

离子型疏水缔合水溶性聚合物的研究进展

安会勇^{1,3}, 陈强², 宋春雷³

1. 辽宁石油化工大学化学与材料科学学院, 辽宁抚顺 113001

2. 河南理工大学材料科学与工程学院, 河南焦作 454000

3. 中国科学院长春应用化学研究所生态环境高分子材料重点实验室, 长春 130022

摘要 疏水缔合水溶性聚合物由于其独特的溶液性质, 在许多工业领域具有潜在的应用价值。离子型疏水缔合水溶性聚合物由于离子的存在, 使此类疏水缔合聚合物不仅具有良好的水溶性和独特的溶液性能, 并可实现聚合物性质的多重响应。因此, 近年来离子型疏水缔合水溶性聚合物研究受到广泛关注。本文按带电基团与疏水基团的相对位置, 将离子型疏水缔合聚合物分为 I 型 (来自于不同单体) 和 II 型 (来自于同一单体), 并按离子基团的种类分类综述了阴离子型、阳离子型以及两性疏水缔合水溶性聚合物的研究工作现状。结合研究现状提出对离子型疏水缔合水溶性聚合物的一些认识, 并展望该方向的发展趋势, 并提出甜菜碱型两性疏水缔合聚合物将成为今后此领域的研究热点。

关键词 静电作用; 疏水缔合; 水溶性聚合物; 聚电解质

中图分类号 O631

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.15.010

Development of Hydrophobically Associating Polyelectrolyte

AN Huiyong^{1,3}, CHEN Qiang², SONG Chunlei³

1. School of Chemistry and Materials Science, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning Province, China

2. School of Material Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan Province, China

3. Key Laboratory of Polymer Ecomaterials, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China

Abstract Hydrophobically Associating Water-soluble Polymers (HAWPs) had potential applications in many industrial societies due to their special properties. Recently Hydrophobically Associating Poly-Electrolytes (HAPEs) had attracted increasing interests because they possessed high water-solubility and peculiar solution property and realized multi-responsive properties, which all stemmed from their ionic groups. In this paper, HAPEs are classified into Type I (ionic units and hydrophobic groups from different monomers) and Type II (ionic units and hydrophobic groups from the same monomer) according to the related position between ionic units and hydrophobic groups and present research state of various kinds of HAPEs, such as anionic HAPEs, cationic HAPEs and amphoteric HAPEs, was reviewed according to the different types of ions. Suggestions and development trends of the research field are put forward in terms of the present situation and betaine HAPEs will become a hot spot of this research field.

Keywords electrostatic interaction; hydrophobic association; water-soluble polymer; polyelectrolyte

0 引言

疏水缔合水溶性聚合物 (Hydrophobically Associating Water-soluble Polymer, HAWP), 是指在水溶性聚合物中引入

少量的疏水基团, 仍能溶于水的一类水溶性聚合物衍生物。疏水缔合作用是指有机分子溶于水后, 水分子要保持其原有的结构而排斥有机分子的倾向, 而有机分子倾向于相互聚集

收稿日期: 2011-02-09; 修回日期: 2011-04-28

基金项目: 吉林省科技发展重点项目 (20070311)

作者简介: 安会勇, 讲师, 研究方向为水溶性高分子, 电子信箱: ahy46@sina.com; 宋春雷 (通信作者), 副研究员, 研究方向为水溶性高分子, 电子信箱: songcl@ciac.jl.cn

以减少与水的接触,形成疏水微区(hydrophobic domains)^[1]。当 HAWP 溶于水时,因疏水基团与水的不相容性,疏水基团间发生聚集。HAWP 的这一微相分离特性,使其在水溶液中可以形成多种复杂微结构,如聚合物胶束、聚合物囊泡、聚合物多分子聚集体和物理交联网络等,呈现出与常规水溶性聚合物显著不同的结构和性能,从而在水体系中构筑各种结构和特定性能提供了有效途径。

