

非晶光子晶体结构显色的研究进展

王淑珍, 徐薇涵, 陈光霞, 陈永利, 刘文霞

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 综述国内外非晶光子晶体结构呈色的研究进展, 为进一步研究非晶光子晶体在印刷颜料、光学防伪、功能性包装材料以及彩色显示器、传感器等领域的应用提供理论依据。**方法** 概括非晶光子晶体的概念、材料的选取与制备方法以及国内外的研究进展, 分析该类材料在应用过程中存在的问题, 并总结目前非晶光子晶体研究所面临的挑战和未来的发展方向。**结论** 非晶光子晶体具有非虹彩效应、各向同性、光局域化等特点, 为包装印刷等相关领域的研究及应用提供了新思路、新方法, 有望早日将这一绿色环保、经济高效型的材料实现规模化应用。

关键词: 非晶光子晶体; 非虹彩结构色; 各向同性

中图分类号: TB34; O756 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0089-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.011

Progress of Structural Color of Amorphous Photonic Crystals

WANG Shu-zhen, XU Wei-han, CHEN Guang-xia, CHEN Yong-li, LIU Wen-xia

(Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to review the research progress of color rendering of amorphous photonic crystal structure at home and abroad, and provide theoretical basis for further research on the application of amorphous photonic crystal in the fields of printing pigments and anti-counterfeiting, functional packaging materials, color display and sensor, etc. The concept of amorphous photonic crystals, the selection materials and the preparation methods were generalized as well as its research progress at home and abroad. The existing problems in the application of the materials were summarized, and the challenges and future development directions of the research on amorphous photonic crystals were indicated. Amorphous photonic crystals have the characteristics of non-iridescent effect, isotropy and photolocalization, which provide new ideas and methods for the research and application of packaging and printing and other related fields. It is expected to realize the large-scale application of this green, environmentally friendly and economically efficient material at an early date.

KEY WORDS: amorphous photonic crystal; non-iridescent color; isotropic

日常生活中,人眼看到的颜色通常分为 2 类,即色素色和结构色。前者是有机或无机化学物质的发色基团对光进行选择吸收产生的,容易随时间变化或在光照下褪色,多用于传统的油墨和颜料;后者是物

体的特殊物理结构与光进行干涉、散射等相互作用产生的,只要材料的折射率和结构尺寸不变,其颜色就不会褪去。

结构色又可分为彩虹色和非彩虹色 2 类。彩虹色

收稿日期: 2018-11-05

基金项目: 天津科技大学大学生实验室创新基金 (1806A202, 1506A203)

作者简介: 王淑珍 (1993—), 女, 天津科技大学硕士生, 主攻非晶光子晶体呈色功能材料及印刷应用。

通信作者: 陈永利 (1978—), 男, 天津科技大学教授, 主要研究方向为颜色科学与光色变功能材料及影像复制技术。

由周期性亚微米或纳米结构的光子晶体 PCs (Photonic Crystals) 产生, 如蝴蝶翅膀和甲虫鳞片; 非彩虹色由非晶光子晶体 APCs (Amorphous Photonic Crystals) 产生, 如许多鸟类的羽毛, 这些羽毛的不同颜色是由髓角蛋白空泡随机排列形成的^[1]。当光子晶体显示出的彩虹色应用于某些需要与观看角度无关、颜色不变的领域时如印刷颜料、显示器、传感器等, 会有很大的局限性。为了解决这个问题, 非彩虹结构色在相关业界备受关注, 研究者们正尝试从胶粒中构造出非晶态结构, 以期获得非彩虹色效应^[2]。

1 光子晶体和非晶光子晶体

光子晶体是微粒结构呈周期性排列形成的, 光在其内部传播时, 由于受到布拉格散射的作用, 使得其能带结构之间形成一定频率范围的光子带隙。当光子带隙和可见光频率范围相近时, 某一波长范围的可见光无法在光子晶体中传播, 就会产生结构色^[3-7]。由此产生的颜色具有明显的角度依赖性, 会随着观察角度的变化而发生变化, 即虹彩效应。

