

Determination of effective interfacial area and local liquid-side mass-transfer coefficient of novel compound rotating zigzag bed by chemical absorption method

Kangsheng GENG¹, Yumin LI^{1*}, Jiadong LU¹, Pengzhen LIU¹, Jun WANG², Jianbing JI¹

1. Research Center for High Gravity Engineering and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

2. Hangzhou Singo Science and Technology Company Limited, Hangzhou, Zhejiang 311301, China

Abstract: The effective interfacial area and the local liquid-side mass-transfer coefficient of the novel compound rotating zigzag bed were determined by absorbing of CO₂ gas with different concentrations of NaOH solution, the effects of liquid volumetric flow rate, gas volumetric flow rate and rotational speed were investigated. The results showed that effective interfacial area and local liquid-side mass-transfer coefficient in the novel compound rotating zigzag bed increased with the increase of liquid volumetric flow rate, gas volumetric flow rate and rotational speed. Compared with the rotating zigzag bed, the effective interfacial area of the novel compound rotating zigzag bed increased by 7%~159%, however, the local liquid-side mass-transfer coefficient reduced by 7.7%~18.2%. Eventually, the local volumetric liquid-side mass-transfer coefficient increased by 4%~132%.

Key words: compound rotating zigzag bed; effective interfacial area; local liquid-side mass-transfer coefficient

化学吸收法测定新型复合转子旋转床气液有效比表面积及液相传质系数

耿康生¹, 李育敏^{1*}, 陆佳冬¹, 刘鹏真¹, 汪军², 计建炳¹

1. 浙江工业大学超重力工程技术研究中心, 浙江 杭州 310014

2. 杭州鑫高科技有限公司, 浙江 杭州 311301

摘 要: 用不同浓度的 NaOH 溶液吸收 CO₂, 分别测定新型复合转子旋转床的气液有效比表面积和液相传质系数, 考察了液量、气量和转速的影响。结果表明, 新型复合转子旋转床的有效比表面积和液相传质系数均随液量、气量和转速增大而增大。在相同操作条件下, 与折流式旋转床相比, 新型复合转子旋转床转子的有效比表面积增大 7%~159%, 液相传质系数降低 7.7%~18.2%, 最终液相体积传质系数增大 4%~132%。

关键词: 复合转子旋转床; 有效比表面积; 液相传质系数

中图分类号: TQ053.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2018)04-0704-06

1 前言

超重力旋转床是一种用离心力代替重力的新型高效气液传质设备^[1,2], 床内的液体受到强大的离心力和剪切力被分割成薄的液膜、细的液丝和小的液滴, 强化了传质过程。超重力旋转床已广泛应用于精馏^[3,4]、吸收^[5,6]、

解吸^[7]、生产纳米材料^[8,9]等多个领域。旋转床转子目前主要有填料式^[10,11]、板式^[12,13]和复合式^[14,15]。

气液有效比表面积和液相传质系数是影响传质的重要参数。陈海辉等^[16]用不同浓度的 NaOH 溶液吸收 CO₂, 分别测定同心环波纹碟片逆流式旋转填料床气液有效比表面积(a_e)和液相体积传质系数($k_L a_e$)。Rajan 等^[17]

收稿: 2017-11-16, 修回: 2018-01-29, 网络发表: 2018-05-18, Received: 2017-11-16, Revised: 2018-01-29, Published online: 2018-05-18

基金项目: 浙江省科技计划公益技术研究工业项目(编号: 2014C31145)

作者简介: 耿康生(1991-), 男, 江苏省淮安市人, 硕士研究生, 化学工程与技术专业, E-mail: 928620144@qq.com; 李育敏, 通讯联系人, E-mail: liym@zjut.edu.cn.

引用格式: 耿康生, 李育敏, 陆佳冬, 等. 化学吸收法测定新型复合转子旋转床气液有效比表面积及液相传质系数. 过程工程学报, 2018, 18(4): 704-709.
Geng K S, Li Y M, Lu J D, et al. Determination of effective interfacial area and local liquid-side mass-transfer coefficient of novel compound rotating zigzag bed by chemical absorption method (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 704-709.
DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217401.