HAWP 根据电荷属性可以分为:非离子、阳离子、阴离子和两性离子高分子 4 类^[2]。在聚合物分子链上引入离子基团可增加 HAWP 在水溶液中的溶解性,并将改变聚合物的溶液性质。离子基团可通过酰胺基水解成羧酸基获得,也可通过与离子型亲水单体(图 1(b)、1(c))或离子型疏水单体(图 2(b)、2(c))共聚获得^[3-4]。常见用来共聚反应的单体如图 1、图 2 所示。阳离子和阴离子型疏水单体^[5-9]的发展可在水介质中不加入表面活性剂而进行自由基溶液聚合,并能够在聚合物分子链上引入了更多的疏水基团,提高了聚合物溶解性。水溶液自由基聚合不仅克服了大分子反应法^[10]带来的反应复杂、反应不易控制、易造成分子断链等问题,还解决了胶束聚合中大量表面活性剂带来的易发生链转移反应、后处理过程复杂等一系列问题^[11-12]。

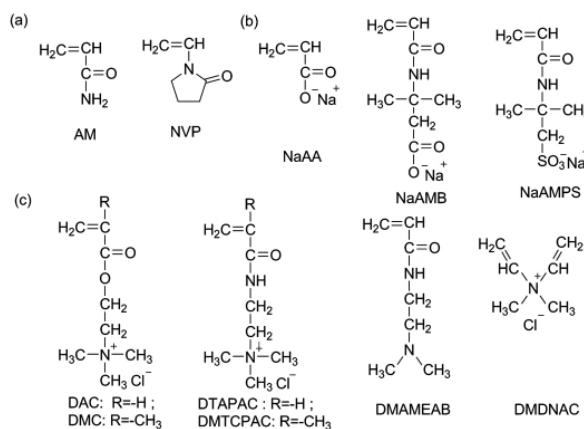


图 1 常见共聚用亲水单体:非离子型(a),
阴离子型(b),阳离子型(c)

Fig. 1 Common hydrophilic monomers used in copolymerization: nonionic monomers (a), anionic monomers (b), and cationic monomers (c)

除了改善疏水缔合单体及聚合物的水溶性外,电荷的静电作用对溶液性能有较大影响。静电引力或静电斥力影响链的构象,即高分子链的伸缩与舒展使位于链上(主要位于侧链)的疏水基团彼此远离或靠近,进而影响分子内、分子间疏水基团的缔合;疏水基团的缔合可能促进或破坏静电相互作用。这种电荷相互作用与疏水缔合性能之间的相互影响直观体现在聚合物溶液的黏度上。按照实际用途的要求进行合理的分子设计的系列疏水缔合聚电解质将扩大疏水缔合水溶性聚合物在油田化学品、水处理、化妆品、涂料、护理用品、生物医药等领域的应用范围。

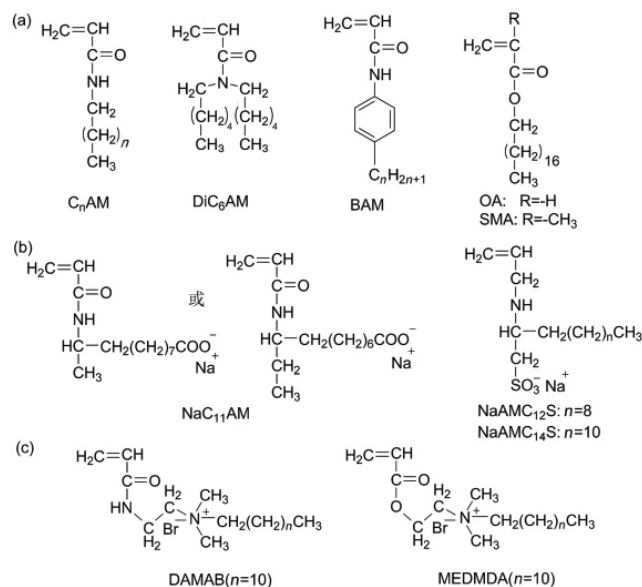


图 2 共聚用常见疏水单体:非离子型(a),
阴离子型(b),阳离子型(c)

Fig. 2 Common hydrophobic monomers used in copolymerization: nonionic monomers (a), anionic monomers (b), and cationic monomers (c)

按疏水缔合聚合物的结构,可以分为带电基团与疏水基团来自不同单体(离子型单体+疏水单体,本文中称为 I 型)和带电基团与疏水基团来自同一单体(离子型疏水单体,本文中称为 II 型)两类。本文按疏水缔合水溶性聚合物的电荷属性与结构特点,分别讨论它们的研究现状,并展望本研究领域的发展趋势。

1 阴离子型疏水缔合聚合物

1.1 阴离子型疏水缔合聚合物(I 型)

