

研究简报

# 颗粒与分布板的碰撞声信号分析 及其流化状态的识别

任聪静, 王靖岱, 阳永荣, 蒋斌波

(化学工程国家重点实验室 (浙江大学), 浙江大学化学工程与生物工程学系, 浙江 杭州 310027)

关键词: 声信号; 气固流化床; 起始流化速度; 起始湍动速度; 方差

中图分类号: TQ 021.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 04-0875-06

## Determination of flow regime by analysis of acoustic signals from impaction between particles and distributor

REN Congjing, WANG Jingdai, YANG Yongrong, JIANG Binbo

(State Key Laboratory of Chemical Engineering, Department of Chemical and  
Biochemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

**Abstract:** Acoustic signals emitted from particles and bubbles in the gas-solid fluidized bed were collected by the transducer located under the distributor and the result showed that the energy and deviation of acoustic signals varied regularly with superficial velocity. Superficial velocity was the minimum fluidizing velocity or the minimum turbulent velocity, while energy or deviation changed suddenly. Then a criterion to determine the change of flow pattern was obtained that when the ratio of acoustic energy or deviation reached the maximum, the velocity was the minimum fluidizing velocity, while the ratio of acoustic energy or deviation reached the next maximum the corresponding velocity was the minimum turbulent velocity. Experiments were carried out in a fluidized bed with inner diameter of 250 mm and polyethylene resin particles. The minimum fluidizing and minimum turbulent velocity obtained from the new method agreed well with those deducted from classical equations and traditional methods, including pressure difference method and pressure fluctuation method. In conclusion, an easy, sensitive, exact and on-line way to detect fluidizing velocity is presented, and this method is applicable to industrial equipment.

**Key words:** acoustic emission signals; gas-solid fluidized bed; minimum fluidizing velocity; minimum turbulent velocity; deviation

### 引 言

在气固流态化过程中, 流型的不同对反应装置

内气固接触、传热、传质都有重要影响, 并直接关系到反应器的生产能力、收率和选择性。因此, 研究流态化的分类及对其转换的判别, 对工业反应器

2007-10-25 收到初稿, 2008-01-07 收到修改稿。

联系人: 蒋斌波。第一作者: 任聪静 (1981-), 女, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (20490205); 国家高技术研究发展计划项目 (G20070040)。

Received date: 2007-10-25.

Corresponding author: JIANG Binbo. E-mail: jiangbb@zju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20490205).

的设计和优化操作非常必要,也是流态化领域研究的重要课题<sup>[1-2]</sup>。起始流化速度和起始湍动速度分别是判断固定床向鼓泡床、鼓泡床向湍动床转变的重要参数。目前文献中提及对于起始流化速度的判断一般用传统的压差法<sup>[3]</sup>和压力脉动法<sup>[4]</sup>。Yerushalmi 等<sup>[5]</sup>将压力脉动幅值达到最大时的气速定义为起始湍动速度,一般采用压力脉动法对其进行测量。虽然以上方法原理简单、方法直观,但是在判断过程中存在着很大的经验性和任意性,尤其是对发黏物料和细粉物料,因其压降随气速的增加波动剧烈,使得判断变得更加困难<sup>[6]</sup>。因此,寻找一种便捷以及实时在线检测起始流化速度和起始湍动速度的方法,对于提高气固流化床的监控能力和优化生产操作具有重要意义。

声波测量技术具有检测灵敏、环保安全、不侵入流场等特点<sup>[7-11]</sup>,王靖岱等<sup>[12]</sup>利用声发射技术对气固流化床壁面上采集的信号进行测量并进行多尺度分解,提出了基于声信号小波包分析的起始流化速度和起始湍动速度的判断准则。但由于该方法是将声发射传感器置于流化床壁面,灵敏度不高,不能第一时间检测到流化颗粒作用于分布板产生的信息,加之小波包分析存在着数据分析处理量大的缺点,不适用于实时在线要求严格的工业环境。基于此,本文利用声波检测技术,将声发射传感器置于分布板下方,实时采集此处颗粒运动和气泡运动所产生的声波信号并对其进行分析,研究其特征变量随气速的变化规律,期望提出起始流化速度和起始湍动速度的判断准则。

