

技术进展

疏水缔合水溶性聚合物的研究进展

唐善法¹ 罗平亚²

(1. 江汉石油学院石油与材料工程学院, 荆州 434102; 2. 西南石油学院, 南充 637001)

摘要:疏水缔合水溶性聚合物是一种亲水性大分子链上带有少量疏水基团的水溶性聚合物,其特有的两亲分子结构使溶液具有独特的流变性。从疏水缔合聚合物的分子结构模型及聚合方法、溶液结构形成方式与类型、聚合物分子结构对溶液性质的影响以及聚合物在界面的吸附行为等方面综述了最新研究进展,展望了它在油气开采、污水污泥处理、涂料工业、生物医药、工程材料等方面的应用前景。

关键词:疏水缔合聚合物;分子结构;溶液结构;溶液性质;吸附

中图分类号:TE39;O631.11

文献标识码:A

Advances in research of hydrophobically associating water-soluble polymerTANG Shan-fa¹, LUO Ping-ya²

(1. Institute of Oil and Material Engineering, Jianghan Petroleum University, Jingzhou 434102, China;

2. Southwest Petroleum Institute, Nanchong 637001, China)

Abstract: Hydrophobically associating water-soluble polymer is a water-soluble polymer with a few hydrophobic groups in the hydrophilic macromolecular chain. The solution has unique rheology because of its amphiphilic molecular structure. Latest advances in the research of molecular structure model and polymerization method, solution structure forming mode and type, effect of polymer molecular structure on solution property and adsorption of polymer on solid-liquid interface are reviewed. Prospects of applications in oil/gas exploitation, wastewater and sludge treatment, coatings, biological drugs and engineering materials are analyzed.

Key words: hydrophobically associating polymer; molecular structure; solution structure; solution property; adsorption

疏水缔合水溶性聚合物(包括水溶性疏水改性聚合物),是指聚合物亲水性大分子链上带有少量疏水基团(摩尔分数为 2%~5%)的水溶性聚合物^[1]。由于其特有的两亲结构使其溶液特性与一般水溶性聚合物溶液大相径庭。在水溶液中,此类两亲聚电解质的疏水基团相互缔合,以及带电离子基团的静电排斥与吸引相互竞争与协同,使大分子链产生分子内或分子间的缔合作用,形成各种不同形态的胶束纳米结构——超分子网络结构^[2]。在稀溶液中,大分子主要以分子内缔合为主,使大分子链发生卷曲,流体力学体积减小,特性黏数下降。当聚合物的浓度高于某一临界值时,大分子链形成以分子间缔合作用为主的超分子结构——“动态物理胶联网络结构”,溶液黏度大幅上升。小分子电解质的加入使

溶液的极性增加,疏水缔合作用增强^[3],具有明显的抗盐性。在高剪切作用下,疏水聚合物缔合形成的“胶联网络”被破坏,溶液黏度下降;当剪切作用消除后,大分子间胶联网络重新形成,黏度再度恢复;而不发生一般高分子聚合物的不可逆剪切降解^[4]。此外,由于疏水缔合是熵驱动的吸热效应,其溶液具有一定的耐温增黏性,因此其在涂料、药物缓释、油气开采、污水处理以及生物大分子、纳米粒子制备等方面具有巨大的应用潜力^[5]。

1 分子结构模型及聚合方法**1.1 分子结构模型**

利用拓扑结构, Francois^[6]将水溶性缔合聚合物

收稿日期:2001-10-22

作者简介:唐善法,1965年生,副教授,在职博士生,主要从事水溶性聚合物、污水处理及三次采油方面的研究工作;罗平亚,1940年生,中国工程院院士,教授,博士生导师,长期从事油气田勘探与开发新理论、新型油田化学剂的研究工作。

