

# 接枝 PVDF 膜吸收器中 CO<sub>2</sub> 吸收特性和传质规律的研究

何婷琳, 陈仁菊, 肖凯军

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 本文以 CO<sub>2</sub> 为吸收气体, NaOH 为吸收液, 研究了 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM) 接枝的 PVDF 中空纤维膜吸收器吸收二氧化碳的吸收特性以及传质规律, 并建立膜吸收器中二氧化碳的传质模型。研究表明: PNIPAM 接枝 PVDF 中空纤维膜吸收器的 CO<sub>2</sub> 吸收率随吸收液浓度和吸收液的流量的升高而升高, 随气体流量升高而降低; 在实验操作条件下, 最佳吸收二氧化碳的工艺参数为: 吸收液浓度为 0.4 mol/L, 吸收液流量为 16 L/h, 气体流量为 250 L/h, 气液两相流动方式采用逆流方式。此时, 二氧化碳的吸收率接近 100%; 而对二氧化碳气体吸收过程中传质的研究得出, 总传质系数  $K_G=17.5\sim 26.3\times 10^5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{KPa}^{-1}$ , 传质通量  $N_{\text{CO}_2}=3.8\sim 7.6\times 10^6 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 采用 PNIPAM 接枝 PVDF 中空纤维膜吸收器, NaOH 水溶液吸收 CO<sub>2</sub> 具有良好的吸收效率。

**关键词:** PNIPAM 接枝 PVDF 中空纤维膜; 膜吸收器; 二氧化碳; 吸收; 传质

文章编号: 1673-9078(2012)9-1106-1110

## CO<sub>2</sub> Absorption Characteristics and Mass Transfer Performance in Grafted PVDF Hollow Fiber Membrane Contactor

HE Ting-lin, CHEN Ren-ju, XIAO Kai-jun

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In this paper, CO<sub>2</sub> absorption characteristics and mass transfer performance in N-isopropyl acrylamide (PNIPAM) grafted PVDF hollow fiber membrane contactor using NaOH solution as absorbing liquid to absorb carbon dioxide were studied, and then mass transfer model of CO<sub>2</sub> absorption was established. The absorption rates of carbon dioxide in PVDF hollow fiber membrane contactor was improved by the increase in the concentration and flow rate of absorbing liquid, while decreased with gas flow. The optimal processing parameters for absorbing CO<sub>2</sub> via grafted PVDF hollow fiber membrane contactor were: 0.4 mol/L of absorbing liquid concentration, 16 L/h of flow rate of absorbing liquid, and 250 L/h of gas flow rate at a counter flow of gas against absorbing liquid. Under the above operating conditions, the absorption rate of carbon dioxide was nearly 100% and total mass transfer coefficient is  $K_G=17.5\sim 26.3\times 10^5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{KPa}^{-1}$ . The mass transfer flux was about  $N_{\text{CO}_2}=3.8\sim 7.6\times 10^6 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . The characteristics of absorption of CO<sub>2</sub> for grafted PVDF membrane contactor were of good efficiency of absorption.

**Key words:** PNIPAM grafted PVDF hollow fiber membrane; membrane contactor; carbon dioxide; absorption; mass transfer

中空纤维膜吸收器具有比表面积大、装填密度高等优点<sup>[1-5]</sup>。随着研究深入, 研究者开始着眼于吸收液的循环和全利用方面的研究, 研究体系也逐步复杂化, 从使用纯二氧化碳气体到混合气体模拟烟气, 还有从单纯的采用氢氧化钠作为单一吸收液到采用胺类等复合吸收液。例如, D.Bhaumik 等采用 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 混合气体, 水作为吸收液进行研究吸收液流动方式对传质系数的影响<sup>[6]</sup>; Kim 等采用 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 的混合气, 选择蒸馏水和乙醇胺、甲基二乙醇胺以及其它胺类的水溶液

