• 研究论文 •

DEA-CO₂ 水溶液的表面张力研究

付 东* 王兰芬 吴湘铖

(华北电力大学环境科学与工程学院 保定 071003)

摘要 用全自动表面张力仪测定了 293.15~323.15 K 温度范围内, 具有不同 CO₂ 载荷的二乙醇胺(Diethanolamine, DEA)水溶液的表面张力, 提出了适宜表达 DEA-CO₂ 水溶液表面张力的热力学模型, 计算结果与实验值吻合良好. 在实验测定和理论计算的基础上, 阐明了温度、DEA 浓度和 CO₂ 载荷对 DEA-CO₂ 水溶液表面张力的影响规律.

关键词 二乙醇胺; 水溶液; CO₂ 载荷; 表面张力

Investigation of the Surface Tension for Diethanolamine-CO₂ Aqueous Solutions

Fu, Dong* Wang, Lanfen Wu, Xiangcheng

(School of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003)

Abstract In this work, the surface tensions of carbonated diethanolamine (DEA) aqueous solutions from 293.15 to 323.15 K were measured by using an automatic surface tension meter. A thermodynamic model applicable for the surface tensions of carbonated DEA aqueous solution was proposed and the calculated results agreed well with experiments. The influences of temperature, DEA concentration and CO₂ loading were demonstrated on the basis of experiments and theoretical calculations.

Keywords DEA; aqueous solution; CO₂ loading; surface tension

我国是全球最大的煤炭生产和消费国, 在一次能源结构中, 煤炭比例约占 2/3 以上. 以煤炭为主的能源结构导致 CO₂ 大量排放. CO₂ 减排已成为我国实施可持续发展战略的重要组成部分, 而碳捕集是减排的关键. 近年来, 基于物理和化学原理的烟气中 CO₂ 捕集方法, 如吸收法^[1~3]、吸附法^[4~6]、膜法^[7~9]和水合物法^[10~13]已引起广泛关注.

在众多的 CO₂ 捕集方法中, 化学吸收法利用吸收剂与 CO₂ 反应达到捕集 CO₂ 的目的, 并通过加热对吸收剂进行再生, 是最有效的 CO₂ 捕集方法之一. 醇胺溶液吸收^[1]和碳酸盐溶液吸收^[2]是当前化学吸收的主要方法, 均具有技术成熟、吸收量大、操作成本较低等优点, 适

宜大规模商业化分离, 特别是在天然气和炼厂气 CO₂ 分离方面, 醇胺法处于主导地位. 随着华能北京热电厂和华能上海石洞口第二电厂 CO₂ 捕集示范工程的展开, 在火电厂 CO₂ 减排领域, 醇胺溶液吸收法也将占据举足轻重的地位. 在常用醇胺如乙醇胺(Monoethanolamine, MEA)、二乙醇胺(Diethanolamine, DEA)和 *N*-甲基二乙醇胺(*N*-methyldiethanolamine, MDEA)中, DEA 具有吸收速度快、溶液成本低和容易回收等特点而得到广泛应用, 在吸收工艺中, 既可单独使用 DEA 水溶液, 也可在其它吸收液(如 MDEA 水溶液或 K₂CO₃ 水溶液)中加入 DEA, 以增强吸收效果.

CO₂ 醇胺吸收工艺的关键参数中, 表征吸收能力的

* E-mail: fudong@tsinghua.org.cn

Received May 24, 2011; revised August 20, 2011; accepted September 20, 2011.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21076070) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Nos. 09MG13, 11ZG10).

国家自然科学基金(No. 21076070)和中央高校基本业务费专项资金(Nos. 09MG13, 11ZG10)资助项目.

