

光学学报

碧凤蝶鳞片的微纳结构及其光学特性

王龙*, 汪刘应, 许可俊, 刘顾, 阳能军, 李平

中国人民解放军火箭军工程大学作战保障学院, 陕西 西安 710025

摘要 为了探究碧凤蝶鳞片的光学特性及其形成机理,通过填充酒精溶液与改变入射角度的方式开展了碧凤蝶鳞片的变色实验,对前后翅鳞片的微观结构形态进行了观测与分析。构建了结构色鳞片的仿生结构模型,并结合传输矩阵法模拟鳞片膜系结构的反射光谱特性。碧凤蝶翅膀边缘黄绿色与青色区域表面均由下层蜂窝状网格陷光结构的黑褐色基鳞与上层褶皱凹坑状膜系结构的彩色鳞片构成。彩色鳞片由表面微凹坑底部与侧壁的 2 种结构色混合而成,且受天然光子晶体膜系结构及其精细尺寸的影响,对有机溶液、光照条件等具有敏感性变色特征。碧凤蝶鳞片具有的独特光学特性可为自适应变色伪装、传感检测等仿生智能材料领域提供一定的参考。

关键词 微纳光学; 鳞片; 光学特性; 结构色; 仿生

中图分类号 O43; Q881

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0523002

Micro-Nano Structure and Optical Characteristics of Achillidesbianor Cramer Scales

Wang Long*, Wang Liuying, Xu Kejun, Liu Gu, Yang Nengjun, Li Ping

Combat Support Academy, The Chinese People's Liberation Army Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract To explore the optical characteristics and formation mechanism of Achillidesbianor Cramer scales, the discoloration experiment of butterfly scales is carried out by filling alcohol solution and changing the incident angle. The microstructures of the forewing and hindwing scales are observed and analyzed in this paper. The bionic structure model of the scales with structure color is constructed, and the reflection spectrum characteristics of the scales film structure are simulated by using the transfer matrix method. The surfaces of the yellow-green and cyan areas on the edge of the scales of the Achillidesbianor Cramer are composed of the dark-brown base scales of the lower honeycomb grid light-trapping structure and the colored scales of the upper fold and pit-like film structure. The colored scales are formed by mixing 2 structural colors at the bottom of the surface micro-pits and the side walls, and it is sensitive to organic solution and light conditions due to the influence of the structure of natural photonic crystal film and its fine size. The unique optical characteristics of the Achillidesbianor Cramer scales can provide some reference for the field of bionic intelligent materials, such as adaptive color changing camouflage, sensor detection and so on.

Key words micro-nano optics; scale; optical characteristics; structural color; bionics

OCIS codes 220.4241; 310.6860; 330.7326

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-10-15; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(51905542)、中国博士后科学基金面上项目(2019M663990)、火箭军工程大学青年基金(2019QNJ08)

* E-mail: waloxs@163.com

1 引言

蝴蝶、鸟、荷叶、鲨鱼等生物非光滑体表经过数亿年自然选择的演化,形成了具有自清洁性、疏水性、减阻耐磨、气敏特性、陷光特性、变色伪装等独特性能的复杂精细结构^[1-4]。仿生智能材料技术模拟生物系统的结构、行为及相互作用机理,可为功能材料领域提供新思路与新途径,仿生制备、结构仿生、功能仿生已经成为一项重要的新兴课题。蝴蝶鳞片、鸟类羽毛、贝壳与甲虫等生物绚丽的色泽不同于花木植物的色素色,主要源于体表精细微纳结构与可见光发生干涉、衍射、散射等复杂光学反应形成的结构色。蝴蝶鳞片的复杂功能结构具有人工系统无法比拟的卓越性能,吸引了国内外研究者的广泛关注。近年来,人们陆续发现蓝闪蝶、天堂凤蝶、红鸟翼凤蝶、巴黎翠凤蝶、紫斑环蝶等品种的结构色鳞片中存在衍射光栅、多层干涉膜层、光子晶体等精细结构^[5-8],这些结构同时具有陷光特性、变色特性、红外低发射率、刺激响应特性等优异性能。师法自然,通过筛选具备独特功能的蝶翅鳞片微纳结构,进而仿生制备类似结构的功能材料,可为太阳能高效陷光构造、自适应伪装、传感与检测等领域提供重要的启迪和依据^[9-13]。基于蝴蝶鳞片结构外界刺激响应特性研制的仿生智能纳米材料已经成为研究热点。由于压印、光刻等微纳制造技术难以高效可控地制备具有生物精细结构的仿生材料,因此,人们直接在生物模板参与下利用溶胶-凝胶法、沉淀法、原位生长法等工艺合成仿生纳米复合材料^[14-16],以达到多组分材料、功能化结构与优异性能的完美统一。但目前多种蝴蝶鳞片的复杂精细结构与光学特性之间还没有建立可靠的模型,尚未透彻揭示显色机理与响应特性机制,且仿生制备在生物精细结构完整传承、材料组分精确调控、制备过程可控等方面仍然存在较大的提升空间。

蝶翅鳞片具有独特的材料结构与功能,利用该生物系统原理构筑的光、电、热、磁等性能优异的新型高性能纳米功能材料及器件,能解决目前面临的许多科学技术问题。碧凤蝶(*Achillidesbianor* Cramer)属东洋、古北区系共有的凤蝶科品种,色彩绚丽动人,展翅长可达 52~60 mm,翅膀底色为黑色,边缘分布有黄绿色与青色亮鳞。碧凤蝶鳞片微纳结构具备的先进光学系统,能为设计与制备新型仿生光学功能材料提供全新的线索与应用前景。本文通过探索碧凤蝶翅膀鳞片功能结构的光学、材料

