

气-固流化床中颗粒碰撞压力时间序列信号分析与随机模拟

郝晓刚¹, 孙彦平¹, 石炎福²

(1. 太原理工大学化工学院, 山西 太原 030024; 2. 四川大学化工学院, 四川 成都 610065)

摘要:对气-固流化床中颗粒碰撞压力的波动现象及其时间序列信号的统计特征进行了探讨. 分析结果表明, 颗粒碰撞压力的波动规律与气泡的运动密切相关, 所测颗粒碰撞压力是由气泡运动所引起的尾涡颗粒动量传输的结果. 用自回归模型对颗粒碰撞压力信号进行了随机模拟, 模拟结果与实测结果有较好的相似性.

关键词:流化床; 颗粒碰撞压力; 时间序列; 随机模拟

中图分类号: TQ021 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2001)03-0257-05

1 前言

波动现象是气-固流态化的基本特征. 目前国内外对波动现象的研究主要集中在压力波动及空隙率波动方面^[1-3], 对颗粒碰撞压力信号的研究则未见报道. 颗粒碰撞压力与多相流模型的建立、流态化的稳定性以及流化床中物体受力和磨损等密切相关^[4,5]. 本文对实验中获得的颗粒向上碰撞压力信号进行分析, 以了解和掌握其波动规律和特征. 同时尝试用自回归模型获得颗粒碰撞压力的模拟序列, 与实测波动信号进行比较, 为流化床设计提供方便.

2 时间序列信号处理

对作为时间函数的动态信号的完整描述需从幅域、时域和频域等三个领域进行^[6]. 通过频谱分析可求得动态信号中的各个频率成份和频率分布范围, 以及动态信号中各个频率成份的幅值分布和能量分布; 通过相关分析可以从时域上了解波动信号内部的相异性, 是鉴别信号的有力工具.

时间序列信号 $x(t)$ 的自功率谱密度函数 $G(f)$ 定义为

$$G(f) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{2}{t} |X(f)|^2, \quad (1)$$

式中 $X(f)$ 是按下式定义的时间序列信号 $x(t)$ 的傅立叶变换:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt. \quad (2)$$

在计算机进行信号处理时, 常将 $X(f)$ 离散为

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-i2\pi nk/N}, \quad (3)$$

则相应地有

$$G(f) = \frac{2\Delta t}{N} |X_n|^2. \quad (4)$$

收稿日期: 2000-11-01, 修回日期: 2000-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 20006011)

作者简介: 郝晓刚(1967-), 男, 山西省榆社县人, 博士, 副教授, 化学工程专业.

随机信号 $x(t)$ 的自相关系数 $\rho(\tau)$ 表示为

$$\rho(\tau) = \frac{C_{OV}(\tau)}{\sigma^2}, \quad (5)$$

自相关系数表达了同一点在不同瞬时的波动信号之间的线性相依性。

由实测样本序列 $x(t)$ (其容量为 n) 估计的自相关系数 r_k 为

$$r_k = \frac{\hat{C}_k}{\hat{\sigma}_t \hat{\sigma}_{t+k}}, \quad (6)$$

式中样本协方差 \hat{C}_k 和方差 $\hat{\sigma}_t, \hat{\sigma}_{t+k}$ 分别以下列各式计算:

$$\hat{C}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}_t)(x_{t+k} - \bar{x}_{t+k}), \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_t = \left[\frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}_t)^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_{t+k} = \left[\frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} (x_{t+k} - \bar{x}_{t+k})^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

式中均值

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} x_t, \quad (10) \quad \bar{x}_{t+k} = \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} x_{t+k}. \quad (11)$$

3 实验装置及测试方法

实验装置主要由气固流化床实验系统及多通道数据采集与分析系统组成,如图 1 所示.流化床为内径 90 mm 的有机玻璃管,高 1 m;供气系统主要由空气压缩机、稳压罐、并联的转子流量计组成.在线数据采集与分析系统的硬件主要由 A/D 转换器、PC/AT286 微型计算机及其配套设施组成.从多路传感器来的电压信号经放大器同步进入采集系统后,在采集软件的控制下即可实现

不同方式的信号采集.实验物料为玻璃珠和聚苯乙烯颗粒,粒径分别为 0.40~0.56, 0.56~0.71, 0.71~0.90 mm,颗粒向上碰撞压力采用自制的膜式应变传感器^[7]测定,气体压力的测定选用 CYG19C 型高精度固态压阻式小差压传感器,空隙率采用中科院化冶所研制的光纤空隙率测定仪进行测定.

