

声发射信号分析与气-固两相流粒径测量

王志春,袁小健,王月明,李海广

(内蒙古科技大学 信息工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:气-固两相流相关参数的实时检测对过程控制和高效运行具有重要的意义。针对现有气-固两相流参数检测法的缺陷,依据经典声发射理论,设计一套空气-玻璃微珠的声发射信号检测装置,进行试验并评价。选用不同粒径的玻璃微珠在撞击速度分别为 1.98 m/s、2.80 m/s、3.40 m/s 和 4.00 m/s 下,获取气-固两相流的速度、粒径的声发射信号,并采用功率谱估计对其进行分析。试验发现,功率谱估计的幅值、面积与固相颗粒的撞击速度、粒径呈良好的线性关系,通过验证试验,粒径检测的相对误差小于 8.5%。因此,声发射结合功率谱估计的方法测量固相颗粒粒径是可行的。

关键词:固相颗粒检测;气-固两相流;声发射;功率谱估计;相对误差

中图分类号:TQ018; TN911.23 **文献标识码:**A

Analysis of Acoustic Emissions and Measurement of Particle Sizes From Gas-solid Two-phase Flow

WANG Zhichun, YUAN Xiaojian, WANG Yueming, LI Haiguang

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The real-time measurement of the relative parameters of the gas-solid two-phase flow has great significance for the process control and efficient operation. For the deficiencies of existing parameters measurement method of gas-solid two-phase flow, a set of acoustic emission signal detecting device with air-glass bead has been designed, tested and evaluated according to the classic acoustic emission theory. The different sizes of glass beads have been chosen for acquisition of acoustic emission (AE) signals of velocity and particle sizes in gas-solid two-phase flow under the impact velocity of 1.98 m/s, 2.80 m/s, 3.40 m/s and 4.00 m/s respectively, and analyzed by the power spectrum estimation. The result shows that there are good linear relationship between the magnitude and the area of the power spectrum estimation with the impact velocity, particle sizes. The verifying experiment results show that the relative error of particle size measurement is less than 8.5%. Therefore, the combination of AE and power spectrum estimation is feasible and effective for measuring the particle size of the solid phase.

Key words: solid phase particle measurement; gas-solid two-phase flow; acoustic emission; power spectrum estimation; relative error

0 引言

在日常生活及工业生产中,气-固两相流广泛存在,尤其在化工、环境、煤炭及食品等领域起着不可替代的作用,如电厂中管道气力输送、化工中气-固搅拌及环境中沙尘监测等。因此,实时在线测量气-固两相流的相关参数对于工业生产的监测、控制和可靠运行具有重要的意义^[1]。在参数检测中,固相

颗粒粒径、浓度及速度是 3 个重要的参数。颗粒粒径的检测方法有电感应法、光散射法^[2]及超声法^[3]等。固相浓度的检测方法有电学法^[4]、压差法^[5]及最新的射线法^[6](包括核磁共振、CT 成像及 γ 射线等)等。虽然各种方法都有一定的实用性,但也存在缺陷。光散射法不满足实时性要求,无法应用于现场,超声法需要提供主动声源,易受环境因素影响。

收稿日期:2016-05-19

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2014MS0609);国家自然科学基金资助项目(61463041,61463042)

作者简介:王志春(1972-),女,内蒙古自治区包头市人,教授,硕士生导师,硕士生,主要从事气-固两相流相关参数检测方面的研究。E-mail:wangzhichun0472@163.com。

压差法适用于高浓度气-固两相流,且相应的节流式传感器易破坏流场。射线法的成本较高,且需要大量数学计算、估计等实现对待测量参数的处理和预测,过程复杂。因此,如何有效、快捷且不侵入流场的在线检测值得深入研究。

声发射检测技术(AE)是一种新兴的无损检测方法,其具有简单、高效、非接触式且实时在线等优点,广泛应用于航空航天、金属加工及石油化工等领域^[7]。本文依据 Hertz 碰撞理论设计了一套空气-玻璃微珠的实验装置,在固定质量浓度的条件下,考察了玻璃微珠粒径、碰撞速度及信号功率谱间的关系。