高保娇等^[13]在微乳液介质中实施了丙烯酰胺(AM)、苯乙烯(St)、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸钠(NaAMPS)的共聚。实验结果表明,在聚丙烯酰胺分子主链上同时引入强阴离子性基团与疏水基团后,阴离子的电黏滞效应与疏水基团的疏水缔合作用相互协同,会使共聚物水溶液的黏度显著提高;盐溶液对疏水缔合作用的增强效应与强阴离子基团对盐的较大容忍度相互结合,使共聚物水溶液的抗盐性能得以明显提高;大分子链上的强阴离子基团磺酸根的存在,在一定程度上会削弱疏水基团之间的疏水缔合作用,即对疏水基团的疏水缔合行为会产生一定的负性影响。

王丕新等^[14]采用自由基胶束聚合法制备了 AM/甲基丙烯酸十八酯(SMA)/2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)三元疏水缔合共聚物(HAPAM),系统研究了 HAPAM 水溶液的流变行为。结果表明,在聚丙烯酰胺大分子主链上引入阴离子基团和疏水基团后,阴离子的电荷效应与疏水基团的疏水缔合作用相互协同作用,使得共聚物水溶液的黏度明显提高;

盐溶液对疏水缔合作用的增强效应与阴离子基团的耐盐性相结合,使 HAPAM 水溶液的抗盐性能得以明显提高;HAPAM 在水溶液中可以有效地形成大量疏水微区,因而具有较好的耐温耐盐和增黏性能。

丁伟等^[15]以 AM 和 AMPS 为亲水单体,以 N-辛基丙烯酰胺为疏水单体,在离子液体[bmim]BF₄中实现了疏水缔合丙烯酰胺三元共聚物的合成。

1.2 阴离子型疏水缔合聚合物(II型)

Yang 等^[16]通过 Ritter 反应制备含羧酸离子基团的疏水单体(NaAMC₁₄S),并与 AM 在水介质中自由基共聚成阴离子型疏水缔合聚电解质。文中通过流变学实验验证了溶液性质与聚合物组成,pH 值以及外加电解质的关系:疏水单体含量高,由于缔合作用增强和较强的静电斥力,使聚合物具有很强的增黏作用;随着 NaCl 增加和 pH 值的降低,聚合物疏水基团上的羧酸根离子由于盐屏蔽作用和静电斥力的消除使分子链收缩,黏度下降。

Gao 等^[17]制备出含磺酸基团的疏水单体(NaAMC₁₄S),并与 AM 合成不同配比、不同嵌段长度以及不同分子量的系列阴离子型疏水缔合聚电解质。实验结果显示,在水溶液中,疏水缔合性能随着疏水单体含量、疏水嵌段长度及分子量的增大而增大;在盐水介质中,溶液除了具备和在水溶液中相似的性质外,还体现出明显的抗盐性。

2 阳离子型疏水缔合聚合物

2.1 阳离子型疏水缔合聚合物(I型)

沈一丁等^[18]以 AM、二甲基二烯丙基氯化铵(DMDAAC)、丙烯酸十八酯(OA)为单体,用氧化-还原引发体系,通过自由基胶束共聚法制得疏水缔合型阳离子共聚物 PADO。结果表明,PADO 水溶液中存在强烈的分子间缔合作用,在处理造纸中段废水时,其应用效果优于聚合硫酸铁、聚合氯化铝和非离子 PAM。

钟传蓉等^[19]以 AM、丁基苯乙烯(BS)、DMDAAC 为单体,用氧化-还原引发体系,通过自由基胶束共聚法制得疏水缔合型阳离子共聚物 PBAD。原子力显微镜(AFM)观测后表明,0.005g/dL⁻¹的 PBAD 溶液形成聚集体,且随着溶液浓度的增大,聚集体的数量和体积增大。溶液絮凝实验表明,0.005g/dL⁻¹是最佳絮凝用量,此时 3%硅藻土溶液的透光率为 96.5%。同时,NaCl 浓度显著影响聚合物对盐溶液的桥接与吸附行为,Ca²⁺和 Al³⁺增强了聚合物的絮凝效果。

2.2 阳离子型疏水缔合聚合物(II型)

黄荣华等^[20]合成 AM 与阳离子疏水单体——2-甲基丙烯酰基乙基二甲基十二烷基溴化铵的共聚物(AM/MEDMDA)。实验表明,在 0.256mol/L NaCl 溶液中表观黏度较之水溶液有较大提高,表现出明显的抗盐性能。对共聚物稀溶液性质的研究反映了共聚物中离子基团和疏水基团对其分子形态的影响。

