

# 耐电压型聚 P(NIPAAm-co-DMAEMA) 水凝胶的合成与性能

龚涛, 廖列文, 周静, 周新华, 崔英德

仲恺农业工程学院绿色化工研究所, 广州 510225

**摘要** 电场敏感水凝胶是由高分子三维网络与溶剂水组成的多元体系, 并且在电场作用下会产生可逆弯曲或消溶胀的水凝胶。本文以异丙基丙烯酰胺 (NIPAAm) 和甲基丙烯酸 N,N-二甲氨基乙酯 (DMAEMA) 为单体, N,N'-亚甲基双丙烯酰胺为交联剂, 过硫酸铵和亚硫酸氢钠为氧化还原引发剂, 采用水溶液聚合法制备了一系列电场敏感性水凝胶, 研究了不同质量分数的 NaCl 溶液、温度、接触电场对水凝胶溶胀率的影响。研究表明, 合成的一系列 P(NIPAAm-co-DMAEMA) 水凝胶中, 随着单体 NIPAAm 量的增加, 在去离子水中的平衡溶胀率下降, 同时随着 NaCl 质量分数的增加, 平衡溶胀率下降, 但即使在质量分数为 0.9% 的 NaCl 溶液中, 最大溶胀率仍达 89g/g, 即保水率 44%; 共聚得到的水凝胶 LCST 温度在 43°C 左右, 有望成为良好的温敏性材料。在接触电压刺激下, 随着样品水凝胶中 DMAEMA 含量的增加, 水凝胶的质量保持率  $R_m$  依次减小。传统阴离子单体或阳离子单体聚合而成的水凝胶在电场作用下消溶胀十分明显, 而本文采用阳离子单体与非离子单体共聚合得到的水凝胶的  $R_m$  与时间的关系可以用拟合方程较好地描述, 根据得到的拟合方程外推, 该水凝胶在通电 360min 后保水率仍可达 53%。这种良好的耐电压性, 使该水凝胶更好地应用于人工肌肉和仿生技术及人造保险丝。

**关键词** 耐电压; N-异丙基丙烯酰胺; 甲基丙烯酸 N,N-二甲氨基乙酯; 水凝胶

**中图分类号** O631.2, TB381

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)18-0047-05

## Synthesis and Properties of Voltage Tolerance P(NIPAAm-co-DMAEMA) Hydrogels

GONG Tao, LIAO Liewen, ZHOU Jing, ZHOU Xinhua, CUI Yingde

*Institute of Green Chemical Engineering, Zhongkai University of Agricultural and Engineering, Guangzhou 510225, China*

**Abstract** The electric-field sensitive hydrogel, composed of macromolecule's three-dimensional network and water, could bend and deswell under the action of an electric field. A series of electric field sensitive gels were prepared by free-radical polymerization with N-isopropylacrylamide (PNIPAAm) and N-(2-(dimethylamino)ethyl)-methacrylamide (DMAEMA) as the monomers, N,N'-methylene bisacrylamide as the crosslinking agent, ammonium persulfate and sodium bisulfite as the redox initiator. The influences of the concentration of aqueous NaCl solutions, temperature and contacting DC electric field on the swelling ratios of the hydrogels were studied in detail. It is shown that the equilibrium swelling ratios decrease as the NIPAAm and the concentration of NaCl increase. Even in a normal saline with concentration of 0.9%, the equilibrium swelling ratio can be around 89g/g, that is to say, the retention is around 44%. The obtained hydrogels, with LCST around 43°C, could be a kind of temperature sensitive materials. Under the action of a contacting DC electric field, the  $R_m$  of hydrogels decreases as DMAEMA increases. Traditionally, the hydrogel prepared by anion or cation monomer, could deswell in an electric field. But in this paper, the hydrogel was prepared by copolymerization with anion monomer and non-ionic, the relationship between  $R_m$  and time could be described with fitting formulas, which indicate that the water retention could reach 53%. Due to the excellent voltage tolerance, the gels can be applied in the artificial muscle and bionic technology, and can substitute conventional metal fuses in the future.

