

# 气液固三相流化床反应器测试技术

刘明言, 杨扬, 薛娟萍, 胡宗定

(天津大学化工学院, 天津 300072)

**摘要:** 在简述已有三相流化床测试技术的基础上, 着重对近年来开发的测试新技术的基本原理及优缺点进行了分析, 包括光纤探头技术、超声探头技术、放射颗粒跟踪技术、X射线颗粒跟踪测试技术、颗粒图像测速技术、电容层析成像技术、激光多普勒测速技术和相多普勒测速技术等, 同时, 展望了三相流化床测试技术的新方向。

**关键词:** 三相流化床; 测试技术; 气液固流态化; 反应器

中图分类号: TQ021.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2005)02-0217-06

## 1 前言

气液固三相流化床是一类具有重要工业应用价值的多相物理操作装置或化学和生物反应器, 但是, 由于流动的复杂性, 适用于三相流化床系统参数测量的测试技术还很有限。而无论是三相流态化系统的理论研究还是实际应用, 均离不开有效的三相流测试技术<sup>[1-4]</sup>。因此, 有限的测试技术制约着三相流态化理论的发展和技术的应用。值得欣慰的是, 随着现代科技的发展, 新的三相流化床测试技术不断出现。为了促进三相流态化理论和应用研究的发展, 本工作对近年来在三相流化床测试技术方面取得的最新成果进行了总结, 并展望了三相流化床测试技术的发展方向。

根据测试传感器是否侵入流场可将三相流化床测试技术分为两大类: 侵入式测试技术和非侵入式测试技术。

## 2 侵入式测试技术(Invasive Techniques)

侵入式测试技术的研究应用先于非侵入式测试技术, 始于20世纪60年代<sup>[4]</sup>。其优势在于可以方便快捷地实现局部特性参数的测量。侵入式测试所用传感器主要有针型探头、传热探头、超声探头和皮托管等。

### 2.1 针型探头(Needle Probes)

针型探头主要用于研究气液(固)系统的气相局部动力学行为。其时空分辨率分别为秒级和毫米级。单针系统主要用来研究气含率和气泡频率, 双针系统可用于测量气泡速度、局部时均相界面面积和平均泡弦长度分布, 多针系统可以测量气泡形状。针型探头主要有电导探头和光纤探头, 是三相流化床参数测量的重要手段。

电导探头测试的优势在于测量三相流化床的局部气含率。利用双针电导探头和示踪剂相结合可以测量局部液相速度及液相混合特性。双针电导探头也可用于同

时测量三相流化床系统的相含率<sup>[5]</sup>。

光纤探头有反射型探头和透射型探头之分, 常用于测量三相流化床中的气泡特性<sup>[6]</sup>。光纤探头也可用于测量局部固含率, 此时, 气泡的影响可通过标定加以排除。经过对反射型或透射型光纤探头的标定, 该技术也可以实现三相流化床相含率的同时测量。光纤探头引起误差的主要原因为气泡和探头之间的相互作用: 探头表面状况影响刺穿气泡的能力, 探头在多相流中的放置方向影响测量结果, 气泡的形状影响气泡大小和气液相界面面积估计的准确性。同时, 光纤探头的标定是否准确对于测量精度也有较大影响。

### 2.2 超声探头(Ultrasonic Probes)

超声探头测试是根据超声波在多相系统中的透射或反射特性的不同而实现参数测量的。这里所指探头是侵入式超声探头。超声探头主要用于气液系统气泡参数测量, 近年来开始用于三相流化床系统的参数测量<sup>[7,8]</sup>。根据测试原理的不同, 分为超声透射技术和超声反射技术。

根据透射声波特性测量局部气含率和局部平均相界面面积等参数的方法称为超声透射技术, 其需要声波发射探头和接收探头。测量时, 发射探头和接收探头被气液两相系统隔开。

根据来自气泡等表面的反射声波的幅值和频率确定气泡大小和速度的方法称为超声反射技术或脉冲回波技术。超声反射技术的探头本身既是发射器, 又是接收器。为了分析反射波的特性, 常采用脉冲回波技术。通过分析反射波的幅值和频率可以确定气泡尺寸和局部气泡速度分布。采用超声透射探头技术, 可对气液固三相循环流化床提升管内的局部气含率和局部固含率同时测量, 获得相含率的径向分布规律。

图1是采用双通道脉冲接收器系统的超声测试系

收稿日期: 2004-02-26, 修回日期: 2004-07-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 20106012)

作者简介: 刘明言(1966-), 男, 河南省禹州市人, 博士, 副教授, 化学工程专业, E-mail: myliu@tju.edu.cn.

