

参赛学生姓名： Yinuo Elizabeth Li

中学： 上海中学国际部

省份： 上海市

国家/地区： 中国/上海

指导老师姓名： 商珞然

指导老师单位： 复旦大学

论文题目： 基于喷墨打印的光控响应性光子晶体结构色显示技术的开发研究

# 目录

摘要.....	1
关键词.....	1
一、前言.....	2
二、实验部分.....	4
2.1 试剂材料.....	4
2.2 带电二氧化硅纳米颗粒 (SSNP) 的纯化.....	4
2.3 基于 SSNP 的光子晶体制备.....	4
2.4 基于琼脂糖的温度响应性结构色水凝胶的制备及性能测试.....	4
2.5 掺杂墨鱼汁纳米颗粒 (MNP) 的光热响应性水凝胶的制备及性能测试.....	5
2.6 光热响应性结构色水凝胶的制备及其在喷墨打印技术中的应用探索.....	5
2.7 表征.....	5
2.8 数据分析.....	5
三、结果和讨论.....	6
3.1 SSNP 光子晶体的光学特性.....	6
3.2 琼脂糖结构色水凝胶的温度响应性.....	8
3.3 MNP 掺杂的琼脂糖结构色水凝胶的光热转化特性.....	9
3.4 光热响应性结构色水凝胶的智能显示应用探索.....	10
四、总结与展望.....	11
五、参考文献.....	12
致谢.....	14

# 基于喷墨打印的光控响应性光子晶体结构色显示技术的开发研究

作者： Yinuo Elizabeth Li

## 摘要

基于结构色光子晶体的智能显示技术在多个领域具有重要潜力，然而生物相容性和远程控制精确性是其 在 生物医学等领域实际应用中的关键挑战。为解决这一问题，本研究提出了一种具有光控特性的智能响应结构色光子晶体显示技术。该技术基于光控光子晶体复合材料，主要由高度生物相容的带电二氧化硅纳米颗粒、琼脂糖和墨鱼汁纳米颗粒构成。二氧化硅通过自组装形成稳定的光子晶体结构，琼脂糖凝胶的温敏特性则为结构色的可控调节提供了基础。此外，墨鱼汁纳米颗粒凭借其卓越的光热转换性能，使该复合材料具备光控变色功能。实验结果表明，该复合材料在近红外光照射下能够实现远程精确调控结构色。这些特性表明，该材料有望应用于多种领域，如智能显示器、可穿戴设备、动态广告等。

**关键词** 结构色，光子晶体，光热响应，智能显示，喷墨打印

## 一、前言

先进显示技术的发展一直是消费电子、可穿戴设备及其他视觉驱动应用领域进步的基石。传统显示技术，如液晶显示器和有机发光二极管，在分辨率、色域和能效方面取得了显著进展<sup>1</sup>。然而，这些技术仍然高度依赖于发光或透射机制，这涉及复杂的制造过程和大量的能耗。随着对可持续和智能显示解决方案需求的不断增长，人们对利用材料特性来产生视觉效果的替代方法产生了浓厚的兴趣。

在自然界中，众多生物展现出鲜艳多彩的颜色，其中一些并非由色素分子产生，而是通过其表面复杂的纳米级结构与光之间的物理相互作用形成的，这种现象被称为结构色<sup>2,3</sup>，其机制涉及光的干涉、衍射和散射等多种光学效应<sup>4</sup>。结构色的典型例子包括蝴蝶翅膀、孔雀羽毛和某些甲虫的甲壳，这些生物的颜色源于其表面的精细纳米结构所产生的特殊光学效应<sup>5,6</sup>。受自然界中的结构色启发，依赖微结构和纳米结构材料操控光线的结构色显示技术近年来引起了广泛关注，仿生结构色材料的研究随之不断推进<sup>7,8</sup>。光子晶体是结构色材料的一种，具有周期性排列的有序纳米结构<sup>2</sup>。基于此，通过模拟光子晶体结构，可以人工制备仿生结构色材料<sup>9</sup>。这类材料不仅能够展现出与自然界中的结构色相似的鲜艳色彩，还具有通过物理和化学手段调控颜色的优势，避免了化学色素的使用，同时具备较高的稳定性、耐久性和环境友好性，因而在显示技术、光学传感和防伪技术等领域具有广泛的应用前景<sup>10,11</sup>。光子晶体作为制备仿生结构色材料的最常用方法之一，尽管已取得一定突破，但在可穿戴设备、生物医学传感以及人体健康监测等生物医学相关领域的应用仍面临一些挑战。当前的光子晶体材料构建的过程通常需要涉及有机溶剂和潜在有害的化学成分或复杂的合成步骤，这导致生产过程难以简化和量产，且其生物相容性有待进一步提高；此外，现有材料体系在精准、远程调控光子晶体的光学特性方面的研究还较为缺乏<sup>12</sup>。因此，为了推动光子晶体材料在可穿戴设备等人体相关的场景的应用，亟需开发具有优异生物相容性和智能响应性能的新型光子晶体结构色材料。

为了应对以上问题，在本研究中，我们采用基于单分散的磺酸化二氧化硅纳米颗粒的自组装体系，并集成琼脂糖和墨鱼汁纳米颗粒构建了新型复合光子晶体结构色体系。研究方案如图 1 所示。磺酸化二氧化硅纳米颗粒（SSNP）能够通过静电相互作用自发排列成有序的三维光子晶体结构，不需要额外的模板，也无

