

研究论文

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

张旭锋, 吴文辉

(北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081)

摘要: 首先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), 并将该单体与丙烯酰胺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聚丙烯酰胺共聚物 p(DTAB-co-AM)。通过表观黏度法和芘荧光探针法研究了 DTAB 含量、NaCl、十二烷基硫酸钠(SDS)和十六烷基三甲基氯化铵(CTAB)对共聚物缔合性能的影响。结果表明: 当 DTAB 含量为 0.3% (摩尔) 时, 共聚物呈盐增黏特性, 在 1% (质量) 的盐溶液中, 其临界缔合浓度由纯水中的 $0.15 \text{ g} \cdot \text{dL}^{-1}$ 降至 $0.11 \text{ g} \cdot \text{dL}^{-1}$; 当 DTAB 含量小于 0.3% (摩尔) 时, 仅在浓度大于 5% (质量) 的盐溶液中具有盐增黏特性。该共聚物与 SDS 作用, 在疏水缔合和静电吸引两种作用下, 缔合后体系的黏度最大可增加 136 倍, 由缔合前的 $12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 增加到 $1634 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 而与 CTAB 作用, 由于只有疏水缔合作用, 缔合强度较弱黏度增加不大。

关键词: 表面活性单体; 疏水缔合; 聚丙烯酰胺; 均相共聚

中图分类号: O 631.4

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2009)06-0000-0

Association behavior of polyacrylamide with ionic and hydrophobic groups

ZHANG Xufeng, WU Wenhui

(School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A novel cationic and acrylamide-type surface-active monomer, dimethyltetradecyl (2-acrylamidopropyl) ammoniumbromide (DTAB), was successfully synthesized, and cationic DTAB-co-acrylamide (AM) copolymer p(DTAB-co-AM) with hydrophobically associative property was prepared by free radical homogeneous copolymerization of DTAB and AM in aqueous solution, which had both ionic and hydrophobic groups. The effects of the hydrophobe content in the polymer chains, inorganic salts (NaCl), sodium dodecyl sulfate (SDS) and cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) on the hydrophobic association behavior were studied by viscosimetry and fluorescence probe method. It was found the copolymer with 0.3% (mole) hydrophobic units exhibited pronounced positive salinity sensitivity because of strong hydrophobic association. The critical association concentration (CAC) decreased from $0.15 \text{ g} \cdot \text{dL}^{-1}$ in pure water to $0.11 \text{ g} \cdot \text{dL}^{-1}$ in 1% (mass) NaCl solution. When the content of hydrophobic units was below 0.3% (mole), the copolymer solution showed positive salinity sensitivity in aqueous solutions only at concentrations of NaCl above 5% (mass) because hydrophobic association was largely enhanced by the strong polarity of solution. SDS could significantly increase the viscosity of copolymer solution by two orders of magnitude (from $12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ to $1634 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) compared with that

2008-12-08 收到初稿, 2009-03-04 收到修改稿。

联系人: 吴文辉。第一作者: 张旭锋 (1979—), 男, 博士研究生。

Received date: 2008-12-08.

Corresponding author: Prof. WU Wenhui. E-mail: wwh338@bit.edu.cn

of their corresponding aqueous solutions, which was attributed to both hydrophobic association and electrostatic interactions. However, the viscosity of copolymer solution with the addition of CTAB was only slightly enhanced due to weak hydrophobic association.

Key words: surface-active monomer; hydrophobic association; polyacrylamide; homogeneous copolymerization

引 言

疏水缔合水溶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的水溶性聚合物。在临界缔合浓度之上,疏水部分缔合形成动态的三维网络结构,增大了聚合物的流体力学体积,能显著地提高溶液的黏度。鉴于此类聚合物很好的增黏性能,近年来,国内外学者对疏水改性的天然和合成的水溶性高分子进行了广泛的研究。其中研究最多的是疏水缔合型聚丙烯酰胺(HAPAM),由于其独特的流变性能,已广泛应用于三次采油、钻井液和涂料中^[1-3]。

