

魏凤玉,何园. 2013. N,N'-二(2-羟丙基)哌嗪-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>水溶液吸收 SO<sub>2</sub>动力学[J]. 环境科学学报,33(8):2143-2148

Wei F Y, He Y. 2013. Kinetics of absorption of SO<sub>2</sub> into N,N'-bis(2-hydroxypropyl) piperazine and sulfuric acid aqueous solution[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,33(8):2143-2148

# N,N'-二(2-羟丙基)哌嗪-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>水溶液吸收 SO<sub>2</sub>动力学

魏凤玉\*,何园

合肥工业大学化学工程学院,合肥 230009

收稿日期:2012-11-22

修回日期:2012-12-17

录用日期:2012-12-17

**摘要:**在鼓泡式反应器中,以 N,N'-二(2-羟丙基)哌嗪(HPP)-硫酸水溶液为吸收剂,利用初始速率法探讨了 SO<sub>2</sub>吸收反应动力学.结果表明:HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>水溶液吸收 SO<sub>2</sub>为快速反应;吸收速率  $N_A$ 随着 SO<sub>2</sub>进口体积浓度  $y_A$ 和吸收剂浓度  $C_N$ 的增大而增大,随着吸收温度  $T$ 的升高而降低;吸收速率对  $C_N$ 是 0.5 级反应,对  $y_A$ 为 0.85 级反应.同时,建立了 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>水溶液吸收 SO<sub>2</sub>的吸收速率  $N_A$ 与  $C_N$ 、 $y_A$ 及  $T$ 之间的经验关系式,发现该经验关系式的预测值与实验值符合较好,可用于工程设计计算.

**关键词:**N,N'-二(2-羟丙基)哌嗪;初始速率法;反应动力学;吸收速率

文章编号:0253-2468(2013)08-2143-06

中图分类号:TQ028,X511

文献标识码:A

## Kinetics of absorption of SO<sub>2</sub> into N,N'-bis(2-hydroxypropyl) piperazine and sulfuric acid aqueous solution

WEI Fengyu\*, HE Yuan

School of Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009

Received 22 November 2012;

received in revised form 17 December 2012;

accepted 17 December 2012

**Abstract:** The aqueous solution of N,N'-bis(2-hydroxypropyl) piperazine (HPP) was used as an absorbent for SO<sub>2</sub> in a bubbling device. The initial rate was used to determine the absorption reaction kinetics of SO<sub>2</sub>. The results showed that the reaction of SO<sub>2</sub> into the aqueous solution of HPP-sulfuric acid is a fast reaction. The absorption rate ( $N_A$ ) increased with SO<sub>2</sub> concentration in inlet gas ( $y_A$ ) and the absorbent concentration ( $C_N$ ), but decreased with absorption temperature  $T$ . The absorption rate was found to be 0.5 and 0.85 order with respect to  $C_N$  and  $y_A$ , respectively. An empirical correlation of  $N_A$  was subsequently developed as a function of  $C_N$ ,  $y_A$  and  $T$ , and the absorption rate was calculated. The obtained data were found to be in a good agreement with the experimental absorption rate and hence the empirical correlation could be used for engineering design.

**Keywords:** N,N'-bis(2-hydroxypropyl) piperazine; initial rate; reaction kinetics; absorption rate

### 1 引言(Introduction)

湿法烟气脱硫因具有适用煤种广、脱硫剂利用率高、脱硫效率高、脱硫剂来源广等优点,成为国际上应用最广泛、适应性最强的烟气脱硫技术.其中,有机胺湿法烟气脱硫技术以其脱硫效率高、脱硫剂可循环使用、SO<sub>2</sub>可回收利用、不产生二次污染等优点,已成为一种新兴的分离技术(Tang *et al.*, 2004).有机胺吸收剂主要有乙二胺类(Tang *et al.*, 2004)、醇胺类(翟林智等, 2009)、二胺哌嗪类

(Ravary *et al.*, 2005).二胺哌嗪类具有两个碱性不等的胺基,其中,碱性较强的胺基与强酸发生反应生成一种热稳定性盐,另一个氨基则与 SO<sub>2</sub>发生可逆吸收反应,提高了对 SO<sub>2</sub>的选择性.有机胺吸收 SO<sub>2</sub>涉及到气液传质和化学反应,过程较为复杂,目前人们对胺法吸收 SO<sub>2</sub>的研究主要集中在工艺条件的优化(许贤等, 2010;王欣荣, 2010;何川等, 2009),而鲜有反应动力学的研究报道,无法满足工程计算和动力学研究的需要.