张健等^[21]合成了甲基丙酰氧乙基二甲基十六烷基溴化铵。利用 1-溴十六烷与二甲基氨基乙基甲基丙烯酸酯反应制得,并将此疏水单体与 AM 共聚水解,得到疏水改性的水溶性聚合物。此聚合物有较好的耐盐性,因为聚合物中有较长的碳链,疏水性较强,在盐溶液中表现为其浓度随盐浓度的升高而升高,但当疏水单体含量较高时,聚合物的水溶性变差,该类聚合物的耐温性不是很理想。

冯玉军等^[22]用十六烷基二甲基烯丙基氯化铵为疏水单体,与 AM 在水中共聚合成了疏水缔合的聚合物,并研究了其溶液性能。这些季铵盐型疏水单体具有类似阳离子表面活性剂的性质,是目前被广泛用于合成疏水缔合聚合物增黏剂的单体,但这类单体与 AM 共聚得到的共聚物的耐温性较差。

McCormick 等^[23]用两步法合成了丙烯酰胺基乙基二甲基十二烷基溴化铵(dimethyldodecyl(2-acrylamidoethyl)ammonium bromide),并与 AM 用胶束共聚方法制备阳离子疏水缔合聚电解质。含有 5%(物质的量分数)疏水单体的共聚物溶液倾向于分子内缔合;疏水单体含量在 5%—10%的共聚物溶液倾向于分子间缔合。芘荧光探针实验证实,聚合物溶液分子间疏水缔合随疏水嵌段的长度和(或)数量增大而增强。

吴文辉等^[24]合成了新型的表面活性单体二甲基十四烷基(2-丙烯酰胺基丙基)溴化铵(DTAB),并将该单体与 AM 在水溶液中自由基均相共聚得到了兼具离子基团和疏水基团的阳离子疏水缔合丙烯酰胺共聚物 Poly(DTAB-co-AM)。结果表明,当 DTAB 含量为 0.3%(物质的量)时,共聚物呈盐增黏特性,在质量分数为 1%的盐溶液中,其临界缔合浓度由纯水中的 0.15g·dL⁻¹降至 0.11g·dL⁻¹,当 DTAB 含量小于 0.3%(物质的量)时,仅在质量分数大于 5%的盐溶液中具有盐增黏特性。

3 两性疏水缔合聚合物

3.1 两性疏水缔合聚合物(I型)

Candau 等^[25]用 AM、NaAMPS、甲基丙酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC)和两种非离子型疏水单体(DiC₆AM 和 BAM),采用胶束共聚方法合成了不同系列的疏水缔合聚两性电解质。文中系统地研究了溶液的疏水缔合性能:黏度实验表明,低电荷密度的疏水缔合两性聚合物溶液具有较强的增稠作用,甚至在高浓度盐水中也具有很大的黏度。荧光探针实验发现,在高度稀释的溶液中依然存在疏水缔合微区。

3.2 两性疏水缔合聚合物(II型)

叶林等^[26]研究两性离子型疏水缔合水溶性聚合物 ASDO(AM-AMPS-DMDA)时发现,溶液的黏度随温度升高(10—70℃)而下降,温度高于 40℃后黏度下降趋于平缓。

Salamone 等^[27]用 AM、甲基丙酰氧基乙基磺酸盐和一系列甲基丙酰氧基季铵盐阳离子疏水单体共聚合低离子密度的疏水缔合聚两性电解质。适当疏水单体掺量的聚合物溶液具有很好的抗盐性。

Huang 等^[28]在水溶液中用 AM、丙烯酸和烯丙基二甲基十八烷基溴化铵制备疏水缔合两性聚电解质。此共聚物具有很好的疏水缔合性能,且随着疏水基团含量增大而增大。聚合物溶液与表面活性剂的相互作用与表面活性剂的电荷没有直接关系,起主要作用的是疏水缔合相互作用。

Ali Sk. Asrofi^[29-30]用二氧化硫、N,N-二烯丙基-N-羰乙基甲基氯化铵和疏水单体 N,N-二甲基-N-十二烷基氯化铵或 N,N-二烯丙基-N-十八烷基氯化铵在二甲基亚砷中用 AIBN 引发环化聚合水溶性阳离子聚电解质。用适量的酸或碱处理可进一步得到阳离子聚电解质(CPE)、阴离子聚电解质(APE)、两性聚电解质(PB)以及它们的混合物。文献[27]用黏度法测定不同疏水单体含量的聚合物溶液性质,并证明在 NaCl 盐水质中也具有较好的疏水缔合性能。在文献[28]中, PB/APE 比例为 33:67 的聚合物溶液具有最高的黏度值。