作为吸收液<sup>[7]</sup>; Yongtaek Lee 等采用 CO<sub>2</sub> 气体, 采用碳酸钾溶液作为吸收液<sup>[8]</sup>; Wang 等采用的是空间位阻胺、二乙醇胺和甲基二乙醇胺的水溶液<sup>[9]</sup>, 等等。

国内学者也开展相关纤维膜吸收器的研究, 并开展膜吸收的影响因素以及机理研究。如黄冬兰等用水、NaOH 和 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 水溶液作为吸收液进行高浓度 CO<sub>2</sub> 吸收试验, 研究发现 CO<sub>2</sub> 吸收率随着 CO<sub>2</sub> 流速增加而递减, 随吸收液流速增加而递增, 总传质系数和传质速率均增加<sup>[10]</sup>; 王志等模拟了 CO<sub>2</sub> 在水、NaOH、乙醇胺(MEA)、2-氨基-2-甲基-1-丙醇(AMP) 水溶液中的吸收, 研究了 AMP-MEA 混合有机胺水溶液吸收 CO<sub>2</sub> 的过程<sup>[11]</sup>。而高坚等进行了孔隙率对膜吸收过程影响的实验, 结果发现孔隙率对膜吸收过程的影响主要取

收稿日期: 2012-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21176092); “十二五” 国家科技支撑计划课题 (2011BAE16B04); 广东省产学研项目 (2010B090400512)

通讯作者: 肖凯军, 男, 博士, 教授, 主要从事膜材料制备及应用技术研究

决于吸收液边界层厚度,与膜孔隙的半孔间距之间的关系<sup>[12]</sup>。李锡源等采用脉冲示踪法,对二维膜组件模型内流体流动状况进行了研究<sup>[13]</sup>。杨明芬等研究了聚丙烯膜吸收器分离模拟烟气中 CO<sub>2</sub> 的技术<sup>[14]</sup>。

PVDF 材料具有良好的化学稳定性及热稳定性等优点,目前,采用相转变法制备的 PVDF 中空纤维膜,具有疏水性强、机械强度低、膜孔径不均匀等缺点,导致 PVDF 中空纤维膜吸收器吸收 CO<sub>2</sub> 过程中存在操作不稳定、断丝、寿命低等问题。因此,采用新型改性 PVDF 中空纤维膜材料,研究其对 CO<sub>2</sub> 吸收特性及其传递规律,具有十分重要的意义。

本文利用 PNIPAM 接枝 PVDF 中空纤维膜吸收器,

表 1 膜吸收器参数

Table 1 Parameters of PVDF hollow fiber membrane contactor

| 序号 | 膜材质            | 孔径/nm | 纤维膜数/根 | 管长/cm | 管内径/mm | 膜几何面积/m <sup>2</sup> |
|----|----------------|-------|--------|-------|--------|----------------------|
| A  | PNIPAM 接枝 PVDF | 50    | 600    | 35    | 0.3    | 0.001319             |

主要仪器:蠕动泵(MasterFlex L/S,上海人和科学仪器有限公司),液体玻璃转子流量计(LZJ-6,北京玻璃仪器厂),气体玻璃转子流量计(LZB6,北京玻璃仪器厂),压力计(150 表径膜盒,上海自动化仪表四厂)等。

实验药品:NaOH(分析纯,天津市百世化工有限公司),CO<sub>2</sub>(99.99%,普鲁克气体配套设备经营部),盐酸(AR,广州化学试剂厂),酚酞(分析纯,广州化学试剂厂),甲基橙(分析纯,广州化学试剂厂)。

### 1.2 实验流程和装置

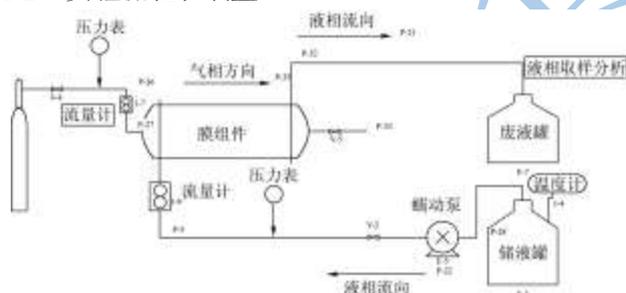


图 1 接枝 PVDF 中空纤维膜吸收器吸收 CO<sub>2</sub> 流程示意图(顺流)

