

# 基于冰模板法构筑快速响应水凝胶及其驱动性能研究

郑 奥, 于嘉欣, 从怀萍\*

(合肥工业大学化学与化工学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**利用银纳米线 (AgNWs) 作为光热纳米材料, 温敏性聚合物 *N*-异丙基丙烯酰胺 (NIPAM) 作为单体, 通过单向冷冻诱导自组装, 成功制备出一种具有开放多孔结构的快速光热响应水凝胶。该水凝胶在恒定近红外 (NIR) 光照射下迅速弯曲, 并利用自遮蔽效应建立内置负反馈回路, 实现持续稳定自振荡。得益于其快速响应性, 水凝胶振荡器能够实时自主跟踪光源, 并在不同入射角范围内保持连续振荡。其优异的光热驱动能力结合多向可控性优势, 为自动化控制、软体机器人及微型运输系统等前沿领域开拓新的技术路径。

**关键词:** AgNWs; 单向冷冻; 快速响应; 自振荡; 多向可控性

**中图分类号:** TQ33

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2026)01-0114-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.021

## Construction of rapid-response hydrogels based on the ice-template method and investigation of their actuation performance

ZHENG Ao, YU Jia-xin, CONG Huai-ping\*

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

**Abstract:** In this study, a rapid photothermal-responsive hydrogel with an open porous structure was successfully fabricated through unidirectional freezing-induced self-assembly using silver nanowires (AgNWs) as photothermal nanomaterials and thermoresponsive polymer *N*-isopropylacrylamide (NIPAM) as the monomer. Under constant near-infrared (NIR) light irradiation, the hydrogel implemented rapid bending and achieved sustained stable self-oscillation via a self-shadowing effect that established an intrinsic negative feedback loop. Furthermore, benefiting from its rapid responsiveness, the hydrogel oscillator enables real-time autonomous tracking of light sources and maintains continuous oscillation across different incident angle ranges. The excellent photothermal actuation performances and multi-directional controllability advantages pioneer novel technological pathways for frontier fields including automated control systems, soft robotics, and micro-transport systems.

**Key words:** AgNWs; unidirectional freezing; rapid responsiveness; self-oscillation; multi-directional controllability

软材料的引入为机器人技术带来了全新的发展机遇,使机器人设计从传统的刚性结构向更具适应性的柔性形态转变。相比于刚性机器人,软机器人能够依靠自身形状变化灵活应对复杂环境,特别是在执行精细操作时展现出独特优势。通过优化材料、结构及驱动方式,软机器人可实现弯曲<sup>[1]</sup>、螺旋<sup>[2-3]</sup>、抓取<sup>[4]</sup>及自主移动<sup>[5-7]</sup>等复杂变形和运动。然而,目前大多数软执行器仍依赖周期性外部刺激来驱动变形,这不仅增加了系统的复杂性和能量消耗,也限制了其自主性和环境自适应能力。

生物体的自主运动依赖内部调节机制,例如心跳、细胞分裂以及蓝藻的昼夜节律,都是通过建立负反馈回路实现稳定自主调节以维持生命活动的长期稳定性。目前,已有研究利用热<sup>[8-10]</sup>、湿度<sup>[11]</sup>、电场

等外界刺激驱动软执行器自主运动。然而,这些系统在远程操控和灵活性方面仍受限制。相比之下,光驱动凭借远程时空操控和可调谐能量输入等优势在软体执行器研究中备受关注。现有光驱动振荡系统主要基于液晶网络和多层薄膜<sup>[12-15]</sup>,如 Zhao 等<sup>[16]</sup>设计液晶弹性体/弹性体双层振荡器在低能量供应下实现高光热转换自主运动。然而,这些振荡器受材料选择与结构设计的限制,难以实现多向驱动和在高温高湿液态环境下稳定运行,影响实际应用。

在高温高湿环境(水)中,水凝胶因高含水量和柔韧性,能克服流体阻力并保持稳定振荡<sup>[17-18]</sup>。作为振荡执行器,水凝胶的响应速度至关重要。响应过慢会降低振荡频率并加剧能量损耗,导致振荡衰减。传统直接聚合的水凝胶因致密的网络结构,导致响

收稿日期:2025-03-21;修回日期:2025-10-02

基金项目:国家自然科学基金项目(22171066)

作者简介:郑奥(2001-),女,硕士生;从怀萍(1982-),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为超弹性复合材料、智能响应/修复/驱动材料,通讯联系人, hpcong@hfut.edu.cn.

