

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.014

重力场诱导质量浓度梯度构筑各向异性水凝胶

李 政, 从怀萍

(合肥工业大学 化学与化工学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章采用 *N,N*-双(丙烯酰)胱胺(BACA)修饰银纳米线(AgNWs)作为多功能大分子交联剂和导电填料,以丙烯酸钠为离子型可聚合单体,重力场作用诱导多功能大分子交联剂组装形成质量浓度梯度,在催化剂和热引发条件下发生自由基聚合反应,制备基于质量浓度梯度的高度各向异性纳米复合水凝胶。通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)、万能材料测试仪、电化学工作站、红外热像仪等对所制备的纳米复合水凝胶进行表征,结果表明,该纳米复合水凝胶网络密度自上而下逐级提高,表现出高度各向异性的机械、电学、光热等行为。通过对其相关性能的检测,结果表明,该纳米复合水凝胶可以快速地在水条件和近红外辐照下发生不对称形状变化,在柔性智能驱动领域有着广阔的应用前景。

关键词:重力场诱导组装;银硫配位作用;质量浓度梯度;各向异性;智能驱动

中图分类号:O611.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)06-0810-07

Bio-inspired anisotropic nanocomposite hydrogels assembled by gravity-induced concentration gradient

LI Zheng, CONG Huaiping

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A gradient nanocomposite hydrogel was successfully fabricated via a free radical polymerization under catalyst and thermal initiation conditions by using *N,N*-bis(acryloyl) cystamine (BACA)-modified silver nanowires (AgNWs) as the multifunctional crosslinkers and conductive fillers. Under the effect of gravity, the concentration of BACA-modified AgNWs was assembled into gradient distribution and sodium acrylate was used as ionic polymerizable monomer in this system. Scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), tensile machine, electrochemical workstation and infrared thermal imaging were used to investigate the performance of the gradient nanocomposite hydrogel. The results show that the density of network increases from top to bottom and the nanocomposite hydrogel exhibits highly anisotropic mechanical, electrical, and photothermal performances. As demonstrations of related mechanical performance, the nanocomposite hydrogel can quickly change its shape asymmetrically in water and under near infrared irradiation, which provides a new insight into flexible smart actuator for this kind of hydrogel.

Key words: gravity-induced assembly; Ag-S coordination interaction; concentration gradient; anisotropy; smart actuator

水凝胶是聚合物分子链以水为分散介质形成的三维网络结构^[1-2]。由于这种特异的组分结构

收稿日期:2021-05-13;修回日期:2021-05-24

基金项目:国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目(21922104)

作者简介:李 政(1993—),男,安徽滁州人,合肥工业大学硕士生;

从怀萍(1982—),女,安徽凤阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: hpcong@hfut.edu.cn.

赋予了水凝胶具有液体水的流动性和聚合物的机械弹性^[3-4],并与生物组织有着高度的生物相容性,因而被广泛应用于伤口愈合^[5-7]、组织医药工程^[8-9]、柔性隐形眼镜等方面。20 世纪以来,随着纳米材料科学领域的发展,纳米材料独特的尺寸和界面效应使其在光学、电子学、机械学等方面具有巨大的研究潜力,使得越来越多的材料科学家投身于该领域的研究。

将纳米材料与水凝胶聚合物网络结合起来从而赋予水凝胶体系具有纳米材料的特异性能成为一种水凝胶新型设计策略。文献[10]首次提出了纳米复合水凝胶的概念,其通过无机纳米黏土粒子掺杂聚异丙基丙烯酰胺水凝胶网络,其中纳米黏土粒子充当交联剂从而固定了分子链,使得所制备的纳米复合水凝胶具有优异的机械性能,相比原本的水凝胶材料,其拉伸倍率提高了 20 倍,拉伸强度提高了近 100 多倍;文献[11]利用 *N,N*-双(丙烯酰)脒胺(BACA)改性金纳米颗粒(AuNPs)形成多功能交联剂 AuNPs@BACA,构建纳米复合水凝胶,相较于传统的水凝胶的不均质网络,其均匀的网络赋予了该纳米复合水凝胶近 1 MPa 的拉伸应力及 24 倍的拉伸倍率;在 808 nm 激光下动态的金属配位键使得该纳米复合水凝胶具有优异的自愈合性能。然而,传统的纳米复合水凝胶由于其纳米微粒的随机分散,从而使得所制备的纳米复合水凝胶具有各向同性结构^[12]。

