

大蓝闪蝶翅鳞微纳结构的光学隐身特性研究

王 龙, 汪刘应, 刘 硕, 阳能军, 葛超群, 许可俊, 王伟超

(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: 为了探究大蓝闪蝶翅鳞的光学功能特性及其仿生应用潜力, 对其进行了响应性光学性能测试与微观结构表征, 并构建了翅鳞的可视化仿生模型, 进而揭示了大蓝闪蝶翅鳞多尺度分级微纳结构与可见光-近红外波段响应功能特性之间的映射关系及影响规律。研究表明, 该蝶翅上下两层鳞片具有周期性精细结构, 脊结构分别被几丁质片层堆叠成梳齿状堆栈结构与塔状光栅结构, 瑞利散射、多层膜干涉、光子禁带等光学效应协同作用赋予它对外部环境介质填充、光照入射角度等因素变化具有敏感的变色响应特征, 并在近红外波段兼容有反射率可调特性。大蓝闪蝶翅鳞具有的独特光学特性可为自适应变色变发射率仿生隐身功能材料与元器件的研制提供新思路。

关键词: 仿生材料; 大蓝闪蝶; 翅鳞; 微纳结构; 光学隐身

中图分类号: TB381; TJ765.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)05-1926-07

仿生技术是连接生物系统与人类工程应用的重要桥梁。师法自然, 从自然界生物功能特性中汲取灵感, 模仿生物系统的材料、结构、行为及其工作机制, 为解决工程技术难题提供重要借鉴。荷叶自清洁、水龟腿部疏水、蛾眼陷光、蝎子微振动敏感、翼形猪草定向输水、瓢虫跗骨刚毛粘附等卓越性能已经受到广泛关注^[1-6]。生物彼此迥异的天然体表微结构经过亿万年优胜劣汰的进化选择, 成为其优异功能特性的关键基础。通过在功能材料领域引入仿生学思想, 仿制生物体表的精细微纳结构, 再现卓越性能, 能为打破传统材料困局提供崭新的突破途径。当前微纳级仿生结构材料制备大都采用“自上而下”的减材制造与以“自下而上”的增材制造两大类手段^[7-11], 难以精准复制生物体表复杂的三维精细构型, 因此以天然生物结构为模板的原位自组装制备“遗态材料”的新型方法倍受关注^[12-16]。

蝴蝶是人类熟知的生物原型, 多达 2 万多个种类, 且地域分布极为广泛。蝴蝶翅鳞精细的多尺度分级微纳结构, 使其在光热效应、光学催化、生物检测与传感、疏水防雾、油水分离等领域表现出了广阔的应用前景^[17-21]。蝴蝶翅鳞的精细结构-功能特性一体化为新型功能材料与智能材料制备提供了新的思路。通过利用蝶翅功能结构化表面为模板开展不同组分的高性能纳米复合材料可控制备, 追求达到材料、结构与性能的完美耦合。然而, 蝴蝶翅鳞不同尺度、维数、层次

与形态的构型组合与光、电、热、磁等功能特性之间还没有建立可靠的关系模型, 也尚未透彻揭示其刺激-响应特性机制。大蓝闪蝶(morpho menelaus)属于蛱蝶科闪蝶, 主要生活于巴西、委内瑞拉等南美洲亚马逊河流域热带地区。大蓝闪蝶翅鳞微纳结构具备的先进光学系统, 能为设计与制备新型光学隐身仿生材料提供启迪。基于仿生学思想, 研究大蓝闪蝶翅鳞多尺度分级微纳结构与可见光-近红外反射特性, 并构建翅鳞微结构的 3D 可视化模型, 进而揭示翅鳞微纳结构与光学响应特性之间的内在联系, 有望为自适应变色变发射率仿生隐身功能材料及其元器件的研制提供新思路。

1 实 验

大蓝闪蝶形态如图 1 所示, 前后两对翅膀表面均匀呈现蓝色金属光泽, 而蝶翅边缘部分呈现灰黑色。选取大蓝闪蝶翅膀表面鳞片完整的亮蓝色区域, 并裁成 15 mm×15 mm 薄片样品待用。首先, 采用表面张力小、易挥发的 80%乙醇有机溶液, 并让其充分浸润翅鳞的微纳结构。其次, 利用日本浩视公司的 KH-7700 超景深三维显微镜观察翅鳞排列形式及其在乙醇溶液浸润与挥发过程的变色规律, 并利用日立 U-4100 型号光谱仪测量翅鳞在可见光-近红外波段的光学反射性能。然后, 采用美国 FEI 公司 Quanta 250FEG 超高分辨扫描电镜以 500~40000 倍率局部放大, 以观察翅鳞表面与横截面的微观形态结构, 并由此构建准确的仿

