

循环流化床提升管中团聚物的结构及发展过程

陈宇航^{1,2}, 卢仕兵^{1,2}, 胡军军^{1,2}, 殷上轶^{1,2}, 宋涛^{1,2}, 卢平^{1,2}

(1.南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室,江苏 南京 210023)

[摘要] 为了研究循环流化床提升管内颗粒团聚的形成与解体机理,采用高速摄像技术捕获了 Geldart B 类颗粒在循环流化床提升管内团聚物的形成、长大和解体的动态演化过程。利用图像处理技术获得不同操作条件下团聚物的形状、尺寸及其从形成到解体的发展过程。结果表明,在循环流化床复杂气流的作用下,不同空间位置上团聚物的形成情况不同,边壁区较中心区多,底部密相区较上部稀相区多;床内团聚物形态各异,大致可分为 U 形、倒 U 形、中心带状、贴壁条状、彗星形、致密球形、双核形等,其中彗星形、致密球形、双核形团聚物在运动过程中会相互转变;在提升管中心区多为向上运动的倒 U 形和彗星形团聚物,而在提升管边壁区多为向下运动的 U 形和贴壁条状团聚物,且团聚物存在横向迁移的现象。

[关键词] 循环流化床,颗粒团聚物,高速摄像技术,图像处理

[中图分类号] TK121 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)03-0015-07

Structure and Development of Clusters in the Circulating Fluidized Bed Riser

Chen Yuhang^{1,2}, Lu Shibing^{1,2}, Hu Junjun^{1,2}, Yin Shangyi^{1,2}, Song Tao^{1,2}, Lu Ping^{1,2}

(1.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Engineering Laboratory of Energy System Conversion and Emission Reduction of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to study the formation and disintegration mechanism of particle clusters in a circulating fluidized bed riser, the dynamic evolution process of particle clusters, such as the cluster formation, development and dissipation in a circulating fluidized bed riser is reported by the high-speed video technology. The image processing technology is used to determine the cluster shape, size and record the clusters evolution from formation to breakup under various operating conditions. The results indicate that under the effect of the complex air flow in the circulating fluidized bed, the formation of clusters in different spatial positions is various. The clusters in side-wall regions are more than those in the center. Similarly, the clusters at the riser bottom are more than those in the upper part. In addition, clusters in the bed vary in the shape and can be divided into the U-shaped, the inverted U-shaped, the center-banded, the stick-wall strip, the comet-shaped, the dense-spherical and the double-core-shaped. The comet-shaped, the dense-spherical and the double-core-shaped clusters could change into each other in the movement process. The upward flowing inverted U-shaped and the comet-shaped clusters are majority in the center region of the riser, while the falling U-shaped and the stick-wall strip clusters are majority in the side-wall region. Furthermore, the clusters in the riser always lateral migrate.

Key words: circulating fluidized bed, particle cluster, high-speed video technology, image processing

循环流化床具有气固接触充分、传热效果好、反应速率快等优点,被广泛用于固体燃料燃烧和气化、流化催化裂化和费托合成等能源、石油和化工领域^[1-2]。在循环流化床提升管内,颗粒受到流体动力学作用发生聚集,形成团聚物是流化床内气固两相流动的典型特征,对反应器性能产生重要影响^[3-4]。提升管内离散颗粒聚集形成的团聚物不断长大,然后分裂成小尺寸的团聚物并最终消散,循环往复。因此,床内团聚物始终处于时空的动态变化中。目前国内外对团聚物形成、长大和解体过程的研究较少,对团聚物形成机制和发展过程认

收稿日期:2018-01-10.