需使用复杂的模板去除步骤，从而避免了有毒化学品的使用并简化了工艺<sup>13</sup>。琼脂糖是一种通常从红藻中提取的多糖。作为一种天然高分子，其具备良好的生物相容性和环境友好性，来源广泛且成本较低、利于规模化生产。此外，琼脂糖具有温度可控的溶胶-凝胶转变性能，可赋予材料动态温度响应特性<sup>14, 15</sup>，且生物相容性好，常用于药物递送和食品工业等领域<sup>16-18</sup>。同时，我们还将墨鱼汁纳米颗粒(MNP)整合到材料制备体系中，以实现光控温度响应结构色显示特性。MNP的加入不仅可以提供更强的颜色对比度，还可基于其光热转换能力赋予所制备的仿生结构色材料远程调节的功能<sup>19-21</sup>。因此，我们认为通过上述这些功能单元构建的复合光子晶体结构色材料有望在人体相关的场景取得应用。

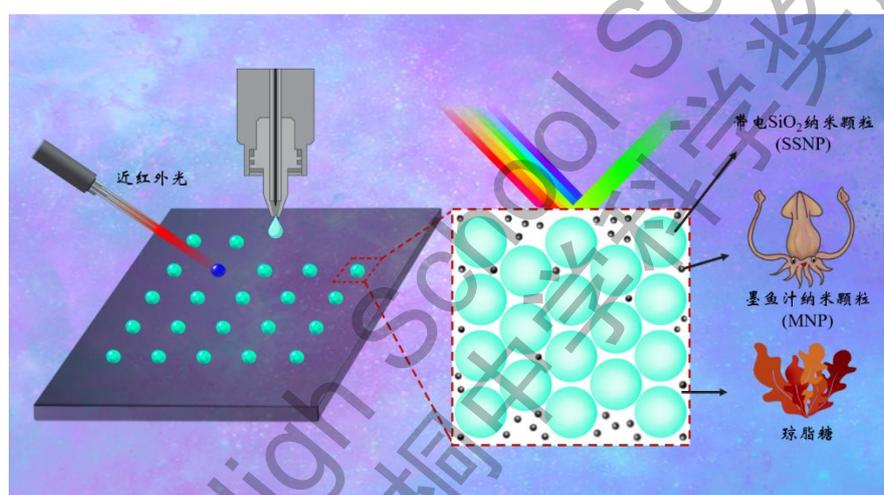


图 1. 研究方案示意图。集成了带电二氧化硅纳米颗粒、琼脂糖以及墨鱼汁纳米颗粒的光热响应结构色水凝胶，在利用喷墨打印技术生成液滴阵列后，能够通过近红外光的远程精确照射，使照射路径上的液滴发生颜色变化，展现出在新型智能显示技术领域中的应用潜力。图形为自主绘制结合使用 BioRender 软件制作。

我们首先对 SSNP 进行纯化处理，以确保其粒径的均一性。之后，探究了不同浓度 SSNP 对其自组装行为及产生结构色的影响。在此基础上，我们引入琼脂糖作为温度响应单元，考察了其在 SSNP 体系中的温度响应效果。进一步地，我们研究了集成 MNP 的琼脂糖水凝胶的光热转化能力，测定了其光热转化效率。最终，我们确定了光热响应性结构色复合水凝胶的制备工艺以及 SSNP、琼脂糖和 MNP 的最佳浓度配比。基于该优化配方，我们采用喷墨打印技术在透明薄膜上打印出液滴阵列，并通过近红外光沿指定路径的照射，考察了这种光热响应结

构色材料在智能显示方面的潜在应用价值。我们发现，这种复合材料具有明显的光热响应性和智能调控结构色的能力。这些结果表明，本项目所构建的光热响应结构色体系具有很好的智能控制效果，未来在新型智能显示等领域具有应用潜力。

## 二、实验部分

### 2.1 试剂材料

SSNP 由本课题组其他成员前期合成提供。离子交换树脂 AG@501-X8 (D) 购自 Bio-Rad 公司，琼脂糖购自 Sigma Aldrich 公司。MNP 通过从墨鱼墨囊中分离并纯化获得。实验用水均经由 Milli-Q Plus 185 (Millipore) 去离子水净化系统纯化。

### 2.2 SSNP 的纯化

为提升合成后 SSNP 的纯度，首先将颗粒均匀分散于纯水中，通过 5 分钟超声处理与 1 分钟涡旋振荡，确保颗粒在水中充分且均匀地分散。随后，采用逐步提速的离心方法，转速由 4500 rpm 缓慢升至 8000 rpm，对溶液进行多次离心。每次离心持续 5 分钟，之后移除上清液，以有效去除粒径分布不均的颗粒及样品中的溶解性杂质。此过程需多次重复，每次均重新加入纯水进行分散，直至达到理想的纯化效果。最后，将纯化后的颗粒置于开盖状态下，放入烘箱中彻底烘干，以确保颗粒内部的水分完全蒸发。

### 2.3 基于 SSNP 的光子晶体制备

为探究纳米颗粒自组装形成光子晶体的条件，首先配置浓度为 5~50 wt% 的纳米颗粒纯水分散液。通过超声与涡旋处理，确保纳米颗粒在纯水中均匀分散。静置，观察并记录分散液的颜色。随后，向各浓度分散液中加入离子交换树脂，利用涡旋仪再次混匀，使树脂均匀分布并与液面平齐。最后，将分散液静置，观察并记录其颜色。