根据文献报道,大多数 HAPAM 由胶束共聚法合成,是将疏水单体增溶在表面活性剂形成的胶束中,聚合后疏水单体以微嵌段的形式分布在丙烯酰胺分子主链上。该方法的主要缺点是聚合体系中大量表面活性剂的加入会影响聚合物的分子量,更主要的是对聚合物的纯化造成了很大的困难^[4-5]。如果将表面活性单体用做疏水单体直接与丙烯酰胺共聚合成 HAPAM 可避免以上弊端。表面活性单体(surfmer)是一种新型的功能性单体,同时具有可聚合的双键和表面活性剂的特性^[6-10]。有报道将阳离子表面活性单体(2-甲基-丙烯酰氧乙基)二甲基烷基溴化铵与丙烯酰胺共聚合成 HAPAM,但此类聚合物由于酯键的存在热稳定性差、易水解使其应用受到限制^[11]。此外还有用烷基二甲基烯丙基氯化铵和丙烯酰胺烷基磺酸钠类的活性单体合成疏水缔合型聚丙烯酰胺,但是水溶性差。

本文合成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),其可聚合部分保持了丙烯酰胺的基本骨架,因此容易与丙烯酰胺共聚。同时分子中不含酯键有利于提高共聚物的耐温性,而且酰胺键和阳离子的存在可提高聚合物的水溶性。将 DTAB 用做疏水单体与丙烯酰胺共聚合成了兼有离子性和疏水缔合两种结构特性的共聚物 p(DTAB-co-AM),由于疏水基团和电荷位于

同一侧链上这为共聚物溶液缔合能力的调控提供了途径。通过表观黏度法和荧光法考察了 DTAB 含量、无机电解质及表面活性剂对聚合物溶液疏水缔合性能的影响。文中合成的阳离子型疏水缔合聚丙烯酰胺尚未见文献报道。

1 实验部分

1.1 原料与试剂

丙烯酰氯(98%),化学纯,北京三盛腾科技有限公司;N,N-二甲基丙二胺(95%),化学纯,江苏淮安和元化工有限公司;1-溴十四烷($\geq 98.0\%$),化学纯,中国医药(集团)上海化学试剂公司;偶氮二异丁脒盐酸盐(AIBA),化学纯 Fluka;丙烯酰胺(AM)、十二烷基硫酸钠(SDS)、尿素,化学纯,北京化学试剂公司;十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)乙二胺四乙酸(EDTA),分析纯,北京化学试剂公司。

1.2 DTAB 的合成及表征

图 1 给出了 DTAB 的合成路线。第一步反应,将 N,N-二甲基丙二胺(4.09 g, 0.04 mol)的 CH_2Cl_2 溶液 20 ml 和 7 ml 浓度为 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液加到 150 ml 的圆底烧瓶中,用冰水浴冷却,同时充氮气 30 min。当温度降至 $< 5^\circ\text{C}$ 后,缓慢滴加 20 ml 丙烯酰氯(3.1 g, 0.041 mol)的 CH_2Cl_2 溶液,保持温度 $< 5^\circ\text{C}$ 。滴加完后,室温下反应 5h,然后将有机层用饱和的 NaCO_3 水溶液洗两次,水相用 NaCl 饱和后用 CH_2Cl_2 萃取。最后将有机层及 CH_2Cl_2 萃取液用 MgSO_4 干燥 24h,减压蒸出 CH_2Cl_2 ,得到产物为淡黄色油状液体,产率为(74%)^[12]。

第二步反应将第一步中得到的产物 N,N-二甲基丙基丙烯酰胺(4.5 g, 0.029 mol)、溴代十四烷(9 g, 0.03 mol)和 60 ml 丙酮加到三口圆底烧瓶中,充氮气 30 min,然后升温至 55°C 反应 48 h。反应完后降至室温,用乙醚沉淀单体并洗涤。用乙醚和丙酮的混合溶液(体积比为 1:1)将产品进

