

## 工业技术

# 多相 Bunsen 反应中 SO<sub>2</sub> 溶于水和甲苯的模拟研究

李晓玲<sup>1</sup>, 贾欣<sup>1</sup>, 王辉<sup>2</sup>, 常丽萍<sup>1\*</sup>, 鲍卫仁<sup>1</sup>, 王建成<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学, 煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西太原 030024;

2. 萨斯喀彻温大学化学和生物工程系, 加拿大萨斯卡通 S7N 5A9)

**摘要:** 对多相 Bunsen 反应的速率控制步骤即 SO<sub>2</sub> 溶于水和甲苯的过程进行模拟研究。选择 Flash2 作为单元操作模块, 分别使用 ELECNRTL 模型和 RK-SOAVE 模型描述 SO<sub>2</sub>-水体系和 SO<sub>2</sub>-甲苯体系的物性, 对高温高压条件下 SO<sub>2</sub>-水体系的亨利系数进行校正。最后利用灵敏度分析模拟计算了不同温度和压力下 SO<sub>2</sub> 在水和甲苯中溶解度的变化规律。

**关键词:** 硫化氢化学反应循环; 多相 Bunsen 反应; SO<sub>2</sub> 溶解; 模拟研究; Aspen Plus

中图分类号: O643

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)S-0220-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.S.048

## Simulation study on dissolution of SO<sub>2</sub> into water and toluene in multi-phase Bunsen reaction

LI Xiao-ling<sup>1</sup>, JIA Xin<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, CHANG Li-ping<sup>1\*</sup>, BAO Wei-ren<sup>1</sup>, WANG Jian-cheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coal Science and Technology of the Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon S7N 5A9, Canada)

**Abstract:** H<sub>2</sub>S chemical reaction cycle is an effective method to reutilize sulfur-containing pollutants for producing hydrogen and sulfuric acid. Bunsen reaction is the major bottleneck to realize H<sub>2</sub>S chemical reaction cycle. Using iodine-toluene to conduct the multi-phase Bunsen reaction at ambient temperature can suppress side reactions, and avoid the deposition of iodine vapor and mitigate corrosion issues. This study aims to simulate the dissolution of SO<sub>2</sub> in water and toluene, which is the rate controlling step of the multi-phase Bunsen reaction. Flash 2 module is used as the unit operation module. ELECNRTL model and RK-SOAVE model are respectively used to describe the physical properties of the SO<sub>2</sub>-water system and the SO<sub>2</sub>-toluene system. Henry's coefficient of the SO<sub>2</sub>-water system at high temperature and high pressure is modified. In addition, the variations of the solubility of SO<sub>2</sub> in water and toluene at different temperatures and pressures are investigated by using the sensitivity analysis.

**Key words:** chemical reaction cycle for H<sub>2</sub>S; multi-phase Bunsen reaction; SO<sub>2</sub> dissolution; simulation study; Aspen plus

传统化石燃料的利用过程中不可避免地存在 H<sub>2</sub>S 和 SO<sub>2</sub> 的排放, 对环境造成污染且严重危害着人类的健康<sup>[1-3]</sup>。目前, 已有的脱硫技术在很大程度上减少了 H<sub>2</sub>S 和 SO<sub>2</sub> 的排放, 但在能耗和污染物去向方面都缺乏可持续性。污染物的资源化利用是实现可持续发展和循环经济的重要途径。Wang<sup>[4]</sup>提出的 H<sub>2</sub>S 化学反应循环可以在脱除 H<sub>2</sub>S 和 SO<sub>2</sub> 的同时实现氢气和硫酸的资源化制备, 包含 4 步反应:

① H<sub>2</sub>S 的氧化反应:  $\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{S}$ 。

② 硫的氧化反应:  $\text{S} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SO}_2$ 。

③ Bunsen 反应:  $2\text{SO}_2 + 2\text{I}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 4\text{HI} +$

$2\text{H}_2\text{SO}_4$ 。

④ 氢碘酸分解反应:  $4\text{HI} \longrightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{I}_2$ 。