Fig.1 Schematic diagram of process of absorbing CO<sub>2</sub> via grafted PVDF hollow fiber membrane contactor (downstream)

实验装置如图 1 所示。试验中 CO<sub>2</sub> 通过流量计后进入膜组件,气体为壳程流动(流经膜外),吸收液为管程流动(流经膜内),CO<sub>2</sub> 与吸收液 NaOH 接触并发生化学反应。在系统稳定运行后,在液相取样分析处取样进行数据处理分析。富含 CO<sub>2</sub> 的吸收液送入废液罐储存。逆流时调整吸收液流动方向与气体方向相反即可。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 CO<sub>2</sub> 的吸收效率计算方法

建立二氧化碳膜吸收反应系统,考察不同因素对膜吸收器分离吸收二氧化碳气体效率的影响。通过研究纳米孔径膜吸收器的传质动力学,获得纳米孔径下气液反应与吸收的规律与机理,为新型 PVDF 中空纤维膜吸收器在 CO<sub>2</sub> 气体的吸收利用提供理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验材料

实验采用本研究室利用碱改性-接枝方法制备 PNIPAM 接枝 PVDF 中空纤维膜吸收器,膜吸收器的参数如表 1 所示。

CO<sub>2</sub> 的吸收率为:

$$\eta = \frac{C_{[CO_2]} \times V_{s液} \times 22.4}{V_{s气体}} \times 100\%$$

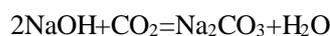
式中: C<sub>[CO<sub>2</sub>]</sub>-样品中溶解的 CO<sub>2</sub> 分析浓度, mol/L; V<sub>s液</sub>-液相的体积流量, L/h; V<sub>s气</sub>-气相的体积流量, L/h。

#### 1.3.2 动力学方程的建立及传质系数的计算

本文利用膜将气相和吸收液分开,气相与吸收液在膜-液界面上进行吸收传质,整个传质过程包括以下步骤<sup>[15]</sup>:

- (1) CO<sub>2</sub> 气体从气相主体相膜传质;
- (2) CO<sub>2</sub> 气体在膜液界面溶解;
- (3) 溶解的 CO<sub>2</sub> 气体在膜界面向液相主体传递。

吸收过程伴随着 CO<sub>2</sub> 与吸收液反应的方程式为:



CO<sub>2</sub> 气体在液相中传递的同时,也被吸收液吸收带走。

各过程传质通量方程为

$$N_{CO_2} = k_g(p_g - p_m); \quad N_{CO_2} = k_m(p_m - p_l)$$

$$N_{CO_2} = k_l(c_l - c^*)$$

式中, N<sub>CO<sub>2</sub></sub> 为 CO<sub>2</sub> 传质通量, mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; k<sub>g</sub>, k<sub>m</sub> 和 k<sub>l</sub> 分别为 CO<sub>2</sub> 在气相、膜和液相中的分传质系数, m·s<sup>-1</sup>; p<sub>g</sub>, p<sub>m</sub> 和 p<sub>l</sub> 分别为 CO<sub>2</sub> 在气相主体、气-膜接触界面以及膜-液界面处的压力, KPa; c<sub>l</sub> 和 c<sup>\*</sup> 分别为膜液界面处 CO<sub>2</sub> 于气相的平衡浓度和 CO<sub>2</sub> 在液相中的平衡浓度, mol·L<sup>-1</sup>。

由于吸收过程伴随着化学反应:

$$N_{CO_2} = Ek_l(c_l - c^*)$$

式中 E 为化学反应增强因子。

由亨利定律可得 p<sub>i=HG</sub>

膜吸收总传质阻力由气膜阻力 (1/K<sub>G</sub>)、膜阻力

( $1/k_m$ ) 和液膜阻力 ( $1/k_l$ ) 3 部分组成, 气相为纯  $\text{CO}_2$  无气膜阻力, 因此总的传质阻力方程可由下式得到:

$$1/K_G = 1/k_m + 1/k_l$$

式中  $K_G$  为总传质系数,  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{KPa}^{-1}$ 。