统, 超声探头的具体布置如图 1(a)所示, 探头可沿径向移动. 测得的相含率分布如图 1(b)所示<sup>[8]</sup>.

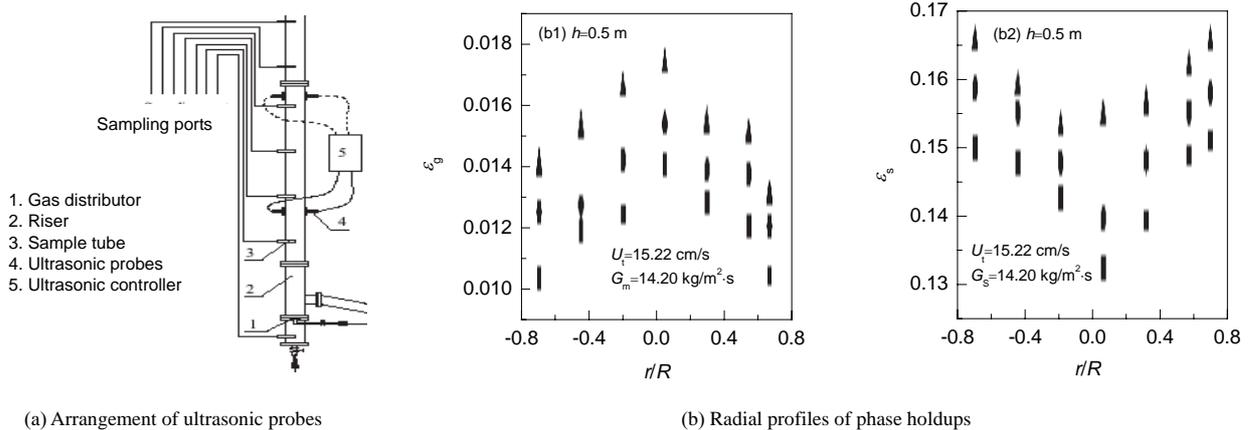


图 1 超声探头技术

Fig.1 Ultrasonic probe techniques<sup>[8]</sup>

### 3 非侵入式测试技术(Non-invasive Techniques)

侵入式测试技术具有对流场有干扰、标定曲线具有不确定性、时空分辨率低(厘米或毫米级、分钟或秒级)等局限性. 其中, 对流场有干扰是其最大局限. 非侵入式测试技术则无此缺陷, 分为全局特性参数测试技术和局部特性参数测试技术<sup>[4]</sup>.

#### 3.1 全局参数测量技术(Global Measuring Techniques)

全局测量技术包括压力传感器技术、相示踪技术、辐射衰减技术(X 射线、 $\gamma$ 射线和中子吸收射线摄影技术等)、声波技术(次声波、可闻声波到超声波等等), 可以得到三相流化床的流型、压降、相含率、气泡尺寸分布、相混合特性等. 对于测得波动特性数据, 还可以应用现代分析方法进行深入研究<sup>[4,9,10]</sup>.

#### 3.2 局部参数测量技术(Measuring Techniques Yielding Local Characteristics)

##### 3.3.1 摄像技术(Photographic Techniques)

摄像技术是一种比较传统的可视化研究手段, 对流场无干扰, 常用于研究二维三相流化床内的气泡行为, 结合液相和固体颗粒折射率匹配技术等, 可以测得气泡的大小、分布、上升速度、运动过程和气含率等<sup>[11]</sup>. 其局限性在于只能得到壁面附近的运动情况, 液相和壁面都要求透明. 对于高压系统, 需要耐压的视窗材料.