总反应为:  $\text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ 。

也可以通过反应③和④将 SO<sub>2</sub> 转化为硫酸, 同时制备氢气。

Bunsen 反应作为 H<sub>2</sub>S 化学反应循环中衔接 H<sub>2</sub>S 转化与氢碘酸分解制氢的关键步骤, 其实现方式和进行程度制约着整个循环的进行<sup>[5]</sup>。传统 Bunsen 反应为了提供液态的碘至反应器, 温度必须高于碘的熔点 (113.7℃), 造成高能耗、有副反应、碘蒸气挥发再沉积堵塞反应器及强腐蚀等技术难题<sup>[6-7]</sup>。针对上述问题, Wang 等<sup>[8]</sup>和 Norman 等<sup>[9]</sup>

收稿日期: 2020-03-29; 修回日期: 2020-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21576183)

作者简介: 李晓玲 (1994-), 女, 硕士生, 研究方向为气体净化, lxlytut17@163.com; 常丽萍 (1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事煤洁净转化、污染物控制与治理方面的研究, 通讯联系人, lpchang@tyut.edu.cn。

提出将固体碘溶解于甲苯作为碘源进行有机多相 Bunsen 反应的新方法,反应在室温或常温下进行,利用 Corning 微通道反应器<sup>[10]</sup>优异的传质传热性能和耐腐蚀性能完成多相 Bunsen 反应,达到了良好的效果。

SO<sub>2</sub> 在水和甲苯中的溶解过程作为多相 Bunsen 反应的速率控制步骤<sup>[5]</sup>是前述反应循环能否顺利进行的关键。该溶解过程的模拟研究可以为验证 Corning 微通道反应器中 SO<sub>2</sub> 的实际溶解度与理论溶解度的差异提供基础数据,也可以为实验设计提供依据,减少实验工作量。目前,关于 SO<sub>2</sub> 在水和甲苯中溶解过程的模拟研究尚不完善,尤其是高温高压条件下 SO<sub>2</sub> 溶解的模拟研究。Aspen Plus 模拟软件集生产装置设计、稳态模拟和优化于一体,具有完备的气液平衡数据库和物性模型,不但能优化工艺条件还可对实验数据进行回归<sup>[11-12]</sup>。朱登磊等<sup>[13]</sup>利用 Aspen Plus 选用 Flash2 模块和 ENRTL-RK 模型模拟计算 101~606 kPa、0~60℃时 CO<sub>2</sub> 在水中的溶解度,结果表明模拟值与实验值偏差极小,数据基本吻合。本文利用 Aspen Plus 软件对 SO<sub>2</sub> 在水和甲苯中的溶解过程进行模拟研究,首先对单元操作模型和物性方程进行选择,结合已有的 SO<sub>2</sub> 和水体系气液相平衡数据,利用数据回归系统校正亨利系数,并通过灵敏度分析模拟研究 SO<sub>2</sub> 在水

和甲苯中的溶解规律。

## 1 单元操作模型和物性方法的选择

### 1.1 单元操作模型的选择

SO<sub>2</sub> 在水和甲苯中的溶解主要涉及气液相平衡,因此选用 Flash2 模块作为分离闪蒸模拟<sup>[14-15]</sup>。如图 1 所示,双出口 Flash2 闪蒸模块进口至少可流入一种以上物流,经过闪蒸器分为两股,其中一股为液相,另一股为气相。Flash2 模块只需规定压力、温度、热负荷、气体分数中的任意两个(但不可同时规定热负荷和气体分数)及出口处物流的相态<sup>[15]</sup>。

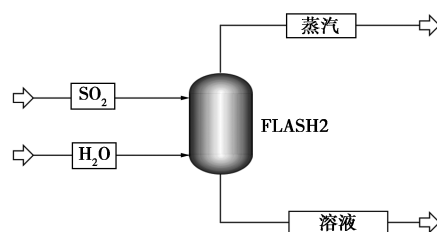


图 1 Flash2 双出口闪蒸器

### 1.2 物性方法的选择

物性方法是计算物性的方法和模型的集合。模拟 SO<sub>2</sub> 在水或甲苯中的溶解时,根据体系的化学键类型和极性不同,参经常规物性方法选择准则(如图 2)选用适当的物性方法。SO<sub>2</sub> 和水体系为极性

