

研究论文

循环流化床压力波动信号的间歇性分析

马丽萍 石炎福 黄卫星 余华瑞

(四川大学化学工程学院化学工程系, 四川 成都 610065)

祝京旭

(加拿大西安大略大学化学及生物化学工程系, 加拿大 N6A5B9)

摘 要 用小波变换模极大值的方法对循环流化床靠近床层底部和顶部压力波动时间序列进行多重分形分析, 确定相应的压力波动信号的间歇性指数。结果表明循环流化床内气-固流动具有多重分形的特性, 由间歇性参数随操作气速的变化可判断出由快速流化床向密相气力输送的改变, 提出了新的判断循环流化床流型转变的方法, 指出流型的转变沿提升管轴向并不是均匀一致同时改变, 床层底部的转变要滞后于床层顶部。

关键词 小波变换 循环流化床 压力波动信号 多重分形

中图分类号 TQ 021.1

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2003) 05-0619-06

INTERMITTENCE ANALYSIS OF PRESSURE
FLUCTUATION SIGNAL OF CIRCULATING FLUIDIZED BED

MA Liping, SHI Yanfu, HUANG Weixin and YU Huarui

(Department of Chemical Engineering, College of Chemical Engineering, Sichuan University,
Chengdu 610065, Sichuan, China)

ZHU Jingxu

(Department of Chemical and Biochemical Engineering, University of Western Ontario, Canada N6A5B9)

Abstract The multifractal analysis for pressure fluctuation signal in bottom region and upper region of circulating fluidized bed (CFB) was performed by using the wavelet transform modulus maxima method. The intermittence index of the signals can be calculated with this method. Results show that the gas-solid flow in CFB is shown to possess a multifractal character. A new method is also proposed to identify the regime transition in CFB. The lower turning point of intermittence index curve can be used to determine the transition of flow regimes from fast fluidization to dense pneumatic conveying. The transition of flow regime in CFB is not homogeneous along the axis of riser, the transition in bottom region may be later than in upper region, and the transport velocity based on this method is also compared with that calculated by some empirical equations.

Keywords wavelet transform, circulating fluidized bed, pressure fluctuation signal, intermittence

引 言

压力波动是气-固循环流化床的一个重要的动力学特征, 它隐含着反应器内气固流化运动的动态

信息, 是颗粒特性、气体性质、反应器几何特性等诸多因素的综合反应。对压力波动信号的研究一直是流化床基础理论研究的重要组成部分, 其重要的研究目的之一即是两相流型的辨识, 如用压力波动

2001-09-29 收到初稿, 2002-09-09 收到修改稿。

联系人: 石炎福。第一作者: 马丽萍, 女, 36 岁, 博士, 工程师。

基金项目: 国家自然科学基金 (海外青年学者合作基金) 资助项目 (No. 29928005)。

Received date: 2001-09-29.

Corresponding author: Prof. Shi Yanfu. E-mail: s321008@mail.sc.cninfo.net

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 29928005).

幅值、标准偏差、扁平度、偏斜度、概率分布、主频等统计参量分析流体运动特征、判断流型过渡等。随着非线性科学理论的发展,近 10 多年来,确定性混沌理论广泛用于循环流化床压力波动信号的分析,研究循环流化床内在的复杂流动规律,以维数、熵等参数表征不同的流型和流域,探讨循环流化床的放大等^[1~3]。但是,由于气固两相运动过程十分复杂,非线性强,随机性大,许多问题至今还不能很好地认识和掌握,对循环流化床内流体流域的转变和划分尚缺乏一个统一的认识。

具有稠密周期点的混沌系统具有较强的间歇性结构。间歇特性是指信号幅度具有伪周期的突然震动,因此对脉冲函数信号具有较强的间歇性,而对平稳均匀的变量或一稳定信号则没有间歇性。对信号进行间歇性分析以描述循环流化床不同操作条件下流体的运动特性的研究尚属探索阶段,国际上也只见零星报道^[4,5]。但这些方法也是建立在统计分析的基础上,对流体系统内在的特性并未给出更多的解释。

