

鼓泡床中电石渣液相碳酸化反应流动特性表征

郑 鹏, 李蔚玲

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 搭建了气液固鼓泡床实验系统,对碱性固体废弃物电石渣固定 CO_2 进行实验研究. 流动特性对鼓泡床反应器传质、产率 and 产品质量都有较大的影响. 通过压力脉动信号采集与分析,对实际反应体系 CO_2 - H_2O -电石渣的流动特性进行表征,给出重要参数液固比对三相反应流流动特性的影响机制. 结果表明:基于时间域的概率密度函数和自相关函数分析发现,在低气速 $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下,增大液固比,压力脉动分布变化较小,但自相关分析可进一步揭示液固比的增大加大了气泡运动的不稳定性. 在气速 $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下,液固比增大会加大压力脉动分布范围,且延迟时间增大,自相关性降低,表征床内流动表现出更多的随机性和混沌特征. 结合流动图像,液固比增大使大气泡容易聚并生成. 基于时频域的 Hilbert-Huang 变换分析,获得了时间-频率-幅度谱图. 低气速下,三相流运动频率高,幅值低,增大液固比后,三相流运动频率降低,幅值增大,揭示液固比增大后,三相流系统中高频的小气泡运动特性降低,大气泡聚并发生促进能量幅值增大,该结果为进一步研究流动对碳酸化反应影响机理奠定了基础.

[关键词] 鼓泡床,多相流,气泡,概率密度函数,压力脉动分析,电石渣液相碳酸化

[中图分类号] O359 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2022)02-0001-08

Characteristics of Carbide Slag Slurry Flow in a Bubble Column Reactor

Zheng Peng, Li Weiling

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

Abstract: A gas-liquid-solid bubble column experimental system is set up and the direct aqueous carbonation of the carbide slag is experimentally evaluated and studied. Hydrodynamics of the bubble column has a great effect on the bed mass transfer and product yield and quality. The flow behaviors for a real reaction system of CO_2 - H_2O -carbide slag are characterized through the bed pressure signal analyzation. The effect of the important parameter liquid to solid (L/S) ratio on the flow dynamics of the three-phase reacting flow is revealed. The time domain and the time-frequency domain analysis of the signals are carried out. The results show that the curves of the probability density function have the similar distributions when increasing the L/S ratio at $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The results of the auto-correlation function analysis reveal that the bed bubble flow is unsteady and irregular at $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ when increasing the L/S ratio. The change amplitudes of the pressure signals become wider at $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ with an increase in the L/S ratio. The delay time increases in this condition which indicates that the pressure signals are not similar and the three-phase flow is more random and stochastic. The large bubbles are easier to form when observing the flow images. The time-frequency-amplitude spectrums are obtained and it is found that the three-phase flow has the lower frequency and the higher energy amplitude with an increase in the L/S ratio, which contributes by the bubble coalescence. This work gives a theoretical basis for the further study on the effect of the flow dynamics on the carbonation reactions.

Key words: bubble column, multiphase flow, bubble, probability density function, pressure fluctuation signal analysis, carbide slag aqueous carbonation

鼓泡床广泛应用于化工、石油化工、生物化工、环境和制药等行业,如煤的液化^[1],费托合成^[2],烟气脱硫^[3],生物废水的处理和发酵等^[4]. 三相鼓泡床具有结构简单,传热和传质效率高,温度控制容易,无活

收稿日期:2021-06-28.

基金项目:国家自然科学基金项目(51706108)、江苏省高校自然科学研究面上项目(17KJB470008)、南京师范大学科研启动项目(184080H202B73).

