

旋转床内填料表面传质特性的研究

杨 玲 张鹏远*

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘 要: 在旋转床(RPB)中,用氮气-水系统,通过氧解吸过程对两种不同形状填料的传质过程进行实验研究,实测体积传质系数与转子转速、液体流率及气体流率的关系,进而揭示出旋转床内两种填料的传质特性。对这两种不同形状的填料表面传质特性进行比较,找出传质效果较好的填料。文中还进一步对填料比表面积对体积传质系数的影响进行了探讨,证实了液体在转子填料层中的连续微粒化所得到的大量液滴表面是旋转床传质强化的重要因素。基于对旋转床传质的实验结果,提出了平均体积传质系数的回归关系式。

关键词: 旋转床;气液传质;关联式

中图分类号: TQ 021.4

引 言

旋转床作为一种气液传质设备,由于其具有体积小、泛点高、传质系数大的优点,正受到越来越多研究者的青睐。研究者发现在旋转床填料层内的气液接触过程中,相间传质可得到极大的强化。传质单元高度较传统的填料塔可减少1~2个数量级^[1]。如何将旋转床应用到工业生产过程中,也就逐渐成为目前的研究重点。我校超重力工程研究中心已对旋转床内气相压降及传质过程进行了详细的研究,但是多采用整形填料,而在实际的工业生产中,尤其是气液固三相反应器中,较多采用小尺寸的填料或催化剂。本文针对两种小尺寸的填料进行实验研究,目的就是揭示两种不同形状的填料表面的传质规律,进一步研究旋转床内液膜控制的气液传质过程强化的机理,并对这两种填料的传质效果进行比较。

1 实验部分

1.1 实验装置与方法

在旋转床中采用两种不同形状的多孔填料(三叶草形和球形填料,以下分别用 和 来表示),用氮气对水中的氧气进行逆流解吸。三叶草形填料的

尺寸为:长度 l 为 8~18 mm,叶间距 D_1 为 2~2.25 mm,比表面积 a_1 为 $1.82 \times 10^3 (\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$,颗粒密度 ρ_p 为 $911 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$;球形填料的粒径 d_p 为 2.5~3.5 mm,比表面积为 $1.15 \times 10^3 (\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$,颗粒密度 ρ_p 为 $966 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 。转子填料层的尺寸为:外径 D_{out} 300 mm、内径 D_{in} 150 mm、高度 H 95 mm,旋转床内催化剂采用乱堆方式装填,旋转床设备如图1所示。

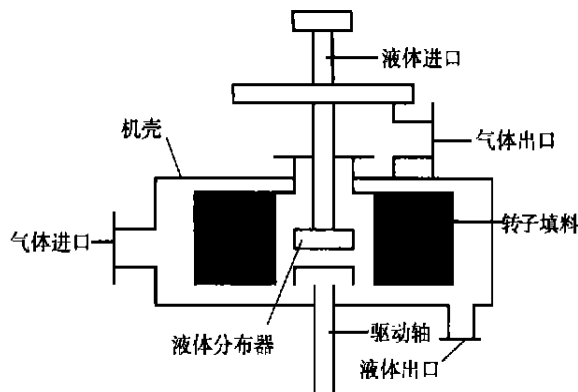


图1 旋转床结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RPB

1.2 实验流程

来自贮罐的水经转子流量计,由旋转床上部的液体进口流入旋转床,经液体分布器喷到高速旋转着的填料层的内缘,液体在离心力的作用下,由填料内缘被甩至外缘,进入转子与外壳的空腔内,经液体出口流出旋转床。来自高压气瓶的氮气经稳压阀、转子流量计由气体进口切向流入旋转床的空腔,在压力梯度的作用下由填料层的外缘经填料层至内

收稿日期: 2001-01-10

基金项目: 北京燕山化工二厂资助项目(H99123)

