

# 表面活性剂分子有序组合体研究动态

杨翠英, 主曦曦, 姚旭阳

(山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266510)

**摘要:**表面活性剂分子有序组合体因其特殊的性质和重要的应用价值受到研究者的极大关注。囊泡、溶致液晶和蠕虫状胶束是目前备受关注的 3 种分子有序组合体,对其表征方法和应用等方面的研究进行了综述,探讨了 3 种有序组合体的相互转化关系。概括了正负离子表面活性剂体系中分子有序组合体的研究进展。

**关键词:**分子有序组合体;囊泡;蠕虫状胶束;溶致液晶;相互转化

中图分类号:O647.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)03-0066-06

## Research Development on Sequenced Assembly of Surfactant Molecules

YANG Cuiying, ZHU Xixi, YAO Xuyang

(College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

**Abstract:** The sequenced assemblies of surfactant molecules attracted researchers' great attention because of their special properties and significant application values. Three of them consisted of vesicle, lyotropic liquid crystals and wormlike micelle in surfactant solution attracted more researchers and the studies in several aspects, such as the development history, characterizing method and application were summarized in the paper. The inter-transition relations among them were analyzed. At last, the latest study progress of the molecular sequenced assembly in the system of cationic and anionic surfactants were discussed.

**Key words:** molecular sequenced assembly; vesicles; wormlike micelles; lyotropic liquid crystals; inter-transition

分子有序组合体是指表面活性剂的浓度超过临界胶束浓度(critical micelle concentration, CMC)时自发形成的自组装结构<sup>[1]</sup>。其形成机理是:表面活性剂分子或离子在溶液中产生疏水效应,使两亲分子可以形成多种多样的自组装结构<sup>[2-3]</sup>。分子有序组合体具有一些特殊的性质和广泛的应用价值,尤其在模板功能和微反应器方面,对新材料的合成有着重要作用<sup>[4-6]</sup>,在分析化学中也开始显现出一定的应用潜力<sup>[7]</sup>。表面活性剂有序组合体已经成为化学工作者研究的热点领域之一。其中,囊泡、溶致液晶和蠕虫状胶束是目前备受关注的 3 种分子有序组合体,在一定条件下它们可以相互转化。

## 1 囊泡

囊泡是由两亲分子构成的一种有序结构,它是由密闭双分子层所形成的球型或椭球型的单室或多室结构。由天然表面活性物质磷脂所形成的囊泡通常也称为脂质体。脂质体是人类最早发现的囊泡体系<sup>[8]</sup>,它有着独特的性质和结构,目前利用表面活性剂分子组装的这种结构可用于生物模拟、药物的封装等。

1959 年,Stoeckenius 发现磷脂分子在水中溶胀会形成多层结构,后来被证明是囊泡。1965 年 Bangham 等<sup>[9]</sup>将干磷脂分散于水中用超声波的手段制得了多室囊泡,这标志着人工制备囊泡研究的开始。1977 年, Kunitake 等<sup>[10]</sup>以双十二烷基二甲基溴化铵制得了囊泡,之后的很多研究证明具有双链结构的两亲分子可以

收稿日期:2010-10-26

作者简介:杨翠英(1963—),女,山东肥城人,副教授,主要从事表面活性剂方面的研究. E-mail: yeytu@126.com.

形成囊泡。与此同时,研究者也发现一些单链两亲分子在一定条件下也能形成囊泡。1972年,Gebicki等<sup>[11]</sup>用不饱和脂肪酸—油酸制得了囊泡。1981年,Kunitake等<sup>[12]</sup>从形成液晶的两亲分子结构出发,在单链两亲分子的疏水链中插入至少有两个苯环的添加剂也能够形成囊泡。但是单链表面活性剂形成囊泡对pH等条件要求很高,条件不易控制。

