引用格式：孙书瑞，储广萌，李义臣，等．光子晶体传感器在生物医学中的应用进展[J]．材料工程，2026，54(6)：25-39.
SUN Shurui，CHU Guangmeng，LI Yichen，et al.Research progress in photonic crystal sensors for biomedicine[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(6)：25-39.

光子晶体传感器在生物医学中的应用进展

孙书瑞[1,2,3]，储广萌[1,2,3]，李义臣[1,2,3*]，张　骏[1,2,3*]
（1 苏州大学 纺织与服装工程学院，江苏 苏州 215021；2 苏州大学 现代丝绸国家工程实验室，江苏 苏州 215021；3 苏州大学 纺织行业丝绸功能材料与技术重点实验室，江苏 苏州 215021）

摘要：光子晶体是一种具有光子带隙特性的周期性电介质结构，通过与入射光的物理光学作用，能够产生明亮艳丽的结构色。自然界中的许多生物，如孔雀、蜂鸟和昆虫通过进化发展出了复杂的光子晶体结构，进而呈现丰富多彩的结构色。受到自然界的启发，科研人员通过构筑人造光子晶体结构，并将其应用于生物传感领域，开发出了一系列创新型可视化生物传感器。本综述总结了光子晶体在生物传感领域的应用现状，包括光子晶体结构色的基本概念、自然界中的光子晶体结构现象、光子晶体结构色生物传感器的响应类型及其具体应用。同时，本综述还展望了光子晶体生物传感器在未来精准医疗、生理监测及环境感知等领域的发展前景，强调了对响应型光子晶体生物传感器进行持续研究和改进的重要性，以期推动仿生材料学及医学领域的科技进步。

关键词：光子晶体；生物传感；结构色；智能响应；可视化；生理监测
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000100　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000100
中图分类号：TB381　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)06-0025-15

Research progress in photonic crystal sensors for biomedicine

SUN Shurui[1,2,3]，CHU Guangmeng[1,2,3]，LI Yichen[1,2,3*]，ZHANG Jun[1,2,3*]
（1 College of Textiles and Clothing Engineering，Soochow University，Suzhou 215021，Jiangsu，China；
2 National Engineering Laboratory for Modern Silk，Soochow University，Suzhou 215021，Jiangsu，China；
3 China National Textile and Apparel Council Key Laboratory of Silk Functional Materials and Technology，Soochow University，Suzhou 215021，Jiangsu，China）

Abstract：Photonic crystal (PC) with a periodic dielectric structure exhibits photonic band gap property. It can produce bright and gorgeous structural colors through physical optics upon interaction with incident light. Over the course of evolution, many organisms, such as peacocks, hummingbirds, and insects, have gradually developed complex photonic crystal structures, progressing from one-dimensional nanostructured photonic gratings or multilayers to three-dimensional colloidal crystals, thereby presenting rich and colorful structural colors. Inspired by nature, researchers have developed a series of innovative visual biosensors by fabricating artificial photonic crystal structures and integrating them into biosensor technology. These biosensors, incorporating photonic crystal structures, can visually respond to various stimuli, such as temperature, stress, environmental pH, and small molecules, by altering lattice parameters, dielectric constants, or Bragg diffraction angles through the combination of photonic crystal chromophoric structures and responsive materials. They show great potential in cell mechanics monitoring, drug transport tracking, bionic skin design, wearable bionic materials, and disease prevention and treatment. This review summarizes the application status of photonic crystals in the field of biosensors, including the basic concept of photonic crystal structure color, the photonic crystal structure phenomena in different dimensions in nature, the temperature, mechanics, environmental pH, and molecular response types of photonic crystal structure color biosensors, and their specific applications. Finally, the development prospects of photonic crystal biosensors in the fields of precision medicine, physiological monitoring, and environmental sensing

in the future are prospected, emphasizing the importance of ongoing research and improvement of responsive photonic crystal biosensors, to drive advancements in bionic materials and medical science and technology.

Key words: photonic crystal; biosensor; structural color; smart responsiveness; visualization; physiological monitoring

颜色的本质是由不同波长的电磁波与人眼视网膜上的感光细胞相互作用后,经由大脑复杂认知机制解读后形成的色知觉。电磁波谱作为一个宽泛的范畴,涵盖了从极低频率的无线电波到极高频率的伽马射线。在此光谱中,波长介于380~780 nm之间的电磁波,因能够被人类视网膜上的视锥细胞捕获并转化为神经信号,进而被大脑识别为颜色,故被称为可见光。在可见光线与物质相互作用的过程中,当光线照射至物体表面或界面时,会发生反射、透射以及吸收等光学行为[1]。这一系列光学行为塑造了物体表面的视觉特性,呈现了一个色彩斑斓、多姿多彩的世界。

根据颜色产生的物理与化学机制,可以将颜色大体上划分为色素色与结构色两大类。色素色依赖于物质内部对光的吸收和反射特性,而结构色源于可见光与周期性物理结构之间几何和物理光学效应,具体包括折射、散射、干涉、衍射等现象[2-3]。这些光学效应通过改变光的传播路径和波长分布,使物体在不同角度下展现出独特的色彩效果[4]。

在绚烂多彩的自然界中,大部分植物和动物的颜色归类于色素色。然而,某些鸟类如孔雀、蜂鸟,以及昆虫如蓝闪蝶和金龟子,却展现出独特的结构色。与色素色相比,结构色在视觉表现上更为生动明亮,且具有独特的虹彩效应,其在不同的角度下呈现出不同的颜色视觉效果。在自然界漫长的进化历程中,众多生物逐渐发展出从一维纳米结构的光子光栅或多层膜到三维胶体晶体的复杂微观结构[5],以呈现丰富多彩的结构色。一维光子晶体由高低两种不同折射率的材料交替组成,在自然界中广泛存在,常见于某些植物和昆虫中。相比之下,二维光子晶体能在两个不同的方向上表现出周期性,在自然界中则较为罕见,但其特殊的结构却赋予了生物体更为独特的色彩表现。孔雀羽毛的斑斓色来源于其羽肢外层皮质中的二维光子晶体结构,其主要由连接着角蛋白的黑色素杆组成,并嵌入表面角蛋白层下方[6]。

在自然界的各种结构色中,三维光子晶体结构以其高度的复杂性而著称,其具有在3个维度上的周期性特征[7]。象鼻虫的鳞片由甲壳素与其中嵌入的空隙共同构建出一种类似反蛋白石结构的面心立方堆积模式[8]。这种独特的结构在阳光照射下,能够展现出令人目眩的色彩效果。另一典型实例为宽绒番凤蝶的翅膀,其表面覆盖着反蛋白石三维光子晶体结构。这些光子晶体的取向在小范围内呈现无序状态,但总体上,大部分晶体倾向于沿着鳞片表面的法线方向排列对齐[9]。这种有序与无序相结合的精妙结构,赋予了宽绒番凤蝶翅膀均匀而鲜明的绿色外观。这些自然界中的结构色现象,不仅展示了光子晶体在微观尺度上的精妙构造,也为科学研究提供了丰富的素材和灵感。

在探索了自然界中不同动植物的显色机理后,研究人员对于这类颜色鲜艳且具有高饱和度特点的结构色产生了巨大的兴趣,并开展了有关人工制备光子晶体结构色的研究。从对生物体一维、二维和三维光子晶体显色机理的研究,到人工光子晶体的构筑,研究者经过理论分析与实验逐渐掌握了对光子晶体结构色显色的调控方法,其主要包括改变光子晶体相对折射率、晶格间隙、光线入射角等参数,从而控制材料展现出丰富多彩的结构色。此外,还有学者通过研究变色龙等生物的变色原理,发现了光子晶体结构色具有智能响应性的特点,并尝试将其应用于传感器等领域,实现了独特的可视化传感。本文系统综述了从自然界生物结构色到人造光子晶体结构色的各类响应机理及其在生物传感领域的应用等方面的研究进展。

1 光子晶体结构色概述

光子晶体(photonic crystal,PC)是一种具有光子带隙(photonic bandgap,PBG)特性的周期性电介质结构。类似于电子在半导体中的传播,当光子进入介电常数不同且在空间上呈周期性排布的介电材料时,会遇到某些频率波段的光子无法通过的能带,这被称为光子带隙[10],是光子晶体的基本特征。根据折射率周期性变化的空间分布,光子晶体可分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体(图1(a))[11-12]。一维光子晶体是一种在单一维度上展现出介电材料层状周期性堆叠的精细结构,亦被广泛称作布拉格反射器或布拉格镜,其特点在于通过一维周期性排布实现对特定波长光的反射与透射调控。二维光子晶体是在两个空间方向上有着介电材料的周期性堆叠,在第

3个空间方向上，介电材料是均匀结构。而三维光子晶体是最为复杂且功能全面的光子学材料体系，其在所有3个空间维度上均呈现出精密的周期性排列模式，确保了无论入射电磁波来自何方，均能受到光子晶体的有效调制，从而在光操控等领域展现出非凡的性能与应用前景[7,13-14]。通常来说，在常规染料不合适或环境不可取的地区，可调控的光子晶体结构颜色的使用具有吸引力（图1(b)）[15]。

