

采用电阻层析成像技术测量三相外环流反应器中相含率的实验研究

韩玉环^{1,2}, 靳海波²

(1. 北京化工大学化工学院, 北京 100029; 2. 北京石油化工学院化工系, 北京 102617)

摘要: 结合电阻层析成像技术和差压法, 以平均粒径为 3 mm 的聚氨酯为固相, 空气为气相, 水为液相, 对 $\phi 90$ mm 的气升式三相外循环环流反应器中局部相含率及其径向分布进行了研究. 结果表明, 在实验范围内, 增大固相体积分数不影响气含率在上升管中的分布特征; 固含率随着表观气速的增大先增大, 当表观气速 $u_g=0.09$ m/s 时反应器达到充分发展段, 固相已充分循环; 上升管中气固虚拟相的径向分布呈中心高、边壁低的特征, 但并非严格对称, 在 $r/R=0\sim 0.2$ 间出现极大值; 下降管中气固虚拟相在径向上分布较为均匀. 本工作证实了两种技术相结合测量气液固三相相含率的可行性.

关键词: 气升式三相外循环环流反应器; 电阻层析成像技术; 局部相含率; 径向分布

中图分类号: TQ016 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2009)03-0431-06

1 前言

气升式三相环流反应器综合了鼓泡塔和机械搅拌釜两类反应器的特点, 具有结构简单、无机械传动部件、易密封、造价低、易实现工业放大等优点, 在石油、化工、电化学和生物化工等领域得到了广泛应用^[1]. 相含率是三相环流反应器中重要的流动特性之一, 对于平均相含率已有很好的研究和报道^[2-5]. 然而, 在气升式三相环流反应器中相含率并非均匀分布, 成为该反应器设计和放大的难点之一, 因此, 有必要对三相局部相含率进行深入细致的研究.

过程层析成像技术是近年来飞速发展起来的一门新技术, 具有巨大的发展潜力和广阔的工业应用前景. 非插入式的电阻层析成像技术(Electrical Resistance Tomography, ERT)是过程层析成像的一种, 以其相对价格低廉、操作简单、时间分辨率高、并可实现对某一特定空间进行多方位在线测量等优点, 成为过程层析成像技术发展的主流和研究热点, 与插入式测量技术相比, 同时采用数据图像重构技术, 提高空间分辨率(可视图像和流动结构), 给出整个截面的流场和浓度信息, 具有明显的优势. 电阻层析成像技术已成功用于各类气液鼓泡塔反应器中, 取得了较好的实验结果^[6-10]. 但电阻层析成像技术的测量原理是基于电导率, 只能区分导电相与非导电相, 尚不能独立用于气液固三相相含率研究. 为了克服该缺点, 引入传统的差压测量方法, 即将电阻层析成像技术与差压法结合, 将非导电或导电的两相相含率方程封闭, 从而分别得出气液固三相相含率. 文献

[11]对气升式三相外循环环流反应器中局部相含率及其径向分布进行了研究, 但仅给出了上升管中相含率的分布. 在外循环环流反应器中, 下降管各相流动行为也会对反应器整体的反应结果造成影响, 因此, 有必要同时研究上升管与下降管的流体力学行为.

本工作结合前人的研究结果, 以平均粒径 d 为 3 mm 的聚氨酯颗粒(密度 $\rho=1110$ kg/m³)为固相, 采用电阻层析成像技术与差压法相结合的测量技术, 在线实时测量上升管和下降管的流动行为, 给出相含率及其径向分布特征与操作条件的关系, 为进一步研究奠定一定实验基础.

2 实验

2.1 实验装置

实验装置为气升式三相外循环环流反应器, 如图 1 所示, 上升管高 3.1 m, 内径 90 mm; 下降管高 2.75 m, 内径 90 mm. 气体分布器为孔板分布器, 孔径 2 mm, 间距 17 mm, 板上 19 个孔呈等边三角形排列, 开孔率为 0.9%. 气体由气体分布器经转子流量计计量进入上升管, 因上升管和下降管中气含率不同使两管间形成了密度差, 推动液体在上升管和下降管间循环流动. 用 1151 型差压传感器(量程 ± 2 kPa)测量床层压降, 2 个相连的测压口(高 200 mm)分别连接传感器的高端和低端. 测量前传感器的两端充满液相, 压力信号经传感器转变为电流信号(4~20 mA), 通过电路转换为电压信号(1~5 V), 再通过 A/D 采集卡将电压转变为数字信号通过计算机采集和存储, 采样频率由计算机控制, 一般为 100 Hz.