## 1 实验装置及方法

实验装置主体结构如图 1 所示。气固流化床为高 3000 mm、内径 250 mm 的透明有机玻璃床,静床高为 800 mm。分布板为多孔平板,孔径为 2.0 mm,开孔率为 2.6%,以空气作为流化气体,气速从 0 变化到  $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,操作温度为室温。声发射信号测量与数据采集分析系统(UNIAE 2003)由浙江大学联合化学反应工程研究所自行开发。系统包括声波接收装置、放大装置、信号采集装置和信号处理装置<sup>[10]</sup>。声波探头置于分布板下方中心处。实验采样频率为 200 kHz,采样时间为 10 s。实验中使用的粒子为线性低密度聚乙烯颗粒,其密度为  $944 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均粒径为 0.482 mm,粒径分布如表 1 所示。

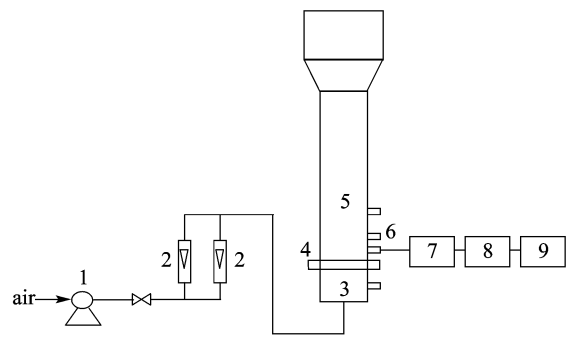


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental system setup

- 1—blower; 2—flowmeter; 3—mixing room;  
4—distributor; 5—fluidized bed; 6—acoustic sensor;  
7—preamplifier; 8—A/D convertor; 9—computer

表 1 颗粒粒径分布

Table 1 Particle size distribution

Diameter/ $\mu\text{m}$	Mass fraction/%
880	36.3
555	36.4
380	12.2
250	9.9
180	5.2

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 声波测量点的选择

声波信号包含了流化床内的综合动态信息,是颗粒特征和气泡特性多种因素相互作用的外在动态反映,而如何选择合适的测量点对信号采集的有效性和解决问题的针对性起着重要的作用。在气固流态化过程中,每一气泡的产生都由分布板上开始和发展,而颗粒则是在气泡带动下开始运动。因此,颗粒和气泡产生的声信号包含了丰富的颗粒碰撞和气泡运动信息,作用在分布板上的颗粒和气泡的信号第一时间反映了流态化的演化规律,因此,将声波探头置于分布板下方采集声信号,具有简易可行和实时在线的特征。

### 2.2 起始流化速度和起始湍动速度的测量

设声波信号的时间序列为  $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$ ,则各采样点的能量  $E$  为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} \quad (1)$$

信号的平均值  $\bar{x}$  为

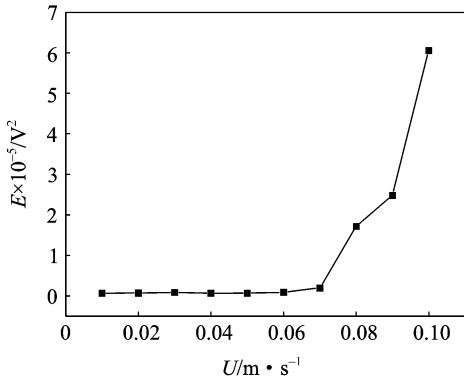
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2)$$

声波信号的方差  $S$  为

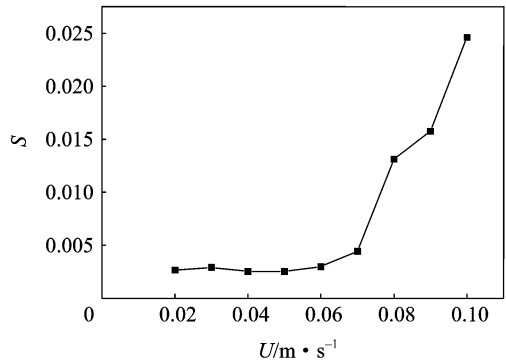
$$S^2 = [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_N - \bar{x})^2] / N \quad (3)$$