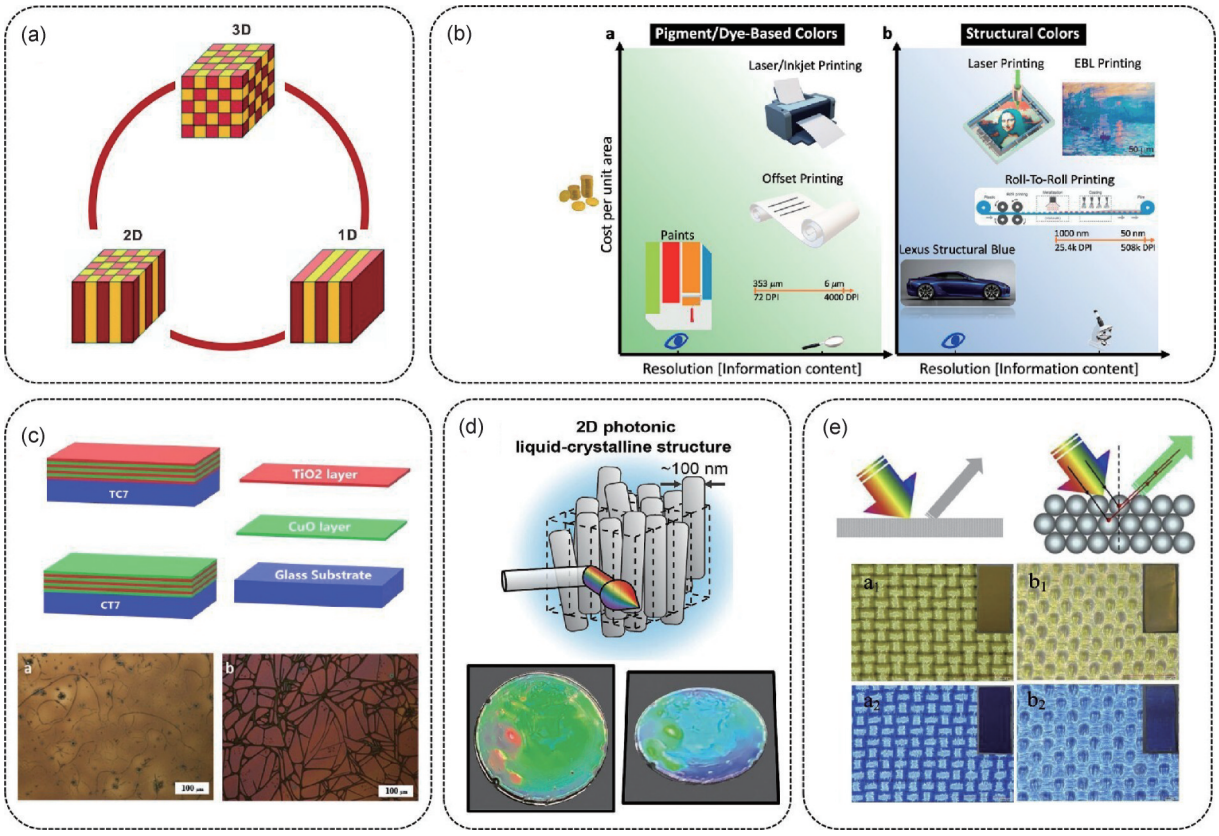


图1　光子晶体结构色

(a)光子晶体的分类[12]；(b)基于颜料/染料的颜色在可定制性和分辨率方面与结构色的对比[15]；(c)采用自旋涂技术沉积在玻璃基板上不同结构的一维光子晶体图层样品模型及其光学图像[22]；(d)自组装棒状颗粒组成的2D光子胶体晶体液晶结构及其光学图像[25]；(e)白色光在织物基底和三维光子晶体基底上的示意图和光学图像[28]

Fig.1　Photonic crystal structure color

(a)classification of photonic crystals[12]; (b)pigment/dye-based colors are compared with structural colors in terms of customizability and resolution[15]; (c)one-dimensional photonic crystal layer sample models with different structures deposited on glass substrates by spin coating technology and their optical images[22]; (d)liquid crystal structure and optical image of 2D photonic colloidal crystals composed of self-assembled rod-like particles[25]; (e)schematic and optical images of white light on fabric substrate and three-dimensional photonic crystal substrate[28]

通常，光子带隙会受到多种因素的影响，包括不同介质的介电常数、填充率、晶格结构以及散射原子的形状等。例如，光子晶体中两种介质的介电常数比值越大，对入射光的散射就越强烈，光子带隙出现的可能性也就越高。除了光子带隙特性外，光子晶体还具有光子局域现象[16]、抑制自发辐射[17-18]等特性，其中二维光子晶体还具有独特的横电场和横磁场两种偏振特性。

当光子晶体的禁带处于可见光波段（380～780 nm），与之相当波长的电磁波将会被禁止传播而不能进入该晶体，这部分被静止的电磁波会被光子晶体结构选择性反射，进而在周期性排列的光子晶体表面形成相干衍射，当相长干涉的反射光刺激视觉系统，便会产生明亮艳丽的结构色效果。这种颜色由物质的微观结构决定，满足布拉格衍射定律[19]。光子晶体结构色取决于3个关键参数：相对折射率（介电常数）、晶格常数、入射角或者布拉格观测角[20]。三者与结构色的产生和光子晶体的维度有关，布拉格堆积一维光子晶体的反射峰位置（即λ_{Bragg}）满足Bragg基本方程，如式(1)所示：

$$m\lambda_{Bragg}=2d_{hkl}\sqrt{n_e^2-\sin^2\theta} \tag{1}$$

式中：m为衍射级数；d为晶面间距；n_e为光子晶体结构

内部的平均折射率;θ为入射光的入射角[21-23]。二维光子晶体具有高衍射效率、易于制备和转移、对分析物响应灵敏等优点,它的光子禁带出现在二维方向上,其布拉格衍射波长λ计算,如式(2)所示[24-26]:

$$m\lambda=\sqrt{3}\,d\sin\theta \tag{2}$$

而对于以蛋白石光子晶体为代表的三维光子晶体的微球状晶格,若其为紧密堆积的面心立方结构,则晶面间距与微球基元间的关系,如式(3)所示[27-29]:

$$d_{111}=\sqrt{2/3}\,D \tag{3}$$

三维光子晶体的光学性质满足的衍射规律,如式(4),(5)所示:

$$m\lambda=\sqrt{8/3}\,D\left(n_e^2-\sin^2\theta_1\right) \tag{4}$$

$$n_e=\sqrt{n_1^2v_1+n_2^2v_2} \tag{5}$$

式中:v_1和v_2分别代表两种介质材料在结构中的体积占比;D为微球与微球之间的中心距离;θ_1为入射光与光子晶体(111)面法向方向的夹角。

根据所述公式的阐释,结构色的产生显现出与晶面间距(d_{hkl})、平均折射率(n_e)及入射角(θ_1)等诸多参数的紧密关联性。通过功能化设计,可针对不同响应需求对上述参数进行动态调控。例如,可引入温敏性聚合物作为光子晶体介质,其热致体积相变可同步改变晶格间距与有效折射率。这种参数定向调控策略使得反射光谱可被限定在可见光波段(380~780 nm),无需依赖复杂仪器,仅通过裸眼观测颜色变化即可实时敷料药物释放速率、体表汗液pH值或口腔微生物代谢状态等生物指标。进一步地,基于不同维度的布拉格方程,研究者可通过协同调控材料组分、结构维度等手段,实现对结构色特性的响应优化,为基于光子晶体传感器的精准医疗和智能诊断提供创新解决方案。

2 光子晶体结构色传感器的响应类型

传感器,从广义角度界定,是指依据特定物理、化学、生物学原理、定理、定律或效应,实现能量形式与信息内容的高效转换,并确保其输出信号与输入刺激之间存在严格对应关系的精密器件或系统[30]。近年来,随着社会对生活质量要求的日益提高及公众健康意识的显著增强,生物传感器领域经历了前所未有的快速发展。这些技术不仅深度介入疾病的筛查、诊断、治疗过程,以及对患者健康状况的持续监测和整体健康管理,还极大地促进了对细菌、真菌、病毒等多种微生物的认知,为疾病的预防策略与治疗方案的优化提供了有力支持。当前,生物传感器技术呈现出多样化的发展趋势,主要包括以下几类:(1)可植入式体内生物传感器,该类传感器能够直接置于人体内部,如大脑、血管、眼睛等关键部位,实现对生理压力的精确测量[31-32];(2)柔性可穿戴生物传感器,设计用于贴合于胸部、手腕、脚踝等体表位置,实现远程、实时的健康数据监控[33-35];(3)电化学与酶基生物传感器,利用传感元件与目标分析物间的特异性相互作用,实现对核酸、蛋白质、葡萄糖等生物体内重要有机分子的高精度检测[36-38]。此外,科研界还积极探索并开发了一系列新型生物传感器,如基于等离子体的生物传感器[39-40]、金属氧化物半导体生物传感器[41-42]及石墨烯基生物传感器[43-44]等,这些技术专注于生物小分子的监测与分析,是生物传感技术在深度、精度及应用范围上的不断拓展与创新。

但是,上文提到的传感器工作机理,主要都是通过响应机械变化转变为电阻变化、电容变化或者产生电荷等,从而对人体的心率、血氧水平、呼吸、温度等生理信号或是一些生物分子进行实时的监测。存在检测效率较低,过程复杂等缺点。如今,许多科学家受到自然界响应型光子晶体结构色的启发,研发了不同功能的光子晶体结构色传感器,可以实现对温度、力学、pH值和小分子等方面的多重响应。该类型的光子晶体传感器的主要响应机理,是通过外界温度、机械力的变化或是环境pH值的改变、与生物分子的结合等因素,使得内部的光子晶体纳米结构的折射率、晶格常数两个内部的结构参数发生变化,从而反映出不同的光学现象。与上文传统的生物传感器相比,光子晶体传感器往往具有更加直观、精确度更高、响应类型更广、响应性可逆等优点,对于人体健康的检测和各类疾病的预防与治疗有着广阔的应用前景。

2.1 温度响应

光子晶体温度响应型传感器通常由光子晶体材料与温敏性聚合物复合而成,基于温敏性聚合物在不同温度下内部结构变化而导致的不同程度的溶胀或收缩现象,使得材料内部光子晶体的晶格常数或相对折射率发生变化,进而通过传感器的颜色变化反映出检测目标对应的温度变化,实现可视化响应。

聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAM)为常见的具有热响应性质的微凝胶,它的低临界溶液温度(LCST)约为32~34 ℃。当温度低于LCST时,PNIPAM分子与水分子之间形成大量氢键,表现为亲水性,聚合物链在水中充分溶胀并呈现水凝胶状态。当温度高于LCST时,PNIPAM的酰胺基与水分子之间的氢键逐渐破裂,亲水性下降,疏水基团(异丙基)相互聚集,聚合物链发生卷曲和聚集,会导致体积显

著收缩[45-46]。Lu 等[47]通过将 PNIPAM 与蝴蝶翅膀的微观结构结合，利用戊二醛（GA）作为桥接剂，在翅膀表面形成了均匀的 PNIPAM 涂层。传统胶体晶体中，微球体收缩导致晶格常数减小，反射波长随之减小（蓝移现象）。但在该材料中，由于温度升高水分子被排出，导致 PNIPAM 折射率显著增加，使系统的整体有效折射率增加，且有效折射率的增加对波长的贡献超过了晶格收缩的影响，最终导致反射波长发生红移。此外，Fei 等[48]同样利用蝴蝶翅膀为模板，将 PNIPAm 与银纳米颗粒（AgNPs）复合，成功制备出一种光热双重响应的光子晶体复合材料。由于金属纳米粒子的引入，装载有银纳米颗粒的聚合物涂层蝴蝶翅膀（PC-Ag@PNIPAm）在激光照射下，AgNFs 通过表面等离子体共振（SPR）可将光能转化为热能，材料表面温度升高，从而引发 PNIPAm 层收缩，反射波长蓝移。