通讯作者:李蔚玲,博士,讲师,研究方向:气液固流动特性. E-mail:liweiling06@njnu.edu.cn

动部件和维护成本低等优点^[5-7]. 在捕集 CO₂ 上, Xie 等^[8]在浆态鼓泡床用 Mg(OH)₂ 捕集 CO₂, 获得了最佳浆液浓度、CO₂ 浓度和温度. Cheng 等^[9]在三相鼓泡床中研究 Mg(OH)₂ 浆液吸收烟气中的 CO₂, 评估了 CO₂ 去除率. Li 等^[10]在鼓泡床反应器中研究 Mg(OH)₂ 的浓度、进气流量和温度对 Mg(OH)₂ 浆液 CO₂ 吸收性能的影响. 液相直接碳酸化属于加速碳酸化固定 CO₂ 路径之一, 属于矿化封存 CO₂ 路径, 它指存在液相如水的条件下, CO₂ 进行水合作用形成碳酸、矿物或碱性固废等物质中钙和镁等碱性离子在液相中溶出, 碳酸根离子与溶液中或固体表面的碱性离子发生反应而形成碳酸盐的过程. 该反应可促进固废利用, 能固定重金属^[11-13]. 电石渣作为碱性固废, 含钙量高, 反应活性强. 目前有研究电石渣制备钙剂吸附剂用于高钙循环捕集 CO₂^[14-15], 对其液相碳酸化固定 CO₂ 的性能研究工作较少. 本研究在鼓泡床中对电石渣液相碳酸化进行探索研究. Pan 等^[16]用鼓泡床作为碳酸化反应器, 对不同时间、温度和液固比下转炉渣的加速碳酸化过程和效率进行评估. Chang 等^[17]研究了鼓泡床作为反应器, 氧气转炉渣与冷轧废水和金属加工废水处理厂的废水碳酸化反应, 研究了操作条件(废水类型、反应时间、液固比、CO₂ 流量和浆液体积)对 CO₂ 固定量的影响, 结果表明冷轧废水中转炉渣的最佳碳酸化效率达 89.4%, 最佳工况为反应时间 120 min, 液固比 20:1, 在室温下 CO₂ 流量 1 L·min⁻¹. 鼓泡床作为反应器, 碳酸化效率较高^[16-17], 但该反应器中三相流动非常复杂, 气液、气固和液固之间的相互作用都会影响三相流动^[18-20], 流动特征的不同会导致相间接触不同, 进而会影响化学反应, 复杂的相间作用会影响液相碳酸化反应效率^[21]. 因此重要操作参数对流动特性的影响研究需要开展. 三相鼓泡床中流动结构可划分为分散气泡流型(均相流)、过渡流和非均相流^[22-25]. 目前该反应器中流动、反应、产物产量和产物品质, 仍有很多问题未研究清楚. 气体流量和液固比作为液相碳酸化反应重要操作条件, 该条件的改变会影响碱性固废的碳酸化转化效率. 本文主要工作是对实际反应过程 CO₂-H₂O-电石渣反应流进行流动特性分析, 获得重要操作参数液固比对反应流动特性的影响. 通过采集与分析反应器中的压力脉动时间序列, 获得床内流体动力学特征数据, 该结果为揭示该反应器中流动特性对气-液传质和碳酸化转化率的潜在影响机制提供了基础数据.

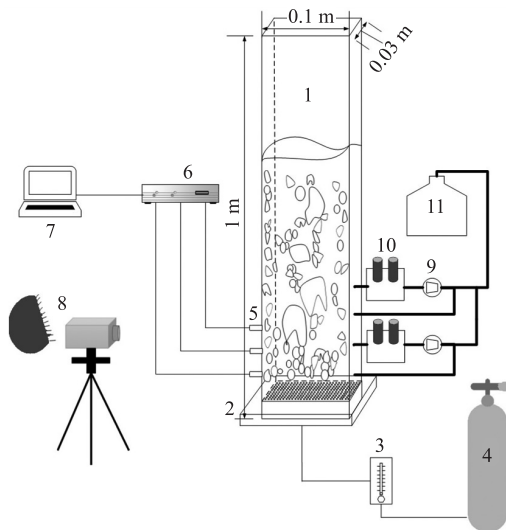
1 实验系统与方法

1.1 实验系统

本文搭建的实验系统示意图如图 1 所示. 系统由气液固鼓泡床反应器、数据采集系统和图像采集系统组成. 三相鼓泡床横截面为 0.1 m×0.03 m, 高 1 m, 由透明有机玻璃制成. 布风板为金属烧结板, 平均孔径为 50 μm. 数据采集系统包括压力传感器、液相 pH 与电导率传感器, CO₂ 浓度传感器, 高速采集卡和数据采集计算机. 压力传感器用于采集反应器内液相压力脉动时间序列, 设置三个测点, 分别距布风板 50 mm、150 mm 和 250 mm, 采集频率为 500 Hz. 压力传感器的量程为 0~10 kPa. 数字图像采集系统包括高分辨率 CCD 数码相机和高亮度照明光源, 用于拍摄反应过程的流动图像, 拍摄频率 500 张·s⁻¹.

1.2 实验材料与方法

实验中固相、气相和液相分别为电石渣、CO₂ 和去离子水, 由于电石渣主要成分为氢氧化钙, 在常温常压下具有较优的热力学特性, 因此本研究的反应在常温常压下进行. 气液固物料参数如表 1 所示. 实验工况如表 2 所示, 重点揭示液固比对电石渣浆态流动特性的影响. 实验中, 每次实验称取 30 g 电石渣固体, 根据指定的液固比, 量取一定体积的去离子水, 从反应器上方加入鼓泡床反应器, 气相 CO₂ 经过气体质量流量计, 从反应器底部通入. 当液相 pH 降至 7 附近稳定后结束信号采集. 实验重点对比研究三组液固比下的流动特性.