溶解度参数已有大量的实验和理论研究^[14~24], 但与强化传质相关的表面张力的研究相对较少^[25~32]. 表面张力是控制气-液传质过程的重要参数, 对 CO₂ 吸收效果有重要影响. 如在吸收塔中, 从塔顶贫液到塔底富液, 表面张力随 CO₂ 载荷(CO₂-loading, mol CO₂/mol 醇胺)的变化而变化, 而传质表面积与表面张力密切相关, 因此, 吸收液的表面张力对 CO₂ 气体分子穿过液相薄膜进入液相主体从而强化吸收至关重要. 迄今为止, DEA 水溶液表面张力研究已有一些报道, 如 Aguila-Hernández 等^[25]测定了 293.25~363.15 K 温度范围内、DEA 质量分率分别为 0.1, 0.2 和 0.3 时, DEA 水溶液的表面张力; Vazquez 等^[26]测定了 298.25~323.15 K 温度范围内、DEA 质量分率介于 0~1 时水溶液的表面张力; Maham 和 Mather^[27]用基于温度的线性关系的经验公式对 298.15 K 时 DEA 水溶液的表面张力进行了关联, 并计算了 298.15 K 时 DEA 水溶液的表面熵和表面焓. 但除未吸收 CO₂ 的 DEA 水溶液的表面张力外, 具有不同 CO₂ 载荷的 DEA 吸收液的表面张力实验数据尚未见诸报道; 可描述温度、DEA 浓度和 CO₂ 载荷对表面张力影响的热力学模型亦未见诸报道. 吸收塔内从塔顶贫液到塔底富液的表面张力与温度、DEA 浓度和 CO₂ 载荷之间的定量关系尚不明晰.

本文的主要目的是通过实验测定具有不同 CO₂ 载荷的 DEA 水溶液的表面张力; 提出适宜精确关联和预测 DEA-CO₂ 水溶液的表面张力的计算模型. 在实验测定和理论计算的基础上, 阐明温度、DEA 浓度和 CO₂ 载荷对 DEA 吸收液表面张力的影响规律, 从而为 DEA 吸收工艺中涉及强化传质的过程设计提供基础数据和计算模型.

1 实验

实验所用的 ZBY-1 型全自动表面张力仪由上海衡平仪器仪表厂生产. ZBY-1 型全自动表面张力仪可测 -5~110 °C 之间液体的表面张力, 量程为 0~400.0 mN/m, 精度为 0.1 mN/m. 实验测量装置包括全自动表面张力仪主机及超级恒温槽, 如图 1 所示.

由于 MEA 和 DEA 等一级醇胺水溶液腐蚀性较强, 在使用时需严格控制水溶液中醇胺的质量分率. 在本文配制的水溶液中, DEA 的质量分率分别为 0.1, 0.2, 0.3 和 0.4. 在配制好的 DEA 水溶液中通 CO₂, 制备 CO₂ 吸收液, 然后再用未吸收 CO₂ 的 DEA 水溶液按一定比例对吸收液进行稀释, 配制具有不同 CO₂ 载荷(α)的系列待测吸收液.

实验过程所用的去离子水由华北电力大学环境学

院制备; DEA 为分析纯, 由保定市华新试剂公司提供.

图 1 全自动表面张力仪示意图

I 全自动表面张力仪主机; II 超级恒温槽; III 主机内部结构; A 铂金吊片, B 恒温池, C 烧杯, D 热电偶, E 循环水胶管

Figure 1 Schematic diagram of automatic surface tension meter

I Host of the tension meter; II CH1006 thermostatic bath; III Inner structure of the host of the tension meter: (A) Platinum hanging film; (B) thermostatic copper pan; (C) solution container; (D) thermocouple; (E) water pipe

2 结果和讨论

293.15~323.15 K 温度范围内, 具有不同 CO₂ 载荷的 DEA-CO₂ 水溶液的表面张力实验结果如表 1 所示.

为了定量描述温度、DEA 浓度和 CO₂ 载荷对 DEA-CO₂ 水溶液表面张力的影响, 并对表面张力进行关联和预测, 需建立 DEA-CO₂ 水溶液表面张力的热力学方程.

考虑到不同 α 条件下吸收液的组分较复杂(剩余的 DEA、多种离子及水), 在具有严格统计基础的热力学状态方程的基础上, 结合密度泛函或密度梯度理论^[33~36]研究此类体系的表面张力具有相当的困难, 本文在溶液理论的基础上, 构建热力学方程.