与 PCs 相比, 非晶光子晶体是光子晶体的“缺陷态”结构, 其内部结构并不呈周期性排布。由于其光子带隙不完整, 晶格排列有序度低, 因此 APCs 结构是短程有序、长程无序的。这种短程有序的结构使 APCs 存在不同于 PCs 的特殊带隙, 称其为光子带隙^[3], 其对应的光子态密度不为零且可随频率快速响应, 使得位于光子态密度低谷区的光被强烈反射, 进而产生结构色。与传统的光子带隙不同, 光子带隙与方向无关, 光在各个方向均匀散射, 进而产生非彩虹结构色^[3,8-11]。

这种“自身缺陷”导致的短程有序结构, 使得 APCs 具备各向同性、非虹彩效应、光局域化等特点, 不仅能满足人们的视觉要求, 更能满足光散射和光传输领域对材料的特殊要求^[3]。APCs 各向同性和非虹彩效应的特点既能通过变换观察角度鉴别颜色是否发生变化来体现; 又可通过理论进行分析验证, 即二维傅立叶转换法判断空间结构对称性, 能够快速有效地判断出散射质点的分布情况^[12-14]。PCs 具有有序排布、各向异性的特点, 其对应的 2D FFT 图案表现为六角对称点阵结构, 是 PCs 独有的特征; APCs 是短程有序、各向同性的 APCs 结构, 其对应的 2D FFT 图案为圆环形且中心对称。上述是区别 APCs 和 PCs 的基本方法。

APCs 产生的非彩虹结构色彩, 由于其观看角度较宽, 因此在印刷媒体、比色传感器、光学器件、显示器等领域的应用受到广泛关注^[15-18]。同时其具有的各向同性、非彩虹色和不褪色特性使其在包装装潢、印刷颜料等相关领域具有巨大的应用前景^[19]。

2 材料选取和颜色饱和度

制备 APCs 时, 通常将光功能纳米颗粒与基体材料相结合, 构成光功能纳米复合材料。这不仅能够解决纳米材料在稳定性方面的问题, 还可赋予纳米材料新的特性和功能, 满足了科技发展对印刷包装材料的功能、结构一体化及智能化的需求。

2.1 制备材料的选取

结构性能良好的 APCs 除了要求具备各向同性和均匀性之外, 其较强的颜色可见性也是非常必要的。要想呈现出颜色丰富、高质量的结构色, 就必须选择合适的材料。APCs 制备材料的来源比较广泛, 根据材料成分的差异可以分为无机/无机、有机/有机和有机/无机等 3 类材料。

采用无机/无机材料结合的方式制备 APCs, 一般制备出的是壳核体系结构, 即在半导体纳米颗粒外包裹一层绝缘的无机壳层。这种结构不仅能够钝化纳米颗粒外表面的化学键作用力, 还能削弱其表面缺陷态对光致发光效率的影响, 减少环境因素对发光强度的作用^[19]。董慧芬^[20]采用 TiO_2 和 SiO_2 纳米颗粒为组装单元, 通过层层自组合法制备 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 材料。由于 TiO_2 的折射率 (n) 较大, 其与 SiO_2 结合使得组装材料的折射率差值较大, 这对材料的呈色性非常有利。

通过有机/有机材料结合的方式制备 APCs, 是在纳米颗粒外包裹一层有机壳层, 能够解决纳米颗粒的溶解性和稳定性问题。聚合物包裹的有机纳米外壳不仅稳定性很好, 且疏水性、力学性能等也很优良。Kolle 等^[21]利用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 和聚异戊二烯-聚苯乙烯 (PSPI) 为材料制备出了具有一定弹性的结构色纤维。Wang^[22]以聚 (N-异丙基丙烯酰胺)-聚甲基丙烯酸环氧丙酯和聚甲基丙烯酸甲酯为组装材料, 构筑形成多层膜结构; 之后用图案化的模板罩住聚合物膜, 经紫外灯照射后, 光子纸图案隐形; 再将薄膜浸入水中, 隐形的图案在水中显现。这一方法不仅可以应用于印刷多色非晶光子晶体图案, 还可以通过图案的隐形和再现为印刷包装领域的产品提供光学防伪功能。综上所述, 选择适当的材料制备有机壳层, 不仅能改善纳米颗粒的溶解性、稳定性, 还能够同时提高纳米颗粒的光学性能。