**Keywords** voltage tolerance; N-isopropylacrylamide; N-(2-(dimethylamino)ethyl)-methacrylamide; hydrogel

收稿日期: 2010-03-17; 修回日期: 2010-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20376087, 20176007)

作者简介: 龚涛, 硕士研究生, 研究方向为功能高分子材料的合成, 电子信箱: gongtao199@126.com; 廖列文 (通信作者), 研究员, 研究方向为功能高分子材料的合成与应用, 电子信箱: liaolw@163.com

## 0 引言

敏感性水凝胶以其独特的功能在工业废水处理、药物缓释、蛋白质的分离提纯、活性酶的包埋和人工肌肉等方面有着广阔的应用前景,其研究受到了国内外学者的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。

在敏感性的高分子中,除温敏性的聚 N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAAm)<sup>[6]</sup>、聚 N,N-二乙基丙烯酰胺(PDEAM)<sup>[7]</sup>、pH 敏感性的聚丙烯酸类<sup>[8]</sup>等外,聚甲基丙烯酸二甲胺乙酯(PDMAEMA)是一种既具有温敏性又具有 pH 敏感性的敏感性高分子,其体积相转变温度(Lower Critical Solution Temperature, LCST)约为 41℃<sup>[9]</sup>。甲基丙烯酸 N,N-二甲氨基乙酯(DMAEMA)分子中含有碱性的叔胺基,可以被质子化而呈现正离子性<sup>[10-11]</sup>。N-异丙基丙烯酰胺为非离子型单体,水凝胶链上含有疏水的异丙基和亲水的酰胺键。这两种单体由于其特殊的结构,使其在敏感水凝胶的研究中受到大量重视<sup>[12-16]</sup>。本文采用自由基聚合的方法合成了聚异丙基丙烯酰胺/甲基丙烯酸 N,N-二甲氨基乙酯(P(NIPAAm-co-DMAEMA))敏感性水凝胶,并对这些水凝胶在不同质量分数 NaCl 溶液、温度和直流电场中的敏感行为进行了详细研究。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂和仪器

异丙基丙烯酰胺(NIPAAm),分析纯,上海东升化学试剂有限公司;甲基丙烯酸 N,N-二甲氨基乙酯(DMAEMA),工业级;N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBAAm),分析纯,天津市福晨化学试剂厂;过硫酸铵(APS),分析纯,广州市新成精细化工有限公司;亚硫酸氢钠(SBS),分析纯,天津市大茂化学试剂;其余未列出试剂为市售,且使用前没有做任何处理。Spectrum2000 傅里叶变换红外光谱仪,德国 Bruker 公司;JY600 型电泳仪;902C 型铂电极;电热恒温水浴锅;CS101-2 型电热鼓风干燥箱。

### 1.2 P(NIPAAm-co-DMAEMA)水凝胶的制备

按表 1 所给原料组成称取定量的 NIPAAm、DMAEMA 和 MBAAm,加入适量的蒸馏水使其溶解,然后再加入定量的 APS、SBS,搅拌均匀后倒入塑料容器中,密封,最后置于 50℃ 恒温水浴锅中,反应 3h 得水凝胶。在去离子水中浸泡 3d,每天换水 3 次,以除去未反应的单体及小分子量的线状聚合物、均聚物。

表 1 制备 NIPAAm/DMAEMA 水凝胶的原料组成  
Table 1 The composition of NIPAAm/DMAEMA hydrogels

样品	NIPAAm/g	DMAEMA/g	NMBA/%	APS/%	SBS/%	单体质量分数/%
S <sub>1</sub>	5.0	3.0	1	0.6	0.4	
S <sub>2</sub>	6.0	2.0	1	0.6	0.4	40
S <sub>3</sub>	7.0	1.0	1	0.6	0.4	
S <sub>4</sub>	7.2	0.8	1	0.6	0.4	

注:交联剂 NMBA、氧化还原引发剂 APS 和 SBS 的用量单位均为占单体总质量分数;单体浓度指单体与水的比值。

Notes: The contents of NMBA, APS and SBS, refer to the ratio relative to the monomer's total mass; the ratio of monomer refers to the ratio relative to water.