##### 3.3.2 放射颗粒跟踪技术

放射线照相技术(Radiographic Techniques)是摄像技术的延伸, 而放射颗粒跟踪技术(Radioactive Particle Tracking, 简称 RPT)以放射线照相技术为基础, 可以获得平均和瞬时三维多相流场图像<sup>[10,11]</sup>. RPT 也可称为

CARPT(Computer Aided RPT).

在测试过程中, 示踪颗粒与流化床内固体颗粒的大小和密度相同, 这样, 示踪颗粒的运动轨迹可以代表流化床内固体颗粒的运动轨迹. 与流化床内颗粒不同的是, 示踪颗粒可以发射射线, 一般用 $\gamma$ 射线.  $\gamma$ 射线被沿流化床高度布置的多个闪烁探测器所感知. 示踪颗粒位置不同, 施加到每个探测器上的 $\gamma$ 射线的辐射量不同. 通过估计流化床内 $\gamma$ 射线的衰减等可以测得示踪颗粒在较长一段时间内的瞬态三维运动位置或坐标[x,y,z]. 通过对颗粒运动轨迹上的点的连续微分, 可以将颗粒运动的位移转换为局部和瞬时速度分量. 但是, 该技术 1 次只跟踪 1 个放射颗粒, 属于点测量, 同时, 在由信号确定颗粒位置时, 需要繁琐的校正程序, 因此, 获得完整流场的时间较长, 数量级在 10 h 级<sup>[10,12]</sup>.

RPT 技术在三相流化床测量方面的最新进展是 X 射线颗粒跟踪测试技术(X-ray-based Particle Tracking Velocimetry, 简称 XPTV)<sup>[12]</sup>. XPTV 技术克服了 RPT 技术单点测量和费时的不足, 可以在较高的分散相含率下, 以很快速度(20 s)同时得到固体颗粒的三维速度场和局部平均固含率. 在 XPTV 技术实施过程中, X 射线在相界面处既不折射, 也不反射, 而是直线穿过多相系统, 克服了光学测试方法的缺点.

图 2 给出了 XPTV 测试系统[图 2(a)]及测得的 X 射线图像[图 2(b)]. 图 2(b)中, 黑色点为颗粒, 较亮的区域为气泡. 系统所用固体颗粒为立方体, 边长 2 mm, 液相为甘油, 表观气速 1.5 mm/s, 总气含率 2%, 总固含率 7.5%. 其测量原理为: 来自 2 个 X 射线源(S1 和 S2)的射线穿过流化床达到 2 个图像增辉器(I1 和 I2)上, 表示颗粒的 P 点在 2 个图像增辉器上生成 2 点图像 P1 和

P2. 点 P 的三维运动情况可由测得的二维矢量(点 P1 和 P2)重构得到. 图像增辉器的作用是将 X 射线转化成可见光并将其强度放大. 再用 CCD 摄像头(每秒 50 场)将图像记录并输入计算机. 通过应用具有颗粒确认、颗粒跟

踪和失真校正功能的软件包, 研究颗粒的运动情况, 根据其位移和时间间隔求出速度分布, 进而求出局部固含率. 颗粒与环境的确认是根据像素灰度值的大小, 颗粒跟踪时, 同时考虑连续 3 幅图片.

