

温敏光子晶体及自适应结构色迷彩器件制备

王超¹, 牛文斌^{1*}, 李胜铭^{2*}, 王云朋¹, 张淑芬¹

(1. 大连理工大学 精细化工国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 创新创业学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以 *N,N*-二甲基十二烷基氧化胺 (C₁₂DMAO) 为基本单元, 将 *N*-异丙基丙烯酰胺 (NIPAM)、双丙酮丙烯酰胺 (DAAM)、丙烯酰胺 (AM) 在紫外聚合的条件下形成 PNIPAM-*co*-PDAAM-*co*-PAM 交联网络, 制备了一种快速响应的温敏光子晶体水凝胶 C₁₂DMAO/PNIPAM-*co*-PDAAM-*co*-PAM。然后, 采用硅橡胶对制备的温敏光子晶体水凝胶进行包覆, 将包覆的温敏光子晶体水凝胶与集成电加热板复合, 构建自适应结构色器件。通过反射光谱、红外成像对器件进行测试。结果表明, 通过 NIPAM、DAAM、AM 比例的调整, 水凝胶的响应温度可在 4.3~55.0 °C 范围内调节。当 NIPAM 0.20 g、DAAM 0.20 g、AM 0.05 g、MBAA 50 mg, 制备的自适应结构色器件可在 22~30 °C 之间调节温度, 结构色器件可以实现快速的颜色变化。

关键词: 温敏性; 结构色; 水凝胶; 光子晶体; 迷彩防伪; 功能材料

中图分类号: O734; TQ427.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2022) 08-1619-07

Preparation of temperature-sensitive photonic crystals and self-adaptive color devices

WANG Chao¹, NIU Wenbing^{1*}, LI Shengming^{2*}, WANG Yunpeng¹, ZHANG Shufen¹

(1. State Key Laboratory of Fine Chemicals, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. College of Innovation and Entrepreneurship, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: A fast responsive C₁₂DMAO/PNIPAM-*co*-PDAAM-*co*-PAM temperature-sensitive photonic crystal hydrogel was prepared by *N,N*-Dimethyldodecylamine oxide (C₁₂DMAO) as basic unit interacting with PNIPAM-*co*-PDAAM-*co*-PAM cross-linking network which were formed by polymerization of *N*-isopropylacrylamide (NIPAM), diacetone acrylamide (DAAM) and acrylamide (AM) under UV irradiation. Next, a self-adaptive color device was built through composition of silicone coated temperature-sensitive photonic crystal hydrogel with integrated electric heating plate and tested by inverse color spectrum and infrared imaging. It was concluded that the hydrogel exhibited a temperature response range of 4.3~55.0 °C along with the proportion adjustment of NIPAM, DAAM and AM. With NIPAM of 0.20 g, DAAM of 0.20 g, AM of 0.05 g and MBAA of 50 mg, the response temperature range of prepared adaptive structured color device was a close one of 22~30 °C, which led to rapid color change.

Key words: temperature sensitive; structural color; hydrogel; photonic crystal; camouflage; functional materials

现代作战是复合场景的变化, 单一颜色的伪装已不适应目前的需求。因此, 开发一种颜色随外部环境变化的自适应材料器件具有很重要的发展意义^[1-4]。目前, 常见的自适应变色材料包括光敏变色材料和温敏变色材料。光敏变色材料抗氧化性差、

耐疲劳性低, 且受环境影响大^[5]; 温敏变色材料变色具有滞后性, 不能快速变色, 而且各种模拟外界环境的刺激因素较为复杂, 较难人工调控^[6-9]。

在光子晶体周期结构体系内引入可随外界刺激响应的材料, 可制备出周期性结构能随着外界的物

收稿日期: 2022-01-11; 定用日期: 2022-03-11; DOI: 10.13550/j.jxhg.20220031

基金项目: 国家自然科学基金 (22078048); 大连高水平人才创新支持计划 (2019RD06)

作者简介: 王超 (1997—), 男, 硕士生, E-mail: 13007059616@163.com。联系人: 牛文斌 (1984—), 男, 教授, E-mail: niuwb@dlut.edu.cn; 李胜铭 (1987—), 男, 副教授, E-mail: lishengming@dlut.edu.cn。

理和化学刺激而发生改变的响应性光子晶体^[10-14]。其原理是：在物理或者化学信号的刺激下，光子晶体的周期或者介电常数发生变化，进而引起光子带隙的改变，从而产生颜色的变化^[15-17]。响应性光子晶体因其良好的显色效果、响应性能而受到广泛关注^[6-8]。目前，PARK 等^[18]提出将温敏响应光子晶体材料与集成电路结合，制备自适应变色器件。然而，目前报道的温敏响应光子晶体材料能在 1~10 min 内改变折射率和板厚（即晶格间距）来控制自身颜色的变化^[19-21]，温敏响应光子晶体材料变色的滞后性影响其使用性，为此，开发快速响应的温敏变色材料具有重要的意义。

本文拟首先制备快速响应的温敏光子晶体水凝胶；然后将制备的温敏光子晶体水凝胶进行包覆来增强变色材料的稳定性，并将包覆好的材料与正阵列式 6×6 像素点的集成电路电加热板结合来构筑自适应光子晶体结构色器件；最终通过测试调控，让自适应光子晶体结构色器件展示出目标颜色图案。自适应结构色器件具有柔性材料可穿戴的优异性能和结构色水凝胶快速热响应变色、可视化等特性，以期拓宽其在迷彩防伪领域的应用。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