基金项目:国家自然科学基金项目(51706109)、江苏省博士后科研资助计划项目(1601093B)。

通讯作者:殷上轶,博士,副教授,研究方向:气固两相流动及数值模拟。E-mail: syyin@njnu.edu.cn

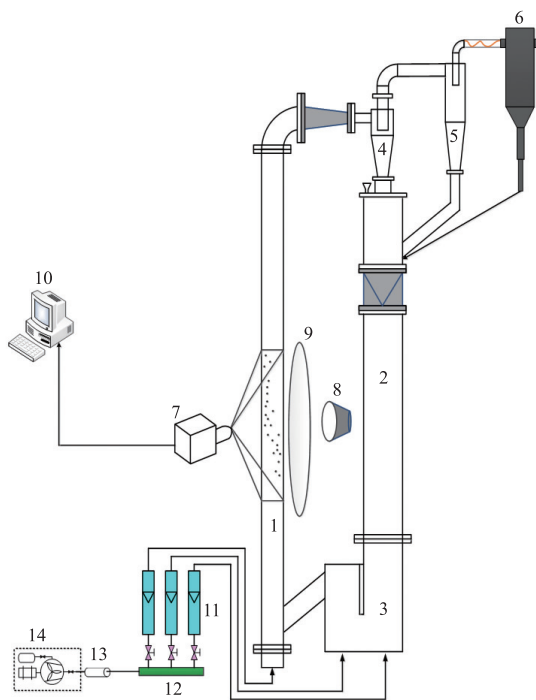
识不够充分,因此需要对其进行进一步深入研究. 高速摄影技术属于非接触测量,由于具有对流场无干扰、动态响应快、精度高、结果直观可靠等优点,因此可以捕捉快速运动中的颗粒或团聚物的运动情况. 图像处理技术将获得的图像更加直观、准确地呈现出来,从而更好地研究团聚物的相关特性. Yang 等^[5]采用图像处理技术,通过进一步处理图像中颗粒及团聚物浓度分布的色度、饱和度和纯度,较准确地识别团聚物,并获得团聚物形状、运动等特征参数. McMillan 等^[6]将高速摄影技术与图像分析相结合,捕捉到在床内不同位置处颗粒团聚的形成过程. 田晨^[7]等采用高速摄像和粒子图像测速技术,研究了炉膛结构对锅炉内气固流动的影响,确定了反应器内不同颗粒浓度区域颗粒的速度分布. 随着高速摄像和图像处理技术日渐成熟,循环流化床内团聚物形成、发展及解体的动态演化过程的捕获已经能够实现^[8].

流化床内团聚物形状大多不规则,且始终处于动态变化过程中,气固相间曳力与团聚物结构密切相关,为了揭示团聚物的内在规律、形成和解体机制,有必要进一步研究循环流化床提升管内团聚物的形状和尺寸等结构特征,并对流化床内团聚物从形成到解体的动态发展过程进行探讨^[9]. 本文采用高速摄像和图像处理相结合的手段,捕获了颗粒团聚物在循环流化床提升管中的动态演化的过程,揭示了提升管内不同空间位置的团聚物形状和极大值尺寸,并对提升管内充分发展段的团聚物形成和解体过程进行了探讨.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

本次试验在循环流化床冷态试验装置中进行(如图 1 所示). 该装置主要由试验台主体、光纤测量系统和送风系统等组成. 试验台主体部分由有机玻璃制成,主要包括提升管、立管、两级旋风分离器、储料罐、流动密封阀及返料管,其中提升管的横截面为 25 mm×100 mm,高度为 3.2 m.



1-提升管;2-立管;3-流动密封阀;4-一级旋风分离器;5-二级旋风分离器;6-布袋除尘器;7-高速摄像机;8-冷光源;9-光分散板;10-计算机;11-转子流量计;12-集气管;13-消音器;14-罗茨风机

图 1 循环流化床冷态试验台

Fig. 1 The cold test bench of circulating fluidized bed

罗茨风机产生流化风进入提升管底部,和来自流动密封阀的固体颗粒汇合,颗粒与气体一起沿着提升管并行向上流动,到达提升管的顶部后,气固两相从平滑出口流出并依次进入到两级旋风分离器中实现气体和固体之间的分离. 然后,固体颗粒会再次回到立管中,从立管下端经流动密封阀重新回到提升管底部,进入新一轮循环,气体经由布袋除尘器除去细小颗粒后被排到大气中.