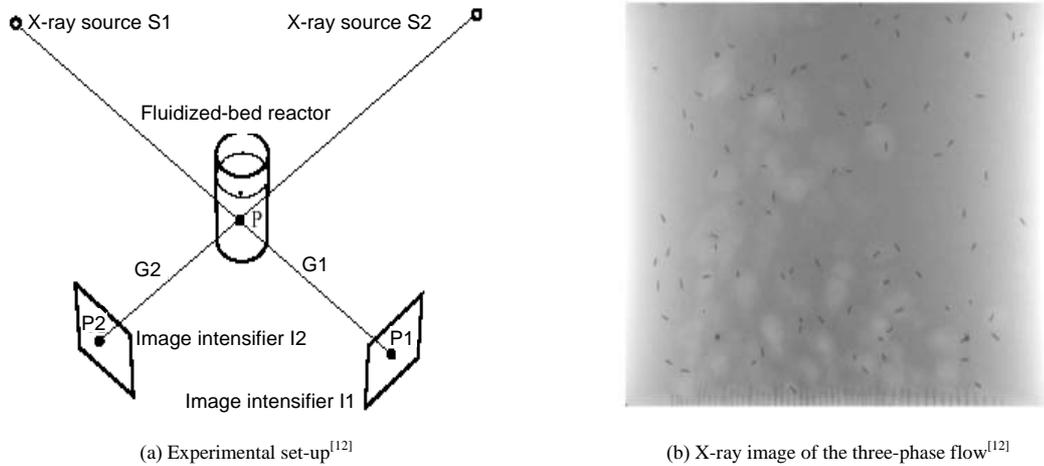


图 2 XPTV 测试系统和 X 射线图像  
Fig.2 Experimental set-up of XPTV and X-ray image of the three-phase flow

图 3 给出了部分颗粒轨迹和重建的三维颗粒速度矢量场. 其中, 速度场是测量时间(18.4 s)内的平均值. 从

图 3(b)可以看出流化床右侧有一上升流, 而左侧存在一下降流. 这归因于右侧比左侧具有较高的气体通量.

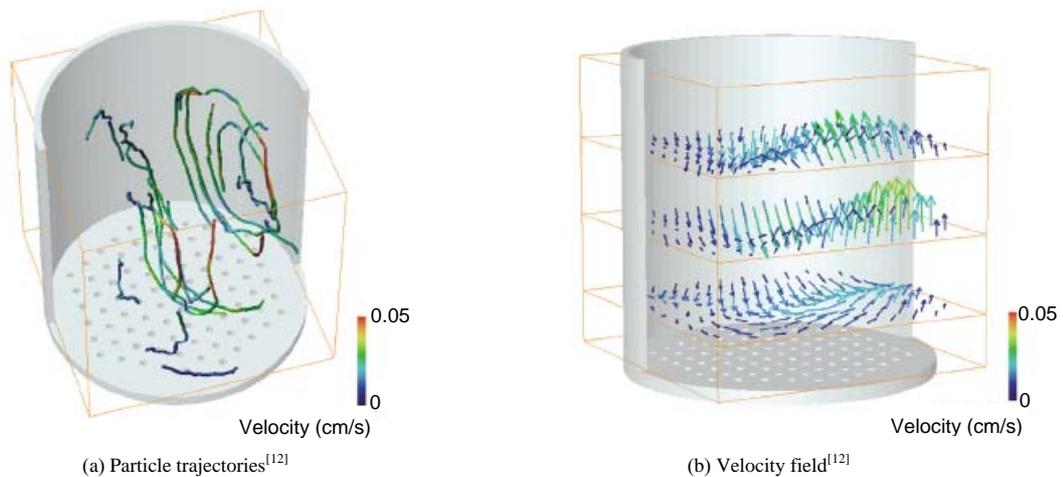


图 3 部分颗粒轨迹和计算得到的速度场  
Fig.3 Some particle trajectories and calculated velocity field

XPTV 技术已分别用于测量气液鼓泡塔内的液相速度分布和三相流化床内的颗粒速度及局部固含率, 但是, 如何将二者结合, 实现三相流化床中相参数的同时测量, 是进一步研究的方向. 另外, 还应提高表观气速及液速等操作条件, 以更接近实际工况.

### 3.2.3 颗粒图像测速技术

颗粒图像测速(Particle Image Velocimetry, 简称

PIV)技术 20 世纪 90 年代初被应用于多相流系统, 以 Eulerian 观点获得整个流场的瞬时和平均速度分布, 突破了空间单点测量技术的局限性<sup>[13]</sup>. 其测试原理是: 激光束经透镜形成片光源, 照射含有示踪颗粒的被测流场, 用高分辨率快速 CCD 摄像头对流场空间进行成像数字采样, 然后将图像数据输入计算机进行处理. 通过计算多幅图像中分析窗口内颗粒的位移, 可以得到瞬时

速度场. PIV 技术不仅可以测量三相流化床内局部颗粒瞬时速度, 还可以测量速度波动、相含率、气泡大小及分布.

