

氨水细喷雾吸收 CO₂ 的体积总传质系数

曾庆, 郭印诚, 牛振祺, 林文漪

(清华大学工程力学系, 北京市 海淀区 100084)

Volumetric Overall Mass Transfer Coefficients of CO₂ Absorption Into Aqueous Ammonia of Fine Spray

ZENG Qing, GUO Yincheng, NIU Zhenqi, LIN Wenyi

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Carbon dioxide emissions has become the focus of world attention. In recent years, capture and storage of CO₂ (CCS) is considered to be a potential technical on reducing CO₂ emissions. As a kind of new absorbent, the ammonia solution obtains universal attention. In order to provide reference data to the future industrial design, the absorption of CO₂ into aqueous ammonia had been studied in a spray tower at atmospheric pressure. The results show that the higher concentration and flow rate of the aqueous ammonia solution are beneficial to promote CO₂ removal efficiency. The volumetric overall mass transfer coefficients of CO₂ absorption into aqueous ammonia were measured. It was found that the performance of the spray column varies with the tested process parameters, including ammonia concentration, liquid flow rate, gas flow rate, CO₂ concentration in inlet gas and temperature. Experimental results show that the volumetric overall mass transfer coefficients decreases slightly when increasing CO₂ inlet concentration. The volumetric overall mass transfer coefficients increases remarkably with the ammonia concentration and also increases with the gas flow rate and liquid flow rate. It was also found that the temperature affects the volumetric overall mass transfer coefficients. When the temperature in the spray tower is lower than 40 °C, the volumetric overall mass transfer coefficients increases with the temperature. Whereas, when the temperature in the spray tower is higher than 40 °C, the volumetric overall mass transfer coefficients decreases with the increasing temperature.

KEY WORDS: carbon dioxide; ammonia; spray; volumetric overall mass transfer coefficient

摘要: 二氧化碳减排已经成为国际关注的焦点问题,近年来,二氧化碳捕集与封存技术(capture and storage of CO₂, CCS)被认为是减少 CO₂ 排放的有效途径。氨水作为一种新的吸收剂得到普遍关注。为了为进一步的工业设计提供参考依据,该文采用喷雾塔对氨水细喷雾吸收 CO₂ 进行试验研究,考察氨水流量和氨水浓度对 CO₂ 脱除率的影响,测定了氨水细喷雾吸收 CO₂ 的体积总传质系数,研究氨水浓度、氨水流量、进口气体流量、CO₂ 进口浓度和温度对体积总传质系数的影响。实验结果表明,体积总传质系数随着气体流量、氨水流量、氨水浓度的升高而增大,随着 CO₂ 进口浓度升高略微下降;当温度低于 40 °C,体积总传质系数随反应温度升高而增加,至 40 °C 达到最大值。研究发现氨水浓度是影响体积总传质系数的关键因素。

关键词: 二氧化碳; 氨水; 喷雾; 体积总传质系数

0 引言

气候变化引起国际社会越来越多的关注,二氧化碳的减排已成为迫切需要解决的问题。世界上约 40% 的 CO₂ 由化石燃料电厂产生,现有的燃煤电厂 CO₂ 捕集主要有 3 条技术路线: 燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧^[1]。其中针对燃烧后排放的二氧化碳的分离技术主要有化学吸收法、吸附法、膜吸收法和生物固碳和水合物法^[2], 其中化学吸收法被认为是目前最有效的方法^[3]。吸收二氧化碳主要的化学试剂有醇胺溶液, NaOH 溶液和氨水等。国内外许多学者对醇胺溶液吸收二氧化碳做了详细的实验研究,比如一乙醇胺(monoethanolamine, MEA)吸收 CO₂ 的技术已成功应用于合成氨工艺中,但采用 MEA 吸收 CO₂ 的工艺存在以下缺点^[4-5]: 1) 再生能耗较高; 2) 设备腐蚀率较高; 3) 烟气中少量的 SO₂、NO₂、HCl、HF 和 O₂ 会导致一定的胺损失;

基金项目: 北京市科委科技计划课题(Z08040902950803)。

Beijing Municipal Commission for Science & Technology Under Grant(Z08040902950803).