胆甾相液晶作为一类由杆状纳米颗粒或分子以扭曲方式周期性排列而成的特殊材料，展现出独特的光子带隙特性，能够精准地选择性反射特定波长的光线，从而呈现出绚丽多彩的结构色。这一特性源于其内部精细的螺旋结构，而该结构对环境温度的变化极为敏感。具体而言，随着环境温度的波动，胆甾相液晶的螺旋节距会发生相应的调整，影响液晶材料内部的折射率等参数，进而引起反射光波长的改变，宏观上表现为颜色的变化。Zhang 团队[49]近期的研究工作将天然高分子与智能水凝胶相结合，开发出一种基于胆甾相纤维素的新型液晶墨水，为三维结构色打印领域带来了突破。该复合墨水的核心配方包含了两种具有热响应性的组分：羟丙基纤维素（HPC）和丙烯酰胺-丙烯酸共聚物（PACA）。在温度升高的条件下，HPC 分子链的构象发生变化，导致螺旋节距缩短；与此同时，PACA 水凝胶网络因温度响应而发生体积膨胀。这两种热致效应的协同作用，加上液晶材料折射率等结构参数的变化，最终导致在加热条件下打印出的物体发生体积膨胀和颜色红移，从而实现了颜色的可控变化（如图 2(a)）。此外，Gao 等[50]创新地采用手性向列相液晶（隶属胆甾相液晶范畴）微胶囊作为核心材料，成功研制出一种用于表皮温度监测的光子传感器件（图 2(b)）。随着环境温度的升高，微胶囊内部的液晶分子的螺旋节距减小，这一结构上的调整直接影响了液晶对光的反射行为，导致反射光谱中峰值波长向短波方向移动，即发生经典的蓝移现象。因此，通过观察器件表面颜色的变化，即可实现对表皮温度的直观监测。

2.2　力学响应

研究者通常利用光子晶体与水凝胶的结合制作出具力学响应的生物传感器，水凝胶优秀的可拉伸和回弹特性在传感器受压时，驱动内部的光子晶体结构参数的改变，影响导致间隙及反射光线的改变，进而实现颜色可逆的力学传感响应。Guo 团队[51]从自然界的水母触须中汲取灵感，采用先进的微流控纺丝技术，成功制备出一种包含反蛋白石水凝胶微球的微纤维触觉传感器。该传感器能感知压缩或拉伸等机械刺激，通过调整纳米级孔隙结构（晶格参数），引发反射光谱峰值位移。独特的是，微球在水凝胶中的分散模式使传感器对局部施加的压力极为敏感，当触及空间特定位置时，展现出位置特异性颜色变化（图 2(c)），从而实现了高精度的触觉感应。Xu 等[52]研发了一种基于人类诱导多功能干细胞衍生心肌细胞的活性各向异性的结构色水凝胶心脏芯片，用于体外评估环境毒素对人类心脏组织的影响。这种芯片将健康的心肌细胞在水凝胶的导电性碳纳米管顶层有序生长，自主进行跳动，从而引起水凝胶内部的反蛋白石结构光子晶体间隙改变，形成规律性的结构色变化。然而，如果存在毒素作用，则细胞的收缩力及活性会减弱，结构色变化幅度相应减小，这有助于观察到环境毒素对心脏组织的影响（图 2(d)）。

2.3　pH 值响应

在最近的科学研究中，聚合物 poly（2-vinylpyridine）（P2 VP）因其独特的 pH 值响应性而在结构色传感器领域受到广泛关注。P2 VP 作为一种弱电解质，其质子化过程在酸性环境下会导致体积膨胀（溶胀），而在碱性条件下则发生去质子化，导致聚合物收缩。这种在不同 pH 值条件下的体积变化，会显著影响材料内部光子晶体的有效折射率和光的反射路径，进而引发反射光谱的红移或蓝移，可直观表现为颜色的变化[53]。Yu 等[54]利用非紧密堆积的单层胶体晶体作为模板，成功制备了超薄光子聚合物凝胶膜。该膜在添加 P2 VP 聚合物后，显著提升了其光子传感性能。这种超薄光子聚合物凝胶膜在 pH 值传感中表现出卓越的响应性和线性关系，实现了快速的可视化 pH 值监测，同时具备优异的循环稳定性和较小的滞后环。这一研究成果不仅为 pH 值传感器的设计提供了新思路，还展示了聚合物凝胶在光学传感领域的巨大潜力。与此同时，Yang 团队[55]则采用自乳化的方法，以 P2 VP 为主要原料，成功制备了具有周期性壳结构的微胶囊。这种空心微胶囊利用 P2 VP 壳层在不同 pH 值环境下的溶胀与收缩特性，实现了壳层厚度和折射率的快速变化，从而产生对应的颜色响应（图 2(e)）。与实

心微球相比，空心微胶囊的单色性显著增强，且在不同刺激下的颜色变化更加稳定和均匀。这项研究不仅提高了光子晶体微胶囊的传感性能，还为其在药物释放可视化等领域的应用开辟了新的途径。

除了使用具有pH值响应性P2 VP作为原料，还有研究者通过对光子晶体微球表面进行改性以实现对pH值的智能监测。Liao等[56]通过乳液聚合方法合成了单分散的聚(甲基丙烯酸甲酯-丙烯酸丁酯)(P(MMA-BA))共聚物纳米粒子，并经过自组装形成致密有序结构的薄膜。薄膜的pH值响应性主要依赖于极性羧基在共聚物纳米颗粒表面的键合，它们通过在锚定的物种和共聚物骨架之间的氢键和纳米颗粒与周围溶液之间的羟基离子浓度梯度产生的渗透压共同作用，可以随pH值的改变而改变聚合物链的排列和粒子间的距离，从而产生薄膜的结构色变化。这种响应过程是可逆的，能够根据外界pH值条件的变化调节颜色，展示出极好的灵活性和调控能力。Guan团队[57]通过超顺磁性Fe_3O_4@PVP纳米颗粒的磁场排列，形成一维周期结构，将2-羟基乙基丙烯酸酯(HEA)、丙烯酸(AA)等单体，通过氢键吸附到Fe_3O_4@PVP颗粒周围，在紫外光照下进行自由基聚合，生成包覆在磁性颗粒表面的水凝胶外壳，得到光子纳米链(RPNCs)。水凝胶中的羧基(—COOH)在酸性和碱性下会分别发生质子化和脱质子化，使水凝胶表现出收缩和膨胀，纳米链的晶格常数改变，反射波长随之变化(图2(f))。为了解决RPNCs在液体中使用的稳定性和污染问题，将RPNCs嵌入琼脂糖水凝胶中，制备出异质水凝胶薄膜，实现了快速pH值响应并提升传感器稳定性和循环耐久性[58]。

2.4 分子响应

还有许多科学家致力于研发能够智能响应不同小分子物质的生物传感器。在这些研究中，特殊传感器材料与目标分子之间的物理或化学结合会导致材料内部光子晶体的折射率、晶格间隙等发生变化，进而引发可观察的颜色变化。Meradi等[59]基于增强表面等离子共振(SPR)原理，创新性地设计了一种多层结构生物传感器。该传感器由钛、银、石墨烯和光子晶体层组成。当目标分子(如血浆中的蛋白质或癌细胞)与传感器表面结合时，会改变传感器表面的折射率，从而影响SPR条件，导致反射光强度的变化和共振角的偏移。通过测量这些变化，可以计算出目标分子的浓度。特别的，光子晶体层的引入显著增强了SPR传感器表面的局部电场强度，提高了传感器对折射率变化的灵敏度，使其能够检测到极其微小的折射率变化。例如，在检测血浆或癌细胞等目标物质时，光子晶体层能够放大SPR共振角的偏移，从而实现更高精度的检测。Talukdar等[60]研发了一种创新的裸眼色度传感器，该传感器采用多孔硅薄膜作为结构色滤波器，并结合RGB激光照明技术。通过阳极氧化法制备的多孔硅薄膜具有特定的孔隙率和厚度，经高温氧化处理后表面呈现亲水性，能够吸附水分子并导致有效折射率增加，进而引发反射光谱的红移和显著的结构色变化(图2(g))。这种传感器不仅能够通过肉眼直接观察颜色变化来直观检测目标物质(如水分子)，还可以通过暴露于3-氨基丙基三乙氧基硅烷(3-APTES)蒸气进行功能化修饰，实现了与生物素分子的结合，并在与链霉亲和素的特异性结合时导致颜色显著变化，从而拓展了传感器在生物分子检测领域的应用。Shang等[61]探索了基于结构色条码的悬浮阵列在生物检测中的应用潜力，这种阵列的核心在于其条码颗粒的多重编码功能。在生物样品中悬浮的条码颗粒通过与生物标志物结合，形成条码-探针-目标物的三元复合物。此过程中，条码颗粒内部折射率的变化可通过光谱仪检测不同波长的反射光强度来反映，进而实现对目标物的识别和浓度检测(图2(h))。这种方法的优势在于能够同时检测多种生物标志物，提高了检测效率和准确性。

光子晶体结构色传感器作为新一代传感技术，通过其独特的响应机制展现了对温度、力学、pH值及小分子物质等多重刺激的出色感知能力。这类传感器以光子晶体为核心，利用其纳米结构的动态变化，将外界刺激转化为可观测的光谱信号，实现了高精度、高灵敏度的实时监测。总结而言，光子晶体结构色生物传感器不仅克服了传统传感器在检测效率、操作复杂度等方面的局限，更以其直观、可逆的响应特性，为生物医学、环境监测等领域提供了新的发展方向和突破。

3 光子晶体结构色传感器在生物医学传感领域的应用

由于光子晶体传感器具备多样化的响应模式和极高的响应效率，科研界近年来运用其特性，研发出一系列应用于生物医药领域的新型光子晶体传感器。这些传感器在细胞力学状态监测、药物传输过程的即时跟踪及小分子目标的精准捕获与定量分析等领域具有广阔的应用前景。此外，光子晶体传感器的可逆响应特性也被创新地引入到仿生皮肤的设计中，不仅能够精确捕捉人体的细微运动，还能有效监测皮肤表面的汗液分泌情况等，提供非侵入性且直观的健康评估途径。