用不同浓度的 NaOH 溶液吸收 CO_2 , 测定了分层填料旋转床的 a_e 和液相传质系数(k_L). 姚远等^[18]分别用 NaOH 溶液和含 ClO^- 催化剂的 $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{--NaHCO}_3$ 缓冲溶液吸收 CO_2 , 测定了丝网填料旋转床的 a_e . Tsai 等^[19]用 NaOH 溶液吸收 CO_2 法测定了装有静止挡板叶片的填料旋转床的 a_e , 采用氧解析法测定了 k_L . 本工作研究的转子为新型复合转子, 由碟片式和折流式转子复合组成, 结合了两种转子的优点(碟片式转子有利于液体雾化和降低床层压降, 折流式转子有利于气液传质). 采用化学吸收法准确测定气液有效比表面积(a_e)与液相传质系数(k_L)依靠准确的八田数, 本工作用不同浓度的 NaOH 溶液吸收 CO_2 , 分别测定新型复合转子旋转床转子的 a_e 和 k_L , 研究其随液量、气量和转速变化的规律, 为工业化应用提供依据.

2 复合转子旋转床结构及气液流动

新型复合转子旋转床结构如图 1 所示, 由两种板式转子(碟片式和折流式)复合组成. 超重力旋转床设备主要包括壳体、复合转子、液体分布器和气液进出口. 新型复合转子由内外两层组成, 内层为波纹碟片层, 外层为动静折流圈层. 波纹碟片层由若干金属孔板波纹碟片沿轴向等距平行叠放而成且固定在布满小孔的金属内支撑圈上, 金属内支撑圈固定在动盘上, 动盘固定在旋转轴上, 波纹碟片层随旋转轴高速旋转, 金属孔板波纹碟片在开有小孔的金属碟片上做出若干同心圆波纹. 动静折流圈层由同心动静折流圈相互嵌套而成, 静折流圈固定在静盘上静止不旋转, 而动折流圈固定在动盘上, 随旋转轴高速旋转. 液体分布器为普通四爪分布器, 每爪轴向上开有一排小孔, 开孔方向均沿径向向外. 新型复合转子旋转床与折流式旋转床^[20]相比, 传质性能更优

越, 具有折流式旋转床的优势, 可中间进料, 无需动密封.

液体由静止的液体分布器喷射到高速旋转的内支撑圈上, 由于液体与内支撑圈相对周向速度最大, 液体被内支撑圈瞬间破碎成细小的液滴, 此时有效比表面积和液相传质系数达到最大值, 称为端效应. 液体穿过端效应区后继续沿径向向外运动, 同时沿波纹碟片周向运动, 部分液体以液膜形式在波纹碟片的同心圆波纹板面上流动, 沿着波纹倾角飞离波纹板面, 与相邻的波纹碟片猛烈撞击; 部分液体穿过同心圆波纹的小孔形成液丝或液滴, 高速撞击到下个同心圆波纹上, 液体表面快速更新、产生极高的气液有效比表面积. 液体在离心力作用下从波纹碟片层甩向动静折流圈层, 液体每经过一对动静折流圈均经历加速—甩出—撞击过程, 最终液体撞向旋转床内壁, 沿壁面流下从液体出口流出旋转床. 气体在压力的作用下从气体进口管进入折流圈层, 以螺旋型上升、下降的运动方式到达折流圈层内缘, 再进入波纹碟片层, 在波纹碟片层以类似于“之”字形的路径运动, 到达波纹碟片层内缘, 从气体出口离开旋转床.

3 实验

3.1 实验装置

新型复合转子旋转床转子内径 $r_i=101\text{ mm}$, 外径 $r_o=288\text{ mm}$, 高 $z=51\text{ mm}$. 固定波纹碟片层的金属内支撑圈孔径 2 mm , 孔间距 2.8 mm , 高 49 mm . 波纹碟片层由 6 层波纹碟片组成, 波纹碟片层内径 103 mm , 外径 160 mm , 距离静盘 9 mm , 距离动盘 2 mm , 相邻波纹碟片的轴向距离均为 6 mm , 波纹碟片上的孔孔径 1 mm , 孔间距 2.1 mm , 相邻波峰和波谷间距为 10 mm , 波纹夹角为 90° . 动静折流圈层由 7 对动静折流圈组成, 动圈高 43 mm , 动圈直径分别为 $170, 189, 208, 227, 245, 262$ 和 278 mm , 动圈上的孔孔径 1.5 mm , 孔间距为 2.5 mm , 最下层孔与动盘距离为 13 mm ; 静圈高度为 38 mm , 静圈直径分别为 $180, 200, 218, 238, 256, 272$ 和 288 mm . 液体分布器为 4 爪分布器, 每爪有 4 个孔, 孔径 1 mm , 孔间距 10 mm .