收稿日期: 2021-07-09

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项目(2019QNJJ08)

作者简介: 王 龙, 男, 1989 年生, 博士, 火箭军工程大学作战保障学院, 陕西 西安 710025, E-mail: waloxs@163.com



图 1 大蓝闪蝶的外观形态

Fig.1 Appearance of morpho menelaus

生结构模型。进而，建立大蓝闪蝶翅鳞形态结构与可见光-近红外波段光学特性的密切关联，揭示大蓝闪蝶翅鳞特殊光学响应蕴含的内在隐身机理。

2 大蓝闪蝶翅鳞的光学隐身特性

图 2 为光照呈一定倾斜角度入射至大蓝闪蝶翅鳞时的乙醇介质填充变色过程。由于翅鳞经乙醇有机溶液浸泡后却依然能可逆恢复初始色彩，并没发生有机溶剂溶解后的不可逆“褪色”现象，因此大蓝闪蝶翅鳞色彩为结构色。大蓝闪蝶翅膀表面呈双层鳞片规则性排列分布，底层彩色的短宽鳞片表面被覆盖着另一层无色透明状的细长鳞片，而结构色源于底层鳞片。图 2a 为无乙醇介质填充的初始鳞片，呈现出靛蓝色光泽。随着乙醇介质迅速完全浸润覆盖整个翅鳞微结构，如图 2b 所示，鳞片色泽快速响应变化，光线波长发生红移，并呈现出黄绿色。这是因为乙醇介质迅速填充

了鳞片微纳结构的间隙层，导致折射、干涉等光学物理现象发生改变，从而导致了鳞片结构色的变化。由于乙醇介质液面最初能完全包裹鳞片微纳结构，因此鳞片色彩变化过程经历了图 2b→图 2c→图 2d 的亚稳定状态，能在较长时间维持黄绿色。该亚稳定状态的持续时间与乙醇介质的滴加量呈正相关性，滴加量越大，则持续时间越长。随着乙醇介质继续挥发，使得空气重新填充鳞片微纳结构间隙，因此鳞片色彩经历了图 2d→图 2e→图 2f→图 2a 恢复阶段的突变过程，光线波长发生蓝移，颜色由黄绿色转变为蓝绿色，并最后又恢复为最初的靛蓝色。综上所述，随着乙醇介质的浸润与挥发，翅鳞对液体环境变化呈现出可逆的敏感性变色响应特性，该可调结构色为智能变色隐身仿生纳米材料研制提供了启迪。

大蓝闪蝶鳞片色泽对外界光照条件也有敏感响应特性。当光照方向垂直入射翅鳞表面时，蝶翅宏观表面及其放大 350 倍率后鳞片的色彩如图 3 所示。大蓝闪蝶鳞片光泽变得更加鲜亮，颜色也由原来的靛蓝色转变为蔚蓝色。大蓝闪蝶翅膀结构色源于底层鳞片微纳结构对入射光线的干涉、散射、衍射等光学物理作用，因此经鳞片微纳结构作用后的光波波长会随光照入射角的变化而变化，进而导致鳞片结构色的视觉变化，这种现象也被称为虹彩效应。大蓝闪蝶翅鳞微纳结构对光照条件的敏感特性，也为受背景环境刺激响应型的自适应光学隐身仿生材料研制提供了重要的生物模板。

大蓝闪蝶翅鳞复杂精细结构类似一种天然的传感元器件，具有精妙的生物响应性功能，能对周边环境刺激产生独特的光学响应。图 4 为大蓝闪蝶翅膀彩色鳞片区域的可见光-近红外反射光谱特性。当蝶翅处于

