

折流式超重力旋转床的液泛

谢爱勇, 李育敏, 徐之超, 王红军, 计建炳

(浙江工业大学化学工程与材料学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 在 Wallis 提出的气液两相逆流液泛关联式的基础上, 建立了折流式超重力旋转床的液泛关联式. 以空气-水为物系, 对转子直径 288 mm、高 55 mm 的折流式旋转床进行了液泛实验. 旋转床转子采用动圈开单排孔和动圈开多排孔 2 种结构, 用实验数据拟合出这 2 种结构的液泛关联式参数. 结果表明, 随着气液流动参数的增加, 折流式旋转床的液泛能力因子减小. 转速每增加 100 r/min, 液泛能力因子平均减小 0.007 m/s. 在相同条件下, 多排孔转子液泛能力因子比单排孔高 8.5%.

关键词: 折流式旋转床; 液泛气速; 液泛关联式; 超重力

中图分类号: TQ051.8; TQ021.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2009)02-0238-04

1 前言

超重力旋转床是一种新型气液传质设备, 该设备利用旋转产生的离心力极大地强化气液之间的接触, 增强传质效率, 从而大幅度减小设备体积, 降低设备投资. 折流式超重力旋转床(RZB)是一种新型超重力旋转床, 其基本结构如图 1 所示. 它的转子由静盘和动盘上下镶嵌而成, 静盘固定在壳体上, 动盘固定在转轴上并随轴一起转动, 动静盘形成气液流通的折流式通道^[1], 气液流动路径见文献[2]. 折流式旋转床具有传质效率高、体积小、重量轻、单台可实现连续精馏等优越性^[3], 已成功用于乙醇-水、甲醇-水等工业生产的连续精馏过程.

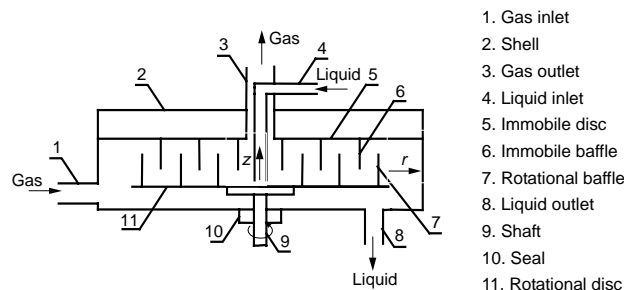


图 1 折流式旋转床结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the rotating zigzag bed

液泛是超重力旋转床流体力学的重要特征之一. 对于气液逆流的超重力旋转床, 因为转子内径处气体流通截面最小, 气体流动速度最大, 故液泛总是发生在转子内径处. 随着气量的增大, 在转子中心出现雾状液滴, 过量的液滴夹带是旋转床液泛的前兆. 气量增大, 液相不能流过旋转床, 气相压降急剧增大, 液泛发生, 大量

液体从气体出口管喷出.

Short^[4]对超重力旋转床的液泛规律作了定性分析, 认为超重力场中的离心加速度远大于重力加速度, 故在相同气液量条件下, 超重力场中的液泛气速远高于重力场中的液泛气速. Munjal 等^[5]将 Sherwood 液泛关联式应用于超重力旋转床的液泛预测, 将式中的重力加速度由离心加速度替代, 认为 Sherwood 关联式对旋转床液泛点低估了 40%~70%. Kellher 等^[6]研究了压降与转速的关系, 用压降的突变点来确定液泛点. Burns 等^[7]研究认为超重力旋转床的液泛气速与转速呈正比. Rao 等^[8]认为当超重力旋转床转速变小, 旋转床压降会突然增加, 这是由于离心力下降而导致的液泛. Lin 等^[9]在超重力旋转床精馏实验中发现, 传质效率随旋转床转速的减小而急剧下降, 认为转速减小导致液泛发生而使传质效率下降.

陈海辉^[10]对同心圆环碟片填料旋转床进行液泛研究, 发现旋转床的液泛气速随液量增加而变小, 由于同心圆环碟片的特殊结构, 液泛气速随转速增加而变小. 王玉红^[11]也对旋转床的液泛作了研究, 并参照 Sherwood 方程得到液泛关联式.

本工作采用 Wallis 对气液两相在管中逆流产生的液泛关联式^[12], 结合实验数据, 提出了适用于折流式超重力旋转床的半经验半理论液泛关联式.

