

小灰蝶鳞片微结构及其吸光机理研究

邬立岩, 宋玉秋

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

5 **摘要:** 小灰蝶 (*Heliophorus ila* Lycaenidae) 翅面鳞片对太阳光具有很高的吸收率, 将太阳能转换成维持机体的热能, 前期分光计试验显示: 小灰蝶的吸光率可达到 85%, 鳞片内部结构及其吸光机理分析对太阳能热利用研究具有重要意义。本文通过扫描电镜 (SEM) 和透射电镜 (TEM) 分析鳞片微结构特征, 建立简化模型, 并利用多重反射陷光结构、光学谐振腔理论揭示了吸光机理。结果表明: 小灰蝶吸光鳞片具有两种不同的吸光机制, 顶层斜面与中空结构对入射光发生多重反射与折射作用, 增加光程; 底层的中空结构形成了矩形谐振腔的储能结构, 通过这两种结构共同作用, 实现对太阳光高效吸收。该成果对后续太阳能热利用结构型材料仿生设计奠定了理论基础。

10 **关键词:** 仿生学; 太阳能热利用; 蝴蝶鳞片; 微结构; 谐振腔

15 **中图分类号:** Q 6 3

Study on microstructure and optical mechanism of butterfly *Heliophorus ila* Lycaenidae scales

WU Liyan, SONG Yuqiu

20 (Agricultural Engineering School, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: Wing scales of butterfly *Heliophorus ila* Lycaenidae had very high sunlight absorptivity that could convert the solar energy to heat to maintain the body warmness. Early spectrometer experiment results showed that the absorptivity could reach 85%. Therefore, analyzing about the scale inner microstructure and its optical mechanism had great significance for solar heat utilization research. In this article, through scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM), microstructure characteristics and simplified models were described. Then, by using multiple reflection and optical resonator theories, the mechanism of light absorption was analyzed. Results showed that the *Heliophorus ila* Lycaenidae scale had two kinds of optical microstructures, the top slope and hollow structure had multiple reflection and refraction effect which could prolong the travelling length. The bottom hollow structure formed a rectangular resonant cavity mode which could save energy, through the combination of these two kinds of structure, the sunlight could be absorbed efficiently. This study provided a theoretical basis for subsequent bionic designning of structural materials for solar heat utilization.

30 **Key words:** Bionic, solar energy heat utilization, butterfly scale, microstructure, resonant cavity