最初,人工囊泡的制备需要借助于外力的作用,比如超声波、注射和反向蒸发等,操作非常麻烦。而且,靠机械作用形成的囊泡都是亚稳定的,机械力除去后,囊泡膜的曲率会丧失,导致囊泡形变,限制了囊泡的广泛应用。Hargreaves等<sup>[13]</sup>发现,当向表面活性剂溶液中加入助表面活性剂如长链醇时,双亲分子会自发形成囊泡。Kaler等<sup>[14-15]</sup>随后进行了系统的研究,表明在 $C_8 \sim C_{12}$ 的烷基硫酸盐、磺酸盐及十二烷基苯磺酸钠等阴离子表面活性剂与十六烷基三甲基苯磺酸铵、 $C_{12} \sim C_{18}$ 烷基三甲基溴化铵、十六烷基氯化吡啶等阳离子表面活性剂的混合溶液中,均能自发形成囊泡。囊泡的大小、相变温度、包藏率等性质与正负离子表面活性剂的比例有一定关系。此后的研究<sup>[16-17]</sup>发现,阴阳离子表面活性剂复配、离子表面活性剂和助表面活性剂复配、两性表面活性剂和阴离子表面活性剂复配,两种阳离子表面活性剂复配也可自发形成囊泡。

囊泡相的形成,是不饱和键、氢键、配位键、静电力和疏水力等共同作用的结果。近几年出现了聚合囊泡,它是在可形成囊泡的两亲分子中引入适当的不饱和键,在形成囊泡后使之聚合,利用这些不饱和键聚合成聚合物来增加囊泡的稳定性。在两亲分子中不饱和键的位置通常有3种:疏水链的尾部,中部和极性头部。利用氢键及配位诱导作用,也可在一种特殊的溶剂——室温离子液中制得囊泡相<sup>[18-20]</sup>。另外,一些新型的表面活性剂,如Gemini型和Bola型表面活性剂分子由于其特殊的双头基和双尾基的结构,使得分子间的静电和疏水作用异于传统表面活性剂,在水中更易自发形成囊泡<sup>[21]</sup>,稳定性很好,从而克服了机械制得的囊泡不稳定的缺点,实际应用更加方便。

囊泡的表征有很多方法,如冷冻蚀刻电镜法<sup>[22]</sup>(freeze-fracture transmission electron microscope, freeze-fracture TEM)、光散射法<sup>[23]</sup>、负染色透射电镜法<sup>[24]</sup>、葡萄糖捕获法(glucose trapping)以及流变法等。其中,freeze-fracture TEM是最直观的一种方法,利用这种方法可以直接得到各种囊泡的照片,但缺点是费用高且操作复杂;相比之下,光散射方法要简单得多,它分为静态光散射和动态光散射,可以与TEM相结合,在确认囊泡存在的前提下,准确地给出其半径,并可以跟踪监测其变化。光散射可以通过粒径的变化确认囊泡的存在;而流变法则可以通过胶束、囊泡和虫状胶束流变性质的差别反映其结构的变化<sup>[25]</sup>,是最常用的研究方法之一。最近,荧光探针法<sup>[26]</sup>也被广泛应用于囊泡体系的研究中。

囊泡的应用范围很广,是理想的生物膜模拟体系,可为仿生研究提供一条新的途径。囊泡具有奇特的结构,即存在亲水微区和疏水微区,这使得囊泡具有同时运载水溶药物和水不溶药物的能力,是理想的体内药物的载体。由于分子进出囊泡需要较长的时间,近年来人们利用囊泡作为缓释剂,以更好地发挥药效。在材料科学及化学反应领域,囊泡被用作模板来制备纳米材料,并为某些化学反应提供合适的微环境,在化妆品工业以及食品工业有一定的应用。

## 2 溶致液晶

液晶是指处于“中介相”状态(介晶态)的物质,它一方面具有象液体一样的流动性和连续性,另一方面又具有象晶体一样的各向异性。根据形成条件和组成可将液晶分为热致液晶和溶致液晶。热致液晶的液晶相是由温度变化引起的,只在一定的温度范围内存在,而溶致液晶则由化合物和溶剂组成,液晶相是由浓度变化引起的。表面活性剂中形成的分子有序组合体更多地是指溶致液晶。它通常是一定浓度的表面活性剂和溶剂形成的二元或多元体系,兼具液体的流动性和晶体的各向异性,结构多样,长程有序<sup>[27]</sup>。随着表面活性剂溶液浓度的增大,一般依次会出现六角状、立方状和层状三种液晶形式,也有人发现浓度更大时会出现反立方液晶和反六方液晶。