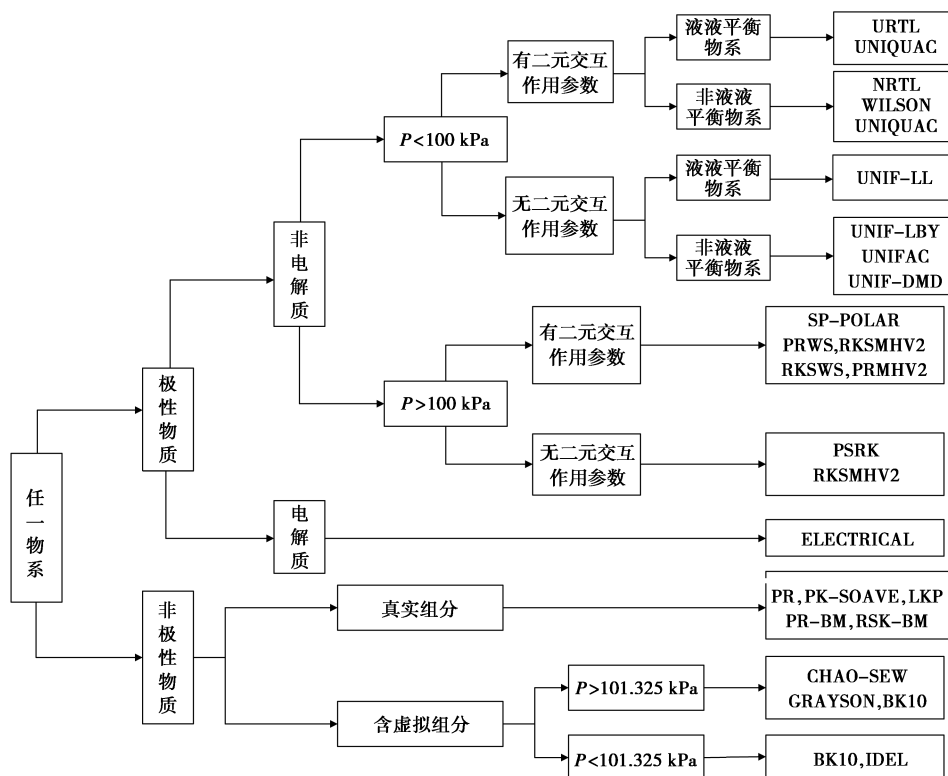


图 2 经验物性方程选择方法<sup>[16]</sup>

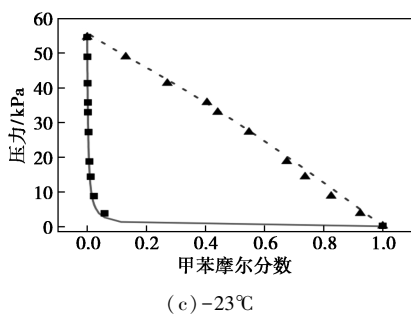
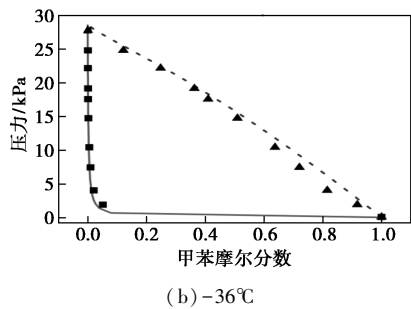
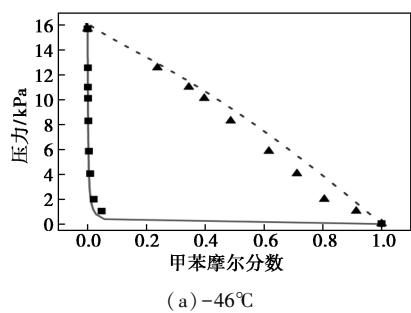
电解质溶液,选用 ELECRTL 模型描述该过程的物性。研究表明,当体系中包含水或在水中可电离的组分,且体系为非理想电解质体系时,ELECRTL 模型表现出良好的适用性和精准性<sup>[16]</sup>。SO<sub>2</sub> 和甲苯体系为弱极性真实组分体系,因此物性模型选用 RK-SOAVE。RK-SOAVE 状态方程为立方型方程,适用于任何温度及压力下的非极性或弱极性体系<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物性方法检验与参数校正

