

聚 *N*-烷基丙烯酰胺结构与性能及外界环境对溶液性能影响

马 超^{1,2}, 万 刚¹

(1. 长江大学石油工程学院, 武汉 430100; 2. 四川大学高分子材料工程国家重点实验室, 成都 610065)

摘要:聚 *N*-烷基丙烯酰胺具有温度敏感的特殊性能, 其良好的应用潜力成为高分子领域的研究热点。决定该类聚合物温度敏感性的关键因素是聚合物本身的结构, 而且与聚合物所处的外界环境也有紧密关系。利用该类聚合物的温敏特性来适应油气田开发中的高温高盐地层具有重要的研究价值。本文综述了聚 *N*-烷基丙烯酰胺结构对聚合物性能的影响, 如亲疏水单体比例、温敏单体共聚方式、改性单体种类等; 总结了聚 *N*-烷基丙烯酰胺聚合物水溶液性能的影响因素, 如不同种类表面活性剂、溶剂、离子强度、剪切速率等。

关键词:聚 *N*-烷基丙烯酰胺; 温敏聚合物; 温敏凝胶; 临界相转变温度; 温敏机理

近年来, 由于聚 *N*-烷基丙烯酰胺表现出温敏特性而成为高分子领域研究热点, 其在药物缓释、物料分离提纯、温敏薄膜、酶的固定以及免疫分析、智能纺织等领域具有非常好的应用潜力^[1,2]。线性温敏聚合物的温敏特征表现为当温度低于低临界相转变温度(LCST)时, 溶于水形成均相溶液, 但当温度升高至 LCST 之上时, 溶液发生相分离, 溶液体系的粘度会显著变大^[3,4]。温敏聚合物溶液的特殊性能是由于含有不同比例的亲疏水性基团, 聚合物中亲水基团与水分子之间形成的“氢键”断裂而表现出的相变, 从而产生热敏现象^[5,6]。在油气田开发中用的聚合物驱油剂(阴离子聚丙烯酰胺及其改性产物)在高温高盐地层中溶液的表观粘度急剧降低, 聚合物驱油剂的主要驱油机理是驱油剂溶液具有一定的粘度, 增加水相渗透率, 降低水油流度比, 进而提高原油的采收率。若能将温敏聚合物用在高温高盐地层, 在温度和无机盐的作用下温敏聚合物溶液在 LCST 温度以上, 粘度上升, 变“被动”降粘为“主动”增稠, 起到良好的驱油效果, 具有良好的应用潜力。

温敏聚合物的特殊性能主要是聚合物分子结构、疏水基团和亲水基团的种类和比例, 以及温度变化引起的亲、疏水基团与水分子形成的“氢键”作用的变化而引起的。另外, 温敏聚合物溶液性质受外界环境的影响较大, 利用温敏聚合物对不同外界环境的刺激响应性, 也成为延伸温敏聚合物应用功能的重要方法。因此, 本文总结了温敏聚合物的结构对性能的影响和外界环境对水溶液性能的影响。

1 聚 *N*-烷基丙烯酰胺结构对性能的影响

1.1 不同单体对温敏聚合物 LCST 的影响

聚 *N*-烷基丙烯酰胺温敏聚合物进行改性的单体主要有亲水单体、疏水单体、功能性单体。亲水性单体主要有丙烯酰胺类单体; 具有 pH 敏感性的丙烯酸类单体; 疏水性的单体, 如酯类单体; 功能性单体, 如聚乙二醇、丙烯腈、*N*-丙烯酰氧基丁二酰亚胺。不同功能单体对 *N*-烷基丙烯酰胺改性的作用不同, 如丙烯酰胺类改性单体主要的作用是依靠其分子链段中含有酰胺基或离子基团来改善温敏凝胶的亲水性; 丙烯酸类改性单体由于其分子结构中含有羧基官能团故可提供温敏凝胶的 pH 敏感性; 酯类改性单体主要可以根据酯类单体的亲水性或疏水性可调节温度敏感性^[7]。

文献^[8]研究发现温敏单体与亲水单体无规共聚可提高其 LCST。该类亲水单体主要可分为强电解

10.14028/j.cnki.1003-3726.2016.03.004

收稿: 2015-06-02; 修回: 2015-09-23;

基金项目: 国家自然科学基金(51404036), 中国石油科技创新基金(2013D-5006-0207);

作者简介: 马超(1979—), 男, 副教授, 博士研究生, 现主要从事油田用高分子材料方面的教学和科研工作。E-mail: mc19790924@126.com, Tel: 138723939359.