天然结构材料(如蹄筋、韧带和肌肉)具有独特的多尺度梯度次各向异性结构,从而带来了优异的性能。然而,构建具有多尺度梯度次结构的高度各向异性水凝胶材料仍是一个重大的挑战^[13]。受天然蹄筋、肌肉等由于组织的定向生长而具有高度各向异性结构的启发,本文利用重力效应诱导分子链的定向生长,制备一种梯度结构的各向异性纳米复合水凝胶材料。

在前期研究的基础上,本文将 BACA 充分地吸附在银纳米线(AgNWs)上,形成 RS-Ag 动态配位键,从而构建了多功能大分子交联剂^[14];在重力场的作用下,诱导组装形成了自上而下的质量浓度梯度逐级提高的多功能大分子交联剂,在可聚合单体丙烯酸钠(NaAA)的存在下发生自由基聚合形成纳米复合水凝胶。质量浓度梯度纳米导电填料 AgNWs 的引入赋予了该纳米复合水凝胶具有高度各向异性的机械、电学、光热等性能。由于梯度非均质导电网络的形成,使得该纳米复

合水凝胶在柔性传感、智能驱动领域有着广阔的应用前景。

1 实验部分

1.1 主要试剂与仪器

1.1.1 试剂

硝酸银(AgNO_3)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、氯化钠、丙三醇、氢氧化钠、丙烯酸(AA)、过二硫酸钾($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$)均购于国药集团化学试剂有限公司;BACA、四甲基乙二胺(TEMED)均购于阿法埃莎(中国)化学有限公司;去离子水由 Millipore 纯水机自制。

1.1.2 仪器

Instron 5965 型万能材料测试仪(英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司);SU8020 场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(日本日立);HT-7000 型场发射透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)(日本日立);FD-1A 型冷冻干燥机(照生有限公司);CHI-760D 型电化学工作站(上海辰化仪器有限公司);Ti400 型红外热像仪(美国福禄克公司)。

1.2 实验

1.2.1 AgNWs 的制备

首先将 5.86 g $M_w = 40\ 000$ 的 PVP 加入到 190 mL 的丙三醇溶液中,搅拌均匀于微波中加热 10 min 使 PVP 完全溶解;然后降温到室温,倒入 250 mL 的三颈烧瓶中,依次向其中加入 1.58 g 的硝酸银和 10 mL 丙三醇,配制的 0.5 mL 去离子水与 59 mg 氯化钠的混合溶液,20 min 升温到 210 °C,同时控制搅拌速率为 50 r/min;待反应完成后,倒入 500 mL 的烧杯中,加入等体积的去离子水,待降温后离心 2 次,分散定容。

1.2.2 各向异性纳米复合水凝胶制备

首先取 40 mL 去离子水于带盖玻璃瓶中,向其中加入分析纯 AA 10 mL,充分震荡使其完全混合均匀,进行脱气,随后向其中加入 5 g 氢氧化钠,搅拌使其充分溶解,制备可聚合 NaAA 单体;然后通过取 25 g/L AgNWs 分散液 2 mL 于带盖小玻璃瓶中,向其中加入 2 mL 去离子水,充分震荡,随后加入 2 mg BACA 交联剂,进行 3 min 超声使 BACA 完全吸附在 AgNWs 上;最后向其中加入上述制备好的 1 mL NaAA 单体溶液和 15 mg $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 引发剂,进行 1 min 超声震荡,然后脱气静置 120 min 进行诱导组装,再滴加稀释的 TEMED 催化剂置于 70 °C 烘箱中快速进行凝

胶化,即可制得导电纳米复合水凝胶。

2 结果与讨论

2.1 梯度各向异性纳米复合水凝胶的设计

传统的纳米复合水凝胶通过向水凝胶网络掺杂纳米微粒对其机械性能进行调控,而由于纳米微粒的随机分散性质使得所制备的纳米复合水凝胶具有高度的各向同性;而各向异性的结构往往会赋予材料特有的性能,诸如机械强度、电学性能、光学性能、膨胀动力学等,从而严重地限制了水凝胶材料的应用。而常规的各向异性结构的设计最常见的有双梯度不对称结构^[15]、可编程的异质结构^[16]、梯度结构^[17]3种,其中梯度结构构建各向异性水凝胶材料仍具有相当大的挑战。受蹄筋、肌肉等天然各向异性材料启发,本文通过重力场作用诱导 AgNWs@BACA 形成质量浓度梯度,诱导分子链定向生长来构建各向异性纳米复合水凝胶,赋予了其优异力学和电学各向异性,并进一步赋予其在智能驱动上的潜在应用。为了更加直观地表达该纳米复合水凝胶的梯度网络,本文采用 5 mL 体系并将其均匀地分成 5 个质量浓度梯度,其制备流程如图 1 所示。在聚合反应前,将 BACA 改性 AgNWs 形成纳米复合物 AgNWs@BACA,随后在重力场作用下诱导组装形成质量浓度梯度的大分子交联剂,最后在可聚合单体 NaAA、引发剂 $K_2S_2O_8$ 以及催化剂 TEMED 在 70 °C 条件下发生原位自由基聚合形成导电纳米复合水凝胶。由于在重力场作用下使得 AgNWs 发生诱导组装,鉴于 AgNWs 与 BACA 存在 RS-Ag 配位键形成梯度质量浓度的大分子交联剂,诱导分子链定向生长,所制备的纳米复合水凝胶有可能显示出高度的各向异性,并赋予其智能驱动方面的应用。