复杂的物理过程往往产生不规则的信号,而这些不规则性也正代表着信号的间歇性,其中往往蕴涵着丰富的动力系统信息。多重分形分析提供了对不同物理系统的局部奇异性的完整描述,用来表示仅用一个取决于整体的特征标度指数所不能完全描述的奇异性几率分布的形式,以揭示系统内复杂的非均匀结构。多重分形理论已成功地应用于完全发展湍流、天气云图变化、地理地貌研究等方面,但在循环流化床波动信号分析方面的应用较少见。Huan Zhong 等^[6]基于多重分形理论曾用时间窗函数平均矩的方法对循环流化床颗粒浓度波动信号进行了初步探索,得到相关的间歇性指数,但此方法也是建立在统计平均分析基础上,对分析信号局部特性存在不足。本文根据多重分形机理,利用小波变换模极大值方法对检测信号局部奇异性、提取信号多重分形特点具有的优越性,对循环流化床压力波动信号进行分析,计算其间歇性指数,并与相关流动特性进行关联分析,提出循环流化床中流型转变的新的判断方法。

1 理论及方法

1.1 多重分形

多重分形描述的是分形几何体在生长过程中不

同的层次和特征,用来表示仅用一个取决于整体的特征标度指数所不能完全描述的奇异性几率分布的形式,从系统的局部出发来研究其最终的整体性质。根据多重分形的机理^[7],对奇异性测度 μ ,若用一大小为 ξ 的盒子 $B_i(\xi)$ 去覆盖测度支集 μ ,则其 q 阶矩的配分函数定义为

$$Z(q, \xi) = \sum_{i=1}^{N(\xi)} \mu_i^q(\xi) \quad (1)$$

其中

$$\mu_i = \mu(B_i(\xi))$$

式中 μ_i 是大小为 ξ 的盒子的质量, $N(\xi)$ 指覆盖的盒子的数量。当 $\xi \rightarrow 0^+$ 时,配分函数具有以下功率关系

$$Z(q, \xi) \sim \xi^{-(q)} \quad (2)$$

则广义维数

$$D(q) = \tau(q)/(q-1) \quad (3)$$

1.2 小波变换与多重分形分析

小波变换最早是为了分析地震数据引入的,此后其理论得到不断发展,并应用到许多领域^[8]。对一个信号函数 $s(x)$,其小波变换为

$$W_\psi[s](b, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \cdot s(x) dx \quad (4)$$

式中 $a \in R^+$, 为尺度参数; $b \in R$, 为空间位置参数(平移参数)。小波变换能够实现对信号在时-频二维空间的分解,提供更全面的分析。Mallat 等证明^[9],若小波函数 ψ 具有正交性且满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^m \psi(x) dx = 0 \quad (\forall m, 0 \leq m < n_\psi) \quad (5)$$

那么,信号函数 $s(x)$ 的局部行为可由小波系数反应出来

$$W_\psi[s](x_0, a) \sim a^{h(x_0)} \quad (6)$$

式中 $h(x_0)$ 为对应点 x_0 的信号的奇异性指数。类似配分函数的定义式(2),可得到由小波系数反应的配分函数

$$Z(q, a) = \int |W_\psi[s](x, a)|^q dx \quad (7)$$

但是,由所有的小波系数计算配分函数是比较繁琐和不确定的。Mallat^[9]提出小波变换模的局部极值能够很好地检测出信号的局部奇异性,由此得到由小波变换模极值计算函数空间-尺度配分函数

$$Z(q, a) = \sum_{|x_i(a)|} |W_\psi[s](a, x_i(a))|^q \quad (8)$$

即在给定尺度上不是对所有小波变换系数求和,而是只对其模极大值的绝对值求和。Muzy 等^[7]证

明，这样做可避免 $q < 0$ 小波系数振动所带来的偏差。与式 (1) 相比，小波函数 ψ 相当于广义盒子的作用，尺度 a 相应于盒子的大小，而小波变换模极大值则相当于如何放置“振动盒子”而获得的给定尺度上的配分函数。则配分函数指数（或质量指数）由下式得到