### 2.4 基于琼脂糖的温度响应性结构色水凝胶制备及性能测试

为制备温度响应性结构色水凝胶，首先配制 2.5 wt% 琼脂糖水溶液，加入磁子后置于热台上加热至 90 °C。随后，将纯化好的纳米颗粒以 15 wt% (呈红色)

和 25 wt%（呈绿色）的浓度加入溶液中，均匀分散。将混合液置于 90 °C 水浴锅中加热，并分别观察记录其在 30 °C、50 °C、70 °C 时的颜色变化和测定其反射光谱。

## 2.5 掺杂 MNP 的光热响应性水凝胶的制备及性能测试

为评估 MNP 的光热转化效能，本研究将 0.1 wt%、0.5 wt% 及 0.01 wt% 的 MNP 分别掺入 2.5 wt% 的琼脂糖水溶液中，经充分混合后，制备成光热响应性结构色水凝胶。随后，采用功率分别为 1 W 和 2 W 的近红外光源，于 5 cm 距离处对水凝胶进行照射，并每隔 15 秒记录一次水凝胶的温度，持续记录 180 秒。

## 2.6 光热响应性结构色水凝胶的制备及其在喷墨打印技术中的应用探索

依据前期实验的优化成果，选取 25 wt% 的 SSNP、2.5 wt% 的琼脂糖以及 1 wt% 的 MNP 用于构建光热响应性结构色水凝胶。将这三种成分充分混合均匀后，装载至喷墨打印平台的进料系统。随后，通过精确操控打印机喷头，在聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）塑料薄膜上分别打印出 4×4 与 5×5 的液滴阵列。为了生成特定的图形，采用近红外光对预设路径上的液滴进行照射，并仔细观察与记录液滴在光照下的变色情况。

## 2.7 表征

纳米颗粒的尺寸以及光子晶体的结构特征，均通过扫描电子显微镜（S-3000N, Hitachi）进行拍摄与测定。液滴阵列则利用喷墨打印平台（FDM Desktop 3D Printer, Aurora; LSP01-2A, LongerPump）进行精确打印。反射光谱数据由光纤光谱仪（USB2000-FLG, Ocean Optics）进行记录与分析。为评估样品的光控效应，采用光纤耦合红外发射器（PSU-III-LED, Photontec）进行远程加热，并使用红外线测温仪（H10, Hikvision）对加热过程中的温度进行准确测定。

## 2.8 数据分析

为了高效处理大量的光谱数据，本研究还自主开发了一款基于 Python 的数据分析程序。该程序能够迅速识别并记录可见光范围（波长 400 至 800 nm）内反射光谱的对应峰值，从而实现对光谱数据的快速准确分析。

### 三、结果和讨论

#### 3.1 SSNP 光子晶体的光学特性

为验证 SSNP 在纯化后的粒径均一性，我们采用了扫描电子显微镜（SEM）进行表征。如图 2 所示，SEM 图像清晰展示了这些纳米颗粒的粒径约为 115 nm，且呈现出高度的均一性，这一特性使其成为制备仿生结构色光子晶体的理想材料。

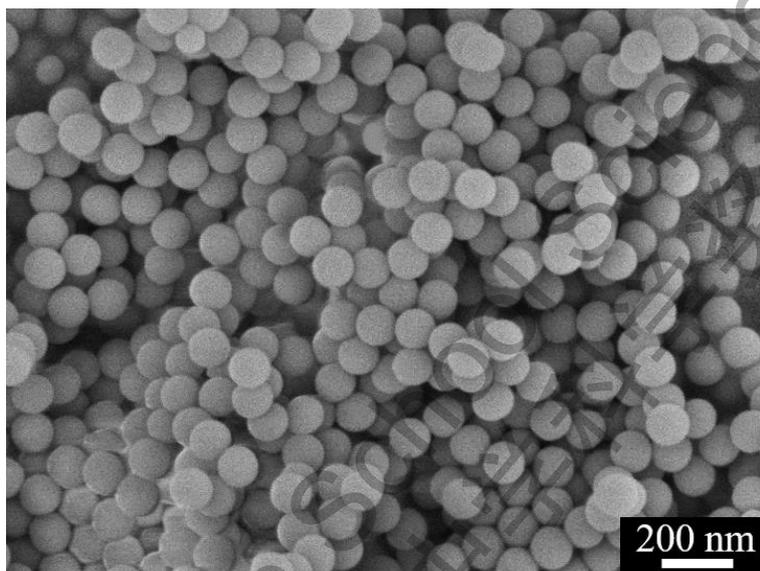


图 2. SSNP 的 SEM 图像。标尺为 200 nm。

为探究 SSNP 通过自组装形过程形成光子晶体的条件，我们配置了不同浓度的 SSNP 纯水分散液样品，并在所有样品中均添加了离子交换树脂作为离子稳定助剂。经过静置观察，我们发现当纳米颗粒浓度处于 13~35 wt% 范围时，样品成功显现出了结构色。（如图 3a 所示）。而当浓度低于或高于此范围时，样品则无法观察到结构色，而是呈现乳白色。这一颜色变化现象表明，SSNP 在特定浓度范围内能够通过自组装形成周期性的纳米结构，并展现出光子晶体的独特效应。