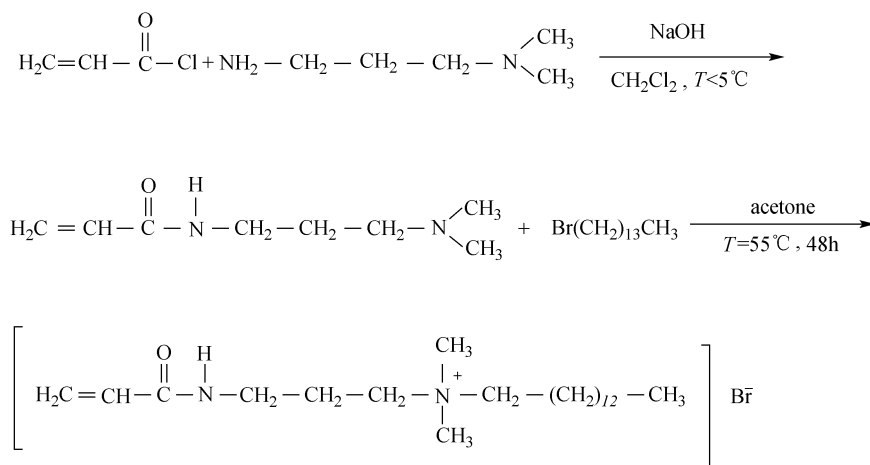
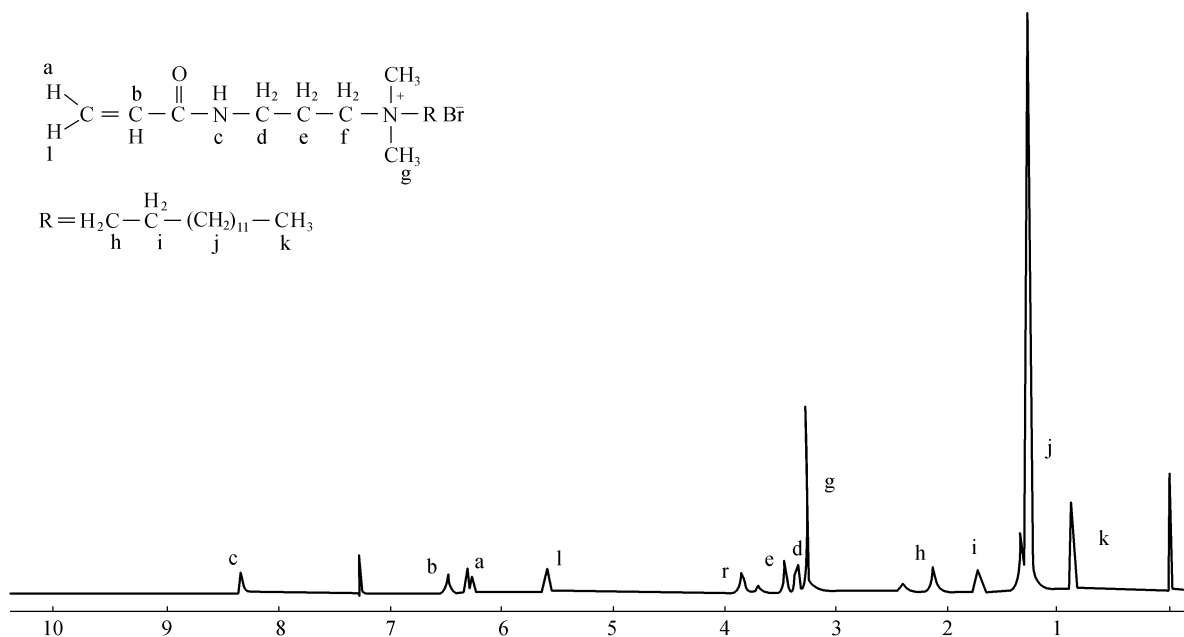


图 1 二甲基十四烷基(2-丙烯酰胺丙基)溴化铵的合成

Fig. 1 Synthesis of dimethyltetradecyl(2-acrylamidopropyl)ammoniumbromide

图 2 二甲基十四烷基(2-丙烯酰胺丙基)溴化铵 (DTAB) 的 ^1H NMR 谱图Fig. 2 ^1H NMR spectrum of dimethyltetradecyl(2-acrylamidopropyl)ammoniumbromide (DTAB) (CDCl_3)

行重结晶，产率为 83%^[13]。

用红外、 ^1H NMR 和元素分析对产物结构进行表征。红外谱图由日本岛津公司 Prestige-21 型傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 测得，采用 KBr 压片法；元素分析由德国 Elementar 公司 Vario EL 元素分析仪测得； ^1H NMR 谱图由美国 Varian 公司 mercury-plus 400 核磁仪测得，溶剂为 CDCl_3 。测试结果如下。

FT-IR：酰胺基团的特征吸收峰：3434 cm^{-1} (N—H，伸缩振动)；1666 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ ，吸收)；1626 cm^{-1} (N—H，弯曲振动)；1412 cm^{-1}

