

超声场中鼓泡塔内气泡直径分布特征研究

邹华生,程小平,周超

(华南理工大学化学与化工学院,广东 广州 510640)

摘要:利用自主研发的超声鼓泡塔和双电导探针气泡特征参数测量仪测定了不同频率组合下超声场辐射对鼓泡塔内气泡 Sauter 直径随表观气速和鼓泡塔径向及轴向位置的分布情况。实验结果表明,在距气体分布板轴向距离 250 mm、塔中心处气泡 Sauter 直径由于超声作用而显著减小,最大减幅达 55%;在超声场作用下随着表观气速增大,气泡 Sauter 直径呈增大趋势,当表观气速大于 0.06 m/s 时,气泡 Sauter 直径趋于不变;大气泡在塔中心区域聚集倾向明显,小气泡分布在塔壁面附近,气泡 Sauter 直径(在径向位置)呈现中心峰分布趋势;随着距气体分布板轴向距离增加,气泡 Sauter 直径增大,在多频混响声场中,气泡 Sauter 直径增速小于单频声场中增速,即多频混响超声场中易形成小气泡。实验结果证实,超声场有利于减小气泡体积,增大气泡比表面积,这对于加强气液相间传质、提高传质效果会有显著作用。

关键词:鼓泡塔;超声场;气泡直径;分布特征

中图分类号:TQ021.4

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2011)11-0064-04

Study on bubble diameter sistribution in bubble column under ultrasonic field

ZOU Hua-sheng, CHENG Xiao-ping, ZHOU Chao

(School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The bubble Sauter diameter distribution in radial and axial orientation versus the superficial gas velocity has been investigated in an air-water bubble column with a bubble feature measuring system called duplex conductivity probe under ultrasonic field of one frequency or multi-frequency. The results show that, the bubble Sauter diameters at the central line of the column are obviously reduced because of the remarkable effect of ultrasonic field. The maximum reducing extent is about 55%. Under ultrasonic field, the bubble Sauter diameter increases as the superficial gas velocity rises until to 0.06 m/s, then the diameter almost keeps constant. And the bigger bubbles are potentially concentrating in the central zone of the column, while the smaller bubbles appear near the wall of the column. The biggest bubble diameter appears at the central line of the column. The results also suggest that the bubble Sauter diameter distribution rises as the distance from the gas distributor increases and the frequency of the ultrasonic field has influence on the bubble Sauter diameters. The bubble Sauter diameters effected by multi-frequency reverbrating ultrasonic field are smaller than those by single frequency ultrasonic field. So multi-frequency reverbrating ultrasonic field such as produced from the combination of 20-50-100 kHz is favorable for generating smaller bubbles and more turbulent which can enlarge the bubble surface, then prolong the bubble residence time, and finally enhance the mass transfer between gas-liquid phases.

Key words: bubble column; ultrasonic field; bubble diameter; distribution feature

鼓泡塔反应器效率高、结构简单、便于操作,在化工生产中,如氧化过程、费托合成、生物发酵、废水处理等方面应用广泛^[1]。鼓泡塔内气泡特征主要参数,如上升速度(V_{ave})、气泡 Sauter 直径(D_{32})以及气含率(ε_g)等,直接影响到鼓泡塔的总体积、塔内多相流体流型、气液相接触面积以及相间传质、传热速率,进而直接决定整个反应的速率。一般意义上讲,气泡尺寸越小,则气泡传质比表面积越大,对气液相间传质是有利的;气泡在液相中运动速度小,则气相停留时间长,可增强气液相间传质效果;鼓泡塔中气含率越大,表明气相百分比越大,相间湍动激烈,相间接触面积大,对于增强气液相间传质具有积极的作用^[2]。