对于可逆化学反应,由于反应开始时只有反应

基金项目:安徽省重点科技攻关项目(No. 08010202124)

Supported by the Anhui Important Science Research Project(No. 08010202124)

作者简介:魏凤玉(1963—),女,教授(博士),E-mail: weifyliuj@ yahoo. com. cn; \*通讯作者(责任作者)

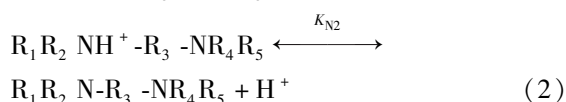
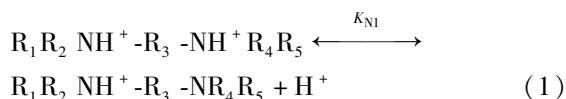
Biography: WEI Fengyu(1963—), female, professor(Ph. D.), E-mail: weifyliuj@ yahoo. com. cn; \*Corresponding author

物,无产物,排除了产物对反应产生的干扰,因此,利用初始速率法确定反应级数比较可靠(王正烈等,2001;翟林智,2010).本课题组前期研制出一种二胺哌嗪类脱硫剂  $N,N'$ -二(2-羟丙基)哌嗪(HPP)(史成武等,2009),其硫酸盐( $n(\text{HPP}):n(\text{H}_2\text{SO}_4)=2:1$ )水溶液对  $\text{SO}_2$  具有较好的吸收、解吸效果且具有较高的稳定性(刘清安,2010).为进一步研究该吸收剂的脱硫反应机理,本文利用初始速率法对 HPP 硫酸盐水溶液吸收  $\text{SO}_2$  传质反应动力学进行研究,以期有机胺法脱硫的工业化应用提供基础的动力学数据.

## 2 反应机理和吸收速率(Reaction mechanism and absorption rate)

### 2.1 HPP 在溶液中的存在形式

HPP 在水溶液中有  $\text{R}_1\text{R}_2\text{N-R}_3\text{-NR}_4\text{R}_5$ 、 $\text{R}_1\text{R}_2\text{NH}^+-\text{R}_3\text{-NR}_4\text{R}_5$ 、 $\text{R}_1\text{R}_2\text{NH}^+-\text{R}_3\text{-NH}^+\text{R}_4\text{R}_5$  3 种型体,分别记为 HPP、 $\text{HPPH}^+$ 、 $\text{HPPH}_2^{2+}$ ,其解离反应如下:



设  $C_N$  为液相中有机胺的总浓度,则  $C_N = [\text{HPP}] + [\text{HPPH}^+] + [\text{HPPH}_2^{2+}]$ . 以  $\delta(\text{HPP})$ 、 $\delta(\text{HPPH}^+)$  和  $\delta(\text{HPPH}_2^{2+})$  分别代表 HPP、 $\text{HPPH}^+$  和  $\text{HPPH}_2^{2+}$  的分布分数,则可分别表示为:

$$\delta(\text{HPP}) = \frac{[\text{HPP}]}{C_N} = \frac{K_{N1}K_{N2}}{K_{N1}K_{N2} + K_{N1} \times [\text{H}^+] + [\text{H}^+]^2} \quad (3)$$

$$\delta(\text{HPPH}^+) = \frac{[\text{HPPH}^+]}{C_N} = \frac{K_{N1}[\text{H}^+]}{K_{N1}K_{N2} + K_{N1} \times [\text{H}^+] + [\text{H}^+]^2} \quad (4)$$

$$\delta(\text{HPPH}_2^{2+}) = \frac{[\text{HPPH}_2^{2+}]}{C_N} = \frac{[\text{H}^+]^2}{K_{N1}K_{N2} + K_{N1} \times [\text{H}^+] + [\text{H}^+]^2} \quad (5)$$

根据 HPP 的解离常数  $K_{N1}$ 、 $K_{N2}$  (孙人杰等,2011),由式(3)~(5)可求得 HPP 的  $\delta$ -pH 关系图,具体如图 1 所示.