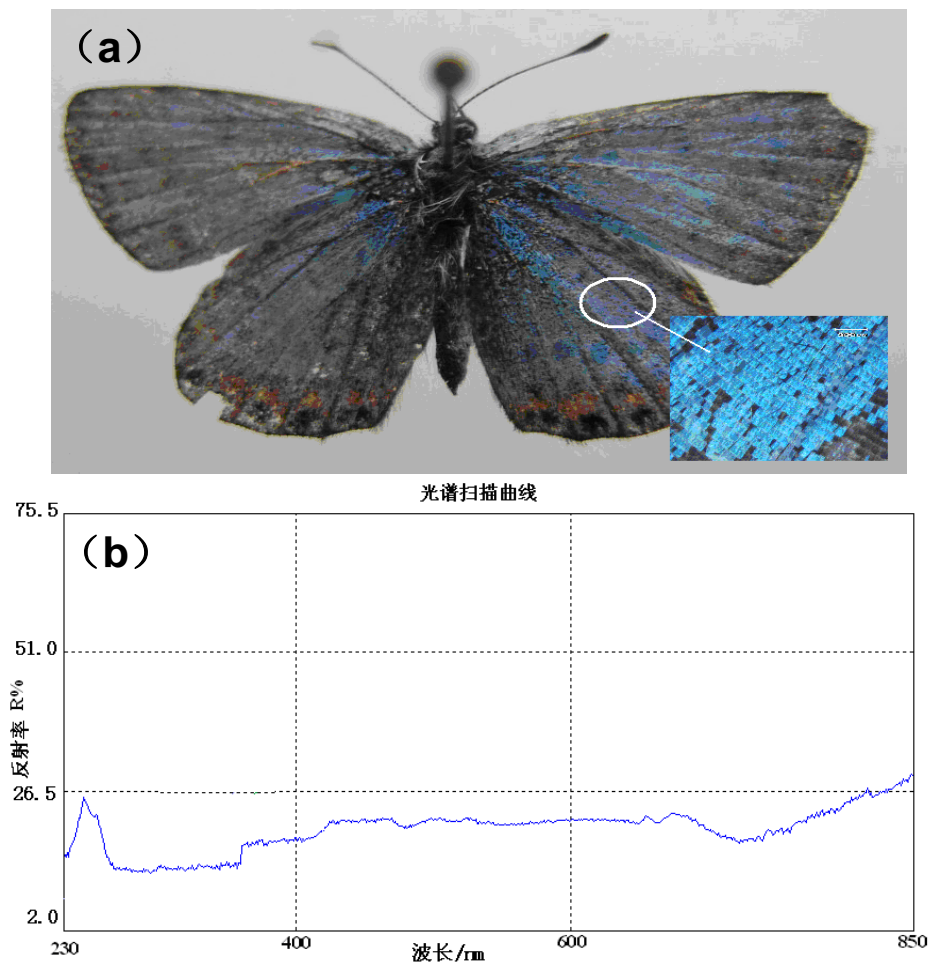
35

0 引言

小灰蝶 (*Heliophorus ila* Lycaenidae) 蝴蝶隶属于鳞翅目灰蝶科, 体型较小, 在我国许多省份均有分布, 在中高海拔山区, 早春季节就会有小灰蝶出现, 它们所需要的热能来源于对太阳光的吸收, 其翅面鳞片具有高效的吸光能力 (图 1a)。前期研究对金凤蝶、白绢蝶、绿带翠凤蝶、小豹蛱蝶、柳紫闪蛱蝶、小灰蝶、翠叶凤蝶进行了分光计试验测量, 对比结果发现: 小灰蝶翅面鳞片具有高吸收的特点, 吸收率可达 85%, 如图 1b。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (20102103120012)

作者简介: 邬立岩 (1978-), 男, 讲师, 农业机械仿生技术. E-mail: wly78528@163.com



45 图 1 H. ilycaenidae 蝶翅面光学特性 (a) H. ilycaenidae 蝶 (b) 翅面反射光谱曲线

Fig. 1 Optical effect of H. ilycaenidae (a) Butterfly H. ilycaenidae (b) Reflectance spectrum

近年来, 学者们对蝴蝶鳞片及其微结构方面进行了大量研究^[1-3]。根据蝴蝶鳞片的不同光学特性, 探索可见光隐身和红外隐身研究^[4,5], 仿鳞片微纳结构探索碳薄膜超黑材料的制备研究^[6], 以及对鳞片内的光子晶体结构进行了理论分析^[7-9]。吉林大学韩志武教授等对蝶类鳞片的陷光作用及样品制备方面做了大量研究^[10-12]。本研究针对具有高吸光率的 Heliophorus ilycaenidae 蝶, 利用扫描电镜对鳞片表面脊脉结构进行了观察, 采用透射电镜分析鳞片内部中空结构, 建立 3 维简化模型, 利用多重反射与折射理论、光学矩形腔理论分析鳞片的吸光机理, 为结构型太阳能材料设计提供仿生学借鉴。

1 试验方法

55 1.1 SEM 试验

扫描电镜采用: Hitachi-450 型扫描电子显微镜。

试验用样品: 小灰蝶腹翅, 鳞片取自如图 1a 所示位置。首先将样本用 0.65% 的 NaCl 溶液进行脱脂冲洗, 对于表面的黏液、脂肪和蛋白质类物质可用乙醚进行脱脂, 将样本放在器皿中用乙醚浸泡 10 分钟。脱脂后的样本再进行乙醇系列脱水, 乙醇浓度分别为 40%、50%、60 70%、纯乙醇。每个阶段各浸泡 10 分钟, 样品采用自然干燥法。

