

[Note]

www.whxb.pku.edu.cn

DMA+AOT+正辛烷三组分非水微乳体系的临界现象

蔡红兰¹ 安学勤^{1,2,*} 沈伟国^{1,3}¹兰州大学化学化工学院, 兰州 730000; ²南京师范大学化学与环境科学学院, 南京 210097;³华东理工大学化学系, 上海 200237)

摘要: 采用折射率法在离临界温度 7 K 的范围内测定 *N,N*-二甲基乙酰胺(DMA)与二-(2-乙基己基)琥珀酸酯磺酸钠(AOT)摩尔比为 3.46 的非水微乳体系(DMA+AOT+正辛烷)的温度-折射率($T-n$)共存曲线, 利用标准曲线转化为温度-体积分数($T-\varphi$)共存曲线和温度-有效体积分数($T-\psi$)共存曲线, 进而求得临界指数 β 。研究表明, 该体系的临界指数 β 与已经报道的微乳液不同, 在较宽的温度范围内均符合 Fisher 重整化理论值 0.365。分析实验数据, 获得指数因子 B 、Wegner 校正项因子 B_1 和共存曲线的直径 ρ_0 , 并讨论所选择的序参量的优劣性。

关键词: 微乳液; 临界现象; 共存曲线; 折射率; AOT

中图分类号: O642; O648

Critical Phenomena of Three-component Nonaqueous Microemulsion System of DMA+AOT+*n*-octane

CAI Hong-Lan¹ AN Xue-Qin^{1,2,*} SHEN Wei-Guo^{1,3}¹College of Chemistry & Chemical Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China;²College of Chemistry and Environment Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, P. R. China;³Department of Chemistry, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, P. R. China)

Abstract: The coexistence curves of ($T-n$) (T and n are temperature and refractive index, respectively) for the system of DMA+AOT+*n*-octane have been determined within about 7 K from the critical temperature (T_c) by measurements of refractive index at a constant molar ratio of DMA to AOT (3.46). The coexistence curves of ($T-n$) have been converted to the coexistence curves of ($T-\varphi$) and ($T-\psi$) (φ and ψ are volume fraction and effective volume fraction, respectively) through the standard curves determined by measurements of refractive indexes at various volume fractions and temperatures. The critical exponent β was deduced from the coexistence curves, which was found to be inconsistent with the 3D-Ising value and approach the Fisher-normalization value 0.365 in a rather wide temperature range. The experimental results were also analyzed to obtain the critical amplitude B and the Wegner correction terms B_1 to examine the diameters of coexistence curves, and to discuss the goodness of the order parameter.

Key Words: Microemulsion; Critical phenomena; Coexistence curve; Refractive index; AOT

微乳液是由两种互不相溶的液体(一种是极性液体, 通常是水; 另一种是非极性液体, 通常是油)和表面活性剂形成的各向同性稳定的热力学体系, 微观上由表面活性剂的界面膜所稳定的一种液体的微滴分散在另一种液体所构成。如果界面膜内的液体是非

极性的, 则该微乳液为正相(对水为水包油)微乳液, 反之为反相(对水为油包水)微乳液。微乳液这种特殊的微观结构和对不同极性物质极强的增溶能力使其作为反应介质而被广泛应用于纳米材料的制备^[1,2]、有机合成反应^[3,4]、药物载体^[5]和生化反应^[6]等方面。

Received: December 19, 2006; Revised: January 15, 2007; Published on Web: April 28, 2007.

*Corresponding author. Email: anxueqin@163.com; Tel: +8625-83598678.

国家自然科学基金(20573056, 20673059, 20473035, 20273024), 江苏省高新技术研究计划(BG-2005041)和上海市纳米技术专项(0652nm010)资助项目

迄今为止,关于微乳液的研究主要集中在以水为极性相形成的油包水体系.由于研究工作和生产实际的需要,非水微乳液的制备及其应用近年来倍受关注^[7-23].用具有较高介电常数和烷烃中有较低溶解度的极性溶剂来代替水,该极性溶剂的选择范围较广,其微乳性质也与水体系微乳有所不同,把极性相由水拓展到非水极性溶剂可大大扩展微乳液的应用范围.目前,对该非水体系的研究主要集中在相图和微观结构^[7]、粘度和电导率行为^[8]、测定胶束尺寸和胶束间的相互作用^[9-11]以及用分子探针的吸收或发射光谱^[9,12,13,16-23]、傅里叶变换红外光谱^[10,14,15,21]和核磁共振(NMR)氢谱^[14,15,21]表征体系的微环境,而关于非水微乳体系临界行为的研究很少^[24,25].