该测试技术的难点在于相的有效识别和重建三维流场, 为此提出了许多方法, 如: 对液相应用荧光示踪颗粒、对信号进行过滤、应用折射率匹配技术、筛选合适的光路设计等.

### 3.2.4 电容层析成像技术

层析成像技术的原理是通过测量穿过流化床截面的物理特性, 并通过重构算法获得截面的相分布图像. 根据物理特性的不同, 可分为( $\gamma$ 或 X 射线)光子衰减层析成像、电阻抗层析成像、超声层析成像和电容层析成像 (Electrical Capacitance Tomography, 简称 ECT) 技术等<sup>[4]</sup>. 其中, ECT 技术在多相流方面最具发展潜力和应用前景.

ECT 测试技术的特点是能够测得多相装置某截面上相的分布及相含率, 多截面测量时还可以测得相速度分布. 该技术在 20 世纪 80 年代得以迅速发展. 它具有结构简单、非侵入性、速度快、成本低、安全性能佳、无需流场透光性等特点, 适合较高相含率分布情况的测定. 主要研究和应用对象为两相流(油水、油气、气固、气液等)及三相流(油水气)系统. 近年来, 被 Warsito 等<sup>[4]</sup>引进气液固三相流化床系统的流动研究中, 取得了可喜的进展.

ECT 技术系统由电容传感器系统、电容数据采集系统、计算机图像重构系统三大部分组成. 在绝缘管道外壁均匀安装多对金属电极板, 外面采用屏蔽罩屏蔽, 构成电容传感器部分. 测试原理是: 多相流各相介质具有不同的介电常数, 当各相组分浓度及其分布发生变化时会引起多相流混合流体等效介电常数分布的变化, 电容测量值随之发生改变. 采用多电极阵列式电容传感器, 传感器各电极之间的相互组合可获得反映各相分布状

况的多个电容测量值. 以此为投影数据, 采用合适的图像重建算法, 可重建出反映装置系统某一截面上各相分布状况的图像.

ECT 技术的关键是图像重构. 对截面上多相介质空间浓度分布的成像过程实际上是对截面上介电常数分布的重建过程. 在三相流化床的 ECT 测试研究中, Warsito 等<sup>[4]</sup>提出了基于模拟神经网络的多判据最优化图像重构技术, 用该方法得到了三相流化床内的流动分布, 并结合三相电容模型等计算了气含率和固含率.

图 4(a)为 ECT 测试系统结构示意图<sup>[4]</sup>. 该电容传感器阵列由双平面传感器组成, 每个平面有 12 根电极. 电极被贴附在装置系统的外壁面. 每个电极的长度为 5 cm. 实验条件为: 三相流化床直径 10 cm, 高 1 m. 气相为空气(介电常数=1), 液相为煤油(介电常数=2.2), 静液高度 80 cm, 玻璃球(介电常数=3.8)直径 0.2 mm.

图 4(b)为采用 ECT 测量方法和压降方法测得的 2 个截面的平均相含率的比较<sup>[4]</sup>. 可以看出, 两种测量结果都很接近. 图 5 给出了距离气体分布器 20 cm 处, 三相流动在同一截面 4 s 的拟三维流动结构及气含率分布<sup>[4]</sup>. 图 6 是所测 4 s 内截面固含率的分布图<sup>[4]</sup>. 这些与实际现象吻合较好.

ECT 技术的局限性主要有: 电容场是一种软场, 难以得到很高的空间分辨率; 图像重构是解一个逆问题, 一般不存在解析解, 而且不存在唯一解, 原因是从有限个电极对可以测得的极间电容数目远少于所需重建图像像素数, 所以, ECT 是一个由严重不完全投影数据重建图像的问题; 数据采集速度和降低噪声的矛盾难以解决. 尽管如此, 由于 ECT 技术的突出优点, 可以预见, 其在三相流化床参数测试方面的研究和应用在今后将会得到较大的发展.