将干燥好的样本采用双面胶粘在金属台上, 采用在 1×10^{-5} MPa 左右的真空中 40° 旋转喷镀或用离子溅射仪溅射, 样品镀金厚度在 15~20nm 之间。

1.2 TEM 试验

试验用透射电镜为 JEOL-100 透射电子显微镜。

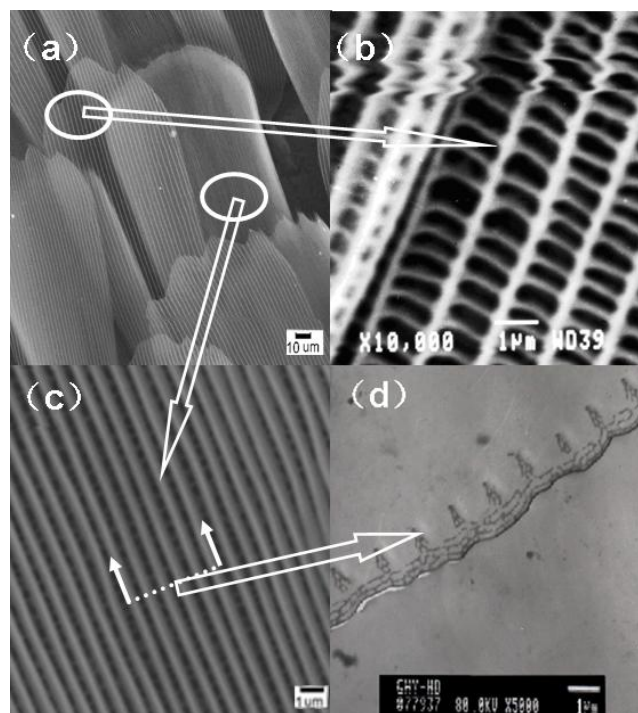
65 将蝴蝶样本首先进行 4% 的戊二醛溶液活体前固定，避免鳞片的结构由于细胞的死亡或者水分的蒸发而发生变化，然后进行磷酸缓冲液冲洗。接下来采用 1% 的锇酸后固定，将样本染色；后固定结束后用乙醇梯度脱水，将脱水后的样本放入氧化丙烯中置换 20 分钟。

70 接下来进行样品包埋，采用环氧丙烷与包埋剂 1: 1 比例将氧化丙烯置换出来，最终使得包埋剂完全浸透到样本内。将样本放入包埋剂中浸透 4 小时后，放入恒温箱分别以 35℃、45℃、55℃ 各保持 12 小时，即可凝固成块，为制作切片做好准备。制作切片时，首先在 LKB-III 型超薄切片机上采用手动做定位切片，切片的厚度大约为 3-4 微米。在光学显微镜下观察结构，确定所要的鳞片位置，然后做超薄切片，厚度为 100nm，用滤网收集后上镜观察，获得鳞片横截面上各方向结构特征和尺寸。

2 结果与分析

2.1 SEM 与 TEM 结果分析

在低倍 SEM 试验结果中，可以观察到小灰蝶的鳞片整体排布情况，鳞片呈覆瓦状排列，鳞片间彼此间有重叠，且存在两类形态迥异的鳞片，如图 2 (a)，透过顶层鳞片可以清晰的看到底层的鳞片轮廓。分别针对两种鳞片，提高放大倍数后发现：顶层鳞片上存在类似窗格的结构，光线可以直接通过这些通孔 (图 2b)，因此，当光线入射到蝶翅表面时，大部分光线通过顶层鳞片的通孔结构后直接入射到底层鳞片上，小灰蝶的高效吸光特性更主要取决于其底层鳞片。底层鳞片具有特殊的纵向脊脉结构，且密集分布 (图 2c)，针对这类鳞片，按照图 2 (c) 标注位置进行横截面微结构的 TEM 观察，结果如图 2 (d)。



85 图 2 SEM 与 TEM 试验结果 (a)、两种鳞片的分布 (b)、顶层鳞片的孔状结构 (c)、底层鳞片表面形态 (d)、底层鳞片的横断面结构

Fig. 2 Results of SEM and TEM. (a)、Distribution of two kinds of scales (b)、Holes on the top scales surface (c) Morphology of bottom scales (d)、Cross section shape of bottom scale

