

Mass transfer performance of methanol absorption in layered packing cross-flow rotating beds

Jie DU, Zhiguo YUAN*, Pengfei LIANG, Shanshan DUAN, Hangtian LI

Shanxi Province Key Laboratory of Hige-oriented Chemical Engineering, North University of China, Research Center of Shanxi Province for High Gravity Chemical Engineering and Technology, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract: The methanol was adsorpted by water via the layered packing cross-flow rotating bed. The effects of operating parameters such as high gravitational factor (β), empty bed gas velocity (u), liquid spray density (q) and inlet methanol concentration on the overall volumetric gas-phase transfer coefficient (K_Ga) of methanol were explored. The results indicated that K_Ga increased with the increases of β , u and q , but the inlet methanol concentrations had a negligible effect on the K_Ga of methanol. Under the conditions of $\beta=100$, $u=0.9$ m/s, $q=17.6$ m³/(m²·h), the inlet concentration of methanol was 14000 mg/m³, the absorptivity of methanol on rate was 97%, the K_Ga values of methanol reached 27 s⁻¹, which was 1.1~3.9 times of the countercurrent-flow rotating packed bed with blade packing, 2~7.7 times of the cross-flow rotating packed bed with blade packing. It showed that the device can effectively reduce the mass transfer resistance of gas film control. When the inlet concentration of methanol gas was stable, high u and low q , β value had great influence on the K_Ga of methanol. The mass transfer efficiency in the process of methanol absorption was effectively enhanced. The empty bed gas velocity of this equipment reached 1 m/s, which was 3~12 times of the countercurrent-flow rotating packed bed with blade packing.

Key words: high gravity; layered packing cross-flow rotating bed; absorption; mass transfer; methanol

收稿: 2017-11-15, 修回: 2018-03-05, 网络发表: 2018-07-16, Received: 2017-11-15, Revised: 2018-03-05, Published online: 2018-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 21376229); 国家重点研发计划资助项目(编号: 2016YFC0204103); 山西省科技攻关项目(编号: 2015031019-5)

作者简介: 杜杰(1991-), 男, 山西省吕梁市人, 硕士研究生, 研究方向为超重力化工过程强化, E-mail: dujie1881@163.com; 袁志国, 通讯联系人, E-mail: ncityzg@163.com.

引用格式: 杜杰, 袁志国, 梁鹏飞, 等. 分层填料错流旋转床吸收甲醇气体的传质性能. 过程工程学报, 2018, 18(5): 965-971.
Du J, Yuan Z G, Liang P F, et al. Mass transfer performance of methanol adsorption in layered packing cross-flow rotating beds (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(5): 965-971, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217396.

分层填料错流旋转床吸收甲醇气体的传质性能

杜杰, 袁志国*, 梁鹏飞, 段珊珊, 李航天

中北大学超重力化工过程山西省重点实验室, 山西省超重力化工工程技术研究中心, 山西 太原 030051

摘要: 在分层填料错流旋转床中用水吸收挥发性有机物甲醇气体, 研究了超重力因子(β)、空床气速(u)、液体喷淋密度(q)和甲醇气体进口浓度等操作参数对甲醇气相总体积传质系数 K_Ga 的影响。结果表明, 甲醇气体的 K_Ga 值随 β 、 u 和 q 增加而增加, 随甲醇气体进口浓度增大变化较小。在 $\beta=100$, $u=0.9$ m/s, $q=17.6$ m³/(m²·h) 和甲醇气体进口浓度 14000 mg/m³ 时, 甲醇气体的吸收率为 97%, K_Ga 达 27 s⁻¹ 以上, 是挡板填料逆流旋转床的 1.1~3.9 倍, 是挡板填料错流旋转床的 2~7.7 倍, 表明分层填料错流旋转床可有效减小气膜控制为主的传质阻力。当甲醇气体入口浓度稳定时, 在 u 大、 q 小的情况下, β 对甲醇气体的 K_Ga 影响较大, 有效强化了吸收甲醇过程中的传质效率。分层填料错流旋转床中 u 达 1 m/s, 是挡板填料错流旋转床中的 3~12 倍。

关键词: 超重力; 分层填料旋转床; 吸收; 传质; 甲醇

中图分类号: TF821

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)05-0965-07

1 前言

挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)指熔点低于室温而沸点在 50~260 °C、具有挥发性的有机化合物, 工业 VOCs 废气挥发到大气中不仅危害人体健康, 部分有机废气还会形成光化学烟雾, 造成大气污染, 对空气质量破坏严重^[1,2]。近年来, 许多学者对去除 VOCs 进行了研究, 包括燃烧^[3-6]、吸收^[7,8]、膜分离^[9]、吸附^[10]和生物降解^[11]等, 其中吸收法具有处理速度快、操作安全、经济可行等特点, 是处理 VOCs 最有效的方法之一。传统设备处理 VOCs 时气液传质效果较差, 设备体积庞大, 建造及维护成本高。