Licea-Claverie 等^[31]分别合成了甲基丙烯酸酯类的阴离子和阳离子的衍生物,并将它们共聚成带有疏水基团的两性聚电解质。黏度法和动态光散射表明聚合物溶液有强烈的自缔合行为,且缔合行为具有类两性聚电解质性质,还提出了此类疏水缔合聚两性电解质的结构模型,并探讨了作用机制。

王丕新等^[32]在合成出阴离子疏水单体-丙烯酸酯基十一烷基酸(C₁₁AM)的基础上,与 AM、DMC 在水介质中共聚成新型疏水缔合聚两性电解质(ADC 系列)。流变性和芘荧光探针研究表明,ADC 系列疏水缔合聚两性电解质由于兼具疏水缔合性质和反聚电解质效应,使其具有较好的耐盐性能。

3.3 甜菜碱型两性疏水缔合聚合物

McCormick 等^[33]利用的甜菜碱型两性单体与非离子型疏水单体制备出不同电荷密度的丙烯酰胺基疏水缔合两性聚电解质。利用流变实验研究聚电解质的 pH、外加电解质响应性。实验结果表明,造成高电荷密度的疏水缔合聚两性电解质具有特殊溶液性质的原因是其电荷作用、疏水作用、氢键作用的共同结果。

Winnik 等^[34-36]利用同时含有亚胺基和磷酸基的疏水单体与 N-异丙基丙烯酰胺共聚合成两亲型聚甜菜碱。稳态荧光光谱和时间分辨荧光光谱研究发现,聚合物自组装会被二价离子破坏。通过与不带疏水基团的结构相近的聚合物比较,得出此甜菜碱疏水缔合聚两性电解质与不同表面活性剂之间的作用机制^[36]。

4 展望

离子型疏水缔合共聚物具有溶解性好,合成过程绿色环保(无表面活性剂的水溶液聚合),溶液性质可控(pH 敏感、盐敏感)等特点。其中两性疏水缔合聚合物由于疏水作用与静电引力的叠加效应,使其溶液性质具有较好的耐盐性,从而扩大了水溶性聚合物的应用范围。但是,相对于阴离子型疏水缔合聚合物和阳离子型疏水缔合聚合物,两性疏水缔合聚合物研究较少。作为两性疏水缔合聚合物的一类,甜菜碱型

疏水缔合聚合物由于其与结构俱来的等电点特性,使其具有特殊的溶液性能。结合离子型疏水缔合共聚物的发展现状,合成新型的具有疏水基团的甜菜碱单体并成功制备出甜菜碱型疏水缔合聚合物有可能成为本领域研究的热点。

参考文献 (References)

