



纳米海绵诱导的各向异性水凝胶的驱动行为研究

匡中文^a, 苑苗发^b, 刘爱萍^b

(浙江理工大学, a. 材料科学与工程学院; b. 理学院, 杭州 310018)

摘要: 高含水量的水凝胶通常机械性能差、响应单一, 严重限制了其作为软体驱动器的发展。为了制备出具有多响应和优异力学性能的智能水凝胶, 以纳米海绵作为骨架, 将明胶水凝胶加入其中并溢出一定厚度, 从而获得具有双层各向异性结构的纳米海绵/明胶复合水凝胶。结果表明: 纳米海绵/明胶复合水凝胶同时具备多种溶剂响应和优异的力学性能, 与纯明胶水凝胶相比, 复合水凝胶的拉伸应力和压缩应力从 kPa 级上升到 MPa 级; 复合水凝胶改变了原始水凝胶的各向同性结构使其具备驱动能力, 可以在多种离子溶液中弯曲变形, 在 3 mol/L 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中弯曲角度可达 247° ; 复合水凝胶用作微流控阀门, 能识别特定溶液并调控其通过阀门的速度。通过引入纳米海绵骨架有效地构造智能水凝胶的各向异性结构, 并明显增强了水凝胶的力学性能和驱动能力, 为智能水凝胶在微流控系统、智能驱动器和人工肌肉等领域的应用提供了新的思路。

关键词: 明胶; 纳米海绵; 各向异性结构; 机械性能; 智能驱动器

中图分类号: TB322

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 11-0821-08

Study on driving behavior of the anisotropic hydrogel induced by nano-sponge

KUANG Zhongwen^a, YUAN Miaofa^b, LIU Aiping^b

(a. School of Materials Science & Engineering; b. School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Hydrogels with high water content usually have poor mechanical properties and unvaried response, which seriously limits their development as soft drivers. In order to prepare intelligent hydrogels with multiple responses and excellent mechanical properties, nano-sponge was used as the skeleton, and gelatin hydrogels were added to it and spilled out to a certain thickness, to obtain a double-layer anisotropic nano-sponge/compound gelatin hydrogel. The results showed that the nano-sponge/composite gelatin hydrogel had multiple solvent responses and excellent mechanical properties. Compared with the pure gelatin hydrogel, the tensile stress and compressive stress of the composite hydrogel grew from kPa level to MPa level. The composite hydrogel changed the isotropic structure of the original hydrogel, making it capable of driving and bending in a variety of ionic solutions. It can reach a bending angle of 247° in 3 mol/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ solution. The composite hydrogels were used as microfluidic valves to identify specific solutions and regulate their speed when they pass through the valve. The anisotropic structure of intelligent hydrogel can be effectively constructed by introducing nano-sponge skeleton, and the mechanical properties and driving ability of hydrogels can be effectively enhanced, which provides a new idea for the

收稿日期: 2022-03-16 网络出版日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51572242)

作者简介: 匡中文(1995—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事智能水凝胶材料方面的研究。

通信作者: 刘爱萍, E-mail: aipingwz@163.com

application of intelligent hydrogels in microfluidic system, intelligent actuator and artificial muscle, etc.

Key words: gelatin; nano-sponge; anisotropic structure; mechanical properties; intelligent actuator

0 引言

传统的刚性机器人通常体积大、结构笨重、制作成本高,不能与人类进行灵活地互动。为了改善这一情况,许多科研人员采用介电弹性体、硅橡胶和水凝胶等软材料来开发研制软体机器人^[1]。作为智能新材料的重要组成部分,响应型水凝胶由于具有与生物体相近的模量以及独特的环境响应特性,被认为是制作软体机器人及智能驱动器的理想材料之一^[2]。在受到压力^[3]、温度^[4]、光^[5]、pH 值^[6]、离子^[7]、溶剂^[8]、电场^[9]和磁场^[10]等特定的外部环境刺激下,响应型水凝胶会发生可控的体积和形状变化,因此在智能驱动^[11]、人工肌肉^[12]、人机交互^[13]等领域有广阔的应用前景。然而,各向同性的水凝胶体系在外界刺激下通常只表现出体积的膨胀或收缩,而要实现特定的弯曲变形就需要构筑各向异性结构。目前,研究人员已经提出了多种构筑水凝胶各向异性结构的方法,如 Yao 等^[14]通过逐层组装的方法制备了聚(N-异丙基丙烯酰胺)-纳米黏土双层水凝胶,能够在温度刺激下实现可控的弯曲变形;Liu 等^[15]和 Dong 等^[16]分别利用重力诱导和液体扩散的方法制备了具有梯度多孔结构的水凝胶,能够在热水中实现多种特殊的形状变化。此外,具有图案化结构^[9]、定向多孔结构^[17]、多层结构^[5]等各向异性结构的水凝胶也被开发出来,但上述水凝胶制备过程较为复杂,需要严格控制实验条件,且获得的水凝胶仍存在机械性能差、响应速度慢、重复使用率低等问题。虽然通过添加纳米填料^[18]、采用机械训练^[19]等方式可以有效增加水凝胶的韧性,但这些方法获得的水凝胶通常是各向同性的,无法完成特定、复杂的弯曲变形。因此,亟须探究一种简单、通用的方法,实现提升水凝胶的力学性能和驱动性能的双重目的。

