

大颗粒流化床中颗粒反射光纤信号的多重分形特性

李晓光^{1,2}, 徐德龙¹, 范海宏¹

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 710055, 西安; 2. 长安大学建筑工程学院, 710061, 西安)

摘要: 采用 2 mm 直径的光纤探头, 对颗粒直径为 3.66 mm 的二维流化床内颗粒的光纤反射信号进行了采集, 并利用小波变换极大模值法对该类信号进行了数值分析, 结果表明其具备多重分形特征; 给出了多重分形谱图. 由谱图分析可知: 随颗粒雷诺数 Re_p 的增加, 床中心处颗粒流动更加规律, 而近壁区和中心至壁面半途区的情况正相反; 在不同的 Re_p 下, 床中心部分颗粒无规则运动程度较高, 接近壁面处较低. 多重分形谱图分析有望为大颗粒流化床中颗粒运动规律的探测提供一种新的手段.

关键词: 流化床; 大颗粒; 小波变换极大模值; 多重分形; 光纤信号

中图分类号: TQ051.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)11-1259-05

Multifractal Spectrum of Optical Reflection Signals in a Two-Dimensional Fluidized Bed with Coarse Granules

Li Xiaoguang^{1,2}, Xu Delong¹, Fan Haihong¹

(1. School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Construction Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In a two-dimensional fluidized bed with granules of 3.66 mm diameter suspending in gas stream, the optical reflection signals were sampled adopting an optical fiber probe with 2 mm-diameter. The signals were analyzed with wavelet transform maximum modulus (WTMM) method and the results revealed the signals multifractal characteristics. The multifractal singular spectrums (MSS) of the signals were presented. It is shown that the granules move in the bed central region more regularly as the granules' Reynolds number increases; in the near-wall and midway regions more significant irregularity of granule motion is detected. For a given value of Reynolds number, the disorder in nature of granule motion in the central region is more remarkable than in the near-wall region. The MSS analysis is expected to offer an effective tool for exploring the particle motion in fluidized bed with coarse granules.

Keywords: fluidized bed; coarse granule; wavelet transform maximum modulus; multifractal; optical fiber signal

大颗粒流化床有着极为复杂的动力学行为, 常规研究仅能对其物理量进行粗略和简单的统计, 精确的描述几乎是不可能的. 随着计算机技术的发展和新的数学分析工具与方法的有效使用, 20 世纪 90 年代以后, 非线性科学得到了迅速发展, 混沌、分形等新的分析工具对诸多工程学科的发展起到了有力

的推动作用^[1,2]. 在流态化工程领域, 非线性科学的研究成果也得到了一定程度的应用, 使得对流化床这种典型的非线性系统进行精确描述成为可能^[3]. 本文采用小波变换极大模值 (WTMM) 法对二维大颗粒流化床的颗粒光纤反射信号进行多重分形谱分析.

1 基本概念简介

1.1 多重分形

多重分形的概念是由研究湍流模型的物理学家和应用数学家提出的^[4,5]. 它由两个量构成, 第一个量是衡量时间序列正则性的 Lipschitz 指数 α , 第二个量是在该过程中每一个 α 对应的分形维数——平滑函数 $f(\alpha)$. 多重分形谱可用来描述分形体不同层次、不同区域的生长特征. 为了从试验数据中计算多重分形谱, Frish 和 Parisi^[4] 首先采用热力学类比的方法定义了配分函数 $Z(q, S)$, 配分函数的尺度性质则定义为尺度函数 $\tau(q)$. 通过对尺度函数的 Legendre 变换可得到平滑函数 $f(\alpha)$. 文献^[6]在此基础上提出, 由于小波变换在时域局部化的同时保留了信号的尺度行为和正则性, 所以特别适合于研究多重分形过程的局部尺度行为和正则性.