3.2 实验方法

分别以浓度 1 和 0.05 mol/L 的 NaOH 水溶液吸收空气中的 CO_2 气体(浓度 $2\text{ vol}\%$), 测定新型复合转子旋转床转子的 a_e 和 k_L . 实验流程如图 2 所示, NaOH 溶液从储液槽由泵输送至液体分布器, 均匀喷射到转子的内缘, 在旋转转子离心力的作用下向转子外缘流动, 最终撞击在腔体内壁, 随自身重力沿内壁流下, 从液体出口流出旋转床. CO_2 气体与空气混合后切向进入旋转床,

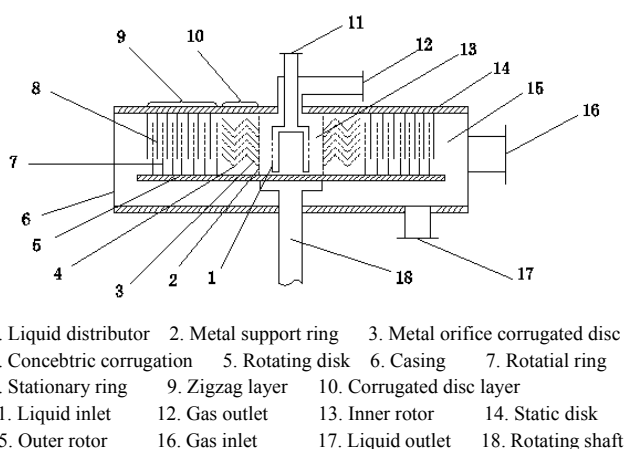


图1 复合转子旋转床结构示意图

Fig.1 Structure diagram of novel compound rotor rotating bed

逆向接触 NaOH 溶液并进行气液传质,最后从气相出口流出旋转床. 为测定转子的气液有效比表面积 a_e (即排除空腔区的影响), 在靠近转子外缘处放置一个液体样品收集器, 收集刚离开转子的液体. 气体进口 G_1 和出口 G_3 收集到的气体样品浓度用 SP-6800A 气相色谱仪(山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司)分析, 液体出口 L_2 和转

子外缘 L_3 收集到的液体样品采用双指示剂法(硫酸钡和酚酞)测定 Na_2CO_3 和 NaOH 的浓度. 在 G_1 , L_3 和 G_3 处的 CO_2 摩尔分数分别为 y_{1,CO_2} , y_{2,CO_2} 和 y_{3,CO_2} . L_2 处的 Na_2CO_3 浓度分别为 $c_{2,\text{Na}_2\text{CO}_3}$, L_3 处的 Na_2CO_3 浓度为 $c_{3,\text{Na}_2\text{CO}_3}$.