微乳体系的临界行为近年来引起人们极大的兴趣^[26-29],尽管对于该体系是符合 3D-Ising 还是 Fisher 重整化的普适类别还存在着争论^[27,30],但对油包水微乳体系(水+AOT+正构烷烃)^[26,28,29]的临界行为的研究表明,在充分接近临界温度时体系符合 3D-Ising 普适类别.对于非水微乳体系的普适类别还不清楚,本实验室在前期工作中^[25]曾研究了 DMA 与 AOT 摩尔比 ω 为 2.86 的三组分非水微乳体系(*N,N*-二甲基乙酰胺(DMA)+AOT+正辛烷)的临界行为,发现该体系在临界点附近符合 3D-Ising 普适类别.为了进一步考察不同 ω 的非水微乳体系的临界行为,本文研究了 DMA 与 AOT 摩尔比为 3.46 的上述体系的临界现象,采用折射率法在距临界温度 7 K 的温度范围内测定该体系的液-液共存曲线,推导出临界指数 β 、指前因子 B 和 B_1 ,并讨论共存曲线直径 ρ_d 及序参量的优劣性.

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

二-(2-乙基己基)琥珀酸酯磺酸钠(AOT): Fluka 公司产品,纯度>99%;正辛烷(*n*-octane): Merck 公司产品,纯度>99%;*N,N*-二甲基乙酰胺(DMA): 分析纯,天津化学试剂研究所产品,纯度>99%,经多次减压蒸馏^[31]处理备用.

1.2 临界温度和临界组成的确定

用等体积法确定临界组成^[32],固定 DMA 与 AOT 的摩尔比 $\omega=3.46$,调节正辛烷的加入量,使样品在接近相变温度时上下相的体积比为 1:1,此时样品的组成确定为临界组成(φ_c),相分离温度确定为临界温度(T_c).用此法测得上述微乳体系的假纯组分(DMA-AOT)的临界体积分数 φ_c 为 (0.360 ± 0.001) ,相应的 T_c 为 (311.498 ± 0.002) K.

1.3 折射率的测定

利用最小偏差法^[32]在不同温度下测定具有临界组成样品的共存两相的折射率 n ,绘制温度-折射率($T-n$)共存曲线,示于图 1(a).在测定过程中,温度控制精度为 ± 0.002 K,温度测量的准确度和精确度分别为 ± 0.01 K 和 ± 0.002 K,折射率的测量精度为 ± 0.0001 .实验发现,该体系的临界温度 T_c 会缓慢向上飘移,这可能与体系的稳定性有关.通过对具有临界组成的样品的临界温度进行反复测定,确定其漂移速率为 $1 \text{ mK} \cdot \text{h}^{-1}$,以此对临界温度进行校正.

2 数据处理与讨论

2.1 标准曲线的测定和共存曲线的转化

在临界现象的研究中,温度-体积分数($T-\varphi$)共存曲线更具有实际意义.为了将实验测得的($T-n$)共

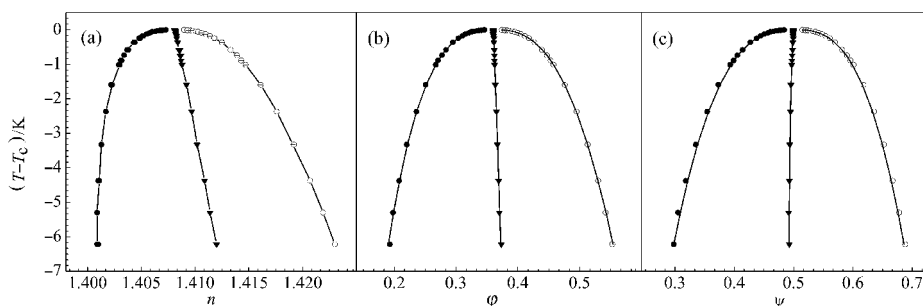


图 1 DMA +AOT+正辛烷微乳体系的共存曲线

Fig.1 Coexistence curves of $(T-n)$, $(T-\varphi)$, and $(T-\psi)$ for the $[\varphi(\text{AOT-DMA})+(1-\varphi)n\text{-octane}]$ microemulsion system

