

PAMPS/SiO₂ 杂化水凝胶的合成及电场敏感性研究*

李云龙^{1,2} 林松柏^{1,2**} 张青海^{1,2} 李大刚^{1,2}

(¹ 黎明职业大学轻纺工程系 ² 实用化工材料福建省高校应用技术工程中心 泉州 362000)

摘 要 以 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸 (AMPS) 为有机原料, 正硅酸乙酯 (TEOS) 为无机原料, 过硫酸钾为引发剂, *N*, *N'*-亚甲基双丙烯酰胺为交联剂, 通过原位-凝胶水溶液聚合法合成了一系列不同二氧化硅含量和不同聚离子浓度的聚(2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸)/二氧化硅杂化电场敏感性水凝胶. 通过扫描电子显微镜 (SEM) 表征凝胶的结构, 研究水凝胶在去离子水以及氯化钠溶液中的溶胀和消溶胀行为. 结果表明, 系列凝胶的平衡溶胀度介于 224.9 至 325.6 之间, 复合凝胶的溶胀速率随 TEOS 用量的增加而降低; 除理想杂化凝胶外, 随着聚离子浓度的升高, 凝胶在氯化钠溶液中的消溶胀速率逐渐减小. 对凝胶的电场敏感性研究表明, 当聚离子浓度大于氯化钠溶液浓度时, 凝胶进一步溶胀, 反之则消溶胀, 其中杂化凝胶的再溶胀性能减弱, 而消溶胀行为变得更为明显. 同时制得的理想杂化凝胶, 较纯有机凝胶具有更为理想的力学性能, 最大抗压缩强度可达 23.4 MPa.

关键词 水凝胶, 电场敏感, 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸, 二氧化硅

智能凝胶是一类能对电场、温度、pH、离子强度、光强或磁场强度等外界刺激作出响应的高分子或超分子体系, 在可控释放、人工肌肉、纳米器件、智能分离等方面有很好的应用前景^[1~4]. 电场敏感性凝胶在外加电场作用下发生弯曲变形或体积变化, 即将电能等温地转化为机械能的特性, 可将其设计为柔性电机化学系统, 用于人工肌肉、机械手、传感器、驱动器、药物释放系统以及膜分离系统等领域^[5~11]. 但绝大部分合成材料制备得到的水凝胶的机械性能都很差, 一般的水凝胶的断裂能量在 $10^{-1} \sim 100 \text{ J/m}^2$ 之间, 远小于普通橡胶的断裂能^[12]. 有机/无机杂化的方式, 是解决这个问题的理想手段之一^[13~17]. 如果将有机智能凝胶与无机凝胶配合在一起, 就可得到杂化型智能凝胶. 无机凝胶种类很多, 硅凝胶是最常见的一种, 它可以采用溶胶-凝胶法将烷氧基硅化合物经过水解, 缩聚和凝胶化而制得^[18].

采用原位-凝胶水溶液聚合法, 以有机离子型单体与无机非离子型前驱体, 合成了聚离子浓度可调的聚(2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸)/二氧化硅 (PAMPS/SiO₂) 水凝胶, 测定该凝胶在 NaCl 溶液中有电场存在以及无电场存在 2 种情况下的溶胀行为, 探讨正硅酸乙酯的用量对凝胶机械性能的

影响.

1 实验部分

1.1 实验药品

2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸 (AMPS), 化学纯, 山东寿光联盟精细化工有限公司; 正硅酸乙酯 (TEOS), 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司; *N*, *N'*-亚甲基双丙烯酰胺 (MBA), 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司; 过硫酸钾 (KPS), 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司; 氯化钠 (NaCl), 分析纯, 广东西陇化工厂; 浓盐酸 (HCl), 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司; 丙酮, 分析纯, 广东西陇化工厂; 氢氧化钠 (NaOH), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司.

1.2 PAMPS/SiO₂ 水凝胶的制备

取一定量的 TEOS 于干净的小烧杯中, 加入一定量的蒸馏水, 用 HCl 调 pH = 3 ~ 5, 置于磁力搅拌器上搅拌 2 h 左右, 制得硅溶胶; 取一定量的 AMPS 单体置于烧杯中, 用一定量的蒸馏水将其溶解, 将溶液加入到装有搅拌装置的三颈瓶中, 通氮排氧 30 min, 开动搅拌器, 依次加入适量的交联剂、自制硅溶胶、适量的引发剂, 升温至 55℃; 反应一定时间, 获得半透明凝胶. 将产物放在蒸馏水

* 2011-10-26 收稿, 2011-12-20 修稿; 福建省自然科学基金 (基金号 2009J01319)、福建省教育厅 A 类项目 (项目号 JA10283) 和泉州市优秀人才培养专项 (10A01) 资助.