各向异性结构在自然界中普遍存在,如人体的骨骼肌肉系统中,骨骼支撑身体,为肌肉附着提供位点;而骨骼肌能对刺激产生完全或部分收缩,带动骨骼和关节活动,这种将刚性和柔性完美结合的结构使人体能够完成各种动作。受人体骨骼肌肉系统的启发,本文提出了一种简单、通用的方法来构建具有双层各向异性结构的纳米海绵/明胶复合水凝胶。该方法通过在纳米海绵骨架中添

加明胶水凝胶,并控制明胶水凝胶的溢出高度,使复合水凝胶具备双层各向异性结构。纳米海绵骨架的加入能够提升复合水凝胶的力学性能并赋予其驱动能力。将复合水凝胶精心设计成智能微流体阀,探究其识别特定溶液的能力。该策略为构建响应型水凝胶提供了一种全新的方法,使得复合水凝胶在具有优良力学性能的前提下又兼具良好的驱动性能和多溶剂响应性,预示了其在智能驱动器、软机器人、微流体系统和智能人机界面中的应用前景。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

实验材料:纳米海绵(商业化聚三聚氰胺泡沫)购自郑州峰泰纳米材料有限公司,明胶(照相级,胶强度 260 g Bloom)、戊二醛(GA)、硫酸铵 $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ 、乙酸钠(NaCH_3COOH)、硫氰化钠(NaSCN)、磷酸二氢钠(NaH_2PO_4)、氢氧化钠(NaOH)、氯化钠(NaCl)均购自上海麦克林生化有限公司。采用 UPT-I-10 净水系统的去离子水(18.2 MΩ)。所有试剂均为分析级,未进行纯化。

实验仪器:场发射扫描电镜(SEM,S-4800,日本日立有限公司);应力应变测试仪(HY-0230,上海衡翼精密仪器有限公司);傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet is20,赛默飞世尔科技公司);去离子水机(UPT-I-10,上海杲森仪器设备有限公司);光学显微镜(Carl Zeiss microscopy GmbH,37081 Gottingen, Germany);精密电子天平(AUW220,上海方瑞仪器厂);恒温磁力搅拌器(JBZ-14B,上海志威电气有限公司);索尼摄像机(FDRAX60,索尼摄像机有限公司)。

1.2 明胶溶液和戊二醛交联剂的制备

将 10 g 明胶加入 90 mL 去离子水中,在 60 °C 水浴锅中加热搅拌 3 h,至明胶完全溶解,获得浅黄色黏性溶液;将 1 mL 戊二醛溶剂加入 99 mL 去离子水中,放置在搅拌机上搅拌 1 h。

1.3 纳米海绵/明胶复合水凝胶的制备

纳米海绵/明胶复合水凝胶的制备流程如图 1 所示。将质量分数 10% 的明胶溶液加入 40 mm×10 mm×1 mm 的纳米海绵骨架中,控制海绵层与明胶层的厚度比为 1:1、1:2 和 1:3。将样品放置在冰箱中,调节冰箱的温度为 4 °C,使明胶溶液在低温

下形成明胶溶胶。再将样品浸泡在 1% 的戊二醛溶液(化学交联剂)中室温交联 8 h, 得到纳米海绵/明胶复合水凝胶。

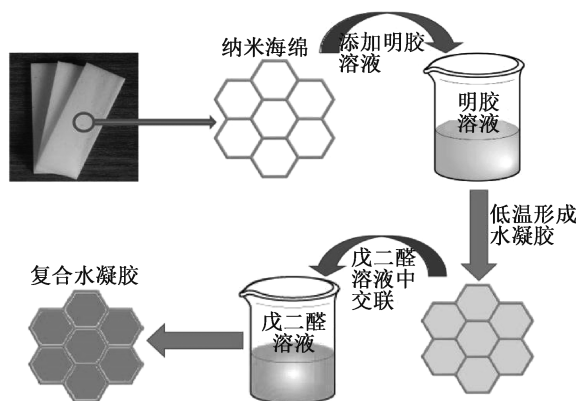


图 1 纳米海绵/明胶复合水凝胶的制备流程

1.4 结构表征与性能测试

采用 SEM 观察纳米海绵和明胶水凝胶的微观结构。测试前,明胶水凝胶先放入液氮中冷冻再切片,然后在零下 80 °C 的冷冻干燥机中冷冻干燥。采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)测定复合水凝胶的官能团,设置波数范围为 500~4000 cm^{-1} 。测试前样品用大量的去离子水冲洗表面并冷冻干燥,然后与溴化钾按 1:100 的质量比研磨成粉末并用压片机压制成片状。在力学试验机上进行拉伸和压缩实验,测定复合材料的力学性能,拉伸试样尺寸为 40 mm×10 mm×1 mm,拉伸速度为 50 mm/min;压缩试样的尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm,压缩速度为 10 mm/min。