(C—N，伸缩振动)；亚甲基的特征吸收峰：2922 cm^{-1} (— CH_2 —，不对称伸缩振动)，2852 cm^{-1} (— CH_2 —，对称伸缩振动)；1467 cm^{-1} (— CH_2 —，剪切振动)；726 cm^{-1} [(CH_2) $n \gg 2$ ，摇摆振动]；2955 cm^{-1} (— CH_3 ，不对称伸缩振动)；3041 cm^{-1} ($\text{C}=\text{C}-\text{H}$ ，伸缩振动)。

^1H NMR (CDCl_3 , δ): 6.3 (1H, a), 5.6 (1H, l), 6.5 (1H, b), 8.3 (1H, c), 3.3 (2H, d), 3.5 (2H, e), 3.9 (2H, f), 3.2 (6H, g), 2.1 (2H, h), 1.8 (2H, i), 1.3 (26H, j), 0.9 (3H, k), 见图 2。

元素分析：理论值 C, 62.39; N, 6.06; H, 10.6; 实验值 C, 62.37; N, 5.97; H, 11.19。

1.3 共聚物 p(DTAB-co-AM) 的合成及溶液性能测试

将设定的 AM、DTAB、EDTA 和尿素加入烧杯中，充分搅拌，配制成水溶液后通 N₂ 30 min，然后加入引发剂 AIBA，继续通氮搅拌在水浴中升温至 35~40℃，待液体变黏 30 min 后在 80℃ 恒温条件下继续反应 5h^[10]，合成的共聚物 p(DTAB-co-AM) 结构如图 3 所示。

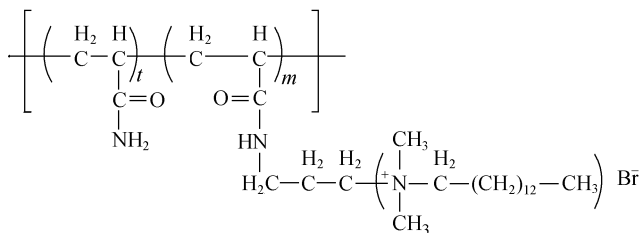


图 3 DTAB 和 AM 共聚物的结构

Fig. 3 Copolymers of DTAB and AM

用黏度法对共聚物的分子量进行表征。以蒸馏水为溶剂，用乌式黏度计测定共聚物水溶液的黏度，共聚物浓度为 0.02~0.05 g·dL⁻¹，测试温度 (30.0±0.5)℃，采用稀释外推法确定特性黏数 [η]，然后由 Mark-Houwink 方程 [η] = kM^α 计算分子量，参数 k、α 值分别为 1×10⁻² 和 0.798。

表观黏度由 Brookfield LVDV-II+ 型旋转黏度计测得。准确称取一定量的共聚物，用蒸馏水溶胀后，稀释配制浓度系列变化的水溶液；在共聚物溶液中加入表面活性剂，充分搅拌后在 (80.0±0.1)℃ 下恒温后测试。

芘的荧光光谱由日立公司 HitachiF4500 型荧光分光光度计在 25℃ 下测得，激发波长 335 nm，狭缝 2.5 nm，扫描范围 350~450 nm。将共聚物溶解于芘的饱和水溶液中（芘的浓度约为 1×10⁻⁶ mol·L⁻¹），并用芘的饱和水溶液将共聚物溶液进一步稀释配制成浓度系列变化的溶液后进行测试。

2 结果与讨论

2.1 p(DTAB-co-AM) 的合成及黏度性能

DTAB 和 AM 在水溶液中实现自由基均相共聚，共聚物 p(DTAB-co-AM) 的配方及分子量如表 1 所示。表中测得的分子量随 DTAB 含量增加而加大是由缔合作用增强而引起的，并非分子量真

实的变化，所以相同条件下合成的共聚物的分子量相差不大，不会对其性能产生影响。

表 1 合成的聚合物配方

Table 1 Materials proportion of synthesized copolymers

Polymer	Acrylamide /g	DTAB /% (mole)	EDTA /mg	Initiator (AIBA) /mg	[η] /dL·g ⁻¹	M×10 ⁻⁴
H0	25	0	10	10	31.8	784
H0.1	24.848	0.1	10	10	31.3	769
H0.2	24.698	0.2	10	10	35.6	899
H0.3	24.553	0.3	10	10	38.7	1005

Note: The total mass of polymerization system is 100 g. The total monomer concentration in the feed is 25% (mass).