1.2 测量和分析方法

本实验采用高速摄像及图像采集系统(如图2所示).均匀明亮的光从床体背面照射在运动颗粒上,光线经透射后进入图像控制器(charge-coupled device, CCD),CCD将流化床颗粒运动的光信号转化为图像,经千兆网线传输进入计算机进行储存,最后利用数字图像处理技术离线处理获得团聚物结构、尺寸等特征参数.实验采用的光源为1 000 W的矩形LED冷光源,采用的图像采集设备为日本Photron数码公司的FASTCAM SA4高速摄像机,其帧率5 000 fps,分辨率1 024×800,拍摄时间为3 s.

由于实验装置本身的限制或试验环境的影响,利用CCD拍摄的图像中会出现一些与试验目的无关的噪点.为了降低噪点对图像质量的影响,便于后续的图像分割,必须对图像进行预处理、画面增强,并选择合适的方法来消除噪点.本实验在Matlab平台上采用最佳阈值法获得团聚物识别的阈值,并将图像经过二值化处理,以获得团聚物的清晰图像^[10].图3(a)所示为提升管内气固流动的原始灰度图像,图3(b)为经过团聚物识别和二值化处理后的图像.分析图像中所包含的信息,可获得团聚物的形状、尺寸和速度等参数,有助于了解团聚物的运动特征、形成、长大和解体过程.

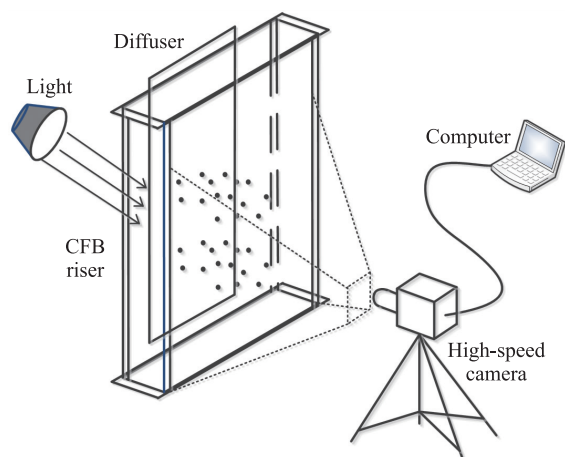


图2 高速摄像图像采集系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high-speed imaging system

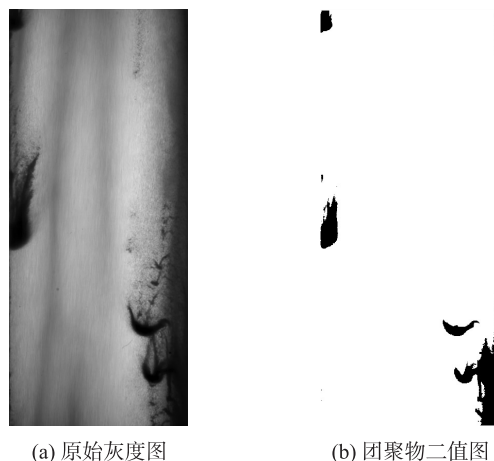


图3 团聚物识别及图像二值化

Fig. 3 Clusters identification and image binarization

1.3 实验物料与工况

实验物料选用球形无色玻璃珠,其真密度为 $2\,333\text{ kg/m}^3$,堆积密度为 $1\,452\text{ kg/m}^3$,平均粒径为 $234\text{ }\mu\text{m}$,粒径范围 $188\sim 250\text{ }\mu\text{m}$,属于窄筛分颗粒.根据Geldart颗粒分类法,实验所用物料属于Geldart B类颗粒.实验在表观气速 $U_g=3\sim 6.5\text{ m/s}$,固体通量 $G_s=5\sim 100\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的条件下进行.