1-鼓泡床主体; 2-布风板; 3-气体质量流量计; 4-气瓶; 5-压力探头; 6-高速采集卡; 7-计算机; 8-灯光及拍摄装置; 9-泵; 10-pH 探头; 11-储水箱

图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

表 1 物料参数

Table 1 Material parameters

参数	数值
固相平均粒径/ μm	24.85
液相密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	998.2
液相粘度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.001 003

表 2 实验工况

Table 2 Experimental conditions

参数	数值
液固比 $\text{L/S}/(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$	20, 30, 50
液相体积/mL	600, 900, 1 500
表观气速 $U_g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.062, 0.102, 0.205

2 压力脉动分析方法

采集与分析反应器中时间序列信号,可表征流体内在动力学特性.常用方法有时间域分析^[26-27]、频域分析^[28-29]、时频域分析和状态空间法^[30-31].本文选用时间域分析中的概率密度函数和自相关函数,和时频域分析中的 Hilbert-Huang 变换进行分析.鼓泡床的压力波动可分为全局压力波动和局部压力波动^[25].全局压力波动的产生原因有,气泡的聚并和破碎、气泡的形成和涌发、浆态悬浮物的自然振动和床层的机械振动等^[25].局部压力波动产生的原因有液体速度的波动、气含率的波动、气泡的上升、大的涡、湍动和大气泡的通路等.

2.1 概率密度函数

概率密度函数是概率函数的导数,用于描述随机信号在其值域内的特征.对本实验中的压力脉动时间序列 $x(t)$,进行概率密度计算,计算公式如为

$$P(x) = \frac{N_x}{N\Delta x}. \quad (1)$$

式中, Δx 为中心为 x 的窄区间, N_x 为数据落在 $x \pm \Delta x/2$ 中的数据个数.

2.2 自相关函数

自相关函数是反映变量 $x(t)$ 及其延迟 $x(t+\tau)$ 间线性相关性的函数,表征前后两个不同时刻信号的统计特征量以及两个时刻信号值之间的线性相关性.当两个信号之间的自相关函数等于 0 时,表示这两个时刻信号值之间线性无关.

$$r_\tau = \sum_{t=\tau+1}^N (x_t - \mu)(x_{t-\tau} - \mu). \quad (2)$$

式中, μ 为 $x(t)$ 的均值.

2.3 Hilbert-Huang 变换

Hilbert-Huang 变换可分析非线性非稳态信号,由 Huang 等^[32]在 1998 年提出.对固有模态函数进行 Hilbert 变换,得到信号的解析形式为

$$z_i(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + d_i(t) = a_i(t) e^{j\phi_i(t)}. \quad (3)$$

式中的 $d_i(t)$ 为 $c_i(t)$ 的 Hilbert 变换, $a_i(t)$ 为幅度, $\phi_i(t)$ 为相位函数,其表达式为

$$d_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(t')}{t-t'} dt', \quad (4)$$

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + d_i^2(t)}, \quad (5)$$

$$\phi_i(t) = \arctan \frac{d_i(t)}{c_i(t)}. \quad (6)$$

每个固有模态函数的瞬时频率为 $f_i(t)$

$$f_i(t) = \frac{d\phi_i(t)}{dt}. \quad (7)$$

信号 $x(t)$ 可由每个固有模态函数的瞬时频率和幅度表示,

$$x(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \phi_i(t) dt}. \quad (8)$$

取 $x(t)$ 的实部为 Hilbert-Huang 谱,

$$H(\phi, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \phi_i(t) dt}. \quad (9)$$

3 实验结果与分析

3.1 流动结构分析

鼓泡床中有三种典型流型,包括均相流、过渡流和非均相流,示意图如图 2 所示. 实验研究发现电石渣液相碳酸化反应流动,可较为明显地观察到两种流型:均相流和非均相流^[25].

