

# 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶电刺激响应行为的研究<sup>\*</sup>

郑云华 刘根起<sup>\*\*</sup> 程永清 杨世文

(西北工业大学长安校区应用化学系 西安 710129)

**摘 要** 以脲为催化剂,将聚乙烯醇(PVA)磷酸酯化制成聚乙烯醇磷酸酯,再经戊二醛交联制备了一种新型的聚乙烯醇磷酸酯水凝胶.研究了水凝胶的溶胀性能,力学性能和电刺激响应行为.结果表明,该凝胶在NaCl水溶液中其平衡溶胀率随NaCl溶液的离子强度增大而减小.在离子强度为0~0.2的NaCl水溶液中,其弹性模量为0.300~0.356 MPa,抗张强度为91.5~137.8 kPa,断裂伸长率为32.0%~37.5%,且均随离子强度的增大而增大.在去离子水和NaCl水溶液中于非接触直流电场作用下,凝胶向电场负极弯曲,弯曲速度和应变随外加电压的增大而增大,并随NaCl离子强度的增大在0.005处出现极大值.在循环电场作用下,聚乙烯醇磷酸酯水凝胶的电刺激响应行为具有良好的可逆性.

**关键词** 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶, 溶胀, 电刺激响应, 弯曲, 离子强度

由于一些聚合物凝胶在外界环境,如温度、pH、溶剂组成、电场、磁场、光或压力等发生微小变化时,自身的体积、形状、相、渗透率、光学或力学等性质能作出敏感的响应,显示了某种智能特性,因此该凝胶材料被称为智能凝胶材料.根据智能凝胶材料刺激-响应方式的不同,可将其分为温敏性凝胶、pH敏感性凝胶、电刺激响应性凝胶等.从信号控制的观点来看,电场易于施加和调控,有利于实现凝胶材料的快速响应,其在人工肌肉、机器人用柔性执行元件、微机械等领域有着广泛的应用前景,因而电刺激响应型智能凝胶材料近年来成为人们研究的热点<sup>[1-6]</sup>.

对智能凝胶电刺激响应行为的研究主要始于20世纪80年代.1982年,Tanaka等<sup>[7]</sup>发现,部分水解的聚丙烯酰胺凝胶在丙酮/水(1:1体积比)的二元混合溶液中于接触电场作用下,其靠近电场阳极的部分收缩,发生不连续的体积变化.1985年,Hirotsu观察到离子型凝胶珠在相转变点于直流和交流电场刺激下会发生收缩的现象<sup>[8]</sup>.同年,Shiga和Kurauchi在研究将聚丙烯酸钠条形水凝胶置于接触直流电场中的电刺激响应行为时发现了一种新型的形变——弯曲形变<sup>[9]</sup>.1990年,Shiga等详细研究了凝胶在电场作用下的弯曲机理<sup>[10]</sup>,随后有关智能凝胶电刺激响应行为的研究报道逐年增多.但目前用于研究的电刺激响应性凝胶材料的机械性能欠佳,且其制备材料主要局

限于弱聚电解质的聚丙烯酸及其衍生物类,而对强聚电解质基团的凝胶研究较少.网络中含有可离子化的基团是高分子凝胶材料具有电刺激响应行为的重要条件<sup>[11]</sup>,我们通过将戊二醛交联的聚乙烯醇硫酸酯化的方法制得了机械性能好且对电场有良好响应性能的聚乙烯醇硫酸钾(PVSK)强电解质水凝胶<sup>[5]</sup>,在此基础上,本文在聚乙烯醇网络中引入强电解质磷酸基团制备了聚乙烯醇磷酸酯水凝胶并研究了其电刺激响应行为.目前,国内外对聚乙烯醇磷酸酯水凝胶的研究报道较少,且主要集中在其制备工艺、吸附性能和热性能等方面<sup>[12]</sup>,而对其电刺激响应行为的研究迄今尚鲜见报道.