与理化作用过程的微观特性,获取结构色鳞片功能结构的跨尺度特征参数与仿生模型表征方法,阐释鳞片的结构色及其变色机理,可为环境刺激响应性变色伪装、环境敏感性可视化传感检测等领域的仿生智能材料研究提供新思路。

2 研究方法

将碧凤蝶翅膀背部具有金属光泽特征的彩色鳞片区域作为研究对象,并将其裁成尺寸为 5 mm×10 mm 的薄片。蝶翅具有的疏水性导致水无法直接渗透到鳞片间隙中,因此,在蝶翅中填充易挥发的 80%(体积分数)酒精有机溶液,以开展鳞片变色实验,并利用日本浩视公司的 KH-7700 三维光学体视显微镜在 350~1500 倍率下观察酒精溶液挥发过程中鳞片的颜色变化状况。当鳞片颜色是由精细结构产生的结构色时,鳞片颜色通常会随酒精挥发过程产生明显变化;当鳞片颜色是由色素产生时,酒精溶液填充前后鳞片颜色不会发生变化。采用日立 U-4100 型号紫外可见近红外分光光度计测量碧凤蝶翅膀鳞片的光学反射性能,进而分析碧凤蝶鳞片结构对蝶翅鳞片着色与变色的影响规律。

为了观测鳞片深层次的微观结构特征,预先将蝶翅样品进行脱脂-脱水-粘台与喷金处理,再用美国 FEI 公司 Nova NanoSEM50 超高分辨扫描电镜(SEM)以 500~50000 倍率局部放大,以观察鳞片的排列方式与微观形态。结合蝶翅微观结构实测特征参数与传输矩阵理论计算方法,用 Matlab 软件自编程实现蝶翅鳞片仿生结构模型的光学模拟仿真分析,从而揭示碧凤蝶鳞片的结构色及其变色机理。

3 碧凤蝶鳞片的光学特性

碧凤蝶鳞片的色泽分布如图 1 所示,碧凤蝶展翅长可达 52~60 mm,翅底为黑色,在前、后翅边缘分布有黄绿色与青色的亮鳞斑纹,且后翅具有尾突。彩色鳞片区域包括黑褐色的色素色基鳞、表层彩色的结构色鳞片。其中,黑褐色基鳞顶部呈多个锯齿状,彩色鳞片顶部相对光滑,呈近似椭圆状,长约为 140~150 μm ,中间最宽约为 60~70 μm ,两端过渡圆弧的长约为 20 μm 。前翅颜色较淡,分布有稀疏无序的黄绿色闪亮鳞片;后翅分布有相对密集有序的青色亮鳞,可随光照射角度与强度的变化而变化,因此该区域内的金属光泽在黄、绿、蓝三相邻色之间略有差异。臀角的半圆

形粉红色斑与黑褐色都不会闪烁金属光泽,是典型的色素色。前、后翅的彩色鳞片上都存在有序

规则排列的亮斑,可能由鳞片表层存在凹槽结构导致。

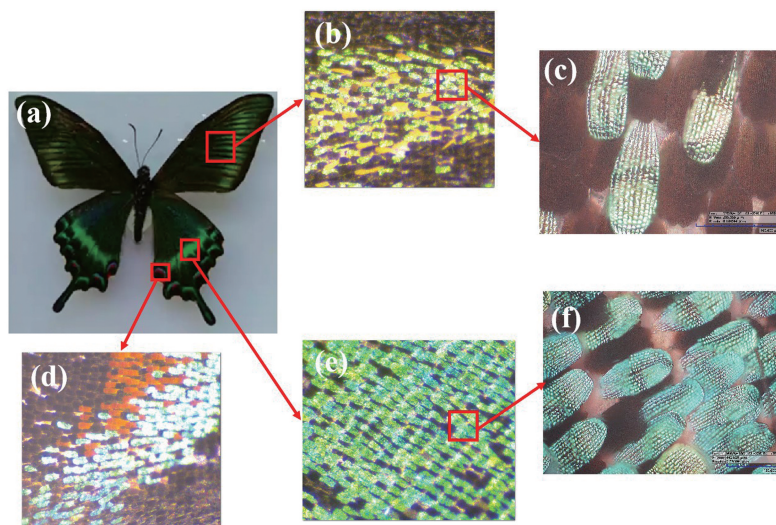


图 1 碧凤蝶鳞片光学显微图像。(a)碧凤蝶;(b)~(c)前翅彩色鳞片;(d)~(f)后翅彩色鳞片

Fig. 1 Optical microscopic images of the *Achillidesbianior* Cramer scales. (a) *Achillidesbianior* Cramer; (b)~(c) colored scales of the forewing; (d)~(f) colored scales of the hindwing

碧凤蝶前后翅膀结构色鳞片区域的可见光反射特性如图 2 所示。可见光是一种波长为 380~780 nm 的电磁波,颜色由光的波长决定。可以发现,前翅鳞片的光谱反射峰值位于 572 nm 波长处,

介于 560~580 nm 的黄绿色可见光区间,反射率最高为 53.5%。后翅鳞片的光谱反射峰值位于 484 nm 波长处,介于 480~490 nm 的青色可见光区间,反射率最高为 59.2%。因此,蝴蝶鳞片呈现的结构色就是反射光谱的最高峰值区间波段,实质是源于鳞片对不同波长光的差异化反射特性。