由图 1 可知, HPP 在溶液中的存在形态随着 pH 值的不同而改变,当  $\text{pH} > \text{p}K_{N2}$  (8.2) 时,溶液中主要以 HPP 为主体;当  $\text{pH} < \text{p}K_{N1}$  (3.8) 时,溶液中  $\text{HPPH}_2^{2+}$  占优势;当  $\text{p}K_{N1} < \text{pH} < \text{p}K_{N2}$  时,溶液中

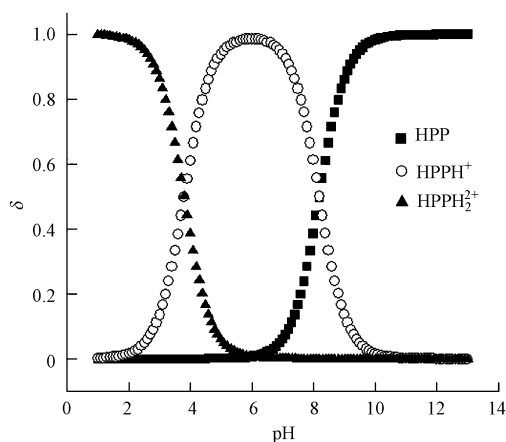
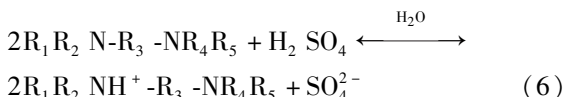


图 1 HPP 的  $\delta$ -pH 图

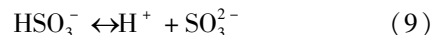
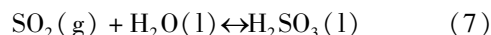
Fig. 1 Distribution coefficient of HPP vs pH

$\text{HPPH}^+$  占优势. HPP 硫酸盐( $n(\text{HPP}):n(\text{H}_2\text{SO}_4)=2:1$ )水溶液的 pH 值在 6.5 左右,此时溶液中主要以  $\text{HPPH}^+$  形式存在,则 HPP 水溶液中加入硫酸的成盐反应为:



### 2.2 HPP 硫酸盐水溶液吸收 $\text{SO}_2$ 的反应机理

$\text{SO}_2$  溶于  $\text{HPP-H}_2\text{SO}_4$  水溶液的传递过程如下:首先,  $\text{SO}_2$  从气相传递至液相生成  $\text{H}_2\text{SO}_3$ , 同时发生解离,过程如式(7)~(9)所示. 因为 HPP 硫酸盐中只含有叔胺氮原子无活泼氢,不能像伯胺、仲胺那样直接与  $\text{SO}_2$  反应. 因此, HPP 硫酸盐  $\text{HPPH}^+$  与溶液中的  $\text{H}^+$  进一步发生化学反应,生成  $\text{HPPH}_2^{2+}$ , 具体见式(1).



由上述反应历程可知,在有机胺  $N,N'$ -二(2-羟丙基)哌嗪硫酸盐水溶液吸收  $\text{SO}_2$  过程中,  $\text{HPPH}^+$  起到了类似催化剂的作用,促进反应(7)~(9)右移,从而促进  $\text{SO}_2$  的吸收.