将明胶分别浸泡在 1、2 mol/L 和 3 mol/L 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中,每隔 30 min 用天平测量样品重量,计算明胶的失水率 $F_{\text{失水}}/\% = [(M_{\text{前}} - M_{\text{后}})/M_{\text{前}}] \times 100$,其中: $M_{\text{前}}$ 和 $M_{\text{后}}$ 分别为浸泡前后明胶水凝胶的质量。为了研究纳米海绵/明胶复合水凝胶的驱动变形行为,将复合材料的一端用夹子固定,另一端自由悬浮在空气中。随后将纳米海绵/明胶复合水凝胶置于不同离子溶液中,待样品弯曲至最大位移处后放入去离子水中恢复,整个过程用摄像机记录。利用 Adobe Premiere Pro 软件选取不同时间点的图片,并利用 Image J 软件对图片中复合水凝胶的弯曲角度进行测量,研究弯曲角度随时间的变化规律。复合水凝胶弯曲状态下的圆心角 α 定义为复合水凝胶的实际弯曲角度,通过 Image J 软件测量复合水凝胶弯曲状态下两端切线的夹角 θ ,根据公式 $\alpha = \theta$ 计算出实际弯曲角度。

2 结果与讨论

2.1 明胶水凝胶的溶剂响应机理

蛋白质溶液在无机盐溶液(如 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 Na_2CO_4 等)的作用下会发生盐析现象。盐析作用是可逆的,再次加水稀释后凝聚的蛋白质又可以重新溶解^[20]。明胶是胶原部分水解后得到的一类蛋白质,因此也会在盐溶液中发生盐析作用。通常明胶溶液在高于 40 °C 时呈液体状态,此时在明胶溶液中加入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液,明胶会发生盐析作用产生沉淀;在温度低于 40 °C 时,明胶分子通过氢键形成螺旋连接,从而形成明胶溶胶,再经化学交联后得到明胶水凝胶。将预先形成的明胶水凝胶浸泡在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中时,现有的聚合物网络和链缠结作用(例如螺旋连接)限制了明胶分子的运动,并抑制其沉淀^[21](图 2)。此时,明胶水凝胶主要表现为水分排出、体积收缩。明胶在低温下形成的三维网状结构是不稳定的,加热会加速明胶分子链的移动和松弛并再次溶解。为了增加明胶分子链的稳定性,使其不受温度的影响,通常在明胶分子低温成胶后再加入戊二醛溶液发生化学交联,形成稳定的三维网状结构^[22]。

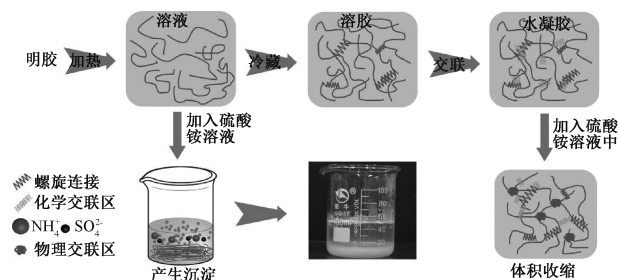


图 2 明胶在不同温度下的沉淀和体积收缩过程

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液的浓度会影响明胶水凝胶的收缩程度。将低温下预成型的明胶水凝胶浸入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中,由于盐析作用发生,明胶分子链不断聚集并将水分排出,导致明胶体积收缩。明胶水凝胶和复合水凝胶在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中浸泡前后的光学图片、失水率及 FTIR 曲线如图 3 所示。由图 3(a)和图 3(b)可知,明胶水凝胶和复合水凝胶在不同浓度的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中浸泡 9 h 后体积发生了不同程度地收缩,并且 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液的浓度越大体积收缩越严重。其中复合水凝胶因为纳米海绵骨架阻碍收缩,导致复合水凝胶比明胶水凝胶在相同浓度的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中收缩程度要小。明胶水凝胶在 1、2 mol/L 和 3 mol/L 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液浸泡 9 h 后,水分排出导致质量分别减少 9.88%、

42.71%和62.73%(见图3(c))。复合水凝胶的质量分别减少5.23%、23.22%和43.93%(见图3(d)),其原因可能是 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液浓度越高,水凝胶内外渗透压越大,失水率越高。FTIR的测试结果也证实了这一点,在 3415 cm^{-1} 处的宽特征峰为明胶水凝胶的O—H伸缩振动,在 1395 cm^{-1} 处的特征峰为 CH_3

对称变形和C—H弯曲变形(见图3(e)),随着 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液浓度从 1 mol/L 增加到 3 mol/L ,这两个峰的强度都有所增加,表明氢键增强(与O—H伸缩振动有关),明胶链之间的相互作用增强,明胶分子链的折叠捆绑程度增大(与C—H弯曲变形和 CH_3 对称变形有关),体积收缩更大^[21]。