旋转填料床(Rotating Packed Bed, RPB)^[12]能有效强化吸收和蒸馏的气液传质。近年来, 不少学者^[13-16]研究了不同结构的 RPB 的传质性能, 但多集中于强化液膜控制为主的传质过程, 对气膜控制为主的 VOCs 传质过程研究较少。And 等^[17]采用散装 RPB 吸收异丙醇和丙酮等 VOCs, RPB 中的离心力可强化吸收 VOCs 的传质过程。Lin 等^[18,19]在挡板填料旋转床中吸收甲醇、丙酮、异丙醇等, 甲醇吸收率最高为 89.8%, 气相总体积传质系数为 6.16 s⁻¹。RPB 可强化吸收 VOCs 的传质过程, 但对气膜控制为主的 VOCs 吸收过程强化效果不显著, 在挡板 RPB 中气体与填料和液体间的相对滑移速度较低, 气体以整体形式随填料转动^[20-22], 填料对气体的剪切程度较低, 对气膜控制的 VOCs 处理效果有待进一步提高。挡板填料旋转床中气液以逆流方式接触, 处理大量气体所需径向尺寸较大, 不利于工业化放大。基于强化气相剪切、增大气体与填料和液体间相对滑移速度和减小填料层径向尺寸的思路研制的分层填料错流旋转床将填料分为 3 层, 上下两层为转子填料, 中间一层为定子填

料, 相对于单层旋转填料床, 气体受到多级填料的剪切而重新分布, 与液体接触面积更大, 加快了气液界面更新速率, 可强化气相传质; 气体与液体以错流方式接触, 可有效减小转子径向尺寸, 适用于大气量场合^[23,24]。

本研究用水吸收甲醇气体, 研究了以甲醇为代表的 VOCs 的传质性能, 考察了超重力因子(β)、空床气速(u)、液体喷淋密度(q)和甲醇气体进口浓度等操作参数对甲醇气相总体积传质系数(K_Ga)的影响, 用拟合公式量化操作参数对 K_Ga 的影响, 以期研究以气膜控制为主的传质性能, 为进一步优化设备结构、提高传质效率提供理论依据, 开发适合处理 VOCs 的超重力设备。

2 实验

2.1 试剂与填料

甲醇(气体 $\geq 99.5\%$, 天津市科密欧化学试剂有限公司), 水。

分层填料错流旋转床外壳直径 108 mm, 高 180 mm, 填料为鲍尔环填料聚丙烯塑料, 有通量大、阻力小、分离效率高、操作弹性大等特点^[25], 其特性参数见表 1。

2.2 实验流程

实验装置如图 1 所示。钢瓶中氮气减压通过转子流量计后, 以适宜速度由鼓泡法夹带甲醇气体经过气体缓冲瓶, 与风机中的空气混合得到适宜的甲醇气体, 经过涡街流量计从气体进口进入分层填料错流旋转床。气体先被下层转子高速剪切后螺旋上升, 受到中间定子填料阻滞, 气体与填料间的相对滑移速度增大, 气体湍动程度进一步提高, 被上层转子填料再次高速剪切后经除雾器处理后从气体出口排出。储液槽中的吸收液水经液泵增压后进入填料床的液体分布器, 分布后进入填料床内边缘, 受离心力作用甩到填料床内壁后因重力作用从

液体出口排出。

表 1 填料的特性参数
Table1 Characteristic parameters of packings

Layer	Inner diameter/mm	Outer diameter/mm	Axial length/mm	Bed porosity	Specific surface area/(m ² /m ³)
First	15	93	Z ₁ =60	91	213
Second	15	100	Z ₂ =30	91	213
Third	15	93	Z ₃ =60	91	213