** 通讯联系人, E-mail: sblin@hqu.edu.cn; lsb@lmu.edu.cn

doi:10.3724/SP.J.1105.2012.11339

中浸泡 7 天,每隔一段时间换一次水,充分洗去未反应的单体及其他杂质,烘干,得 PAMPS/SiO₂ 水凝胶. 具体配方见表 1.

Table 1 Sample preparation, equilibrium swelling ratio in deionized water and concentration of polyion of hydrogels

Sample code	The amount of AMPS (g)	The amount of TEOS (g)	The equilibrium swelling ratio (g/g)	The concentration of polyion of hydrogels (mol/L)
Gel1	20.0	0	320.4	0.024
Gel2	19.0	1.0	325.6	0.021
Gel3	18.0	2.0	312.1	0.019
Gel4	17.0	3.0	260.1	0.017
Gel5	16.0	4.0	224.9	0.015

1.3 凝胶内部聚离子浓度的测定

PAMPS/SiO₂ 水凝胶中聚离子的浓度等于凝胶内部 H⁺ 的浓度,通过测定凝胶内部的 H⁺ 浓度来表征聚离子浓度. 具体方法:将吸去离子水达到饱和的凝胶切成一定规则体积凝胶块(20 mm × 5 mm × 2 mm),然后将凝胶放入装有一定量丙酮的量筒中,通过量筒内液体体积的变化来计算凝胶的体积. 然后将凝胶浸泡在过量的 0.01 mol/L NaOH 溶液中 24 h,确保凝胶内 H⁺ 被完全中和,用配置好的 HCl 标准溶液滴定残余溶液的 NaOH 浓度,以酚酞为指示剂. 按式(1)计算凝胶内聚离子浓度 c_{p-} :

$$c_{p-} = (c_{NaOH} \times V_{NaOH} - c_{HCl} \times V_{HCl}) / V_p \quad (1)$$

其中, c_{NaOH} 和 V_{NaOH} 分别为 NaOH 溶液的浓度和体积; c_{HCl} 和 V_{HCl} 分别为盐酸的浓度和体积; V_p 为凝胶的体积.

1.4 凝胶溶胀性能的测定

1.4.1 凝胶平衡溶胀度的测定

准确称取一定量的干凝胶置于烧杯中,放入 25℃ 的去离子水或 NaCl 溶液中浸泡,直到凝胶的质量不变,达到溶胀平衡. 按式(2)计算凝胶的平衡溶胀度 ESR:

$$ESR = (w_e - w_d) / w_d \quad (2)$$

其中 w_e 为达到溶胀平衡后凝胶的质量; w_d 为干凝胶的质量.

1.4.2 凝胶溶胀速率的测定

将干凝胶切成 2 mm × 1 mm × 1 mm 的规则小片并准确称重,放入至恒温的去离子水中浸泡,按设定的时间取出凝胶,用滤纸擦干凝胶表面的水分,称重. 按下式计算溶胀度 SR:

$$SR = (w_t - w_d) / w_d \quad (3)$$

其中 w_t 为溶胀一定时间后凝胶的质量; w_d 为干凝胶的质量.

1.4.3 凝胶消溶胀速率的测定

将吸去离子水饱和的凝胶切成 10 mm × 5 mm × 2 mm 规则凝胶块,然后放入 NaCl 溶液中浸泡,按设定的时间取出凝胶,用滤纸擦干凝胶表面的水分,称重. 按下式计算凝胶的保水率(WR):

$$WR = w_t / w_0 \times 100\% \quad (4)$$

其中 w_0 为在去离子水中达到溶胀平衡的凝胶的质量; w_t 为在 NaCl 溶液中浸泡一定时间后凝胶的质量.

1.5 水凝胶电场敏感性测定

将吸去离子水饱和的凝胶切成 50 mm × 5 mm × 2 mm 规则凝胶块,按图 1 所示安放在盛有一定浓度的氯化钠(NaCl)溶液的玻璃槽的中心位置,将两根有效电化作用长度为 20 mm 的 902-C 型铂电极固定于电解池两端,两极间的距离为 100 mm,在两电极上加上 30 V 的电压. 按设定的时间取出凝胶,用滤纸擦干凝胶表面的水分,称重. 按式(4)计算凝胶的保水率(WR).

