

阵列凸起微通道内气液两相传质特性研究

何万媛¹, 陈一字¹, 朱春英¹, 付涛涛¹, 高习群², 马友光¹

(¹天津大学化工学院, 化学工程联合国家重点实验室, 天津 300072;

²辽阳石油化纤公司亿方工业公司, 辽宁 辽阳 111003)

摘要: 研究了阵列凸起微通道内 *N*-甲基二乙醇胺 (MDEA) 吸收 CO₂ 过程的气液两相传质特性。在弹状流型下, 考察了气液两相流量、MDEA 浓度对体积传质系数、CO₂ 吸收效率、压力降以及能量损耗的影响。弹状气泡受到阵列凸起的挤压作用发生形变, 促进了气液两相间的传质。与平滑通道相比, 阵列凸起微通道在实验条件下具有更好 CO₂ 吸收效率。在相同的能量损耗时, 阵列凸起微通道具有更大的体积传质系数。

关键词: 阵列凸起微通道; 气液两相流; 传质; 吸收; CO₂

中图分类号: TQ 021.4

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2023) 02-0690-08

Study on gas-liquid mass transfer characteristics in microchannel with array bulges

HE Wanyuan¹, CHEN Yiyu¹, ZHU Chunying¹, FU Taotao¹, GAO Xiqun², MA Youguang¹

(¹State Key Laboratory of Chemical Engineering, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ²Yifang Industry Corporation, Liaoyang Petrochemical Fiber Company, Liaoyang 111003, Liaoning, China)

Abstract: The gas-liquid two-phase mass transfer characteristics of CO₂ absorption into *N*-methyldiethanolamine (MDEA) aqueous solution in the microchannel with the array bulges were studied. The influences of gas/liquid flow rate and MDEA concentration on the volumetric mass transfer coefficient $k_L a$, CO₂ absorption rate X , pressure drop ΔP and energy consumption ε were studied under slug flow regime. The deformation of slug bubbles due to the squeezing effect of the array bulges promotes the gas-liquid mass transfer efficiency. Compared with non-array bulge microchannel, the array bulge microchannel obviously enhanced CO₂ absorption rate and has larger volumetric mass transfer coefficient for the same energy consumption.

Key words: array bulge microchannel; gas-liquid two-phase flow; mass transfer; absorption; CO₂

引言

随着经济和环境压力的增加, 化工行业迫切要求高效、安全、环境友好的化工生产新工艺, 这为微化工技术的发展提供了机遇^[1-2]。微化工技术因其

具有良好的热/质传递效率、操作方便、反应时间短、灵敏度高、能耗低、安全性高、可控性强、集成度高等特点^[3], 显示了巨大的应用潜力^[4-5]。

尽管微反应器作为有潜力的新技术具有很多优势, 但微通道的低处理量限制了微反应器的应

收稿日期: 2022-07-28 修回日期: 2022-10-27

通信作者: 马友光(1964—), 男, 教授, yigma@tju.edu.cn

第一作者: 何万媛(1997—), 女, 硕士研究生, wanyuanhe@tju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(21978197, 21776200)

引用本文: 何万媛, 陈一字, 朱春英, 付涛涛, 高习群, 马友光. 阵列凸起微通道内气液两相传质特性研究[J]. 化工学报, 2023, 74(2): 690-697

Citation: HE Wanyuan, CHEN Yiyu, ZHU Chunying, FU Taotao, GAO Xiqun, MA Youguang. Study on gas-liquid mass transfer characteristics in microchannel with array bulges[J]. CIESC Journal, 2023, 74(2): 690-697

用^[6-7]。因此,要实现工业规模生产,必须对微反应器进行有效放大。目前,主要有两种放大方式来增大微通道的处理量:微通道的数量放大策略和通道单维扩张策略^[8-12]。与数量放大相比,单维扩张微通道具有结构简单、有效防止通道堵塞等优点^[13-15]。然而,相较于正方形截面微通道,低深宽比的单维扩张微通道内气泡周围的液膜变薄^[16-18],且内部流场分布不均匀,导致了传质性能的降低^[19-21]。因此,对低深宽比微通道内气液流动与相间传质进行强化十分必要。

近年来,已有众多学者对微通道内气液相间传质的强化进行了研究。Seo等^[22]在电渗驱动混合型微通道中对矩形、三角形和圆形凸起障碍物混合性能的影响进行了数值研究,发现矩形障碍物增强传质的效果最好。Yin等^[23]实验研究了正方形截面微通道中矩形挡板对气液传质的增强作用,发现微通道内加入矩形挡板能够加强气液扰动,促进涡流的形成,增强相间传质速率,传质增强因子最高可达1.5。Yang等^[24]在深宽比为0.5的微通道中设置了与通道高度等高的阵列圆柱体,通过数值模拟的方法对乙醇-氮气以及乙醇-氟化剂的两相流体流动特性进行了研究,并采用渗透模型计算了相间传质系数,结果表明,阵列圆柱体微通道对传质具有显著的增强效果。上述研究表明,在微通道内设置障碍物或者凸起能有效提高相间传质性能。因此,本文针对单维扩张的低深宽比微通道,提出了设置阵列凸起正方体来强化微通道内气液两相间传质性能的方法。采用可视化在线分析法对阵列凸起微通道内气液两相传质性能进行了实验研究,分析了阵列凸起微通道对传质的强化性能及增强机理。