质型、弱电解质型和非电解质型。常用的电解质型亲水单体主要有丙烯酸(AA)、甲基丙烯酸(MMA)、2-丙烯酰胺-2-甲基-1-丙磺酸(AMPS)等;常用的非电解质性亲水单体主要有 *N*、*N*-二甲基丙烯酰胺(DMAM)、AM、乙二醇等。文献^[9]认为亲水单体在一定程度上提高 LCST,疏水单体在一定程度上降低 LCST,但亲水或疏水单体的量要适当,否则过多的亲水单体如 AM,会提高 LCST,直至 LCST 消失,而过多的疏水单体如 *N*-丁基丙烯酰胺将使其 LCST 降至 0℃。周礼等^[10]采用自由水溶液聚合方法制备出了温敏聚合物 P(AM-NIPAM)和 P(AM-NIPAM-*NaAA*),结果表明,不同共聚单体的配比以及单体含量对共聚物溶液的 LCST 均有显著影响;当 $T > \text{LCST}$ 时,共聚物分子链上的疏水基团的缔合作用增强,导致疏水结构的聚集,聚合物分子链发生去溶剂化作用,在共聚物稀溶液中表现为线团收缩,在共聚物亚浓溶液中表现为共聚物分子间聚集发生相分离。

文献^[8]通过与疏水性的单体进行无规共聚发现可降低聚合物 LCST,但能提高聚合物的温敏性,也就是对温度刺激的响应性增强。毛华华等^[11]采用溶液聚合合法合成了一系列 *N*-异丙基丙烯酰胺(NIPAM)与甲基丙烯酸甲酯、丙烯酸乙酯、丙烯酸丁酯或甲基丙烯酸丁酯的无规共聚物,用浊度观测法和光散射法测定了不同共聚物水溶液的温敏相转变行为。结果表明,所得共聚物的 LCST 均低于均聚物 PNIPAM。NIPAM 与丙烯酸酯共聚物的 LCST 随着酯类结构单元含量的增加而呈线性逐渐降低,酯类单体的疏水性越强,降低共聚物 LCST 的效果越明显。共聚物中丙烯酸酯类单元含量越高,共聚物相转变温度范围越宽。丙烯酸酯类单体与 NIPAM 的共聚物中,酯基上的烷基对共聚物 LCST 影响能力大于丙烯酸酯 α 位上的烷基,前者对增大共聚物的疏水性贡献更大。

研究认为^[12,13]嵌段共聚亲水或疏水单体也可以改变温敏聚合物的 LCST,这是因为对于 PNIPAAm 来说,嵌段共聚比无规共聚对其相转变的影响更加显著。因为嵌段共聚的 PNIPAAm 链比无规共聚的 PNIPAAm 链段对温度具有更高的响应性。文献^[9]报道认为,与无规共聚物相比,亲水性基团如丙烯酸和 *N*、*N*-二甲基丙烯酰胺的嵌段共聚物,能显著提高聚合物的 LCST,降低相转变的速率;相反,疏水性基团和 *N*、*N*-二甲基丙烯酰胺的嵌段共聚物,却没有此影响,既不影响其 LCST,也不影响其相转变的速率。李姝静等^[14]合成了侧链携带金刚烷(Ad)的温敏性聚合物(PNIPAm-Ad),用紫外-可见吸收光谱仪测得 PNIPAm-Ad 的 LCST 为 21.3℃,比纯 PNIPAm 的 LCST(32℃)要低,这是因为聚合物中疏水基团 Ad 的引入增大了聚合物的疏水性,使聚合物的溶解度有所下降。