收稿日期: 2008-12-15, 修回日期: 2009-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 20776018); 北京市自然科学基金资助项目(编号: 2093034); 北京市属高等学校人才强教深度计划资助项目(编号: PHR200906139)

作者简介: 韩玉环(1983-), 女, 河北省石家庄市人, 硕士研究生, 化学工艺专业; 靳海波, 通讯联系人, Tel: 010-81292074, E-mail: jinhaibo@bipt.edu.cn.

电阻层析成像的两层传感器均匀分布在环流反应器上升管和下降管内壁上,每层由16个20 mm×30 mm长方形电极组成,测量位置位于距分布板高1300 mm处,详细位置如图1所示.实验所用层析成像系统由北京唐钢工控科技有限公司提供,型号为KH-ERT2004.数据的采集频率为2幅/s,激励频率为9.6 kHz,一般每组数据采集400帧图像.

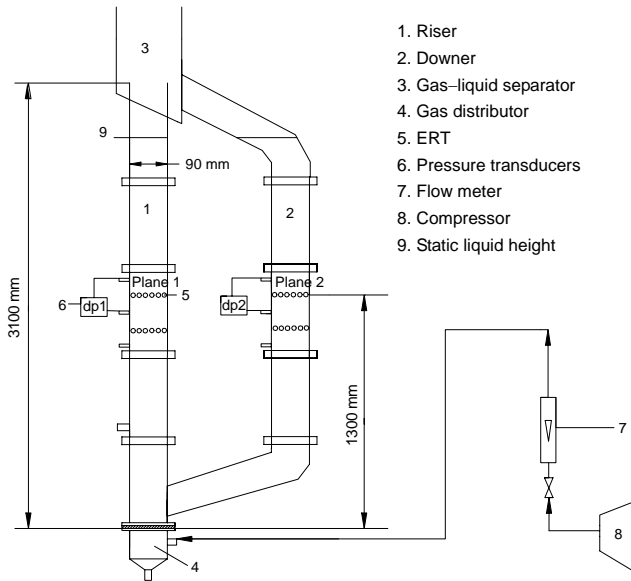


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 实验条件

实验在常温常压下进行,采用空气-水-聚氨酯三相体系,气体由气体分布器经转子流量计计量进入上升管,表观气速 u_g 范围为0.026~0.26 m/s.实验对不同的固相添加量进行了研究,先加入固相,再注入液体,最初的静液高度以保证在 $u_g=0.026$ m/s时三相可在反应器内顺畅循环流动为宜,位置如图1所示.各相的物理参数如表1所示.

表1 三相物理性质

Table 1 Physical properties of three phases

Material	Physical property			
	Phase	ρ (kg/m ³)	d (mm)	Conductivity
Water	Liquid	998.2	-	Conductive
Air	Gas	1.2	-	Non-conductive
Polyurethane	Solid	1110	3	Non-conductive

2.3 测量方法和数据处理

ERT的物理基础是基于不同的媒质具有不同的电导率,判断出处于敏感场中媒质的电导率分布,便可知媒质分布状况.当测量流场内的电导率分布变化时,电流场及场内电势分布变化,从而场域边界上的测量电压

也发生变化.通过实际对象的边界测量电压与空场状态下对应位置测量电压的对比,运用相应的成像算法,便可重建实际对象的电导率分布,实现可视化测量.本工作的图像重构采用的是单步灵敏度算法^[12].每帧ERT图像由316个20.12 mm²小区域上的相含率数据构成.电阻层析成像技术是一种可精确实现在线实时测量的先进技术,有很多优点,其主要的缺点是只能得到导电相和非导电相含率分布,尚不能独立给出三相体系中各相含率的分布.本实验中液相(水)作为导电相而固相(聚氨酯)和气相(空气)一起作为非导电相,故其不能很好地区分气固两相含率.为了克服这个缺点,引入差压法同时进行测量,使测量相含率的3个方程得以封闭,从而可计算出三相的相含率.压力传感器的2个引脚接近ERT的测量位置,这样可提供更为可靠的数据,而2种方法分别测量气液两相含率的可靠性和统一性已在实验前的大量实验中得到证明^[13].本工作将2种方法相结合测量空气-水-聚氨酯体系中上升管和下降管中三相含率的分布特性.