1.2 小波变换极大模值法的多重分形谱

小波是函数空间 $L^2(\mathbf{R})$ 中满足容许性条件 $0 < C_\Psi = \int_0^\infty \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} < \infty$ 的一个函数或信号 $\Psi(\cdot)$ ^[7]. 如果信号 $f(\cdot)$ 满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt < \infty$, 则 $f(\cdot)$ 的连续小波变换定义如下

$$Wf(u, S) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) S^{-1/2} \Psi^* \left(\frac{t-u}{S} \right) dt$$

式中: u 为时间因子; S 为尺度因子. Arneodo 对小波变换系数定义的配分函数如下

$$Z(q, S) = \int_{\mathbf{R}} |Wf(u, S)|^q du, \quad q \in \mathbf{R}$$

式中: q 为权重因子. 为减少连续小波变换中大量的冗余信息, Mallat 提出了小波极大模值的概念^[8], 并定义了极大模值线. 他同时指出^[9], 沿着这些极大模值线可完成对 α 的测量, 并且建议用极大模值线上系数的离散和代替上述积分式. 极大模值线的个数取决于小波函数消失矩的阶数, 若所检测的 Lipschitz 指数上限为 n , 则应采用至少具有 n 阶消失矩的小波函数. 通常选择 $\Psi = (-1)^n \theta^{(n)}$ 的形式, 其中 θ 为高斯函数^[9]. 本研究所用的小波采用其二阶导的墨西哥帽状小波.

小波极大模值法的多重分形谱计算过程如下^[9]:

(1) 对每一个尺度 S 计算出 $Wf(u, S)$ 及其极大模值, 随 S 的变化连接小波极大模值;

(2) 求配分函数, 有 $Z(q, S) = \sum |Wf(u,$

$S)|^q$;

(3) 计算尺度函数 $\tau(q)$, $\ln Z(q, S) \approx \tau(q) \ln S + C(q)$, 其中 $C(q)$ 为常数;

(4) 多重分形谱计算, $f(\alpha) = \min_{q \in \mathbf{R}} (q(\alpha + 1/2) - \tau(q))$.

2 光纤信号的多重分形研究

2.1 试验条件

床体由有机玻璃制作而成, 尺寸为 $150 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$, 布风板的开孔率为 6% . 试验统一在静床高为 75 mm 、测点垂直高度均为 100 mm 的条件下进行. 试验装置如图 1 所示, 测点的径向位置分别在 $r/R=0, 0.5, 1.0$ 处 ($R=75 \text{ mm}$, 为二维床长度的一半; r 为二维床的轴向坐标, 床中心线处 $r=0$, 壁面处 $r=75 \text{ mm}$), 光纤探头从床体侧面伸入至测点位置. 操作条件: 以颗粒直径为定型尺寸、表观风速为计算风速的雷诺数 $Re_p=638, 851, 1\,065$.

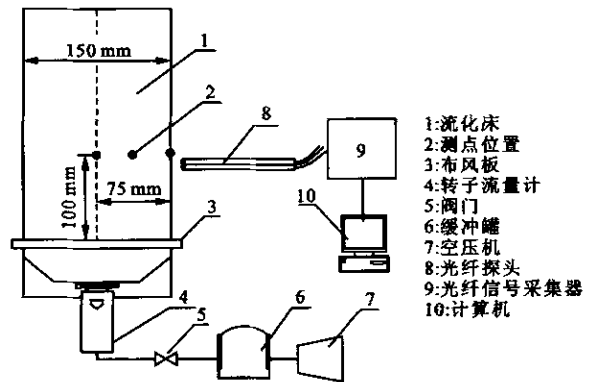


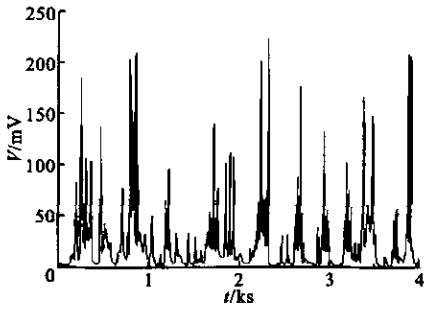
图1 试验装置

试验物料采用光滑的瓷球颗粒, 直径 $d_p = 3.66 \text{ mm}$, 表观密度 $\rho_p = 2\,400 \text{ kg/m}^3$, 球形度 $\phi = 1$, 流化床平均空隙率 $\epsilon = 0.4$. 流化气采用压缩空气, 试验温度为 280 K . 用降压法得出该种物料的临界流化风速 u_{mf} 近似为 2.22 m/s . 颗粒光纤反射信号的测量采用直径为 2 mm 的光导纤维探头, 采样频率为 976.56 Hz , 采样时间为 4.19 s , 每路信号采样点为 $4\,096$ 个. 为防止噪声干扰, 滤波频率 (-3 dB) 选为 250 Hz .

