

声发射技术在气固流化床中的应用

舒伟杰 曹翌佳 任聪静 郑卫华 王靖岱 阳永荣*

(浙江大学化学工程与生物工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 利用声发射检测技术, 根据不同粒径的颗粒在气固流化床壁面碰撞产生不同频率的声波信号的机理, 结合能谱分析、多尺度小波和小波包分析, 可以实现气固流化床的流化速度、粒径分布、结块、流型和料位等流化动力学参数的实时在线检测。在 $\phi 150\text{mm}$ 气固流化床冷模装置中, 测定了流态化实验中聚乙烯颗粒碰撞壁面的声发射信号。实验发现, 通过对不同气速下声波信号的小波包分析, 可获得颗粒的起始流化速度和初始湍动速度。应用 AE - PSD 方程能够很好地揭示声波信号在各尺度的能量分率分布特征与粒径分布的定量关系, 其平均相对误差都在 10% 以下。并可以通过对声信号的 7 尺度小波分析, 发现床内大颗粒的增加和结块的形成与代表大颗粒信号的第 6、7 尺度的能量变化有着密切的关系。同时, 首次用声发射检测技术测得了流化床内的流动模式为带有滞留区的双循环模式。研究结果表明, 声发射检测技术能快速、准确地实现流化床流化动力学参数的实时监控。

关键词: 声发射, 流化床, 流化速度, 粒径分布, 结块, 流型, 小波, 小波包, 能谱

引言

流化床气相聚合技术具有众多的优点, 在过去的几十年中取得了巨大的工业成功^[1]。起始流化速度和初始湍动速度是气相法聚合流化床反应器设计和生产操作的基础参数。目前对起始流化速度都是用传统的压差法^[2]或压力脉动法^[3]测定, 虽然这两种方法原理简单、方法直观, 但是临界点的判断存在着经验性和任意性。尤其是发粘物料和细粉物料, 因其压降随气速的增加波动剧烈, 使得起始流化速度无法确定^[4]。而对初始湍动速度的测定尚未有公开发表的文献报道^[5]。粒径分布和结块的测量是保证流化床长期稳定的运行和提高反应器的时空产率的关键。流化床内流型的研究是开发新型反应器的重要依据。长期以来, 流化床的流型是研究热点^[6]。由于针对烯烃聚合体系的颗粒流态化特性具有独特之处, 加之实验手段的缺乏导致流态化研究难于深入, 严重妨碍了对现有工业流化床反应器的理解, 并妨碍了新型反应器的开发。本课题组基于声信号的多尺度解析, 已经实现了气固流化床颗粒粒径分布的在线检测^[7-8]。并在 2001 年提出了用声发射检测技术对流化床进行结块故障诊断, 但该文只是简单运用原始信号获得直观的故障信息, 尚未对信号进行深入的处理^[9]。

声波主频的变化反映为声波各尺度(频段)能量分布的改变, 正是由于不同粒径的颗粒所产生的声波能量叠加, 导致声波在各尺度的能量分布不同, 因此有可能通过多尺度声波能量分率的分析, 实现流化速度的测定与粒径分布和结块的预测。同时, 由于流化床局部区域的声波能量反映了颗粒与壁面、颗粒与颗粒之间的撞击规律, 从中可以获得壁面内颗粒的浓度和颗粒的碰撞频率等信息, 揭示流化床内整体的信息。

本文拟采用声检测技术, 利用流态化时颗粒碰撞壁面产生的声波信号, 对其进行多尺度小波包、小波和频谱图的解析, 实现流化床内起始流化速度和初始湍动速度的测定、颗粒粒径分布和结块的实

*联系人: 阳永荣, E-mail: yangyr@zju.edu.cn。第一作者: 舒伟杰 (1981 -), 男, 硕士研究生
基金项目: 国家自然科学基金重大基金 (20490200)

时在线检测以及床内流型和料位的监测。

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

装置流程如图 1 所示，由声波测量仪和外加热气固流化床两部分组成，其中声波测量仪器（UNILAB 2003，浙江大学联合化学反应工程研究所自行开发）包括声波探头、前置放大器、主放大器信号、A/D 采集装置和信号处理装置。内径为 150 mm 的气固流化床为有机玻璃制造，分布板为多孔平板，孔径为 2 mm，开孔率为 2.6%。实验采样频率为 500 kHz，采样时间为 90 s。

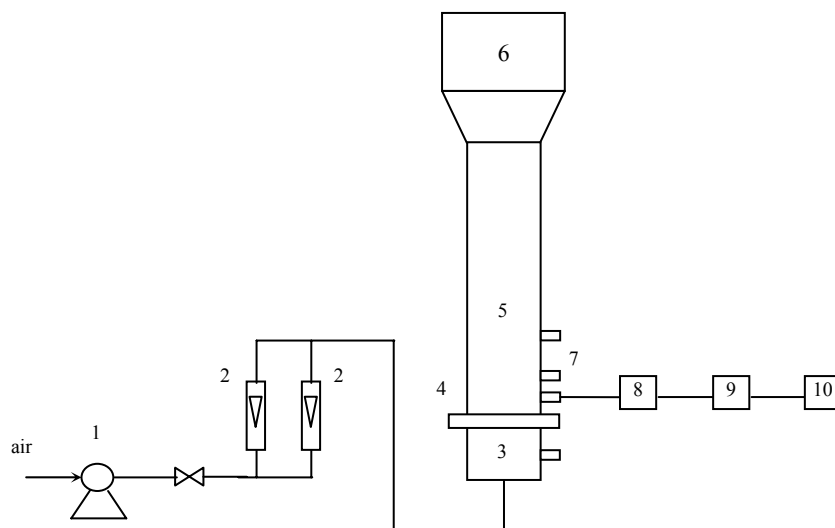


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

1-Fan 2- Flow meter 3- Mixing room 4 -Distributor 5-Fluidized bed 6-Expanding section 7- AE sensor 8- Preamplifier 9- Signal conditioning 10- Computer

