

研究论文

瓜尔胶 g 聚(丙烯酸钠-co-苯乙烯)/海泡石复合 高吸水性树脂的制备及溶胀行为

施小宁^{1, 2}, 王文波¹, 王爱勤¹

(¹中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 730000; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以瓜尔胶 (GG)、部分中和丙烯酸 (NaA)、苯乙烯 (St) 和海泡石 (ST) 为原料, 过硫酸铵 (APS) 为引发剂, *N, N'*-亚甲基双丙烯酰胺 (MBA) 为交联剂, 在水溶液中通过接枝共聚反应合成了瓜尔胶 g 聚(丙烯酸钠-co-苯乙烯)/海泡石 (GG-g-poly(NaA-co-St)/ST) 复合高吸水性树脂。考察了 St 和 ST 用量对复合高吸水性树脂溶胀能力和溶胀速率的影响。当 $C_{St} = 24.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、ST 为 10% (质量) 时, 树脂的溶胀能力和溶胀速率最大。研究了树脂在不同价态阳离子盐 (NaCl、CaCl₂ 和 AlCl₃) 和不同 pH 值溶液中的溶胀行为。实验结果表明, 在 GG-g-poly(NaA) 凝胶中引入适量的 St 和 ST 可以有效地改善树脂的网络结构。相对于空白样品, 复合高吸水性树脂在蒸馏水中的溶胀能力和初始溶胀速率分别提高 46.1% 和 62.7%。

关键词: 瓜尔胶; 苯乙烯; 海泡石; 复合高吸水性树脂; 溶胀行为

中图分类号: TQ 317.3

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157(2011)03-0864-06

Synthesis and swelling properties of guar gum g poly(sodium acrylate-co-styrene)/sepiolite superabsorbent composite

SHI Xiaoning^{1,2}, WANG Wenbo¹, WANG Aiqin¹

(¹Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;

²Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Novel guar gum-g-poly(sodium acrylate-co-styrene)/sepiolite (GG-g-poly(NaA-co-St)/ST) superabsorbent composites were synthesized by grafted copolymerization in aqueous solution using ammonium persulfate (APS) as initiator and *N, N'*-methylenebisacrylamide (MBA) as crosslinker. The effect of St and ST contents in superabsorbent composites on swelling capacity and swelling rate was investigated and the results showed that the optimum St and ST contents were $24.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and 10% (mass), respectively. The swelling behavior of the superabsorbent composites in solutions of different salts (NaCl, CaCl₂, AlCl₃) and pH values was also studied. The experiment results indicated that the polymeric network structure of GG-g-poly(NaA) could be improved by introducing a proper amount of St and ST, and then the swelling capacity and swelling rate of the superabsorbent composites increased by 46.1% and 62.7%, respectively.

Key words: guar gum; styrene; sepiolite; superabsorbent composites; swelling behaviors

2010-05-06 收到初稿, 2010-09-09 收到修改稿。

联系人: 王爱勤。第一作者: 施小宁 (1976—), 女, 博士研究生。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA03Z0454); 中国科学院“西部行动”计划项目 (KGCX2-YW-501)。

Received date: 2010-05-06

Corresponding author: Prof WANG Aiqin, aqwang@licp.cas.cn

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2006AA03Z0454) and the Western Action Project of CAS (KGCX2-YW-501).

引言

高吸水性树脂是由亲水性单体经适度的化学物理交联形成的具有三维网络结构的功能高分子材料, 具有优异的吸水 and 保水性能, 能够吸收比自身重数百倍甚至上千倍的水分, 而且所吸收的水分在较高压力下也不会溢出^[1]。因此, 高吸水性树脂在医疗卫生、农林园艺、食品加工、环境保护、美容化妆、土木建筑、石油开采等领域应用广泛^[2-4]。

