

研究简报

# 高压浓相粉煤气力输送特性及信息熵分析

梁 财, 陈晓平, 蒲文灏, 鹿 鹏, 范春雷, 赵长遂  
(东南大学洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

关键词: 气力输送; 高压; 固气比; Shannon 信息熵

中图分类号: TQ 051

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 05-1191-06

## Flow characteristics and Shannon entropy analysis of dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal under high pressure

LIANG Cai, CHEN Xiaoping, PU Wenhao, LU Peng, FAN Chunlei, ZHAO Changsui

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** Experiments of dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal using nitrogen were carried out in an experimental test facility with the conveying pressure up to 4 MPa and the solid-gas ratio up to  $450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . The influences of conveying differential pressure, gas volume flow rate and superficial velocity on the solid-gas ratio were investigated. The Shannon entropy analysis of pressure fluctuation time series was developed to reveal the flow characteristics. Through the investigation on the distribution of Shannon entropy in different conditions, the flow stability and evolutionary tendency of Shannon entropy in different regimes and regime transition processes were discovered. The relationship between Shannon entropy and flow regimes was also established. The results indicated that solid gas ratio and Shannon entropy increased with increasing conveying differential pressure. Shannon entropy was different for different flow regimes, and was able to identify the flow regimes. Shannon entropy analysis is a feasible approach to researching the characteristics of flow regimes and flow regime transitions in dense-phase pneumatic conveying under high pressure.

**Key words:** pneumatic conveying; high pressure; solid-gas ratio; Shannon entropy

### 引 言

气力输送在能源、化工、冶金、医药和食品加工等领域得到广泛的应用。关于粉体的密相输送有许多有价值的研究成果, 一般来说, 这些系统主要

在低压下工作。目前, 大规模高效煤气化在洁净煤利用技术领域日益得到重视和发展, 粉煤的浓相气力输送技术是煤气化过程的关键技术之一<sup>[1-2]</sup>。由于高压浓相输送中速度较低, 固相浓度过高, 流动形态复杂, 流动稳定性下降, 可借鉴的资料和经验

2006-05-11 收到初稿, 2006-10-11 收到修改稿。

联系人: 赵长遂。第一作者: 梁财 (1980-), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB217702-01); 东南大学优秀博士学位论文基金资助项目。

Received date: 2006-05-11.

Corresponding author: Prof. ZHAO Changsui. E-mail: cszhao@seu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2004CB217702-01) and Excellent PhD Thesis of Southeast University.

很少,尚无成熟理论依据可以参照<sup>[1-3]</sup>,对其输送过程中流动特性掌握不够,以至于在系统的设计及运行中都遇到了一定的困难。所以对高压浓相输送过程中流动特性的研究,无论在试验方面还是理论方面都有待于深入。

压力信号载有大量的动态信息,是流动特性、输送形态、输送管道几何特性和能量交换等流动特性的综合体现。许多先进的信号处理方法已经用于两相流动特性的分析,如功率谱密度<sup>[4-6]</sup>、小波分析<sup>[7-8]</sup>及混沌<sup>[9]</sup>等。近年来,信息熵逐渐应用到两相流信号的分析之中,Cho 等<sup>[10]</sup>利用信息熵分析研究了三相流中的温度脉动特性,钟文琪等<sup>[11]</sup>采用信息熵研究了喷动床中 Shannon 熵和流型之间的关系,王晓萍等<sup>[12]</sup>对两相流的信息熵进行了研究,石磊等<sup>[13]</sup>应用 Shannon 熵研究了气液两相流输送流型及其稳定性得到了不同流动形态下 Shannon 熵的分布规律。Shannon 熵是对信号所携带系统的信息量大小的度量,不同的流动过程所包含的信息量是有差别的。不同输送条件下的压力信号,携带了其特有的流动特征信息。通过分析压力脉动时间序列的信息熵,获取 Shannon 熵与输送差压、风量及表观速度等之间的关系,则有可能建立信息熵与高压浓相输送过程中两相流流动特性之间的联系,进行输送形态的辨别。

## 1 Shannon 信息熵定义及其计算

1948 年,美国学者 C. E. Shannon 首次提出了 Shannon 信息熵的概念,信息熵是信息源紊乱程度的测度,表征了系统运动状态的不确定性(无序性)。可以证明,信息熵与热力学熵二者之间呈正比关系。从某种意义上讲,熵概念在热力学中即为热力学熵,应用到信息论中则是信息熵。信息论的发展使人们开始把统计物理看成是信息论的特例。20 世纪以来,信息熵已被广泛应用到众多科学领域,取得了丰硕的成果。