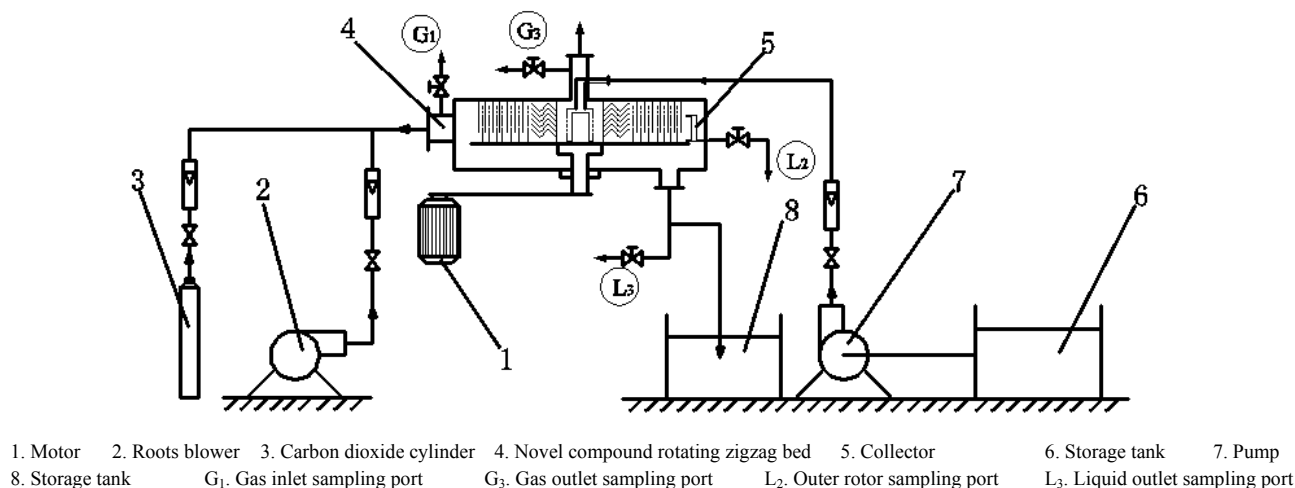


图2 实验流程图

Fig.2 Schematic diagram of experiment

3.3 实验原理

用高浓度(1 mol/L)NaOH 溶液吸收 CO_2 气体, 转子的有效比表面积 a_e [20]如下:

$$a_e = \frac{HG_m(y_{2,\text{CO}_2} - y_{3,\text{CO}_2})}{py_{\text{CO}_2}\sqrt{D_L k \pi z(r_o^2 - r_i^2)}}, \quad (1)$$

式中, H 为 CO_2 在 NaOH 溶液中的亨利常数, D_L 为 CO_2 在 NaOH 溶液中的扩散系数(m^2/s), k 为拟一级反应速率常数(s^{-1}), p 为气体总压强(kPa), G_m 为气体摩尔流率(kmol/s), y_{CO_2} 为转子区 CO_2 摩尔分数.

用低浓度(0.05 mol/L)NaOH 溶液吸收 CO_2 气体, 转子的液相传质系数 k_L [20]如下:

$$k_L = \sqrt{\left[\frac{HG_m(y_{2,\text{CO}_2} - y_{3,\text{CO}_2})}{py_{\text{CO}_2} a_e \pi z(r_o^2 - r_i^2)} \right]^2 - D_L k}. \quad (2)$$

CO_2 在转子空腔区中物料守恒, 转子外缘处 CO_2 摩尔分数 y_{2,CO_2} 为:

$$y_{2,\text{CO}_2} = y_{1,\text{CO}_2} - \frac{L_m(c_{3,\text{Na}_2\text{CO}_3} - c_{2,\text{Na}_2\text{CO}_3})}{G_m}, \quad (3)$$

式中, L_m 为液体摩尔流率(kmol/s).

转子区 CO_2 摩尔分数 y_{CO_2} 为 y_{2,CO_2} 和 y_{3,CO_2} 的算数平均值, 转子内 Na_2CO_3 和 NaOH 的浓度为液体进口处 L_2 和转子外缘 L_3 处浓度的算数平均值. CO_2 在 NaOH 溶液

中的溶解度系数 H 、扩散系数 D_L 和拟一级反应常数 k 可由文献[17]得到, 将 y_{2,CO_2} , y_{3,CO_2} , H , D_L 和 k 代入式(1)和(2)中即可得新型复合转子旋转床转子区的 a_e 和 k_L .

4 结果与讨论

4.1 有效比表面积和液相传质系数的影响因数

液体流量(L)、气体流量(G)和转速(n)对新型复合转子旋转床转子的 a_e 的影响如图 3 所示. a_e 随液体流量、气体流量和转速增大而增大. 在相同转速下($n=1200 \text{ r/min}$), 当 L 从 80 L/h 增加到 240 L/h 时, a_e 急剧增大, $G=10$ 和 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, a_e 分别增大 157.1% 和 166.5%. L 增加时, 更多的液体被波纹碟片雾化成液滴, 同时被动折流圈甩出的液丝量增加, 导致气液有效比表面积 a_e 增大, 如图 3(a)所示, L 从 80 L/h 增加到 160 L/h 时(增加 1 倍), a_e 从 $252.28 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 增至 $487.21 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (近似增加 1 倍). 在波纹碟片区, 气液有效比表面积主要由雾化的细小液滴提供, 当液量增加 1 倍时, 细小液滴数也近似增加 1 倍, 因此气液有效比表面积也近似增加 1 倍. 相同转速下($n=1200 \text{ r/min}$), G 从 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $40 \text{ m}^3/\text{h}$, $L=120$ 和 240 L/h 时, a_e 分别增大了 18.9% 和 20.6%. G 增加, 气液两相之间的相互作用增强, 液相湍流强度增强导致液滴破碎成直径更小的液滴, 液滴数随之增加, a_e 增大. $G=10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 当 n 从 600 r/min 增至 1200 r/min, $L=80$