近年来, 随着人们绿色环保意识的不断增强, 研究开发环境友好材料引起了各国研究者的关注。利用可再生资源(尤其是天然多糖)替代日益枯竭的石油资源、提高树脂的性能、降低树脂的生产成本、合成可降解或易降解的环境友好高吸水性树脂, 已经成为目前国内外高吸水树脂研究的热点^[5]。瓜尔胶(GG)是一种非离子型的天然半乳甘露聚糖胶^[6], 在工业上广泛用作增稠剂、稳定剂和乳化剂等^[7]。瓜尔胶可与丙烯酸接枝共聚制备可降解高吸水性树脂^[8-9]。海泡石(ST)是一种具有层链状结构的硅酸盐黏土矿物, 含有可参与反应的Si-OH, 可作为合成无机-有机复合高吸水性树脂中的无机填料^[10]。另据文献报道^[11-13], 在亲水性的聚合物网络中引入适量的疏水基团可以有效地改善网络结构, 从而提高凝胶的溶胀能力。为此, 在过去瓜尔胶接枝聚丙烯酸钠研究工作的基础上^[8], 本文以苯乙烯为疏水共聚单体, 通过接枝共聚反应合成了瓜尔胶-g-聚(丙烯酸钠-co-苯乙烯)/海泡石(GG-g-poly(NaA-co-St)/ST)复合高吸水性树脂, 考察了苯乙烯和海泡石用量对高吸水树脂溶胀能力和溶胀速率的影响, 研究了复合高吸水性树脂在不同浓度阳离子盐和pH值溶液中的溶胀行为。

1 实验材料和方法

1.1 实验原料

丙烯酸(AA): 化学纯, 上海五联化工厂, 使用前经减压蒸馏; 苯乙烯(St): 化学纯, 中国医药(集团)上海化学试剂公司, 使用前未加纯化; 瓜尔胶(GG): 食品级(数均分子量220000), 武汉天源生物技术有限公司; 海泡石(ST): 大连环球矿产集团公司; 过硫酸铵(APS): 分析纯, 西安化学试剂厂; *N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(MBA): 化学纯, 中国医药(集团)上海化学试剂公司。其他

试剂均为分析纯。

1.2 分析测试仪器

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), Thermo Nicolet, NEXUS, 美国; 电子微量天平(精度为0.01 mg), Sartorius BP211D型, 瑞士; 烘箱: DHG-9145A型电热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科技有限公司。

1.3 GG-g-poly(NaA-co-St)/ST复合高吸水性树脂的制备

在装有搅拌棒、回流冷凝管、氮气导管和恒压滴液漏斗的250 ml圆底烧瓶中加入1.20 g GG和34 ml NaOH溶液(pH=12.5, 0.067 mol·L⁻¹), 将其置于60℃油浴中, 搅拌分散1 h后加入8.9 mmol·L⁻¹的引发剂APS, 恒温15 min, 引发产生自由基。然后降温至40℃后加入含7.2 g AA(用8.5 ml 8 mol·L⁻¹ NaOH中和), 0~38.8 mmol·L⁻¹ St, 2.8 mmol·L⁻¹交联剂MBA和一定量ST混合溶液。滴加完后缓慢升温至70℃, 恒温反应3 h。整个实验过程均用氮气保护。反应结束后, 将所得的产物置于鼓风干燥箱内, 在70℃下干燥至恒重, 再将干树脂粉碎, 过40~80目(380~180 μm)网筛, 得备用样品。GG-g-PNaA/ST和GG-g-poly(NaA-co-St)仍按上述方法制备, 只是分别没有加入St和ST。

1.4 平衡溶胀倍率和溶胀速率的测定

称取0.05 g(*m*₁)干燥样品于500 ml的烧杯中, 加入250 ml蒸馏水或生理盐水, 放置4 h后达到溶胀平衡。将溶胀凝胶用100目(1.0 mm)网筛滤出并静置10 min滤去多余水分。然后称出溶胀样品的质量(*m*₂), 平行测定3次取平均值, 按式(1)计算出复合高吸水性树脂的平衡溶胀倍率 $Q_{eq}(g \cdot g^{-1})$

$$Q_{eq} = (m_2 - m_1) / m_1 \quad (1)$$

溶胀速率的测定是在数只烧杯中各加入0.05 g样品, 再加入250 ml蒸馏水, 分别静置不同时间测定溶胀倍率与时间的关系。复合高吸水性树脂在不同盐溶液和pH值溶液中的溶胀行为按上述类似方法测定。