对于 *N*-烷基丙烯酰胺聚合物而言,亲水单体含量的增加能提高 LCST,疏水单体能降低 LCST,但两者在改变 LCST 方面需要一个适当的比例范围才能保证温敏聚合物的温敏特点,进而控制 LCST。酯类疏水单体的引入能明显降低 LCST,而且酯类单体的链越长,降低 LCST 的幅度越大。另外,嵌段共聚的亲水单体比无规共聚亲水单体能明显提高 LCST,但却降低了温敏响应的速度,嵌段共聚疏水单体却没有影响,或者影响甚微。

1.2 温敏单体作为聚合物侧链对性能影响

将 *N*-烷基丙烯酰胺作为温敏聚合物的侧链,主要通过偶联接枝法来合成^[15,16]。先通过自由基聚合合成含有端胺基的 *N*-烷基丙烯酰胺^[17],再将其直接接枝到聚丙烯酸主链上;或与丙烯酸在二环己基碳二亚胺(DCCI)等偶联剂存在的条件下发生偶联反应制得温敏大分子单体,然后将大分子单体与丙烯酰胺通过溶液自由基共聚得到梳状温敏聚合物。

Hourdet^[18]通过偶联接枝法制备了一系列温敏聚合物,研究发现,保持侧链 PNIPAM 链节的分子量和含量不变的前提下,随着聚合物分子量的降低,LCST 升高。当固定聚合物分子量和 PNIPAM 含量而变化 PNIPAM 链节长度时,发现 PNIPAM 链节的分子量高于 15000g/mol 时,相转变温度不受影响,而在低于 15000g/mol 时,相转变温度则随 PNIPAM 分子量的增加而升高。高低不同的 PNIPAM 的分子量和接枝密度对热增粘效应影响都较大,相转变温度却随接枝密度的增大而降低。

文献^[19]报道了以主链为聚丙烯酸钠(PAANa)、侧链为 PNIPAM 的热增粘聚合物的分子结构与流变性能的关系,分别考察了接枝率、主链长度、侧链的亲水-亲油平衡对热增粘能力的影响。实验研究发现,

通过调节侧链的化学组成,可以在一定的温度范围内调控聚合物溶液的 LCST;其次,热增粘幅度与接枝率密切相关,而绝对粘度值则受主链分子量的影响较大。

郭睿威等^[20]以巯基乙胺为分子量调节剂,以丙烯酰氯作为链端转化剂合成了不同分子量的端丙烯酰胺基 PNIPAM 大分子单体,再将其与丙烯酰胺共聚合,合成了以 PNIPAM 为侧链的接枝共聚物。合成的温敏聚合物水溶液的 LCST 在 32~50℃ 之间。郭睿威^[20]用同样方法将 PNIPAM 接枝到 HPAM 侧链,发现 HPAM-PNIPAM 在接枝率大于 400,接枝侧链 PNIPAM 相对分子质量大于 8000g/mol,且聚合物质量浓度大于 2g/L 时具有较强的温敏增粘性。

白荣光^[21]用端基转换法合成了聚[N-异丙基丙烯酰胺(NIPAM)-co-N, N-二甲基丙烯酰胺(DMAM)]大分子单体,并将其与丙烯酰胺聚合后再水解,得到以大分子单体为侧链的接枝共聚物,发现其热增粘能力依赖于侧链组成、接枝物浓度和外加盐浓度。引入 N, N-二甲基丙烯酰胺虽然提高了热致增粘的响应温度范围,但同时也提高了缔合浓度,降低了缔合强度,从而削弱了热致增稠的能力。

通过偶联接枝法将温敏单体作为温敏聚合物的侧链是温敏聚合物结构改性的重要手段,高低不同的 PNIPAM 的分子量和接枝密度对热增粘效应影响都较大,而且影响比较复杂。一般而言,相转变温度随接枝密度的增大而降低,而绝对粘度则主要受主链分子链长短的影响,接枝密度和接枝链的长短在一定范围内具有良好的温敏效应。