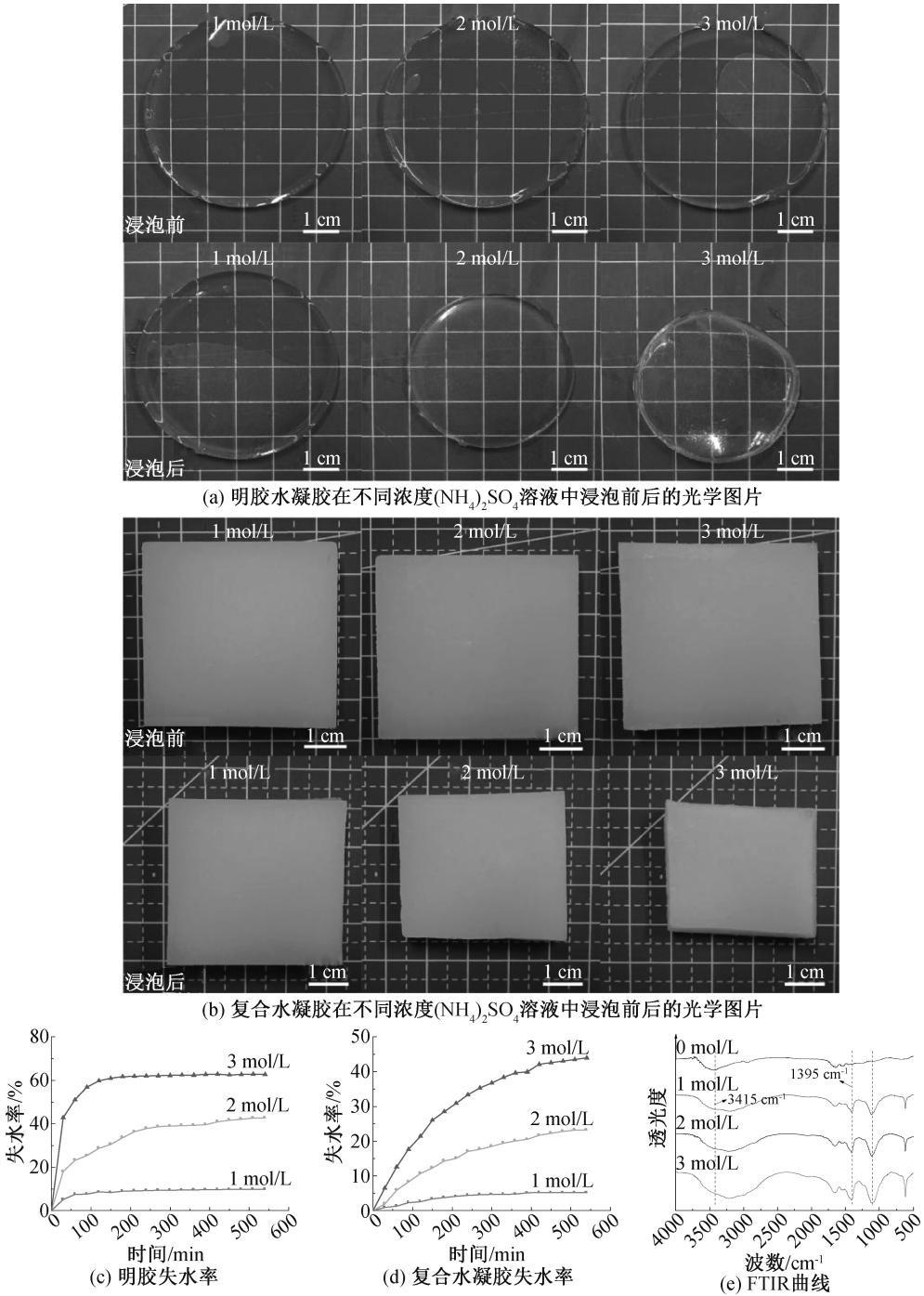


图3 明胶水凝胶和复合水凝胶在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中浸泡前后的光学图片、失水率及FTIR曲线

2.2 纳米海绵/明胶复合水凝胶的微观结构和力学性能

纳米海绵、明胶和纳米海绵/明胶复合水凝胶的

光学照片和微观形貌如图4所示。纳米海绵是一种均匀多孔的气凝胶,孔径为 $80\sim300\text{ }\mu\text{m}$ (见图4(a)),吸水、保水能力强,密度低,弹性强。图4(b)

为三维多孔的明胶水凝胶的微观结构,孔径分布在 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 。当明胶溶液注入到纳米海绵中,由于纳米海绵超强的吸水能力,明胶溶液很容易渗入其中。复合水凝胶显示出明显的双层结构(见图 4

(c)),明胶在纳米海绵里分布均匀,成胶后明胶也没有任何杂质。纳米海绵的厚度为 $1\ \text{mm}$,可通过改变明胶溶液的量来控制复合结构中海绵层与明胶层的厚度比,本文采用的厚度比为 $1:1$ 、 $1:2$ 和 $1:3$ 。