2 实验结果与讨论

2.1 FTIR及UV-Vis分析

图1分别为ST、GG、GG-g-PNaA/ST、GG-g-poly(NaA-co-St)、GG-g-poly(NaA-co-St)/ST

的红外光谱图。在图 1 中曲线 a, 1168、1089、1024 cm^{-1} 处的吸收峰为 GG 分子中—OH 的特征吸收峰。GG 与 NaA 发生接枝聚合后, 此特征吸收峰减弱, 在 1726 cm^{-1} 出现 C=O 伸缩振动吸收峰, 1576、1456、1409 cm^{-1} 出现了 COO^- 的不对称和对称吸收峰, 红外光谱中的上述变化说明 GG 的羟基参与了接枝反应, NaA 已经接枝到 GG 的骨架上^[8]。从 ST 的红外光谱 (图 1 中曲线 b) 可以看到, 3679 cm^{-1} 对应于 Si—OH 的伸缩振动峰, 但此吸收峰在接枝反应发生后几乎完全消失 (图 1 中曲线 c~ e), 说明 ST 的 Si—OH 参与了反应。上述红外光谱分析结果表明, GG、NaA 和 ST 共同参与了接枝聚合反应。由于 St 用量较少, 其苯基特征吸收峰在红外光谱中与 COO^- 的吸收峰重叠。为了确认 St 参与了共聚反应, 测定了树脂的紫外-可见吸收光谱。由图 2 可见, 含有 St 的样品均在 263 nm 出现了苯环的 E 带特征吸收, 这说明 St 也参与了接枝共聚反应。

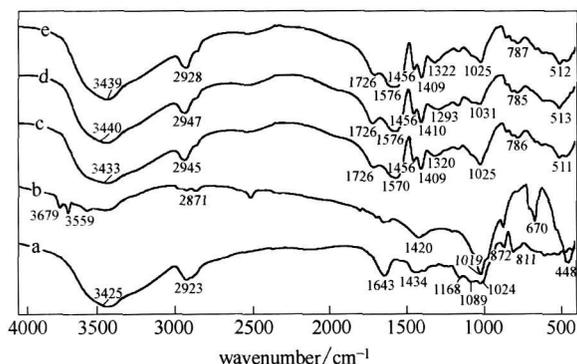


图 1 GG、ST、GG-g-PNaA/ST、GG-g-poly(NaA-co-St) 和 GG-g-poly(NaA-co-St)/ST 的红外光谱
Fig. 1 FTIR spectra of GG (a), ST (b), GG-g-PNaA/ST (c), GG-g-poly(NaA-co-St) (d) and GG-g-poly(NaA-co-St)/ST (e)

2.2 St 用量对复合高吸水性树脂溶胀能力的影响

在高吸水性树脂的聚合物链中引入适量的疏水基团, 可以改变聚合物网络中的物理交联作用, 从而提高树脂的溶胀性能^[11-12]。疏水单体的用量对复合高吸水性树脂的溶胀能力有很大影响。固定 AA: GG=6:1, APS 8.9 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, MBA 2.8 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, ST 10% (质量), 改变 St 的用量, 其对树脂平衡溶胀倍率的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 在 0~24.3 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 随着 St 用量的增加, 样品的溶胀倍率升高, 当 St 用量为 24.3

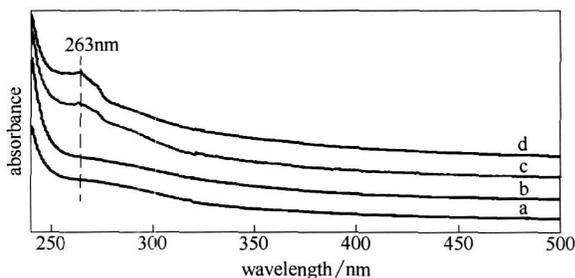


图 2 GG-g-PNaA、GG-g-PNaA/ST (10%)、GG-g-poly(NaA-co-St)/ST 的紫外吸收光谱
Fig. 2 UV-Vis spectra of GG-g-PNaA (a), GG-g-PNaA/ST (10%) (b), GG-g-poly(NaA-co-St)/ST ($C_{\text{St}} = 24.3, 38.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively; ST: 10%) (c) and (d)