实验所用物料为三种聚乙烯颗粒，其物性如表 1 所示。

Table1 Property and PSD of LLDPE, HDPE and Bimodal PE

| Resin | Melt Index (g/10min) | Density (kg/m ³) | \overline{d}_p (μm) |
|------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| LLDPE | 9.6 | 944 | 460 |
| HDPE | 24 | 960 | 671 |
| Bimodal PE | 6.0 | 946 | 365 |

2 应用

2.1 流化速度

实验通过改变气速考察了气固流化床中颗粒的起始流化速度和初始湍动速度，发现颗粒能量分布存在规律性的变化（如图 2 所示），基于此本文提出了能量分配理论，即当气速增加时，床内一些小颗粒由于受到气体的推动获得能量，由静止变到运动，继而推动大颗粒。随着气速的进一步增大，大颗粒也由静止变到运动，进一步推动更大颗粒的运动。而此过程中，不同的颗粒撞击流化床壁面将产生不同的能量分布，致使各尺度能量分布发生变化。当各尺度能量分布达到暂时的平衡时，即完成了第一次能量分配，称之为能量一次分配理论，此时的气速即为起始流化速度。随着气速的进一步增加，

床内出现了气泡，并随着气速的再增加，床层明显的气泡消失，床层表面开始模糊不清，此时颗粒不再局限于流化床内的局部运动，开始了大范围的运动，致使流化床内各尺度（频率段）的能量分布产生变化。气速继续增大，当全床混合完全均匀时，各尺度的能量分布再次达到了平衡，即再次的能量分配完成，称之为能量再分配理论。此时，气速继续增加，各尺度的能量分率也将维持不变，可认为此时流化床混合均匀、流化稳定，而在此气速段下进行的流化称之为最优流化。最优流化速度段中的最小速度即为初始湍动速度。而当气速继续增加达到颗粒的带出速度时，由于颗粒的带出，改变了系统的能量平衡，各尺度的能量分率又开始发生变化，从小粒径颗粒至大粒径颗粒能量依次降低，直至趋向零。

根据以上判据，可以得到平均粒径分别为 0.51 mm、0.64mm、0.76 mm、1.02 mm 和 1.24 mm 的 5 种颗粒的起始流化速度和初始湍动速度，与经典的压差法测得的起始流化速度和工业生产上初始湍动速度的经验值相比，平均相对误差分别仅为 5.18%和 6.78%，结果如表 2 所示。说明利用声波能量的多尺度解析来获取起始流化速度和初始湍动速度是可行的。

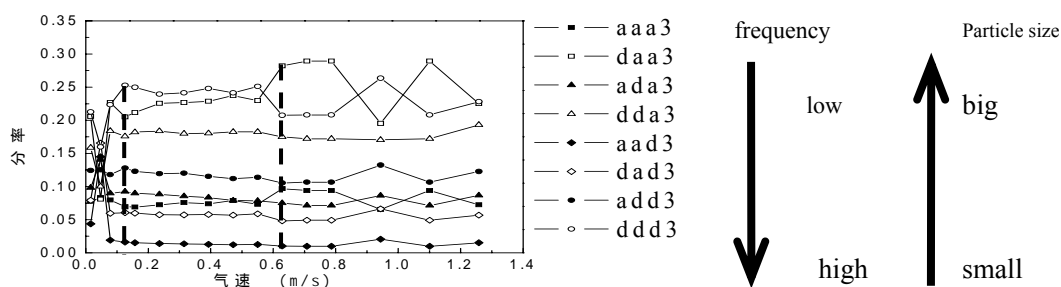


Fig.2 The energy percentage of wavelet packet analysis profile with the gas velocity (sensor location $H_p=150\text{mm}$, $d_p=0.64\text{mm}$)

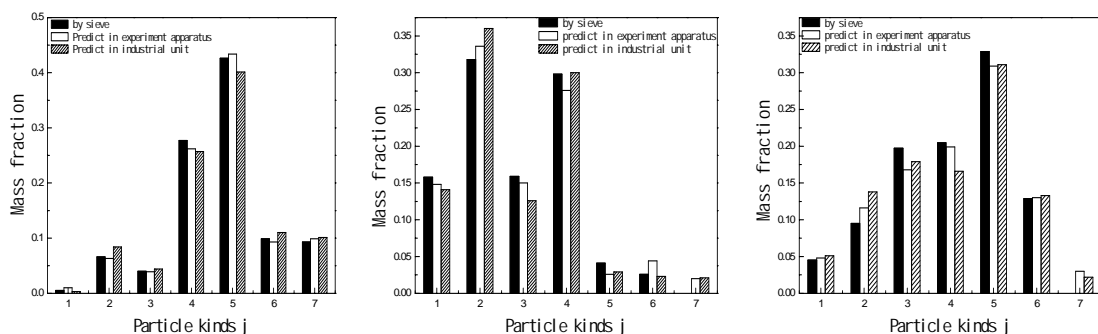
Table 2 The Minimum fluidization velocity and the optimal operating gas velocity

| d_p (mm) | U _{mf} , m/s | | | optimal operating gas velocity, m/s | | |
|---------------|-----------------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|---------|
| | pressure drop | AE | AARD(%) | empirical value | AE | AARD(%) |
| 0.51 | 0.10 | 0.089 | | 0.42 | 0.480 | |
| 0.64 | 0.14 | 0.140 | | 0.60 | 0.655 | |
| 0.76 | 0.17 | 0.158 | 5.18 | 0.75 | 0.800 | 6.78 |
| 1.02 | 0.24 | 0.229 | | 1.05 | 1.080 | |
| 1.24 | 0.31 | 0.300 | | 1.32 | 1.330 | |