#### 2.1.1 物性方法检验

将所选物性模型与美国国家标准及技术研究所(NIST)数据库结合使用,在 Aspen Plus 软件的物性回归系统中,通过对比实验值和模拟值以确定所选物性方法是否准确<sup>[15,18]</sup>。图 3 为不同温度时,SO<sub>2</sub> 和甲苯体系的气液相平衡模拟值与实验值的对比。

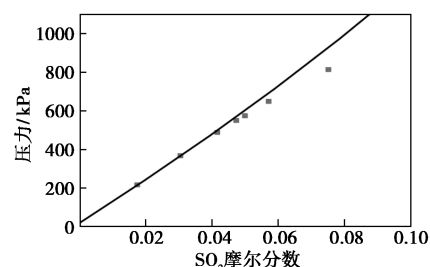


..... P-X 模拟值; —— P-Y 模拟值; ▲ —液相浓度实验值;  
■ —气相浓度实验值

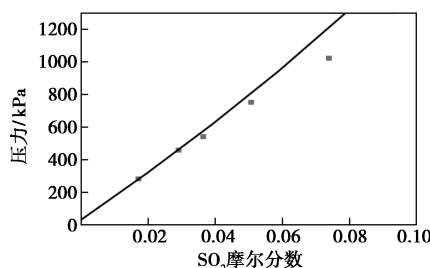
图 3 SO<sub>2</sub> 和甲苯体系的 P-X/Y 相图

结果显示,SO<sub>2</sub> 和甲苯体系在各个温度下的实验值和模拟值吻合度高,说明物性方法适用。

在温度为 60 与 70℃,模拟计算不同压力下 SO<sub>2</sub> 和水体系的气液相平衡组分,并与实验值相比较,如图 4 所示。可以看出,在不同温度下,当压力小于 303 kPa 时,SO<sub>2</sub> 和水体系的模拟值与实验值吻合度较高;但压力大于 303 kPa 时,模拟值和实验值出现较大偏差,此时所选物性方法不再适用,ELECRTL 模型需对系统中的亨利组分进行指定。此外,当压力升高时,SO<sub>2</sub> 在水中的溶解度大幅增加使原有的亨利系数不再适用,因此需要利用相应的实验数据对亨利系数进行回归校正。



(a) 60℃



(b) 70℃

■ —实验值; ——模拟值

图 4 SO<sub>2</sub> 和水体系的 P-X 相图

#### 2.1.2 亨利系数的校正

Aspen Plus 中的物性数据回归系统对比实验值和模拟值,当二者偏差较大时,通过拟合不同操作条件下的实验值,对内置物性参数进行回归,以获得更适合实际操作情况的新参数<sup>[18]</sup>。新参数保存在 Aspen Plus 中,用于相应操作条件的模拟。

Aspen Plus 模拟计算通常选择亨利常量模型来计算气体组分在混合物中的亨利系数,如式(1)~式(3):

$$\ln(H_i/\gamma_i^0) = \sum_A \omega_A \ln(H_{iA}/\gamma_{iA}^0) \quad (1)$$

$$\omega_A = x_A (V_{cA})^{2/3} / \sum_B x_B (V_{cB})^{2/3} \quad (2)$$

$$\ln H_{iA}(T, P_A^{*l}) = a_{iA} + b_{iA}/T + c_{iA} \ln T + d_{iA} T \quad (3)$$

$$T_L \leq T \leq T_H$$

式中: $H_i$  为气体组分  $i$  的亨利常量,  $\text{kPa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ ;  $H_{iA}$  为在纯溶剂 A 中气体组分  $i$  的亨利常量,  $\text{kPa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ ;  $\gamma_i^\theta$  为气体组分  $i$  的活度系数;  $\gamma_{iA}^\theta$  为在纯溶剂 A 中气体组分  $i$  的活度, 二者的值取决于活度系数模型, 本文中由 ELECNRTL 模型可得;  $\omega_A$  为组分 A 的偏心因子;  $x_A$ 、 $x_B$  分别为液相中组分 A、B 的物质的量分数;  $V_{cA}$ 、 $V_{cB}$  为组分 A、B 的临界体积,  $\text{m}^3$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $p_A^{*l}$  为组分 A 的平衡分压,  $\text{kPa}$ ;  $a_{iA}$ 、 $b_{iA}$ 、 $c_{iA}$  和  $d_{iA}$  为溶剂-溶质对的特定常数, 其值取决于特定的溶质和溶剂体系, 不同的溶质或溶剂组成也会得到不同的值, 其值从气体溶解度数据中回归得到。