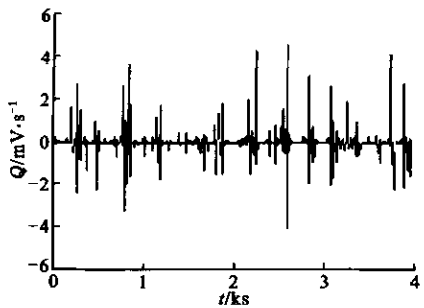
2.2 计算过程与结果分析

以 $Re_p = 638$ 为例, 在 $r/R=0$ 处大颗粒的光纤反射信号如图 2 所示. 当颗粒为等径球且颜色均一时, 由于光纤直径与颗粒直径相当, 信号主要是单颗粒通过探头时因遮挡造成光反射产生的. 由于信号强度值与颗粒遮挡面积成正比, 而遮挡面积的变化

率可线性反映颗粒速度大小,所以信号强度的变化率反映了颗粒速度随时间的变化关系.颗粒速度瞬间变化的实质源于其在流化床中的受力情况.对该类信号的分析可间接反映测点处颗粒由于受外力影响发生无规则随机运动的激烈程度.小波极大模值法的多重分形分析将主要是针对信号强度突变部分的特征展开定性或定量研究.



(a) 光纤信号的时间序列



(b) 光纤信号强度变化率的脉动

图 2 大颗粒流化床中的光纤反射信号

2.2.1 不同测点和条件下的连续小波变换 以 $Re_p=638$ 为例,不同径向位置处颗粒光纤反射信号的连续小波变换如图 3 所示.图中的灰度线表示各尺度下小波变换极大模值的连线,可以看出沿尺度坐标减小的方向,小波变换系数(用灰度图表示)具有明显的自相似特征,预示着大颗粒流化床中颗粒

的无规则运动程度具有一定的分布,可采用分形方法进行研究.

2.2.2 配分函数与尺度函数的计算 在本研究中权重因子 q 的绝对值的取值上限定为 15,即可满足计算的需要.图 4 是在 $Re_p=638$ 时各测点处配分函数与尺度因子的关系图,可见对于不同的 q 值,配分函数与尺度因子的对数成线性关系,在小尺度范围内尤为明显.根据多重分形理论的标度不变性原则,这类信号具有多区域多分形特征,属于多重分形研究范畴,可以用多重分形谱刻画大颗粒流化床非线性动力系统的特征.图 5 为相应的尺度函数与 q 的关系,在此基础上可求出 α .

2.2.3 多重分形谱的计算结果与分析 大颗粒流化床光纤强度信号的多重分形谱与床内颗粒流动和气泡特征有着深刻的联系.采用多重分形谱的计算方法,得到各测点处不同颗粒雷诺数下的多重分形谱,如图 6 所示.图 6 是分别在床轴线处、床半径一半处以及床壁面处,在 3 种雷诺数条件下光纤信号的多重分形谱图.由图 6a 可知,在床的中心线处,随颗粒雷诺数的增加,信号的总体分形维数降低,并有向右移动的趋势,说明信号起伏程度减弱,颗粒无序运动概率减小,流动更加规则.当测点位置在 $r/R=0.5$ 时,多重分形谱随雷诺数的变化却有所不同:在 $Re_p=638,851$ 时,谱图变化不大,但当雷诺数增至 1 065 时,谱图明显左移,信号的奇异性增强,颗粒无序运动的概率显著增加.图 6c 表明,在床壁面 $r/R=1.0$ 处,多重分形谱整体明显左移且分形维数增加,但与 $Re_p=851$ 时相比, $Re_p=1 065$ 时信号的奇异性又有所减弱,无规则运动程度略有降低.