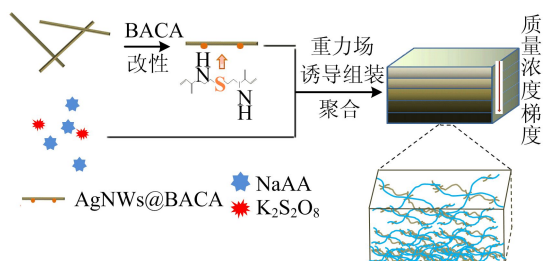


图 1 各向异性纳米复合水凝胶制备示意图

2.2 AgNWs 诱导组装及调控

重力场效应诱导 AgNWs 形成的质量浓度梯度如图 2 所示。

从图 2a 可以看出,随着诱导时间的延长,最后 AgNWs 质量浓度梯度不断地增加,在达到 120 min 时增加了 10 g/L,当超过 120 min 后,分散液中 AgNWs 质量浓度有着一定程度的降低,可能是由于 AgNWs 产生质量浓度集中导致的。从图 2b 可以看出,诱导时间过长导致局部质量浓度升高。

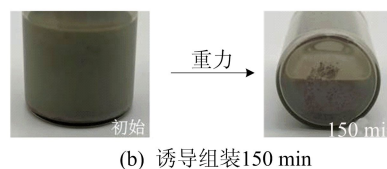
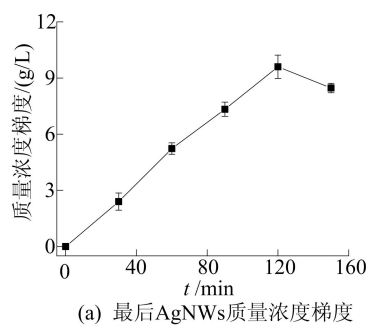
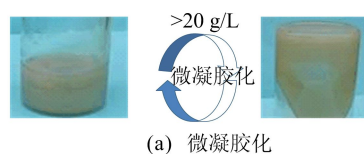
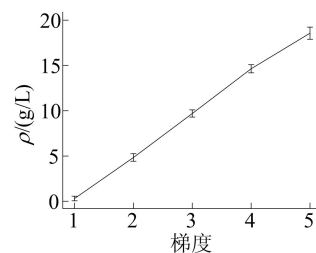


图 2 诱导组装形成的质量浓度梯度

为了进一步选择制备各向异性纳米复合水凝胶的初始 AgNWs 质量浓度,本文合成了不同 AgNWs 质量浓度的水凝胶,质量浓度梯度对凝胶化的影响如图 3 所示。



(a) 微凝胶化



(b) 120 min 各 AgNWs 质量浓度梯度

图 3 诱导组装质量浓度梯度对凝胶化的影响

图 3a 所示为 AgNWs 质量浓度大于 20 g/L 微凝胶化图,由图 3a 可知,当 AgNWs 质量浓度大于 20 g/L 时不利于凝胶化,从而形成了微凝胶。为了进一步定量质量浓度梯度,选用初始分散液 AgNWs 质量浓度为 10 g/L 进行诱导组装,诱导 120 min 各 AgNWs 质量浓度梯度如图 3b

所示,从图 3b 可以看出,AgNWs 质量浓度呈现梯度分布,最后一个质量浓度梯度为 18.5 g/L,这也充分表明质量浓度梯度诱导形成。

2.3 AgNWs 及各向异性水凝胶的表征

2.3.1 改性 AgNWs 表征

AgNWs 及其纳米复合物的表征结果如图 4 所示。

从图 4a 和图 4b 可以看出,AgNWs 均质分散,长度为 5~10 μm ,且直径为 50 nm 左右。从图 4c 可以看出,AgNWs 吸附 BACA 后,其吸收峰发生了红移,波长从 374 nm 跃迁到 396 nm,这归结于 AgNWs 吸附了 BACA 后,其尺寸有增大的趋势,可见光吸收产生的等离子体共振发生了改变。

