



绿带翠凤蝶翅面结构光变色机理的 试验研究

任露泉* 邱兆美 韩志武 关会英 邬立岩

(吉林大学生物与农业工程学院地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要 动物体表彩色是在长期生物进化过程中为了逃避天敌、捕捉猎物或展示自身艳丽而自然形成的, 研究其结构光机理是仿生学的一个重要方面. 根据用酒精溶液填充到绿带翠凤蝶翅面蓝色鳞片区域的瞬时改变颜色成绿色, 最后又还原成蓝色这一现象, 应用体视显微镜、扫描电镜、透射电镜和紫外可见分光光度计, 通过分析翅面鳞片的微观结构和光学特性与变色效应关系, 发现中国东北地区的绿带翠凤蝶蓝色鳞片可以变色, 其原因在于可见光经过鳞片的凹坑状多层薄膜反射结构与填充介质时, 由于介质的折射率不同, 引起了一定波长的光波发生干涉, 形成相应波长的颜色, 这对于视频隐身材料的仿生设计具有重要的学术参考价值.

关键词 视频隐身 绿带翠凤蝶 结构光变色

动物为了适应恶劣的环境, 维持生命和物种的延续, 经过亿万年的生物进化, 各种各样的动物自身具有了不同的特殊功能. 几乎每一种生物都有自身独特的色彩, 尤以蝴蝶翅膀拥有的色彩和图案最为绚丽且神秘. 某些蝴蝶翅面的颜色来自于翅面鳞片的结构色, 且产生这些明亮颜色的结构很复杂, 在光线照射下可以折射出斑斓的色彩. 蝴蝶生存环境的不同, 在长期自然选择进化下造就了翅面颜色的多样性, 有的形成眼花缭乱的花纹图案, 有的形成闪亮的颜色, 使它们在花草丛中时隐时现, 似真似幻, 起到保护和隐蔽自身的作用.

许许多多动物体表变幻莫测的颜色, 有些是为了逃避天敌或捕捉猎物, 有些是为了展示自身的艳丽, 研究和揭示其奥秘对开发动物体表色彩模拟设计有重要意义. 本文以试验分析绿带翠凤蝶翅面变色现象与鳞片微观结构间的关系, 所得的结果对视频隐身仿生设计有所启示, 并在国防领域有深远的战略意义.

收稿日期: 2007-04-25; 接受日期: 2007-05-20

国家自然科学基金(批准号: 50635030, 30570235)、教育部科学技术研究重点项目(批准号: 105059)和霍英东青年教师基金(批准号: 101020)资助项目

* E-mail: lqren@jlu.edu.cn

1 色彩的本质

物体的颜色是物体对可见光的反映, 这种反映取决于构成物体原子的能级结构. 如果组成可见光的 7 种单色光谱完全被物体反射, 则物体为白色; 如果完全被物体吸收, 则为黑色; 如果完全透过物体, 物体便是透明的; 如果某种或某几种单色光谱被反射, 其余的被吸收, 所看到的便是某种单一颜色或某几种颜色汇集成的彩色, 这就是颜色的物理本质.

光线射在物体上被反射到同一点或线, 如果其光程差为光线波长的整数倍, 便为亮色; 其光程差为半波长或半波长的奇数倍, 便为暗色. 这就是结构光的本质. 英国的物理学家 Thomas Young 对结构光的干涉做了详细解释^[1]: 光线射至薄膜表面, 一部分被反射, 其余部分直射到下表面, 又在下表面有一部分被反射. 这些由上、下表面反射的光具有相同的方向, 最终汇集到一起. 然而, 由于它们在上表面和下表面的光程不同, 于是由上、下表面反射的光线不再协调. 这种不相协调的程度受油膜的厚度、油膜的折射系数、入射光的波长和入射角度的影响. 如果两条反射光线的光程差正好成光波波长的整数倍时, 两者相干涉, 得到的反射光就很强; 如果两者的光程差为反射光的半波长, 或者是半波长的奇数倍时, 那么反射光就会完全不相协调, 即相消干涉, 便使反射光减弱, 甚至消失. 反射光线的具体情形取决于光线波长的大小、薄膜的厚度以及薄膜的折射率. 英国物理学家 Vukusic 教授按照产生结构色的结构不同将其分为 3 类^[2]: 第 1 类, 多层等厚的薄片层结构构成脊脉产生的结构色; 第 2 类, 由多层薄片层结构构成鳞片体本身产生的结构色; 第 3 类, 没有多层的薄片层结构, 而是由其他的衍射和散射系统产生的结构色.