应迟缓,振荡幅度小、频率低。冰模板法可通过增加孔隙提升水传输速率,从而加快响应,提高振荡性能<sup>[19-20]</sup>,为提升水凝胶振荡性能提供了有效途径。

因此,笔者提出了一种取向冷冻组装诱导紫外光低温聚合策略,用于构筑快速响应的水凝胶自振荡驱动器。在 NIR 光照射下,具有多孔结构水凝胶能够迅速弯曲,并通过自遮蔽效应阻挡刺激,形成稳定的弯曲振荡行为。同时,该结构赋予水凝胶卓越快速响应能力,使其能够实时追踪入射光,实现多方位自振荡。基于多孔结构带来的高频和大振幅特性,进一步设计出具备自主游泳能力的软体驱动器,展现了水凝胶在仿生运动领域中的巨大潜力。

## 1 试剂与仪器

### 1.1 试剂

*N*-异丙基丙烯酰胺(NIPAM),梯希爱(上海)化工贸易有限公司生产;*N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(MBA,化学纯)、乙醇( $C_2H_6O$ ),国药集团化学试剂有限公司生产;2-羟基-2-甲基苯基丙酮(光引发剂 1173),上海阿拉丁生化科技有限公司生产;实验用水均为 Milli-Q 纯化水。

### 1.2 仪器

场发射透射电子显微镜(TEM),H-7650型,德国蔡司;场发射扫描电子显微镜(SEM),SU8020型,德国蔡司;冷冻干燥机,FD-1A型,北京照生行仪器设备有限公司;UV LED 便携式手电筒,IFY-01型,柯依努(苏州)精密光电有限公司;红外成像仪,Fluke Ti480Pro型,上海坚领电子科技有限公司;近红外激光器,MDL-III-808-2.5W型,长春新产业光电技术有限公司;分析天平,XA105Du型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;DZG-303A型纯水仪,合肥柯宁特水处理有限公司。

## 2 实验方法

### 2.1 单向冷冻诱导 AgNWs-PNIPAM (DFAP) 水凝胶的合成

分别称取 0.8 g NIPAM、3 mg MBA 溶于 4 mL 水中,超声溶解后加入 1 mL AgNWs 溶液(40 mg/mL)和 50  $\mu$ L 光引发剂 1173,超声分散均匀后置于冰浴中保存。将前驱体溶液注入一对由平行玻璃和 0.5 mm 硅胶片组成的反应池,放置在 $-60^{\circ}\text{C}$ 的冷盘上,待冷冻完全后打开紫外灯低温聚合 90 s。最后将凝胶从玻璃片上取下浸泡在水中去除未聚合的单体。

### 2.2 多孔水凝胶的形貌表征

对 DFAP 水凝胶进行 SEM 制样以观察水凝胶内部网络结构。制样方式如下:将溶胀平衡的样品切割成 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 0.5 mm 的块状铺平后放入液氮中,冷冻完全后取出放在低温冷盘上用刀刮去表面一层,然后放入冷冻干燥机,2 d 后取出冻干水凝胶样品,用导电胶固定在制样台上,喷金处理后即可观察。截面只需将样品铺平后置于液氮中冷冻完全,然后掰断放于冻干机中重复上述操作即可。

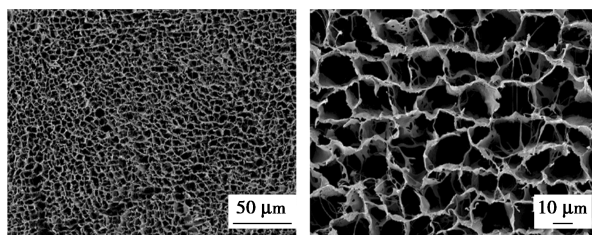
### 2.3 驱动性能测试

将条状凝胶的一端连接到垂直玻璃板上,以产生悬臂结构。施加固定位置的 NIR 光刺激,用手机摄像记录红外激光器打开照射时水凝胶的振荡行为,通过视频记录样品振荡角度随时间变化。