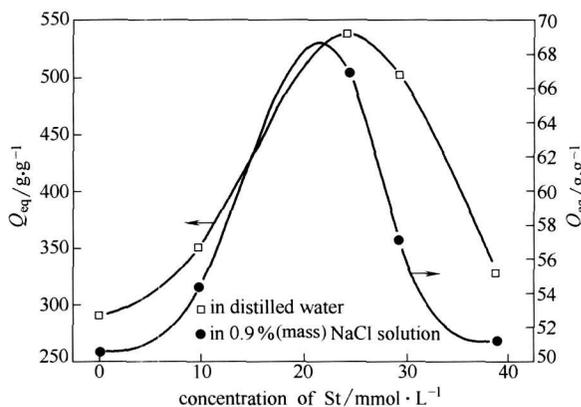


图 3 苯乙烯浓度对复合高吸水性树脂溶胀能力的影响
Fig. 3 Effect of styrene concentration on swelling capacity of superabsorbent composites

$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时树脂在蒸馏水和 0.9% (质量) 盐水中溶胀倍率达到最大值, 分别为 $556 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $68 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这是因为在一定范围内疏水的苯基在聚合物网络中可以降低网络中亲水基团之间的氢键作用, 使网络链空隙增大, 有利于水分子的进入, 因而溶胀倍率增加。另外, 由于苯基是非离子基团, 所以其耐盐性好, 但是过量的疏水基团也会降低亲水网络的亲水作用, 从而降低溶胀能力。

2.3 ST 用量对复合高吸水性树脂溶胀倍率的影响

固定 St 用量为 $24.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 改变 ST 的用量, 考察对树脂溶胀性能的影响。由图 4 可见, 在 ST 含量 5%~10% (质量) 的范围内, 复合高吸水性树脂的溶胀倍率明显增大, 但当 ST 含量 > 10%, 其溶胀倍率降低。这是因为 ST 表面上具有可反应的—OH, 可与 AA 和 GG 一起参与聚合反应, 由于 ST 起到了交联点的作用^[10], 从而可改善

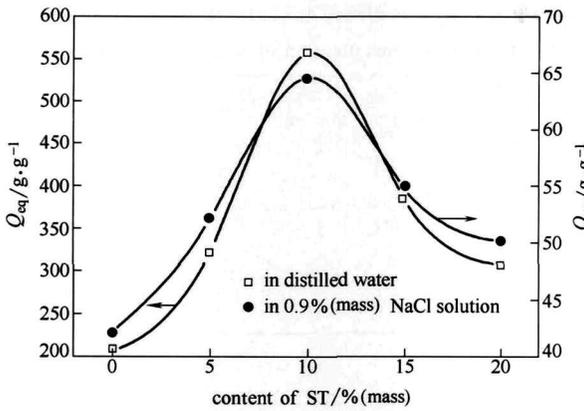


图 4 海泡石含量对复合高吸水性树脂溶胀能力的影响

Fig. 4 Effect of sepiolite content on swelling capacity of superabsorbent composites

聚合物的网络结构, 提高溶胀能力。但当 ST 的用量大于 10% 时, 一方面 ST 可有更多的交联点使交联密度增加; 另一方面过量的 ST 会以物理填充的方式进入到聚合物网络中, 由于 ST 的溶胀倍率很小, 故二者的影响使复合高吸水树脂溶胀性能下降。

2.4 不同 St 和 ST 含量对复合高吸水性树脂溶胀速率的影响

图 5 和图 6 是不同 St 和 ST 含量的复合高吸水性树脂的溶胀速率曲线。从图中可以看出, 加入 St 和 ST 后复合高吸水树脂的初始溶胀速率明显加快。Lee 等^[14]的研究表明: 高吸水性树脂的初始溶胀速率主要由水分子通过扩散和毛细管作用向树脂网络内部的渗透决定。树脂溶胀速率和初始溶胀速率随 St 和 ST 用量的增加而提高, 是因为疏水的苯基和刚性的 ST 在树脂中形成较多疏水微区, 毛细管作用更加明显, 从而可加速水分子的渗入。不同 St 和 ST 含量对树脂的溶胀速率和溶胀能力的影响可用 Schott 二级动力学方程表示^[15]

$$t/Q_t = 1/K_s Q_\infty^2 + t/Q_\infty \quad (2)$$

式中 Q_t 是复合高吸水性树脂在任一时刻 t 的吸水倍率, $g \cdot g^{-1}$; Q_∞ 是理论平衡吸水倍率, $g \cdot g^{-1}$; K_s 是溶胀速率常数; $K_{is} = K_s \times Q_\infty^2$, 是初始溶胀速率常数, s 。根据实验数据以 t/Q_t 对 t 作图拟合可得到一直线, 相关系数 > 0.99 , 说明树脂的溶胀行为符合 Schott 二级动力学模型。将此直线的截距和斜率代入式(2), 可计算出复合高吸水性树脂的溶胀速率常数 K_s 及理论平衡吸水倍率 Q_∞ , 也可得到树脂的初始溶胀速率常数 K_{is} , 结果见表