和 160 L/h 时, a_e 分别增大了 36.5% 和 79.8%。 n 增加, 波纹碟片和动折流圈对液体的剪切力增大, 液体被撕裂成更多直径更小的液滴, 从而提高了 a_e 。 在以上操作条件下, 新型复合转子旋转床转子的气液有效比表面积 a_e 可达 229.35~726.81 m^2/m^3 。

液体流量、气体流量和转速对新型复合转子旋转床转子的液相传质系数 k_L 的影响如图 4 所示。 k_L 随液体流量、气体流量和转速增大而增大, $G=10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 当 L 从 80 L/h 增加到 240 L/h, $n=800$ 和 1200 r/min 时, k_L 分别增大了 35.4% 和 46.3%。 随 L 增加, 液体在波纹碟片

层的分布更加均匀, 同时液膜在静折流圈壁的下降速度增大, 导致液膜的液体湍动增大, 从而提高了 k_L 。 $L=120 \text{ L/h}$ 时, 当 G 从 10 m^3/h 增至 40 m^3/h , $n=800$ 和 1200 r/min 时, k_L 分别增大了 9.8% 和 17.9%。 随 G 增加, 液滴被分裂成更小的液滴, 液丝变得更细, 减小了液相传质阻力, 有利于气液传质。 $L=160 \text{ L/h}$ 时, 当 n 从 600 r/min 增至 1200 r/min, $G=40$ 和 10 m^3/h 时 k_L 分别增大 29.4% 和 51.3%。 随 n 增加, 液滴直径变小, k_L 增大。 在以上操作条件下, $k_L=0.00158\sim0.00264 \text{ m/s}$ 。

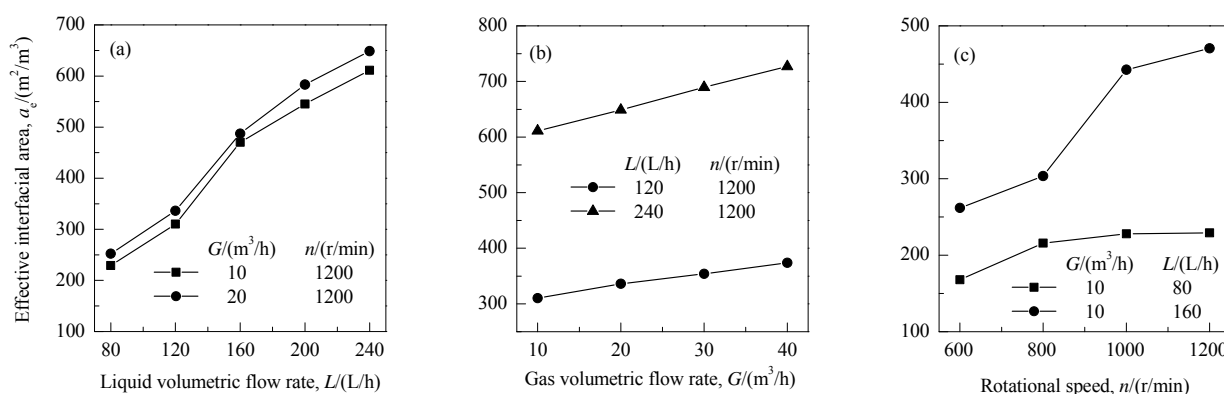


图3 液体流量、气体流量和转速对新型复合转子旋转床转子的气液有效比表面积的影响

Fig.3 Effects of liquid volumetric flow rate, gas volumetric flow rate and rotational speed on effective interfacial area of novel compound rotating zigzag bed rotor