对于高压浓相输送过程中的任意一组离散压力信号  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 称之为状态空间,其值称为信息符号;信息符号  $x_i$  出现的概率为  $P_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 即  $X$  的概率向量  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 。附有信息符号出现概率的状态空间,称之为信源。信源一般表示为

$$[X; P] \quad \text{或} \quad X: \begin{bmatrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ p_1, p_2, \dots, p_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $p_i \geq 0, \sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。

$x_i$  的信息量  $f(p_i)$  是  $p_i$  的单调递减函数,在可加、连续且可导的条件下,其形式是惟一的,即

$$f(p_i) = -\log_b p_i \quad (2)$$

其中,  $b$  决定信息量的单位。当  $b$  为 2、e、10 时,信息量的单位分别为 bit (比特)、nat (奈特) 和 hart (哈特)。

对于信源 (1) 的信息量, Shannon 定义为各信息符号信息量的平均信息量 (信息熵), 用  $S(X)$  表示

$$S(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_b p_i \quad (3)$$

在本文中, Shannon 熵的单位均为 nat, 即

$$S(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i = \sum_{i=1}^n p_i \ln \frac{1}{p_i} \quad (4)$$

从信息量计算式 (1) ~ 式 (4) 中可以看出, Shannon 信息熵仅与信息源概率向量  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  有关, 而与信息符号的具体状态和取值无关。

从信息熵的定义可以看出, 输送系统越不稳定, 压力变化频率越快, 熵值就越大。输送过程的 Shannon 信息熵反映了管内两相流的流动形态和稳定性, 两相流运动越剧烈, 压力变化频率越大, 则系统的不确定性越高, Shannon 熵值就越大。

## 2 试验系统

高压浓相粉煤气力输送试验系统如图 1 所示, 高压氮气经过缓冲罐分成充压风、流化风和补充风 3 路。煤粉发料罐采用上出料式, 其结构如图 2 所示, 流化风流经布风板后对发料罐中的煤粉进行流化, 经提升段进入输送管道, 在发料罐出口引入补充风增强输送能力, 充压风则维持发料罐的压力。收料罐压力由排气管道上的电动调节阀根据设定值自动控制。发料罐和收料罐体积均为  $0.648 \text{ m}^3$ , 输送管为  $\phi 16 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 输送距离为 45 m, 煤粉实时质量由 3 个高精度箔式电子秤称量。压力传感器及差压传感器分别采用瑞士 Keller 公司生产的 PA-21SR 和 PD-23 型, 采集频率为 200 Hz, 精度为 0.3%; 充压风、流化风和补充风流量采用金属管转子流量计测量。压力、差压、质量和流量信号经过数据采集 A/D 转换板进入计算机存储和处理。可视段采用  $\phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  耐压石英玻璃作为观察窗口, 利用 FASTCAM-Net 系列高速摄

影仪，分辨率  $512 \times 240$ ，60FPS。被输送煤粉平均粒径为  $36 \mu\text{m}$ ， $\rho_s = 1350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，输送风为压缩氮气，缓冲罐气源最高压力为  $4.8 \text{ MPa}$ 。

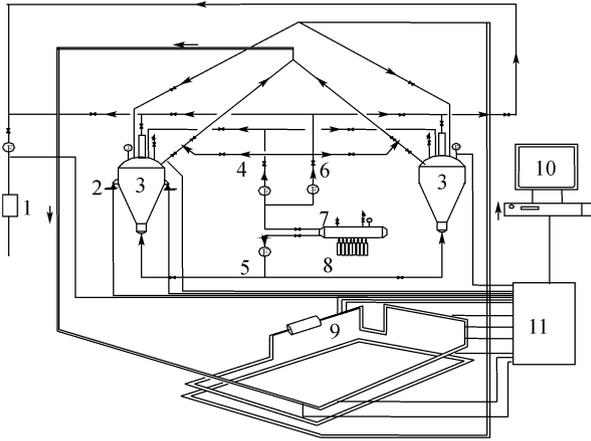


图 1 高压浓相粉煤气力输送试验系统

Fig. 1 Schematic diagram of dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal under high pressure

- 1—electric control valve; 2—weigh cell; 3—hopper;
- 4—pressurizing gas; 5—fluidizing gas; 6—supplement gas;
- 7—buffer tank; 8—nitrogen cylinder; 9—inspection window;
- 10—computer; 11—sensor and A/D converter

