文章编号：1007-2691(1999)04-0023-05

内旋流流化床中气泡运动规律研究†

田文栋，魏小林，孙满弟，盛宏至

(中国科学院力学研究所，北京　100080)

摘要：利用摄相机研究了内旋流流化床固相流场及气泡特性，结果表明：非均匀布风是形成内旋流的关键，最佳高风区、低风区流化倍率为初始流化速度的 6 倍和 1.5 倍；随着气泡的上升，其体积不断增大；体积越大，上升速度越快；上升速度随流化倍率的增加而迅速增大；气泡运动及大、小气泡的汇合促进了固体颗粒的上升运动。实验结果表明气泡是产生内旋的一个重要因素。

关　键　词：内旋流；流化床；气泡；实验研究
中图分类号：O 359　　**文献标识码**：A

引　言

内旋流流化床是一种高效低污染的燃烧装置[1]，如图 1 所示。内旋流床不同于鼓泡床和循环床等气–固流化床，而是利用非均匀布风形成颗粒在床内的大尺度内循环运动。在内旋流床的高速风区，高速气流 (3~24u_{mf}，u_{mf} 为颗粒的初始流化速度) 以气泡形式携带颗粒自下向上运动，形成剧烈运动的流动床，因此高速风区又称为流动床区，颗粒到达浓相床区顶部时，携带颗粒的气泡在床面破裂，将大部分颗粒抛洒到低速风区；在低速风区，由于气流速度较小 (1 u_{mf} 左右)，颗粒在自重作用下缓慢下沉，并补充到床料被携带走之后留下的空隙，形成颗粒缓慢下降的移动床，低速风区又称为移动床区；随后床料又被高速气流携带向上。这样在床区形成一个由流动床和移动床构成的复合床。内旋流床不但可以增进燃料在床层内的扩散，而且还可以使重质不燃物下沉至布风板，并沿倾斜布风板逐渐移动至出渣口。因此，内旋流流化床有利于城市生活垃圾之类的特殊燃料的焚烧处置。

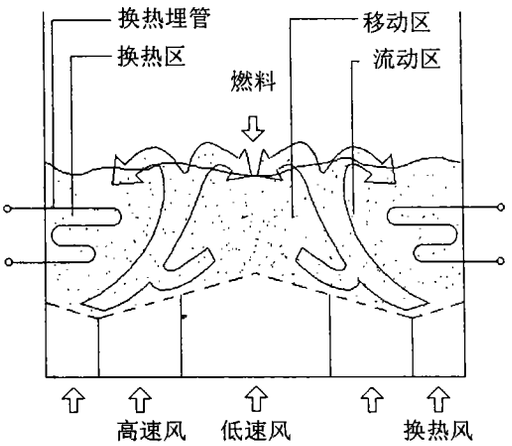


图 1　内旋流流化床结构示意图

气泡不仅是气–固流化床中明显的特点，而且引起颗粒运动，正是这种颗粒运动造成了颗粒的迅速充分混合。很多研究者都给出了多种流化床中气泡特性的细致而详尽的描述，而对内旋流床的研究工作

收稿日期：1999-04-12.
†本研究工作得到国家自然科学基金 (59776023) 和中国科学院重点项目 (KY95T-03-02) 资助.
作者简介：田文栋 (1969-)，男，中国科学院力学研究所，助理研究员.

大多集中于传热特性规律[2,3]、颗粒运动[4]和系统研制等，未见气泡规律的研究报告。Freedman 和 Davidson[5] 研究了气-液流化床中的气泡特性，结果表明非均匀布风可以诱导出液体的内旋流流动。通过获得的内旋流流化床中的气泡运动图像，分析得到了床内气泡的一些运动规律和特性。

1 试验系统

图 2 为实验系统简图，主要有流化床试验台（包括供风、风量控制等）和图像采集处理两部分。

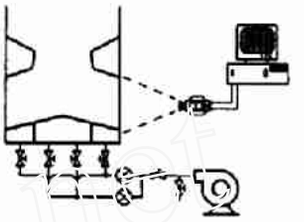


图 2 实验装置简图

由于内旋流床宽度方向为非均匀布风，纵深方向为均匀布风，颗粒的横向扩散远大于纵深方向的扩散，因此内旋流床为近似的二维床。试验台尺寸为 80 mm（纵深）×600 mm（宽）×1200 mm（高），与宽度方向比，纵深方向尺寸很小，便于观察气泡的演变；实验装置采用密孔板布风方式，开孔率为 5%，开孔半径 2.5 mm。选取平均粒径为 0.5 mm 的石英砂为床料颗粒，其真实密度为 2500 kg/m³；流动床区的布风速度为 4.0~24.0 u_{mf}，移动床区布风速度为 1.0~2.0 u_{mf}。