2.3.1 局部平均相含率

压力传感器所测压降主要是液体和固体的静压头及边壁摩擦导致的,由于本实验采用的气液固环流速度并不高,边壁摩擦的影响可以忽略.因此,根据差压法得到以下计算公式^[14]:

$$\Delta p = \rho_g g H - (\rho_g H \varepsilon_g + \rho_s g H \varepsilon_s + \rho_s g H \varepsilon_s), \quad (1)$$

式中, Δp 为压差法测得的两引脚之间的压力差(Pa), ρ_g , ρ_l , ρ_s 分别为气、液、固相密度(kg/m³), g 为重力加速度(m/s²), H 为两引脚之间的距离(m), ε_g , ε_l , ε_s 分别为气、液、固相含率.

气、液、固三相含率之和符合以下关系:

$$\varepsilon_l + \varepsilon_s + \varepsilon_g = 1, \quad (2)$$

气相密度与液相和固相密度相差2个数量级,其影响可忽略不计.将式(1),(2)联立,可得

$$\Delta p / (gH) = (\varepsilon_g + \varepsilon_s) \rho_l - \rho_s \varepsilon_s. \quad (3)$$

由ERT装置获得电导率数据,将不导电相(气固两相)看作一个虚拟相,根据麦克斯韦方程可得到不导电相的局部相含率 ε_m :

$$\varepsilon_m = \varepsilon_g + \varepsilon_s = (2\sigma_l - 2\sigma_{mc}) / (2\sigma_l + \sigma_{mc}), \quad (4)$$

式中, σ_l 为导电相即液相的电导率(mS/cm), σ_{mc} 为ERT测得的三相混合物的局部电导率(mS/cm).

将式(3),(4)联立,可得出固含率 ε_s :

$$\varepsilon_s = \{ [(2\sigma_l - 2\sigma_{mc}) / (2\sigma_l + \sigma_{mc})] \rho_l - \Delta p / (gH) \} / \rho_s, \quad (5)$$

再由式(4)求出气含率, 进而由式(2)求出液含率.

2.3.2 局部平均相含率的径向分布

径向含率的数值采用 Matlab 程序计算, 将截面分为 10 个区域, 同一径向尺度(如图 2 中区域 1)的所有电导率求平均值, 即为该径向尺度的平均电导率 σ_{mc} , 再由式(4)计算出不导电相的相含率. 而平均 ERT 图像则是将每次采集的 400 帧图像的各相应部位电导率分别叠加后再平均.

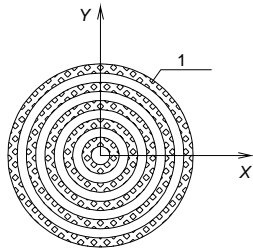


图 2 径向分布数据处理示意图
Fig.2 Schematic diagram of radial distribution

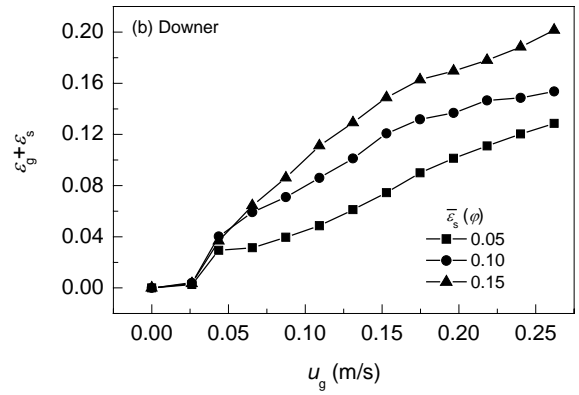
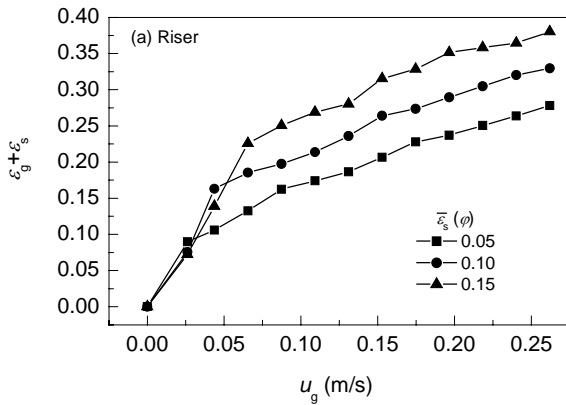