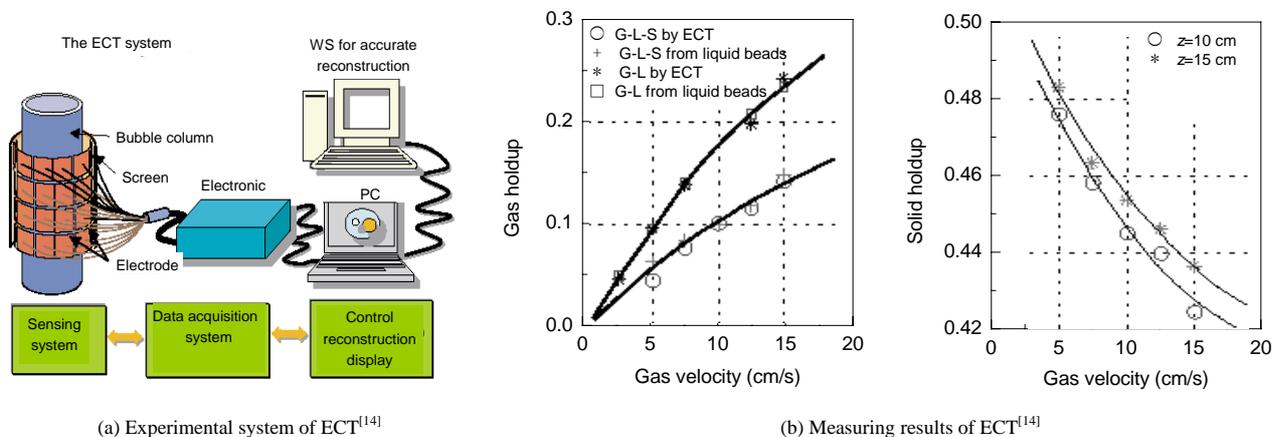


图 4 ECT 测试系统及相含率测试结果  
Fig.4 Experimental system and phase holdup results of ECT

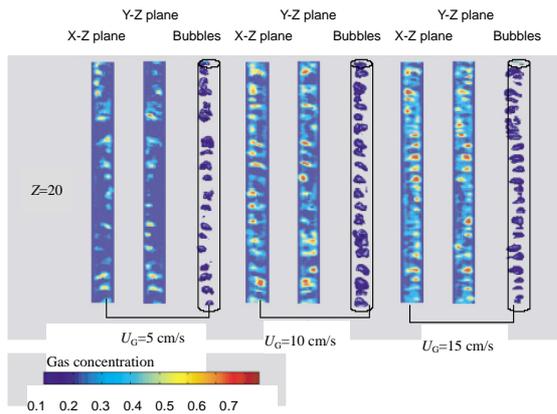


图 5 G-L-S 三相系统流动结构和气含率分布  
Fig.5 Flow structures and gas holdup distributions  
in G-L-S system<sup>[14]</sup>

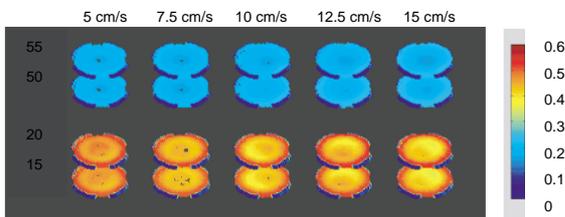


图 6 G-L-S 三相系统时均固含率的截面分布  
Fig.6 Time averaged cross-sectional distributions of  
solid holdups in G-L-S systems<sup>[14]</sup>

