



HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系相平衡数据测定及关联

郑争志^{1,2}, 刘雅婷¹, 崔鹏^{1*}

(1. 合肥工业大学化学与化工学院, 可控化学与材料化工安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽大学化学化工学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 采用浊点法和相组分分析法测定了不同温度下 N,N'-二(2-羟丙基)哌嗪(HPP)-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系的双节线和相平衡数据, 并分别采用多项式、经验方程、有效体积排除法模型和 NRTL 模型对双节线数据和相平衡数据进行了关联。结果表明, 经验方程对双节线数据关联的吻合度高于多项式方程和有效体积排除法模型, 且 NRTL 模型能很好关联该双水相相平衡数据。除忽略可填充体积分数 f_{213} 的有效体积排除法模型外, 其余方程和模型的关联参数均能满足实际计算和工程应用。

关键词: N,N'-二(2-羟丙基)哌嗪; 双水相; 双节线数据; 液液相平衡; NRTL 模型

中图分类号: TQ013.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)03-0557-06

Measurement Data and Correlation of Liquid-Liquid Equilibria for Aqueous Two-phase Systems of HPP-Na₂SO₃-H₂O

Zhengzhi ZHENG^{1,2}, Yating LIU¹, Peng CUI^{1*}

(1. School of Chemistry & Chemical Engineering, Anhui Key Laboratory of Controllable Chemistry Reaction & Material Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

2. School of Chemistry & Chemical Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: The binodal and liquid-liquid equilibrium data of the 1,4-bis-(2-hydroxypropyl)-piperazine (HPP)-Na₂SO₃-H₂O system at different temperatures were determined by cloud point method and phase component analysis method respectively. The binodal data were fitted by polynomial equation, empirical equations and effective excluded volume theory models respectively and the liquid-liquid equilibrium data were fitted by NRTL model. The results showed that empirical equations can provide better correlations for the binodal data than the polynomial equation and the effective excluded volume theory ones, and the NRTL model was suitable for the liquid-liquid equilibrium relationship of HPP-Na₂SO₃-H₂O. Except the effective excluded volume theory model neglecting volume fraction f_{213} , the parameters of equations and models were consistent with the actual calculation and engineering application requirements.

Key words: 1, 4-bis-(2-hydroxypropyl)-piperazine; aqueous two-phase system; binodal data; liquid-liquid equilibria; NRTL model

1 前言

双水相体系分离萃取作为一种新型分离技术, 具有设备投资费用少、体系含水量高、不使用有机溶剂、操作简单、易放大可快速进入工业生产阶段等优点^[1,2]。双水相体系高效温和, 不易引起生物活性物质变性失活, 近几年国内外科科研人员将其用于细胞器^[3]、蛋白质与 DNA^[4,5]、金属离子^[6]、有机物^[7,8]等的分离提纯。

N,N'-二(2-羟丙基)哌嗪(HPP)为小分子有机化合物, 是一种新型有机胺可再生脱硫剂^[9], 急性毒性试验表明属低毒类。与目前研究较多的聚乙二醇形成的双

水相相比, HPP 与盐形成的双水相粘度更低^[9,10], 有利于分离过程的扩散和传质。Na₂SO₃ 或 NaHSO₃ 形成的双水相在食品工业分离中受到关注^[11-13]。HPP 与 Na₂SO₃ 形成的双水相 pH 值约为 10, 适用于在弱碱性条件下稳定物质的萃取与分离。

HPP 吸收剂吸收解吸 SO₂ 气体过程中, 烟气灰尘引入的 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻ 和 K⁺ 等离子会随吸收剂循环次数增加而累积甚至结晶, 影响吸收剂的效果和寿命。HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系可有效分离杂质离子且不引入新杂质。研究双水相体系双节线及液液相平衡可获得双水相形成的浓度及上下相的平衡组成, 对双水相

收稿日期: 2017-08-25, 修回日期: 2017-11-13

基金项目: 安徽省重点科技攻关项目(编号: 08010202124)

作者简介: 郑争志(1984-), 女, 河北省东光县人, 博士研究生, 材料化学工程专业; 崔鹏, 通讯联系人, E-mail: cuipeng@hfut.edu.cn.