2 实验结果与分析

2.1 颗粒团聚的静态分析

在提升管不同空间位置上,颗粒聚集形成团聚物的趋势不同:提升管底部的团聚物数量和存在时间较提升管上部大得多;在相同高度上边壁区域团聚物较中心区域数量多且时间长.分析其原因可能是:径向上,边壁区的颗粒浓度较高,气流干扰较小,颗粒易于相互聚集形成浓度较高且较为稳定的团聚物,而中心区气速较大,颗粒较难聚集形成大尺寸的团聚物,且形成的团聚物极易被气体吹散,或向边壁区发生横向迁移.轴向上,提升管底部,颗粒运动速度较低、浓度较高,颗粒非常容易在此处发生聚集形成团聚物.另一方面,由于气固相间作用较大,形成的团聚物又很快地分解,导致该区域团聚物形成与解体频繁.在提升管上部稀相区,颗粒浓度较低,气固滑移速度不大,因此,形成的少量团聚物能够维持较长的时间.

2.1.1 颗粒团聚的空间结构

基于实验观察和拍摄的图片,循环流化床提升管内气固流动状况复杂多变,颗粒非常容易发生聚集,形成形态各异、浓度不同的团聚物.根据形成的团聚物形状和致密度不同,大致可以把团聚物分为U形、倒U形、中心带状、贴壁条状、彗星形、致密球形、双核形(如图4所示).图4中U形、中心带状、贴壁条状和致密球形团聚物内部颗粒浓度较高,均属于致密型团聚物.倒U形、彗星形和双核形团聚物的颗粒分布