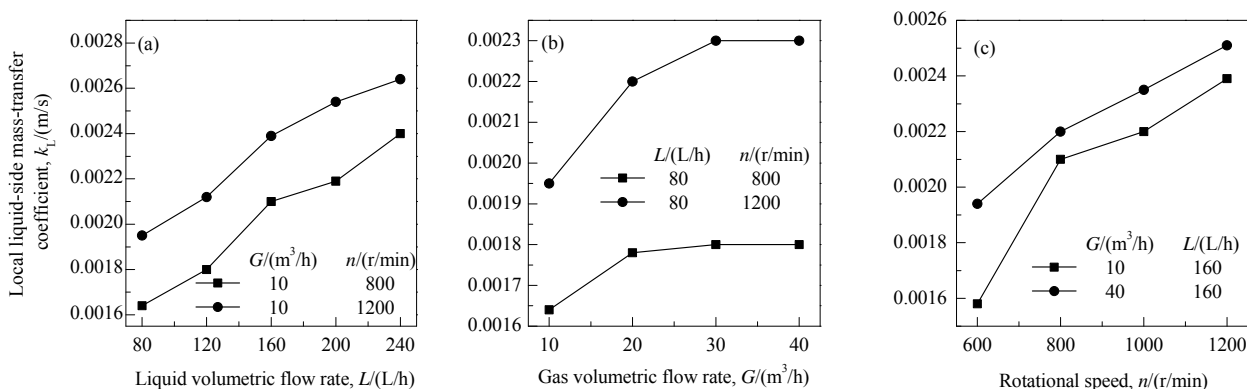


图4 液体流量、气体流量和转速对新型复合转子旋转床转子的液相传质系数的影响

Fig.4 Effects of liquid volumetric flow rate, gas volumetric flow rate and rotational speed on local liquid-side mass-transfer coefficient of novel compound rotating zigzag bed rotor

4.2 新型复合转子旋转床与其他旋转床的比较

新型复合转子旋转床转子的气液有效比表面积(a_e)、液相传质系数(k_L)和液相体积传质系数($k_L a_e$)与其它旋转床的比较见图 5, 图中的操作条件见表 1。 由如图 5(a) 可知, 在相同操作条件下, 新型复合转子旋转床转子的 a_e 是折流式旋转床的 1.07~2.59 倍, 这是因为新型复合转子旋转床的静止分布器和旋转支撑圈导致的端效应及新型复合转子内层的波纹碟片层对液体雾化效果极

好, 从而极大地提高了 a_e 。 液体流量对旋转床比表面积影响大, 而气体流量对比表面积影响小。 喷淋密度 $q_L=4.944 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的新型复合转子旋转床的 a_e 小于喷淋密度 $q_L=6.529 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的装有叶片的旋转填料床^[21], 喷淋密度 $9.887 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的新型复合转子旋转床的 a_e 大于喷淋密度 $q_L=6.529 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的传统旋转填料床^[21], 新型复合转子旋转床转子的 a_e 与装有叶片的旋转填料床和传统旋转填料床接近。

由图 5(b)可知,在相同操作条件下,新型复合旋转床转子的 k_L 是折流式旋转床转子区 81.8%~92.3%,这是因为液体通过相同径向距离时,经过波纹碟片的时间比经过动静折流圈的时间短.液体在转子中停留时间短导致离开转子外缘的 CO_3^{2-} 浓度变小, CO_2 进入液相的传质速率变小,液相传质系数变小.装有叶片的旋转填料床和传统旋转填料床的 k_L 小于新型复合转子旋转床,是因为装有叶片的旋转填料床和传统旋转填料床的液相停留时间短.

由图 5(c)可知,在相同操作条件下,新型复合转子

旋转床转子的液相体积传质系数 k_La_e 是折流式旋转床的 1.04~2.32 倍.这表明新型复合转子旋转床综合传质性能优于折流式旋转床,尤其在液体流量较大时新型复合转子旋转床传质性能更优,但在液体流量较低时无明显优势,因为新型复合转子旋转床转子的 a_e 随液体流量增加急剧增大,折流式旋转床转子的 a_e 随液量增加而缓慢增加;新型复合转子旋转床转子和折流式旋转床转子的 k_L 随液体流量增加而增大幅度接近.新型复合转子旋转床转子的 k_La_e 大于装有叶片的旋转填料床和传统旋转填料床^[21].