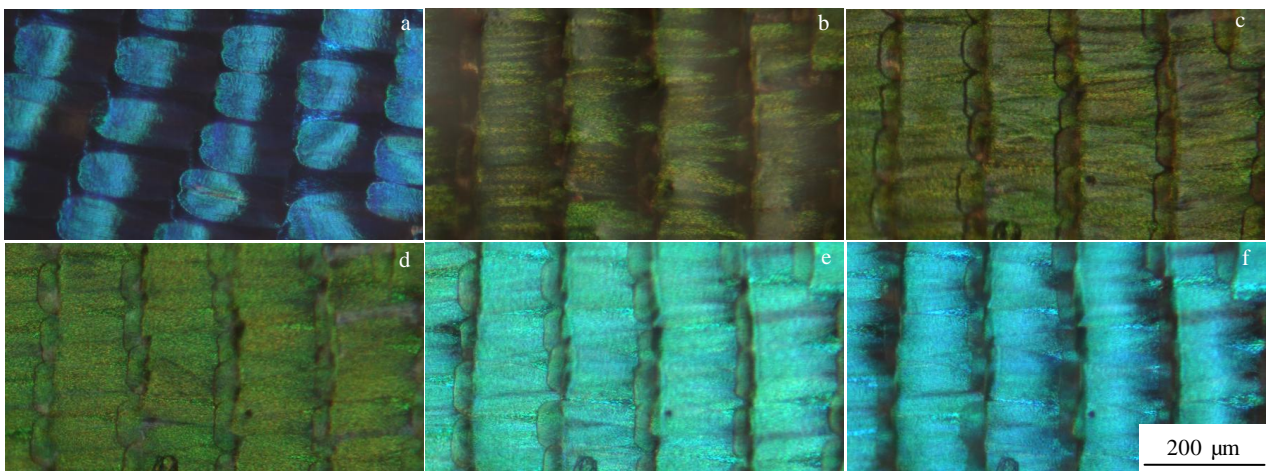


图 2 翅鳞的色彩变化过程

Fig.2 Color change process of wing scales: (a) initial state, (b~d) metastable state, and (e~f) recovery state

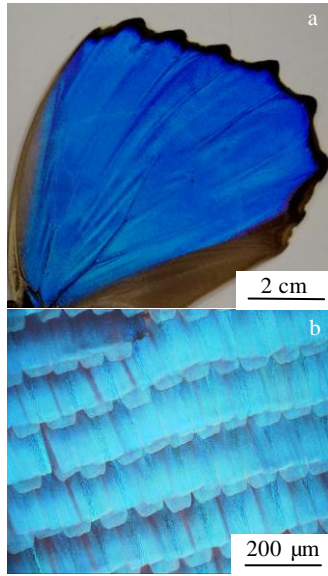


图 3 翅鳞色彩随光照条件变化

Fig.3 Color of wing scales changed with light conditions: (a) macro scale with original scale and (b) micro scale

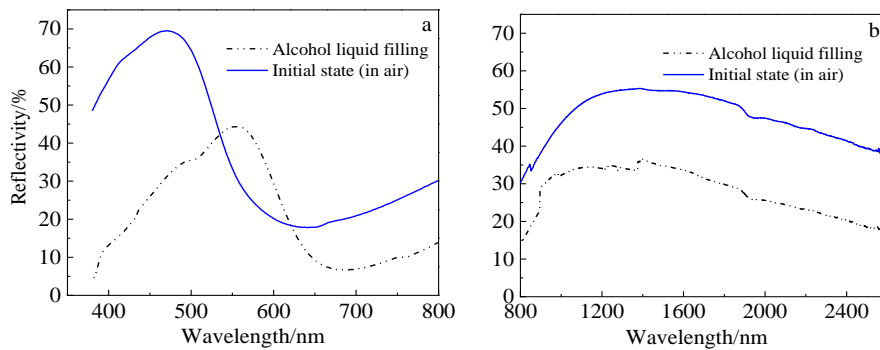


图 4 翅鳞在可见光-近红外波段的反射光谱

Fig.4 Reflectance spectra of wing scales: (a) visible band and (b) near infrared band

3 大蓝闪蝶翅鳞的微纳结构

大蓝闪蝶翅鳞的结构色及其蕴含的优异光学隐身功能特性取决于其精巧的天然微纳结构系统。彩色区域鳞片的分布及表面结构如图 5 所示。如图 5a 所示，两层鳞片形状都近似于长方形，均呈覆瓦状有序交替排列。底层结构色鳞片长度介于 165~190 μm，宽度 80~90 μm；上层透明状鳞片长度介于 185~200 μm，宽度介于 55~70 μm。大蓝闪蝶翅膀鳞片的特殊微结构及其排列方式，使其具有疏水性、自清洁性等独特功能。图 5b 为蝶翅上层的透明鳞片表面局部结构，而 5c 为蝶翅底层的结构色鳞片表面局部结构。两类鳞片表面都纵向分布着近似平行且等间距的脊结构阵列，而上层透明鳞片脊结构之间的间距大