- [1] 蒋锡夔, 张劲涛. 有机分子的簇集和自卷 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.
- [2] Jiang Xikui, Zhang Jintao. Aggregation and self-coiling of organic molecules[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1996.
- [3] Davidson R L. Handbook of water-soluble gums and resins[M]. Singapore: McGRAW-HILL Book Co, 1980: 1-20.
- [4] Armentrout R S, McCormick C L. Water soluble polymers. 76. electrolyte responsive cyclocopolymers with sulfobetaine units exhibiting polyelectrolyte or polyampholyte behavior in aqueous media [J]. *Macromolecules*, 2000, 33(2): 419-424.
- [5] Liaw D L, Huang C C, Sang H C, et al. Aqueous solution and photophysical properties of cationic poly(trimethyl methacrylamidophenyl ammonium methylsulfate) and zwitterionic poly(N,N-dimethylmethacrylamidophenyl ammonium propane sulfone)[J]. *Polymer*, 2001, 42(1): 209-216.
- [6] Braun O, Selb J, Candau F. Synthesis in micromulsion and characterization of stimuli-responsive polyelectrolytes and polyampholytes based on N-isopropylacrylamide[J]. *Polymer*, 2001, 42(25): 8499-8510.
- [7] Tuin G, Candau F, Zana R. The influence of salicylate counterions on the aggregation behaviour of a polymerizable cationic surfactant [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, 131(1-3): 303-313.
- [8] 刘慷慨, 高保娇, 郭浩鹏. 阳离子型表面活性单体(2-丙烯酰胺基)乙基十四烷基二甲基溴化铵的合成及其胶束化行为 [J]. 胶体与聚合物, 2006, 24(3): 10-12.
- [9] Liu Kangkai, Gao Baojiao, Guo Haopeng. *Chinese Journal of Colloid & Polymer*, 2006, 24(3): 10-12.
- [10] Wu H W, Kawaguchi S, Ito K. Synthesis and polymerization of tail-type cationic polymerizable surfactants and hydrophobic counter-anion induced association of polyelectrolytes [J]. *Colloid Polym Sci*, 2004, 282(12): 1365-1373.
- [11] Ye L, Huang R H. Study of P (AM-NVP-DMDA) hydrophobically associating water-soluble terpolymer [J]. *J Appl Polym Sci*, 1999, 74(1): 211-217.
- [12] Kaczmarek J P, Glass J E. Synthesis and solution properties of hydrophobically-modified ethoxylated urethanes with variable oxyethylene spacer lengths[J]. *Macromolecules*, 1993, 26(19): 5149-5156.
- [13] Hill A, Candau F, Selb J. Properties of hydrophobically associating polyacrylamides: Influence of the method of synthesis [J]. *Macromolecules*, 1993, 26(17): 4521-4532.
- [14] Candau F, Selb J. Hydrophobically-modified polyacrylamides prepared by micellar polymerization[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 1999, 79(2-3): 149-172.
- [15] 高保娇, 吴念, 李延斌. 兼具强阴离子性与疏水缔合性的丙烯酰胺三元共聚物[J]. 高分子学报, 2004, 5(10): 736-742.
- [16] Gao Baojiao, Wu Nian, Li Yanbin. *Acta Polymerica Sinica*, 2004, 5(10): 736-742.