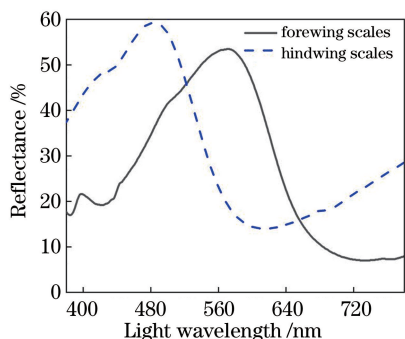


图 2 结构色鳞片的反射光谱特性

Fig. 2 Reflectance spectrum characteristics of the scales with structural color

滴加酒精溶液后碧凤蝶的前翅与后翅变色现象分别如图 3 与图 4 所示。从图 3 可以发现,填充酒精溶液后碧凤蝶前翅的黄绿色鳞片立即转变为橙红色,随着酒精的挥发,鳞片由橙红色逐渐恢复至绿色,亮度也逐渐增加。但黑褐色鳞片的颜色无显著变化,这表明该颜色为色素色。从图 4 可以发现,填充酒精溶液后碧凤蝶后翅的青亮色立即转变为橙黄色,波长发生红移。随着酒精溶液不断挥发,鳞片色的波长又发生蓝移,逐渐恢复为初始的青亮色。这表明碧凤蝶的黄绿色鳞片和青色鳞片均为结构色,对

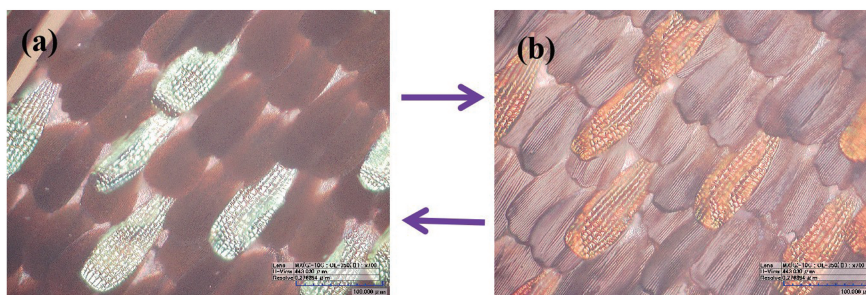


图 3 前翅鳞片颜色变化。(a)酒精填充前;(b)酒精填充后

Fig. 3 Color change of the forewing scales. (a) Before filling with alcohol; (b) after filling with alcohol

液体等周围环境具有不同的光学响应。当与空气折射率不同的酒精等有机填充介质快速渗透到碧凤蝶鳞片结构缝隙时,鳞片结构的颜色会发生变化。变色过程持续的时间与滴加溶液的折射率、挥发性等因素有关,具有较好的液体敏感性。根据多层膜干涉理论可知^[17-18],由于酒精溶液的折射率高于空气的折射

率,酒精填充空气间隙会使蝶翅微纳结构的等效光学厚度增大,反射光谱峰值发生红移。当酒精逐渐挥发,蝶翅微纳结构的间隙会被空气重新填充,此时蝶翅微纳结构的等效光学厚度减小,反射光谱峰值蓝移。碧凤蝶鳞片的微纳结构对周围环境的刺激性变色响应现象,为智能变色伪装技术提供了新思路。

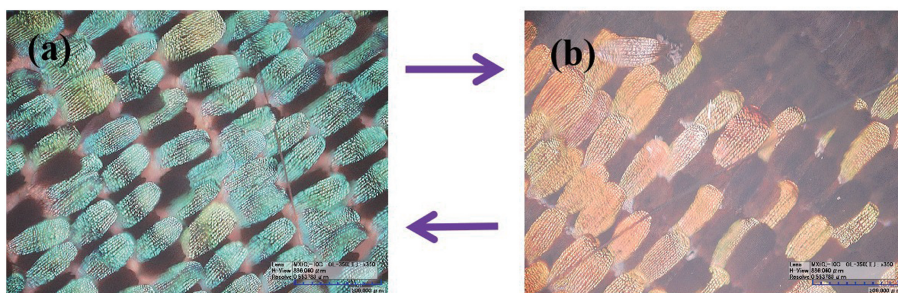


图 4 后翅鳞片颜色变化。(a)酒精填充前;(b)酒精填充后

Fig. 4 Color change of the hindwing scales. (a) Before filling with alcohol; (b) after filling with alcohol

当光照射角度发生倾斜变化时,后翅鳞片的颜色如图 5 所示。可以发现,碧凤蝶后翅的鳞片光泽相对较暗,并由原来的青色转变为蓝绿色,即经蝶翅微纳结构作用后的光波波长产生了蓝移现象。这表明碧凤蝶鳞片的结构色与亮度会随光线入射角的变化而变化,这种现象也被称为虹彩效应。碧凤蝶结构色鳞片对光照条件的敏感特性,为开发高灵敏度、高选择性的仿生光敏传感器提供了可能。

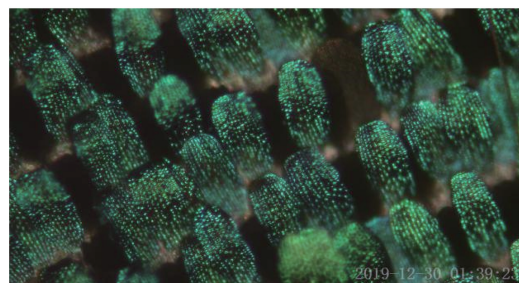


图 5 照射角度变化后的后翅鳞片颜色

Fig. 5 Color of the hindwing scales after irradiation angle changes

4 碧凤蝶鳞片的微纳结构

碧凤蝶前翅鳞片的分布及表面微纳结构如图 6 所示,图 6(a)为前翅纯黑褐色区域的鳞片,图 6(b)