2.2 粒径分布

对流化床内三种不同粒径分布 (PSD) 聚乙烯颗粒体系的在线测量, 根据 AE - PSD 粒径分布模型^[8]可以准确地得到三种颗粒体系的粒径分布。选用的三种聚乙烯颗粒体系 (LLDPE、HDPE 和 Bi-modal PE) 分别在实验室冷模条件和工业反应器热模条件下进行实验。其中线性低密度聚乙烯 (LLDPE) 是大粒径颗粒占多数的体系; 高密度聚乙烯 (HDPE) 是具有双峰 PSD 分布的颗粒体系; 双峰聚乙烯 (Bi-modal PE) 是小粒径颗粒占多数的体系。图 3 (a) ~ (c) 分别展示了三种聚乙烯颗粒体系 PSD 的声波测量值和取样筛分分析值的比较, 粒径种类 $j=1\sim7$ 分别代表 2.00mm、1.19mm、0.71mm、

0.50mm、0.36mm、0.18mm 和 0.14mm 的颗粒。可见，在 $\phi 150$ 冷模流化床实验中通过 AE - PSD 声波测量与取样筛分测量所得到的颗粒粒径分布十分吻合，三种聚乙烯颗粒体系的平均偏差分别为 3.2%、5.3%和 8.8%。在工业装置上进行在线测量时，三种聚乙烯颗粒体系的平均偏差分别为 6.2%、8.3%和 15.8%。表明 AE - PSD 粒径分布模型在实验室冷模装置和工业装置中都能适用。



(a) LLDPE ($U=0.6\text{m/s}$, $\rho_s = 920\text{kg/m}^3$) (b) HDPE ($U=0.6\text{m/s}$, $\rho_s = 961\text{kg/m}^3$) (c) Biomodal PE ($U=0.4\text{m/s}$, $\rho_s = 940\text{kg/m}^3$)

Fig. 3 The comparison between the value by PSD model and the value by sieving about the three kinds particles

2.3 结论

在流化床乙烯气相聚合过程中，结块的产生将导致壁面颗粒声波频率急剧降低，多尺度的小波分析来揭示流化床内颗粒熔融结块过程的演化规律。随着气固流化床聚合物颗粒从小颗粒团聚成大颗粒乃至结块，声波信号的主频将从高频向低频转移，声波能量分率即由低尺度向高尺度有层次地增加。因此可以根据多尺度小波分析的第 6、7 个小波尺度 d_6 、 d_7 能量分率的变化来对结块进行预警。对颗粒结块声信号进行 7 尺度小波分析，当代表最大颗粒和结块信号的第 6、7 个小波尺度的 d_6 、 d_7 能量分率发生突变时，则表明流化床内已经产生结块。图 4、图 5 为 17:30~19:30 之间对某工业装置中聚合物粉料在结块过程中测量得到的声波信号进行 7 尺度的小波分解后得到的声波各尺度能量分率变化图，根据以上依据，从图中可以看出，在 18:10，床内稍大的颗粒开始团聚成更大的颗粒和小结块。在 18:51 时， d_7 能量分率突然上升，说明有大结块产生。通过伽马射线对此结块过程后床内颗粒的在线测量和实际取样筛分测量，确实发现流化床内存在直径为 150mm、长为 400mm 的结块。实验结果表明，可以把多尺度小波分析的第 6、7 个小波尺度 d_6 、 d_7 能量分率的变化作为结块产生的

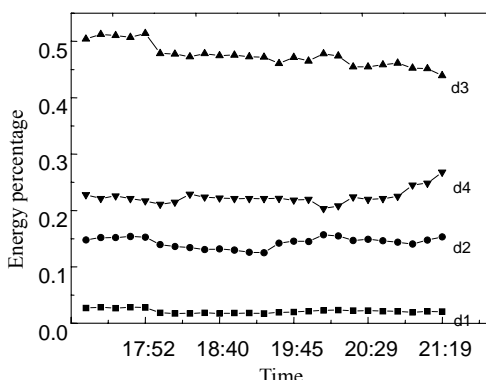


Fig.4 Variation of energy ratio in $d_1^{\text{st}} \sim d_4^{\text{th}}$ scales in industrial bed

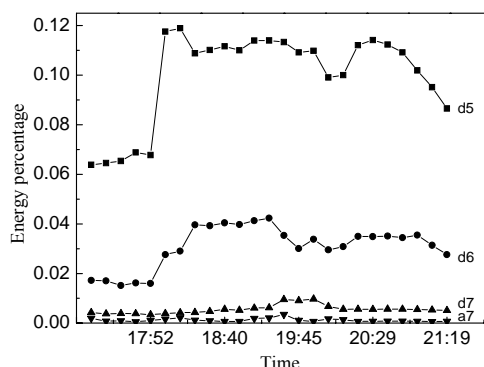


Fig.5 Variation of energy ratio in $d_5^{\text{th}} \sim d_7^{\text{th}}$ and a_7^{th} scales in industrial bed