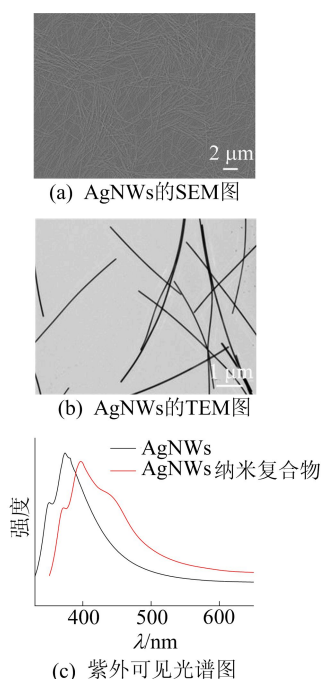


图 4 AgNWs 及其纳米复合物的表征结果

2.3.2 各向异性纳米复合水凝胶结构表征

通过 SEM 对纳米复合水凝胶结构进行表征,梯度层 SEM 图如图 5 所示。

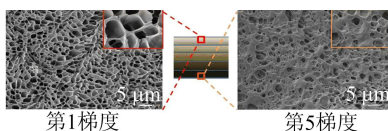


图 5 梯度的 SEM 图

从图 5 可以看出,第 1 梯度的纳米复合水凝胶结构具有明显的多孔结构,而第 5 梯度几乎看不到均质的孔洞结构,充分说明最后梯度的纳米复合水凝胶具有更加致密的网络结构,分子链具有沿重力

场方向增长趋势,进一步证明本文成功制备了基于质量浓度梯度各向异性纳米复合水凝胶。

2.4 各向异性纳米复合水凝胶的机械性能

2.4.1 力学性能

为了充分证明通过质量浓度梯度构建的纳米复合水凝胶具有优异的力学各向异性。本文对纳米复合水凝胶每个梯度进行了力学测试,各梯度的力学性能如图 6 所示。

从图 6 可以看出,纳米复合水凝胶自上而下的力学强度不断提高,其弹性模量不断增加,从 5 kPa 到 12 kPa 的跃迁,进一步证明了纳米复合水凝胶自上而下的凝胶网络密度是增加的,具有高度的力学各向异性的可能。

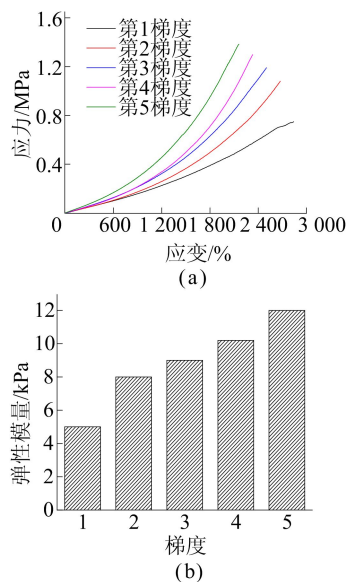


图 6 梯度的力学性能

2.4.2 力学各向异性

为了进一步体现其高度的力学各向异性,本文将纳米复合水凝胶沿着平行于质量浓度梯度和垂直于质量浓度梯度的方向切取相应的长条状进行测试。各向异性机械性能及其拉伸演示图如图 7 所示。

从图 7a 可以看出:在平行于质量浓度梯度方向可以达到 22 倍的拉伸倍率,其拉伸应力可达 1.26 MPa;而垂直于质量浓度梯度方向虽然只有近 11 倍的拉伸倍率,其拉伸应力可达 1.62 MPa。以上结果充分说明了所制备的纳米复合水凝胶具有高度的力学各向异性。图 7b、图 7c 所示分别为纳米复合水凝胶垂直和平行于质量浓度梯度方向的拉伸演示图,形象且充分证明了其高度的力学各向异性。