为闪烁有黄绿色光泽区域的鳞片。两个区域均为两层鳞片覆盖于基底上,后排的鳞片柄部直插入前排

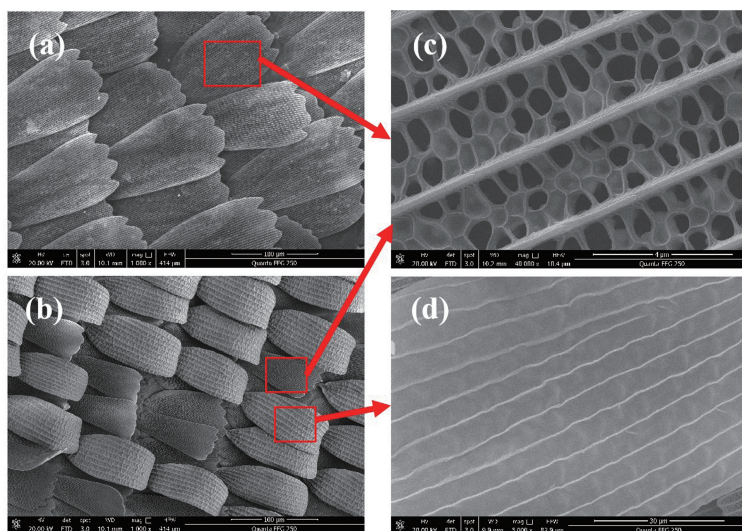


图 6 前翅鳞片的微纳结构。(a)黑褐色鳞片分布;(b)绿色鳞片分布;(c)黑褐色鳞片的表面结构;(d)绿色鳞片的表面结构

Fig. 6 Micro-nano structure of the forewing scales. (a) Distribution of the dark-brown scales; (b) distribution of the green scales; (c) surface structure of the black-brown scales; (d) surface structure of the green scales

鳞片覆盖区域,首尾搭接。彩色鳞片区域由下层黑褐色基鳞与上层结构色鳞片组成。下层黑褐色基鳞相对扁平,头小尾大近似芭蕉扇形,长约为 $160\ \mu\text{m}$ 、中部宽约为 $100\ \mu\text{m}$,端部有 3~5 个锯齿状齿裂。上层的结构色鳞片近似椭圆形,长为 $195\sim 220\ \mu\text{m}$ 、中部宽为 $60\sim 80\ \mu\text{m}$ 。平行脉状非光滑褶皱表面形成许多微小凹槽结构,将整个表面分割成栅格结构,端部平滑呈圆弧状且无齿裂现象,覆盖在基鳞上方。放大后的黑褐色鳞片如图 6(c)所示,其表面分布 32~36 条纵向平行的锯齿状脊脉和横向交错分布的短肋,构成了具有陷光特性的蜂窝状多孔网格结构,脊脉间距约为 $2.3\ \mu\text{m}$,孔径为 $0.6\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 。蝴蝶是变温动物,能利用蜂窝状多孔网格陷光结构提高太阳能的光热转换效率,从而维持体温^[19]。当光进入蜂窝状鳞片的光陷阱微结构后,类似传播在光纤内表面产生的多重反射与吸收,形成较好的光热转换性能^[11]。放大的黄绿色鳞片表面如图 6(d)

所示,表面分布的纵向脊脉和横向交错分布的短肋在整个表面形成凹坑形,近似窗格状结构,脊脉之间的距离为 $5\sim 6\ \mu\text{m}$,脊脉每隔 $5.5\sim 7.5\ \mu\text{m}$ 有横向不规则的微凹槽。这类 μm 级精确阵列排布的凹坑形状能表现出干涉、散射及衍射等复杂的光学物理特性。

碧凤蝶后翅的鳞片分布及表面微纳结构如图 7 所示,图 7(a)和图 7(b)中的彩色斑纹区域同样由上层青色鳞片、下层基鳞呈两层瓦片状覆盖于基底上。后翅结构色的单个鳞片形状与前翅结构色鳞片相似,从中部向两端递减近似为椭圆形,长为 $155\sim 220\ \mu\text{m}$,中部宽为 $60\sim 75\ \mu\text{m}$ 。局部放大的结构色鳞片表面如图 7(c)与图 7(e)所示,由纵向层脊脉与横向短肋构成凹坑形非光滑形态表面。脊脉之间的距离为 $5\sim 6\ \mu\text{m}$,脊脉每隔 $3.5\sim 4.5\ \mu\text{m}$ 有横向不规则的微凹槽。黑褐色基鳞如图 7(d)与图 7(f)所示,同样具有陷光特性的蜂窝状多孔网格结构。