较为稀疏,属于松散型团聚物。

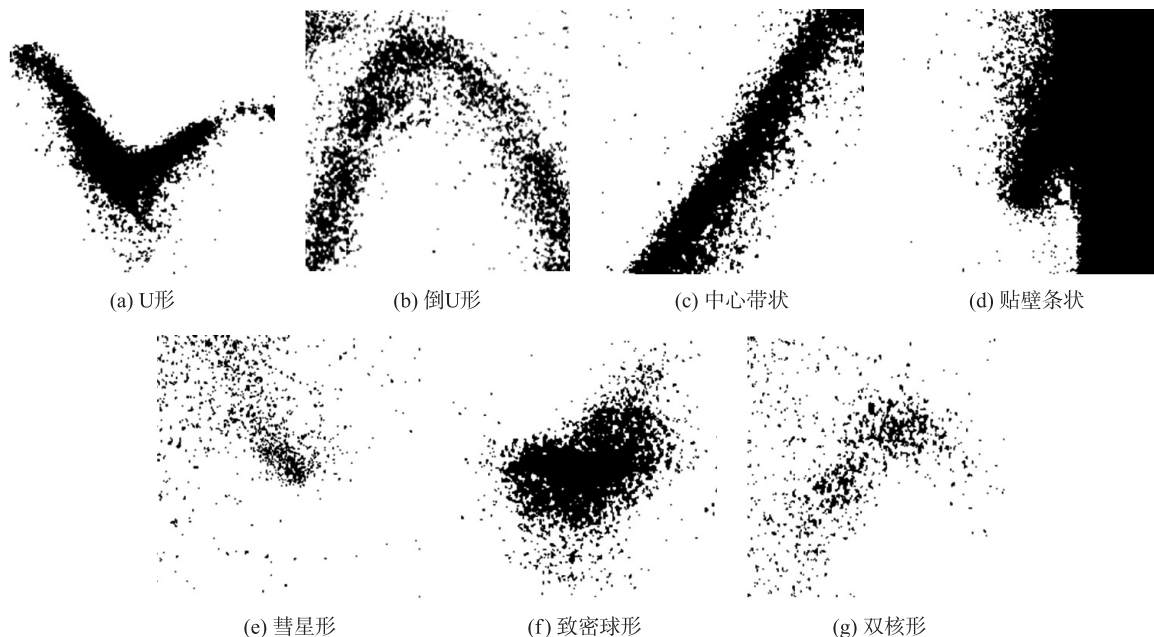


图 4 团聚物的分类

Fig. 4 The classification of clusters

由于受到提升管内复杂气固流体动力学作用的影响,不同类型团聚物的形成原因、运动趋势不尽相同。U 形团聚物一般出现在提升管中心区域,这种团聚物中心颗粒浓度高、重量大,超过了气体对它的携带能力,因而缓慢向下运动。因此,上升气流不足将其吹散,仅带动两端较为松散的颗粒向上发展。相比之下,倒 U 形团聚物没有致密的团聚核心,内部结构较为松散,气流容易携带推动着团聚物向上运动。团聚物中心受到高速气流的作用快速向上运动,两侧颗粒上升速度相对较慢,从而形成两条向下的尾巴。中心带状团聚物大多由其他团聚物发展而来。由于受到中心处高速气体的拖拽,颗粒团在竖直方向被拉伸成长条形。中心带状团聚物存在时间较长且具有较大的横向迁移。贴壁条状是由于受到壁面效应的影响,大量颗粒在壁面汇聚形成的。由于这种团聚物在下落的过程中不断有新的颗粒加入导致其质量和体积均较大,超过了气流向上的携带能力,因此大多向下运动或缓慢向上运动。彗星形团聚物大多是由一个致密球形颗粒团在较大的气固滑移速度下由于尾迹效应形成的。致密球形团聚物是一种由高浓度核心组成的拟球形团聚物,其质量和密度均较大。致密球形团聚物在上升或者下落的过程中,颗粒团中心受到气流的作用较大,核心一分为二,形成双核形团聚物。双核形团聚物结构较松散,下落一段时间便被吹散,因此存在时间较短。彗星形、致密球形和双核形团聚物在气固流动发展过程中频繁地相互转变。

在实际流场中,团聚物上升和下落的现象同时存在。团聚物在提升管内会发生横向迁移,中心区域上升的团聚物向壁面迁移,逐渐靠近床层边壁并与边壁处的下落团聚物汇合然后一同向下运动。边壁处下落的团聚物在较大速度梯度下,靠近中心区的一侧受到气体向上的曳力作用,向中心和上部方向发展,又进入中心区,从而形成一定程度的内循环。

2.1.2 团聚物尺寸

团聚物尺寸的确定有利于进一步认识气固流动系统中的颗粒团聚特性,为循环流化床反应器结构的设计、运行和优化提供参考^[11]。目前,国内外对团聚物尺寸的研究大多采用反射式光纤测量,获得竖直方向上团聚物的长度^[12]。实际上,团聚物大多为不规则形状,不同方向的尺寸并不相同。本文基于团聚物二维图像对不同形状团聚物的尺寸进行探讨。

本文研究了平行于拍摄平面上典型的团聚物在二维方向上的极大值尺寸。图 5 给出了上升的倒 U 形、彗星形、致密球形团聚物的极大值尺寸。需要指出的是,由于团聚物由较分散的颗粒云包裹,没有明显的边界,因此团聚物尺寸的确定存在一定的主观因素。如图 5 所示,上升的团聚物尺寸为 23~78 mm,倒 U 形团聚物径向和轴向尺寸都较大;彗星形径向尺寸较小,轴向尺寸较大;致密球形尺寸最小。