$\ln H_{iA}$  与  $T$  之间的线性关系发生在界外, 得到式(4):

$$H_{iA}(T, P) = H_{iA}(T, P_A^{*l}) \exp\left[\frac{1}{RT} \int_{P_A^{*l}}^P V_{iA}^\theta dP\right] \quad (4)$$

式中: $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $P$  为压力,  $\text{kPa}$ ;  $P_A^{*l}$  为组分 A 的平衡分压,  $\text{kPa}$ ;  $R$  为理想气体常数, 其值为  $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;  $H_{iA}$  为在纯溶剂 A 中气体组分  $i$  的亨利常量,  $\text{kPa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ ;  $V_{iA}^\theta$  为在纯溶剂 A 中无限稀释的超临界组分  $i$  的偏摩尔体积,  $\text{m}^3/\text{mol}$ , 其值可从回归模型中得到。

利用 Aspen Plus 内置的亨利系数式(1)对华盛顿大学化学系<sup>[19]</sup>提供的 SO<sub>2</sub> 在水中溶解度的实验数据进行回归, 用以校正亨利系数, 式(1)中的  $\gamma_i^\theta$  来源于活度系数模型, 在本文中为建立在 NRTL 模型上的 ELECNRTL 热力学模型。利用 ELECNRTL 模型计算时, 体系的液相组成需已知, 此外, SO<sub>2</sub> 作为 SO<sub>2</sub> 和水体系中的亨利组分需满足亨利定律。因此, 必须结合 ELECNRTL 模型与亨利系数模型来回归气液平衡数据以修正亨利系数。

在数据回归系统中, 华盛顿大学化学系提供的两组 SO<sub>2</sub> 和水体系的气液相平衡组分如表 1 和表 2 所示, 利用模拟值和实验值的均方根残差 RMSR 来评价回归结果的可靠性。两组数据模拟回归后, 表 1 的 RMSR 值为 5.920 7, 表 2 为 8.678 83。对于 LLE 体系, 若 RMSR 小于 100 则回归的结果可以被接受; 而对于 VLE 体系, RMSR 小于 10 时回归结果可以被接受, 并可用作此类模拟的新参数。两组数据均满足回归要求。

将表 1 和表 2 数据得到的 SO<sub>2</sub> 和水体系的二元交互作用参数 (包括亨利方程模型参数和 ELECNRTL 活度系数模型参数) 导入到 Aspen Plus

表 1 SO<sub>2</sub> 和水体系的气液相平衡数据 1<sup>[18]</sup>

温度/ °C	压力/ kPa	$X_{\text{SO}_2}/$ (10 <sup>3</sup> )	$X_{\text{H}_2\text{O}}/$ (10 <sup>2</sup> )	$Y_{\text{SO}_2}/$ (10 <sup>2</sup> )	$Y_{\text{H}_2\text{O}}/$ (10 <sup>3</sup> )
23.20	47.47	12.11	98.79	93.96	60.35
27.20	53.53	12.11	98.79	93.24	67.63
30.00	60.60	12.11	98.79	92.96	70.44
33.00	67.67	12.11	98.79	92.50	74.97
36.00	74.74	12.11	98.79	92.01	79.93
38.20	80.80	12.11	98.79	91.65	83.48
42.20	91.91	12.11	98.79	90.88	91.25
45.20	101.00	12.11	98.79	90.36	96.43
48.20	111.10	12.11	98.79	89.76	102.43
52.00	133.32	12.11	98.79	88.66	113.41
55.30	136.35	12.11	98.79	88.21	117.91
58.40	149.48	12.11	98.79	87.50	125.04
61.20	160.59	12.11	98.79	86.78	132.20
63.00	168.67	12.11	98.79	86.36	136.35
67.20	189.88	12.11	98.79	85.31	146.95
70.80	206.04	12.11	98.79	84.23	157.68
72.40	213.11	12.11	98.79	83.63	163.71