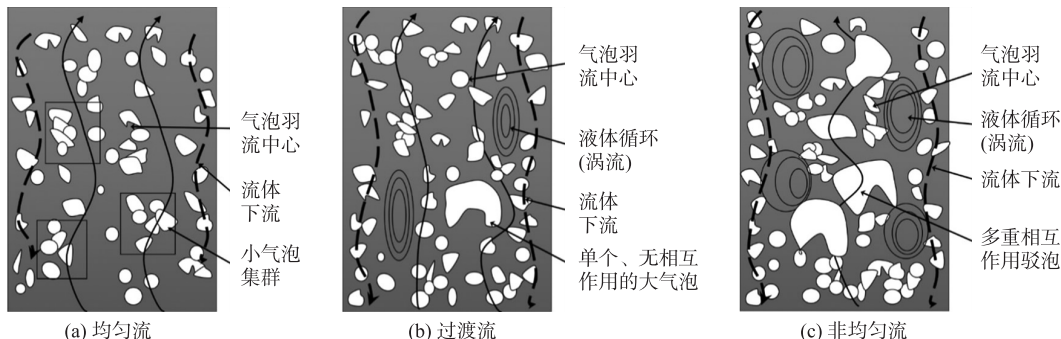


图 2 鼓泡床中典型流型的示意图

Fig. 2 Typical flow patterns of the bubble column

图 3 给出 3 组气速下的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -电石渣的流动图像. 在 $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下,反应器中三相流处于均相流,在 $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.205 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 处于非均相流中. 在均相流型下,气速处于较低的状态,气泡分散在液固流动中,呈现离散分布的状态,气泡有明显的球形或者椭球形的边界形状,气泡的尺寸相近. 当处于非均相流时,有较多大气泡聚并生成,并且在反应器形成中间通路,更多气泡发生聚并成后向上运动,床内液相运动易形成液相循环运动,即液相从中间上升运动,再从靠近壁面处向下运动,易发生返混现象.

3.2 反应流动特性分析

3.2.1 概率密度函数分析

压力脉动的变化主要能反映出床内气泡的聚并和破碎、气泡的形成和涌发、浆态悬浮物的自然振动和床层的机械振动等,进而能对比不同工况下流动结构的差异. 前期开展了反应过程中,单个工况在反应时间的前期、中期和后期的压力脉动分析^[33],结果表面在中低气速 ($0.041 \sim 0.082 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 下,气泡 Sauter 平均直径随反应时间增大没有明显变化,在测试的所有气速下,各工况平均气含率和气液相界面面积随反应时间变化幅度较小,因此可用任意时刻下的流动特征信息,代表该工况下整个反应过程的主要流动特性. 本研究都采集反应中期的压力脉动信号进行分析.

对鼓泡床中 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -电石渣的三相流动采集压力脉动信号,在气速 U_g 分别为 $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下,概率密度分析结果如图 4 所示. 图 4(a) 为气速在 $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的概率密度结果,由图可知该工况下的压力波动范围在 -0.3 kPa 到 0.3 kPa ,最大的概率在 6.3% 附近. 分析该气速条件下,液固比的影响结果可知,气速条件下增大液固比,压力脉动具有相近的变化规律,推测床内的气泡尺寸分布变化较小. 当气速条件增大至 $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,概率密度分析结果如图 4(b) 所示,该条件下压力波动范围变广,为 -1.1 kPa 到 1.2 kPa ,最大概率值有所降低,在 2% 或 3%. 证实了均相流和非均相流下的气泡尺寸分布具有明显差异. 当气速在 $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,增大液固比,概率密度曲线变得更平坦,即压力脉动范围增大,最

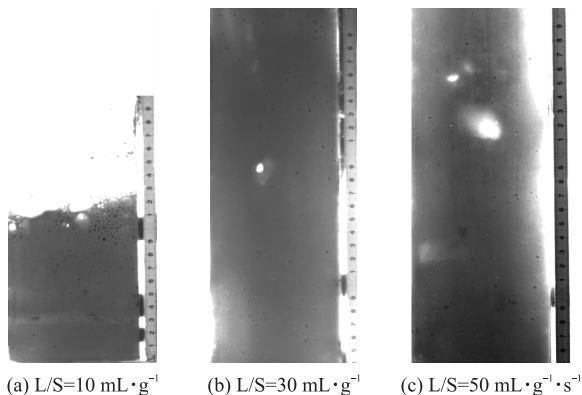


图 3 鼓泡床 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -电石渣流动图像

Fig. 3 Flow images of $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -carbide slag flow in the bubble column

大概率值降低,可见随着液固比增大压力信号的随机性加大,流动中的气液压力信号波动加剧,结合流动图像可知,流动中出现更多大气泡,即该气速下,增大液固比会促进气泡的聚并.结合流动图像结果和压力脉动分析结果可知,压力脉动的概率密度分析可反映出床内气泡的分散、聚并和破碎变化,从而反应床内气泡尺寸分布的不同.