2 试验

2.1 试验材料

由 Vukusic 等^[2~5]和 Parker 等学者^[6~13]的一系列研究结果得知, 鳞片颜色主要来源于结构色, 且产生这些明亮颜色的结构很复杂. 结构色有别于化学色, 是不含任何色素因素在内的纯物理结构产生的颜色^[8]. 绿带翠凤蝶属于凤蝶科翠凤蝶亚属蝴蝶. 翠凤蝶亚属全世界已记载 41 种, 中国已知 10 种^[14]. 其翅的底色多为黑色, 散布有金绿色或金蓝色鳞. 本文在中国北方吉林省山区采集绿带翠凤蝶, 如图 1 所示, 并将采集回来的蝴蝶活体采用人工辅助展翅、固定和自然风干等措施制成蝴蝶标本. 进行试验时, 先将蝴蝶标本回软, 然后摘下蝴蝶后翅, 选取翅面的纯蓝色区域剪下约 18 mm×18 mm 小块粘在盖玻片上, 制成试样.

2.2 试验观察

2.2.1 变色现象

将试样放在 OLYMPUS 体视显微镜的载物台上, 用胶头滴管在样品表面滴 1~2 滴 75% 的酒精溶液, 观察试样与酒精溶液接触后色彩的实时变化情况, 如图 2 所示. 基鳞为黑色, 单个鳞片的端部有 2~3 个齿裂; 蓝色鳞片呈扁平近长方形, 外端缘比较圆滑无齿裂, 基部(鳞片与翅膀结合端)收敛于小柄; 各排鳞片之间有重叠, 整体呈覆瓦状规律分布; 单鳞尺寸 139~143 μm , 宽 53~77 μm (详见图 1 所示). 当酒精溶液滴到蝴蝶翅面的瞬间, 鳞片的颜色就发生了变化, 由原来的亮蓝色(图 2(a))瞬时变成黄绿色(图 2(b)), 随着时间的推移, 滴在翅面的酒精溶液自然挥发, 翅面颜色保持黄绿色, 当酒精溶液挥发殆尽, 鳞片又重新暴露在空气中, 颜色又快速还原为原来的亮蓝色(如图 2(c)~(f)所示), 整个变色过程完成.

2.2.2 微观结构

将蝴蝶标本回软后,选取后翅的纯蓝色区域剪下一小块,粘在铜柱端面上,经离子溅射镀膜,在 JXA-840 型扫描电镜下观察鳞片表面微观结构;再剪一块,应用 LKB- 型超薄切片机和 JEM-12000EX 透射电子显微镜,经固定、包埋、切片和上镜,观察鳞片的横截面结构.扫描电镜观察绿带翠凤蝶后翅的蓝色鳞片表面的微观结构,如图 3 所示.放大 500 倍,发现单个鳞片表面规律分布由凹坑形非光滑单元体组成的栅格结构,且表面纵向有 11~16 条平行脊脉和许多平行横肋(见图 3(a)).进一步放大至 1000 倍(见图 3(b))和 5000 倍(见图 3(c)),可见整个鳞

