

气-液-固三相流化床冷态实验

张居兵, 李雅宁, 钱舒琳, 杨宏旻, 朴桂林

(南京师范大学能源与机械工程学院, 南京 210042)

[摘要] 以氮气为气相、蒸馏水为液相、铜粉为固相构建了的气-液-固三相流化床冷态实验装置, 流化床反应器内径为 50 mm、高为 500 mm. 采用 Hilbert-Huang Transform 分析了布风板上表面处压力脉动信号, 考察了布风板压差和床内两固定测点间压差随气体流速的变化关系, 使用降速法得到了气-液-固三相流化床的最小流化速度, 并通过同步图像采集验证了该最小流化速度. 结果表明: 气体流速为 14.85 mm/s 时, 固体颗粒之间碰撞剧烈, 气、液、固三相混合均匀; 随着气体流速的增加, 两固定测点间压降呈现先降低, 后增加, 最后又降低的变化趋势; 气-液-固三相流化床的最小流化速度约为 17.4 mm/s.

[关键词] 三相流化床, 压力脉动信号, 最小流化速度

[中图分类号] TQ021 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2014)04-0025-06

Cold Model Experiment of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Fluidized Bed

Zhang Jubing, Li Yaning, Qian Shulin, Yang Hongmin, Piao Guilin

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

Abstract: A gas-liquid-solid three-phase fluidized bed with inner diameter of 50 mm and height of 500 mm is established by using nitrogen as gas phase, distilled water as liquid phase and copper powder as solid phase. Pressure fluctuation signals obtained in the region upon the gas distributor are analyzed by Hilbert-Huang Transform method. The effects of gas flow rate on gas distributor pressure drop and differential pressure between two fixed measure points are studied. Minimum fluidization velocity of the three-phase fluidized bed is obtained from cold model experiments and further confirmed by high speed photography. The results show that solid particles strike each other violently with the gas flow rate of 14.85 mm/s. Gas phase, liquid phase and solid phase mixes well under such gas flow rate. With the increase in gas flow rate, differential pressure between two fixed measure points decreases at first, and then increases, and decreases at last. The minimum fluidization velocity of the three phase fluidized bed is determined as 17.4 mm/s and finally is verified by high synchronous image acquisition.

Key words: three-phase fluidized bed, pressure fluctuation signal, minimum fluidization velocity

气-液-固三相流的多种参数中, 压差脉动信号是最容易在线准确测量的参数之一, 它包含了能够反映三相流流动规律的大量有用信息, 因而压差脉动信号的分析处理已经成为研究三相流的一种重要手段^[1-6]. 快速傅立叶变换(FFT)分析^[7,8]、混沌分析^[9-12]、小波分析^[13,14]等方法已在压差脉动信号的分析中得到了广泛应用, 也取得了一定成效. 然而这些分析手段都有一定的局限性, 例如, FFT 谱分析缺乏时域信息, 混沌分析的计算结果与参数设置有很大关系, 而小波分析中的基函数信号容易泄漏, 因而这些分析方法在气-液-固三相流中的应用受到了限制.

Hilbert-Huang Transform (HHT) 是另外一种常用的信号处理方法. 该方法通过信号本身来确定各不相同的基函数, 确保了基函数的自适应特点, 从而真正实现信号局部特点的分析, 被认为是对基于傅立叶变换的线性和平稳信号分析的重大突破^[15-18]. HHT 分析方法包含两个步骤: 使用经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 方法将所得信号分解成若干内禀模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF); 对各

收稿日期: 2014-05-26.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金 (12KJB480006)、江苏省自然科学基金 (BK2012851).

通讯联系人: 张居兵, 博士, 讲师, 研究方向: 燃料电池、生物质活性炭制备、煤和生物质混合气化等. E-mail: jubingzhang@njnu.edu.cn

IMF 分量进行 Hilbert 变换来获得瞬时频率和局部幅值,进而构成被测信号关于时间-频率-幅值(能量)分布的三维谱图,即 Hilbert-Huang 谱图.

本研究采用差压变送器采集自制气-液-固三相流化床内的压差脉动信号,使用 HHT 法对该脉动信号进行分析和特征提取,进而对气-液-固三相流化床的基本流动规律进行归纳,同时也为后续气-液-固三相流化床热态实验中部分参数的选择提供依据.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

实验所用试剂及仪器如表 1 所示.