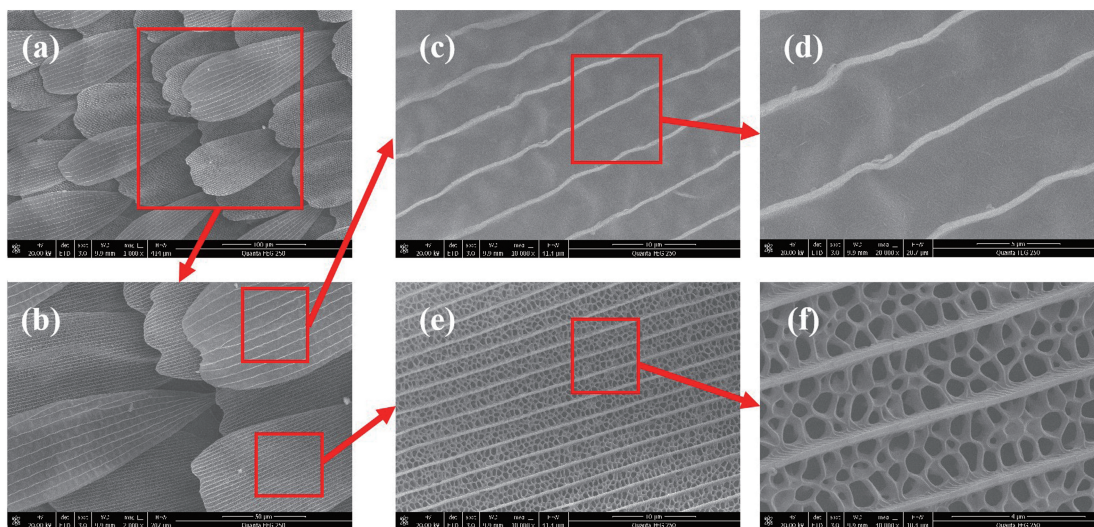


图 7 后翅鳞片的微纳结构。(a)~(b)彩色区域鳞片分布;(c)~(d)蓝绿色鳞片表面结构;(e)~(f)黑色基鳞表面结构

Fig. 7 Micro-nano structure of the hindwing scales. (a)~(b) Scales distribution in color area;

(c)~(d) surface structure of the blue-green scales; (e)~(f) surface structure of the black basal scales

蝴蝶的结构色鳞片横截面微纳结构可分成塔状结构与层状结构。碧凤蝶前后翅的结构色鳞片类似于翡翠凤蝶,呈图 8 所示的凹坑型层状结构^[19],即由几丁质膜层与空气间隙交替组成的多层薄膜结构。膜系结构呈一定弧度曲面平行分布,近似半圆型,脊脉之间的宽度为 $5\sim 6\ \mu\text{m}$,从而形成脊线间的凹坑沟槽结构。

5 碧凤蝶鳞片的光学机理

碧凤蝶鳞片的结构色是精细结构导致光线发生散射、干涉、衍射等复杂效应生成的特殊颜色。

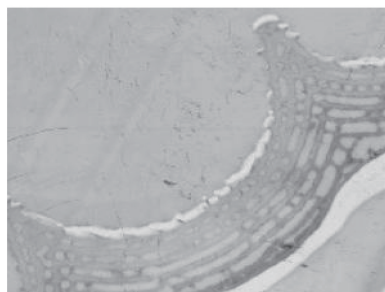


图 8 鳞片的横截面结构

Fig. 8 Cross sectional structure of the scales

碧凤蝶鳞片的微观结构由实体几丁质结构和空气

间隙填充组成,非光滑表面形态是由凹坑型表面形态与层状平行多层膜横截面的二元耦合结构。如图 9 所示,膜系结构形态可分为凹坑型膜系结构与平整型膜系结构。凹坑型膜系结构更加贴合天然蝶翅鳞片的微纳结构,表面规律排布凹坑形

单元体,脊脉与基体互为一体形成周期性角度变化的多层薄膜状结构。为了便于仿真分析碧凤蝶结构色鳞片的光学特性,可将凹坑型膜系结构的底面与侧面局部简化成平整型膜系结构。

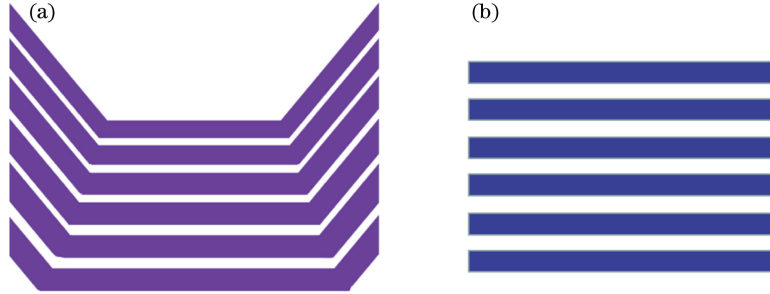


图 9 鳞片横截面的层状结构。(a)凹坑型多层膜;(b)平整型多层膜

Fig. 9 Layered structure of the cross section of the scale. (a) Pit type multilayer film; (b) flat type multilayer film

根据多层薄膜干涉原理,在每个薄膜周期内光线都会重复被加强和抑制,导致一部分光发生相消干涉,另一部分光发生相长干涉。碧凤蝶翅膀鳞片的周期性膜系结构与一维光子晶体有相似特征,均由不同折射率的介质周期性交替排列组成^[20-22]。因此,可用光子晶体的光子禁带理论分析碧凤蝶鳞片膜系结构的光学特性。光子禁带效应导致某一频率范围的光波无法顺利通过,形成高反射现象,使鳞片具有该特定频率光波的颜色。用传输矩阵法模拟计算光子晶体膜系结构的反射光谱曲线。可见光在第 l 层介质中传输时的特征矩阵 M_l 可表示为^[23-24]

$$M_l = \begin{bmatrix} \cos\left(2\pi n_l d_l \frac{\cos \theta_l}{\lambda}\right) & j \frac{\sin\left(2\pi n_l d_l \frac{\cos \theta_l}{\lambda}\right)}{\eta_l} \\ j \eta_l \sin\left(2\pi n_l d_l \frac{\cos \theta_l}{\lambda}\right) & \cos\left(2\pi n_l d_l \frac{\cos \theta_l}{\lambda}\right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, λ 为入射波长, d_l 为第 l 层的厚度, n_l 为第 l 层的折射率, θ_l 为第 l 层介质的折射角,导纳

$$\eta_l = \begin{cases} n_l / \cos \theta_l, & \text{TM wave} \\ n_l \cos \theta_l, & \text{TE wave} \end{cases}. \quad (2)$$

