

# 流化床风帽故障的声发射检测

王志春, 张蕾, 张志强, 李文涛  
(内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 针对化工生产中气固流化床风帽故障影响流化质量问题, 提出一种能够快速准确地检测出风帽故障位置和故障类型的方法; 应用声发射技术进行定位测量, 通过均匀安装在流化床分布板下方的声发射传感器采集气固流化床内固体颗粒撞击分布板产生的声信号, 再对该信号进行多尺度小波包分解, 找出特征频段能量值和能量分布差异; 对比各检测点声发射信号总能量的强弱可以直观的反应风帽故障位置, 观察各尺度能量分率的变化能够有效判断风帽故障类型, 从而实现实时在线监测流化床风帽故障情况, 并及时进行故障处理, 提高流化床流化质量。

**关键词:** 声发射; 风帽故障; 流化质量; 小波包; 能量分率

## Detection of Gas—solid Fluidized Bed Hood Fault Based on Acoustic Emission Testing

Wang Zhichun, Zhang Lei, Zhang Zhiqiang, Li Wentao  
(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** For gas—solid fluidized bed cowl faults affecting the fluidization quality problem, this paper proposes away to detect the cowl fault location and fault type rapidly and accurately; This method uses the acoustic emission technology, by installing distribution in fluidized bed plate at the bottom of the acoustic emission sensor collection and distribution of solid particle impact in the gas—solid fluidized bed plate produced by acoustic signal, then the signal is sent to multi—scale wavelet packet decomposition, find out the characteristics of frequency and energy distribution differences; Contrast each testing point on the strength of the acoustic emission signal' total energy can intuitive response cap fault location, observe changes in the rate of energy distribution can effectively judge the scale cap fault type, so as to realize the real—time online monitoring the fluidized bed cap damage, and have fault handling in a timely manner, improve the quality of fluidized bed fluidization.

**Keywords:** acoustic emission; cap fault; fluidization quality; wavelet packet; energy fraction

## 0 引言

在聚乙烯等颗粒物的化工生产中, 气固流化床是常用的生产设备, 风帽位于流化床布风板的上部, 是流化床的重要部件, 主要作用是使流化风均匀稳定并且以合理的流速从风帽小孔流出, 保证流化风与床内物料均匀混合, 维持良好的流化状态。实际生产过程中受到流化环境的影响风帽极易发生破损和堵塞<sup>[1]</sup>。破损发生后, 有些区域流过风帽的风量大,

会加重对风帽的磨损, 甚至发生漏料, 但有些区域风量变小, 会出现流化死区, 导致流化粒子结块; 而流化床内突发压力波动时, 会造成部分床料反冲进入帽体内部, 造成风帽小孔的堵塞, 小孔一旦堵塞就会形成局部流化失效, 造成床内局部堆积结块。因此, 如何有效的监测风帽故障情况, 并对故障位置和类型进行准确分析是保证流化稳定的关键。

本文将采用一种非侵入式的、具有高灵敏度、安全环保、实时在线的声发射检测技术<sup>[2]</sup>进行风帽故障检测, 将声发射传

感器均匀分布在分布板的下方每个风帽附近, 测量各个风帽附近颗粒对分布板的碰撞和摩擦信号, 对信号进行小波分析和能量分析等有效的数据处理方法来反应风帽故障情况。

## 1 实验装置及方法

### 1.1 实验装置

声发射检测实验总体装置如图 1, 它由气固流化床和声发射检测系统两部分构成。气固流化床为实验室利用透明有机玻璃搭建的冷模装置, 内径 200 mm, 高 2 000 mm, 床层底部装有多孔风帽式分布板, 风帽类型为钟罩型风帽, 孔径为 2 mm, 开孔率为 2.5%。实验使用压缩空气作为流化气体, 固体物料为密度 2 400 kg/m<sup>3</sup>, 粒径范围  $d_p$  为 0.12~0.16 mm 的玻璃微珠。