超声波在液相或多相体系中传播会产生如空化效应、湍动效应和微射流效应等,声强均匀分布的超声场可以促进相间传质进程^[3]。测定鼓泡塔内的气泡参数,对于鼓泡塔的设计、放大以及了解塔内的反应情况,都具有重要的理论和指导性作用,同时对于深入研究鼓泡塔内气液两相流数学模型化提供实验依据^[4]。国内外关于鼓泡塔内气泡特征参数有较多的研究报道,主要集中在鼓泡塔内气含率的研究^[5],许多研究者对气泡运动速度及分布、气泡尺寸及分布做了一些研究^[6-8]。但对于超声场下鼓泡塔中气泡运动速度及分布和气泡尺寸及分布研究较少。这制约了人们对此类设备和过程的科学认识,阻碍了其广泛和有效地推广应用。为此,本文利用

收稿日期:2011-06-09

基金项目:广东省科技攻关项目(2007B030103012);广州市科技攻关项目(2007Z3-E0311)

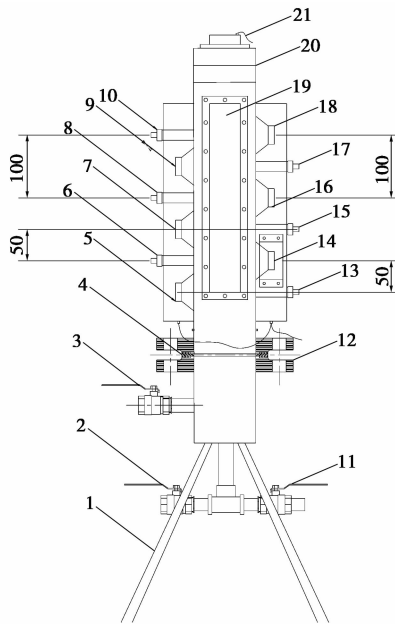
作者简介:邹华生(1957-),男,博士,教授,研究方向为水资源综合处理与利用技术、清洁能源技术,020-22236505,cehszou@scut.edu.cn;程小平(1985-),男,硕士生,从事流体力学与传质方向研究,通讯联系人,hbexp_czp@163.com。

自主研发的超声鼓泡塔双电导探针气泡特征参数测量仪,通过改变超声波的频率组合,考察了超声场中不同表观气速下气泡直径沿塔内径向和轴向位置的分布,为揭示超声场强化鼓泡塔传质机理、优化塔内结构和操作条件、减小气泡尺寸和改善气泡尺寸分布进行了有益的探索。

1 实验设备

1.1 超声场鼓泡塔

本文研究超声场对鼓泡塔内气泡特征参数影响的主体设备,如图 1 所示。超声场鼓泡塔为内边长 105 mm,壁厚 1.5 mm,高 700 mm,材质为不锈钢的圆角正四边形鼓泡塔,塔底设置气体分布板,分布板开孔 21 个,孔径 3 mm,开孔率为 1.35%,塔壁对侧开有玻璃视窗以便观测塔内气液相运动状况,塔的另外两侧分别安置 3 组超声换能器,共 6 个,相邻 2 个换能器间距为 100 mm。相对的 2 个换能器为一组,共 3 组,同组换能器偏心距离 50 mm,换能器频率分布见图 1。同时在塔壁两侧自分布板由下而上设 6 个测量口,一侧测量口标号为 1[#]、3[#]、5[#],另一侧为 2[#]、4[#]、6[#],相对的 2 个测量口偏心间距 50 mm,以减小超声辐射盲区 and 便于各种检测仪器的放置及测量。



1—支架;2—排水阀;3—进水阀;4—气体分布板;11—进气阀;
12—法兰;19—玻璃视窗;20—塔体;21—灯罩;5、7、9、14、16、
18—分别为 20、20、100、50、50、100 kHz 超声换能器;13、6、15、8、
17、10—分别为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]测量口