图 4 是不同 DTAB 含量的 p(DTAB-co-AM) 水溶液的黏浓曲线。由图 4 可以看出，DTAB 含量越大，聚合物溶液的表现黏度增加越快。当 DTAB 含量为 0.3%（摩尔）时，其临界缔合浓度 (C*) 约是 0.15 g·dL⁻¹；DTAB 含量降至 0.1%（摩尔）时，C* 约为 0.2 g·dL⁻¹。疏水单体含量增加 C* 值降低，是因为疏水单体含量增加提高了聚合物主链中疏水侧链的含量，增加了缔合机率^[12]。

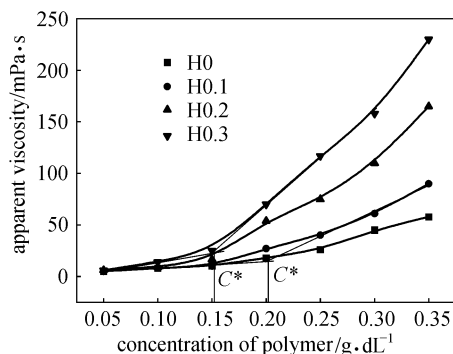


图 4 DTAB 含量对共聚物溶液表现黏度的影响

Fig. 4 Effect of DTAB content on viscosity of copolymer aqueous solution. Spindle (1# spindle, 6 r·min⁻¹)

表观黏度的变化从宏观上反映了聚合物溶液的疏水缔合行为，而芘的荧光光谱能从分子水平反映聚合物溶液的疏水缔合性能^[14]。芘是油溶性荧光化合物，其荧光光谱中 I₁ 峰 (λ = 372 nm 附近) 与 I₃ 峰 (λ = 384 nm 附近) 强度的比值 (I₁/I₃) 表征着芘分子周围环境的极性强弱，比值越小环境的极性越弱。图 5 为不同 DTAB 含量的聚合物的 I₁/I₃ 随聚合物溶液浓度变化的曲线。由图 5 看出，纯聚丙烯酰胺溶液的浓度对 I₁/I₃ 值没有影响，但是对于 HAPAM，当聚合物浓度增加至一定值后，

I_1/I_3 开始明显降低, 并且远小于聚丙烯酰胺溶液中的 I_1/I_3 值。这说明随着 HAPAM 浓度的增加形成了疏水缔合微区, 使得芘分子增溶到了非极性微区中 I_1/I_3 迅速降低。DTAB 含量分别为 0.1% (摩尔)、0.2% (摩尔) 和 0.3% (摩尔) 的共聚物, I_1/I_3 显著降低的起始浓度依次约为 0.16、0.12、0.06 $\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$, 这是由于疏水单体含量的增加、共聚物的缔合能力增强, 在较低浓度下可形成疏水微区。

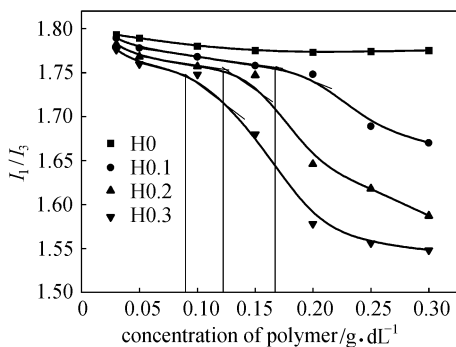


图 5 水溶液中 I_1/I_3 随聚合物浓度的变化
Fig. 5 Varying of I_1/I_3 in polymer solution of pure water with polymer concentration