CO₂ 载荷 α 为 0 时, DEA 水溶液的表面张力可表达为:

$$\gamma_{\text{aq}} = x_1\gamma_1 + x_2\gamma_2 + G(T, w) \quad (1)$$

式中, x_i 和 γ_i 分别代表给定温度 T 时, 纯组分 i 的物质的量分率及表面张力; $G(T, w)$ 可表达为温度和 DEA 质量分率 w 的函数^[37]:

$$G(T, w) = (a + bw + cw^2)T \quad (2)$$

式中, a , b 和 c 均为可调参数, 需以 DEA 水溶液表面张力的实验数据^[26]进行关联, 结果为: $a = -0.878$, $b = 1.520$, $c = -0.714$, 关联的平均相对偏差为 0.52%. 关联结果与实验结果^[26]的比较如图 2 所示.

从图中可以看出, 在给定温度下, DEA 水溶液表面张力随 DEA 质量分率的上升而单调下降; 在给定 DEA 质量分率条件下, DEA 水溶液表面张力随温度上升而单调下降. 公式(1)可准确描述 DEA 水溶液的表面张力与

表 1 DEA-CO₂ 水溶液的表面张力^a
Table 1 Surface tensions for carbonated DEA aqueous solutions

w_{DEA}	α	$\gamma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	α	$\gamma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	α	$\gamma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	α	$\gamma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$
	293.15 K		303.15 K		313.15 K		323.15 K	
0.1	0.0	68.0	0.0	65.9	0.0	64.2	0.0	62.6
	0.1	68.8	0.1	67.1	0.1	65.6	0.1	64.4
	0.2	69.6	0.2	67.7	0.2	66.2	0.2	65.0
	0.3	70.3	0.3	68.2	0.3	66.8	0.3	65.3
	0.4	70.8	0.4	69.0	0.4	67.2	0.4	65.7
	0.6	72.0	0.5	69.4	0.5	67.6	0.5	66.1
	0.82	73.0	0.83	71.7	0.76	68.8	0.70	67.1
	$\alpha_{\text{max}}=0.986$		$\alpha_{\text{max}}=0.916$		$\alpha_{\text{max}}=0.852$		$\alpha_{\text{max}}=0.789$	
0.2	0.0	65.4	0.0	62.5	0.0	60.7	0.0	59.1
	0.1	66.3	0.1	64.6	0.1	63.2	0.1	61.8
	0.2	67.4	0.2	65.4	0.2	64.1	0.2	62.4
	0.3	68.4	0.3	66.3	0.3	64.7	0.3	63.0
	0.4	69.4	0.4	67.3	0.4	65.3	0.4	63.6
	0.5	70.4	0.5	68.4	0.5	66.1	0.5	64.2
	0.77	72.2	0.72	70.1	0.68	67.4	0.64	64.8
	$\alpha_{\text{max}}=0.927$		$\alpha_{\text{max}}=0.870$		$\alpha_{\text{max}}=0.772$		$\alpha_{\text{max}}=0.680$	
0.3	0.0	62.5	0.0	60.0	0.0	58.3	0.0	56.7
	0.1	64.7	0.1	62.8	0.1	60.1	0.1	58.7
	0.2	65.6	0.2	63.9	0.2	61.9	0.2	60.0
	0.3	66.6	0.3	64.9	0.3	62.6	0.3	62.1
	0.4	67.9	0.4	66.1	0.4	63.7	0.4	61.6
	0.5	69.1	0.5	66.9				
	0.71	71.2	0.68	68.5				
	$\alpha_{\text{max}}=0.815$		$\alpha_{\text{max}}=0.763$		$\alpha_{\text{max}}=0.690$		$\alpha_{\text{max}}=0.618$	
0.4	0.0	60.0	0.0	58.0	0.0	56.3	0.0	54.2
	0.1	62.5	0.1	60.9	0.1	58.2	0.1	57.9
	0.2	63.4	0.2	62.0	0.2	60.1	0.2	58.9
	0.3	65.0	0.3	63.2	0.3	61.2	0.3	59.0
	0.4	66.6	0.4	64.3	0.4	62.0	0.4	59.9
	0.5	68.4	0.5	65.4				
	0.65	69.6	0.62	66.3				
	$\alpha_{\text{max}}=0.721$		$\alpha_{\text{max}}=0.672$		$\alpha_{\text{max}}=0.628$		$\alpha_{\text{max}}=0.580$	

^a Values of α_{max} are taken from ref. [14] by interpolation.