$$Z(q,a) \sim a^{\tau(q)} \tag{9}$$

广义维数为

$$D(q) = \tau(q)/(q-1) \tag{10}$$

$$D(1) = \left. \frac{\partial \tau(q)}{\partial q} \right|_{q=1} \tag{11}$$

1.3 间歇性指数

由 Davis 等^[10] 根据平均时窗的多级倍增串极模型得到的表示信号间歇性的特征参数

$$\langle \epsilon(\lambda, x)^q \rangle \sim \lambda^{-K(q)} \tag{12}$$

$$C(q) = K(q)/(q-1) \tag{13}$$

$$D(q) = 1 - C(q) \tag{14}$$

$$C(1) = \left. \frac{\partial K(q)}{\partial q} \right|_{q=1} \tag{15}$$

式中 $\epsilon(\lambda, x)$ 为尺度为 λ 的信号长度， $D(q)$ 为广义分形维， $C(q)$ 为联合维数， $K(q)$ 为相对于 q 阶统计平均窗函数的标度指数。对均匀分布的信号没有间歇性，即平均矩的改变与 λ 无关， $K(q)=0$ ， $C(q)=0$ ， $D(q)=1$ 。对脉冲信号，间歇性最强， $\langle \epsilon(\lambda, x)^q \rangle \sim \lambda^{1-q}$ ，即 $C(q) = 1$ 。因此，维数 $C(q)$ 值可作为信号间歇性的度量。Davis 等证明一阶维数可作为信号间歇性的定量指标，即 $C(1)$ 越大间歇性越大， $C(1)$ 小则间歇性小。结合式 (11)、式 (14) 则可推出由小波变换模极大值计算的间歇性指数

$$C(1) = 1 - D(1) = 1 - \left. \frac{\partial \tau(q)}{\partial q} \right|_{q=1} \tag{16}$$

2 实 验

实验在 $\phi 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、高 4.25 m 的有机玻璃冷模循环流化床装置上进行，装置如图 1 所示。用河沙和 PVC 粒料作为固体颗粒，其物性见表 1。沿提升管轴向开 4 个测压孔，距分布板位置分别为 0.55、1.58、2.51、3.44 m，分别用 Z1、Z2、Z3、Z4 表示。用压阻式压力传感器（CYG319 型）与六通道数据采集装置连接实现在线采集，靠床壁测压，采样频率为 333 Hz，每次样本量为 25000

个点，固体循环量通过下行管进料口蝶阀控制。

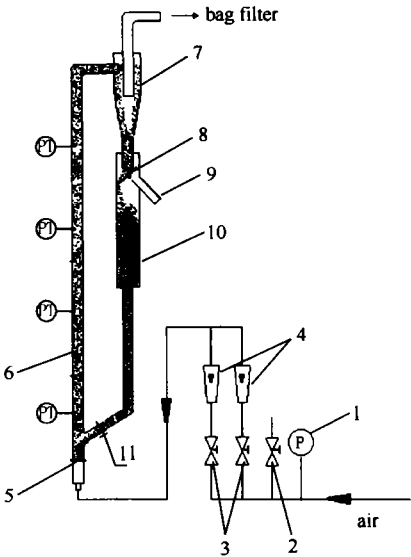


Fig. 1 Circulating fluidized bed unit

- 1—pressure gauge; 2—release valve; 3—gas valve;
- 4—rotameter; 5—distributor; 6—riser;
- 7—cyclone; 8—gate valve to measure solids mass flux;
- 9—solid get-out to measure solids mass flux;
- 10—downcomer; 11—butterfly valve

Table 1 Characteristics of solids used

Material	Particle-size range / μm	Particle mean diameter / μm	Particle density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Geldart classification group
sand	170—560	360	2625	B
PVC	98—250	180	989	A