依据。

2.4 流型和料位

首次采用声发射技术,对 $\phi 150$ 流化床内的 LLDPE 树脂进行测定,根据声能量随床高的变化,得到了流化床内的双循环流型。

如图 6 所示。左图是能量随床层高度的变化曲线,右图是所对应的流化床内大小循环的分布状况,由图可知,声能量随床高的增加(密相段内)存在着一个最小值和一个最大值。在近分布板处,由于分布板射流作用,颗粒被迅速加速向上运动,因而分布板上颗粒具有较大的能量,声波能量较高。随着床高的增加,射流的动能迅速衰减,射流蜕化为许多向上运动的小尺寸气泡,颗粒速度相应下降,声波能量随之减少,至分布板以上 0.17 m 处,声波能量达到最小值,说明在此处颗粒运动变得不活跃,存在着所谓的“滞留区”或者“死区”。

由于重力的作用,被提升到滞留区的颗粒还会随机地从两个射流股之间的空间回流,在分布板形成堆积,堆积的颗粒还会继续被气体射流再次加速,由此形成床内的短程循环区。随着床高的继续增加,部分颗粒运动脱离滞留区进入主循环区。在主循环区,壁面颗粒继续恢复活跃的运动状态,声波能量沿床高增加并达到稳定值。从流体力学方面分析,气泡在上升过程中相互聚并,尺寸不断长大,并且向床中心区域运动,由于颗粒上升是依靠气泡的夹带,当气泡携带着固体颗粒在床面爆破时,上流的颗粒将沿边壁区回流,以补充向上流动的颗粒造成的空缺,再次进入循环区。由此形成颗粒在床内的主循环区。由声波能量的测量数据可以明显地区分出大小循环的分界线,在床层界面,图中 0.60m 处,由于气泡逸出床面时的弹射作用和夹带作用,致使来自气泡顶部和来自气泡尾涡的颗粒因气泡破碎被抛入流化床的自由空域,因而此处的颗粒运动最为活跃,即产生的声能量和声波信号的波动也就越大。最后,料面以上为流化床的稀相,颗粒浓度大大降低,声波能量迅速下降。可见,颗粒在流化的过程中,声波能量能够反映颗粒与颗粒的碰撞、颗粒与壁面的碰撞(如果是热模实验,还有催化剂颗粒在聚合过程中的破碎)等过程。

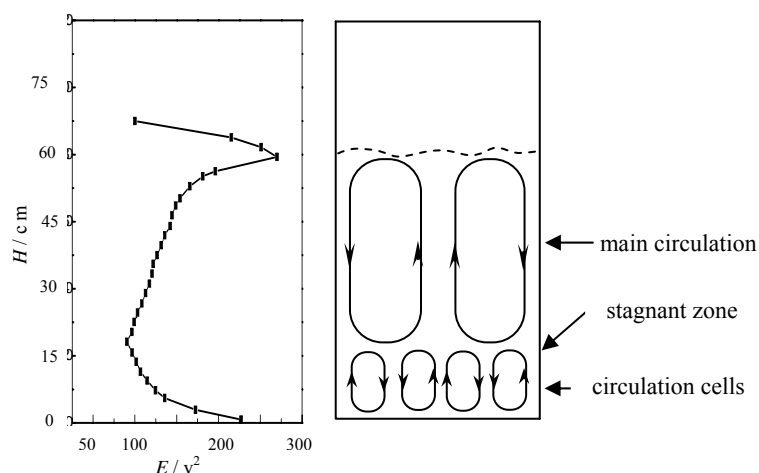


Fig.6 AE energy profile and multi-circulation
($U=0.4$ m/s, $\phi 150$, $H=0.60$ m)

3 结论

1. 通过对气固流化床颗粒作用壁面产生的声波信号的多尺度小波包分析,发现各尺度能量分率随流速变化存在着规律性的演化行为,提出了判断起始流化速度和初始湍动速度的新方法。
2. 应用 AE - PSD 粒径分布模型能够很好地实现实验室冷模和工业热态条件下颗粒粒径分布的在线测量。
3. 利用声发射技术,结合多尺度小波分析,提出了实时监控气固流化床聚合物颗粒团聚结块的判据。
4. 首次运用声发射技术成功测得了气固流化床的颗粒流动模式和料位。

References

- [1] DeChellis, M. L., Griffin, J. R., Muhle, M. E. Process for polymerizing monomers in fluidized beds, USP at. 5405922, 1995
- [2] Chen Gantang(陈甘棠). Chemical reaction engineering(China)(化学反应工程). Beijing: Chemical Industry Press, 1989
- [3] Liang Weihua(梁卫华), Wang JInfu(王金福), Han Lu(韩禄), etc. Prediction of minimum fluidization velocity of solicon particle system with the pressure fluctuation method. *The Chinese Journal of Process Engineering(过程工程学报)*, 2002, **2**(1): 1-6
- [4] H.Koda, T.Kurisaka. Research and Development of Gas Phase Polymerization Process of Propylene, *Fluidization Science and Technology Conference Paper*, China-Japan Symposium Science Press, 1985. 402-413
- [5] Hou Linxi(侯琳熙), Study on acoustic emission measurement and multi-scale structure of fluidized bed polymerizer, [dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University(浙江大学), 2005
- [6] Zhang, Yufeng, Hamid, Arastoopour. Dilute fluidized cracking catalyst particles-gas flow behavior in the riser of a circulating fluidized bed. *Powder Technology*. 1995, **84**(3): 221-229
- [7] Yang Yongrong(阳永荣), Hou Linxi(侯琳熙), Liu Chengwu(刘诚午), et.al. CN(中国专利) 20031011358.7(申请号)
- [8] 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. (China)(自然科学进展)*, 2005, **15**(3): 380-384
- [9] Zhao Guibing(赵贵兵), Yang Yongrong(阳永荣), Hou Linxi(侯琳熙). Mechanism of Acoustic Emissions and its Application on Diagnosis of Malfunction in Fluidization, *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)(化工学报)*, 2001, **52**(11): 941-943