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂及仪器

聚乙烯醇,牌号1799,聚合度 $1700 \pm 50$ ,醇解度99%,黏均分子量 $7.49 \times 10^4$ ,重庆北碚化学试剂厂;85%磷酸,分析纯,西安化学试剂厂;脲,化学纯,西安化学试剂厂;戊二醛,分析纯,配成1%的水溶液,上海医药集团上海化学试剂公司;氯化钠、无水乙醇、浓盐酸、浓硫酸、钼酸铵、氯化亚锡均为分析纯试剂.SS1791-型可跟踪直流稳压电源,石家庄无线电四厂,0~30 V;Tensor27红外光谱仪,德国Bruker公司;772s型可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;电刺激响应测量装

<sup>\*</sup> 2008-10-20 收稿,2009-01-12 修稿.西北工业大学基础研究基金(基金号 NPU-FFR-JC200823)资助项目;<sup>\*\*</sup> 通讯联系人,E-mail: liugenqi@nwpu.edu.cn

置,自制.

1.2 实验方法

1.2.1 聚乙烯醇磷酸酯(P-PVA)的制备 将聚乙烯醇(PVA)0.4 g,脲 1.77 g,85%磷酸 2 mL,蒸馏水 2 mL 分别加入平底试管中,升温至 70 ~ 90℃用磁力搅拌密闭搅拌 2 ~ 4 h,待反应混合物溶清后去除封口,转移到 95℃的油浴中,搅拌反应 9 h 后,向反应物中加入 20 mL 无水乙醇,用玻璃棒搅拌,析出白色固体.取出产品,撕成小块用无水乙醇浸泡 12 h,去除残余磷酸和脲.将浸泡后的产品放入烘箱 50℃烘干,备用.聚乙烯醇磷酸酯产率为 78.1%.利用氯化亚锡还原光度法<sup>[13]</sup>测定聚乙烯醇磷酸酯的酯化度(以聚乙烯醇磷酸酯中磷元素的质量百分含量计).

1.2.2 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶(CrP-PVA)的制备 将聚乙烯醇磷酸酯固体 1.5 g 加入到 10 mL 蒸馏水中,加热至 80 ~ 90℃搅拌使 P-PVA 颗粒完全溶解,冷却至 50℃后滴加 1%的戊二醛水溶液 0.6 mL,滴加 1 mol/L 盐酸调 pH = 1.0 ~ 1.5 左右,搅拌 2 min 倒入表面皿中,放入 50℃烘箱中加热 6 h 制成干膜,再经蒸馏水浸泡除去残留的试剂后,干燥,备用.

1.3 聚乙烯醇,聚乙烯醇磷酸酯,聚乙烯醇磷酸酯水凝胶的红外光谱实验

利用 KBr 压片法,在 TENSOR27 红外光谱仪上分别绘出 PVA、P-PVA 和 CrP-PVA 的红外光谱图.

1.4 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶溶胀性能的测定

先称量聚乙烯醇磷酸酯水凝胶的干重,再将其浸泡在蒸馏水和不同浓度 NaCl 水溶液中,达到溶胀平衡后取出,用滤纸迅速吸去其表面多余的水分后称其质量.平衡溶胀率  $S_w$  由下式计算:

$$S_w = [(W_e - W_d)] / W_d$$

其中,  $W_e$  为溶胀平衡时水凝胶的质量;  $W_d$  为干凝胶的质量.

1.5 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶力学性能测试

将聚乙烯醇磷酸酯水凝胶经不同离子强度的 NaCl 水溶液浸泡达到溶胀平衡后,切成 30 mm × 5 mm × 0.366 mm 的条形,用静态法测定其拉伸应力-应变关系曲线.直线部分斜率即其弹性模量,由其断裂时所承受的最大应力和断裂时的伸长可知其断裂拉伸强度( $P_t$ )即抗张强度和断裂伸长率( $\epsilon_t$ ).

1.6 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶的电刺激响应行为研究

将制备的聚乙烯醇磷酸酯水凝胶浸泡在去离子水和不同离子强度的 NaCl 水溶液中,达溶胀平衡后取出,切成 13 mm × 2 mm × 0.366 mm 的细条,一端固定,置于自制的电刺激响应测量装置中(电极间距 3.2 cm).水凝胶的电刺激响应行为,即其在电场中的弯曲运动情况可通过测量其可移动端在施加电场前后的位移,即弯曲偏转( $Y$ )来考察.凝胶弯向负极,弯曲偏转取正值;凝胶弯向正极,弯曲偏转取负值.凝胶弯曲时的应变( $\epsilon$ )由下式计算<sup>[14]</sup>:

$$\epsilon = 6DY/L^2$$

其中,  $Y$  为凝胶的弯曲偏转;  $D$  为凝胶的厚度;  $L$  为凝胶的弯曲前的长度.实验装置如图 1 所示.