若 n_0 、 θ_0 分别为空气介质的折射率与入射角,且符合 Snell 定律,则

$$n_l \sin \theta_l = n_0 \sin \theta_0. \quad (3)$$

当薄膜由 k 层组成时,整个光子晶体薄膜结构的特征矩阵 M_{all} 可表示为

$$M_{\text{all}} = \prod_{l=1}^{l=k} M_l = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

若空气导纳为 η_0 ,基底导纳为 η_{k+1} ,则入射光

经碧凤蝶膜系结构表面的反射率 R 为^[23-24]

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})} \right|^2. \quad (5)$$

碧凤蝶鳞片膜系结构中发生相长干涉的光波波长,取决于膜层厚度、膜层折射率、环境介质厚度、环境介质折射率及入射角等因素。一般空气介质的折射率为 1,鳞片几丁质膜层的折射率为 1.55,酒精溶液的折射率为 1.36^[25-26]。碧凤蝶鳞片膜系结构的几丁质层数为 6~9 层,几丁质层的平均厚度为 85~100 nm,空气层的平均厚度为 125~140 nm。碧凤蝶鳞片仿生结构模型的光学模拟仿真条件:几丁质层数为 6 层;前翅结构色鳞片的几丁质膜层厚度为 95 nm,空气间隙厚度为 135 nm;后翅结构色鳞片的几丁质膜层厚度为 85 nm,空气间隙厚度为 125 nm;凹坑型多层膜结构的底面与侧壁角度为 45°。

无酒精溶液填充条件下,碧凤蝶鳞片的可见光反射光谱模拟结果如图 10 所示。可以发现,前翅鳞片凹坑底部的反射光谱峰值介于黄色可见光区间(580~595 nm);侧壁的反射光谱峰值介于蓝色可见光区间(380~440 nm)。任何一种颜色的可见光都可用其相邻两侧的光混合而成,前翅鳞片凹坑底部的黄色反射光与侧壁蓝色反射光混合形成宏观上肉眼所见的黄绿色。后翅鳞片凹坑底部与侧壁反射光谱峰值分别介于绿色可见光区间(520~560 nm)与蓝色可见光区间(380~420 nm),后翅鳞片凹坑底部的绿色反射光与侧壁蓝色反射光混合形成青色。因此,碧凤蝶鳞片宏观呈现出的颜色并非单一颜色,而是凹坑型膜系结构产生的 2 种结构色的混合色。

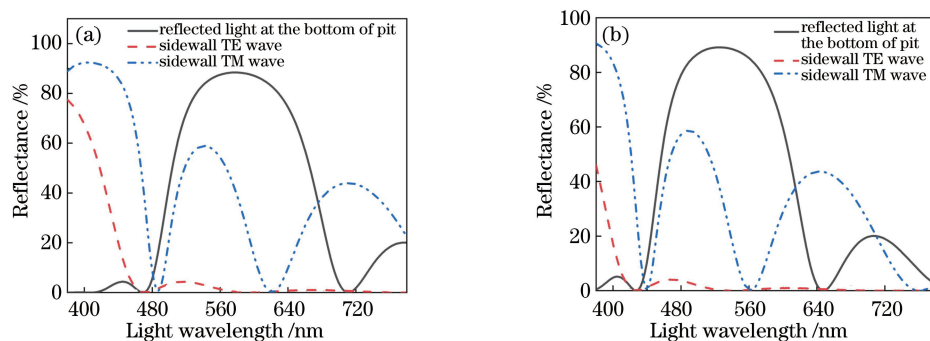


图 10 无酒精溶液填充时鳞片的光学特性。(a)前翅鳞片;(b)后翅鳞片

Fig. 10 Optical characteristics of scales when filled with alcohol-free solution. (a) Scales of the frontwing;
(b) scales of the hindwing

当鳞片被酒精溶液填充时,碧凤蝶鳞片的可见光反射光谱如图 11 所示,可以发现,光谱呈现出快速响应的液敏传感性能。前翅鳞片凹坑底部与侧壁反射光谱峰值分别介于红色可见光区间(640~680 nm)和绿色可见光区间(500~540 nm)。后翅鳞片凹坑底部与侧壁反射光谱峰值分别介于黄色、红色可见光区间(580~620 nm)与青色、蓝绿色可见光区间(460~500 nm),这与蝶翅变色现象完全一致,表明反射光谱模拟曲线可真实反映出碧凤蝶翅膀鳞片在滴加酒精溶液前后敏感性响应颜色的微妙变化。用酒精溶液填充微纳结构时碧凤蝶翅膀鳞片的变色现象,源于酒精溶液的折射率大于空气层折

率。当鳞片的微观结构一定时,填充酒精溶液会使膜系结构的等效光学厚度增大,经蝶翅微纳结构作用后反射光谱峰值的光波波长发生红移。当酒精逐渐挥发,空隙又会被空气重新填充,经蝶翅微纳结构作用后反射光谱峰值的光波波长发生蓝移。同时,酒精溶液填充鳞片结构降低了介质层的折射率,削弱了光子晶体膜系结构的光子禁带效应,使光谱反射率峰值减小,增强了光吸收率,导致宏观上的色彩亮度变暗。此外,在光传输模拟过程中,光线最初从空气进入几丁质/酒精溶液膜系结构再进入空气,可能会在空气与膜层界面附近发生一定程度的电磁界面态,使 TM 波光谱反射峰值形成较弱的劈裂现象。