### 3.2.5 激光多普勒测速技术

激光多普勒(Laser Doppler Anemometry, 简称 LDA)测速技术可以测得局部运动瞬时速度,具有测量精度高、时间和空间分辨率高、测量体积小、响应频率快、非接触测量、对流场无干扰等优点<sup>[4]</sup>。测试原理是利用激光多普勒效应进行速度测量。研究主要集中在固含率较低的气固两相系统、液固两相系统和液含率较低的气液两相系统(液滴分散于气相中)。近年来,用于气液鼓泡塔系统相速度和大小测量的研究较多<sup>[4]</sup>,但是,用于三相流测试的很少<sup>[15]</sup>。

### 3.2.6 相多普勒测速技术

作为 LDA 测试技术的扩展,相多普勒测速技术(Phase Doppler Anemometry, 简称 PDA)可以测量多相系统中分散相的大小、速度和相间滑移速度等,还可以从连续相的数据中得到 Reynolds 应力和湍流强度。在测试原理上与 LDA 测试系统不同的是,激光多普勒信号由两个具有一定相位角的光探测器接收。PDA 具有与 LDA 类似的优点。主要用于测量气液两相系统的相速度、大小等参数。只是最近,PDA 技术才开始被用于气液固三相流系统的参数测量<sup>[16]</sup>。

在选取的三相流系统中,液相为连续相,气含率最大为 0.66%,保持较小的气含率的目的在于创造一个与鼓泡流类似的流动环境,固含率为 0.054%,固含率再大时,会使液相测量数据精度难以接受,固体颗粒的直径为 0.15 mm。由此可以看出,该三相流与工业实际情况具有较大差距,可以称作模拟三相流。

激光(相)多普勒测速系统虽然比较复杂,价格昂贵,并且使用时技术要求高,但在细颗粒、低浓度流化床的速度测试中有着很好的应用前景。今后如能更好地解决光阻问题等,将有助于更好地提高该技术的测量范围和精度。同时,工业用实际三相流化床系统(颗粒、气泡等尺寸和含率较大的系统)参数的测量也是应该关注的研究领域。

此外,还有其他一些测试技术,如传热探头技术—热膜风速仪<sup>[4]</sup>、传质探头技术—极谱技术<sup>[17]</sup>、电扩散测试技术<sup>[18]</sup>、皮托管<sup>[4]</sup>等,限于篇幅,在此简略。

## 4 结论及展望

(1) 有效的三相流化床参数测试技术还很有限,技术难题在于气液固三相的识别,这是许多两相系统测试手段无能为力原因,制约着三相流化床理论的发展和技术的应用。

(2) 非侵入式测试技术明显的优点是对流场无干扰,但实施比较复杂,且价格昂贵。在实际操作状况下,往往难以实现或者效果不佳。测试实验数据往往是离散的或时均值,难以充分利用现代分析方法进行信息挖掘和提取等。因此,不能忽视侵入式测试技术的研究和应用。同时,将两类测试技术的优点相结合,是获得三相流化床完整实验数据的有效途径。

(3) 在完善现有测试方法的基础上,结合现代科技的发展,研发安全可靠、无干扰、测试范围广、分辨率高、简便快捷、经济的测试技术是今后的发展方向。

### 参考文献:

- [1] Fan L S. Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering [M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 1989. 33-145.
- [2] 金涌,祝京旭,汪展文,等.流态化工程原理[M].北京:清华大学出版社,2001.430-459.
- [3] Liu M Y, Li J H, Kwauk M. Application of the Energy-minimization Multi-scale Method to Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds [J]. Chem. Eng. Sci., 2001, 56(24): 6805-6812.
- [4] Boyer C, Duquenne A M, Wild G. Measuring Techniques in Gas-Liquid and Gas-Liquid-Solid Reactors [J]. Chem. Eng. Sci., 2002, 57: 3185-3215.
- [5] 曹长青,刘明言,胡宗定,等.气液固三相流化床局部相含率轴径向分布的实验研究[J].化工学报,2005,56(2): 249-256.
- [6] Wang T F, Wang J F, Yang W G, et al. Experimental Study on Bubble Behavior in Gas-Liquid-Solid Three-phase Circulating Fluidized