膜传质系数  $k_m$  可以由下式得到:

$$k_m = \left(\frac{N_{\text{CO}_2}}{A_m \Delta p}\right) \cdot \left(\frac{273.15}{T}\right)$$

式中,  $p$  为气相压力,  $\text{KPa}$ ;  $A_m$  为传质面积,  $\text{m}^2$ ;  $T$  为热力学温度,  $\text{K}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸收液浓度对 $\text{CO}_2$ 吸收率和传质的影响

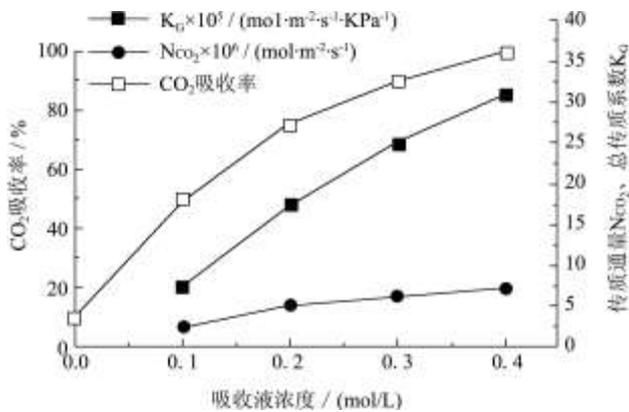


图 2 吸收液浓度对  $\text{CO}_2$  吸收率和传质的影响

Fig.2 The effect of absorbing liquid concentration on  $\text{CO}_2$  absorption rate and mass transfer

操作温度  $28\text{ }^\circ\text{C}$ , 保持一定的液体和气体流量, 此时, 膜吸收器的  $\text{CO}_2$  吸收率和总的传质系数  $K_G$  与传质通量  $N_{\text{CO}_2}$  随吸收液浓度的提高而升高。如图 2 所示, 随着吸收液 ( $\text{NaOH}$  溶液) 浓度在  $0.1\text{ mol/L}\sim 0.4\text{ mol/L}$  范围内,  $\text{CO}_2$  吸收率和  $K_G$  显著增大。 $\text{NaOH}$  与  $\text{CO}_2$  反应属于化学反应, 当吸收液的浓度提高, 化学增强因子增大, 从而导致  $K_G$  和  $N_{\text{CO}_2}$  的增加。在  $0\text{ mol/L}\sim 0.1\text{ mol/L}$  范围内,  $\text{CO}_2$  吸收率曲线斜率较大, 说明吸收率提高得很快。由于膜法吸收二氧化碳的主要推动力是溶液的浓度差, 随着吸收液浓度的升高, 液膜附近的吸收液浓度差增大, 吸收率升高, 因此二氧化碳吸收率曲线的斜率会迅速上升。当吸收液浓度为  $0.4\text{ mol/L}$  时, 二氧化碳的吸收率几乎达到了  $100\%$ 。

### 2.2 吸收液流量对膜吸收器传质的影响

如图 3 所示, 吸收液流量在  $5\sim 15\text{ L/h}$  范围内,  $\text{CO}_2$  吸收率随着吸收液流量的提高显著增大。本实验是动态吸附, 液相边界层中已经反应的吸收液会被迅速带走, 使得液膜两侧浓度差提高, 从而使得  $\text{CO}_2$  吸收率提高。由于实验中吸收液保持过量, 渗透到界面侧的  $\text{CO}_2$  很快就被吸收液中的大量溶质吸收掉, 化学反应