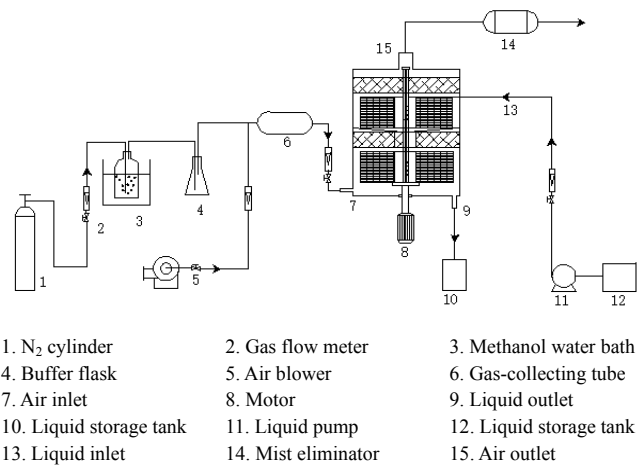


图 1 实验装置图
Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.3 检测与表征

2.3.1 甲醇气体浓度检测

进出口混合气中甲醇气体浓度采用 7890B 型气相色谱仪(美国 Agilent 公司)分析, FID 检测器, 色谱柱为 CP-Lowox 毛细管色谱柱(Φ0.53 mm×10 m). 进样口气化温度 250℃, 载气(N₂)流量 10 mL/min. 柱温采用程序升温, 100℃下保持 2 min, 以 15℃/min 的速率升温至 200℃保持 6 min. 检测器温度 250℃, H₂ 流量 40 mL/min, 空气流量 450 mL/min, 尾吹气(N₂)流量 20 mL/min, 分流比 10:1.

2.3.2 气相总体积传质系数

水吸收甲醇气体属气膜控制过程, 采用气相总体积传质系数 K_Ga 表征分层填料错流超重力装置的传质性能. 取旋转填料床内径 r 、厚度 dr 、高 z_b 的体积微元, C_G^* 为液体平衡浓度, 由反应物甲醇的物料衡算可得:

$$Q_G dC_G = K_G a (C_G - C_G^*) 2\pi r z_b dr, \tag{1}$$

其中, K_G 为气相总传质系数[kmol/(m²·s·Pa)], a 为气液有效接触面积(m²/m³), Q_G 是气体流量(m³/s), C_G 为进口气体浓度(mg/m³).

由质量守恒定律可得, 微元内单位时间气相中溶质减少量等于液相中溶质增加量, 当相界面上气液两相平衡时, 甲醇在相界面的浓度 $C_{L,i}=0$, 即:

$$Q_G (C_G - C_{G,o}) = Q_L (C_L - C_{L,i}) = Q_L (C_G^* / H - 0), \tag{2}$$

$$C_G^* = (C_G - C_{G,o}) / A, \tag{3}$$

其中, $C_{G,o}$ 为甲醇气体出口浓度(mg/m³), C_L 为液体中溶质浓度(mol/m³), Q_L 是液体流量(m³/s), H 为甲醇气体在 25℃ 下的亨利系数, A 为吸收因子.

$$A = Q_L / (H Q_G). \tag{4}$$

将式(3)代入式(2), 并积分^[26]可得:

$$K_G a = \frac{Q_G}{\pi (R_0^2 - R_i^2) Z_b} \frac{\ln \left[(1 - A^{-1}) \left(\frac{C_{G,i}}{C_{G,o}} \right) + A^{-1} \right]}{(1 - A^{-1})}, \tag{5}$$

其中, $C_{G,i}$ 和 $C_{G,o}$ 分别是甲醇气体进口和出口浓度(mg/m³), Z_b 为填料层高度(m), R_i 和 R_o 分别是填料内径和外径(m). 甲醇在 25℃ 下的亨利系数为 1.95×10^{-4} ^[27]. $Z_b = Z_1 + Z_3$, Z_1 和 Z_3 为第一和第三层填料的高度. 甲醇吸收实验环境温度为(25±1)℃, 压力为常压.

3 结果与讨论

3.1 超重力因子β对 K_Ga 的影响

超重力场强度用超重力因子β^[28]表征. 甲醇气体入口浓度 14000 mg/m³, 吸收液为水时β对甲醇 K_Ga 的影响如图 2 所示. 由图可知, K_Ga 随β增大而增大. β增大, 液体所受离心力增大, 液体被高速旋转的填料快速切割为细小的液丝、液滴和液膜, 增大了气液有效接触面积, 液体与气体高速碰撞, 提高了气液湍动程度, 气液表面更新速率加快. 进口甲醇气体先受到最下层高速旋转的填料剪切后螺旋上升, 通过中间静止填料后, 气体沿径向旋转的趋势被消除或减弱, 重新分布的气体向上通过上层高速旋转的填料再次受到高速剪切. 相对单层转子的 RPB, 气体被多级填料剪切后多次重新分布, 有效减小了气相侧传质阻力, 传质系数明显增大. 图 2(b)中, 在β=100, $u=0.9$ m/s, $q=17.6$ m³/(m²·h)时, K_Ga 达 27 s⁻¹ 以上, 为普通 RPB^[23]的 1.7~3.8 倍.

由图 2 可知, 甲醇的 K_Ga 与β^x成正比, 即 $K_Ga \propto \beta^x$, x 由 Origin8.3 软件中的非线性回归方程计算得到.

x 随操作条件的变化如表 2 所示. 相同风速下甲醇

气体在 $q=7.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时的 x 比 $q=17.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时大, 表明 q 较小时 β 对甲醇的 K_{Ga} 影响更显著. 当 $q=17.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时, 甲醇的 x 在 $u=0.9 \text{ m/s}$ 时比 $u=0.3 \text{ m/s}$ 时大, 且在 $q=7.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时更明显, 表明用分层填料错流旋

转床吸收甲醇气体过程中, u 较大时, 改变 β 对 K_{Ga} 影响更大. 对于吸收 VOCs 气体的过程, 增大 u 和减小 q 时, β 对传质效果的影响更大.