3 结果与讨论

图 2 为河沙在气速 $u_g = 8.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，固体循环量 $G_s = 72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时提升管 Z1 位置压力波动时间序列。图 2(a)~图 2(c) 分别对应信号长度为 2000、4000、7000 个点，图 3 为相应信号的连续小波变换系数图。可以看出，压力波动的时间序列及其连续小波变换系数图的垂直竖线具有自相似的特点，这正是由于信号具有分形结构的自相似性而产生的^[11]。

用小波变换模极大值的方法计算不同 q 值配分函数随尺度 a 变化的对数关系见图 4，所用小波函数为三阶 Gause 函数，即

$$\psi^{(3)} = \frac{d^3}{dx^3} e^{-x^2/2} \tag{17}$$

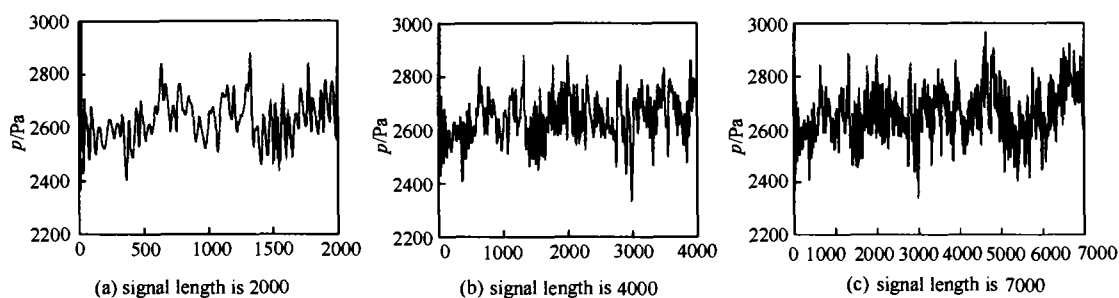


Fig. 2 Typical pressure fluctuation time series for sand at $u_g=8.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $G_s=72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

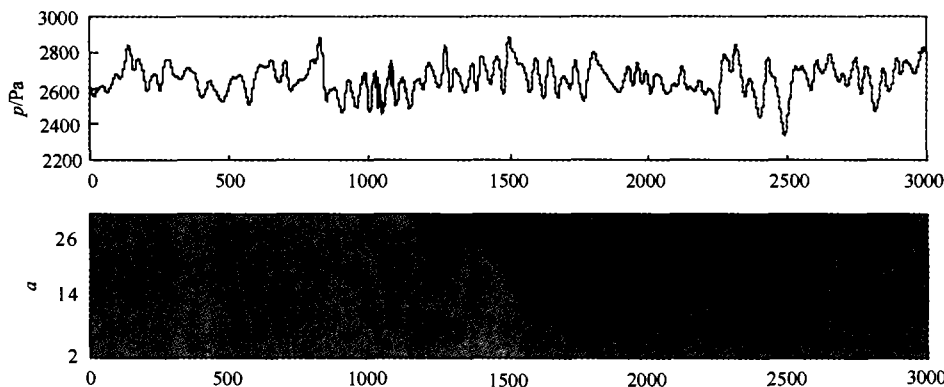


Fig. 3 Continuous wavelet transform of pressure fluctuation signal as in Fig. 2, amplitude is coded, large scales are at top

由直线斜率可得质量指数 $\tau(q)$ 。图 5 为 $\tau(q)$ 随 q 值的变化曲线，由 $q=1$ 点处曲线斜率及式 (17) 可得信号的间歇性指数 $C(1)$ 。

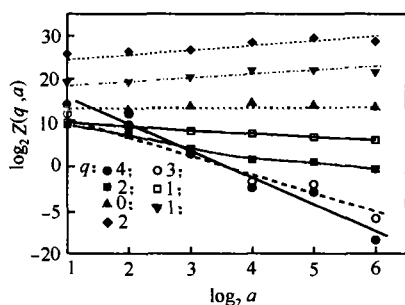


Fig. 4 Scaling exponent $\tau(q)$ extracted according to Eq. (9)