### 1.3 水凝胶的红外光谱表征

使用 Spectrum2000 傅里叶变换红外光谱仪对样品水凝胶进行红外光谱测试(中山大学测试中心),扫描范围为 500~4000cm<sup>-1</sup>,扫描次数为 32,分辨率为 4cm<sup>-1</sup>。

### 1.4 水凝胶平衡溶胀率的测定

凝胶的平衡溶胀率用重量法测定,计算式为

$$\text{平衡溶胀率} = (W_s - W_d) / W_d \quad (1)$$

其中,  $W_s$  为溶胀后的凝胶重量,  $g$ ;  $W_d$  为烘干后凝胶的重量,  $g$ 。

### 1.5 水凝胶在不同质量分数的 NaCl 溶液或温度时的平衡溶胀率

取小块在去离子水中溶胀平衡后的凝胶,分别放入不同质量分数的 NaCl(或不同温度)溶液中,3d 后取出,重量记为  $W_s$ ;将其置于 100℃ 烘箱中,干燥 24h,重量记为  $W_d$ ,按照式(1)计算凝胶在 NaCl 溶液或不同温度水溶液中的平衡溶胀率。

### 1.6 水凝胶的电刺激收缩性能

将溶胀后的水凝胶切成圆柱状(底面直径为 10mm,高度为 10mm),放入测量装置中,将一对铂电极沿着水平方向从

两边插入水凝胶。接通电源,在保持 16V 电压和电极间距为 10mm 不变情况下,定时取出失水后的水凝胶,用滤纸吸去表面水后称重。按式(2)计算水凝胶的质量保持率  $R_m$

$$R_m = (M_t / M_i) \times 100 \quad (2)$$

式中,  $M_t$  为通电  $t$  时间后水凝胶的质量,  $g$ ;  $M_i$  为通电前溶胀了的水凝胶的质量,  $g$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NIPAAm-co-DMAEMA 水凝胶的红外光谱分析

图 1 为 NIPAAm-co-DMAEMA 水凝胶的红外光谱图, NIPAAm 分子中酰胺基团的伸缩振动吸收峰出现在 1665cm<sup>-1</sup> 处, DMAEMA 分子中的酯基的伸缩振动吸收峰出现在 1730cm<sup>-1</sup> 处,但是不饱和双键的特征吸收峰(1640cm<sup>-1</sup>)已经不存在,说明两种单体已经聚合形成聚合物网络。

### 2.2 不同单体配比水凝胶在去离子水中的平衡溶胀率

图 2 显示在室温下 P(NIPAAm-co-DMAEMA)水凝胶不同单体质量配比(表 2)的平衡溶胀率。所合成的一系列

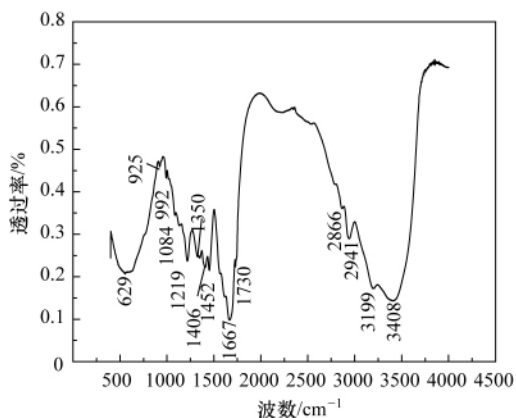


图 1 NIPAAm-co-DMAEMA 水凝胶的红外光谱图

Fig. 1 FTIR spectrum of NIPAAm-co-DMAEMA hydrogel

P(NIPAAm-co-DMAEMA)水凝胶,由于亲水性基团的浓度不同,导致凝胶的吸水性和溶胀率有很大区别。水凝胶吸水过程实际是聚合物网络膨胀的过程,吸水前,高分子网络呈紧张状态;当高聚物与水接触时,一方面通过扩散和毛细管吸附等物理作用吸附部分水,另一方面通过化学键(如氢键)的形式吸收水分。水凝胶的溶胀率实质上与凝胶的交联度、凝胶内部离子化基团的解离状态、凝胶的空间结构和亲水性等有关。

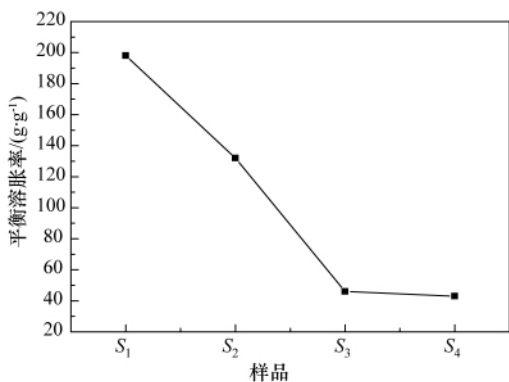


图 2 水凝胶在去离子水中的平衡溶胀率

Fig. 2 Equilibrium swelling ratio of P(NIPAAm-co-DMAEMA) hydrogel in deionized water