图 3 ERT 所得上升管和下降管中气固两相相含率之和与表观气速的关系
Fig.3 Relationship between $\epsilon_g + \epsilon_s$ and ϵ_s and gas velocity in the riser and downer by ERT

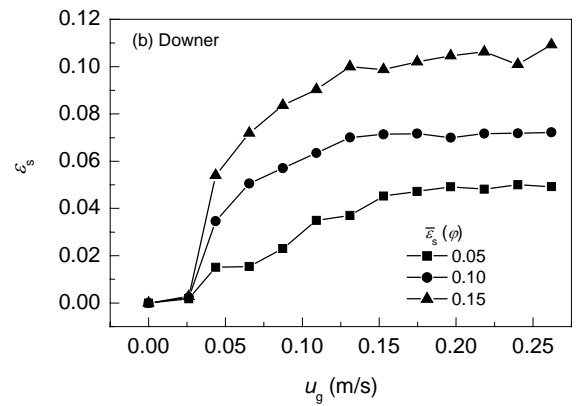
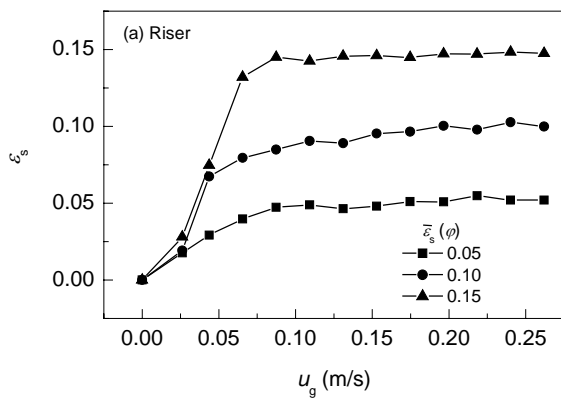


图 4 上升管和下降管中固含率与表观气速的关系
Fig.4 Relationship between ϵ_s and gas velocity in the riser and downer

上述所有数据局部值和截面平均值经多次重复性实验, 正负偏差均不超过 5%.

3 结果与讨论

3.1 局部相含率

3.1.1 气含率和固含率之和

由图 3 可以看到, 截面气含率和固含率之和随表观气速的增大而增大, 其趋势与两相研究中气含率随表观气速的变化趋势一致. 随着固相平均体积分率的增大, 气固两相含率之和增大, 且增大的值与固相平均体积分率的增大值基本相等.

3.1.2 固含率

由图 4 可以看到, 固含率先随着表观气速的增大而增大, 当表观气速 u_g 达到 0.09 m/s 后, 固含率基本保持不变, 这说明 $u_g=0.09$ m/s 时反应器达到充分发展阶段, 固相已能充分循环, 不再随表观气速增大而明显变化. 但同时也观察到, 达到稳态操作时, 在整个反应器中固

相并非均匀分布,而是呈上稀下浓分布.由图4还可以看到,在下降管中同一测量位置,达到稳态操作时固含率明显小于上升管.这是由于所采用的固相密度比液相稍大,重力作用导致的.

3.1.3 气含率

由图5可看到,三相外循环环流反应器中的气含率随表观气速增大而增大,而随固相平均体积含率增大基本保持不变,这是因为本实验所采用的固相密度($\rho=1110\text{ kg/m}^3$)与液相密度差不多,具有良好的跟随性,其加入量基本不影响整个反应器中的气含率分布.