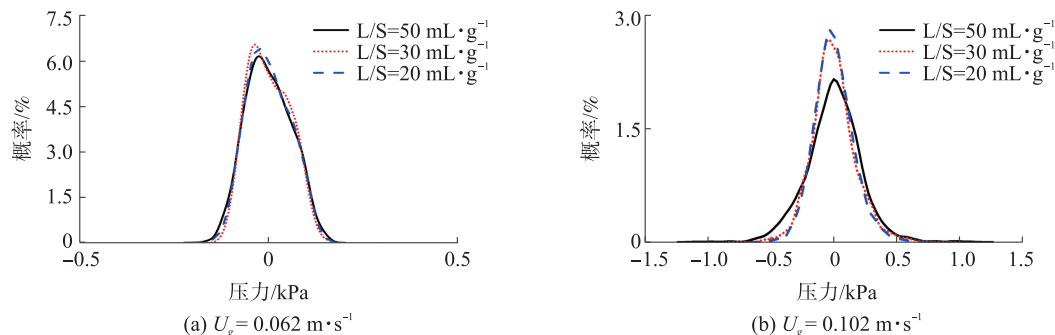


图 4 概率密度分析结果图

Fig. 4 Diagram of probability density analysis results

3.2.2 自相关函数分析

自相关函数主要分析一个时间序列中,相距一定时间间隔两个信号之间的相互关系.通过自相关函数分析,可表征床层压力脉动信号与自身的相似度.分析气速在 $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时改变液固比下,压力脉动的自相关函数分析结果如图 5、图 6 所示.当自相关函数曲线第一次到达 0 值时,定义为延迟时间,延迟时间越小,表示压力脉动信号在时间间隔前后的信号值相近度越高,即自相关性越高,代表床内的多相流动更为规律,如果延迟时间越大,代表床内流动情况更为紊乱,混沌程度更高.当自相关函数曲线到达 0 值后,曲线的波动也进一步反映气液固三相的流动特征.当自相关函数曲线随时间在 0 附近周期性地波动时,说明信号与自身的相似程度大,反映出床内流动比较均匀,气泡分散均匀且运动有规律.并且曲线波动的频率高,自相关性越强,床内前后时刻流动状态相近.

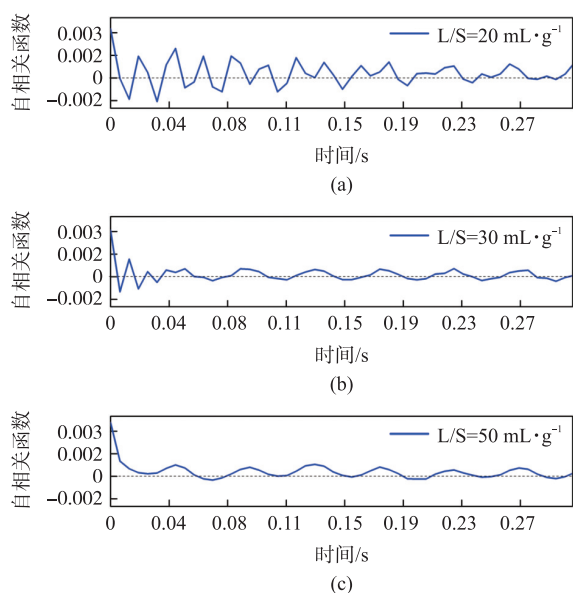

 图 5 自相关函数分析结果($U_g = 0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

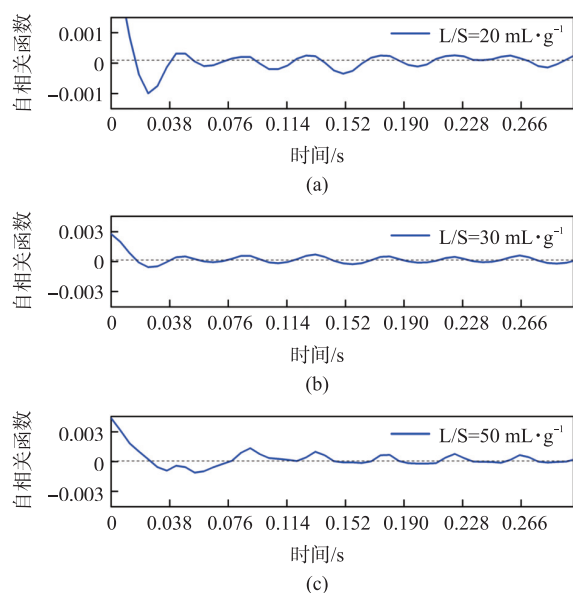
 Fig. 5 Autocorrelation function analysis results($U_g = 0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