1.2 实验装置

根据热态气-液-固三相反应器的尺寸,设计制造了有机玻璃冷态实验台,图 1 所示为实验装置的系统流程图. 流化床反应器内径为 50 mm,风室高度为 200 mm,布风板以上部分高度为 500 mm;所用布风板为过滤精度 20 μm 的金属粉末烧结板,其厚度为 8 mm;实验中以氮气为气相、蒸馏水为液相、铜粉(150~220 目)为固相. 初始液面高度为 130 mm,布风板上表面处、床体上部距布风板上表面 18 mm 和 68 mm 的两个高度分别设置了 P_1 、 P_2 和 P_3 3 个测点,各测点分别与大气环境构成一组压差,使用差压变送器测量压差值并将压差信号转为电信号输出,数据采集器将输入的电信号重新转换成压差信号,并由计算机存储. 风室内同样布置了测点 P_0 ,主要用于标定布风板压差.

表 1 实验试剂及实验仪器

Table 1 Experiment reagent and experimental apparatus

名称	规格及型号	生产厂家或产地
铜粉	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
蒸馏水	自制	
氮气	工业级	南京通广特种气体公司
差压变送计	SD3051	南京卓欧自控科技有限公司
数据采集器	RBH8251-13	北京瑞博华控制技术有限公司
高速摄影仪	MS55K S2	加拿大 Mega Speed Corp 公司

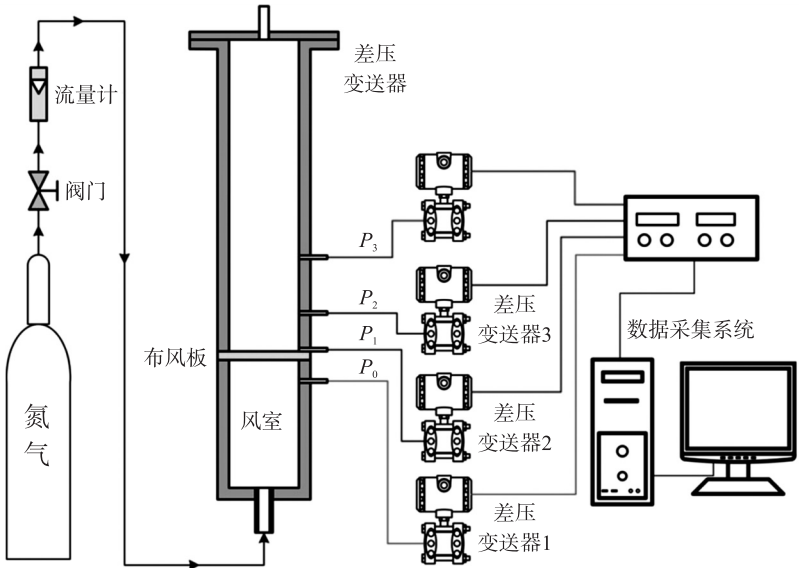


图 1 气-液-固三相流化床实验装置系统流程图

Fig. 1 The system flow chart of the gas-liquid-solid three-phase fluidized bed experimental facility

1.3 实验方法

首先检查所有管路的气密性,关闭各测压孔与差压变送器连接处球阀;风室内通入氮气,其流量控制在 60 L/h 左右;稳定一段时间后,向流化床内缓慢注入蒸馏水,其添加量满足液固两相静止液面高度为 130 mm 的要求;将一定量的铜粉颗粒缓慢添加到流化床内;逐步增加气体流速,到达预定值并稳定一段时间后采集升速过程中不同气体流速下各测点与大气环境的压差脉动信号,采样频率为 200 Hz,采集时间 10 s;当气体流速超过 34 mm/s 后,再依次减小气体流速,记录降速过程中不同气体流速下的压差信号,升速过程和降速过程中的气体流速一一对应. 各气体流速下床内流动状况稳定后,使用高速摄影仪对床内气泡相和颗粒相的分布情况进行图像采集,即与压差脉动信号采集同步进行.

差压变送器 1 显示值为布风板下表面与外界环境的压差,由于流化床顶部盖板出气口内径较大,可认为该压差值即为床层压差.差压变送器 2 显示值为测点 2 与外界环境的压差,加上当地大气压后即是测点 2 处的实际压力值.因而,差压变送器 2 和差压变送器 3 所显示数值的差值应是该两测点处的实际压差值.