Some Applications of Acoustic Emission in Fluidized Bed

Shu Weijie, Cao Yijia, Ren Congjing, Zheng Weihua, Wang Jingdai, Yang Yongrong
(Department of Chemical and Biochemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract : As the acoustic measurement has many advantages such as high sensitivity, safety, non-intrusiveness, being real-time and on-line, it is employed in many fields. In our experiments, we achieved the real-time and on-line detection of flow pattern, bed height, the initial fluidization velocity, particle size distribution, agglomeration as well as particle velocity, by collecting the information from the acoustic signals of fluidized bed.

Keyword: Acoustic emission, fluidized bed, U_{mf} , PSD, agglomeration, wavelet, wavelet packet transform, spectrum analyzer

声发射技术在气固流化床中的应用

作者：[曹翌佳](#)，[任聪静](#)，[郑卫华](#)，[王靖岱](#)，[阳永荣](#)
 作者单位：[浙江大学化学工程与生物工程系, 浙江杭州310027](#)

相似文献(6条)

1. 学位论文 [徐显骏 聚乙烯气固流化床的基本流动参数的测定](#) 2007

气相流化床乙炔聚合生产工艺中,分布板是保证气固流化床具有良好而稳定的流态化状态的重要构件,直接影响流化床内颗粒的流动模式和流化均匀性,是流化床聚合反应器设计所必需考虑的关键部件。寻找能快速、准确、灵敏、环保地测定聚乙烯气固流化床中包括起始流化速度、流动模式、流化均匀性和分布板上死区在内的基本流动参数的方法,继而揭示不同分布板的优劣性,不仅有助于加深对流化床聚合反应器的认识、加快分布板的改造和设计,而且对于聚合反应的安全生产和优化操作、工业反应器的开发设计具有重要的指导意义。针对目前聚乙烯气固流化床分布板存在着抗沉积能力不强、稳定性不高、易被活性物质堵塞等缺陷,本文设计了新型的抗沉积分布板,并以三种不同结构的分布板为参照,采用声发射检测技术,研究测定聚乙烯气固流化床包括起始流化速度、颗粒的流动模式等基本流动参数,在线检测分布板上死区的存在与否和风量射流特性,为分布板的设计和筛选提供了新的方法。本文主要的创新性工作包括:

- (1) 设计并制备了适用于聚乙烯气固流化床的新型抗沉积分布板,该分布板具有抗沉积能力强、物料流化充分、基本没有死区、生产稳定、操作灵活和生产周期长等优点。
- (2) 利用声发射检测技术,在分布板上采集气固流化床颗粒作用于分布板产生的声信号,结合频谱分析,提出声发射测量起始流化速度和起始湍动速度判据,即当声信号的能量比或均方差比达到最大值时的表观气速为起始流化速度,当声信号的能量比或均方差比达到次大值时的表观气速为起始湍动速度。同时,通过对声波信号的多尺度小波或小波包分析,发现各尺度能量分辨率随气速变化存在着规律性的演化行为,建立了颗粒流化的能量分配理论,包括能量一次分配理论和能量再分配理论。基于气固流化床颗粒流化的能量分配理论,提出了判断起始流化速度和起始湍动速度的新方法,即能量达到第一次分配平衡时,气速为起始流化速度,当能量达到再分配平衡时,气速为起始湍动速度。根据两种判据得到的聚乙烯起始流化速度均为0.08 m/s,与经典的压差法和文献上的压力脉动法测得的起始流化速度完全一致。
- (3) 采用声发射检测技术,通过测量气固流化床声能量的轴向分布,获得了装载不同分布板时气固流化床的颗粒流动模式。研究表明,颗粒的流动模式和分布板结构密切相关,装载抗沉积分布板或北欧化工分布板时,颗粒的流动模式为带滞留区的双循环流动模式,而装载齐鲁中试分布板和改进齐鲁中试分布板时为无滞留区的单循环流动模式。同时,通过测量气固流化床壁面不同方位声能量轴向分布,考察了不同分布板的偏流程度。研究发现,抗沉积分布板和北欧化工分布板流化均匀性较好,而齐鲁中试分布板和改进齐鲁中试分布板流化均匀性较差,存在着一定程度的偏流。
- (4) 利用声发射技术,通过采集分布板下不同位置的声信号,结合频谱分析,发现声能量的分布直接反映了分布板死区的分布,继而提出了聚乙烯流化床分布板上死区存在的判断准则,即当某区域的声波能量值与分布板上最大声波能量值的比值不大于40%时,表明该区域为分布板死区。判据得到了摄像法的检验。对分布板的死区研究表明,抗沉积分布板通过采用新型风帽,有效地提高了抗沉积分布板风帽出口气体流速,较好地消除了分布板死区,提高了分布板性能。而其它参照分布板均存在着不同程度的死区区域,影响流化质量。
- (5) 采用声发射技术,针对单风帽分布板,结合声信号的频谱分析,能够较为准确地测量出风帽的喷射距离。和摄像法相比,具有较好的精度。实验结果表明,新型风帽喷射距离为参照风帽的两倍左右,该风帽在具有更大的吹扫面积的同时,喷射气速的变大更能保证大颗粒不在板上沉积,抗沉积能力得到加强。与此同时,利用称重法对四种分布板的漏料情况进行了考察。实验发现,抗沉积分布板漏料量最少,具有更好的防漏料效果。