1 声发射信号测量原理

声发射(AE)是材料局部能量的快速释放而产生瞬间弹性波的现象。其中,材料的断裂、变形属于一次 AE 源;撞击、摩擦及流体等的泄漏属于二次 AE 源。本文实验中,固相颗粒受重力作用自由落体,以不同的速度撞击钢板,在此过程中颗粒与颗粒间的碰撞、颗粒与钢板间的撞击都可激发出较强弹性波,其中包括钢板表面变形的一次 AE 源和颗粒相互间碰撞的二次 AE 源,所以整个过程属于混合型的 AE 源^[8]。虽然在实验中声发射传感器与钢板间涂有耦合剂,但由于空气中的衰减作用,且颗粒与颗粒间相互碰撞的声发射信号较弱,所以声发射传感器几乎不能接收此信号。因此,传感器所检测到声发射信号主要是来自固相颗粒撞击钢板。

1.1 声发射信号频率

声发射信号可看成是许多固相小球撞击壁面的叠加,根据 Hertz 碰撞理论^[9],固相小球撞击壁面时所产生的声发射信号的频率 f 可表示为

$$f = \frac{1}{t_H} = \frac{u_s}{\left\{ 2.94 \left[\frac{15}{16} \mu_1^2 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) m_u \right]^{\frac{2}{5}} R_s \right\}} \quad (1)$$

式中: t_H 为固相小球撞击壁面时的碰撞时间; u_s 为小球垂直撞击平面的速度; μ_1 、 μ_2 分别为平板、小球泊松比; E_1 、 E_2 分别为平板、小球弹性模量; m_u 为小球的质量; R_s 为小球的半径。

由式(1)可知,当风速一定时,粒径和频率成反比。在此基础上,文献^[10]中假设 2 个小球相互撞

击延伸到 1 个小球撞击无限大平板的模型,新的声发射频率为

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{5.7} \frac{v^{1/5}}{D^{2/5} R \rho_s^{2/5}} \quad (2)$$

式中: τ 为小球撞击平板的弹性时间; $D = \frac{3}{4} \cdot \left[\frac{1-\sigma_1^2}{E_1} + \frac{1-\sigma_2^2}{E_2} \right]$, σ_1 、 σ_2 分别为小球和平板的泊松比; R 为固相颗粒粒径; ρ_s 为固相颗粒的真密度; v 为小球垂直碰撞壁面的速度。

该模型描述了固相颗粒撞击壁面的速率、颗粒粒径及其真密度、颗粒及壁面的弹性模量间的定量关系。比 Hertz 碰撞理论简单且计算方便。

1.2 声发射信号能量

类似于声发射信号频率预测模型,从单个颗粒考虑,质量为 m_i 的颗粒,碰撞壁面产生的声压为

$$p_i = \frac{2\eta m_i v_s f_i}{A} \quad (3)$$

式中: $f_i = C_{b,i} A v_s$ 为颗粒撞击壁面产生的频率, $C_{b,i}$ 为固相颗粒浓度; v_s 为颗粒垂直撞击壁面的速度; η 是机械能转化为声能的效率; A 为颗粒碰撞的有效面积。

声发射信号功率为

$$W_i = p_i A v_s = 2\eta C_{s,i} A v_s^3 \quad (4)$$

式中 $C_{s,i} = m_i C_{b,i}$ 为颗粒的质量浓度

由式(4)可看出,在 A 、 η 不变的条件下, W_i 与 $C_{s,i}$ 及 v_s^3 均成正比关系。若其他条件保持不变,只增加 $C_{s,i}$,则相应的 W_i 会增加;而当 A 不变,随着 v 增大, W_i 也会随之增加。

2 声发射实验系统构建

材料或结构在受力情况下因内部形变而释放能量,利用声发射传感器进行采集,并将接收到的能量值转化成电信号,后续电路对电信号进行滤波、放大等方式处理并显示,最后获得待测材料的内部情况。总体上,声发射信号较静电、压差信号更易获得,且更能从微观角度反映出气-固两相流流动的复杂性。