### 2.3 气液化学反应吸收速率

$\text{HPP-H}_2\text{SO}_4$  吸收  $\text{SO}_2$  属于化学吸收过程,设  $\text{HPP-H}_2\text{SO}_4$  与  $\text{SO}_2$  为快速拟  $m$  级反应,其反应速率  $r$  可表示为:

$$r = k_{mn} C_{Ai}^m C_N^n \quad (10)$$

式中,  $r$  为 HPP 硫酸盐与  $\text{SO}_2$  的反应速率 ( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  $k_{mn}$  为化学反应速率常数 ( $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{1-m-n}\cdot\text{min}^{-1}$ );  $C_{Ai}$  为  $\text{SO}_2$  在气液界面的

浓度 ( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $C_N$  为液相中有机胺总浓度 ( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $m$ 、 $n$  分别为反应速率对气液界面处 SO<sub>2</sub> 浓度和液相中有机胺总浓度的反应级数。

根据 Danckwerts(1970)理论,对于快速拟  $m$  级反应,SO<sub>2</sub>的吸收速率  $N_A$ 可表示为:

$$N_A = \sqrt{\frac{2}{m+1} k_{mn} D_{AL} C_{Ai}^{m+1} C_N^n} \quad (11)$$

式中, $N_A$ 为 SO<sub>2</sub>的吸收速率 ( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $D_{AL}$ 为 SO<sub>2</sub>在液相的扩散系数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )。

### 3 实验部分(Experimental setup)

#### 3.1 实验装置

实验流程如图 2 所示,整个装置包括气液反应器、模拟烟气配送系统及尾气吸收系统。气液反应器是带有筛板的吸收瓶,其吸收容量为 500 mL。为保证吸收过程中吸收瓶内的温度保持稳定,吸收瓶置于恒温水浴锅中。为排除实际 SO<sub>2</sub>废气中的 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等杂质对 SO<sub>2</sub>吸收反应的影响,本实验中模拟烟气由 N<sub>2</sub>和 SO<sub>2</sub>配制。为配制一定浓度的混合

气体,采用气体流量计控制器设定 N<sub>2</sub>和 SO<sub>2</sub>的气体流量,然后进入缓冲罐混合均匀。尾气吸收系统为装有 NaOH 溶液的吸收瓶。

#### 3.2 实验方法

实验前预先配制一定浓度的 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ( $n(\text{HPP}) : n(\text{H}_2\text{SO}_4) = 2 : 1$ )水溶液,将配制好的吸收液加入吸收瓶中,通过恒温水浴锅来控制其温度。当吸收液温度恒定后,通入一定浓度的模拟烟气,同时开始计时,每隔一定时间取样。根据碘量法(国家环境保护局,2000)与茜素红法(国家环境保护局,1992)分别测出吸收液中 S(IV)、S(VI)的浓度,得出不同时间点液相中 SO<sub>2</sub>吸收的总浓度  $C_T$ ,作出  $C_T$ 随时间的变化曲线,求出曲线在  $t = 0$  处的斜率,即为该实验条件下 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>水溶液吸收 SO<sub>2</sub>的初始吸收速率  $N_A$ 。实验条件如表 1 所示。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

实验参数	单位	实验条件
气体流量	L·h <sup>-1</sup>	212
SO <sub>2</sub> 进口体积浓度		5.66% ~ 23.08%
液相中有机胺的总浓度	mol·L <sup>-1</sup>	0.05 ~ 0.5
液相持液量	mL	200, 300, 350
温度	K	298.15 ~ 332.15

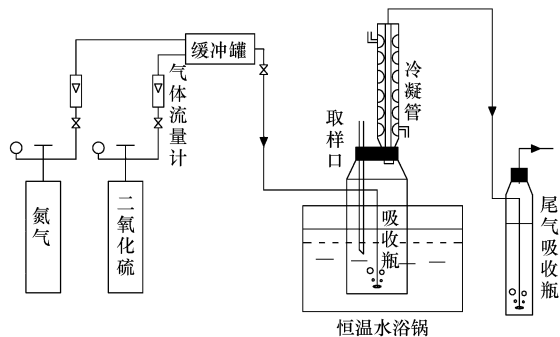


图 2 实验流程的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental flow

### 4 实验结果与讨论 (Experimental results and discussion)

#### 4.1 SO<sub>2</sub>吸收反应动力学区域的确定

在研究某一传质-反应体系时,首先要确定该反应所属动力学区域。由于各动力学区域的特点不同,故各因素对其影响程度也不同。对反应动力学影响的因素参见表 2(谭天恩等,1990)。