第一作者: 女,1972年生,硕士生

* 通讯联系人

缘,从气体出口流出旋转床。气液在填料层内逆流接触,进行氧解吸过程。用调频仪控制驱动电机来调节转子转速,用 7528D 型数字式溶氧仪在线测量进出口水中氧的浓度。

1.3 本实验的主要操作参数

旋转床转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$: 600; 700; 800; 900;

1 000; 1 100;

水的体积流量 $q_v/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$: 1.5; 2.0; 2.5;

3.0;

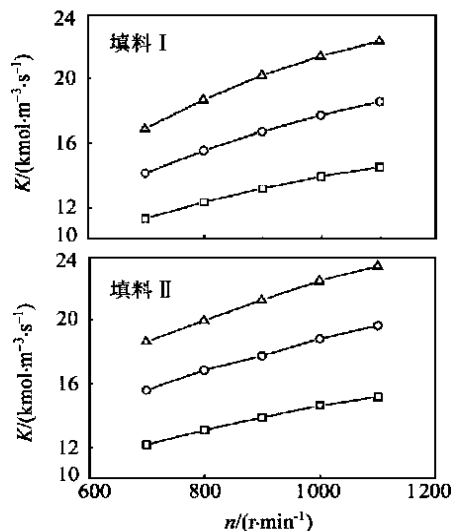
氮气的体积流量 $q_v/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$: 1.5; 1.7; 1.9;

2.1。

2 实验结果与讨论

2.1 操作参数对体积传质系数的影响

图 2 和图 3 分别为填料 I、II 的体积传质系数随不同操作条件变化的示意图。



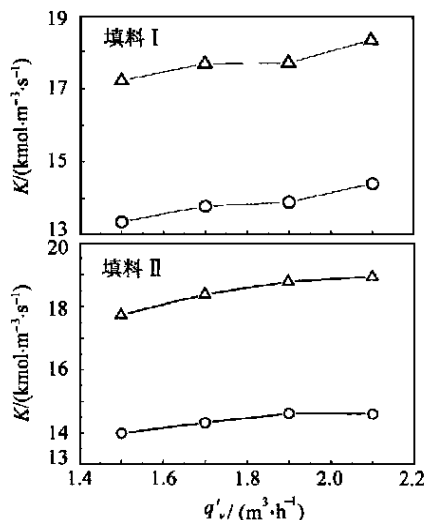
$q_v/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}) = 1.9$; $q_v/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$: 1.5; 2.0; 2.5

图 2 体积传质系数随转速的关系

Fig. 2 Dependence of volumetric mass transfer coefficient on rotating speed

从图中可以看出,体积传质系数随气体、液体的体积流量和转速的变化规律同于整形填料^[2]的变化规律,即在一定的操作条件下,改变气流量及转速,体积传质系数随气量、液量、转速的增大而增大。本文认为表面现象对气液相间的传质作用不容忽视,因为在实验过程中发现随转子甩出的液体中夹带着大量的细雾。由于细小雾滴过饱和蒸气压的存在,大量的蒸汽将会在液体表面上冷凝成液体,蒸汽冷凝后体积急剧减小,周围的气体会马上填充到这些地方,造成气液界面附近的气体 and 液体的强烈湍

动,从而使传质速率加快。



$N = 1\,000\text{ r/min}$ $q_v/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$: 1.5; 2.0

图 3 体积传质系数随气体流率的关系

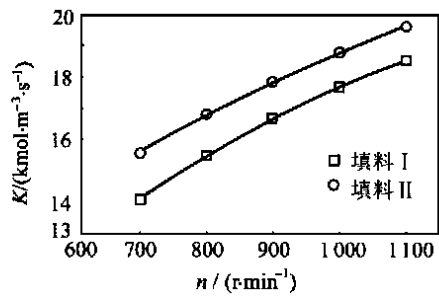
Fig. 3 Dependence of volumetric mass transfer coefficient on gas flow rate