2 实验结果与分析

2.1 压力脉动信号分析

三相流化床反应器中,底部固体颗粒浓度高,且集流器(涉及电化学反应时会采用)一般也放置在流化床底部位置,此处压力脉动对颗粒相的随机运动有较大影响,这种随机运动又在很大程度上决定了颗粒与集流器的碰撞,进而影响了气-液-固三相反应.因此,对流化床底部位置(P_2 测点)处的压力脉动信号的采集和分析显得非常重要.

利用经验模态分解将不同气体流速下的压力脉动信号按照频率分量从高到低进行分解,进而获得内禀模态函数 $IMF_1 \sim IMF_9$,而原始信号用 IMF_0 表示.分别对 8.49、10.61、12.73、14.85、16.98 及 19.10 mm/s 气体流速下的压力脉动信号进行 EMD 分解,从而得到各阶 IMF,图 2 所示为 12.73 mm/s 气体流速下 EMD 分解结果.为实现不同频段能量的定量分析,进而得到压力脉动信号各阶 IMF 的能量份额,本研究将 IMF 分为 3 个频段:高频段(高于 5 Hz, $IMF_1 \sim IMF_3$)、低频段(低于 1 Hz, $IMF_7 \sim IMF_9$)和中频段(介于高频与低频之间, $IMF_4 \sim IMF_6$),各阶 IMF 和不同频段的能量份额统计结果如表 2 所示.

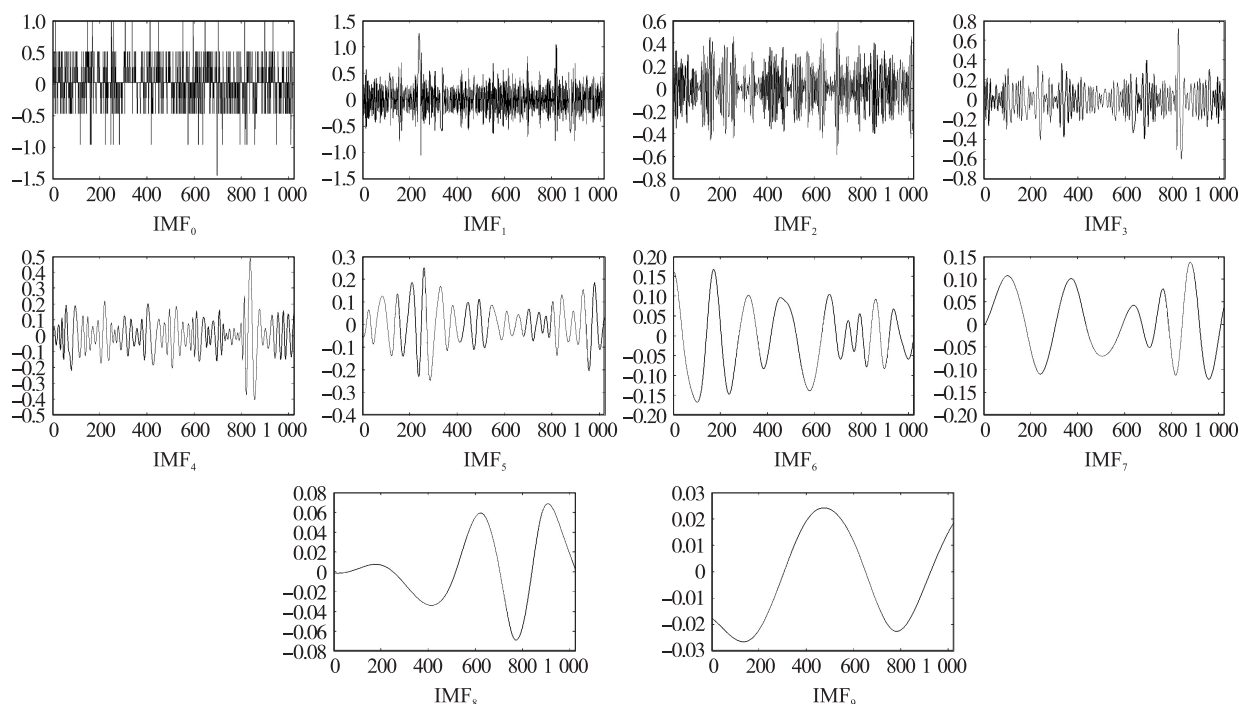


图 2 气体流速为 12.73 mm/s 时 P_2 测点处压力脉动信号的 IMF 分量

Fig. 2 IMFs of the pressure fluctuant signals obtained at P_2 measure point under gas flow rate of 12.73 mm/s