分为接枝聚合物和远螯型聚合物两种结构模型,前者包括疏水基在主链上无规分布和连续嵌段分布以及位于亲水隔基的末端等情况;后者包括疏水基接在亲水主链的一端或两端和一疏水基与多个亲水主链相连的“星”型聚合物等情况。接枝型疏水缔合聚合物有疏水改性的羟乙基纤维素^[7]、聚乙烯醇的改性物^[8]和疏水单体在主链上以连续微嵌段或无规分布等形式存在的疏水改性丙烯酰胺聚合物^[9]。远螯型缔合聚合物有疏水改性聚氧乙烯和端封的聚苯乙烯磺酸盐等^[10]。星型疏水缔合聚合物有两亲型聚氧乙烯聚合物^[11]。

1.2 聚合方法

关于非均相共聚、均相共聚的不适用性,胶束共聚的原理和对疏水缔合聚合物结构的影响以及大分子反应法已有较多论述^[12]。下面仅就反相微乳液聚合、无皂乳液聚合和阴离子聚合法进行概述。

1.2.1 反相微乳液聚合^[13]

反相微乳液聚合是将水溶性的单体和疏水单体在油包水乳化剂作用下,以有机物为连续相形成W/O微乳液;再以油溶性或水溶性引发剂引发聚合的方法。其特点是反应速度快,分子质量高,不需对产物溶液作后处理。赵勇用反相微乳液法对疏水型聚丙烯酰胺的合成及性能进行了研究,发现用反相微乳液聚合的大分子溶液具有更明显的增黏作用,且随疏水单体的浓度及聚合物的浓度增大而增大;而不像胶束聚合产物存在一临界“聚集”浓度值。

1.2.2 无皂乳液聚合

针对胶束聚合时表面活性剂对疏水缔合聚合物溶液性质的影响及其后处理复杂等问题,从解决疏水单体水溶性着手,人们设计了两亲性的大分子单体^[14]。由于该类单体具有两亲性,可使共聚单体在不加乳化剂条件下直接进行传统的自由基水溶液共聚,即无皂乳液聚合,简化了反应条件,有利于工业生产与应用^[15]。

1.2.3 阴离子聚合

阴离子聚合是惟一能按分子结构设计来合成并控制分子结构的聚合方法。它可用于合成特定的嵌段共聚物、支化聚合物和末端带有官能团的聚合物,并使聚合按设计的分子结构、分子质量、分子质量分布进行,从而控制产品性能。Zhang Hongmin等人^[16]利用阴离子聚合法合成了亲水主链上带有少量疏水侧链的两亲梳状聚合物——苯乙烯接枝的1-乙氧基甲基丙烯酸乙酯/甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物[(EEMA-co-GMA)-g-St]。Francois采用阴离子聚合

