

加压大型气液鼓泡床中气含率的实验和关联

张同旺¹, 靳海波¹, 何广湘¹, 佟泽民¹, 朱建华²

(1. 北京石油化工学院化工系, 北京 102617; 2. 石油大学(北京)化工学院, 北京 102259)

摘要: 对内径 0.3 m、高 6.6 m 的加压鼓泡床中的气含率进行了系统研究, 得出了表面张力、粘度、压力等对气含率的影响规律; 结果表明, 在实验范围内, 鼓泡床中的气含率随表面张力和粘度的升高而降低, 随压力的升高而升高; 并用气泡聚并的能量理论作了定性的解释. 根据 542 组实验数据得出了气含率的关联式.

关键词: 鼓泡床; 气含率; 加压操作

中图分类号: TQ021 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2002)06-0481-04

1 前言

鼓泡床是近年来飞速发展的多相流化反应器, 因其结构简单、温度易控制、液相停留时间易调节等特点广泛应用于有机化工、煤化工、生物化工、环境工程等生产过程^[1]. 尽管对气液鼓泡床已有大量报道, 但由于所研究的体系比较简单, 且局限于常压、小型、冷模实验装置, 而床内各参数间相互影响又十分复杂, 故目前在鼓泡床反应器的设计与放大过程中仍存在诸多困难. 气含率是气液鼓泡床中计算与设计放大的重要参数之一, 对床层内的流型、气液接触面积等其他流体力学参数有重要影响, 因此, 对气含率进行深入研究具有重要意义.

2 实验

2.1 实验装置

本实验结合工业对二甲苯氧化反应器的特点, 设计并建立了其流体力学实验装置, 如图 1 所示, 鼓泡床高 6.6 m, 内径 0.3 m, 在鼓泡床一侧自床层底部至顶部, 每隔 0.5 m 开有 $\phi 8$ mm 的测压口; 床层底部封头处安装一分布器, 距圆心 1/2 半径的圆周上均匀开有 4 个 $\phi 20$ mm 的喷嘴; 在压缩机进出口各安装一个气体贮罐, 起稳定流量作用, 且压缩机进口贮罐连有一补气用压缩机,

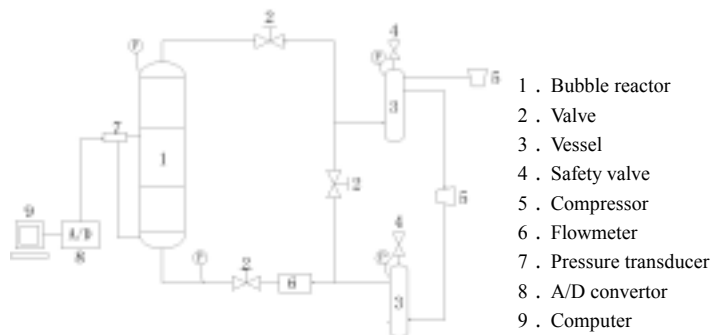


图 1 实验装置图

Fig.1 Scheme of experimental apparatus

收稿日期: 2002-07-09, 修回日期: 2002-10-16

基金项目: 中国石油化工总公司科技开发部资助项目(编号: 200058); 中国石油天然气总公司催化重点实验室资助项目

作者简介: 张同旺(1975-), 男, 山东省聊城市人, 硕士研究生, 应用化学专业; 靳海波, 通讯联系人.

用于补偿工作过程中系统泄露的微量气体,两贮罐间由一装有阀门的短路管道相连,避免床层塌落时,因突然关闭床层底阀而使压缩机过载.气体由压缩机送出,经调节阀调节气体流量后,至流量计、分布器,从塔底进入鼓泡床,由顶部排出,回到压缩机,完成一个循环.

由于鼓泡过程中床层上端面不稳定,根据鼓泡前后床层高度不同计算得出的气含率与实际误差较大,且不能测量床层内的局部气含率,并且由于床体由不锈钢制造,故本文通过测得的两测压点间的差压 ΔP 进行计算,求得床层内两测压点间的气含率^[2,3].测点间距为3 m,下测压口距塔底0.25 m.

2.2 实验物料与操作条件

实验所用物系为空气-水两相体系,利用油酸钠改变液相表面张力、三甘醇改变液相粘度.实验条件如表1所示.由于压力对表面张力和粘度影响较小,表中列出的是常压下的表面张力和粘度值.

表1 实验条件
Table 1 Experimental conditions

Operating condition	Operating range	Operating condition	Operating range
Viscosity	$(105\sim 360)\times 10^{-5}$ Pa·s	System pressure	0.1~1.6 MPa
Surface tension	$(49\sim 73)\times 10^{-3}$ N/m	Superficial gas velocity	0.06~0.28 m/s

2.3 测量方法

由于气体密度远小于液体密度,可忽略不计, ΔP 可表示为 $\rho_l \varepsilon_g g \Delta H$,故两测压点间的气含率 ε_g 为^[2]

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta P}{\rho_l g \Delta H} \quad (1)$$

由于本文主要考察床层内的平均气含率,故将差压变送器两引脚分别与床层顶部和底部相连,由 ΔP 计算所得结果即为床层内的平均气含率.差压信号经A/D转换由计算机进行数据采集,采样频率115 Hz.