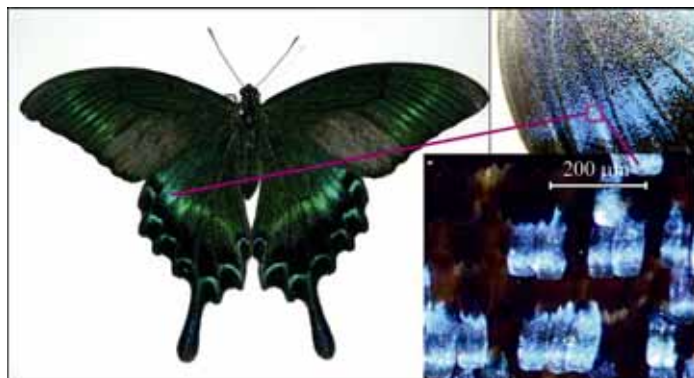


图 1 绿带翠凤蝶后翅蓝色鳞片示意图

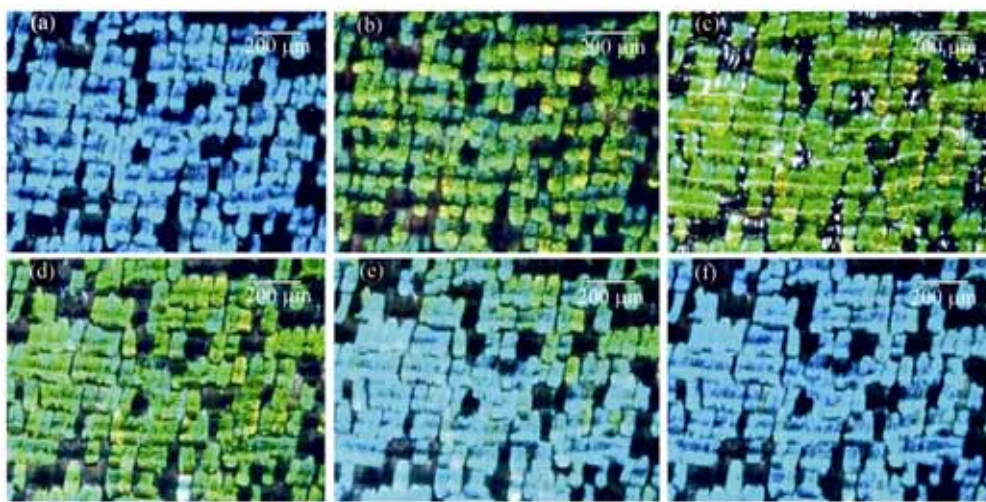


图 2 酒精溶液作用下绿带翠凤蝶蓝色鳞片变色现象瞬时图



图 3 绿带翠凤蝶后翅蓝色鳞片扫描电镜图

片表面的纵向脊脉都等间距平行分布, 每条脊脉厚约 $1\ \mu\text{m}$, 间距约 $5\ \mu\text{m}$; 而在相邻平行脊脉间的横向短肋厚约 $1.5\ \mu\text{m}$, 且不同脊脉间的短肋平行交错分布, 以相邻脊脉和短肋为侧壁在鳞片表面形成一个凹面体. 图 4 给出由透射电镜拍摄的鳞片横截面图, 其中图 4(a)给出了一个近乎完整的凹坑形非光滑单元体的横截面, 可以看出绿带翠凤蝶后翅的蓝色鳞片具有两类多层薄膜结构. 第 1 类是指由多层薄片结构构成的塔状脊脉, 即非光滑单元体的坑壁(见图 4(b)-). 大约有 10~12 层薄片, 每层厚约 $30\ \text{nm}$, 间距约 $50\ \text{nm}$. 与 *Morpho rhetenor*^[2,4,12,13] 蝴蝶鳞片的的多层薄片结构类似, 脊脉两侧伸出的薄片层都是等间距、左右交错分布; 第 2 类是指非光滑单元体的凹坑底部(见图 4(b)-), 是与 *Urania leilus* 蛾和 *Papilio palinurus* 蝴蝶鳞片结构^[2]相似的多层薄片结构. 两者的薄片层都是等间距平行排布的, 近乎水平连续. 大约有 8 层薄膜, 每层厚约 $80\ \text{nm}$, 间距约 $60\ \text{nm}$. 因此, 由图示横截面结构还可以得出, 绿带翠凤蝶后翅蓝色鳞片的一个非光滑单元体的结构是由现在已经研究出来的两大多层结构类型完美的结合在一起形成的凹面体.