制备了聚氧乙烯端封远螯型疏水聚合物,并研究了其溶液流变性。Tsitsilianis等^[2]则对阴离子聚合的聚丙烯酸远螯型疏水聚合物进行了研究。

2 溶液结构

研究表明:在疏水缔合水溶性聚合物溶液内部存在局部疏水微区,或在较高浓度时存在缔合胶束聚集体^[17]。在低浓度溶液中,聚合物主要以分子内形成疏水微区为主;而在超过临界聚集浓度时,则形成分子间的疏水缔合,引起溶液黏度明显上升^[2]。Yamamoto和Yekta等人^[1,18]认为引起上述现象的原因是溶液中存在“结构”,并对疏水端封的非离子型聚氧乙烯远螯型聚合物的溶液进行了研究。认为在高于临界聚结浓度的稀溶液中,聚合物两端的疏水端基发生缔合并形成了“花状”聚集体;而当浓度进一步升高时,则形成较大的多个花状体的聚集体,且聚合物嵌段主链——聚氧乙烯链段在花状聚集体间形成了桥联,从而在溶液中形成了“瞬时网络”^[5];其流变性体现为低剪切速率时的类牛顿溶液现象和在剪切变稀前轻微的剪切增稠^[2]。Tsitsilianis等人^[2]对聚苯乙烯疏水端封聚丙烯酸盐溶液的研究,也得到了相同的结论,但由于聚电解质的作用,其溶液存在零剪黏度和屈服应力,体现出了更为明显的“网络结构”特征。Yamamoto等人^[1]认为疏水聚合物在溶液中发生缔合所形成的“胶束纳米结构”类型取决于缔合是否发生在分子内或分子间,分子内缔合导致单分子胶束的形成;而分子间的疏水缔合则产生“网络结构”,使溶液增稠。针对疏水缔合聚合物溶液中是否存在“结构”的问题,冯玉军等人^[19]采用荧光显微镜、环境扫描电镜等对自行研制的疏水缔合水溶性聚合物——丙烯酰胺/丙烯酸/烷基二甲基烯丙基季铵盐(AM/AA/CnDMAAC)和丙烯酰胺/2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸/烷基二甲基烯丙基季铵盐(AM/AMPS/CnDMAAC)在溶液中的缔合行为、网络结构进行了研究。证明在聚合物浓度高于临界缔合浓度时,溶液中确实存在“缔合网络结构”,其形成方式是疏水缔合水溶性聚合物在溶液中先形成链束,再以链束形成结构。结构表现为三维立体网络状,网络状结构的“网眼”似六边形。研究还发现疏水缔合聚合物在溶液中的质量分数低至0.001%时,溶液中仍有结构,只是结构更疏松,似乎呈单层分布。

3 溶液性质的影响因素

3.1 疏水基团的种类、链长及含量的影响

疏水缔合水溶性聚合物的溶液性质与疏水基团

的种类、链长和含量密切相关。一般芳香环类疏水基(苯基、萘基、茚基)的疏水性强于烷烃类,而全氟取代烷烃又强于含氢烷烃^[2]。强疏水性有利于聚合物的疏水缔合,引起溶液黏度的增加;分子中含有高比例的疏水基团时更是如此。通常疏水基团含量及其碳链长度增加,聚合物在溶液中缔合能力增强,增黏效果增强^[20];而发生临界缔合时聚合物浓度减小。Yamamoto 等人^[1,21]对 2-丙烯酰胺-2-甲基丙烷磺酸钠/甲基丙烯酸胺烷基取代无规共聚物的研究表明,在相同的聚合物浓度下,随着疏水长链中碳数的增加,聚合物缔合能力增强,但发生缔合时分子中所需疏水基的含量下降。一般疏水链中碳数小于 12 时,聚合物以分子内缔合为主;其他条件相同,疏水基摩尔分数 < 10% 时,聚合物以分子间缔合为主;疏水基摩尔分数为 10% ~ 50% 时,分子间和分子内缔合同时存在,但聚合物链束缔合较为疏松;疏水基摩尔分数 > 50% 时,只存在分子内的缔合,此时聚合物分子形成单一分子胶束,如同一密实球状物。

3.2 聚合物分子链上疏水基团排列顺序的影响

聚合物分子链上疏水基团的序列分布与聚合方法直接相关,如胶束聚合所得共聚物为一种微嵌段结构,反相微乳液、均相及非均相聚合所得共聚物均为无规分布^[9]。研究表明^[9],亲水、疏水基团在两亲聚合物中的序列分布是影响疏水缔合水溶性聚合物在溶液中发生分子内或分子间缔合的重要因素;微嵌段结构较无规结构具有更强的分子间缔合作用;对于同样的疏水单元,嵌段长度增加,分子间缔合能力增强。

3.3 疏水基团与主链相连间隔基团的影响

Yamamoto 等人^[21]的研究表明,若疏水基团通过酰胺基与聚合物主链相连,则该聚合物在溶液中具有很强的分子内缔合能力,并在高聚合物浓度下形成密实的单分子胶束。原因是毗邻的酰胺基间存在氢键缔合作用,加大了分子内缔合的潜能。若疏水基团是通过酯基间隔与聚合物大分子主链相连,则聚合物溶液即使在稀溶液条件下,仍可发生分子间疏水缔合,并形成多个大分子胶束聚集体。