2.1 实验系统构建

图 1 为实验装置简图。主要有实验装置和检测装置两部分构成,其中试验选用的声发射检测仪是北京声华公司的 SAEU2S 型声发射仪^[11],此外,还

有 SR150M 型号探头 (60~220 kHz), 前置放大器, 信号电缆及计算机。采样频率为 500 kHz, 采样时间为 2 s。

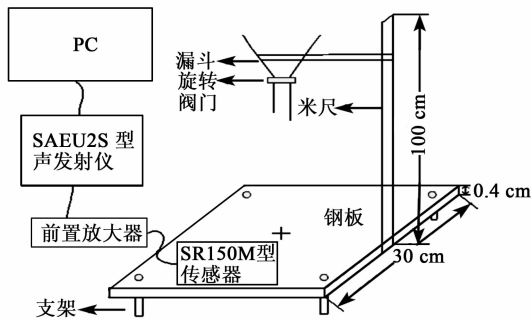


图1 实验装置简图

打开漏斗, 玻璃微珠作自由落体运动, 并通过移动米尺上的螺栓改变玻璃微珠的高度 (即碰撞速度), 此外, 通过调节漏斗下方的旋转阀门获得玻璃微珠的不同质量流量。玻璃微珠的粒径值分别为 $\varnothing 120 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 150 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 180 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 250 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 420 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 840 \mu\text{m}$, 忽略空气阻力的影响, 漏斗高度分别为 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm。

2.2 试验设计

实验过程为空气-玻璃微珠组成的气-固两相流, 由于该过程采样时间较短, 故忽略颗粒在平板堆积及空气阻力, 假设气-固无滑移, 即固相颗粒的速度代表气-固两相流的速度, 各粒径分别称取 500 g, 调节旋转阀门, 使其在 $(50 \pm 2) \text{ g/s}$ 的质量流量下试验。试验过程:

1) 保持玻璃微珠粒径相同, 以此增加漏斗高度 (即增加玻璃微珠的撞击速度) 至 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm (碰撞速度: 1.98 m/s、2.80 m/s、3.40 m/s 和 4.00 m/s) 分别进行试验, 采集声发射信号。

2) 保持漏斗高度相同, 依次选用粒径为 $\varnothing 120 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 150 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 180 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 250 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 420 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 840 \mu\text{m}$ 的玻璃微珠进行试验, 采集声发射信号。

3) 利用上述试验所得数据, 结合相关算法总结、归纳出玻璃微珠的碰撞速度、粒度信息, 并作出相应的拟合趋势线, 并使用不同粒径玻璃微珠进行验证, 得到其检测精度。

2.3 试验分析方法

本文采用功率谱估计法对声发射采样所得信号进行频域分析。Welch 算法的基本思想是使用分段加窗法将 1 个长度为 N 的数据 $x_N(n)$ 分成 L 段, 每段数据长 $M (M=N/L)$, 各段数据相互独立, 但允许部分重叠。将每段数据进行傅里叶变换, 得到 $X_N(e^{j\omega})$, 并取其幅值后平方, 再除以 N , 作为对功率谱 $P_X(\omega)$ 的估计, 将 L 段数据的功率谱求和, 并取均值即可得到平均功率谱。与传统的傅里叶变换相比, 该方法在估计方差方面得到改善^[12], 且得到的功率谱较平滑。

3 试验结果评价

3.1 实验结果分析

由式(1)、(2)可知, 影响颗粒碰撞频率的理论因素主要有碰撞速度、颗粒粒径、钢板及玻璃微珠的相关物理参数。在气速一定的条件下, 声发射信号的频率与粒径成反比关系。图 2、3 分别为不同碰撞速度条件下, $\varnothing 420 \mu\text{m}$ 和 $\varnothing 250 \mu\text{m}$ 的功率谱估计图。

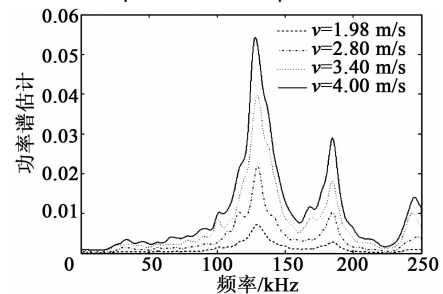


图2 $\varnothing 420 \mu\text{m}$ 颗粒在不同气速下的功率谱估计

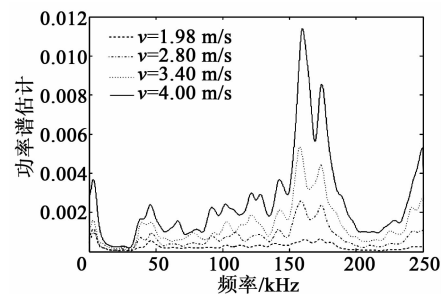


图3 $\varnothing 250 \mu\text{m}$ 颗粒在不同气速下的功率谱估计

由图 2、3 可看出, 粒径不同, 声发射信号的频率也不同。 $\varnothing 420 \mu\text{m}$ 的功率谱估计主频约为 130 kHz, 而 $\varnothing 250 \mu\text{m}$ 的功率谱估计的主频约为 160 kHz, 实测值与理论预测趋势一致, 即随着颗粒粒径的增加, 声发射信号的能量值逐渐向低频迁移, 表明功率谱估计用于颗粒粒径的检测是可行的。为更直观观察玻璃微珠的粒径对功率谱估计的影响,