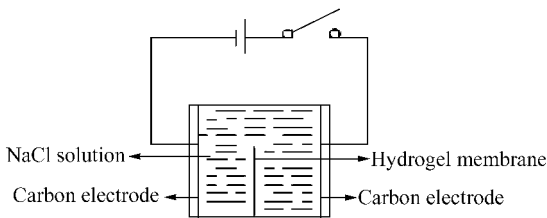


Fig. 1 Schematic illustration of measurement under D.C. field

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

图 2 为聚乙烯醇(a),聚乙烯醇磷酸酯(b)和聚乙醇磷酸酯水凝胶(c)的红外光谱图.(b)与(a)相比,在 1260  $\text{cm}^{-1}$  处出现了 P=O 键的伸缩振动吸收峰,而在 1100  $\text{cm}^{-1}$  处吸收增强,应为 C—O—P 键的伸缩振动引起的,说明聚乙烯醇已发生磷酸酯化反应,我们测得聚乙烯醇磷酸酯的酯化率为 19.98%.(c)和(b)相比,除仍具有 1260  $\text{cm}^{-1}$  和 1100  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰外,在 2930  $\text{cm}^{-1}$  处出现了新的吸收,为交联键  $\text{—O—CH—O—}$  中 C—H 的伸缩振动,说明已发生交联反应.

2.2 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶溶胀性能的测定

将制备的聚乙烯醇磷酸酯水凝胶浸泡在去离子水和不同离子强度的 NaCl 水溶液中,观察其溶胀率的变化.图 3 为室温下凝胶在去离子水和不同离子强度的 NaCl 溶液中的溶胀动力学曲线.由图可见,该凝胶的溶胀速率较快,大约在 8 min 左右,凝胶基本达到溶胀平衡.图 4 为去离子水和不

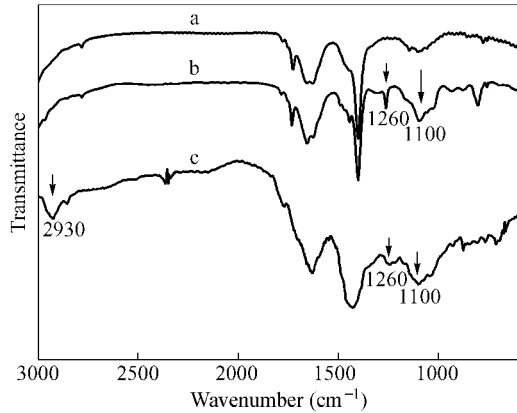


图 2 The IR spectral of PVA (a), P-PVA (b) and CrP-PVA (c)

同离子强度的 NaCl 水溶液中聚乙烯醇磷酸酯水凝胶的平衡溶胀率. 由图可知, 水凝胶的平衡溶胀率均随离子强度的增大而减小.

智能水凝胶在不同离子强度的电解质溶液中的溶胀行为可以从大分子链上固定电荷之间的排斥作用来解释. 当外界离子强度低时, 外界溶液中的抗衡离子进入凝胶内部的较少, 大分子链上固定电荷之间存在强烈的静电斥力, 使大分子链尽量伸展, 以达到能量最低态; 当加入了强电解质时, 外界离子强度增加, 更多的抗衡离子渗入凝胶中, 屏蔽了高分子链上的有效电荷, 由离子间的静电排斥作用所引起的链的扩展作用减弱, 因而水凝胶达到平衡时其溶胀度随离子强度的增大而减小.