于底层结构色鳞片。脊结构由许多片层紧密倾斜的相互堆叠，形成了褶皱纹理。如图 5b 所示，上层透明鳞片的脊结构宽度约 0.2 mm，脊结构之间的距离约 3 mm。上层透明鳞片脊结构呈梳齿状堆栈结构，其相邻片层由微肋连接成窗口状的网孔结构。由于上层透明鳞片脊结构顶部分布有线性排列的尖端，形成了瑞利散射效应的位点阵列，从而有利于辅助强化底层结构色鳞片的反射光效果。如图 5c 所示，底层结构色鳞片的脊结构宽度约 0.3 mm，脊结构之间的距离约 0.6 mm。底层结构色鳞片表面隆起的周期性脊结构阵列，以及相邻两脊结构之间以极短小肋状结构连接，形成十分精细的天然衍射光栅结构，从而引起光波的相长或相消干涉，进一步增强了特定可见光波段的反射强度。

无乙醇浸润填充的初始状态时，可见光谱的特征反射峰位于 470 nm 波长处，介于 420~470 nm 蓝色可见光与 470~500 nm 青色可见光两区间的交界处，特征峰强度为 69.5%。当蝶翅被乙醇浸润填充时，可见光谱的特征反射峰位于 555 nm 波长处，介于 500~570 nm 绿色可见光区间，特征峰强度为 44.5%。该反射光谱测试结果与大蓝闪蝶翅鳞呈现的色彩变化现象高度吻合。蝶翅结构色就是可见光反射光谱的最高峰值波段，源于鳞片对不同波长光波的差异化反射特性。根据多层膜干涉理论^[22,23]，采用较大折射率的乙醇填充空气间隙会使鳞片微纳结构的等效光学厚度增大，从而导致蝶翅反射光谱峰值发生红移，因此可见光反射光谱峰值由蓝色光波区间移至绿色光波区间。此外，大蓝闪蝶翅膀鳞片在近红外波段也表现出高反射性与可调控性，不仅无乙醇填充的初始状态时位于 1.1~2 μm 区间的红外反射率可高达 50%~55%，而且近红外波段反射率还对环境介质也具有差异化的光学响应，因此该鳞片微纳结构具有优异的近红外隐身性能，适用于研制新型变色变发射率隐身仿生材料。

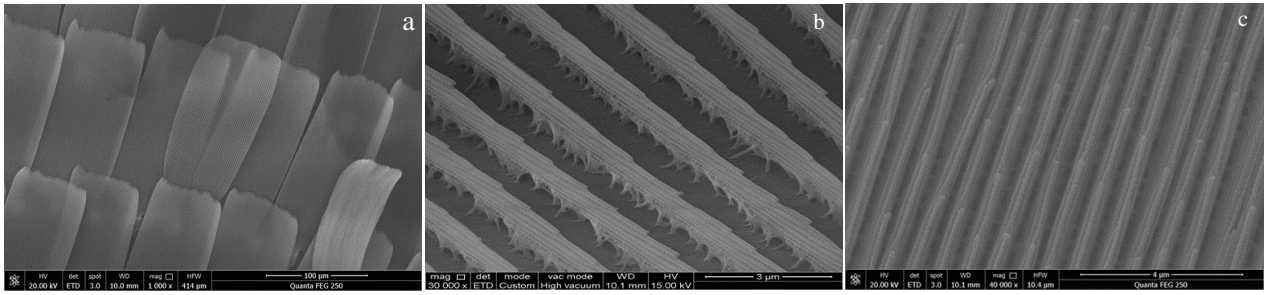


图 5 翅鳞的排列方式与表面结构

Fig.5 Surface structure of wing scales: (a) arrangement of scales, (b) transparent scales, and (c) structural color scales

