

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107880

## 循环流化床颗粒团多参数的光散射测量方法\*

杨斌<sup>1</sup>, 张驰<sup>1</sup>, 平力<sup>1</sup>, 殷上轶<sup>2</sup>, 姜勇俊<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院/上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093;

2. 南京师范大学能源与机械工程学院 南京 210042)

**摘要:**针对循环流化床内颗粒团动态参数和行为特性的测量问题,提出了基于光散射原理的颗粒团运动速度、高度与浓度等多参数同时在线测量方法,利用该方法对二维冷态循环流化床试验台开展颗粒团参数测量,获得了颗粒经测量区造成的光强衰减信号,通过对上下测量单元光强信号进行互相关分析可获得颗粒团运动速度参数;对信号进行低通滤波,根据低频信号极值点时间差及运动速度测量结果,得到颗粒团高度参数;同时根据光强衰减程度计算颗粒团的浓度参数。由此实现了基于光散射原理的循环流化床内颗粒团运动速度、高度与浓度多参数同时在线测量,测量结果显示,在典型工况下,提升管中心区域颗粒团运动速度较为稳定,平均速度为 3.81 m/s,近壁面区域颗粒团运动速度有较大波动且出现负值,平均速度为 0.65 m/s;中心区域颗粒浓度较近壁面区域小;中心区域颗粒团高度主要分布在 20~40 mm 区间,近壁面区域颗粒团高度主要分布在 30~60 mm 区间。这为循环流化床内颗粒团的形成、结构及其运动研究提供了一种有效的测量手段。

**关键词:**多相流测量;循环流化床;颗粒团;光散射;互相关法

**中图分类号:** TH74      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 530.14

## Light scattering measurement method for multi-parameters of particle clusters in circulating fluidized bed

Yang Bin<sup>1</sup>, Zhang Chi<sup>1</sup>, Ping Li<sup>1</sup>, Yin Shangyi<sup>2</sup>, Jiang Yongjun<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering / Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Aiming at the measurement issue of dynamic parameters and behavior characteristics of particle clusters in circulating fluidized bed (CFB), a multi-parameter simultaneous on-line measurement method of velocity, height and concentration of particle clusters based on light scattering principle is proposed. This method is used to measure the parameters of particle clusters in a two-dimensional cold test bench of CFB. The light attenuation signal caused by particle clusters flowing through the measurement zone is obtained. The velocity of particle clusters is obtained from the cross-correlation analysis of the light intensity signals of the upper and lower measurement units. The signal is filtered with low-pass filter, and the height of particle clusters is obtained according to the time difference of the extreme points of the low-frequency signal and the measurement results of motion velocity. At the same time, the concentration is calculated according to the light intensity attenuation. Thus, the multi-parameter on-line measurement of velocity, height and concentration of particle clusters in CFB is realized based on light scattering. The measurement results show that under typical working condition, the velocity of particle clusters in the central zone of riser is quite stable, and the average velocity is 3.81 m/s. The motion velocity of particle clusters in the near wall zone has large fluctuations, even is negative, and the average velocity is 0.65 m/s. The concentration of particle clusters in the central zone is less than that in the near wall zone. The height of particle clusters in the central zone is mainly distributed in the range of 20~40 mm, and the height of particle clusters in the near wall zone is mainly distributed in the range of 30~60 mm. The results provide an effective measurement method for studying the formation, structure and motion of particle clusters in CFB.

**Keywords:** multi-phase flow measurement; circulating fluidized bed; particle cluster; light scattering; cross-correlation method

收稿日期:2021-05-04      Received Date: 2021-05-04

\* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0600601)项目资助

## 0 引 言

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)是一种气固(或液固、或气液固三相)接触反应器技术<sup>[1]</sup>,以较高的表观速度使固体颗粒的重力与流体曳力达到平衡,从而将固体物料层托举起来,并使床层整体上获得类似于流体的特性,具有良好的混合和传热传质条件,并通过分离器使固体物料多次循环再入主要反应区,以延长停留时间,达到高转化率<sup>[2-4]</sup>。由于循环流化床内气固流动复杂,流动不稳定及颗粒与颗粒、颗粒与气体、颗粒与壁面之间存在着多种相互作用力,在这些力的作用下颗粒易相互聚集形成颗粒团聚物,颗粒团对循环流化床内的气固两相流动、反应及传热等特性有很大影响,是循环流化床床内流动特性研究的重点内容之一<sup>[5-8]</sup>。