采用无机/有机材料结合的方式制备非晶态微球, 不仅可以提高折射率的差值, 还可利用有机聚合物特有的性能制备多功能结构色材料, 为包装印刷领域提供环保的印刷颜料。Li 等^[23]使用 SiO_2 胶体粒子与聚乙烯醇 (PVA) 2 种主要材料通过雾化沉积的方式制备了非彩虹色胶体颗粒。PVA 既可以调控 SiO_2 粒子间的距离, 还可以利用其固有的性能赋予材料良好的着色力和稳定性, 可附着到各种不规则或弯曲的

表面如纸张、树脂、金属板、陶瓷和柔性丝织物等。Katagiri 等^[24]以 SiO_2 、PDDA 和炭黑为主要材料,制备了颜色可调的结构色膜,通过砂纸磨损测试验证,薄膜具有很好的机械耐磨性。

现阶段,APCs 的胶体制备材料主要有聚苯乙烯(PS)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和 SiO_2 。这些材料在可见光范围内与空气形成的折射率差值较小,产生的光子带隙特性较弱,从而产生的结构色色彩饱和度和偏低。而单分散的球形金属、金属氧化物和半导体材料如 CuO_2 、 ZnS 、 TiO_2 和 ZnO 等^[25-26],具有较高的折射率,是较理想的构建 APCs 的基础单元。总之,无机材料的折射率范围比较宽(2.0~5.0),能够从中找出折射率差值较大的多种材料组合,从而可以通过少数材料的堆叠制备出靓丽的结构色;有机高分子聚合物通常具有良好的成膜性和光学性能,可赋予材料丰富的性能,但是不同聚合物间的材料折射率的差值偏小(1.3~1.7),需要大量堆叠才能构筑靓丽的结构色;有机/无机材料的结合,既可满足材料的高折射率差,又能够赋予材料更丰富的性能,比如优良的着色性、成膜性和机械稳定性等,对于新型包装印刷多功能结构色材料的制备及其应用很有意义^[27]。

2.2 颜色饱和度的增加

APCs 能够呈现出颜色鲜艳的结构色。将其作为印刷颜料时,不仅颜色鲜艳、不易褪色,且具有低角度依赖性,满足大众的视觉要求。由于 APCs 在整个可见区域的非相干光散射较强,因此人造 APCs 的色彩通常具有较低的颜色可视性^[28]。添加高吸收特性的黑色材料可有效解决这一问题。这一方法不仅可减少非相干光的散射,提高颜色的饱和度;还可有效减少或消除控制薄膜厚度所涉及到的相互作用力^[29]。

研究者们一般使用炭黑(CB)^[1,12,29-32]或黑色背景等黑色物质来吸收多重散射光,以提高结构色彩的质量。将炭黑添加到非晶态结构体系来提高色彩饱和度的方式,类似于鸟类羽毛的呈色机理,即黑色素和 β 角蛋白粒子组合。

在多个表面能较高的纳米材料中,使用炭黑通常会引发体系的不稳定,微粒容易团聚在一起,导致分布不均匀、亮度明显下降。综上,除了炭黑之外,还可以通过添加与炭黑类似的黑色材料,来提高 APCs 结构色的饱和度^[33-35]。Xiao 等^[33]利用高折射率的盐酸多巴胺($n \approx 1.74$)来仿制黑色素,将其作为核与低折射率的硅壳($n \approx 1.45$)组合制备出了核壳纳米粒子,再通过反乳液自组装方法制备出了明亮、非彩虹效应的多种结构色。人工黑色素具有独特的高折射率和吸收宽波段光的特性,可以增加纳米粒子的亮度和饱和度。Teshima 等^[36]利用微流聚焦装置制备了由 SiO_2 和 Fe_3O_4 组装的单分散亚微米微球,黑色的 Fe_3O_4 可