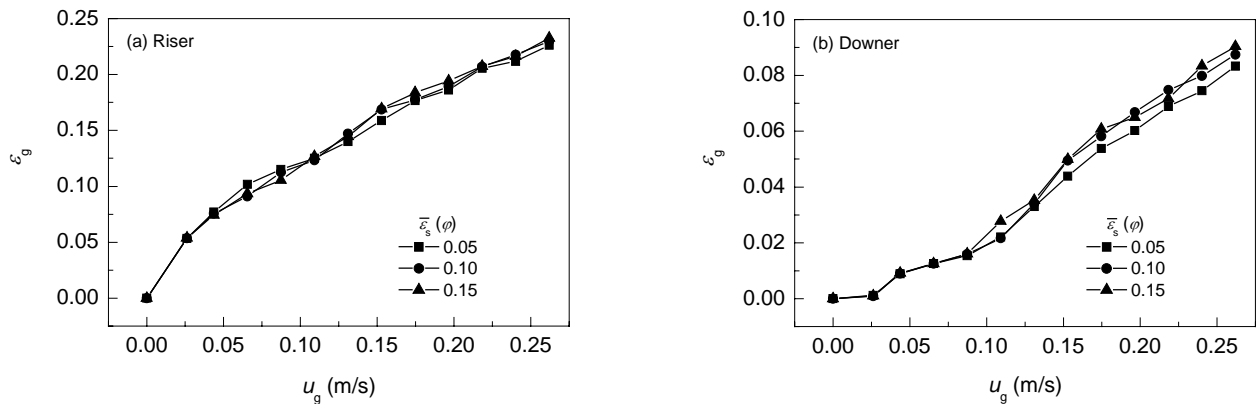


图5 上升管和下降管中气含率与表观气速的关系

Fig.5 Relationship between ε_g and gas velocity in the riser and downer

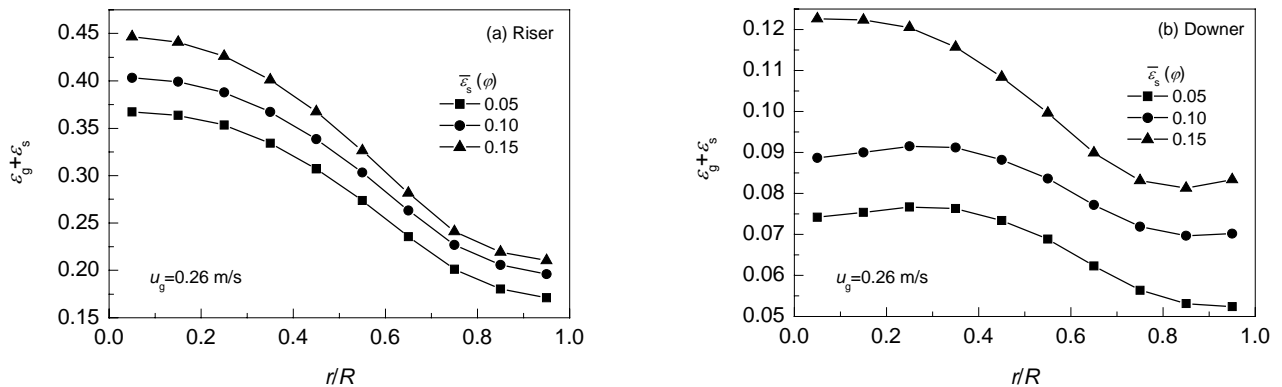


图6 上升管和下降管中气固两相相含率之和的径向分布

Fig.6 The radial holdup profiles at different gas velocities in the riser and downer

3.2 局部相含率的径向分布

由图6可以看到,上升管中气固两相之和的径向分布呈现出中心高边壁低的分布特征,这与气液两相中的气含率径向分布规律基本一致.而下降管中气固两相之和的径向分布较为均匀,这是因为液体从上升管进入气液分离器后,速度显著降低,只有尺寸较小的少量气泡会被夹带进入下降管,且其滑移速度小,故下降管内的气泡沿径向近似呈均匀分布.由于本工作固相加入较多,循环率也高,而下降管中气含率很小,基本上可以反映出固相的径向分布规律,可推断固相在径向上也呈现良好的均匀分布特征,与实验观察到的现象一致.

图7是将每次采集的400帧图像的电导率叠加后得到的平均ERT图像,生动地呈现了整个截面的气固两相相含率之和的分布情况,与图6所描述的信息一致.可以看出固相平均体积分数一定时,随着表观气速的增大,相含率增大;表观气速一定时,随着固相平均体积分数的增加,相含率增大.由图7(a)可以看到,上升管中气固两相之和的径向分布呈现中心高边壁低的分布特征,但整个截面并非严格对称,在 $r/R=0\sim 0.2$ 之间出现极大值,这与环流反应器结构及各相实际的流动结构相关.由图7(b)也可以看到下降管中相含率分布较为均匀.