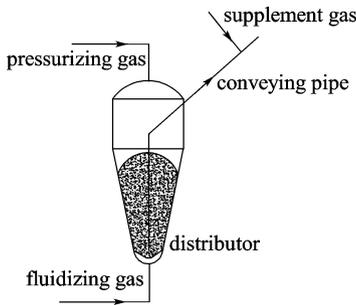


图 2 发料罐结构

Fig. 2 Diagram of feed hopper

### 3 结果与讨论

#### 3.1 Shannon 信息熵与流动形态

气力输送的流动形态主要分为 4 种：悬浮流、分层流、沙丘流和柱塞流。Owen 使用相图来描述水平管中所观察到的气固两相流流型，并得到国内外研究学者的认可<sup>[14-15]</sup>。水平管输送相图如图 3 所示，在粉煤质量流量不变的情况下，输送速度很大时，粉煤颗粒悬浮在管道中，呈均匀分布地被氮气流动输送，空隙率很大，压力损失主要是气体高速运动造成的；随着气速的降低，气相压力损失将减

小，处在气流中的粉煤颗粒的速度减慢而浓度增加，固相使压力损失增加，当压损的固相增加和气相减小平衡时，输送相图上出现压力损失的最小值，这时候的气流速度为经济气流速度。当气流速度大于这一点时，粉煤颗粒大多能悬浮在输送管内，呈悬浮流态；当速度小于经济气流速度时，粉煤便开始沉积在管底，流动变得异常复杂，压损再次开始增大，呈现分层流；继续减小流动速度，粉煤颗粒在管底大量沉积，压力损失因为粉煤浓度的增加而增大，呈现沙丘流或柱塞流。质量流量较大时，压力损失较大且经济气流速度较大。

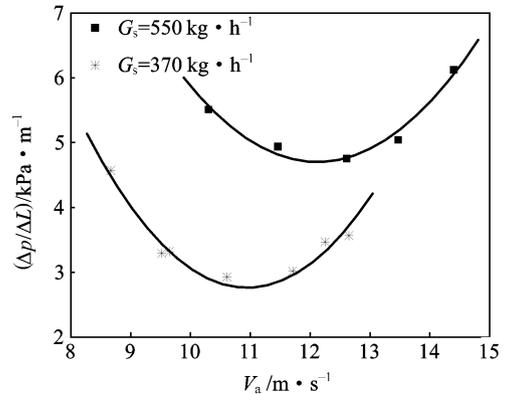


图 3 表观速度和差压之间的关系

Fig. 3 Differential pressure vs superficial gas velocity

图 4 为表观速度与 Shannon 信息熵之间的关系。从图中可以看出，Shannon 信息熵随着表观速度的减小呈先减小后增大的变化趋势，与图 3 中的相图变化规律相同，不同流动形态的 Shannon 信息熵值分度较好，对输送压力时间序列的 Shannon 信息熵分析，则有可能建立流型与 Shannon 信息熵之间的联系。当输送速度很大时，粉煤颗粒悬浮在管内，为悬浮流，气体输送速度较快，颗粒碰撞非常剧烈，压力变化频率较高，管内紊流度较高，不确定性较大，Shannon 信息熵值较大；随着输送速度的降低，压力损失减小，压力变化幅度及频率均有一定程度的降低，流动混乱程度有所降低，Shannon 信息熵值减小；当到达经济气流速度时，气相压损和固相压损之和达到最小值，此时是紊流度最低的悬浮流动，流动的混乱程度最低，Shannon 信息熵值最小。当输送速度低于经济气流速度后，粉煤颗粒开始沉积在管底，占据一定的管道截面，提高了气体实际流速，流动情况变得异常复杂，气流的运动变得不稳定，粉煤浓度增大，压

力损失上升, Shannon 信息熵开始增大。当继续降低流动速度时, 煤粉大量沉积在管底, 呈多沙丘状在管底滑动, 输送气体在剩余管道截面的实际速度并不降低, 当输送气体流过煤粉沙丘时, 相当于经过很多拉阀尔喷管, 气体速度时而增大时而降低, 且煤粉沙丘不稳定, 经常会出现坍塌和迁移, 只需要少量的煤粉就足以造成堵塞, 内部流动变得极其复杂, 混乱程度开始加剧, 稳定性大大降低, Shannon 信息熵增大。煤粉的质量流量越大, 经济气流速度处的 Shannon 信息熵值就越大。这主要因为煤粉的质量流量越大, 经济气流速度越高, 携带煤粉的量越多, 流动过程中颗粒碰撞频率及剧烈程度均较大, 混乱程度较大, Shannon 信息熵值就越大。