3.4 分子质量的影响

Bock 等^[22]对 *N*-正辛基丙烯酸酯/丙烯酸共聚物研究表明,聚合物浓度及其他条件不变,聚合物分子质量增大,分子间缔合作用增强,溶液黏度明显增大。Jimenez-Regalado 等人^[20]对丙烯酸酯/烷基丙烯酸酯(AM/CnAM)疏水缔合聚合物研究时发现,分子质量增大,聚合物溶液的临界缔合浓度下降,临界

黏度上升。原因是分子质量高的聚合物链上疏水基在溶液中的相对含量也较大,疏水基间接触的几率及形成结构能力也增大;此外分子质量高的聚合物主链更长,当其浓度达到一定值时,主链参与缠结形成溶液结构的几率更大。

3.5 疏水缔合聚合物中离子基团的影响

在聚合物分子链上引入离子基团可增加疏水缔合水溶性聚合物的溶解性,但其溶液性质则由静电力和疏水缔合能共同作用来决定。静电斥力趋于使分子链扩张,有利于聚合物分子间发生缔合。Shalaby 等人^[3]在相同分子结构的条件下就 $-\text{CO}_2^-$ 、 $-\text{SO}_3^-$ 及 $-\text{RCO}_2^-$ 对聚合物溶液性能的影响进行了研究,发现含离子基团的聚合物均具有明显的聚电解质的增黏性。当加入小分子电解质后,聚合物静电荷被屏蔽,在临界缔合浓度以下,由于链的收缩,流体力学体积减小,溶液表观黏度大幅下降。在临界缔合浓度以上,缔合受离子基团种类及其与主链距离的共同影响。含 $-\text{CO}_2^-$ 和 $-\text{RCO}_2^-$ 的聚合物有优良的缔合行为,其盐溶液显示高黏度;含 $-\text{SO}_3^-$ 的聚合物几乎不受离子强度的影响。离子基团离主链的距离越近,则对聚合物疏水基团缔合的影响越小。含 $-\text{CO}_2^-$ 的聚合物的疏水缔合作用比含 $-\text{RCO}_2^-$ 的聚合物强。

4 在界面(或表面)的吸附行为

Kim 等人^[23]对聚氧乙烯远整型两亲聚合物在粒子界面吸附性能研究发现,十八烷改性聚氧乙烯聚合物由于疏水作用,在聚甲基丙烯酸甲酯胶体粒子上的吸附首先是以两个疏水端基“锚接”于粒子界面,而亲水性聚氧乙烯嵌段悬于溶液中的分子构象进行的;但随着聚合物浓度的增大,则转变为一个端基吸附于粒子表面,而另一端基伸入溶液胶束中。T. Abraham 等人^[24]对甲基丙烯酸异丁酯/甲基丙烯酸缩水甘油磺酸盐酯(PtBMA-*b*-PGMAS)亲水、疏水二嵌段聚电解质在硅片上的吸附动力学研究发现,在短程疏水缔合相互作用下,聚合物疏水链段以“锚接”形式在疏水固体界面进行吸附;分为初期成核、吸附层连续快速增长和稳态平衡 3 个过程;且均受介质含盐度及聚合物浓度的影响。在固体界面原始束缚离子层的影响下,含盐量上升,成核时间增长且与含盐量的幂次方成正比;同时平衡吸附密度及吸附层连续增长速度增大。吸附动力学数据表明,吸附并不受控于链的扩散,而决定于吸附的具体时期

与过程:即慢的成核过程与吸附层的快速生长过程。

5 应用前景

5.1 油气开采

在油气开采过程中,水溶性聚合物用量大且不可替代;特别是三次采油。常用的聚丙烯酰胺(PAM)及黄原胶虽已得到广泛应用,但PAM耐温、耐盐及抗剪切能力差;黄原胶虽性能优于PAM,但在高温下易生物降解且价格昂贵。而新型疏水缔合水溶性聚合物则具有满足上述要求的各种性能,可应用于油气开采中的调剖,三次采油、钻井、压裂等工艺^[25]。