大幅度降低了吸收液中的液膜阻力,  $\text{CO}_2$  在聚合物膜中的传质过程成为控制过程。由图 3 可知, 总传质系数  $K_G$  接近于膜传质系数  $k_m$  受流量影响较小, 故  $\text{CO}_2$  传质通量  $N_{\text{CO}_2}$  和总传质系数  $K_G$  之呈现出略微上升的趋势, 总传质系数在  $K_G=20\times 10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{KPa}^{-1}$  左右, 传质通量在  $N_{\text{CO}_2}=5\times 10^{-6}\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  附近。

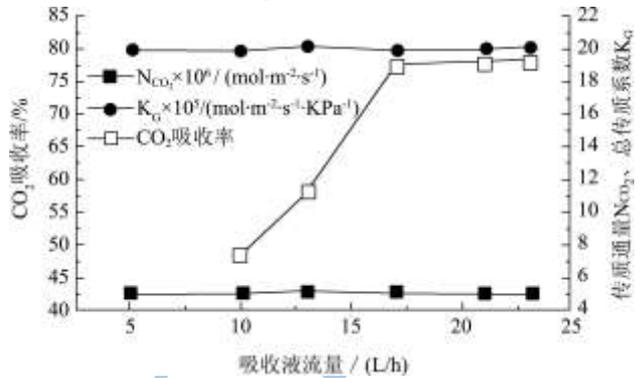


图 3 吸收液流量对  $\text{CO}_2$  吸收率和传质的影响

Fig.3 The effect of absorbing liquid flow on  $\text{CO}_2$  absorption rate and mass transfer

### 2.3 $\text{CO}_2$ 气体流量对传质的影响

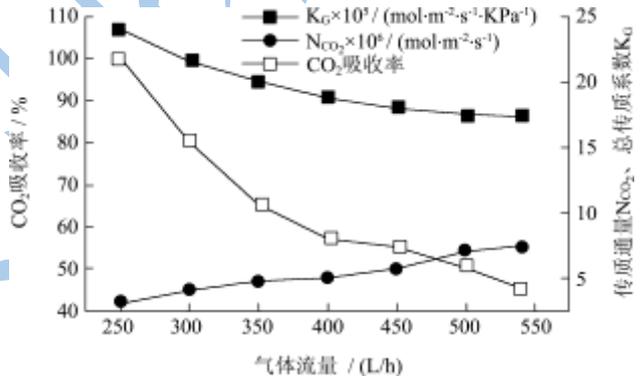


图 4 二氧化碳气体流量对  $\text{CO}_2$  吸收率和传质的影响

Fig.4 The effects of carbon dioxide gas flow on  $\text{CO}_2$  absorption rate and mass transfer

由图 4 知, 随着  $\text{CO}_2$  气体流量的增大, 传质通量  $N_{\text{CO}_2}$  增加, 而  $\text{CO}_2$  吸收效率和传质系数  $K_G$  减小。在  $\text{NaOH}$  溶液的浓度为  $0.2\text{ mol/L}$ , 吸收液流量为  $16\text{ L/h}$  左右, 操作温度  $28\text{ }^\circ\text{C}$  的实验条件下, 当气体流量为  $250\text{ L/h}$  左右时,  $\text{CO}_2$  吸收效率接近  $100\%$ 。由于  $\text{CO}_2$  在聚合物膜中的传质过程为控制步骤, 随气体流量的增加, 气体压力增大, 但气压对总的传质系数没有明显的影响, 使得传质系数变化不大, 在  $K_G=18\times 10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{KPa}^{-1}$  处达到平衡。但是由于气流量的增加同时也造成气体在膜组件的停留时间减少, 气体还未被完全吸收就被带走, 从而造成吸收率降低, 传质通量略上升, 在  $N_{\text{CO}_2}=5\times 10^{-6}\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  处达到平衡。