2.2 NaCl 对 p(DTAB-co-AM) 溶液表观黏度的影响

HAPAM 一般在盐环境下使用^[15], 作者具体研究了 NaCl 对 p(DTAB-co-AM) 溶液表观黏度的影响。DTAB 含量为 0.3% (摩尔) 和 0.1% (摩尔) 的聚合物在 1% (质量) 的 NaCl 溶液中的黏浓曲线见图 6, 由图 6 可看出, DTAB 含量为 0.3% (摩尔) 的聚合物表观黏度远高于水溶液中的黏度值, 临界缔合浓度由纯水水中的 0.15 $\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$ 降至 0.11 $\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$, 而 DTAB 含量为 0.1% (摩尔) 的聚合物在盐水溶液中的黏度反而略低于水溶液中的黏度。在 1% (质量) 的 NaCl 溶液中, DTAB 含量不同的共聚物 I_1/I_3 值随聚合物溶液浓度变化的曲线见图 7, 从微观上解释了 NaCl 的加入对共聚物缔合性能的影响。在开始缔合浓度以上, DTAB 含量为 0.3% (摩尔) 的共聚物的 I_1/I_3 值比水溶液中下降的更快, 其中浓度为 0.15 $\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$ 时, I_1/I_3 值由水溶液中的 1.68 降到了 1.574, 说明盐水中缔合微区的极性更弱, 疏水侧链的缔合能力变强^[14]。DTAB 含量分别为 0.2%、0.1% (摩尔) 聚合物盐溶液, 当其浓度为 0.2% (质量) 时, I_1/I_3 值由纯水中的 1.646、1.748 分

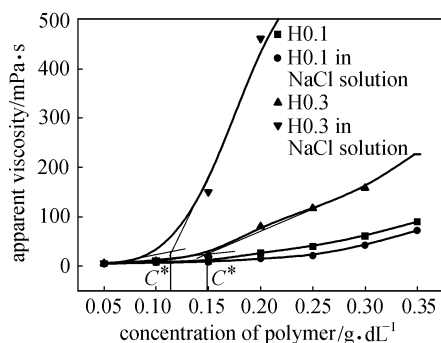


图 6 NaCl 溶液中表观黏度随聚合物浓度的变化
Fig. 6 Varying of apparent viscosity in NaCl solution with polymer concentration (1# spindle, $6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)

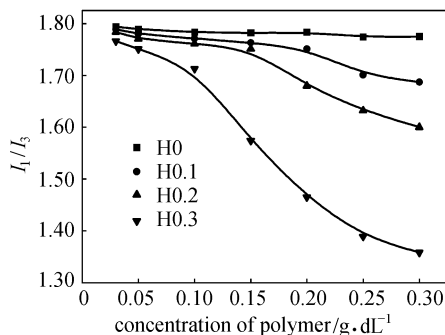


图 7 NaCl 溶液中 I_1/I_3 随聚合物浓度的变化
Fig. 7 Varying of I_1/I_3 in NaCl solution with polymer concentration

别增加到了 1.682、1.753, 说明缔合能力有所下降。

图 8 是不同 DTAB 含量下浓度为 0.2% (质量) 的聚合物溶液表观黏度与盐浓度的关系曲线。由图 8 可看出, 当 NaCl 浓度增加至一定值后, DTAB 含量为 0.1% (摩尔) 和 0.2% (摩尔) 的聚合物溶液的表现黏度才超过其初始黏度。这是因为在低电解质浓度下, 主要对疏水侧链产生电荷屏蔽作用, 使得分子链卷曲流体力学体积减小, 体系黏度下降, 同时缔合能力会变弱; 在高电解质浓度下, 溶液极性增大, 疏水侧链缔合能力增强, 表现为黏度升高。但是对于 DTAB 含量为 0.3% (摩尔) 的聚合物, 其溶液黏度随 NaCl 浓度增加呈增加趋势, 当 NaCl 浓度为 3% (质量) 时, 聚合物溶液的黏度增加了 30 倍, 显示了极强的盐增黏效应。这主要是因为疏水单体含量高, 电解质的加入使疏水缔合作用增强对黏度增加的影响超过了静电屏蔽对黏度降低的影响。由以上分析可知, p

(DTAB-co-AM) 兼有离子性和疏水缔合两种结构特性, 盐浓度对疏水单体含量不同的聚合物溶液的缔合能力具有调控作用。

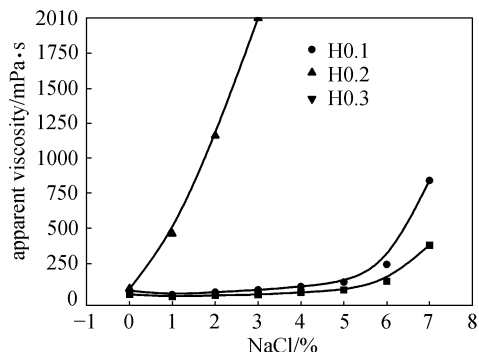


图 8 NaCl 浓度对聚合物溶液表观黏度的影响
Fig. 8 Effect of NaCl concentration on apparent viscosity of polymer solution
(1# spindle, 3 r · min⁻¹)