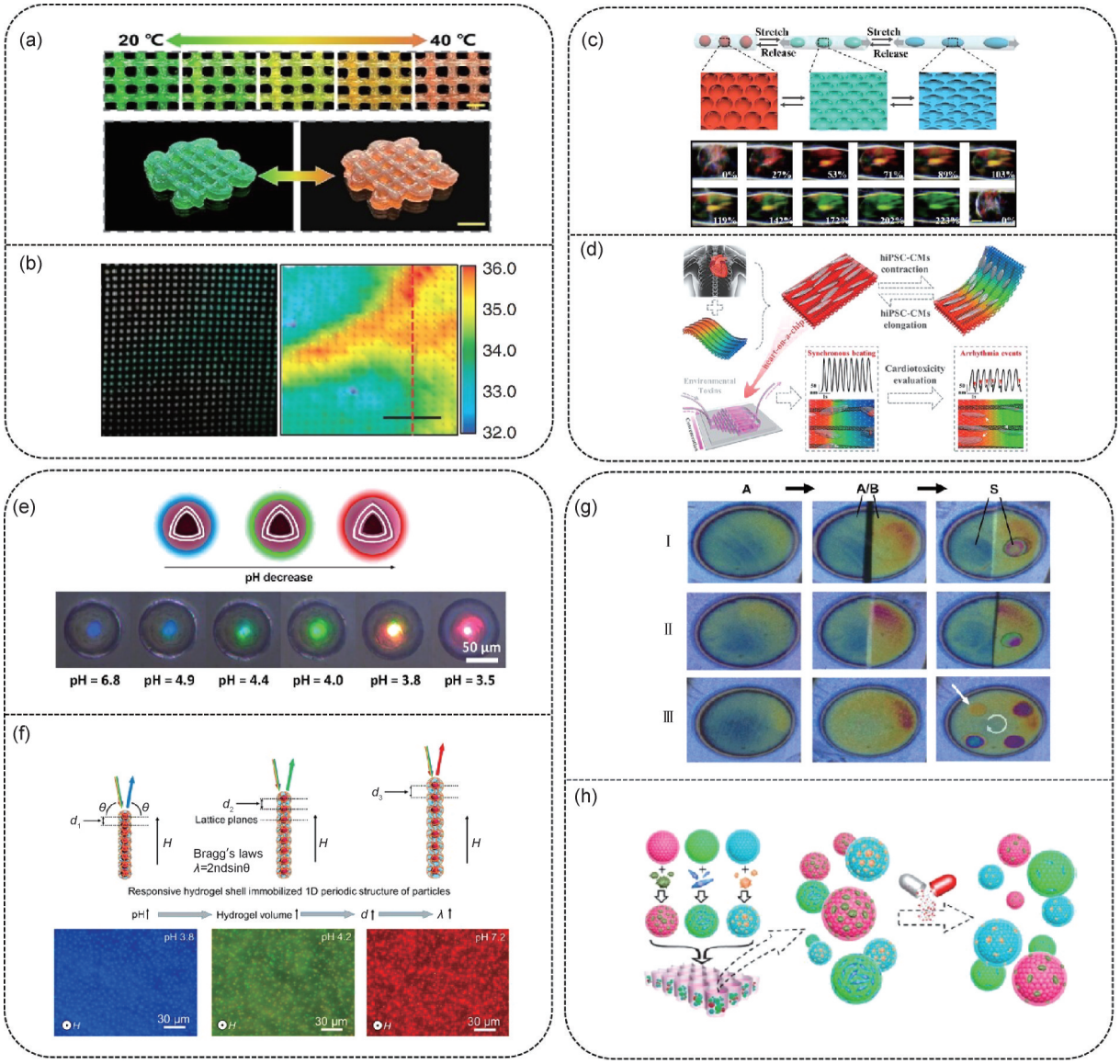


图 2　光子晶体结构色生物传感器的响应类型

(a)3D打印复合HPC-明胶-PACA(HGP)物体的热响应性能[49];(b)可贴合手腕的电子表皮薄层色谱(e-TLC)设备的图像和从设备数字图像中提取的温度分布三维渲染[50];(c)在挤压过程中植入红色结构彩色微球的水凝胶的表征[51];(d)用于环境毒素诱导的心脏毒性筛选的活体各向异性结构颜色水凝胶示意图[52];(e)光子微胶囊的pH响应性能示意图和照片[55];(f)水凝胶基光子链的pH响应性示意图和照片[57];(g)裸眼色度传感器的生物素-链霉亲和素相互作用可视化演示[60];(h)用于药物筛查的球形条形码平台示意图[61]

Fig.2　Response types of photonic crystal structure color biosensors

(a)thermal response properties of 3D printed composite HPC-gelatin-PACA (HGP) objects[49];(b)images of an electronic epidermal thin layer chromatography (e-TLC) device that fits the wrist and three-dimensional rendering of the temperature distribution extracted from the device's digital image[50];(c)characterization of hydrogels implanted with red structure color microspheres during extrusion[51];(d)*in vivo* anisotropic structure color hydrogel schematic diagram for environmental toxin-induced cardiotoxicity screening[52];(e)pH-responsive performance schematics and photos of photonic microcapsules[55];(f)schematic diagram and photographs of the pH responsiveness of hydrogel-based photonic chains[57];(g)visualization of the biotin-streptavidin interaction of naked-eye colorimetric sensors[60];(h)schematic diagram of spherical barcode platform for drug screening[61]

现今主导市场的传感器技术主要通过转化电信号进行后续处理与分析,而光子晶体传感器则利用精妙的纳米结构设计,直接将外部环境的改变转化为反射波长的偏移信号。此特性使得其具有远超传统技术的检测精度,同时也大大简化了信号解读与处理的过程,操作更具灵活性。因此,光子晶体传感器作为新一代生物传感平台,正逐步展现出其在不同生物传感领域的广泛应用前景。

3.1　细胞力学监测

心脏是人类重要的器官之一,心肌细胞的活跃程

度直接反映了心脏的健康程度。细胞机械力异常通常被视为功能失衡及病态解剖结构的直接反映，因此日益成为疾病评估的重要因素[62]。因此，深入研究细胞在不同环境及状态下的机械力特性，对理解各类疾病、揭示治疗策略具有重要意义。然而，现有的细胞力学检测技术大多依赖于复杂的设备和烦琐的模拟计算，成本高且耗时。

在探索心肌细胞力学特性的前沿研究中，Fu 团队[63]利用不同尺寸的二氧化硅纳米微球自组装构建的胶体晶体阵列作为模板，通过 GelMA（甲基丙烯酸化明胶）水凝胶对其浇筑封装，通过蚀刻去除嵌入的纳米颗粒，获得了具备反蛋白石结构的结构色水凝胶膜。将心肌细胞培养负载于水凝胶结构色膜的表面，当心肌细胞跳动时，能够直接诱导光子晶体的晶格间距发生相应变化，从而通过所产生的颜色变化实现对心肌细胞力学性能的实时监测。类似地，Chen 等[64]研发出一种新型异质结构色微纤维，它可以实现在单个心肌细胞层次上的培养和自主搏动力的精确测量。心肌细胞在微纤维表面的生长与自发搏动，能够引发结构色段的同步形变，进而产生清晰可辨的光学信号，为心肌细胞功能评估开辟了新途径。在另一项研究中，Wang 等[65]受仿贻贝黏附机制启发，以聚多巴胺（PDA）水凝胶作为黏附层，聚乙二醇二丙烯酸酯（PEGDA）水凝胶作为抗黏附层，制备出具有反蛋白石结构的智能水凝胶贴片。该贴片在心脏跳动等机械应力作用下，其内部光子晶体结构间隙会发生实时调整，导致颜色从红色经绿色再回归红色的循环变化（图 3(a)，(b)），这不仅直观展示了贴片的黏附状态，也为心跳活动的实时监测提供了一种可视化新手段。此外，该团队还通过在液滴中共同组装氧化石墨烯（GO）和胶体纳米颗粒，形成了具有半球形胶体晶体簇和扁平 GO 成分的各向异性的 Janus 结构颗粒。将 Janus 结构颗粒在明胶甲基丙烯酸酯（GelMA）水凝胶预聚液中通过浸泡、固化、刻蚀等步骤，制备出具有反蛋白石结构的 GelMA 水凝胶微珠，研究者将心肌细胞培养在 GelMA 水凝胶微珠上，细胞的收缩和舒张引起微珠的颜色变化，成功实现了细胞活动的可视化监测[66]。

近年来，肺芯片的兴起为模拟人体肺部复杂结构与功能提供了重要平台。然而，传统肺芯片在再现肺泡呼吸过程中的三维动态形变方面存在局限。针对此问题，Zhu 等[67]开发出一套三维仿生肺芯片系统（图 3(c)，(d)），该系统核心为由聚二甲基硅氧烷薄膜构成的肺泡阵列，表面以二氧化硅光子晶体修饰，展现出绚丽的虹彩结构色。随着气流的吸入与呼出，薄膜的弯曲与收缩驱动光子晶体间隙的变化，使得肺泡阵列在模拟呼吸过程中展现出动态色彩变换，实现了呼吸过程的实时可视化监测。这一突破性技术不仅深化了对细胞力学变化的理解，还为生物学研究、疾病诊断及药物筛选等领域提供了一种高效、经济的模拟与测试工具。