求取 250 kHz 范围内功率谱估计与横坐标轴围成的面积。表 1 为 6 种不同粒径的玻璃微珠在不同气速下的功率谱估计面积。

表 1 多粒径在不同气速条件下的功率谱估计面积

粒径/ μm	功率谱估计面积			
	1.98 m/s	2.80 m/s	3.40 m/s	4.00 m/s
$\varnothing 120$	0.026 7	0.072 1	0.138 3	0.190 0
$\varnothing 150$	0.043 7	0.161 0	0.268 5	0.320 3
$\varnothing 180$	0.079 2	0.195 1	0.380 2	0.564 2
$\varnothing 420$	0.147 8	0.495 2	0.732 5	1.428 1
$\varnothing 840$	0.248 2	0.613 2	1.114 5	2.166 4

由表 1 及图 2、3 可看出,在粒径一定时,随着固相颗粒碰撞速度的增大,声发射信号的功率谱估计幅值随之增大;在碰撞速度一定时,随着固相颗粒粒径的增加,声发射信号功率谱估计的面积也呈现出增大的趋势。显然,固相颗粒的碰撞速度增大,玻璃微珠撞击的动能增大,在转化效率不变的条件下,声发射传感器接收到更高的信号能量,从而造成了功率谱估计幅值的增大;在撞击速度相同的条件下,大粒径的颗粒具有较大惯性,得到了较高的功率谱估计面积。不同玻璃微珠粒径下功率谱估计面积随撞击速度的变化曲线如图 4 所示。由图可看出,在颗粒撞击速度一定时,功率谱估计面积与颗粒粒径呈现出较好的线性关系。

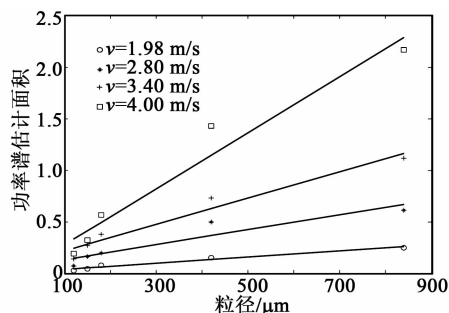


图 4 功率谱估计面积随颗粒粒径的变化曲线

根据表 1 中的数据,拟合出 $\varnothing 120 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 150 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 180 \mu\text{m}$ 、 $\varnothing 420 \mu\text{m}$ 和 $\varnothing 840 \mu\text{m}$ 玻璃微珠在撞击速度 1.98 m/s、2.80 m/s、3.40 m/s、4.00 m/s 下的功率谱幅值变化趋势线方程分别为

$$y=0.000\ 3x-0.013\ 1 \quad (5)$$

$$y=0.000\ 7x-0.059\ 6 \quad (6)$$

$$y=0.001\ 3x-0.089\ 8 \quad (7)$$

$$y=0.002\ 7x-0.005\ 1 \quad (8)$$

综上所述,该试验条件下总结、归纳的不同玻璃微珠粒径与功率谱估计面积的拟合方程,在碰撞速

度条件已知,能够达到有效识别和判读玻璃微珠粒径的检测目的。

3.2 实验结果验证

以图 4 结果为基础,验证碰撞速度已知的条件下, $\varnothing 250 \mu\text{m}$ 的玻璃微珠的预测值如表 2 所示。

表 2 $250 \mu\text{m}$ 玻璃微珠测试值

碰撞速度/ (m/s)	功率谱估 计面积	粒径预测值 / μm	相对误差/%
1.98	0.085 0	255.7	2.3
2.80	0.219 6	228.6	8.5
3.40	0.424 9	257.8	3.1
4.00	0.694 1	255.2	2.1

向系统中加入不同粒径的单一颗粒,通过声发射检测仪采样,并通过 Welch 算法获得功率谱估计面积。由图 4 可推出玻璃微珠粒度值,从而获得同等条件下的粒径信息。由表 2 可知,不同气速条件下的相对误差在 8.5% 以下,研究表明此方法适应于未知粒径检测。