表 2 不同单体配比的 P(NIPAAm-co-DMAEMA)平衡溶胀率

Table 2 Equilibrium swelling ratio of different P(NIPAAm-co-DMAEMA) hydrogels

样品	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
平衡溶胀率/(g·g <sup>-1</sup> )	202	155	41	34.6

由图 2 可知, S<sub>1</sub> 水凝胶表现出了良好的溶胀率,而当随着 NIPAAm 单体增加、DMAEMA 单体减少,溶胀率逐渐降低。这是因为当 NIPAAm 含量降低时,具有强亲水性的非离子基团酰胺键占主导作用,根据相似相溶原理,水是一种极性溶剂,而水凝胶高分子链上具有强极性基团—CONH<sub>2</sub>,可与水分

子形成氢键,增强对水的亲和性。而 DMAEMA 上酯基的空间位阻作用又能够增加凝胶内部的间隙,有利于凝胶吸水膨胀,另外可能由于 DMAEMA 链上的—N<sup>+</sup>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 基团的溶剂化效应和渗透效应,大大增强了网络的吸水能力。当 NIPAAm 含量逐渐增大时,水凝胶侧链上的疏水性的异丙基占主导作用,亲水基团减少,氢键逐渐被打破,且随 DMAEMA 含量的降低水凝胶的溶剂化效应降低,酯基增加了凝胶的疏水性,故吸水倍率较低。

### 2.3 水凝胶在 NaCl 溶液中的溶胀性质

合成的水凝胶主要应用于个人卫生或医疗等领域,是直接与自然界包括 NaCl 等电解质溶液接触的材料,因此对电解质溶液的吸收能力是衡量其性能的重要一环<sup>[7]</sup>。在不同质量分数的 NaCl 溶液中测试了水凝胶的吸液能力,结果如图 3 所示。一系列合成的水凝胶平衡溶胀率随着 NaCl 溶液质量分数的增加而减小。

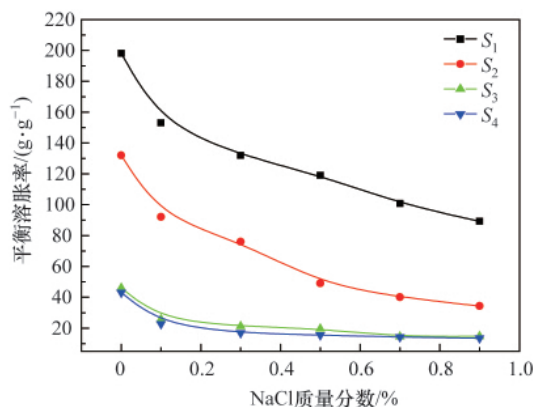


图 3 P(NIPAAm-co-DMAEMA)水凝胶在不同质量分数 NaCl 溶液中的平衡溶胀率

Fig. 3 Equilibrium swelling ratio of P(NIPAAm-co-DMAEMA) hydrogel in aqueous solution of NaCl

环境中盐(离子)的存在对水凝胶的平衡溶胀率有很大的影响,图 3 显示了在不同质量分数的 NaCl 溶液中 P(NIPAAm-co-DMAEMA)凝胶的平衡溶胀率。可以看出,质量分数很小的 NaCl 溶液会大大降低凝胶的平衡溶胀率。随着离子强度的增大,凝胶的平衡溶胀率先迅速降低,然后逐渐趋于平缓,表明此凝胶具有灵敏的离子强度敏感性。这是因为离子强度的增大改变了凝胶内外渗透压的差值,从而引起离子凝胶溶胀率的显著下降。当 NaCl 质量分数增大时,Na<sup>+</sup>对凝胶中酰胺键的屏蔽作用增加,导致凝胶内部负离子之间的排斥作用和凝胶的水合作用减弱,凝胶的溶胀率减小。另外从图 3 可知,随着 DMAEMA、NaCl 质量分数逐渐增加,溶液中平衡溶胀率下降缓慢,表现出很好的保水率,即很好的耐盐性。例如 S<sub>1</sub> 水凝胶,即使在质量分数为 0.9% 的 NaCl 溶液中,吸水率仍有 89.2g/g。这可能是由于该凝胶 DMAEMA 组分中含有被质子化而带正电的碱性叔胺基团的作用。