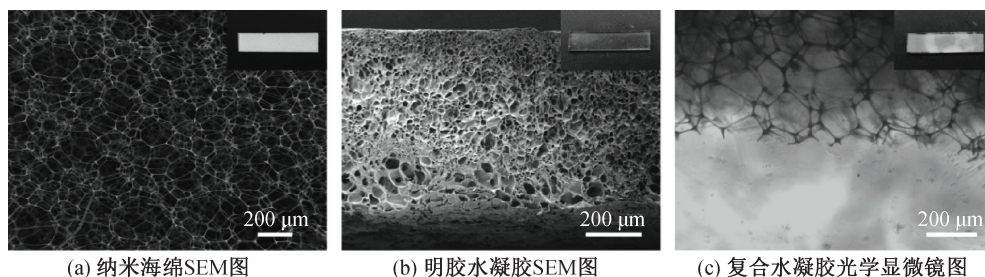


图 4 纳米海绵、明胶和纳米海绵/明胶复合水凝胶的光学照片和微观形貌

进一步研究纳米海绵的加入对纳米海绵/明胶复合水凝胶力学性能的影响。图 5(a)和 5(b)显示,明胶水凝胶含水量高,力学性能较差,拉伸应力和压缩应力只有 $6.4\ \text{kPa}$ 和 $81.1\ \text{kPa}$ 。当纳米海绵加入后,由于纳米海绵极好的韧性使得复合水凝胶的拉伸应力和压缩应力明显增大,分别可达到 $110.9\ \text{kPa}$ 和 $209.3\ \text{kPa}$;当纳米海绵/明胶复合水凝胶在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中浸泡后,由于明胶水凝胶水分的排出、体积收缩,使得明胶分子链聚集,分子链之间

的作用加强,进一步提升了复合水凝胶的力学性能。随着 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液浓度从 $1\ \text{mol/L}$ 增加到 $3\ \text{mol/L}$,复合水凝胶的拉伸和压缩应力增大。相比于未在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中浸泡的复合水凝胶,浸泡后复合水凝胶的拉伸应力和压缩应力最大分别达到 $2.3\ \text{MPa}$ 和 $5.2\ \text{MPa}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液对明胶水凝胶的作用极大地提高了复合水凝胶的力学性能(见图 5(c)和图 5(d))。

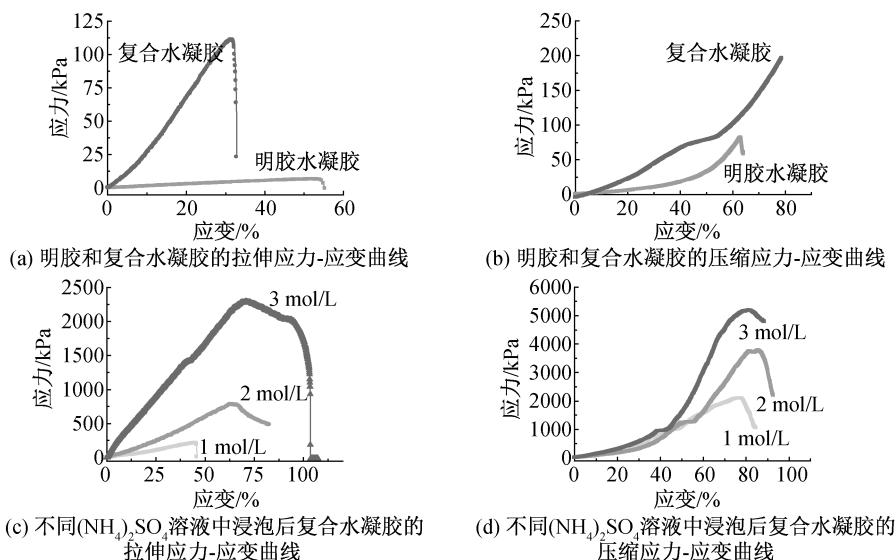


图 5 明胶和复合水凝胶的拉伸和压缩应力-应变曲线

2.3 纳米海绵/明胶复合水凝胶的驱动行为研究

明胶水凝胶具有各向同性结构,在离子溶液中仅表现出体积的均匀收缩,不产生弯曲变形^[21]。纳米海绵/明胶复合水凝胶具有双层各向异性结构,浸泡于 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中时将产生不对称的体积收缩。这是由于纳米海绵阻碍水凝胶体积的收缩,海绵层的体积收缩比无纳米海绵的明胶层小,从而导致驱动器向纯明胶一侧弯曲。为了研究纳米海绵层

与纯明胶层厚度比和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液浓度对复合水凝胶驱动能力的影响,调控纳米海绵/明胶复合水凝胶两层的厚度比(固定有纳米海绵的一侧厚度为 $1\ \text{mm}$,改变纯明胶一侧的厚度)和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液浓度,测试其驱动角度和驱动速度,结果如图 6 所示。从图 6(a)和图 6(e)可以看出,在 $3\ \text{mol/L}$ 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中,随着纳米海绵层与明胶层厚度比的增加,驱动速度以及最大弯曲角度减小。这是

因为在离子浓度相同的条件下,增加厚度比导致整体的厚度增加,驱动器的自重成倍增加,驱动需要克服的阻力增大,驱动能力变差。当控制复合水凝胶两层的厚度比为1:1(两层的厚度均为1 mm),并分别在1、2 mol/L和3 mol/L的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中进行驱动,发现随着 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浓度增加,驱动速度从2.4 (°)/s提升到3.5 (°)/s,最大弯曲角度从158°增加到247°(图6(b)和图6(f))。这是因为随