引用格式: 郑争志, 刘雅婷, 崔鹏. HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系相平衡数据测定及关联. 过程工程学报, 2018, 18(3): 557-562.
Zheng Z Z, Liu Y T, Cui P. Measurement Data and Correlation of Liquid-Liquid Equilibria for Aqueous Two-phase Systems of HPP-Na₂SO₃-H₂O (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 557-562, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217312.

体系的分离应用十分重要. 本工作测定了烟气脱硫剂常用吸收温度 30, 40 和 50 °C 下 HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相的双节线数据和液液相平衡数据, 并用模型进行了关联.

2 实验

2.1 实验试剂

HPP 根据文献[14]方法自制, 重结晶后使用, 纯度大于 99.0%. 无水亚硫酸钠、氢氧化钠、盐酸、碘、可溶性淀粉均购于国药集团化学试剂有限公司, 除可溶性淀粉为化学纯外其余药品均为分析纯. 实验用水为二次蒸馏水.

2.2 实验仪器

KAICC 超级恒温水浴槽(艾卡仪器设备有限公司), AL104 电子分析天平和 FE20 数显 pH 计(梅特勒-托利多仪器上海有限公司).

2.3 实验方法

2.3.1 浊点法测定双节线数据

准确称量约 10 g HPP 置于双层夹套玻璃恒温容器中, 加入 10.00 mL 蒸馏水, 充分搅拌溶解. 加入一定量无水 Na₂SO₃ 固体充分溶解, 溶液变浑浊, 用滴定管滴入蒸馏水至溶液恰好澄清, 记录加入的无水 Na₂SO₃ 质量和蒸馏水体积, 计算 HPP 和 Na₂SO₃ 的浓度. 重复以上操作至新加入的无水 Na₂SO₃ 不再溶解.

2.3.2 两相相平衡数据的测定

将准确称量的 Na₂SO₃、水和 HPP 以一定配比加入带夹套的恒温玻璃装置中, 搅拌 1 h 后静置 3 h. 用注射器分别抽取上下两相溶液, Na₂SO₃ 含量用碘量法^[15]测定, HPP 含量用电位滴定法^[16]测定.

3 结果与讨论

3.1 双水相体系双节线数据及其关联

3.1.1 双节线数据

浊点法测定的 30, 40 和 50 °C 下 HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系双节线数据如图 1 所示. w_1 为 HPP 浓度, w_2 为 Na₂SO₃ 质量含量. 从图可看出, 30~50 °C 范围内温度对 HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系双节线曲线影响不大, 临界 HPP 和临界 Na₂SO₃ 浓度随温度变化较小.

3.1.2 经验方程式关联

双节线数据可采用式(1)关联^[10]. 为了提高对数据的拟合程度, Merchuk 等^[17]基于重量分析法构建了式(2). 非线性经验方程式(3)~(5)成功关联了聚合物-盐、离子液体-盐双水相体系的双节线数据^[18-20].

$$w_1=a+bw_2+cw_2^2, \tag{1}$$

$$w_1=a\exp(bw_2^{0.5}-cw_2^3), \tag{2}$$

$$w_1=a+bw_2^{0.5}+cw_2+dw_2^2, \tag{3}$$

$$w_1=\exp(a+bw_2^{0.5}+cw_2+dw_2^2), \tag{4}$$

$$w_1=a\exp(bw_2)+c\exp(dw_2). \tag{5}$$

式中, a ~ d 为关联参数.