大蓝闪蝶翅膀底层结构色鳞片的横截面结构如图 6 所示，呈近似等间距独立分布的多尺度分级树枝状结构群，形成了天然衍射光栅结构^[24]。多尺度分级树枝状结构由脊主干与平行的片层分支有序排列组成，且相邻的片层间被空气层隔断，形成了多层膜干涉特性的天然光子晶体结构。树枝状结构的各片层的间距、厚度均近似相等，由上至下将树枝状结构的最外边缘连接，呈现一个上短下长的等腰梯形，因此也可称之为塔形结构。塔形结构的片层数为 5~7 个，片层厚度 60~80 nm，相邻片层的间距 110~140 nm，且脊主干与基底之间的夹角为 75°~90°。蝶翅鳞片材质主要由几丁质组成，其化学分子式为(C₈H₁₃O₅N)_n，也被称为甲壳素或壳聚糖^[25]。该鳞片的塔形多尺度分级精细微纳结构系统是构成大蓝闪蝶翅膀鲜亮色彩的光学物理现象基础。

4 大蓝闪蝶翅鳞的光学隐身机理

大蓝闪蝶翅鳞微纳结构的显微表征能为揭示其光学隐身机理提供可靠的空间分布、特征尺寸等生物结构信息。蝶翅底层结构色鳞片表面的塔形阵列结构如图 7 所示，由几丁质片层与空气层 2 种不同折射率介

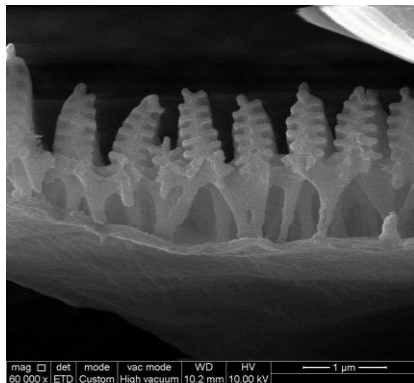


图 6 结构色鳞片的横截面结构

Fig.6 Cross section structure of structural color scales

质周期性交替排列组成的膜系结构，类似于天然的一维光子晶体。图 7a 为十分贴合底层结构色鳞片横截面的实际结构形态，然而为了便于进一步开展大蓝闪蝶结构色鳞片的光学特性模拟仿真分析，可将其简化成图 7b 所示平整型膜系结构的理想仿生模型。塔形结构的主要特征参数包括几丁质片层数目、几丁质片层厚度、片层间距以及脊结构主干与基底的夹角。选取的大蓝闪蝶鳞片仿生结构模型光学模拟仿真条件：几丁质片层数目为 7 层，几丁质片层厚度为 80 nm，片层间距为 110 nm，脊结构主干与基底的夹角为 90°。

大蓝闪蝶鳞片的多层薄膜干涉会导致一部分光波发生相消，另一部分发生相长。其中，经鳞片双介质多层薄膜结构作用增强反射的特定波长可见光必须满足下列表达式^[22,23]，并最终形成结构色。

$$n_1 d_1 \cos \theta_1 + n_2 d_2 \cos \theta_2 = \frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

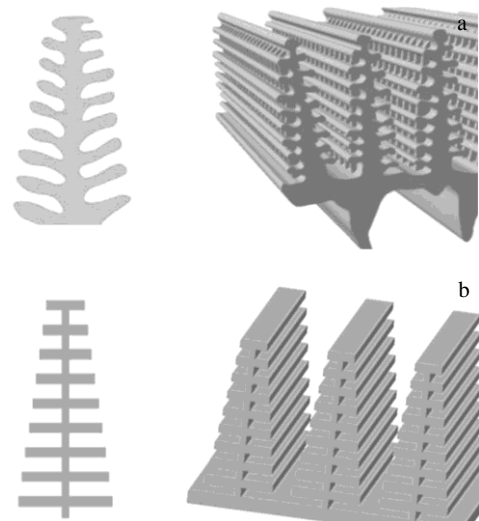


图 7 鳞片横截面的塔形结构与简化模型

Fig.7 Tower structure of scale cross section: (a) actual shape and (b) bionic model