光子晶体的颜色与其内部结构的周期性紧密相关，并遵循布拉格衍射定律： $\lambda=2dn_{average}$ 。其中， $\lambda$  代表反射光的波长， $d$  是光子晶体的晶格间距，而  $n_{average}$  则是材料体系的平均折射率。根据公式可知，纳米颗粒的浓度会直接影响光子晶体的晶格间距，进而对结构色产生显著影响。具体而言，随着纳米颗粒浓度的增加，颗粒间的排列变得更为紧密，导致晶格间距减小，从而使得光子晶体结构所能反射的光波长相应减小。当这些反射光波长落在可见光范围内时，光子晶体便会展

现出鲜明的结构色。随着 SSNP 浓度的逐步增加，光子晶体的颜色会从红色逐渐过渡到蓝紫色。

为了更精确地分析这一现象，我们使用光纤光谱仪记录了 13~35 wt% 浓度范围内不同 SSNP 分散液的特征反射光谱（如图 3b 所示）。从图中可以看到，随着 SSNP 浓度从 13 wt% 增加到 35 wt%，反射光谱的峰位置逐渐从长波长区域向短波长区域移动，这一现象被称为蓝移。图 3c 进一步展示了光子晶体的反射峰波长与 SSNP 浓度之间的线性关系，当浓度从 13% 增加至 35% 时，反射波长从大约 750 nm 减小到了 400 nm 左右。这一结果不仅进一步证实了我们的观察和分析，还揭示了光子晶体的周期性结构与其反射波长之间的直接相关性。因此，通过调节材料的浓度，我们可以精确控制反射波长，从而实现特定光学响应的精细调节。其中，图 3c 的制作因涉及到多个光谱图反射峰峰值分析，我们编写了一个基于 Python 的程序，可以实现快速识别并记录下在可见光范围内光谱的反射峰峰值。该程序显著减少了数据处理时间，为今后这类数据批量处理提供了有效的工具。

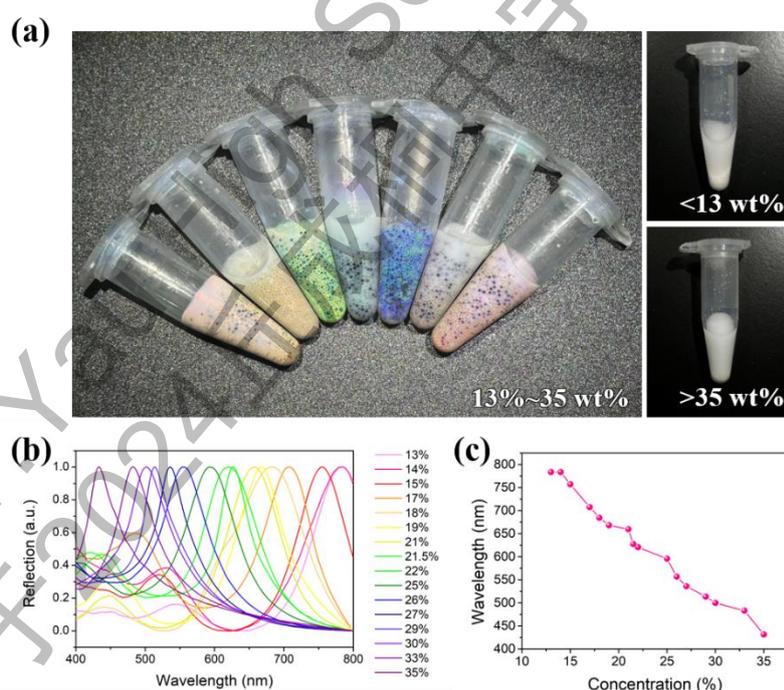


图 3. SSNP 光子晶体的光学特性。(a) 不同浓度 SSNP 纯水分散液的照片。(b) 不同浓度 SSNP 纯水分散液的反射光谱。(c) SSNP 纯水分散液的浓度与反射峰波长之间的关系。

### 3.2 琼脂糖结构色水凝胶的温度响应性

为了赋予 SSNP 光子晶体温度响应特性，我们引入了琼脂糖作为关键的温度响应元件。琼脂糖在水中溶解后可形成琼脂糖水凝胶，该凝胶在常温下保持固态，而当温度升至 80~90℃时，会发生相转变变为液态，展现出良好的温度响应性。此外，琼脂糖作为一种天然且丰富的高分子材料，不仅成本低廉，还具备优异的生物相容性和环境友好性，因此具有广泛的应用潜力。在本研究中，我们将 2.5wt% 的琼脂糖溶解于 SSNP 光子晶体中，制得的复合材料在常温下呈现凝胶态，并显示出结构色。通过 SEM 对琼脂糖结构色水凝胶的纳米结构进行表征（见图 4），结果显示 SSNP 在琼脂糖凝胶中自组装形成了周期性结构，且 SSNP 颗粒间的孔隙被琼脂糖填充。这一发现证实了 SSNP 在琼脂糖水凝胶中同样能够构建光子晶体结构。

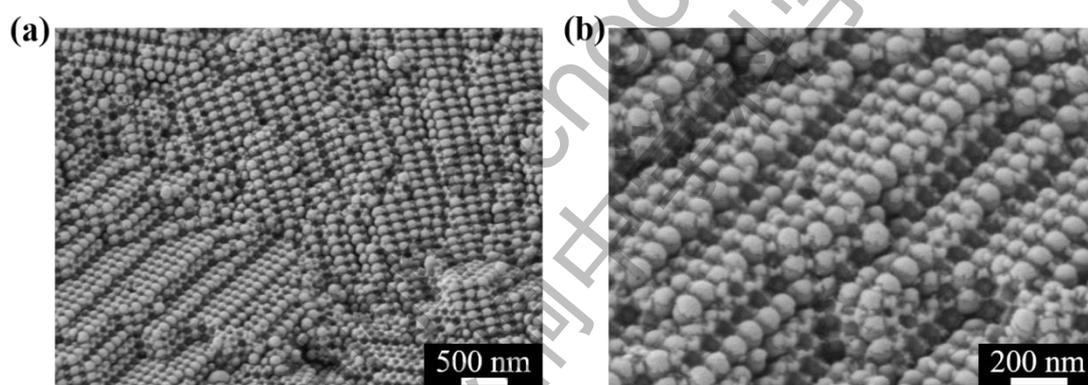


图 4. 琼脂糖结构色水凝胶的纳米结构的 SEM 图片。(a) 全景图，标尺 500 nm。(b) 局部放大图，标尺为 200 nm。

接下来，我们探究了琼脂糖结构色水凝胶的热致变色能力。实验结果显示，SSNP 浓度为 25 wt% 的样品在不同温度下颜色发生显著变化：在 30 °C 时呈现明显的绿色，而在 70 °C 时则变为蓝色（见图 5a）。反射光谱测量结果进一步证实了温度对光子晶体结构的影响，随着温度从 30 °C 升高至 70 °C，反射峰位置逐渐蓝移。在 SSNP 浓度为 15 wt% 的琼脂糖结构色水凝胶中，也观察到了类似的升温蓝移现象（见图 5b）。以上结果表明，随着温度升高，琼脂糖水凝胶的高分子结构发生变化，导致光子晶体的晶格间距减小，进而使反射光的波长减小。此外，升温还可能引起材料体系折射率的变化，从而影响颜色表现。综上所述，我们成功验证了将琼脂糖作为温度响应单元掺入 SSNP 分散液中，可以制备出具有热致

变色能力的琼脂糖结构色水凝胶。

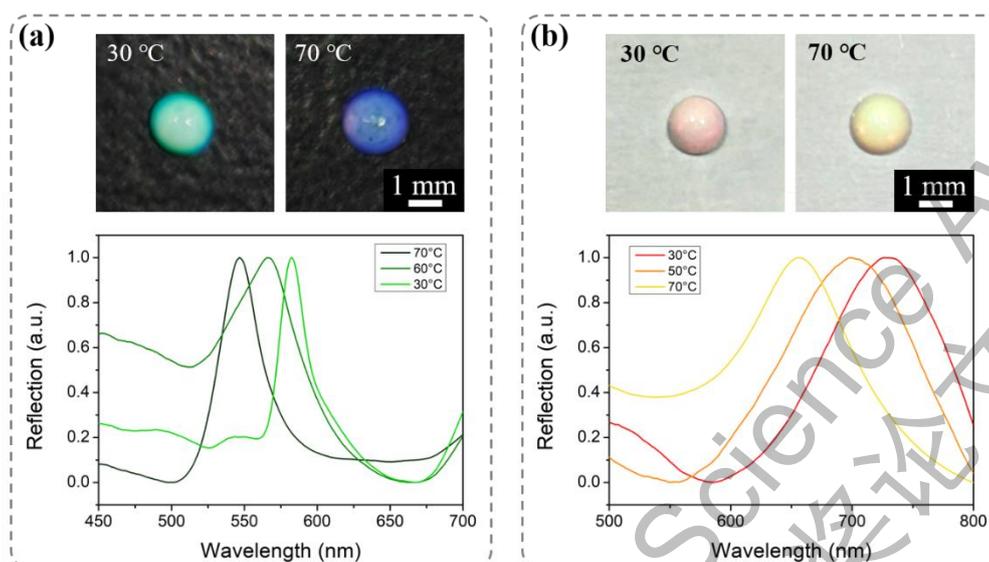


图 5. 琼脂糖结构色水凝胶的温度响应特性。(a) SSNP 浓度为 25 wt% 的琼脂糖结构色水凝胶在 30 °C 和 70 °C 时的照片和反射光谱。(b) SSNP 浓度为 15 wt% 的琼脂糖结构色水凝胶在 30 °C 和 70 °C 时的照片和反射光谱。

### 3.3 MNP 掺杂的琼脂糖结构色水凝胶的光热转化特性

为了赋予体系光热响应的能力，我们引入了具有高效光热转换特性的 MNP。通过将浓度为 0.01、0.05 及 0.1 wt% 的 MNP 与琼脂糖结构色水凝胶均匀混合，随后，我们利用近红外光照射，系统评估了各样品的光热转换效率，并深入研究了在近红外照射功率分别为 1 W 和 2 W 时，体系温度随时间的变化规律。如图 6 a 所示，在近红外功率为 1 W、照射距离为 5 cm 的条件下，不同 MNP 浓度的琼脂糖结构色水凝胶展现出不同的温度变化曲线。随着 MNP 浓度的增加，温度上升速率及最终温度均呈现显著提升。具体而言，1 wt% MNP 样品的温度由初始的 26 °C 上升至约 34 °C，相比之下，0.1 wt% MNP 样品的温度仅升至约 30 °C。图 6b 则显示了当近红外功率提升至 2W 时，所有浓度体系的温度上升速率及最终温度均显著增加，其中 1 wt% MNP 样品的温度迅速攀升至 40 °C 以上，而 0.1 wt% MNP 样品则升至约 32 °C。这一结果充分表明，高浓度 MNP 具有更强的光热响应性。实验数据证实，琼脂糖结构色水凝胶的光热转换效率随 MNP 浓度的增加而显著提高，这主要得益于 MNP 卓越的近红外光吸收能力，能够高效地将光能转换为热能。本研究不仅揭示了 MNP 在光热响应中的巨大潜力，还展示了