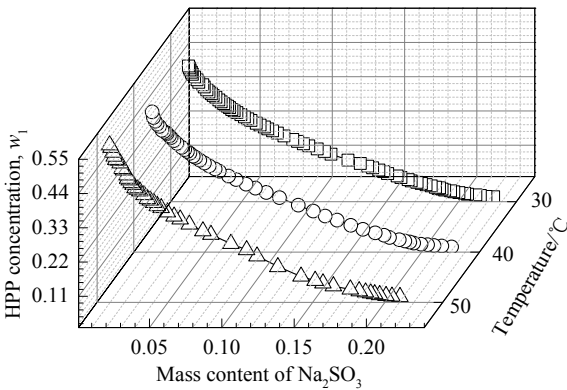


图 1 HPP-Na₂SO₃-H₂O 双节线
Fig.1 Binodal curves of HPP-Na₂SO₃-H₂O

表 1 双节线数据关联参数

Table 1 Equations parameters fitted from binodal data						
Temperature, T/°C	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²	Equation
30	0.4580	-3.5380	7.3110		0.9939	(1)
40	0.4734	-3.7341	7.7975		0.9954	
50	0.5165	-4.6465	11.2656		0.9898	
30	0.6731	-3.7102	140.3588		0.9997	(2)
40	0.6849	-3.6567	161.9243		0.9996	
50	0.7645	-4.1143	172.2800		0.9991	
30	0.6250	-1.7753	1.2541	-1.0290	0.9994	(3)
40	0.6204	-1.5838	0.5892	0.1600	0.9990	
50	0.7186	-2.3597	2.1991	-1.8819	0.9981	
30	-0.1235	-7.5370	14.5227	-64.4912	0.9996	(4)
40	-0.0907	-7.7266	15.6657	-72.0513	0.9996	
50	0.0168	-8.4275	17.2962	-80.2072	0.9995	
30	0.2501	-10.9978	0.2501	-10.9982	0.9937	(5)
40	0.2581	-11.3275	0.2582	-11.3279	0.9931	
50	0.2780	-12.5748	0.2780	-12.5733	0.9931	

分别用式(1)~(5)对 HPP-Na₂SO₃-H₂O 双节线数据进行关联, 关联参数和系数 R^2 如表 1 所示. 从表可看出各式均可很好关联 HPP-Na₂SO₃-H₂O 在 30, 40 和 50 °C 下的双节线数据. 式(2)~(4)的关联结果优于式(1), 式(2)和(4)关联效果更好, $R^2>0.999$, 式(2)采用 3 个关联参数, 比采用 4 个关联参数的式(4)更方便计算.

3.1.3 有效体积排除法模型关联

Guan 等^[21]基于统计几何方法提出了有效体积排除法模型, 用于关联高聚物-高聚物双水相体系, 近年来不少学者将其应用于其它双水相体系的模拟^[22-24]:

$$\ln\left(V_{213}^* \frac{w_2}{M_2} + f_{213}\right) + V_{213}^* \frac{w_1}{M_1} = 0, \tag{6}$$

$$\ln\left(V_{213}^* \frac{w_2}{M_2}\right) + V_{213}^* \frac{w_1}{M_1} = 0, \tag{7}$$

式中, f_{213} 为 Na₂SO₃ 与 HPP 在溶液中紧密排布后仍存在的可填充体积分数及水分子体积的影响, V_{213}^* 为 Na₂SO₃ 的有效排除体积, M_1 为 HPP 的分子量, M_2 为 Na₂SO₃ 的分子量.

通过对图 1 中双节线数据的关联, 分别计算 V_{213}^* ,

f_{213} 和 R^2 , 结果如表 2 所示. 由表可知, 式(6)的关联结果较好, 这是因为有效排除体积法模型基于反映组分间相容性的理论^[25]. 两种分子体积相差很大, 将导致在溶液中紧密排布后可填充的体积分数很小, f_{213} 可忽略不计. HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系中, HPP 为小分子有机物, 分子体积更接近 Na₂SO₃ 和水, Na₂SO₃ 与 HPP 在溶液中紧密排布后的体积分数较大.