5.2 污水污泥处理

疏水缔合水溶性聚合物因分子链上可同时带阴、阳离子基团且含少量不同烃类疏水基团,因此在污水、污泥处理中具有独特的功能^[26]。如利用其阳离子特性及疏水基团的疏水亲油特性则可使含油污水易于破乳除油,悬浮物及污泥易于絮凝、沉降脱水。而特殊疏水基团如苯环类则可使印染废水中染料得到较好的去除;在阳离子絮凝剂中引入硅烷疏水基则可提高其除油及脱色能力。

5.3 涂料工业

疏水缔合水溶性聚合物其特有的流变性及耐盐性能为水基涂料提供了良好的增稠剂,从而为无有机溶剂、无污染、高性能涂料的发展创造了契机。研究表明,疏水改性的聚乙烯醇及疏水缔合聚合物丙烯酸/丙烯酸十四酯(AM/TA)共聚物具有良好的增稠及抗盐性,可较好地在水基涂料进行增稠^[8,27]。

5.4 生物医学

利用多糖及胆汁酸本身的生物可降解性,以及胆汁酸自身的两亲性能对多糖进行疏水改性,所得产物具有良好的生物相容性,有利于与蛋白质、酶或类酯相互作用^[5,17]。聚-N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAM)疏水化修饰产物可使其疏水部分作为锚基插入类脂双层中,并利用PNIPAM的温度效应调节类脂双层膜中药物的释放^[28]。由疏水改性的“普鲁兰”(Pullulan)和疏水改性的PNIPAM自组装形成的热敏感性纳米粒子可较好地应用于医药与生物技术中^[5]。