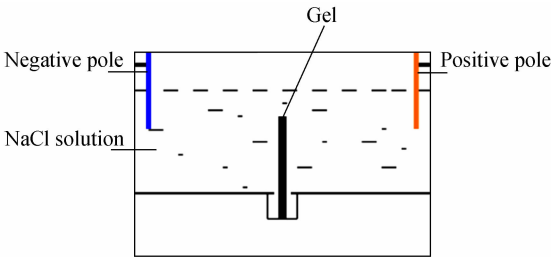


Fig. 1 The section drawing of electrical stimuli-response experiment

1.6 水凝胶抗压缩强度的测定

将溶胀达到平衡的凝胶切成 10 mm × 10 mm × 10 mm 的正方体,在 CMT-6104 型万能力学测试仪上进行凝胶的压缩性能测试,压缩速度为 2 mm/min,直至凝胶破裂. 按下式计算凝胶的压缩强度(S_s):

$$S_s = F / S \quad (5)$$

其中 F 为样品截面受到的力, S 为样品的截面积.

1.7 扫描电镜测试

采用 LEO-1530 型扫描电镜仪, 样品断面氮气保护下喷涂黄金, 在扫描电压为 20 kV 下观察产物的断面形貌.

2 结果与讨论

2.1 扫描电镜分析

图 2(a)~2(e) 分别是未加入 TEOS 和 TEOS 用量为 1.0 g (Gel 2), 2.0 g (Gel 3), 3.0 g (Gel 4) 和 4.0 g (Gel 5) 的凝胶的电镜图. 从图 2 可以看出, 纯 PAMPS 凝胶 (Gel 1) 的表面平整, 形貌均

一; Gel 2 至 Gel 5 由于 SiO_2 的加入, 表面呈现一定分布的白色小颗粒和团聚物, 其中 Gel 2 颗粒分布均匀, 粒径处于纳米级别, 随 TEOS 用量的增加, 白色小颗粒慢慢变多, 并显现聚集的状态, 而 Gel 5 已出现明显的团聚甚至相分离状态. 这是由于以 TEOS 为前驱体引入 SiO_2 , 其表面存在羟基 ($-\text{OH}$), 这些 $-\text{OH}$ 相互间或与有机相中的一些官能团 (如磺酸基) 间会产生氢键甚至化学键. 当 TEOS 用量较少时, 后者为主导作用, 使得 SiO_2 能比较均匀分散在有机相中; 而随着 TEOS 用量的增加, 前者慢慢变为主导地位; 当 TEOS 用量太大时, 就会发生团聚现象, 甚至出现明显的相分离.

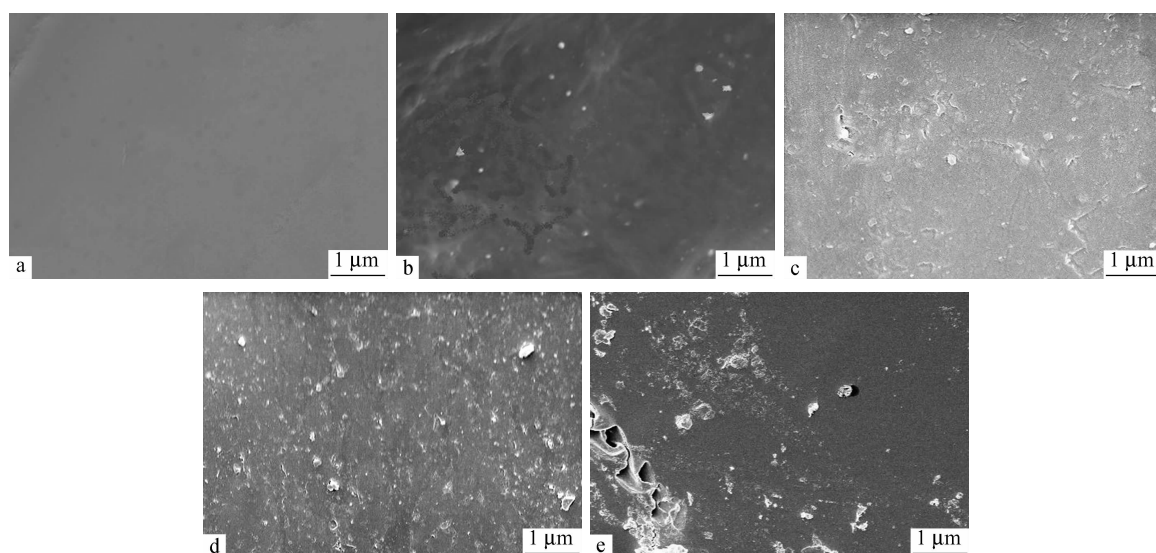


Fig. 2 SEM photographs of hydrogels with different contents of TEOS: (a) Gel 1, (b) Gel 2, (c) Gel 3, (d) Gel 4 and (e) Gel 5

2.2 凝胶抗压缩强度测定

图 3 是不同 TEOS 用量 (其他制备条件相同) 对水凝胶抗压缩性能的影响.