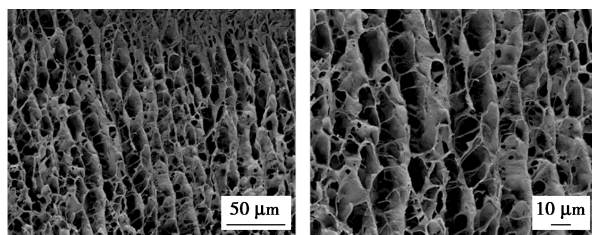
## 3 结果与分析

### 3.1 DFAP 多孔水凝胶的结构设计与表征

快速响应 DFAP 多孔水凝胶的设计过程是将一对带有水凝胶前体溶液的反应池放置在 $-60^{\circ}\text{C}$ 的冷盘上,通过定向冷冻技术诱导水凝胶前体溶液自组装,随着冰晶沿温度梯度生长,溶质分子被排斥并积累在冰晶之间,冷冻完全后通过紫外聚合 90 s 制备出具有 3D 有序结构和开放传质通道的快速光热响应 DFAP 水凝胶。通过对水凝胶样品表面和截面进行 SEM 表征,如图 1(a)、(b)所示,水凝胶表面呈现蜂窝网络结构,孔隙尺寸为 10~20  $\mu\text{m}$ 。平行于冰晶生长方向,观察到均匀的间距为 10  $\mu\text{m}$  的层状结构,且相邻片层相互连接,这种开放贯通的 3D 有序网络有助于水分子的快速高效传输。



(a) DFAP 多孔水凝胶的表面 SEM 图



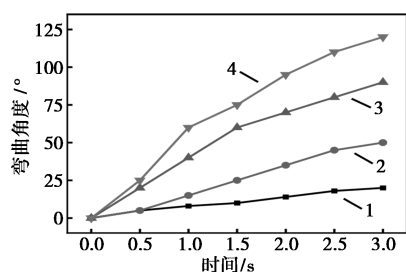
(b) DFAP 多孔水凝胶的截面 SEM 图

图 1 DFAP 多孔水凝胶的结构和形貌表征

### 3.2 DFAP 多孔水凝胶的刺激响应性能探究

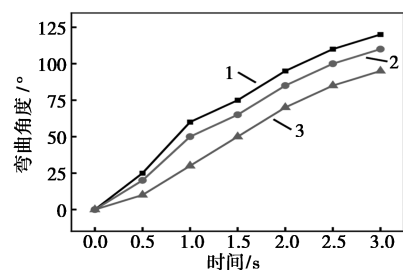
AgNWs 赋予水凝胶独特的光热响应特性,而定向冷冻形成的低折射率通道则进一步优化了水分子的传输路径,使水凝胶在光刺激下能够迅速发生变形。水凝胶的光响应变形及恢复能力主要受 AgNWs 质量分数和单向冷冻温度等因素的影响。在 NIR 光照射下,由于凝胶自身的厚度,刺激区域形成了温度梯度,照射侧的温度高于未照射侧,导致凝胶网络收缩程度不同,这种光触发的不对称应力诱导水凝胶向光源弯曲。从图 2(a)可以看出,在相同的光照时间下,AgNWs 质量分数为 0.8% 的水凝胶样品弯曲角度最大,达到  $120^\circ$ 。这是由于 AgNWs 质量分数的增加增强了水凝胶的光热转化能力,使其在相同照射条件下响应速度更快,从而导致更显著的弯曲变形。

此外,从图 2(b)可以观察到,单向冷冻温度对水凝胶的变形程度具有重要影响。当冷冻温度为  $-60^\circ\text{C}$  时,样品的弯曲变形幅度达到最大。这是由于较低温度加速了冰晶的成核速率,导致冰晶数量增加但尺寸减小,形成更加致密的孔隙结构。这种小孔径结构限制了水分子的迁移,从而降低了水凝胶的整体响应速率。