奥地利植物学家Reinitzer于1888年在加热胆甾醇苯甲酸晶体时首先观察到液晶现象。次年,德国物理学家Lehmann(莱曼)对此现象进行了研究,并提出液晶(liquid crystal)这一术语。1895年,莱曼首次在表面活性剂体系油酸铵水溶液中发现了液晶,后来,在人工合成的多种表面活性剂溶液中观察到了液晶相的

存在。表面活性剂液晶的研究多集中于单一的表面活性剂或表面活性剂/助剂体系。李干佐等<sup>[28]</sup>研究了离子表面活性剂中添加醇或者醚时体系的相图、形成的层状液晶纹理和性质。随着混合表面活性剂体系的深入研究,关于混合表面活性剂液晶的研究也逐渐展开。戴乐蓉等<sup>[29]</sup>对离子型表面活性剂十二烷基硫酸钠、十六烷基三甲基溴化铵与非离子表面活性剂聚氧乙烯油醇醚、烷基酚聚氧乙烯醚混合体系溶致液晶的相图及层状液晶的结构进行了研究,并得出了一些结论。影响溶致液晶的形成和结构的因素有两种:胶团内组分的相互作用和胶团彼此间的相互作用。前者主要受烷基链堆积的约束,后者则受静电斥力、空间位阻和溶剂化三种因素的影响。对于离子型表面活性剂,尽管反离子影响强烈,但是胶团表面仍带有大量电荷,使胶团内组分之间或胶团之间存在静电斥力。对于非离子表面活性剂,极性头基的水合作用较小,表面活性剂分子烷基链之间的范德华引力与极性头基之间的体积阻力构成一对平衡力。表面活性剂水溶液中的水含量变化可引起液晶相的转变,随着水含量的增加,其相变序列一般是:固体→层状液晶→立方液晶(六方液晶)→胶团→溶液<sup>[30]</sup>。

研究液晶的手段很多,如偏光显微镜法,差示扫描量热法,小角中子散射和小角 X 光散射法<sup>[31]</sup>,荧光探针法,流变学和核磁共振联合法等<sup>[32]</sup>。其中,偏光显微镜法是最直接最方便快捷的手段,但是立方液晶为各向同性,用偏光显微镜法无法检测立方液晶的存在。差示扫描量热法能够准确地确定相变的温度和相存在的温度,但是不能确定具体的相态和相结构。小角中子散射,小角 X 光散射和荧光探针法等是近年才发展起来的检测技术,可以准确测定液晶的结构。

### 3 蠕虫状胶束

表面活性剂的浓度恰好在临界胶束浓度 CMC 之上时,胶束通常是圆形的。在特定的情况下(如特定的温度、盐度等),增加表面活性剂或电介质的浓度,可使表面活性剂胶束的形状由球状转变为棒状,胶束经历延长并形成巨大和高度弯曲的聚集体,称为蠕虫状或线状胶束。浓度更高时,蠕虫状胶束还可以相互缠绕、粘附甚至融合形成三维网状结构,使溶液粘度急剧增加,并表现出较高的粘弹性。蠕虫状胶束是热力学平衡聚集体,其摩尔质量可达  $10^6$  g/mol,长度几十纳米甚至更长;还有些特殊的蠕虫状胶束,在一维线状的主体外还有很多像绒毛一样的细小分支,这种蠕虫状胶束也被形象地叫做多毛的蠕虫状胶束<sup>[33]</sup>。

早在 1926 年,Hatschek 等发现油酸铵盐的水溶液呈现反常的高粘度,但受当时条件的限制,他们仅对该现象进行了表述,却未能揭示其微观结构。此后,随着光散射、脉冲傅立叶方法和多维核磁共振等新实验技术应用及胶束水溶液体系和高分子溶液理论的进展,人们才开始对蠕虫状胶束的形成机理、微观形态结构和溶液体系独特的流变性能有了深入的认识。国外对蠕虫状胶束的研究主要集中在表面活性剂体系中胶束的形态转变、胶束溶液流变性和粘弹性及其产生机理。