表 2 影响伴有化学反应吸收的因素

Table 2 The factors influencing chemical reaction absorption

变量	符号	动力学区域							
		A	B	C	D	E	F	G	H
液相中有机胺的总浓度	$C_N$	+	-	+	+	?	?	+	+
气相主体中 SO <sub>2</sub> 的分压	$P_A$	+	+	+	+	?	?	+	+
相界面积	$A$	+	+	+	+	+	+	+	-
液相持液量	$V_L$	-	-	-	-	+	+	+	+
液相传质系数	$k_L$	+	-	+	-	?	?	+	-
气相传质系数	$k_G$	+	+	+	+	?	?	+	-
2 级反应速率常数	$k_2$	-	-	+	+	?	?	+	+

注: A. 瞬时反应; B. 界面瞬时反应; C. 快速反应; D. 快速拟 1 级反应; E. 中速反应; F. 拟级中速反应; G. 慢速反应; H. 液相主体的极慢反应; “+”受此因素影响; “-”不受此因素影响; “?”可能受此因素影响。

为了确定 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液吸收 SO<sub>2</sub> 的反应动力学区域, 根据上述动力学区域的确定方法, 设计了影响因素实验(表 3). 其它实验条件: 气体流量为 212 L·h<sup>-1</sup>, 吸收温度为 298.15 K, 进气中 SO<sub>2</sub> 的分压为 8.92 kPa, 吸收剂浓度为 0.1 mol·L<sup>-1</sup>, 吸收液初始体积为 350 mL.

表 3 反应动力学区域的确定

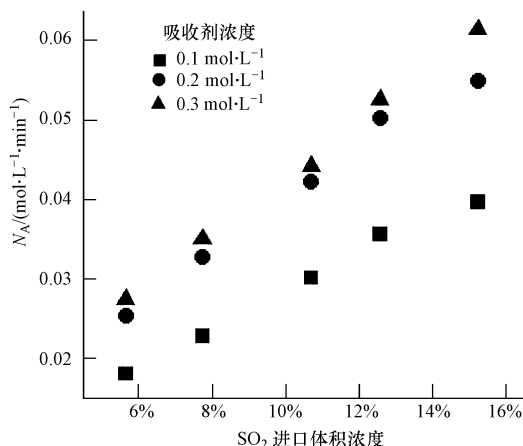
Table 3 Determination of zone of reaction kinetics

实验参数	实验条件	$N_A / (10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$
$V_L / \text{mL}$	300	3.367
	200	3.367
$n_L / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	100	1.330
	300	2.327

由表 3 可知, 液相体积的变化对吸收速率无影响, 依据表 2 可排除区域 E ~ H; 通过液相搅拌速度  $n_L$  来改变液相传质系数  $k_L$ , 发现液相传质系数对吸收速率有影响, 由此可进一步排除区域 B 和 D. 此传质-反应过程中, 吸收速率随着时间的延长逐渐减小, 即非瞬时反应, 可排除区域 A. 因此, 确定 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液吸收 SO<sub>2</sub> 为快速反应.

#### 4.2 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度对吸收速率的影响

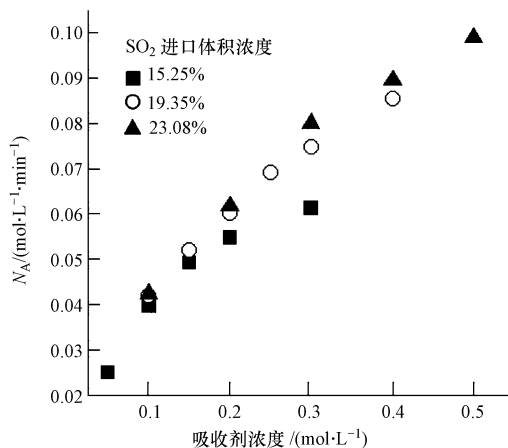
在吸收液体积为 350 mL, 气体进口总流量为 212 L·h<sup>-1</sup>, 吸收液温度为 301.15 K 的条件下, 考察了 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度对吸收速率的影响. 图 3 给出了不同吸收剂浓度下, SO<sub>2</sub> 进口体积浓度对吸收速率的影响. 由图可见, 吸收速率随着 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度升高而增大. 由化学反应和传质理论可知, 增加气相中 SO<sub>2</sub> 的含量, 除了可以加快 HPPH<sup>+</sup> 与 SO<sub>2</sub> 的