DEA 质量分率及温度之间的关系, 且关联结果与实验值高度吻合。

由于具有一定 CO₂ 载荷的吸收液的组成与 DEA 水溶液的组成不同, 在计算吸收液的表面张力时, 需首先确定吸收液各组分的浓度。DEA 水溶液吸收 CO₂ 时, DEA 与 CO₂ 的理论反应当量为 1 : 0.5, 即 1 mol DEA 理论上可吸收 0.5 mol CO₂, 但由于吸收液中的阴离子 (HOC₂H₄)₂NCOO⁻ 会发生水解重新生成部分 DEA, 故实际吸收中, 饱和吸收率 α_{max} 一般大于 0.5, 实际反应当量关系可按 α_{max} CO₂~DEA 计算。

常压下具有特定质量浓度 w 的 DEA 水溶液对 CO₂

的饱和吸收率 α_{max} 的测定需在密闭条件下进行, 如用皂膜流量计测定 α_{max} 时, 流量计前后需放置盛有 CO₂ 的贮气瓶, 以保证吸收过程气相 CO₂ 分压为 1×10^5 Pa。但目前常用的表面张力测定仪需在与空气接触的条件下测定溶液的汽液表面张力, 而 CO₂ 载荷 α 值较大时, DEA 吸收溶液长时间暴露在空气中易导致部分 CO₂ 逸出, 特别是在 w 和 α 均较大的条件下制备的吸收液在表面张力仪主机的恒温池中恒温时, 随着部分 CO₂ 的逸出, 表面张力测定值波动较大。为此, 本文根据表面张力测定的条件, 采用在 DEA 水溶液中直接通 CO₂ 的方法制备吸收液(由于此时气相为空气, CO₂ 分压远小于 1×10^5 Pa,

图2 DEA水溶液表面张力的计算值与实验值^[26]的比较

符号: 实验值; 线: 关联结果

Figure 2 Comparison of the calculated and experimental^[26] surface tensions for DEA aqueous solutions

Symbols: experimental data; lines: correlated results

配制的吸收液的 CO_2 载荷 α 亦小于 $\alpha_{\max}$), 然后再用未吸收 CO_2 的DEA水溶液按一定比例对吸收液进行稀释, 配制具有不同 α 的系列待测吸收液. 相对较低的 α 值, 可保证实验过程中, 表面张力读数稳定.

本文在表面张力计算过程中使用的 $\alpha_{\max}$ 是通过文献^[14]结合插值法获得的. 根据理论反应方程式, 原则上可确定 CO_2 载荷为 α 时吸收液中DEA、水和离子的浓度. 但由于温度、DEA质量分率及载荷 α 均对 $(\text{HOC}_2\text{H}_4)_2\text{NCOO}^-$ 离子的水解产生影响, 难以严格确定吸收液中水和各种离子的浓度, 本文将吸收液中离子的水解、离子与剩余DEA的相互作用以及离子与水的相互作用对表面张力的贡献, 近似以 $ew_{\text{DEA}}\alpha/T$ 表达, 吸收液表面张力可表达为:

$$\gamma = \gamma_{\text{aq}} + \gamma_{\text{ion}} - ew_{\text{DEA}}\alpha/T \quad (3)$$

式中, γ_{ion} 代表由于吸收 CO_2 生成的离子对表面张力的贡献:

$$\gamma_{\text{ion}} = (fw_{\text{ion}} + gw_{\text{ion}}^2)/T \quad (4)$$

式中, f 和 g 为可调参数.