4 结论

1) 根据经典的声发射理论,论述了气固两相流的声发射检测机理。设计一套空气-玻璃微珠的声发射信号检测装置,并在实验室内进行试验、评价,通过数据采集、算法分析,获得玻璃微珠的粒度信息。

2) 试验规律符合两相流体系中的固相颗粒碰撞频率模型,在碰撞速度一定时,声发射信号功率谱估计的面积随着粒径的增大而增大;粒径一定时,声发射信号功率谱估计的面积也随着碰撞速度的增大而增大。试验表明,玻璃微珠的粒径、碰撞速度与功率谱估计的面积成线性关系,据此能够有效识别未知条件下的单一固相颗粒相关信息。

3) 试验测试结果表明,该方法用于测量不同碰撞气速下的粒径信息,与实际粒径相比,最大相对误差为 8.5%。此方法为气-固两相中的粒径信息检测提供了新思路,并为多粒径混合的气-固体系中相关参数检测研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 龚欣,郭晓镭,代正华,等.高固气比状态下的粉煤气力输送[J].化工学报,2006,57(3):640-644.
GONG Xin, GUO Xiaolei, DAI Zhenghua, et al. High solids loading pneumatic conveying of pulverized coal [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(3): 640-644.

- [2] ZHAO Y J, WANG S M, NING M U, et al. Online continuous measurement of dust concentration in the exhaust duct by laser scattering mean method[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2004, 24(11):217-221.
- [3] 薛明华, 蔡小舒, 苏明旭. 超声法测量颗粒两相流粒径及浓度的理论与实验研究[D]. 上海:上海理工大学, 2008.
- [4] 胡红利, 周屈兰, 徐通模, 等. 电容式气固两相流浓度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(11):1947-1950.
HU Hongli, ZHOU Qulan, XU Tongmo, et al. Capacitance-based system for solid concentration measurement in gas/solid two-phase flow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(11):1947-1950.
- [5] 吴占松, 谢菲. 用于管道煤粉流量测量的文丘里管型设计及优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(5):666-669.
WU Zhansong, XIE Fei. Optimization of venturi tube design for pipeline pulverized coal flow measurements [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2007, 47(5):666-669.
- [6] 钱震, 张明辉, 于皓, 等. 高密度气固两相流颗粒质量通量的自动测量方法[J]. 高校化学工程学报, 2004, 18(4):506-509.
QIAN Zhen, ZHANG Minhui, YU Hao, et al. An automatic method for measuring solids flux in high density gas-solid two-phase flow[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2004, 18(4):506-509.
- [7] 王胜新, 佟国章, 李建萍, 等. 微地震裂缝监测技术在油水井压裂和注水评价中的应用[J]. 国外测井技术, 2011(3):9-11.
WANG Shengxin, TONG Guozhang, LI Jianping, et al. Application of microseism fracturing and injection evaluation of oil and water wells[J]. World Well Logging Technology, 2011(3):9-11.
- [8] 汪兵, 柯云龙, 廖祖维, 等. 流动流体黏度的声发射测量[J]. 石油学报(石油加工), 2011, 27(2):239-242.
WANG Bing, KE Yunlong, LIAO Zuwei, et al. Measurement of flowing fluid viscosity based on AE signals [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2011, 27(2):239-242.
- [9] CYCIL M, CHARLES E C. Shock and vibration handbook[M]. 5nd ed. Beijing: China Petrochemical Press Co Ltd, 2008:278-280.
- [10] 侯琳熙, 王靖岱, 阳永荣, 等. 气固流化床中声发生机理及在工业装置中的应用[J]. 化工学报, 2008, 56(8):1474-1478.
HOU Linxi, WANG Jingdai, YANG Yongrong, et al. Frequency analysis of acoustic emission and application in gas-solid fluidized bed[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 56(8):1474-1478.
- [11] 王志春, 张志强, 张蕾, 等. 基于声发射的输气管道故障检测技术研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(1):174-177.
WANG Zhichun, ZHANG Zhiqiang, ZHANG Lei, et al. Study on Gas pipeline fault detection technology based on acoustic emission[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2016, 38(1):174-177.
- [12] 杨晓明, 晋玉剑, 李永红. 经典功率谱估计 Welch 法的 MATLAB 仿真分析[J]. 电子测试, 2011, 7:101-104.
YANG Xiaoming, JIN Yujian, LI Yonghong. MATLAB simulation and analysis of the Welch method in the classical power spectrum estimation [J]. Electronic Test, 2011, 7:101-104.