目前,循环流化床颗粒团测量方法主要有激光相位多普勒粒子分析仪(phase doppler particle analyzer, PDPA)、高速摄影、粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)与光散射法等。刘新华等<sup>[9]</sup>利用 PDPA 技术测量循环流化床中颗粒团聚物,根据颗粒散射光的运动颗粒散射光的多普勒频移和相位移动得到颗粒粒径大小与运动速度。PDPA 技术主要测量单颗粒运动,对颗粒团识别与测量缺乏统一标准。相较于 PDPA 技术,高速摄影与 PIV 等图像测量技术对于循环流化床颗粒团测量更具直观性。Yang 等<sup>[10]</sup>通过高速摄像技术捕获颗粒团图像从而分析颗粒团浓度在提升管内的分布特性;石惠娴等<sup>[11-13]</sup>利用灰度阈值法确定颗粒团边界,更加精确得到颗粒团的形状和大小,并利用 PIV 技术获得循环流化床内颗粒运动分布。但这些图像测量技术受成像区域与时空分辨率限制,颗粒团大小与速度参数分布需要大量的统计分布,颗粒团浓度分布测量还受光源强度与成像响应影响。相较而言,光散射法利用光纤传输激光照射待测点获得测点散射光信号得到颗粒团浓度更为简便。Lin 等<sup>[14]</sup>利用光纤探针测量流化床内局部颗粒浓度的变化来判断团聚物的存在及其尺寸。采用光散射法的光纤探针通常采用侵入式方式会对流场造成干扰,主要依靠单点颗粒浓度反应颗粒团参数,多点测量系统复杂且流场影响更为严重。

对此,本文旨在基于双光路消光衰减原理研究循环流化床颗粒团运动速度、高度与浓度等多参数同时在线测量方法。通过对上下游光束消光衰减信号进行互相关分析获得颗粒团运动速度参数;对信号进行低通滤波,根据低频信号极值点时间差及运动速度测量结果,得到颗粒团高度参数;同时根据光强衰减程度计算颗粒团的浓度参数。并研制相应的测量系统对二维冷态循环流化床试验台开展实验测量,从而揭示循环流化床提升管内颗

粒团的动态参数和行为特性,为颗粒团的形成、结构及其运动研究提供了一种有效的测量手段。

## 1 颗粒团多参数测量原理

当一束光强和波长一定的平行光照射到含有颗粒团的两相流测量区域时,如图 1 所示,在颗粒团流向上下游布置相距为  $l$  的双光路激光探测单元,激光器 L1 和 L2 发出激光,初始光强为  $I_0$ ,经待测区域后,由于颗粒团的散射作用,探测器 D1 和 D2 接收的激光光强衰减信号如图 2 所示。

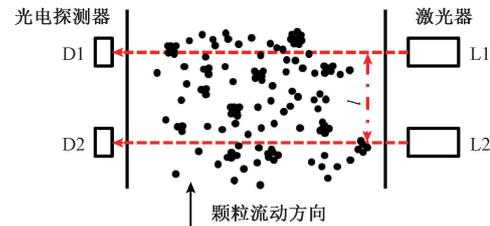


图 1 颗粒团多参数测量原理

Fig. 1 Particle clutter multi-parameter measurement principle

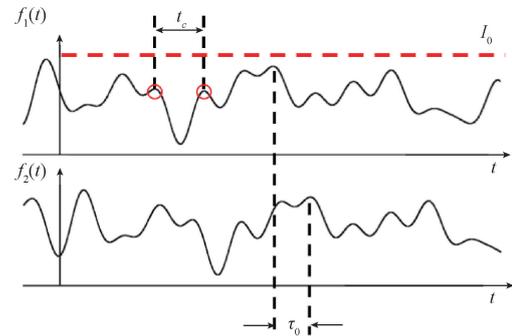


图 2 双光路透射光强典型信号

Fig. 2 Typical signals of two light path transmitted intensity

激光经待测区域,由于颗粒的消光作用,透射光强发生衰减,并符合 Beer-Lambert 定律:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{\pi}{4}ND^2LK_{\text{ext}}(\lambda, D, m) \quad (1)$$