表 2 有效排除体积法关联参数
Table 2 Correlation parameters for effective excluded volume model

Temperature, T/°C	V_{213}^*	f_{213}	R^2	Equation
30	363.096 4	0.449 9	0.984 7	(6)
40	405.413 3	0.392 9	0.989 2	
50	519.943 5	0.259 7	0.986 3	
30	880.660 4		0.694 8	(7)
40	887.242 6		0.769 3	
50	909.011 5		0.846 6	

3.2 双水相体系液液相平衡数据及关联

3.2.1 液液相平衡数据

30, 40 和 50 °C 下 HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系液液相平衡数据如表 3 所示.

表 3 HPP-Na₂SO₃-H₂O 双水相体系相平衡数据
Table 3 Equilibrium data of HPP-Na₂SO₃-H₂O

No.	Temperature, T/°C	Top phase		Bottom phase	
		HPP concentration, w ₁ /wt%	Na ₂ SO ₃ concentration, w ₂ /wt%	HPP concentration, w ₁ /wt%	Na ₂ SO ₃ concentration, w ₂ /wt%
1	30	30.51	4.89	10.74	14.46
2		33.03	4.08	7.89	16.38
3		36.44	3.01	5.59	18.32
4		39.54	2.34	4.41	20.18
5		42.47	1.93	2.61	21.72
1	40	29.14	5.01	10.82	12.97
2		33.19	3.86	7.12	15.46
3		36.96	2.75	5.41	16.91
4		39.95	2.38	3.10	18.77
5		42.72	2.03	2.16	20.07
1	50	29.81	5.43	10.48	12.89
2		34.86	3.30	8.08	14.52
3		41.54	2.47	4.83	16.56
4		46.23	1.95	2.68	18.22
5		51.23	1.51	2.67	20.06

3.2.2 相平衡数据的验证

采用 Othmer-Tobias 方程^[26]验证相平衡数据的准确性:

$$\ln\left(\frac{1-w_2^b}{w_2^b}\right) = n + k \ln\left(\frac{1-w_1^t}{w_1^t}\right), \tag{8}$$

式中, w_1^t 为上水相中 HPP 浓度, w_2^b 为下水相中 Na₂SO₃ 浓度, n 和 k 为 Othmer-Tobias 方程参数.

液液相平衡数据用式(8)关联结果见图 2, 参数 n , k 及 R^2 见表 4. 可以看出, 相关系数 R^2 均接近 1, 实验结果可靠.

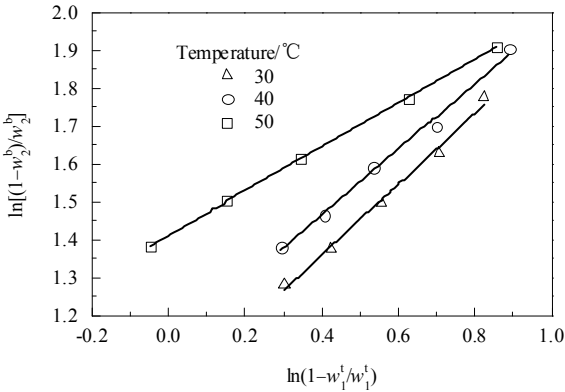


图 2 Othmer-Tobias 方程关联结果
Fig.2 Correlation results by Othmer-Tobias equation

表 4 Othmer-Tobias 方程参数和拟合度
Table 4 Othmer-Tobias equation parameters and R^2

Temperature, $T/^\circ\text{C}$	n	k	R^2
30	0.9814	0.9424	0.9906
40	1.1200	0.8650	0.9910
50	1.4135	0.5803	0.9997

3.2.3 NRTL 模型关联

萃取分离过程中常用萃取分配系数表征达到相平衡时被萃取物质在上下两相中的浓度比,而液液相平衡关系可通过组分在两相中的活度系数描述.活度系数可由活度系数模型及其二元交互作用参数计算.根据常用液液相平衡活度系数模型的适用范围^[27],NRTL 模型适用于 HPP- Na_2SO_3 - H_2O 双水相体系.NRTL 模型认为组分为 m 的混合物的过量 Gibbs 自由能 g^E 为

$$\frac{g^E}{RT} = \sum_{i=1}^m x_i \frac{\sum_{j=1}^m \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{l=1}^m G_{li} x_l}, \quad (9)$$

其中, $\tau_{ji} = (g_{ji} - g_{ii}) / RT$, $\tau_{ii} = 0$, $G_{ji} = \exp(-\alpha_{ji} \tau_{ji})$.