5.5 工程材料

大多数高分子具有绝缘性,极易积累电荷产生静电。通过分子设计,合成两亲聚合物,用作抗静电剂或抗静电材料,兼具永久抗静电性和高分子基的良好相容性^[29]。

参考文献

- [1] Yamamoto Hiroshi, Tomatsu Itsuro, Hashidzume Akihito, et al. Associative properties in water of copolymers of sodium 2-(acrylamido)-2-methylpropanesulfonate and methacrylamides substituted with alkyl groups of varying lengths[J]. *Macromolecules*, 2000, 33: 7852 ~ 7861
- [2] Tsitsilianis Constantinos, Iliopoulos Ilias, Ducouret Gylaine. An associative polyelectrolyte end-capped with short polystyrene chains. Synthesis and rheological behavior[J]. *Macromolecules*, 2000, 33: 2936 ~ 2943
- [3] Shalaby S W, McCormick C L, Buttlar G B. Water-soluble polymers synthesis, solution properties and applications[A]. ACS Symposium Series 467[C]. Washington D C: Am Chem Soc, 1991
- [4] Goddard E D, Gruber J V. Principles of polymer science and technology in cosmetics and personal care[M]. New York: Marcel Dekker, 1999
- [5] Akiyoshi Kazunari, Kang Eui-Chul, Kurumada Satoshi, et al. Controlled associative of amphiphilic polymers in water: Thermosensitive nanoparticles formed by self-assembly of hydrophobically modified pullulans and poly(*N*-isopropylacrylamides) [J]. *Macromolecules*, 2000, 33: 3244 ~ 3249
- [6] Francois J. Association in water of model hydrophobically end-capped poly(ethylene oxide)[J]. *Prog Org Coat*, 1994, 24(1/2/3/4): 67 ~ 74
- [7] 张健, 张黎明, 李卓美, 等. 耐盐增粘剂 HCMC 的研究[J]. *石油与天然气化工*, 2000, 29(2): 80 ~ 82
- [8] 黄学红, 许国强. 疏水物改性聚乙烯醇缔合型增稠剂[J]. *涂料工业*, 1999(11): 7 ~ 9
- [9] Hill A, Candau F, Selb J. Properties of hydrophobically associating polyacrylamides: influence of the method of synthesis[J]. *Macromolecules*, 1993, 26: 4521 ~ 4526
- [10] Tam K C, Farmer M L, Jenkins R D, et al. Rheological properties of hydrophobically modified alkali-soluble polymers-effect of ethylene-oxide chain length[J]. *Polym Sci B: Polym Phys*, 1998, 36: 2275 ~ 2280
- [11] Zhou G B, Chen X, Smid S. Phase separation phenomena in aqueous solutions of associative amphiphilic star polymers[J]. *Polym Mater Sci Eng*, 1993, 69: 102 ~ 109
- [12] 罗开富, 张熙, 黄荣华. 疏水缔合水溶性聚合物的合成[J]. *油田化学*, 1999, 16(3): 282 ~ 285
- [13] 赵勇, 何炳林, 哈润华. 反相微乳液中疏水缔合型聚丙烯酰胺的合成及性能研究[J]. *高分子学报*, 2000(5): 550 ~ 553
- [14] Schulz D N, Kaladas J J, Maurer J J, et al. Copolymers of acrylamide and surfactant macromonomers: Synthesis and solution properties[J]. *Polymer*, 1987, 28(12): 2110 ~ 2117
- [15] Kathmann E E, White L A, McCormick C L. Water-soluble copolymers. 73. Electrolyte- and pH-responsive zwitterionic copolymers of 4-[(2-acrylamido-2-methylpropyl) dimethylammonio] butanoate with 3-[(2-acrylamido-2-methyl-propyl) dimethylammonio] propanesulfonate [J]. *Macromolecules*, 1997, 30(18): 5297 ~ 5303
- [16] Zhang Hongmin, Ruckenstein Eli. One-pot, three-step synthesis of amphiphilic comblike copolymers with hydrophilic backbone and hydrophobic side chains[J]. *Macromolecules*, 2000, 33: 814 ~ 819
- [17] Nichifor Marieta, Lopes Antonio, Carpov Adrian, et al. Aggregation in water of dextran hydrophobically modified with bile acids[J]. *Macromolecules*, 1999, 32: 7078 ~ 7085

(下转第 15 页)

上做任何实验。开、停车步骤是否完全正确、恰当,很少能从理论上预测。因而对于操作者来说,积累丰富的经验是至关重要的。

要解决这种问题,通常有两种思路。一是建立生产过程物理模型,在物理模型上研究过程的操作行为。但这种方法耗资、耗时,而且建立复杂系统的物理模型的难度很大。另外一种思路即是采用动态模拟技术,首先建立准确描述过程行为的动态数学模型,然后用其研究开、停车过程的动态行为,借助动态模拟技术系统地探讨和分析开、停车的特性,从而指导开、停车过程的实施。采用动态模拟技术,可以缩短开停车时间,尽快达到稳定操作状态或安全停车;避免可能产生的误操作或事故;减少不合格产品;保证开停车过程的正常进行。

建立动态仿真系统是动态模拟技术的一项重要用途。动态仿真系统用来模拟装置的实际生产,它不仅能得到稳态的操作情况,更重要的是,借助动态仿真技术可以随意改变某些可调量,人为造成过程的动态变化条件,从而系统地考察干扰存在时系统行为的变化,其仿真效果一目了然。因而动态模拟技术已经在教学、生产过程培训以及生产过程调优方面得到广泛应用。

1.3 设计先进控制系统

先进控制系统起源于20世纪70年代末,并在90年代获得了广泛应用。现今控制系统设计的关键是了解装置的动态特性,而装置的动态特性可以通过在线过程识别或者过程动态模拟获得。动态模

拟的发展使得人们可以用计算机模拟代替现场动态测试,不仅节省了大量资金,加快了动态特性模拟数据的获取,而且对生产无任何干扰,理论上可以取得任何所需的数据。国外已将动态模拟技术应用于先进控制系统的设计,尤其是在著名的过程控制公司如美国 Setpoint 公司和 DMC 公司(均于1996年为 Aspen Tech 公司兼并),在过程的先进控制领域开展了卓有成效的研究。