1—0.2% AgNWs; 2—0.4% AgNWs; 3—0.6% AgNWs;  
4—0.8% AgNWs

(a) 不同 AgNWs 质量分数的 DFAP 水凝胶在 NIR 光照射下的弯曲角度变化



1— $-60^\circ\text{C}$ ; 2— $-90^\circ\text{C}$ ; 3— $-120^\circ\text{C}$

(b) 不同冷冻温度的 DFAP 水凝胶在 NIR 光照射下的弯曲角度变化

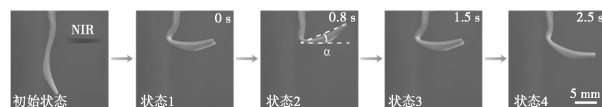
图 2 AgNWs 质量分数和单向冷冻温度对 DFAP 水凝胶光驱动性能影响 (NIR 功率  $2.5\text{ W}/\text{cm}^2$ )

综合上述结果,DFAP 水凝胶驱动器的最佳制备条件:单向冷冻为  $-60^\circ\text{C}$ 、AgNWs 质量分数为 0.8%。

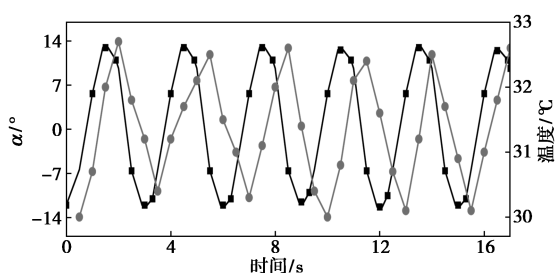
### 3.3 DFAP 多孔水凝胶的光驱动自振荡行为探究

当恒定 NIR 光源垂直照射悬挂的水凝胶样品时,可以观察到当样品弯曲到一定角度后,不断进行往复摆动,即实现连续稳定的周期性弯曲振荡。如图 3(a)所示,在 NIR 光照射下,水凝胶样品能够实现频率为 0.34 Hz、振荡幅度 ( $\alpha$ ) 为  $26.8^\circ$  的弯曲振荡。进一步分析自振荡机制发现,这一现象源于光热诱导弯曲变形引发的自遮蔽效应以及 DFAP 水凝胶的高速驱动,整个过程通过内置负反馈回路进行动态调节。在振荡过程中,凝胶的任意一个位置受到光刺激,被辐照区域的聚合物网络迅速收缩,样品弯曲至状态 1。在光源的持续照射下,随着网络的持续收缩,凝胶继续弯曲至状态 2。此时凝胶因过度弯曲使尾端遮挡光源,导致之前被辐照区域温度下降,水分子迅速进入网络,使该样品回到状态 3。在惯性作用和温度继续下降的影响下,样品最终恢复至状态 4,处于最低弯曲角度。随着 NIR 光持续照射,辐照区域温度再次升高,样品重新弯曲至状态 1,开启新一轮振荡。

为进一步确认自遮蔽机制,通过热电偶测量并记录水凝胶在振荡过程中刺激区域的温度变化及  $\alpha$  的变化,如图 3(b)所示。样品的弯曲角度表现出稳定的波动,表明水凝胶在恒定刺激下具备自振荡能力。温度变化趋势与凝胶弯曲角度变化趋势基本一致,进一步证实了水凝胶自振荡行为与凝胶系统中的光-热-力相互作用密切相关。



(a) DFAP 水凝胶振荡器单次振荡照片



(b) DFAP 水凝胶振荡器在振荡过程中振荡幅度与刺激区域温度的变化

图 3 DFAP 水凝胶自持续振荡行为及振荡机制 (NIR 功率  $2.5\text{ W}/\text{cm}^2$ )

### 3.4 几何形状与输入能量对于振荡执行器的影响探究

#### 3.4.1 悬臂长度对于振荡频率的影响

从图 4 可以看出,臂长( $L$ )分别为 14、18、20 mm 的振荡器对应的单次振荡周期增加,振荡频率逐渐降低,分别为 0.8、0.36、0.25 Hz。可以发现振荡频率随  $L$  增加而降低,并与  $L^2$  呈反比。这一现象主要归因于臂长的增加导致系统质量增大,同时刚度降低,使系统惯性增加,从而延长了振荡周期。