1.3 温敏单体接枝在固体表面性能特点

刘敬平等^[22]将 NIPAM 异丙醇溶液涂抹在聚苯乙烯培养皿的固体表面,通过电子束照射提供接枝反应的能量,利用其温敏性控制细胞分离。结果显示,37℃ 下,细胞在接枝的培养皿上能正常地生长,能起到依靠培养温度来控制细胞分离的作用。肖凯军^[23]将 NIPAM 单体接枝到聚偏氟乙烯(PVDF)基膜上,制备出具有温度响应特性的智能膜,测试分析证明,接枝了温敏基团 PNIPAM 的温度响应型聚偏氟乙烯复合膜具有良好的温度响应性及抗污染性。

PNIPAM 的分子构象随着温度的变化会出现伸展状态或者收缩状态,PNIPAM 的分子的表面则呈现亲水性或疏水性的转变,依据这个特性可将 PNIPAM 接枝于固体表面,通过调节环境温度可以改变固体表面的亲水性。

1.4 温敏单体接枝超分子的性能

常见的接枝与温敏单体的超分子一般有环糊精和冠醚,环糊精和冠醚具有独特的结构,几乎都具有空腔结构,可以通过分子间力实现对客体分子的键合和选择性包结^[24]。环糊精是由葡萄糖单元结合而成的锥筒状笼型超分子结构,其腔内侧处于碳氢键的屏蔽而呈疏水性,外侧则由于羟基的聚合而是亲水性的^[25,26]。刘郁杨等^[27]把环糊精(CD)和 NIPAM 结合,制备得到一种新型的多功能水凝胶,使温敏性的 NIPAM 结合疏水性的 β -环糊精,能识别许多疏水性化合物。Wang 等^[28]合成的 p(NIPAM-co-CD)温敏水凝胶,与传统的 PNIPAM 相比,其 LCST 在水中增大而在铵盐(ANS)溶液中减小。

2 外界环境对水溶液性能的影响

2.1 离子强度对溶液性能的影响

王焕霞等^[16]利用透光率仪测定了盐对 PDEAM 水溶液 LCST 的影响。结果表明:水溶液中分别加入不同类型的无机盐,随着无机盐 NaCl、KCl、CH₃COONa、Na₂SO₄ 及 MgSO₄ 含量的增加 PDEAM 水溶液的 LCST 降低,降低程度与盐的种类和阴离子价数有关;十二烷基磺酸钠(SDS)则使 PDEAM 水溶液的 LCST 升高。张晓飞等^[17]合成了 P(NIPAM-HEMA-AM-NaAA)共聚物,在 2% 的聚合物水溶液中加入 4% NaCl 后,溶液粘度增大,升温增稠效应明显。一定浓度的盐能促进温敏聚合物的缔合强度,增大溶液体系的粘度。Hourdet 小组^[15]研究了无机盐 K₂CO₃ 对 PAA-g-PNIPAM 聚合物溶解性的影响,无机盐 K₂CO₃ 会降低溶剂对 PNIPAM 的溶解性。

研究离子强度对温敏聚合物溶液的影响很少,主要集中在期望该类聚合物能用于油气田开发中作为驱油剂,因为作为溶解介质的地层水本身含有一定的离子,关键要弄清楚聚合物溶液性质与盐浓度的关系,但从为数不多的文献中仍能发现一定的规律:盐(离子强度)对离子型温敏聚合物的 LCST 有一定的影响,能降低温敏聚合物的 LCST,影响程度一般遵循 Donnan 效应和聚合物与盐离子之间的静电力作用。对于非离子型和阳离子型温敏聚合物的影响能力,盐对 LCST 影响能力进行排序,为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{I}^- > \text{SCN}^-$ 。但相对阴离子型温敏聚合物,盐对其的影响很小。分析这种规律的本质,一方面小分子盐能促进聚合物中缔合基团之间的缔合驱动力增强,导致溶液粘度增大,另一方面又能降低聚合物的水化能力,导致溶液粘度降低。一般而言,缔合作用的增粘作用要大于降低水化的降粘作用^[29]。

2.2 表面活性剂对溶液性能的影响

当阴离子表面活性剂胶束将非离子聚合物转变为带电荷的链时,聚合物将会发生聚电解质的行为。PNIPAAm(线性或交联)可与表面活性剂,尤其是阴离子表面活性剂,如 SDS 形成混合的疏水缔合。