图 1 反应器简图

1.2 双电导探针气泡特征参数测量仪

电导探针测量气泡特征参数响应快,便于与微机联接,测量精度高。由于探针体积很小(直径 0.1~0.2 mm),可置于被测设备中任意位置,几乎不影响流场,因而用电导探针来测量气液两相流中气泡参数是一种比较先进可行的方法^[9]。图 2 所示为自主开发的 1 套双电导探针气泡特征参数测量系统,利用该系统测量超声场作用下气泡特征参数的变化规律,以研究鼓泡塔内气液传质过程中强化机理。

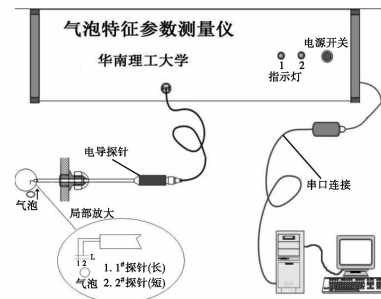


图 2 双电导探针气泡特征参数测量系统示意图

2 检测方法

测量仪器的原理主要是基于气液两相电导率的差异。根据二维标尺将探针置于鼓泡塔内某一径向和轴向位置处,气泡在上升过程不断被探针刺破,由于气液两相电导率不同,电路中将产生有 2 个脉冲信号,每个脉冲代表 1 个气泡从接触探针到完全刺破的过程。

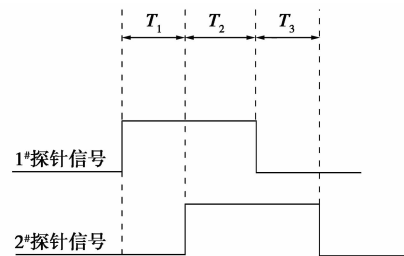


图 3 脉冲信号图

图 3 为双电导探针信号示意图, $(T_1 + T_2)$ 和 $(T_2 + T_3)$ 表示气泡由被刺到完全刺破所用的时间,在距离上则对应着直径,理论上这 2 个值是相等的。 T_1 和 T_3 表示同一气泡经过 2 根探针的时间差,理论上这 2 个值也是相等的。因此,由于两根探针的垂直距离为 L ,气泡经过 2 根探针的间隔时间为 T_1 (或 T_3),气泡在每一根探针上持续的时间分别为 $(T_1 + T_2)$ 和 $(T_2 + T_3)$,则有:

$$\begin{aligned} \text{气泡速度} & U = L/\Delta t \\ \text{气泡直径} & D = U \cdot W_i \\ \text{气含率} & \varepsilon_g = \sum W_i/t \end{aligned}$$

信号间隔时间 Δt 为 T_1 、 T_3 的平均值, 气泡持续时间 W_i 为 $(T_1 + T_2)$ 与 $(T_2 + T_3)$ 的平均值, t 为连续采样总时间。在实际测量中, 气泡不是标准球形, 探针不一定沿气泡直径方向刺破气泡, 实际得到的可能只是气泡的某个弦长, 用气泡的 Sauter 弦长表示气泡的当量直径, 是考虑上述问题后对气泡形状的修正, 对于研究气泡运动规律更具有实际意义, 鼓泡塔内气泡 Sauter 直径 D_{32} , 其计算公式如下^[10]:

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_b} n_i D_i^2}$$

气泡 Sauter 直径分布是气泡运动过程中聚并和破碎动态平衡的结果, 与液相湍动程度有关, 是研究气液相间传质和反应器设计的重要参数之一。在测量中, 当气泡连续被探针刺破后, 得到矩形方波脉冲信号图, 测量仪器通过探针采样, 利用芯片处理筛选和排除形状极不规则的气泡后, 通过电脑进行数据接收和统计处理, 得到鼓泡塔内各项气泡特征参数。

3 结果与讨论

由于气泡 Sauter 直径是影响鼓泡塔内气液两相间传质效果的 1 个重要参数, 作为本文的重要研究内容之一, 较详细地探讨了超声场作用下鼓泡塔内气泡直径 D_{32} 分布规律。在超声场鼓泡塔中加入一定量的清水, 液位高度为 600 mm, 调节空气流量以控制鼓泡塔表观气速 U_g , 开启鼓泡塔两侧壁面不同频率的换能器以构成多频超声场, 控制各组实验条件下超声功率一定。然后在不同的测量口用“气泡特征参数测量仪”实时测量和处理气泡特征参数, 每组实验重复进行 3 次, 取平均值。