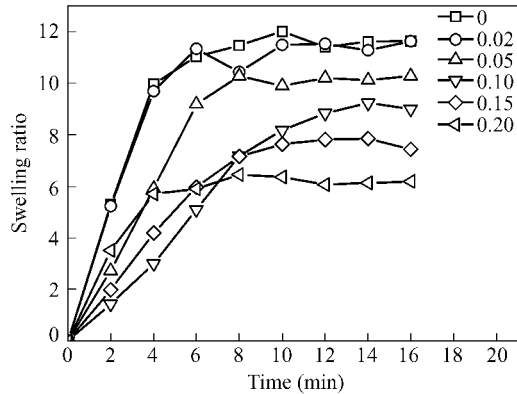


图 3 Swelling kinetic curves of phosphorylated polyvinyl alcohol hydrogel in NaCl aqueous solution of different ionic strength

2.3 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶力学性能测试

将凝胶置于去离子水和不同离子强度的 NaCl 水溶液中, 达溶胀平衡后, 研究其力学性能. 结果发现, 在离子强度为 0 ~ 0.2 的 NaCl 水溶液中, 其弹性模量为 0.300 ~ 0.356 MPa, 抗张强度为

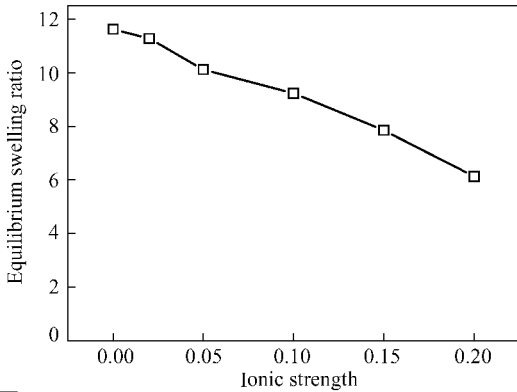


图 4 Equilibrium swelling ratio of phosphorylated polyvinyl alcohol hydrogel in NaCl aqueous solution of different ionic strengths

91.5 ~ 137.8 kPa, 断裂伸长率为 32.0% ~ 37.5%, 且它们均随离子强度的增大而增大. 图 5 为水溶液离子强度对聚乙烯醇磷酸酯水凝胶弹性模量的影响曲线. 由图可见, 随离子强度的增加其弹性模量增加, 表明其机械强度也随之增加. 表 1 为聚乙烯醇磷酸酯水凝胶与其它已见诸于报道的聚乙烯醇硫酸钾水凝胶 (PVSK)<sup>[15]</sup>、明胶水凝胶<sup>[16]</sup>、壳聚糖<sup>[16]</sup>、半交联互穿的聚异丙基丙烯酸酰胺/聚丙烯酰胺水凝胶<sup>[17]</sup>, 在溶液中达到溶胀平衡后其弹性模量 ( $E$ )、抗张强度 ( $P_t$ )、断裂伸长率 ( $\epsilon_t$ ) 及平衡溶胀率 ( $S_w$ ). 由表可知, 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶的机械强度虽低于 PVSK, 但仍具有较好的机械性能, 远高于明胶水凝胶、壳聚糖和半交联互穿的聚异丙基丙烯酸酰胺/聚丙烯酰胺水凝胶等.

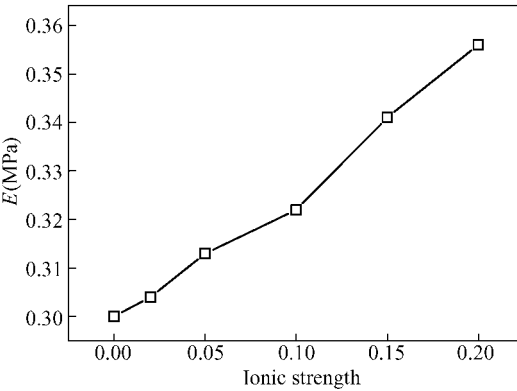


图 5 The effect of the ionic strength of NaCl solution on the Young's modulus of phosphorylated polyvinyl alcohol hydrogel

2.4 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶电刺激响应行为的研究

2.4.1 电场强度对聚乙烯醇磷酸酯水凝胶电刺激响应行为的影响 在直流电场作用下, 该水凝胶的可移动端向电场负极弯曲偏转. 图 6 为聚

乙烯醇磷酸酯水凝胶在去离子水中于 15 V 电压下电响应弯曲应变的实物照片,其中(a)为水凝胶在起始位置( $t = 0$  s), (b)为水凝胶到达最大弯曲

偏转后的照片( $t = 20$  s,由于水凝胶是无色透明的,故将凝胶用碳黑涂成黑色后拍摄.)