2. 学位论文 [舒伟杰 乙炔气相聚合流化床反应器流动模式的研究](#) 2006

气相流化床乙炔聚合生产工艺中,床内的流动模式是流化床聚合反应器设计所必需的基本条件,直接影响到聚合反应特性和传热传质性能,揭示其本质特点及变化规律,不仅有助于从理论上加深对流化床聚合反应器的认识,而且其研究结果对反应器的设计和改造等工业过程开发具有直接的应用价值,对于工业反应器的安全生产、优化操作和产品开发也具有重要的实用价值。因此,研究流化床聚合反应器的流动模式极富挑战性,成为本文的主要任务。本研究论文以声波的测量和分析为研究手段,对气相流化床聚合反应器中的流动模式进行了研究。通过研究流化床壁面颗粒的运动活跃程度,获得了流化床内正常情况和故障条件下的流动模式特征,以及流动模式随颗粒粒径和表观气速变化的实验证据,并通过颗粒温度考察了双循环流动模式中滞留区的颗粒活跃程度。本文主要的创新性工作包括:

- (1) 在实验室冷模装置和工业热模装置上,气速为0.6m/s时,得到了平均粒径为511.6 μm高密度聚乙烯、平均粒径为221.2 μm双峰聚乙烯和平均粒径为540.0 μm线性低密度聚乙烯的颗粒流动模式,研究发现,高密度聚乙烯颗粒和冷凝态下的线性低密度聚乙烯颗粒在流化床内的流型都为带有滞留区的双循环流动模式,而双峰聚乙烯颗粒则是单循环流动模式。
- (2) 采用声波测量技术,通过对声信号的能量分析和频谱分析,能够敏感地检测到气固流化床的结块,为实现工业热模装置上结块的预警和实时监控提供了基础。在实验室冷模装置上,通过加入结块来测定故障条件下双峰聚乙烯在不同气速下的流动模式,研究发现,结块的存在将导致在结块位置声波能量的变化,当加入的结块尺寸增大到一定程度时,流型将发生突变,由单循环流动模式转变为双循环流动模式;同时发现,在结块存在的情况下,气速对流型没有影响。相应的结论获得了工业试验的检验。
- (3) 根据Geldart颗粒分类法,将双峰聚乙烯、高密度聚乙烯和油类籽分别划分为拟A/C类、B类和D类三种颗粒,通过声发射技术测定了不同静床高和不同气速下三种颗粒的流动模式,研究发现,拟A/C类和D类颗粒为单循环的流动模式,B类颗粒为双循环的流动模式。
- (4) 通过声发射技术对单粒径和不同平均粒径颗粒流动模式的测定,发现不同粒径的颗粒具有不同的流动模式,并且聚乙烯颗粒单、双循环的流动模式转变发生在粒径为0.296~0.328mm之间,此处正是聚乙烯的A类与B类粒子的分界处附近。通过声发射技术测得的颗粒流动模式分析,发现不同粒径的滞留区区域范围和滞留区中心位置随流化数的增加慢慢变小,而主流区区域范围则随流化数的增加逐渐增大,证实了气速的增加有利于床内反应的进行和颗粒的流化。
- (5) 通过气固流化床颗粒产生的声波理论分析和虚拟颗粒温度理论分析,得到了计算流化床内不同高度、气速下的虚拟颗粒温度的理论公式。以平均粒径为0.640mm的聚乙烯颗粒为例,得到了表征颗粒活跃程度的虚拟颗粒温度计算公式。基于虚拟颗粒温度,提出颗粒具有良好流化的判据:虚拟颗粒温度大于临界虚拟颗粒温度,即 $T^* \geq T^*_{cr} = (1.5umf)^2$ 。如果满足上述判据,床内的颗粒具有一定的活跃程度,在流化过程中不会出现滞留,并由此引起的团聚结块的流化床故障。并按照判据,以平均粒径分别为0.482mm、0.522mm、0.584mm和0.640mm的四种颗粒为例,发现当操作气速达到5个流化数以上时,床内不存在颗粒的滞留,只是滞留区处的颗粒处于相对不活跃的状态,并不会发生团聚结块。

3. 会议论文 [舒伟杰, 曹翌佳, 任聪静, 郑卫华, 王靖岱, 阳永荣 声发射技术在气固流化床中的应用](#) 2005

利用声发射检测技术,根据不同粒径的颗粒在气固流化床壁面碰撞产生不同频率的声波信号的机理,结合能谱分析、多尺度小波和小波包分析,可以实现气固流化床的流化速度、粒径分布、结块、流型和料位等流化动力学参数的实时在线检测。在φ150mm气固流化床冷模装置中,测定了流态化实验中聚乙烯颗粒碰撞壁面的声发射信号。实验发现,通过对不同气速下声波信号的小波包分析,可获得颗粒的起始流化速度和初始湍动速度。应用AE-PSD方程能够很好地揭示声波信号在各尺度的能量分辨率分布特征与粒径分布的定量关系,其平均相对误差都在10%以下。并可以通过对声信号的7尺度小波分析,发现床内大颗粒的增加和结块的形成与代表大颗粒信号的6、7尺度的能量变化有着密切的关系。同时,首次用声发射检测技术测得了流化床内的流动模式为带有滞留区的双循环模式。研究结果表明,声发射检测技术能快速、准确地实现流化床流化动力学参数的实时监控。