2 新液泛关联式的提出

Wallis^[12]提出的气液两相在管中逆流产生的液泛关联式如下:

$$C_G^{0.5} + mC_L^{0.5} = C, \quad (1)$$

收稿日期: 2008-11-14, 修回日期: 2009-02-04

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(编号: Y406239)

作者简介: 谢爱勇(1978-), 男, 江西省吉安市人, 硕士研究生, 研究方向: 折流式旋转床流体力学及传质性能, Tel: 13989814326, E-mail: xieai1223@163.com; 计建炳, 通讯联系人, Tel: 0571-88320598, E-mail: jjb@zjut.edu.cn.

其中 $C_G=U_G[\rho_G/(\rho_L-\rho_G)]^{0.5}$, (2)

$C_L=U_L[\rho_L/(\rho_L-\rho_G)]^{0.5}$, (3)

$C=K'(gd)^{0.25}$, (4)

对于超重力旋转床, 以离心加速度 $r_1\omega^2$ 代替重力加速度 g , 故

$C=K'(r_1\omega^2d)^{0.25}=K'd^{0.25}(r_1\omega^2)^{0.25}$. (5)

由于折流式旋转床转子由动盘和静盘嵌在一起构成, 不存在填料, 故将式(5)修正为

$C=K(r_1\omega^2)^n$, (6)

将式(6)代入式(1)可得

$C_G^{0.5}+mC_L^{0.5}=K(r_1\omega^2)^n$. (7)

由于气速/液速比即为气量/液量比

$(U_L/U_G)(\rho_L/\rho_G)=L/V$, (8)

式(8)变形后, 得

$U_L=(\rho_G/\rho_L)U_G(L/V)$, (9)

由式(2), (3), (9)可得

$C_L^{0.5}=C_G^{0.5}(L/V)^{0.5}(\rho_G/\rho_L)^{0.25}$, (10)

代入式(7)可得

$C_G = \left\{ \frac{K(r_1\omega^2)^n}{1+m[(L/V)(\rho_G/\rho_L)^{0.5}]^{0.5}} \right\}^2$, (11)

即为折流式液泛关联式. 通过液泛实验数据, 关联出式(1)和(6)中的参数 m , K 和 n . 转子结构不同, 参数 m , K 和 n 也不同.

3 实验

实验在折流式旋转床内进行, 以空气-水为物系.

旋转床壳体直径为 450 mm, 旋转床折流式转子直径 288 mm, 高 55 mm. 实验装置流程如图 2 所示. 来自风机的空气经孔板流量计计量后, 从旋转床的切向进入床内, 在折流式转子中与液体逆流接触, 最后从气相出口管引出. 水经转子流量计计量后, 从折流式转子中心进入, 流经转子后被高速旋转的转子沿径向甩出, 由外腔汇集后经出液口排出. 用 U 型管压差计测量旋转床气体进出口的气相压降.

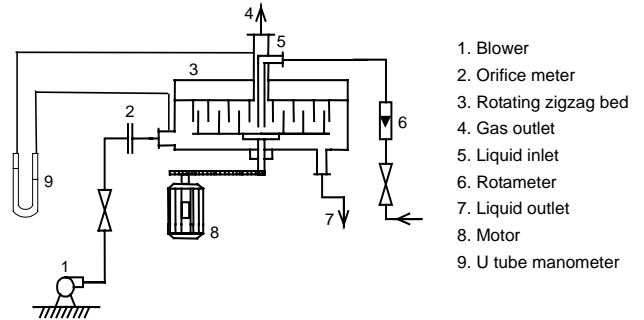


图 2 折流式旋转床实验流程图
Fig.2 Schematic diagram of the experimental setup

本旋转床的折流式转子由动盘和静盘相互嵌套组成. 动盘与静盘间距 51 mm. 静盘上装有 9 个静折流圈, 高 39 mm; 动盘上装有 9 个动折流圈, 高 45 mm. 动折流圈采用 2 种结构, 一种是在动折流圈上沿圆周方向开有 1 排直径 2 mm、孔间距 3 mm 的小孔, 称为单排孔结构, 如图 3(b)所示; 另一种结构是在动折流圈上开有 12 排直径 2 mm、孔间距 3 mm、排间距 3 mm 的小孔, 称为多排孔结构, 如图 3(c)所示.

实验测得 2 种动圈结构不同转速和液量下的液泛气速. 气相压降随气速增大而增大. 液泛气速可从气相压降随气速变化的曲线来判定, 压降急剧增大时的气速定义为液泛气速, 如图 4 中箭头所示. 此时, 液体不能流过旋转床, 在旋转床气体出口处观察到大量液体从气体出口管喷出.