式中: $I_0$  为初始光强,  $I$  为采集得到的透射光强信号,  $D$  为颗粒平均粒径,  $N$  为颗粒数量浓度,  $L$  为测量区域光程长度,  $\lambda$  为激光器波长, 本文选用波长为  $\lambda = 650 \text{ nm}$  的激光光源, 在已知颗粒粒径  $D$  并给定颗粒折射率  $m$  后, 可按 Mie 散射理论计算  $K_{\text{ext}}$ <sup>[15]</sup>。如图 2 所示, 上下游透射光强信号具有很好的相似性, 因此, 基于光学互相关原理可实现速度测量<sup>[16]</sup>。光电探测器 D1 和 D2 接收的激光透射光强随机波动信号为  $Y_1$  和  $Y_2$ , 其光强时间序列信号为

$y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ ,分析其互相关系数 $R_{12}$ :

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y_1(t - \tau) y_2(t) dt \quad (2)$$

式中: $T$ 为积分平均时间。当 $\tau = \tau_0$ 时, $R_{12}$ 为最大值,则 $\tau_0$ 为两随机波动信号的时滞,如图3所示。

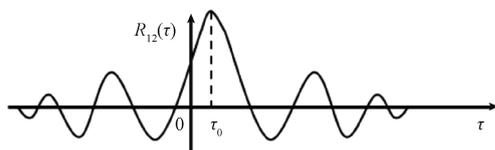


图3 互相关分析

Fig. 3 Cross correlation analysis

因此,根据时滞 $\tau_0$ 以及两探测器之间的距离 $l$ (m)可求得颗粒团运动速度 $v$ :

$$v = l/\tau_0 \quad (3)$$

颗粒团高度可根据颗粒团的运动速度和经过测点的时间计算得到。对原始采样数据进行低通滤波处理,滤除单个颗粒造成的高频信号,对滤波后的低频信号取极值分析,如图2所示。两极值点之间的时间差即为颗粒团的存在时间 $t_c$ ,根据试验测得的颗粒团速度 $v$ ,可以分析得到颗粒团的高度:

$$h_c = v \cdot t_c \quad (4)$$

相应的颗粒团的数量浓度及质量浓度可根据 Beer-Lambert 定律得到:

$$N = \frac{4 \ln(I_0/I_t)}{\pi D^2 L K_{ext}} \quad (5)$$

$$C_m = \frac{2 \rho D \ln(I_0/I_t)}{3 L K_{ext}} \quad (6)$$

由此实现颗粒团运动速度、高度及浓度参数的同时在线测量,通过长时间统计,还可获得参数的分布规律。

## 2 试验系统与工况

### 2.1 循环流化床冷态试验系统

如图4所示,循环流化床冷态试验台系统主要包括由提升管、立管、两级旋风分离器、风机等组成<sup>[17]</sup>。试验过程中,处于初始流化状态的固体颗粒从立管下部落入提升管底部的布风板;主流化气使其达到初始流化并加速颗粒,颗粒与气体沿着提升管并行向上流动;气固两相到达提升管顶部出口后依次进入两级旋风分离器和布袋除尘器后,收集到的固体颗粒再回到立管中,再从立管下部进入提升管底部。

试验系统中的总风量是影响颗粒流态化的主要参数,总风量为提升管主流化风量( $Q_1$ )和返料器的松动风

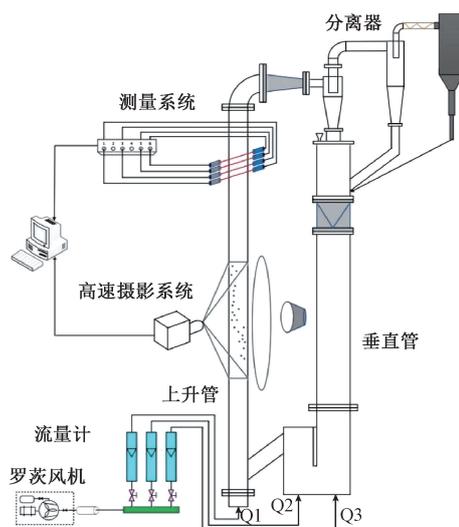


图4 循环流化床冷态试验台

Fig. 4 The cold test bench of circulating fluidized bed

量( $Q_2$ )和流化风量( $Q_3$ )的总和。气体流量由转子流量计测量得到。光散射测量系统的测量区域为提升管中段。选定3组不同的试验工况,利用光散射测量系统对提升管中段测量区域进行颗粒团多参数在线测量。各工况的风量参数如表1所示。