**Table 1** The Young's modulus, tensile strength, elongation at break and equilibrium swelling ratio of CrP-PVA hydrogel, PVSK hydrogel, gelatin, chitosan and semi-PNIPAm/PAM<sup>[5]</sup>

| Solvent          | CrP-PVA               | PVSK           | Gelatin               | Chitosan              | semi-PNIPAm/PAM |
|------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
|                  | deionized water       | 0.1 mol/L NaCl | 0.01 mol/L NaCl       | deionized water       | deionized water |
| $E$ (MPa)        | 0.300                 | 1.186          | $4.29 \times 10^{-3}$ | —                     | 0.101           |
| $P_t$ (MPa)      | $9.15 \times 10^{-2}$ | 0.154          | $5.11 \times 10^{-3}$ | $3.43 \times 10^{-3}$ | —               |
| $\epsilon_t$ (%) | 32.0                  | 16.7           | 110                   | 58.0                  | —               |
| $S_w$            | 11.61                 | 4.11           | 8.70                  | 1.30                  | 7.80            |

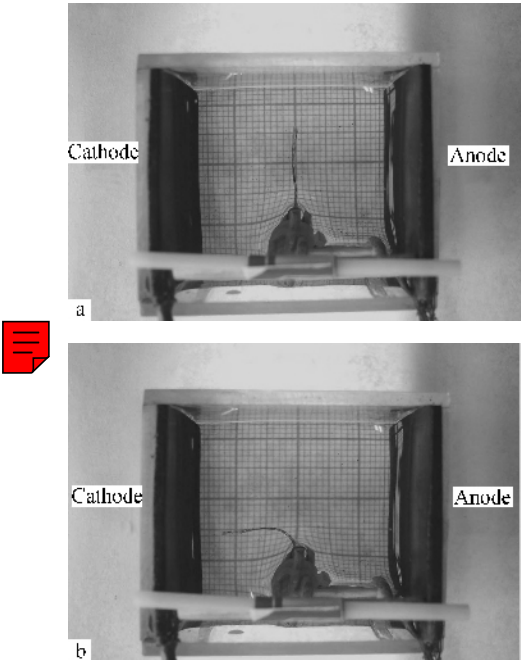


**图 6** 磷酸化聚乙烯醇水凝胶在去离子水中于 15 V 电压下电刺激响应行为的实物照片: a)  $t = 0$  s; b)  $t = 20$  s

图 7 为聚乙烯醇磷酸酯水凝胶在 0.02 mol/L 的 NaCl 水溶液中达到溶胀平衡后于不同的电场强度作用下其弯曲应变随时间变化的动力学曲线。由图可知,在直流电场作用下,凝胶的弯曲偏转随着时间的延长其偏转变逐渐增大,最终趋于平缓而达到平衡。由图还可看出,随着电场强度的增大,动力学曲线的斜率即水凝胶的弯曲速度加快,应变增大;同时,水凝胶的最大应变随电场强度的增加而增大,且开始时,随着电压的增大其最大偏转变增加得较快,当电压增至 8 V 以后,继续增加电场强度,水凝胶的最大弯曲应变变化不大。