图像采集与处理系统包括：工业用CCD摄相机(分辨率为 768×576)、微型计算机和图像采集处理软件。

2 实验结果与分析

利用 CCD 摄相机拍摄了不同流化速度下，不同位置、不同尺寸的气泡的运动情况，对气泡的形状、尺寸、速度以及气泡之间的相互作用进行了研究。

2.1 气泡形状与尺寸

三维流化床中的气泡一般呈球形，底部有凹进的尾迹，其中带有许多颗粒[6]。内旋流床是近似的二维床，气泡的形状和三维流化床有一定的差别：气泡为椭球形而非球形，而且随着流化速度的提高形状有很大变化。图 3 给出了不同流化倍率时气泡的形状：流化倍率低时气泡多呈扁平形（横向尺寸大于纵向），这种形状一直维持到床表面破碎（图 3A）；随着流化倍率的提高，气泡从刚产生时的扁平状逐渐向圆球状发展，接近床表面时，气泡纵向尺寸已经大于横向（图 3B）；流化倍率进一步提高，气泡尺寸很快变大，形状变为弹状（图 3C）。

一个气泡从床底部生成至到达床顶部破碎需要 0.5 s 左右的时间，CCD 摄相机给出的视频信号为隔行扫描得到的信号，每帧包括两场，场间隔为 0.02 s。利用 CCD 摄相机连续拍摄并记录同一个气泡的运

A. u_{mf}=3.50　　B. u_{mf}=4.80　　C. u_{mf}=6.80

图 3 不同流化倍率下的气泡形状

动历程，可以得到 10 幅以上的照片，气泡的大小和位置则通过照片得到。勾画出气泡的边缘可以得到气泡的截面积。由于床纵深方向很小，气泡的尺寸在纵深变化很小。由气泡的截面积乘以纵深尺寸可得到气泡的体积。图 4 给出了同一气泡的大小和所处的位置（气泡中心位置）的关系。气泡大小不仅和流化倍率有关，而且随着气泡的上升体积不断增大。

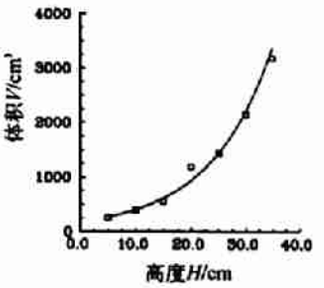
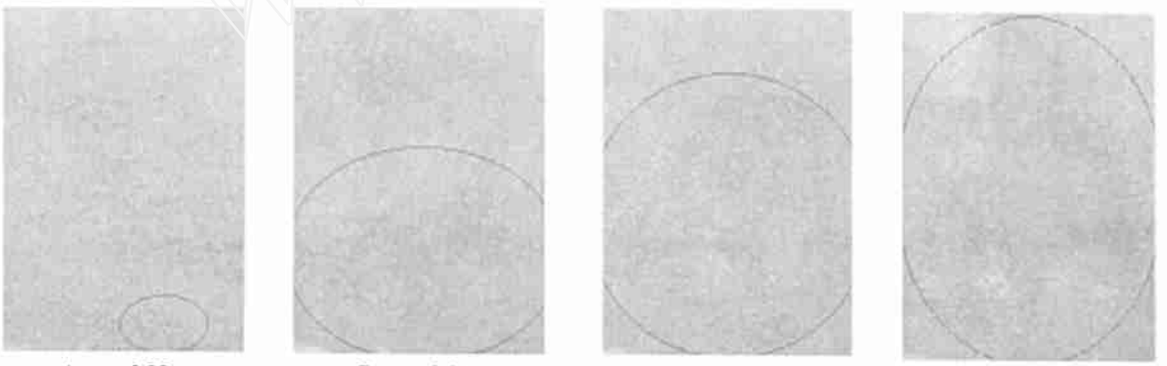