吸收液中DEA、水及总离子的质量分率如下:

$$w_{\text{DEA}} = \frac{1 - \alpha/\alpha_{\max}}{M_t} w \quad (5)$$

$$w_{\text{ion}} = \frac{\alpha w M_{\text{CO}_2}/M_{\text{DEA}} + \alpha w/\alpha_{\max}}{M_t} \quad (6)$$

$$w_w = \frac{1 - w}{M_t} \quad (7)$$

式中, $M_t = 1 + \alpha w M_{\text{CO}_2}/M_{\text{DEA}}$ 为1 g质量分率为 w 的DEA水溶液吸收 CO_2 (载荷为 α)后的吸收液的质量, M_{CO_2} 和

M_{DEA} 为 CO_2 和DEA的分子量.

将上述DEA、总离子及水的质量分率表达式代入公式(1~4), 并以吸收液表面张力实验值对 e, f 和 g 等3个可调参数进行关联, 可得 CO_2 载荷为 α 的吸收液表面张力的解析表达式, 使模型具备预测功能, 从而可定量研究温度、DEA浓度及 CO_2 载荷对表面张力的影响规律. 可调参数的关联结果为: $e = -18776.40$, $f = -124.11$, $g = 6616.95$, 关联的平均相对偏差为0.77%.

在给定水溶液中DEA质量分率 w 的条件下, 温度和 CO_2 载荷 α 对吸收液表面张力的影响如图3和4所示. 从图中可以看出, 本文提出的热力学模型可以准确关联 CO_2 载荷为 α 的DEA吸收液的表面张力. 当 w 和 α 一定时, 随着温度的上升, 表面张力呈下降趋势. 当 w 和温度一定时, 吸收液表面张力随 CO_2 载荷 α 的上升而单调上升, 并呈现为 α 的二次函数的关系.

图3 $w=0.1$ 和 0.2 (插图)时, 温度和 CO_2 载荷 α 对吸收液表面张力的影响

Figure 3 Effects of temperature and CO_2 loading on the surface tensions of carbonated DEA-water mixtures, $w=0.1$ and 0.2 (inset)

图4 $w=0.3$ 和 0.4 (插图)时, 温度和 CO_2 载荷 α 对吸收液表面张力的影响

Figure 4 Effects of temperature and CO_2 loading on the surface tensions of carbonated DEA-water mixtures, $w=0.3$ and 0.4 (inset)

表面张力随 α 的变化趋势与吸收液中剩余 DEA 浓度及生成的总离子浓度有关. 由于溶液中的 DEA 具有界面活性, 其浓度的上升将导致体系表面张力下降; 而在界面负吸附的离子则相反, 其浓度上升将导致表面张力的上升. 如图 3 所示, 当 $w=0.1$ 时, 随着 CO₂ 载荷 α 的上升, 随着 DEA 与 CO₂ 反应消耗量上升, 吸收液中剩余 DEA 的浓度下降, 生成的离子浓度上升, 因此表面张力上升, 直到达到饱和吸收为止.

在给定的温度条件下, 水溶液中 DEA 的质量分率和 CO₂ 载荷 α 对吸收液表面张力的影响如图 5 和 6 所示. 与图 3 和 4 类似, 当 w 和 T 一定时, 吸收液表面张力随 CO₂ 载荷 α 的上升而单调上升, 并呈现为 α 的二次函数的关系. 给定温度下, w 值较小时对应的吸收液的表面张力随 α 上升而缓慢上升; 而 w 值较大时对应的吸收液的表面张力随 α 上升而快速上升. 如图 5 所示, 293.15 K 条件下, 当 α 较小时, 吸收液的离子浓度不高, 表面张力主要由 DEA 质量浓度决定, 如 $w=0.1$ 对应的吸收液中的 DEA 浓度显著小于 $w=0.2, 0.3$ 和 0.4 等 3 种吸收液, 故其表面张力值最大; 当 α 较大时, 随着吸收液中剩余 DEA 的质量分率逐渐变小而趋于 0, 离子浓度对表面张力的贡献逐渐变大, $w=0.4$ 对应的吸收液应具有最大的表面张力(大于相同温度下水的表面张力), 但实验和计算均未得到这一结果, 主要原因是 $(\text{HOC}_2\text{H}_4)_2\text{NCOO}^-$ 离子发生水解, 吸收液中 DEA 浓度并不为 0.