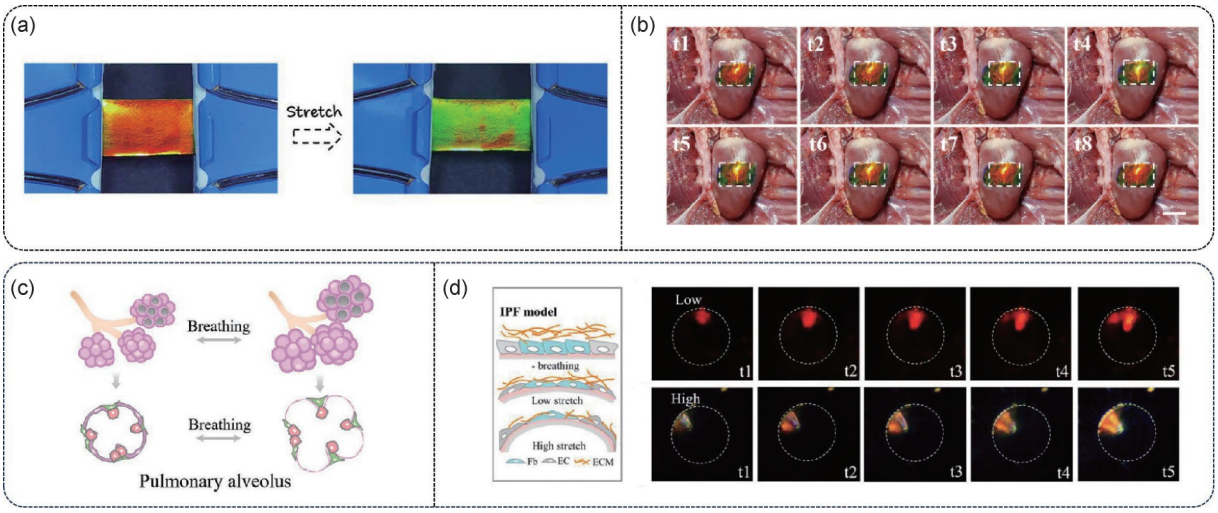


图 3 响应型光子晶体在细胞力学监测上的应用

(a)结构色水凝胶膜的机械响应颜色变化[65]；(b)具有各向异性表面黏附的生物激发结构色斑块在鸭心脏表面的应用[65]；(c)呼吸期间的肺泡示意图[67]；(d)随着低气流和高气流的结构颜色变化的光学显微镜图像[67]

Fig.3 Application of photonic crystals in cell mechanics monitoring

(a)mechanical response color change of structural color hydrogel film[65]; (b)application of biologically excited structural color patches with anisotropic surface adhesion on the surface of duck heart[65]; (c)alveolar schematic diagram during respiration[67]; (d)optical microscope image of structural color change with low airflow and high airflow[67]

3.2　药物运输监测

具有光子晶体结构的药物运输胶囊颗粒或创口敷料，往往可以制备成独特的多空隙结构，或者与功能化的水凝胶相结合[68]，在提高其载药率的同时，既提升载药量，又能精准控制药物释放速率和程度。

例如，Yang 等[55]研发的具有周期性层状结构的空心光子晶体微胶囊，当环境的 pH 值降低到 3.6 至 4.9 之间时，其聚苯乙烯-b-聚(2-乙烯基吡啶)(PS-b-P2VP)聚合物壳层发生质子化，从而使微胶囊壳层溶胀，周期性结构的厚度增加，导致反射波长发生红移。同时，壳层的渗透性随之增加，使得药物能够更快速地通过壳层扩散并释放出来。在此过程中微胶囊的颜色变化和药物的释放速率是同步的，图 4(a)展示了罗丹明 6G(R6G)在中性和酸性水中的释放程度以及胶囊对应的颜色，可以通过观察其颜色的变化来判断药物释放的进程。同时，还可以通过调节外部环境的 pH 值，对药物释放的速率进行控制。Chen 等[69]将温敏聚合物 N-异丙基丙烯酰胺(NIPAM)与壳聚糖反蛋白石结构相结合，在其中负载荧光素异硫氰酸酯-牛血清白蛋白(FITC-BSA)，制备出具有多功能的生物质复合反蛋白石颗粒微珠，用于智能药物递送和伤口愈合。在伤口处的炎症反应会引起伤口局部温度升高，当温度高于 NIPAM 水凝胶的体积相变温度时，填充在反蛋白石空隙中的温敏性水凝胶会发生体积收缩，将包裹的药物挤压释放出来。在药物释放过程中，颗粒内部的纳米孔间距会减小，导致颗粒的有效折射率发生变化，反射光的波长蓝移(图 4(b))，这使得药物释放可以被实时监控。Zhang 等[70]基于刻蚀法制备出具有反蛋白石结构的丝素蛋白支架，并在其空隙中填入温度响应性 PNIPAM 水凝胶和抗癌药物，通过升高温度，让 PNIPAM 水凝胶发生相变，体积收缩并挤出封装的药物，实现药物的可控释放，避免了药物浪费并提高了癌症等疾病治疗的安全性(图 4(c))。在 PNIPAM 水凝胶收缩的过程中，会减少光子晶体的平均折射率，引起反射峰蓝移。该可视化药物缓释支架可用于测试微载体的药物释放机制、生物相容性和抗

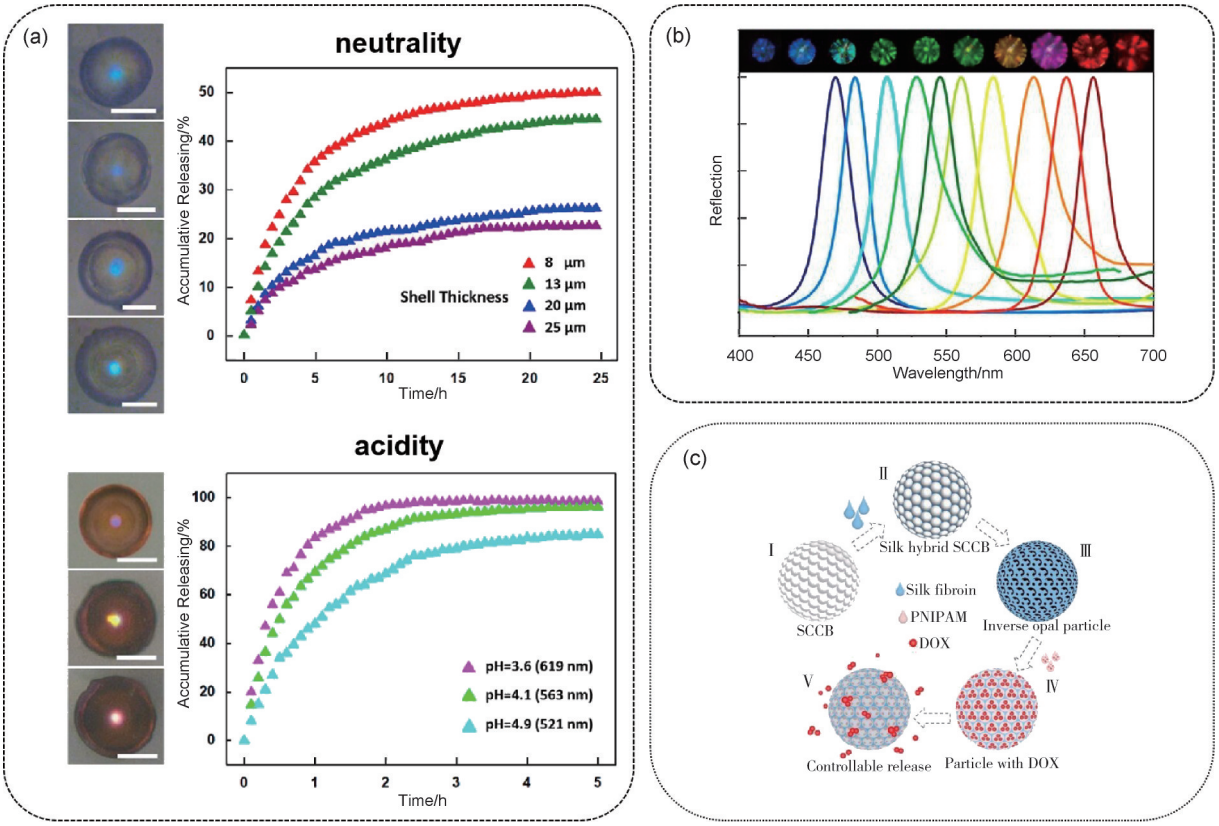


图 4　响应型光子晶体在药物运输监测中的应用

(a)罗丹明(R6G)在中性水和酸性水中的释放程度以及胶囊对应的颜色[55]；(b)在药物释放过程中生物量反蛋白石颗粒的实时监测和反射图像及光谱[69]；(c)反蛋白石颗粒与响应性水凝胶结合的制备过程和可控药物释放应用的示意图[70]

Fig.4　Application of responsive photonic crystals in drug delivery monitoring

(a)release of rhodamine (R6G) in neutral water and acidic water and the color of the capsule[55]; (b)real-time monitoring and reflection images and spectra of biomass inverse opal particles during drug release[69]; (c)schematic diagram of the fabrication process and controlled drug release applications of responsive hydrogels combined with inverse opal particles[70]

癌效果，作为体内应用的前期研究。

3.3 可穿戴仿生材料

随着人工智能的发展，电子皮肤在运动监测、健康管理、疾病诊断等方面的应用受到了广泛关注。目前，电子皮肤通常利用石墨烯、碳纳米管、金属纳米线或导电聚合物等与柔性基体结合，但这些传统材料通常只输出电信号，缺乏类似变色龙那样的光学视觉反馈[71]。已有学者基于光子晶体结构色智能显色的原理，利用高弹性水凝胶来开发具有高性能的多功能材料，以实现电子皮肤的可视化传感。然而，大多数现有的水凝胶材料存在复杂的合成过程和生物相容性问题[72]。为此，Zhang 等[73]提出了一种由天然蚕丝蛋白和聚丙烯酰胺(PAM)合成聚合物复合制成的结构色水凝胶膜，具备优异的可拉伸性、柔韧性、导电性以及自反馈能力，能够作为多信号响应的仿生电子皮肤。该复合水凝胶膜在拉伸和弯曲过程中，能够产生明显的颜色变化和电学信号响应(图 5(a))，使其能够实时感知人类运动中的颜色和电信号变化。Ren 等[74]通过调控二氧化硅纳米粒子在聚乙二醇苯基醚丙烯酸酯弹性体中的自组装过程，结合还原氧化石墨烯/聚二甲基硅氧烷黑色柔性基底的使用，成功制备了一种具有优异力学性能和双模式传感能力的可穿戴应变传感光子-电子皮肤(PE-skin)，并且可以通过改变 SiO_2 纳米粒子的粒径和体积分数，调控光子晶体的晶格参数，从而影响其反射波长和颜色。图 5(b)展示了将 PE-skin 附着在人体手腕上，可以通过监测其颜色变化和电阻变化，实现对人体运动的实时、直观反馈。