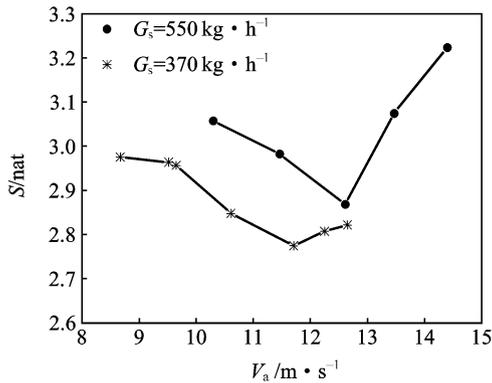


图 4 表观速度和 Shannon 信息熵之间的关系

Fig 4 Shannon entropy vs superficial gas velocity

### 3.2 流化风量与固气比及 Shannon 信息熵的关系

流化风穿过多孔底板进入发料罐, 在一定的气流速度下利用气体的动能把煤粉颗粒悬浮起来。这时, 颗粒间彼此稍有分离, 并且可以前后左右移动, 呈现出流体的特性。试验过程中保持收料罐压力和补充风量不变, 输送压差也不变, 流化风量与输送固气比及 Shannon 信息熵之间的关系如图 5、图 6 所示。

输送固气比是指输送的固体流量与输送气体的流量之比, 分为质量固气比、体积固气比和质量/体积固气比。在此选用质量/体积固气比, 能够较直观地反映出单位体积气体的输送能力。固气比与流化风量之间的关系如图 5 所示, 随着流化风量的增大, 固气比先增大后减小。在流化风量较小时, 出料口附近的煤粉被流化的效果较差, 颗粒移动时要消耗很大的能量, 煤粉的输送比较困难, 单位体积气体输送的煤粉的质量较小, 固气比较低;

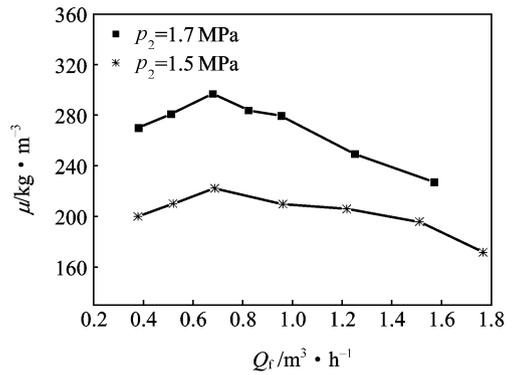


图 5 流化风流量和输送固气比之间的关系

Fig 5 Solid-gas ratio vs fluidizing gas volume flow rate

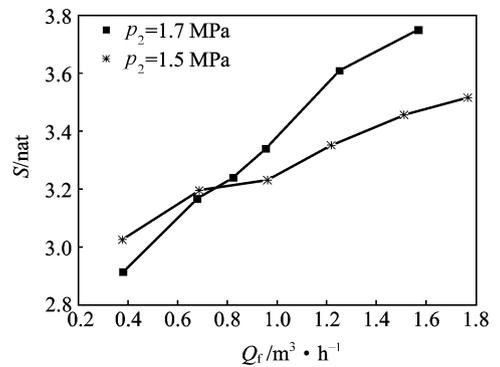


图 6 流化风流量和 Shannon 信息熵之间的关系

Fig. 6 Shannon entropy vs fluidizing gas volume flow rate

当流化风量增大时, 流化效果好转, 煤粉呈现出流体的特性, 流化风量的变化对煤粉质量流量影响较大, 煤粉流量增幅大于气体流量增幅, 固气比增大; 当流化风量过大时, 流化风的变化对煤粉的质量流量影响减缓, 煤粉流量增幅低于气体流量增幅, 固气比降低。所以随着流化风量的增大, 固气比先增大后减小。

流化风量与 Shannon 信息熵之间的关系如图 6 所示, 随着流化风量的增大, Shannon 信息熵值逐渐增大。在流化风量增大的过程中, 煤粉的质量流量和输送速度均增大, Shannon 信息熵的变化为多个参数变化共同作用的结果。当流化风量较小时, 增大流化风量, 固气比和输送速度均增大, 管内流动混乱程度加剧, Shannon 信息熵必然增大; 当流化风量继续增大时, 虽然输送固气比开始降低, 但输送速度和煤粉质量流量在增大。煤粉的质量流量和输送速度增大, 管内颗粒轴向输送速度增加, 径向脉动频率及幅度变强, 碰撞次数增多, 颗粒在管内纵横飞跃, 紊流度增强, 变得更为无序, Shannon 信息熵值增加。因此, 随着流化风量的增