声发射检测系统是北京声华公司生产的 SAEU2S 声发射系统, 包括声波探头 (SR150M 型传感器)、前置放大器 (PAI 型, 400 dB)、信号采集机箱和计算机。声发射装置工作时的采样频率为 900 kHz, 采样时间取 5 s。

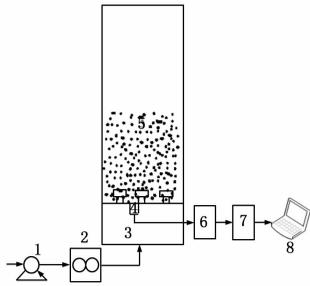
### 1.2 实验方法

静止床高 150 mm 时, 由空气压缩机所供的气体经转子流量计后 (控制风速为 0.65 m/s) 进入风室, 经气体分布板进入流化区, 流化床内的运动颗粒与流化床壁、分布板以及其他颗粒之间产生大量的摩擦和碰撞, 产生不同的声音信号。因

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2015-03-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51166010); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2014MS0609)。

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, 主要从事工业控制与智能装置方向的研究。



1: 压缩机; 2: 转子流量计; 3: 风室; 4: 传感器; 5: 流化床;  
6: 前置放大器; 7: 数据采集箱; 8: 计算机

图 1 声发射检测实验装置图

此, 本实验将 9 个声发射传感器均匀安装在分布板下面靠近风帽的位置, 进行分布板处声信号的采集, 测量点为如图 2 中标号 1~9。对所得信号进行小波包分析并计算其能量值。正常流化时, 测得的声信号能量较强且均匀, 若出现风帽堵塞或破损, 其声信号能量就会发生变化, 以此来判断风帽的故障情况, 如图 1 所示。

设置故障风帽, 其他条件不变的情况下, 分别进行两类风帽故障实验, 每组实验重复多次, 取平均值: 1) 将中间风帽(即 1 号)风帽换成顶部破损的故障风帽; 2) 将 1 号风帽入口堵塞。1 号风帽附近为 3、4、5 三个测点, 两类实验分别与正常流化状态实验做对比, 如图 2 所示。

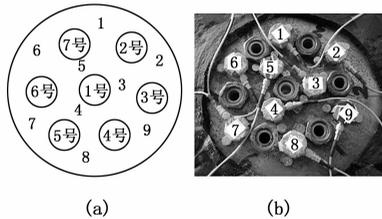


图 2 分布板上传感器分布示意图

## 2 基本理论

### 2.1 小波分析

考虑平方可积的实数函数空间  $L^2(R)$  (即能量有限的信号空间), 设  $\Psi(t) \in L^2(R)$ , 其中傅立叶变换为  $\Psi(\omega)$ , 当  $\Psi(\omega)$  满足下式的允许条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (1)$$

时, 我们称  $\Psi(t)$  为一个母小波, 或基本小波。将  $\psi(t)$  经伸缩和平移后, 可以得到一个小波序列:

$$\psi_{(a,b)}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbf{R}; a \neq 0 \quad (2)$$

式中:  $a$  为尺度因子,  $b$  为平移因子。

基于多分辨分析的快速小波变换是利用正交小波基将信号分解为不同尺度下的各个分量, 其对低频部分进行详细分解。

小波包分析 (wavelet packet analysis) 能够为信号提供一种更加精细的分析方法, 它将频带进行多层次划分, 对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解, 从而提高了时-频分辨率。本文对信号进行三层小波包分解。

### 2.2 小波能量

记原始声波信号经小波包分解后得到的各尺度分解系数分

别为向量  $C_{d_0}, \dots, C_{d_7}$  并记向量  $C_{d_0}$  为  $[x_0, \dots, x_n]$ , 则定义尺度  $d_0$  上的声波能量为

$$E_{d_0} = \sum_{i=0}^n x_i^2 \quad (3)$$

其余尺度的能量定义与  $d_0$  相同, 总能量

$$E = E_{d_0} + \dots + E_{d_7} \quad (4)$$

定义尺度  $d_1$  的能量占声波总能量  $E$  的能量分率  $p_{d_0}$  为

$$p_{d_0} = \frac{E_{d_0}}{E} \quad (5)$$

### 2.3 颗粒与声信号的关系

在颗粒浓度<sup>[3]</sup>、气体温度和风速 (0.65 m/s) 等不变的条件下, 对流化床的声信号进行小波分析发现, 小波各尺度与颗粒粒径存在一定关系, 颗粒粒径大小对应的声发射信号主峰频率如表 1 所示。