 图 6 自相关函数分析结果($U_g = 0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

 Fig. 6 Autocorrelation function analysis results($U_g = 0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

观察图 5 的结果,在 $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, L/S 在 $20 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,自相关函数曲线达到 0 值后的波动最为频繁,说明此时气液固流动相对均匀,增大液固比后,曲线波动的频繁程度降低,说明此工况下收集到的压力脉动信号,前后序列信号相差较大,同气速下,随着液固比的增大气泡运动的不稳定性和不规律性加大.该结果能进一步揭示概率密度函数分析中不能表征出的信息.从图 6 的结果可知,在 $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下,增大液固比,自相关曲线达到 0 值后的波动频率相近,但延迟时间随液固比增大而增大,同样反映出在该气速条

件下,增大液固比会使信号自相关性更低,即加剧了床内的流动不规律性,结合拍摄的流动图像可知,液固比增大,会促进气泡聚并成大尺寸气泡,改变了床内的气泡尺寸分布与气液接触情况。

3.2.3 Hilbert-Huang 变换分析

进一步用时频域的对 Hilbert-Huang 变换对床内压力脉动信号进行分析,获得时间-频率-幅度的三维谱图如图 7 所示。谱图中的白色至黑色表示能量幅度从低到高变化,标出的数值表示该工况的主要幅值点。通过压力脉动的分析可获得反应器中三相流动能量幅度的变化规律。时间-频率-幅度的三维谱图可反应压力信号波动的频率值,一般频率越高,说明床内三相运动更加均匀和有规律,即周期性强,对应该反应器中流动特征为多个尺寸相近的小气泡连续上升运动。幅度代表压力波动的幅值较大,对应该流动过程主要时气泡的聚并与破碎特征。

分析图 7 中的结果可知,当气速为 $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,液固比为 $20 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,幅值较高点都分布在高频段,即 $150\sim 200 \text{ Hz}$,反应出周期性较强的床内流动,结果流动图像可知,该工况下的气泡分布均匀,随时间增