1 实验部分

1.1 微通道芯片

本文使用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为制作设备的材料,此材料具有透光性好、强度大、耐腐蚀等优点。微通道芯片在一块厚8 mm的PMMA板上采用精密仪器进行铣刻加工,并使用另一块3 mm厚的PMMA板通过螺栓密封而成。微通道采用T形错流进样方式,其通道截面尺寸深×宽为0.2 mm×2 mm,在微通道中均匀分布着高度为0.1 mm的长×宽为0.1 mm×0.1 mm正方体凸起,相邻凸起横向距离

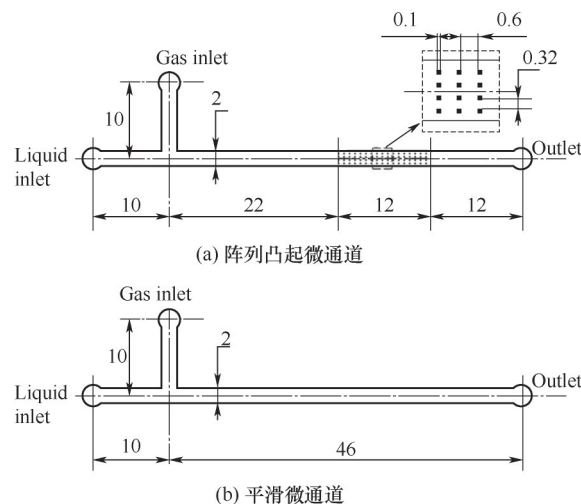


图1 微通道示意图

Fig.1 Schematic diagram of microchannels

表1 MDEA水溶液的物理性质

| MDEA 溶液浓度 <i>c</i> /% | 密度 ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 黏度 μ /($\text{mPa}\cdot\text{s}$) | 表面张力 σ /($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$) |
|--------------------------|---|--|---|
| 10 | 1005.4 | 1.290 | 59.30 |
| 20 | 1015.2 | 1.941 | 55.20 |
| 30 | 1025.0 | 3.092 | 53.00 |

为0.6 mm,纵向距离0.32 mm,每一列4个凸起均匀分布,基于在线分析方法,在阵列凸起区域前后设置空白段用以测量气泡长度的变化。结构如图1所示。表1为实验中所用到的MDEA水溶液的物理参数。

1.2 实验装置与流程

实验装置如图2所示,由两个微量注射泵(Harvard Apparatus, PHD2000, USA, 误差为1%)以恒定的流量将气液两相分别送入微通道的两个进口,气相采用纯 CO_2 气体,液相采用质量分数分别为10%、20%、30%的N-甲基二乙醇胺(MDEA)水溶液(纯度 $\geq 99\%$,上海阿拉丁化学试剂有限公司)。在所有液相中添加质量分数为0.3%的十二烷基硫酸钠(天津科密欧化学试剂有限公司)表面活性剂,用于改善流体与通道壁面间的润湿性,产生稳定的气泡。气液两相在主通道T型口相遇,随后形成气泡进入水平放置的微通道内,最后进入收集瓶中。实验在温度 $T = (298.15 \pm 1)$ K和大气压下进行。气相流量范围为 $40\sim 360 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$,液相流量为 $40, 60, 80, 100 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$ 。采用LED冷光源(LHP-40WP, China Magnolia)提供照明,确保不会产生局部热。微通道的入口压力由压差传感器(Honeywell ST3000, USA)

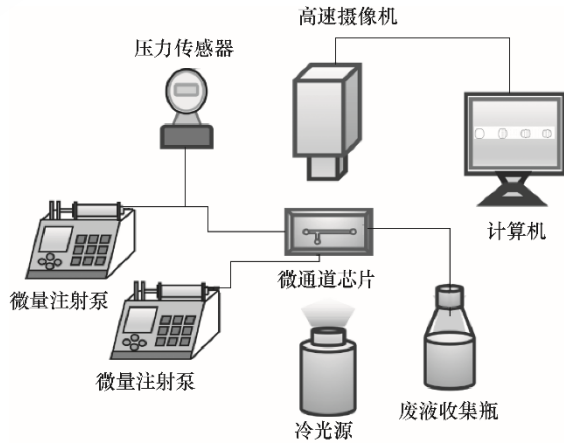


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

测量,出口压力为大气压,压力降测量误差为1%。在流型和压力稳定后,使用高速摄像机(Motion Pro Y-5, USA)观察并记录微通道内气液两相的流动状态和传质过程。气泡的长度可以从高速摄像机记录的图像中获取。

1.3 流型

当微通道内存在障碍物时,气液两相在经过障碍时流体流动会变得更加复杂,在一定的操作条件下,气泡会发生诸如变形、破裂、聚并等现象^[25]。图3为高速摄像机记录的气液两相流动的流型图。在本实验操作范围下共出现了2种流型:弹状流、弹状-泡状流。如图3所示的弹状-泡状流(slug-bubble flow)在30%(质量分数)的MDEA水溶液中出现的频率较高。气泡流过凸起阵列时,会发生明显的形变,进而影响周围的流场及相间传质。