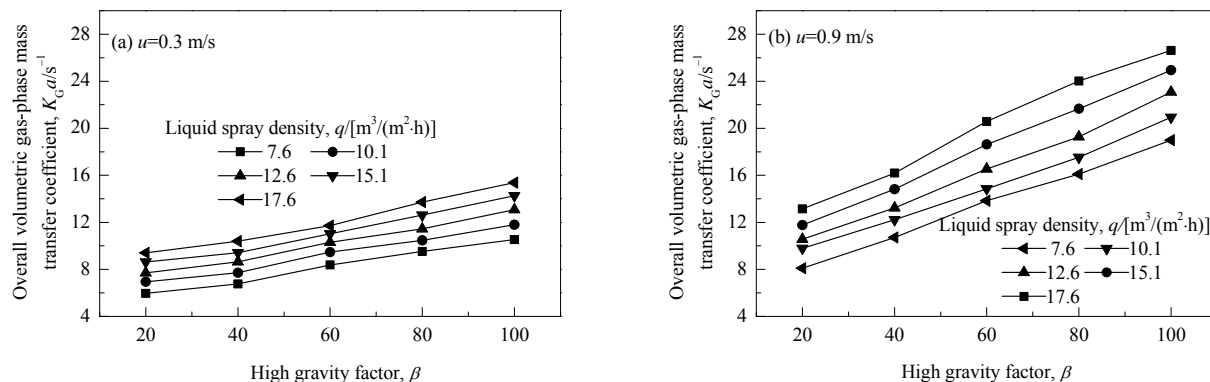


图2 超重力因子(β)对 K_{Ga} 的影响
Fig.2 Effect of high gravity factor (β) on K_{Ga}

表2 x 随操作条件的变化

Table 2 Variation of x with operating conditions

Liquid spray density, $q/[\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})]$	Gas velocity, $u/(\text{m/s})$	x
7.6	0.3	0.41
7.6	0.9	0.56
17.6	0.3	0.32
17.6	0.9	0.45

3.2 空床气速对 K_{Ga} 的影响

甲醇气体浓度 14000 mg/m^3 、吸收液为水的条件下, 空床气速 u 对甲醇 K_{Ga} 的影响如图3所示. 由图可知, 甲醇气体的 K_{Ga} 随 u 增大而增大, 增加的定子填料提高

了气相的切向滑移速度, 促进气液边界层分离, 气体湍动程度加剧, 加快了气液界面更新速率, 减小了气液边界层厚度, 导致传质阻力减小, 强化了气相传质^[18,25]. 当 $q=7.6$ 和 $17.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, $u<0.7 \text{ m/s}$ 时, 甲醇气体 K_{Ga} 随 u 增大明显增大. u 增大时, 气体湍动程度增加, 气膜厚度减小, 传质阻力减小, 强化了气液传质效果, 因此 K_{Ga} 明显增加. $u>0.7 \text{ m/s}$ 时, 气速增大, 气液接触时间缩短, 气液接触不充分, 接触时间对传质效果占主导作用, K_{Ga} 增长趋势放缓.

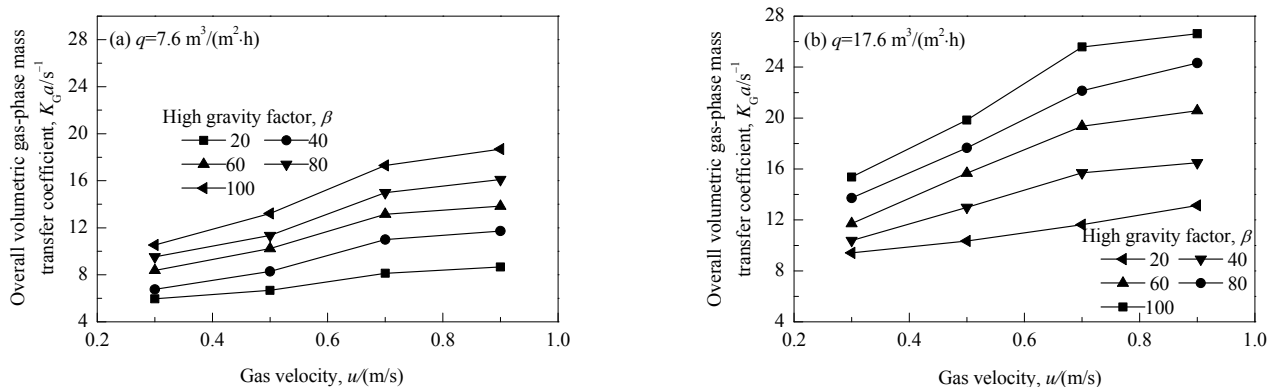


图3 空床气速(u)对 K_{Ga} 的影响
Fig.3 Effect of gas velocities (u) on K_{Ga}

由图3可知, 甲醇的 K_{Ga} 与 u^y 成正比, 即 $K_{Ga} \propto u^y$, y 由非线性回归公式计算得到.