在体积传质系数与转速的关系图中可见,提高转速,体积传质系数增大的趋势变缓。分析其原因为:由于液体破碎成液滴和液膜的尺寸大小是液体的表面张力和所获得的离心力平衡的结果,当液滴直径小到一定程度及液膜薄到一定程度时,液体的表面张力在液体破碎中所起的作用就变得十分明显,要使液体继续破碎就需要更大的离心力,此时继续增加转速所引起的液滴直径、液膜厚度及液滴数量的变化就会很小,从而导致传递量的变化不显著。另一方面,液滴直径越小,单位体积液滴在气体中飞行时受到的磨擦阻力越大,导致气液相间的速度变化不大,从而对传递量增加的贡献变小,使体积传质系数随转速增加趋势变缓。

2.2 不同形状的填料传质效果的比较

通过对两种不同形状填料的传质实验结果的分析,比较两者的传质效果发现(见图 4),填料 I 的体积传质系数要高于填料 II 的体积传质系数,由于填料 I 的比表面积要比填料 II 的比表面积大,因此可以得出推论,填料的比表面积并不是传质过程中的决定因素。张军和郑冲教授^[3]采用高速频闪照相技术对旋转床内液体的流动状况进行了研究,观察到液体在旋转床填料层内以液滴、液线和液膜 3 种形态流动。Burns 和 Ramshaw^[4]利用照像技术对旋转填料床内液体的流动状况也进行了观察,将液体在旋转床填料层中的流动分为 3 类:孔道流、液滴流

和液膜流。因此旋转床内的传质过程是在填料表面和飞溅的液滴表面同时进行的,填料表面积是否起决定性作用取决于两者中谁处于主导作用。根据实验所得到的数据认为在本文实验条件下旋转床中气液间质量传递,在空间飞行的液滴表面所进行的传递过程占主导地位,也就是说球形填料有利于液体微粒化。



$q_v/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}) = 2.0, q_v(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}) = 1.9$
图 4 填料 I 和 II 的体积传质系数的比较
Fig. 4 Comparison of volumetric mass transfer coefficients between packing I and II

2.3 实验数据关联

通过对两种不同形状的填料的实验数据进行因次分析^[5,6],得到以下无因次数群关联式

$$K = x_1 \frac{D_{ab}}{D} \cdot a \cdot Re_l^{x_2} \cdot Re_g^{x_3} \cdot Fr_l^{x_4} \cdot We^{x_5} \tag{1}$$

其中:

$$Re_l = \frac{1 \cdot q_v}{D \cdot \mu_l} \tag{2}$$

$$Re_g = \frac{g \cdot q_v}{D \cdot \mu_g} \tag{3}$$

$$Fr_l = \left(\frac{q_n}{D^2 H \cdot \rho_l} \right)^2 \tag{4}$$

$$We = \frac{1 \cdot q_v^2}{\rho_l \cdot g \cdot D^3} \tag{5}$$

由于本文实验过程中气液温度变化不大,且实验介质一定,表面张力可近似为一定值,因此将关联式中的 We 并入待求常数项 x_1 中。将两种填料的实验数据进行拟合可得到相应的待定参数,计算结果分别如下。

(1) 三叶草形填料: $M = 55$

x_1	x_2	x_3	x_4	/ %
1.19×10^6	1.421	0.167	- 0.295	0.989

(2) 球形填料: $M = 65$

x_1	x_2	x_3	x_4	/ %
4.46×10^6	1.335	0.166	- 0.247	0.709

2.4 拟合结果与实验结果的比较

图 5 是填料 I、II 的体积传质系数的计算结果与实验结果的对比图,从图中可见,所有的点都落在对角线的附近,计算结果与实验结果相吻合。填料 I、II 的相对误差分别为 0.989 %和 0.709 %。

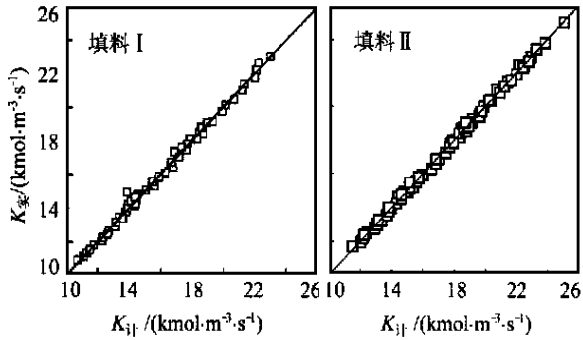


图 5 填料 I 和 II 的体积传质系数的拟合结果与实验结果的对角线图
Fig. 5 Comparison of K between regressive and experimental values of packing I and II