式中, n_1 、 n_2 分别为几丁质片层折射率和环境介质层折射率, d_1 、 d_2 分别为几丁质片层厚度和环境介质层厚度, θ_1 、 θ_2 分别为几丁质层折射角和环境介质层折射角。可见, 经多层薄膜结构作用增强反射的光波取决于几丁质片层厚度、几丁质片层折射率、环境介质厚度、环境介质折射率与光照入射角等因素。一般鳞片几丁质的折射率为 1.55, 空气层介质的折射率为 1, 乙醇介质的折射率为 1.36。经计算, 当光线垂直入射至初始鳞片表面时被增强反射波长为 468 nm 的蓝光, 而经乙醇介质填充鳞片后被增强反射波长为 547.2 nm 的绿色光。因为乙醇介质的折射率大于空气层, 从而使得大蓝闪蝶翅鳞增强反射光的波长变长而发生红移变色现象。然而, 当翅鳞微纳结构内部的乙醇介质逐渐挥发而被空气重新填充, 使得增强反射光的波长变短而产生了蓝移变色现象。此外, 在光线垂直入射时被增强反射光的波长最大, 且随着光照入射角度的增大而变小而产生蓝移变色现象。

光子晶体的光子禁带效应形成高反射理论^[26-30]也适用于分析大蓝闪蝶翅鳞膜系结构的光学特性, 可采用传输矩阵法^[31-33]模拟分析大蓝闪蝶翅鳞微纳结构的反射光谱特性。图 8 为大蓝闪蝶底层结构色鳞片的可见光反射光谱特性, 可较真实反映出大蓝闪蝶鳞片在乙醇介质填充、光照入射角度变化等因素变化对色泽的微妙影响。如图 8a 所示, 光线垂直入射初始鳞片的可见光谱特征反射峰位置介于蓝色、青色可见光区间(450~500 nm); 而被乙醇介质填充空气层间隙时可见光谱特征反射峰位置移动至绿色可见光区间(530~560 nm)。此外, 在乙醇介质填充之后反射光谱的特征峰强度明显减小, 色彩亮度会减弱。如图 8b 所示, 当光线呈 30° 倾斜角度入射至鳞片时的可见光谱特征反射峰位置移至紫色、蓝色可见光区间(410~450 nm)。因为乙醇介质填充鳞片微纳结构或光线入射的倾斜角度减少均会使鳞片塔状膜系结构的等效光学厚度增大, 从而导致光子禁带中心(即特征反射峰)位置的光波波长发生红移。另外, 乙醇介质填充后减小了膜系结构两介质的折射率比值, 从而也弱化了鳞片光子晶体膜系结构的高反射禁带效应(即特征峰强度), 因此形成了视觉上的色彩亮度变暗。综上所述, 底层鳞片微纳结构对填充介质、光照条件等周围环境变化呈现出快速变色响应的敏感性能, 即可应用于智能变色隐身功能, 还能为液体检测敏感元件、光敏元件等仿生传感元件开发提供新的研究原型。

图 9 为大蓝闪蝶翅鳞光子晶体膜系结构的近红外波段反射光谱特性模拟结果。翅鳞在没有被乙醇介质填充的初始状态时在近红外波段有相对较高的反射

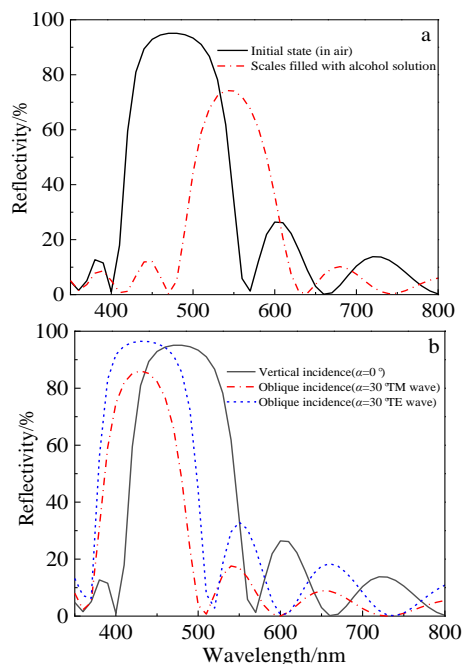


图 8 乙醇填充变色与虹彩效应的可见光反射特性模拟
Fig.8 Simulation of visible light reflection characteristics:
(a) alcohol filling discoloration and (b) iridescent effect

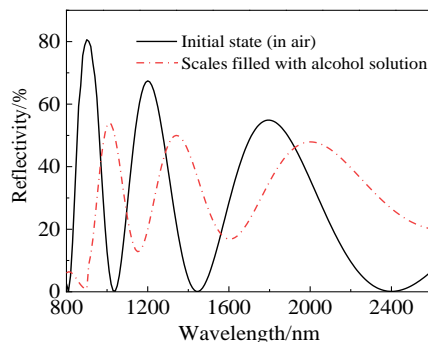


图 9 近红外光反射特性模拟
Fig.9 Simulation of near infrared light reflection characteristics

率, 将有利于减小热量吸收率, 从而降低了红外发射率, 可适用于研制具备近红外隐身的人造微结构, 以实现多组分材料、功能化仿生结构与独特性能完美结合。因为翅鳞微纳结构的等效光学厚度与高反射禁带易受被填充的环境介质折射率的影响, 乙醇介质填充翅鳞使近红外光谱的反射率降低, 并使得高反射峰值波段区间也会被移动调控, 由此可利用大蓝闪蝶翅鳞微纳结构对有机溶液等环境介质的敏感特性来实现新型红外变发射率隐身材料的研制。

5 结 论

1) 基于仿生学角度建立了大蓝闪蝶翅鳞多尺度分级微纳结构与可见光-近红外波段响应功能特性之间的内在联系。

2) 蝶翅底层结构色鳞片表面由脊结构有序组成光栅阵列, 而横截面为几丁质片层/空气层交替排列的塔形膜系结构体系, 类似于一套天然的响应性光子晶体。蝶翅精细结构不仅能通过多膜干涉、光子禁带等光学效应增强可见光-近红外特定波段的高反射特性, 使其呈现结构色与近红外低发射率; 而且因其等效光学厚度可调控能力而成为一种天然的敏感元件, 对外界环境刺激产生奇异性的光学响应。

3) 蝶翅上层透明鳞片的梳齿状堆栈结构, 可利用瑞利散射效应辅助强化底层鳞片的结构色光效。该研究成果为后期进一步利用大蓝闪蝶翅鳞生物模板与响应性材料的复合制备具有仿生结构的特殊响应性光子晶体提供了重要途径, 有望为新型自适应变色变发射率仿生隐身功能材料与元器件的研发提供理论依据和技术支撑。