(a) $(T-T_c)$ vs refractive index n ; (b) $(T-T_c)$ vs volume fraction φ ; (c) $(T-T_c)$ vs effective volume fraction ψ ;

(●), (○) experimental values of concentration variables (ρ) of the coexisting phases; (▼) experimental values of diameter (ρ_d) of the coexisting phases; (---) concentration variables (ρ_{cal}) and diameter ($\rho_{d,\text{cal}}$) of coexisting phases from calculation

存曲线转化为 $(T-\varphi)$ 共存曲线, 配制一系列已知体积分数的样品, 在一相区分别测定每个样品的温度和折射率(见表 1). 该微乳体系的折射率与体积分数和温度之间的关系可表示为,

$$n(\varphi, T)=n(\varphi, T^0)+(\partial n/\partial T)_\varphi(T-T^0) \quad (1)$$

$$(\partial n/\partial T)_\varphi=\varphi(\partial n_1/\partial T)+(1-\varphi)(\partial n_2/\partial T) \quad (2)$$

其中 T^0 是共存曲线(图 1)的中间温度, 该体系对应的 T^0 为 308 K. $(\partial n_1/\partial T)$ 和 $(\partial n_2/\partial T)$ 分别是 $\varphi=1$ (AOT 和 DMA 形成的分散相)和 $\varphi=0$ (纯的正辛烷)时折射

表 1 DMA+AOT+正辛烷微乳体系在不同浓度和不同温度下的折射率 n

Table 1 Refractive indexes for $[\varphi(\text{AOT-DMA})+(1-\varphi) n\text{-octane}]$ at various concentrations φ and temperatures T

φ	T/K	n	φ	T/K	n		
0.0000	304.911	1.3907	0.3598	311.645	1.4080		
	305.738	1.3903		312.406	1.4076		
	306.570	1.3899		313.168	1.4073		
	307.592	1.3894		314.156	1.4068		
	308.624	1.3889		315.107	1.4064		
	309.665	1.3884		315.822	1.4060		
	310.649	1.3879		316.637	1.4057		
	311.704	1.3874		317.460	1.4053		
	0.1087	304.922		1.3964	0.4164	310.234	1.4121
		305.885		1.3959		311.033	1.4117
306.892		1.3955	311.838	1.4113			
307.908		1.3950	312.692	1.4109			
308.905		1.3945	313.514	1.4106			
309.889		1.3940	314.291	1.4102			
310.920		1.3935	315.101	1.4099			
311.899		1.3930	316.012	1.4095			
0.2277		309.415	1.4012	0.5151		308.904	1.4191
		310.257	1.4008			309.683	1.4187
	311.057	1.4004	310.543		1.4183		
	311.877	1.4000	311.271		1.4180		
	312.805	1.3996	312.264		1.4176		
	313.595	1.3992	313.105		1.4172		
	314.410	1.3988	313.927		1.4168		
	315.170	1.3985	314.729		1.4165		
	0.2979	310.775	1.4047		0.5984	304.851	1.4259
		311.653	1.4043			305.810	1.4254
312.605		1.4039	306.716	1.4250			
313.507		1.4034	307.583	1.4246			
314.354		1.4031	308.563	1.4242			
315.272		1.4026	309.525	1.4238			
316.241		1.4022	310.439	1.4234			
317.154		1.4018	311.369	1.4230			