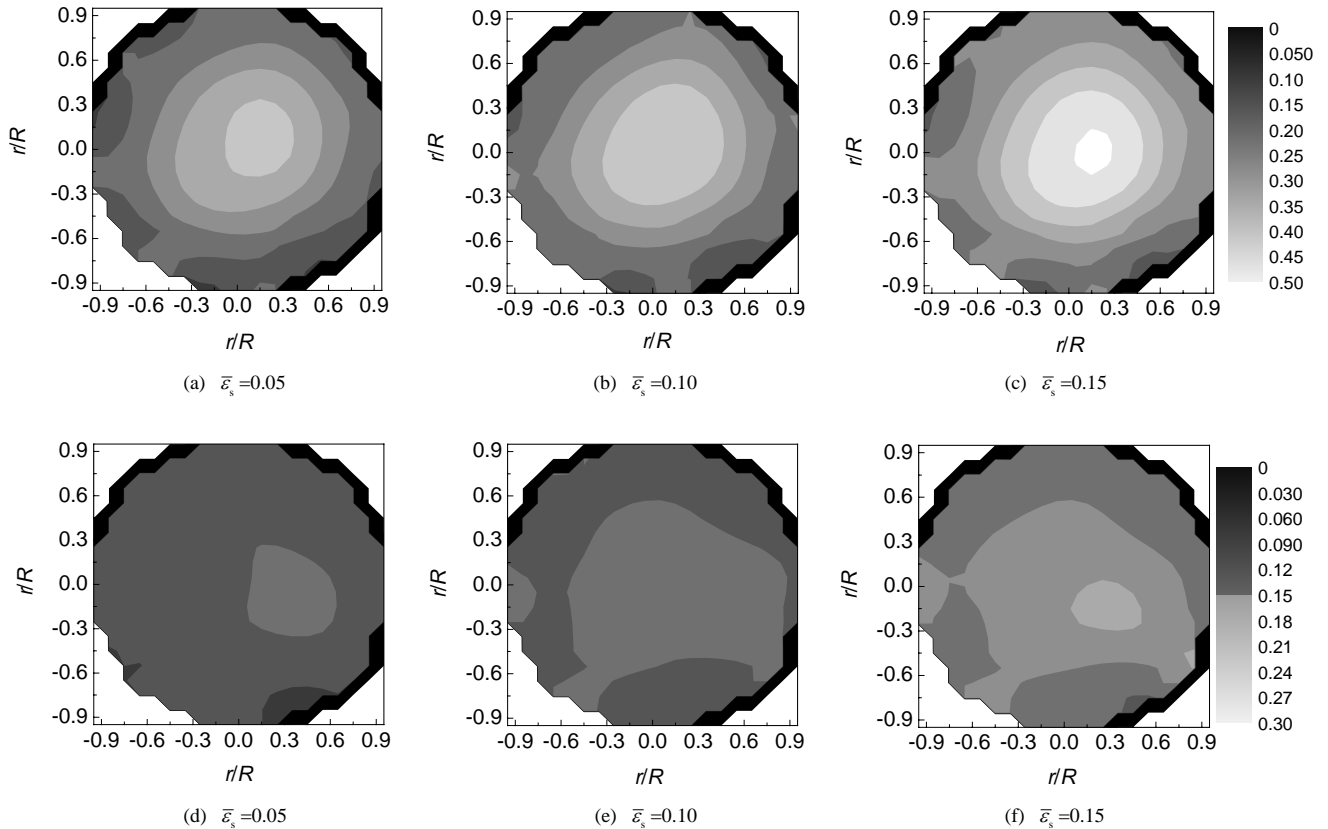


图7 $u_g=0.26$ m/s 上升管(a, b, c)和下降管(d, e, f)的平均 ERT 图像(400 帧)
Fig.7 The ERT images in the riser (a, b, c) and downer (d, e, f) when $u_g=0.26$ m/s

4 结论

采用电阻层析成像技术与差压法相结合测量技术,以平均粒径为 3 mm 的聚氨酯颗粒($\rho=1110$ kg/m³)为固相,对气升式三相外循环环流反应器中的局部相含率及其径向分布特征进行了研究,实现了上升管和下降管的同时在线实时测量,生动地呈现了气固虚拟相在整个截面的相含率分布情况,得到以下结论:

气含率随着表观气速的增大而增大;在实验范围内,增大固相平均体积分率不会影响气体分布;固含率随着表观气速的增大先增大,到 $u_g=0.09$ m/s 时反应器达到充分发展段,固相已能充分循环,不再随表观气速增大而明显变化;上升管中气固两相之和的径向分布呈现中心高边壁低的分布特征,但整个截面并非严格对称,在 $r/R=0\sim 0.2$ 之间出现极大值;下降管中气固两相之和的径向分布较为均匀.本工作进一步证实了两种技术相结合测量气液固三相相含率是可行的.