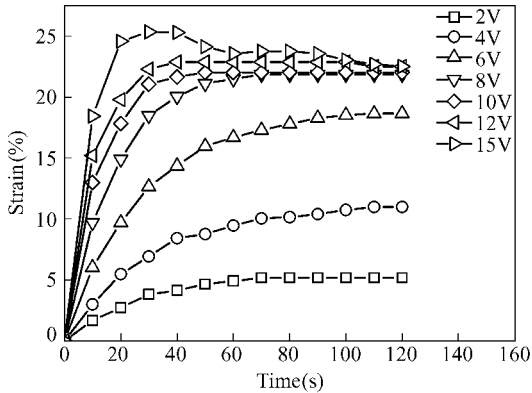


**图 7** 磷酸化聚乙烯醇水凝胶在 0.02 mol/L NaCl 水溶液中不同电压下弯曲动力学曲线

根据 Shiga 的电响应凝胶弯曲理论<sup>[10]</sup>,聚电解质水凝胶在直流电场下的弯曲、变形主要是由于聚离子的对离子以及凝胶周围电解质溶液中的阴、阳离子在电场作用下定向迁移,而聚离子在聚合物网络上保持不动,各离子由于迁移速率不同而在凝胶内部产生离子的浓度梯度,即凝胶面向电场正、负极的两侧的离子浓度不同,从而在凝胶两侧产生一个渗透压差,正是这个渗透压差使得凝胶发生弯曲、变形。聚乙烯醇磷酸酯水凝胶是聚阴离子水凝胶,施加电场后,水溶液和凝胶中的离子分别向其对电极迁移,而凝胶中的聚阴离子磷酸根在网络中保持不动,导致在面向电场正极凝胶相界面处的渗透压升高而负极侧的渗透压降低,且正极侧的渗透压大于负极侧的渗透压,因此正极侧的凝胶溶胀,负极侧的凝胶收缩,使凝胶弯向负极。电场强度的增加,加快了凝胶中聚离子的对离子向凝胶外迁移的速率,从而使凝胶两侧的渗透压差增大,结果使得凝胶的偏转速度加快,偏转变应也增大。

2.4.2 离子强度对聚乙烯醇磷酸酯水凝胶电刺

**电响应行为的影响** 图 8 为在 6 V 电压下,凝胶在不同离子强度 NaCl 溶液达到溶胀平衡后,其平衡偏转应变随离子强度变化的趋势图.由图可知,凝胶最大弯曲应变并不随溶液离子强度的增加而单调递增,而是存在一个极值点离子强度 0.005.当溶液离子强度小于 0.005 时,凝胶最大弯曲应变随离子强度的增加而增加;当溶液离子强度大于 0.005 时,凝胶最大弯曲应变随离子强度的增加而减少.这主要是因为随着周围溶液中电解质浓度的增加,外加电场将诱使溶液中更多的自由离子向其对电极迁移并进入凝胶内部,结果导致凝胶弯曲速度和最大弯曲偏转增加,最大应变增大.然而,当离子强度超过极值点离子强度时,由于大量的自由离子迁移进入凝胶内部对聚离子产生屏蔽效应,使得聚离子间的静电排斥作用减弱从而导致凝胶弯曲速度和最大弯曲偏转值减小<sup>[18]</sup>,最大应变减小.

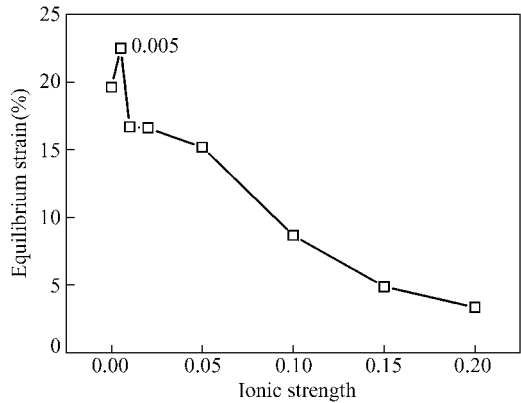


图 8 在 6 V 电压下磷酸化聚乙烯醇水凝胶平衡应变随 NaCl 溶液离子强度的影响

我们在研究中发现聚乙烯醇磷酸酯水凝胶在去离子水中有较好的电刺激响应行为.图 9 为聚乙烯醇磷酸酯水凝胶在去离子水中达到溶胀平衡后于不同的电场强度作用下其弯曲应变随时间变化的动力学曲线.由图可知,该凝胶在去离子水中具有较好的电刺激响应行为.

传统的羧酸类聚电解质基团水凝胶在去离子水中的电刺激响应行为较差,这是因为羧酸类基团是弱电解质,在去离子水中电离不充分从而使得凝胶网络中带电聚电解质基团较少,进而影响了凝胶在去离子水中的电刺激响应行为.由于磷酸类基团是强电解质,在去离子水中能充分解离,导致凝胶网络中的聚电解质基团增多,所以聚乙烯醇磷酸酯水凝胶在去离子水中有较好的电刺激

响应行为.而其在去离子水中的电刺激响应行为要优于聚乙烯醇硫酸钾水凝胶,这可能是因为聚乙烯醇硫酸钾水凝胶的机械强度较强所致.