y 随操作条件的变化见表3, q 相同时甲醇气体在 $\beta=100$ 时的 y 比 $\beta=20$ 时高, 表明高 β 时 u 对甲醇气体 K_{Ga} 的影响更大. $\beta=20$ 时, $q=17.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时 y 比 $q=7.6$

$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时高, $\beta=100$ 时更明显, 表明 q 较大时 u 对甲醇 K_{Ga} 影响更大, 提高 β 和 q 时, u 对甲醇气体传质效果影响更大. u 对 K_{Ga} 的影响程度 $y=0.36\sim0.65$, 与挡板旋转填料床吸收 VOCs 的 y 值($0.48\sim0.71$)^[29]接近, 与规整填料旋转床中吸收单一 VOCs 的 y 值($0.62\sim0.77$)^[25]接

近，比散装填料旋转床吸收单一 VOCs 的 y 值(0.32)^[17] 高。

表 3 y 随操作条件的变化
Table 3 Variation of y with operating conditions

Liquid spray density, q [$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]	High gravity factor, β	y
7.6	20	0.36
7.6	100	0.55
17.6	20	0.42
17.6	100	0.65

3.3 液体喷淋密度 q 对 K_{Ga} 的影响

甲醇气体浓度 $14000\text{mg}/\text{m}^3$ 时， q 对甲醇 K_{Ga} 的影响如图 4 所示。由图可知， K_{Ga} 随 q 增大而增大，主要是因为 q 增大，更多液膜分布在填料上，更多液丝和液滴填充在填料的空隙，增大了气液有效传质比表面积和传质推动力^[24]，强化了甲醇气体的吸收， K_{Ga} 增大。 $u=0.9\text{ m/s}$ 时，随 q 增大，甲醇的 K_{Ga} 增加较明显，这是因为气体流量 Q_G 与进口甲醇气体浓度一定时， q 增加，吸收单位气体的液量增大，气液传质推动力增大， K_{Ga} 增加

较快。 $u=0.3\text{ m/s}$ 时 K_{Ga} 随 q 增大缓慢增大，当 $q=12.6\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时，吸收液可吸收大部分甲醇气体， $q>12.6\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时，继续增大 q 很难再吸收更多甲醇气体，因此 K_{Ga} 增加缓慢。对气膜控制的传质过程，当大部分气体溶解于吸收液中时，持续增大 q 对提高气体 K_{Ga} 效果有限。

由图 4 可知，甲醇的 K_{Ga} 与 q^z 成正比，即 $K_{Ga}\propto q^z$ ， z 由非线性回归公式计算得到。

z 随操作条件的变化见表 4，相同气速下甲醇气体在 $\beta=20$ 时的 z 比 $\beta=100$ 时高，表明当 β 较低时， K_{Ga} 受到 q 的影响更大。甲醇气体的 z 在 $u=0.9\text{ m/s}$ 时比 $u=0.3\text{ m/s}$ 时大，表明在 u 较大时， q 对 K_{Ga} 影响更大。通过减小 β 和提高 u ， q 对 VOCs 的吸收产生重要影响。 q 对 K_{Ga} 的影响程度 $z=0.36\sim 0.65$ ，接近挡板旋转填料床吸收单一 VOCs 的范围(0.24~0.67)^[25]，大于规整填料 RPB 吸收单一 VOC 的 z 值(0.34~0.49)^[28]。