### 2.4 气液相对流动方式对传质的影响

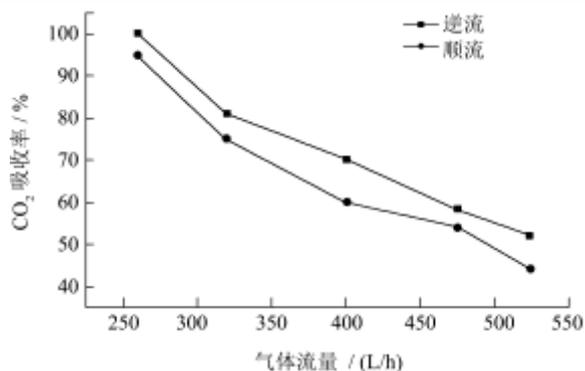


图5 气液相对流动方式对CO<sub>2</sub>吸收率影响

Fig.5 The effect of gas-liquid flow way on on CO<sub>2</sub> absorption rate

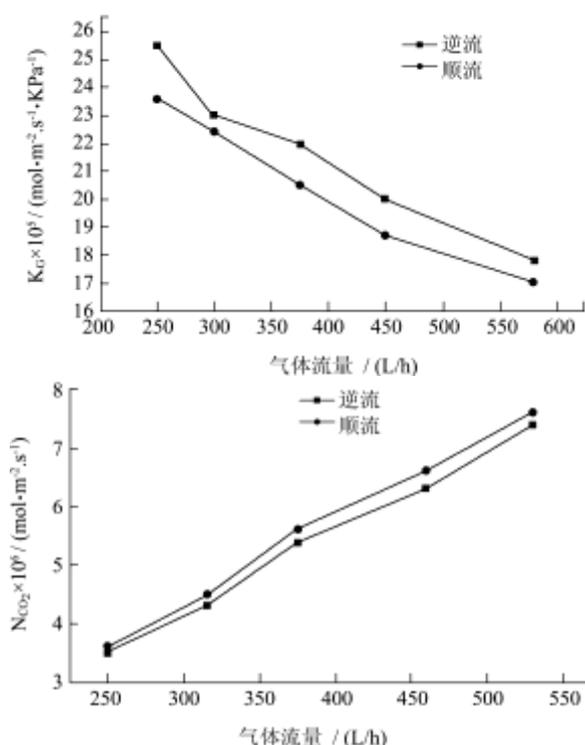


图6 气液相对流动方式对CO<sub>2</sub>传质的影响

Fig.6 The effect of gas-liquid flow way on on CO<sub>2</sub> mass transfer

图5和图6分别是气液相流动方式对CO<sub>2</sub>吸收率、总的传质系数K<sub>G</sub>与传质通量N<sub>CO<sub>2</sub></sub>的影响。上图显示,随着气体流量的增加,CO<sub>2</sub>吸收率减少,且当气体流量固定在某一值时,气液相逆流的实验装置吸收率比气液相顺流的吸收装置吸收率平均高出10%左右,逆流时的总传质系数K<sub>G</sub>和传质通量N<sub>CO<sub>2</sub></sub>大于顺流。这不仅是因为当气液两相以逆流的相对流动方式时,二氧化碳气体与膜接触的时间变长,在推动力的作用下,使液膜中的CO<sub>2</sub>浓度迅速降低,液膜阻力降低,总传质系数K<sub>G</sub>和传质通量N<sub>CO<sub>2</sub></sub>比顺流时略大,总传质系数在K<sub>G</sub>=17.5~26.3×10<sup>-5</sup>mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>·KPa<sup>-1</sup>附近,和传质通量在N<sub>CO<sub>2</sub></sub>=3.8~7.6×10<sup>-6</sup>mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>左右;顺流时,总传质系数在K<sub>G</sub>=17.4~25.3×10<sup>-5</sup>mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>·KPa<sup>-1</sup>

附近,和传质通量在N<sub>CO<sub>2</sub></sub>=3.6~7.4×10<sup>-6</sup>mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>左右。

### 2.5 数学模型的建立及分析

X<sub>1</sub>表示吸收液浓度,单位为mol/L; X<sub>2</sub>表示吸收液流量,单位为L/h; X<sub>3</sub>表示气体流量,单位为L/h; X<sub>4</sub>为温度,单位为℃。Y<sub>1</sub>表示CO<sub>2</sub>吸收率, Y<sub>2</sub>表示总的传质系数, Y<sub>3</sub>表示CO<sub>2</sub>传质通量。通过以上实验数据建立在逆流状态下的数学模型。