单独的表面活性剂体系如阳离子表面活性剂<sup>[34-36]</sup>、阴离子表面活性剂<sup>[37]</sup>和非离子表面活性剂都可以形成蠕虫状胶束,但仍然是以阳离子表面活性剂为主,如烷基溴(氯)化铵、烷基溴(氯)化吡啶等。早在 19 世纪 80 年代末 90 年代初,对于长链阳离子表面活性剂体系在加盐的情况下蠕虫状胶束的理论模拟及其动力学和流变学行为的广泛研究已同时展开。

后来,研究者发现混合表面活性剂体系中也能形成蠕虫状胶束。例如:离子-两性表面活性剂体系、两性-非离子表面活性剂体系、离子-非离子表面活性剂体系和混合非离子表面活性剂体系形成的粘弹性溶液中包含蠕虫状胶束。另外,阴阳离子表面活性剂中因增效的自组装作用也可形成蠕虫状胶束体系。Raghavan 等<sup>[38]</sup>利用粘度法系统研究了不同碳链长度的阳离子表面活性剂烷基三甲基溴化铵( $C_n$ TAB)与油酸钠(NaOA)形成蠕虫状胶束的不同情况,发现当 NaOA 与  $C_8$ TAB 的质量之比为 7:3 时,体系表现出显著较高的粘性(粘度是单组分表面活性剂体系的百万倍),说明生成了巨大的、尾基相互缠绕的蠕虫状胶束。发现在阴阳离子表面活性剂混合体系中,当表面活性剂尾基的碳链长度达到一个最佳的不对称值时蠕虫状胶束的增效生长作用达到最大值。

我国对于蠕虫状胶束体系的研究起步较晚,并多集中于其性质和应用研究,对于其机理和模型模拟方面的研究鲜有报道。牟建海等<sup>[39]</sup>在研究阴离子表面活性剂的蠕虫状胶束时,利用冷冻蚀刻电镜法从放大 4 万

倍的电子显微镜照片中可以很明显地看到柔软的蠕虫状胶束的存在。张为灿等<sup>[40]</sup>研究发现阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(cetyltrimethyl ammonium bromide, CTAB)在 KBr 的作用下可以形成蠕虫状胶束,并研究了 KBr 浓度对胶束形状的影响,发现当 KBr 浓度大于 0.2 mol/L 时,胶束为蠕虫状。胡忠前等<sup>[41]</sup>利用表面活性剂蠕虫状胶束溶液与疏水缔合聚合物之间的协同效应,用作油田压裂液。

蠕虫状胶束的特殊结构使它具有高表面活性、高粘度和高剪切稀释性等特性<sup>[42]</sup>。与一般的化学高分子聚合物不同,自组装蠕虫胶束可以在剪应力下破坏并重新形成,这使它在高剪切的环境中应用时十分稳定。在油气开采方面,可以做良好的压裂剂、酸化剂和应用于三次采油驱油体系以提高原油采收率。一些新兴的研究中还将蠕虫状胶束作为神奇的筛分基质用于毛细管电泳分离 DNA 片段的过程<sup>[43]</sup>。

#### 4 各种有序组合体的关系

表面活性剂溶液中可以形成囊泡、溶致液晶、蠕虫状胶束等各种分子有序组合体。条件改变时,各种有序结构之间是可以相互转变的,其转变主要受浓度、温度和添加剂的影响。

随表面活性剂体系浓度减小,体系中溶致液晶结构变化顺序为:层状液晶→六方液晶→立方状液晶。在浓度增大的时候球状胶束将转变成棒状甚至蠕虫状胶束,但某些体系如十二烷基硫酸钠和十二烷基三乙基溴化铵混合胶束在高浓度区又会出现随着浓度增大棒状转变为球状的现象<sup>[44]</sup>。蠕虫状胶束在稀释的时候也有可能转变为单壁囊泡<sup>[45]</sup>等。

黄建滨等<sup>[46]</sup>系统研究总结了温度对表面活性剂体系分子有序结构的调控作用。温度能够控制囊泡的形状、控制胶束与囊泡间的相互转变、囊泡的聚集和融合以及囊泡与层状液晶之间的相互转变。