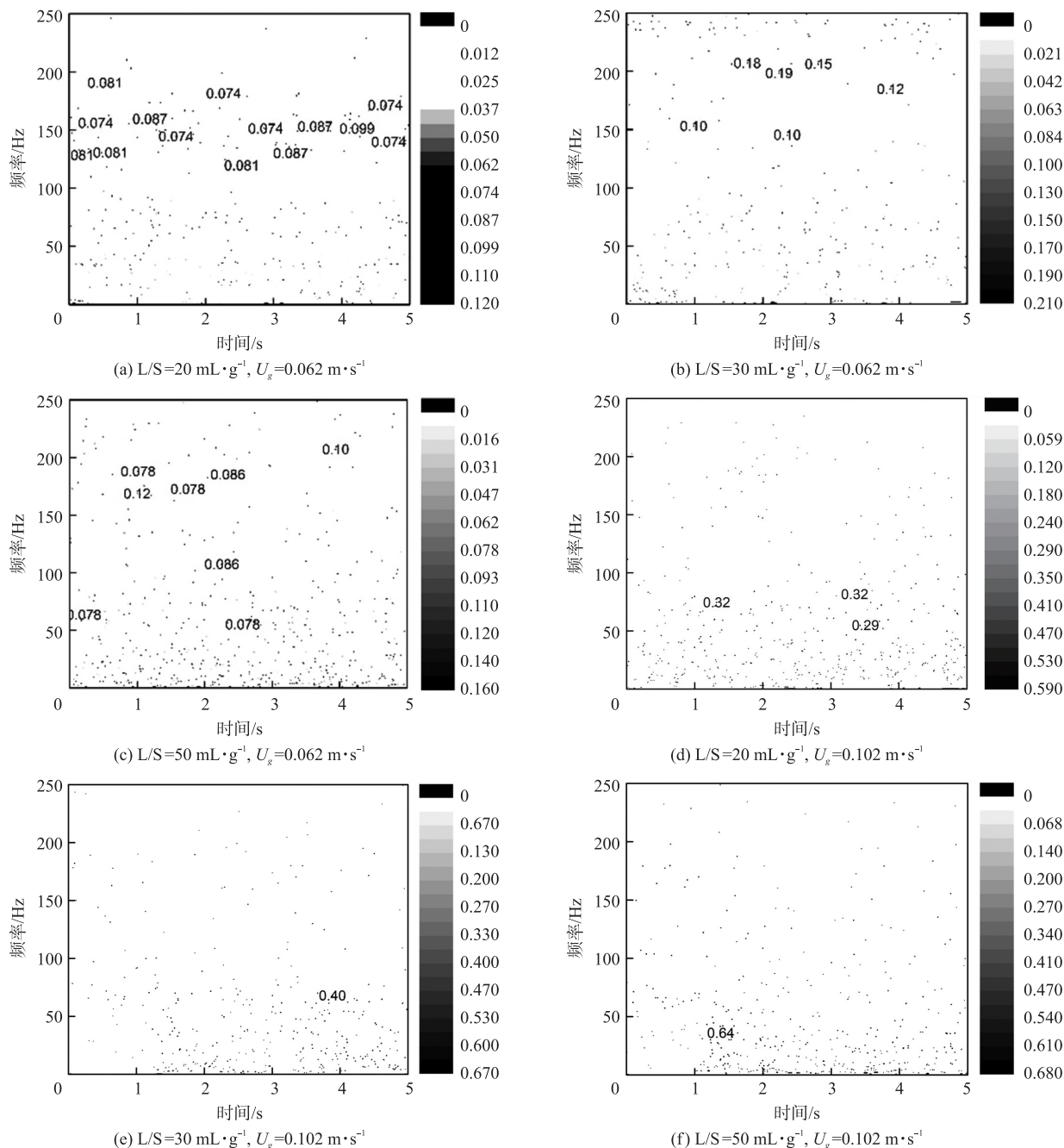


图 7 Hilbert-Huang 谱图分析结果

Fig. 7 Hilbert-Huang spectrum analysis results

大时运动规律相近. 该气速条件下增大液固比,幅值较高点向低频转移,反映出液固比增大,降低了流动的周期性,反映出该工况下,流动状态发生了改变,气泡尺寸变化,气液固流动变得不均匀与不稳定. 当气速升高至 $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,幅值主要存在与低频率段,即 50 Hz 附近,定量展示了该气速下,床内三相流动处于非周期性状态,气泡分布不均匀,并且该气速下随着液固比的增大,幅值点数值增加,说明非周期性增强,大气泡的聚并生成与运动特征更加明显,单个气泡的尺寸更大,气液相界面积越小,影响气液传质. 该方法可从时频域的角度,反映液固比对床内的流动的变化规律.

4 结论

对鼓泡床 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -电石渣实际反应系统中三相流动开展流动特性表征研究,分析重要操作参数液固比对三相流动特性的影响. 采集反应器中压力脉动信号,用时间域分析方法包括概率密度函数和自相关函数,和时频域分析方法 Hilbert-Huang 变换进行信号分析,获得表征参数结果,揭示三相流动尤其是气泡行为随液固比变化的主要特征. 研究发现气速的增大降低了三相流动的运动周期性,而增大液固比会加剧流动的混沌特性,明显改变气液固流动尤其是气泡的运动规律. 从时频域角度分析获得了床内流动的时间-频率-幅度变化规律,液固比的增大提高了流动的能量幅度并降低了床内流动的运动频率,说明液固比的增大促进了气泡的聚并作用. 该结果为进一步研究三相流动对碳酸化反应影响机理奠定了基础.

[参考文献] (References)