图 7a 表明,当 $Re_p=638$ 时,在 $r/R=0.5$ 处谱图略向右移,而在床壁面处谱图则明显向右移动,这表明沿径向至壁面颗粒的无规则运动概率有减小的趋势,颗粒流动的规律性不断增强.当 Re_p 提高到 851 时,由谱图的右移可知,与床中心线处相比,在

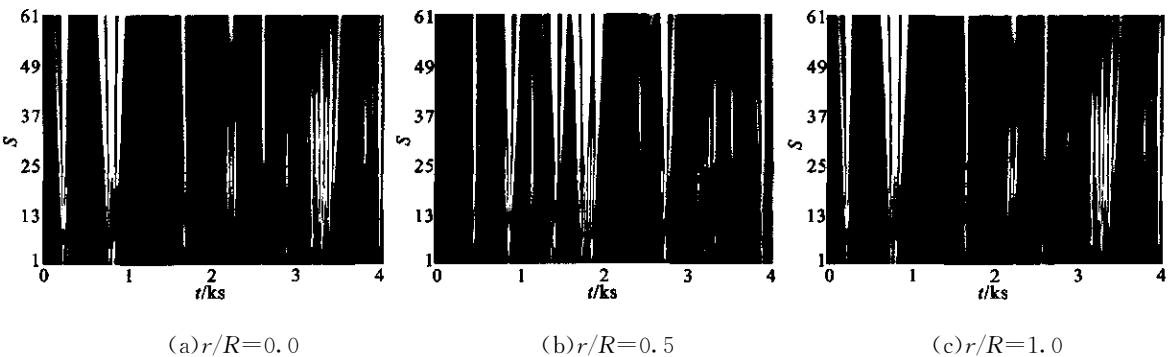


图 3 不同径向位置处光纤信号的连续小波变换

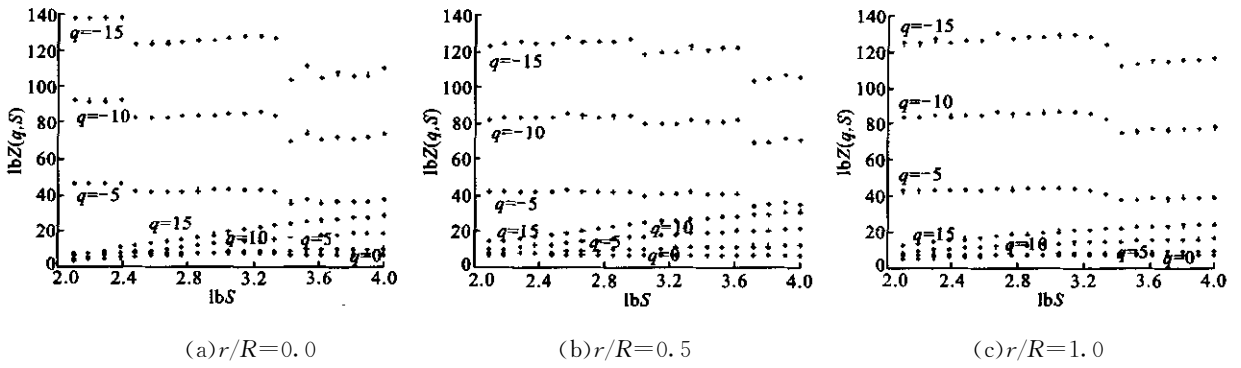


图 4 配分函数与尺度因子的关系图

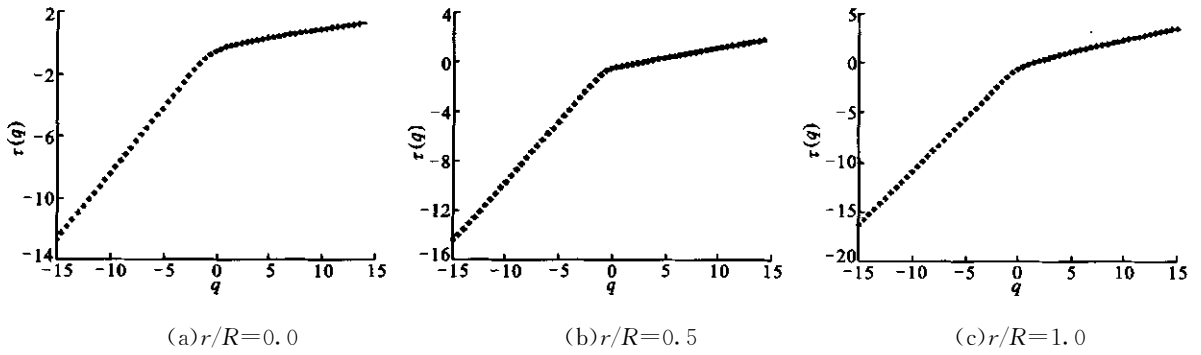
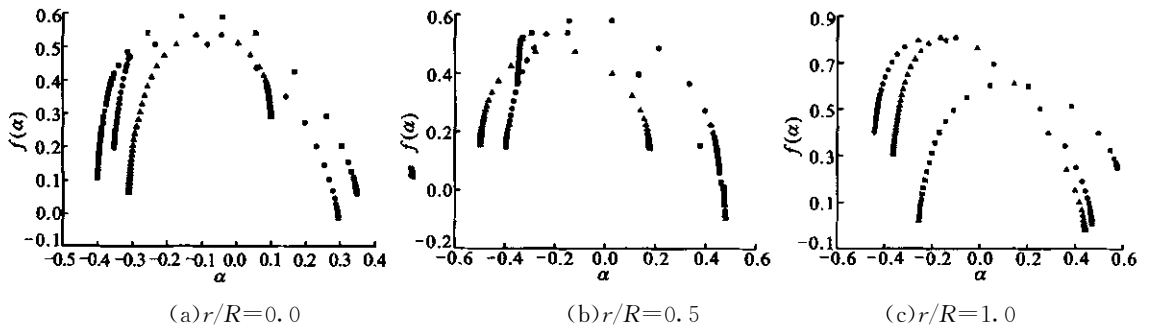
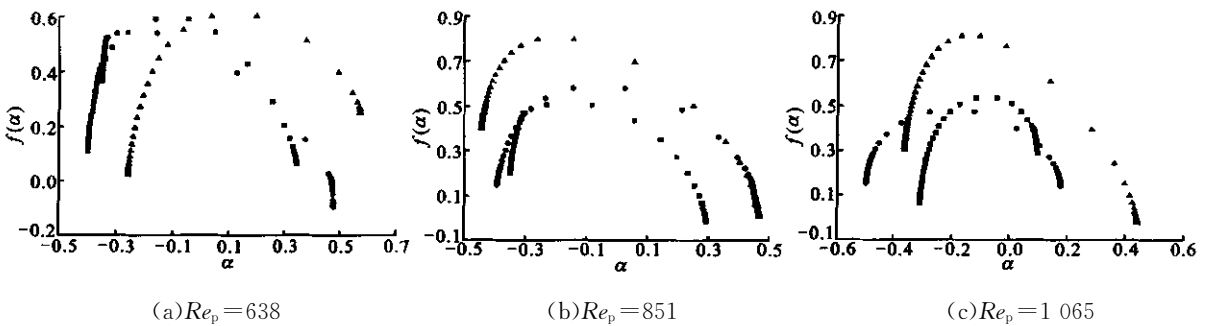


图 5 光纤反射信号的尺度函数与权重因子的关系图



■ $Re_p=638$; ◆ $Re_p=851$; ▲ $Re_p=1065$

图 6 相同测点不同雷诺数下光纤信号的多重分形谱图



■ $r/R=0.0$; ◆ $r/R=0.5$; ▲ $r/R=1.0$

图 7 不同径向位置处光纤信号的多重分形谱图

$r/R=0.5$ 处颗粒运动的规律性增强,而当到达壁面时,则由于谱图整体分形维数的增加,使得无规则运动程度又略有加强.在 $Re_p=1065$ 时,与床中心线处相比, $r/R=0.5$ 处的谱图明显左移,信号的奇异性增强,颗粒运动的无规则程度加剧,而在床壁面处谱图又明显右移,颗粒运动的规律性增强.以上分析说明,随操作条件的变化,在大颗粒流化床内不同区域存在着不同的颗粒运动方式.