图 4　气泡上升时的体积变化

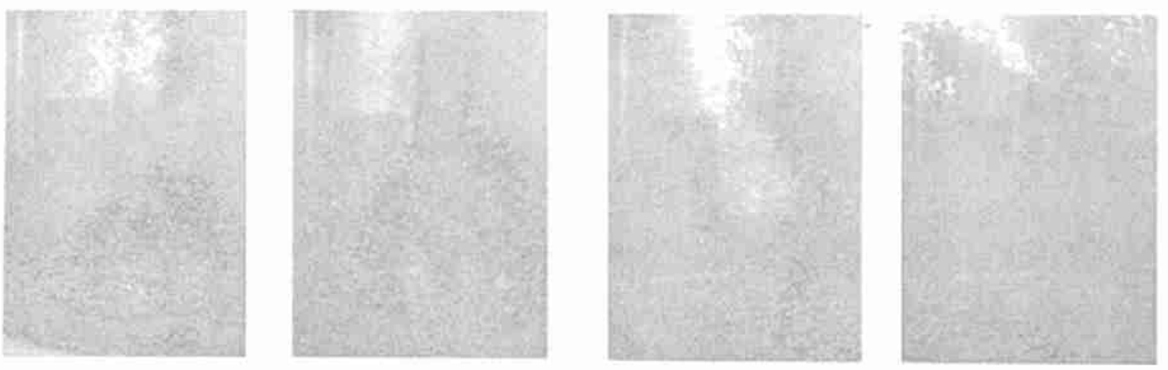
2.2　气泡发展过程

旋流中的气泡分为产生、发展和破碎 3 个阶段。新产生的气泡体积小、速度慢且垂直向上运动，形状为扁平状。气泡进入发展阶段，一般存在两种情况：当气泡比较孤立时，气泡仍垂直向上运动，上升速度逐步加快，形状由扁平向椭球形发展（图 5）。当气泡周围存在其它气泡时，两气泡相互吸引并向一起运动，最后合并为一个大气泡。气泡接近流化床表面时开始破碎，当流化倍率比较低时，气泡直到接触床表面时才由其顶部破碎，随着气泡内气体向上喷出携带起一定量固相颗粒。当流化倍率较高时，气泡距床表面还有一段距离就开始破碎，此时从气泡到床面发展出一条或几条长的“气体管道”，使气泡内气体由管道喷出，并夹带少量颗粒，随着气泡上升接近床面时，整个气泡破裂时掀起大量的颗粒，使床面产生“爆炸”，如图 6 给出了气泡破裂的照片。



A. $t = 0.00$ s　　B. $t = 0.04$ s　　C. $t = 0.08$ s　　D. $t = 0.12$ s

图 5　单一气泡的快速发展



A. $t = 0.00$ s　　B. $t = 0.04$ s　　C. $t = 0.08$ s　　D. $t = 0.12$ s

图 6　气泡的破碎过程

2.3　气泡上升速度

大小不同的气泡不断从流化床底部各处产生，并向床面发展，因此整个床层内均分布有大小不同速

度各异的气泡。在时间间隔为 0.04 s 的若干幅连续照片中可以找到同一个气泡，并测量其体积和位置，得到气泡体积和上升速度的关系。图 7 给出了同一布风条件下、不同时刻出现的、初始体积不同的 3 个气泡的发展过程，气泡 A、B、C 的初始体积分别为 430 cm^3、250 cm^3 和 200 cm^3，气泡上升速度与气泡体积有直接关系：气泡初始尺寸越大，上升速度越快。同一个气泡在不同高度上升速度也不同，气泡上升速度随气泡的上升而增加。图 8 给出了具有相同初始体积的气泡在不同流化倍率下的上升速度，随着流化速度的提高，气泡的上升速度增加。

2.4 气泡在整个床内的特性

内旋流流化床是一个包含流动床和移动床的复合床，各处的流化倍率存在差异，气泡的特性与均匀布风的流化床存在差异：由于非均匀布风，在高风区底部，产生大量大尺度的气泡，而在低风区底部，仅产生少量的小尺度的气泡。随着气泡的上升，小气泡向大气泡运动并很快同大气泡汇合，形成更大的气泡上升并最后破碎，将颗粒抛撒至低速风区，并向下移动，最终形成床内的颗粒循环。图 9 是气泡的运动示意图。布风的不同使两床区产生大小和速度均不同的气泡，在气泡发展过程中，由于气泡的运动总是向阻力小的方向运动，所以产生了图 9 所示的运动方式，而气泡运动给颗粒运动提供了动力，使得固相颗粒也沿气泡运动方向移动，加上固相颗粒的质量守衡与重力作用，便产生了固相颗粒的大尺度旋流。图 10 给出了非均匀布风流化床的流场内气泡运动的照片。