4. 学位论文 [杨宝柱 流化床聚合反应器颗粒生长与流动模式的研究](#) 2005

气相流化床乙炔聚合生产工艺中,床层流化的均一性、床层的传递特性、流态化的特征参数、反应效果、聚合物后处理以及聚合物产品均受到流化床内颗粒粒径分布的影响。因此,在乙炔气相聚合反应中,聚合物颗粒粒径及其分布的检测、预测和调控,对于优化操作生产,实现聚合物产品的设计,具有非常重要的意义。另一方面,与颗粒粒径分布密切相关的流动模式是流化床聚合反应器设计所必需的基本条件,直接影响到聚合反应特性和传热传质性能,揭示其本质特点及相互间的转变规律,不仅有助于从理论上加深对流化床聚合反应器的认识,而且其研究结果对反应器的设计和改造等工业过程开发具有直接的应用价值。但是所有研究问题的瓶颈都在于目前尚未有效的检测方法进行工业化流化床聚合反应器的测量。因此,采用新型测量技术,研究流化床聚合反应器颗粒长大的规律、流体力学特性以及它们之间的相互作用关系,成为本文的主要任务。

受古人“听音辨琴”的启示,并发现“气固流化床运行过程中发出的声波高频变化反映为声波各尺度(频段)能量分布的改变,正是由于不同粒径的颗粒所产生的声波能量叠加,导致声波在各尺度的能量分布不同”。因此,本文通过对流化床运行过程中发出的包含有丰富信息的声信号检测,经非线性的多尺度解析,发明了新型的气固流化床参数在线测量技术,实现了气固体系颗粒流动模式的实验检测和结块与料位高度的在线监控。在此基础上,建立了工业气固流化床稳态操作下聚乙烯颗粒粒径分布的预测模型和定制模型,模型可以较好地预测聚合物的颗粒粒径分布,并在定制模型的指导下,通过调节流化床聚合反应器各操作变量,可以实现定制的聚合物颗粒的粒径分布。通过研究流化床壁面颗粒的运动活跃程度,获得了流化床存在大小循环的流动模式特征,以及流动模式随颗粒粒径和表观气速变化的实验证据。本文主要的创新性工作包括:

- (1) 在考虑聚乙烯颗粒在气相流化床反应器中生长、磨损和折析的基础上,建立了乙炔气相聚合工艺中稳态操作条件下颗粒生长与粒径分布的预测模型。论文首次对工业气相流化床反应器的聚乙烯颗粒生长和粒径分布进行了模拟应用,计算得到的粒径及其分布与生产数据基本一致,说明该模型能够较为真实地反映气相流化床反应器内聚乙烯颗粒的反应历程和生长规律,在预测聚乙烯颗粒分布方面具有良好的应用前景。
- (2) 首次提出了聚乙烯颗粒粒径分布定制模型。由定制的最优粒径分布数据,可以求得催化剂粒径及其分布、操作气速、反应温度、乙炔浓度和丁烯浓度等操作参数,由此进行生产可获得具有良好流态化特性的聚乙烯颗粒粒径分布。根据工业装置的生产数据分析了计算结果的合理性。其中,运用粒子群优化算法求解模型的非线性规划问题,算法具有调整参数少、收敛速度快和全局优化等优点。
- (3) 首次将声波测量技术应用于气相流化床聚合反应器中颗粒流动模式和料位高度的测量,实现了气固流化床简易快捷、安全环保的在线监控,并投入工业运行。其中,运用声发射技术测得气固流化床的颗粒流动模式,发现其与颗粒粒径和表观气速密切相关。论文系统考察了粒径和气速对流型的影响,发现对于颗粒粒径为500 μm的聚乙烯颗粒,当表观气速在0.3~0.7m/s内,其对应的流动模式为带有滞留区的双循环模式。如果气速增大到0.8m/s以上时,流动模式将转化为无滞留区的单循环流动模式。而当颗粒平均粒径降为365 μm,对应的双循环流动模式蜕化为单循环模式,壁面不存在滞留区。进一步发现,滞留区位置与静床高无关。根据声波能量随流化床高的规律性变化,首次提出了声信号测定料位的判据——声能量的均方差比达到最大时的床高即为料位高度。判据在实验室冷模装置和工业流化床热模装置上成功获得了验证。
- (4) 首次将三种混沌特征参数——最大Lyapunov指数、关联维数和熵同时应用于气固流化床声信号的分析,研究表明,三种混沌特征参数均能敏感而明确地指示出固定床、鼓泡流化和湍动流化等不同流型之间的转变过程,并且在不同的操作条件下呈现一定的规律性,为流型识别提供了新思路。

而在颗粒流化的全过程中,混沌程度随气速增加呈凸形曲线,其中从进入鼓泡态到湍动流化状态阶段颗粒的声波信号存在着混沌特征。混沌分析同时发现,明显的气泡是床层运动进入混沌态的最重要因素。

相比于关联维数和K熵,最大Lyapunov指数能更为清晰地反映床层运动中颗粒从静止到起始流化的转型特征,而关联维数和K熵则能更清晰地辨析从鼓泡态到湍动态的转型区域。

(5)根据声波信号的小波分析,提出了气固流化床聚合物粉体团聚结块的判据,即声波能量分率由低尺度向高尺度有层次地增加,声波信号的主频频率是从高频向低频转移,尺度内部的能量发生突变时,表明已有严重结块产生。这可作为流化床结块产生实时检测的一个有力手段,代替对人体有致命伤害的 γ 射线。

在考察结块声信号混沌特征参数演化规律的基础上,根据混沌分析,提出了气固流化床结块的量化判据,即故障系数CLE1、CD2和Ck2的突变,该参数灵敏度高,能有效地预测和诊断气固流化床中的结块。并在实验室冷模装置和工业中试热模装置上得到了验证。