表 1 声发射信号频率与粒径大小对应表

频率范围/kHz	粒径 $d$ /mm
500~1 000	<0.10
250~500	0.10~0.14
125~250	0.14~0.18
62.5~125	0.18~0.36
31.25~62.5	0.36~0.5

## 3 实验结果与结论

对声发射信号进行三层小波包分解, 分解尺度范围如表 2。

表 2 三层小波包分解

$d_0$ / kHz	$d_1$ / kHz	$d_2$ / kHz	$d_3$ / kHz	$d_4$ / kHz	$d_5$ / kHz	$d_6$ / kHz	$d_7$ / kHz
0~ 112.5	112.5~ 225	225~ 337.5	337.5~ 450	450~ 562.5	562.5~ 675	675~ 787.5	787.5~ 900

本实验所选粒径范围为 0.12~0.16 mm, 气速为 0.65 m/s, 根据表 1 可知, 所测声发射信号对应频率范围应为 125~500 kHz 之间, 因此主要能量集中在  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  部分, 选取表 2 中  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  三个频段的能量和作为总能量进行分析<sup>[4]</sup>。多次测量各个传感器的平均能量值如表 3, 其能量直方图如图 3~5, 能量平面分布示意图如图 6~8。

表 3 传感器所测得平均能量值

传感器	1	2	3	4	5	6	7	8	9
正常 ( $\times 10^6$ )	4.6 185	4.7 324	4.5 758	4.5 672	4.7 345	4.3 479	4.2 978	4.5 789	4.4 667
堵塞 ( $\times 10^6$ )	4.3 121	4.2 165	3.1 342	3.2 173	3.3 215	4.2 404	4.2 575	4.2 122	4.1 233
破损 ( $\times 10^6$ )	4.3 124	4.3 672	3.6 753	3.4 461	3.4 890	4.3 309	4.4 372	4.3 908	4.2 987

对比图 3~5 能量分布图可知, 正常流化状态下的各测点的能量均匀且较强, 风帽一旦发生故障, 堵塞或破损, 各个风帽附近测点的能量值都会相应的减小, 总能量值减小。且图 4

各测点的能量均略小于图 5 对应测量点能量<sup>[7]</sup>。由图 4 分析 3、4、5 三个测量点的能量值小于其他测点的能量值, 结合图 7 的能量平面图可以直观的看出流化床内颗粒流化不均, 比色卡对比蓝色(下端)能量低红色(上端)能量高, 即中间能量小于边缘能量。同样由图 5 可知, 3、4、5 测量点的能量低于其余测量点, 由图 8 可知其中间能量小于边缘能量。因此可通过能量值的变化来判断风帽故障的存在情况, 结合多传感器的

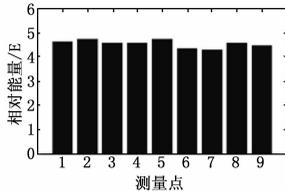


图3 正常流化声信号能量分布

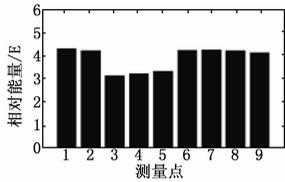


图4 堵塞状态下声信号能量分布

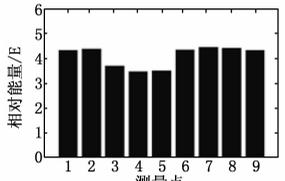


图5 破损状态下声信号能量分布

定位测量即可判断故障位置<sup>[5]</sup>。

由图只能判断出故障存在位置, 但是很难区分故障类型, 具体是风帽堵塞还是风帽破损不能直接得出, 可以借助能量分率的变化来区分故障类型<sup>[5]</sup>。 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$  尺度<sup>[4]</sup> 的能量分率见表 4。