4) CO₂的吸收负荷较低。Yeh等^[6]将氨法吸收二氧化碳与MEA法脱除CO₂进行了对比,得出了氨水吸收效率和吸收能力都优于MEA的结论,且所得副产品碳酸氢铵又是我国农业上广泛应用的氮肥,具有一定的经济效益^[7]。目前,对于氨法吸收二氧化碳的许多研究主要都集中于CO₂脱除效率和氨水吸收能力^[6-10]。体积总传质系数 $K_G a_v$ 是衡量反应器气液传质性能高低的重要参数,它可以直接用于工业设计,对于研究化学吸收过程有着重要的意义。Aroonwilas等^[11-13]研究了填料塔中2-氨基-2-甲基-1-丙醇(2-Amino-2-methyl-1-propanol, AMP)、NaOH、MEA、二乙醇胺(diethanolamine, DEA)等溶剂吸收二氧化碳的体积总传质系数。骆培成等^[14]研究了填料塔中碳酸钾/哌嗪混合吸收液脱除CO₂的体积总传质系数。张好翠等^[15]研究了降膜微反应器中NaOH吸收CO₂的气相总传质系数。Kuntz等^[16]研究了喷雾塔中MEA吸收二氧化碳的体积总传质系数,通过与填料塔作对比,得出喷雾塔是很有潜力的二氧化碳吸收装置。

本文研究了喷雾塔中氨水细喷雾吸收CO₂的体积总传质系数 $K_G a_v$,分析了CO₂进口浓度、气体流量、氨水流量、氨水浓度、温度等参数对 $K_G a_v$ 的影响,以期为进一步的工业设计提供指导。

1 体积总传质系数 $K_G a_v$

根据双膜理论,气液反应的总吸收速率方程为

$$N_A = K_G p(y - y^*) \quad (1)$$

式中: p 为气相总压,kPa;气相组成 $p(y - y^*)$ 表示总传质推动力; K_G 为气相总传质系数,并且有

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{EHk_L} \quad (2)$$

式中: $1/K_G$ 表示总传质阻力; $1/k_G$ 表示气相传质阻力; $1/(EHk_L)$ 表示液相传质阻力。影响气相总传质系数 K_G 的主要因素有:气相传质系数 k_G ,无化学反应的液相传质系数 k_L ,气体溶解度系数 H 和化学反应增强因子 E 。

对于稳定的吸收过程,单位时间由气相转入液相的溶质量为 $\Omega d(G_A)$,其中 Ω 表示喷雾塔横截面积,单位为m²。其中 $G_A = G y = G_1 Y$, G_1 为惰性气体的流量, Y 为混合气中溶质和惰性气体的摩尔比, y 表示气相中溶质的摩尔分率。且