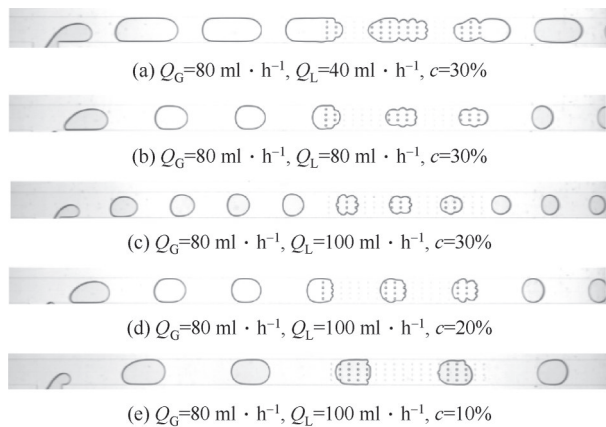


图 3 阵列凸起微通道中 CO₂-MDEA 水溶液的气液两相流型

Fig.3 Gas-liquid two-phase flow regimes of CO₂-MDEA aqueous solution in microchannel with array bulges

1.4 微通道内传质系数的计算

对于气相为纯 CO₂ 气体的吸收过程,气膜阻力可以忽略,传质阻力集中在液相一侧,故传质通量^[26]为

$$N = k_L(C_e - C) \quad (1)$$

式中, k_L 为微通道的总传质系数; C 是液相主体中 CO₂ 的浓度; C_e 是 CO₂ 在溶液中的平衡浓度。由于 CO₂ 与 MDEA 溶液发生快速化学反应,且溶液过量,因此,液相主体中的 CO₂ 的浓度 C 可以视为 0 ($C=0$)。根据亨利定律,平衡浓度 C_e 为

$$C_e = \frac{\bar{P}}{H_{\text{CO}_2 \cdot \text{MDEA}}} \quad (2)$$

式中, \bar{P} 为通道内进出口压力的平均值;亨利系数 $H_{\text{CO}_2 \cdot \text{MDEA}}$ 可通过式(3)进行计算^[27]。

$$H_{\text{CO}_2 \cdot \text{MDEA}} = H_{\text{N}_2\text{O} \cdot \text{MDEA}} \left(\frac{H_{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}}}{H_{\text{N}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (3)$$

其中, $H_{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}}$ 通过式(4)计算^[28]。

$$H_{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 2.8249 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{-2044}{T}\right) \quad (4)$$

$H_{\text{N}_2\text{O} \cdot \text{MDEA}}$ 和 $H_{\text{N}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{O}}$ 通过文献中的数据得到^[29],主通道内平均传质通量 N 还可以写成:

$$N = \frac{Y \Delta n_g}{A_s} \quad (5)$$

式中, Y 为气泡生成频率; A_s 为微通道内总的相界面面积; Δn_g 为单个气泡中 CO₂ 溶解在液相中的量,可通过式(6)计算。

$$\Delta n_g = \frac{P_{\text{in}} V_{\text{in}} - P_{\text{out}} V_{\text{out}}}{RT} \quad (6)$$

式中, P_{in} 和 P_{out} 分别为微通道进出口的压力, P_{in} 由压力表测得, P_{out} 为大气压; V_{in} 为无传质条件下气泡的生成体积; V_{out} 为微通道出口处气泡的体积。

气泡由气泡主体和气泡头尾部的气泡帽组成,气泡帽可以视为半个椭球体,椭球体长轴为 w ,短轴为 h ,并绕着短轴 h 旋转而成。对于角区问题,可以将角区处气液界面看作 1/4 圆,半径 r 近似为 $(2h+2/w)^{-1}$ 。根据 Musterd 等^[30]提出的界面自由能最小化理论模型计算气泡的体积 V 。

$$V = \left[hw - (4 - \pi) \left(\frac{2}{h} + \frac{2}{w} \right)^{-2} \right] \left(L_B - \frac{w}{3} \right) \quad (7)$$

联立上述各式可得传质系数 $k_L a$ 为

$$k_L a = \frac{Y(P_{\text{in}} V_{\text{in}} - P_{\text{out}} V_{\text{out}})}{RT C_e V_M} \quad (8)$$

式中, a 为比表面积, $a = A_s/V_M$ 。

采用 CO₂ 吸收效率 X 评价吸收 CO₂ 的性能。

$$X = \frac{P_{in}V_{in} - P_{out}V_{out}}{P_{in}V_{in}} \times 100\% \quad (9)$$

2 结果与讨论

2.1 体积传质系数

图4显示了不同浓度下气液两相流量对体积传质系数的影响。由图可知,传质系数随着气液两相流量的增大而增大。因为随着气相流量增大,气泡长度增加,气泡表面积持续增大,微通道内部的比表面积不断扩大,为传质提供了更大的气液两相相界面面积,较高的流速也提高了表面更新速率。在较高气液比下,气泡体积变大,通道内液含率相对减小,气泡周围的液膜易于饱和,高气液比下的传质系数增加速率减缓。液相流速的提高会使得气