2.3 表面活性剂对 p(DTAB-co-AM) 溶液表观黏度的影响

表面活性剂可有效地调控 HAPAM 溶液黏度, 作者具体研究了阳离子表面活性剂 CTAB、阴离子表面活性剂 SDS 和非离子表面活性剂 OP-10 对 p(DTAB-co-AM) 溶液黏度的影响。OP-10 对聚合物溶液的黏度没有影响, p(DTAB-co-AM) 溶液 (0.1%, 质量) 表观黏度随 CTAB 和 SDS 浓度变化的曲线见图 9。由图可看出, 随着表面活性剂浓度的增加, 聚合物与表面活性剂缔合体系的黏度都呈先增加后降低的趋势, 这与文献报道的现象一致^[16]。对于 CTAB/p(DTAB-co-AM) 体系, 缔合后体系的黏度增加幅度不大; 而 SDS/p(DTAB-co-AM) 体系缔合后体系黏度增加显著。其中 DTAB 含量为 0.3% (摩尔) 的聚合物, 当 SDS 浓度为 0.36 mmol 时, 黏度达到最大值, 由缔合前的 12 mPa · s 增加到了 1634 mPa · s, 增加了 136 倍。值得指出的是, 随着 DTAB 含量的增加, 缔合后出现黏度最大值时的 SDS 的浓度降低, 但黏度最大值却有所增加。由于聚合物同时具有阳离子电荷和疏水基团两种结构特征, 并且位于同一侧链上, 当与 SDS 作用时, 由于静电吸引和疏水缔合双重作用使 SDS 与阳离子疏水侧链极易形成混合胶束, 将丙烯酸胺分子主链连接起来形成物理交联网络, 在增大流体力学体积的同时增强了缔合强度, 因此黏度显著增加。随着 DTAB 含量增加, 阳离子疏水侧链与 SDS 作用增强, 在较低的 SDS 浓度下即

可形成混合胶束将分子链有效交联, 由图 9 还可看出, 缔合体系的黏度对 SDS 的浓度更为敏感。对于 CTAB/p(DTAB-co-AM) 体系, 由于 CTAB 与疏水侧链间的静电排斥作用和疏水缔合作用相互抵消, 缔合强度较弱, 因此缔合后黏度增加幅度远不及 SDS/p(DTAB-co-AM) 体系。

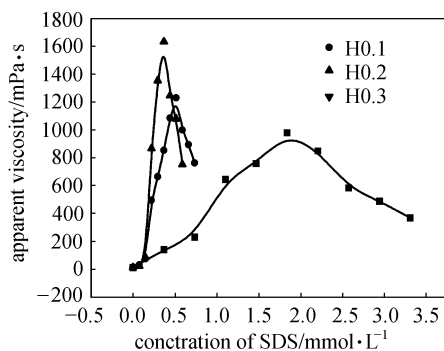
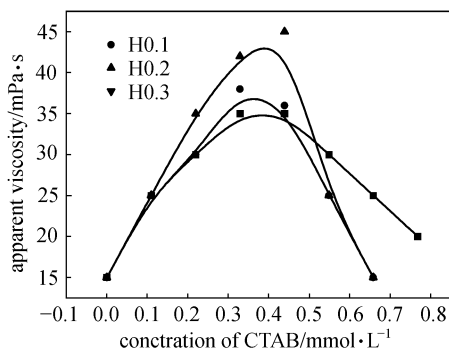


图 9 表面活性剂浓度对聚合物溶液表观黏度的影响
Fig. 9 Effect of surfactant concentration on apparent viscosity of polymer solution
(2# spindle, 3 r · min⁻¹)