- [1] YOU Q, WU S Y, WU Y Q, et al. Product distributions and characterizations for integrated mild-liquefaction and carbonization of low rank coals[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 156: 54–61.
- [2] AIL S S, DASAPPA S. Biomass to liquid transportation fuel via fischer tropsch synthesis-technology review and current scenario[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 267–286.
- [3] WU W, HAN B, GAO H, et al. Desulfurization of flue gas: SO_2 absorption by an ionic liquid[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2004, 43(18): 2415–2417.
- [4] MOTA A, VICENTE A A, TEIXEIRA J. Effect of spent grains on flow regime transition in bubble column[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(14): 3350–3357.
- [5] SONG H S, RAMKRISHNA D, TRINH S, et al. Multiplicity and sensitivity analysis of Fischer-Tropsch bubble column slurry reactors: Plug-flow gas and well-mixed slurry model[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(12): 2759–2766.
- [6] BARGHI S, PRAKASH A, MARGARITIS A, et al. Flow regime identification in a slurry bubble column from gas holdup and pressure fluctuations analysis[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2004, 82(5): 865–870.
- [7] JHAWAR A, PRAKASH A. Heat transfer in a slurry bubble column reactor: A critical overview[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 51(4): 1464–1473.
- [8] XIE P F, LI L Q, HE Z C, et al. Gas-liquid mass transfer of carbon dioxide capture by magnesium hydroxide slurry in a bubble column reactor[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(6): 1592–1606.
- [9] CHENG L, LI T, KEENER T, et al. A mass transfer model of absorption of carbon dioxide in a bubble column reactor by using magnesium hydroxide slurry[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 17: 240–249.
- [10] LI T, KEENER T C, CHENG L. Carbon dioxide removal by using $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in a bubble column: Effects of various operating parameters[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 31: 67–76.
- [11] PAN S Y, CHIANG A, CHANG E, et al. An innovative approach to integrated carbon mineralization and waste utilization: A review[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15: 1072–1091.
- [12] LEE M G, KANG D, JO H, et al. Carbon dioxide utilization with carbonation using industrial waste-desulfurization gypsum and waste concrete[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, 18(3): 407–412.
- [13] TAN W, ZHANG Z, LI H, et al. Carbonation of gypsum from wet flue gas desulfurization process: Experiments and modeling[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(9): 8602–8608.
- [14] 孙荣岳, 叶江明, 毕小龙, 等. 丙酸改性提高电石渣捕集 CO_2 性能的动力学分析[J]. 化工进展, 2017, 36(6): 2325–2330.
- [15] 马晓彤, 李英杰, 王文静, 等. 间歇氯化对电石渣循环捕集 CO_2 性能的影响[J]. 化工学报, 2016, 67(12): 5268–5275.

- [16] PAN S Y, LIU H L, CHANG E E, et al. Multiple model approach to evaluation of accelerated carbonation for steelmaking slag in a slurry reactor[J]. *Chemosphere*, 2016, 154: 63–71.
- [17] CHANG E E, CHIU A C, PAN S Y, et al. Carbonation of basic oxygen furnace slag with metalworking wastewater in a slurry reactor[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 12: 382–389.
- [18] SASIC S, LECKNER B, JOHNSON F. Characterization of fluid dynamics of fluidized beds by analysis of pressure fluctuations[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(5): 453–496.
- [19] JOHNSON F, ZIJERVELD R, SCHOUTEN J V, et al. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26(4): 663–715.
- [20] OMMEN J R, SASIC S, SCHAAF J, et al. Time-series analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds—A review[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(5): 403–428.
- [21] DING W, CHEN Q, SUN H, et al. Modified phosphogypsum sequestering CO₂ and characteristics of the carbonation product[J]. *Energy*, 2019, 182: 224–235.
- [22] RUZICKA M, DRAHOŠ J, FIALOVA M, et al. Effect of bubble column dimensions on flow regime transition[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(21/22): 6117–6124.
- [23] KRISHNA R, ELLENBERGER J, MARETTO C. Flow regime transition in bubble columns[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1999, 26(4): 467–475.
- [24] BOYER C, DUQUENNE A M, WILD G. Measuring techniques in gas-liquid and gas-liquid-solid reactors[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(16): 3185–3215.
- [25] RUTHIYA K C, CHILEKAR V P, WARNIER M J, et al. Detecting regime transitions in slurry bubble columns using pressure time series[J]. *AIChE Journal*, 2005, 51(7): 1951–1965.
- [26] BRIENS L A, ELLIS N. Hydrodynamics of three-phase fluidized bed systems examined by statistical, fractal, chaos and wavelet analysis methods[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(22): 6094–6106.
- [27] TAOFEEQ H, AL DAHHAN M H. Effect of vertical internals on the pressure drop in a gas-solid fluidized bed[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2018, 96(10): 2185–2205.
- [28] LUO L, YAN Y, XU Y, et al. Time-frequency analysis based flow regime identification methods for airlift reactors[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(20): 7104–7112.
- [29] LUO L, YAN Y, XIE P, et al. Hilbert-huang transform, hurst and chaotic analysis based flow regime identification methods for an airlift reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 181: 570–580.
- [30] XIANG J, LI Q, WANG A, et al. Mathematical analysis of characteristic pressure fluctuations in a bubbling fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 2018, 333: 167–179.
- [31] LI W L, ZHONG W Q, JIN B S, et al. Flow regime identification in a three-phase bubble column based on statistical, Hurst, Hilbert-Huang transform and Shannon entropy analysis[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 102: 474–485.
- [32] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903–995.
- [33] 郑鹏, 李蔚玲, 赵传文, 等. 鼓泡床中电石渣直接液相碳酸化过程气泡特性研究[C]//中国工程热物理学会多相流会议. 大连, 中国, 2020.

[责任编辑: 陈 庆]