图 3 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度对  $N_A$  的影响Fig. 3 Effect of SO<sub>2</sub> inlet concentration on  $N_A$ 

反应速率, 还可以增加气相传质推动力, 两者共同作用可以加快吸收速率.

#### 4.3 吸收剂浓度对吸收速率的影响

在吸收液体积为 350 mL, 气体进口总流量为 212 L·h<sup>-1</sup>, 吸收液温度为 301.15 K 的条件下, 考察了吸收剂浓度对吸收速率的影响. 不同 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度下, 吸收剂浓度对吸收速率的影响见图 4. 由图可见, 吸收速率随着吸收剂浓度的增大而增大. 这是由于吸收剂浓度的增加, 导致更多的 HPPH<sup>+</sup> 扩散到液膜中与 SO<sub>2</sub> 发生反应, 提高了化学反应速率.

图 4 吸收剂浓度对  $N_A$  的影响Fig. 4 Effect of absorbent concentration on  $N_A$ 

#### 4.4 吸收温度对吸收速率的影响

在吸收液体积为 350 mL, 气体进口总流量为 212 L·h<sup>-1</sup> 的条件下, 考察吸收温度对吸收速率的影响. 图 5a 给出了吸收剂浓度为 0.3 mol·L<sup>-1</sup>, 不同 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度下, 吸收温度对吸收速率的影响; 图 5b 给出了 SO<sub>2</sub> 分压为 19.61 kPa, 不同吸收剂浓度下, 吸收温度对吸收速率的影响. 由图可知, 其它条件一定的情况下, 吸收速率均随着吸收温度的升高而降低. 这是由于温度对吸收速率的影响有以下两方面: 一方面, 温度升高加快了 SO<sub>2</sub> 在气相和液相的扩散系数和反应速率常数  $k_{mn}$ , 有利于吸收速率的增大; 另一方面, 温度升高导致 SO<sub>2</sub> 溶解度系数  $H$  值的降低, 降低了液膜传质速率, 从而导致吸收速率降低.

#### 4.5 吸收动力学方程的建立

为了确定吸收速率与 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度、吸收剂浓度及吸收温度之间的变化规律, 假设吸收速率与吸收剂浓度、SO<sub>2</sub> 进口体积浓度之间符合幂函数关系式:

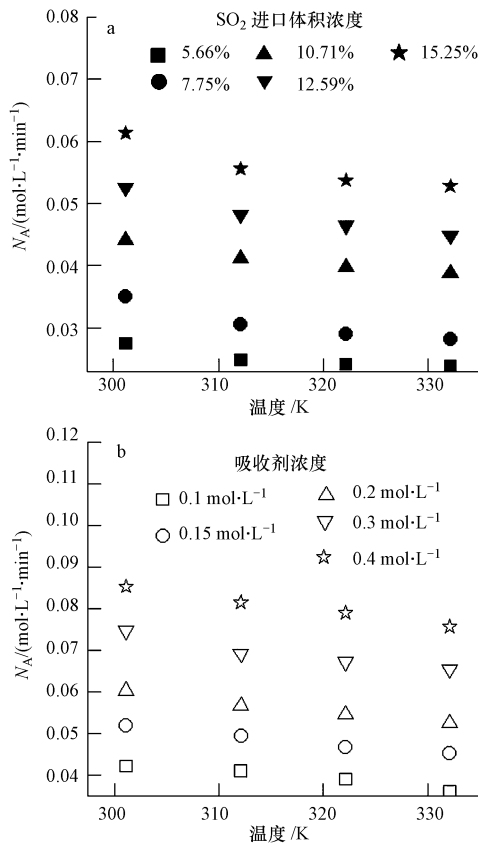


图5 不同 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度 (a) 和不同吸收剂浓度 (b) 下吸收温度对  $N_A$  的影响