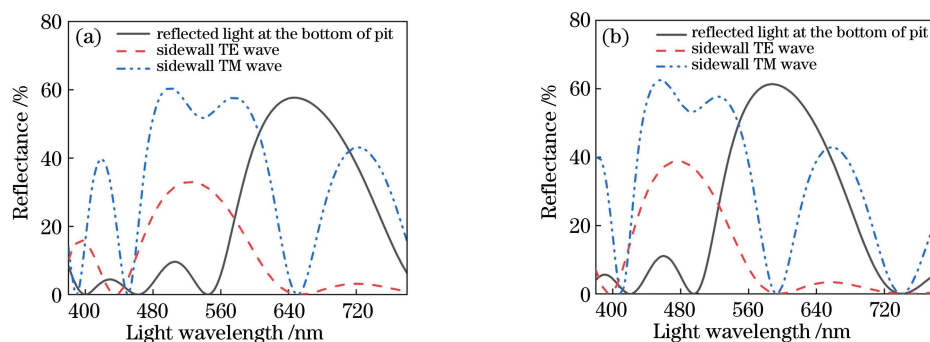


图 11 用酒精填充时鳞片的的光学特性。(a)前翅鳞片;(b)后翅鳞片

Fig. 11 Optical characteristics of scales when filled with alcohol. (a) Scales of the frontwing;
(b) scales of the hindwing

碧凤蝶鳞片的结构色不仅与微观结构、有机溶液填充等因素有关,还受光线入射角度 α 的影响。以结构色鳞片凹坑底部为例,其可见光光谱反射的模拟曲线如图 12 所示。可以发现,该光谱呈较好的光响应性。当光线以不同角度入射到蝶翅鳞片凹坑底部时,可见光反射光谱特性发生了明显变化,高反射区及其中心峰值的波长位置都发生了跨色彩区间的移动,使碧凤蝶鳞片在不同光照角度下的颜色发

生变化。此外,最大反射率峰值也发生了变化,导致蝶翅结构色的光泽亮度发生变化。

6 结 论

从仿生学角度出发,采用实验与数值模拟相结合的方式研究了碧凤蝶翅膀鳞片的微纳结构、光学性能及其内在关联。分析了碧凤蝶鳞片在 380~780 nm 可见光范围内的光学特性,证实了黄绿色、

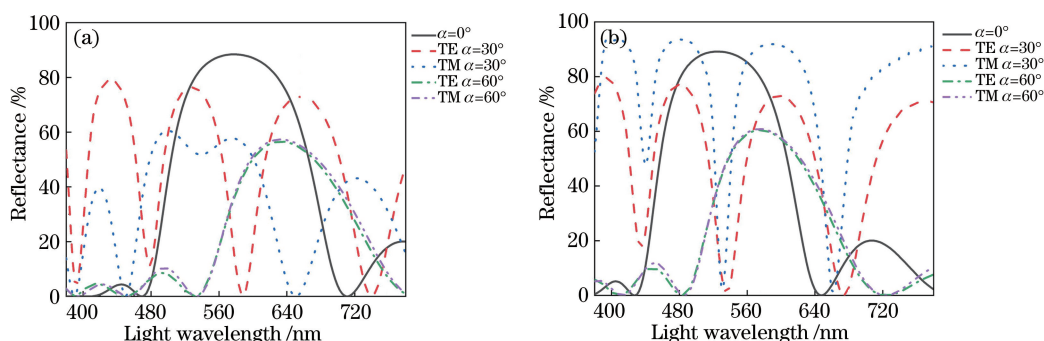


图 12 光线以不同角度入射到鳞片凹坑底部的光学特性。(a)前翅鳞片;(b)后翅鳞片

Fig. 12 Optical characteristics of light incident on the bottom of the scale pits at different angles.

(a) Scales of the frontwing; (b) scales of the hindwing

青色鳞片均属于结构色。碧凤蝶翅膀边缘彩色区域表面由蜂窝状多孔网格结构的黑褐色基鳞与非光滑褶皱凹坑状表面结构色鳞片双层首尾搭接规则排列而成。碧凤蝶前后翅的结构色鳞片具有相似的结构特征,类似于天然的光子晶体,为几丁质层和空气间隙交替周期性分布构成凹坑型膜系结构。构建了碧凤蝶鳞片结构反射特性的物理模型,解释了鳞片结构色的变色机理。结果表明,碧凤蝶鳞片的颜色并非由多层膜结构直接相长干涉的单色反射光形成。当同一束光照射凹坑型膜系结构时,实际上在底面与侧面会形成 2 种不同的结构色。鳞片颜色是凹坑型膜系结构产生 2 种结构色的混合色,由精细结构形态与特征尺寸共同决定,并对填充介质、光线入射角度等外界环境具有敏感性变色现象。酒精溶液填充、光线入射角度均会改变鳞片微纳结构的等效光学厚度,使高反射位置发生跨色彩区间的移动,形成变色现象。该研究成果对智能变色伪装、环境刺激响应传感检测等仿生智能材料的研制具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Pouya C, Stavenga D G, Vukusic P. Discovery of ordered and quasi-ordered photonic crystal structures in the scales of the beetle *Eupholus magnificus* [J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11355-11364.
- [2] Jiang L. *Bionic intelligent nanomaterials* [M]. Beijing: Science Press, 2015.
江雷. 仿生智能纳米材料[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [3] Blossey R. Self-cleaning surfaces: virtual realities [J]. *Nature Materials*, 2003, 2(5): 301-306.
- [4] Wang K J. Mechanism and bionic research of ultrasensitive micro-vibrational sensilla of scorpion [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [5] Vukusic P, Sambles J R, Lawrence C R. Colour mixing in wing scales of a butterfly [J]. *Nature*, 2000, 404(6777): 457.
- [6] Vukusic P, Roy Sambles J. Photonic structures in biology [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 852-855.
- [7] Yang C Z, Guan Y, Chen S K, et al. Research progress on the metal nanocomposites with butterfly wing hierarchical structure [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(1): 101-108.
杨诚智, 关玉, 陈世坤, 等. 蝶翅精细分级结构金属纳米复合材料的研究进展 [J]. *金属学报*, 2019, 55(1): 101-108.
- [8] Mu Z Z. Design, fabrication and properties of biomimetic functional surfaces based on typical butterfly wings [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
穆正知. 基于典型蝶翅的仿生功能表面设计制造及性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [9] Chung K, Yu S, Heo C J, et al. Flexible, angle-independent, structural color reflectors inspired by morpho butterfly wings [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(18): 2375-2379.
- [10] Pris A D, Utturkar Y, Surman C, et al. Erratum: towards high-speed imaging of infrared photons with bio-inspired nanoarchitectures [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 195-200.
- [11] Koon D W, Crawford A B. Insect thin films as sun blocks, not solar collectors [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(15): 2496-2498.
- [12] Potyrailo R A, Ghiradella H, Vertiatchikh A, et al. Morpho butterfly wing scales demonstrate highly selective vapour response [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 123-128.
- [13] Xie H F. The stealth characteristic of Morpho butterfly wings and mechanics analysis and fabrication exploration of its bionic structure [D].

- Wuhan: Hubei University of Technology, 2016.
- 谢恒峰. Morpho 蝶翅隐形特性与仿生结构力学分析及仿生制备的探究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- [14] Tian J L, Zhang W, Gu J J, et al. Bioinspired Au-CuS coupled photothermal materials: enhanced infrared absorption and photothermal conversion from butterfly wings[J]. *Nano Energy*, 2015, 17: 52-62.
- [15] Zhu S M, Lu T, Zhang D. Progress in stimuli-responsive photonic crystals with biological structures[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2017, (2): 229-244.
- 朱申敏, 路涛, 张荻. 生物结构刺激响应光子晶体的研究进展[J]. *高分子学报*, 2017, (2): 229-244.
- [16] Guan Y, Yang C Z, Su H L, et al. Controllable synthesis of nano Ag-Au/butterfly wings composites with mimicking fine hierarchical structure of butterfly wings[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2018, 35(11): 3146-3153.
- 关玉, 杨诚智, 苏慧兰, 等. 蝶翅精细分级结构纳米 Ag-Au/蝶翅复合材料的可控制备[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(11): 3146-3153.
- [17] Liao G L, Jiang T, Jiang X, et al. Fabrication and optical characteristics of biomimetic micronano structures on Morpho butterfly wing[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(12): 21-25.
- 廖广兰, 江婷, 江轩, 等. 仿 Morpho 蝶翅微纳结构制备及其光学特性[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(12): 21-25.
- [18] Shi Y. Test and simulation on infrared stealth characteristic of micro-nano structure in bionic butterfly scales[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016.
- 史迎. 仿蝶翅鳞片微结构红外隐形特性测试与仿真[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- [19] Shang C H. The mechanism of butterfly scales with high absorptivity of light and design of bionic structures[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- 商春辉. 蝴蝶鳞片高吸光率机理分析及仿生结构设计[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [20] Cai Y Y, Wang Z, Chen X, et al. Coupling properties of defect modes in organic octagonal quasiperiodic-photonic-crystals under low-refractive-index contrast[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0216003.
- 蔡园园, 王智, 陈笑, 等. 低折射率对比度下有机八重准周期光子晶体缺陷模的耦合特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0216003.
- [21] Liu R H, Shi J M, Zhao D P, et al. Preparation and characteristics of middle and far infrared stealth of photonic crystal film under intense irradiation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(3): 031601.
- 刘瑞煌, 时家明, 赵大鹏, 等. 强辐照下光子晶体红外隐身薄膜的隐身特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(3): 031601.
- [22] Wang H, Zhao D P, Liu R H, et al. Compatible stealth photonic crystal for visible-light, far-infrared, and multi-wavelength lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 181602.
- 王航, 赵大鹏, 刘瑞煌, 等. 可见光、远红外与多种激光兼容的隐身光子晶体[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 181602.
- [23] Liu R H, Zhao D P, Zhang J K, et al. Preparation and characteristics of middle and far infrared stealth of photonic crystal film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0816001.
- 刘瑞煌, 赵大鹏, 张继魁, 等. 中远红外隐身光子晶体薄膜的制备及隐身特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0816001.
- [24] Yi Y, Deng L W, Luo H, et al. Design of infrared and laser band compatible camouflage structure based on photonic crystals[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(11): 2966-2971.
- 易怡, 邓联文, 罗衡, 等. 基于光子晶体的红外光与激光兼容伪装材料结构设计[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(11): 2966-2971.
- [25] Berthier S, Charron E, Da Silva A. Determination of the cuticle index of the scales of the iridescent butterfly Morpho menelaus[J]. *Optics Communications*, 2003, 228(4/5/6): 349-356.
- [26] Land M F. The physics and biology of animal reflectors[J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 1972, 24: 75-106.