以适当吸收部分非相干散射来提高颜色的饱和度。Zhang 等^[37]在单分散的 P(St-MMA-AA)体系引入包含少量石墨烯量子点(GQDs)的石墨烯纳米片,获得了高饱和度、非彩虹效应的结构色薄膜。石墨烯纳米片能够增强 APCs 对蓝色伪光子带隙边缘的吸收,有效地调控 GQDs 的光致发光(PL),使 PL 的波长与光子带隙的波长匹配,从而提高结构色的亮度,进而提高颜色饱和度。

3 组装方法

近年来,结构稳定性高的晶体结构引起了人们的广泛关注^[26,38-40]。性能稳定、呈色效果好的 APCs 结构类型主要有 2 种。

1) 核壳包被结构。这是将一种材料作为壳包覆在另一种材料的表面,形成核壳包被结构。

2) 嵌入式结构。这是将柔性材料浇注并嵌入到制备好的晶体结构空隙中,硬质微球之间的气孔完全被柔性材料取代^[41]。Li 等^[42]采用共沉积自组装的方法,将粒径较小的 P(MMA-BA)共聚物颗粒填充在了粒径较大的 SiO_2 微球间的空隙中,在织物基体上制备了绚丽的结构色薄膜。

受自然界生物的启发,人们仿照生物体的结构制备出了带有结构色的 APCs,目前常用的制备方法有平板刻蚀法、自组装法、模板法、相分离法和均匀着色法。

平板刻蚀法是受自然界二维 APCs 结构的启发,目前主要用于研究激光效应和非晶态结构发光二极管(LEDs)的发光效率。其主要依靠计算机模拟出 APCs 的结构模型,再用聚焦离子束去除基底,随后在周围选择性的开一些空气槽,从而形成了非晶结构^[3,41]。Noh 等^[43]在半导体 GaAs 的几何平板中制备了二维 APCs 结构的 GaAs 膜仿生样品。Yue 等^[44]也用此方法制备了短程有序的 GaN 发光二极管。

自组装法是将 2 种或多种尺寸不同的胶体颗粒按照一定的浓度比例配制,并在一定时间和温度下自行进行组装的方法,制备得到的微观结构就是 APCs 结构^[13,45-46]。利用该方法不仅可以破坏晶体的周期性结晶状态,进而得到短程有序的晶体微球,还可以重新组合调整晶体的结构色。Xiao 等^[33]将合成黑色素作为核、 SiO_2 作为壳来合成黑色素核壳纳米粒子(CS-SMNPs),并把 2 种具有相同核粒径(160 nm)、不同壳粒径(36 nm 和 66 nm)的 CS-SMNPs 按照不同的质量比混合,得到的混合物展现了不同的颜色效果。其颜色的调整只需改变 CS-SMNPs 微粒的混合比值,不需重新合成不同厚度外壳的新 CS-SMNPs 微粒,大大节省了制备时间,为今后的相关研究提供了理论依据。

模板法是利用自然界生物组织的非晶态结构如蝴蝶的翅膀、昆虫翅鞘、鸚鵡羽毛等制备 APCs 的方法。将这些结构作为模板进行人工仿制,不仅具有原生物体的结构,还具有化学材料自身的诸多优点。廖娜^[47]将鸚鵡羽毛小羽枝做为模板,分别制备出了 ZnO, Fe₂O₃, SnO₂ 等复制品;随后通过电子扫描显微镜对制备的上述样品进行分析,发现 SnO₂ 样品的形貌最好,不仅具有鸚鵡羽毛的非晶结构特征,还有羽毛特有的结构色,因此该模板法制备的材料更接近生物组织的非晶态结构。

相分离法是在内芯与外壁的混合溶液中,加入凝聚剂或非溶剂,或者通过改变溶液温度、PH 值来降低外壁材料的溶解度,使其能够从溶液中凝聚的方法。这种方法也适用于制备 APCs,可分为成核生长和失稳分解 2 种类型,形成的结构分别为球形堆积和通道连通^[3,48]。Dufresne 等^[48]假设并解释了某些鸟类自组装纳米结构与相分离后形成的通道和球体形态相似的原因,这 2 种纳米结构也是使鸟类羽毛产生颜色的原因。

