

方形气固流化床中局部颗粒速度实验研究

曾涛,刘少北,柳忠彬,林海波

(过程装备与控制工程四川省高校重点实验室,四川 自贡 643000)

摘要:对 FCC 颗粒在截面尺寸为 368 mm 的方形流化床中研究了局部颗粒速度分布的基本行为。实验利用光纤探针测试了三个不同轴向高度的颗粒速度分布和静止床层高度对颗粒速度分布的影响。结果表明:截面局部颗粒速度随表观气速 U_g 的增大同步增加,颗粒速度沿截面分布不均匀。在截面中心区,局部颗粒速度随 U_g 增加而增加,上行颗粒速度增加更为显著。在边壁区,低气速时上、下行局部颗粒速度随 U_g 增加而增加且增幅相近;高气速下局部颗粒速度表现出显著的波动过程。静床高度增加,对上行颗粒速度影响明显,但随着气速增加影响减弱。

关键词:FCC 颗粒;方形流化床;颗粒速度

中图分类号:TK224.1;TQ021.1

文献标志码:A

引言

流态化技术从引入现代过程工业开始,在煤化工和石油的催化裂化等方面产生了举足轻重的作用,并引发了在许多物理和化学加工的工业过程中应用流态化技术^[1]。气固流化床由于具有较好的传质和传热的优点,广泛地应用于燃烧、气化、催化裂化和氧化铝的煅烧等过程工业中^[2-3]。

湍动流态化作为一种传统流态化,其总体研究工作远不如鼓泡流态化、快速流态化那样深入广泛,目前尚无有效、统一的模型来定量描述其动力学行为。但是湍动流化床作为一种传统流化床,已经广泛应用于各种过程工业,特别是应用于化工和冶金过程中。例如 FCC 的再生、氯化、无催化剂的流化床反应器、颗粒干燥等^[4]。

流化床内的局部颗粒速度是表征气固流态化体系流体力学行为的重要动力学参数,对流化床内局部流动的动力学性能起到决定性作用,并与颗粒在床层的停留时间直接相关,特别是对床层内的传热和传质性能影响

很大^[5-6]。许多研究者通过对颗粒、空穴或气泡速度的测试,验证流体力学性能并建模,但这些研究大多集中在鼓泡流化床和循环流化床^[4]。流态化工作者在研究流态化的局部流动结构时,往往对局部颗粒浓度的分布、床层空隙率、空穴尺寸、上升气速和床层膨胀等进行研究^[7-9],也有研究生物质材料、出口结构^[10-11]等循环流化床中颗粒速度的影响,但对湍动流化床局部颗粒速度的分布研究不多,尤其是本实验采用的 368 mm × 368 mm 尺寸规模的方形湍动流化床中颗粒速度的系统实验测试研究尚未见报道。本文对床层中局部颗粒速度的分布进行了实验测试,研究了在方形气固流化床中局部颗粒速度沿截面的分布行为,表观速度和静床高度对局部颗粒速度的影响,为湍动流化床的工业应用和设计提供了相应的实验数据。

1 实验装置和参数测量

1.1 实验装置

气固流化床实验系统如图 1 所示。方形截面尺寸

收稿日期:2013-08-23

基金项目:四川省教育厅重大培育项目(07ZZ019)

作者简介:曾涛(1967-),女,四川富顺人,教授,博士,主要从事流态化技术方面的研究,(E-mail)windtaozg@126.com

为 368 mm, 高度为 2037 mm。设备材料为低碳钢, 在下部流化段相对的两表面用有机玻璃设置了 250 mm × 400 mm 的视窗, 便于实验时的观察。

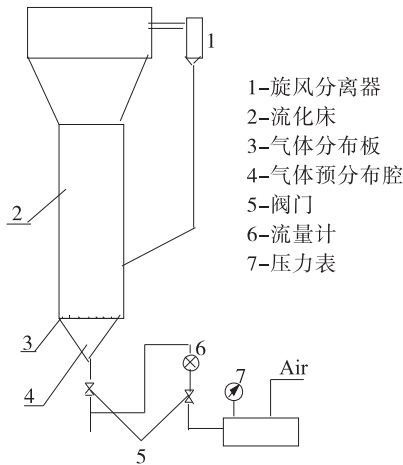


图 1 湍动流化床实验系统示意图

1.2 实验条件及测试方法

实验时采用的固体颗粒为 FCC, 气体为常温空气, 表观气速设置为: 0.02 – 1.2 m/s。局部颗粒速度由光纤探头测试, 速度探头两光纤之间的距离为 0.285 mm, 采集时颗粒平行于光纤束排列方向运动时, 将产生两路波形相似、而在时间上有一定延迟的反射信号。对两路信号进行互相关运算, 求出延迟时间 τ , 即可由 $V = S/\tau$ (距离与时间的比值) 得出物料的运动速度。