着 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液浓度增加,导致复合水凝胶的体积收缩更严重,驱动能力更强。 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液对明胶水凝胶的盐析效应是可逆的,当将明胶水凝胶再次放入去离子水中后明胶可以恢复(图6(b)和图6(d))。以上结果表明,在3 mol/L的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中复合水凝胶两层的厚度比为1:1时驱动性能最好,复合水凝胶的最大驱动速度和最大驱动角度可达3.5 (°)/s和247°。

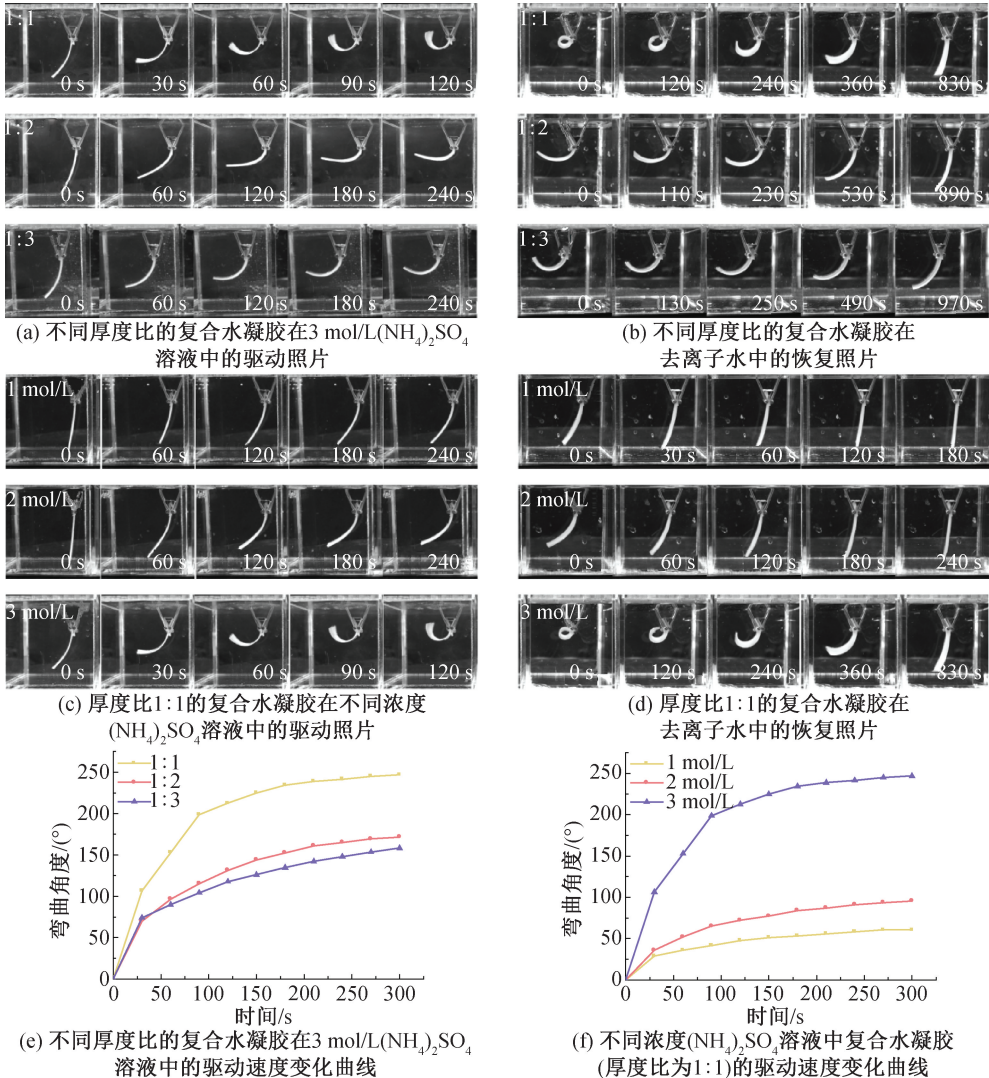


图6 复合水凝胶在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中的驱动图片及驱动性能

2.4 纳米海绵/明胶复合水凝胶的多种溶液响应和微流控阀门应用

无机盐溶液中的离子可以使蛋白质溶液发生盐析作用产生沉淀,且盐析作用强弱与无机盐溶液的离子种类有关,这一现象称为霍夫迈斯特效应^[21]。大量的研究证实,离子序列对蛋白质溶液盐析作用的影响强弱顺序(霍夫迈斯特序列)为: CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 H_2PO_4^- 、 F^- 、 CH_3COO^- 、 Cl^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 I^- 、 ClO_4^- 、 SCN^- ^[23-24]。为了验证不同离子