Fig. 5 Effect of absorption temperature on  $N_A$  under different SO<sub>2</sub> inlet volume concentrations (a) and different absorbent concentrations (b)

$$N_A = K_{ab} C_N^a y_A^b \quad (12)$$

式中,  $a$ 、 $b$  分别为吸收速率对吸收剂浓度及 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度的级数;  $K_{ab}$  为吸收速率经验常数 ((mol·L<sup>-1</sup>)<sup>1-a</sup>·min<sup>-1</sup>).

将图 5 中的实验结果利用二元线性回归, 得出式(12)中的系数, 具体见表 4. 分析表 4 中的数据, 可将系数  $a$ 、 $b$  分别取为 0.5、0.85, 即吸收速率对吸收剂浓度呈 0.5 级, 对 SO<sub>2</sub> 进口体积浓度呈 0.85 级, 具体算式见式(13). 比较式(11)与(13), 可知  $\frac{n}{2} = a = 0.5$ , 即  $n = 1$ . 因此, HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液吸收 SO<sub>2</sub> 的反应速率对吸收剂浓度呈一级反应.

$$N_A = K_{ab} C_N^{0.5} y_A^{0.85} \quad (13)$$

根据式(13), 将 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液吸收 SO<sub>2</sub> 的吸收速率进行拟合, 可得到不同温度下的经验常数  $K_{ab}$ . 通过拟合得到  $K_{ab}$  与温度的关系, 具体见式(14), 可决系数  $R^2$  为 0.9976.

$$K_{ab} = 0.456 + 2.806884091 \times 10^5 e^{-\frac{T}{20.19501}} \quad (14)$$

表 4  $N_A$  关系式中系数

温度/K	$a$	$b$	$R^2$
301.15	0.5103	0.8175	0.9952
312.15	0.4903	0.8608	0.9972
322.15	0.5062	0.8620	0.9920
332.15	0.5292	0.8517	0.9910

联合式(13)、(14), 可得出 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液吸收 SO<sub>2</sub> 的吸收速率经验关系式为:

$$N_A = (0.456 + 2.806884091 \times 10^5 e^{-\frac{T}{20.19501}}) C_N^{0.5} y_A^{0.85} \quad (15)$$

对上式进行误差分析, 由式(16)、(17)分别计算出吸收速率的模型预测值  $N_{A,cal}$  与实验值  $N_{A,exp}$  的平均相对偏差 MRE (Akanksha *et al.*, 2008) 为 4.98%, 残差平方和 SSe 为  $7.99 \times 10^{-4}$ .

$$MRE = \frac{1}{M} \sum_1^M \text{ABS} \left( \frac{N_{A,exp} - N_{A,cal}}{N_{A,exp}} \right) \quad (16)$$

$$SSe = (N_{A,exp} - N_{A,cal})^2 \quad (17)$$

图 6 给出了由式(15)计算的吸收速率值与实验值之间的比较结果, 两者的相对偏差均在  $\pm 15\%$  之内. 可见, 模型值与实验值符合较好, 该模型可以反映 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液吸收 SO<sub>2</sub> 的数学定量模式, 通过模型的计算可以得出在不同反应条件下 HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液吸收 SO<sub>2</sub> 的吸收速率.