N,N-二甲基十二烷基氧化胺（C₁₂DMAO）、双丙酮丙烯酸酰胺（DAAM），AR，北京百灵威科技有限公司；正己醇（NA），AR，天津市大茂化学试剂厂；*N*-异丙基丙烯酰胺（NIPAM），AR，萨恩化学技术上海有限公司；丙烯酸酰胺（AM）、*N,N*-亚甲基双丙烯酸酰胺（MBAA），AR，天津市科密欧化学试剂有限公司；2-羟基-2-甲基-1-苯基-1-丙酮（1173 光引发剂），AR，广州市利厚贸易有限公司；SYLGARD 184 硅橡胶（黏度 4000~6500 Pa·s）、SYLGARD 184 硅橡胶（弹性体 KIT），上海恩莱保贸易有限公司；3-缩水甘油醚氧基丙基三乙氧基硅烷（KH-560），质量分数 98%，广州市中杰化工科技有限公司；铂(0)-1,3-二乙烯-1,1,3,3-四甲基二硅氧烷络合物，质量分数 99.95%，广州市中杰新材料有限公司。

WFH-204BS 手提式紫外分析仪（254、365 nm），上海科兴仪器有限公司；PG2000-Pro 光纤光谱仪，上海辰昶仪器设备有限公司；YE5K623195 型自动移液器，大龙兴创仪器（北京）有限公司；SU8220 型冷场发射扫描电子显微镜，日本日立高新技术有限公司；FD-2A 型冷冻干燥机，北京博医康实验仪器有限公司；PT-305 型电脑式拉力试验机，东莞市普赛特检测设备有限公司；NANOSTAR 小角 X 射线散射仪，德国 Bruker AXS 公司；Agilent 4294A

型阻抗分析仪，美国安捷伦科技公司；TiS75 红外热像仪，美国福禄克公司。

1.2 基于 C₁₂DMAO 的温敏光子晶体材料的制备

如图 1 所示，首先，将 200 mL（0.87 mmol）C₁₂DMAO、85 mg（0.83 mmol）NA、0.20 g（1.77 mmol）NIPAM、0.20 g（1.18 mmol）DAAM、0.05 g（0.71 mmol）AM、50 mg（0.32 mmol）MBAA、20 μL（0.13 mmol）2-羟基-2-甲基-1-苯基-1-丙酮（1173 光引发剂）配制前驱液，超声溶解 10 min 后，用手电筒照射前驱液，观察溶液中是否有蓝色絮状物，来决定是否在 254、365 nm 的紫外波长条件下聚合 10 min。通过改变配方含量（表 1），制备一系列温敏光子晶体水凝胶 C₁₂DMAO/PNIPAM-*co*-PDAAM-*co*-PAM。

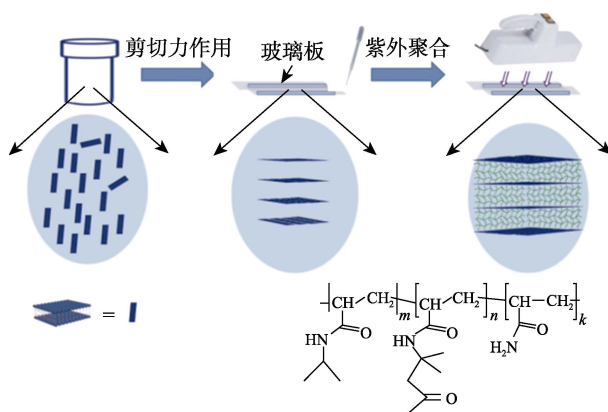


图 1 温敏光子晶体水凝胶的制备原理图

Fig. 1 Preparation principle diagram of thermosensitive photonic crystal hydrogel

表 1 温敏光子晶体水凝胶的配方

Table 1 Formulations of thermosensitive photonic crystal hydrogels

样品	C ₁₂ DMAO/ mL	NA/ mg	NIPAM/ g	DAAM/ g	AM/g	MBAA/ mg	1173/ μL
1	200	85	0.20	0.20	0.05	50	20
2	200	85	0.30	0.10	0.05	25	20
3	200	85	0.30	0.10	0.05	50	20
4	200	85	0.30	0.10	0.05	75	20
5	200	85	0.30	0.10	0.05	85	20
6	200	85	0.30	0.10	0.05	100	20
7	200	85	0.30	0.10	0.05	125	20
8	200	85	0.30	0.10	0.05	150	20
9	200	85	0.10	0.30	0.05	50	20
10	200	85	0.30	0.10	0.15	50	20
11	200	85	0.30	0.10	0.20	50	20
12	200	85	0.30	0.10	0.25	50	20

下一步将制备的样品用手术刀进行裁剪，得到 10 mm×10 mm×2 mm 大小的样品。

最后，将 11 g SYLGARD 184 硅橡胶、20 μL KH-560，10 μL 铂(0)-1,3-二乙烯-1,1,3,3-四甲基二硅

氧烷络合物混合, 对 10 mm×10 mm×2 mm 大小的样品浸渍进行包覆, 制得被包覆的温敏光子晶体材料 C₁₂DMAO/PNIPAM-co-PDAAM-co-PAM, 用于后续实验探讨。

首先, 选取包覆质量较好的温敏光子晶体水凝胶使用双面胶粘在正列式 6×6 像素点的集成电路电加热板上; 其次, 初步进行温度调控, 观察是否具有良好的响应性, 升降温可逆性等性能; 然后, 与不粘透明双面胶带的器件进行对比, 观察透明双面胶带的的使用是否对温敏光子晶体水凝胶产生影响; 最后, 经过控制变量观察后, 发现使用透明双面胶带不会对温敏光子晶体水凝胶的光学性能产生影响, 最终将包覆好的温敏光子晶体水凝胶粘在正阵列式 6×6 像素点的集成电路电加热板上, 从而得到一个自适应的温敏光子晶体水凝胶器件。

1.3 结构表征与性能测试

反射光谱测试: 使用带钨卤光源的光纤光谱仪测得光子晶体水凝胶的反射光谱变化, 入射方向为垂直入射, 用标准铝镜作为反射率测量中的镜面反射参考物。**SEM 测试:** 将被包覆的温敏光子晶体 C₁₂DMAO/PNIPAM-co-PDAAM-co-PAM 置于 -18 °C 下冷冻干燥机中干燥 12 h, 然后在 -40 °C 下干燥 18 h, 最后取其截面进行 SEM 表征, 工作电压为 20 kV。**机械性能测试:** 拉伸和压缩速度分别为 20 和 1 mm/min。重复拉伸和释放行为由自制的频率可调的循环拉伸仪控制。压力的定义为施加力除以未变形的测试样品的面积。**FTIR 测试:** 对可聚合单体和温敏光子晶体水凝胶进行红外光谱表征, 测试模式为全反射, 可聚合单体使用 KBr 压片法进行测试, 波数范围为 4000~500 cm⁻¹。**小角 X 射线散射(SAXS) 测试:** 从温敏光子晶体水凝胶截面处测量, 扫描角度范围为 0.2°~3.2°。**介电常数(ε_r) 测试:** 对温敏光子晶体水凝胶进行介电常数随温度变化的测试, 温度变化范围为 20~40 °C, 升温速率为 5 °C/min, 测试

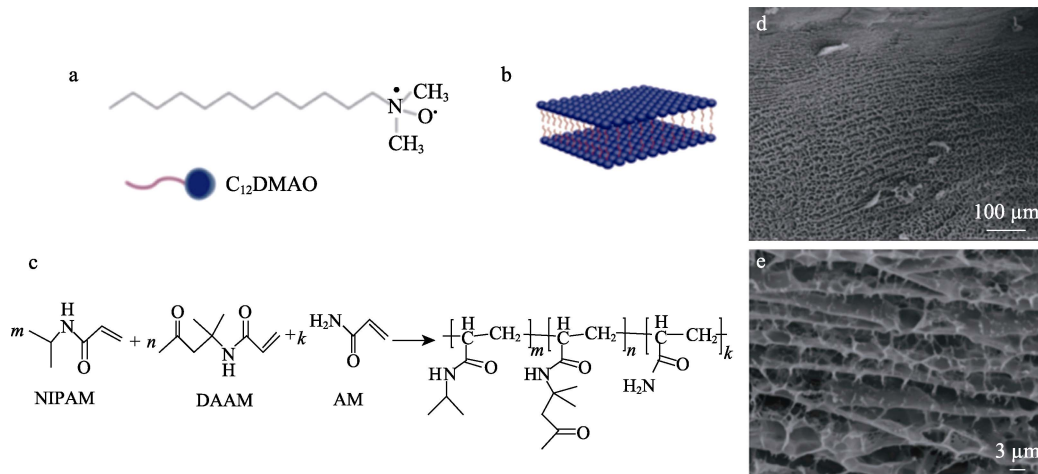
频率为 10 kHz。红外成像测试: 拍摄温敏光子晶体 C₁₂DMAO/PNIPAM-co-PDAAM-co-PAM 在不同温度下的红外热成像照片和视频。

2 结果与讨论

2.1 基于 C₁₂DMAO 的温敏光子晶体水凝胶的制备与结构表征

C₁₂DMAO 为表面活性剂(图 2a)在水溶液中形成了双分子板层结构(图 2b)。这些双分子层在水中层层堆叠形成周期性结构, 根据布拉格衍射规律而产生结构色($\lambda=2nds\sin\theta$, 其中, λ 为反射光的波长, nm; n 为水的折射率, 1.33; d 为双分子层之间的距离, nm; θ 为光的入射角, °)。通过引入 AM、NIPAM、DAAM、MBAA, 在紫外光固化下形成(PNIPAM-co-PDAAM-co-PAM)的交联网络, 制备了一种基于 C₁₂DMAO 的温敏光子晶体水凝胶, 结构如图 2c 所示。

由图 2d、e 可见, 温敏光子晶体水凝胶(样品 1)形成了温度响应的骨架结构, 同时没有对形成的层状液晶造成破坏。包含 C₁₂DMAO、NIPAM、DAAM、AM、交联剂 MBAA 和光引发剂的前驱液缓慢注入到由两个平行玻璃板组成的“三明治”结构中。在注入模具过程中自组装得到的双分子层在剪切力诱导作用下沿着模具方向定向排列, 通过紫外光聚合将多分子层结构固化在交联网络中。图 2f 为反应前后分子结构的 FTIR 谱图。由图 2f 可以看出, 随着交联聚合的完成, DAAM 上 1620 cm⁻¹ 处、NIPAM 上 1625 cm⁻¹ 处以及 AM 上 1650 cm⁻¹ 处的 C=C 键的伸缩振动吸收峰均已消失, 可以推测出反应单体的 C=C 打开, 发生了聚合反应^[15-18]。由图 2g 可以发现, 散射峰的存在说明存在层层结构, 在散射矢量(q)比为 1:2:3 的情况下没有呈现一系列典型的尖锐散射峰, 表明 C₁₂DMAO 双分子板层结构在网络中是短程有序而非长程有序。



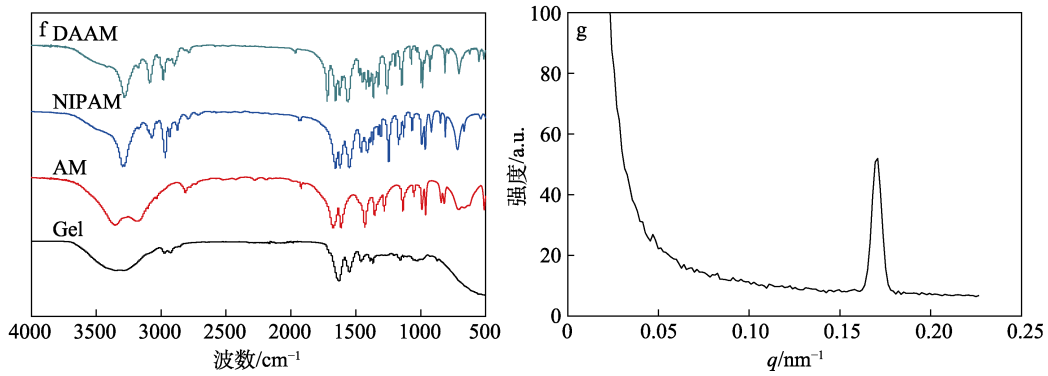


图 2 C_{12} DMAO 分子和示意图 (a); C_{12} DMAO 在水中形成的双分子层示意图 (b); 交联网络的反应化学式 (c); 温敏光子晶体水凝胶 (样品 1) 的 SEM 图 (d、e); 原料和样品 1 (记为 Gel) 的 FTIR 谱图 (f); 样品 1 的 SAXS 图 (g)

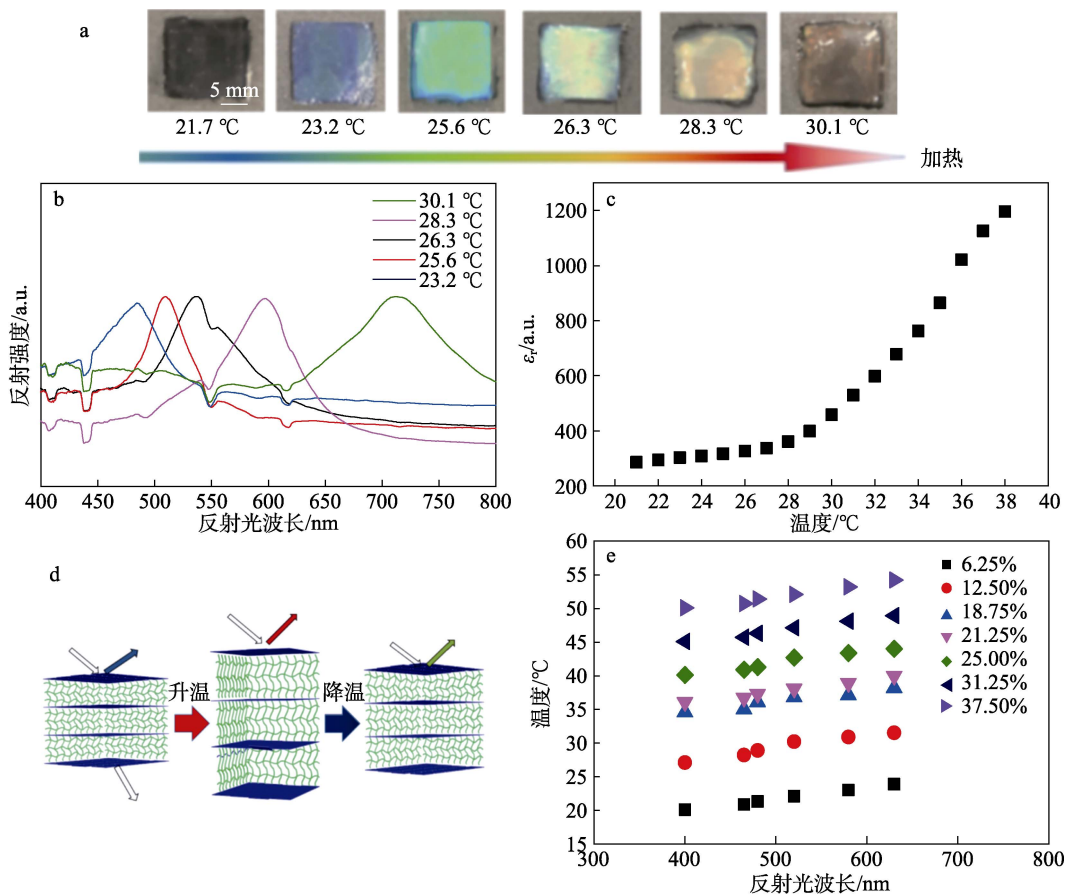
Fig. 2 Structural formula and schematic diagram of C_{12} DMAO molecule (a); Schematic diagram of bilayer formed by C_{12} DMAO in water (b); Reaction chemical formula of crosslinking network (c); SEM images of thermosensitive photonic crystal hydrogel (sample 1) (d, e); FTIR spectra of raw materials and sample 1 (noted as Gel) (f); SAXS pattern of sample 1 (g)

2.2 温敏变色机理与性能研究

作为温敏材料，与传统的慢响应的温敏光子水凝胶不同，基于 C_{12} DMAO 的光子晶体水凝胶能实现对温度的快速响应，这对温度的可视化是至关重要的，以便实时监测。对制备的温敏光子晶体水凝胶 (样品 1) 的变色性能进行了测试，结果见图 3。

如图 3a 所示，样品 1 能在 2 s 内实现从紫色到红色的颜色变化。图 3b 为在不同温度下，样品 1 反

射光谱的变化，通过反射光谱，表征了材料从红色到紫色变化的历程。由图 3b 可以看出，随着温度从 23.2 °C 上升至约 30 °C，样品 1 反射光波长增加，发生红移。为测试温敏光子晶体水凝胶的性能，对样品 1 进行了介电常数的测试，结果见图 3c。由图 3c 可知，在 20~40 °C 范围内，随着温度的升高，介电常数不断增大。通过控制变量法探究了组成单体的比例对材料温敏性能的影响。



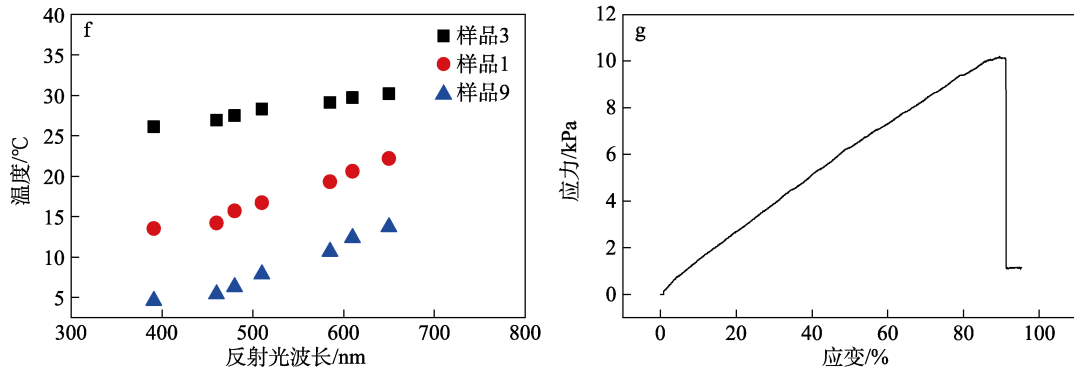


图 3 样品 1 的加热变色照片 (a)、加热变色对应的谱图 (b) 及介电常数 (c); 温敏光子晶体水凝胶的变色原理示意图 (d); MBAA 用量对温敏光子晶体水凝胶变色温度的影响 (e); NIPAM/DAAM 质量比对温敏光子晶体水凝胶变色温度的影响 (f); 样品 1 的应力-应变曲线 (g)

Fig. 3 Heating discoloration picture (a) and spectra corresponding to heating discoloration (b) and dielectric constant of sample 1 (c); Schematic diagram of the principle of discoloration of thermosensitive photonic crystal hydrogel (d); Effect of MBAA dosage on discoloration temperature of thermosensitive photonic crystal hydrogel (e); Effect of NIPAM/DAAM mass ratio on discoloration temperature of thermosensitive photonic crystal hydrogel (f); Stress-strain curve of sample 1 (g)

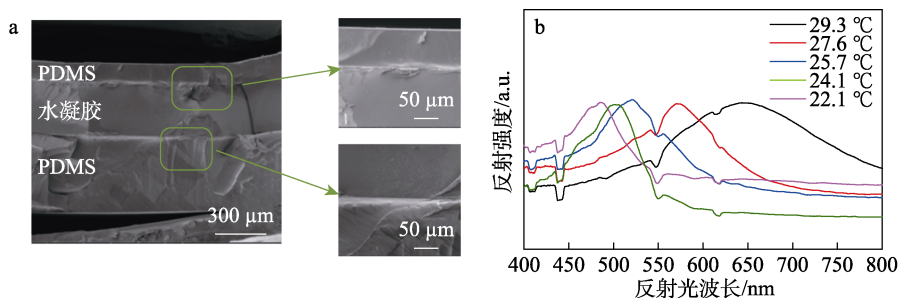
按照 1.2 节实验方法, 在 NIPAM 为 0.30 g、DAAM 为 0.10 g 保持不变的条件下, 考察不同 MBAA 用量 (以 NIPAM 和 DAAM 的质量为基准, 下同) 制备的样品的温敏性能, 结果如图 3e 所示。由图 3e 可以发现, 由不同用量 MBAA 制备的样品对应的温度区域宽度没有发生变化, 对应的温度区域上下限发生了类似于线性的变化, 其中, 用量为 6.25%、12.50%、18.75%、21.25%、25.00%、31.25%、37.50% 对应的样品 2~8 的温度区域分别为 20.1~24.3 °C、26.6~29.8 °C、33.7~36.6 °C、36.6~40.0 °C、39.6~43.2 °C、46.7~49.2 °C、52.7~55.2 °C, MBAA 用量每增加约 10%, 对应样品的温度域提升 5~6 °C。同时发现, 当 MBAA 用量为 21.25% 时, 样品 5 对应的变色温度域区间为 36.6~40.0 °C, 这个温度区域于人体温度区域最为适配。此外实验发现, 随着 AM 用量的增加, 制备的样品的温度区间也不断上升, 当 AM 用量分别为 37.5%、50.0%、62.5% 时, 制备的样品 10、样品 11、样品 12 对应的温度区间分别为 20.0~26.0 °C、31.6~37.2 °C、42.2~48.5 °C。综上可以发现, AM 用量每增加 50 mg, 对应的温度区域上升约 10 °C。以上探究的是

改变一个因素的用量, 其他因素用量不变的情况下材料的温度响应性。图 3f 为在两种原料 NIPAM、DAAM 在总质量 (0.4 g) 不变的情况下, 按 $m(\text{NIPAM}) : m(\text{DAAM})$ 分别为 3 : 1、1 : 1、1 : 3, 制备的样品 3、样品 1、样品 9 对应的温度区域分别为 25.1~29.3 °C、13.4~23.1 °C、4.3~14.3 °C。同时对样品 1 进行拉伸性能进行测试, 结果如图 3g 所示。由图 3g 可知, 制备的温敏光子晶体水凝胶拉伸性能较差, 在交联剂 DAAM 较高用量下制备的水凝胶的断裂应变约为 90%。

综上所述通过 NIPAM、DMAA、AM 比例的调整, 水凝胶的响应温度可在 4.3~55.0 °C 范围内调节。

2.3 温敏光子晶体水凝胶的包覆及性能测试

由于水凝胶含水量较大, 正常暴露在空气中容易失水进而影响显色性能, 因此, 使用 SYLGARD 184 硅橡胶对温敏光子晶体水凝胶 (样品 1) 进行包覆, 得到聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 包覆的温敏光子晶体 $\text{C}_{12}\text{DMAO/PNIPAM-co-PDAAM-co-PAM}$, 并对其性能进行考察, 结果见图 4。从图 4a 可以看出, PDMS 层与水凝胶层的界面紧紧贴合在一起。对包覆前后材料的光学性质进行测试, 结果如图 4b、c 所示。



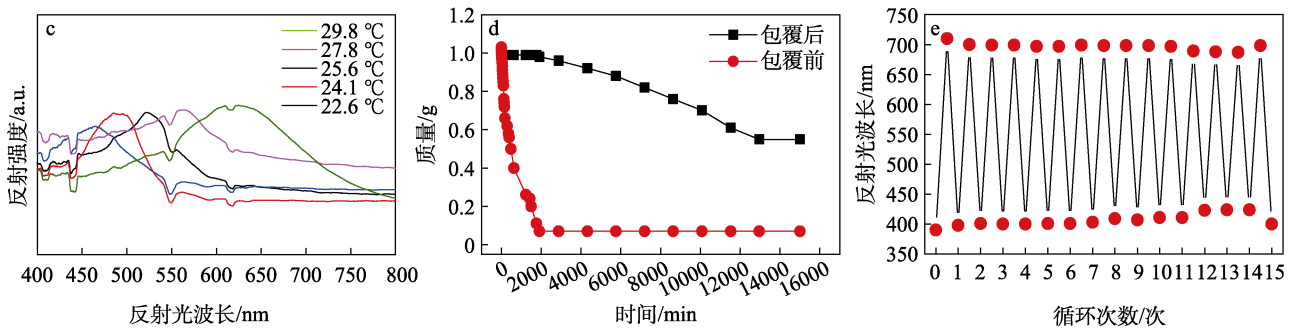


图 4 包覆后温敏光子晶体的 SEM 图 (a); 包覆前后样品 1 的反射光谱图 (b、c)、不同时间的质量 (d); 包覆后温敏光子晶体在循环加热条件下的波长变化 (e)

Fig. 4 SEM images of coated thermosensitive photonic crystal (a); Reflection spectra (b, c) and mass at different time (d) of sample 1 before and after coating; Wavelength change of coated thermosensitive photonic crystal under cyclic heating conditions (e)

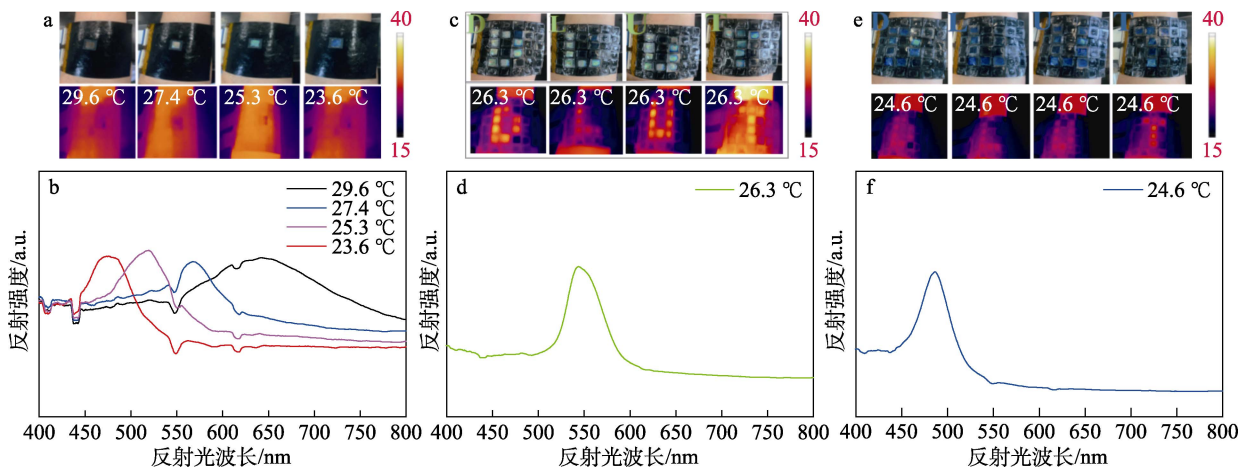
由图 4b、c 可以发现，包覆后材料的变色性能保持良好，但一定程度上包覆后的材料，对应峰变得更宽，说明包覆的硅烷弹性材料的存在对变色材料存在一定的影响，但不影响温致变色的能力。图 4d 为包覆前后水凝胶在不同时间的质量，以此评价可以看到，包覆对水凝胶稳定性的影响。由图 4d 可知，正常的水凝胶在常温下放置 1920 min 后，由于失水丧失变色能力且不可逆，用 PDMS 包覆后的水凝胶，大大缓解水凝胶的失水，在放置 13000 min 后，其质量仍然可以保持约 60%。在反复升降温后，包覆后的水凝胶依然能保持良好的显色效果。由图 4e 可知，包覆后水凝胶材料连续循环加热 15 次后，仍能保持良好的可逆变色性能，显示出稳定可逆的光学性能。

2.4 自适应结构色器件的构建与性能研究

受到自然界夏威夷短尾游鱼与伊莎贝拉蝶变色原理的启发，制备了一种可响应外界刺激的自适应可穿戴变色器件。当材料中 NIPAM 0.20 g、DMAA 0.20 g、AM 0.05 g、MBAA 50 mg 时，首先研究样品的控制单点显色。图 5a 为 10 mm×10 mm×2 mm 大小的样品 1 包覆后在单点控制后的显色情况。由图 5a 可知，随着温度从 22 °C 调整到 30 °C，变色

材料从紫色开始发生红移。过程对应的反射光谱如图 5b 所示。然后，对多点控制的器件显色进行了研究，在多点统一温度下的颜色变化如图 5c 所示。由图 5c 可知，多点同时输出同一温度，可以实现颜色的统一变化。当集成电路控制电热板上输出温度为 26.3 °C 时，控制不同区域实现的颜色变化显示，分别呈现出黄绿色 DLUT 字样。图 5d 为 26.3 °C 时温敏材料对应的反射光谱图。在完成上述操作之后，对整体的区域进行了降温操作，使温度从 26.3 °C 调整到 24.6 °C。在多点同时完成降温操作后，显示出了如图 5e 的蓝色的 DLUT 字样，当温敏材料为 24.6 °C 时，温敏材料对应的反射光谱如图 5f 所示。完成多点同时输出实现相同的颜色变化后，在指定区域输出不同的温度实现如图 5g 的颜色变化。

图 5h 为对应的红外热成像图。在此过程中通过集成电路，实现了对温敏材料的温度控制，进而输出不同的颜色。图 5g 中模拟的是花朵的样式（上下部分分别为红花及绿叶），红花部分对应的温度为 30.5 °C，对应的反射光谱如图 5i 所示，绿叶部分对应的温度为 26.5 °C，对应的反射光谱如图 5j 所示，从而初步达到模拟仿生的效果，实现了自适应环境显色的变化。



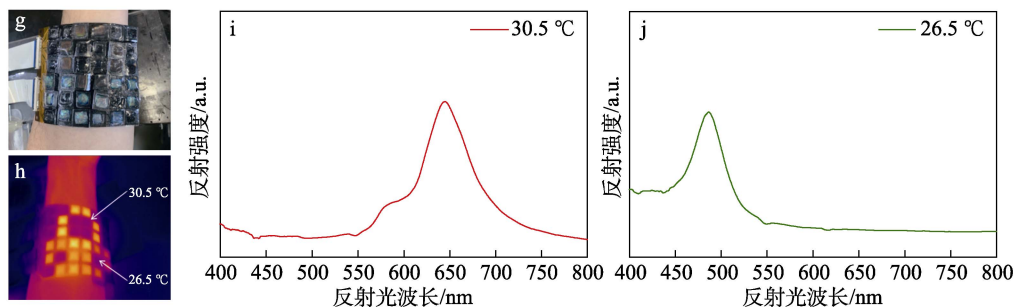


图 5 自适应结构色器件的单点测试图以及对应的红外热成像图 (a); 单点对应的反射光谱图 (b); 自适应结构色器件多点统一控温在 26.3 °C 的测试图以及对应的红外热成像仪图 (c); 26.3 °C 时对应的反射光谱图 (d); 自适应结构色器件多点统一控温在 24.6 °C 的测试图以及对应的红外热成像仪图 (e); 24.6 °C 时对应的光谱图 (f); 自适应结构色器件多点不同温度控制的红花绿叶图 (g); 红花绿叶图对应的红外热成像图 (h); 红花绿叶图对应的反射光谱图 (i, j)

Fig. 5 Single point test of adaptive structured color devices (a); Reflection spectrum corresponding to a single point (b); Test diagram of multi-point unified temperature control of adaptive structural color device at 26.3 °C and corresponding infrared thermal imager diagram (c); Reflection spectrum corresponding to the material at 26.3 °C (d); Test diagram of multi-point unified temperature control of adaptive structural color device at 24.6 °C and corresponding infrared thermal imager diagram (e); Corresponding spectrum at 24.6 °C (f); Red flower green leaf diagram with multi-point different temperature control of adaptive structural color device (g); Infrared thermal image corresponding to safflower green leaf image (h); Reflection spectrum corresponding to safflower green leaf diagram (i, j)

3 结论

本文制备了一种基于 C₁₂DMAO 的温敏显色材料与正阵列式集成电路复合构成的温敏响应的光子晶体结构色器件。通过 NIPAM、DMAA、AM 比例的调整, 水凝胶的响应温度可在 4.3~55.0 °C 范围内调节。在 NIPAM 为 0.20 g、DMAA 为 0.20 g、AM 为 50 mg、MBAA 50 mg 条件下, 制备的自适应结构色器件在 22~30 °C 之间调节温度, 结构色器件可以实现快速的颜色变化。通过调节 AM 用量, 可以调整显色材料的温度区间, 通过调节 NIPAM、DMAA 用量, 可以调整显色材料当前温度区间的宽窄。通过信号调整使正阵列式加热板能稳定输出温度, 结合材料温敏变色的特性, 通过温度的调节显示出不同图案, 从而达到自适应显色的效果。在可穿戴迷彩防伪方面有着广阔的应用前景。

参考文献:

- BERGER O, YOSKOVITZ E, ADLER-ABRAMOVICH L, *et al.* Spectral transition in bio-inspired self-assembled peptide nucleic acid photonic crystals[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(11): 2195-2200.
- LEE G H, CHOI T M, KIM B, *et al.* Chameleon-inspired mechanochromic photonic films composed of non-close-packed colloidal arrays[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(11): 11350-11357.
- SHEN H Z, WANG Z H, WU Y X, *et al.* One-dimensional photonic crystals: Fabrication, responsiveness and emerging applications in 3D construction[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(6): 4505-4520.
- MATSUBARA K, WATANABE M, TAKEOKA Y, *et al.* A thermally adjustable multicolor photochromic hydrogel[J]. *Angewandte Chemie*, 2007, 119(10): 1718-1722.
- BOHN J J, BEN-MOSHE M, TIKHONOV A, *et al.* Charge stabilized crystalline colloidal arrays as templates for fabrication of non-close-packed inverted photonic crystals[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 344(2): 298-307.
- WANG Z H, ZHANG J H, LI J X, *et al.* Colorful detection of organic solvents based on responsive organic/inorganic hybrid one-dimensional photonic crystals[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(4): 1264-1270.
- WANG Z H, ZHANG J H, TIAN Z C, *et al.* Organic-inorganic hybrid photonic hydrogels as a colorful platform for visual detection of SCN⁻[J]. *Chemical Communications*, 2010, 46(45): 8636-8638.
- HAQUE M A, KUROKAWA T, KAMITA G, *et al.* Rapid and reversible tuning of structural color of a hydrogel over the entire visible spectrum by mechanical stimulation[J]. *Chemistry of Materials*, 2011, 23(23): 5200-5207.
- XIAO F X, PAGLIARO M, XU Y J, *et al.* Layer-by-layer assembly of versatile nanoarchitectures with diverse dimensionality: A new perspective for rational construction of multilayer assemblies[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(11): 3088-3121.
- KURT P, BANERIEE D, COHEN R E, *et al.* Structural color via layer-by-layer deposition: Layered nanoparticle arrays with near-UV and visible reflectivity bands[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, 19(47): 8920-8927.
- DIERENDONCK M, DE K S, DE R R, *et al.* Just spray it-LbL assembly enters a new age[J]. *Soft Matter*, 2014, 10(6): 804-807.
- NOGUEIRA G M, BANERJEE D, NCOHE R E, *et al.* Spray-layer-by-layer assembly can more rapidly produce optical-quality multistack heterostructures[J]. *Langmuir*, 2011, 27(12): 7860-7867.
- CHO J, CHAR K, HONG J D, *et al.* Fabrication of highly ordered multilayer films using a spin self-assembly method[J]. *Advanced Materials*, 2001, 13(14): 1076-1078.
- ANAMUL H, GEN K, TAKAYUKI K, *et al.* Unidirectional alignment of lamellar bilayer in hydrogel: One-dimensional swelling, anisotropic modulus, and stress/strain tunable structural color[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22: 5110-5114.
- CHEN Z Y, FU F F, YU Y R, *et al.* Cardiomyocytes-actuated morpho butterfly wings[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(8): 1805431.
- DUMANLI A G, SAVIN T. Recent advances in the biomimicry of structural colours[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(24): 6698-6724.
- CHIARELLI P A, JOHAL M S, CASSON J L, *et al.* Controlled fabrication of polyelectrolyte multilayer thin films using spin-assembly[J]. *Advanced Materials*, 2001, 13(13): 1167-1171.
- PARK T H, YU S G, CHO S H, *et al.* Block copolymer structural color strain sensor[J]. *NPG Asia Materials*, 2018, 10(4): 328-339.
- KOSONEN H, VALKAMA S, RUOKOLAINEN J, *et al.* One-dimensional optical reflectors based on self-organization of polymeric comb-shaped supramolecules[J]. *European Physical Journal E*, 2003, 10(1): 69-75.
- KIMURA M, OKAHARA K, MIYAMOTO T, *et al.* Tunable multilayer-film distributed-bragg-reflector filter[J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(3): 1222-1225.
- WANG Z H, ZHANG J H, XIE J, *et al.* Bioinspired water-vapor-responsive organic/inorganic hybrid one-dimensional photonic crystals with tunable full-color stop band[J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, 20(21): 3784-3790.