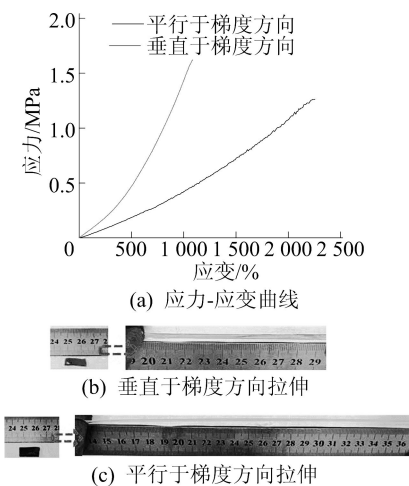


图 7 各向异性纳米复合水凝胶机械性能及其拉伸演示图

2.5 各向异性纳米复合水凝胶的电学性能

2.5.1 各梯度的导电性能

电学的各向异性是各向异性材料一个重要的性能体现,各梯度的电学性能如图 8 所示。从图 8a 可以看出,纳米复合水凝胶自上而下梯度的电流-电压曲线的斜率不断减小,说明其电阻在不断减小。从图 8b 可以看出,纳米复合水凝胶自上而下的电导率从 0.09 S/m 跃迁到 1.08 S/m,说明在重力场效应下导电梯度网络的形成导致其电导率增大。

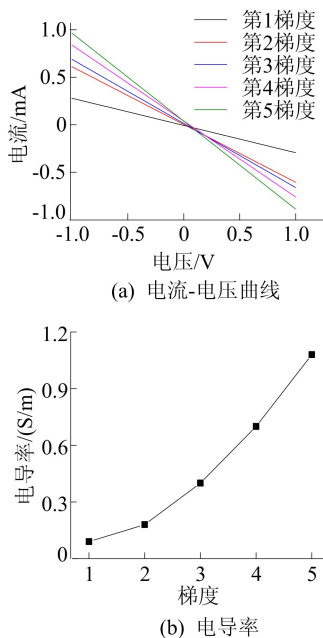


图 8 梯度层的电学性能

2.5.2 各梯度的灯泡演示

为了更加直观地展示各梯度的差异性电导率,本文进行小灯泡亮度实验,各梯度的小灯泡演

示结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,随着质量浓度梯度的增加,小灯泡有着明显的增亮趋势。

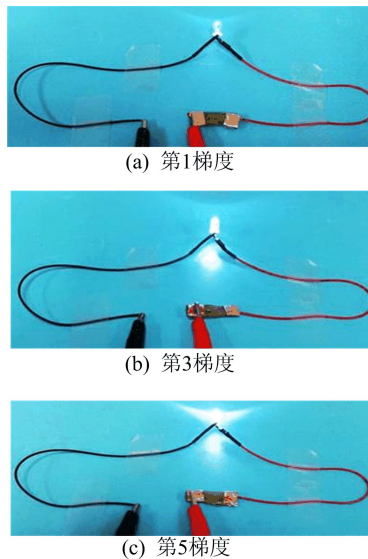


图 9 不同梯度的小灯泡演示图

2.5.3 电学各向异性

为了进一步对其各向异性的电学进行测试,本文将平行于质量浓度梯度和垂直于质量浓度梯度切成长条,进行电学相关表征,各向异性的电学性能及相关演示如图 10 所示。从图 10a 可以看出:平行于质量浓度梯度方向有着更小的斜率,即更小电阻;而垂直于质量浓度梯度方向有着较大的斜率,即更大的电阻;优异的电学各向异性与其高度的阶梯质量浓度形成的网络结构有着密切的关系。从图 10a、图 10b 可以看出,在平行于质量浓度梯度方向小灯泡比垂直方向更加的明亮,与其电流-电压曲线结果充分地吻合。

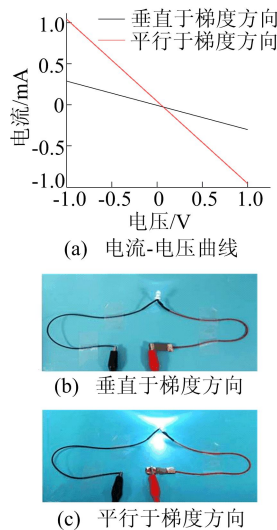
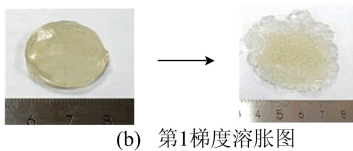
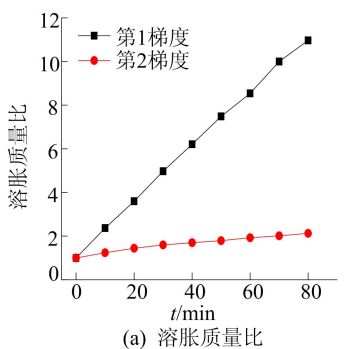