大量研究结果表明:气泡的分布频率主要集中在 1~5 Hz,而该频率段正好对应 IMF 分量的中频段.从图 2 和表 2 的能量分布统计数据中可以发现:随着气体流速的增加,气泡能量的分布也从低阶 IMF 分量(高频段为主)逐渐转向高阶 IMF 分量(低频段为主);气体流速较小(8.49 mm/s)时,高频段能量所占比例很大,而中频段和低频段的比例较少;随着气体流速的不断增大,气泡的生成量逐渐增多,高频段能量的比例开始减少,而中、低频段能量份额则大幅增加;当气体流速超过 14.85 mm/s 后,中频段能量比例相对稳定,此时气-液-固三相混合很充分,颗粒与颗粒之间的碰撞也非常剧烈,这正是气-液-固三相反应所需要的状态;当气体流速超过 16.98 mm/s 后,此时的固体颗粒运动具有均匀快速流动的特点,3 个频段的能量分布相对均匀,但气泡在床内的团聚现象很明显,严重阻碍了气、液、固三相的混合,不利于三相反应的进行.

表 2 不同气速下 IMF 的均方值
Table 2 The mean square values of IMF's under different gas flow rates

气速/(mm/s)	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅	IMF ₆	IMF ₇	IMF ₈	IMF ₉	IMF ₁₋₃ /%	IMF ₄₋₆ /%	IMF ₇₋₉ /%
8.49	0.068 7	0.053 1	0.016 8	0.012 2	0.008 3	0.003 9	0.001 2	0.001 5	0.001 1	83.093 5	14.628 3	2.278 2
10.61	0.061 3	0.051 7	0.012 8	0.031 6	0.019 9	0.006 2	0.014 4	0.008 7	0.007 7	58.702 8	26.924 9	14.372 3
12.73	0.044 1	0.020 6	0.012 4	0.030 1	0.025 6	0.018 7	0.024 3	0.017 5	0.008 5	38.206 1	36.868 2	24.925 7
14.85	0.019 7	0.018 2	0.021 2	0.032 9	0.025 3	0.017 4	0.023 5	0.019 7	0.017 7	30.214 7	38.650 3	31.135 0
16.98	0.021 5	0.020 4	0.017 7	0.036 3	0.028 4	0.024 4	0.027 7	0.031 6	0.025 1	25.568 4	38.224 0	36.207 6
19.10	0.017 5	0.002 1	0.019 9	0.017 8	0.013 2	0.008 5	0.020 3	0.012 1	0.007 9	33.109 8	33.109 8	33.780 4

2.2 布风板压差

气-液-固三相流化床正常运行时微孔布风板的部分孔隙会被液相占据,造成运行状态下的布风板压差与空床布风板压差的差异性. 为了保证可对比性,在进行空床布风板压差测量前先向流化床内加入少量蒸馏水,并在 1.5 L/min 的流化气体下放置 30 min 移除床内多余蒸馏水,然后再测量不同气体流速下的布风板压差,实验结果如图 3 所示.

从图 3 中可以看出,不同于风帽式布风板,金属粉末烧结板的阻力要大得多. 布风板压差与气体流速呈现拟线性关系,气体流速为 33 mm/s 时,布风板的压差甚至超过了 27 kPa.

2.3 固定测点间压降

不同床高之间(测点 2 和测点 3)的压差值随气体流速的变化关系如图 4 所示. 从图中可以看出,随着气体流速的增加,两固定测点间压降呈现先降低,后增加,最后又降低的变化趋势. 随气流速度的增加,流化床内气含率相应增加,使得液体的平均密度减小,重力压降随之下降,最终导致总压降减小;当气体流速超过 6.37 mm/s 后,两测点之间区域内的固含率有了一定程度的增加,此时固相含率增加对重力压降的加强作用超过了气相的削弱作用,因而总压降有所增加;然而伴随气体流速的进一步增加,固体颗粒均匀地分散在液相中,此时增大气速,降低了该区域内固相和液相含率,因而总压降急剧下降.