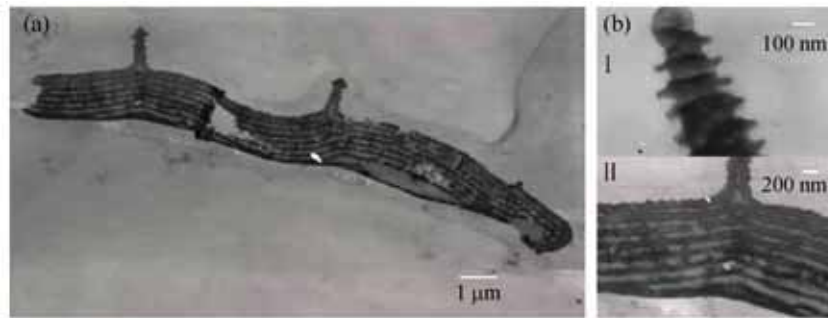


图 4 绿带翠凤蝶翅面鳞片横截面透射电镜图

2.3 可见光反射率

将试样粘在 TU1901 型紫外可见分光光度计的样本架上, 放入积分球的待测样本侧固定, 在可见光范围内, 测量蝴蝶鳞片对 8° 入射光线的反射率 $R(\%)$. 图 5 给出的是应用紫外可见分光光度计, 在 $800\sim350\ \text{nm}$ 的波长范围内, 光谱扫描实时绘出的绿带翠凤蝶蓝色鳞片对可见光

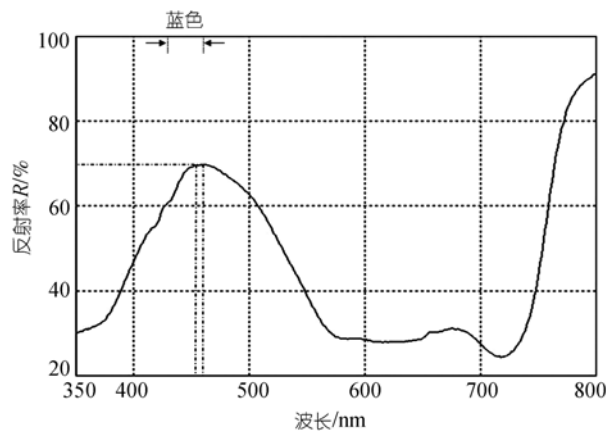


图 5 绿带翠凤蝶翅面蓝色鳞片可见光反射率曲线图

的反射率曲线. 由图中曲线可知, 光的反射率 $R(\%)$ 在 580 nm 处开始上升, 在 460~454 nm 处达到峰值约为 70%, 然后下降. 对应可见光光谱查询, 得知达到波峰的波长范围对应的颜色为蓝色(波长范围 460~430 nm), 正是翅面在体视显微镜下看到的颜色.

3 结果与讨论

由上述一系列的试验结果可得两个着色机理, 一是翅面鳞片蓝色的着色机理, 绿带翠凤蝶的翅面颜色是由于覆盖在表面的复杂结构鳞片所产生光的多层膜干涉所致. 蝴蝶翅上鳞片有许多薄层结构, 每片薄层之间由介质层隔开, 每层膜都反射光线, 被反射的光线出现光的干涉, 呈现出一定的表面颜色. 另一个是绿带翠凤蝶翅面鳞片的颜色在滴酒精溶液前后发生明显改变的机理, 具有不同折射率的介质——酒精溶液和空气被填充到了鳞片的薄层结构的缝隙中. 当光线入射到鳞片上时, 就会受到空气或酒精溶液与薄片层的交界面的改变, 引起一定波长的光波发生干涉变色, 又由于酒精和水的混和溶液的折射率高于空气的折射率, 当鳞片的非光滑结构内的填充介质为酒精溶液时, 其反射波长要比填充介质是空气时反射波长长, 因而, 发生了变色现象, 如图 6 所示^[4], 使鳞片表面的颜色由亮蓝色变成黄绿色, 最后又恢复成亮蓝色.