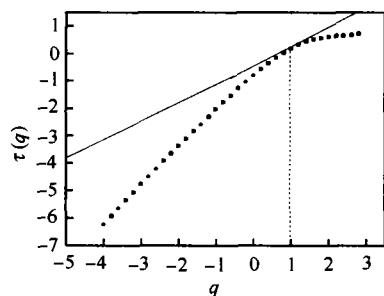


Fig. 5 Plot of $\tau(q)$ vs q

图 6 为河沙在提升管轴向靠床层底部和顶部 Z1、Z3 两位置压力波动间歇性参数 $C(1)$ 随气速的变化，相应的操作条件见图 7。由图 7 可见，当颗粒引入装置蝶阀开度保持一稳定值时，开始阶段，随气速的增加，颗粒带出速率增加，颗粒循环量增大；但在气速升到一定值后，受蝶阀开度的影响，继续提高气速颗粒循环量改变不大，几乎达到一稳定值。相应条件下压力波动间歇性参数值 $C(1)$ 如图 6 所示。由图 6 可见， $C(1)$ 值在 Z3 位置要比 Z1 位置大。在靠近床层底部 Z1 位置，随气速的增加 $C(1)$ 先略有增加而后降低，到达一最低值后随气速增加而单调增大；而靠近床层顶部 Z3 位置，间歇性参数 $C(1)$ 随气速的增加先增加而后又降低，到达一低值拐点后随气速的增加略有增加而后逐渐减小，在气速大于 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后两个位置间歇性参数逐渐接近。循环流化床压力波动主要由气-固相之间的相互作用、颗粒之间相互碰撞、颗粒与床层壁面之间的摩擦力以及气体进入分布板的波动等因素造成，在颗粒循环量随气速提高而增加的区域（此时颗粒沿床壁向下滑落，为快速流化床状态），气速增加，床层内颗粒浓度增加，颗粒之间相互碰撞及颗粒与床层壁面之间的摩擦力

增加，引起压力波动增大，床层底部和顶部间歇性相差大，且靠近床层顶部 Z3 位置由于颗粒的滑落造成其压力波动间歇性比靠近床层底部 Z1 位置高。当循环量达到稳定之后，床内流域进入密相输送状态，颗粒在床层轴向分布相对均匀，压力波动相差不大，两个位置间歇性参数接近。从图 6 还可看出，间歇性参数出现拐点的最低值所对应的气速正好相应于颗粒循环量达到饱和稳定值时对应的气速，对 Z1 位置 C(1) 最低值对应气速约为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，与颗粒循环量达到饱和稳定值一致（图 7 虚线所指），而 Z3 位置 C(1) 最低拐点对应气速略低于 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当流体运动由快速流化床向气力输送转变时，床层内颗粒运动突然转变，颗粒明显地均匀向上运动，并不存在颗粒的下降流动，表现出间歇性突然降低。也即说明通过间歇性参数随气速变化出现的最低拐点可判断循环流化床内流型的转变，即由快速流化床向密相气力输送的转变。同时，沿轴向位置流型在床层顶部的转变要先于床层底部，由间歇性参数可将其准确地区分开来。

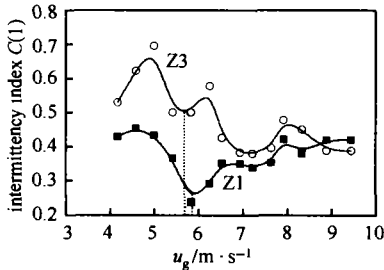


Fig. 6 Variation of intermittency parameter C(1) with gas velocity u_g for pressure fluctuation signal at different position of riser

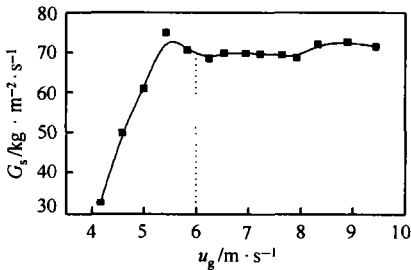


Fig. 7 Variation of solid circulation rate G_s with gas velocity u_g for sand

图 8、图 9 为 PVC 颗粒在同样两个位置压力波动时间序列的间歇性参数值随操作气速的变化及相应的操作条件。由图 9 可见，颗粒循环量与气速的关系类似图 7，受设备的影响，当颗粒循环量达