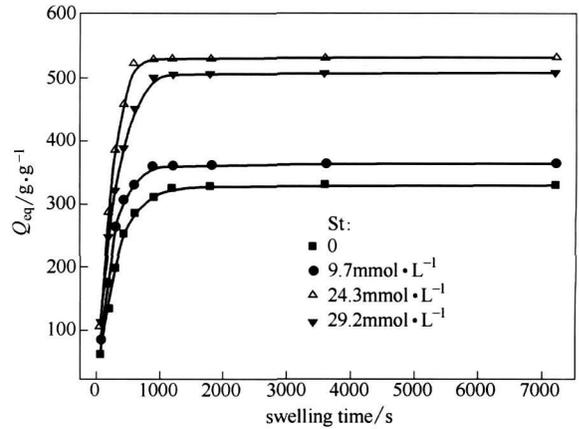


图 5 苯乙烯浓度对复合高吸水性树脂溶胀动力学的影响

Fig. 5 Effect of styrene concentration on swelling kinetics of superabsorbent composites

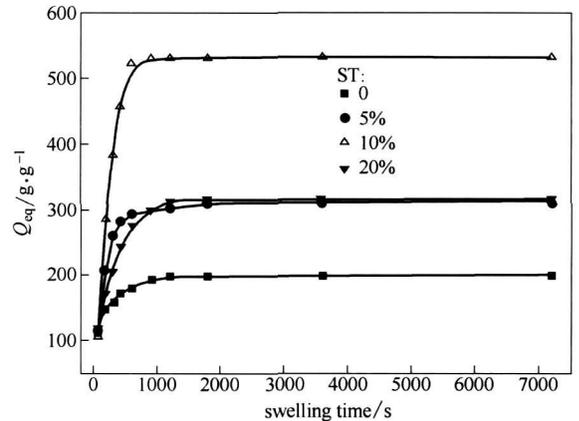


图 6 海泡石含量对复合高吸水性树脂溶胀动力学的影响

Fig. 6 Effect of sepiolite content on swelling kinetics of superabsorbent composites

1。由表 1 可见, St 和 ST 的用量对高吸水性树脂的初始溶胀速率常数 K_{is} 有极大影响, 这进一步证明了疏水单体及无机黏土对复合高吸水性树脂的网络结构有影响。

2.5 复合高吸水性树脂在不同价态盐溶液中的溶胀行为

图 7 为 $C_{St} = 24.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $ST = 10\%$ (质量) 的复合高吸水性树脂在不同价态阳离子盐溶液中的溶胀倍率曲线。树脂的溶胀倍率随着外界盐溶液 (NaCl 、 CaCl_2 和 AlCl_3) 离子强度的增加而下降, 这是由离子屏蔽作用的增加和凝胶网络与外部溶液的渗透压差下降引起的。树脂在单价阳离

表 1 不同苯乙烯和海泡石含量 GG-g poly(NaA-co-St)/ST 复合高吸水树脂溶胀动力学参数

Table 1 Swelling kinetic parameters of GG-g poly(NaA-co-St)/ST with various concentration of St and ST content

Sam ple	$Q_{eq}/g \cdot g^{-1}$	$Q_{\infty}/g \cdot g^{-1}$	K_s/s	$K_s \times 10^{-5}/g \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$
St, 0 mmol · L ⁻¹ ; ST, 10% (mass)	331	341	2 1868	1 8774
St, 9.7 mmol · L ⁻¹ ; ST, 10% (mass)	363	370	3 5856	2 6139
St, 24.3 mmol · L ⁻¹ ; ST, 10% (mass)	533	544	5 8630	1 9850
St, 29.2 mmol · L ⁻¹ ; ST, 10% (mass)	508	521	4 2017	1 5489
St, 24.3 mmol · L ⁻¹ ; ST, 0% (mass)	199	201	3 7795	9 3737
St, 24.3 mmol · L ⁻¹ ; ST, 5% (mass)	313	316	4 7794	4 7719
St, 24.3 mmol · L ⁻¹ ; ST, 20% (mass)	316	323	3 1135	2 9921