王焕霞等^[16]利用透光率仪测定了表面活性剂对 PDEAM 水溶液 LCST 的影响。结果表明,十二烷基磺酸钠(SDS)可以使 PDEAM 水溶液的 LCST 升高。这是由于 PNIPAAm 具有疏水基团,聚合物微胶束在达到 cmc 时形成,在高温时,由于表面活性剂的静电斥力与聚合物的疏水作用相抵消,使 LCST 明显升高。另外,当烷基磺酸钠表面活性剂的烷基链长在 0~4 时,表面活性剂将使 PNIPAAm 的 LCST 降低,且对此聚合物链的缔合没有促进作用,与 Na_2SO_4 有相似的作用;当烷基磺酸钠的烷基链长在 5~10 时,在表面活性剂浓度较低时,同样抑制其 LCST,但当表面活性剂浓度高于 cmc 时,将使其表观 LCST 升高。

胡静等^[30]通过研究 P(AM-Macromer)溶液与不同表面活性剂的相互作用,发现 P(AM-Macromer)在水溶液中与表面活性剂存在明显相互作用,复合效应与聚合物浓度、表面活性剂结构及浓度有关。在较高聚合物溶液浓度下,随表面活性剂浓度增加,溶液粘度急剧增加并达到最大值,此后继续增加表面活性剂浓度将使聚合物溶液表观粘度经历降低过程后趋于稳定值;在低浓度聚合物溶液中,表面活性剂的加入使溶液粘度下降。表面活性剂对共聚物 P(AM-Macromer)溶液粘度的影响强弱顺序为:SDBS > CTAB > OP-10。

Hourdet 小组^[15]研究了表面活性剂对 PAA-g-PNIPAM 聚合物溶液粘度的影响,发现表面活性剂十二烷基磺酸钠能使 PNIPAM 已形成的增粘的疏水缔合结构破坏,粘度下降。Hourdet 分析这可能是表面活性剂的浓度并未达到“缔合”浓度的原因。

阴离子表面活性剂对温敏聚合物溶液粘度影响较大,其本质的原因是阴离子表面活性剂带有电荷,达到一定临界胶束浓度时,表面活性剂能形成胶束结构,胶束结构能将非离子的聚合物链包裹,而带亲水基团的阴离子朝向外面(即水相),加剧了电荷的作用,这种加剧程度在高温更加强烈,能使得 LCST 进一步升高。这种影响在表面活性剂临界胶束浓度时更加显著;另外,表面活性剂对聚合物粘度的影响随聚合物浓度的高低显然不同,聚合物浓度高,增加粘度,反之,则降低粘度,这可能是与形成的“胶束”的大小有关系,聚合物在单位体积内的链多则形成的胶束缔合能力大,粘度增加,链少则缔合能力小,粘度变化不大,甚至降低。

2.3 溶剂对溶液性能的影响

在温敏聚合物水溶液中加入有机溶剂,如甲醇、丙酮和 DMF 等,可以改变温敏聚合物的 LCST。如在水和有机溶剂 DMF 的混合溶剂中,丙烯酰氧乙基-二甲基苄基铵盐和 NIPA 的共聚物溶液的 LCST 随着 DMF 百分含量的增加而有所变化。卞凤玲等^[31]研究了聚 *N,N*-二乙基丙烯酰胺(PDEA)在四氢呋喃(THF)、水以及四氢呋喃和水混合溶剂中粘度依赖性。实验结果表明,PDEA 在上述三种溶剂中粘度的温度依赖性不同,PDEA-THF 体系的相对粘度随温度升高而升高;PDEA- H_2O 体系以及 PDEA-THF- H_2O 体系的粘度随温度升高反而降低。

朱莉等^[32]合成了丙烯酰胺(AM)和 PNIPAM 共聚,采用聚醋酸乙烯酯(PVAc)醇解制备出了不同醇

解度的聚乙烯醇(PVA),研究 PVA 对聚合物溶液性能的影响。结果表明:PVA 与聚合物溶液复合效应明显,该复合溶液具有盐增稠和升温增粘的特性,溶液的弹性随温度的升高而增强;高醇解度 PVA 具有良好盐增稠和升温增粘的特性。醇解度较低的 PVA 与聚合物溶液复合后,溶液的 LCST 明显降低。