组分 i 的活度系数方程为

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^m \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{l=1}^m G_{li} x_l} + \sum_{j=1}^m \frac{x_j G_{ij}}{\sum_{l=1}^m G_{lj} x_l} \left[\tau_{ij} - \frac{\sum_{r=1}^m x_r \tau_{rj} G_{rj}}{\sum_{l=1}^m G_{lj} x_l} \right], \quad (10)$$

其中, τ_{ji} 为二元交互作用参数,组分 j 和 i 之间的交互作用能量参数 $g_{ji} = g_{ij}$,与混合物非自由度相关的可调特性常数 $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$,可取固定值或根据实验数据拟合^[28].

对表 3 中 HPP- Na_2SO_3 - H_2O 双水相体系液液相平衡数据用 NRTL 方程二元交互参数 τ_{ji} 和可调特性常数 α_{ij} 关联,结果如表 5 和图 3 所示.

表 5 NRTL 方程关联参数

Table 5 The associated parameters of the NRTL model			
Temperature, $T/^\circ\text{C}$	30	40	50
τ_{12}	-0.1869	-0.4878	16.1354
τ_{21}	116.9513	935.1402	5.1919
τ_{13}	-61.9073	-6.0994	1.2752
τ_{31}	190.5448	83.7511	3.8814
τ_{23}	165.7800	102.8307	600.58378
τ_{32}	205.0785	172.0879	14.9851
α_{12}	1.2905	0.0061	-0.2331
α_{13}	0.0074	0.0160	0.5485
α_{23}	0.0111	0.0113	0.0028
R^2	0.9906	0.9891	0.9952

从图 3 可看出,在实验温度范围内,除 $\tau_{\text{HPP}-\text{Na}_2\text{SO}_3}$ 和 $\tau_{\text{HPP}-\text{H}_2\text{O}}$ 外,其余二元交互作用参数 τ_{ji} 均大于 0,表明 Na_2SO_3 和 H_2O 分别与体系中其它分子的交互能量参数 g_{ji} 大于自身交互能量参数 g_{ii} . $\tau_{\text{HPP}-\text{Na}_2\text{SO}_3}$ 和 $\tau_{\text{HPP}-\text{H}_2\text{O}}$ 随

温度升高而增大,30 和 40 $^\circ\text{C}$ 下均为负值,50 $^\circ\text{C}$ 下均为正值,表明在 40~50 $^\circ\text{C}$ 范围内存在相应的温度使 HPP 对 Na_2SO_3 和 H_2O 的交互能量参数 g_{ji} 分别与 Na_2SO_3 和 H_2O 各自的自身交互能量参数 g_{ii} 相等. $\tau_{\text{HPP}-\text{Na}_2\text{SO}_3}$ 和 $\tau_{\text{HPP}-\text{H}_2\text{O}}$ 随温度升高而增大, $\tau_{\text{H}_2\text{O}-\text{HPP}}$ 和 $\tau_{\text{H}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{SO}_3}$ 随温度升高而减小,这是因为分子间的交互能量参数 g_{ji} 会随温度改变,当某种分子对异种分子的交互能量参数 g_{ji} 随温度的变化率与自身的交互能量参数 g_{ii} 变化率的变化趋势一致时,产生该结果. $\tau_{\text{Na}_2\text{SO}_3-\text{HPP}}$ 和 $\tau_{\text{Na}_2\text{SO}_3-\text{H}_2\text{O}}$ 在 40 $^\circ\text{C}$ 时分别出现最大值和最小值,可能是因为 Na_2SO_3 分子分别对 HPP 和 H_2O 分子的交互能量参数 g_{ji} 随温度的变化率较大,且在约 40 $^\circ\text{C}$ 时分别出现最大值和最小值,而自身的交互能量参数 g_{ii} 随温度的变化率较小, $\tau_{\text{Na}_2\text{SO}_3-\text{HPP}}$ 和 $\tau_{\text{Na}_2\text{SO}_3-\text{H}_2\text{O}}$ 出现图 3 中的变化趋势,与 NRTL 模型理论^[28]一致.