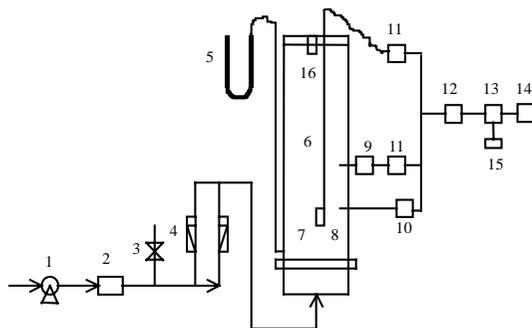


图 1 实验装置及流程

Fig.1 Experimental apparatus

1. Air compressor
2. Buffer tank
3. Valve
4. Rotameter
5. Manometer
6. Fluidized bed
7. Particle impact pressure transducer
8. Fiber optic probe
9. Pressure probe and transducer
10. Voidage meter
11. Amplifier
12. A/D converter
13. Computer
14. Recorder
15. Printer
16. Fixture

4 实验结果描述与参数分析

4.1 实验结果描述

颗粒碰撞压力的波动曲线如图 2 所示.在初始流化状态下,颗粒碰撞压力曲线只在零线附近有轻微扰动,鼓泡之后波动曲线上开始出现一系列突起的峰值,产生较大波动,且随气速增加而波动加剧^[8].比较同步采集到的空隙率波动

信号可知,在床层中心位置通过的泡大而频繁,而越靠近边壁区气泡的数量越少,壁面位置偶尔才有气泡通过,颗粒碰撞压力与气泡的运动密切相关,颗粒碰撞压力波动曲线与空隙率波动曲线有较好的对应关系,可推断颗粒碰撞压力主要是气泡尾涡颗粒碰撞测压传感器的结果^[7]。在同样的气速($U-U_{mf}$)条件下,玻璃珠床中的颗粒碰撞压力峰值远大于聚苯乙烯床中的颗粒碰撞压力峰值,表明颗粒碰撞压力与颗粒种类有关;床中心位置测得的颗粒碰撞压力波动曲线比壁面处剧烈得多,表明颗粒碰撞压力与径向位置有关;波动程度还随床高而异,在初始流化床高以下的浓相鼓泡区波动幅度随床高增加而增加,超过初始流化高度后波动幅度随床高增加而迅速降低。此外,实验还表明静床高对颗粒碰撞压力波动影响不大。

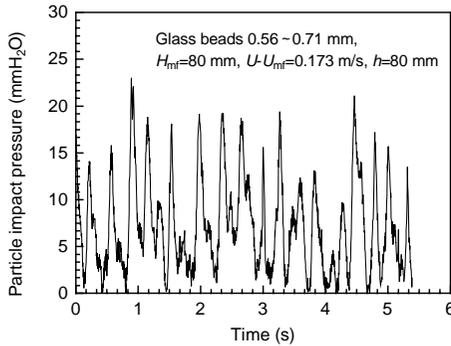


图 2 颗粒碰撞压力时间序列信号
Fig.2 Time series signal of particle impact pressure

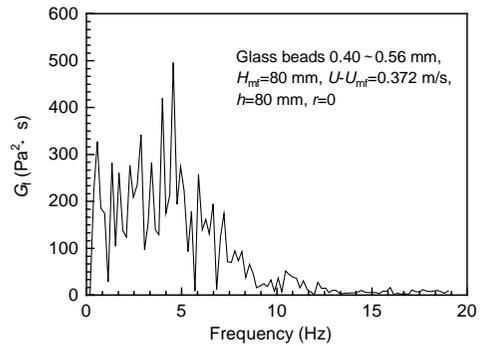


图 3 颗粒压力信号功率谱密度
Fig.3 Power spectral density of particle pressure

4.2 功率谱密度分析

颗粒碰撞压力信号的功率谱密度如图 3 所示。分析表明,当气速较低时床中心信号功率谱密度图具有多峰特征且各峰值的数量级大致相当,与主峰相差不大,主峰频率偏低。充分鼓泡以后主峰比较突出,玻璃珠床中主频在 4~5 Hz 之间,聚苯乙烯颗粒床中的主频范围为 5~7 Hz,靠近壁面处功率谱密度图较分散,主频减小。在空隙率信号的功率谱密度图中也发现有类似现象,因为空隙率信号的主频对应着探头端面经过的气泡频率,因而证实了颗粒压力主要是气泡尾涡颗粒碰撞物体的结果。压力波动信号的谱分析表明,充分流化以后其主频与床中心颗粒碰撞压力信号主频接近,但不同径向位置其功率谱密度图相差不大。

4.3 自相关系数分析

表 1 列出了颗粒碰撞压力波动信号的各阶自相关系数的一些分析结果。

表 1 颗粒压力波动信号的自相关系数
Table 1 Auto correlation coefficient of particle impact pressure