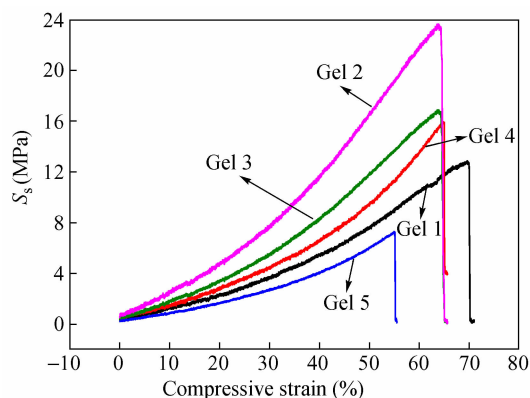


Fig. 3 The compressive strength of the different hydrogels

从图 3 可以看出, 在加入 TEOS 制得的凝胶中 (Gel 2、Gel 3、Gel 4 和 Gel 5) 随着 TEOS 用量的

增加, 凝胶的抗压缩强度依次下降, 这主要是由于 Gel 2 形成良好的有机/无机杂化网络结构, 无机硅凝胶很好的对杂化凝胶进行了增强. 图 3 中还可以看出, 纯 PAMPS 凝胶 (Gel 1) 的抗压缩强度仅比 Gel 5 来得好, 其最大抗压缩强度仅为 12.7 MPa, 这说明采用溶胶-凝胶法, 以 TEOS 为前驱体引入 SiO_2 无机网络, 可对凝胶进行良好的增强作用, 其中理想杂化凝胶 (Gel 2) 最大抗压缩强度可达到 23.4 MPa, 而 Gel 5 可能是由于引入 TEOS 的量太大, 使得凝胶中无机的相团聚现象过于严重, 造成发生了明显的相分离, 凝胶的抗压缩强度也随着降低.

2.3 凝胶的溶胀性能

表 1 是系列凝胶的合成配方、去离子水中的平衡溶胀度及凝胶内部聚离子浓度. 其中平衡溶胀度在 224.9 至 325.6 之间, 凝胶内聚离子浓度介于 0.015 mol/L 到 0.024 mol/L 之间. Gel 2 的

平衡溶胀度最大,引入 SiO₂ 制得的复合凝胶随 TEOS 用量的增加,凝胶内部聚离子浓度降低. 图 4 是不同 TEOS 用量制得的杂化凝胶在去离子水中的溶胀行为曲线.

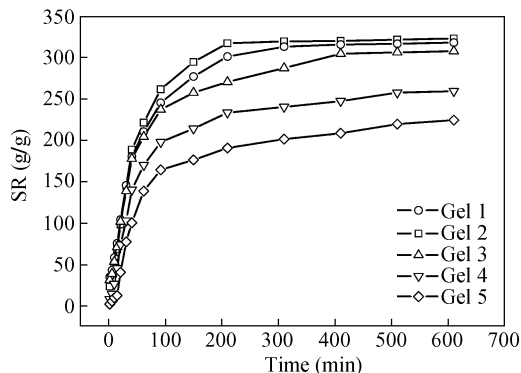


Fig. 4 The swelling kinetics of hydrogels in deionized water

从图 4 可以看出,与未加入 TEOS 的 Gel 1 相比, Gel 2 的溶胀速率以及平衡溶胀均略有提高,而 PAMPS/SiO₂ 复合凝胶随 TEOS 用量的增加,凝胶的溶胀速率和平衡溶胀度均呈现下降的趋势. PAMPS 分子链上的一SO₃H 是强电解质基团,而引入的 SiO₂ 无机凝胶末端具有大量未缩合的非离子型亲水基团(—OH),当 TEOS 加入量较少时,凝胶可形成良好的有机/无机杂化机制,获得良好的离子-非离子协同作用的效果. 随着 TEOS 用量的进一步增加,体系中 SiO₂ 出现团聚甚至相分离的现象,从而导致凝胶的溶胀速率以及平衡溶胀度下降.