### 2.4 温度对水凝胶的影响

图 4 给出了凝胶的平衡溶胀率随温度变化的趋势,聚异丙基丙烯酸酰胺 (PNIPAAm) 的 LCST 约为 32°C<sup>[18]</sup>,而 PDMAEMA 的 LCST 为 41°C<sup>[9]</sup>,为了验证 NIPAM/DMAEMA 复合水凝胶是否仍具有相转变温度,在 20~70°C 之间测试了凝胶的平衡溶胀率,如图 4 所示。

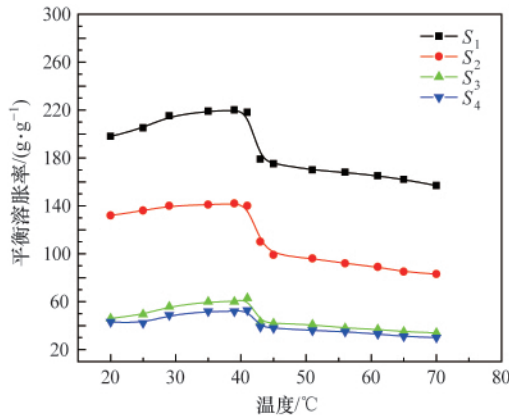


图 4 温度对凝胶平衡溶胀率的影响

Fig. 4 Effect of temperature on swelling ratio of the hydrogel

可以看出,随着温度的升高,凝胶的溶胀率先升高后逐渐降低。在 43°C,凝胶的溶胀率急剧减小,表明复合水凝胶的内部网络剧烈收缩,将大量的水分子挤压出去,造成溶胀率下降,证明其在 43°C 附近仍然存在相转变,即存在体积相转变温度。在 >43°C 时,凝胶的溶胀率随温度的升高迅速发生突变而下降,这是因为温度较高时,凝胶链 NIPAM 上的疏水性的异丙基相互作用加强,使得亲水基团与水的作用(如氢键等)减弱直至消失。由图 4 还可看出,由于引入 DMAEMA 链, DMAEMA 上的酯基的空间位阻作用和  $-N^+(\text{CH}_3)_3$  基团的溶剂化效应改变了水凝胶的 LCST。随着温度的升高,共聚物水凝胶的溶胀率在 43°C 前呈缓慢上升趋势,当上升到 43°C 后,出现急剧变化,表现为溶胀率迅速降低。这表明在 PNIPAM 中引入 DMAEMA 结构单元时,共聚物的 LCST 将增大。

### 2.5 水凝胶在接触直流电场中的脱水

图 5 显示了 P(NIPAM-co-DMAEMA) 凝胶在特定条件直流电场作用下的收缩脱水情况。当施加接触电压后,溶胀后的水凝胶在电极周围有水分渗出并伴有体积收缩现象。图 5 中 4 条曲线分别表示不同单体配比的水凝胶在 16V 电压下通电 15min 后的保水率。由图 5 可以看出随着通电时间的延长,  $R_m$  值逐渐减小;随着共聚物中 DMAEMA 质量分数的增大,水凝胶的  $R_m$  值也依次减小,表现为水凝胶渗出的水分增多,体积收缩现象愈明显。由图 5 还可看出,  $S_1$  有最大的脱水率,即具有最好的电场敏感性。从水凝胶组成的分子结构上考查,产生这种现象的原因可能是 NIPAAm/DMAEMA 水凝胶网络中存在碱性叔胺基团,能够在凝胶网络中形成聚正离子。 $S_1$  水凝胶中含有较多的 DMAEMA 侧链,侧链带叔胺基团较多,能产生较多的聚正离子,故消溶胀明显。而  $S_4$  水凝胶分

子中含有较多的 NIPAAm 上的疏水性的异丙基基团,这些疏水性基团会聚集形成疏水微区(胶束),造成高分子链呈现紧缩构象,因此样品水凝胶的消溶胀程度减弱。

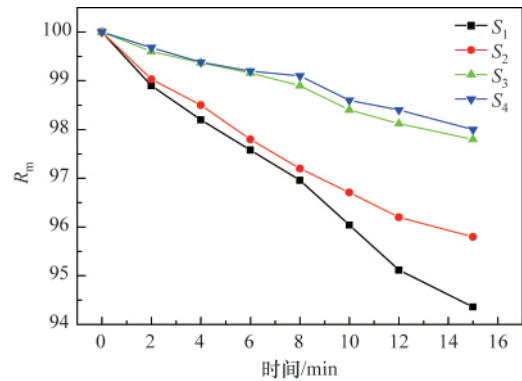


图 5 NIPAAm/DMAEMA 水凝胶在 16V 下的消溶胀动力学曲线

Fig. 5 Contractile behavior of NIPAAm/DMAEMA hydrogels under electrical stimulus of 16V