1.4 质量交换网络综合^[1]

质量交换网络综合是过程系统工程的新兴分支方向。质量交换网络综合在化学工业中广泛地应用于进料预处理、产品分离及精制有用物质的回收等。近年来,它的应用则主要侧重于工业过程的废物最小化和清洁生产。几种重要的质量交换网络引起了人们极大的兴趣,它们是伴随反应过程的动态质量交换网络、动态热分离网络及动态废物截断分配网络等。

2 化工动态模拟技术的研究进展

2.1 国外研究状况

国外化工过程模拟始于20世纪50年代中后期。1958年,美国 Kellogg 公司率先推出化工过程模拟程序——灵活流程模拟系统(flexible flowsheeting),并在当时的化学工程界产生了很大的影响。随后出现了一系列稳态流程模拟软件,如 ASPEN、PROCESS、PRO-II、SPEED UP、HYSIM 等,在化学工程领域产生了重要影响并发挥了巨大的作用。有的

(上接第13页)

- [18] Yekta A, Xu B, Minnik M A. The structure of telechelic associating polymers in water[A]. In: Webber S E, Munk P, Tuzar Z. Eds. Solvents and self-organization of polymers. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 319 ~ 325
- [19] 冯玉军,罗平亚,董兆雄,等.疏水缔合水溶性聚合物溶液结构的研究[C].第二届油气藏开发工程师国际学术研讨会,南充, 1999
- [20] Jimenez-Regalado E, Selb J, Candau F. Phase behavior and properties of aqueous solutions containing mixtures of associating polymers [J]. *Macromolecules*, 2000, 33: 8720 ~ 8730
- [21] Yamamoto Hiroshi, Morishima Yotaro. Effect of hydrophobe content on intra- and interpolymer self-associations of hydrophobically modified poly(sodium 2-(acrylamido)-2-methylpropanesulfonate) in water [J]. *Macromolecules*, 1999, 32: 7469 ~ 7475
- [22] Bock J, Valin P L, Pace S J, et al. Hydrophobically associating polymers [A]. In: Stahl G A, et al. Water-soluble polymer for petroleum recovery. New York: Plenum Press, 1988. 147 ~ 160

- [23] Kim H S, Lau W, Kumacheva E. Interaction forces between adsorbed layers of associative polymer [J]. *Macromolecules*, 2000, 33: 4561 ~ 4567
- [24] Abraham T, Gisson S, Gohy J F, et al. Adsorption kinetics of a hydrophobic-hydrophilic diblock polyelectrolyte at solid-aqueous solution interface: A slow birth and fast growth process [J]. *Macromolecules*, 2000, 33: 6051 ~ 6059
- [25] 王健,郑焰,冯玉军,等.新型聚合物驱油性能评价[J]. *油田化学*, 1999, 16(2): 149 ~ 153
- [26] 岳钦艳,赵华章,高宝玉,等.有机高分子絮凝剂 P(DMDAAC-VTMS)和 P(DMDAAC-AM-VTMS)的合成与絮凝性能研究[J]. *工业水处理*, 2001, 21(3): 16 ~ 19
- [27] 黄雪梅,许国强.疏水缔合型聚合物 P(AM/TA)溶液性质的研究[J]. *精细化工*, 2000, 17(3): 152 ~ 154
- [28] 史向阳,吴世康,孙曹民.疏水化修饰的聚 N-异丙基丙烯酰胺高分子的水溶液性质研究[J]. *高分子学报*, 1999(2): 200 ~ 215
- [29] 陈尔凡,赵常礼,程远杰,等.甲基丙烯酸二甲氨基乙酯溴代烷基铵盐与苯乙烯共聚合的研究[J]. *高分子学报*, 1999(5): 588 ~ 594 ■