传统彩色隐形眼镜主要依赖有机色素染料来呈现色彩，然而，这些染料存在生物相容性差、易褪色等问题，可能导致眼部疾病，危害人体健康[75]。有研究者利用涡轮振荡器辅助的自组装过程，将合成的单分散二氧化硅纳米粒子组装成具有有序结构的光子晶体微球，并引入炭黑增强色彩效果(图 5(c))[76]，对制备好的光子晶体微球进行烧结处理后与黏性树脂混合，制备光子晶体隐形眼镜墨水。此外，有学者提出可利用结构色隐形眼镜中光子晶体智能响应的特性[77]，开发出一种基于光子晶体结构色的隐形眼镜传感器，通过自组装胶体晶体纳米颗粒实现颜色变化，用于无创监测眼部生理参数。研究采用基于“咖啡环效应”的胶体晶体自组装法和直接在 HEMA 单体中制备纳米颗粒的方法，制备出颜色鲜艳且安全的结构色隐形眼镜。通过光子晶体阵列的周期性结构，当外界刺激(如泪液中葡萄糖浓度、眼内压变化或药物释放)发生变化时，水凝胶体积膨胀或收缩，导致晶格间距

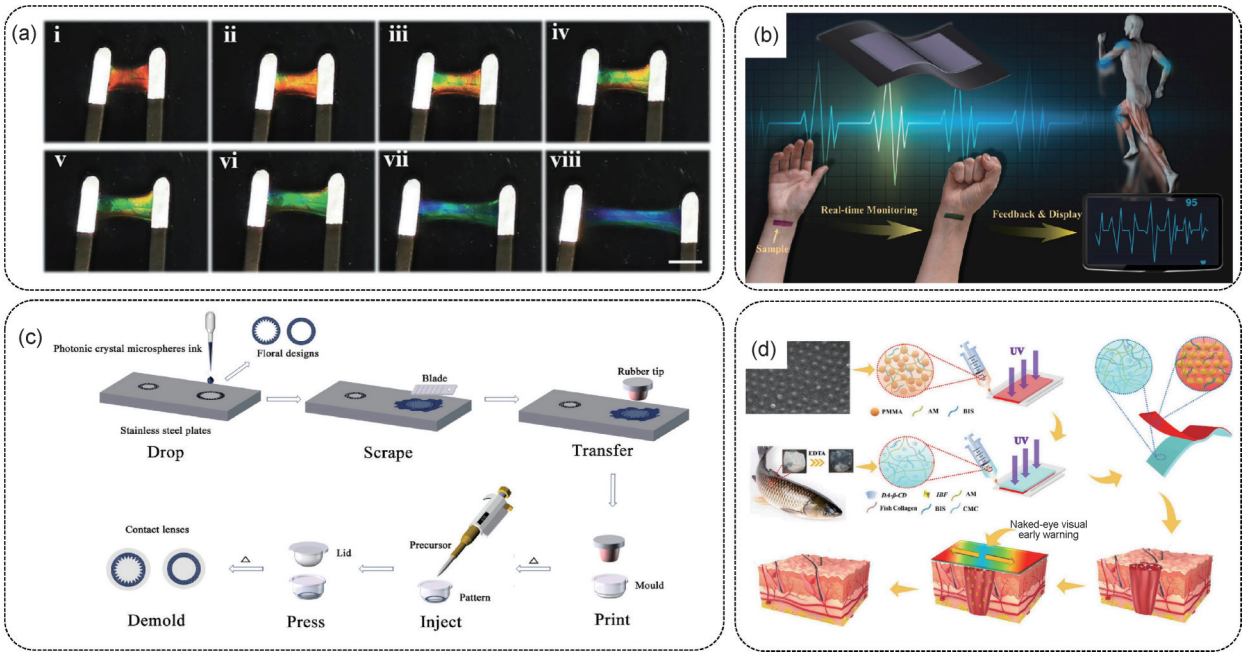


图 5 响应型光子晶体在可穿戴仿生材料中的应用

(a)复合水凝胶膜在拉伸过程中的光信号和电信号的变化[73]；(b)由微电子芯片电路控制双模信号的 PE-skin[74]；(c)光子晶体隐形眼镜制备工艺示意图[76]；(d)伤口开裂导致水凝胶颜色变化的预警[78]

Fig.5 Application of responsive photonic crystals in wearable bionic materials

(a)changes of optical and electrical signals of the composite hydrogel film during stretching[73]; (b)microelectronic chip circuits control dual-mode signal PE-skin[74]; (c)photonic crystal contact lens preparation process diagram[76]; (d)warning for color change in the hydrogel due to wound cracking[78]

变化，从而直观地引起颜色改变。

近期，一种仿生可穿戴水凝胶复合材料被开发用于伤口治疗及裂伤的肉眼视觉预警。该复合材料结合了含鱼胶原蛋白与改性β-环糊精的药物释放水凝胶以及非密堆积光子晶体，实现了缓释布洛芬药物，并具有良好的力学性能、抗冻性和优异的生物相容性。通过分子动力学模拟验证了药物与载体之间的高效结合和缓释机制。光子晶体结构颜色随伤口的变形而发生明显蓝移，可直观反映伤口裂开的程度（图5(d)）[78]。动物实验结果表明，该水凝胶复合材料在创面愈合过程中表现出卓越的药物缓释与促愈合效果，3天后创面闭合率达40.5%，14天基本痊愈。该研究为创伤护理提供了一种高效、直观且生物相容的解决方案，有望推动临床治疗与健康监测的协同发展。

3.4　分子检测传感器

为了替代传统酶电极检测葡萄糖的方法，Zhang等[79]创新性地研发出一款基于苯硼酸（PBA）与葡萄糖特殊键合反应的线性快速响应水凝胶葡萄糖传感器。其原理为：在低葡萄糖浓度下，PBA更倾向于形成2∶1复合物，这会导致水凝胶的体积收缩，而随着葡萄糖浓度增加，2∶1复合物解离为2个1∶1复合物，导致水凝胶体积膨胀。水凝胶的体积变化会导致其内部的光子晶体的反射波长发生红移或蓝移，从而精确响应葡萄糖浓度。Qin等[80]通过将丙烯酸修饰的抗原和抗体引入含有光子晶体的水凝胶中，成功制备出一种可快速检测多种生物分子的生物传感器（图6(a)）。当传感器与游离的抗原的样品相接触时，原本通过抗原-抗体作用形成的水凝胶内部交联被打破，导致水凝胶发生显著膨胀，其内部的晶格间距增大，光的衍射波长发生红移，从而使传感器颜色发生变化。此外，他们还在仿生光子水凝胶中引入化学反应网络（CRN），通过反应诱导的超分子结构变化，实现酶和生物燃料反应的实时、可视化监测（图6(b)）[81]。Endo等[82]开发了一种基于二维光子晶体（2D-PHC）薄膜的无标记光学生物传感器，当抗原（CRP）与抗体反应时，2D-PHC薄膜周围的折射率发生变化，导致反射光谱在可见光区域发生变化，通过监测反射峰的波长和强度变化，实现了CRP浓度的高灵敏度检测。

革兰氏阴性菌的脂多糖（LPS）是引发食源性毒性和人体疾病的重要因素，它是革兰氏阴性细菌外壁的主要成分，不同类型的革兰氏阴性细菌具有不同结构

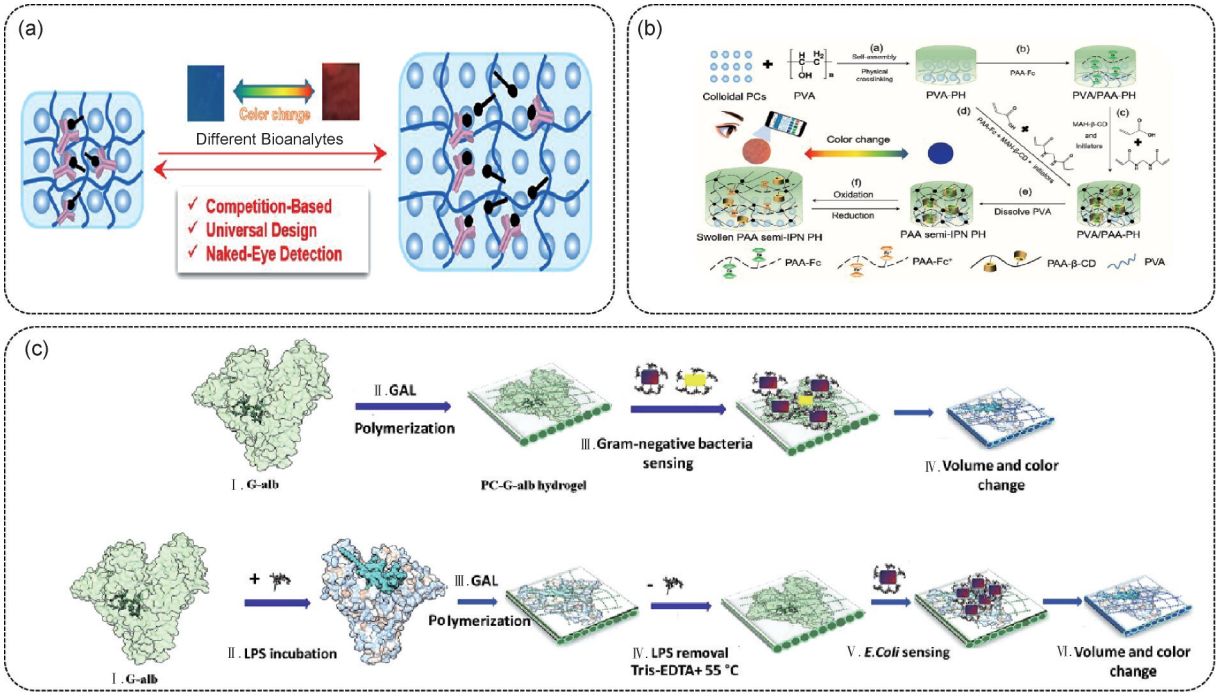


图6　光子晶体在分子检测传感器中的应用

（a）基于竞争的PCH生物传感器，能够用肉眼检测各种生物分子（如蛋白质、多肽和小分子），具有高灵敏度和选择性以及极好的可逆性[80]；（b）自调节生物激发超分子水凝胶的制备和工作流程示意图[81]；（c）两种蛋白水凝胶的工作原理[83]

Fig.6　Application of photonic crystals in molecular detection sensors

(a)based on competitive PCH biosensors, it can detect various biomolecules (such as proteins, peptides, and small molecules) with high sensitivity and selectivity and excellent reversibility[80]; (b)preparation and workflow diagram of self-regulating bio-excited supramolecular hydrogels[81]; (c)working principle of two protein hydrogels[83]