3.1 表观气速 U_g 对气泡直径 D_{32} 的影响

在分布板上方 5[#] 取样口 ($z = 250$ mm), 塔中心处 ($r/R = 0$), 气泡 Sauter 直径分布如图 4 所示。

在单频超声场作用下, 气泡 Sauter 直径随表观气速 U_g 的变化情况如图 4(a) 所示。从图中可以看出无超声作用及较低频超声场下 (超声频率为 20 kHz 和 50 kHz), 气泡 Sauter 直径随着表观气速的增加而增大, 当表观气速增大到一定值后, 即 U_g 大于 0.06 m/s 时, Sauter 直径趋于某一稳定值。

图 4(b) 中 20 - 50 kHz 和 20 - 50 - 100 kHz 超声辐射条件下也有相似的分布。这是因为随着 U_g 的增大, 进入鼓泡塔内的气体增加, 形成的气泡数目

增多, 气泡聚并作用加强, 气泡直径增大; 另一方面, 气速增大, 液体湍动加强, 气泡破碎几率增加, 最终气泡聚并和破碎达到平衡, 形成稳定的气泡直径分布。单频超声作用下, 气泡 Sauter 直径比在无超声作用下显著减小, 在实验频率范围内最高减幅约达 55%。图 4(b) 中可以看出, 多频超声场辐射下, 气泡 Sauter 直径随表观气速的变化情况更加复杂, 20 - 50 kHz 及换能器全开 (20 - 50 - 100 kHz) 组合频率超声场作用下变化趋势与单频超声场下一致, 而在 20 - 100 kHz 和 50 - 100 kHz 组合频率超声场作用下, 气泡 Sauter 直径基本不受表观气速的影响。

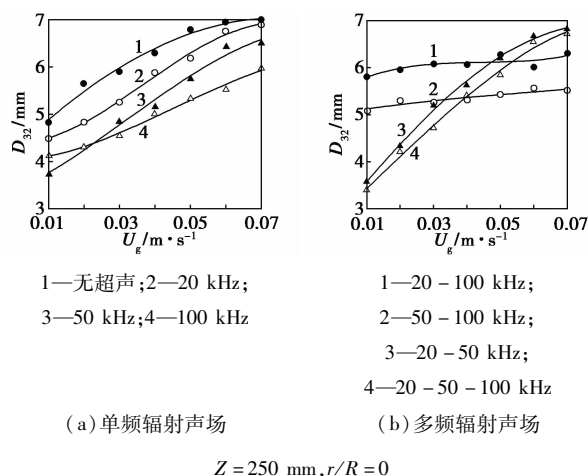


图 4 表观气速 U_g 对气泡 sauter 直径的影响

综合图 4(a) 和图 4(b) 来看, 气泡直径分布受超声场辐射影响较大, 根据水中声速得 100 kHz 的半波长约为 7.5 mm, 鼓泡塔边长为 105 mm, 为 100 kHz 声波半波长的整数倍, 即 100 kHz 超声波在接触塔壁后反射易形成驻波场, 将气泡相对固定在波节而不易聚集, 因此, 气泡直径变化小。冯诺等^[11]研究表明, 20 kHz 至 50 kHz 不大可能形成驻波。在 20 - 50 - 100 kHz 多频辐射声场中, 3 个频率组合声波在空间叠加形成混响声场, 对气泡直径的影响不同于驻波, 气泡直径呈先增大后保持不变的趋势。

引入超声后, 气泡平均直径变小, 超声场中组合的频率之和越大, 气泡 Sauter 值越小, 这说明超声的引入有利于增加气泡比表面积, 减小气泡上升速度, 延长气泡停留时间, 可以强化传质效果。