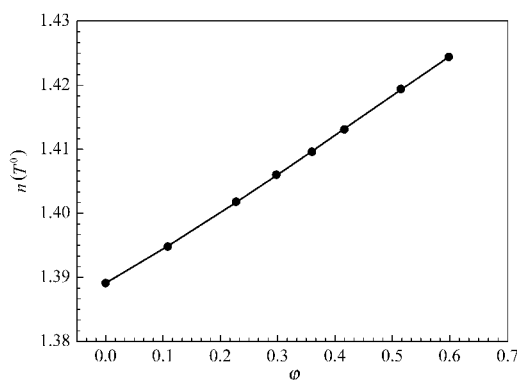


图 2 DMA+AOT+正辛烷微乳体系在 $T^0=308$ K 时的折射率与体积分数的关系

Fig.2 standard curve for $[\varphi(\text{AOT-DMA})+(1-\varphi) n\text{-octane}]$ at $T^0=308$ K

(●) experimental values; (—) calculated by Eq.(4)

率随温度的变化率. 根据表 1 所测的数据, 可直接线性拟合得到纯正辛烷的 $(\partial n_2/\partial T)$ 及其它各组成样品的 $(\partial n/\partial T)_\varphi$, 将上述结果代入式(2)可得 $(\partial n_1/\partial T)$. $(\partial n_2/\partial T)$ 和 $(\partial n_1/\partial T)$ 的数值分别为 -4.86×10^{-4} 和 -4.35×10^{-4} . 合并式(1)和式(2)可得:

$$n(\varphi, T)=n(\varphi, T^0)+[\varphi(\partial n_1/\partial T)+(1-\varphi)(\partial n_2/\partial T)](T-T^0) \quad (3)$$

将 $(\partial n_2/\partial T)$ 和 $(\partial n_1/\partial T)$ 的数值代入式(3)并用其拟合实验数据 $n(\varphi, T)$ (表1), 可得不同组成 φ 的样品在 T^0 时的 $n(\varphi, T^0)$ (见图2), 用简单的幂级数拟合 $n(\varphi, T^0)$ 可得折射率与体积分数 φ 之间的关系为,

$$n(\varphi, 308 \text{ K})=1.3891+0.051\varphi+0.0234\varphi^2-0.0166\varphi^3 \quad (4)$$

式(4)拟合的标准偏差为 0.0001, 通过式(4)的 $(n-\varphi)$ 标准曲线将 $(T-n)$ 共存曲线转化为 $(T-\varphi)$ 共存曲线, 结果示于图 1(b). 在讨论微乳液体系的临界行为时, 有效体积分数 ψ 是另外一个常用的广义密度量, 可由下式定义:

$$\psi=\varphi/[\varphi+\varphi_c(1-\varphi)]/(1-\varphi_c) \quad (5)$$

通过式(5)可将 $(T-\varphi)$ 共存曲线转化为 $(T-\psi)$ 共存曲线, 示于图 1(c).

2.2 临界指数和指前因子

根据临界态理论, 在近临界温度附近, 共存曲线可描述为,

$$\Delta\rho=(\rho_1-\rho_2)=B\tau^\beta+B_1\tau^{\beta+\Delta}+\dots \quad (6)$$

其中 τ 为相对温度, $\tau=|T-T_c|/T_c$; ρ 为广义密度变量, 可以是密度、折射率和浓度等, ρ_1 和 ρ_2 分别表示共存曲线上、下相的广义密度, $\Delta\rho$ 为序参量; β 为临界指数, 其理论值对于不同的模型有所差别, 3D-Ising

模型的理论值为 0.3265, Fisher 重整化模型的理论值为 0.365; Δ 为 Wegner 指数, 其理论值为 0.5; B 和 B_1 称为指前因子, 其数值与体系的性质有关. 当体系温度充分接近临界温度时, 式(6)可简化为,