对颗粒速度共测试了 9 个点的颗粒向上的速度 (正速度) 和向下的速度 (负速度) 的电信号, 并通过互相关进行计算。

2 实验结果与讨论

2.1 床层截面上颗粒速度的分布

图 2 所示为颗粒在床层中的高度 (静床高度) $H_0 = 0.9$ m、测试点轴向高度 $H = 0.56$ m 的床层截面中心 ($l/L = 0$) 和边壁区 ($l/L = 0.975$) 向上和向下的颗粒平均速度随表观气速的变化。

由图 2 可知, 随着空气进入流化床的速度 U_g 的增大, 不同测试点, 颗粒向上和向下的平均速度变化趋势显著不同。在截面中心处 ($l/L = 0$), 随着 U_g 的增大, 向上的颗粒平均速度显著增加, 向下的颗粒平均速度也随之缓慢增大; 而靠近边壁区 ($l/L = 0.975$), 随着 U_g 的增大, 向下的颗粒平均速度变化与中心区变化没有显著不同, 但上行颗粒速度的增加远不如中心区变化显著; 从

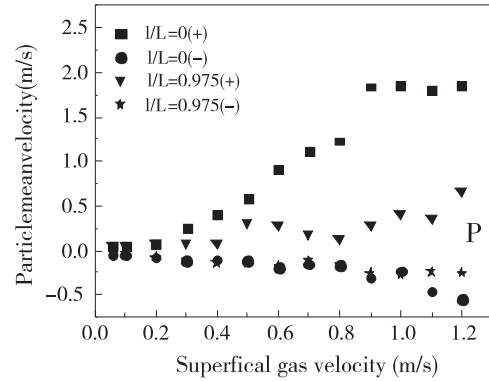


图 2 床层截面中心区与边壁区颗粒速度随表观气速的变化 ($H_0 = 0.9$ m, $H = 0.56$ m)

整个截面而言, U_g 对上行颗粒速度的影响比对下行颗粒平均速度的影响更大。

值得注意的是, 在截面中心处 ($l/L = 0$), 可以观察到颗粒向上的平均速度有三个变化阶段: 第一阶段: $U_g < 0.3$ m/s 时, 颗粒向上平均速度略有增大; 第二阶段: 0.3 m/s $< U_g < 0.9$ m/s 时, 颗粒向上平均速度随着表观气速的增大而增大; 而当 $U_g > 0.9$ m/s 后, 颗粒向上平均速度基本又达到平稳。这个结果与文献 [12] 的图 4 和图 5 中局部颗粒浓度在同样操作条件下的变化规律是一致的。速度值无多大变化时, 颗粒浓度值变化也不大, 而当向上的颗粒速度随 U_g 增大时, 对应的颗粒浓度值在减少。

图 3 显示了静床高度 $H_0 = 0.9$ m, $U_g = 0.4$ m/s、1.2 m/s 条件下, $H = 0.31$ m、0.56 m、0.82 m 三个床层截面上局部颗粒平均速度从中心到边壁的变化。由图 3 可知, 截面各点颗粒都存在着向上和向下的速度, 揭示出颗粒在床内的返混行为。在较低表观气速时, 如 $U_g = 0.4$ m/s, 颗粒平均速度由截面中心到边壁分布比较均匀, 各点向上和向下的颗粒速度比较一致, 床层高度从 0.31 m 增加到 0.82 m, 颗粒向上和向下的速度没有明显的变化。

当表观气速增加到 $U_g = 1.2$ m/s 时, 上行颗粒平均速度由截面中心最大到边壁逐渐减小, 其分布有明显的不均匀性, 且沿轴向高度发展, 上行速度分布不均匀程度亦有所增强; 但由图 3 中可知, 高气速时下行颗粒速度的分布与变化与低气速时有相同的行为。