均匀着色法应用于非晶光子晶体的呈色,常利用炭黑类的黑色材料吸收非相干散射光,除去虹彩效应的多彩色,使制备的 APCs 显现出各向同性、饱和度高的颜色^[1,12,29—37]。

4 性能及应用研究

APCs 不仅具有颜色丰富、低角度依赖的特点,研究者们还赋予了其多种性能,使其应用于印刷颜料、功能性包装材料、防伪标签等多种领域。下面主要从非虹彩湿度传感器、疏水性薄膜和结构色光纤等 3 个方面介绍。

1) 利用 APCs 能够制备性能优异的湿度传感器,其展现的结构色彩亮度高,且具有非虹彩特性。APCs 湿度传感器的色彩可调,便于反映环境湿度,避免了传统 PCs 传感器由于观测角度不同而引起的颜色混淆现象。Zhang 等^[37]将含有交联剂和引发剂的丙烯酸酰胺单体水溶液通过毛细管力渗透到 APCs 模板的空隙中,采用波长为 365 nm 紫外光照射,将丙烯酸酰胺单体光聚合形成聚丙烯酸酰胺水凝胶和 APS-水凝胶复合湿度传感器。该传感器水凝胶在相对湿度 (RH) 增大 (或减小) 时发生膨胀 (或收缩),相对湿度为 45% 与 100% 条件下水凝胶的厚度分别为 27.8 μm 和 31.2 μm ,厚度的变化引起 APS-水凝胶复合材料光子晶格的变化,从而导致其结构颜色发生变化。该方法可以广泛用于易受环境湿度影响的产品包装上,通过颜色变化鉴别产品质量。将该方法制得的结构色颜料印刷在产品表面,既不会影响产品本身的质量,还可对产品质量起到监控作用,是一款新型的智

能包装材料。

2) 常用于印刷包装产品信息的颜料或油墨可能会随时间或环境变化被破坏,而利用 APCs 制备的非虹彩结构色的疏水性材料,不仅可以保证印刷颜料的颜色鲜艳,还不会受环境影响破坏颜色亮度。Wang 等^[30]制备了低角度依赖、超疏水的 SiO₂/PDMS 彩色薄膜,其多彩的结构色和超疏水性可应用于防湿润标签、彩色印刷和防伪等领域。Meng 等^[12]提出了一种制备疏水性高、机械稳定性良好的非彩虹结构色薄膜的方法,通过混沌对流共组装来制造非晶态的聚苯乙烯 (PS) 粒子阵列,将氟化聚丙烯酸酯 (FPA) 乳胶作为粘结剂引入 PS 颗粒间的空隙中,最终得到疏水性高、机械稳定性良好的薄膜。在自然光下,这种薄膜能够保持明亮的颜色特性,可应用于抗水性印刷颜料。

3) 利用 APCs 能够制备结构色光纤。Shang 等^[49]研究了一种新型的 PDMS 光纤,在外加磁场作用下呈现出可调的结构颜色;将含有 Fe₃O₄@C 纳米粒子的乙二醇液滴包埋在 PDMS 中,能够制备出新型的磁场响应光纤。在外加磁场作用下,分散在乙二醇液滴中的 Fe₃O₄@C 纳米粒子沿磁场形成一维链状结构,纤维的颜色变成了黄色和绿色,而当磁场被移除时纤维的颜色就会消失并显示出原来的颜色。此外,这种新型 PDMS 纤维具有良好的力学性能,无论拉伸或挤压都能在固定磁场下保持其颜色。由于这些纤维具有足够的强度和柔韧性,因此将这一材料运用于某些特定包装材料中时,可以通过调控磁场改变材料的颜色起到防伪的作用,为开发新型功能的智能包装提供了广阔的前景。

非虹彩结构色的 APCs 材料,不仅能够用作印刷颜料或涂料对纸张、塑料、瓷器、玻璃进行图案化处理^[22—23,50],使得彩色印刷品的层次更丰富、阶调更鲜明,图像细节表现更加优良;还可以将其自身特有的一些性能如拉伸性能、湿度、温度及 PH 响应性能和磁控性能等,在印刷防伪、智能包装等众多领域加以研究应用,为未来研究三维光子晶体结构具体的光传播形式、光与 APCs 结构之间的关系提供新思路。