在内径为 250 mm 的实验室气固流化床装置中，将声发射传感器固定于分布板下方中心非开孔处，风速在  $0.01 \sim 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内变动，获得了不同风速下的声波信号。在前期的空白对比实验中，分别对空床时和加料 800 mm 时所得声信号进行频谱分析发现，空床声信号主要集中在较低的频段，因此在实验结果处理中将低频范围内的背景噪声进行了滤波处理。将不同风速下所得声信号进行分析，得到了声信号的能量  $E$  和方差  $S$  随风速的变化情况，结果如图 2 所示。能量代表了颗粒碰撞的强度，方差代表了颗粒碰撞的活跃程度。其中图 2 (a)、(b) 为小风速范围 ( $< 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 内  $E$  和  $S$  随风速的变化，图 2 (c)、(d) 则是大气速范围  $E$  和  $S$  的变化情况。由图 2 (a)、(b) 可以看

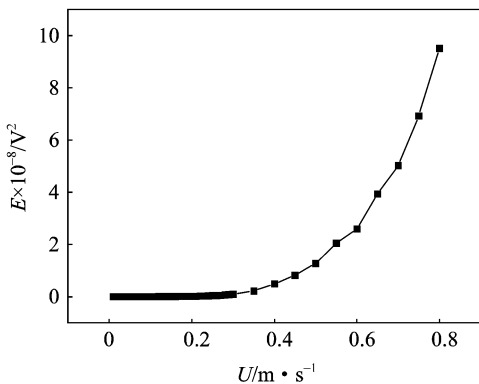
出，在风速小于  $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时，床内声波信号的能量和方差均接近于零，这是由于在这个风速范围内，流化床尚处于固定床阶段，床中的颗粒尚未流化，探头基本没有感受到颗粒碰撞的信号，因此声信号的能量和方差接近于零。随着风速的增加，当风速为  $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时，声信号能量和方差从零开始快速增加，产生了第 1 次突变变化，此时床内粒子开始运动，颗粒与颗粒之间、颗粒与分布板之间的碰撞开始加强，床内开始出现小气泡，气泡携带周围颗粒向上运动，继而使得全床颗粒开始松动，床层开始膨胀，流化床进入流化状态。此时，放置于分布板下方的声波探头明显感受到了颗粒、气泡作用在分布板上产生的声信号，第一时间指示了流化床内颗粒从静止到运动的变化情况。当整床颗粒进入流化状态后，随着风速的增加，床内逐渐产生更大尺寸的气泡，带动粒子向上运动，流化床充分流化。从图 2 (c)、(d) 可以看出，声波信号的能量和方差随风速的变化趋势基本一致。当风速从 0



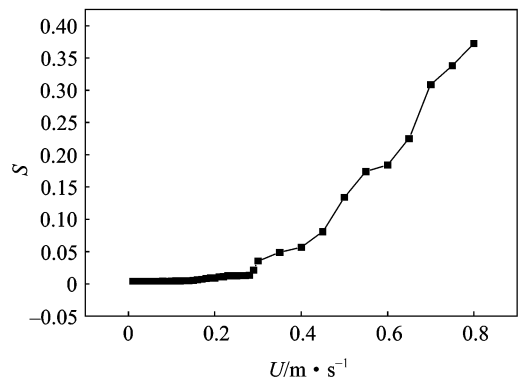
(a) relationship between energy and velocity ( $U < 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )



(b) relationship between variance and velocity ( $U < 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )



(c) relationship between energy and velocity



(d) relationship between variance and velocity

图 2 能量和方差随表观风速的变化关系

Fig. 2 Dependence of energy and deviation on superficial velocity

开始增加时, 声波信号的能量和方差随着气速增加基本不变, 处于一个比较平稳的状态, 并没有明显的变化。随着气速的逐渐增加, 颗粒与颗粒、颗粒与分布板之间的碰撞更加活跃, 产生的能量也随之增加, 并且增加的速率也逐渐变大, 此时声信号的能量和方差平稳增加。当气速达到  $0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 流化床内大气泡数量开始逐渐减少, 此时气泡破碎的过程多于气泡生长聚并的过程, 床内气泡从少量的大气泡向大量的小气泡过渡, 流型由鼓泡态向湍动态转变。此时颗粒运动更为剧烈, 加之大量小气泡的产生更加促进了全床颗粒的运动和混合。由图 2 (c)、(d) 可以发现, 当气速达到  $0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以后, 声信号的能量和方差随气速开始急剧增加, 即在气速为  $0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 能量和方差产生了第 2 次突跃变化。此时放置在分布板下方的声波探头再一次感受到了流化床内颗粒运动状况的改变, 指示了流型的转变。