图 10 各向异性纳米复合水凝胶的电学性能及其相关演示

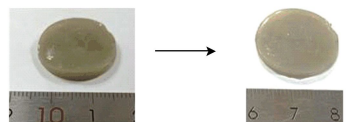
2.6 水响应各向异性水凝胶的机械行为

2.6.1 各梯度的差异性溶胀

基于质量浓度梯度构建的各向异性纳米复合水凝胶具有不均质的网络结构赋予了其在力学、电学、光热等方面的高度各向异性。由于聚电解质聚丙烯酸钠(PNaAA)对水有更强的作用力,可以在水中快速地吸水溶胀,而纳米复合往往会抑制分子链的运动,在此基础上,本文研究了该纳米复合水凝胶在水环境中的机械行为。各梯度的水中溶胀质量比及其溶胀图如图 11 所示。从图 11 可以看出,第 1 梯度和第 5 梯度在水环境中有着较大的差异性溶胀,第 1 梯度有着较大的溶胀变化,而第 5 梯度仅仅溶胀了 2 倍左右,这也为水响应驱动提供了可能。



(b) 第1梯度溶胀图



(c) 第2梯度溶胀图

图 11 梯度层的水中溶胀质量比及其溶胀图

2.6.2 水驱动的网络结构变化

为了从微观角度解释该纳米复合水凝胶差异性溶胀,水响应驱动分子机理如图 12 所示,从图 12 可以看出,该纳米复合水凝胶自上而下由于梯度网络的形成,其三维网络密度呈现逐级增加,在水分子作用下,其网络束缚力增强,从而形成非对称网络结构。

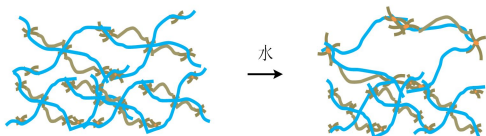


图 12 水响应驱动分子机理

2.6.3 水响应驱动演示

本文将该各向异性纳米复合水凝胶平行于梯度方向切成一个长方形块状,随后将其置于充满水的烧杯中,水响应机械驱动演示图如图 13 所示。

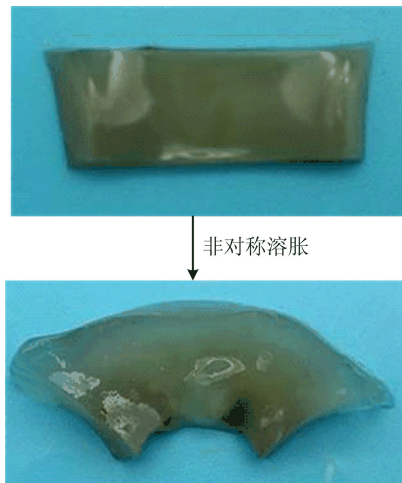


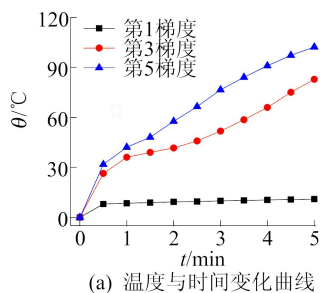
图 13 水响应机械驱动演示图

从图 13 可以看出,仅仅在几分钟内,该纳米复合水凝胶发生了快速的形状变化,由规整的长方形变成不规则的扇形,这归结于聚电解质 PNaAA 和 AgNWs 二元梯度网络对水的协同作用。由于梯度质量浓度的作用,使得该纳米复合水凝胶自上而下具有更高交联密度的网络结构,纳米复合程度的提高,不利于水分子的进入,在水环境的条件下,由于自上而下梯度网络对水分子的作用不同产生了不对称的溶胀驱动力,从而发生了各向异性的膨胀。

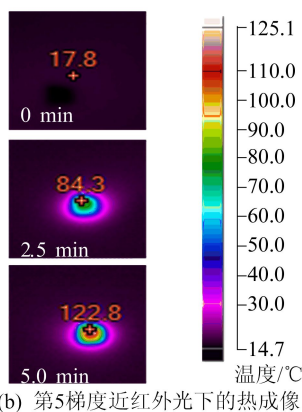
2.7 各向异性纳米复合水凝胶的机械行为

2.7.1 各梯度的光热性能

本文研究其光热响应各向异性的机械行为,贵金属由于表面等离子体共振,在近红外光作用下会产生一定的热量,因此该各向异性纳米复合水凝胶具有超高的光热转化性能。各梯度在近红外光(输出功率 1 W)下的光热效应如图 14 所示。