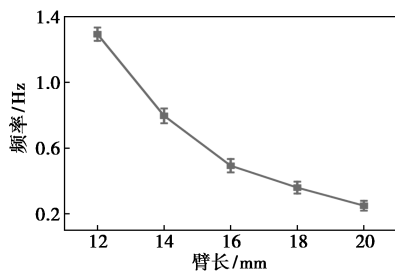
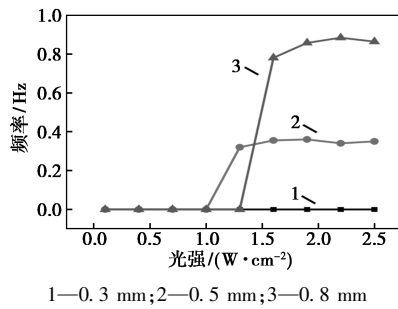


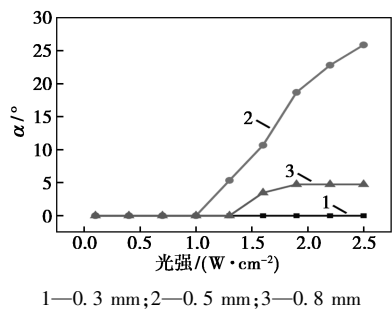
图 4 不同臂长的 DFAP 水凝胶弯曲振荡性能 (NIR 功率 2.5 W/cm<sup>2</sup>)

#### 3.4.2 悬臂厚度与激光强度对于振荡频率的影响

从图 5(a)、(b)可以看出,在 NIR 光刺激下,厚度为 0.3 mm 的执行器无法表现出振荡行为。这是由于凝胶厚度较小,NIR 光照射时无法在厚度方向形成有效的温度梯度,从而无法引发弯曲变形。当厚度增加至 0.5 mm 时,执行器的振荡频率为 0.35 Hz,



(a) 不同厚度的 DFAP 水凝胶在不同光强下的振荡频率



(b) 不同厚度的 DFAP 水凝胶在不同光强下的振荡幅度

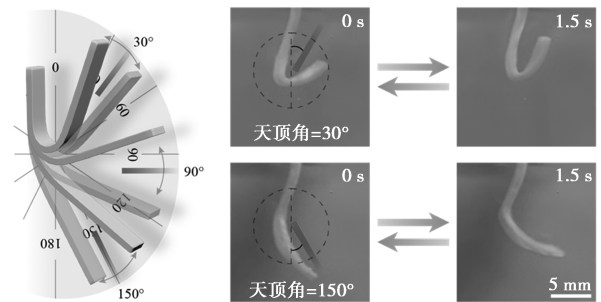
图 5 不同厚度的 DFAP 水凝胶在不同光强下的振荡性能

$\alpha$  为 25.85°。进一步增加厚度至 0.8 mm 后,振荡频率提高至 0.86 Hz,但  $\alpha$  减少至 4.74°。这一现象归因于厚度增加导致悬臂刚度提升,使变形程度减弱,从而导致  $\alpha$  降低。

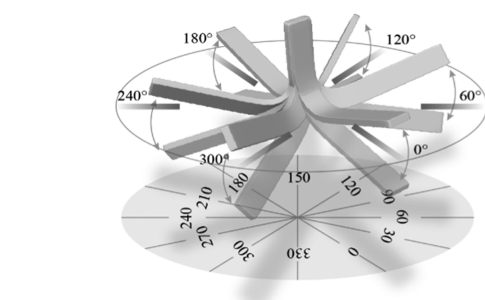
输入能量同样影响振荡性能。如图 5(a)、(b)所示,厚度为 0.5 mm 的执行器在激光强度低于 1.0 W/cm<sup>2</sup> 时,样品表现出不变形或弯曲变形,无法形成稳定的负反馈回路,从而无法实现自振荡。当光强超过 1.0 W/cm<sup>2</sup> 后,样品开始进入稳定的振荡状态。从图 5(b)可以进一步看出, $\alpha$  随光强的增加而增大。这是因为较高的光强意味着更多的输入能量,引发更大的温度波动,使执行器发生更显著的弯曲变形,从而导致  $\alpha$  增加。综合研究结果,选择 2.5 W/cm<sup>2</sup> 的激光强度刺激厚度为 0.5 mm 的水凝胶,以实现稳定振荡。