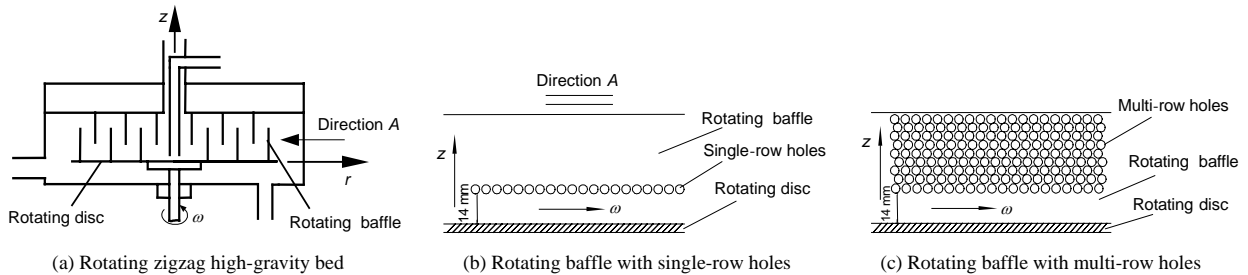


图 3 单排孔和多排孔动折流圈示意图
Fig.3 Schematic diagrams of the rotational baffle plates of single-row and multi-row orifices

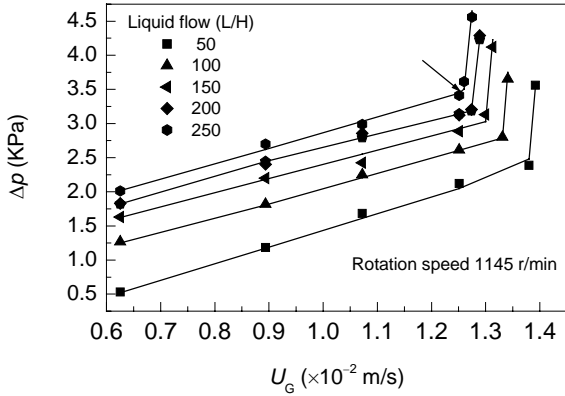


图4 单排孔结构气速与气相压降的关系
Fig.4 Relationship between vapor velocity and gas pressure drop

4 结果与讨论

通过实验得到不同转速下旋转床在不同液量下的液泛气速 U_G . 采用式(2)和(3)将液量转换成 $C_L^{0.5}$, 液泛气速 U_G 转换成 $C_G^{0.5}$, 得到单排孔和多排孔不同转速下 $C_L^{0.5}$ 与 $C_G^{0.5}$ 的关系, 如图5所示. 表1为相同转速下对应的 $C_L^{0.5}$ 和 $C_G^{0.5}$.

从图5可知, 相同转速下的 $C_L^{0.5}$ 和 $C_G^{0.5}$ 基本成直线关系, 由此可以判断, 虽然 Wallis 是针对垂直湿壁管膜状液流推出的气液逆流液泛公式, 但对折流式旋转床滴状液流仍然适用. 由式(1)可知, 该直线的斜率即为 m , 不同转速下的 m 很接近, 单排孔取平均值 $m_{单}=0.0376$, 多排孔取平均值 $m_{多}=0.031$.

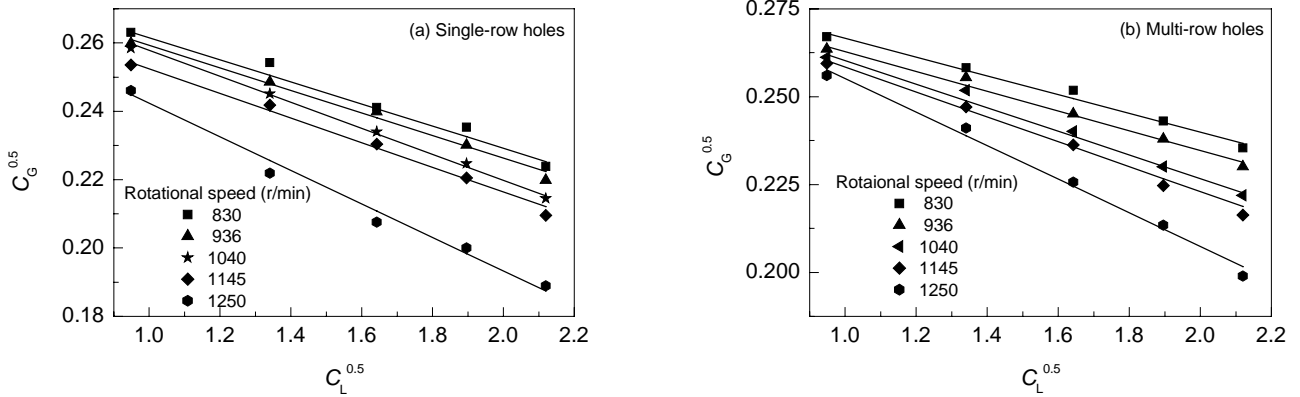


图5 单排孔和多排孔结构的 $C_L^{0.5}$ 与 $C_G^{0.5}$
Fig.5 Flooding data of $C_L^{0.5}$ and $C_G^{0.5}$ for single-row and multi-row holes