由于在流型转变处存在能量和方差的突变, 为了更清晰地判断流型的转变, 本文定义了声信号的能量比和方差比的概念

$$R_E(j) = E_{j+1}/E_j \quad (4)$$

$$R_S(j) = S_{j+1}/S_j \quad (5)$$

式中  $j$  表示气速从  $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  开始的第  $j$  个采样点。

图 3 给出了声波信号能量比及方差比随气速的变化关系。从图中可以看出, 大部分能量比和方差比值都在 1 左右波动, 说明能量和方差并没有明显变化, 床内粒子和气泡的运动状态没有发生很大的变化。而在表观气速分别为  $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  处存在两个突变的峰, 即在这两个气速下能量和方差有了阶跃性的变化和显著的增加, 从图中可以看出,  $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  处产生的峰值比  $0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  处大, 气速为  $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时的能量比和方差比为 8.8, 气速为  $0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时的能量比和方差比为 4.8。由前面的分析可知,  $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时床层开始流化, 产生气泡, 而正是气泡的产生、生长、上升和破裂带动了流化床内颗粒的运动, 因此, 当颗粒与分布板开始撞击时, 声信号能量产生第 1 次突跃, 颗粒的运动也随之活跃, 此时的表观气速为起始流化速度。当气速为  $0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 由于床层中气泡破碎的速率超过气泡生长聚并的速率而导致床内的气泡尺寸变小, 流化床由鼓泡状态向湍动状态转变。进入湍动状态后, 由于众多小气泡的作

用, 使得颗粒的运动更为活跃, 颗粒与颗粒、颗粒与分布板之间的作用更加剧烈, 由此产生第 2 次声信号能量和方差的突跃, 此时表观速度达到起始湍动速度。而起始流化速度的能量比和方差比大于起始湍动速度的比值则是因为声波探头对于气泡从无到有变化的检测比气泡从大到小变化的检测要敏感。在相同的操作条件下, 重复实验, 得到了同样的实验结果。因此, 利用声发射技术, 由分布板下方直接采集声信号, 能准确地测量气固流化床的起始流化速度和起始湍动速度, 实现流型的实时在线判断。

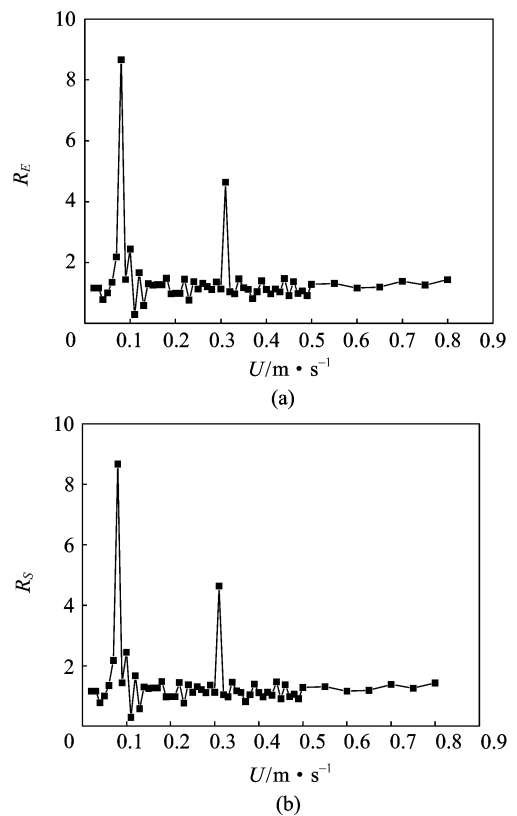


图 3 能量比和方差比随表观气速的变化关系  
Fig. 3 Dependence of ratio of energy and ratio of deviation on superficial velocity