$U-U_{mf}$ (m/s)	0.173 ¹⁾			0.372 ¹⁾			0.042 ²⁾			0.219 ²⁾		
Bed height (mm)	35	55	80	35	55	80	55	80	55	80	80	
R(1)	0.7437	0.7833	0.7845	0.7166	0.7437	0.7431	0.8559	0.8677	0.9414	0.9156		
R(2)	0.5135	0.5932	0.6223	0.4988	0.5468	0.5981	0.8446	0.8651	0.8783	0.8234		
R(3)	0.3504	0.4105	0.5105	0.3633	0.3666	0.4545	0.7654	0.7445	0.8191	0.7086		
R(4)	0.1917	0.2577	0.3789	0.1657	0.2183	0.2859	0.6983	0.6909	0.7542	0.5829		
R(5)	0.0922	0.1588	0.2691	0.1111	0.0951	0.1755	0.6222	0.6415	0.6733	0.4574		
R(6)	0.0201	0.0875	0.1785	0.0321	0.0155	0.0763	0.5523	0.6024	0.5937	0.3455		
R(7)	0.0457	0.0152	0.0988	0.0545	0.0184	0.0011	0.4671	0.5334	0.5187	0.2345		
R(8)	0.1011	0.0412	0.0245	0.1433	0.0377	0.0466	0.3881	0.4596	0.4273	0.1359		

Note : 1) 0.40~0.56 mm glass beads, sampling frequency 120 Hz, 2) 0.40~0.56 mm polystyrene, 350 Hz.

颗粒碰撞压力与空隙率信号的自相关分析表明两者亦颇为相似,同一点信号的自相关系数从初始流化开始随气速增加而增加,达到稳定流化以后随气速增加而减小,表明在初始流化状态波动为纯随机过程,时间相依性最差,随着气速增加形成稳定的气泡流,信号相依性增强,之后随气速增加气泡开始发生聚合、破裂,湍动加剧,信号的时间相依性减弱.随床高增加,自相关系数略有增加,表明上部形成气泡较稳定,时间相依性好,而较低位置分布板上气泡迅速聚合,还未生成稳定气泡,时间相依性差.另外较低气速空隙率自相关系数下降缓慢,气速增加时,自相关系数下降趋势加快.

5 自回归模型及随机模拟结果

5.1 时间序列信号的自回归模型

一般而言,时间序列中包括确定成份和随机成份,后者又包括相依成份和纯随机成份.欲随机模拟时间序列,需先随机模拟序列中的纯随机成份(序列),再依时序将其叠加在其它成份(这些成份采用有关的模型计算)之上,即得模拟的时间序列.

纯随机序列的随机模拟采用蒙特卡洛法,首先模拟[0,1]区间上的均匀分布的纯随机序列(简称随机数),再将随机数转换为指定分布的纯随机序列,即为随机模拟的纯随机序列.

自回归[AR(p)]模型的一般形式为

$$x_t = \mu + \varphi_1(x_{t-1} - \mu) + \varphi_2(x_{t-2} - \mu) + \dots + \varphi_p(x_{t-p} - \mu) + \varepsilon_t \quad (12)$$

式中 p 为自回归阶数, μ 为序列的均值.一般假定 ε_t 为独立随机序列(白噪声序列),且假定服从均值为零、方差为 σ^2 的正态分布,即 $N(0, \sigma^2)$.当模拟出纯随机序列后,通过 $AR(p)$ 模型以原始序列作为初值输入,即可模拟出 $AR(p)$ 序列,模型中有参数 $p+2$ 个,即 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 以及 μ 和 σ^2 ,前 p 个参数为自回归系数,后 2 个参数为序列的均值和方差,分别根据矩法估计^[9]来确定.

将 μ, σ 和 φ_i 的矩法估计 $\bar{x}, s, \hat{\varphi}_i$ 代入式(12)得

$$x_t = \bar{x} + \hat{\varphi}_1(x_{t-1} - \bar{x}) + \hat{\varphi}_2(x_{t-2} - \bar{x}) + \Lambda \Lambda + \hat{\varphi}_p(x_{t-p} - \bar{x}) + s\sqrt{1 - \hat{\varphi}_1 - \hat{\varphi}_2 - \Lambda \Lambda - \hat{\varphi}_p} \varepsilon_t \quad (13)$$

理论上模型中阶数 p 越大则模拟序列越可靠,但对于具有截尾性的时间序列信号,当自相关系数接近零时增大阶数已无意义,因此可根据采样频率与自相关系数值确定阶数.

用 FORTRAN 语言编制了模拟程序,可以对各种动态信号进行随机模拟.