种类对明胶水凝胶盐析作用的影响,选取霍夫迈斯特序列中五种无机盐溶液进行实验,分别是 Na_2CO_3 、 NaH_2PO_4 、 NaCH_3COOH 、 NaCl 和 NaSCN 溶液。复合水凝胶在不同溶液中的驱动照片如图7所示。从图7中可以明显看出,复合水凝胶在 Na_2CO_3 溶液中的驱动速度和最大弯曲角度最大,在 NaSCN 溶液中的驱动速度和最大弯曲角度最小,符合霍夫迈斯特序列规律。

以纳米海绵/明胶复合水凝胶为阀门开关,设计

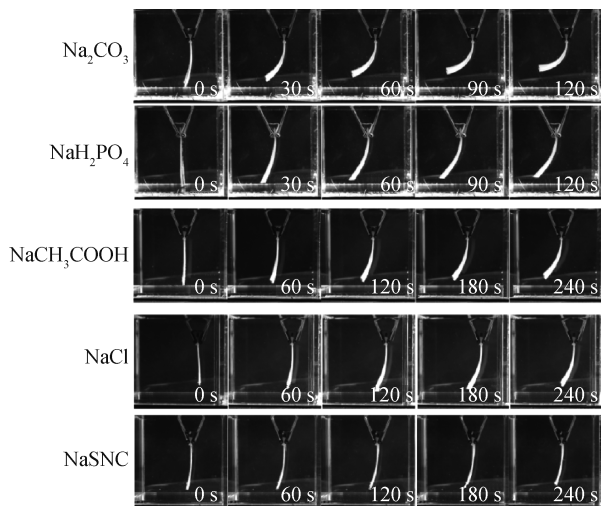
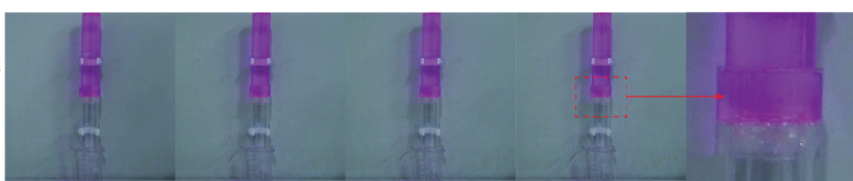
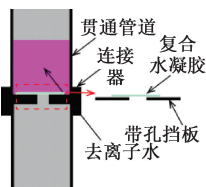


图 7 复合水凝胶在不同溶剂中的驱动照片

并构造了一个智能阀门系统。该智能阀门系统主要包括以下部分:两根直径为 3 cm 的贯通管道,正中央是直径为 5 mm 的小孔挡板,连接两根管道的连



(a) 智能阀门对去离子水的作用示意图及光学照片

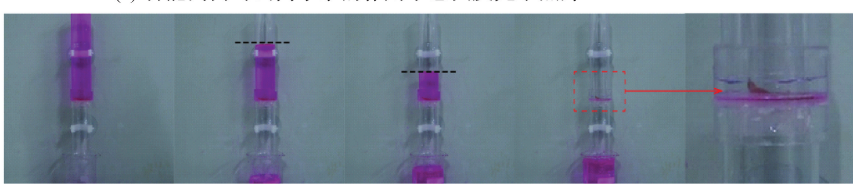
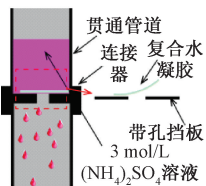
(b) 智能阀门对 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液的作用示意图及光学照片

图 8 智能阀门控制液体流入的示意图及光学照片

3 结 论

本文以纳米海绵为骨架,构筑具有各向异性结构的纳米海绵/明胶复合水凝胶,既增强了明胶水凝胶的力学性能,又赋予明胶水凝胶优异的离子响应性能和弯曲变形能力,探究了纳米海绵和明胶的厚度比以及离子溶液浓度和种类对复合水凝胶力学性能和驱动性能的影响规律,获得的主要结论如下:

a) 纳米海绵的加入和离子溶液对明胶的盐析作用,协同提高了纳米海绵/明胶复合水凝胶的力学性能。与明胶水凝胶相比,复合水凝胶在 3 mol/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液浸泡后,拉伸应力由 6.4 kPa 提升到 2.3 MPa,压缩应力由 81.1 kPa 提升到 5.2 MPa。

b) 纳米海绵骨架的加入使复合水凝胶获得了各向异性结构,表现出优异的驱动变形能力,可在多

接器以及大小为 1 mm×2 cm×2 cm 的纳米海绵/明胶复合水凝胶。将复合水凝胶纯明胶一侧朝上,组装在孔的上方,使其一端固定,另一端可自由活动。再把挡板卡在管道上,并用连接器将两根管道连接,一个单通阀门系统就制作完成。当去离子水倒入智能阀门系统中,由于液体压强的作用使得纳米海绵/明胶复合水凝胶开关紧紧封闭孔洞,去离子水不能通过孔洞(见图 8(a))。当在智能阀门系统中倒入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液,纳米海绵/明胶复合水凝胶开关的活动端向上弯曲,挡板上的孔洞暴露出来, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液通过小孔流出(见图 8(b))。通过改变倒入溶液的种类和浓度,可以进一步改变智能阀门的开关速度和开口大小,从而控制倒入液体的流通速度。根据倒入液体的流通速度,能识别出液体的种类。因此,复合水凝胶在智能阀门领域有很好的应用前景。