根据上述分析, 提出了基于声发射技术的气固流化床流型转变的判据, 即当分布板下方的声波信号的能量比或方差比达到最大值时, 此时表观气速为起始流化速度。当声波信号的能量比或方差比达到次最大值时, 此时表观气速为起始湍动速度。

### 2.3 与其他方法的比较

作为验证和对比, 本文采用经典的压降法和压力脉动法分别测量了起始流化速度和起始湍动速

度。由压降法测量起始流化速度所得结果见图 4，由图可以得出起始流化速度为  $0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。压力脉动幅值和风速的变化关系如图 5 所示，根据前面对起始湍动速度的定义（即压力脉动幅值达到最大时的风速为起始湍动速度），可以得到起始湍动速度为  $0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见，利用声波法所得的流化速度与由压降法和压力脉动法所得结果基本吻合。

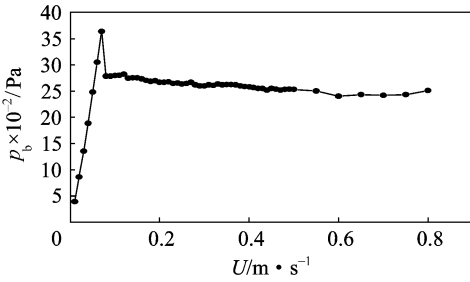


图 4 压降随表观风速的变化关系

Fig. 4 Relationship between pressure difference and superficial velocity

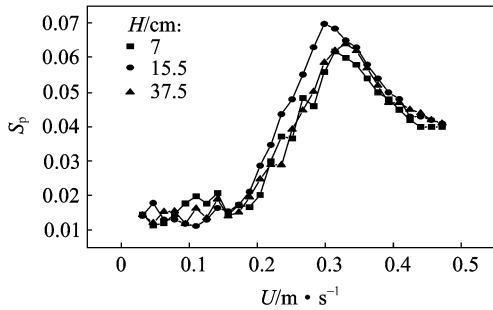


图 5 压力脉动幅度随表观风速的变化关系

Fig. 5 Relationship between amplitude of pressure fluctuation signals and superficial velocity

为了进一步验证实验结果的可靠性，利用 Wen-Yu 公式和金涌等<sup>[13]</sup>提出的公式分别对起始流化速度和起始湍动速度进行计算，公式见式 (6)、式 (7)，计算结果列于表 2。由表 2 可知，利用声波法提取有效的特征参数能同时实现对起始流化速度和起始湍动速度的准确测量。

$$U_{mf} = \frac{d_p^2}{1650\mu}(\rho_p - \rho)g \quad Re_p < 20$$

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p}{24.5\rho}(\rho_p - \rho)g \quad Re_p > 1000 \quad (6)$$

$$\frac{U_c}{\sqrt{gd_p}} = \left( k \frac{D_i}{d_p} \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \frac{\rho_{g0}}{\rho_g} \right)^{0.27} \left( \frac{\mu_{g0}}{\mu_g} \right)^{0.2} \quad (7)$$

### 3 结 论

基于声测量技术，将声波探头置于气固流化床

表 2 不同方法所得起始流化速度和起始湍动速度的比较  
Table 2 Comparison of  $U_{mf}$  and  $U_c$  measured by experiment and formula

Formula and method	$U_{mf}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$U_c/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Wen-Yu formula	0.10	—
Ref. [13]	—	0.31
AE method	0.07	0.31
pressure method	0.08	—
pressure fluctuation method	—	0.32

分布板下方非开孔处进行信号测量，采用频谱分析，对测量所得声信号的能量和方差进行分析，发现两者随风速呈规律性的变化，在起始流化速度和起始湍动速度附近均有阶跃性的增长。基于此，本文提出了能量比和方差比的概念，发现在流型转变处存在能量比和方差比的极值，由此得到了声波法测量气固流化床起始流化速度和起始湍动速度的判据，即当声信号能量比或方差比达到最大值时对应的表观风速为起始流化速度，能量比或方差比达到次最大值时对应的表观风速为起始湍动速度。实验结果与公式计算和实验方法（经典的压差法、压力脉动法）所得的数据符合较好。由于声信号的能量和方差的变化能较好地反映气泡以及颗粒的运动状态，因此，利用声波法将声波探头置于分布板下方，借助特征量——声波能量或方差，能够简便快捷、灵敏准确地指示流型的转变，实现起始流化速度和起始湍动速度的在线实时测量。