$$\Omega d(G y) = \Omega d(G_1 Y) \quad (3)$$

其中

$$y = \frac{Y}{1 + Y} \quad (4)$$

由于高浓度气体吸收时,气体总流量 G 是变量,而惰性气体的流量 G_1 保持恒定,因此有

$$\Omega d(G y) = \Omega d(G_1 Y) = \Omega G_1 dY \quad (5)$$

在吸收塔中任取一微元高度 dh ,根据物料平衡有

$$\Omega G_1 dY = \Omega N_A a_v dh \quad (6)$$

$$G_1 dY = N_A a_v dh \quad (7)$$

将式(1)代入式(7)中得

$$G_1 dY = K_G a_v p(y - y^*) dh \quad (8)$$

$$K_G a_v = \frac{G_1 dY}{p(y - y^*) dh} \quad (9)$$

对于氨水吸收二氧化碳的化学反应属于快速反应,可以认为 $y^* = 0$ ^[17-18],因此有

$$dh = \frac{G_1}{K_G a_v \cdot p} \frac{dY}{y} \quad (10)$$

将(4)式代入(10)中得

$$dh = \frac{G_1}{K_G a_v p} \left(\frac{1 + Y}{Y} \right) dY \quad (11)$$

将式(11)从塔顶到塔底积分,得

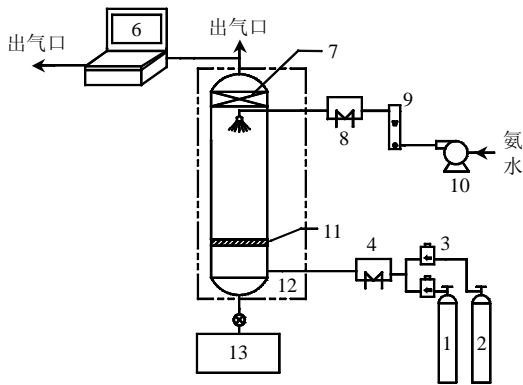
$$h = \frac{G_1}{K_G a_v p} \left[\ln \frac{Y_1}{Y_2} + (Y_1 - Y_2) \right] \quad (12)$$

$$K_G a_v = \frac{G_1}{ph} \left[\ln \frac{Y_1}{Y_2} + (Y_1 - Y_2) \right] \quad (13)$$

式中: Y_1 , Y_2 分别为进塔和出塔气体中溶质的摩尔比。其中单位体积的有效传质面积 a_v 的数值很难直接测定。所以常将 a_v 与传质系数的乘积 $K_G a_v$ 视为一体,称为体积总传质系数。它是吸收塔设计的重要参数。本文通过测量进出口气相中二氧化碳的浓度,根据(13)式求出喷雾塔中氨水细喷雾吸收二氧化碳的体积总传质系数 $K_G a_v$ 。

2 实验装置及流程

实验装置流程如图1所示,其主体设备为喷雾塔,喷雾塔由内径为100 mm的不锈钢圆筒制成,工作段高度为400 mm。为了保证吸收过程中塔内温度,喷雾塔主体部分镶嵌在恒温水浴夹套中。模拟烟气由N₂和CO₂配制,N₂和CO₂气体由钢瓶经减压阀、质量流量控制器后进入混合器配制一定CO₂浓度的模拟烟气,再经气体恒温加热器以保证气体温度恒定,最后进入塔底,与氨水逆流接触后由塔顶排出。预先配制的氨水通过恒温加热器后经喷嘴喷入塔中,喷雾颗粒的平均直径在30~40 μm,



1—N₂ 气瓶；2—CO₂ 气瓶；3—气体质量流量计；4—气体加热箱；
5—填料塔；6—红外 CO₂ 分析仪；7—丝网除沫器；8—液体加热箱；
9—液体流量计；10—氨水泵；11—气体分布器；12—恒温水浴；
13—富液箱。

图 1 喷雾法吸收 CO₂ 的实验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of CO₂ capture using the spray scrubber

反应后的富液由塔底流出。

实验前预先配制一系列不同浓度的氨水溶液静置一段时间，试验中，先通入设定体积分数的模拟烟气，同时红外线二氧化碳分析仪在线监测气体出口处二氧化碳的浓度，当二氧化碳分析仪显示的值达到稳定状态，打开氨水泵，氨水经恒温加热后通过喷嘴雾化，进入塔体顶部，与模拟烟气逆流接触，进行吸收反应。这时二氧化碳分析仪的显示值开始降低，当二氧化碳分析仪显示的值再次达到稳定状态，表明塔内吸收过程已经达到平衡，此时保存红外线二氧化碳分析仪在线监测的数据。通过改变 CO₂ 进口浓度、气体流量、氨水流量、氨水浓度、温度等条件，得到各组实验数据，利用式(13)计算得到不同操作条件下的体积总传质系数 K_{Gav} 。为了验收实验的精度，在实验前验证了实验系统的重复性，通过 3 次重复实验，测得出口二氧化碳浓度值的标准误差为 0.14%，说明实验重复性良好。在试验中主要的测量误差主要来源于气体质量流量控制器和红外线二氧化碳分析仪，其中气体质量流量控制器精度为 ±1.0% S.P.(设定点)；红外线二氧化碳分析仪的精度为 ±2% F.S.(量程为 0~20.0%)。实验参数及实验条件见表 1。