CO<sub>2</sub>吸收率、总传质系数、CO<sub>2</sub>传质通量的回归方程分别为:

$$Y_1 = 104 + 465X_1 + 3.78X_2 - 0.48X_3 - 2.08X_4 - 578X_1^2 - 0.023X_2^2 + 0.031X_4^2$$

$$Y_2 = -7.565 + 34X_1 - 0.004X_2 + 0.023X_3 + 0.006X_4 + 17.6X_1^2 + 3.497X_3^2 - 7.887X_4^2$$

$$Y_3 = -17.503 + 8.39X_1 + 0.05X_2 - 0.04X_3 + 1.01X_4 - 5.09X_1^2 - 0.013X_4^2$$

表2 回归统计

Table 2 Regression statistics

| 项目                | CO <sub>2</sub> 吸收率 | 总传质系数      | 传质通量     |
|-------------------|---------------------|------------|----------|
| Multiple R        | 0.96434387          | 0.99994513 | 0.951262 |
| R Square          | 0.92995911          | 0.99989026 | 0.9049   |
| Adjusted R Square | 0.92106502          | 0.99987632 | 0.892823 |
| 标准误差              | 5.39383847          | 0.03643346 | 0.204417 |
| 观测值               | 72                  | 72         | 72       |

表3 方差分析

Table 3 Variance analysis

| 项目                 | df | SS       | MS       | F        | Significance F |
|--------------------|----|----------|----------|----------|----------------|
| CO <sub>2</sub> 回归 | 8  | 24335.97 | 3041.996 | 104.559  | 2.1557E-33     |
| 吸收 残差              | 63 | 1832.89  | 29.09349 |          |                |
| 率 总计               | 71 | 26168.86 |          |          |                |
| 总传 回归              | 8  | 761.952  | 95.24401 | 71752.47 | 1.1695E-121    |
| 质系 残差              | 63 | 0.08363  | 0.001327 |          |                |
| 数 总计               | 71 | 762.0357 |          |          |                |
| 传质 回归              | 8  | 25.0492  | 3.131155 | 74.9323  | 3.04E-29       |
| 通量 残差              | 63 | 2.63255  | 0.041786 |          |                |
| 总计                 | 71 | 27.6818  |          |          |                |

由表2可知,上述关于二氧化碳吸收率的回归方程中的R值为0.96,说明此方程可以很好的表达氧化相对因素对二氧化碳吸收率的关系。同时也说明,各因素对二氧化碳吸收率的影响顺序大概是:吸收液浓度>吸收液流量>温度>二氧化碳气体流量。查得F<sub>a</sub>(a=0.05时)值为1.27,即F>F<sub>a</sub>,表示各因素综合下对Y值有显著性影响。而显著性水平远远小于0.001,说明各因素显著。由表2可知,R值分别为0.99994513、0.951262,说明所建立的回归模型方程与实测值能较好地拟合。由表3可知,总的传质系数和CO<sub>2</sub>传质通量回归模型的F分别为71752.47和74.9323,查得F<sub>a</sub>(a=0.05时)值为1.27, F>F<sub>a</sub>,且

相应的概率值均远小于 0.0001, 可知该方程的模型达到极其显著。

### 3 结论

3.1 实验表明, 提高吸收液 NaOH 浓度, 对膜吸收器吸收传质过程有明显的促进作用, 随着吸收液中 NaOH 浓度的增大, 总传质系数最高可达  $K_G=32 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{KPa}^{-1}$  和传质通量最高可达  $N_{\text{CO}_2}=7.5 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 气液两相以逆流方式流动时, 总传质系数  $K_G$  和传质通量  $N_{\text{CO}_2}$  比顺流时大, 且总传质系数在  $K_G=17.5 \sim 26.3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{KPa}^{-1}$  附近, 和传质通量  $N_{\text{CO}_2}=3.8 \sim 7.6 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  左右。