表1 不同工况试验参数

Table 1 Experiment parameters in different working conditions

| 工况 | 试验参数/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |               |               |            |
|----|--|---------------|---------------|------------|
|    | 流化风量( $Q_1$ )                            | 松动风量( $Q_2$ ) | 流化风量( $Q_3$ ) | 总风量( $Q$ ) |
| 1  | 32.0                                     | 12.0          | 1.3           | 45.3       |
| 2  | 38.0                                     | 12.0          | 1.3           | 51.3       |
| 3  | 50.0                                     | 11.5          | 1.2           | 62.7       |

试验物料选用的是密度为 $2333 \text{ kg/m}^3$ 、堆积密度为 $1452 \text{ kg/m}^3$ 、采用3层标准筛振荡获得粒径范围 $188 \sim 250 \mu\text{m}$ 的无色透明玻璃珠,试验管径为 $100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ,高度 $3.2 \text{ m}$ 。

### 2.2 颗粒团多参数测量系统

基于光散射原理的颗粒团多参数测量系统如图5所示,由激光器光源、光学探头、光纤、光电探测系统、数据采集系统和数据分析系统组成。激光器发射激光透射过颗粒团,再由光学探头接收透射光,经光纤传输至光电探测系统转换为电压信号,后由采集卡采集,传输至计算机进行数据分析与处理。为了与光散射测量方法对比,实验同时利用高速摄影对同测量区域进行测量。

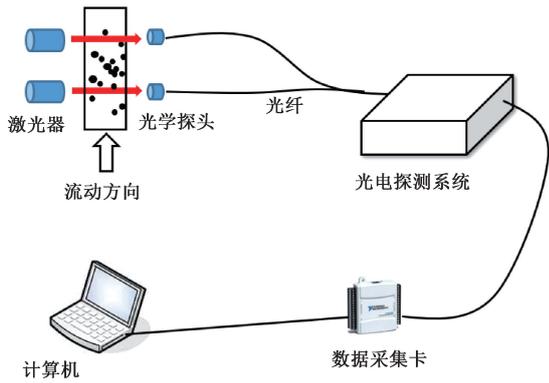


图 5 颗粒团多参数测量系统

Fig. 5 Particle clutter multi parameter measurement system

为研究颗粒团在提升管内参数分布规律,如图 6 所示,沿测量区域横向布置了 5 组光纤,每组沿颗粒团流动方向成上下游布置以得到互相关的透射光强信号。

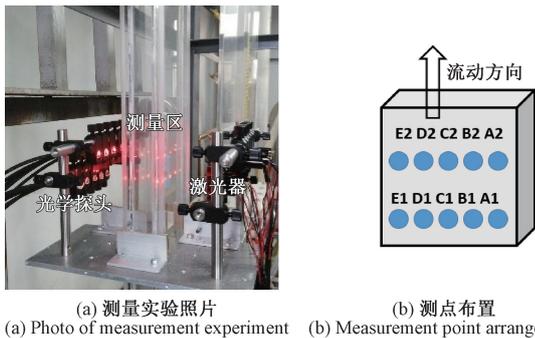


图 6 颗粒团测量实验测点布置

Fig. 6 Measurement point arrangement in particle cluster measurement experiment

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 典型双光路透射光强信号处理

为保证颗粒团参数测量数据的连续性,数据采集系统采样模式为连续采样模式,采集系统共 10 路采样通道,分别采集 10 个不同测点位置处的颗粒团光散射信号,每路通道采样频率为  $f=5 \text{ kHz}$ ,如图 7 所示,为工况 1 测点 A 采集的双光路透射光强信号,由于流化风携带颗粒依次流过测点 A1 与测点 A2,且两测点相距较近,颗粒团形态不会发生较大变化,A1 与 A2 的信号具有较好的相似性。