表 4 各频段能量分率

能量分率	$P_{d2}$	$P_{d3}$	$P_{d4}$
正常	0.572 35	0.119 65	0.308
堵塞	0.598 57	0.109 83	0.291 6
破损	0.522 67	0.130 9	0.34643

由表知, 有风帽堵塞时, 其低频段能量分率  $P_{d2}$  比正常时高, 相对高频段能量分率<sup>[8]</sup>  $P_{d3}$ 、 $P_{d4}$  较正常时低。风帽破损时趋势相反。风帽堵塞时, 整体风量减弱, 颗粒撞击分布板频率会减小, 对比正常流化时各频段的能量分率向低频部分偏移。风帽破损时破损处的风量增大, 会使周围的粒子高速运动, 高频率撞击分布板, 因此特征频段会向高频段偏移。由此可知, 很据能量分率微变可以进一步区分故障类型。

#### 4 结束语

- 1) 在分布板下方均匀布置声发射传感器, 测得声发射信号, 由各测点能量值的差异可直接判断故障存在位置。
- 2) 可根据特征频段的偏移判断风帽故障类型。

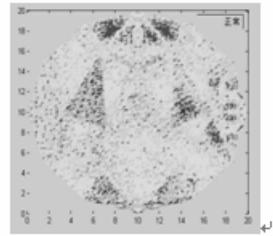


图6 正常状态下声信号能量平面分布示意图

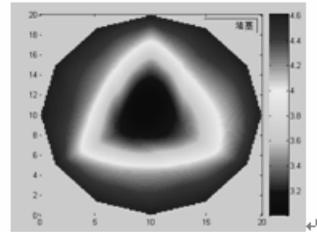


图7 堵塞状态下声信号能量平面分布示意图

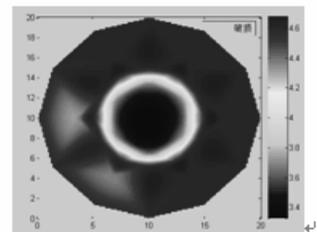


图8 破损状态下声信号能量平面分布示意图

3) 声发射技术能快速、准确的检测出风帽的故障, 并能对故障类型进行判断, 为实际生产提供一种全新的检测手段。

#### 参考文献:

- [1] 安茂春. 故障诊断专家系统及其发展 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (9): 1217-1219.
- [2] 白 斌. 循环流化床锅炉故障分析与处理 [J]. 化学工程与装备, 2014 (5).
- [3] 周云龙, 孙 斌, 李洪伟. 多相流参数检测理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 曹翌佳, 王靖岱, 阳永荣. 声波信号多尺度分解与固体颗粒质量流率的测定 [J]. 化工学报, 2007, 58 (6): 1404-1407.
- [5] 王靖岱, 蒋斌波, 阳永荣, 等. 声波的多尺度解析与气固流化床故障检测 [J]. 化工学报, 2006, 57 (7): 1561-1564.
- [6] 虞贤波, 任静聪, 姜晓静. 气固流化床中声发射和结块定位 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42 (10): 1828-1832.
- [7] 刘 刚, 陈 超, 韩金良, 等. 液固两相流声发射检测系统设计及实验评价 [J]. 振动与冲击, 2012, 31 (22): 179-182.
- [8] 陈杰勋, 曹翌佳, 任静聪. 气固流化床分布板死区的声发射检测 [J]. 石油化工, 2008, 37 (9): 910-914.
- [9] 赵贵兵, 阳永荣, 侯琳熙. 流化床声发射机理及其在故障诊断中的应用 [J]. 化工学报, 2001, 52 (11) 941-943.
- [10] 成丰渊, 杜伟光, 吕兆聚. 对循环流化床锅炉风帽破坏的原因分析 [J]. 工业锅炉, 2013 (4): 58-60.