液两相总流速增大,两相湍动程度增强,气液两相混合程度加剧,也加快了液膜表面更新速率,从而提高了体积传质系数。从图4(a)可以看出,阵列凸起微通道内的体积传质系数高于平滑通道,这证明了阵列凸起微通道的传质强化效果。同时,在较低气速时传质增强效果不显著,这是由于在较低气速下,气泡体积较小,气液两相流动速度慢,微通道内比表面积较小,气泡经过阵列凸起时受到扰动的部分也较少,所以阵列凸起微通道体积传质系数与平滑通道相比优势并不明显。随着气速逐渐增大,气泡逐渐加长的同时比表面积也随之增大,阵列凸起作用于气泡的扰动加剧,局部湍动增强^[31],气液两相表面更新速率加快,随着气液两相速度的增强,阵列凸起强化传质的优势更加明显,这体现在高气液比下,体积传质系数具有更加明显的优势性。从图4(b)可以看出,MDEA浓度的提高对于体积传质系数的影响较为明显,这是因为提高MDEA浓度可以提高溶剂中的CO₂平衡浓度,从而提高CO₂与MDEA化学反应速率,增强传质。此外,在液相MDEA浓度较高时,气泡体积变小,更多的液体通过气泡和通道壁面之间的沟槽流向通道下游,促进了相界面的表面更新,改善了液膜与液弹间的物质交换。然而,随着溶液中MDEA浓度升高,气泡将迅速缩小导致比表面积减小,传质系数增大的速率减慢。由于MDEA水溶液化学吸收CO₂过程的传质速率较快,相较于物理吸收过程^[23],阵列凸起微通道对传质的增强效果相对较弱。

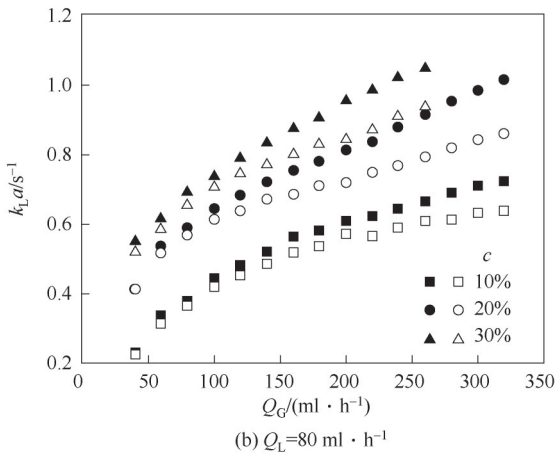
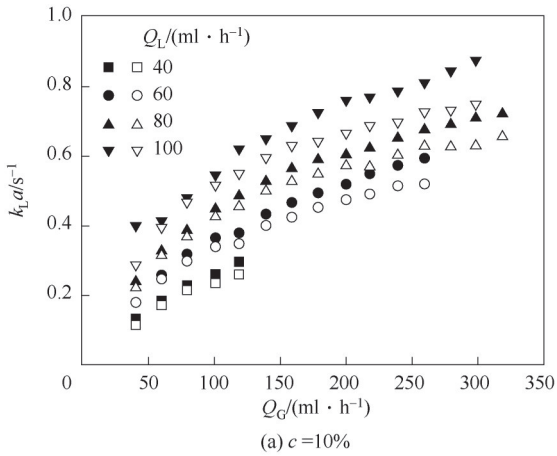


图4 气液相流量和MDEA浓度对液体体积传质系数 $k_L a$ 的影响(实心符号表示阵列凸起的微通道,空心符号表示平滑通道)

Fig.4 Effects of gas and liquid flow rates and MDEA concentration on volumetric mass transfer coefficient $k_L a$ (solid symbols for the microchannel with array bulges, hollow symbols for non-array bulge microchannel)

2.2 CO₂吸收效率

图5显示了不同MDEA浓度下气液两相流量对CO₂吸收效率的影响。由图可知,高MDEA浓度和高液相流量下,CO₂的吸收效率较高,且CO₂的吸收效率随着气相流量的增加而降低。气相流量的增加可导致相界面面积增大,气泡表面更新速率加快,同时液弹内循环也有所加强,这些均对吸收过程具有促进作用。但是,随着气相流量的增大,气泡初始体积显著增大,而在微通道内的停留时间显著变短[图5(c)],导致CO₂的吸收效率下降。由图5(a)可以看出液相流量的增大使得CO₂吸收效率提高。液相流速的提高会使气泡表面更新速率加快,液弹长度相对变长,液膜与液弹的物质交换速率提高,从而降低了液膜的饱和程度,增强了CO₂的吸收。在操作条件下,相对气相流量的变化(40~360 ml·h⁻¹),液相流量的范围为40~100 ml·h⁻¹,液相流量

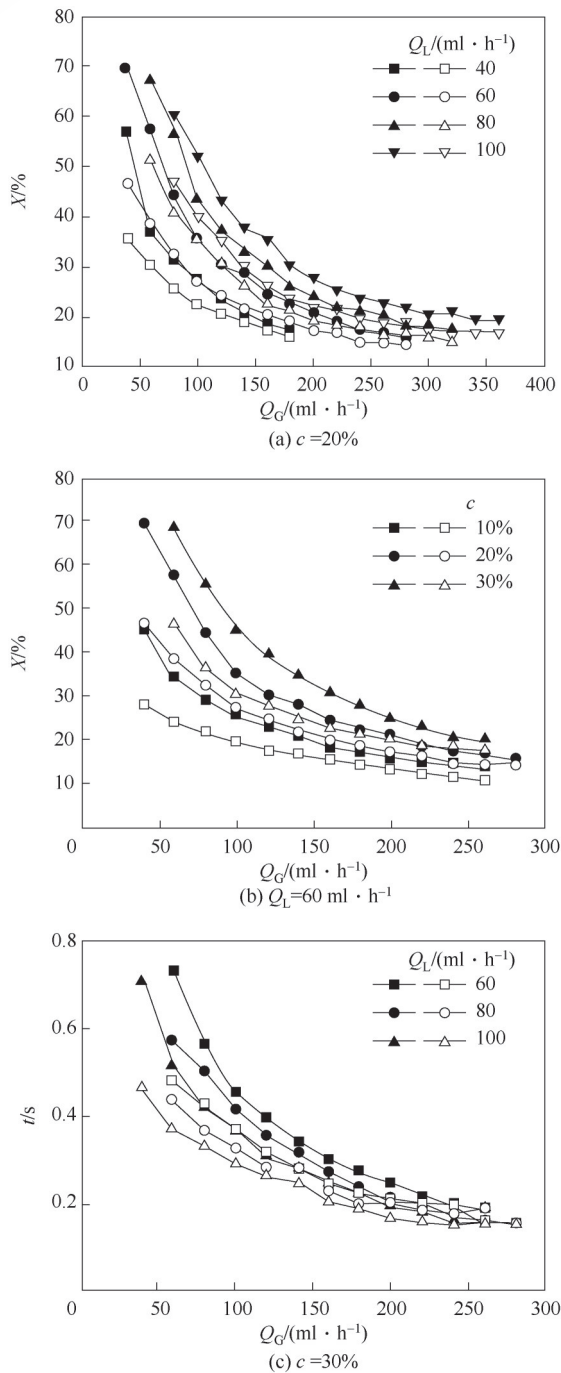


图 5 气液相流量和 MDEA 浓度对 CO_2 吸收效率的影响与气泡停留时间示意图 (实心符号表示阵列凸起的微通道, 空心符号表示平滑通道)

Fig.5 The effect of gas and liquid flow rates and MDEA concentration on CO_2 absorption efficiency and the bubble residence time (solid symbols for the microchannel with array bulges, hollow symbols for non-array bulge microchannel)

对气泡停留时间的影响较弱,因此,尽管吸收时间缩短,但总体 CO_2 吸收效率仍呈现升高的趋势。图 5 (b)表明,随着 MDEA 浓度的提高,相间传质系数增大, CO_2 吸收效率随之升高。此外,从图 5 还可以看

出,相较于平滑通道,阵列凸起微通道在不同条件下均呈现了更高的 CO_2 吸收效率。对应的 CO_2 吸收效率在高液相流量下效果更显著,在高气相流量下强化效果相对较弱。这是因为微通道内的阵列凸起对气液两相流动产生了一定的阻碍作用,延长了气泡在通道内的停留时间。图 5(c)是气泡在阵列凸起微通道与平滑通道的气泡停留时间示意图,可以看出,相比于平滑通道,阵列凸起微通道内气泡运动速度较低,气泡在通道内的停留时间较长,这使得 CO_2 吸收效率更显著地提升。阵列凸起通道在高气相流速下的气泡停留时间与平滑微通道相差不大,对 CO_2 吸收效率产生的影响也较小。

2.3 压力降

使用压力传感器测量微通道进口的压力,出口压力为大气压。以气泡和相邻的液弹所形成的气液单元作为研究对象,水平放置的微通道内部气液两相流压力降主要由液弹与微通道壁面的摩擦压力降、气泡主体与周围液膜间的摩擦压力降、气泡头尾部分 Laplace 压力降组成^[32]。本实验由于微通道内阵列凸起作为障碍来强化气液两相传质,流体流经时会产生一定的压力损失。

由图 6(a)可以看出,气液两相流量的增大均可导致微通道内压力降增大,阵列凸起微通道内的压降总是大于平滑通道内的压降。当气相流量增大时,气泡的生成频率和气液两相相界面接触面积增大,气泡主体部分与液膜之间的摩擦压降增大^[33];气液两相流体运动速度加快,液弹与微通道壁面的摩擦压力降增大。气泡的速度越高,为了克服由于气泡速度增大随之增加的剪切应力^[34],气泡尾部与头部附近的压强差也越大。气泡尾部弧形区域的存在使得液相减速导致的惯性效应也增加了气泡尾部的压降。但随着气泡速度持续增大,气泡个数减少,气泡头尾部的压降、液弹与通道壁面的摩擦压降减小。气相流量很大时,气液两相流型逐渐向弹状-环状流转变,气泡主体表面积增加的趋势减缓,通道内整体压降的增大趋势也减缓。当液相流量增加时,液弹体积、数目都增加,气液两相流体流动速度加快,导致液弹与微通道壁面的摩擦压力降增大。液相流量的增大使得微通道内气泡数目增多,这导致了整个通道内气泡头尾部附近的压降增大。所以液相流量增大,通道内压降增大。

由图6(b)可以看出,当MDEA液相浓度提高时,化学反应速率会加快,气泡体积缩减速率快,气泡长度变小、数量增加,气泡头尾部Laplace压力降增大。而且MDEA浓度增大,液体黏度也会随之增大,液弹与通道壁面之间的摩擦压力降也会增大。此外,MDEA液相浓度增大,气液两相界面上气液膜的浓度差增大,传质速率加快,弧形的气液界面附近会形成旋涡从而增大压降^[23,35]。综上,MDEA液相浓度提高时压降会随之增大。阵列凸起微通道内总压降高于平滑通道,增值在1.5 kPa之内(相对压力降增加率小于30%),这在工业应用中是可接受的。由于阵列凸起微通道会对流体流动产生一定阻碍,增大了压力降。同时,阵列凸起对气泡边缘将产生扰动作用,气液两相流体在经过阵列凸起时会产生局部湍动^[19,36],阵列凸起作为障碍增加了两相流体与微通道壁面之间的摩擦,这使其在增强传

质的同时具有一定的压力损失。

在低深宽比的微通道内加入一系列阵列凸起会促进气泡主体和液膜之间的传质,但由此增大的压降造成了一定的能量损耗 ε 。通道内能量损耗 ε 和压力降 ΔP 、气液相流量、流体密度、通道尺寸等物理量有关^[37]。

$$\varepsilon = \frac{\Delta P(Q_G + Q_L)}{\rho V_M} \quad (10)$$

由图7可得,随着能耗增大,体积传质系数的增长速率均逐渐减缓。相同能量损耗下,无论是相同MDEA溶液浓度还是相同液相流量下,阵列凸起微通道的体积传质系数均大于平滑通道的体积传质系数,并且这种传质的差异随着能耗的增大而增大。这说明阵列凸起微通道在高能耗下对传质的强化更显著。由图7(a)得,相同能量损耗下,液相流量越大,凸起微通道的传质效果越好,

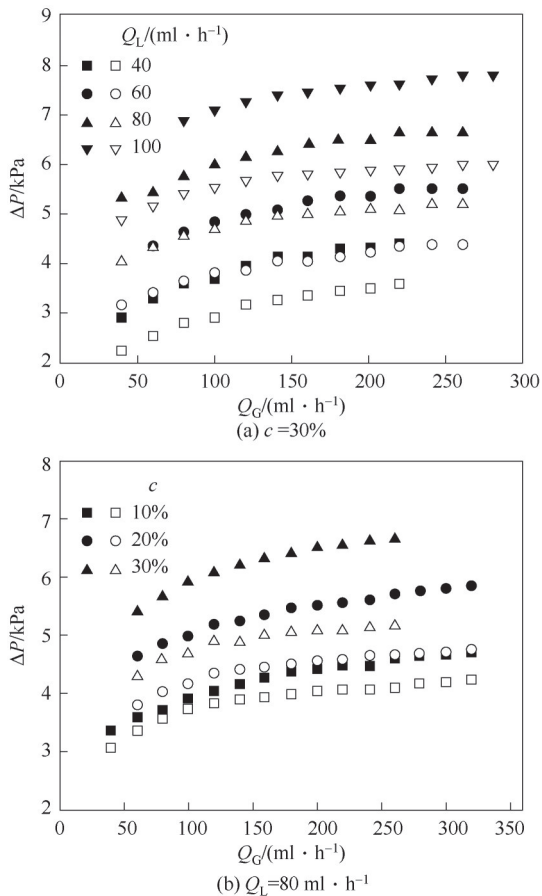


图6 气液相流量和MDEA浓度对压降 ΔP 的影响(实心符号表示阵列凸起的微通道,空心符号表示平滑通道)

Fig.6 Effects of gas and liquid flow rates and MDEA concentration on pressure drop ΔP (solid symbols for the microchannel with array bulges, hollow symbols for non-array bulge microchannel)

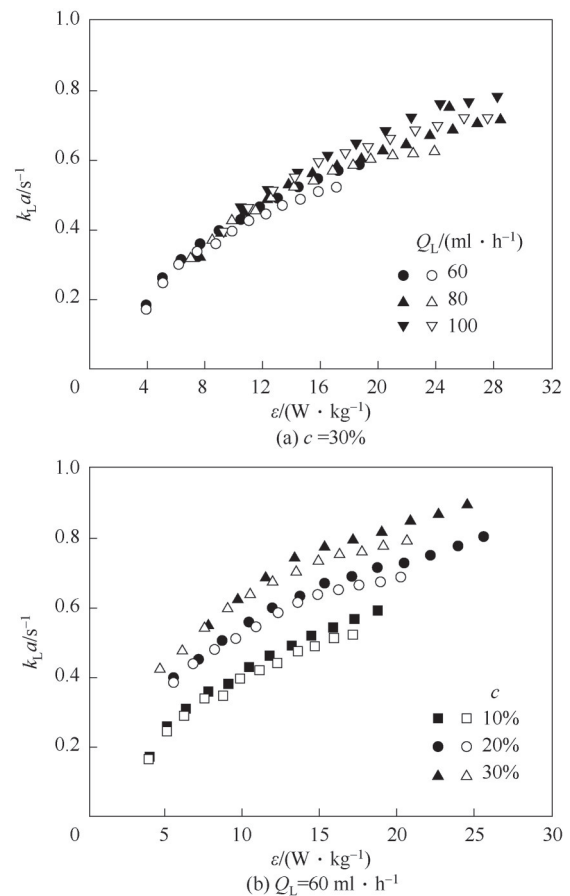


图7 液侧传质系数随能耗变化(实心符号表示阵列凸起的微通道,空心符号表示平滑通道)

Fig.7 Relationship between liquid side volumetric mass transfer coefficient and energy consumption (solid symbols for the microchannel with array bulges, hollow symbols for non-array bulge microchannel)

这主要是因为液相流量增大导致了通道内流体的湍动程度增大,促进了传质。同样地,相同能耗下,MDEA 溶液浓度越大凸起微通道的传质效果也越好[图 7(b)]。

3 结 论

本文研究了深宽比为 0.1 的阵列凸起微通道内 MDEA 水溶液吸收 CO₂ 的气液两相传质特性。阵列凸起微通道显示了优越的传质强化性能,阵列凸起对气泡的挤压作用使得气泡在经过阵列凸起时产生弯曲弧形,弯曲变形发生在气泡头尾部和边缘处,增强了流体扰动和气液两相质量交换,从而强化了传质。体积传质系数 $k_L a$ 随气液两相流量和 MDEA 溶液浓度增大而增大;CO₂ 吸收效率 X 随气相流量增加而减小,随液相流量增大而增大。与平滑通道相比,阵列凸起微通道内压力降 ΔP 增加,其量小于 30%。相同能量损耗 ε 下,阵列凸起微通道的传质系数均比平滑通道大。

符 号 说 明

A_s ——微通道内总的相界面面积, m^2
 a ——比表面积, m^{-1}
 C ——液相主体中 CO₂ 的浓度, $mol \cdot m^{-3}$
 C_e ——CO₂ 在液相中的平衡浓度, $mol \cdot m^{-3}$
 c ——质量分数, %
 H ——亨利系数, $Pa \cdot m^3 \cdot mol^{-1}$
 h ——通道高度, m
 k_L ——液侧传质系数, $m \cdot s^{-1}$
 $k_L a$ ——液侧体积传质系数, s^{-1}
 L_b ——气泡长度, m
 N ——传质通量, $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
 Δn_g ——单个气泡内 CO₂ 溶解在液相中的量, mol
 P ——压力, Pa
 ΔP ——压力降, Pa
 \bar{P} ——平均压强, Pa
 Q ——体积流量, $m^3 \cdot s^{-1}$
 R ——理想气体常数, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
 T ——温度, K
 t ——气泡停留时间, s
 V ——单个气泡的体积, m^3
 V_M ——微通道的体积, m^3
 w ——通道宽度, m
 X ——CO₂ 吸收效率, %
 Y ——频率, Hz
 ε ——能量损耗, $W \cdot kg^{-1}$

下角标

G——气相
in——微通道进口
L——液相
out——微通道出口

参 考 文 献

- [1] Abdollahi S A, Mokhtariyan N, Ameri E. Design of a solar reactor based on porous nanocomposite ceramics for removal of heavy metal ions from wastewater[J]. *Solar Energy*, 2022, **233**: 61–70.
- [2] Dai L, Shan M J, Li J P, et al. Purification and reuse of carbon black wastewater of acetylene production from natural gas by microchannel filtration[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, **162**: 219–229.
- [3] Yao X J, Zhang Y, Du L Y, et al. Review of the applications of microreactors[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **47**: 519–539.
- [4] Pan J, Zhang R, Lu Q B, et al. Experimental study on premixed methane–air catalytic combustion in rectangular micro channel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **117**: 1–7.
- [5] Chau J L H, Leung A Y L, Yeung K L. Zeolite micromembranes [J]. *Lab on a Chip*, 2003, **3**(2): 53.
- [6] Kockmann N, Gottsponer M, Roberge D M. Scale-up concept of single-channel microreactors from process development to industrial production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **167** (2/3): 718–726.
- [7] Adamo A, Beingsner R L, Behnam M, et al. On-demand continuous-flow production of pharmaceuticals in a compact, reconfigurable system[J]. *Science*, 2016, **352**(6281): 61–67.
- [8] Saber M, Commenge J M, Falk L. Microreactor numbering-up in multi-scale networks for industrial-scale applications: impact of flow maldistribution on the reactor performances[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, **65**(1): 372–379.
- [9] Guo R W, Fu T T, Zhu C Y, et al. Flow distribution and mass transfer of gas-liquid flow in parallel microchannels with different tree-shaped distributors: halving-width *versus* constant-width[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, **59**(3): 1327–1335.
- [10] Liu G T, Wang K, Lu Y C, et al. Liquid-liquid microflows and mass transfer performance in slit-like microchannels[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **258**: 34–42.
- [11] Nieves-Remacha M J, Kulkarni A A, Jensen K F. OpenFOAM computational fluid dynamic simulations of single-phase flows in an advanced-flow reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, **54**(30): 7543–7553.
- [12] 王冠球, 林冠屹, 朱春英, 等. 微通道反应器的一维放大及气液传质特性[J]. *化工学报*, 2021, **72**(2): 937–944.
Wang G Q, Lin G Y, Zhu C Y, et al. One-dimensional amplification and gas-liquid mass transfer characteristics of microchannel reactor[J]. *CIESC Journal*, 2021, **72**(2): 937–944.
- [13] Wyss H M, Blair D L, Morris J F, et al. Mechanism for clogging of microchannels[J]. *Physical Review E*, 2007, **74**(6): 061402.
- [14] Aubin J, Prat L, Xuereb C, et al. Effect of microchannel aspect ratio on residence time distributions and the axial dispersion coefficient[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process*