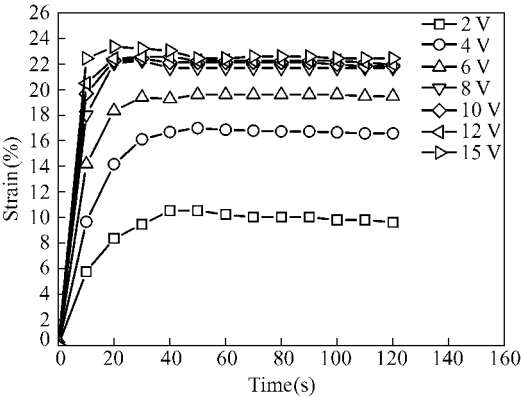


图 9 磷酸化聚乙烯醇水凝胶在不同电压下的弯曲动力学曲线

**2.4.3 聚乙烯醇磷酸酯水凝胶电刺激响应行为的可逆性研究** 图 10 是聚乙烯醇磷酸酯水凝胶分别在去离子水和 0.005 mol/L 的 NaCl 水溶液中,于 6 ~ -6 V 的周期性电场作用下的运动情况(每 60 s 改变电场的方向).由图可知,改变电场方向后,聚乙烯醇磷酸酯水凝胶随之立即反向弯曲偏转,未见滞后现象;且在同一周期内,其反向最大偏转应变与其正向最大偏转应变基本相等,而不同周期的同向最大偏转应变也大致相等,说明该水凝胶的电刺激响应行为具有良好的重现性和可逆性.

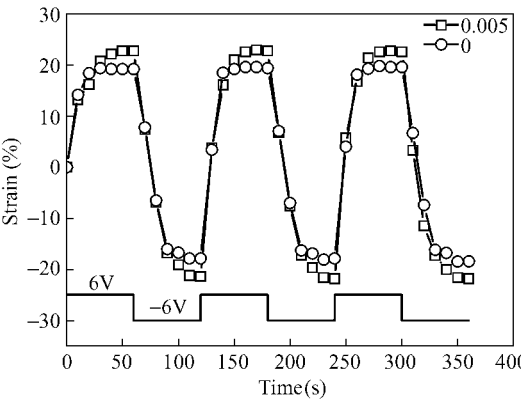


图 10 磷酸化聚乙烯醇水凝胶在周期性变化的电场(6 V 至 -6 V, 每 60 s 改变一次)下的弯曲响应

3 结 论

以脲为催化剂将聚乙烯醇(PVA)磷酸酯化制

成聚乙烯醇磷酸酯,再经戊二醛交联制备了一种新型的聚乙烯醇磷酸酯水凝胶.该水凝胶溶胀速度较快,其在去离子水和不同浓度的 NaCl 水溶液中于 8 min 左右达到溶胀平衡,且其平衡溶胀率随 NaCl 溶液的离子强度增大而减小.在离子强度为 0~0.2 的 NaCl 水溶液中,其弹性模量为 0.300~0.356 MPa,抗张强度为 91.5~137.8 kPa,断裂伸长率为 32.0%~37.5%,且均随离子强度的增

大而增大.在非接触直流电场中,其弯曲偏转指向电场负极,偏转速度和偏转量随电压的增大而增大.在离子强度为 0.005 的 NaCl 水溶液中其弯曲速度、弯曲偏转和应变出现极大值.在循环电场作用下,其电刺激响应行为具有良好的重现性和可逆性.同时,其在蒸馏水中也具有较好的电刺激响应行为.