(a) 温度与时间变化曲线



(b) 第5梯度近红外光下的热成像

图 14 各梯度在近红外光下的温度变化及其热成像图

从图 14 可以看出,该各向异性纳米复合水凝胶在一个近红外光功率下自上而下的光热效率具有明显的提高,第 1 梯度在 5.0 min 内其温度几乎没有变化,而最后梯度的温度增加了 102.0 °C,该结果与其纳米复合水凝胶梯度的导电网络结构密切相关。

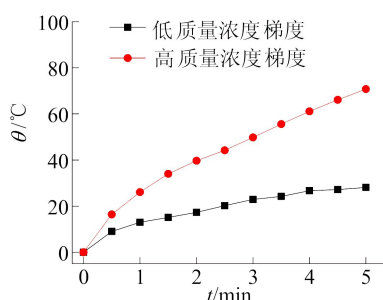
2.7.2 近红外光响应驱动

为了进一步进行近红外光响应驱动,本文将该凝胶迎着平行于梯度质量浓度方向切成厚度为 1 mm 的薄片,网络密度较高的一面置于上方,置于近红外下。近红外光响应各向异性驱动性能如图 15 所示。

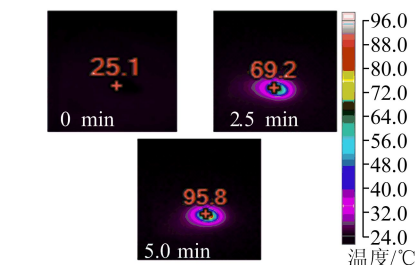
从图 15a 可以看出,水凝胶快速发生了形状的改变,由原来的长方形变成弧形。从图 15b 和图 15c 可以看出,仅仅 5.0 min 左右,两者有 43 °C 的温度差。



(a) 近红外光响应驱动



(b) 输出功率 1 W 近红外光下温度变化



(c) 高质量浓度梯度表面近红外光下热成像

图 15 近红外光响应各向异性驱动性能

由于在近红外光的条件下,具有质量浓度梯度较高的一面快速产生大量的热,使得水快速挥发,高分子聚合物链发生收缩而产生驱动力,从而发生弯曲形变。

3 结 论

本文基于重力场作用诱导 AgNWs 组装,通过引入 RS-Ag 配位键,从而制备了具有梯度网络结构的高度各向异性纳米复合水凝胶。由于质量浓度梯度的形成赋予了该纳米复合水凝胶逐级密度增大的交联网络,使得所制备的纳米复合水凝胶具有力学上的各向异性;AgNWs 导电填料的质量浓度梯度分布特征赋予该纳米复合水凝胶具有电学、光热性能上的高度各向异性。本文的机械行为演示图也显示了该各向异性纳米复合水凝胶在智能驱动柔性材料方面的潜在应用,因此该各向异性纳米复合水凝胶的制备策略在未来大规模制备以及柔性器件等方面有着更广阔的应用前景。

[参 考 文 献]

- [1] WEN Q, BASU A, JANMEY P A, et al. Non-affine deformations in polymer hydrogels[J]. *Soft Matter*, 2012, 8(31): 8039-8049.
- [2] MORELLE X P, ILLEPERUMA W R, TIAN K, et al. Highly stretchable and tough hydrogels below water freezing temperature[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(35): 1801541.
- [3] PEPINDONAT B, VIALLAT A, BLACHOT J F, et al. Electromechanical polymer gels combining rubber elasticity with electronic conduction[J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(11): 1401-1405.
- [4] PAN S, XIA M, LI H, et al. Transparent, high-strength, stretchable, sensitive and anti-freezing poly(vinyl alcohol) ionic hydrogel strain sensors for human motion monitoring [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(8): 2827-2837.
- [5] LOHMANN N, SCHIRMER L, ATALLAH P, et al. Glyco-