表1 不同转速下的 C_L 和 C_G

Table 1 The values of C_L and C_G at various rotational speeds

C_L (m/s)	C_G (m/s) (rotor with single-row holes)					C_G (m/s) (rotor with multi-row holes)				
0.94809	0.26312	0.25984	0.25844	0.25358	0.24611	0.26706	0.26357	0.26122	0.25944	0.25602
1.3408	0.25423	0.24858	0.24511	0.24182	0.22191	0.25822	0.25544	0.2518	0.24708	0.24109
1.64214	0.24111	0.23982	0.23398	0.23037	0.20758	0.25184	0.24508	0.24011	0.23627	0.2574
1.89618	0.23537	0.23008	0.22467	0.22052	0.20003	0.24309	0.23798	0.23008	0.22467	0.12343
2.12	0.22391	0.21982	0.21453	0.20958	0.18895	0.23537	0.23008	0.22191	0.21629	0.1983

根据式(7), r_i 取 45 mm, 拟合得单排孔结构的 $K_{单}$ 和 $n_{单}$, $K_{单}=1.063$ m/s, $n_{单}=-0.1186$. 同理, 得到多排孔结构的 $K_{多}$ 和 $n_{多}$, $K_{多}=0.890$ m/s, $n_{多}=-0.1029$.

将 $m_{单}=0.0376$, $K_{单}=1.063$ m/s, $n_{单}=-0.1186$ 代入式(11), 得到单排孔结构的折流式旋转床液泛关联式:

$$C_G = \left\{ \frac{1.536\omega^{-0.2372}}{1+0.0376[(L/V)(\rho_G/\rho_L)^{0.5}]^{0.5}} \right\}^2 \quad (12)$$

同理, 得到多排孔结构折流式旋转床液泛关联式:

$$C_G = \left(\frac{1.225\omega^{-0.2058}}{1+0.031[(L/V)(\rho_G/\rho_L)^{0.5}]^{0.5}} \right)^2 \quad (13)$$

根据式(12)和(13), 以气液流动参数 $(L/V)(\rho_G/\rho_L)^{0.5}$ 为横坐标, 以气相液泛能力因子 C_G 为纵坐标作图, 如图6所示. 由图可知, 单排孔和多排孔结构的气相液泛能力因子 C_G 都随转速增加而减小. 转速每增加 100 r/min, C_G 平均减小 0.007 m/s. 这是由于转速增加, 液体受到的离心加速度增加, 则液体离开动折流圈的径向速度增加, 因而液滴以更高的速度与静折流圈碰撞, 液滴被撞碎后产生更细小的液滴, 它们大量地被气体夹带, 从而导致液泛提前发生, 液泛能力因子减小.

在相同转速下, 随着气液流动参数 $(L/V)(\rho_G/\rho_L)^{0.5}$ 的增加, 气相液泛能力因子 C_G 稍微减小, 这与普通填料

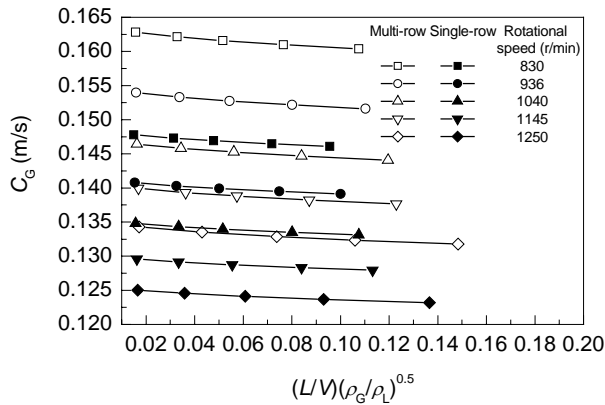


图 6 液泛关联图

Fig.6 Plot for flooding correlation

塔液泛曲线类似。液流量增加, 静折流圈上的液膜厚度增加, 气体的流通面积减小, 气体速度增大, 导致气液交互作用增强, 液体不能通过旋转床而使液泛发生。

另外, 在同等条件下, 多排孔结构液泛能力因子平均比单排孔结构高 8.5%。由于多排孔开孔多, 气体流通面积增大, 因而气速降低, 气液交互作用减弱, 导致液泛能力因子增大。