到一定值后，再提高气速颗粒循环量基本保持一稳定值。从图 8 也可看出，类似于河沙颗粒所得结果（图 6），在 Z1 位置间歇性参数 C(1) 随气速的增加而增加，气速达 $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时出现一最低拐点，此气速对应于颗粒循环量达稳定时的操作气速（图 9 虚线所示），而后随气速增加间歇性参数逐渐增加。同样在 Z3 位置间歇性参数 C(1) 出现最低拐点对应的气速低于 Z1 位置，约为 $2.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，对应于颗粒循环量接近稳定时的操作气速，此后气速提高间歇性参数也逐渐增加。在颗粒循环量达稳定值后，靠床层底部和顶部位置间歇性参数逐渐接近。

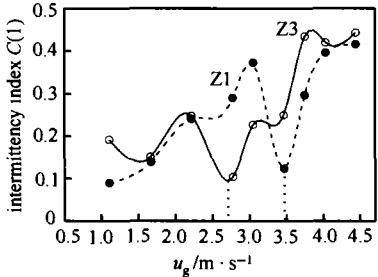


Fig. 8 Variation of intermittency parameter C(1) with gas velocity u_g for pressure fluctuation signal at different position of riser

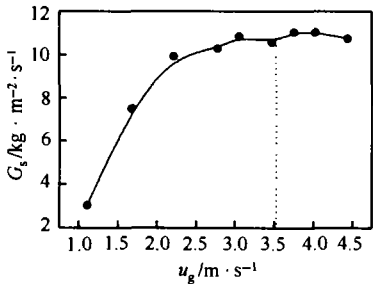


Fig. 9 Variation of solid circulation rate G_s with gas velocity u_g for PVC

从图 6~图 9 可以看出，在快速流化区，靠近床层顶部间歇性参数比靠近床层底部要大，但 B 类颗粒沿床层轴向间歇性参数的变化比 A 类颗粒大，说明 A 类颗粒沿床层下滑不多，颗粒在床层轴向的分布比 B 类颗粒相对均匀。进入密相气力输送，颗粒沿床层轴向分布均匀，两种颗粒均表现出床层底部和顶部间歇性参数接近。通过间歇性参数最低拐点可准确地判断出流型的转变，且床层顶部流型转变总要先于床层底部，说明循环流化床流型的转变沿床层轴向并不是均匀一致同时改变的。

将间歇性参数出现最低拐点对应的表观气速

与在此条件下由经验公式^[12]计算的由快速流化床向密相气力输送的转变速度 u_{FD} 对照, 见表 2. 由白丁荣等根据文献数据整理而得

$$u_{FD} = 26.58(G_s/\rho_s)^{1.0875}[(\rho_s - \rho_g)^2 g^2 / \rho_g \mu_g]^{1/3} d_p - 0.2217 \tag{18}$$

由毕晓涛等得到的关联式为

$$u_{FD} = 3.21(G_s/\rho_s)^{0.425}(d_p/D_b)^{0.173}[(\rho_s - \rho_g)/\rho_g]^{0.426} \tag{19}$$

Table 2 Comparison of u_{FD} calculated by different methods

Method	$u_{FD}/m \cdot s^{-1}$	
	Sand	PVC
this paper	5.83	3.47
Eq. (18)	5.75	0.557
Eq. (19)	8.02	3.19

由表 2 可见, 经验关联式 (18) 对 B 类颗粒计算的 u_{FD} 与本文间歇性指数最低拐点对应气速接近, 而对 A 类颗粒则偏小. 相反, 用经验关联式 (19) 计算的 u_{FD} 对 A 类颗粒与本文方法所得气速较接近, 而对 B 类颗粒则计算结果偏差较大.