图 5 293.15 和 303.15 K (插图)时, DEA 质量分率和 CO₂ 载荷 α 对吸收液表面张力的影响

Figure 5 Effects of DEA mass concentration and CO₂ loading on the surface tensions of carbonated DEA-water mixtures. $T=293.15$ and 303.15 K (inset)

3 结论

本文测定了 293.15~323.15 K 温度范围内, 具有不同 CO₂ 载荷的 DEA-CO₂ 水溶液的表面张力, 提出了适宜表达此类体系表面张力的理论模型. 阐明了温度、

图 6 313.15 和 323.15 K (插图)时, DEA 质量分率和 CO₂ 载荷 α 对吸收液表面张力的影响

Figure 6 Effects of DEA mass concentration and CO₂ loading on the surface tensions of carbonated DEA-water mixtures. $T=313.15$ and 323.15 K (inset)

DEA 浓度和 CO₂ 载荷对 DEA-CO₂ 水溶液表面张力的影响规律. 结果表明:

(1) 给定温度和给定 DEA 水溶液 w 的条件下, 吸收液表面张力随 CO₂ 载荷 α 的上升而单调上升, 并呈现为 α 的二次函数的关系.

(2) 吸收液表面张力随 α 的变化趋势与吸收液中剩余 DEA 质量浓度及生成的总离子浓度密切相关. 吸收液中剩余 DEA 质量浓度的上升导致体系表面张力下降; 而离子浓度的上升导致表面张力上升. 由于 $(\text{HOC}_2\text{H}_4)_2\text{NCOO}^-$ 离子发生水解, 吸收液中 DEA 浓度并不为 0, 因此吸收液的表面张力仍小于相同温度下纯水的表面张力.

(3) 本文提出的热力学模型可精确关联 DEA 水溶液及具有不同 CO₂ 载荷的吸收液的表面张力, 适宜描述温度、DEA 浓度和 CO₂ 载荷对 DEA-CO₂ 水溶液表面张力的影响规律.

References

- Nahicenicovic, N.; John, A. *Energy* **1991**, *16*, 1347.
- Wang, B. Q.; Jin, H. G.; Zheng, D. X. *Int. J. Energy Res.* **2004**, *28*, 521.
- Kralj, A. K.; Glavic, P. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2007**, *46*, 6953.
- Zheng, C. C.; Liu, D. H.; Yang, Q. Y.; Zhong, C. L.; Mi, J. G. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2009**, *48*, 10479.
- Wu, D.; Xu, Q.; Liu, D. H.; Zhong, C. L. *J. Phys. Chem. C* **2010**, *114*, 16611.
- Lan, J. H.; Cao, D. P.; Wang, W. C.; Smit, B. *ACS Nano* **2010**, *4*, 4225.
- Matsumiya, N.; Teramoto, M.; Kitada, S. *Sep. Purif. Technol.* **2005**, *46*, 262.