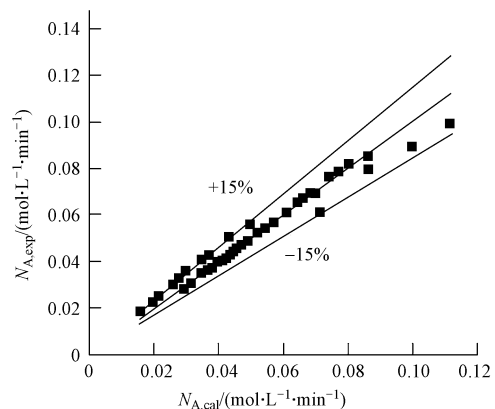


图 6  $N_A$  实验值与计算值的比较

Fig. 6 Comparison of experimental data and calculated values of  $N_A$

## 5 结论 (Conclusions)

1) HPP-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液吸收 SO<sub>2</sub> 的反应是快速反



应,化学反应速率对吸收剂浓度是一级反应;吸收速率对吸收剂浓度呈 0.5 级反应,对  $\text{SO}_2$  进口体积浓度呈 0.85 级反应.

2) 吸收速率随着  $\text{SO}_2$  进口体积浓度、吸收剂浓度的增大而增大,随着吸收温度的升高而降低.

3) 根据实验数据得到了吸收速率  $N_A$  与  $C_N$ 、 $y_A$  和  $T$  之间的经验关系式,该模型预测值与实验值的平均相对偏差小于 5%,可以满足工业吸收装置的设计及优化操作的需要.

**责任作者简介:**魏凤玉(1963—),女,教授,博士,主要研究方向为化工传质与分离技术,化工环保技术及新材料的开发. E-mail: weiflyuj@ yahoo. com. cn.

#### 参考文献 (References):

- Akanksha, Pant K K, Srivastava V K. 2008. Mass transport correlation for  $\text{CO}_2$  absorption in aqueous monoethanolamine in a continuous film contactor [J]. *Chemical Engineering and Process Intensification*, 47(5): 920-928
- Danckweerts P V. 1970. *Gas-Liquid Reaction* [M]. New York: McGraw-Hill Press. 116-128
- 国家环境保护总局. 1992. GB/T13025. 8—91. 制盐工业通用实验方法-硫酸根离子的测定[S]. 北京:国家环境保护总局
- 国家环境保护总局. 2000. HJ/T56—2000. 固定污染源排气中二氧化硫的测定碘量法[S]. 北京:国家环境保护总局
- 何川,钟秦,杜红彩,等. 2009. 微波法合成醇胺类离子液体及其吸收  $\text{SO}_2$  研究 [J]. *化学工程*, 37(2): 8-11
- 刘清安. 2010. 可再生胺湿法烟气脱硫的研究 [D]. 合肥:合肥工业大学. 37-47
- Ravary P M, Sarlis J N, Parisi P J, *et al.* 2005. Low energy regenerable  $\text{SO}_2$  scrubbing process [P]. US, 20050034600A1. 2005-02-17
- 史成武,刘清安,崔鹏,等. 2009. 可再生的烟气脱硫剂及制备方法 [P]. CN 101584961A. 2009-11-25
- 孙人杰,刘清安,桃李. 2011. N,N'-(2-羟丙基)哌嗪的合成及其在烟气脱硫工艺中的应用 [J]. *应用化工*, 40(7): 1145-1147
- Tang Z G, Zhou C C, Chen C. 2004. Studies on flue gas desulfurization by chemical absorption using an ethylenediamine phosphoric acid solution [J]. *Ind Eng Chem Res*, 43(21): 6714-6722
- 王欣荣. 2010. 乙二胺/磷酸吸收液烟气脱硫研究 [D]. 南京:南京理工大学. 27-46
- 王正烈,周亚平,李松林. 2001. *物理化学* [M]. 北京:高等教育出版社. 212
- 翟林智,钟秦. 2009. 胺类吸收剂模拟烟气脱硫 [J]. *应用化学*, 26(8): 952-955
- 翟林智. 2010. 可再生胺类吸收剂烟气脱硫的研究 [D]. 南京:南京理工大学. 70-78
- 许贤,蔡振云,梁坤. 2010. 哌嗪水溶液脱硫性能研究 [J]. *环境化学*, 29(3): 450-454
- 谭天恩,金一中,骆有寿. 1990. *传质-反应过程* [M]. 杭州:浙江大学出版社. 88-91