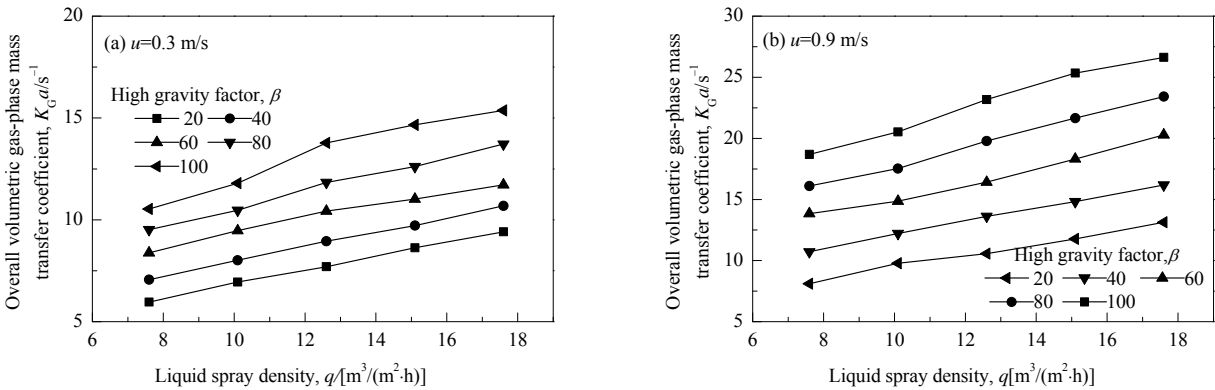


图 4 液体喷淋密度(q)对 K_{Ga} 的影响
Fig.4 Effect of liquid spray densities (q) on K_{Ga}

表 4 z 随操作条件的变化
Table 4 Variation of z with operating conditions

Gas velocity, u (m/s)	High gravity factor, β	z
0.3	20	0.54
0.3	100	0.36
0.9	20	0.65
0.9	100	0.42

3.4 甲醇气体浓度对 K_{Ga} 的影响

在空床气速 $u=0.3$ 和 0.9 m/s 、液体喷淋密度 q 为 7.6 和 $17.6\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、吸收液为水的条件下，甲醇气体进口浓度对甲醇气体 K_{Ga} 值的影响如图 5 所示。由图可知，在相同操作条件下， K_{Ga} 随甲醇气体进口浓度增大无明显变化。 $\beta=60$ ， $u=0.3\text{ m/s}$ ， $q=7.6\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时，甲醇气体入口浓度从 $2800\text{ mg}/\text{m}^3$ 增至 $14000\text{ mg}/\text{m}^3$ ，甲醇气体的 K_{Ga} 从 8.38 s^{-1} 增至 9.07 s^{-1} [图 5(a)]。 $\beta=100$ ， $u=0.9$

m/s ， $q=17.6\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时，甲醇气体入口浓度从 $2800\text{ mg}/\text{m}^3$ 增至 $14000\text{ mg}/\text{m}^3$ ， K_{Ga} 从 26.62 s^{-1} 增至 27.02 s^{-1} [图 5(b)]。在相同操作条件下，甲醇气体进口浓度对甲醇气体的 K_{Ga} 影响较小。

3.5 实验结果与文献对比

不同设备处理 VOCs 的传质性能见表 5。在相近的操作参数下，分层填料错流 RPB 的 K_{Ga} 为挡板填料逆流 RPB 的 1.1~3.9 倍，表明分层填料错流 RPB 可强化 VOCs 吸收过程的传质效果。挡板填料逆流 RPB 为逆流结构，当处理大通量气体时，所需填料径向尺寸较大，给高速转动的填料部件加工制造和安装调试带来诸多不便，能耗和投资增加。分层填料错流 RPB 气液错流接触，可减小填料层径向尺寸，空床气速为挡板填料逆流 RPB 的 4~12 倍，适用气体速度范围宽，不易发生液泛，

表明分层填料错流 RPB 可有效强化吸收 VOCs 传质过程。

在相近的操作参数下，分层填料错流 RPB 的 K_{Ga} 为挡板填料错流 RPB^[31] 的 2~7.7 倍，表明分层填料错流 RPB 独特填料层结构可提高吸收 VOCs 的传质效率，其

液气比为挡板填料错流 RPB 的 1/3，可大幅度降低吸收液循环量，且超重力因子更小，节能降耗显著，空床气速为挡板填料错流 RPB 的 3~10 倍，易于工业化放大。分层填料错流 RPB 在处理 VOCs 方面优势明显。