3 实验结果与分析

3.1 氨水细喷雾吸收二氧化碳的脱除率

在气体吸收操作中，脱除率是表征吸收程度的一种重要参数，通常表示为

$$\eta = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} \times 100\% \quad (14)$$

表 1 喷雾塔参数及实验条件
Tab. 1 Parameters of spray column and test conditions

参量	条件
塔高/m	0.4
塔径/m	0.1
气压/kPa	101.3
吸收剂	氨水
气体流速/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	61~214
CO ₂ 体积分数/%	5~15
液体流速/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	1.02~3.06
氨水浓度/%	2~16
温度/℃	15~55

为考察氨水流量和氨水浓度对 CO₂ 脱除率的影响，实验中保持进口气体流量 76.4 m³·m⁻²·h⁻¹，温度 20 ℃和二氧化碳浓度 15% 不变，选用不同浓度的氨水溶液，其质量浓度分别为 4%、6% 和 8%。在温度为 20 ℃的条件下，对 CO₂ 脱除率随氨水流量变化关系进行了研究，实验结果如图 2 所示。随着氨水流量和氨水浓度的增加，二氧化碳脱除率明显升高。增加氨水流量可以增大气液有效接触面积，从而强化气液传质能力，对 CO₂ 的吸收有利。而增大氨水浓度，将促进气液化学反应，从而提高化学反应增强因子 E ，因此也有助于 CO₂ 的吸收。

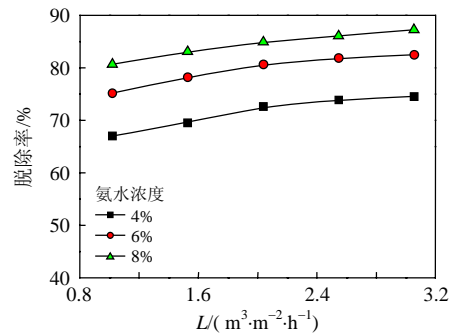


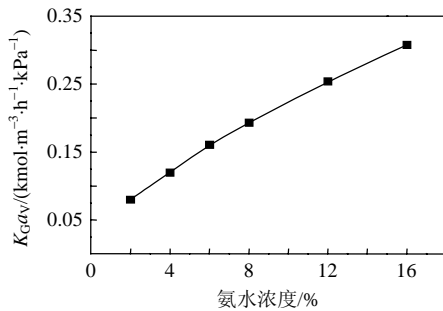
图 2 氨水浓度和流量对二氧化碳脱除率的影响
Fig. 2 Effect of ammonia concentration and liquid flow rate on CO₂ removal efficiency

3.2 氨水细喷雾吸收 CO₂ 的 K_{Gav}

3.2.1 氨水浓度的影响

为考察氨水浓度对 K_{Gav} 的影响，实验中保持氨水流量为 1.53 m³·m⁻²·h⁻¹，进口气体流量 152.8 m³·m⁻²·h⁻¹，CO₂ 进口浓度 15%，温度 20℃，实验结果如图 3 所示。

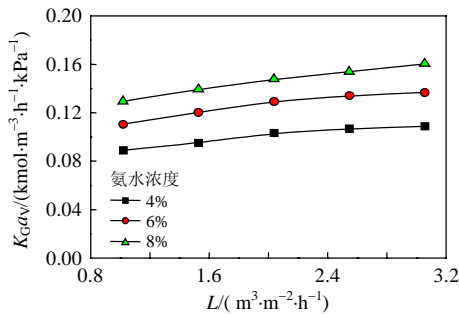
随着氨水浓度从 2% 升高到 16%，体积总传质系数增加到原来的 4 倍。这是由于氨水浓度升高，有更多的氨分子扩散到气液界面与 CO₂ 发生反应，

图3 氨水浓度对 K_{GaV} 的影响Fig. 3 Effect of ammonia concentration on K_{GaV}

增大了化学反应增强因子 E ，从而降低了液相传质阻力 $1/(EHk_L)$ 。所以通过提高氨水浓度可以有效地增加体积总传质系数，从而增强二氧化碳的吸收。

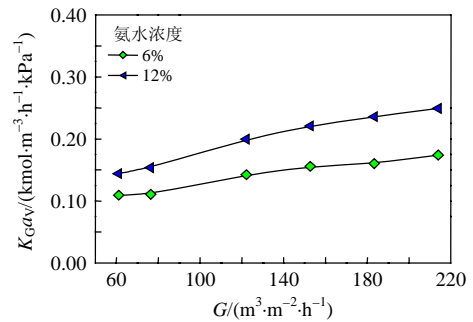
3.2.2 氨水流量的影响

为考察氨水流量对 K_{GaV} 的影响，在 20°C 的条件下，实验中保持进口气体流量 $76.4 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ， CO_2 进口浓度 15%，不同氨水流量下体积总传质系数的变化如图 4 所示。在不同氨水浓度下，随着氨水流量的增大， K_{GaV} 的值均逐渐上升。当氨水浓度为 8%，氨水流量从 $1.02 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加到 $3.06 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 时， K_{GaV} 的值增加了 24.1%。这是因为随着氨水流量的增加，不仅可以增大有效相界面面积 a_V ，还可以增强液相传质分系数 k_L ，从而增大 K_{GaV} 值。

图4 氨水流量对 K_{GaV} 的影响Fig. 4 Effect of liquid flow rate on K_{GaV}

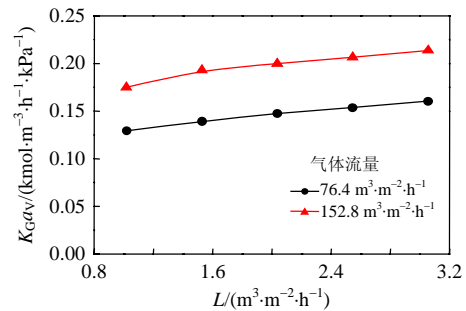
3.2.3 气体流量的影响

实验中保持氨水流量为 $1.02 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，二氧化碳进口浓度 15%，温度 20°C 不变。图 5 表明在不同氨水浓度下， K_{GaV} 值都随着气体流量增大而升高。当氨水浓度为 8%，气体流量从 $61 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 升高到 $214 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 时，体积总传质系数增加了 73.0%。这是因为随着气体流量增加，有效地提高了气相传质系数 k_G ，对强化气液两相对流传质有利。但气体流量加大会降低气体在喷雾塔内停留时间缩短，不利于喷雾吸收，所以，气体流速并不是

图5 气体流量对 K_{GaV} 的影响Fig. 5 Effect of gas flow rate on K_{GaV}

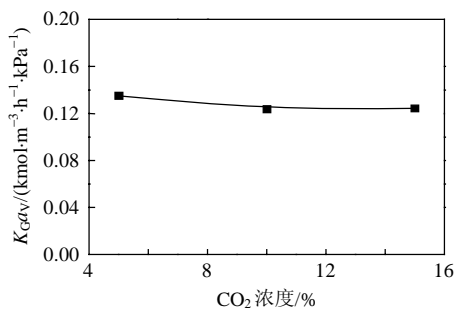
越大越好。

图 6 给出了氨水流量和气体流量对 K_{GaV} 的影响，当气体流量从 $76.4 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加到 $152.8 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 时， K_{GaV} 平均增长了 $0.053 \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kPa}^{-1}$ 。在相同的气体流量下， K_{GaV} 也随着液体流量增加而逐渐升高。这表明喷雾塔中氨水吸收二氧化碳同时受到气膜阻力和液膜阻力的影响。

图6 气体流量和液体流量对 K_{GaV} 的影响Fig. 6 Effect of gas flow rate and liquid flow rate on K_{GaV}

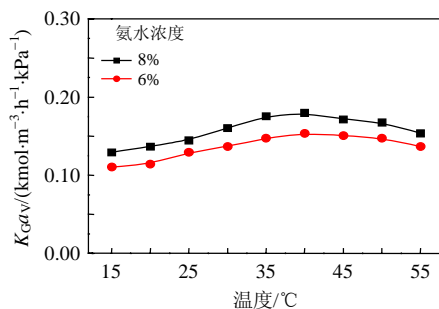
3.2.4 CO_2 进口浓度的影响

图 7 为体积总传质系数 K_{GaV} 随着 CO_2 进口浓度的变化关系。保持气体流量 $152.8 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，液体流量 $1.02 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，氨水浓度 4% 不变， CO_2 进口浓度从 5% 增加到 15%。根据双膜理论，气相中 CO_2 浓度越高，气相传质阻力 $1/k_G$ 越低，这有利于提高体积总传质系数 K_{GaV} ，但图 7 中显示 K_{GaV} 值略微下降。这主要是由于气相 CO_2 浓度较高时，液相中随着氨水吸收 CO_2 的进行，氨水浓度下降明显，后续的吸收速率显著降低，致使化学反应增强因子 E 降低，从而使液膜传质阻力增加。这 2 种效果共同作用，最终导致体积总传质系数 K_{GaV} 略为下降。这同时也说明了液相传质阻力的大小对整个吸收传质过程的影响很大。氨水浓度是影响体积总传质系数 K_{GaV} 的关键因素， CO_2 浓度对体积总传质系数的影响较小。

图 7 CO₂ 进口浓度对 K_{GaV} 的影响Fig. 7 Effect of CO₂ inlet concentration on K_{GaV}

3.2.5 反应温度的影响

图 8 为塔内反应温度对 K_{GaV} 的影响, 保持气体流量 $76.4 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 液体流量 $1.02 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, CO₂ 进口浓度 15%。在低温时, K_{GaV} 随着温度升高而增大, 并且在 40 °C 时达到最高点, 当温度超过 40 °C 后, K_{GaV} 开始下降。根据双膜理论, 影响气相总传质系数 K_G 的主要因素有: 气相传质系数 k_G , 无化学反应的液相传质系数 k_L , 气体溶解度系数 H 和化学反应增强因子 E 。而气相传质系数 k_G 又与气体扩散系数 D_{AG} 相关, 无化学反应的液相传质系数 k_L 也与溶质 A 在液相的扩散系数 D_{AL} 相关。当温度升高, 会促进 D_{AG} 、 D_{AL} 增大, 这些因素有利于 K_{GaV} 的提高。但温度升高会导致 CO₂ 气体溶解度系数 H 降低, 尤其当温度超过 38 °C, 将发生逆向反应, 所以超过 40 °C 对 CO₂ 吸收不利, 会导致氨水吸收 CO₂ 的 K_{GaV} 降低。

图 8 温度对 K_{GaV} 的影响Fig. 8 Effect of temperature on K_{GaV}

4 结论

通过常压下喷雾塔中用氨水细喷雾吸收二氧化碳的实验研究, 得出以下结论:

1) 在 20 °C 时, 二氧化碳脱除率随着氨水流量和氨水浓度的增加而明显升高。

2) 实验测定了不同条件下氨水吸收二氧化碳的体积总传质系数 K_{GaV} , 结果表明: 体积总传质系

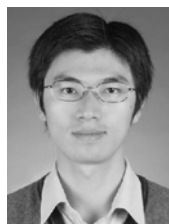
数随着氨水浓度的升高而明显增大, 随气体流量、氨水流量升高也有所增加; 随着 CO₂ 浓度进口升高略微下降; 当温度低于 40 °C, 体积总传质系数随着反应温度升高而增加, 当温度超过 40 °C, 体积总传质系数开始下降。

3) 氨水细喷雾吸收烟气中二氧化碳受液膜阻力和气膜阻力共同控制, 其中液膜阻力的影响较大。氨水浓度是影响体积总传质系数的关键因素, CO₂ 进口浓度对体积总传质系数的影响较小。

参考文献

- [1] 李庆钊, 赵长遂. O₂/CO₂ 气氛煤粉燃烧特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(35): 39-43.
Li Qingzhao, Zhao Changsui. Investigation on characteristics of pulverized coal combustion in O₂/CO₂ mixtures[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(35): 39-43(in Chinese).
- [2] 刘妮, 刘道平, 谢应明. 水合物法高效储存二氧化碳气体的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 36-40.
Liu Ni, Liu Daoping, Xie Yingming. Experimental study on CO₂ storage by hydrate crystallization[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 36-40(in Chinese).
- [3] Liu Jinzhao, Wang Shujuan, Zhao Bo, et al. Absorption of carbon dioxide in aqueous ammonia[J]. Energy Procedia, 2009: 933-940.
- [4] Yeh J T, Resnik K P, Rygle K, et al. Semi-batch absorption and regeneration studies for CO₂ capture by aqueous ammonia[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86: 1533-1546.
- [5] Kim J Y, Han K, Chun H D. CO₂ absorption with low concentration ammonia liquor[J]. Energy Procedia, 2009(1): 757-762.
- [6] Yeh A C, Bai H. Comparison of ammonia and monethanolamine solvents to reduce CO₂ greenhouse gas emissions[J]. The Science of the Total Environment, 1999(228): 121-133.
- [7] Diao Yongfa, Zheng Xianyu, He Boshu, et al. Experimental study on capturing CO₂ greenhouse gas by ammonia scrubbing[J]. Energy Conversion and Management, 2004(45): 2283-2296.
- [8] Bai H, Yeh A C. Removal of CO₂ greenhouse gas by ammonia scrubbing[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1997(36): 2490-2493.
- [9] Resnik K P. Aqua ammonia process for simultaneous removal of CO₂, SO₂ and NO_x[J]. International Journal of Environmental Technology and Management, 2004, 4(1/2): 89-104.
- [10] Derksa P W J, Versteegb G F. Kinetics of absorption of carbon dioxide in aqueous ammonia solutions[J]. Energy Procedia, 2009(1): 1139-1146.
- [11] Aroonwilas A, Tontiwachwuthikul P. Mass transfer coefficients and correlation for CO₂ Absorption into 2-Amino-2- methyl-1-propanol (AMP) Using Structured Packing[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1998, 37(2): 569-575.
- [12] Aroonwilas A, Veawab A, Tontiwachwuthikul P. Behavior of the mass-transfer coefficient of structured packings in CO₂ absorbers with

- chemical reactions[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1999, 38(5): 2044-2050.
- [13] Aroonwilas A, Veawab A. Characterization and comparison of the CO₂ absorption performance into single and blended alkanolamines in a packed column[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2004, 43(9): 2228-2237.
- [14] 骆培成, 焦真, 张志炳. 填料塔中碳酸钾/哌嗪混合吸收液脱除 CO₂ 的体积传质系数[J]. *化工学报*, 2005, 56(1): 53-57.
Luo Peicheng, Jiao Zhen, Zhang Zhibing. Volumetric mass transfer coefficients of dilute CO₂ absorption into mixtures of potassium carbonate and piperazine in packed column[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2005, 56(1): 53-57(in Chinese).
- [15] 张好翠, 乐军, 陈光文, 等. 降膜微反应器中 CO₂ 化学吸收过程传质行为[J]. *化工学报*.2010, 61(3): 635-641.
Zhang Haocui, Yue Jun, Chen Guangwen, et al. Mass transfer behaviors in process of chemical absorption of CO₂ in falling film microreactors[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2010, 61(3): 635-641(in Chinese).
- [16] Kuntz J, Aroonwilas A. Performance of spray Column for CO₂ capture application[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(1): 145-153.
- [17] 钦淑均, 郑志胜, 张成芳, 等. 纯氨水吸收二氧化碳的速率研究[J]. *华东化工学院学报*, 1983(2): 155-167.
Qin Shujun, Zheng Zhisheng, Zhang Chenfang, et al. A study on absorption rate of CO₂ into pure ammonia aqueous solutions[J]. *Journal of East China Institute of Chemical Technology*, 1983(2): 155-167(in Chinese).
- [18] de Montigny, Tontiwachwuthikul P, Chakma A. Comparing the absorption performance of packed columns and membrane contactors [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005(44): 5726-5732.



曾庆

收稿日期: 2010-06-22。

作者简介:

曾庆(1984), 男, 硕士研究生, 从事烟气 CO₂ 捕集方面的研究, zengqing1027@126.com。

(责任编辑 车德竞)