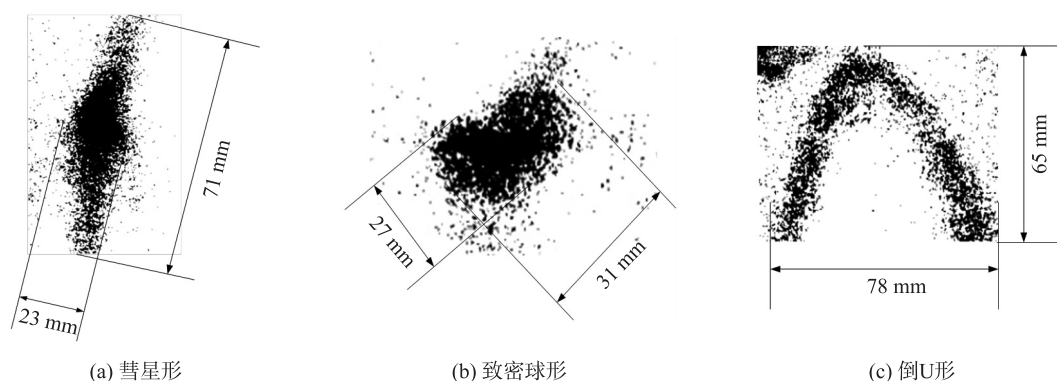


图5 上升团聚物的尺寸

Fig. 5 The size of rising clusters

图6为下落的U形和贴壁条状团聚物的极大值尺寸.从图中可以看出,下落团聚物的尺寸为12~43 mm,普遍小于上升团聚物,这可能是由于团聚物在下落过程中受到较大的曳力作用,很难维持较大的尺寸. U形团聚物主要朝水平方向分布,轴向尺寸较小.贴壁条状在形成初期轴向尺寸大于径向尺寸,在发展后期,由于受到气流作用向水平方向拉伸,径向尺寸大于轴向尺寸.

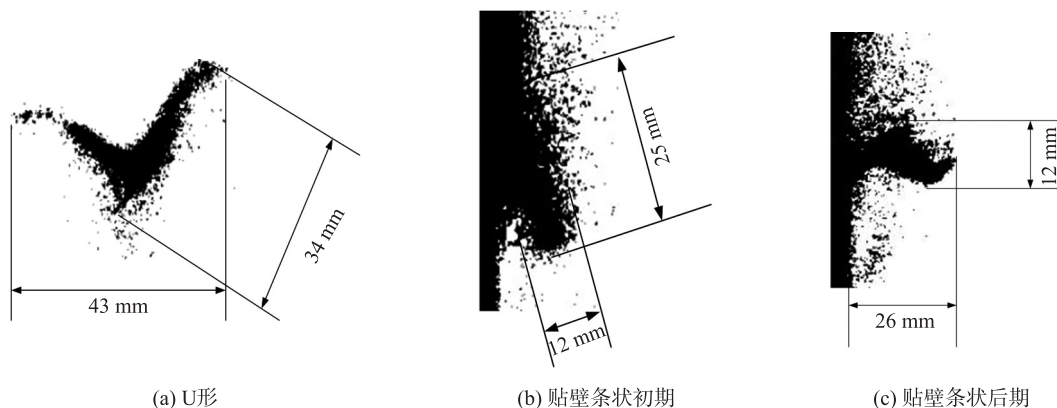


图6 下落团聚物的尺寸

Fig. 6 The size of falling clusters

2.2 颗粒团聚的动态分析

团聚物的运动状态是不断变化的,在提升管内频繁地形成、长大和解体.在形成初期或者开始发生解体时,团聚物较为松散,内部颗粒浓度较低;在团聚物完全发展时,内部颗粒紧密聚集在一起形成致密的颗粒核心,此时团聚物内部颗粒浓度最高.

对实验拍摄到的大量图片进行统计可以发现:提升管中心区出现上升的团聚物概率较高,并且当上升的团聚物发生解体时,团聚物内的部分颗粒发生横向运动,朝边壁方向迁移,最终汇入到边壁颗粒群中.而近边壁区向下运动的团聚物,由于其与气流方向相反,极易被气流吹散,靠近中心的一侧由于受到气流的拉拽脱离团聚物,跟随气流一起向上运动.

图7为提升管中心区域上升团聚物的动态演化过程.其中, $U_g = 4.4 \text{ m/s}$, $G_s = 27.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $z = 0.8 \text{ m}$.从图中可以看出,开始时已经形成一个尺寸较大的致密团聚物,其顶部存在一个浓度核心,下方则是尚未完全聚集的松散颗粒云.上升气流推动分散颗粒逐渐向顶部核心聚集,向水平方向拉伸,形状由最初的椭球形变成横置条状.由于受到气流的直接冲击,中心处的气流速度较大,使得团聚物从中心分散,最终解体.整个过程历时大约 96 ms.