2.4 凝胶的消溶胀性能

不同 TEOS 用量制得的凝胶在 0.02 mol/L NaCl 溶液中的消溶胀性能见图 5. 对于聚离子型水凝胶来说,凝胶内外的渗透压差是决定凝胶溶胀与消溶胀的主要因素^[19]. 因此,把在去离子水中达到溶胀平衡的 PAMPS/SiO₂ 水凝胶置于 NaCl 溶液中时,外部溶液离子浓度升高,使得外部溶液的渗透压大于凝胶内部溶液的渗透压,凝胶发生消溶胀. 另外,从图 5 可以看出,各种凝胶的消溶胀速率关系为 Gel 2 < Gel 1 < Gel 3 < Gel 4 < Gel 5. 这可能是由于 Gel 2 内部形成良好的离子-非离子的协同平衡,有助于提高凝胶的保水能力,而其余凝胶内部未形成平衡状态,聚离子浓度越高,凝胶内部的渗透压越大,从而减小了凝胶内外的渗透压差,使得凝胶的消溶胀速率降低.

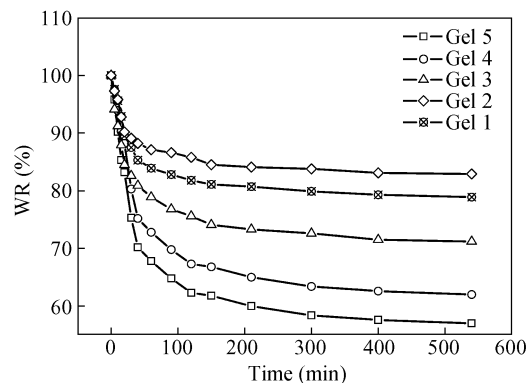


Fig. 5 The deswelling kinetics of hydrogels in 0.02 mol/L NaCl solution

2.5 通电条件下凝胶在 NaCl 溶液中的溶胀性能

图 6 是达到溶胀平衡的 PAMPS/SiO₂ 水凝胶,在外加电场存在下的 0.02 mol/L 的 NaCl 溶液中消溶胀行为曲线.

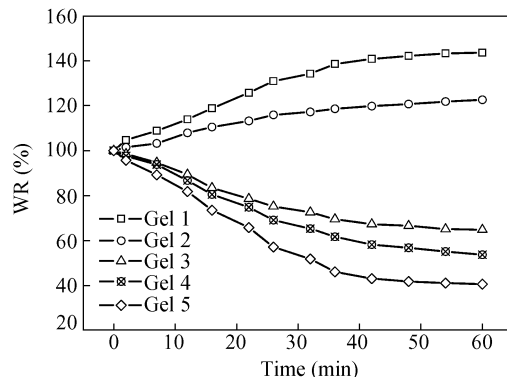


Fig. 6 The swelling properties of hydrogels in 0.02 mol/L NaCl solution with an applied voltage of 30 V

从图 6 中可以看出,电场存在下凝胶的消溶胀行为与未外加电场的行为存在明显的差异. 由图 5 可知没有外加电场的情况下,制得的水凝胶在 0.02 mol/L NaCl 溶液中均发生不同程度的收缩. 而电场存在下,聚离子浓度低于 0.02 mol/L 的 Gel 3、Gel 4 和 Gel 5 发生收缩,而浓度高于 0.02 mol/L 的 Gel 1 和 Gel 2 却发生了进一步溶胀的现象. 这可能是由于,聚离子型水凝胶的渗透压存在 3 种来源:(1)高分子链组成的交联网络,存在虎克弹性的压力;(2)凝胶中不同离子发生混合,熵变产生的压力^[20];(3)抗衡离子产生的压力. 当凝胶在去离子水中达到溶胀平衡时,3 种压力也达到了平衡. 将凝胶放入没有电场存在下的 NaCl 溶液中时,外界溶液中离子浓度升高,第(1)

种压力基本不受影响,而由于凝胶中存在不可扩散的聚离子,当凝胶内外达到杜南平衡时,凝胶内累积部分 Na^+ ,一方面 Na^+ 作为抗衡离子所产生的压力降低,另一方面使得外界溶液的自由离子浓度大于凝胶内的自由离子浓度,两者形成的渗透压使得凝胶发生收缩.而将达到溶胀平衡的凝胶置于外加电场的 NaCl 溶液中时,外加电场作用使得凝胶外部溶液中的离子发生定向迁移,且凝胶内外溶液中的自由离子浓度趋于平衡,这种平衡作用,一方面会促进凝胶内部的自由离子向外迁移,从而改变了溶液及凝胶内部离子浓度的分布,另一方面会使得凝胶内部的自由离子也发生定向迁移,从而降低了凝胶的混合熵.因此,外加电场会改变凝胶在 0.02 mol/L 的 NaCl 溶液中的溶胀性能.当凝胶内部的聚离子浓度低于 NaCl 溶液的离子浓度时,凝胶内外的渗透压作用仍起主要作用,凝胶发生消溶胀.而当凝胶内部的聚离子浓度高于 NaCl 溶液时,凝胶内自由离子往外迁移,而外界的水向内迁移的趋势,使得凝胶进一步溶胀.