5 结语

文中综述了 APCs 的结构特点、材料选取、制备方法以及该领域的最新研究成果和应用方向,对更多实用性的新型功能材料运用于包装印刷行业寄予展望。目前,虽然基于仿生结构呈色的 APCs 材料具有颜色鲜艳、观看角度独立以及环境友好等优点,但是也存在一些尚待解决的问题:非晶结构的胶体粒子尺寸、排布规律不能精确控制;APCs 功能材料的研究主要是在实验室完成,且多数是对生物体结构的复

制, 未能实现批量生产; 对 APCs 结构色的色度和饱和度的掌控不够成熟, 有待进一步研究和提高。

为了解决这一系列问题, 相关领域的科学研究工作者仍然需要继续深入探讨, 从而为具备多功能、高质量的创新性光学材料的研发做出应有的贡献。

参考文献:

- [1] WANG F, XIN Z, YING L, et al. Structural Coloration Pigments Based on Carbon Modified ZnS@SiO₂ Nanospheres with Low-angle Dependence, High Color Saturation, and Enhanced Stability[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(7): 5009—5016.
- [2] KOHRI M, NANNICHI Y, TANIGUCHI T, et al. Biomimetic Non-iridescent Structural Color Materials from Polydopamine Black Particles That Mimic Melanin Granules[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(4): 720—724.
- [3] 曾琦, 李青松, 袁伟, 等. 非晶无序光子晶体结构色机理及其应用[J]. *材料导报*, 2017, 31(1): 43—55.
ZENG Qi, LI Qing-song, YUAN Wei, et al. Color Mechanism and Application of Amorphous Disordered Photonic Crystal Structure[J]. *Material Guide*, 2017, 31(1): 43—55.
- [4] TOPÇU G, GÜNER T, DEMİR M M. Non-iridescent Structural Colors from Uniform-sized SiO₂ Colloids[J]. *Photonics and Nanostructures-fundamentals and Applications*, 2018, 29: 22—29.
- [5] 乔路, 李意, 崔永明. SiO₂ 微球自组装可控结构色薄膜的研究[J]. *武汉纺织大学学报*, 2017, 30(3): 69—73.
QIAO Lu, LI Yi, CUI Yong-ming. Study on Self-assembled Controllable Structured Color Films of SiO₂ Microspheres[J]. *Journal of Wuhan Textile University*, 2017, 30(3): 69—73.
- [6] ALESANCO Y, VINUALES A, PALENZUELA J, et al. Multicolor Electrochromics: Rainbow-like Devices [J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(23): 14795—14801.
- [7] 陈诚, 董志强, 陈昊文, 等. 二维光子晶体[J]. *化学进展*, 2018, 30(6): 775—784.
CHEN Cheng, DONG Zhi-qiang, CHEN Hao-wen, et al. Two-dimensional Photonic Crystals[J]. *Advances in Chemistry*, 2018, 30(6): 775—784.
- [8] YIN H, DONG B, LIU X, et al. Amorphous Diamond-structured Photonic Crystal in the Feather Barbs of the Scarlet Macaw[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(27): 10798—10801.
- [9] DONG B Q, LIU X H, ZHAN T R, et al. Structural Coloration and Photonic Pseudogap in Natural Random Close-packing Photonic Structures[J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14430—14438.
- [10] GALUSHA J W, RICHEY L R, JORGENSEN M R, et al. Study of Natural Photonic Crystals in Beetle Scales and Their Conversion into Inorganic Structures via a Sol-gel Bio-templating Route[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20(7): 1277—1284.
- [11] KOHRI M, SHINODA Y, KOHMA H, et al. Facile Synthesis of Free-standing Polymer Brush Films Based on a Colorless Polydopamine Thin Layer[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2013, 34(15): 1220—1224.
- [12] MENG Y, TANG B, CUI J, et al. Biomimetic Construction of Non-iridescent Structural Color Films with High Hydrophobicity and Good Mechanical Stability Induced by Chaotic Convective Coassembly Method[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2016, 3(19): 1600374.
- [13] ZHANG Y, DONG B, CHEN A, et al. Using Cuttlefish Ink as an Additive to Produce Non-iridescent Structural Colors of High Color Visibility[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(32): 4719—4724.
- [14] KAWAMURA A, KOHRI M, YOSHIOKA S, et al. Structural Color Tuning: Mixing Melanin-like Particles with Different Diameters to Create Neutral Colors[J]. *Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2017, 33(15): 3824—3830.
- [15] LEE I, KIM D, KAL J, et al. Quasi-amorphous Colloidal Structures for Electrically Tunable Full-color Photonic Pixels with Angle-independency[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(44): 4973—4977.
- [16] ARSENAULT, ANDRÉ C, PUZZO D P, et al. Photonic-crystal Full-colour Displays[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(8): 468—472.
- [17] KIM H, GE J P, KIM J, et al. Structural Colour Printing Using a Magnetically Tunable and Lithographically Fixable Photonic Crystal[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(9): 534—540.
- [18] YAKOVLEV A V, MILICHKO V A, VINOGRADOV V V, et al. Inkjet Color Printing by Interference Nanostructures[J]. *Acs Nano*, 2016, 10(3): 3078—3086.
- [19] 韩婕. 基于生物模板的光功能复合材料研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
HAN Jie. Study on Optical Functional Composites Based on Biological Templates[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [20] 董慧芬. TiO₂/SiO₂ 光子晶体的层层自组装制备及其结构色性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
DONG Hui-fen. Study on the Structure and Color Properties of TiO₂/SiO₂ Photonic Crystals[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014.