传统的阴离子与阳离子单体聚合所得的电敏感水凝胶,一般保水能力较差。对水凝胶的电敏消溶胀性能进行数学拟合,得到水凝胶的保水率与时间的关系如图 6,相关参数如表 3 所示。这说明水凝胶的在电刺激作用下随着时间的延长,保水率逐渐下降,这符合一般吸水聚合物电敏感性能的通性。对于  $S_4$ ,用式  $R_m=99.97558-0.13061t$  进行外推,连续通电 6h 后,水凝胶的保水率仍达 53%。相对于文献[16],合成的水凝胶具有优良的保水性能。

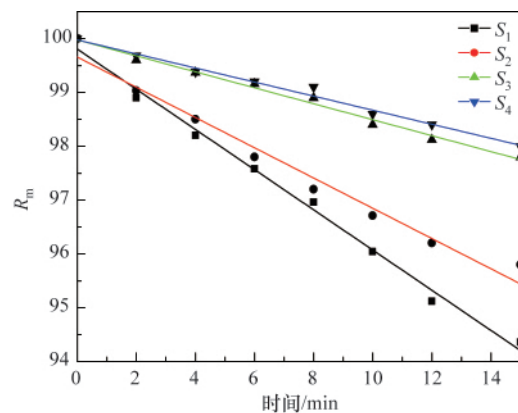


图 6 NIPAAm/DMAEMA 水凝胶电刺激下保水率与时间的关系拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of retention against time for NIPAAm/DMAEMA hydrogels under electrical stimulus

### 3 结论

以 NIPAAm 和 DMAEMA 为单体,  $N,N'$ -亚甲基双丙烯酸胺为交联剂,过硫酸铵和亚硫酸氢钠为氧化还原引发剂,通

表 3 水凝胶电刺激下  $R_m$  与时间的拟合参数Table 3 Fitting parameters for the relation between  $R_m$  and time under electrical stimulation

水凝胶	拟合方程	$a$	$b$	$R^b$
$S_1$	$R_m=99.80468-0.37329t$	99.80468	-0.37329	0.99259
$S_2$	$R_m=99.65662-0.28093t$	99.65662	-0.28093	0.97237
$S_3$	$R_m=99.97416-0.14813t$	99.97416	-0.14813	0.98805
$S_4$	$R_m=99.97558-0.13061t$	99.97558	-0.13061	0.98486

过水溶液聚合法制备了 P(NIPAAm-co-DMAEMA) 水凝胶。测定了其在不同质量分数 NaCl 溶液、温度、电场刺激下的吸液性能, 得到以下结论。

1) 合成的一系列 P(NIPAAm-co-DMAEMA) 水凝胶随着单体 NIPAAm 量的增加, 在去离子水中的平衡溶胀率下降, 同时随着 NaCl 浓度的增加, 溶胀率下降。但即使在 0.9% 的生理盐水中,  $S_1$  溶胀率仍达 89g/g, 说明得到的水凝胶具有良好的耐盐性。

2) 共聚得到的水凝胶的 LCST 为 43℃ 左右, 有望成为良好的温敏性材料。

3) 在接触电压刺激下, 随着样品水凝胶中 DMAEMA 含量的增加, 水凝胶的质量保持率  $R_m$  值依次减小, 可能是由于 DMAEMA 亲水导电性和异丙基的疏水性能变化产生; 水凝胶的  $R_m$  与时间的关系可以用拟合方程较好地描述, 并根据得到的拟合方程外推; 该水凝胶在长时间通电情况下具有良好的保水率。