### 符 号 说 明

- $D_i$ ——流化床有效直径，mm
- $d_p$ ——颗粒的平均粒径，mm
- $E$ ——声信号平均能量， $V^2$
- $H$ ——压力脉动测量点高度，cm
- $p_b$ ——压降，Pa

$R_E(j)$  ——声信号的能量比

$R_S(j)$  ——声信号的方差比

$Re_p$ ——颗粒 Reynolds 数

$S_p$ ——压力脉动信号脉动幅度

$U$ ——表观风速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$U_c$ ——起始湍动速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$U_{mf}$ ——起始流化速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$x_i$ ——声波采集信号序列第  $i$  个采样点信号

$\mu_g$ ——气体黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$

$\mu_{g0}$ ——标准状况下气体黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$

$\rho_g$ ——气体密度， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

$\rho_{g0}$ ——标准状况下气体密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

$\rho_p$ ——聚合物颗粒密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

## References

- [1] Huang Yilun (黄铁伦), Huang Hai (黄海), Chen Bochuan (陈伯川). Application of complexity in flow regimes identification of gas-solid fluidized beds. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities* (高校化学工程学报), 2004, **4** (18): 453-458
- [2] Bakshi B R, Zhong H. Analysis of flow in gas-liquid bubble columns using multi-resolution methods. *Trans. IChemE.*, 1995, **73**: 608-614
- [3] Chen Gantang (陈甘棠). *Chemical Reaction Engineering* (化学反应工程). Beijing: Chemical Industry Press, 1989
- [4] Liang Weihua (梁卫华), Wang Jinfu (王金福), Han Lu (韩禄). Prediction of minimum fluidization velocity of silicon particle system with the pressure fluctuation method. *The Chinese Journal of Process Engineering* (过程工程学报), 2002, **2** (1): 1-6
- [5] Yerushalmi, Cankurt N T. Further studies of the regimes of fluidization. *Powder Technology*, 1979, **24**: 187-205
- [6] Koda H, Kurisaka T. Research and development of gas phase polymerization process of propylene//Fluidization Science and Technology Conference. Beijing: China-Japan Symposium Science Press, 1985: 410-411
- [7] Cody G D, Bellows R J, Goldfarb D J, Wolf H A, Storch G V. A novel non-intrusive probe of particle motion and gas generation in the feed injection zone of the feed riser of a fluidized bed catalytic cracking unit. *Powder Technology*, 2000, **110**: 128-142
- [8] Jonathan W R Boyd, Julie Varley. The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes. *Chemical Engineering Science*, 2001, **56**: 1749-1767
- [9] Zhao Guibing (赵贵兵), Yang Yongrong (阳永荣), Hou Linxi (侯琳熙). Mechanism of acoustic emission and application on diagnosis of malfunction in fluidization. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2001, **52** (11): 941-943
- [10] Yang Yongrong (阳永荣), Hou Linxi (侯琳熙), Yang Baozhu (杨宝柱), Liu Chengwu (刘诚午), Hu Xiaoping (胡晓萍), Wang Jingdai (王靖岱), Chen Jizhong (陈纪忠). Technique and equipments in gas-solid fluidized beds based on AE measurement; CN, 1544140. 2006
- [11] Yang Yongrong (阳永荣), Hou Linxi (侯琳熙), Wang Jingdai (王靖岱). The study on particle size distribution in gas-solid fluidized beds based on AE measurement. *Prog. Nat. Sci.* (自然科学进展), 2005, **15** (3): 380-384
- [12] Wang Jingdai, Yang Yongrong, Ge Pengfei, Shu Weijie, Hou Linxi. Measurement of the fluidized velocity in gas-solid fluidized beds based on AE signal analysis by wavelet packet transform. *Science in China Series B: Chemistry*, 2007, **50** (2): 284-289
- [13] Cai Ping (蔡平), Jin Yong (金涌). The judgement of transition from bubble fluidized to turbulent fluidized. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 1986, **37** (4): 391-401