的LPS。LPS的检测对于食品污染控制和临床诊断至关重要。Murtaza等[83]研发了两种基于糖化白蛋白(G-alb)的光子晶体(PC)水凝胶传感器(图6(c))。其中一种是G-alb功能化的水凝胶(PC-G-alb),另一种是LPS印迹的水凝胶(PC-G-alb-LPSimp)。PC-G-alb水凝胶的原理是利用G-alb(一种阳离子蛋白质)与革兰氏阴性菌细胞表面的脂多糖(一种阴离子分子)之间的特定相互作用。G-alb分子中的某些氨基酸残基(如赖氨酸、精氨酸等)的侧链含有氨基或胍基,可以与LPS分子中的磷酸基团形成氢键。同时,G-alb和LPS分子中可能都含有芳香环结构,它们之间可以通过疏水π-π相互作用进一步稳定结合。这些相互作用的协同作用会导致PC-G-alb水凝胶的体积收缩,这种变化可以通过观察颜色环的蓝移来直观地检测,也可以通过激光指针测量衍射环的直径或使用光谱仪测量衍射波长的变化来定量检测。而PC-G-alb-LPSimp水凝胶在PC-G-alb的基础上,进一步引入了LPS的印迹机制,以提高对特定LPS(如大肠杆菌LPS)的选择性。这两种传感器均具备快速响应、操作简便的特点,适用于食品安全检测和便携式临床诊断应用。

4 结束语

综上所述,光子晶体传感器因其独特的响应性生色结构,可将生物环境变化直观且实时地转变为颜色变化,实现可视化的传感。将响应型光子晶体创新性地应用于传感器领域,不仅突破了传统传感器依赖于电信号传播的限制,更实现了信息向高度敏感光信号的转化。这一突破不仅极大地丰富了传感器在生物医学等领域的应用范畴,也为提高对生命活动及生物小分子的传感监测精度开辟了全新的路径。通过将光子晶体生色结构与功能性材料相结合,这类传感器的响应类型得到了显著拓展,涵盖了温度、机械力、pH值等多维参数。这种结合不仅促进了药物的可控释放和可视化监测,还实现了对生物小分子的精确捕获和含量检测,进一步提升了传感器的功能性和实用性。尽管目前响应型光子晶体的研究已取得显著进展,但距离投入工业化生产以及大规模应用还有很大差距。为了推动该领域的进一步发展,建议从以下几个方面进行深入探索和改进:

(1)材料选择与优化:挑选合适的介质来搭载光子晶体,以确保光子晶体传感器具备更长的使用寿命和更高的稳定性。

(2)响应类型多样化:充分利用光子晶体的独特光学性质,持续研发更多类型的响应型生物传感器,以满足不同应用场景的需求。

(3)生产工艺与成本控制:针对一次性传感器(如伤口敷料),需优化原料选择和生产工艺,以提高其生物相容性并降低生产成本,从而推动其广泛应用。

(4)储存与稳定性:研发有效的储存方法,确保响应型光子晶体生物传感器在长期存放后仍能保持检测的精准性,提高其可靠性和耐用性。

对响应型光子晶体生物传感器的持续研究和改进,不仅具有重要的学术价值,更将进一步推动仿生材料学及医学领域的科技进步。在学术界和产业界的共同努力下,通过材料物理与化学、固体物理、纺织科学与工程以及各类应用领域专家的合作研究,相信响应型光子晶体生物传感器材料的研究在不久的未来将进入一个快速发展期。

参考文献

[1] XUAN Z Y, LI J Y, LIU Q Q, et al. Artificial structural colors and applications[J]. The Innovation, 2021, 2(1): 100081.

[2] MA W B, ZHANG J J, JIN M T, et al. Fabrication and responsive application of flexible yarns with structural colors based on photonic crystal hydrogels[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7(3): 1851-1862.

[3] WANG L, DING X Y, FAN L, et al. Self-healing dynamic hydrogel microparticles with structural color for wound management[J]. Nano-Micro Letters, 2024, 16(1): 232.

[4] ERK P. Industrial organic pigments. production, properties, applications. 3rd edition. by willy herbst and klaus hunger[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2004, 43(34): 4393-4394.

[5] ZHAO Y J, XIE Z Y, GU H C, et al. Bio-inspired variable structural color materials[J]. Chemical Society Reviews, 2012, 41(8): 3297.

[6] ZI J, YU X D, LI Y Z, et al. Coloration strategies in peacock feathers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(22): 12576-12578.

[7] ZHENG L S, LI N, QI C Z, et al. Brilliant mechanochromic scattering structural colors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(7): 11020-11026.

[8] WELCH V, LOUSSE V, DEPARIS O, et al. Orange reflection from a three-dimensional photonic crystal in the scales of the weevil *Pachyrrhynchus congestus Pavonius* (Curculionidae)[J]. Physical Review E, 2007, 75(4): 041919.

[9] YOSHIOKA S, FUJITA H, KINOSHITA S, et al. Alignment of crystal orientations of the multi-domain photonic crystals in *Parides sesostris* wing scales[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11(92): 20131029.

[10] PEI G C, WANG J X, JIANG L. Research progress of bioinspired photonic crystal fibers[J]. Acta Chimica Sinica, 2021, 79(4): 414.

[11] FENZL C, HIRSCH T, WOLFBEIS O S. Photonic crystals for chemical sensing and biosensing[J]. Angewandte Chemie Interna-

tional Edition,2014,53(13):3318-3335.
[12] SUN J Y,BHUSHAN B,TONG J.Structural coloration in nature [J].RSC Advances,2013,3(35):14862.
[13] WANG J Y,YUAN Y C,ZHU H,et al.Three-dimensional macroporous photonic crystal enhanced photon collection for quantum dot-based luminescent solar concentrator[J].Nano Energy,2020,67:104217.
[14] BOHLEY C,JANDIERI V,SCHWAGER B,et al.Thickness-dependent slow light gap solitons in three-dimensional coupled photonic crystal waveguides[J].Optics Letters,2022,47(11):2794-2797.
[15] REZAEI S D,DONG Z G,CHAN J Y,et al.Nanophotonic structural colors[J].ACS Photonics,2021,8(1):18-33.
[16] CHEN S,HE J N,XU Y M,et al.Enhanced photocatalytic activity of titanium dioxide in nitrogen fixation by the photon localization effect of SiO_2 opal photonic crystals [J]. New Journal of Chemistry,2022,46(47):22895-22907.
[17] MARTORELL J,LAWANDY N.Observation of inhibited spontaneous emission in a periodic dielectric structure[J].Physical Review Letters,1990,65(15):1877-1880.
[18] PURCELL E M,TORREY H C,POUND R V.Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid[J].Physical Review,1946,69(1/2):37-38.
[19] LIU Y F,HOU X Y,SONG Y L,et al.Bioinspired reflective display based on photonic crystals [J]. Interdisciplinary Materials,2024,3(1):54-73.
[20] 赵鹏飞,李博,程丽霞,等.电活性材料驱动的柔性光子晶体结构色调控技术研究进展[J].西安交通大学学报,2023,57(7):84-100.
ZHAO P F,LI B,CHENG L X,et al.Research progress in technology of flexible photonic crystal structural color control actuated *via* electroactive materials [J].Journal of Xi'an Jiaotong University,2023,57(7):84-100.
[21] TILLEY R J D.Colour and the optical properties of materials:an exploration of the relationship between light,the optical properties of materials and colour[M].New York:Wiley,2010.
[22] DALMIS R,KESKIN O Y,AK AZEM N F,et al.A new one-dimensional photonic crystal combination of TiO_2/CuO for structural color applications[J].Ceramics International,2019,45(17):21333-21340.
[23] PARK T H,YU S,PARK J,et al.Interactive structural color displays of nano-architectonic 1-dimensional block copolymer photonic crystals[J].Science and Technology of Advanced Materials,2023,24:2156256.
[24] ZHANG J-T,WANG L L,LUO J,et al.2-D array photonic crystal sensing motif[J].Journal of the American Chemical Society,2011,133(24):9152-9155.
[25] KATO R,MIKAMI T,KATO T.2D photonic colloidal liquid crystals composed of self-assembled rod-shaped particles[J].Advanced Materials,2024,36(38):2404396.
[26] ZHOU Y J,MUHAMMAD I,QIU L L,et al.β-Hydroxybutyrate dehydrogenase functionalized two-dimensional photonic crystals for quantitative and visual sensing of ketone bodies[J].Biosensors and Bioelectronics,2024,264:116647.
[27] FUDOUZI H.Fabricating high-quality opal films with uniform structure over a large area[J].Journal of Colloid and Interface Science,2004,275(1):277-283.
[28] ZHOU L,LI Y C,LIU G J,et al.Study on the correlations between the structural colors of photonic crystals and the base colors of textile fabric substrates [J]. Dyes and Pigments,2016,133:435-444.
[29] DONG Y S,AI F,SUN-WATERHOUSE D,et al.Optical and photocatalytic properties of three-dimensionally ordered macroporous Ta_2O_5 and Ta_3N_5 inverse opals[J].Chemistry of Materials,2023,35(19):8281-8300.
[30] PARANDIN F,HEIDARI F,RAHIMI Z,et al.Two-dimensional photonic crystal biosensors:a review[J].Optics & Laser Technology,2021,144:107397.
[31] LU D,YAN Y,DENG Y J,et al.Bioresorbable wireless sensors as temporary implants for *in vivo* measurements of pressure[J].Advanced Functional Materials,2020,30(40):2003754.
[32] YANG Q S,LEE S,XUE Y G,et al.Materials,mechanics designs,and bioresorbable multisensor platforms for pressure monitoring in the intracranial space[J].Advanced Functional Materials,2020,30(17):1910718.
[33] HE F L,LI K J,LV X F,et al.Flexible biochemical sensors for point-of-care management of diseases:a review[J].Microchimica Acta,2022,189(10):380.
[34] ZHANG Y H,HU Y B,JIANG N,et al.Wearable artificial intelligence biosensor networks [J]. Biosensors and Bioelectronics,2023,219:114825.
[35] ZHU T X,NI Y M,ZHAO K Y,et al.A breathable knitted fabric-based smart system with enhanced superhydrophobicity for drowning alarming[J].ACS Nano,2022,16(11):18018-18026.
[36] BRUCH R,BAASKE J,CHATELLE C,et al.Biosensors:CRISPR/Cas13a-powered electrochemical microfluidic biosensor for nucleic acid amplification-free miRNA diagnostics (adv.mater.51/2019)[J].Advanced Materials,2019,31(51):1970365.
[37] DAI Y F,SOMOZA R A,WANG L,et al.Exploring the trans-cleavage activity of CRISPR-Cas12a (cpf1) for the development of a universal electrochemical biosensor[J].Angewandte Chemie International Edition,2019,58(48):17399-17405.
[38] JIAO S L,LIU L,WANG J Q,et al.A novel biosensor based on molybdenum disulfide (MoS_2) modified porous anodic aluminum oxide nanochannels for ultrasensitive microRNA-155 detection [J].Small,2020,16(28):2001223.
[39] SONG S,LEE J U,JEON M J,et al.Detection of multiplex exosomal miRNAs for clinically accurate diagnosis of Alzheimer's disease using label-free plasmonic biosensor based on DNA-assembled advanced plasmonic architecture [J]. Biosensors and Bioelectronics,2022,199:113864.
[40] XIAO S-Y,JIA D-G,NIE A-R,et al.Multi-channel few-mode multicore fiber based surface plasmon resonance biosensor with open air-hole[J].Acta Physica Sinica,2020,69(13):137802.
[41] LIU Y L,LIU Y,GUO H Q,et al.Enhancement of sensing performance of GaN-based MOS-HEMT biosensors by graded AlGaN barrier [J]. IEEE Sensors Journal,2024,24(15):23470-