- [14] 张萍萍, 张德文, 宋春雷, 等. AM/AM PS/SMA 三元共聚物的合成及其性能研究[J]. 应用化工, 2008, 37(9): 1025-1028.
Zhang Pingping, Zhang Dewen, Song Chunlei, et al. *Applied Chemical industry*, 2008, 37(9): 1025-1028.
- [15] 丁伟, 刘海燕, 于涛, 等. 离子液体中 AM/AMPS/N8AM 三元共聚物的合成及溶液性能[J]. 高等学校化学学报, 2008, 29(4): 868-870.
Ding Wei, Liu Haiyan, Yu Tao, et al. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2008, 29(4): 868-870.
- [16] Yang Q B, Chen Q, Tan Y, et al. Synthesis and aqueous solution properties of hydrophobically modified anionic acrylamide copolymers[J]. *J Polym Sci Part B: Polym Phys*, 2008, 46(22): 2465-2474.
- [17] Gao B J, Jiang L D, Liu K K. Microstructure and association property of hydrophobically modified polyacrylamide of a new family [J]. *Eur Polym J*, 2007, 43(10): 4530-4540.
- [18] 沈一丁, 李刚辉, 李培枝. 疏水缔合型阳离子聚丙烯酰胺的溶液性能与应用研究[J]. 现代化工, 2007, 27(4): 38-40.
Shen Yiding, Li Ganghui, Li Peizhi. *Modern Chemical Industry*, 2007, 27(4): 38-40.
- [19] 钟传蓉, 何文琼, 赖立, 等. 疏水改性阳离子型丙烯酸酰胺共聚物的微结构与絮凝性能[J]. 化工学报, 2007, 58(8): 2138-2143.
Zhong Chuanrong, He Wenqiong, Lai Li, et al. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2007, 58(8): 2138-2143.
- [20] 罗开富, 叶林, 黄荣华. AM/MEDMDA 阳离子型疏水缔合水溶性聚合物溶液性能的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 1999, 15(1): 145-148.
Luo Kaifu, Ye Lin, Huang Ronghua. *Polymer Materials Science & Engineering*, 1999, 15(1): 145-148.
- [21] 张健, 张黎明, 李卓美. 疏水性阳离子单体 ADMCAB 及其共聚物的溶液性质[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1999, 38(6): 49-53.
Zhang Jian, Zhang Liming, Li Zhuomei. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1999, 38(6): 49-53.
- [22] 冯玉军, 郑焰, 罗平亚. 疏水缔合聚丙烯酰胺的合成及溶液性能研究[J]. 化学研究与应用, 2000, 12(1): 70-73.
Feng Yujun, Zheng Yan, Luo Pingya. *Chemical Research and Application*, 2000, 12(1): 70-73.
- [23] Chang Y, McCormick C L. Water-soluble copolymers. 49. Effect of the distribution of the hydrophobic cationic monomer dimethyldodecyl (2-acrylamidoethyl) ammonium bromide on the solution behavior of associating acrylamide copolymers [J]. *Macromolecules*, 1993, 26(22): 6121-6126.
- [24] 张旭峰, 吴文辉. 兼有离子和疏水缔合两种结构特性的聚丙烯酰胺的缔合性能[J]. 化工学报, 2009, 60(6): 1593-1599.
Zhang Xufeng, Wu Wenhui. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2009, 60(6): 1593-1599.
- [25] Kujawa P, Rosiak J K, Selb J, et al. Micellar synthesis and properties of hydrophobically associating polyampholytes [J]. *Macromol Chem Phys*, 2001, 202(8): 1384-1397.
- [26] 叶林, 黄荣华. AM-AMPS-DMDA 水溶性疏水两性共聚物溶液性能的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 1998, 14(3): 67-70.
Ye Lin, Huang Ronghua. *Polymer Materials Science & Engineering*, 1998, 14(3): 67-70.
- [27] Watterson A C, Hunter C R, Thompson A M, et al. Study of hydrophobic effects in ampholytic ionomer systems [J]. *Am Chem Soc, Div Polym Chem*, 1991, 32: 126-127.
- [28] Huang Z Y, Lu H S, He Y. Amphoteric hydrophobic associative polymer: I synthesis, solution properties and effect on solution properties of surfactant[J]. *Colloid Polym Sci*, 2006, 285(3): 365-370.
- [29] Umar Y, Al-Muallem H A, Abu-Sharkh B F, et al. Synthesis and solution properties of hydrophobically associating ionic polymers made from diallylammonium salts/sulfur dioxide cyclocopolymerization [J]. *Polymer*, 2004, 45(11): 3651-3661.
- [30] Umar Y, Abu-Sharkh B F, Ali S A. The effects of zwitterionic and anionic charge densities in polymer chains on the viscosity behavior of a pH-responsive hydrophobically modified ionic polymer[J]. *J Appl Polym Sci*, 2005, 98(3): 1404-1411.
- [31] Santos-Rosas R, Licea-Claverie A, Arndt K. Statistical copolymers of methacrylic acid derivatives with hydrophobic spacers and N,N'-dimethylaminoethylmethacrylate: New associating polyampholytes [J]. *J Mex Chem Soc*, 2006, 50(4): 164-174.
- [32] 安会勇, 宋春雷, 徐昆, 等. AM/DMC/C₁₁AM 疏水缔合两性电解质的合成、表征与溶液性质[J]. 高等学校化学学报, 2010, 31(11): 2308-2312.
An Huiyong, Song Chunlei, Xu Kun, et al. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2010 31(11): 2308-2312.
- [33] Johnson K M, Fevola M J, McCormick C L. Hydrophobically modified acrylamide -based polybetaines. I. synthesis, characterization, and stimuli-responsive solution behavior [J]. *J Appl Polym Sci*, 2004, 92(1): 647-657.
- [34] Miyazawa K, Winnik F M. Synthesis of phosphorylcholine -based hydrophobically modified polybetaines [J]. *Macromolecules*, 2002, 35(7): 2440-2444.
- [35] Miyazawa K, Winnik F M. Solution properties of phosphorylcholine -based hydrophobically modified polybetaines in water and mixed solvents[J]. *Macromolecules*, 2002, 35(25): 9536-9544.
- [36] Miyazawa K, Winnik F M. Solution properties of hydrophobically -modified phosphorylcholine -based polymers in water and in the presence of surfactants [J]. *J Phys Chem B*, 2003, 107 (38): 10677-10682.

(责任编辑 岳臣)



《科技导报》“科学共同体要闻”栏目征稿

“科学共同体要闻”栏目报道中国科协、地方科协和中国科协所属全国学会,以及其他学术团体的重大科技事件、学术活动成果等新闻。每条科技新闻字数为 300 字左右,要求标注新闻来源、日期。欢迎各级科协 and 全国学会推荐或自荐新闻。栏目责任编辑:陈广仁,投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn