

随心而变——多响应超疏水智能致动材料

苏玺元, 胡震临, 樊焯, 刘先渊*, 鹿现永*

北京航空航天大学化学学院, 北京 102206

摘要: 智能致动器具有将外界刺激转化为机械运动的能力, 在软体机器人、人造肌肉、传感器、智能皮肤等领域具有广阔的应用前景。本新创实验通过在聚酰亚胺高分子膜表面涂覆聚二甲基硅氧烷预聚体, 并喷涂石墨烯乙醇分散液, 制备出一种可以利用高分子材料的热膨胀系数差异对光、电、热等刺激产生响应的超疏水智能材料。从中国传统剪纸艺术和仿生结构获得灵感, 将所得超疏水材料加工成爪形构造和可变形集水装置, 利用材料的超疏水性质实现其在强酸, 强碱等复杂应用环境下的稳定运行。此外, 通过调整刺激电流大小实现了材料致动能力的智能化编程, 进一步提升了新创实验的可控性和应用性。本新创实验融汇无机化学、高分子化学、仪器分析和材料化学等多个化学学科, 实现理论与应用的巧妙衔接。所选用的实验原料无毒且易得, 符合绿色化学的要求, 体现了实验的可持续性。通过开发新型材料的制备技术, 有效提升了材料的致动性能, 极大地拓展了材料的应用场景。该新创实验现象明显, 操作过程趣味性强, 有助于激发学生的科研兴趣, 提高学生的知识应用水平, 培养学生的创新意识, 同时提升学生的综合素质。该实验对学生的学习和成长具有积极的促进作用。

关键词: 智能材料; 高分子膜; 超疏水; 多响应

中图分类号: G64; O6

Change as You Want: Multi-Responsive Superhydrophobic Intelligent Actuation Material

Xiyuan Su, Zhenlin Hu, Ye Fan, Xianyuan Liu*, Xianyong Lu*

College of Chemistry, Beihang University, Beijing 102206, China.

Abstract: Intelligent actuators have garnered significant attention for their applications in diverse fields such as soft robotics, artificial muscles, sensors, and intelligent skins. In this innovative experiment, we successfully synthesized a superhydrophobic actuation material by employing a layer-by-layer assembly approach, incorporating polyimide film (PI), polydimethylsiloxane (PDMS), and graphene. This material exhibits responsive behaviors to stimuli including light, electricity, and heat. Drawing inspiration from traditional Chinese paper-cutting techniques, we fashioned claw-shaped structures and deformable water collection devices, enabling intelligent programming even in challenging environments such as strong acids and alkalis. Serving as an effective educational tool, this experiment facilitates students' understanding of fundamental scientific principles across multiple disciplines, spanning inorganic and polymer chemistry, instrumental analysis, and materials science, while emphasizing the seamless integration of theory and application. The selection of raw materials, which are non-toxic, cost-effective, and eco-friendly, aligns with the principles of green chemistry, underscoring the experiment's sustainability. Notably, the experimental phenomenon is readily observable, and the operation process is engaging, fostering students' enthusiasm for scientific research and innovation. This experiment offers a stimulating and enriching learning experience, nurturing students' curiosity, and proficiency in scientific inquiry.

收稿: 2023-11-20; 录用: 2024-02-04; 网络发表: 2024-04-01

*通讯作者, Emails: lxyuan323@163.com (刘先渊); xylyu@buaa.edu.cn (鹿现永)

基金资助: 北京航空航天大学教改项目(2022-210)

Key Words: Actuating materials; Polymer membrane; Superhydrophobic; Multiple responses

1 引言

智能致动材料能够对光照、湿度、溶剂、温度、电场、pH和磁场等外部刺激做出响应，在软体机器人、人造肌肉、传感器、智能皮肤、智能开关、信息加密、红外动态显示、伪装和温度调节以及人机界面等领域具有广泛应用前景，因此受到了材料学家的广泛关注。智能材料的设计制造涉及机械、物理、材料等多个学科，而化学是上述学科联系的桥梁。本新创实验目的是增加智能材料的制备内容，将实验教学工作与科研工作联系起来，填补现有本科综合教学实验中应用领域的空白，从而实现培养创新型人才的目标。综合性实验有助于学生全面了解智能材料的制备和响应机理，拓展其实验技能和科学思维。通过涉及多个学科的内容，学生能够更好地理解智能材料在不同领域的应用和潜在价值。

特定液体样本的无损转移有着重大意义，在水收集与水输送^[1,2]、油水分离^[3,4]、化学微反应^[5,6]与细胞生物工程^[7,8]中有着重大应用前景。然而，目前的主要技术难点在于液滴的精确收集与移动。传统技术路线主要依赖于特定刚性功能平面来支持液滴。例如，江雷院士团队^[9]通过共价接枝制备了一种各向异性的光滑表面，该表面对不同的水滴和气泡具有优异的各向异性滑动行为。尽管该方法成本较低，并能够对特定样本进行功能化定制，但该方法实际控制难度大，操作精度要求高，限制了液滴的空间移动能力，使样本运动轨迹仅局限于有限的功能区域内，这给实际应用带来极大不便。为此，通过对材料表面进行针对性定制，使其可以灵活应用于多种环境。同时，智能致动材料可形变的特性使其可以在空间中转移液滴等微型样品，满足不同实验与应用环境的操作需求。

本实验创作灵感基于中国传统剪纸，以聚酰亚胺(Polyimide, PI)薄膜作为基底，表面刮涂聚二甲基硅氧烷预聚体(Polydimethylsiloxane, PDMS)，并喷涂石墨烯(Graphene)分散液，仿生制备了一种超疏水多响应智能驱动复合材料。复合材料中的石墨烯组分赋予材料的超疏水界面性能、焦耳加热性质，同时结合聚合物材料的膨胀性质控制，实现智能材料对光、电、热等刺激做出快速响应。

本实验涉及无机化学、高分子化学、仪器分析、材料化学等多个化学学科(图1)，包括材料的制备、表征和应用三个部分。本新创实验过程完整，要求学生综合运用化学基础知识与实验技能，能够巩固学生基础知识，提高学生知识应用水平。同时，本实验紧密联系教学与科研，实现了科教融合，有利于引导学生了解科学前沿内容，培养科学思维和合作意识，激发科研兴趣，并能够促进学生创新意识和创新能力的培养，提高学生的综合素质。

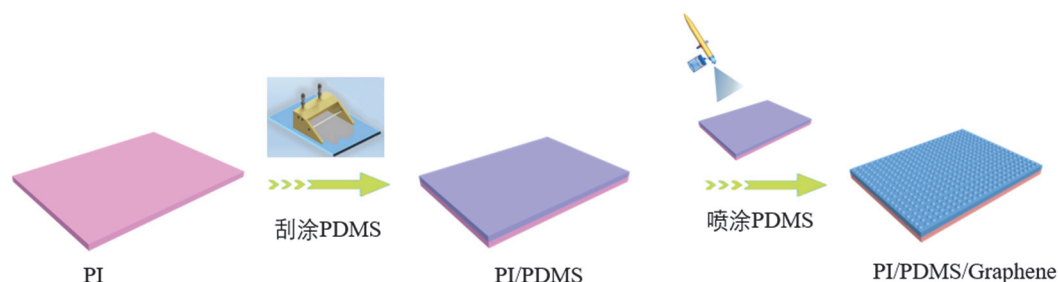


图1 PI/PDMS/Graphene复合材料的制备流程图

2 实验部分

2.1 实验原理

高分子材料通常具有较大的热膨胀系数^[10]。当紧密接触的两种不同高分子薄膜在高温下同时发生热膨胀时，由于热膨胀系数和热应力的不同，会导致该结构向热膨胀系数相对较小的一侧弯曲，并且在降温后随着薄膜的收缩恢复原状，从而达到热响应的致动效果。同时，可以利用薄膜的导电

性, 根据焦耳定律将电能转换为热能, 从而实现电热响应。此外, 高能量的光也能使材料温度升高, 从而实现光热响应。

在本新创实验中, 笔者利用上述原理设计制备了一种PI/PDMS/石墨烯复合薄膜, 旨在实现智能多响应的实验效果。聚酰亚胺(Polyimide, PI)薄膜是一种黄色透明薄膜, 有突出的耐高温、耐腐蚀和力学性能; 聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)是一种液体硅橡胶。液体橡胶是浇筑型弹性体, 较易加工。在常温下, 未固化的PDMS是无色、无臭和透明的高粘度液体, 因此, 可以将PDMS预聚体利用刮涂机均匀刮涂在PI薄膜表面, 并在固化之前将石墨烯分散液均匀喷涂在PDMS一侧的表面(图2), 这样确保制备的薄膜材料具有良好的超疏水性能、界面性能和导电能力。

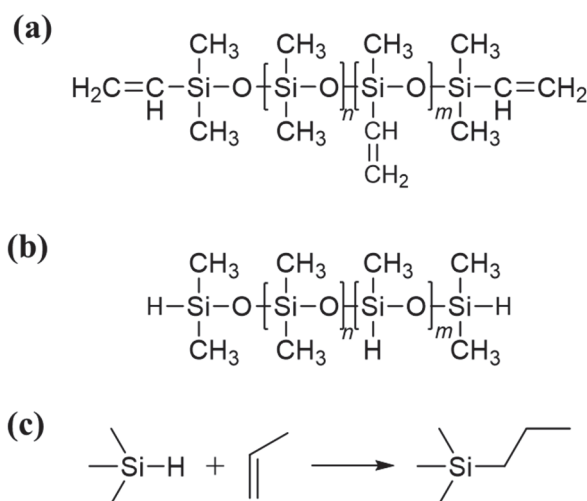


图2 乙烯基聚硅氧烷(a)、含氢聚硅氧烷(b)及硅氢加成反应(c)的示意图

荷叶表面具有一种“乳突”微纳结构^[11], 由于其凹凸不平, 可以在与水滴接触时在接触面储存一层空气, 使得水滴只能与荷叶表面的若干个点接触, 无法浸润整个表面。石墨烯分散液喷涂在复合膜表面, 也可以形成类似荷叶表面的微观结构, 提高材料的疏水性, 使材料能够应用在更多复杂场景之中。

实验中使用的PDMS是商品化的液体硅橡胶, 以预聚体A和固化剂B的形式分开存放。预聚体A是分子量在10000到20000左右的乙烯基聚硅氧烷。固化剂B是含氢聚硅氧烷。在使用时, 需将预聚体A和固化剂B按质量比10:1混合均匀, 并在加热条件下固化^[12], 发生硅氢加成反应, 如图2所示。由于硅的电负性较小(1.90), 氢的电负性较大(2.20)^[13], 硅的氧化数为+1, 带正电, 氢的氧化数为-1, 带负电。受此影响, Si-H键能与C=C键发生加成反应^[14-17]。由于预聚体A和固化剂B上含有较多反应位点, 反应后能形成网状结构, 实现了PDMS的固化。

2.2 实验试剂

本文所用主要实验试剂见表1。

表1 实验所用试剂

药品名称	生产公司	药品名称	生产公司
聚酰亚胺(PI)膜	深圳市昌达盛电子有限公司	银箔	云南华雄环保科技有限公司
PDMS (道康宁184)	美国陶氏化学公司	液氮	张家口创启气体有限公司
石墨烯	上海麦克林生化科技有限公司	导电胶	北京新兴百瑞技术有限公司
无水乙醇	现代东方(北京)科技发展有限公司	金靶材	南昌瀚宸新材料科技有限公司
银线	云南华雄环保科技有限公司		

2.3 实验仪器

本文所用主要实验仪器见表2。

表2 实验所用仪器

仪器名称	型号	生产公司
电子分析天平	AL-204	梅特勒-托利多(上海)仪器公司
超声波细胞破碎仪	SCIENTZ-IIID	宁波新芝生物科技
电热鼓风干燥箱	PCD-D8000	中仪国科(北京)科技有限公司
接触角测量仪	JC2000C1	上海中晨数字技术设备有限公司
扫描电子显微镜	JSM-7500F	日本电子株式会社
近红外加热灯	T16	佛山益辰电子科技有限公司
直流稳压电源	GPS3010D	深圳市固测电子科技有限公司
气泵	AF186	宁波浩盛气动机械有限公司
喷枪	HD130	宁波浩盛气动机械有限公司
刮刀涂覆机	MSK-AFA-L800-H	合肥科晶材料技术有限公司
手持测温热像仪	HM-TPH21Pro-3AQF	杭州微影软件有限公司
螺旋测微器	IP65	桂林广陆数字测控有限公司

2.4 实验步骤

2.4.1 PI/PDMS薄膜的制备

称取15.00 g PDMS预聚体A和1.50 g固化剂B，置入离心管中均匀混合。用玻璃棒搅拌混合物10 min，再使用100 W的超声分散器分散5 min，最终得到透明粘稠液体。剪取10.00 cm × 20.00 cm的PI薄膜，并用透明胶带将PI膜固定在玻璃板上，用螺旋测微器测量PI膜和玻璃板的总厚度，然后利用刮涂机均匀涂覆PDMS液体在PI薄膜上，并调节刮涂机刀具使PDMS层的厚度维持在150 μm，得到未固化的PI/PDMS薄膜。

2.4.2 石墨烯分散液的制备及喷涂

电子分析天平称量0.25 g石墨烯粉末，用量筒量取250 mL乙醇，然后将它们混合并将其放入超声波细胞破碎仪中，以800 W的功率超声处理3 min，最后得到均匀的石墨烯分散液。随后将得到的石墨烯分散液放入气动喷枪的料槽中，气泵的压力控制在400 kPa左右，将石墨烯均匀地喷涂在PI/PDMS薄膜的PDMS一侧。

2.4.3 PI/PDMS/Graphene薄膜的加工和固化

将PI/PDMS(预聚)/Graphene复合薄膜裁剪成两个10.00 cm × 10.00 cm大小的薄膜，将其中一个薄膜裁剪成若干8.0 mm × 50.0 mm大小的长条和3个3.00 cm × 3.00 cm大小的小尺寸复合膜。这些裁剪后的薄膜分别粘贴在50 mL、100 mL、200 mL烧杯内壁，以保证固化后在常温下薄膜能够具有不同的曲率。将另一个10.00 cm × 10.00 cm大小的薄膜放在玻璃板上。将烧杯和玻璃板置于鼓风干燥箱中，160 °C固化2 h，最后得到PI/PDMS/Graphene复合薄膜。

2.4.4 PI/PDMS/Graphene薄膜爪形结构的构筑

笔者从中国传统剪纸中获得设计与制造灵感，将PI/PDMS/Graphene薄膜剪成爪形结构。爪形结构中心为正六边形，边长为5.0 mm，外接等腰梯形，梯形上底长5.0 mm，下底长10.0 mm，高为40.0 mm，相邻两高线夹角为60.0°。

2.4.5 PI/PDMS/Graphene结构表征

取一扫描电镜载物台，并在顶面和侧面贴上导电胶。将1条8.0 mm × 50.0 mm大小PI/PDMS/Graphene长条裁剪成尺寸为4.0 mm × 50.0 mm的两条薄膜。并将其中一条薄膜置于50 mL烧

杯中。向烧杯中倒入液氮，使复合薄膜材料低温脆化，迅速用镊子取出并将材料脆断得到结构完整的断面。将断面朝上，贴在载物台的侧面。将另一PI/PDMS/Graphene长条剪成小块，贴在载物台的顶部。对样品进行喷金处理，在5 kV电压下对PI/PDMS/Graphene表面和截面进行SEM表征。

2.4.6 薄膜疏水性的界面性能表征

将固化好的8.0 mm × 50.0 mm大小的PI/PDMS/Graphene长条用双面胶固定在载玻片上，将载玻片在接触角测量仪上固定，用微量进样器取5 μL去离子水滴加在薄膜上，测量并记录接触角的大小。另取5 μL去离子水滴加在薄膜上，缓慢匀速调整平台与水平面的夹角，记录水滴恰好滑落时平台与水平面的夹角，即为滚动角。

2.4.7 PI/PDMS/Graphene薄膜电响应表征

将固化好的8.0 mm × 50.0 mm大小的PI/PDMS长条两侧连接直径为0.05 mm的银质导线，用0.02 mm厚的银箔固定。导线两侧分别接在30 V直流电源的两极，打开电源20 s，关闭电源30 s，循环10次。用热成像仪测量通电前后薄膜表面温度变化，并记录弯曲薄膜在通电前后的曲率变化。

2.4.8 PI/PDMS/Graphene薄膜热响应表征

将制备好的尺寸为3.00 cm × 3.00 cm薄膜、8.0 mm × 50.0 mm爪形构造长条分别放置在桌面上，用近红外加热灯在300 W功率状态下，距离材料10.00 cm的高度，以15400 Lux光强对材料进行加热，材料响应迅速。笔者通过开关红外灯研究样品的热响应性能。

2.4.9 PI/PDMS/Graphene薄膜耐酸碱表征

通过双面胶将玻璃棒一端与爪形结构中心相连。用近红外加热灯加热玻璃棒上的爪形结构使其展开，并抓取放置在桌面的泡沫块，停止加热，待爪形构造收缩后将泡沫块提起，一段时间后再次加热，释放泡沫。配制质量分数为25%的HCl溶液(pH < 0.5)和NaOH溶液(pH > 14)。将爪形构造在HCl溶液中浸泡10 min，取出晾干后进行抓取泡沫块操作。将材料用离子水冲洗干净，再置于NaOH溶液中浸泡10 min后取出晾干，再次重复抓取泡沫块的操作。

2.4.10 可变形集水装置致动器的构筑

本实验还设计制作了一款基于PI/PDMS/Graphene薄膜的可变形集水装置。装置由载玻片与PI/PDMS/Graphene薄膜组成，载玻片上使用双面胶纵向固定一片弧形薄膜以控制水滴流向，并在载玻片末端使用双面胶横向固定，另一弧形薄膜用于集水。在没有信号刺激的情况下，末端薄膜卷起形成沟槽，阻拦水珠滚动，完成集水。当光信号刺激施加在装置上时，末端薄膜发生响应展开，释放水珠。信号刺激结束后，末端薄膜自行恢复。通过这一装置，材料在不同条件下的响应行为，展示其超疏水性和致动能力的特性。

3 结果与讨论

3.1 PI/PDMS/Graphene薄膜的结构表征

图3为PI/PDMS薄膜的扫描电子显微镜(SEM)结果。SEM图显示PI层和PDMS涂层之间分界明显，这有利于增大两种材料因热膨胀系数不同对薄膜弯曲产生的影响，从而使高温下薄膜的致动效果更加明显。同时，石墨烯分散液与PDMS涂层紧密混合，大大增强了薄膜导电性，防止了石墨烯在薄膜伸缩过程中的脱落，进而提高了薄膜材料的力学性能。另外，石墨烯的加入使薄膜的表面形成了类似于荷叶表面的乳突状微观结构^[11]和低表面能表面，赋予了复合薄膜表面的疏水性。这些优异的特性使得所制备的复合薄膜在实验中能够表现出智能电响应的效果，并在可变形集水装置中展示出良好的超疏水性与致动能力。

3.2 PI/PDMS/Graphene薄膜疏水性表征

通过接触角测试仪对PI/PDMS/Graphene薄膜材料界面性质进行测试表征。测试结果如图4所示，PI/PDMS/Graphene薄膜的接触角达到了160.2°，而滚动角为6.7°。一般认为，液体在材料表面接触角大于150.0°，且滚动角小于10.0°时，可认定为低黏附超疏水材料。因此，本实验设计的复合薄膜材

料成功达到了超疏水表面的标准，并展现出优异的超滑性能。这些性能将为智能电响应和可变形集水装置的实验效果提供有力的支持，为智能材料在液体样本收集与转移、人造肌肉和软体机器人等领域的应用奠定坚实的基础。

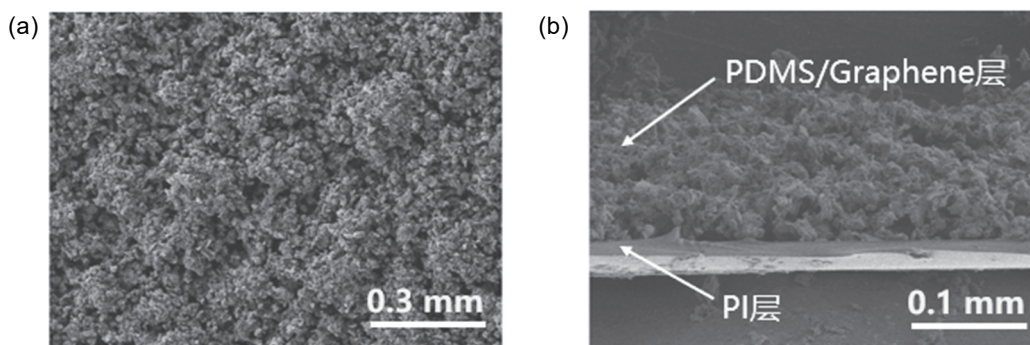


图3 PI/PDMS/Graphene薄膜截面(a)和石墨烯表面(b)的SEM图

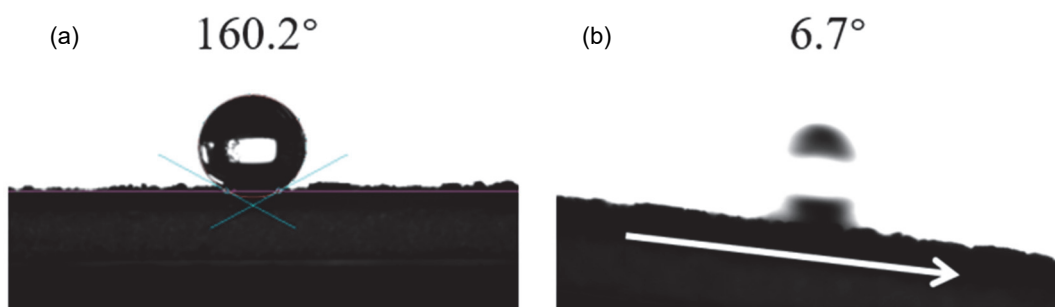


图4 PI/PDMS/Graphene薄膜的接触角(a)和滚动角(b)

3.3 PI/PDMS/Graphene薄膜的多响应致动性能

PI/PDMS/Graphene薄膜对多种刺激信号快速响应。在对热响应进行测试和表征时，该材料能够迅速、均匀地吸收热量，使表面温度达到约210 °C。同时，薄膜会在短时间内由卷曲状态迅速伸平，直至完全展开(图5)。复合薄膜材料热响应现象是由于PDMS与PI两种材料的热膨胀系数不同。在加热至相同温度的条件下，PDMS膨胀程度相较于PI更大，材料便会向PI方向展开。这种材料的快速热响应特性使其在智能开关、温度调节和人造肌肉等具有广泛应用潜力。