因连续采样时间较长,且流场中气流状况复杂,气流与颗粒、颗粒与颗粒之间作用频繁,为精确计算颗粒团瞬时速度,对连续采样数据利用分段式互相关算法分

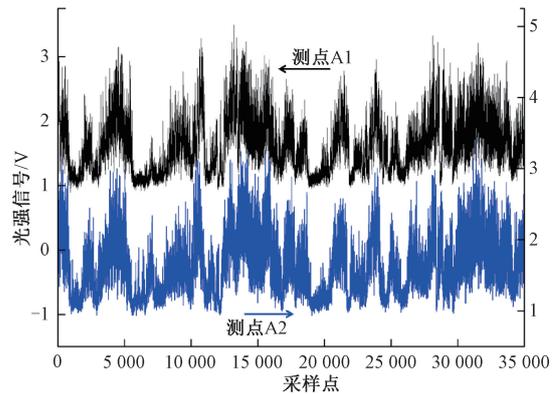


图 7 双光路透射光强信号

Fig. 7 Two light path transmitted intensity signals

析<sup>[18]</sup>。取分析单元长度为  $u=5 \text{ 000}$ ,移动步长  $s=100$ ,根据两测点间距  $l=35 \text{ mm}$ ,为对信号 A1 和信号 A2 进行互相关计算,得到速度分布如图 8 所示。由于该工况下总风量较小,颗粒团在上升过程中存在团聚物分散的现象,会有部分颗粒向边壁方向运动,汇入到边壁颗粒团聚中;而边壁处团聚物会出现向下运动团聚,与气流的方向相反。

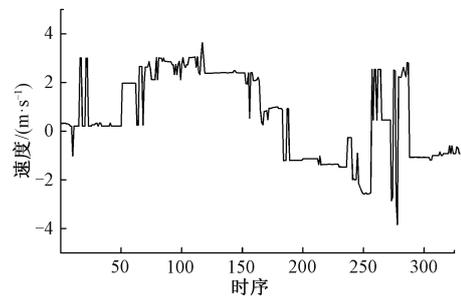


图 8 近壁面区域(测点 A)速度分布

Fig. 8 The velocity distribution in near wall zone (measurement point A)

对原始采样数据进行低通滤波处理并取极值点分析,结合试验中测得颗粒团运动速度计算颗粒团高度,如图 9 所示。其中,低通滤波阈值频率的选取应综合考虑颗粒团尺寸与运动速度等因素。

测点 A 颗粒团高度分布如图 10 所示,在靠近壁面区域处颗粒团高度集中分布在  $40 \sim 60 \text{ mm}$  区间内,其平均高度为  $h_{pj}=57.63 \text{ mm}$ 。

#### 3.2 颗粒团运动速度测量结果与分析

在工况 1 下对提升管中心区域(测点 C)处测得的颗粒团运动速度分布和近壁面区域(测点 A)处测得的速度分布进行比较发现,如图 11 所示,中心区域速度分布较为平缓,没有较大的波动,平均速度  $v_c=3.81 \text{ m/s}$ ,在提

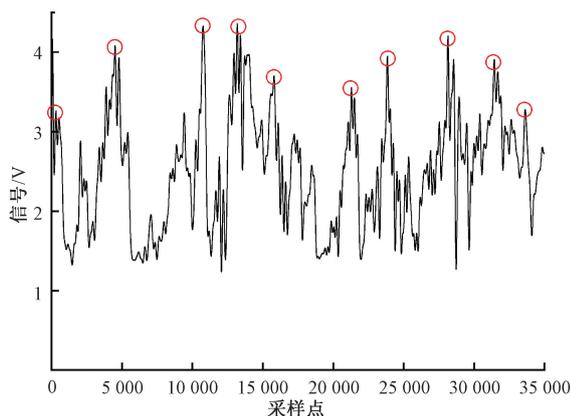


图9 原始信号低滤波结果

Fig. 9 Low-pass filtering result of the original signal

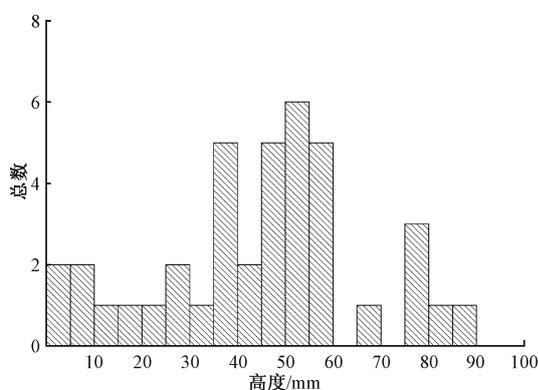


图10 测点A颗粒团高度分布

Fig. 10 The height distribution of particle clusters in measurement point A

升管近壁面区域,颗粒团速度有较大波动且出现负值,平均速度  $v_a = 0.65 \text{ m/s}$ 。这是因为流场中上升团聚物和下降团聚物同时存在,处于床层中心区域的上升团聚物在中心上升气流的影响下会发生水平运动,逐渐靠近床层边壁而汇入下落团聚物并一同下落。

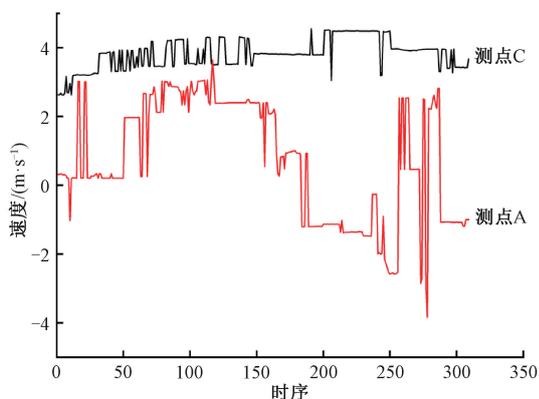


图11 不同测点颗粒团速度分布

Fig. 11 The velocity distribution of particle clusters in different measurement points

对不同工况下各个测点速度分析,如图12所示。总风量越大,流化风对颗粒的携带能力越强,颗粒团运动速度越快,由于壁面的边壁效应,中心区域气速高边壁低,中心区域速度为正值,颗粒团上升;在总风量较小的工况下,大量颗粒在边壁汇集而成,且具有较大的质量,远远大于近壁面上升气流的携带能力而快速下落,呈现壁面颗粒团向下流动,中心区域颗粒团向上流动的现象,这与循环流化床内颗粒“环核”流动的特性是相符合的。

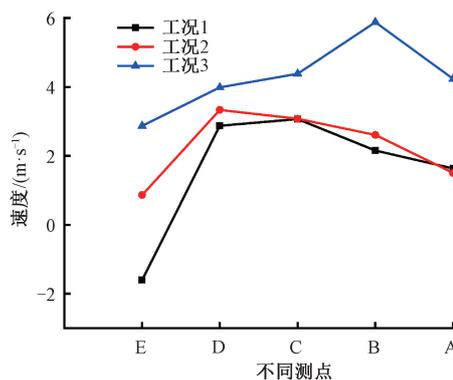


图12 不同工况下颗粒团速度分布

Fig. 12 The velocity distribution of particle clusters in different working conditions

### 3.3 颗粒团浓度测量结果与分析

由于颗粒团分布非均匀,为使浓度测量结果更具代表性,对单次透射光强信号取平均,进而计算通过该测点的统计平均浓度值。对不同工况下各测点的浓度分析结果如图13所示。中心区域颗粒浓度较小,近壁面区域颗粒浓度明显增大,这是因为中心区域颗粒运动速度较快,颗粒难以形成和维持团聚物的形状浓度较低,而在边壁区域的颗粒运动速度低,颗粒相互聚集,形成较为密集的颗粒团。随着工况改变,总风量越大,颗粒团浓度越小。

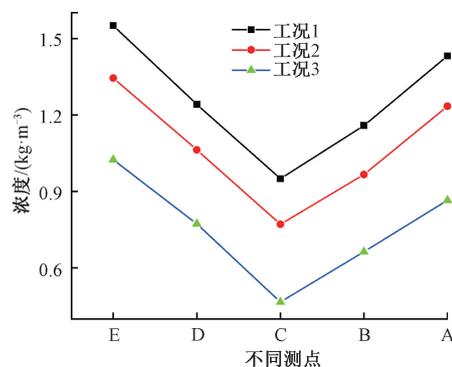


图13 不同工况下颗粒团浓度分布

Fig. 13 The concentration distribution of particle clusters in different working conditions