3.2 超声场下气泡直径 D_{32} 径向分布

图 5 为不同频率组合的超声场下, 分布板上方 5[#] 取样口 ($z = 250$ mm), 表观气速为 0.06 m/s 时气泡 Sauter 直径径向分布。

从图 5(a) 可以看出, 无超声作用下和超声频率为 20 kHz 时, 径向位置对气泡 Sauter 直径的影响

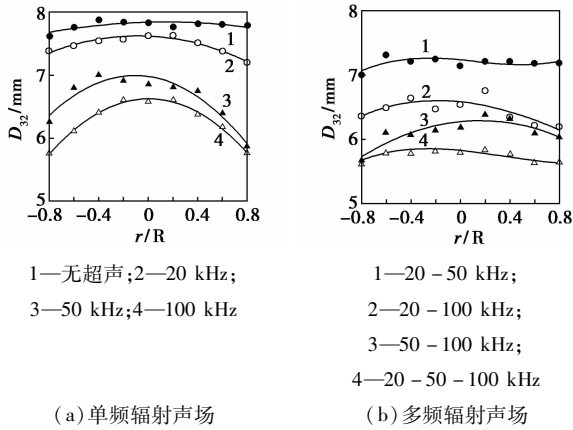


图 5 气泡 sauter 直径径向分布

基本可以忽略, 气泡直径径向分布均匀; 而频率为 50、100 kHz 时, 气泡 Sauter 直径沿着距塔壁径向距离增大而增大, 在塔中心处达最大值, 越靠近塔壁气泡 Sauter 直径越小。这是因为气泡在超声鼓泡塔运动过程中, 气泡大小主要由气泡聚并、破碎和超声作用三者决定, 当体系一定时, 无超声作用下的气泡运动聚并和破碎作用保持平衡, 而引入超声波之后, 超声场的空化效应、微射流作用和湍动作用等对气泡产生激烈的综合效应, 使其原有的气泡运动、生长、聚并和破碎平衡被破坏, 相间湍动更激烈, 气泡破碎作用加强, 同时, 由于超声换能器紧贴安装在鼓泡塔壁面, 所以距壁面越远, 声场作用减弱, 气泡在鼓泡塔中心被破碎强度减小, 以致气泡在塔中心区域聚集倾向明显, 呈现中心峰的分佈趋势。

对比图 5(a), 从图 5(b) 可以看出, 多频组合辐射声场中气泡 Sauter 直径的径向分布较为均匀, 这是因为多频组合产生的混响超声场声强分布均匀, 减小或消除了超声辐射盲区, 混响超声场对气泡的作用也更加均匀稳定, 气泡径向分布均匀性增加。图中结果显示, 引入多频组合混响超声场后, 气泡平均直径变小, 超声场中组合频率之和越大, 气泡 Sauter 直径越小, 这说明混响超声场的引入有利于增加气泡比表面积, 强化传质。

3.3 超声场下气泡直径 D_{32} 轴向分布

图 6 表示在不同频率组合超声场下, 塔中心处 ($r/R=0$), 表观气速为 0.06 m/s 时气泡 Sauter 直径轴向分布。

从图 6(a) 中可以看出, 无超声作用和引入超声场之后, 随着测量口与分布板轴向距离的增大, 气泡 Sauter 直径随之增大。这是因为气泡 Sauter 直径取决于气泡聚并和破碎速率大小及平衡, 且随着轴向位置的增加, 气泡所受静压力减小, 气泡聚并速率增

大, 气泡 Sauter 直径增大, 即越靠近液面, 气泡越大。而从图 6(b) 中可以看出, 多频超声辐射场中, 气泡 Sauter 直径的轴向分布有所不同, 在轴向距离增大到一定值时, 气泡 Sauter 直径值增速减小, 直至趋于不变, 这是因为混响超声场作用减缓了气泡的聚并, 气泡直径增速小于单频超声场, 在多频声场辐射下易形成小气泡。