$$\Delta\rho=(\rho_1-\rho_2)=B\tau^\beta \quad (7)$$

利用式(7)在不同的 τ 范围内拟合图 1 中的实验数据可得不同广义密度量的临界指数 β , 示于图 3, 其中 (T_c-T) 表示温差的范围, 图中的每个点对应的 β 值是通过拟合该点对应的温差范围内的所有实验点得到的. 从图中可以看出, 临界指数 β 随温度趋近于临界温度而稍有增加. 在温度远离临界温度 7 K 时, 广义密度量 n 、 φ 和 ψ 的临界指数 β 分别为 0.363 ± 0.001 、 0.364 ± 0.001 和 0.364 ± 0.001 ; 而在温度趋近临界温度 1 K 时获得三个变量的临界指数 β 均为 0.366 ± 0.002 , 这说明在误差允许的范围内, 该体系的临界指数 β 在较宽的温度范围 {即 $(T_c-T)<7$ K} 内均趋近于 0.365, 与 Fisher 重整化的理论值相一致. 该结果与以水作为极性相的微乳体系不同, 后者符合 3D-Ising 理论值^[26,28,29]. 两者不同可能原因在于: 水不溶于烷烃, 所以在以水为极性相的微乳液体系中, 水几乎都处于“极性池”中; 而 DMA 在烷烃中有一定的溶解度^[9], 在 DMA+AOT+正辛烷的微乳液体系中, 当 ω 值较小时, DMA 在体系中的相对浓度较小, DMA 基本处于“极性池”中^[9], 该体系的临界指数也符合 3D-Ising 理论值^[24,25]. 但本文所研究的体系的临界指数符合 Fisher 重整化理论值可能是由于随着 ω 值的增大, DMA 在体系中的相对浓度增大, 会有少

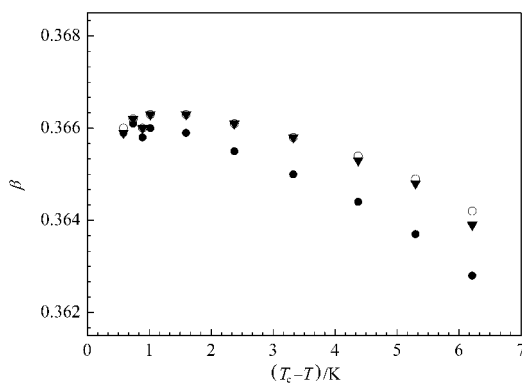


图 3 DMA+AOT+正辛烷微乳体系在不同温度范围内的临界指数 β

Fig.3 Values of the critical exponent β of n , φ and ψ in difference ranges of (T_c-T) for microemulsion system of DMA+AOT+n-octane

(●) refractive index; (○) volume fraction;
(▼) effective volume fraction

表 2 DMA+AOT+正辛烷微乳体系拟合式(6)得到各序参量的 B 和 B_1

Table 2 Critical amplitude B and B_1 in a temperature region of $(T_c-T)<7$ K with various order parameters

Order parameter	B	B_1	$ B_1/B $
Δn	0.0948 ± 0.0001		
	0.0962 ± 0.0004	-0.0276 ± 0.0035	0.29
$\Delta\varphi$	1.542 ± 0.002		
	1.559 ± 0.006	-0.296 ± 0.054	0.19
$\Delta\psi$	1.67 ± 0.01		
	1.69 ± 0.01	-0.37 ± 0.07	0.22

量 DMA 分布于烷烃中, 该少部分 DMA 就类似于向二元溶液中所加的第三组分, 从而导致体系的临界指数发生改变.

在临界现象的研究中, 序参量的选择是非常重要的. 一个好的序参量能使体系的临界行为在更宽的温度范围内用式(7)来描述. 序参量的优劣可以通过由式(6)拟合得到的指前因子之比 $|B_1/B|$ 的大小来判断. 根据式(6)固定 $\beta=0.365$, $\Delta=0.5$, 分别拟合实验数据可得出不同密度量 n 、 φ 和 ψ 对应的指前因子 B 、 B_1 和 $|B_1/B|$ 值, 示于表 2. 序参量 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\psi$ 对应的比值明显小于 Δn , 说明在 Δn 、 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\psi$ 三个序参量中, $\Delta\varphi$ 是比较好的参量, 这与以水作为极性相的微乳体系的结果相一致^[26,28,29].