- [21] KOLLE M, LETHBRIDGE A, KREYSING M, et al. Bio-inspired Band-gap Tunable Elastic Optical Multi-layer Fibers[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(15): 2239—2245.
- [22] WANG Z, ZHANG J, 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.
- [23] LI Q, ZHANG Y, SHI L, et al. Additive Mixing and Conformal Coating of Noniridescent Structural Colors with Robust Mechanical Properties Fabricated by Atomization Deposition[J]. *Acs Nano*, 2018, 12(4): 3095—3102.
- [24] KATAGIRI K, UEMURA K, UESUGI R, et al. Structurally Colored Coating Films with Tunable Iridescence Fabricated via Cathodic Electrophoretic Deposition of Silica Particles[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(20): 10776—10784.
- [25] 王芬, 刘彤, 林莹, 等. ZnO 三维光子晶体结构色的制备及其性能研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2018(1): 106—111.
WANG Fen, LIU Tong, LIN Ying, et al. ZnO Preparation of Color Three Dimensional Photonic Crystal Structure and Its Performance Study[J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*, 2018(1): 106—111.
- [26] ZHANG X, WANG F, WANG L, et al. Designing Composite Films of SiO₂/TiO₂/PDMS with Long Lasting Invariable Colors and Enhanced Mechanical Robustness[J]. *Dyes & Pigments*, 2017, 138: 182—189.
- [27] 寇东辉, 马威, 张淑芬, 等. 一维光子晶体结构色材料的应用研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(4): 1468—1479.
KOU Dong-hui, MA Wei, ZHANG Shu-fen, et al. Advances in the Application of One-dimensional Photonic Crystal Color Materials[J]. *Chemical Progress*, 2018, 37(4): 1468—1479.
- [28] WANG Z, ZHANG J, XIE J, et al. Polymer Bragg Stack as Color Tunable Photonic Paper[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(16): 7887—7893.
- [29] YOSHIOKA S, TAKEOKA Y. Production of Colourful Pigments Consisting of Amorphous Arrays of Silica Particles[J]. *ChemPhysChem*, 2014, 15(11): 2209—2215.
- [30] WANG F, ZHANG X, ZHANG L, et al. Rapid Fabrication of Angle-independent Structurally Colored Films with a Superhydrophobic Property[J]. *Dyes & Pigments*, 2016, 130: 202—208.
- [31] WANG F, ZHANG X, YING L, et al. Fabrication and Characterization of Structurally Colored Pigments Based on Carbon Modified ZnS Nanospheres[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(15): 3321—3327.
- [32] ZHOU J, HAN P, LIU M, et al. Self-healable Organogel Nanocomposite with Angle-independent Structural Colors[J]. *Angewandte Chemie*, 2017, 129(35): 10462—10466.
- [33] DHINOJWALA A, XIAO M, HU Z, et al. Bioinspired Bright Noniridescent Photonic Melanin Supraballs[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): 1701151.
- [34] ZHANG C, WU B H, DU Y, et al. Mussel-inspired Polydopamine Coatings for Large-scale and Angle-independent Structural Colors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(16): 3898—3902.
- [35] CUI Y, WANG F, ZHU J F, et al. Preparation of Large-scale and Angle-independent Structural Colors by Additive of Black Polypyrrole[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 531: 609—617.
- [36] TESHIMA M, SEKI T, KAWANO R, et al. Preparation of Structurally Colored, Monodisperse Spherical Assemblies Composed of Black and White Colloidal Particles Using a Micro-flow-focusing Device[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(4): 769—777.
- [37] ZHANG Y X, HAN P, ZHOU H Y, et al. Highly Brilliant Noniridescent Structural Colors Enabled by Graphene Nanosheets Containing Graphene Quantum Dots[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(29): 1802585.
- [38] JOSEPHSON D P, MILLER M, STEIN A. Inverse Opal SiO₂, Photonic Crystals as Structurally-colored Pigments with Additive Primary Colors[J]. *Zeitschrift Fur Anorganische Und Allgemeine Chemie*, 2014, 640(3/4): 655—662.
- [39] ZHOU J, JING Y, GU Z, et al. Controllable Fabrication of Noniridescent Microshaped Photonic Crystal Assemblies by Dynamic Three-phase Contact Line Behaviors on Superhydrophobic Substrates[J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2015, 7(40): 22644—22651.
- [40] YI B, SHEN H. Structurally Colored Films with Superhydrophobicity and Wide Viewing Angles Based on Bumpy Melanin-like Particles[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 427: 1129—1136.
- [41] 史建超. 非彩虹结构色薄膜的制备[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2018.
SHI Jian-chao. Preparation of Non-rainbow Structured Films[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2018.
- [42] LI Y, ZHOU L, LIU G, et al. Study on the Fabrication of Composite Photonic Crystals with High Structural