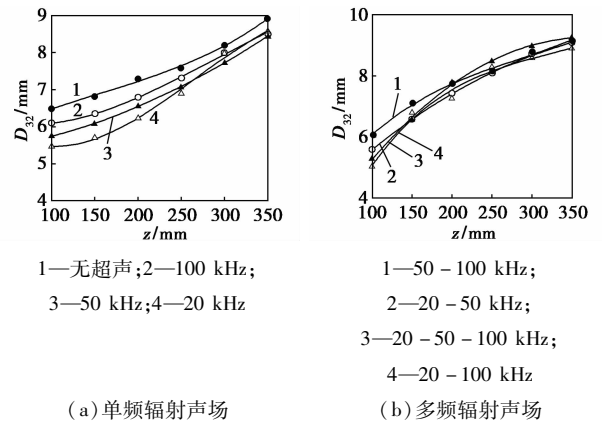


图 6 气泡 sauter 直径轴向分布

4 结论

(1) 在超声场作用下, 气泡 Sauter 直径比在无超声作用条件下显著减小, 在实验频率范围内最高减幅约达 55%。随着表观气速的增大, 鼓泡塔内气泡 Sauter 直径先增大, 当 U_g 大于 0.06 m/s 时, 气泡 Sauter 直径基本保持不变。

(2) 超声对气泡化工传质效应导致液相湍动激烈, 气泡聚并破碎作用加强, 导致大气泡在塔中心区域聚集倾向明显, 气泡直径呈现出中心峰的分佈趋势。

(3) 随着距分布板轴向位置的增加, 气泡所受静压力减小, 气泡聚并速率增大, 气泡 Sauter 直径增大。多频混响声场能提供更强大和更均匀的声强密度及更高功率, 增强气泡聚并破碎作用, 轴向位置上气泡 Sauter 直径增速小于单频声场中增速, 故多频混响声场中易形成较小气泡。

参考文献

[1] Luo H P, Al-Dahhan M H. Macro-mixing in a draft-tube airlift bioreactor[J]. Chem Eng Sci, 2008, 63(6): 1572 - 1585.
 [2] Joshi J B. Computational flow modeling and design of bubble column reactors[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(21): 5893 - 5933.
 [3] 邹华生, 周超, 黎明乐. 正八棱形套管连续式超声反应器声强分布研究[J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(5): 789 - 794.

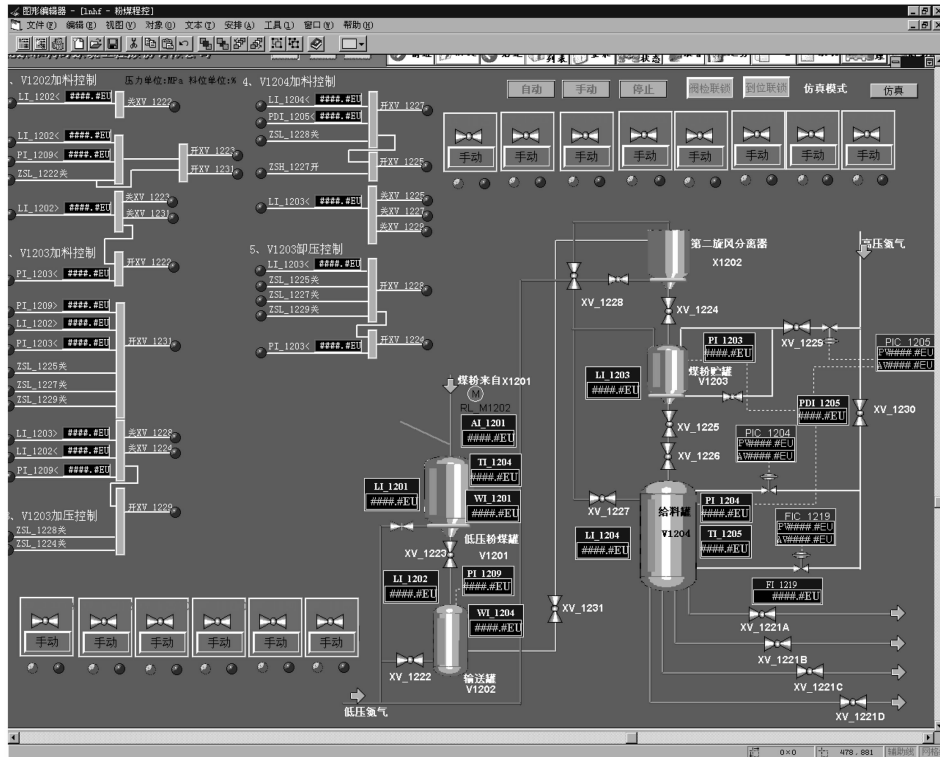
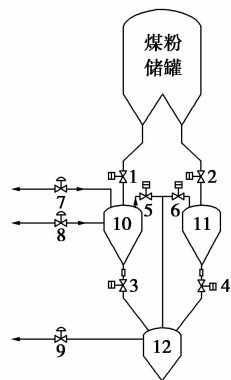