23479.
[42] ŞERBAN I, ENESCA A. Metal oxides-based semiconductors for biosensors applications[J]. Frontiers in Chemistry, 2020, 8: 354.
[43] KUJAWSKA M, BHARDWAJ S K, MISHRA Y K, et al. Using graphene-based biosensors to detect dopamine for efficient Parkinson's disease diagnostics[J]. Biosensors, 2021, 11(11): 433.
[44] ROONDHE B, SAHA S, LUO W, et al. Detection of type-Ⅱ diabetes using graphene-based biosensors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(18): 185402.
[45] CHIAPPELLI M C, HAYWARD R C. Photonic multilayer sensors from photo-crosslinkable polymer films[J]. Advanced Materials, 2012, 24(45): 6100-6104.
[46] METAWEA O R M, ABDELMONEEM M A, HAIBA N S, et al. A novel 'smart' PNIPAM-based copolymer for breast cancer targeted therapy: synthesis, and characterization of dual pH/temperature-responsive lactoferrin-targeted PNIPAM-co-AA[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2021, 202: 111694.
[47] LU T, ZHU S M, MA J, et al. Bioinspired thermoresponsive photonic polymers with hierarchical structures and their unique properties[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2015, 36(19): 1722-1728.
[48] FEI X, LU T, MA J, et al. A bioinspired poly (N-isopropylacrylamide)/silver nanocomposite as a photonic crystal with both optical and thermal responses[J]. Nanoscale, 2017, 9(35): 12969-12975.
[49] ZHANG Z H, WANG C, WANG Q, et al. Cholesteric cellulose liquid crystal ink for three-dimensional structural coloration[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(23): e2204113119.
[50] GAO L, ZHANG Y H, MALYARCHUK V, et al. Epidermal photonic devices for quantitative imaging of temperature and thermal transport characteristics of the skin[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4938.
[51] GUO J H, ZHANG H, ZHANG H, et al. Jellyfish tentacle-inspired hydrogel microfibers implanted with discrete structural color microsphere tactile sensing units[J]. Advanced Fiber Materials, 2022, 4(5): 1209-1218.
[52] XU D Y, WANG Y, SUN L Y, et al. Living anisotropic structural color hydrogels for cardiotoxicity screening[J]. ACS Nano, 2023, 17(15): 15180-15188.
[53] YANG Y, KIM H, XU J P, et al. Responsive block copolymer photonic microspheres[J]. Advanced Materials, 2018, 30(21): 1707344.
[54] YU S M, DONG S, JIAO X L, et al. Ultrathin photonic polymer gel films templated by non-close-packed monolayer colloidal crystals to enhance colorimetric sensing[J]. Polymers, 2019, 11(3): 534.
[55] YANG Y, CHEN Y, HOU Z Y, et al. Responsive photonic crystal microcapsules of block copolymers with enhanced monochromaticity[J]. ACS Nano, 2020, 14(11): 16057-16064.
[56] LIAO J L, ZHU C, GAO B B, et al. Multiresponsive elastic colloidal crystals for reversible structural color patterns[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(39): 1902954.
[57] LUO W, CUI Q, FANG K, et al. Responsive hydrogel-based photonic nanochains for microenvironment sensing and imaging in real time and high resolution[J]. Nano Letters, 2020, 20(2): 803-811.
[58] XIAO D Y, MA H R, LUO W, et al. Agarose-based hydrogel film with embedded oriented photonic nanochains for sensing pH[J]. Polymers, 2024, 16(11): 1530.
[59] MERADI K A, TAYEBOUN F, GUERINIK A, et al. Optical biosensor based on enhanced surface plasmon resonance: theoretical optimization[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(2): 124.
[60] TALUKDAR T H, MCCOY B, TIMMINS S K, et al. Hyperchromatic structural color for perceptually enhanced sensing by the naked eye[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(48): 30107-30117.
[61] SHANG L R, WANG Y T, CAI L J, et al. Structural color barcodes for biodiagnostics[J]. View, 2020, 1(2): e8.
[62] GUO X Y, ZHANG Y C, CAO M X, et al. Mechanical force characterization of living cells based on needle deformation[J]. Advanced Materials Interfaces, 2023, 10(20): 2300293.
[63] FU F F, SHANG L R, CHEN Z Y, et al. Bioinspired living structural color hydrogels[J]. Science Robotics, 2018, 3(16): eaar8580.
[64] CHEN Z Y, YU Y R, GUO J H, et al. Heterogeneous structural color microfibers for cardiomyocytes tug-of-war[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(9): 2007527.
[65] WANG Y, SHANG L R, CHEN G P, et al. Bioinspired structural color patch with anisotropic surface adhesion[J]. Science Advances, 2020, 6(4): eaax8258.
[66] WANG H, LIU Y X, CHEN Z Y, et al. Anisotropic structural color particles from colloidal phase separation[J]. Science Advances, 2020, 6(2): eaay1438.
[67] ZHU Y J, SUN L Y, WANG Y, et al. A biomimetic human lung-on-a-chip with colorful display of microphysiological breath[J]. Advanced Materials, 2022, 34(13): 2108972.
[68] CAO X Y, SUN L Y, XU D Y, et al. Melanin-integrated structural color hybrid hydrogels for wound healing[J]. Advanced Science, 2023, 10(22): 2300902.
[69] CHEN C W, LIU Y X, WANG H, et al. Multifunctional chitosan inverse opal particles for wound healing[J]. ACS Nano, 2018, 12(10): 10493-10500.
[70] ZHANG H, LIU Y X, CHEN C W, et al. Responsive drug-delivery microcarriers based on the silk fibroin inverse opal scaffolds for controllable drug release[J]. Applied Materials Today, 2020, 19: 100540.
[71] SHANG Y Y, HUANG C, LI Z, et al. Bioinspired ultra-stretchable and highly sensitive structural color electronic skins[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(2): 2412703.
[72] LONG T Y, YUAN W Z. Biomimetic bilayer ionic conductive photoelectronic skin based on nano-structured photonic crystal film and flexible adhesive hydrogel for dual-signal motion detection and anti-disturbance temperature monitor[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 192: 149-160.
[73] ZHANG H, GUO J H, WANG Y, et al. Stretchable and conduc-

tive composite structural color hydrogel films as bionic electronic skins[J].Advanced Science,2021,8(20):2102156.

[74] REN Y Q,HUANG Z H,FANG Y Z,et al.Wearable strain sensing skin with visual and stable structural color and electrical response for real-time monitoring[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2025,387:116376.

[75] YANG F,WU S T,LEI X Q,et al.Novel SiO_2 photonic crystal microspheres as inorganic pigments for structural color contact lenses[J].Optical Materials,2023,138:113705.

[76] LEI X Q, YANG F, HAN X L, et al. Photonic crystal microspheres: synthesis, characterization, and applications in colored contact lenses[J].Optical Materials,2024,150:115229.

[77] 王小美,王昭,郝凌云,等.基于光子晶体的结构色隐形眼镜的构建及应用[J].人工晶体学报,2021,50(11):2164-2172,2191.
WANG X M, WANG Z, HAO L Y, et al. Construction and application of structural color contact lenses based on photonic crystals[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50(11): 2164-2172, 2191.

[78] ZHENG W X, MUHAMMAD I, YIN X D, et al. Bioinspired wearable hydrogel composite with sustained drug-release for wound healing and naked-eye visual early warning of wound dehiscence[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2024,16(37):49711-49723.

[79] ZHANG C J,CANO G G,BRAUN P V.Linear and fast hydrogel glucose sensor materials enabled by volume resetting agents [J].Advanced Materials,2014,26(32):5678-5683.

[80] QIN J J,LI X Q,CAO L X,et al.Competition-based universal photonic crystal biosensors by using antibody - antigen interaction [J]. Journal of the American Chemical Society, 2020, 142(1): 417-423.

[81] QIN J J, DONG B H, WANG W, et al. Self-regulating bioinspired supramolecular photonic hydrogels based on chemical reaction networks for monitoring activities of enzymes and biofuels[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2023,649:344-354.

[82] ENDO T,KAJITA H,KAWAGUCHI Y,et al.Label-free optical detection of C-reactive protein by nanoimprint lithography-based 2D-photonic crystal film[J].Biotechnology Journal,2016,11(6):831-837.

[83] MURTAZA G,RIZVI A S,IRFAN M,et al.Glycated albumin based photonic crystal sensors for detection of lipopolysaccharides and discrimination of Gram-negative bacteria[J]. Analytica Chimica Acta,2020,1117:1-8.

基金项目:国家自然科学基金项目(52303043, 52203275);江苏省自然科学基金项目(BK20220503)

收稿日期:2025-02-25;**录用日期**:2025-03-25

通讯作者:李义臣(1992—),男,副教授,博士,研究方向为光子晶体高效组装及其在纺织品表面的结构生色,联系地址:江苏省苏州市干将东路178号苏州大学纺织与服装工程学院(215021),E-mail:ycli131@suda.edu.cn;张骏(1990—),女,副教授,博士,研究方向为丝蛋白基生物医药材料、3D打印材料等,联系地址:江苏省苏州市干将东路178号苏州大学纺织与服装工程学院(215021),E-mail:junzhang@suda.edu.cn

(本文责编:齐　新)