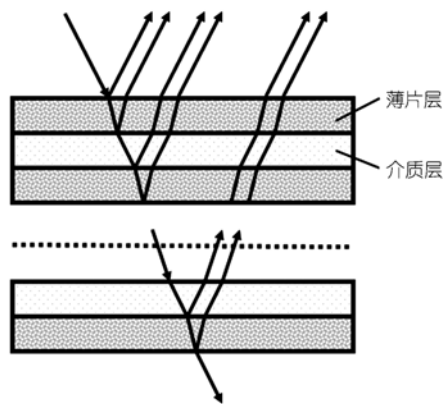


图 6 多层薄膜结构反射光线导致干涉的示意图

4 结论

通过基于 75%酒精溶液作为介质的绿带翠凤蝶后翅蓝色鳞片变色实验, 研究了结构色的变色现象与鳞片的微观结构间的内在关系.

() 绿带翠凤蝶的蓝色鳞片表面规律分布有凹坑状四面体型非光滑单元体, 且非光滑单元体由两类多层薄片结构组成, 一类是由 10~12 层等厚等间距左右交错分布的塔状平行薄片层组成的多层结构; 另一类是由 8 层等厚等间距连续的近乎水平平行薄片层组成的多层结构.

() 鳞片变色原理: 鳞片具有凹坑状多层薄膜反射结构, 使反射光发生多层干涉, 产生颜色; 不同折射率的介质被填充到多层反射结构的介质层中, 改变了干涉条件, 从而引起了变色现象.

参 考 文 献

- 1 Vukusic P. Bright butterflies. *Phys Rev* (Philip Allan Publishers), 1998, 8(1): 2—7
- 2 Vukusic P, Sambles J R, Ghiradella H. Optical classification of microstructure in butterfly wing-scales. *Photonics Sci News*, 2000, 6: 61—66
- 3 Vukusic P, Sambles J R, Lawrence C R. Colour mixing in wing scales of a butterfly. *Nature*, 2000, 404: 457
- 4 Vukusic P, Sambles J R. Color effects in bright butterflies. *JSDC*, 2000, 116: 376—380
- 5 Vukusic P, Sambles J R, Lawrence C R, et al. Structural colour: Now you see it-Now you don't. *Nature*, 2001, 410: 36
- 6 Parker A R, Martin N. Structural colour in animals—simple to complex optics. *Opt Laser Technol*, 2006, 38(4—6[special issue]): 1—8
- 7 Parker A R. 515 million years of structural colour. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2000, 2: 15—28
- 8 Parker A R, McKenzie D R, Large M C J. Multilayer reflectors in animals using green and gold beetles as contrasting exam-

- ples. J Exp Biol, 1998, 201: 1307—1313
- 9 Nijhout H F, Maini P K, Madzvamuse A, et al. Pigmentation pattern formation in butterflies: experiments and models. C R Biologies, 2003, 326: 717—727
 - 10 Berthier S, Charron E, Silva A D. Determination of the cuticle index of the scales of the iridescent butterfly *Morpho Menelaus*. Opt Commun, 2003, 228: 349—356
 - 11 Tada H, Mann S E, Miaoulis I N, et al. Effects of a butterfly scale microstructure on the iridescent color observed at different angles. Opt Expr, 1999, 5: 87—92
 - 12 Plattner L. Optical properties of the scales of *Morpho rhetenor* butterflies: theoretical and experimental investigation of the back-scattering of light in the visible spectrum. J R Soc Interface, 2004, 1: 49—59
 - 13 Tayeb G, Gralak B, Enoch S. Structural colors in nature and butterfly-wing modeling. Opt Photonics News, 2003, 2: 38—43, 49
 - 14 周尧. 中国蝴蝶分类与鉴定. 郑州: 河南科学技术出版社, 1998. 9—10