图8为边壁区贴壁下落团聚物的动态演化过程.其中, $U_g = 3.96 \text{ m/s}$, $G_s = 16.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $z = 0.8 \text{ m}$.由图可知,边壁处最初形成一个拟球形的致密团聚物,边界较为清晰.在下落过程中,由于受到上升气流的冲刷,团聚物下落速度逐渐减慢.此外,边壁区团聚物处在较大的速度梯度下,靠近中心区一侧气流速度较边壁处大得多,因此产生一个水平方向的压力差,使得团聚物逐渐脱离壁面被横向拉伸直至最终破

碎. 同时,被脱离团聚物的颗粒随着气流一起向上运动. 整个过程历时约为 104 ms.

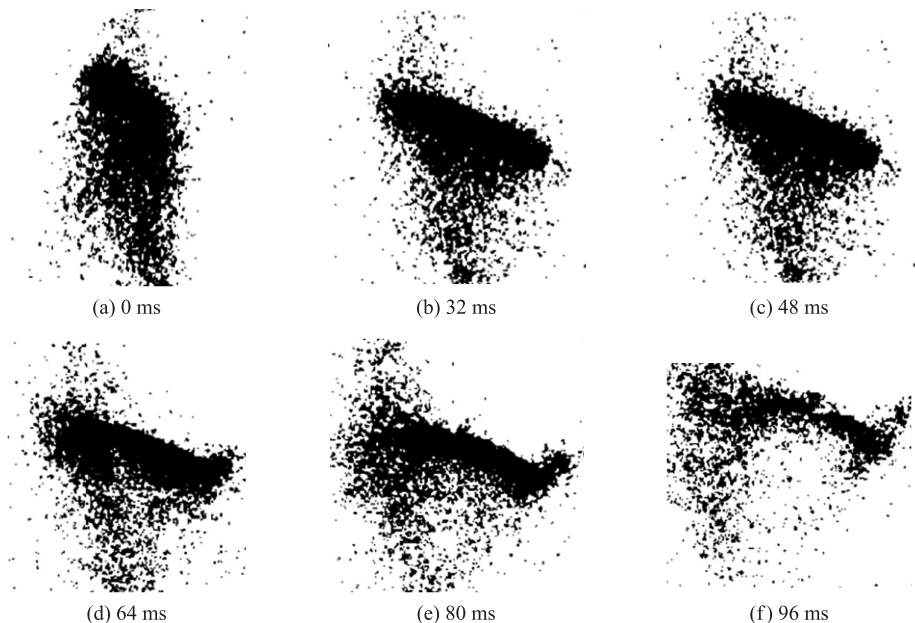


图 7 上升团聚物的运动过程

Fig. 7 The movement of rising cluster

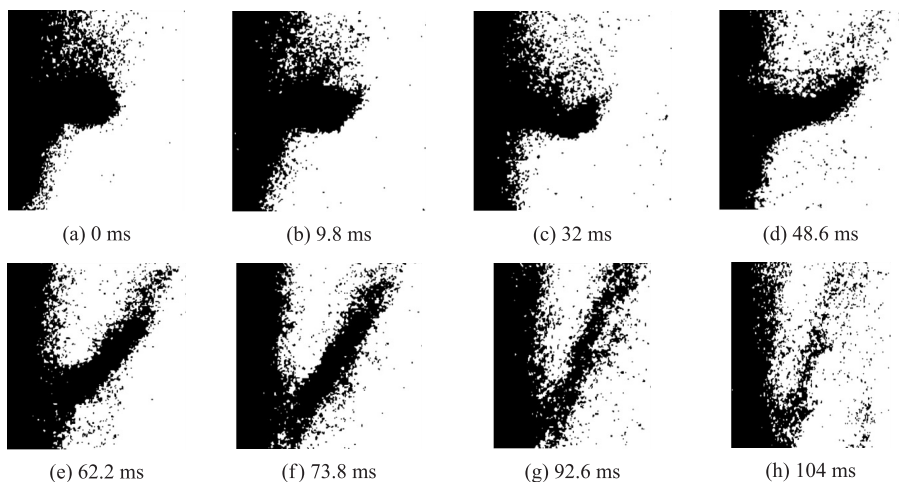


图 8 下落团聚物的运动过程

Fig. 8 The movement of falling cluster

3 结论

通过高速摄像技术记录循环流化床提升管中团聚物的动态演化过程,利用图像处理技术对拍摄的图像进行分析,获得了团聚物的形状、尺寸等静态特性以及团聚物形成、长大和解体的动态过程,得到如下结论:

(1)在提升管不同空间位置,颗粒聚集形成团聚物的趋势不同. 团聚物在边壁区域较中心区域形成数量多、存在时间长,在提升管底部较上部形成数量多、存在时间长.