- Intensification, 2009, **48**(1): 554–559.
- [15] Liu Z D, Lu Y C, Wang J W, et al. Mixing characterization and scaling-up analysis of asymmetrical T-shaped micromixer: experiment and CFD simulation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **181/182**: 597–606.
- [16] Choi C W, Yu D I, Kim M H. Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios(part II): Bubble behaviors and pressure drop in single bubble[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, **53**(23/24): 5242–5249.
- [17] Hong S H, Tang Y L, Wang S F. Investigation on critical heat flux of flow boiling in parallel microchannels with large aspect ratio: experimental and theoretical analysis[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, **127**: 55–66.
- [18] Wong H, Radke C J, Morris S. The motion of long bubbles in polygonal capillaries(part 2): Drag, fluid pressure and fluid flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, **292**: 95–110.
- [19] Jia H W, Zhang P. Investigation of the Taylor bubble under the effect of dissolution in microchannel[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **285**: 252–263.
- [20] van Baten J M, Krishna R. CFD simulations of mass transfer from Taylor bubbles rising in circular capillaries[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**(12): 2535–2545.
- [21] 王宜飞, 王清强, 姬德生, 等. 微通道壁面浸润性对气-液两相流的影响规律研究[J]. *化工学报*, 2022, **73**(4): 1501–1514.
Wang Y F, Wang Q Q, Ji D S, et al. Effects of the wall wettability of microchannel on the gas-liquid two-phase flow hydrodynamics [J]. *CIESC Journal*, 2022, **73**(4): 1501–1514.
- [22] Seo H S, Kim Y J. A study on the mixing characteristics in a hybrid type microchannel with various obstacle configurations[J]. *Materials Research Bulletin*, 2012, **47**(10): 2948–2951.
- [23] Yin Y R, Guo R W, Zhu C Y, et al. Enhancement of gas-liquid mass transfer in microchannels by rectangular baffles[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, **236**: 116306.
- [24] Yang L, Shi Y X, Abolhasani M, et al. Characterization and modeling of multiphase flow in structured microreactors: a post microreactor case study[J]. *Lab on a Chip*, 2015, **15**(15): 3232–3241.
- [25] Nieves-Remacha M J, Kulkarni A A, Jensen K F. Gas-liquid flow and mass transfer in an advanced-flow reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, **52**(26): 8996–9010.
- [26] Zhang S Z, Zhu C Y, Feng H S, et al. Intensification of gas-liquid two-phase flow and mass transfer in microchannels by sudden expansions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, **229**: 116040.
- [27] Naami A, Edali M, Sema T, et al. Mass transfer performance of CO₂ absorption into aqueous solutions of 4-diethylamino-2-butanol, monoethanolamine, and N-methyldiethanolamine[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, **51**(18): 6470–6479.
- [28] Mandal B P, Kundu M, Padhiyar N U, et al. Physical solubility and diffusivity of N₂O and CO₂ into aqueous solutions of (2-amino-2-methyl-1-propanol + diethanolamine) and (N-methyldiethanolamine + diethanolamine)[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2004, **49**(2): 264–270.
- [29] Haimour N, Sandall O C. Absorption of carbon dioxide into aqueous methyldiethanolamine[J]. *Chemical Engineering Science*, 1984, **39**(12): 1791–1796.
- [30] Musterd M, van Steijn V, Kleijn C R, et al. Calculating the volume of elongated bubbles and droplets in microchannels from a top view image[J]. *RSC Advances*, 2015, **5**(21): 16042–16049.
- [31] Jakiela S, Korczyk P M, Makulska S, et al. Discontinuous transition in a laminar fluid flow: a change of flow topology inside a droplet moving in a micron-size channel[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(13): 134501.
- [32] Kreutzer M T, Kapteijn F, Moulijn J A, et al. Multiphase monolith reactors: chemical reaction engineering of segmented flow in microchannels[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60**(22): 5895–5916.
- [33] Abiev R S. Modeling of pressure losses for the slug flow of a gas-liquid mixture in mini- and microchannels[J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2011, **45**(2): 156–163.
- [34] Abiev R S. Analysis of local pressure gradient inversion and form of bubbles in Taylor flow in microchannels[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, **174**: 403–412.
- [35] Liu Z M, Zhang L X, Pang Y, et al. Micro-PIV investigation of the internal flow transitions inside droplets traveling in a rectangular microchannel[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2017, **21**(12): 1–8.
- [36] Li S W, Xu J H, Wang Y J, et al. Liquid-liquid two-phase flow in pore array microstructured devices for scaling-up of nanoparticle preparation[J]. *AIChE Journal*, 2009, **55**(12): 3041–3051.
- [37] Potdar A, Protasova L N, Thomassen L, et al. Designed porous milli-scale reactors with enhanced interfacial mass transfer in two-phase flows[J]. *Reaction Chemistry & Engineering*, 2017, **2**(2): 137–148.