种溶剂中驱动变形,复合水凝胶在 3 mol/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中的最大驱动速度和最大驱动角度可达 3.5(°)/s 和 247°。

c) 将纳米海绵/明胶复合水凝胶作为阀门开关并构筑智能阀门系统,能够识别特定的液体并调节液体通过阀门的速度,拓宽了智能水凝胶驱动器的应用。

本文制备了一种具有双层结构的纳米海绵/明胶复合水凝胶,制备方法简单、环保,复合水凝胶同时具备优异的力学性能和驱动性能,为智能水凝胶驱动器的研发提供了新的思路。但该水凝胶驱动器仅限于溶液中使用,应用环境存在局限,这也是目前水凝胶驱动器研究存在的一个共性问题。

参考文献:

[1] Rus D, Tolley M T. Design, Fabrication and control of

- soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
- [2] Liu X Y, Liu J, Lin S T, et al. Hydrogel machines[J]. *Materials Today*, 2020, 36: 102-124.
- [3] Wehner M, Truby R L, Fitzgerald D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. *Nature*, 2016, 536(7617): 451-455.
- [4] Liu K K, Zhang Y, Cao H Q, et al. Programmable reversible shape transformation of hydrogels based on transient structural anisotropy[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(28): 2001693.
- [5] Luo R C, Wu J, Dinh N D, et al. Gradient porous elastic hydrogels with shape-memory property and anisotropic responses for programmable locomotion[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(47): 7272-7279.
- [6] Jian Y K, Wu B Y, Le X X, et al. Antifreezing and stretchable organohydrogels as soft actuators [J]. *Research*, 2019, 2019(6): 2384347.
- [7] Zheng S Y, Shen Y Y, Zhu F B, et al. Programmed deformations of 3D-printed tough physical hydrogels with high response speed and large output force[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(37): 1803366.
- [8] Peng X, Liu T Q, Zhang Q, et al. Surface patterning of hydrogels for programmable and complex shape deformations by ion inkjet printing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(33): 1701962.
- [9] Jiang H Y, Fan L X, Yan S, et al. Tough and electro-responsive hydrogel actuators with bidirectional bending behavior[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(5): 2231-2237.
- [10] Tognato R, Armiento A R, Bonfrate V, et al. A stimuli-responsive nanocomposite for 3D anisotropic cell-guidance and magnetic soft robotics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(9): 1804647.
- [11] Chen S E, Cao Y T, Sarparast M, et al. Soft crawling robots: design, actuation, and locomotion [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(2): 1900837.
- [12] Bassil M, Ibrahim M, El Tahchi M. Artificial muscular microfibers: hydrogel with high speed tunable electroactivity[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(10): 4833-4838.
- [13] Liu Y, Liu J, Chen S, et al. Soft and elastic hydrogel-based microelectronics for localized low-voltage neuromodulation[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2019, 3(1): 58-68.
- [14] Yao C, Liu Z, Yang C, et al. Poly(N-isopropylacrylamide)-clay nanocomposite hydrogels with responsive bending property as temperature-controlled manipulators [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(20): 2980-2991.
- [15] Liu J, Xu W Z, Kuang Z W, et al. Gradient porous PNIPAM-based hydrogel actuators with rapid response and flexibly controllable deformation[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(35): 12092-12099.
- [16] Dong P L, Xu W Z, Kuang Z W, et al. Liquid stratification and diffusion-induced anisotropic hydrogel actuators with excellent thermosensitivity and programmable functionality[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(11): 2100030.
- [17] Qin H, Zhang T, Li N, et al. Anisotropic and self-healing hydrogels with multi-responsive actuating capability[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-11.
- [18] Han L, Lu X, Liu K Z, et al. Mussel-inspired adhesive and tough hydrogel based on nanoclay confined dopamine polymerization[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(3): 2561-2574.
- [19] Lin S T, Liu J, Liu X Y, et al. Muscle-like fatigue-resistant hydrogels by mechanical training [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(21): 10244-10249.
- [20] Rodionov V O, Presolski S I, Gardinier S, et al. Benzimidazole and related ligands for Cu-catalyzed azide-alkyne cycloaddition[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(42): 12696-12704.
- [21] He Q Y, Huang Y, Wang S Y. Hofmeister effect-assisted one step fabrication of ductile and strong gelatin hydrogels[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(5): 1705069.
- [22] Piola B, Sabbatini M, Gino S, et al. 3D bioprinting of gelatin-xanthan gum composite hydrogels for growth of human skin cells[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(1): 539.
- [23] Hua M T, Wu S W, Ma Y F, et al. Strong tough hydrogels via the synergy of freeze-casting and salting out[J]. *Nature*, 2021, 590(7847): 594-599.
- [24] Chen X, Flores S C, Lim S M, et al. Specific anion effects on water structure adjacent to protein monolayers[J]. *Langmuir*, 2010, 26(21): 16447-16454.