表 2 SO<sub>2</sub> 和水体系的气液相平衡数据 2<sup>[19]</sup>

温度/ °C	压力/ kPa	$X_{\text{SO}_2}/$ (10 <sup>3</sup> )	$X_{\text{H}_2\text{O}}/$ (10 <sup>2</sup> )	$Y_{\text{SO}_2}/$ (10 <sup>2</sup> )	$Y_{\text{H}_2\text{O}}/$ (10 <sup>2</sup> )
26.80	13.13	3.06	99.69	72.74	27.26
33.60	18.18	3.06	99.69	71.10	28.90
39.40	24.24	3.06	99.69	69.91	30.09
44.20	29.29	3.06	99.69	68.06	31.94
50.60	36.36	3.06	99.69	65.12	34.88
61.60	54.54	3.06	99.69	60.37	39.63
67.40	65.65	3.06	99.69	57.34	42.66
73.40	80.80	3.06	99.69	54.78	45.22
79.20	95.95	3.06	99.69	51.97	48.03
86.40	121.2	3.06	99.69	49.31	50.69
98.40	165.64	3.06	99.69	41.55	58.45
100.60	184.83	3.06	99.69	43.59	56.41
106.60	219.17	3.06	99.69	41.10	58.91

的物性数据库中保存, 并选择 SO<sub>2</sub> 作为亨利组分, 在 Flash2 闪蒸模块中进行不同温度和压力下 SO<sub>2</sub> 和水体系的气液平衡模拟计算, 结果如图 5 所示。曲线 A 由 Aspen Plus 内置的活度系数和亨利系数得到,

曲线 B 和 C 分别由表 1 和表 2 实验数据及相应的亨利系数方程回归得到。当温度分别为 20 和 40℃ 时,由表 1 中实验数据模拟回归得到的亨利系数比系统内置参数和由表 2 得到的参数更接近实验值。因此,在温度低于 40℃ 时,可选择利用表 1 修正的亨利系数进行模拟计算。随着温度升高到 60 和 70℃ 时,相比于系统内置参数和由表 1 得到的参数,由表 2 中数据模拟回归得到的亨利系数更接近实验值。因此温度高于 60℃ 时,选用表 2 修正的亨利系数进行模拟计算。