- Beds [J]. Powder Technol., 2003, 137 (1-2): 83-90.
- [7] Macchi A, Grace J R, Bi H. Use of Ultrasound for Phase Holdup Measurements in Multiphase Systems [J]. Can. J. Chem. Eng., 2001, 79(4): 570-583.
- [8] Liu Z L, Vatanakul M, Jia L F, et al. Hydrodynamics and Mass Transfer in Gas-Liquid-Solid Circulating Fluidized Beds [J]. Chem. Eng. Technol., 2003, 26(12): 1247-1253.
- [9] Kang Y, Woo K J, Ko M H, et al. Particle Dispersion and Pressure Fluctuations in Three-phase Fluidized Beds [J]. Chem. Eng. Sci., 1997, 52(21-22): 3723-3732.
- [10] Larachi F, Cassanello M, Chaouki J, et al. Flow Structure of the Solids in a Three-dimensional Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed [J]. AIChE J., 1996, 42(9): 2439-2452.
- [11] 张立国, 王一平, 胡宗定. 气-液-固三相流化床内气泡行为分区的初探 [J]. 化工冶金, 1991, 12(1): 24-30.
- [12] Seeger A, Kertzscher U, Affeld K, et al. Measurement of the Local Velocity of the Solid Phase and the Local Solid Hold-up in a Three-phase Flow by X-ray Based Particle Tracking Velocimetry (XPTV) [J]. Chem. Eng. Sci., 2003, 58(9): 1721-1729.
- [13] Reese J, Chen R C, Fan L S. Three-dimensional Particle Image Velocimetry for Use in Three-phase Fluidization Systems [J]. Exp. Fluids, 1995, 19(6): 367-378.
- [14] Warsito W, Fan L S. ECT Imaging of Three-phase Fluidized Bed Based on Three-phase Capacitance Model [J]. Chem. Eng. Sci., 2003, 58(3-6): 823-832.
- [15] Brenn G, Braeske H, Zivkovic G, et al. Experimental and Numerical Investigation of Liquid Channel Flows with Dispersed Gas and Solid Particles [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2003, 29(2): 219-247.
- [16] Braeske H, Brenn B, Domnick J. Extended Phase-Doppler Anemometry for Measurements in Three-phase Flows [J]. Chem. Eng. Technol., 1998, 21(5): 415-420.
- [17] Essadki H, Delmas H, Svendsen H F. Friction on a Solid Sphere Exposed to Gas-Liquid and Gas-Liquid-Solid Flow in Bubble Column and Fluidized Bed Reactors [J]. J. Chem. Technol. Biotechnol., 1995, 62(3): 301-309.
- [18] Michele V, Hempela D. Liquid Flow and Phase Holdup Measurement and CFD Modeling for Two- and Three-phase Bubble Columns [J]. Chem. Eng. Sci., 2002, 57(11): 1899-1908.

## Measuring Techniques for Gas-Liquid-Solid Three-phase Fluidized Bed Reactors

LIU Ming-yan, YANG Yang, XUE Juan-ping, HU Zong-ding

(School of Chemical Engineering & Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The gas-liquid-solid three-phase fluidized bed is a kind of very important devices for physical operation or chemical reactions and has been widely used in chemical, petrochemical, biochemical, metallurgical, environmental and coal liquefaction processes. However, the effective measuring techniques are still limited, which baffles the further development of the theory and application of three-phase fluidized beds. Fortunately, much progress has been made recently on the measuring techniques for gas-liquid-solid fluidization or three-phase flow with the development of modern science and technology and many new measuring methods have been developed. This article introduces the progress in research and development of measuring techniques in three-phase fluidized beds. The principles, advantages and disadvantages of these kinds of measuring techniques are discussed briefly, including new techniques developed recently such as optical fiber probes, ultrasonic probes, radioactive particle tracking, X-ray based particle tracking velocimetry, particle image velocimetry, electrical capacitance tomography, laser Doppler anemometry, and phase Doppler anemometry techniques. Furthermore, the research directions in the future and application prospects of some measuring techniques are given.

**Key words:** three-phase fluidized bed; measuring technique; gas-liquid-solid fluidization; reactor