化床中经历了多次由聚并到破裂的过程,气泡平均直径也随之发生多次的波动.而在连续流化床中,气泡平均直径一般是沿床高增大的.

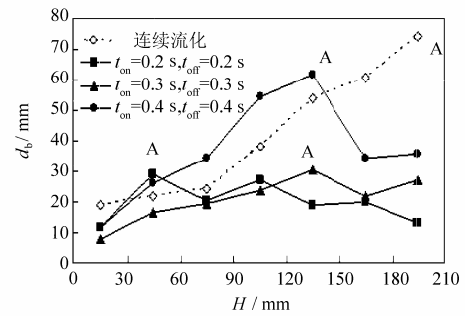


图3 气泡平均直径沿床高的变化

(芥末籽: $v=0.75$ m/s, $d_p=1.2$ mm, $H_0=200$ mm)

Fig.3 Variation of average diameter of bubbles with bed height (mustard seed: $v=0.75$ m/s, $d_p=1.2$ mm, $H_0=200$ mm)

在适宜的脉动条件下($t_{on}=0.2$ s和 0.3 s),气流的脉动抑制了单个气泡尺寸的长大,在床层上部位置的气泡尺寸比连续流化床中气泡尺寸小.气泡尺寸的最大值(图3中A点)出现在床层内部,在气流脉动的情况下,随着气流“开”期间(t_{on})的增大,气泡尺寸的最大值出现的位置越靠近床层顶部,但进入气流“闭”期间(t_{off}),气泡尺寸减小,即部分气流转入密相区.

床层物料的物性对脉动流化床气泡尺寸也存在较大的影响,在非生物物质床(沙子, $d_p=0.51$ mm)中,脉动气流更加容易使床层中形成大气泡,类似于节涌床中的壁面气栓,而在植物种子(芥末籽, $d_p=1.2$ mm)床中,由于物料不容易产生架桥,气泡的平均直径小.从图4中可知,在沙子床中的气泡平均直径较植物种子床中的气泡平均直径大得多,脉动气流对较大颗粒的流化具有较好的作用.

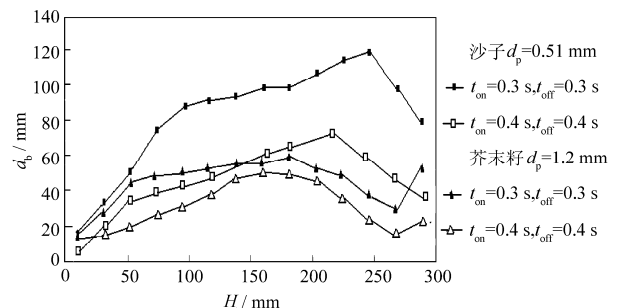


图4 不同物料对气泡平均直径的影响

($v=0.75$ m/s, $H_0=200$ mm)

Fig.4 Influence of different particle to average diameter of bubbles ($v=0.75$ m/s, $H_0=200$ mm)

2.2 气泡平均上升速度

实验在无内构件的二维流化床装置中进行,考虑气泡平均直径、气泡的相互作用对气泡上升速度的影响,结合 Davidson 等人的结论^[7],床层中气泡的平均上升速度关联式为

$$v_b = K_1(v - v_{mf}) + K_2\sqrt{gd_b} + K_3 \quad (1)$$

由连续图片,分析计算出脉动气流作用下植物种子床层中气泡的平均直径 d_b 以及气泡的平均上升速度 v_b ,最后回归得出式(2)($v < 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$v_b = 0.7197(v - v_{mf}) + 6.530\sqrt{gd_b} - 1.256 \quad (2)$$

式中:

v —— 气流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

v_b —— 气泡上升速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

v_{mf} —— 起始流化速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

g —— 重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;

d_b —— 床高 H 处的气泡平均直径, mm.

图 5 为气泡平均上升速度 v_b 实测值与式(2)中预测值的比较,从图中可以看出,实测值与预测值吻合较好.