3 结 论

将 DTAB 与 AM 共聚合成了疏水单体含量不同的阳离子型疏水缔合聚丙烯酰胺 p(DTAB-co-AM)。DTAB 含量大于 0.3% (摩尔) 时, 该聚合物具有显著的盐增黏效应; DTAB 含量较低时, 低浓度盐溶液对侧链的静电屏蔽作用较强, 聚合物溶液黏度较纯水中有所降低, 但是在高浓度盐溶液中, 由于溶液极性增强使得疏水缔合作用显著, 聚合物溶液又呈盐增黏特性。该聚合物与 SDS 在疏水缔合和静电引双重作用下缔合体系黏度增加显著, 但是与 CTAB 作用, 由于疏水缔合作用和静电排斥作用相互抵消缔合体系黏度增加不大。实验结果证实了合成的聚合物具有离子性和疏水缔合两

种结构特性, 为聚合物溶液黏度的调控提供了途径。

References

- [1] Peiffer D G. Hydrophobically associating polymers and their interactions with rod-like micelles. *Polymer*, 1990, **31** (12): 2358
- [2] Cram S L, Brown H R, Spinks G M, Hourdet D, Creton C. Hydrophobically modified dimethylacrylamide synthesis and rheological behavior. *Macromolecules*, 2005, **38** (7): 2981-2983
- [3] Volpert E, Selb J, Candau F. Influence of the hydrophobe structure on composition, microstructure, and rheology in associating polyacrylamides prepared by micellar copolymerization. *Macromolecules*, 1996, **29** (5): 1452-1458
- [4] Kujawa P, Janusz M R, Selb J, Candau F. Micellar synthesis and property of hydrophobically associating polyampholytes. *Macromol. Chem. Phys.*, 2001, **202** (8): 1387
- [5] Selb J, Candau F. Hydrophobically-modified polyacrylamides prepared by micellar polymerization. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1999, **79** (2/3): 149-152
- [6] Summers M, Eastoe J. Applications of polymerizable surfactants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, **100/101/102**: 137-152
- [7] Gutierrez-Hijar D P, Fausto B, Puig J E. Properties of two polymerizable surfactants aqueous solutions: dodecylethylmethacrylatedimethylammonium bromide and hexadecylethylmethacrylatedimethylammonium bromide (I): Critical micelle concentration. *Colloid Polym. Sci.*, 2004, **283** (1): 78-79
- [8] Huawei W, Kawaguchi S. Synthesis and polymerization of tail-type cationic polymerizable surfactants and hydrophobic counter-anion induced association of polyelectrolytes. *Colloid Polym. Sci.*, 2004, **282** (12): 1365-1368
- [9] Samakande A, Hartmann P C, Sanderson R D. Synthesis and characterization of new cationic quaternary ammonium polymerizable surfactants. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **296** (1): 316-319
- [10] Gao Baojiao, Guo Haopeng, Wang Jian, Zhang Yan. Preparation of hydrophobic association polyacrylamide in a new micellar copolymerization system and its hydrophobically associative property. *Macromolecules*, 2008, **41** (8): 2890
- [11] Joynes D, Sherrington D C. Novel polymerizable mono- and divalent quaternary ammonium cationic surfactants (I): Synthesis, structural characterization and homopolymerization. *Polymer*, 1996, **37** (8): 1453-1457
- [12] Tuin G, Candau F, Zana R. The influence of salicylate counterions on the aggregation behaviour of a polymerizable cationic surfactant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, **131** (1/2/3): 303-308
- [13] Lu Guiqian, Wu Dingcai, Fu Ruowen. Studies on the synthesis and antibacterial activities of polymeric quaternary ammonium salts from dimethylaminoethyl methacrylate. *Reactive & Functional Polymers*, 2007, **67** (4): 355-366
- [14] Shi Xuefeng (史学峰), Wu Wenhui (吴文辉), Gong Ruiying (宫瑞英), Wang Jianquan (王建全). Solution properties of hydrophobically modified anion polyelectrolytes based on Fenugreek gum. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59** (5): 1326-1327
- [15] Kujawa P, Audibert-Hayet A, Selb J, Candau F. Effect of ionic strength on the rheology properties of multisticker associative polyelectrolytes. *Macromolecules*, 2006, **39** (1): 384-392
- [16] Gouveia L M, Paillet S, Khoukh A. The effect of the ionic strength on the rheological behavior of hydrophobically modified polyacrylamide aqueous solutions mixed with sodium dodecyl sulfate (SDS) or cetyltrimethylammonium p-toluenesulfonate (CTAT). *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2008, **322** (1/2/3): 211-218