层状胶束加入某些助剂可以形成囊泡<sup>[47-48]</sup>。添加蔗糖时,立方液晶转变为反向立方状液晶和反向六方状液晶<sup>[49]</sup>。向非离子表面活性剂复配体系 LA070 /C<sub>8</sub>H<sub>17</sub>OH/H<sub>2</sub>O 中加入离子型表面活性剂能导致层状液晶相转变为囊泡<sup>[50]</sup>。

#### 5 结语

囊泡、溶致液晶、蠕虫状胶束 3 种表面活性剂有序组合体的特征、流变性和形成机理等方面已得到了深入的研究,多种实验技术也成功地应用于其功能、形成条件、稳定性的研究中。表面活性剂溶液中形成的特殊有序组合体具有特殊的结构和性质,使有序分子组合体在生命、信息、能源、材料等领域得到了广泛的应用。最近兴起的室温离子液体中分子有序组合体的研究将成为该领域的研究热点,必将对化学化工及其相关领域的发展起到极大的推动作用。

#### 参考文献:

- [1]赵国玺.表面活性剂物理化学[M].北京:北京大学出版社,1991.
- [2]JONSSON B, LINDMAN B, HOLMBERG K, et al. Surfactants and polymers in aqueous solution[M]. New York: John Wiley Sons, 1998.
- [3]TANFORD C. The hydrophobic effect[M]. New York: John Wiley Sons, 1973.
- [4]FENDLER J H, FENDLER E J. Catalysis in micellar and macromolecular systems[M]. New York: Academic Press, 1975.
- [5]LEE K H, MAYO P. Biphasic photochemistry: photochemical regiospecificity and critical micelle concentration determination [J]. Photochemistry and Photobiology, 1980, 31(4): 311-314.
- [6]FENDLER J H. Atomic and molecular clusters in membrane mimetic chemistry[J]. Chemical Reviews, 1987, 87(5): 877-899.
- [7]BURGUERA J L, BURGUERA M. Analytical applications of organized assemblies for on-line spectrometric determinations: Present and future[J]. Talanta, 2004, 64(5): 1099-1108.
- [8]FENDLER J H. Membrane mimetic chemistry[M]. New York: John Wiley Sons, 1982.
- [9]BANGHAM A D, STANDISH M M, WATKINS J C. Diffusion of univalent ions across the lamellae of swollen phospholipids[J]. Journal of Molecular Biology, 1965, 13(1): 238-252.
- [10]KUNITAKE T, OKAHATA Y. A totally synthetic bilayer membrane[J]. Journal of the American Chemical Society, 1977, 99(11): 3860-3861.