2.2 鳞片的3维结构简化及吸光机理

小灰蝶的鳞片结构由于其脊脉和底层具有不同的微观结构特征,本研究将其分解成为上下两部分进行分析。上部分,即脊脉结构,可以简化成塔状空腔结构,如图3所示。

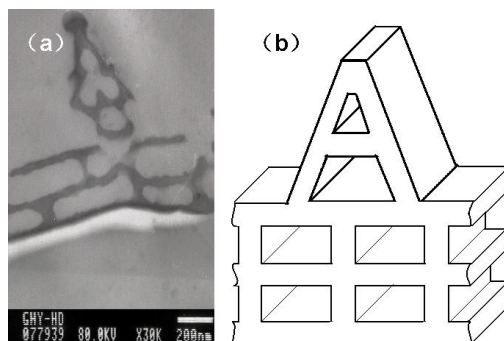


图3 吸光鳞片微结构及其示意图. (a) 鳞片微结构的TEM图片 (b) 3D简化模型

Fig. 3 Microstructure model of scale with absorption function. (a) TEM picture of scale microstructure (b) 3D simplified model

95

2.2.1 塔状多重反射结构的陷光作用

当光线由空气中(折射率 $n_1=1$)射入鳞片几丁质(折射率 $n_2=1.5$)中时,部分光发生反射,另一部分发生折射,根据几何光学的折射定律可知,(1)折射光线位于入射光线和界面法线所决定的平面内;(2)折射线和入射线分别在法线的两侧;(3)入射角 i 的正弦和折射角 i' 的正弦的比值,由于 $n_2 > n_1$,故折射角小于入射角。折射后的光线在几丁质中走过一段距离后,进入到空腔内,发生第二次折射,而反射部分又可能射入到相邻脊脉上,重复反射与折射,如图4所示。经过多重反射与折射后,光在几丁质中走过的距离大大增加,能量逐渐被脊脉材料吸收。能量降低后的光线,只有少部分反射到空气中去。

100

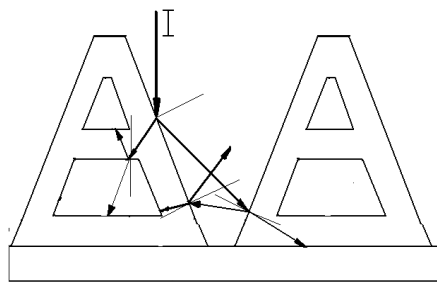


图4 吸光鳞片顶层的多重反射、折射结构

Fig. 4 Multiple reflection and refraction structure of top part of absorption scale

105

2.2.2 光学谐振腔结构的储能作用

谐振腔是由两块轴线垂直的平面或凹球面反射镜构成,光波可以在其中来回反射从而得到储存能量的空腔。在理想的无耗谐振腔内,任何电磁扰动一旦发生就永不停歇。腔内的电磁场可根据谐振腔的边界条件求解麦克斯韦方程组而得出,它是一组具有一定正交性的电磁场模式的叠加。腔内的电磁场也可认为是波在腔壁上来回反射而形成的驻波场。

110

在保留支承立柱情况下,小灰蝶的鳞片底层结构可以视为光学矩形腔,如图5所示。光学矩形腔有六个平面围成,它们内表面的坐标为

$$\begin{cases} x = 0 \\ x = L_1 \end{cases} \begin{cases} y = 0 \\ y = L_2 \end{cases} \begin{cases} z = 0 \\ z = L_3 \end{cases} \quad (1)$$