表 1 图 5 中的具体操作条件
Table 1 Specific operation conditions in Fig.5

Operation condition	Higee device	Liquid spray density, $q_L/[\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})]$	Superficial gas velocity, $u_G/(\text{m/s})$
1	Novel compound rotating zigzag bed	4.944	0.172
2	Novel compound rotating zigzag bed	9.887	0.172
3	Novel compound rotating zigzag bed	9.887	0.687
4	Rotating zigzag bed	4.944	0.172
5	Rotating zigzag bed	9.887	0.172
6	Rotating zigzag bed equipped with blades in the packing section	6.529	0.109
7	Conventional rotating zigzag bed	6.529	0.109

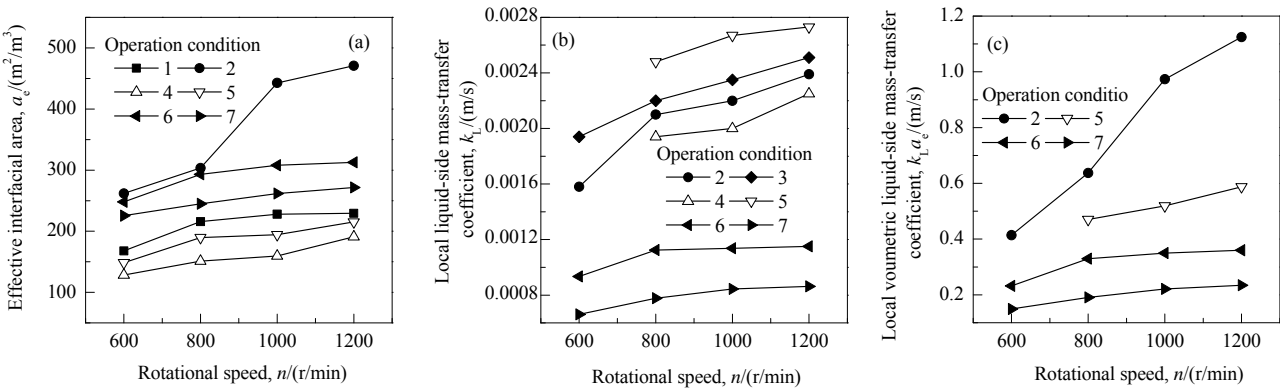


图 5 新型复合转子旋转床转子的有效比表面积、液相传质系数和液相体积传质系数与其它旋转床的比较
Fig.5 Comparison of effective interfacial area, local liquid-side mass-transfer coefficient and local volumetric liquid-side mass-transfer coefficient between novel compound rotating zigzag bed rotor and other rotating bed rotor

5 结 论

通过化学吸收法测定新型复合转子旋转床的气液比表面积及液相传质系数,并与其它旋转床进行比较,得到如下结论:

- (1) 新型复合转子旋转床转子的气液有效比表面积 a_e 随气体流量、液体流量与转速增大而增大,液相传质系数 k_L 随液体流量和转速增大而增大,随气体流量增大略微增大, a_e 可达 $726.81\text{ m}^2/\text{m}^3$, k_L 可达 0.00264 m/s .
- (2) 新型复合转子的碟片层受益于自身结构的优越性和端效应,对液体雾化效果极好,有利于增大 a_e 和 k_L .
- (3) 在相同操作条件下,新型复合转子旋转床转子

的 k_L 小于折流式旋转床,但大于装有叶片的旋转填料床和传统旋转填料床.新型复合转子旋转床转子的 a_e 远大于折流式旋转床,与装有叶片的旋转填料床和传统旋转填料床接近.新型复合转子旋转床转子的液相体积传质系数(k_La_e)高于折流式旋转床、装有叶片的旋转填料床和传统旋转填料床.

参考文献

[1] Rao D P, Bhowal A, Goswami P S. Process intensification in rotating packed beds (HIGEE): an appraisal [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2004, 43(4): 1150–1162.
[2] Agarwal L, Pavani V, Rao D P, et al. Process intensification in HiGee absorption and distillation: design procedure and applications [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2010, 49(20): 10046–10058.
[3] And T K, Fair J R. Distillation studies in a high-gravity contactor [J].