3 结果与讨论

3.1 表面张力对气含率的影响

不同表面张力时气含率随表观风速的变化如图2所示,表观风速相同时,气含率随表面张力升高而降低,此趋势与文献^[4]报道一致.

根据质量守恒方程,可得出平均气含率 ε_g 与表观风速 u_g 、平均气泡上升速度 u_b 间的函数关系:

$$\varepsilon_g = \frac{u_g}{u_b} \quad (2)$$

张同旺等^[9]从能量角度考察表面张力对气泡聚并与破裂推动力的影响,得出表面张力增加,气泡聚并的推动力升高,使得小气泡数目减少,气泡的平均半径增加.由Stokes公式可知,气泡尺寸愈小, u_b 愈低,又由式(2)可知,气含率与 u_b 成反比,故如图2所示,气含率随表面张力的升高而降低.

Kelkar等^[5]利用长链醇改变液相表面张力,也得出了随表面张力降低,气含率升高的结论,但没有指出气含率曲线斜率随表观张力降低而增加的现象.

3.2 粘度对气含率的影响

粘度是影响气含率的重要因素之一.粘度不同时气含率与表观风速的关系如图3所示,表观

气速相同时, 气含率随粘度增加而降低. Haque 等^[6]利用酒精改变液相粘度研究粘度对气含率的影响, 认为粘度增加, 气含率降低. 这是因为较大的液相粘度会增加小气泡聚合成大气泡的机会, 使气泡分散困难, 从而导致气含率下降^[7].

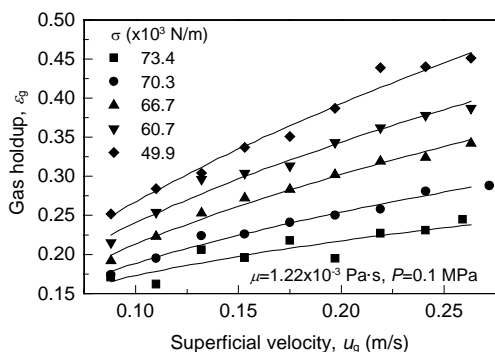


图2 不同表面张力时气含率与表观气速的关系
Fig.2 The effect of superficial velocity on gas holdup at different superficial tensions

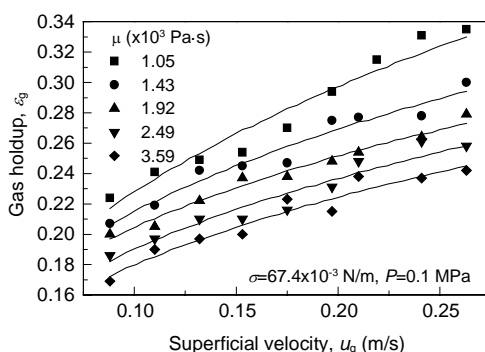


图3 不同粘度时气含率与表观气速的关系
Fig.3 The effect of superficial velocity on gas holdup at different viscosities

由图3还可看出, 表观气速相同时, 气含率随粘度增加而降低的趋势逐渐变弱, 即粘度改变相同的值, 气含率相应的变化值随粘度增加而降低; 表观气速改变相同的值, 气含率相应的变化值会随粘度增加而降低. 这是因为粘度增加, 大气泡分率增加, 而大气泡上升速度受液相操作条件影响较小, 故 u_b 上升趋势减弱, 气含率的变化值相应减小.

3.3 系统压力对气含率的影响

系统压力是影响气含率的主要因素. 不同系统压力时气含率随表观气速的变化如图4所示, 相同表观气速时, 气含率随系统压力的升高而升高.

Lin 等^[8]认为压力增加, 气泡的平均尺寸减小, 气含率增加. 张同旺等^[9]从能量角度考察压力对气泡聚并和破裂的影响, 认为压力增加, 气泡聚并的推动力降低, 小气泡数目增加, 气泡的平均半径减小, 上升速度降低, 根据式(2), 气含率增加.

3.4 气含率的关联式

根据对气含率单因素的分析, 可知气含率与下列因素有关:

$$\varepsilon_g = f(u_g, \sigma, \mu, P, \rho_1, D). \quad (3)$$

参照文献^[10,11], 利用因次分析方法, 组成无量纲群, 构成下面的形式:

$$\frac{\varepsilon_g}{(1-\varepsilon_g)^4} = f\left(\frac{D^2 \rho_1 g}{\sigma}, \frac{D^3 \rho_1^2 g}{\mu^2}, \frac{u_g}{\sqrt{gD}}, \frac{P}{P_0}\right). \quad (4)$$

根据 544 组实验数据, 应用多元线性回归方法, 关于床层内平均气含率的关联式可表达为

$$\frac{\varepsilon_g}{(1-\varepsilon_g)^4} = 0.2487 \left(\frac{D^2 \rho_1 g}{\sigma}\right)^{0.14} \left(\frac{D^3 \rho_1^2 g}{\mu^2}\right)^{0.1} \frac{u_g}{\sqrt{gD}} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.55}, \quad (5)$$