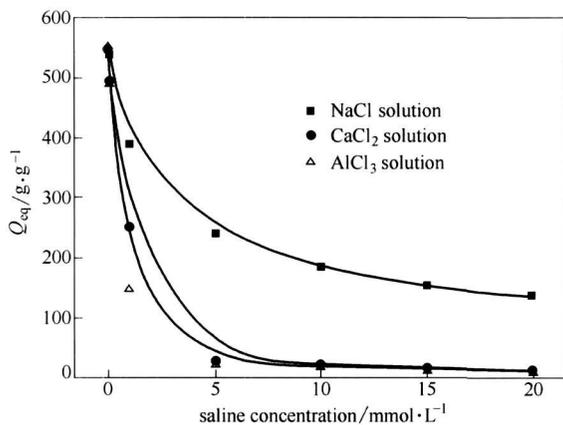


图 7 复合高吸水性树脂在不同浓度阳离子盐溶液中的溶胀行为

Fig. 7 Swelling behavior of optimized superabsorbent composites in different cationic salt solutions with various concentrations

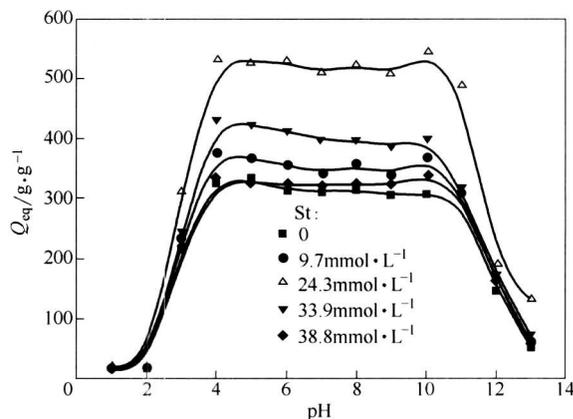


图 8 不同苯乙烯含量的复合高吸水性树脂在不同 pH 值溶液中的溶胀能力

Fig. 8 Effect of external pH on water absorbency of superabsorbent composites with different St concentration [ST 10% (mass)]

子盐溶液中的溶胀速率曲线比在多价阳离子溶液中更为平缓，溶胀倍率顺序为：NaCl > CaCl₂ > AlCl₃。其原因为多价阳离子可与聚合物网络中的 -COO⁻ 基团进行“离子交联”，增加了树脂的有效交联密度，减小了可容纳水分子的凝胶网络空间，从而使溶胀能力下降。

2.6 复合高吸水性树脂在不同 pH 值溶液中的溶胀行为

图 8 为溶液 pH 值对不同 St 含量复合高吸水性树脂溶胀行为的影响。树脂在溶液 pH < 4 或 pH > 10 时溶胀倍率较低，而在 pH 4~10 之间溶胀倍率较大，且变化较小。在较低的 pH 值溶液中，离子化的 -COO⁻ 转变为 -COOH，使 -COO⁻ 间的排斥力减小，渗透压减小，从而使整个网络结构的溶胀能力减小；在高 pH 值溶液中，过多 Na⁺ 会对聚合物链形成“反离子屏蔽效应”，也导致溶胀能力的下降。在 pH 4~10 的溶液中，树脂中的 -COO⁻ 和 -COOH 可形成缓冲体系，对外界溶液

pH 值的变化起到一定缓冲作用，从而保持溶胀能力基本不变。

3 结 论

(1) 以 GG、NaA、St 和 ST 为原料，MBA 为交联剂，APS 为引发剂，采用水溶液聚合方法成功制备了 GG-g poly(NaA-co-St)/ST 复合高吸水性树脂。红外和紫外-可见光谱分析证明，GG、NaA、St 和 ST 共同参与了接枝共聚反应。

(2) St 和 ST 的用量对复合高吸水性树脂的溶胀能力和溶胀速率有明显影响。复合高吸水性树脂的溶胀能力和溶胀速率随 St 和 ST 用量的增加先提高后降低，最佳的 St 和 ST 用量分别为 24.3 mmol · L⁻¹ 和 10% (mass)。在聚合物网络结构中引入适量的疏水共聚单体 St 可有效改善树脂网络结构。