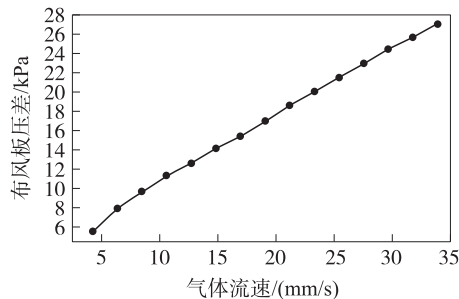


图 3 布风板压差随气体流速的变化关系
Fig.3 The effect of gas flow rate on gas distributor pressure drop

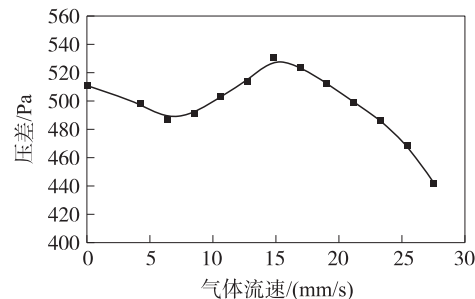


图 4 两固定测点间压差与气体流速的变化关系
Fig.4 The effect of gas flow rate on differential pressure between two fixed measure points

2.4 床层压降

降速法得到的流化床床层压降随气体流速的变化关系如图 5 所示. 通过辅助线绘制可以得到此流化床的最小流化速度约为 17.4 mm/s.

2.5 图像采集

图 6 为不同气体流速下流化床内气、液、固三相分布状态的实时图像. 当气体流速为 8.49 mm/s 时,气-液-固三相流化床处于起流状态,固体颗粒基本停留在布风板上,气泡从固体颗粒的间隙中窜出,粒径极小的部分铜粉颗粒随气泡的波动进入液相中,使液相略带黄色(铜粉的颜色);当气体流速增加到 10.61 mm/s 时,液相中气泡数量有一定程度的增加,气泡的速度也逐步增大,被夹带的固体颗粒的粒径也随之增大,使液相中固相浓度相应增加,因而液相也变得更加浑浊;伴随气体

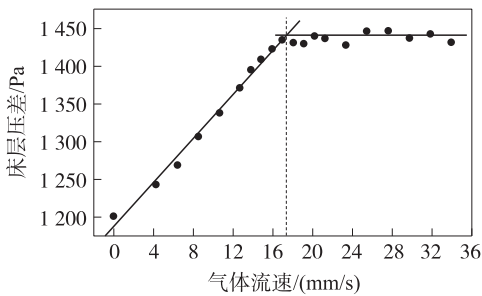


图 5 床层压差随气体流速关系
Fig.5 The effect of gas flow rate on bed pressure drop

流速的持续增加,除了液相中气含率和液相颜色发生变化外,气泡的粒径也继续增大,气含率的增加也使液面高度有一定上升($v=12.73\text{ mm/s}$);当气流速度达到 14.85 mm/s ,液面高度进一步上升,除了床层下部固相浓度稍高及个别地方固相浓度稍低外,铜粉颗粒基本分散在整个流化床内;气体流速为 16.98 mm/s 时,液相的颜色更加统一,固相在床内分布更加均匀,基本上达到了气、液、固三相混合均匀的状态;此后进一步增加气体流速($v=19.10\text{ mm/s}$),气泡会在床内发生剧烈的团聚、破裂,其粒径也明显增大,而过大的气流速度也使床层迅速膨胀,高度急剧增加。