5 结论

(1) 根据 Wallis 方程, 建立了折流式超重力旋转床的液泛关联式。用 2 种转子结构的液泛实验数据进行拟合, 得到液泛关联式的参数, 为旋转床的设计提供依据。

(2) 折流式旋转床 2 种转子结构液泛气速均随气液流动参数增大而稍微减小。

(3) 单排孔和多排孔结构的气相液泛能力因子 C_G 都随转速增加而减小, 转速每增加 100 r/min, C_G 平均减少 0.007 m/s, 多排孔液泛能力因子平均比单排孔高 8.5%。

符号表:

C 式(1)中的常量 ($m^{0.5}s^{0.5}$)
 C_G 气相液泛能力因子 (m/s)

C_L 液液泛能力因子 (m/s)
 d 填料定性尺寸 (m)
 g 重力加速度 (m/s^2)
 K 式(6)中的常量 (m/s)
 K' 式(4)中的常量 (m/s)
 L 液体流量 (kg/s)
 m 式(1)中的参数
 n 式(6)中的指数
 r_i 旋转床转子内圈半径 (m)
 U_L 转子内径 $r_i=45$ mm 处按转子内缘面积计算的表观液体速度 (m/s)
 U_G 转子内径 $r_i=45$ mm 处按转子内缘面积计算的表观气体速度 (m/s)
 V 气体流量 (kg/s)
 ρ_L 液体密度 (kg/m^3)
 ρ_G 气体密度 (kg/m^3)
 ω 旋转床角速度 (r/s)

参考文献:

- [1] 计建炳, 徐之超, 俞云良, 等. 多层折流式超重力旋转床装置 [P]. 中国专利: CN200520100685.3, 2006-04-05.
- [2] 计建炳, 俞云良. 折流式旋转床-超重力场中的湿壁群 [J]. 现代化工, 2005, 25(5): 52-58.
- [3] 徐之超, 俞云良, 计建炳. 折流式超重力旋转床及其在精馏中的应用 [J]. 石油化工, 2005, 34(8): 778-780.
- [4] Short H. New Mass-transfer Find Is a Matter of Gravity [J]. Chem. Eng., 1983, 25(2): 23-29.
- [5] Munjal S, Dudukovic M. Mass-transfer in Rotating Packed Beds: I. Development of Gas-Liquid and Liquid-Solid Mass-transfer Correlations [J]. Chem. Eng. Sci., 1989, 44(10): 2245-2256.
- [6] Kelleher T, Fair J R. Distillation Studies in a High-gravity Contactor [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1996, 35(12): 4646-4655.
- [7] Burns J R, Jamil J N, Ramshaw C. Process Intensification Operating Characteristics of Rotating Packed Beds—Determination of Liquid Hold-up for a High-voidage Structure Packing [J]. Chem. Eng. Sci., 2000, 55(13): 2401-2415.
- [8] Rao D P, Bhowal A, Goswami P S. Process Intensification in Rotating Packed Beds (HIGEE) [J]. An Appraisal, 2004, 43(14): 1150-1162.
- [9] Lin C C, Ho T J, Liu W T. Distillation in a Rotating Packed Bed [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research Journal of Chemical Engineering of Japan, 2002, 35(12): 1298-1304.
- [10] 陈海辉. 逆流型旋转填料床的液泛实验研究 [J]. 青岛科技大学学报, 2004, 25(3): 228-231.
- [11] 王玉红. 旋转床超重力装置的液泛和传质研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 1992. 160-170
- [12] Wallis G B. One-dimensional Two-phase Flow [M]. New York: McGraw-Hill, 1969. 24-36.

Liquid Flooding of a Rotating Zigzag High-gravity Bed

XIE Ai-yong, LI Yu-min, XU Zhi-chao, WANG Hong-jun, JI Jian-bing

(College of Chemical Engineering & Materials Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: The flooding correlation of high-gravity rotating zigzag bed (RZB) was established on the basis of a correlation of flooding in counter-current two-phase flow in tubes proposed by Wallis. The experiment was carried out in a RZB with rotor diameter of 288 mm and rotor height of 55 mm in air-water system. The rotor had two types of structure (single-row orifices and multi-row orifices) on the rotational disc. A flooding correlation was obtained by regression based on the experimental data. The results showed that the flooding capacity factor decreased with the increase of gas-liquid flow rates. The factor was reduced by 0.007 m/s when rotational speed increased each time by 100 r/min. And the factor by the rotor with multi-row orifices was 8.5% greater than that of single-row orifices.

Key words: rotating zigzag bed; gas velocity of flooding; flooding correlation; high-gravity