(3) 不同阳离子盐对树脂的溶胀能力有较大影响。随着盐溶液离子强度的增加，树脂的溶胀能力

下降。在相同离子强度时, 树脂在不同价态阳离子盐溶液中的溶胀能力次序为: $\text{NaCl} > \text{CaCl}_2 > \text{AlCl}_3$ 。

(4) 不同 St 含量的复合高吸水性树脂在不同 pH 值溶液中溶胀行为基本相似。在 pH 4~10, 由于树脂中的 $-\text{COO}^-$ 和 $-\text{COOH}$ 的缓冲作用, 溶胀倍率变化较小且接近于最大溶胀倍率。在 $\text{pH} < 4$ 或 $\text{pH} > 10$ 时, 超出了树脂的缓冲能力范围, 溶胀倍率迅速降低。在相同 pH 值溶液中, 不同 St 含量复合高吸水性树脂的溶胀能力次序与其在蒸馏水中一致。

References

- [1] Wang Aiqin (王爱勤), Zhang Junping (张俊平). Organic inorganic Superabsorbent Composite (有机-无机复合高吸水性树脂) [M]. Beijing: Science Press, 2006
- [2] Panariello G, Favalaro R, Forbicioni M, Caputo E, Barbucci R. Synthesis of a new hydrogel, based on guar gum, for controlled drug release [J]. *Macromolecular Symposia*, 2008, 266: 68-73
- [3] Tyliczszak B, Polaczek J, Pielichowski J, Pielichowski K. Preparation and properties of biodegradable slow-release PAA superabsorbent matrixes for phosphorus fertilizers [J]. *Macromolecular Symposia*, 2009, 279: 236-242
- [4] Lin Hailin (林海琳), Cui Yingde (崔英德), Li Xinming (黎新明), Liao Liewen (廖列文), Yin Guoqiang (尹国强), Jia Zhenyu (贾振宇). Swelling behavior of superabsorbent resin in aqueous solutions [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, 57 (6): 1468-1473
- [5] Li Mingjie (李铭杰), Li Zhongjin (李仲谨), Zhu Xiaofeng (诸晓锋), Hao Mingde (郝明德), Zhang Chaowu (张超武). Research progress in super absorbent resin prepared from modification of natural polymers [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2010, 29 (3): 573-578
- [6] McCleary B V, Clark A H, Dea I C M, Rees D A. The fine structures of carob and guar galactomannans [J]. *Carbohydrate Research*, 1985, 139: 237-260
- [7] Singh V, Kumari P, Pandey S, Narayan T. Removal of chromium (VI) using poly(methylacrylate) functionalized guar gum [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100: 1977-1982
- [8] Fujioka R, Tanaka Y, Yoshimura T. Synthesis and properties of superabsorbent hydrogels based on guar gum and succinic anhydride [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 114: 612-616
- [9] Wang W B, Wang A Q. Preparation, characterization and properties of superabsorbent nanocomposites based on natural guar gum and modified rectorite [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77: 891-897
- [10] Xie Yuntao (谢涛), Wang Aiqin (王爱勤). Preparation and properties of chitosan-g-poly(acrylic acid)/sepiolite superabsorbent composites [J]. *Polymer Materials Science and Engineering* (高分子材料科学与工程), 2009, 25 (7): 129-132
- [11] Marandi G B, Hariri S, Mahdavinia G R. Effect of hydrophobic monomer on the synthesis and swelling behaviour of a collagen graft poly[(acrylic acid)-co(sodium acrylate)] hydrogel [J]. *Polymer International*, 2009, 58: 227-235
- [12] Shukla S, Bajpai A K, Kulkarni R A. Preparation, characterization, and water sorption study of polyvinyl alcohol based hydrogels with grafted hydrophilic and hydrophobic segments [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 95: 1129-1142
- [13] Kennedy J E, Lyons J G, Geever L M, Higginbotham C L. Synthesis and characterisation of styrene butadiene styrene-g-acrylic acid for potential use in biomedical applications [J]. *Materials Science and Engineering C*, 2009, 29: 1655-1661
- [14] Lee W F, Wu R J. Superabsorbent polymeric materials (I): Swelling behaviors of crosslinked poly(sodium acrylate-co-hydroxyethyl methacrylate) in aqueous salt solution [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, 62: 1099-1114
- [15] Schott H. Swelling kinetics of polymers [J]. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 1992, 31: 1-9