其与琼脂糖结合后在光子晶体体系中的温度调节能力。通过外部光照，该体系的温度可迅速且精确地调控，这一特性使其在光热治疗、温度传感器及可调节光学器件等领域展现出广阔的应用前景。通过精细调节 MNP 的浓度和近红外照射功率，我们可实现对材料温度的精确控制，为智能光热材料的进一步开发奠定了实验基础。

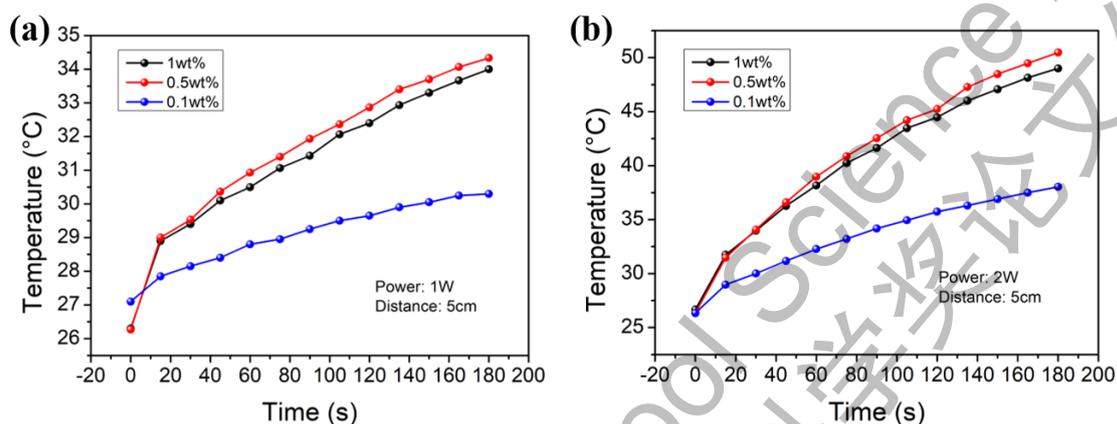


图 6. 不同浓度 MNP 的琼脂糖结构色水凝胶在近红外照射下的温度变化与时间的关系。

(a) 近红外功率设定为 1 W，照射距离为 5 cm 时的时间-温度曲线。(b) 近红外功率提升至 2 W，照射距离保持 5 cm 时的时间-温度曲线。

### 3.4 光热响应性结构色水凝胶的智能显示应用探索

基于前期实验的探索成果，我们采用了 25 wt% 的 SSNP、2.5 wt% 的琼脂糖及 1 wt% 的 MNP，构建了光热响应性结构色水凝胶。利用先进的喷墨打印技术，在透明的 PET 薄膜上精确构建了结构色水凝胶液滴阵列，以观察其智能显示特性。实验结果显示，该液滴阵列在近红外光照射前后，展现出了鲜明的结构色变化。当近红外光源移动时，受照射的液滴因光热响应而发生结构色蓝移，使得照射路径上的液滴颜色均从绿色转变为蓝色。通过近红外光的远程操控，我们成功在结构色液滴阵列上绘制出了“Z 形”与“菱形”图案（图 7）。因此，该光热响应性结构色水凝胶在远程近红外光照射下，表现出了卓越的结构色远程智能可调性，预示着这种材料在智能显示器件、多功能传感器以及可变色装饰涂层等领域具有广泛的应用前景和巨大的发展潜力。