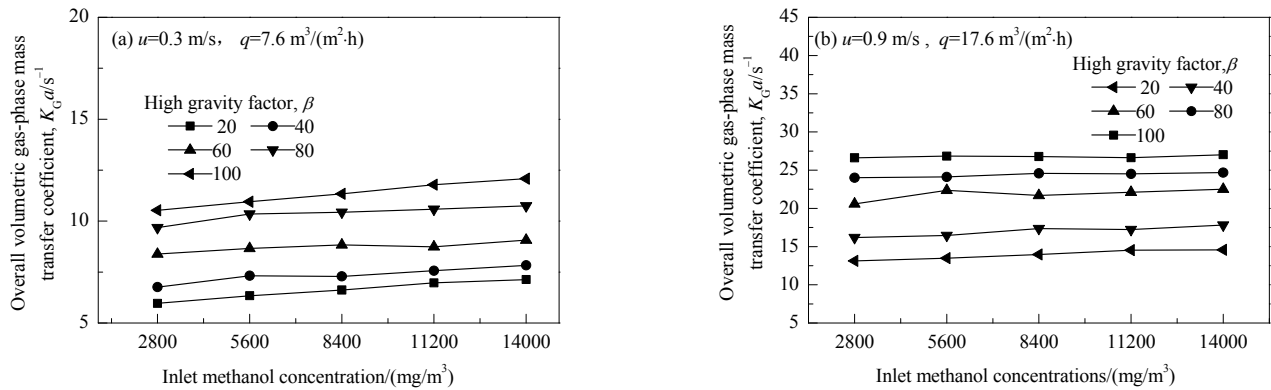


图 5 甲醇气体进口浓度对 K_{Ga} 的影响
Fig.5 Effect of inlet methanol concentration on K_{Ga}

表 5 不同设备处理 VOCs 时传质性能的比较
Table5 Comparison of mass transfer performance for teratment of VOCs with different devices

Device	Gas velocity, u /(m/s)	Ratio of liquid to gas/(L/m ³)	High gravity factor, β	Overall volumetric gas-phase mass transfer coefficient, K_{Ga} /s ⁻¹
Countercurrent-RPB	0.01~0.07	3~13	16.4~148	2.89~6.81
Cross-RPB	0.04~0.09	7.5~26.2	36.7~114	1.5~3.5
Layer packing cross-RPB	0.3~1	2.4~5.6	20~100	3.08~27

4 结 论

采用分层填料错流旋转床用水吸收甲醇气体，研究了超重力因子(β)、空床气速(u)、液体喷淋密度(q)和甲醇气体进口浓度等操作参数对甲醇气相总体积传质系数 K_{Ga} 的影响，得到如下结论：

(1) K_{Ga} 随 β , u 和 q 增大而增大，随甲醇气体进口浓度增大变化较小. $\beta=20\sim100$, $q=7.6\sim17.6$ m³/(m²·h) 和 $u=0.3\sim0.9$ m/s 的条件下，甲醇吸收率为 40%~97%， $K_{Ga}=5.96\sim27$ s⁻¹.

(2) 在 $\beta=100$, $u=0.9$ m/s 和 $q=17.6$ m³/(m²·h)的条件下，甲醇进口浓度为 14000 mg/m³，甲醇吸收率为 97%， K_{Ga} 达 27 s⁻¹ 以上.

(3) 甲醇入口浓度稳定时，在 u 较大、 q 较小的情况下， β 对甲醇气体的 K_{Ga} 值影响较大； q 和 β 较大时， u 对甲醇气体 K_{Ga} 值的影响较大； β 值较小、 u 较大时， q 对甲醇气体 K_{Ga} 影响较大

(4) 在相近的操作条件下，分层填料错流 RPB 的 K_{Ga} 明显高于挡板填料逆流和错流 RPB，可进一步强化气膜控制的传质过程， u 为挡板填料逆流和错流床的 3~12 倍。

参考文献

[1] 马超, 薛志钢, 李树文, 等. VOCs 排放、污染以及控制对策 [J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(2): 103-109.
Ma C, Xue Z G, Li S W, et al. VOCs emission, pollution and control measures [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(2): 103-109.
[2] 王治民, 孙建薇. 关于 VOC 废气处理技术的相关思考 [J]. 能源与节能, 2014, (5): 97-99.
Wang Z M, Sun J W. Relevant thinking on the VOC gas treatment technology [J]. Energy and Energy Conservation, 2014, (5): 97-99.
[3] Khan F I, Ghoshal A K. Removal of volatile organic compounds from polluted air [J]. J. Loss Prev. Process Ind., 2000, 13(6): 527-545.
[4] 韩晓强, 黄伟. VOC 废气蓄热式热氧化处理方法 [J]. 中国环保产业, 2012, (12): 43-45.
Han X Q, Huang W. Regenerative thermal oxidation treatment process for VOC gas [J]. China Environmental Protection Industry, 2012, (12): 43-45.
[5] 马文娇. 催化燃烧去除挥发性有机化合物的研究进展 [J]. 科技视界, 2014, (32): 48-85.
Ma W J. Research progress of catalytic combustion for removal of volatile organic compounds [J]. Science & Technology Vision, 2014, (32): 48-85.
[6] 徐伟, 张钰靓, 施延君, 等. 钙钛矿型催化剂去除 VOC 的性能研究 [J]. 广东化工, 2011, 38(6): 273-274.
Xu W, Zhang Y L, Shi Y J, et al. Preparation of supported perovskite catalysts and its performance for the catalytic combustion of VOCs