#### 参考文献 (References)

- [1] Aikawa K, Matsumoto K, Uda H, *et al.* Hydrogel formation of the pH response polymer polyvinylacetal diethylaminoacetate [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 1998(167): 97-104.
- [2] Yu L W, Gu L X. Effects of microstructure, crosslinking density, temperature and exterior load on dynamic pH-response of hydrolyzed polyacrylonitrile-blend-gelatin hydrogel fibers [J]. *European Polymer Journal*, 2009(45): 1706-1715.
- [3] Zhang X Z, Zhuo R X. Synthesis and properties of thermosensitive poly (N-isopropylacrylamide-co-methyl methacrylate) hydrogel with rapid response[J]. *Materials Letters*, 2002, 52: 5-9.
- [4] Lu X Q, Zhai M L, Li J Q. Radiation preparation and thermo-response swelling of interpenetrating polymer network hydrogel composed of PNIPAAm and PMMA [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, 57: 477-480.
- [5] Kobayashia J, Kikuchib A, Sakai K. A queous chromatography utilizing hydrophobicity-modified anionic temperature-responsive hydrogel for stationary phases[J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, 958: 109-119.
- [6] Dowding P J, Vincent B, Williams E. Preparation and swelling properties of poly (NIPAM) "Minigel" particles prepared by inverse suspension polymerization [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, 221: 268-272.
- [7] 刘守信, 房喻, 柳明珠, 等. 具有伸展构象的温度和 pH 双重敏感的 P(DEAM-co-MAA) 水凝胶的合成与性质研究[J]. *化学学报*, 2006, 64

(15): 1575-1580.

Liu Shouxin, Fang Yu, Liu Mingzhu, *et al.* *Acta Chemica Sinica*, 2006, 64(15): 1575-1580.

- [8] 李亚娜, 霍东霞, 钱庆文, 等. pH 及温度敏感性 N-异丙基丙烯酰胺-丙烯酸共聚微凝胶的制备与表征[J]. *合成橡胶工业*, 2005, 28(3): 222-227. Li Yana, Huo Dongxia, Qian Qingwen, *et al.* *Synthetic Rubber Industry*, 2005, 28(3): 222-227.
- [9] Fu J X, En T K, Neoh K G. pH and temperature-responsive hydrogels from crosslinked triblock copolymers prepared via consecutive atom transfer radical polymerizations[J]. *Biomaterials*, 2006, 27: 2787-2797.
- [10] 黄怡, 范晓东, 胡晖. 甲基丙烯酸 N,N-二氨基乙酯与丙烯酰-β-环糊精共聚水凝胶的合成及其性能研究[J]. *高分子学报*, 2004, 2: 177-182. Huang Yi, Fan Xiaodong, Hu Hui. *Acta Polymerica Sinica*, 2004, 2: 177-182.
- [11] 廖列文, 刘正堂, 岳航勃. AMPS/DMAEMA 共聚水凝胶合成与性能 [J]. *科技导报*, 2008, 26(24): 69-72. Liao Liewen, Liu Zhengtang, Yue Hangbo. *Science & Technology Review*, 2008, 26(24): 69-72.
- [12] Wang B, Xu X D, Wang Z C. Synthesis and properties of pH and temperature sensitive P(NIPAAm-co-DMAEMA) hydrogels[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 64: 34-41.
- [13] Tian Y. Characterization of nitrate ions adsorption and diffusion in P(DMAEMA/HEMA)hydrogels[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2008, 19: 1111-1114.
- [14] Chen Y F, Yi M. Swelling kinetics and stimuli-responsiveness of poly (DMAEMA)hydrogels prepared by UV-irradiation Radiation [J]. *Physics and Chemistry*, 2001, 61: 65-68.
- [15] Jie Z, Liang Y C, Chang J C. Graft-type poly (N-isopropylacrylamide-co-acrylic acid) microgels exhibiting rapid thermo- and pH-responsive properties[J]. *Polymer*, 2008, 49: 2595-2603.
- [16] 岳航勃, 廖列文, 黎新明, 等. 智能型 AMPS/DMAEMA 水凝胶的电敏感性[J]. *功能材料*, 2009, 9(40): 1481-1485. Yue Hangbo, Liao Liewen, Li Xinmin, *et al.* *Journal of functional materials*, 2009, 9(40): 1481-1485.
- [17] 廖列文, 刘正堂, 黎新明, 等. AA/AMPS 共聚物水凝胶的吸液性能[J]. *化工进展*, 2008, 27(5): 729-732. Liao Liewen, Liu Zhengtang, Li Xinming, *et al.* *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2008, 27(5): 729-732.
- [18] Crowther H M, Saunders B R, Mears S J. Poly(NIPAM)microgel particle de-swelling: A light scattering and small-angle neutron scattering study [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, 152: 327-333.

(责任编辑 岳臣)