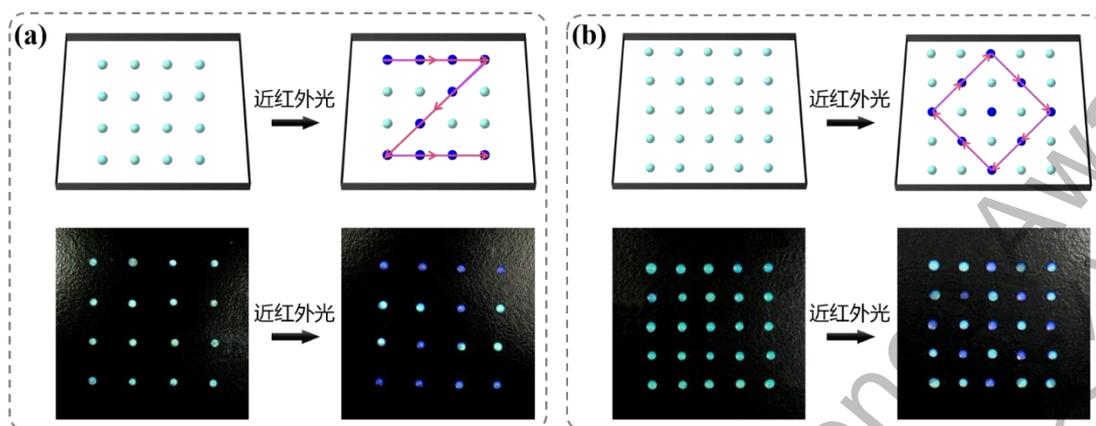


图 7. 喷墨打印的光热响应性结构色水凝胶液滴阵列在近红外光照射前后的结构色变化。

(a) 利用近红外光在液滴阵列上打印出“Z形”图案。(b) 利用近红外光在液滴阵列上打印出“菱形”图案。

#### 四、总结与展望

我们创新性地提出了一种基于复合结构色水凝胶的智能显示技术。利用磺酸化二氧化硅纳米颗粒自组装形成光子晶体，产生了稳定的结构色。同时，通过整合琼脂糖水凝胶与墨鱼汁纳米颗粒，显著提升了材料的温度响应性和光热转换效率。研究结果显示，这种集成了多功能单元的光热响应性结构色水凝胶不仅对温度敏感，而且对近红外光具有显著的响应性，能够实现外观颜色的动态调节。利用喷墨打印技术，我们成功构建了结构色液滴阵列，并通过近红外光精确控制了照射路径上液滴的颜色变化，从而实现了彩色图案的绘制。这一成果充分验证了光热响应性结构色水凝胶在智能显示领域的巨大应用潜力。在之后的研究中，我们将持续优化材料体系，集成更多功能单元，并结合更多先进的加工技术，以期将这种智能结构色水凝胶的应用范围拓展至智能显示器件、生物医用传感器、可穿戴设备等多个领域。

## 五、参考文献

1. Schadt, M., Milestone in the History of Field-Effect Liquid Crystal Displays and Materials. *Jpn J Appl Phys* **2009**, *48* (3S2), 03B001.
2. Braun, P. V., MATERIALS SCIENCE Colour without colourants. *Nature* **2011**, *472* (7344), 423-424.
3. Cai, Z. Y.; Li, Z. W.; Ravaine, S.; He, M. X.; Song, Y. L.; Yin, Y. D.; Zheng, H. B.; Teng, J. H.; Zhang, A. O., From colloidal particles to photonic crystals: advances in self-assembly and their emerging applications. *Chem Soc Rev* **2021**, *50* (10), 5898-5951.
4. Kinoshita, S.; Yoshioka, S.; Miyazaki, J., Physics of structural colors. *Rep Prog Phys* **2008**, *71* (7).
5. Cuthill, I. C.; Allen, W. L.; Arbuckle, K.; Caspers, B.; Chaplin, G.; Hauber, M. E.; Hill, G. E.; Jablonski, N. G.; Jiggins, C. D.; Kelber, A.; Mappes, J.; Marshall, J.; Merrill, R.; Osorio, D.; Prum, R.; Roberts, N. W.; Roulin, A.; Rowland, H. M.; Sherratt, T. N.; Skelhorn, J.; Speed, M. P.; Stevens, M.; Stoddard, M. C.; Stuart-Fox, D.; Talas, L.; Tibbetts, E.; Caro, T., The biology of color. *Science* **2017**, *357* (6350).
6. Zi, J.; Yu, X.; Li, Y.; Hu, X.; Xu, C.; Wang, X.; Liu, X.; Fu, R., Coloration strategies in peacock feathers. *Proc Natl Acad Sci U S A* **2003**, *100* (22), 12576-8.
7. Fu, Y.; Tippets, C. A.; Donev, E. U.; Lopez, R., Structural colors: from natural to artificial systems. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol* **2016**, *8* (5), 758-75.
8. Parker, A. R.; Townley, H. E., Biomimetics of photonic nanostructures. *Nat Nanotechnol* **2007**, *2* (6), 347-53.
9. Li, K.; Li, C.; Li, H.; Li, M.; Song, Y., Designable structural coloration by colloidal particle assembly: from nature to artificial manufacturing. *iScience* **2021**, *24* (2), 102121.
10. Zhao, Z.; Wang, H.; Shang, L.; Yu, Y.; Fu, F.; Zhao, Y.; Gu, Z., Bioinspired Heterogeneous Structural Color Stripes from Capillaries. *Adv Mater* **2017**, *29* (46).
11. Yu, Z.; Wang, C. F.; Ling, L.; Chen, L.; Chen, S., Triphase microfluidic-directed self-assembly: anisotropic colloidal photonic crystal supraparticles and multicolor patterns made easy. *Angew Chem Int Ed Engl* **2012**, *51* (10), 2375-8.
12. Liu, H.; Wang, C.; Wang, P.; Liu, N.; Du, Q., A Two-Step Strategy for Fabrication of Biocompatible 3D Magnetically Responsive Photonic Crystals. *Front Chem* **2019**, *7*, 26.
13. Zeng, Y.; Liu, K.; Ding, H.; Chong, Z.; Niu, Y.; Guo, Y.; Wei, M.; Du, X.; Gu, Z., Direct Laser Writing Photonic Crystal Hydrogels with a Supramolecular Sacrificial Scaffold. *Small* **2024**, *20* (3), e2306524.
14. Xiao, D.; Ma, H.; Luo, W.; Guan, J., Agarose-Based Hydrogel Film with Embedded Oriented Photonic Nanochains for Sensing pH. *Polymers (Basel)* **2024**, *16* (11).
15. Tang, Y. Q.; Cai, X. Q.; Xiang, Y. Y.; Zhao, Y.; Zhang, X. G.; Wu, Z. M., Cross-linked antifouling polysaccharide hydrogel coating as extracellular matrix mimics for wound healing. *J Mater Chem B* **2017**, *5* (16), 2989-2999.
16. Li, J., Advanced Biomaterials for Drug Delivery and Tissue Regeneration. *Curr Drug Deliv* **2021**, *18* (7), 834-835.
17. Zarrintaj, P.; Manouchehri, S.; Ahmadi, Z.; Saeb, M. R.; Urbanska, A. M.; Kaplan, D. L.; Mozafari, M., Agarose-based biomaterials for tissue engineering. *Carbohydr Polym* **2018**, *187*, 66-84.