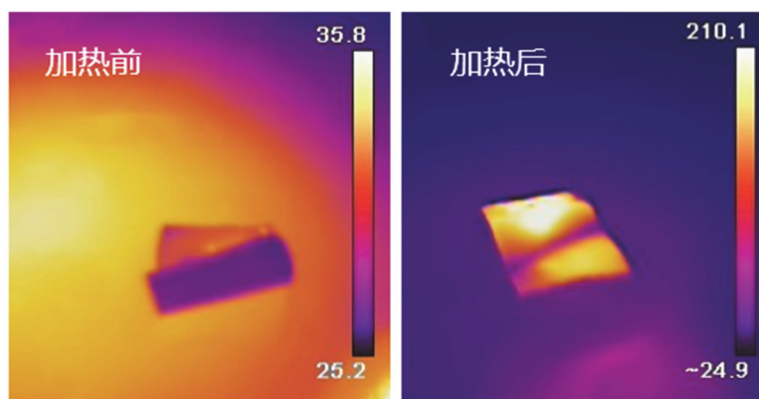


图5 热成像仪下PI/PDMS/Graphene薄膜对热量的吸收

石墨烯层的优异吸光性能使得材料能够快速光热能量转化。在室内光强为164 Lux时，材料呈现一定曲率。然而，当近红外灯打开，距光源10.00 cm处的光强增至15400 Lux时，薄膜会立即伸展平铺。在维持光照30 s后撤掉光源，材料迅速恢复原状，表明材料对光信号非常敏感，能够快速做出响应致动。此外，笔者从中国传统剪纸中获得灵感，设计了不同大小、不同形状的材料进行光响应测试，并发现它们均表现出良好的形变性能(图6)。这种光响应特性使得该复合薄膜材料在光动态显示、信息加密和人机界面等领域具有广泛应用前景，并有望为软体机器人、传感器和智能皮肤等技术领域提供重要支持。



图6 近红外光照下PI/PDMS/Graphene薄膜的光响应致动

在电致动测试中，笔者将8.0 mm × 50.0 mm的薄膜接入电路。在直流电压为30 V的条件下，由于石墨烯涂层的优异导电性，复合薄膜材料产生焦耳热效应，使其发生弯曲形变。在该实验中，笔者测量了材料的弯曲程度：将薄膜两侧末端切线与水平面的夹角记为弯曲角，结果显示两侧弯曲角约为60°，表明材料表现出优异的电热致动性能(图7)。而通过对不同电压、电流和导电材料组成的调整，还可以进一步优化和定制材料的响应性能，满足不同实际应用场景的需求。

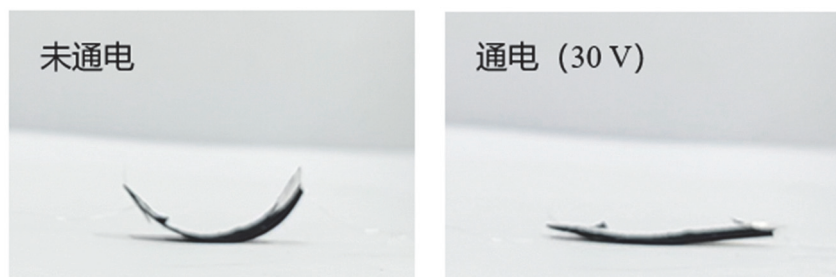


图7 通电前后PDMS的电响应致动

在上述实验中，笔者进行了多次致动测试，并观察到材料在多次形变后并未表现出明显的响应速度变慢或其他疲劳现象，这充分说明本材料具有较好的抗疲劳性能。这种抗疲劳性能使得该复合材料在实际应用中可以实现重复使用，赋予其高实际应用价值。特别是通过设计的爪形结构，我们可以实现轻小物体的抓取(图8)。该功能为材料在实际应用中增加了更多的可能性，例如在微尺度物体操作、不接触远程操作、传感器应用、生物医学领域等方面具有广泛的应用潜力。

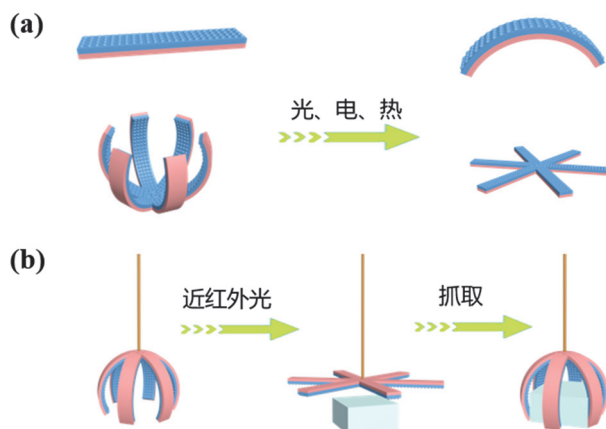


图8 (a) 光、电、热刺激下致动材料的致动效果；
(b) 爪形结构致动器抓取物体示意图

3.4 PI/PDMS/Graphene薄膜的耐酸碱碱性

在进行爪形结构的对照实验之前，笔者先以热响应致动实验作为对照组，并观察到材料表现出良好的热响应性能，成功抓取了轻质泡沫块。随后，笔者对爪形结构进行了两组对照实验(图9)。在第一组实验中，将材料浸泡于 $\text{pH} < 0.5$ 的盐酸溶液中，浸泡10 min后取出并用去离子水冲洗，然后重复上述热响应致动实验。实验结果显示，材料的响应性能与浸泡前相比并未出现明显的变化。在第二组实验中，笔者取同批次的材料制成另一爪形结构，并将其浸泡于 $\text{pH} > 14$ 的氢氧化钠溶液中，同样浸泡10 min后取出并洗净，然后进行重复热响应致动实验。实验结果同样显示，材料的响应性能与浸泡前相比未出现明显的变化。这些对照实验验证了材料具有极佳的耐酸碱腐蚀能力，并且在不同环境中表现出稳定的性能。这意味着该材料可适用于多种复杂环境，并在实际应用中展现优异的稳定性和可靠性，为其解决各类实际工程问题提供了可靠保障。