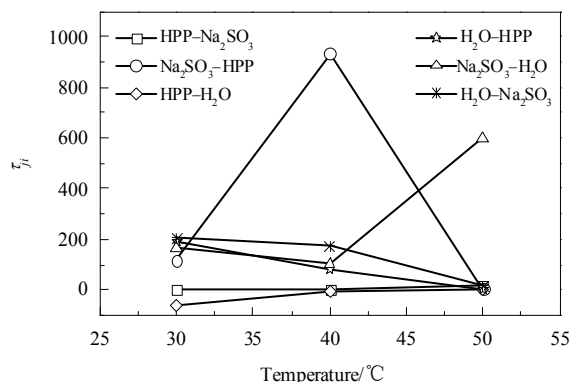


图 3 NRTL 参数随温度的变化

Fig.3 NRTL parameter as a function of temperature

NRTL 模型与实验值的对比如图 4 所示,可看出,计算结果与实验值吻合很好,关联系数 R^2 高,表明 NRTL 模型适用于 HPP- Na_2SO_3 - H_2O 体系,可通过模型参数预测该体系相平衡组成.

4 结论

分别采用经验方程、多项式方程和有效体积排除法双节线模型关联了 30, 40 和 50 $^\circ\text{C}$ 下 $\text{N,N}'$ -二(2-羟丙基)哌嗪(HPP)- Na_2SO_3 - H_2O 双水相体系的双节线数据,并采用 NRTL 模型关联了液液相平衡数据,得到以下结论:

(1) 经验方程和多项式方程模拟的相关系数 R^2 均接近 1,基于重量分析法构建的经验方程式 R^2 均大于 0.999.

(2) 忽略可填充体积分数 f_{213} 的有效体积排除法双节线模型对由小分子组成的 HPP- Na_2SO_3 - H_2O 双水相

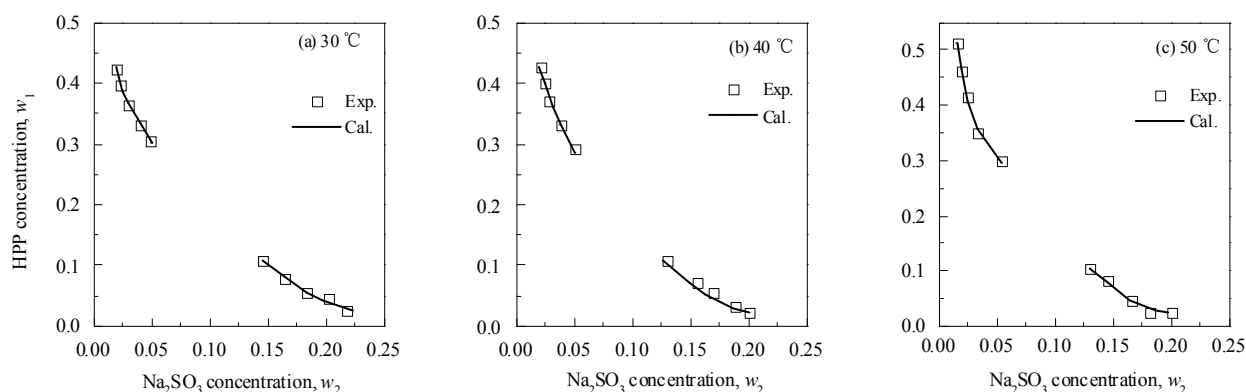


图4 实验值和计算值的对比

Fig. 4 Comparison of calculated data and experimental data

体系的关联效果不理想, R^2 均低于 0.85.