大, Shannon 信息熵逐渐增大。

### 3.3 输送差压与固气比及 Shannon 信息熵的关系

气力输送中, 输送差压是输送动力的来源, 差压的大小直接决定输送气体可转化势能的大小。保持流化风量、补充风量和发料罐压力不变, 通过调节收料罐的压力来改变输送差压。输送固气比和 Shannon 信息熵随输送差压的变化如图 7、图 8 所示。

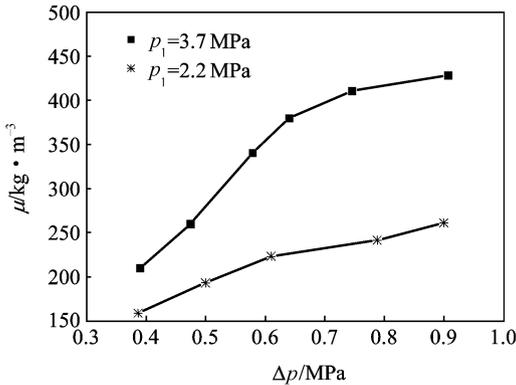


图 7 输送差压和固气比之间的关系

Fig. 7 Solid-gas ratio vs conveying differential pressure

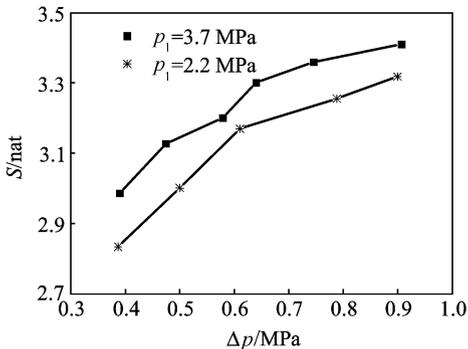


图 8 输送差压和 Shannon 信息熵之间的关系

Fig. 8 Shannon entropy vs conveying differential pressure

输送差压和固气比之间的关系如图 7 所示, 在 3 路风量不变的情况下, 随着输送差压的增大, 固气比逐渐升高。在保持发料罐压力不变, 逐渐增大输送差压的过程中, 输送动力增强, 有足够的差压将煤粉压入输送管路, 煤粉的质量流量增大, 虽然输送气体体积也因为收料罐压力降低而膨胀变大, 但其增大幅度远远小于煤粉质量流量增大的幅度, 故固气比升高。所以, 风量不变的情况下, 输送差压越大, 煤粉的质量流量越大, 固气比越高。从图 7 中还可以看出, 输送差压较小时, 输送差压的变化对固气比影响较大; 随着输送差压的增大, 差压的变化对固气比的影响有所减缓。

如图 8 所示, 随着输送差压的增大, Shannon 信息熵值逐渐增大; 随着差压的增大, Shannon 信息熵值的增大速率减缓。在输送差压增大的过程, 煤粉质量流量增大, 输送固气比升高, 则两相流中的煤粉颗粒浓度升高, 煤粉所占截面积增大, 流速增大; 同时因为收料罐压力降低, 管内平均压力下降, 输送气体体积增大, 输送速度升高。输送固气比升高, 速度增大, 必然导致管内流动加剧, 颗粒与颗粒及颗粒与管壁之间的碰撞频率和碰撞程度均升高, 颗粒脉动频率及幅度增大, 内部流动变得更为无序, Shannon 信息熵必然增大。输送差压较低时, 输送差压增大对固气比值的影响较大, Shannon 信息熵值增幅较大; 输送差压较高时, 输送差压的变化对固气比的影响有所减缓, Shannon 信息熵变化幅度也有所减小。

## 4 结 论

(1) 在煤粉质量流量不变时, Shannon 信息熵随着表观速度的增大先减小后增大, 不同流型的 Shannon 熵的区分度较好;

(2) 当输送差压和输送压力不变时, 随着流化风量的增大, 煤粉质量流量增大, 固气比先增大后减小, Shannon 信息熵逐渐增大;