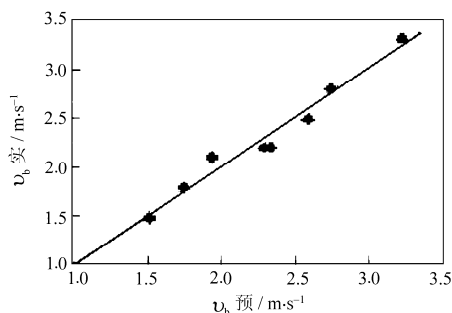


图5 气泡平均上升速度实测值与预测值比较

(芥末籽: $H_b = 200 \text{ mm}, d_b = 1.2 \text{ mm}$)

Fig.5 Comparison of measured and predicted values of average bubble rising velocity (mustard seed: $H_b = 200 \text{ mm}, d_b = 1.2 \text{ mm}$)

气泡在床层内的平均上升速度随频率 f 的增加而减小,如图 6 所示.当气流的脉动频率过低时,气泡的平均上升速度很快,接近连续流化床中的气泡的平均上升速度.气流的脉动频率超过一定值时,气泡平均速度减小的趋势趋于平缓.当频率在 1.5~3.5Hz 时,气泡的平均上升速度明显降低,因此气体在床层中的停留时间增长,有利于气固间接触和物质交换,但影响颗粒的混合.而当频率过高(大于 4Hz)时,由于电磁阀的开闭阻碍气体供应,使气量减少,从而气泡的平均上升速度很小,这时的气泡不能全部通过床层.

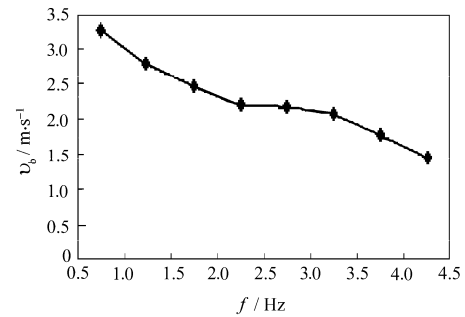


图 6 气泡平均上升速度随频率的变化

(芥末籽: $H_b = 200 \text{ mm}, d_b = 1.2 \text{ mm}$)

Fig.6 Variation of average rising velocity of bubbles with frequency (mustard seed: $H_b = 200 \text{ mm}, d_b = 1.2 \text{ mm}$)

3 结 论

本实验条件下,脉动流化床气泡尺寸较连续流化床小,说明气流的脉动可以达到抑制气泡尺寸增大的目的,因此能减小腾涌的发生.连续流化床中,气泡平均直径一般是沿床高增大的,而在脉动流化床中,气泡平均直径发生了多次的波动.

在非生物质的沙子床中,脉动气流更加容易使床层中形成大气泡,类似于节涌床中的壁面气栓,在芥末籽床中,由于物料不容易产生架桥,气泡的平均直径小.

脉动流化床中,气泡的平均上升速度随脉动频率的增加有降低的趋势,对于芥末籽床层,其与气泡尺寸、气流速度的关系为

$$v_b = 0.7197(v - v_{mf}) + 6.530\sqrt{gd_b} - 1.256$$

参 考 文 献:

- [1] 金涌,祝京旭,汪展文,等. 流态化工程原理[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [2] Kudra T, Mujumdar, Arun S. 先进干燥技术[M]. 李占勇,译. 北京:化学工业出版社,2005:44—49.
- [3] Li ZY, Kobayashi N, Deguchi S, et al. Investigation on drying kinetics in a pulsed fluidized bed [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2004, 37 (9): 1179—1182.
- [4] Kobayashi M, Ramaswami D, Brazelton W T. Heat transfer from an internal surface to a pulsed bed [J]. Chem Eng Prog Sym Ser, 1970, 66(105): 58.
- [5] 严建华, 岑可法, 康齐福. 脉动流化床的机理及燃烧试验研究 [J]. 浙江大学学报, 1986, 20(6): 123.
- [6] 张建生, 吕青, 孙传东. 高速摄影技术对水中气泡运动规律的研究 [J]. 光子学报, 2000, 29(10): 952—955.
- [7] Werther J. Scale-up modeling for fluidized bed reactors [J]. Chem Eng Sci, 1992, 47: 2457.