2.3 共存曲线的直径

当用一个好的变量作为序参量时, 共存曲线的直径 ρ_d 可表示为,

$$\rho_d = \rho_c + A_0\tau + A_1\tau^{1-\alpha} + \dots \quad (8)$$

其中 ρ_c 为临界广义密度量, α 是与比热有关的临界指数, 其理论值为 0.11. 将 α 和 β 分别固定在理论值 0.11 和 0.365, 用式(8)拟合实验数据得到参数 ρ_c 、 A_0 、 A_1 , 结果示于表 3. 其中 $\rho_{c,\text{expt}}$ 为实验测得的广义密度值, 在一相区测量具有临界组成的样品的折射

表 3 拟合式(8)得到 DMA+AOT+正辛烷微乳体系各参数的 ρ_c 、 A_0 、 A_1 和标准偏差 SD

Table 3 Parameters of equation (8) and standard deviations (SD) in ρ for diameters of coexistence curves of $(T-n)$, $(T-\varphi)$, and $(T-\psi)$ of DMA+AOT+n-octane

Parameter	$(T-n)$	$(T-\varphi)$	$(T-\psi)$
$\rho_{c,\text{expt}}$	1.4180 ± 0.0001	0.360 ± 0.001	0.500 ± 0.001
	$\rho_c = \rho_c + A_0\tau + A_1\tau^{1-\alpha}$		
ρ_c	1.4181 ± 0.0001	0.360 ± 0.001	0.500 ± 0.001
A_0	0.120 ± 0.015	-0.16 ± 0.25	2.2 ± 0.3
A_1	-0.05 ± 0.01	0.51 ± 0.16	-1.7 ± 0.2
SD	1.8×10^{-5}	3.1×10^{-4}	3.6×10^{-4}

率与温度的关系,外推到临界温度得到 n_c ; φ_c 由等体积法测量得到; ψ_c 由 φ_c 的实验值通过式(5)计算得到,SD 为拟合标准偏差.从表 3 中可看出,拟合式(8)得到的 ρ_c 与 $\rho_{c,\text{exp}}$ 在实验误差范围内一致,表明从折射率 n 通过标准曲线转化为体积分数 φ 和有效体积分数 ψ 是合理的.联立式(6)与式(8)得:

$$\rho_1 = \rho_c + A_0\tau + A_1\tau^{1-\alpha} - (1/2)B\tau^\beta - (1/2)B_1\tau^{\beta+\Delta} \quad (9)$$

$$\rho_2 = \rho_c + A_0\tau + A_1\tau^{1-\alpha} + (1/2)B\tau^\beta + (1/2)B_1\tau^{\beta+\Delta} \quad (10)$$

将 α 、 β 和 Δ 分别固定在理论值上,把来自表 2 和表 3 的 B 、 B_1 、 ρ_c 、 A_0 和 A_1 的值代入式(9)和式(10),得出共存曲线上两相广义密度的计算值,示于图 1 用实线(—)表示,可以看出计算值与实验值吻合得很好.

3 结论

本文采用折射率法研究了 DMA 与 AOT 的摩尔比 ω 为 3.46 的非水微乳体系(DMA+AOT+正辛烷)的临界行为.实验发现,该体系的临界指数 β 在较宽的温度范围内符合 Fisher 重整化普适类别,并且研究表明在 Δn 、 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\psi$ 三个序参量中, $\Delta\varphi$ 为较好的序参量.