参考文献:

- [1] Hyndman C L, Larachi F, Guy C. Understanding Gas-phase Hydrodynamics in Bubble Columns: A Convective Model Based on Kinetic Theory [J]. Chem. Eng. Sci., 1997, 52(1): 63-77.
- [2] Safoniuk M, Grace J R, Hackman L, et al. Gas Holdup in a Three-phase Fluidized Bed [J]. AIChE J., 2002, 48(7): 1581-1587.
- [3] Arturo M, Hsiaotao B, Grace R, et al. Dimensional Hydrodynamic Similitude in Three-phase Fluidized Beds [J]. Chem. Eng. Sci., 2001, 56(19): 6039-6045.
- [4] Dong H L, Arturo M, Grace R, et al. Fluid Mixture-distribution Effects on Phase Holdups in Three-phase Fluidized Beds [J]. Chem. Eng. Sci., 2001, 56(19): 6031-6038.
- [5] Sang D K, Yong K. Heat and Mass Transfer in Three-phase Fluidized-bed Reactors Overview [J]. Chem. Eng. Sci., 1997, 52(21/22): 3639-3660.
- [6] Wang M, Mann R, Dickin F J. Electrical Resistance Tomography Sensing System for Industrial Applications [J]. Chem. Eng. Comm., 1999, 175: 49-70.
- [7] Fransolet E, Crine M, Toye D. Analysis of Electrical Resistance Tomography Measurements Obtained on a Bubble Column [J]. Meas. Sci. Technol., 2001, 21: 1055-1060.
- [8] Fransolet E, Crine M, Marchot P. Analysis of Gas Holdup in Bubble Columns with Non-Newtonian Fluid Using Electrical Resistance Tomography and Dynamic Gas Disengagement Technique [J]. Chem. Eng. Sci., 2005, 60(22): 6118-6123.
- [9] Jin H, Wang M, Williams R A. Analysis of Bubble Behaviors in Bubble Columns Using Electrical Resistance Tomography [J]. Chem. Eng. J., 2007, 130: 179-185.
- [10] Jin H, Wang M, Williams R A. The Effect of Sparger Geometry on Gas Bubble Flow Behaviors Using Electrical Resistance Tomography

- [J]. Chin. J. Chem. Eng., 2006, 14: 127–131.
- [11] Razzak S A, Barghi S, Zhu J X. Electrical Resistance Tomography for Flow Characterization of a Gas–Liquid–Solid Three-phase Circulating Fluidized Bed [J]. Chem. Eng. Sci., 2007, 62(24): 7253–7263.
- [12] 董峰, 刘小平, 邓湘, 等. 电阻层析成像技术在两相管流测量中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2001, 28(6): 50–54.
- [13] Jin H B, Yang S H, Wang M, et al. Measurement of Gas Holdup Profiles in a Gas Liquid Cocurrent Bubble Column Using Electrical Resistance Tomography [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 18: 191–196.
- [14] 张同旺, 靳海波, 何广湘, 等. 采用压力传感技术测量鼓泡床中流体力学参数 [J]. 化工学报, 2004, 55(3): 476–480.

Experimental Study on Phase Holdup in Three-phase External Loop Airlift Reactors Using Electrical Resistance Tomography

HAN Yu-huan^{1,2}, JIN Hai-bo²

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Department of Chemical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: Profiles of phase holdup in a $\phi 90$ mm three-phase external loop airlift reactor using electrical resistance tomography and pressure transducers were investigated, water was used as the continuous and conductive phase, while polyurethane and air were non-conductive solid and gas phases, respectively. The results show that the gas holdup and solid holdup increases with the increase of superficial gas velocity, the solid holdup first increases with increasing superficial gas velocity and when $u_g=0.09$ m/s, a constant value. For the fluidized system, the distribution of local solid and gas holdup shows a maximum at $r/R=0\sim 0.2$, the radial gas and solid holdup increases with increase of gas velocity in the riser, while the radial gas and solid holdup is uniform in the downer. The feasibility of using the two techniques combined to measure the three-phase has been demonstrated.

Key words: three-phase external loop airlift reactor; electrical resistance tomography; local phase holdup; radial holdup profile