参考文献 References

- [1] Jiang Lei(江 雷). *Bionic Intelligent Nanomaterials*(仿生智能纳米材料)[M]. Beijing: Science Press, 2015: 120
- [2] Zheng Yongmei, Bai Hao, Huang Zhongbing *et al.* *Nature*[J], 2010, 463: 640
- [3] Peisker Henrik, Michels Jan, Gorb Stanislav N. *Nature Communications*[J], 2013, 4: 1661
- [4] Xu Hongbo, Lu Nan, Shi Gang *et al.* *Langmuir*[J], 2011, 27(8): 4963
- [5] Lorenzo Cortese, Lorenzo Pattelli, Francesco Utel *et al.* *Advanced Optical Materials*[J], 2015, 3(10): 1336
- [6] Wang Kejun(王可军). *Mechanism and Bionics Research of Ultrasensitive Micro-vibrational Sensilla of Scorpion*(蝎子体表超敏微振动感受器感知机理与仿生研究)[D]. Changchun: Jilin University, 2019
- [7] Tan Yongwen, Gu Jiajun, Zang Xining *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*[J], 2011, 50(36): 8307
- [8] Tamar Saison, Christophe Peroz, Vanessa Chauveau *et al.* *Bioinspiration & Biomimetics*[J], 2008, 3(4): 046 004
- [9] Tian Junlong, Zhang Wang, Gu Jiajun *et al.* *Nano Energy*[J], 2015, 17: 52
- [10] Zhang Wang, Zhang Di, Fan Tongxiang *et al.* *Chemistry of Materials*[J], 2008, 21(1): 33
- [11] Tanu Suryadi Kustandi, Hong Yee Low, Jing Hua Teng *et al.* *Small*[J], 2009, 5(5): 574
- [12] Gu Jiajun, Zhang Wang, Su Huilan *et al.* *Advanced Materials* [J], 2015, 27(3): 464
- [13] Yang Chengzhi(杨诚智), Guan Yu(关 玉), Chen Shikun(陈世坤) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(1): 105
- [14] Guan Yu(关 玉), Yang Chengzhi(杨诚智), Su Huilan(苏慧兰) *et al.* *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2018, 35(11): 3146
- [15] Han Jie, Su Huilan, Zhang Di *et al.* *Journal of Materials Chemistry*[J], 2009, 19(46): 8741
- [16] Mille Christian, Tyrode Eric, Corkery Robert W *et al.* *Chemical Communications*[J], 2011, 47(35): 9873
- [17] Han Zhiwu, Mu Zhengzhi, Li Bo *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2017, 9(34): 29 285
- [18] Sun Cheng(孙 诚), Gu Jiajun(顾佳俊), Zhang Xiaohui(章潇慧) *et al.* *Materials Review*(材料导报)[J], 2019, 33(21): 3662
- [19] Han Zhiwu, Li Bo, Mu Zhengzhi *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2015, 355: 290
- [20] Han Zhiwu, Li Bo, Mu Zhengzhi *et al.* *Small*[J], 2017, 13(34): 1 701 121
- [21] Lu Tao, Zhu Shemin, Chen Zhixin *et al.* *Nanoscale*[J], 2016, 8 (19): 10 316
- [22] Ding Yong, Xu Sheng, Wang Zhonglin. *Journal of Applied Physics*[J], 2009, 106(7): 074 702
- [23] Serge Berthier, Eric Charron, Anabela Da Silva. *Optics Communications*[J], 2003, 228(4-6): 349
- [24] Boris Gralak, Gérard Tayeb, Stefan Enoch. *Optics Express*[J], 2001, 9(11): 567
- [25] Mu Zhengzhi(穆正知). *Design, Fabrication and Properties of Biomimetic Functional Surfaces Based on Typical Butterfly Wings*(基于典型蝶翅的仿生功能表面设计制造及性能研究)[D]. Changchun: Jilin University, 2019
- [26] Liu Ruihuang(刘瑞煌), Shi Jiaming(时家明), Zhao Dapeng(赵大鹏) *et al.* *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2019, 56(3): 31 601
- [27] Zhao Li(赵 丽), Yu Jiaguo(余家国), Cheng Bei(程 蓓) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(4): 354
- [28] Galusha Jeremy W, Jorgensen Matthew R, Bartl Michael H. *Advanced Materials*[J], 2010, 22 (1): 107
- [29] Lu Tao, Peng Wenhong, Zhu Shenmin *et al.* *Nanotechnology*[J], 2016, 27(12): 122 001
- [30] Mu Yunyun(穆云云), Liu Hongmei(刘红梅), Li Hang(李 行) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料

- 与工程)[J], 2019, 48(9): 2879
- [31] Liu Ruihuang(刘瑞煌), Zhao Dapeng(赵大鹏), Zhang Jikui(张继魁) *et al. Acta Optica Sinica(光学学报)*[J], 2018, 38(8): 0 816 001
- [32] Yi Yi, Deng Lianwen, Luo Heng *et al. Journal of Central South University*[J], 2017, 11: 2967
- [33] Wang Hang(王 航), Zhao Dapeng(赵大鹏), Liu Ruihuang(刘瑞煌) *et al. Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展)*[J], 2019, 56(18): 181 602

Study on the Optical Stealth Characteristics of Micro/Nano Structure of Morpho Menelaus Wing Scales

Wang Long, Wang Liuying, Liu Gu, Yang Nengjun, Ge Chaoqun, Xu Kejun, Wang Weichao
(Combat Support Academy, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: To explore the optical functional characteristics and bionic application potential of morpho menelaus wing scale, the responsive optical performance test and microstructure characterization were carried out, and the visual bionic model of wing scale was constructed. Furthermore, the mapping relationship between the multi-scale hierarchical micro/nano structure and the response functional characteristics in the visible and near infrared bands was revealed. The results show that the upper and lower scales of the wing have periodic fine structures, and the ridge structures are stacked into comb-like stack structure and tower-like grating structure by chitin lamellae, respectively. Rayleigh scattering, multilayer interference, photonic band gap and other optical effects make it with sensitive color changing response characteristics to the changes of external media filling and light incidence angle. Moreover, the reflectivity of near infrared band is adjustable. The unique optical properties of morpho menelaus wing scale can provide a new idea for the development of bionic stealth functional materials and components with adaptive color change and variable emissivity.

Key words: bionic material; morpho menelaus; wing scale; micro/nano structure; optical stealth

Corresponding author: Wang Long, Ph. D., Combat Support Academy, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, P. R. China,
E-mail: waloxs@163.com