2.4 溶液的 pH 对聚合物溶液性能的影响

溶液的 pH 对温敏性聚合物溶液的性能有很大的影响。对 pH 敏感的聚合物一般含有可离子化侧链,以便在 pH 环境变化时,能够接收或提供质子。可通过与 pH 敏感的单体共聚,从而提高或降低其 LCST。

卞凤玲等^[31]制备了 NIPAAm 共聚物,研究发现,其浊点随着 NIPA 含量的增加和 pH 值的降低而降低。伊敏等^[33]利用辐射聚合法以 NIPAAm 和 AAc 为单体在 THF 溶液中制备了二元线型共聚物,聚合物溶液具有温度敏感性,其 LCST 值随溶液的 pH 值而升高,因为 PNIPAAm-AAc 二元线型共聚物受羧基的影响—COO⁻,pH 值增加,—COO⁻增多,斥力使其不易沉淀下来,导致 LCST 值上升。

2.5 剪切对溶液性能的影响

文献^[34]研究显示在低温下聚合物溶液的粘度不随剪切速率的变化而变化,表现出牛顿流体特征;但当温度高于相转变温度后,流变行为表现出明显的剪切变稀特性。这是因为聚合物聚集体的形成在热诱导缔合和剪切破坏之间存在一种很强的竞争。在低剪切速率下,弛豫时间长于聚集体集合的时间,热力学缔合是主要因素,而在高剪切速率下,聚集体的集合时间长于弛豫时间时,PNIPAM 侧链就会因为主链的拉伸而被带出聚集体,表现出剪切变稀的特征。

3 总结

聚 N-烷基丙烯酰胺具有特殊的温敏行为,LCST 是温敏行为最重要表达参数,就聚合物本身的结构而言,亲疏水单体比例、温敏单体共聚方式、改性单体种类等因素均对 LCST 有一定影响;在确定亲疏水单体的条件下,只有两者之间的具有合适的比例,才能达到需要 LCST,单体的共聚方式也对 LCST 有较大的影响,不同的改性单体主要起到调控 LCST 的作用,或者为了达到某种特殊功能。外界环境对溶液性能的研究中主要以 LCST 以上溶液粘度变化为主要表达参数,离子强度的影响遵循一定的规律性,阴离子表面活性剂影响最大,溶剂等因素次之。

将温敏聚合物应用于油气田开发中逐渐被国内学者关注,以四川大学张熙课题组和中国石油大学邱正松课题组为代表,四川大学研究重点是将聚合物作为高温高盐地层的驱油剂,研究聚合物的合成条件、结构与性能关系及聚合物溶液性质,而中国石油大学主要将温敏聚合物作为在钻井液的流变控制剂和封堵剂。作者本人受国家自然科学基金支持,将烷基苯乙烯和丙烯酰胺分别作为疏水单体和亲水单体,和 N-烷基丙烯酰胺进行共聚合成温敏聚合物。研究认为合成聚合物的疏水单体选择性比较窄,在兼顾其本身必须耐温抗盐的特点,合成特殊的疏水单体工艺复杂,成本高,而且加量必须控制在较小比例,否则,聚合物的溶解性会急剧变差,另外,目前合成温敏聚合物基本是自由基聚合,所用引发体系为过氧化物体系,合成的聚合物分子量较短,增稠能力弱,合成中采用了亲水性偶氮类引发剂能较大幅度提高聚合物的粘度。

参考文献:

- [1] 任彦荣,霍丹群,侯长军. 材料导报,2004,18(11):54~60.
- [2] 陈勇,贾云,陈世兰. 重庆科技学院学报,2007,10(6):14~16.
- [3] 胡晖,范晓东. 功能高分子学报,2000,13(4):461~467.
- [4] 胡晖. 聚 N-异丙基丙烯酰胺类聚合物的合成与表征. 西安:西北工业大学硕士学位论文,2001:23~50.
- [5] 马超,刘侨,叶德展,张熙. 高分子通报,2014,(7):18~22.
- [6] 赵宝艳,王瑄,吴超. 浙江纺织服装职业技术学院学报,2010,(1):17~20.