(3) 在输送差压增大的过程中, 固气比和 Shannon 信息熵均增大。

通过改变输送风量、差压和压力等输送条件, 掌握了该系统的输送特性和规律。采用 Shannon 信息熵分析有助于认识高压浓相输送过程中的流型及其转变和管内气固两相流的动力学特性。不同操作条件下的 Shannon 信息熵值存在较大的差异, 规律性较强; 不同流型的 Shannon 信息熵区分度较好。本文对高压浓相粉煤气力输送过程中信息熵相互关系和变化规律进行了初步的探索, 下一步将进行变粒度、煤种和含水率等方面的输送试验, 深入定量研究, 获得相关判据。

### 符 号 说 明

$G_s$ ——煤粉的质量流量,  $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$

$p_1$ ——发料罐压力, MPa

$p_2$ ——收料罐压力, MPa

$\Delta p$ ——输送差压, MPa

$\Delta p/\Delta L$ ——单位长度上的压力损失,  $\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1}$

$Q_f$ ——流化风量,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

S——Shannon 信息熵, nat

$V_a$ ——表观速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$\mu$ ——固气比, 为单位体积的气体输送的煤粉质量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$\rho_s$ ——煤粉的真实密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

## References

- [1] Shen Xianglin (沈湘林), Xiong Yuanquan (熊源泉). Experimental study on dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal at high pressures. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2005, **25** (24): 103-107
- [2] Singer Timothy. Dense-phase pneumatic conveying: applications, system design, and troubleshooting. *Powder and Bulk Engineering*, 2003, **17** (3): 27-33
- [3] Gong Xin (龚欣), Guo Xiaolei (郭晓镭), Feng Jinhua (封金花), et al. High solids loading pneumatic conveying of pulverized coal. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (3): 640-644
- [4] Bai Bofeng (白博峰), Guo Liejin (郭烈锦), Zhao Liang (赵亮). Identification of flow regimes vertical upward steam-water two-phase flow using differential pressure fluctuations. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 1999, **50** (6): 799-805
- [5] Zhang Aihua (张爱华), Cao Changqing (曹常青). Development of on-line identification of steam (gas) -liquid two-phase flow regimes using differential pressure fluctuation. *Journal of Qinghai University* (青海大学学报), 2003, **21** (1): 37-41
- [6] Zhong Wenqi, Zhang Mingyao. Pressure fluctuation frequency characteristics in a spout-fluid bed by modern ARM power spectrum analysis. *Powder Technology*, 2005, **152** (3): 52-61
- [7] Li Hui. Application of wavelet multi-resolution analysis to pressure fluctuations of gas-solid two-phase flow in a horizontal pipe. *Powder Technology*, 2002, **125** (1): 61-73
- [8] Lu Xuesong, Li Hongzhong. Wavelet analysis of pressure fluctuation signals in a bubbling fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*, 1999, **75** (2): 113-119
- [9] Zhao Yanyan (赵艳艳), Li Liuren (李留仁), Liu Haifeng (刘海峰), Yu Zunhong (于遵宏). Chaotic characteristics of gas-solid flow in horizontal pipe. *Journal of East China University of Science and Technology* (华东理工大学学报), 2004, **30** (5): 510-513
- [10] Cho Yongjun, Kim Sajung, Nam Seokhee, Kang Yong, Kim Sangdone. Heat transfer and bubble properties in three-phase circulating fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 2001, **56** (21/22): 6107-6115
- [11] Zhong Wenqi (钟文琪), Zhang Mingyao (章明耀). Flow characteristics in spout-fluid bed by Shannon entropy analysis. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2005, **56** (12): 2303-2308
- [12] Wang Xiaoping (王晓萍), Zhen Ling (甄玲), Huang Hai (黄海), Chen Bochuan (陈伯川). Research on pressure fluctuations time serials by deterministic chaos theory and information entropy. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 2002, **23** (6): 596-599
- [13] Shi Lei (石磊), Zhang Zuoyi (张作义), Yang Ruichang (杨瑞昌). Shannon entropy characteristics of air-water two-phase flow regimes in vertical pipes. *Nuclear Power Engineering* (核动力工程), 2000, **21** (5): 411-415
- [14] Wypych Peter W, Yi Jianglin. Minimum transport boundary for horizontal dense-phase pneumatic conveying of granular materials. *Powder Technology*, 2003, **129** (1/2/3): 111-121
- [15] Jama Gregory A, Klinzing George E, Rizk Farid. Investigation of the prevailing flow patterns and pressure fluctuation near the pressure minimum and unstable conveying zone of pneumatic transport systems. *Powder Technology*, 2000, **112** (1): 87-93