图 1 中试装置煤粉程控示意图

1.2 工业示范装置煤粉输送

煤粉输送单元示意图见图 2。



- 1,2,3,4—煤粉切断阀;5,6—平衡阀;7—锁斗压力调节阀;
- 8—锁斗冲压/放空阀;9—发料罐放空阀;10—煤锁斗 A;
- 11—煤锁斗 B;12—发料罐

图 2 煤粉输送单元示意图

工业示范装置煤粉输送系统包含 2 套锁斗系统,由 1 套顺控逻辑自动控制系统控制,2 套锁斗交替运行,每个锁斗的循环周期约 30 min。单个锁斗的运行过程共分 5 步,下面以 A 系列锁斗运行举例说明。

第 1 步:锁斗受料。按程序打开粉煤锁斗受料阀 1,锁斗开始受料,待锁斗料位达到高料位要求时,关闭锁斗受料阀 1,粉煤锁斗受料完毕。

第 2 步:充压。打开锁斗充压阀 8 对锁斗进行充压,待锁斗压力达到要求后,关闭锁斗充压阀 8,锁斗充压结束。

第 3 步:锁斗等待。将锁斗压力调节阀 7 投入自动调节,保持罐压等待下料。

第 4 步:锁斗下料。打开粉煤锁斗下料阀 3、平衡阀 5 开始下料,待锁斗料位开关低报警时,关闭

(上接第 67 页)

[4] 吕术森,陈雪莉,于广锁.应用电导探针测定鼓泡塔内气泡参数[J]. 化学反应工程与工艺,2003,19(4):344-351.

[5] 王丽雅,庄华洁,宋景祯,等.高气速下鼓泡塔内气含率分布的测定[J]. 化学反应工程与工艺,2006,2(1):1-6.

[6] Rampure M R, Kulkarni A A, Ranade V V. Hydrodynamics of bubble column reactors at high gas velocity: Experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations[J]. Ind Eng Chem Res, 2007,46(25):8431-8447.

[7] Kang Y, Cho Y J, Woo K J, et al. Bubble properties and pressure fluctuations in pressurized bubble columns [J]. Chem Eng Sci,

2000,55(2):411-419.

[8] Son S M, Kang S H, Kim U Y, et al. Bubble properties in three-phase inverse fluidized beds with viscous liquid medium[J]. Chem Eng and Proc, 2007,46(8):736-741.

[9] Van Der Welle R. Void fraction, bubble velocity and bubble size in two-phase flow [J]. Int J Multiphase Flow, 1985, 11(3):317-345.

[10] 张炎,黄为民.气泡大小对反应器内氧传递系数的影响[J]. 应用化工,2005,12(12):734-740.

[11] 冯诺,李化茂.声化学及其应用[M].合肥:安徽科学技术出版社,1992. ■