### 3.4 颗粒团高度测量结果与分析

在工况 1 下中心区域(测点 C)和近壁面区域(测点 A)的颗粒团高度分布统计如图 14 所示。中心区域颗粒团高度主要分布在 20~40 mm 区间,近壁面区域颗粒团高度主要分布在 30~60 mm 区间。这是因为流化床中心区域气速较高,颗粒团浓度较低,团聚物难以维持,颗粒团较松散,导致颗粒团高度较小;而近壁处颗粒浓度较大,颗粒团沿着壁面下落过程出现叠加现象,所以近壁面处比中心区域更容易形成较大尺寸的团聚物。因此近壁面区域颗粒团高度较大。

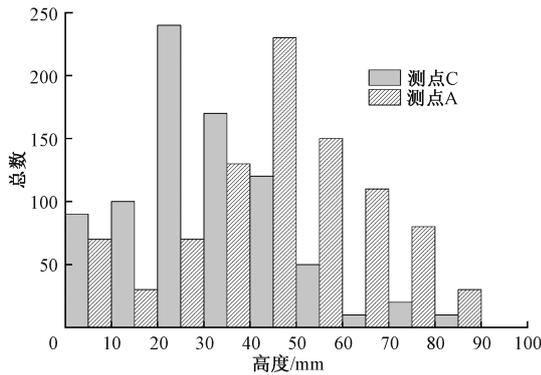


图 14 颗粒团高度统计结果

Fig. 14 Statistical result of particle cluster height

### 3.5 颗粒团形态图像分析

利用高速摄像机对测量区域进行颗粒团图像进行采集,在近壁面区域采集到下落颗粒团图像,而在中心区域则主要为上升颗粒团,如图 15 所示。通过对颗粒团尺寸分析,在中心区域的上升颗粒团的尺寸较小,浓度更大,

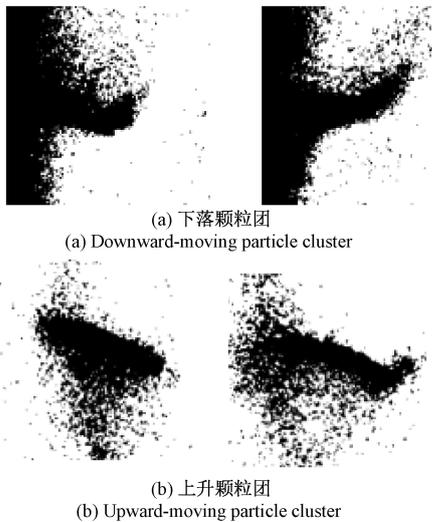


图 15 典型颗粒团图像

Fig. 15 Typical images of particle clusters

典型尺寸为 27 mm×21 mm。近壁面区域的下落颗粒团高度较大,浓度更小,典型尺寸为 23 mm×34 mm、12 mm×31 mm。由此,进一步验证了光散射测量方法的可行性。

## 4 结 论

针对循环流化床床内颗粒团的行为特性与运动参数测量问题,提出的基于光散射原理的颗粒团多参数同时在线测量方法,可以实现循环流化床床内颗粒团运动速度、高度、浓度等参数的同时在线测量,并利用图像测量方法验证了光散射测量方法的准确性,该方法为循环流化床床内颗粒团研究提供了一种有效的多参数测量手段。

通过光散射测量方法,获得了不同工况下的颗粒团速度、浓度以及高度参数在提升管内的分布规律:速度分布符合流化床内颗粒“环核”流动的特性,呈现中心上升两边下落的特点,在总风量较小的工况下,近壁面区域出现颗粒团向下运动现象尤为明显。得到的浓度分布规律与速度分布规律相反,中心区域主气流速度较大而颗粒浓度较小,颗粒难以形成较大团聚物,颗粒团高度较小;而在近壁面区域气流速度小,颗粒浓度高,颗粒团高度较大。

### 参考文献

[ 1 ] 金涌. 流态化工程原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.  
 JIN Y. Principles of fluidization engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

[ 2 ] CHEN H Z, YANG D G, CHENG J. Hydrodynamics of gas solids in a bubbling fluidized bed with binary Particles [ J ]. Procedia Engineering, 2015, 102: 799-803.

[ 3 ] 王晓芳,金保升,钟文琪. 高通量循环流化床上升管气固流动特性实验研究 [ J ]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 27-31  
 WANG X F, JIN B SH, ZHONG W Q. Experimental study on gas-solid flow characteristic in high-flux circulating fluidized bed riser [ J ]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(17): 27-31.