(3) NRTL 模型适用于 HPP- Na_2SO_3 - H_2O 双水相体系液液相平衡关联, R^2 均接近 1, 可用于预测该双水相体系相平衡组成.

参考文献:

- [1] Zhang Y Q, Sun T C, Hou Q X, et al. A Green Method for Extracting Molybdenum(VI) from Aqueous Solution with Aqueous Two-phase System without any Extractant [J]. Sep. Purif. Technol., 2016, 169(1): 151–157.
- [2] Gabriella A B, Luciana P S, Jussara A P, et al. A Method for Dye Extraction Using an Aqueous Two-phase System: Effect of Co-occurrence of Contaminants in Textile Industry Wastewater [J]. J. Environ. Manage., 2016, 183: 196–203.
- [3] Santesson S, Ramirez I B R, Viberg P, et al. Affinity Two-phase Partitioning in Acoustically Levitated Drops [J]. Anal. Chem., 2004, 76(2): 303–308.
- [4] Xu K, Wang Y, Huang Y, et al. A Green Deep Eutectic Solvent-based Aqueous Two-phase System for Protein Extracting [J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 864(3): 9–20.
- [5] Everberg H, Clough J, Henderson P, et al. Isolation of *Escherichia coli* Inner Membranes by Metal Affinity Two-phase Partitioning [J]. J. Chromatogr. A, 2006, 1118(2): 244–252.
- [6] Chen Y, Deng Y, Meng Y, et al. Partitioning Equilibria and Thermodynamics of Gallium, Indium, and Thallium in Aqueous Two-phase Systems [J]. J. Chem. Eng. Data, 2015, 60(5): 1464–1468.
- [7] Burcu T, Berna K, Leman T. Partitioning and Purification of Menadione Induced NAD(P)H Oxidase from *Phanerochaete chrysosporium* in Aqueous Two-phase Systems [J]. Sep. Purif. Technol., 2016, 163(2): 275–281.
- [8] Carlos E A P, Paulo V F D, Francisco C S J, et al. Recovery and Concentration of Ortho-phenylphenol from Biodesulfurization of 4-Methyl Dibenzothiophene by Aqueous Two-phase Flotation [J]. Sep. Purif. Technol., 2017, 176(4): 306–312.
- [9] Cui P, Wang T, Chen Y, et al. Density, Viscosity, and Surface Tension of Aqueous Solution of 1,4-bis-(2-hydroxypropyl)-piperazine Sulfate [J]. J. Chem. Eng. Data, 2013, 58(12): 3327–3331.
- [10] Barbosa A A, Bonomo R C F, Martins C V, et al. Equilibrium Data and Physical Properties of Aqueous Two Phase Systems Formed by PEG (1500 and 4000) $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ +Sodium Sulfate+Water at Different Temperatures and pH 2 [J]. J. Chem. Eng. Data, 2016, 61(1): 3–11.
- [11] Bonifacio P L, Aguiar C D, Alvarenga B G, et al. Phase Diagrams for Liquid-Liquid Equilibrium of Aqueous Two-phase System Containing Poly(ethylene glycol) (4000, 6000, or 10 000 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ +Sodium Hydrogen Sulfite+Water) at Different Temperatures [J]. J. Chem. Eng. Data, 2016, 61(6): 2062–2070.
- [12] Alvarenga B G, Virtuoso L S, Lemes N H T, et al. Measurement and Correlation of the Phase Equilibrium of Aqueous Two-phase Systems Composed of Polyethylene(glycol) 1500 or 4000+Sodium Sulfite+Water at Different Temperatures [J]. J. Chem. Eng. Data, 2014, 59(2): 382–390.
- [13] Virtuoso L S, Vello K A S F, Oliveira A A D, et al. Measurement and Modeling of Phase Equilibrium in Aqueous Two Phase Systems: L35+Sodium Citrate+Water, L35 Sodium Tartrate+Water, and L35+Sodium Hydrogen Sulfite+Water at Different Temperatures [J]. J. Chem. Eng. Data, 2012, 57(2): 462–468.
- [14] 刘清安. 可再生胺湿法烟气脱硫的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010: 39.
- [15] Liu Q A. Application of Regeneration Amines in Wet Flue Gas Desulfurization [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010: 39.
- [16] 国家环境保护总局. 固定污染源排气中二氧化硫的测定—碘量法: HJ/T 56-2000 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [17] State Environmental Protection Administration. Determination of Sulphur Dioxide from Exhausted Gas of Stationary Source—Lodine Titration Method: HJ/T 56-2000 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [18] 程浩. 无机离子对 HPP- SO_2 吸收体系的影响与分离研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 14–15.
- [19] Cheng H. Effect and Separation of inorganic ions on HPP- SO_2 adsorption system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016: 14–15.
- [17] Merechuk J C, Andrews B A, Asenjo J A. Aqueous Two-phase Systems for Protein Separation Studies on Phase Inversion [J]. J. Chromatogr. B, 1998, 711(1/2): 285–293.
- [18] Santos P L, Santos L N S, Ventura S P M, et al. Recovery of Capsaicin from Capsicum Frutescens by Applying Aqueous Two-phase Systems Based on Acetonitrile and Cholinium-based Ionic Liquids [J]. Chem. Eng. Res. Des., 2016, 112(8): 103–112.