3 结 论

上述研究表明,大颗粒流化床内颗粒的光纤反射信号具有典型的多重分形特征,可以采用小波极大模值的多重分形谱的计算方法对该类信号进行计算分析.对流化床某一固定高度处不同径向位置的研究显示,随颗粒雷诺数的增加,床中心处颗粒运动更加规律.在 $r/R=0.5$ 位置及壁面处的颗粒无规则运动程度均有不同程度的提高,但提高程度和规律有所不同.从径向分布来看,在中、低雷诺数下沿径向接近壁面时,颗粒的有序运动总体上在不断增强,而在高雷诺数下,颗粒的无规则运动程度从中心到壁面呈现先增强后减弱的趋势.可见,提高颗粒雷诺数可抑制床中心区域的颗粒无序运动,但可能会对其他位置产生相反的影响.对该类信号进行多重分形谱分析,可提供一种新的分析大颗粒流化床这一复杂系统内颗粒运动方式的工具.

参考文献:

[1] Yang Jin. A dynamic and thermodynamic approach to

complexity [D]. Denton, Texas: University of North Texas, 2003.

[2] Morales Carlos J. Wavelet-based multifractal spectra estimation: statistical aspects and applications [D]. Boston: Boston University, 2002.

[3] 马丽萍,石炎福,黄卫星,等. 循环流化床颗粒浓度波动信号多重分形测度分析[J]. 高校化学工程学报, 2002, 16(5): 496-502.

[4] Frish U, Parisi G. Fully developed turbulence and intermittency [A]. Ghil M, Benzi R, Parisi G. Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics [C]. Amsterdam: North-Holland, 1985. 71-84.

[5] Mandelbrot B B, van Ness J W. Fractional Brownian motion, fractional noises and applications [J]. SIAM Review, 1968, 10(4): 422-437.

[6] Bacry E, Muzy J, Arneodo A. Singularity spectrum of fractal signals from wavelet analysis: exact results [J]. Journal of Statistical Physics, 1993, 70(2): 635-674.

[7] Percival D B, Walden A T. Wavelet methods for time series analysis [M]. London: Cambridge University Press, 2000.

[8] Mallat S. A wavelet tour of signal processing [M]. 2nd edition. New York: Academic Press, 1999.

[9] Mallat S, Wang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Transactions of Information Theory, 1992, 38(617): 2 091-2 110.

(编辑 葛赵青)

(上接第 1222 页)

参考文献:

[1] Walker C I, Bodkin G C. Empirical wear relationships for centrifugal slurry pumps, part 1: side-lines [J]. Wear, 2000, 242 (59): 140-146.

[2] 王惠堂,贾安民. 氧化铝用渣浆泵过流部件失效原因分析与探讨[J]. 有色设备, 2000(1): 12-14.

[3] 汪海燕,黄汝清,吕振林,等. 渣浆泵过流部件的磨损及材质选择[J]. 水利电力机械, 2002, 24(3): 66-69.

[4] 郭景坤. 关于先进结构陶瓷的研究[J]. 无机材料学报, 1999, 14(2): 193-202.

[5] 高 勇,陈森凤. 晶须、片晶、颗粒增韧陶瓷技术[J]. 材料导报, 1998, 12(3): 70-72.

[6] 闵京声,姚 光. 引黄水泵口杯防护材料对比试验研究[A]. 顾四行. 水机磨蚀论文集 [C]. 天津:《水机磨

蚀》编辑部,1998. 25-29.

[7] 曹征齐,孙国伟. 小浪底水利枢纽建设中的重要技术创新[J]. 水力发电,2000(8): 29-34.

[8] 周庆德,饶启昌,方 亮,等. 4PH 杂质泵过流部件(护套)的磨损失效分析[A]. 周庆德,饶启昌,苏俊义. 铬系抗磨铸铁 [C]. 西安:西安交通大学出版社,1987. 226-229.

[9] 李 卫. 热强碱性铝矿浆冲刷腐蚀及抗磨蚀铸铁材料的研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院,2001.

[10] 张安峰. 新型试验机的研制与铬系白口铸铁相间腐蚀的基础研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院,2000.

(编辑 葛赵青)