- saminoglycan-based hydrogels capture inflammatory chemokines and rescue defective wound healing in mice[J]. *Science Translational Medicine*, 2017, 9(386): 1-12.
- [6] DAS S K, PARANDHAMAN T, DEY M D. Biomolecule-assisted synthesis of biomimetic nanocomposite hydrogel for hemostatic and wound healing applications [J]. *Green Chemistry*, 2021, 23(2): 629-669.
- [7] XIAO Z, ZHENG X, AN Y, et al. Zwitterionic hydrogel for sustained release of growth factors to enhance wound healing[J]. *Biomaterial Science*, 2021, 9(3): 882-891.
- [8] 谢云飞, 郭露荫, 方蔚伟, 等. 新型超支化纳米聚合物缓释材料的合成及应用[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(6): 745-749.
- [9] DANKERS P Y, HARMSSEN M C, BROUWER L A, et al. A modular and supramolecular approach to bioactive scaffolds for tissue engineering [J]. *Nature Materials*, 2005, 4(7): 568-574.
- [10] HARAGUCHI K, TAKEHISA T. Nanocomposite hydrogels; a unique organic-inorganic network structure with extraordinary mechanical, optical, and swelling/De-swelling properties [J]. *Advanced Materials*, 2002, 14 (16): 1120-1124.
- [11] QIN H L, ZHANG T, LI N, et al. Dynamic Au-thiolate interaction induced rapid self-healing nanocomposite hydrogels with remarkable mechanical behaviors [J]. *Chem*, 2017, 3(4): 691-705.
- [12] KLEIN A, WHITTEN P G, RESCH K, et al. Nanocomposite hydrogels: fracture toughness and energy dissipation mechanisms[J]. *Journal of Polymer Science Part B(Polymer Physics)*, 2015, 53(24): 1763-1773.
- [13] MREDHA M T I, GUO Y Z, NONOYAMA T, et al. A facile method to fabricate anisotropic hydrogels with perfectly aligned hierarchical fibrous structures[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(9): 1704937.
- [14] SONG P, QIN H L, GAO H L, et al. Self-healing and superstretchable conductors from hierarchical nanowire assemblies[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2786.
- [15] ZHENG W J, AN N, YANG J H, et al. Tough Al-alginate/poly(N-isopropylacrylamide) hydrogel with tunable LCST for soft robotics [J]. *ACS Applied Material Interfaces*, 2015, 7(3): 1758-1764.
- [16] LIU K, ZHANG Y, CAO H, et al. Programmable reversible shape transformation of hydrogels based on transient structural anisotropy[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(28): 2001693.
- [17] TAN Y, WANG D, XU H, et al. Rapid recovery hydrogel actuators in air with bionic large-ranged gradient structure [J]. *ACS Applied Material Interfaces*, 2018, 10 (46): 40125-40131.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 789 页)

- [10] MIAO R Q, GAO Y, HARRISON K D, et al. Identification of a receptor necessary for Nogo-B stimulated chemotaxis and morphogenesis of endothelial cells[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103: 10997-11002.
- [11] PARK E J, GRABIŃSKA K A, GUAN Z Q, et al. Mutation of Nogo-B receptor, a subunit of cis-Prenyltransferase, causes a congenital disorder of glycosylation [J]. *Cell Metabolism*, 2014, 20: 448-457.
- [12] RANA U, LIU Z, KUMAR S N, et al. Nogo-B receptor deficiency causes cerebral vasculature defects during embryonic development in mice [J]. *Developmental Biology*, 2016, 410: 190-201.
- [13] CHRISTOPH E, NINA J, LILLI W, et al. Schwann cell expressed Nogo-B modulates axonal branching of adult sensory neurons through the Nogo-B receptor NgBR[J]. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 2015, 9: 454.
- [14] PARK E, GRABIŃSKA K, GUAN Z, et al. Mutation of Nogo-B receptor, a subunit of cis-prenyltransferase, causes a congenital disorder of glycosylation[J]. *Cell Metabolism*, 2014, 20(3): 448-457.
- [15] ZHAO B F, XU B, HU W Q, et al. Comprehensive proteome quantification reveals NgBR as a new regulator for epithelial-mesenchymal transition of breast tumor cells [J]. *Journal of Proteomics*, 2015, 112: 38-52.
- [16] HU W. Nogo-B receptor deficiency increases liver X receptor alpha nuclear translocation and hepatic lipogenesis through an adenosine monophosphate-activated protein kinase alpha-dependent pathway [J]. *Hepatology*, 2016, 64(5): 1559-1576.
- [17] LIBBY P, RIDKER P M, MASERI A, et al. Inflammation in atherosclerosis[J]. *Circulation*, 2002, 105(9): 1135-1143.
- [18] MA C, FENG K, YANG X, et al. Targeting macrophage liver X receptors by hydrogel-encapsulated T0901317 reduces atherosclerosis without effect on hepatic lipogenesis [J]. *Br J Pharmacol*, 2021, 178(7): 1620-1638.
- [19] HARRISON K D, MIAO R Q. Nogo-B receptor stabilizes Niemann-Pick Type C2 protein and regulates intracellular cholesterol trafficking[J]. *Cell Metabolism*, 2009, 10(3): 208-218.

(责任编辑 闫杏丽)