18. Itazu, A.; Moritaka, H.; Bona, D.; Okamura, Y.; Matsukawa, S., Influence of the Number of Chewing Cycles on the Sweetness and Saltiness Intensity of Agarose Gel. *Food Science and Technology Research* **2017**, *23* (3), 437-448.

19. Deng, R. H.; Zou, M. Z.; Zheng, D.; Peng, S. Y.; Liu, W.; Bai, X. F.; Chen, H. S.; Sun, Y.; Zhou, P. H.; Zhang, X. Z., Nanoparticles from Cuttlefish Ink Inhibit Tumor Growth by Synergizing Immunotherapy and Photothermal Therapy. *ACS Nano* **2019**, *13* (8), 8618-8629.

20. Zhou, J.; Liu, W.; Zhao, X.; Xian, Y.; Wu, W.; Zhang, X.; Zhao, N.; Xu, F. J.; Wang, C., Natural Melanin/Alginate Hydrogels Achieve Cardiac Repair through ROS Scavenging and Macrophage Polarization. *Adv Sci (Weinh)* **2021**, *8* (20), e2100505.

21. Cao, X.; Sun, L.; Xu, D.; Miao, S.; Li, N.; Zhao, Y., Melanin-Integrated Structural Color Hybrid Hydrogels for Wound Healing. *Adv Sci (Weinh)* **2023**, *10* (22), e2300902.

## 致谢

本课题研究背景源于我初中时的一次经历，当时我参加了一场关于液晶显示器（LCD）的英文科普竞赛，并获得了上海市二等奖，这次比赛让我对显示技术产生了浓厚的兴趣。后来我在其他科学新闻中了解到仿生结构色材料在显示技术中的潜在应用，并且认识到这种新型材料在未来显示技术中可能具有的突破性进展。因此，我决定深入研究仿生结构色材料在显示技术中的应用。通过网络搜索，了解到复旦大学商珞然老师在该领域做了很多有趣的工作。随后，我主动联系商珞然老师，成功加入了她的课题组，开展相关科创研究。

通过初步的文献调研，我确定了将天然来源的材料琼脂糖和墨鱼汁纳米颗粒应用于材料的构建，进一步查阅相关资料并了解结构色制备的原理后，和商老师共同设计了课题研究方案并确认了其可行性。在整个研究过程中，感谢商老师作为我的指导教师，给予了无偿的指导，提供了实验场地、试剂及设备支持。

具体的研究工作，包括实验材料的选择、实验设备的调试以及实验条件的优化等，均为本人独立完成，其中 SEM 电镜表征为第三方测试。在实验中遇到的一些技术性问题，如设备调试和实验变量的控制，我通过与指导老师讨论寻找和确定解决方案。

实验过程中，我设计了纳米颗粒与琼脂糖相结合的光子晶体体系，并通过调节纳米颗粒浓度、温度等变量，采集了不同条件下的光学数据，随后我又独立完成数据分析和计算工作，包括对反射光谱的分析和相关参数的计算。我在处理自己所得的光谱数据以及协助课题组其他成员处理光谱数据时，发现从大量的光谱数据中确定光谱的反射峰峰值比较耗费时间，因此尝试利用本人所掌握的计算机科学知识，自主编写了一个基于 Python 的程序，能够快速识别并记录下在可见光范围内光谱的反射峰峰值。该程序显著减少了数据处理时间，为批量数据分析提供了一种高效方法。

论文数据分析以及论文初稿撰写均由我独立完成，包含实验结果的整理与分析、数据图谱的制作，结果分析和讨论。指导老师在论文结构和表达方式上给予了指导，帮助我更好地组织文章的逻辑结构和学术语言表达。

通过这次研究，我不仅加深了对仿生结构色材料的理解，也提升了独立开展科研工作的能力，更加激发了对科学研究的兴趣和未来从事科学研究的向往。

### 论文作者简历:

姓名: Yinuo Elizabeth Li

学校: 上海中学国际部

年级: 10 年级

#### 科创和学科竞赛奖项:

2022 年 11 月, 上海市青少年科学思创挑战活动二等奖

2022 年 11 月, 上海市青浦区科学思创挑战活动一等奖

2023 年, Cambridge Chemistry Challenge, Golden Award

2023 年, Physics Bowl, Silver Award

### 指导老师简历:

姓名: 商珞然

职称: 研究员

地址: 东安路 131 号科研二号楼 A3-004, 上海 200032

邮箱: luoranshang@fudan.edu.cn

商珞然研究员于 2013 年从东南大学生物医学工程学院获得学士, 2017 从东南大学生物医学工程学院获得博士学位, 2017 到 2019 年在哈佛大学工程与应用科学学院从事博士后研究, 2019 年作为独立课题组长和博士生导师进入复旦大学生物医学研究院工作。主要研究方向为基于软物质的构效关系, 综合运用仿生学原理、微流控、3D 打印、自组装等技术调控软物质材料的微纳结构和光学效应、浸润性、界面黏附、智能响应等性能, 并应用于微型反应器件、生物传感、药物递送等方面。