- [19] Morandeiral L, Deive F J, Sanroman M A, et al. Aqueous Two-phase Systems Containing Imidazolium Ionic Liquids and a Tween Surfactant [J]. *J. Chem. Thermodynamics*, 2017, 105: 209–216.
- [20] Milosevic M, Staal K J J, Schuur B, et al. Experimental Data and Thermodynamic Modeling of Ternary Aqueous Biphasic Systems of EO/PO Polymers–Na₂SO₄–H₂O [J]. *Fluid Phase Equilib.*, 2014, 366(2): 45–56.
- [21] Guan Y, Lillry T H, Treery T E. A New Excluded Volume Theory and Its Application to the Coexistence Curves of Aqueous Polymer Two-phase Systems [J]. *Macromolecules*, 1993, 26(15): 3971–3979.
- [22] Regupathi I, Monteiro S L. 1-Hexyl-3-methylimidazolium Chloride-potassium Carbonate Aqueous Two Phase System: Equilibrium Characteristics and BSA Partitioning Behavior [J]. *J. Dispersion Sci. Technol.*, 2014, 35(3): 31–35.
- [23] Taha M, Teng H L, Lee M J. Separation of Tetrahydrofuran, 1,3-Dioxolane, or 1,4-Dioxane from Their Aqueous Solutions Using EPPS Buffer at 298.15 K [J]. *Sep. Purif. Technol.*, 2013, 105(5): 33–40.
- [24] Lu Y, Cong B, Han J, et al. Measurement and Correlation of Phase Equilibria in Aqueous Two-phase Systems Containing Polyoxyethylenecetyl Ether and Potassium Salt at Different Temperatures [J]. *J. Chem. Eng. Data*, 2015, 60(4): 1193–1201.
- [25] Othmer D F, Tobias P E. Tie-line Correlation [J]. *Ind. Eng. Chem.*, 1942, 34(6): 693–696.
- [26] Iyyaswami R, Shanon L M. 1-Hexyl-3-methylimidazolium Chloride-potassium Carbonate Aqueous Two Phase System: Equilibrium Characteristics and BSA Partitioning Behavior [J]. *J. Dispersion Sci. Technol.*, 2014, 35(3): 418–427.
- [27] 许文. 高等化工热力学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2004: 183–184.
- Xu W. *Advanced Chemical Engineering Thermodynamics* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004: 183–184.
- [28] Renon H, Prausnitz J M. Local Compositions in Thermodynamic Excess Function for Liquid Mixtures [J]. *AIChE J.*, 1968, 14(1): 135–144.