(6)最后,建立了气相流化床聚乙烯监控软件包,并在工业装置上成功投用。研究成果已通过中国石油化工股份公司专家的鉴定。

目前, γ 射线检测在工厂较为普遍使用,但因其对人体存在致命的伤害,较难为操作人员所接受,使得结块和料位的监控常处于无序的状态。因此,本论文发展的这种简易快捷、安全环保的气固流化床实时声波监控技术具有重要的应用价值。

5. 期刊论文 [陈杰勋. 曹翌佳. 任聪静. 王靖岱. 阳永荣. Chen Jiexun. Cao Yijia. Ren Congjing. Wang Jingdai. Yang Yongrong 气固流化床分布板死区的声发射检测 - 石油化工 2008, 37 \(9\)](#)

在 $\phi 250$ mm的流化床中,采用空气-聚乙烯颗粒体系和3种不同结构的气体分布板进行流化实验,通过声发射检测装置采集气体分布板下方不同位置的声信号,分别考察了3种不同结构的气体分布板上流化死区的存在情况与位置分布。实验结果表明,分布板局部的声信号平均能量可以反映对应位置的颗粒活跃程度,定义了颗粒活跃程度指数Ri,并提出以 $Ri=0.6$ 作为流化死区存在的判据。声发射技术能有效地检测流化床分布板上的流化死区,对分布板的设计以及工业生产的故障监控都具有积极的意义。

6. 学位论文 [姜晓静 多相流动的随机信号结构分析 2008](#)

多相流体系的随机信号分析是多相流反应器研究的重要方面,如何从复杂的随机时间序列信号中分析并提取出与过程参数及变量最相关的信息,是问题的重点及难点。本文将信号分析方法与多尺度概念相结合,系统地提出了基于小波分析与R/S分析的多相流体系随机信号多尺度结构判别标准,分析了各信号尺度与物理尺度之间的对应关系,并将此判别标准引入到多相流体系声发射信号检测中。通过信号结构与物理尺度之间的对应关系,揭示了气固流化床中的声发射机理,依据此机理实现了气固流化床中颗粒粒径分布的声发射检测。通过对信号尺度与物理尺度对应关系的分析,得到了液固搅拌釜中声发射信号结构与临界搅拌转速、淤浆悬浮高度之间的关系,并建立了相应的判断准则,实现了临界搅拌转速及淤浆悬浮高度的快速、准确、灵敏、环保的在线检测。本文的主要创新工作包括:

1. 将R/S分析与小波分析相结合,根据不同小波尺度Hurst指数的变化规律,建立了多相流随机信号多尺度划分的标准,将多相流体系随机信号划分为微尺度(Hurst指数均小于0.5)、介尺度(既有大于0.5的Hurst指数,也有小于0.5的Hurst指数)和宏尺度(Hurst指数均大于0.5)。

2. 通过对气固流化床的声发射信号与压力脉动信号的结构比较,以及气固流化床、气力输送、气液固淤浆鼓泡床、液固环管及液固搅拌釜中声发射信号多尺度结构差异比较,建立了多相流体系随机信号多尺度结构与物理多尺度的对应关系,认为在有固体颗粒存在的多相流体系,微尺度信号代表了颗粒相对于主体流动的运动状态;介尺度代表主体相对于系统的运动或者不同主体流之间的相互运动;宏尺度则反映整个系统状态随时间的变化。

3. 根据固体颗粒与壁面碰撞产生声波的机理,完善了反映颗粒性质、运动和频率关系的声波频率模型,以及反映颗粒粒径分布与声信号结构关系的Hou-Yang方程,对原有模型推导及说明的错误及疏漏进行了改进。通过在流化床冷模装置($\Phi 150$)及工业流化床聚合反应器装置中声发射信号的分析,提出了更适合工业在线测量的混合粒径标定方法。

4. 基于声信号的小波分解和R/S分析,以固体颗粒碰撞壁面产生的声发射信号所在的高频区域(微尺度)的声能量分率值($R<, 1>$)为特征参数,研究声能量分率随搅拌转速的变化规律,提出了搅拌釜临界搅拌转速的测量判据,即声能量分率快速减少并开始趋于稳定时所对应的搅拌转速即为临界搅拌转速。以水-玻璃珠体系为例,声发射方法测量值与目测值之间的平均相对误差为3.51%,表明声发射技术能快速、准确、灵敏地实现临界搅拌转速的测量。

5. 根据颗粒运动碰撞壁面产生声波的机理,结合声信号的频谱分析、小波分解和R/S分析,利用声波信号随搅拌釜轴向的规律性变化,发现测量点的声能量与主体区平均能量之比 $R<, E>$ 呈现二次阶跃性变化,基于此,提出搅拌釜淤浆悬浮高度的判据,即 $R<, E>$ 随搅拌釜轴向的二次阶跃性变化的分界线分别为淤浆悬浮高度和液位高度。以水-玻璃珠体系为例, $R<, E>$ 为0.62时对应的高度即为淤浆悬浮高度。对于6叶盘式涡轮浆,与目测法相比,淤浆悬浮高度的平均相对误差为7.1%。对于2叶桨式叶轮,与目测法相比,淤浆悬浮高度的平均相对误差为11.8%。可见,声发射法克服了取样法的繁琐和观察法的主观,实现了搅拌釜淤浆悬浮高度的快速、灵敏和非侵入式的在线检测。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6334121.aspx

下载时间: 2010年5月27日