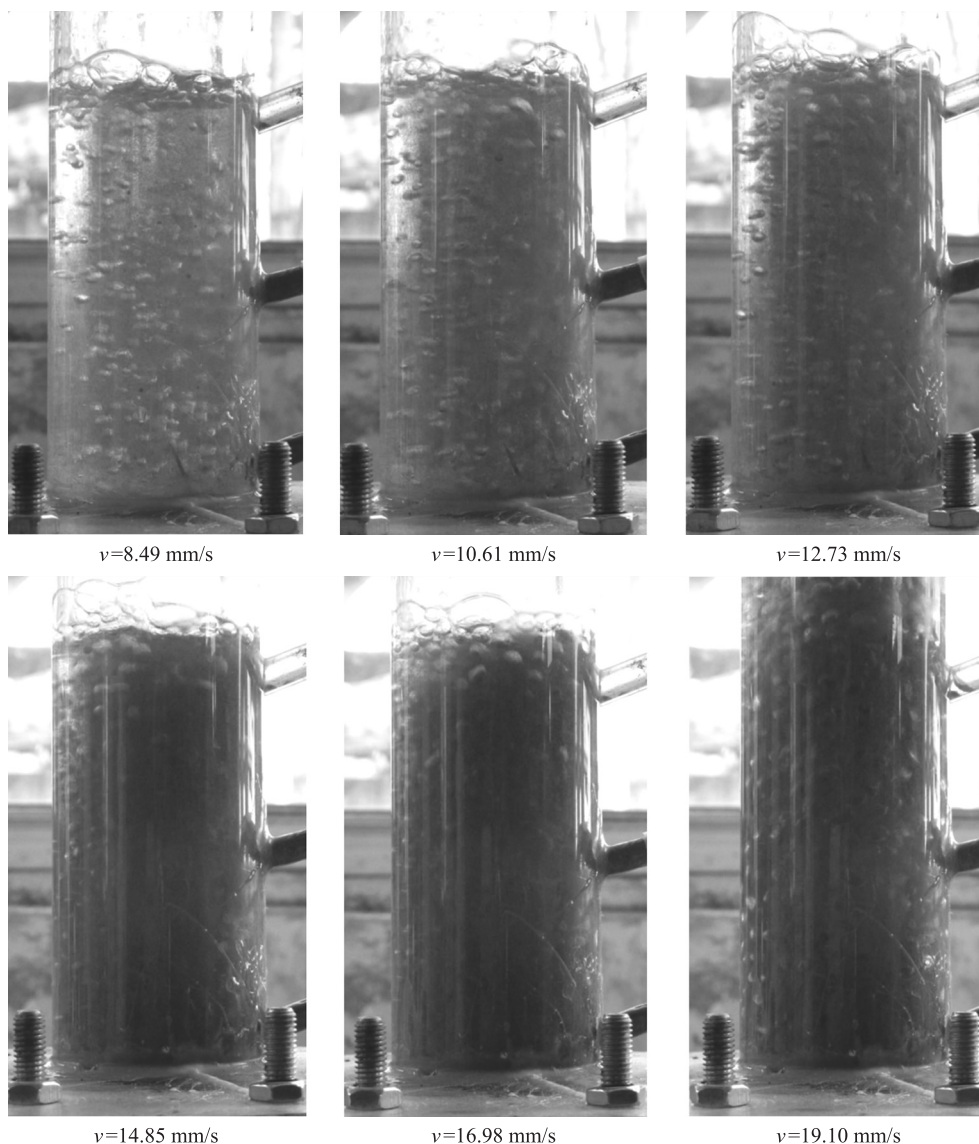


图6 不同气速下流化床内气相、固相分布图

Fig 6 The distribution image of gas phase and solid phase in liquid phase under different gas flow rates

3 结论

随气体流速的增加,高频段能量比例逐渐降低,中、低频段能量份额则大幅增加;气体流速为 14.85 mm/s 时,中频段能量份额基本不变,气、液、固三相混合均匀;气体流速超过 16.98 mm/s 后,粒子运动具有均匀快速流动的特点,此时气泡的团聚非常明显。

利用气体流速与流化床床层压降的关系,获得三相流化床的最小流化速度为 17.4 mm/s 。

气体流速为 16.98 mm/s 时,流化床内液相颜色趋于一致,固相和气相都均匀分布在液相中,基本满足了气-液-固混合均匀的要求,进一步验证了上述最小流化速度。

[参考文献](References)