References

- 1 Simmons, B. A.; Li, S.; John, V. T.; McPherson, G. L.; Bose, A.; Zhou, W.; He, J. *Nano. Lett.*, **2002**, **2**(4): 263
- 2 Xiong, L.; He, T. *Chem. Mater.*, **2006**, **18**(9): 2211
- 3 Holmberg, K. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **2003**, **8**(2): 187
- 4 Engberts, J. B. F. N.; Fernández, E.; García-Río, L.; Leis, J. R. *J. Org. Chem.*, **2006**, **71**(16): 6118
- 5 Lawrence, M. J.; Rees, G. D. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, **2000**, **45**(1): 89
- 6 Jing, F.; An, X. Q.; Shen, W. G. *J. Mol. Catal. B: Enzym.*, **2003**, **24-25**: 53
- 7 Martino, A.; Kaler, E. W. *J. Phys. Chem.*, **1990**, **94**(4): 1627
- 8 Arcoletto, V.; Aliotta, F.; Goffredi, M.; La Manna, G.; Turco Liveri, V. *Mater. Sci. Eng. C*, **1997**, **5**(1): 47
- 9 Riter, R. E.; Kimmel, J. R.; Undiks, E. P.; Levinger, N. E. *J. Phys. Chem. B*, **1997**, **101**(41): 8292
- 10 Riter, R. E.; Undiks, E. P.; Kimmel, J. R.; Levinger, N. E. *J. Phys. Chem. B*, **1998**, **102**(41): 7931
- 11 Laia, C. A. T.; Lopez-Cornejo, P.; Costa, S. M. B.; d'Oliveira, J.; Martinho, J. M. G. *Langmuir*, **1998**, **14**(13): 3531
- 12 Falcone, R. D.; Correa, N. M.; Biasutti, M. A.; Silber, J. J. *Langmuir*, **2000**, **16**(7): 3070
- 13 Lopez-Cornejo, P.; Costa, S. M. B. *Langmuir*, **1998**, **14**(8): 2042
- 14 Novaki, L. P.; Correa, N. M.; Silber, J. J.; El Seoud, O. A. *Langmuir*, **2000**, **16**(13): 5573
- 15 El Seoud, O. A.; Correa, N. M.; Novaki, L. P. *Langmuir*, **2001**, **17**(6): 1847
- 16 Silber, J. J.; Falcone, R. D.; Correa, N. M.; Biasutti, M. A.; Abuin, E.; Lissi, E.; Campodonico, P. *Langmuir*, **2003**, **19**(6): 2067
- 17 Falcone, R. D.; Correa, N. M.; Biasutti, M. A.; Silber, J. J. *J. Colloid Interface Sci.*, **2006**, **296**(1): 356
- 18 Shirota, H.; Segawa, H. *Langmuir*, **2004**, **20**(2): 329
- 19 Laia, C. A. T.; Costa, S. M. B. *Langmuir*, **2002**, **18**(5): 1494
- 20 Laia, C. A. T.; Brown, W.; Almgren, M.; Costa, S. M. B. *Langmuir*, **2000**, **16**(23): 8763
- 21 Correa, N. M.; Pires, P. A. R.; Silber, J. J.; El Seoud, O. A. *J. Phys. Chem. B*, **2005**, **109**(44): 21209
- 22 Raju, B. B.; Costa, S. M. B. *Spectrochim. Acta Part A*, **2000**, **56**(9): 1703
- 23 Correa, N. M.; Levinger, N. E. *J. Phys. Chem. B*, **2006**, **110**(26): 13050
- 24 Peng, S. J.; An, X. Q.; Shen, W. G. *J. Colloid Interface Sci.*, **2005**, **287**(1): 141
- 25 Peng, S. J.; An, X. Q.; Shen, W. G. *J. Chem. Thermodyn.*, **2006**, **38**(1): 43
- 26 An, X. Q.; Chen, J. Y.; Huang, Y. G.; Shen, W. G. *J. Chem. Thermodyn.*, **2002**, **34**(7): 1107
- 27 Martin, A.; Lopez, I.; Monroy, F.; Casielles, A. G.; Ortega, F.; Rubio, R. G. *J. Chem. Phys.*, **1994**, **101**(8): 6874
- 28 An, X. Q.; Feng, J.; Shen, W. G. *J. Phys. Chem.*, **1996**, **100**(4): 16674
- 29 An, X. Q.; Chen, J. Y.; Huang, Y. G.; Shen, W. G. *J. Colloid Interface Sci.*, **1998**, **203**(1): 140
- 30 Aschauer, R.; Beycens, D. *Phys. Rev. E*, **1993**, **47**(3): 185
- 31 Reddick, J. A.; Bunger, W. B.; Sakano, T. K. *Organic solvents*. 4ed. In: Weissberger, A. Ed. *Techniques of chemistry*. Vol. II. New York: Wiley-Interscience, 1986: 844
- 32 An, X. Q.; Shen, W. G.; Wang, H. J.; Zheng, G. K. *J. Chem. Thermodyn.*, **1993**, **25**(11): 1373