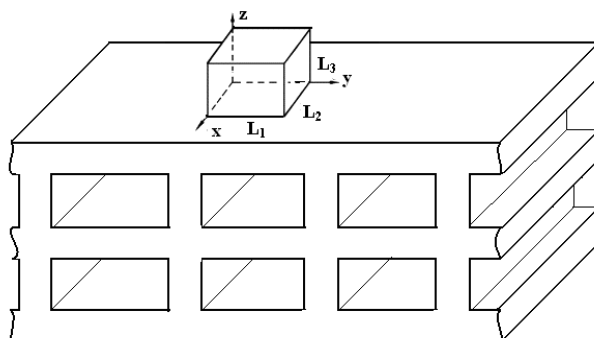


图 5 吸光鳞片底层的光学矩形腔结构

Fig. 5 Optical rectangular cavity structure of bottom part of absorption scale

115

腔内电磁波的电场 \vec{E} 和磁场 \vec{H} 的任一直角分量均满足 Helmholtz 方程。设 $u(x,y,z)$ 为 \vec{E} 或 \vec{H} 的任一分量，则有 $\nabla^2 u + k^2 u = 0$ ，用分离变量法，令 $u(x,y,z) = X(x)Y(y)Z(z)$ ，代入上式可得到方程

120

$$\begin{cases} \frac{d^2 X}{dx^2} + k_x^2 X = 0 \\ \frac{d^2 Y}{dy^2} + k_y^2 Y = 0 \\ \frac{d^2 Z}{dz^2} + k_z^2 Z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad (3)$$

于是 $u(x,y,z)$ 的解即为

$$u(x,y,z) = (C_1 \cos k_x x + D_1 \sin k_x x) \cdot (C_2 \cos k_y y + D_2 \sin k_y y) \cdot (C_3 \cos k_z z + D_3 \sin k_z z) \quad (4)$$

125

用边界条件 $\vec{n} \times \vec{E} = 0$ 和 $\partial E_n / \partial n = 0$ 及 $(x=0, y=0, z=0)$ 可对任意常数 C_i, D_i 作出限定从而把 $u(x,y,z)$ 具体化为 \vec{E} 的各分量。

$$\begin{cases} E_x = A_1 \cos k_x x \sin k_y y \sin k_z z \\ E_y = A_2 \sin k_x x \cos k_y y \sin k_z z \\ E_z = A_3 \sin k_x x \sin k_y y \cos k_z z \end{cases} \quad (5)$$

考虑 $x = L_1, y = L_2, z = L_3$ 面上的边界条件，得知 $k_x L_1, k_y L_2, k_z L_3$ 必须为 π 的整数倍，即

130

$$k_x = \frac{m\pi}{L_1}, \quad k_y = \frac{n\pi}{L_2}, \quad k_z = \frac{p\pi}{L_3} \quad (m, n, p = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

式中 m, n, p 分别代表沿矩形三边所含的半波数。

将 (5) 代入 $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ 即得到三个任意常数 A_1, A_2, A_3 满足的关系

$$k_x A_1 + k_y A_2 + k_z A_3 = 0 \quad (7)$$

该式表明, A_1 、 A_2 、 A_3 中只有两个是独立的。

135 满足 (6) 和 (7) 后, (5) 式代表腔内的一种电磁场谐振波模或腔内电磁场的一种本征振荡。对于每一组 m, n, p 值, 都有两个独立的偏振波模, 其谐振频率 (ω 或 f) 由 (4) 式 $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon$ 和 (8) 式给出

$$\omega_{mnp} = \frac{\pi}{\sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{p}{L_3}\right)^2} \quad (8)$$

ω_{mnp} 为谐振腔的本征频率。

140 由 (5) 和 (7) 还可推算, 若 m 、 n 、 p 中有两个为零, 则场强 $\vec{E} = 0$ 。

若 $L_1 \geq L_2 \geq L_3$, 则最低频率的谐振波模即为 (1, 1, 0) 波, 其频率和波长为

$$f_{110} = \frac{1}{2\sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\frac{1}{L_1^2} + \frac{1}{L_2^2}} \quad (9)$$

$$\lambda_{110} = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{L_1^2} + \frac{1}{L_2^2}}} \quad (10)$$