从图 6 还发现, Gel 1 的再次溶胀率较 Gel 2

来得更高,这是因为外加电场的情况下, Gel 2 原本的离子-非离子协同平衡也被破坏, Gel 2 的聚离子浓度低于 Gel 1,因而再次溶胀率也较低;同时,凝胶的消溶胀行为随着 TEOS 用量的增加而增大.这主要是因为,一方面 TEOS 用量的增加降低了凝胶的溶胀度,使得凝胶内部聚离子浓度降低;另一方面外加电场作用下,破坏了 PAMPS 与 SiO_2 两相之间的作用力,使得凝胶内部离子移动更加容易,从而增加了凝胶内外的渗透压差.

另外,对比图 5 与图 6 可以发现,通电条件下,凝胶重新达到溶胀和消溶胀平衡的速度明显加快, 60 min 内即可重新达到溶胀平衡.这主要是由于电场作用下,体系中各离子的迁移速率加快,凝胶内外的瞬间渗透压差变大,从而使得凝胶溶胀和消溶胀行为时间缩短.

为进一步对电场存在下凝胶溶胀和消溶胀行为进行研究,针对不同的 NaCl 溶液浓度,进行了实验.图 7(a), 7(b) 和 7(c) 分别是在不同 NaCl 浓度溶液中, Gel 1, Gel 2 和 Gel 3 在电场存在下的溶胀和消溶胀行为.

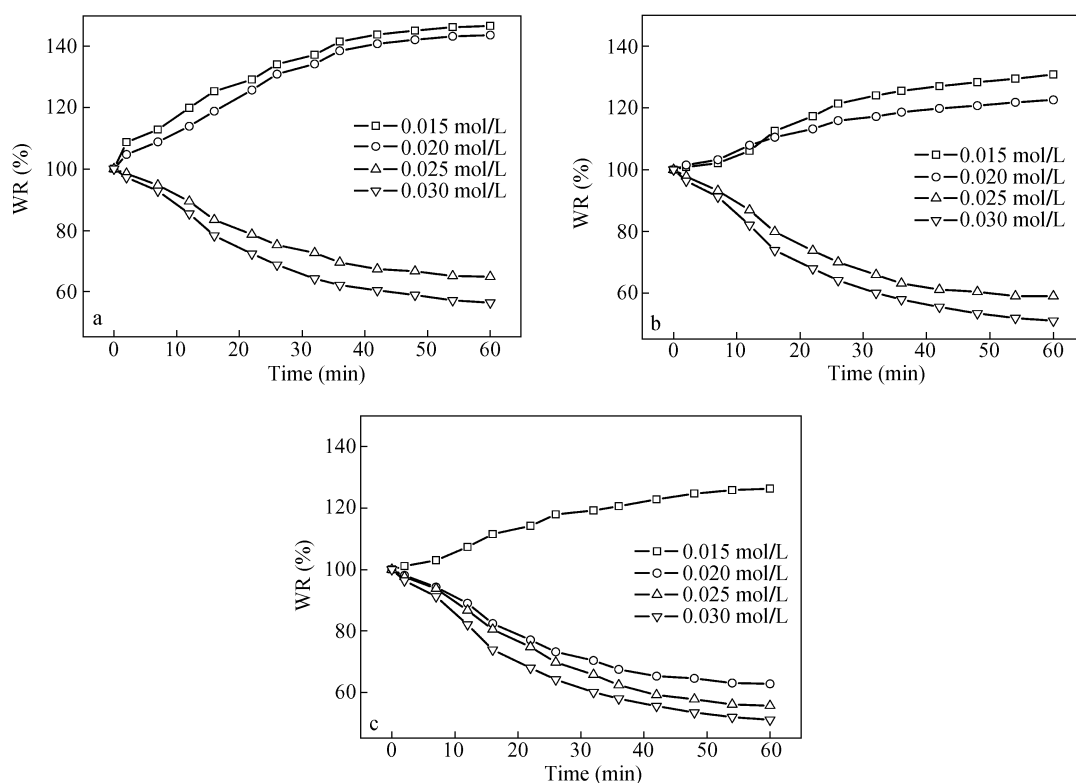


Fig. 7 Effect of the concentration of NaCl solutions on the swelling properties of gels with an applied voltage of 30 V : (a) Gel 1, (b) Gel 2 and (c) Gel 3