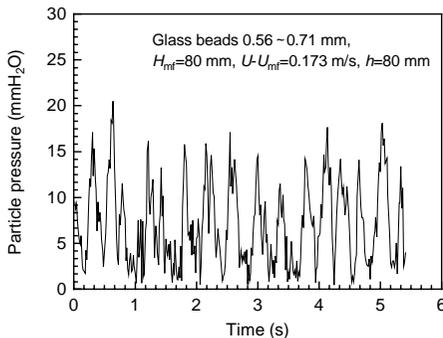


图4 颗粒压力信号模拟序列
Fig.4 Simulated series of particle pressure

5.2 随机模拟结果比较

通过 $AR(p)$ 模型模拟了颗粒碰撞压力波动信号,由图 4 可见,模拟结果与原始信号(图 2)非常相似.表 2 给出了与图相对应的信号原始序列与模拟序列的统计特征,可进一步说明模拟结果的可靠性.

表 2 原始序列与模拟序列统计特征比较
Table 2 Comparison of statistical characteristics of real series with simulated ones

Series	Av.	S. D. ¹⁾	R(1)	R(2)	R(3)	R(4)	R(5)	R(6)
Real.	7.195	24.55	0.788	0.652	0.533	0.327	0.108	0.011
Simu.	7.023	19.99	0.764	0.641	0.503	0.293	0.091	-0.01

Note: 1) Standard deviation

6 结 论

(1) 气-固流化床内颗粒碰撞压力信号的扰动与气泡的行为有关, 波动主频在 0~10 Hz 范围之内, 空隙率信号与颗粒碰撞压力信号的统计特征颇为相似. 分析表明, 颗粒碰撞压力的波动是气泡与尾涡颗粒碰撞物体表面的结果.

(2) 自回归模型形式简单, 又能较好地表征波动信号的统计特征, 随机模拟结果合理、可靠, 表明用随机模拟来研究流化床中的动态信号是一个可行的办法.

符号表:

\hat{C}_k	样本协方差	$R(p)$	p 阶自相关系数	ϕ_i	自回归系数
$C_{\alpha}(\tau)$	协方差	r_k	样本序列自相关系数	$\hat{\phi}_i$	自回归系数矩估计
f	采样频率 (s^{-1})	s	方差矩估计	ε_i	纯随机成份
$G(f)$	功率谱密度函数	t	采样时间 (s)	ξ_i	标准正态分布变量
H_{mf}	初始流化床高 (m)	Δt	离散采样时间间隔 (s)	μ	序列均值
h	距分布板距离 (m)	U	表观气速 (m/s)	$\rho(\tau)$	自相关系数
k	自相关系数阶数	U_{mf}	初始流化速度 (m/s)	σ^2	方差
N	总采样数	\bar{x}	均值矩估计	$\hat{\sigma}_i^2$	样本方差
n	实测样本序列容量	\bar{x}_t	样本均值		
p	自回归阶数	$x(t)$	时间序列		

参考文献:

- [1] Fan L T, Ho Tho Ching, Hiraoka S, et al . Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed [J]. *AIChE Journal*, 1981, 27(3): 388–396.
- [2] 蔡平, 缪棕, 俞芷青, 等. 气-固流化床压力信号的数学特征及其分析方法 [J]. *化工冶金*, 1990, 11(2): 114–122.
- [3] 李静海, Reh L, 董元吉, 等. 不同流态化区域中多方面行为的交叉比较 [A]. 第五届全国流态化会议文集 [C]. 北京, 1990. 110–113.
- [4] Campbell C S, Wang D G. A Particle Pressure Transducer Suitable for Use in Gas-fluidized Beds [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1990, (1): 1275–1279
- [5] 郝晓刚, 石炎福, 余华瑞. 气固流化床中物体受力研究进展 [J]. *化工机械*, 1998, 25(3): 178–182.
- [6] 应怀焦. 波形和频谱分析与随机数据处理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1985. 21–26.
- [7] 何智灵, 郝晓刚. 气固流化床中颗粒碰撞压力的测量 [J]. *化工装备技术*, 2000, 21(3): 15–18.
- [8] 郝晓刚. 气固流化床中颗粒碰撞压力的研究 [J]. *化学工业与工程*, 1998, 15(4): 6–10.
- [9] 杨位钦, 顾岚. 时间序列分析与动态数据建模 [M]. 北京: 北京工业学院出版社. 1987. 99–105.

Analysis and Stochastic Simulation of the Time Series Signal of Particle Impact Pressure in Gas Fluidized Beds

HAO Xiao-gang¹, SUN Yan-ping¹, SHI Yan-fu²

(1. *Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;*

2. *Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)*

Abstract: The fluctuation of particle impact pressure and the stochastic characteristic of time series signal are investigated. Analysis shows that the fluctuation of the particle impact pressure has close relationship with the motion of bubbles. The particle pressure measured in experiments is the result of the momentum transfer of a body of solids in the wake of a bubble striking an object. Stochastic signals are also simulated using auto regression [$AR(p)$] model and the results are very similar to the real signals.

Key words: fluidized bed; particle impact pressure; time series; stochastic simulation