- [J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(6): 273–274.
- [7] Heymes F, Manno-Demoustier P, Charbit F, et al. A new efficient absorption liquid to treat exhaust air loaded with toluene [J]. Chem. Eng. J., 2006, 115(3): 225–231.
- [8] Lalanee F, Malhautier L, Roux J, et al. Absorption of a mixture of volatile organic compounds (VOCs) in aqueous solutions of soluble cutting oil [J]. Bioresour. Technol., 2008, 99(6): 1699–1707.
- [9] Ji W, Hilaly A, Sikdar S K, et al. Optimization of multicomponent pervaporation for removal of volatile organic compounds from water [J]. J. Membr. Sci., 1994, 97(1): 1–19.
- [10] Byeon J H, Park J H, Yoon K Y, et al. Removal of volatile organic compounds by spark generated carbon aerosol particles [J]. Carbon, 2006, 44(10): 2106–2108.
- [11] Daubert I, Lafforgue C C, Fonade C. Feasibility study of a compact process for biological treatment of highly soluble VOCs polluted gaseous effluent [J]. Biotechnol. Progr., 2001, 17(6): 1084–1092.
- [12] Ramshaw C, Mallinson R H. Mass transfer process: US4283255 [P]. 1981–06–20.
- [13] Chandra A, Goswami P S, Rao D P. Characteristics of flow in a rotating packed bed (HIGEE) with split packing [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2005, 44(11): 4051–4060.
- [14] 祁贵生, 刘有智, 王焕, 等. 不同填料错流旋转填料床气液传质特性研究 [J]. 化学工程, 2014, 42(5): 18–22.
Qi G S, Liu Y Z, Wang H, et al. Gas-liquid mass-transfer characteristic in cross-flow rotating packed bed with different packings [J]. Chemical Engineering, 2014, 42(5): 18–22.
- [15] 祁贵生, 焦伟洲, 刘有智, 等. 新型填料结构旋转床传质特性 [J]. 化学反应工程与工艺, 2009, 25(2): 109–115.
Qi G S, Jiao W Z, Liu Y Z, et al. Mass transfer characteristics of a rotating packed bed with new type packings [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2009, 25(2): 109–115.
- [16] 康荣灿, 刘有智, 焦伟洲, 等. 填料结构对错流旋转填料床传质性能的影响 [J]. 青岛科技大学学报, 2007, 28(5): 406–409.
Kang R G, Liu Y Z, Jiao W Z, et al. Effect of different packing structure on mass transfer in a cross-flow rotating packed bed [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2007, 28(5): 406–409.
- [17] And Y, Liu H. Absorption of VOCs in a rotating packed bed [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2002, 41(6): 1583–1588.
- [18] Lin C C, Lin Y C. Mass transfer performance of a rotating packed bed equipped with blade packings in removing methanol and 1-butanol from gaseous streams [J]. Chem. Eng. Process. Process Intensif., 2012, 53(3): 76–81.
- [19] Lin C C, Lin Y C, Chen S C, et al. Evaluation of a rotating packed bed equipped with blade packings for methanol and 1-butanol removal [J]. J. Ind. Eng. Chem., 2010, 16(6): 1033–1039.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Zheng C, Guo K, Yuanding A F et al. Pressure drop of centripetal gas flow through rotating beds [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2000, 39(3): 829–834.
- [23] 中北大学. 一种多级错流旋转填料床传质与反应设备: 201410672155.U [P]. 2014–04–01.
North University of China. The mass transfer and reaction equipment for multistage cross-flow rotating packed bed: 201410672155.U [P]. 2014–04–01.
- [24] 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.
- [25] 张近. 塔填料研究进展 [J]. 化工进展, 1989, 45(6): 9–19.
Zhang J. Research progress of tower packing [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 1989, 45(6): 9–19.
- [26] Lin C C, Chien K S. Mass-transfer performance of rotating packed beds equipped with blade packings in VOCs absorption into water [J]. Sep. Purif. Technol., 2008, 63(1): 138–144.
- [27] Gupta A K, Teja A S, Chai X S, et al. Henry's constants of N-alkanols (methanol through N-hexanol) in water at temperatures between 40°C and 90°C [J]. Fluid Phase Equilib., 2000, 170(2): 183–192.
- [28] 刘有智. 超重力化工过程与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 2–3.
Liu Y Z. Chemical engineering process and technology in high gravity [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 2–3.
- [29] Hsu L J, Lin C C. Binary VOCs absorption in a rotating packed bed with blade packings [J]. J. Environ. Manage., 2012, 98: 175–182.
- [30] Shen K P, Wei T Y, Liu W T, et al. Removal of VOCs from gaseous streams in a high-voidage rotating packed bed [J]. J. Chem. Eng. Jpn., 2004, 37(12): 1471–1477.
- [31] Chen Y S, Hsu Y C, Lin C C, et al. Volatile organic compounds absorption in a cross-flow rotating packed bed [J]. Environ. Sci. Technol., 2008, 42(7): 2631–2636.