2.2 截面中心区与边壁区颗粒速度变化行为

为进一步研究截面中心区与边壁区的颗粒速度变化行为, 在静床高度 $H_0 = 0.9$ m 的条件下, 实验测试了三个不同高度的床层截面 ($H = 0.31$ m, 0.56 m 和

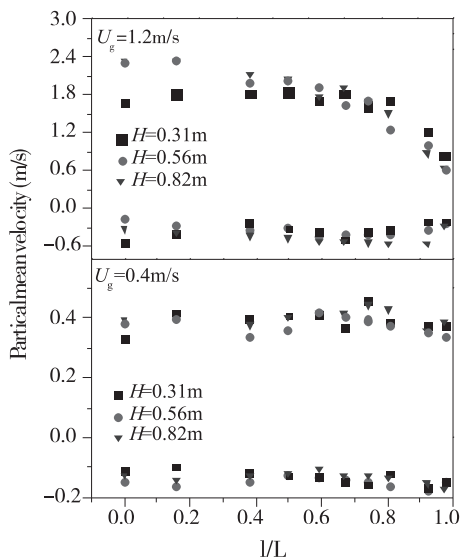


图3 不同表观气速和床层高度截面上颗粒速度的分布 ($H_0 = 0.9\text{m}$)

0.82 m)上中心区和边上中心区和边壁区的局部颗粒平均速度随表观气速的变化,其结果如图4所示。

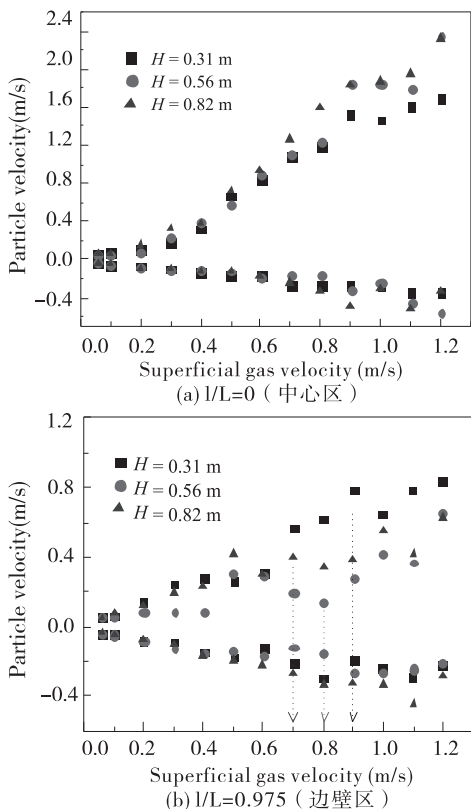


图4 不同高度截面上中心区与边壁区颗粒速度随 U_g 的变化 ($H_0 = 0.9\text{m}$)

从图4中的曲线可以观察到以下现象:

(1) 在截面中心区(图4(a)),上行颗粒速度与下行颗粒速度随表观气速 U_g 增加都同时增加,其中上行颗粒速度增加较下行速度更显著;在不同高度位置,中

心区颗粒速度随表观气速增加的变化规律在低气速范围 ($U_g < 0.7\text{ m/s}$) 内基本一致,在高气速范围内,较高位置截面上 ($H = 0.82\text{ m}$) 的中心区颗粒速度随表观气速的增加更为显著。

(2) 在边壁区(图4(b)),上行颗粒速度与下行颗粒速度随表观气速 U_g 的增加总体上都在增加,且增加幅度接近;在不同高度位置,壁面区颗粒速度随表观气速增加的变化规律与在低气速范围 ($U_g \leq 0.6\text{ m/s}$) 基本一致,但在表观气速 U_g 接近各截面流型转变速度 U_c 的过程中^[13],颗粒上下行速度随表观气速增加均出现上下波动过程,表现出较强的边壁效应;此后表观气速继续增加,上行颗粒速度有所增大。

(3) 中心区与边壁区相比,边壁区颗粒速度受边壁效应影响,行为变化更为复杂。中心区上行颗粒速度随表观气速增大较下行颗粒速度增加更显著;边壁区颗粒上下行速度在低气速范围内随 U_g 增大表现出相同程度的增加,而在高气速范围,上下行颗粒速度表现出显著的波动过程。因此,除非表观气速足够大,通常情况下,边壁区颗粒绝对速度随表观气速增加可能维持基本不变或处于上下波动状态或略有上升。