- Stability by Co-sedimentation Self-assembly on Fabric Substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 444: 145—153.
- [43] NOH H, YANG J K, LIEW S F, et al. Control of Lasing in Biomimetic Structures with Short-range Order[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(18): 183901.
- [44] YUE Q, LI K, KONG F, et al. Analysis on the Light-extraction Efficiency of GaN-based Light-emitting Diodes with Deep-hole Amorphous Photonic Crystals Structures[J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(12): 1070—1077.
- [45] TAKEOKA Y. Structural Colored Liquid Membrane without Angle Dependence[J]. *American Chemical Society*, 2009, 1(5): 982—986.
- [46] SHI L, ZHANG Y, DONG B, et al. Amorphous Photonic Crystals with Only Short-range Order[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(37): 5314—5320.
- [47] 廖娜. 基于生物模板的光子晶体材料的制备与性能研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- LIAO Na. Preparation and Properties of Photonic Crystal Materials Based on Biological Templates[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- [48] DUFRESNE E R, NOH H, SARANATHAN V, et al. Self-assembly of Amorphous Biophotonic Nanostructures by Phase Separation[J]. *Soft Matter*, 2009, 5(9): 1792—1795.
- [49] SHANG S, ZHANG Q, WANG H, et al. Facile Fabrication of Magnetically Responsive PDMS Fiber for Camouflage[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2016, 483: 11—16.
- [50] BISWAS T, MAJUMDER S, PAL M, et al. Design and Development of Plasmonic Hollow Core Photonic Crystal Fiber for Sensing Applications[J]. *Springer Proceeding in Physics*, 2015, 166: 55—60.