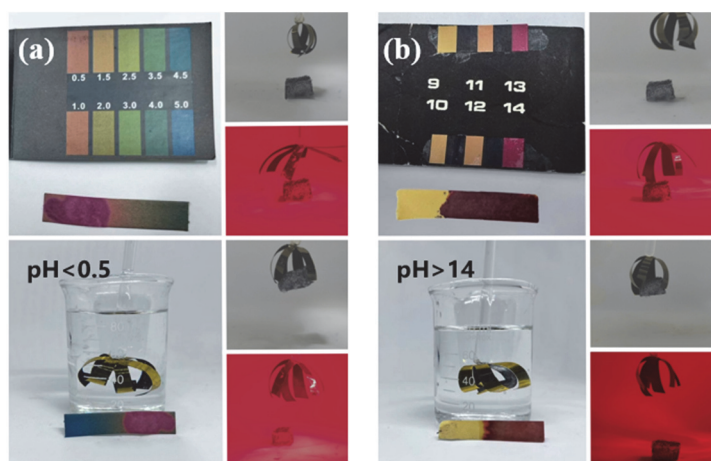


图9 爪形结构在强酸(a)和强碱(b)溶液中浸泡与抓取泡沫块效果

3.5 可变形集水装置模型的测试

在构建完毕的集水装置上使用铁架台进行固定。在未施加光刺激之前，装置末端的薄膜会卷起，形成凹槽。然后向集水装置的顶部滴加液滴，滴加的水珠会被引导至末端处收集。接下来，开启近红外加热灯，当装置接收到近红外光之后，末端薄膜会发生光响应致动，迅速展平，释放收集的水珠。在液滴释放完毕后，关闭近红外加热灯，末端薄膜会迅速卷曲，集水装置的形貌会复原，完成

整个集水循环(图10)。通过这一实验过程可以直观地展示材料的超疏水性和光响应致动能力。集水装置的设计采用了独特的爪形结构,使其能够实现轻小物体的抓取,并且在光刺激下能够灵活地收集和释放水珠。

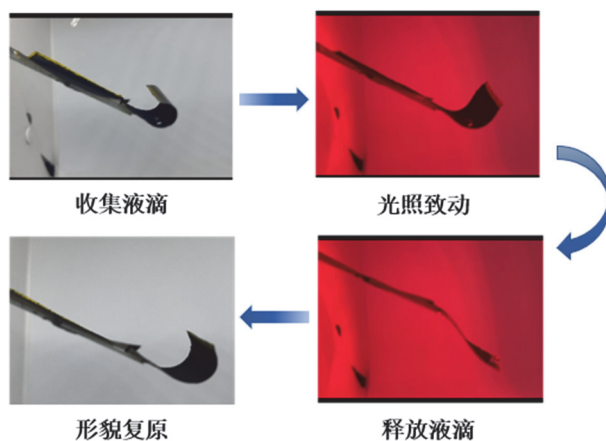


图10 可变集水装置在光信号下的工作流程

综上所述,经过设计性材料制备和智能响应性研究,PI/PDMS/Graphene薄膜在热、电、光响应方面表现出迅速响应,并且具有一定的编程可控性。在实验中,笔者成功实现了预期的设计效果,材料的致动表现准确灵活,机械强度也表现稳定,这使该材料在实际应用中具有较高的潜在价值。该复合材料可以适用于多种不同场景,以满足不同应用需求。在水收集与输送、油水分离、化学反应以及细胞生物工程等领域,该材料的智能响应性将能够发挥重要作用。同时,材料的抗疲劳性和编程可控性为其在软体机器人、传感器和智能开关等领域的应用提供了良好的基础。相信这种新型材料将会在未来的科学研究和工程应用中发挥重要作用,为人类社会的发展带来更多的便利和创新。

4 结语

本新创实验成功制备了一种多响应超疏水智能致动材料,其由具有不同膨胀系数的两种高分子膜和石墨烯组成,对热、光、电等信号都表现出良好的响应效果。实验结果显示该材料的响应速度快、驱动力小、致动幅度大、回复速度快,且循环稳定性优良,同时具有良好的力学性能,展示了其在实际应用中的潜在价值。另外,为了进一步拓展该材料的应用场景,笔者设计了可变形集水装置,将超疏水特性与致动性有效结合,为该材料的实际应用提供了更多可能。该实验的优势不仅在于其涉及化学学科的多个方面,还能锻炼学生实验技能,提高学生知识应用水平,并深化对相关知识的理解。此外,该实验还紧密联系教学与科研,有助于引导学生了解科学前沿内容,同时激发学生对科研的兴趣。实验原料易得且无毒,实验过程安全,符合绿色化学的要求,适合作为8个学时内完成的本科生综合实验项目。在实际的教学过程中,笔者建议将实验分为两个部分进行,第一部分约需4学时,用于介绍实验原理、方法、仪器,并进行材料的制备。第二部分约需4学时,在此期间可以安排学生进行材料表征和集水装置的组装。此外,在这两个部分之间还可利用休息时间将PI/PDMS/Graphene薄膜放入鼓风干燥箱中固化,此步骤需约2 h。共计8学时。此外,学生在实验中自行进行材料形状编辑,制造出基于本材料的其他智能驱动器件,达到培养其运用化学理论知识的综合能力。不同高校可以根据自身情况对实验进行模块化设计,以满足不同层次的教学需求。总体而言,该实验的设计具有很好的教学效果,可为学生提供丰富的实践机会,并引发学生对材料科学及相关领域的深入思考和兴趣。