- Ind. Eng. Chem. Res., 1996, 35(12): 4646–4655.
- [4] Lin C C. Distillation in a rotating packed bed [J]. J. Chem. Eng. Jpn., 2002, 35(12): 1298–1304.
- [5] And C C L, Liu H S. Absorption in a centrifugal field: basic dye adsorption by activated carbon [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1999, 16(1): 161–167.
- [6] Lin C C, Chen Y S, Liu H S. Absorption of dodecane from water in a rotating packed bed [J]. J. Chin. Inst. Chem. Eng., 2004, 35(5): 531–538.
- [7] Tan C S, Lee P L. Supercritical CO₂ desorption of activated carbon loaded with 2,2,3,3-tetrafluoro-1-propanol in a rotating packed bed [J]. Environ. Sci. Technol., 2008, 42(6): 2150–2154.
- [8] Chen J F, Wang Y H, Guo F, et al. Synthesis of nanoparticles with novel technology: high-gravity reactive precipitation [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2000, 39(4): 948–954.
- [9] Chen Y S, Tai C, Chang M H, et al. Characteristics of micromixing in a rotating packed bed [J]. J. Chin. Inst. Chem. Eng., 2006, 37(1): 63–69.
- [10] Yang K, Chu G, Zou H, et al. Determination of the effective interfacial area in rotating packed bed [J]. Chem. Eng. J., 2011, 168(3): 1377–1382.
- [11] 高亚洁, 袁志国, 刘有智, 等. 分层填料错流超重力装置传质性能 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(1): 47–51.
- Gao Y J, Yuan Z G, Liu Y Z, et al. Mass transfer performance of layered packing cross-flow rotating packed bed [J]. Chin. J. Process Eng., 2017, 17(1): 47–51.
- [12] Zheng C, Guo K, Feng Y D, et al. Pressure drop of centripetal gas flow through rotating beds [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2000, 39(3): 829–834.
- [13] 陈昭琼, 童志权. 螺旋型旋转吸收器(II)烟气脱硫传质系数 [J]. 化工学报, 1996, 47(6): 758–762.
- Chen Z Q, Tong Z Q. Helical rotating absorber (II) mass transfer coefficients of flue gas desulphurization [J]. CIESC Journal, 1996, 47(6): 758–762.
- [14] 郭成峰, 王广全, 高升, 等. 新型折流式超重力旋转床传质性能的研究 [J]. 石油化工, 2013, 42(1): 47–52.
- Guo C F, Wang G Q, Gao S, et al. Mass transfer performance of a novel higee rotating zigzag bed [J]. Petrochemical Technology, 2013, 42(1): 47–52.
- [15] Sung W D, Chen Y S. Characteristics of a rotating packed bed equipped with blade packings and baffles [J]. Sep. Purif. Technol., 2012, 93: 52–58.
- [16] 陈海辉, 简弃非, 邓先和. 化学吸收法测定旋转填料床有效相界面面积 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1999, 27(7): 32–38.
- Chen H H, Jian Q F, Deng X H. The Measurement of effective gas–liquid in interfacial area of rotating bed by chemical absorption method [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 1999, 27(7): 32–38.
- [17] Rajan S, Kumar M, Ansari M J, et al. Limiting gas liquid flows and mass transfer in a novel rotating packed bed (HiGee) [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2010, 50(2): 986–997.
- [18] 姚远, 郭镭, 肖占敏, 等. 旋转填料床内有效传质比表面积的测定与验证实验研究 [J]. 现代化工, 2013, 33(6): 130–133.
- Yao Y, Guo K, Xiao Z M, et al. Measurement and verification of gas–liquid interfacial area in rotating packed beds [J]. Modern Chemical Industry, 2013, 33(6): 130–133.
- [19] Tsai C Y, Chen Y S. Effective interfacial area and liquid-side mass transfer coefficients in a rotating bed equipped with baffles [J]. Sep. Purif. Technol., 2015, 144: 139–145.
- [20] Li Y M, Lu Y S, Liu X J, et al. Mass-transfer characteristics in a rotating zigzag bed as a higee device [J]. Sep. Purif. Technol., 2017, 186: 156–165.
- [21] Luo Y, Chu G W, Zou H K, et al. Mass transfer studies in a rotating packed bed with novel rotors: chemisorption of CO₂ [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2012, 51(26): 9164–9172.