145 以上是在理想的无耗谐振腔内, 而以小灰蝶的几丁质材料构成的矩形腔中, 材料具有一定能量消耗, 腔内的光波在腔壁上来回反射过程中, 一部分被吸收消耗, 一部分经过叠加后被加强, 当矩形腔的某一表面形成完全透射, 或出现缺陷时, 该波长的强光将某一角度反射到空气中, 该波长的光就是小灰蝶所呈现出的颜色, 故在小灰蝶翅面鳞片观察时, 有事可以观察到某一较强的单一颜色, 其余波长的光线在反复震荡过程中消耗在矩形腔内, 入射光得到进一步吸收。

150 3 结论

小灰蝶 (*H. ila Lycaenidae*) 翅面鳞片具有很高的吸收率, SEM 分析结果显示: 其表面具有两种鳞片, 其一是多孔状结构, 其二是多脊脉状结构, 后者对光的吸收起着主导作用。TEM 试验分析了脊脉状鳞片的横截面上的微结构, 结果显示其内部存在空腔结构, 且上下两部分空腔结构迥异。

155 上部分的空腔结构具有一定倾斜角度, 通过对入射光的多重反射和折射作用, 增加入射光在鳞片材料中的光程, 进而实现了吸收效果。鳞片底层结构形成了光学谐振腔功能, 将某一特定波长的光线加强后, 被限制在驻波场中, 形成了储能作用。在发生透射或缺陷位置处反射出去, 可形成了小灰蝶的闪亮的结构色, 其余波长入射光在多次反射过程中消耗在鳞片材料中。

160 本研究对小灰蝶的翅面鳞片吸光特性进行了机理分析, 该成果对太阳能热利用材料的设计提供了理论借鉴。

致谢

本研究得到“高等学校博士学科点专项科研基金资助课题”资助, 课题编号: 20102103120012

165 [参考文献] (References)

- [1] 张天涛, 尚素琴, 张雅林, 周尧. 中国迁粉蝶属分类研究[J]. 昆虫分类学报. 2009, 31 (1) :34-44.
- [2] 刘广平, 宣益民, 韩玉阁. Morpho 蝴蝶结构显色特性研究[J]. 激光生物学报. 2006, 15(5): 511-514.
- [3] Krisztián Kertész, Gábor Piszter, Emma Jakab, et al. Color change of blue butterfly wing scales in an air-Vapor ambient[J]. Applied Surface Science, 2013, 281: 49-53.
- 170 [4] HAN Z W, NIU S C, ZHANG L F, LIU Z N, REN L Q. Light Trapping Effect in wing scales of butterfly Papilio peranthus and its simulations original research Article[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013,10,(2): 162-169.
- [5] WU W J, LIAO G L, SHI T L, Rizwan M, et al. The relationship of selective surrounding response and the nanophotonic structures of Morpho butterfly scales[J]. Microelectronic Engineering, 2012, 95: 42-48.
- 175 [6] ZHAO Q B, FAN T X, DING J, et al. Super black and ultrathin amorphous carbon film inspired by anti-reflection architecture in butterfly wing[J]. Carbon, 2011(49): 877-883.
- [7] Zoran J, Dejan P, Milija S, et al. Butterfly scales as bionic templates for complex ordered nanophotonic materials: A pathway to biomimetic plasmonics[J]. Optical Materials, 2013, 35(10): 1869-1875.
- [8] 秦佑华, 刘锋, 殷海玮. 碧凤蝶翅膀上的一维光子结构[J]. 科学通报. 2007, 52(18): 2101-2106.
- 180 [9] Benedicto de C V. Butterfly scale form birefringence related to photonics[J]. Micron, 2011, 42: 801-807.
- [10] HAN Z W, NIU S C, SHANG C H, LIU Z N, REN L Q. Light trapping structures in wing scales of butterfly Trogonoptera brookiana[J]. Nanoscale, 2012, 4(9): 2879-2883.
- [11] HAN Z W, NIU S C, YANG M, ZHANG J Q, YIN W, REN L Q. An ingenious replica templated from the light trapping structure in butterfly wing scales[J]. Nanoscale, 2013, 5(18): 8500-8506.
- 185 [12] HAN Z W, NIU S C, YIN W, REN L Q. Preparation of bionic nanostructures from butterfly wings and their low reflectivity of ultraviolet[J]. Applied. Physics. Letters. 2013, 102, 233702.