### 3.5 振荡执行器的光向性振荡

通过调整 NIR 光照射角度,执行器能够对几乎



(a) DFAP 水凝胶在不同天顶角的 NIR 光下振荡光学照片



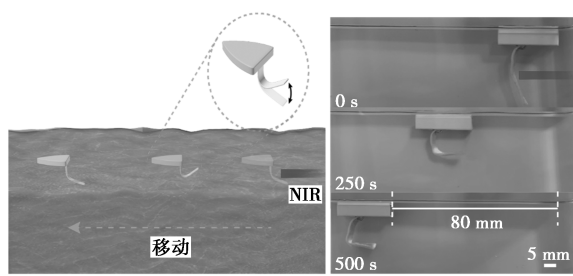
(b) DFAP 水凝胶在不同方位角的 NIR 光下振荡光学照片

图 6 DFAP 水凝胶的向光性振荡行为 (NIR 功率 2.5 W/cm<sup>2</sup>)

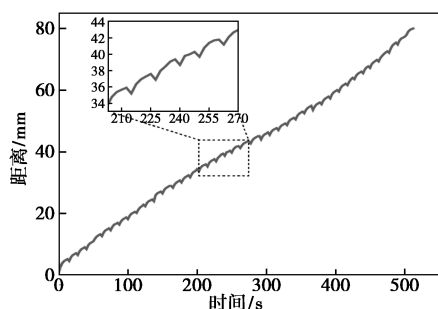
任意天顶角和方位角的光刺激做出快速多方位响应。对于悬臂式水凝胶振荡器,在 NIR 光的不同天顶角照射下,其振荡行为如图 6(a) 所示。当天顶角小于  $30^\circ$  时,执行器表现出光跟踪行为。在  $30^\circ \sim 150^\circ$  的天顶角范围内,执行器均能向光源方向弯曲并产生稳定的振荡,且振荡频率基本保持一致。此外,对于不同方位角的 NIR 光刺激,水凝胶同样能够实现频率接近的弯曲振荡,如图 6(b) 所示。这表明该执行器在不同光照角度下均具有良好的快速光响应特性,为全方位光驱动应用提供了可能性。

### 3.6 自振荡游泳驱动器的设计及运动

得益于 DFAP 水凝胶的快速光响应自主振荡特性,成功制备了一种具备趋光运动能力的自主软机器人,可实现自主推进驱动的高速游泳运动。该软机器人能够将恒定能量输入转化为周期性运动,为开发节能型自主机器人材料提供了新的可能性。如图 7(a) 所示,机器人的主体由聚氯乙烯(PVC)板制成,DFAP 水凝胶作为桨叶。由于 PVC 板的表面张力,驱动器能够漂浮在水面上。在恒定 NIR 光刺激下,水凝胶产生弯曲振荡,推动水流向后,从而获得向前的推进力,驱动机器人逆光源方向移动,实现自主趋光游泳运动。在持续照射 500 s 内,该机器人可移动 80 mm。图 7(b) 进一步展示了驱动器在运动过程中的位移变化,并揭示了水凝胶在单个振荡周期内的运动模式对推进效率的影响。



(a) DFAP 水凝胶游泳驱动器在稳定持续的 NIR 光照射下模拟海豚前进



(b) DFAP 水凝胶游泳驱动器随时间变化的前进距离

图 7 DFAP 水凝胶驱动器在稳定持续的 NIR 光下的自主游泳(NIR 功率  $2.5 \text{ W/cm}^2$ )

## 4 结论

利用单向冷冻诱导紫外聚合成功制备了一种具有开放、低曲折度的光热响应水凝胶自主振荡器。该制备方法通过构筑定向多孔网络实现了水分子的快速传输。基于这一优势,DFAP 水凝胶在恒定 NIR 光刺激下能够实现稳定且快速的自持续振荡,频率可达  $0.34 \text{ Hz}$ ,  $\alpha$  为  $26.8^\circ$ 。此外,改变 NIR 的刺激角度,该振荡器可以跟踪入射光并产生多方位向光自振荡行为。最终基于水凝胶的高频率、大振幅振荡特性,成功构建了一种自主远程驱动的游泳机器人,移动速度达到  $0.16 \text{ mm/s}$ ,为智能柔性驱动器的开发提供了新思路。