(2)根据团聚物的形状和致密度,可将其分为 U 形、倒 U 形、中心带状、贴壁条状、彗星形、致密球形、双核形. 在气固流动过程中,彗星形、致密球形和双核形团聚物会相互转变. 团聚物的极大值尺寸介于十几毫米到几十毫米之间,且下落团聚物的尺寸普遍小于上升团聚物.

(3)提升管中心区域出现上升团聚物的概率较高,边壁处团聚物则大多向下运动. 上升团聚物和下落团聚物均存在横向迁移,在提升管内形成一定程度的内循环. 团聚物从形成、到解体历时约 100 ms.

[参考文献] (References)

- [1] 李智梁. 循环流化床的基本原理与应用[J]. 科技资讯, 2012(12):108.
- [2] 朱文奇. 高密度循环流化床提升管内气固流动特性的数值模拟[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- [3] 白志刚,杨晨. 循环流化床气固两相流动模拟[J]. 计算机仿真, 2009, 26(3):272-275.
- [4] 殷上轶,钟文琪,卢平,等. 基于图像处理的循环流化床团聚物体积分数及其容积份额[J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24(6):506-512.
- [5] YANG J, ZHU J. Cluster identification using image processing[J]. Particuology, 2015, 23(6):16-24.
- [6] MCMILLAN J, SHAFFER F, GOPALAN B, et al. Particle cluster dynamics during fluidization[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 100(2):39-51.
- [7] 田晨,王勤辉,张锡梅,等. 循环流化床内结构对局部流动特性影响的研究[C]//中国颗粒学会学术年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会. 2008.
- [8] 高琼. 循环流化床内部颗粒流动特性的试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [9] 王勤辉,高琼,石惠娟,等. 循环流化床中的颗粒团形成、结构及其运动[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(1):118-122.
- [10] 胡军军. 循环流化床提升管颗粒团聚特性的实验研究[D]. 南京:南京师范大学, 2017.
- [11] 钱诗智,陆继东,林志杰,等. 压力循环流化床流体动力特性研究[J]. 化学工程, 1998, 26(5):10-13.
- [12] CHEW J W, HAYS R, FINDLAY J G, et al. Cluster characteristics of Geldart Group B particles in a pilot-scale CFB riser. I. Monodisperse systems[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 68(1):72-81.

[责任编辑:陈 庆]

(上接第14页)

- [17] 陈智明,张忠斌,徐冠依,等. 风道结构对自提冷柜空气流场和温度场的影响分析[J]. 制冷学报, 2019, 40(5):52-62.
- [18] 刘九五,连之伟,王月梅. CFD在暖通空调系统中的应用现状与发展[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(6):1-6.
- [19] SOKOLOV A, STREHL R, TUREK S. Numerical simulation of chemotaxis models on stationary surfaces[J]. Discrete and Continuous Dynamical Systems(Series B), 2013, 10(10):2689-2704.
- [20] ROSSETTI A, MINETTO S, MARINETTI S. A simplified thermal CFD approach to fins and tube heat exchanger; application to maldistributed airflow on an open display cabinet[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 57:208-215.
- [21] 丁国良, OELLRICH L R. 冰箱箱内空气温度场与流场的优化研究[J]. 制冷学报, 1998, 19(1):22-27.
- [22] 中华人民共和国工业和信息化部. 食品冷柜:JB/T 7244—2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2018.
- [23] 徐敏艳,陈华书,范秦寅,等. 多块网格划分技术在CFD仿真中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2012, 21(4):65-68.

[责任编辑:严海琳]