3.3 本文建立了在逆流状态下个影响因素对该膜吸收器吸收  $\text{CO}_2$  的数学模型, 建立关于此四种因素的回归方程。回归统计中的 R 值都大于 90%, 方差分析中:  $F > F_a$ , 说明这些数学模型很好的表达了各因素对二氧化碳的吸收率及传质的影响。

### 参考文献

- [1] Qi Z, Cussler E L. Microporous hollow fibers for gas absorption I. Mass transfer in the liquid [J]. Journal Membrane Science, 1985, 23: 154-158
- [2] Qi Z, Cussler E L. Microporous hollow fibers for gas absorption II. Mass transfer across the membrane [J]. Journal Membrane Science, 1985, 23: 154-158
- [3] Nishikawa N, Ishibashi M, Ohta H, et al.  $\text{CO}_2$  removal by hollow-fiber gas-liquid contactor [J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36
- [4] 袁亮, 周显宏, 肖凯军, 等. 多级膜浓缩黄芩苷提取液的研究. 现代食品科技[J], 2008, 24(3): 236-239
- [5] 刘胜围, 李旭敏. 膜分离技术在食品工业清洁生产中的应用 [J]. 现代食品科技, 2007, 23(6): 95-97
- [6] Bhaumik D, Majumdar S, Sirkar K K. Absorption of  $\text{CO}_2$  in a transverse flow hollow fiber membrane module having a few wraps of the fibermat [J]. Journal Membrane Science, 1998, 138: 108-113
- [7] Kim Young Seok, Yang Setmg Man. Absorption of carbon dioxide through hollow fiber membranes using various aqueous absorbents [J]. Separation and Purification Technology, 2000, 21: 321-325
- [8] Lee Yongtaek, Noble R D, Yeom Bong Yeol, et al. Analysis of  $\text{CO}_2$  removal by hollow fiber membrane contactors [J]. Journal Membrane Science, 2001, 194
- [9] Wang R, Li DF, Liang DT. Modeling of  $\text{CO}_2$  capture by three typical amine solutions in hollow fiber membrane contactors [J]. Chemical Engineering and Processing, 2004, 43
- [10] 黄冬兰, 王金渠, 贺高红, 等. 膜吸收器吸收  $\text{CO}_2$  的影响因素研究. 安全与环境学报[J], 2004, 4(6): 18-21
- [11] 王志, 龚彦文, 袁力, 等. 中空纤维膜吸收器中  $\text{CO}_2$  吸收过程模拟 [J]. 化工学报, 2003, 54(1): 1563-1568
- [12] 高坚, 任钟旗, 张泽廷, 等. 孔隙率对膜吸收过程影响的实验研究. 高校化学工程学报[J], 2007, 21(1): 14-19
- [13] 李锡源, 张晓东, 贾绍义, 等. 中空纤维膜组件内纤维束间流体流动状况研究. 化学工程[J], 1996, 24(2): 23-30
- [14] 杨明芬, 方梦祥, 张卫风, 等. 膜吸收法脱除电厂模拟烟气中的  $\text{CO}_2$ . 环境科学[J], 2005, 26(4): 24-29
- [15] 孙承贵, 曹义鸣, 介兴明, 等. 中空纤维致密膜基吸收  $\text{CO}_2$  传质机理分析. 高校化学工程学报[J], 2007, 21(4): 556-563

## 欢迎订阅中文核心期刊 《现代食品科技》

邮发代号: 46-349 刊号: ISSN 1673-9078/CN 44-1620

每期定价 15 元, 全年 12 期仅 180 元。欢迎食品及相关行业的机构和科学工作者到各地邮局订阅, 并踊跃投稿或建立广告宣传 and 产学研合作关系。

地址: 广州五山华南理工大学轻工与食品学院麟鸿楼 508, 邮编: 510640

电话: 020-87112373, 87114555, 87113352, 87112532

E-mail: xdspkj@vip.sohu.com

现代食品科技