5 创新性 & 特色说明

(1) 紧密联系教学与科研, 有助于引导学生关注科学前沿, 培养学生对科研的兴趣。实验中的材料设计与响应性研究与当今科学前沿密切相关, 通过让学生了解并参与科研过程, 可以激发学生对于前沿科学问题的兴趣, 促使他们更深入地探索和学习。

(2) 实验涉及材料的制备、表征与应用, 过程完整, 有助于提升学生的综合能力。学生在实验过程中不仅要学习材料的制备方法和实验技巧, 还需要掌握材料表征技术和数据分析方法。通过综合运用这些知识和技能, 学生能够全面理解材料的性质和特点, 并能将所学知识应用于实际应用中, 提升了他们的综合能力。

(3) 实验现象明显, 实验过程富有趣味性, 有助于激发学生对化学的兴趣。实验中的热、光、电响应等现象都是直观且引人入胜的, 这样的实验设计能够吸引学生的兴趣, 让他们更主动地参与到实验中, 加深对化学知识的理解和掌握。

综上所述, 本新创实验设计在培养学生科研兴趣、提升学生综合能力以及激发学生对化学的兴趣方面都具有显著的优势。通过这样有趣且富有挑战性的实验项目, 学生能够更深入地了解化学科学, 并培养其对科学的好奇心和热爱, 为未来的学习和科研奠定坚实基础。

参 考 文 献

- [1] Liu, M. J.; Wang, S. T.; Jiang, L. *Nat. Rev. Mater.* **2017**, *2*, 17036.
- [2] Nan, L.; Lai, M. Y. A.; Tang, M. Y. H.; Chan, Y. K.; Poon, L. L. M.; Shum, H. C. *Small* **2020**, *16*, 1902889.
- [3] Zheng, X.; Guo, Z. Y.; Tian, D. L.; Zhang, X. F.; Jiang, L. *Adv. Mater. Interfaces* **2016**, *3*, 1600461.
- [4] Zhou, C. L.; Cheng, J.; Hou, K.; Zhao, A.; Pi, P. H.; Wen, X. F.; Xu, S. P. *Chem. Eng. J.* **2016**, *301*, 249.
- [5] Yang, Y.; Li, X. J.; Zheng, X.; Chen, Z. Y.; Zhou, Q. F.; Chen, Y. *Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1704912.
- [6] Tan, Y. L.; Hu, B. R.; Chu, Z. Y.; Wu, W. J. *Adv. Funct. Mater.* **2019**, *29*, 1900266.
- [7] Zhang, Y.; Wang, T. H. *Adv. Mater.* **2013**, *25*, 2903.
- [8] Gao, Z. F.; Liu, R.; Wang, J. H.; Dai, J.; Huang, W. H.; Liu, M. J.; Wang, S. T.; Xia, F.; Jiang, L. *Chem* **2018**, *4*, 2929.
- [9] Wang, X.; Wang, Z. B.; Heng, L. P.; Jiang, L. *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30*, 1902686.
- [10] 朱梦冰, 吕亮, 蒋远媛, 王少峰, 王晓东, 黄培. *绝缘材料*, **2007**, No. 6, 53.
- [11] Wang, S. T.; Feng, L.; Jiang, L. *Adv. Mater.* **2006**, *18* (6), 767.
- [12] 米国桥, 幸松民. *有机硅产品合成工艺及应用*. 北京: 化学工业出版社, 2010: 656–662.
- [13] 宋天佑, 徐家宁, 程功臻. *无机化学*. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [14] Henkensmeier, D.; Abele, B. C.; CaNdussio, A.; Thiem, J. *Macromol. Chem. Phys.* **2004**, *205* (14), 1851.
- [15] Zhang, Z.; Sherlock, D.; West, R.; Amine, K.; Lyons, L. J. *Macromolecules* **2003**, *36* (24), 9176.
- [16] Wagner, R. *Appl. Organomet. Chem.* **1998**, *12* (1), 47.
- [17] Dworak, D. P.; Soucek, M. D. *Macromolecules* **2004**, *37* (25), 9402.