2.3 静床高度的影响

图5是静床高度分别为 $H_0 = 0.9\text{ m}$ 和 $H_0 = 1.2\text{ m}$ 、表观气速 U_g 分别为 0.4 m/s 、 0.7 m/s 和 1.0 m/s 时,轴向高度分别为 $H = 0.31\text{ m}$ 和 $H = 0.56\text{ m}$ 的截面上局部颗粒速度的分布变化。从图5中可以观察到,不同表观气速下,静床高度的增加,对不同高度床层截面上颗粒下行平均速度影响很小,但对上行颗粒速度有显著影响,尤其在操作气速较低时。在操作气速较低条件下,如 $U_g = 0.4\text{ m/s}$ 或 0.7 m/s 时,截面各点上行颗粒速度均显著降低,但在 $U_g = 1.0\text{ m/s}$ 时,截面各点上行颗粒速度虽有所降低,但已经不明显。

静床高度增加导致上行颗粒速度减小,其原理可解释为:相同操作条件下,静床高度增加抑制了床层膨胀,床层颗粒浓度增大,这使得气体对颗粒群的有效曳力减小,故静床高度增加导致上行颗粒速度降低;当表观气速较大时,静床高度对床层膨胀的抑制效应相对减小,故高气速条件下,静床高度对上行颗粒速度的影响减弱。

前面的实验结果表明:表观气速增加时床层截面下行颗粒速度也增大,这说明下行颗粒速度与气固之间的

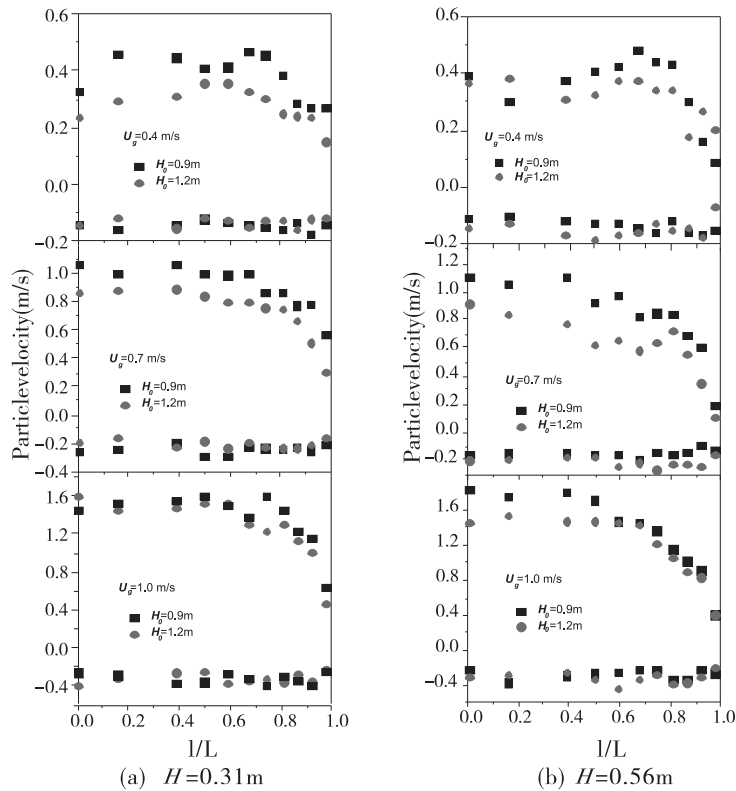


图 5 静床高度对局部颗粒速度分布的影响

有效作用力无直接关系。因此由于静床高度增加导致的气固有效作用力减小,可使上行颗粒速度减小,但对下行颗粒速度无显著影响。

3 结论

本文使用光纤探头对方形鼓泡-湍动床多个截面上的局部颗粒速度进行了大量的测试,经研究主要结论如下:

(1) 低气速时 ($U_g \leq 0.3 \text{ m/s}$), 床层截面各点颗粒速度分布均匀, 随表观气速增加, 截面各点速度同步增加, 但其中上行速度增加更为显著; 不同高度截面上颗粒速度的分布形态和速度值大小随表观气速增加无显著变化。