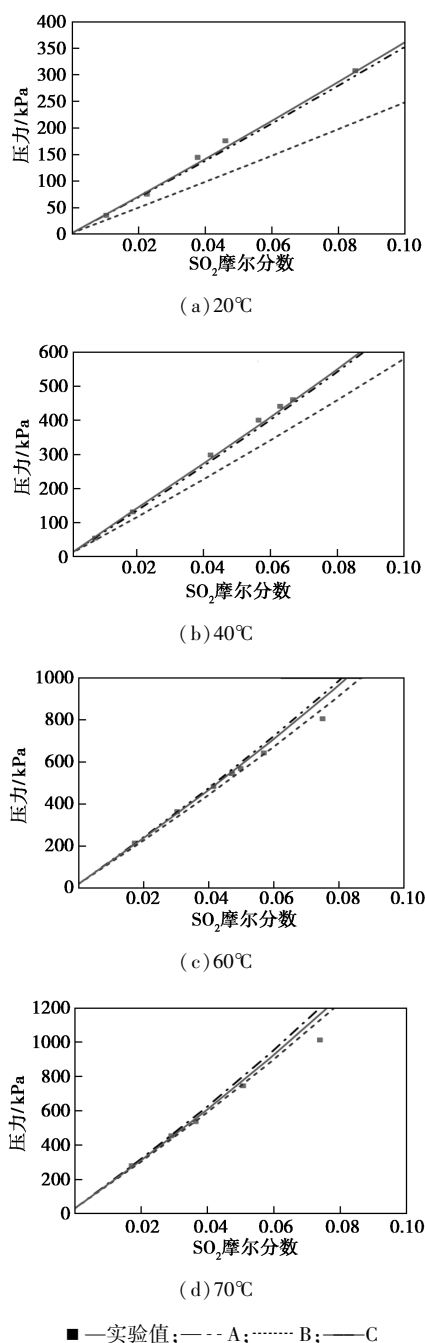


图 5 SO<sub>2</sub> 和水体系的 P-X 相图

## 2.2 SO<sub>2</sub> 溶解度模拟

根据 2.1 的研究结果,选择 Flash2 为单元操作模块,RK-SOAVE 模型为描述 SO<sub>2</sub> 和甲苯体系的物性方法。对于 SO<sub>2</sub> 和水体系的物性模型选用 ELECNRTL 模型;在温度低于 40℃ 时,选择表 1 修正的亨利系数进行模拟计算,温度高于 60℃ 时,则选用表 2 修正的亨利系数。

图 6 为不同温度(低温 20~50℃、高温 50~70℃)、压力(101~909 kPa)下,SO<sub>2</sub> 在水中的溶解度变化趋势。由图可知,整个温度范围内,SO<sub>2</sub> 在水中的溶解度均随着温度的升高而减小。当压力从 101 kPa 升高到 909 kPa 时,各个温度条件下的 SO<sub>2</sub> 溶解度成倍数增大。当温度为 20℃、压力为 909 kPa 时,SO<sub>2</sub> 的溶解度可达 111 g/100 g 水,压力对 SO<sub>2</sub> 在水中溶解度的影响更为显著。

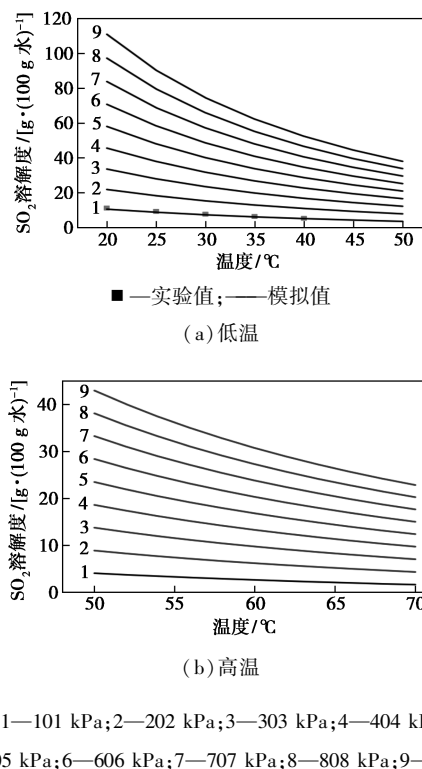
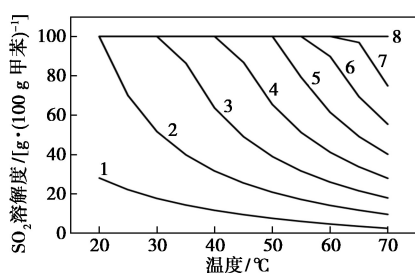


图 6 不同温度、压力下 SO<sub>2</sub> 在水中的溶解度曲线

图 7 为不同温度(20~70℃)、压力(101~808 kPa)条件下,SO<sub>2</sub> 在甲苯中的溶解度变化趋势。随着温度的升高,各压力下 SO<sub>2</sub> 的溶解度均呈现逐渐减小的趋势。当压力逐渐升高时,SO<sub>2</sub> 的溶解度逐渐增加,压力增加到 808 kPa 时,各温度条件下 SO<sub>2</sub> 的溶解度均超过 100 g/100 g 甲苯。



1—101 kPa; 2—202 kPa; 3—303 kPa; 4—404 kPa;  
5—505 kPa; 6—606 kPa; 7—707 kPa; 8—808 kPa

图7 不同温度、压力下  $\text{SO}_2$  在甲苯中的溶解度曲线

### 3 结论

利用 Aspen Plus 软件对多相 Bunsen 反应中  $\text{SO}_2$  在水和甲苯中的溶解进行了模拟研究,通过灵敏度分析预测了不同温度和压力条件下各二元体系的溶解度,得到如下结论:

(1)不同温度及压力下 RK-SOAVE 模型可准确描述  $\text{SO}_2$  和甲苯体系的物性。对于  $\text{SO}_2$  和水体系,当温度和压力较高时,模拟值和实验值的偏差较大,需校正系统内置的亨利系数并指定亨利组分。