[ 4 ] 耿察民,钟文琪,邵英娟,等. 双循环流化床颗粒分布特性的三维数值模拟 [ J ]. 中国科学院大学学报, 2016, 33(2): 258-264.  
 GENG CH M, ZHONG W Q, SHAO Y J, et al. 3D computational simulation of solid distribution characteristics in dual circulating fluidized bed [ J ]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(2): 258-264.

[ 5 ] CAHYADI A, ANANTHARAMAN A, YANG S, et al.

- Review of cluster characteristics in circulating fluidized bed (CFB) risers[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 158: 70-95.
- [6] JIA W C, PARKER D M, COCCO R A, et al. Cluster characteristics of continuous size distributions and binary mixtures of group B particles in dilute riser flow[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 178 (24): 348-358.
- [7] WANG S, LU H, LIU G, et al. Modeling of cluster structure-dependent drag with Eulerian approach for circulating fluidized beds [J]. *Powder Technology*, 2011, 208(1):98-110.
- [8] 王帅, 刘国栋, 赵飞翔, 等. 循环流化床中颗粒聚团特性的模拟 [J]. *化工学报*, 2014, 65 (6): 2027-2033.  
WANG SH, LIU G D, ZHAO F X, et al. Modeling of clusters characteristics in circulating fluidized beds[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2014, 65(6): 2027-2033.
- [9] 刘新华, 高士秋, 李静海. 循环流化床中颗粒团聚物性质的 PDPA 测量 [J]. *化工学报*, 2004, 55(4): 555-562.  
LIU X H, GAO SH Q, LI J H. Characteristics of particle clusters in gas-solids circulating fluidized beds by using PDPA [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 55(4): 555-562.
- [10] YANG J, ZHU J. A novel method based on image processing to visualize clusters in a rectangular circulating fluidized bed riser[J]. *Powder Technology*, 2014, 254: 407-415.
- [11] 石惠娴, 骆仲泱, 王勤辉, 等. 循环流化床内颗粒团属性的可视化研究 [J]. *动力工程学报*, 2005, 25(1): 60-64.  
SHI H X, LUO ZH Y, WANG Q H, et al. Visualization study of attributes of particle clusters in circulating fluidized beds [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(1): 60-64
- [12] 石惠娴. PIV 技术应用于循环流化床颗粒运动测试[J]. *化学反应工程与工艺*, 2004, 20(4): 294-299.  
SHI H X. PIV measurement of particles movement in a Circulating Fluidized Bed [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2004, 20(4): 294-299.
- [13] 石惠娴. 循环流化床流动特性 PIV 测试和数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.  
SHI H X. PIV measurement and numerical simulation of hydrodynamics gas-solid in a CFB riser[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [14] LIN Q, WEI F, JIN Y. Transient density signal analysis and two-phase micro structure flow in gas-solids fluidization[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56: 2179-2189.
- [15] 蔡小舒, 苏明旭, 沈建琪. 颗粒粒度测量技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
CAI X SH, SU M X, SHEN J Q. Particle size distribution measurement technology and applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [16] 施智雄, 潘科玮, 杨逸璠, 等. 光学互相关测速系统设计及验证[J]. *光学仪器*, 2020, 42(2): 75-79.  
SHI ZH X, PAN K W, YANG Y F, et al. Design and experimental validation of velocity measurement system based on optical cross correlation method [J]. *Optical Instruments*, 2020, 42(2): 75-79.
- [17] 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.  
HU J J. Experimental research of clusters in a circulating fluidized bed riser [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.
- [18] 姜勇俊. 光学互相关两相流颗粒运动速度测量方法研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2017.  
JIANG Y J. Study on measurement method of particle velocity in two-phase flow based on optical cross-correlation method [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2017.

### 作者简介



杨斌(通信作者), 2007年和2013年于西北工业大学分别获得学士学位和博士学位, 现为上海理工大学副教授, 主要研究方向为多相流与燃烧在线测量方法。

E-mail: yangbin@usst.edu.cn

**Yang Bin** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2007 and Ph. D. degree in 2013 both from Northwestern Polytechnical University. Now, he is an associate professor in University of Shanghai for Science and Technology. His main research interest includes online measurement methods for multi-phase flow and combustion.