REFERENCES

1 Kim S J, Lee H I, Shin S R, Kim S I. J Appl Polym Sci, 2004, 92 915 ~ 919

2 Liu Zhugen(刘主根), Yi Min(伊敏), Zhai Maolin(翟茂林), Ha Hongfei(哈鸿飞). Acta Polymerica Sinica(高分子学报), 2004, (4) 585 ~ 589

3 Casolaro M, Bottari S, Ito Y. Biomacromolecules, 2006, 7(5) 1439 ~ 1448

4 Liu G Q, Zhao X P. J Macromolecular Sci, 2006, A43(2) 345 ~ 354

5 Jing Weiwei(靖伟伟), Liu Genqi(刘根起), Cheng Yongqing(程永清), Lv Ling(吕玲). Acta Polymerica Sinica(高分子学报), 2007, (5) 478 ~ 483

6 Shang J, Shao Z Z, Chen X. Biomacromolecules, 2008, 9(4) 1208 ~ 1213

7 Tanaka T, Nishio I, Sun S T, Ueno-Nishio S. Science, 1982, 218 467 ~ 469

8 Hirotsu S. Jpn J Appl Phys, 1985, 24 396 ~ 398

9 Shiga T, Kurauchi T. Polymer Preprints Japan, 1985, 34 509

10 Shiga T, Kurauchi T. J Appl Polym Sci, 1990, 39(11&12) 2305 ~ 2320

11 Osada Y, Kishi R, Hasebe M. J Polym Sci, Payt C, 1987, 25 481 ~ 485

12 An Y, Koyama T, Hanabusa K, Shirai H, Ikeda J, Yoneno H, Itoh T. Polymer, 1995, 36(11) 2297 ~ 2301

13 Wei Fusheng *etc*(魏复盛等). Monitoring Analysis Method of Water and Waste Water(水和废水监测分析方法). 3<sup>th</sup> ed. (第三版). Beijing(北京) :China Environment Science Press(中国环境科学出版社), 1998. 285 ~ 286

14 Shiga T, Hirose Y, Okada A, Kurauchi T. J Appl Polym Sci, 1992, 44 249 ~ 253

15 Liu Genqi(刘根起), Zhao Xiaopeng(赵晓鹏), Tang Tao(唐韬). Acta Polymerica Sinica(高分子学报), 2003, (3) 398 ~ 402

16 Yin Y I, Yao K D, Cheng G X, Ma J B. Polym Int, 1999, 48 429 ~ 432

17 Muniz E C, Geuskens G. J Mater Sci Mater Med, 2001, 12 879 ~ 881

18 Kim S Y, Shin H S, Lee Y M, Jeong C N. J Appl Polym Sci, 1999, 73 1675 ~ 1683

## ELECTRO-STIMULATE RESPONSE BEHAVIOR OF PHOSPHORYLATED POLYVINYL ALCOHOL HYDROGEL

ZHENG Yunhua, LIU Genqi, CHENG Yongqing, YANG Shiwen

(Department of Applied Chemistry, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129)

**Abstract** A new phosphorylated polyvinyl alcohol hydrogel was prepared by the crosslinking reaction of phosphorylated polyvinyl alcohol with glutaraldehyde, taking the urea as the catalyst in the phosphorylating reaction of polyvinyl alcohol. Swelling performance, mechanical properties and electro-stimulate response behavior of the phosphorylated polyvinyl alcohol hydrogel were studied. The experimental results show that its equilibrium swelling ratio decreased as the ionic strength of NaCl solutions increased, and the mechanical properties of phosphorylated polyvinyl alcohol hydrogel swollen in the NaCl aqueous solution of the ionic strength range of 0 ~ 0.2 were shown as follows: 0.300 ~ 0.356 MPa of Young's modulus, 91.5 ~ 137.8 kPa of tensile strength and 32.0% ~ 37.5% of elongation at break, and they all increased with the increasing of ionic strength. The phosphorylated polyvinyl alcohol hydrogel bended toward the cathode under non-contact D. C. electric field in deionized water and NaCl aqueous solution, the bending speed and strain increased with the increasing of the applied voltage, and there was an ionic strength of 0.005 at which its bending speed and strain reached their maximum values. That could be explained as follows. When the ionic strength of NaCl solution is lower than 0.005, the increase of ionic strength of NaCl solution induces the increase of free ions moving from the surrounding solution toward their counterelectrode or into the hydrogel, so the bending speed and strain increase. However, if the ionic strength of NaCl solution is higher than 0.005, a shielding effect of the polyions caused by the ions in the electrolytic solution occurs, leading to the decrease of the bending speed and strain. Under a cyclically varying electric field, the hydrogel exhibited a good reversible bending behavior. The hydrogel may be applied to the fields including artificial muscle, robotic actuator and micromechanics, etc.

**Keywords** Phosphorylated polyvinyl alcohol hydrogel, Swelling, Electro-stimulate response, Bending, Ionic strength