(2) 高气速时, 尤其当 $U_g \rightarrow U_c$ 时, 床层进入湍动状态, 边壁效应凸显出来, 中心区有较高上行颗粒速度, 而边壁区上行颗粒速度发生显著下降, 颗粒速度沿截面呈不均匀分布。

(3) 在截面中心区, 上、下行颗粒速度随表观气速 U_g 增加都同时增加, 但上行颗粒速度增加较下行速度更显著, 故中心区颗粒上行绝对速度随表观气速增加而增大; 在不同高度位置, 中心区颗粒速度随表观气速的变

化规律在低气速范围内基本一致, 在高气速范围, 较高位置截面上的中心区颗粒速度随表观气速的增加更为显著。

(4) 受边壁效应影响, 边壁区颗粒速度变化行为相对复杂; 上、下行颗粒速度在低气速范围内随 U_g 增大同时增加且增幅相近, 而在高气速尤其是 U_g 接近各截面流型转变速度 U_c 的过程中, 壁面上下行颗粒速度表现出显著的波动过程。

(5) 静床高度增加, 对各床层截面上的下行颗粒速度影响很小, 但对其上行颗粒速度有较显著的影响; 静床高度增加, 截面各点上行颗粒速度减小, 在高气速条件下, 静床高度对上行颗粒速度的影响减弱。

参考文献:

[1] 郭慕孙, 李洪钟. 流态化手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
 [2] 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.
 [3] 李佑楚. 流态化过程工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
 [4] Bi H T, Ellis N, Abba I A, et al. A state of the art review

- of gas-solid turbulent fluidization[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(21): 4789-4825.
- [5] King D F. Estimation of dense bed voidage in fast and slow fluidized beds of FCC catalyst[C]// Grace J R, Shemilt L W, Bergougnou M A. Fluidization VI: Proceedings of the Sixth International Conference on Fluidization, Banff, Alberta, Canada, May 7-12, 1989: 1-8.
- [6] Cui H P, Mostoufi N, Chaouki J. Characterization of dynamic gas-solid distribution in fluidized beds[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 79(2): 133-143.
- [7] Zhu H Y, Zhu J. Comparative study of flow structures in a circulating-turbulent fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(11): 2920-2927.
- [8] Levenspiel O. G/S reactor models-packed beds, bubbling fluidized beds, turbulent fluidized beds and circulating (fast) fluidized beds[J]. Powder Technology, 2002, 122(1): 1-9.
- [9] Zhu H Y, Zhu J X. Gas-solids flow structures in a novel Circulating-turbulent fluidized bed[J]. AIChE Journal, 2008, 54(5): 1213-1223.
- [10] 张锡梅, 王勤辉, 田晨, 等. 出口结构对矩形循环流化床稀相区颗粒速度分布影响的实验研究[J]. 能源工程, 2010(3): 1-6.
- [11] 王储, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 木屑在循环流化床中的流动特性研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(4): 501-506.
- [12] 曾涛, 漆小波, 祝京旭. 方形气固密相床中局部颗粒浓度分布的实验室研究[J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(5): 783-788.
- [13] 曾涛, 漆小波, 黄卫星, 等. 方形气固流化床从鼓泡到湍动流型转变的实验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(4): 176-180.

Experimental Study of Local Particle Velocity Distribution in a Square Gas-Solid Turbulent Fluidized Bed

ZENG Tao, LIU Shao-bei, LIU Zhong-bin, LIN Hai-bo

(Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control, Zigong 643000, China)

Abstract: In order to study the basic behavior of the local particle velocity distribution in a square fluidized reactor, the distribution of particle velocity in three different axial height and the effect of the static bed height in a 368 mm × 368 mm square fluidized bed with FCC particles are measured by optical probe. The results show that the local particle velocity of cross-section increases with the rise of superficial gas velocity U_g , and the distribution of local particle velocity in the cross-section is non-uniform. At the center of cross-section, the local particle velocity increases with the rise of U_g , and the up-lowing particle velocity increases more significant. Near the wall, in the low superficial gas velocity, the up-flowing and the down-flowing particle velocity all increases with the increase of U_g and with a similar growth; and in the high gas velocity, the local particle velocity shows significant fluctuations. The up-flowing particle velocity is affected greatly by the static bed height, but the impact reducing with the superficial gas velocity increasing.

Key words: FCC particles; square fluidized reactor; particle velocity