- [7] 易菊珍,李海萍,马玉倩,等. 中山大学学报,2008,47(1):59~62.
- [8] Chen G, Hoffman A S. Nature,1995,373(6509):49~52.
- [9] A. S. Hoffman,et al. J Biomed Mater Res,2000,52(4):577~586.
- [10] 周礼,鲁智勇,张熙,等. 高分子科学与工程,2006,22(2):166~168.
- [11] 毛华华,关银燕,齐再前,等. 功能高分子学报,2008,21(4):432~436.
- [12] Taylor L D, Cerankowski L D. J Polym Sci, Part A: Polym Chem,1975,13(11):2551~2570.
- [13] 高青雨,张玉娟. 功能高分子学报,2001, 14(2): 158~162.
- [14] 李姝静,梁海燕,王心蕊. 影像科学与光化学,2012,30(3):200~209.
- [15] Durand A, Hourdet D. Polymer, 1999,40:4941~4951.
- [16] 王焕霞,刘守信,房喻,等. 物理化学学报,2009, 25(9):1911~1915.
- [17] 张晓飞,周礼,朱莉,等. 高分子科学与工程,2007,23,(3):85~91.
- [18] Durand A, Hourdet D. Polymer, 2000,41:545~557.
- [19] Hahn M, Gornitz E, Dautzenberg H. Macromolecules, 1998, 31: 5616~5623.
- [20] 郭睿威,鹿现栋,方道斌. 高等学校化学学报,2003, 24(7):1311~1314.
- [21] 白荣光,郭睿威,蔡超. 化工学报,2007, 9: 2388~2394.
- [22] 刘敬平,张兰兰,赵晓军. 中国组织工程研究与临床康复,2010,14(3):484~487.
- [23] 肖凯军,詹婷,陈仁菊. 现代食品科技,2013,29(1):81~85.
- [24] Liu H,Cai X,Wang Y,et al. Water Res,2011,45(11):3499~3511.
- [25] 李姝静,张小军,梁海燕,等. 化学学报,2012,70(8):1013~1020.
- [26] 赵三平,徐卫林. 化学进展,2010,22(5):916~926.
- [27] 刘郁杨,范晓东,孙乐,等. 高分子学报,2005,6(3):471~474.
- [28] Wang H D,Chu L Y,Yu X Q,et al. Ind Eng Chem Res,2007,46(5):1511~1518.
- [29] 吴奇,汪晓辉,高均. 高分子通报,1998, (3): 9~16.
- [30] 胡静,张晓飞,张熙,等. 高分子材料科学与工程,2008,24(8):82~85.
- [31] 卞凤玲,柳明珠. 物理化学学报, 2002,18(9):776~780.
- [32] 朱莉,李昱,张熙,张晓飞,等. 高分子材料科学与工程,2008,24(5):68~71.
- [33] 伊敏,张剑波,李军,等. 核化学与放射化学,1999,21(1):15~20.
- [34] 谢莎莎,张奕,柯渔,等. 功能材料,2013,4:512~514.

Relationship between Structure and Properties of Poly(*N*-alkyl acrylamide) and Effect of External Environment on Solution Properties

MA Chao^{1,2}, WANG Gang¹

(1. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Hubei 434100, China;

2. State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: PNIPAm has a special property of temperature sensitive, and it is a hot research topic in the field of high polymer. Determine the temperature sensitivity of such polymers is a key factor in the structure of the polymer itself, but also the external environment in which the polymer also has a close relationship. Mintel use temperature of such polymers to adapt to oil and gas development in the high temperature and high salt formation has important research value. In this paper, the effect of the structure of PNIPAm on the properties of the polymer was reviewed, such as Hydrophilic monomer and hydrophobic monomer ratio, temperature sensitive monomer copolymerization, modification monomer types; The influence factors of water solution properties of PNIPAm were summarized, such as different kinds of surface active agent, solvent, ionic strength and shear rate.

Key words: PNIPAm; Temperature sensitive polymer; Temperature-sensitive gel; Critical phase transition temperature; Temperature-sensitive mechanism