- 8 Yan, S. P.; Fang, M. X.; Zhang, W. F. *Fuel Process. Technol.* **2007**, 88, 501.
- 9 Yan, S. P.; Fang, M. X.; Zhang, W. F. *Energy Convers. Manage.* **2008**, 49, 3188.
- 10 Li, X. S.; Xu, C. G.; Chen, Z. Y.; Wu, H. J. *Energy* **2011**, 36, 1394.
- 11 Li, X. S.; Xia, Z. M.; Chen, Z. Y.; Yan, K. F.; Li, G.; Wu, H. J. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2010**, 49, 11614.
- 12 Li, X. S.; Zhang, Y.; Chen, Z. Y.; Tang, L. G.; Yan, K. F. *Acta Chim. Sinica* **2007**, 65, 2187 (in Chinese).
(李小森, 张郁, 陈朝阳, 唐良广, 颜克凤, 化学学报, **2007**, 65, 2187.)
- 13 Li, X. S.; Wu, H. J.; Feng, Z. P.; Tang, L. G.; Fan, S. S. *Acta Chim. Sinica* **2007**, 65, 59 (in Chinese).
(李小森, 吴慧杰, 冯自平, 唐良广, 樊栓狮, 化学学报, **2007**, 65, 59.)
- 14 Lee, J. I.; Otto, F. D.; Mather, A. E. *J. Chem. Eng. Data* **1972**, 17, 465.
- 15 Shen, K. P.; Li, M. H. *J. Chem. Eng. Data* **1992**, 37, 96.
- 16 Barreau, A.; Blanchon le Bouhelec, E.; Habchi Tounsi, K. N.; Mougine, P.; Lecomte, F. *Oil Gas Sci. Technol.* **2006**, 61, 345.
- 17 Zhang, Y.; Chen, C. Y. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2011**, 50, 163.
- 18 Park, S. H.; Lee, K. B.; Hyun, J. C. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2002**, 41, 1658.
- 19 Haji-Sulaiman, M. Z.; Aroua, M. K.; Benamor, A. *Trans. Chem. E* **1998**, 76, 961.
- 20 Zheng, Q.; Dong, L. H.; Chen, J.; Gao, G. H.; Fei, W. Y. *J. Chem. Ind. Eng.* **2010**, 61, 1740 (in Chinese).
(郑碲, 董立户, 陈健, 高光华, 费维扬, 化工学报, **2010**, 61, 1740.)
- 21 Chen, J.; Mi, J. G.; Liu, J. C. *Natural Gas Chem. Ind.* **2001**, 26, 57 (in Chinese).
(陈健, 密建国, 刘金晨, 天然气化工, **2001**, 26, 57.)
- 22 Li, Y. G. *J. Chem. Ind. Eng.* **1995**, 46, 158 (in Chinese).
(李以圭, 化工学报, **1995**, 46, 158.)
- 23 Li, Y.; Mather, A. E. *Ind. Eng. Chem. Res.* **1994**, 33, 2006.
- 24 Li, Y.; Mather, A. E. *Ind. Eng. Chem. Res.* **1996**, 35, 4804.
- 25 Aguila-Hernández, J.; Trejo, A.; Gracia-Fadrique, J. *Fluid Phase Equilib.* **2001**, 185, 165.
- 26 Vazquez, G.; Alvarez, E.; Rendo, R. *J. Chem. Eng. Data* **1996**, 41, 806.
- 27 Maham, Y.; Mather, A. E. *Fluid Phase Equilib.* **2001**, 182, 325.
- 28 Ayyaz, M.; Mohammad, I. A. M.; Cecilia, D. W.; Thanabalan, M.; Amir, S. *J. Chem. Eng. Data* **2008**, 53, 2226.
- 29 Vazquez, G.; Alvarez, E.; Navaza, J. M.; Rendo, R.; Romero, E. *J. Chem. Eng. Data* **1997**, 42, 57.
- 30 Rinker, E. B.; Oelschlager, D. W.; Colussi, A. T.; Henry, K. R.; Sandall, O. C. *J. Chem. Eng. Data* **1994**, 39, 392.
- 31 Alvarez, E.; Rendo, R.; Sanjurjo, B.; Sánchez-Vilas, M.; Navaza, J. M. *J. Chem. Eng. Data* **1998**, 43, 1027.
- 32 Fu, D.; Zhong, Z. K. *Acta Chim. Sinica* **2010**, 68, 1241 (in Chinese).
(付东, 钟智坤, 化学学报, **2010**, 68, 1241.)
- 33 Xia, Z. Q.; Mi, J. G.; Zhong, C. L. *Acta Chim. Sinica* **2007**, 65, 373 (in Chinese).
(夏志强, 密建国, 仲崇立, 化学学报, **2007**, 65, 373.)
- 34 Fu, D. *Chin. J. Chem.* **2006**, 24, 1315.
- 35 Fu, D.; Zhao, Y. *Chin. J. Chem.* **2005**, 23, 386.
- 36 Fu, D.; Zhao, Y. *Acta Chim. Sinica* **2005**, 63, 11 (in Chinese).
(付东, 赵毅, 化学学报, **2005**, 63, 11.)
- 37 Mandal, B. P.; Kundu, M.; Bandyopadhyay, S. S. *J. Chem. Eng. Data* **2003**, 48, 703.

(A1105243 Zhao, X.)