- [11] GEBICKI J M, HICKS M. Ufasomes are stable particles surrounded by unsaturated fatty acid membranes[J]. *Nature*, 1973, 243(5404): 232-234.
- [12] KUNITAKE T, OKAHATA Y, SHIMOMURA M, et al. Formation of stable bilayer assemblies in water from single-chain amphiphiles; Relationship between the amphiphile structure and the aggregate morphology[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1981, 103(18): 5401-5413.
- [13] HARGREAVES W R, DEAMER D W. Liposomes from ionic, single-chain amphiphiles[J]. *Biochemistry*, 1978, 17(18): 3759-3768.
- [14] KALER E W, MURTHY A K, ZASADZINSKI R B. Spontaneous vesicle formation in aqueous mixtures of single-tailed surfactants[J]. *Science*, 1989, 245: 1371-1374.
- [15] KALER E W, HERRINGTON K L, MURTHY A K, et al. Phase behavior and structures of mixtures of anionic and cationic surfactants[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1992, 96(16): 6698-6707.
- [16] ZHAO G X, HUANG J B. Vesicle formation in aqueous solution of surfactant mixture[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 1992, 8(5): 583-585.
- [17] ZHAO G X, YU W L. Vesicles from mixed sodium 10-undecenoate-decyltrimethylammonium bromide solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1995, 173(1): 159-164.
- [18] HAO J, WANG J, LIU W, ET AL. Zn<sup>2+</sup>-induced vesicle formation[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(4): 1168-1172.
- [19] WANG J, SONG A, JIA X, et al. Two routes to vesicle formation; Metal-ligand complexation and ionic interactions[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109(22): 11126-11134.
- [20] HAO J, SONG A, WANG J, et al. Self-assembled structure in room-temperature ionic liquids[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2005, 11(13): 3936-3941.
- [21] 苑再武. 囊泡的形成、结构及有序结构转变研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [22] HAO J C, HUANG J B, XU G Y, et al. Freeze-fracture transmission electron microscopy studies on the self-assemblies of amphiphilic solutions[J]. *Science in China: Series B*, 2003, 46(6): 567-576.
- [23] SUZANA S, DURDICA T, NIKOLA L. Formation of vesicles in diluted aqueous solutions of surfactant investigated by direct analysis of light scattering[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2001, 89: 283-291.
- [24] CHEN W J, LI G Z, ZHAI L M, et al. Spontaneous vesicle formation in mixed aqueous solution of poly-tailed cationic and anionic surfactants[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2003, 14(3): 327-330.
- [25] 翟利民, 李千佐, 郑立强. 囊泡研究进展[J]. *日用化学品科学*, 1999(增刊): 21-23.  
ZHAI Limin, LI Ganzuo, ZHENG Liqiang. Progress in study of vesicles[J]. *Detergent and Cosmetics*, 1999(S): 21-23.
- [26] 何煦, 顾新华, 赵国玺. 荧光探针法研究囊泡融合的动力学[J]. *物理化学学报*, 1995, 11(6): 504-508.  
HE Xu, GU Xinhua, ZHAO Guoxi. Fluorescence method for studying the fusion of vesicle[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 1995, 11(6): 504-508.
- [27] 张国栋, 陈晓, 靖波. 室温离子液体中的有序分子组合物[J]. *化学进展*, 2006, 18(9): 1085-1090.  
ZHANG Guodong, CHEN Xiao, JING Bo. Molecular organized assemblies in ionic liquid under room temperature[J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(9): 1085-1090.
- [28] 李千佐, 杨博, 郑立强, 等. 含有十二烷基磺酸钠的层状溶致液晶的研究[J]. *科学通报*, 1993, 38(16): 1471-1475.  
LI Ganzuo, YANG Bo, ZHENG Liqiang, et al. Research of layer lyotropic liquid crystals contained sodium dodecyl sulfate[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(16): 1471-1475.
- [29] 戴乐蓉, 卜林涛. 离子型与非离子型混合表面活性剂体系溶致液晶相图及结构的研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 1999, 35(2): 137-142.  
DAI Lerong, BU Lintao. The study of phase diagram and structure of lyotropic liquid crystal in mixed ionic and nonionic surfactants systems[J]. *Acta Scientiarum Naturae Universitatis Pekinensis*, 1999, 35(2): 137-142.
- [30] 冯尚华, 王红霞, 张高勇. 表面活性剂溶致液晶的流变学性质[J]. *化学进展*, 2004, 16(5): 690-691.  
FENG Shanghua, WANG Hongxia, ZHANG Gaoyong. Rheological properties of surfactant lyotropic liquid crystals[J]. *Progress in Chemistry*, 2004, 16(5): 690-691.
- [31] RICHTER W, LAUGER J, LINEMANN R. Shear orientation of a micellar hexagonal liquid crystalline phase; A rheo