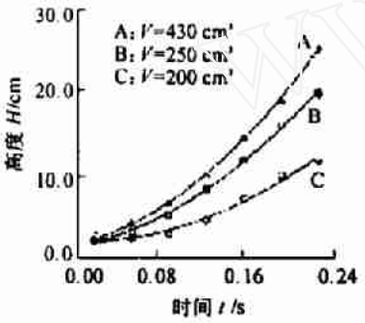


图 7 气泡体积对上升速度的影响

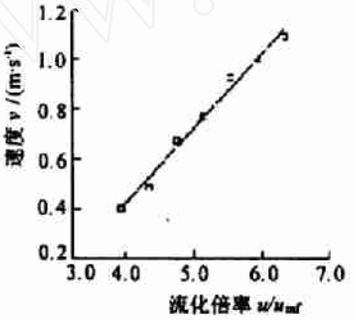


图 8 流化倍率对上升速度的影响

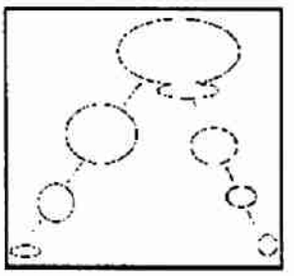
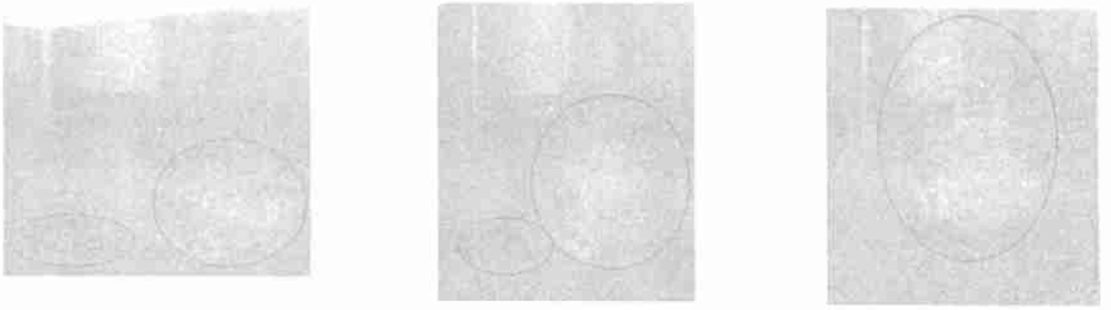


图 9 内旋流床中气泡合并示意图



A. $t = 0.00$ s　　B. $t = 0.08$ s　　C. $t = 0.16$ s

图 10 内旋流流化床中气泡的合并过程

3 结 论

利用图像技术对内旋流流化床固相流场及气泡特性进行了实验研究。结果表明，内旋流是由非均匀布风造成的，最佳高、低风区流化倍率分别为 $6u_{mf}$ 和 $1.5u_{mf}$；流化倍率影响气泡的形状和体积，当流化倍率增加时，气泡形状由扁平状向圆球状发展，气泡的体积也相应增加。随着气泡的上升，体积随位置

增高而不断增大；气泡体积越大，上升速度越快；而且上升速度随流化倍率的增加而迅速增大。气泡运动及大、小气泡的汇合促进了固体颗粒的上升运动。

参 考 文 献

[1] 盛宏至，黎军，魏小林，等.燃烧高水分低热值燃料的内旋流流化床燃烧技术研究[J]. 燃烧科学与技术，1997，3(3)：309-315

[2] Ohshita T，Higo T，Kosugi S，et al. Formation of Internally Circulating Flow and Control of Overall Heat-Transfer Coefficient in a Fluidized-Bed Boiler [J]. Heat Transfer-Japanese Research，1994,23 (4)：349-363

[3] 郝金华，田文栋，魏小林，等. 内旋流流化床埋管传热特性的实验研究 [C]. 见：中国工程热物理学会编. 中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集，合肥：1998.1-6

[4] Merry J M D，Davidson J F. Gulf Stream Circulation in Shallow Fluidized Beds [J]. Trans. Ins. Chem. Eng.，1973,51 (4)：361-368

[5] Freedman W，Davidson J F. Hold-up and Liquid Circulation in Bubble Columns [J]. Trans. Ins. Chem. Eng.，1969,47 (3)：251-261

[6] 戴维森 J F，哈里森 D. 流态化 [M]. 中国科学院化工冶金研究所与化学工业部化工机械研究院等译. 北京：科学出版社，1981.32-96

(责任编辑：贺幼贞)

Experimental Study on Bubble Characteristics in Internal Circulating Fluidized Bed

TIAN Wen-dong，WEI Xiao-lin，SUN Man-di，SHENG Hong-zhi

(Institute of Mechanics，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100085，China)

Abstract: The particle flow field and bubble characteristics in Internal Circulating Fluidized Bed (ICFB) have been investigated experimentally by CCD camera. Results show that the uneven distribution of fluidized air is the key of forming internal circulation. The optimum fluidized number ratio of high velocity air to low velocity air is 6umf：1.5umf. With rising the bubbles rising, the bubble volume increase of and the bigger the volume is, the quicker the bubble rises. And the bubble rising velocity increases quickly with increasing the fluidized number. Particle rising movements have been induced by bubble movement and merging of small bubbles and the big bubbles. Anyway, the bubbles are important to leading the internal circulation.

Key words: internal circulation; fluidized bed, bubble; experimental study

欢迎订阅《华北电力大学学报》