4 结 论

用小波变换模极大值的方法对循环流化床靠近床层底部和顶部压力波动时间序列进行多重分形分析, 得到相应的压力波动间歇性指数. 说明循环流化床内气-固流动具有多重分形的特性, 由间歇性参数随操作气速的变化可判断出循环流化床由快速流态化向密相气力输送流型的改变, 且可得出流型的转变沿提升管轴向并不是均匀一致同时改变的. 上述研究为循环流化床流型判别提出了一种新的方法.

符 号 说 明

- a ——尺度参数
- b ——平移参数
- $C(q)$ ——广义联合维数
- $D(q)$ ——广义维数
- D_b ——提升管直径, m
- d_p ——颗粒平均粒径, μm
- G_s ——颗粒循环速率, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
- g ——重力加速度, $m \cdot s^{-2}$
- $K(q)$ —— q 阶尺度指数
- p ——压力, Pa
- q ——矩参数
- $s(x)$ ——信号函数
- u_{FD} ——快速流化床向密相气力输送转变速度, $m \cdot s^{-1}$

- u_g ——表观气速, $m \cdot s^{-1}$
- $W_\varphi[s](b,a)$ ——信号函数小波变换系数
- $Z(q, \xi)$ ——配分函数
- $Z1, Z3$ ——提升管位置
- μ ——测度
- μ_g ——气体黏度, $N \cdot s \cdot m^{-2}$
- ρ_g ——气体密度, $kg \cdot m^{-3}$
- ρ_s ——颗粒密度, $kg \cdot m^{-3}$
- $\tau(q)$ ——配分函数指数
- ψ ——小波函数

References

1 Robert C Zijerveld, Filip Johnsson, Antonio Marzocchella, Jaap C Schouten, Cor M van den Bleek. Fluidization Regimes and Transitions from Fixed Bed to Dilute Transport Flow. *Powder Technology*, 1998, **95**: 185—204

2 Antoni Marzocchella, Zijerveld R C, Schouten J C, Van den Bleek C M. Chaotic Behavior of Gas-Solids Flow in the Riser of a Laboratory-scale Circulating Fluidized Bed. *AIChE J.*, 1997, **43** (6): 1458—1468

3 Schouten J C, Zijerveld R C, Van den Bleek C M. Scale-up of Bottom-bed Dynamics and Axial Solids-distribution in Circulating Fluidized Beds of Geldart-B Particles. *Chem. Eng. Sci.*, 1999, **54**: 2103—2112

4 Brereton C M H, Grace J R. Microstructural Aspects of the Behaviour of Circulating Fluidized Beds. *Chem. Eng. Sci.*, 1993, **48** (14): 2565—2572

5 Johnsson F, Zijerveld R C, Schouten J C, Van den Bleek C M, Leckner B. Characterization of Fluidization Regimes by Time-series Analysis of Pressure Fluctuations. *Int. J. Multi. Flow*, 2000, **26**: 663—715

6 Huan Zhong, Bakshi B R, Peijun Jiang, Fan L S. Multifractal Characterization of Flow in Circulating Fluidized Beds. *Chem. Eng. J.*, 1996, **64** (1): 107—115

7 Arneodo A, Bacry E, Muzy J F. The Thermodynamics of Fractals Revisited with Wavelets. *Physical A*, 1995, **213**: 232—275

8 Meyer Y. Wavelets and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1992

9 Stephane Mallat, Wen Liang Hwang. Singularity Detection and Processing with Wavelets. *IEEE Tran. TIT.*, 1992, **38** (2): 617—643

10 Davis A, Marshak A, Wiscombe W, Cahalan R. Multifractal Characterization of Nonstationarity and Intermittency in Geophysical Fields Simulated. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99** (D4): 8055—8072

11 Ma Liping (马丽萍). Misalignment Analysis of Fluctuation Signal of Circulating Fluidized Bed: [dissertation] (学位论文). Chengdu: Sichuan University, 2002. 7

12 Ceng Kefa (岑可法), Ni Mingjiang (倪明江), Luo Zhongyang (骆仲泮), et al. Theory of Circulating Fluidization Bed Boiler——Designing and Operating (循环流化床锅炉理论——设计与运行). Beijing: Electronic Press of China, 1998. 65