3 结 论

- (1) 体积传质系数随转子转速、气液流量的增加而增大。
- (2) 在气液两相传质过程中,表面现象的贡献不可忽视。
- (3) 气液两相间的传质并不总是与填料的比表面积成正比,即在一定的操作条件下,填料的比表面积不是旋转床中质量传递的敏感参数。

符 号 说 明

- a ——式(1)中填料的比表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$
- a_1 ——三叶草形填料的比表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$
- a_2 ——球形填料的比表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$
- D_1 ——三叶草形填料的叶间距, mm
- D_{ab} ——扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- D_{in} ——转子填料的内径, mm
- D_{out} ——转子填料的外径, mm
- D ——转子填料的当量直径, $D = (D_{in} + D_{out}) / 2$, mm
- d_p ——球形填料的粒径, mm
- q_v ——气体的体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- H ——填料层的高度, mm
- k_x ——液膜传质系数, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

K ——液相的体积传质系数, $K = k_x \cdot a$, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

$K_{\text{计}}$ ——液相体积传质系数的计算值, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

$K_{\text{实}}$ ——液相体积传质系数的实验值, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

l ——三叶草填料的长度, mm

M ——实验组数

n ——转子的转速, r/min

q_n ——液体摩尔流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

q_v ——液体体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

$x_1 \sim x_5$ ——待定参数, 无因次

——相对实验误差, $= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{K_{\text{实}} - K_{\text{计}}}{K_{\text{实}}} \right|$

ρ_l ——液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

ρ_g ——气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

ρ_p ——三叶草形填料的颗粒密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

ρ_p ——球形填料的颗粒密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

——转子的旋转速度, s^{-1}

μ_l ——液体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

μ_g ——气体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

σ ——液体的表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

Fr_l ——Frouid 准数, 无因次数群

Re_l ——液相雷诺数, 无因次数群

Re_g ——气相雷诺数, 无因次数群

We ——韦伯数, 无因次数群

参 考 文 献

- [1] 竺洁松. 旋转床超重力场中传质特性的研究. [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 1994
- [2] 竺洁松, 郭 锴, 冯元鼎, 等. 旋转床填料中的传质及其模型化. 高校化学工程学报, 1998(3): 219 ~ 225
- [3] 张 军. 旋转床内液体流动与传质的实验研究和计算模拟. [博士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 1996
- [4] Burns J R, Ramshaw C. Process intensification: Visual study of liquid maldistribution in rotating beds. Chemical Engineering Science, 1996, 51(8): 1347
- [5] 时 钧, 汪家鼎, 余国琮, 等主编. 化学工程手册(上卷). 第二版. 北京: 化学工业出版社, 1996, (11-1) ~ (11-44)
- [6] 姚玉英主编. 化工原理(下册). 天津: 天津科学技术出版社, 1995. 90 ~ 125

Mass transfer characteristics of packing in a rotating packed bed

YANG Ling ZHANG Peng-yuan

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: With a N_2 -water system, the mass transfer process of two types of packing with different shape were experimentally studied in a rotating packed bed (RPB). The relations of volumetric mass-transfer coefficient with rotating speed, liquid flow rate and gas flow rate were measured, and mass transfer characteristics of two packings were investigated. By comparing mass transfer coefficients of two packings, one packing that had better mass transfer performance was sorted out. The effect of specific area of packing on volumetric mass transfer coefficient was discussed further, and it was justified that gas-liquid mass transfer intensification is primarily the result of great effective mass transfer area generated by liquid atomization. Finally, based on the experimental data, the empirical correlation equation of the mass transfer coefficient was derived by regression.

Key words: rotating packed bed; mass transfer; correlation