## 参考文献

- [1] Fan W, Yin J, Yi C, *et al.* Nature-inspired sequential shape transformation of energy-patterned hydrogel sheets[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(4): 4878–4886.
- [2] Li M, Mei J, Friend J, *et al.* Acousto-photolithography for programmable shape deformation of composite hydrogel sheets[J]. *Small*, 2022, 18(47): e2204288.
- [3] Tian Z, Xue J, Xiao X, *et al.* Optomagnetic coordination helical robot with shape transformation and multimodal motion capabilities[J]. *Nano Letters*, 2024, 24(9): 2885–2893.
- [4] Xue P, Bisoyi H K, Chen Y, *et al.* Near-infrared light-driven shape-morphing of programmable anisotropic hydrogels enabled by MXene nanosheets[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(7): 3390–3396.
- [5] Xu T, Zhang J, Salehizadeh M, *et al.* Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(29): eaav4494.
- [6] Hu W, Lum G Z, Mastrangeli M, *et al.* Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. *Nature*, 2018, 554(7690): 81–85.
- [7] Li C, Lau G C, Yuan H, *et al.* Fast and programmable locomotion of hydrogel-metal hybrids under light and magnetic fields[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(49): eabb9822.
- [8] Wang X Q, Tan C F, Chan K H, *et al.* In-built thermo-mechanical cooperative feedback mechanism for self-propelled multimodal locomotion and electricity generation[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3438.
- [9] Zhao Y, Hong Y, Qi F, *et al.* Self-sustained snapping drives autonomous dancing and motion in free-standing wavy rings[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(7): 2207372.
- [10] Ren L, He Y, Wang B, *et al.* 4D printed self-sustained soft crawling machines fueled by constant thermal field[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(33): 2400161.
- [11] Wang Q, Wu Z, Li J, *et al.* Spontaneous and continuous actuators driven by fluctuations in ambient humidity for energy-harvesting applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(34): 38972–38980.

(下转第 127 页)