(2)利用  $\text{SO}_2$  和水的气液相平衡数据,结合 ELECNRTL 模型与亨利系数方程在 Aspen Plus 的数据回归系统中校正亨利系数,得到不同温度下校正后的亨利系数。

(3) $\text{SO}_2$  在水中的溶解度随温度的升高而减小,随压力的升高而增大,压力的影响效果更显著。 $\text{SO}_2$  在甲苯中的溶解度随温度和压力的变化趋势与水类似,当压力达到 808 kPa 时,溶解度可超过 100 g/100 g 甲苯。

### 参考文献

- [1] Rezaei F, Rownaghi A A, Monjezi S, *et al.*  $\text{SO}_x/\text{NO}_x$  Removal from flue gas streams by solid adsorbents: A review of current challenges and future directions [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29 (9): 5467–5486.
- [2] Habeeb O A, Kanthasamy R, Ali G M, *et al.* Hydrogen sulfide emission sources, regulations, and removal techniques: A review [J]. *Rev Chem Eng*, 2018, 34 (6): 837–854.
- [3] Gupta A K, Ibrahim S, Al Shoaibi A. Advances in sulfur chemistry for treatment of acid gases [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 54: 65–92.
- [4] Wang H. Hydrogen production from a chemical cycle of  $\text{H}_2\text{S}$  splitting [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32: 3907–3914.
- [5] Li J, Moniri A, Wang H. Apparent kinetics of a gas-liquid-liquid system of Bunsen reaction with iodine-toluene solution for hydrogen production through  $\text{H}_2\text{S}$  splitting cycle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40 (7): 2912–2920.
- [6] Noman J, Besenbruch G E, Brown L C, *et al.* Thermo-chemical water splitting cycle, benchscale investigations, and process engineering: GAA16713 [R]. Washington DC: General Atomics, 1982.
- [7] Zhang K, Bao W R, Chang L P, *et al.* A review of recent researches on Bunsen reaction for hydrogen production via S-I water and  $\text{H}_2\text{S}$  splitting cycles [J]. *J Energy Chem*, 2019, 33: 46–58.
- [8] Wang H, Le Person A, Zhao X, *et al.* A low-temperature hydrogen production process based on  $\text{H}_2\text{S}$  splitting cycle for sustainable oil sands bitumen upgrading [J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 108: 55–62.
- [9] Norman J H, Besenbruch G E, Brown L C, *et al.* Thermo-chemical water-splitting cycle, benchscale investigations, and process engineering, final report for the period February 1977 through December 31, 1981 [R]. General Atomics, 1982.
- [10] 马俊海. 康宁微通道反应器技术—强化传质传热, 绿色连续合成 [C]//中国化工学会橡塑产品绿色制造专业委员会微通道反应技术研讨和产业化推进会论文集, 2016.
- [11] 朱丽华, 李波. Aspen Plus 在循环冷却水系统中的应用 [J]. *河南科技*, 2016, (5): 32–35.
- [12] 何光洪, 邱方利, 林可洪, 等. Aspen Plus 在化工设计物料衡算中的应用 [J]. *化工时刊*, 2012, 26 (7): 59–60.
- [13] 朱登磊, 谭超, 尚书勇, 等. 利用 Aspen Plus 计算和预测物质的溶解度 [J]. *计算机与应用化学*, 2014, 31 (5): 575–577.
- [14] 王红蕊, 沙作良, 王彦飞, 等. Aspen Plus 在无机盐工艺开发与设计中的应用—六水氯化镁生产过程的模拟 [J]. *天津科技大学学报*, 2014, 29 (3): 70–72.
- [15] 孙兰义. 化工过程模拟实训: Aspen Plus 教程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 35–38.
- [16] 包宗宏, 武文良. 化工计算与软件应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [17] 李庆国, 汪和睦, 李敏. 分子生物物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 77–81.
- [18] 杨佳宁. 电子级四氯化硅精馏系统的模拟节能与工艺研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [19] Beuschlein W L, Simenson L O. Solubility of sulfur dioxide in water [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1940, 62 (3): 610–612. ■