从图 7(a) ~ 7(c) 3 个图中均明显看出,当

NaCl 浓度小于聚离子浓度时,凝胶发生再次溶胀

现象;而当 NaCl 浓度大于聚离子浓度时,凝胶产生消溶胀行为. 因此,可以认为,达到去离子水溶胀平衡的凝胶放置在外加电场作用下的 NaCl 溶液中,当凝胶内部聚离子浓度低于溶液中 NaCl 浓度时,凝胶发生消溶胀;反之,则产生溶胀行为.

另外,从图 7 可以看出,Gel 2 相对于 Gel 1 而言,在低于其聚离子浓度的溶液中的再次溶胀率并不高,而消溶胀率却高于其它凝胶,这可能是由于外加电场作用下,凝胶内部的协同平衡被破坏,凝胶的保水能力受到较大的影响.

2.6 电压对凝胶电场响应性的影响

电压对水凝胶溶胀(Gel 1)性能的影响如图 8 所示.

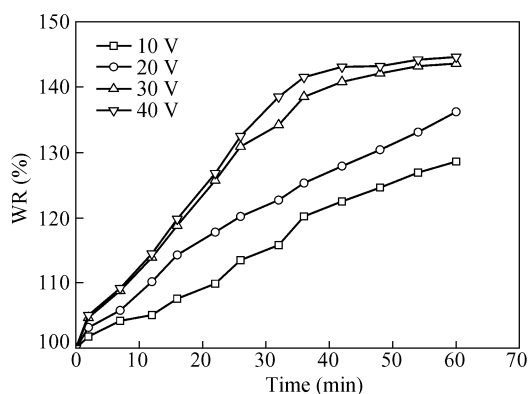


Fig. 8 The influence of an applied voltage on swelling behavior of hydrogel (Gel 1) in 0.02 mol/L NaCl solution

从图 8 可以看出,电场存在下,凝胶在 0.02 mol/L NaCl 溶液中溶胀. 随着施加电压的增加,凝胶的平衡保水率均逐渐升高. 这是因为离子的迁移速度随外加电压的升高而提升,凝胶内外的离子浓度梯度也随之增加,进而增加了凝胶内外

的渗透压,所以凝胶的平衡保水率均升高. 而外加电场强度为 30 V 和 40 V 时,凝胶平衡保水率非常接近,说明当电压达到 30 V 时,再提高电压对凝胶保水率的提高作用已不明显. 因而本实验方案中选择 30 V 为实验电压,以确保实验现象更加明显.

3 结论

(1)通过凝胶表面形貌表征可知,本实验方案下可成功获得具有良好结构的 PAMPS/SiO₂ 杂化凝胶. 通过原位-凝胶聚合法获得的杂化凝胶具有良好的力学性能,最大抗压缩强度可达 23.4 MPa.

(2)在 PAMPS/SiO₂ 复合水凝胶体系中,随着 TEOS 用量的增加,凝胶内部聚离子浓度、凝胶的溶胀速率以及平衡溶胀度均下降,同时理想杂化凝胶的溶胀速率和平衡溶胀度均略优于 PAMPS 凝胶.

(3)没有外加电场存在时,吸去离子水达到溶胀平衡的水凝胶在 NaCl 溶液中,呈现出消溶胀行为,且凝胶的消溶胀速率和消溶胀度均随着聚离子浓度的升高而降低;同时理想杂化凝胶的消溶胀速率和消溶胀度也都较 PAMPS 凝胶来得低.

(4)外在电场存在时,凝胶表现出截然不同的溶胀和消溶胀行为,当聚离子浓度小于 NaCl 浓度时,凝胶发生消溶胀,而大于溶液中 NaCl 浓度时,凝胶却呈现进一步溶胀的特性;理想杂化凝胶的离子-非离子协同作用被破坏之后,进一步溶胀性能减弱,而消溶胀行为变得更为明显.