- [5] Fang Z, Zhang P, Wang M, *et al.* Selective electro-oxidation of alcohols to the corresponding aldehydes in aqueous solution via Cu ( III ) intermediates from CuO nanorods [ J ]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(35):11855–11861.
- [6] Kou T, Chen W, He A, *et al.* Manganese-catalyzed oxidation of furfuryl alcohols and furfurals to efficient synthesis of furoic acids [ J ]. RSC Adv, 2024, 14(37):27060–27065.
- [7] Liu B, Zhang M, Liu Y, *et al.* Electrodeposited 3D hierarchical NiFe microflowers assembled from nanosheets robust for the selective electrooxidation of furfuryl alcohol [ J ]. Green Energy & Environment, 2023, 8(3):874–882.
- [8] Gao Y, Fan S, Zhu B, *et al.* Cobalt and nitrogen co-modified graphitic carbon: A bifunctional catalyst for thermocatalytic and electrocatalytic oxidation of HMF to FDCA [ J ]. Catalysis Today, 2024, 440:114847.
- [9] Wang N, Wang L, Yang S, *et al.* Interface engineering of Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>-Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>/Cu heterogeneous electrocatalyst for enhanced HMF oxidation [ J ]. Applied Surface Science, 2025, 689:162401.
- [10] Heins S P, Schneider P E, Speelman A L, *et al.* Electrocatalytic oxidation of alcohol with cobalt triphosphine complexes [ J ]. ACS Catalysis, 2021, 11(11):6384–6389.
- [11] Yang W, Zhang Y, Feng H, *et al.* Novel graphene-supported palladium complex catalyst with flexible-bridge-chains and its recycling carbon-carbon cross-coupling activity [ J ]. Applied Catalysis A: General, 2022, 646:118852.
- [12] Kumar R, Srivastava A. Anion binding-induced white light emission using a water-tolerant fluorescent molecular tweezer [ J ]. Chemistry-A European Journal, 2016, 22(10):3224–3229.
- [13] 李昭言. 镍基催化剂电催化氧化有机底物性质研究 [ D ]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [14] Tan B, Hickey D P, Milton R D, *et al.* Regeneration of the NADH cofactor by a rhodium complex immobilized on multi-walled carbon nanotubes [ J ]. J Electrochem Soc, 2014, 162(3):H102–H107.
- [15] 张培立. 吡啶—胺五配位钴、镍、铜配合物的水相电催化还原产氢性质研究 [ D ]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [16] Mohona T M, Ye Z, Dai N, *et al.* Adsorption behavior of long-chain perfluoroalkyl substances on hydrophobic surface: A combined molecular characterization and simulation study [ J ]. Water Research, 2023, 239:120074.
- [17] Kubota S, Maruyama T, Nishikiori H, *et al.* Fluorescence properties of aromatic amine adsorbed on metallic and semiconducting single-walled carbon nanotubes [ J ]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2011, 218(2/3):226–230.
- [18] Streeter I, Wildgoose G G, Shao L, *et al.* Cyclic voltammetry on electrode surfaces covered with porous layers: An analysis of electron transfer kinetics at single-walled carbon nanotube modified electrodes [ J ]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 133(2):462–466.
- [19] Faulkner L R, Bard A J. Electrochemical methods: Fundamentals and applications [ M ]. John Wiley and Sons, 2002.
- [20] Singh C, Mukhopadhyay S, Das S K. Polyoxometalate-supported Bis(2,2'-bipyridine) mono(aqua) nickel( II ) coordination complex: An efficient electrocatalyst for water oxidation [ J ]. Inorganic Chemistry, 2018, 57(11):6479–6490.
- [21] Jiang N, You B, Sheng M, *et al.* Electrodeposited cobalt-phosphorous-derived films as competent bifunctional catalysts for overall water splitting [ J ]. Angewandte Chemie, 2015, 127(21):6349–6352.
- [22] Shen J, Wang M, He T, *et al.* Influence of the backbone of N-5-pentadentate ligands on the catalytic performance of Ni( II ) complexes for electrochemical water oxidation in neutral aqueous solutions [ J ]. Chem Commun, 2018, 54(65):9019–9022.
- [23] Wang J, Liu X, Li Z. Acceptorless photocatalytic dehydrogenation of furfuryl alcohol (FOL) to furfural (FAL) and furoic acid (FA) over Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/CdS under visible light [ J ]. Chemistry-An Asian Journal, 2021, 16(19):2932–2938.
- [24] Hu H, Wang J, Tao P, *et al.* Stability of single-atom catalysts for electrocatalysis [ J ]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(11):5835–5849. ■
- .....
- (上接第 118 页)
- [12] Yang L, Chang L, Hu Y, *et al.* An autonomous soft actuator with light-driven self-sustained wavelike oscillation for phototactic self-locomotion and power generation [ J ]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(15):1908842.
- [13] Li Z, Myung N V, Yin Y. Light-powered soft steam engines for self-adaptive oscillation and biomimetic swimming [ J ]. Science Robotics, 2021, 6(61):eabi4523.
- [14] Hu Z, Li Y, Lv J A. Phototunable self-oscillating system driven by a self-winding fiber actuator [ J ]. Nature Communications, 2021, 12(1):3211.
- [15] Xu L, Xu Y, Li L, *et al.* MXene-based soft actuators with phototropic self-sustained oscillation for versatile applications in micro robotics [ J ]. Advanced Functional Materials, 2024, 35(4):2414338.
- [16] Zhao Y, Li Q, Liu Z, *et al.* Sunlight-powered self-excited oscillators for sustainable autonomous soft robotics [ J ]. Science Robotics, 2023, 8(77):eadf4753.
- [17] Zhao Y, Xuan C, Qian X, *et al.* Soft phototactic swimmer based on self-sustained hydrogel oscillator [ J ]. Science Robotics, 2019, 4(33):eaax7112.
- [18] Nakamura S, Yamanaka M, Oishi Y, *et al.* Light-driven autonomous swing of multi-layered hydrogel [ J ]. RSC Advances, 2022, 12(52):33612–33616.
- [19] Zhao Y, Lo C Y, Ruan L, *et al.* Somatosensory actuator based on stretchable conductive photothermally responsive hydrogel [ J ]. Science Robotics, 2021, 6(53):eabd5483.
- [20] Zhang L, Wang K, Weng S, *et al.* Super strong and tough anisotropic hydrogels through synergy of directional freeze-casting, metal complexation and salting out [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2023, 463:142414. ■