- [1] Gómez-Hernández J, Sánchez-Prieto J, Briongos J V, et al. Wide band energy analysis of fluidized bed pressure fluctuation signals using a frequency division method[J]. Chem Eng Sci, 2014, 105: 92–103.
- [2] Hu L S, Wang X J, Yu G S, et al. Chaotic analysis of pressure fluctuation signal in the gas-liquid-solid slurry column[J]. Nonlinear Anal Real, 2009, 10(1): 410–415.
- [3] Si C, Zhou J, Guo Q. Characterization of pressure fluctuation signals in an acoustic bubbling fluidized bed[J]. J Taiwan Inst Chem E, 2011, 42(6): 929–936.
- [4] 刘明辉, 丁忠伟, 张同旺, 等. 气-固加压流化床压力脉动信号的分析[J]. 计算机与应用化学, 2011, 28(10): 1 281–1 284.
- Liu Minghui, Ding Zhongwei, Zhang Tongwang, et al. Analysis of pressure fluctuation signals in a pressured fluidized bed[J]. Computers and Applied Chemistry, 2011, 28(10): 1 281–1 284. (in Chinese)
- [5] 江浩, 李贇, 李珩, 等. 基于经验模态分解的火电机组热力参数滤波处理[J]. 热力发电, 2008, 37(6): 64–68.
- Jiang Hao, Li Yun, Li Heng, et al. Filtration treatment of thermodynamic parameters concerning thermal power unit based on empirical mode decomposition[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(6): 64–68. (in Chinese)
- [6] 黄海, 黄轶伦, 张卫东. 气固流化床压力脉动信号的相关结构模型与分析[J]. 化工学报, 1999, 50(6): 812–817.
- Huang Hai, Huang Yilun, Zhang Weidong. Modeling and analysis of pressure fluctuations in a gas-solid fluidized bed[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 1999, 50(6): 812–817. (in Chinese)
- [7] Mazurenka M, Wada R, Shillings A J L, et al. Fast Fourier transform analysis in cavity ring-down spectroscopy: application to an optical detector for atmospheric NO₂[J]. Applied Physics B, 2005, 81(1): 135–141.
- [8] Pippig M, Potts D. Parallel three-dimensional nonequispaced fast Fourier transforms and their application to particle simulation[J]. SIAM J Sci Comput, 2013, 35(4): C411–C437.
- [9] 王肖祎, 仲兆平, 王春华. 流化床内生物质石英砂双组分混合流动混沌递归分析[J]. 化工学报, 2014, 65(3): 813–819.
- Wang Xiaoyi, Zhong Zhaoping, Wang Chunhua. Chaotic recurrence analysis of two-component flow of mixed biomass particles and quartz sands in fluidized-bed[J]. CIESC Journal, 2014, 65(3): 813–819. (in Chinese)
- [10] Kuo Y L. Chaotic analysis of the geometrically nonlinear nonlocal elastic single-walled carbon nanotubes on elastic medium[J]. J Nanosci Nanotechnol, 2014, 14(3): 2 352–2 360.
- [11] Jothiprakash V, Fathima T A. Chaotic analysis of daily rainfall series in koyna reservoir catchment area, India[J]. Stoch Env Res Risk A, 2013, 27(6): 1 371–1 381.
- [12] Marwan N, Carmen Romano M, Thiel M, et al. Recurrence plots for the analysis of complex systems[J]. Phys Rep, 2007, 438(5): 237–329.
- [13] Li B, Chen X. Wavelet-based numerical analysis: a review and classification[J]. Finite Elem Anal Des, 2014, 81: 14–31.
- [14] 王松岭, 刘锦廉, 许小刚. 基于小波包变换和奇异值分解的风机故障诊断研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 101–106.
- Wang Songling, Liu Jinlian, Xu Xiaogang. Wavelet packet transform and singular value decomposition based fault diagnosis of fans[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 101–106. (in Chinese)
- [15] Yan J, Lu L. Improved Hilbert-Huang transform based weak signal detection methodology and its application on incipient fault diagnosis and ECG signal analysis[J]. Signal Process, 2014, 98: 74–87.
- [16] Lu P, Han D, Jiang R, et al. Experimental study on flow patterns of high-pressure gas-solid flow and Hilbert-Huang transform based analysis[J]. Exp Therm Fluid Sci, 2013, 51: 174–182.
- [17] 王晓萍. 气固流化床压力脉动信号的 Hilbert-Huang 变换与流型识别[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(4): 474–479.
- Wang Xiaoping. The Hilbert-Huang transform and flow regimes identification for pressure fluctuation of gas-solid fluidized beds[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2005, 19(4): 474–479. (in Chinese)
- [18] 黄海, 黄轶伦. 气固流化床压力脉动信号的 Hilbert-Huang 谱分析[J]. 化工学报, 2004, 55(9): 1 441–1 447.
- Huang Hai, Huang Yilun. Pressure-fluctuation analysis of gas-solid fluidized beds using Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004, 55(9): 1 441–1 447. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]