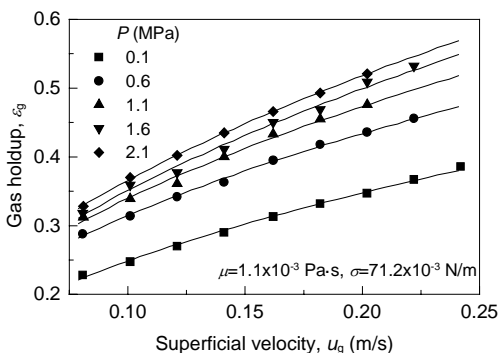


图4 不同压力时气含率与表观气速的关系
Fig.4 Influence of superficial velocity on gas holdup at different pressures

上式最后一项是压力对气含率的影响, $P=P_0$ 时, 适用于常压系统; 在 $0.07 \text{ m/s} \leq u_g \leq 0.27 \text{ m/s}$, $49 \times 10^{-3} \text{ N/m} \leq \sigma \leq 73 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, $105 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s} \leq \mu \leq 360 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 实验条件下, 平均偏差为 4.1%, 最大偏差为 17%.

4 结论

(1) 在 $\phi 0.3 \text{ m}$ 的加压鼓泡床中, 通过对表面张力、粘度、系统压力等影响鼓泡床平均气含率重要因素的分析, 结果表明, 气含率随表面张力的升高而降低, 随粘度的升高而降低, 随压力的升高而增加.

(2) 根据实验结果回归得出床层平均气含率对表观气速、表面张力、粘度和压力关联式, 平均相对偏差为 4.1%.

符号表:

A	床层截面积 (m^2)	ΔH	引脚间距离 (m)	ϵ_g	平均气含率
Bo	Bond 准数	P	系统压力 (Pa)	μ_l	液相粘度 (Pa·s)
D	塔径 (m)	P_0	标准大气压 (Pa)	ρ_l	液相密度 (kg/m^3)
Fr	Froude 准数	ΔP	测压点间的压差 (Pa)	σ	表面张力 (N/m)
g	重力加速度 (m/s^2)	u_b	平均气泡上升速度 (m/s)		
Ga	Galilei 准数	u_g	表观气速 (m/s)		

参考文献:

- [1] Fan L S. Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering [M]. Boston: Butterworth, 1989. 1.
- [2] Fan L S, Yang G Q, Lee D J. Some Aspects of High Pressure Phenomena of Bubble in Liquids and Liquid-Solid Suspensions [J]. Chem. Eng. Sci., 1999, 54(21): 4681-4709.
- [3] Daly J G, Patel S A, Bukur D B. Measurement of Gas Holdup and Sauter Mean Bubble Diameters in Bubble Column Reactors by Dynamic Gas Disengagement Method [J]. Chem. Eng. Sci., 1992, 47(13/14): 3647-3654.
- [4] Peter M W, Herman H. Mass Transfer and Bubble Size in a Bubble Column under Pressure [J]. Chem. Eng. Sci., 1994, 49(9): 1417-1427.
- [5] Kelkar B G, Godbole S P. Effect of Addition of Alcohols on Gas Holdup and Back Mixing in Bubble Columns [J]. AIChE Journal, 1983, 29(3): 361-369.
- [6] Haque M W, Nigam K D, Joshi J B. Hydrodynamic and Mixing in Highly Viscous Pseudo-plastic Non-Newtonian Solutions in Bubble Columns [J]. Chem. Eng. Sci., 1986, 41(9): 2321-2331.
- [7] 杨志生, 安钢, 孙宇, 等. 振动筛板鼓泡塔中气含率的研究 [J]. 天津大学学报, 1997, 30(1): 99-103.
- [8] Lin T J, Fan L S. Heat Transfer and Bubble Characteristics from a Nozzle in High-pressure Bubble Column [J]. Chem. Eng. Sci., 1999, 54(21): 4853-4859.
- [9] 张同旺, 何广湘, 靳海波, 等. 气液鼓泡床气含率的实验研究 [J]. 石油化工高等学校学报. 2002, 4(待发表).
- [10] 丁百全, 张吉波, 秦惠芳, 等. 三相淤浆床甲醇合成反应器大型冷模研究 [J]. 高校化学工程学报. 1999, 13(5): 428-434.
- [11] 陈甘棠. 化学反应工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1990. 259.

Measurement and Correlation of Gas Holdup in a Pressurized Bubble Column

ZHANG Tong-wang¹, JIN Hai-bo¹, HE Guang-xiang¹, TONG Ze-min¹, ZHU Jian-hua²

(1. Department of Chemical Engineering, Beijing Institute of Petro-chemical Technology, Beijing 102617, China;

2. Department of Chemical Engineering, Petroleum University, Beijing 102259, China)

Abstract: Gas holdup is measured in a pressurized bubble column 0.3 m in diameter and 6.6 m in height. The effects of surface tension, viscosity and pressure on gas holdup are investigated. Gas holdup decreases with the increase of surface tension and viscosity, but increases with the increases of pressure. An empirical correlation is also presented.

Key words: bubble column; gas holdup; pressurized operation