REFERENCES

- Hamlen R P, Kent C E, Shafer S N. *Nature*, 1965, 206: 1149 ~ 1151
- Tanaka T, Nishio I, Sun S, Ueno S. *Science*, 1982, 218: 467 ~ 469
- Wallmersperger T, Kroplin B, Gulch R W. *Mater*, 2004, 36(5): 411 ~ 420
- Huang Boyang(黄铂扬), Lin Songbai(林松柏), Zhang Xian(张弦), Li Yunlong(李云龙). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2010, (5): 594 ~ 600
- Supranee K, Siridech B. *Eur Polym J*, 2006, 42: 1609 ~ 1616
- Lira L M, de Torresi S I C. *Electrochem Commun*, 2005, 7: 717 ~ 723
- ing L, Kang E T, Neoh K G, Kato K, Iwata H. *Membr J Sci*, 2004, 243: 253 ~ 262
- Hudson S M, Gil E S. *Prog Polym Sci*, 2004, 29: 1173 ~ 1222
- Shang J, Shao Z, Chen X. *Biomacromolecules*, 2008, 9: 1208 ~ 1213
- Shang Jing(尚婧), Chen Xin(陈新), Shao Zhengzhong(邵正中). *Progress in Chemistry(化学进展)*, 2007, 19(9): 1393 ~ 1399
- Lin J M, Tang Q W, Hu D, Sun X M, Li Q H, Wu J H. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, 346: 177 ~ 211

- 12 Tanaka Y, Fukao K, Miyamoto Y. *Eur Phys J E*, 2000, 3: 395 ~ 401
- 13 Lin S B, Yuan C H, Ke A R, Quan Z L. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134: 281 ~ 286
- 14 Yuan C H, Lin S B, Liu B, Ke A R, Quan Z L. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, 140: 155 ~ 161
- 15 Yuan Conghui(袁丛辉), Yu Na(余娜), Lin Songbai(林松柏), Ke Airu(柯爱茹), Quan Zhilong(全志龙). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2009, (3): 249 ~ 256
- 16 Lin S B, Wu J H, Yao K D, Cai k Y, Xiao C M, Jiang C J. *Compos Interfaces*, 2004, 11: 271 ~ 276
- 17 Yuan Conghui(袁丛辉), Lin Songbai(林松柏), Ke Airu(柯爱茹). Liu Bo(刘博), Quan Zhilong(全志龙). *Journal of Acta Chimica Sinica(化学学报)*, 2009, 67(16): 1929 ~ 1935
- 18 Li Yunlong(李云龙), Lin Songbai(林松柏), Yao Kangde(姚康德), Lu Shaojie(卢绍杰). *Polymer Materials Science & Engineering(高分子材料科学与工程)*, 2005, 21(6): 213 ~ 216
- 19 Shahinpoor M. *Smart Mater Struct*, 1994, 3: 367 ~ 372
- 20 Flory P J. *Principles of Polymer Chemistry*. New York: Cornell Univ Press, 1953

SYNTHESIS AND ELECTRIC-SENSITIVE PROPERTIES OF PAMPS/SiO₂ HYBRID HYDROGELS

Yun-long Li^{1, 2}, Song-bai Lin^{1, 2}, Qing-hai Zhang^{1, 2}, Da-gang Li^{1, 2}

(¹ Department of Light-textile Engineering, Liming Vocational University;

² Applied Technology Engineering Center of Fujian Provincial High Education for Practical Chemical Material, Quanzhou 362000)

Abstract A series of electric-sensitive hydrogels were prepared by in-site gel polymerization with 2-acrylamido-2-methyl propyl sulfonic acid (AMPS) as organic monomer and ethyl orthosilicate (TEOS) as inorganic material, using *N,N'*-methylene bisacrylamide as crosslinking agent and potassium peroxydisulfate as initiator, respectively. The structure of the hydrogels was characterized by scanning electrical microscopy (SEM). The swelling and deswelling properties of hydrogels in deionized water and in NaCl solution were studied in detail, showing that the equilibrium swelling ratio of the hydrogels ranged from 224.9 to 325.6. And the swelling rate of the composite hydrogels decreased with the increasing content of TEOS, in addition, the deswelling speed of the hydrogel decreased with the increasing concentration of polyion in interior of the hydrogels, except for the ideal hybrid hydrogels. Moreover, the electric sensitivity of the hydrogels was considered. The result revealed that the hydrogels swelled at high concentration of NaCl in solution (higher than that of polyion in interior hydrogels), but deswelled at low concentration. As for ideal hybrid gel, the reswelling ratios decreased, and the deswelling property was more obvious. Furthermore, the ideal hybrid hydrogels had more ideal mechanical properties than organic gels, and the maximum compressive strength of the hydrogels was about 23.4 MPa.

Keywords Hydrogels, Electrical sensitivity, 2-Acrylamido-2-methyl propyl sulfonic acid, Silica