- and small angle light scattering study[J]. *Langmuir*, 1994, 10(11): 4374-4379.
- [32] LUKASEHEK M, GRABOWSKI D A, SCHMIDT C. Shear-induced alignment of a hexagonal lyotropic liquid crystal as studied by rheo-NMR[J]. *Langmuir*, 1995, 11(9): 3590-3594.
- [33] MASSIERA G, RAMOS L, LIGOURE C. Hairy wormlike micelles: Structure and interactions[J]. *Langmuir*, 2002, 18(15): 5687-5694.
- [34] BHAT M, GAIKAR V G. Characterization of interaction between butyl benzene sulfonates and cetyl trimethylammonium bromide in mixed aggregate systems[J]. *Langmuir*, 1999, 15(14): 4740-4751.
- [35] ZHANG W C, LI G Z, SHEN Q, et al. Effect of benzyl alcohol on the rheological properties of CTAB/KBr micellar systems [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000, 170(1): 59-64.
- [36] TAKAHASHI T, YAKO N, SHIRAKASHI M. Relationship between shear-induced structure and optical anisotropy on CPyCl/ NaSal aqueous solution[J]. *Journal of the Society of Rheology*, 2001, 29(1): 27-32.
- [37] SAVINS J G. Contrasts in the solution drag reduction characteristics of polymeric solution and micellar systems[M]. New York: Plenum Press, 1969.
- [38] SRINIVASA R R, GERHARD F, ERIC W K. Wormlike micelles formed by synergistic self-assembly in mixtures of anionic and cationic surfactants[J]. *Langmuir*, 2002, 18(10): 3797-3803.
- [39] MU J H, LI G Z. Rheology of viscoelastic anionic micellar solutions in the presence of a multivalent counterions[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2001, 279(9): 872-878.
- [40] 张为灿, 李千佐, 牟建海, 等. 十六烷基三甲基溴化铵蠕虫状胶束的形成及其性质[J]. *科学通报*, 2000, 45(11): 1138-1141.  
ZHANG Weican, LI Ganzuo, MOU Jianhai, et al. The formation and properties of hexadecyl triply co-hydrolyzed brominated ammonium worm micelle[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1138-1141.
- [41] 胡忠前, 马喜平, 王红, 等. 新型复合压裂液体系研究进展[J]. *精细石油化工进展*, 2007, 4(8): 17-20.  
HU Zhongqian, MA Xiping, WANG Hong, et al. Research progress of new composite fracturing fluid department[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2007, 4(8): 17-20.
- [42] HIRONOBU K, CARLOS R, YUSUKE T, et al. Effects of added nonionic surfactant and inorganic salt on the rheology of sugar surfactant and CTAB aqueous solutions[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2004, 38(3-4): 127-130.
- [43] WEI W, YEUNG E S. DNA capillary electrophoresis in entangled dynamic polymers of surfactant molecules[J]. *Analytical Chemistry*, 2001, 73(8): 1776-1783.
- [44] 肖进新, 赵国玺. 高浓度区正负离子表面活性剂混合胶团的形状与大小变化[J]. *化学研究与应用*, 2001, 13(5): 502-505.  
XIAO Jinxin, ZHAO Guoxi. Variance of shape and size of mixed micelles of cationic-anionic surfactants at high concentration[J]. *Chemical Research and Application*, 2001, 13(5): 502-505.
- [45] KALER E W. Transition from micelles to vesicles in aqueous mixtures of anionic and cationic surfactants[C]//Proceeding of 71th Colloid and Surface Science Symposium. New York: ACS Press, 1997: 162-165.
- [46] 尹海清, 黄建滨. 温度调控表面活性剂溶液有序结构转变研究新进展[J]. *物理化学学报*. 2005, 21(11): 1324-1330.  
YIN Haiqing, HUANG Jianbin. Progress in the temperature-controlled transition of self assemblies in surfactant solutions [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2005, 21(11): 1324-1330.
- [47] KIM J M, THOMPSON D H. Tetraether bolaform amphiphiles as models of archea-bacterial membrane lipids: Synthesis, differential scanning calorimetry, and mono-layer studies[J]. *Langmuir*, 1992, 8(2): 637-644.
- [48] OKAHATA Y, KUNITAKE T. Formation of stable monolayer membranes and related structures in dilute aqueous solution from two-headed ammonium amphiphiles[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1979, 101(18): 5231-5234.
- [49] 王志宁, 郑利强, 李千佐. 蔗糖对 MO/水立方液晶体系流变性质的影响[J]. *化学学报*, 2005, 63(4): 274-278.  
WANG Zhining, ZHENG Liqiang, LI Ganzuo. Effects of sucrose on the rheological properties of cubic phase formed from monoolein/H<sub>2</sub>O mixture[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2005, 63(4): 274-278.
- [50] 穆念孔, 赵红军, 王鸿雁, 等. 表面活性剂体系中电荷诱导的层状相向囊泡相的转化[J]. *化学研究*, 2007, 18(4): 68-71.  
MU Niankong, ZHAO Hongjun, WANG Hongyan, et al. Transition from lamellar phase to vesicle-phase induced by ionic surfactants[J]. *Chemical Research*, 2007, 18(4): 68-71.