

# 蝴蝶翅膀表面非光滑鳞片对润湿性的影响

房岩<sup>1,2</sup>, 孙刚<sup>1,3</sup>, 王同庆<sup>1</sup>, 丛茜<sup>1</sup>, 任露泉<sup>1</sup>

(1. 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 长春师范学院生命科学学院, 长春 130032; 3. 东北师范大学植被生态科学教育部重点实验室, 长春 130024)

**摘要:**对8科34属48种蝴蝶翅膀表面的润湿性进行了定性、定量研究。用扫描电子显微镜对蝴蝶翅膀表面进行观察得到:鳞片长为55~150  $\mu\text{m}$ , 宽为35~105  $\mu\text{m}$ , 鳞片上突起的高为200~950 nm。用视频光学接触角测量仪对翅膀表面的静态接触角和滚动角进行测量得到:接触角为134.0°~159.2°, 表明翅膀表面具有较强的疏水性; 顺向滚动角均小于3°, 逆向滚动角均大于65°, 表明翅膀鳞片结构具有明显的各向异性。蝴蝶翅膀表面的润湿性是由鳞片微米和纳米结构协同作用的结果。

**关键词:**工程仿生学; 非光滑表面; 润湿性; 蝴蝶; 鳞片; 超疏水性; 微/纳米结构

**中图分类号:** TB17    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2007)03-0582-05

## Effect of non-smooth scale on surface wettability of butterfly wings

Fang Yan<sup>1,2</sup>, Sun Gang<sup>1,3</sup>, Wang Tong-qing<sup>1</sup>, Cong Qian<sup>1</sup>, Ren Lu-quan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Life Science, Changchun Teachers College, Changchun 130032, China; 3. Key Laboratory for Vegetation Ecology, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** The surface wettability of the butterfly wings of forty-eight species (thirty-four genera, eight families) was qualitatively and quantitatively studied. Scanning electronic microscopy observation shows that the length of the wings' scales is in the range from 55  $\mu\text{m}$  to 150  $\mu\text{m}$  and the width is in the range from 35  $\mu\text{m}$  to 105  $\mu\text{m}$ . The gibbositities on some scales with height of 200 nm to 900 nm were also observed. The static contact angle of water droplet on the surfaces of the wings was measured using an optical contact angle measuring system. Results show that the contact angle is in the range from 134.0° to 159.2°, which indicates the surfaces of the wings are super-hydrophobic. The rolling angle along the scale arrangement is smaller than 3° and against the arrangement is larger than 65°, indicating that the scale structure of the wings is evidently anisotropic. The wettability of the surface of the wings is attributed to the co-effects of the micro- and nano-structures of the scales.

**Key words:** engineering bionics; non-smooth surface; wettability; butterfly; scale; superhydrophobicity; micro/nano structure

收稿日期: 2006-07-06.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50635030); 教育部留学回国人员启动科研基金资助项目.

作者简介: 房岩(1965-), 女, 博士研究生. 研究方向: 工程仿生学. E-mail: fangyan0318@sohu.com

通讯联系人: 丛茜(1963-), 女, 教授, 博士生导师. 研究方向: 工程仿生学. E-mail: congqian@jlu.edu.cn

经过几百万年的演化、进化与优化,许多生物的体表逐渐形成了各种非光滑结构,以适应其生存环境。当污染物落到体表时,它们能够进行自我清洁,而清洗同等面积的人工表面却要花费几倍的努力。物体表面的自清洁性能在防雪、防水、防雾、防污染、抗氧化等日常生活及工农业生产中,以及航空航天、潜艇、雷达通讯等领域都有着极其广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室率先提出生物非光滑理论,发现土壤动物的优良脱附减阻功能与其体表亚微观尺寸的非光滑形态有密切关系<sup>[2-5]</sup>。1996年,Wagner<sup>[6]</sup>等人选取了97种昆虫,对昆虫翅膀上的微观结构和润湿性以及它们在受污染时的变化进行了研究,指出“SM指数”(SM Index,翅膀表面积与身体质量的商)与“自清洁”效应有关,“SM指数”高的昆虫有很好的疏水性,在水的作用下可以移除尘埃。江雷<sup>[1]</sup>对荷叶和水稻进行了研究,指出其自清洁的特征是由粗糙表面上微米结构的乳突以及表面蜡状物的存在共同引起的。但目前对蝴蝶翅膀表面鳞片的非光滑单元体形状、单元分布密度、非光滑尺寸等特征量与接触角的关系等报道较少,关于蝴蝶鳞片表面纳米结构对其浸润性质的影响规律及机制的研究仍非常有限。

作者应用扫描电子显微镜和视频光学接触角测量仪,对我国东北地区典型常见蝴蝶翅膀非光滑表面的润湿性及疏水机理进行了定性与定量研究,旨在探讨纳米结构对润湿性质的作用机制,为制备纳米疏水和自清洁材料提供理论依据。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

蝴蝶标本于2005年6—8月采自长春市(南湖公园、动植物公园、净月潭国家森林公园)、吉林市(左家特区)和大连市(旅顺口区),隶属8科34属48种,共2152头成虫标本。标本鉴定由昆虫分类学家帮助完成,采用系统分类法进行分类鉴定<sup>[7,8]</sup>。

### 1.2 实验仪器和测量方法

使用Olympus SZX-12型电视显微图像计算机分析系统(日本)对蝴蝶翅膀鳞片的结构进行观察和测量。使用HITACHI S-570型扫描电子显微镜(SEM)(日本)观察和拍照。样品喷金处理使用中国科学院北京仪器研制中心(KYKY)研制

的SBC-12型小型离子溅射仪,金粉厚度约为20 nm。使用Dataphysics公司生产的OCA20型视频光学接触角测量仪(德国),采用坐滴法测量各样品中室处的接触角,平行样本5个,取其平均值。

### 1.3 数据处理

使用SPSS 13.0对实验数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 鳞片形态表征

对48种蝴蝶翅膀表面按照鳞片的形状、大小及排列密度进行分类。鳞片形状主要有4种:窄叶形、圆叶形、阔叶形和纺锤形(图1)。鳞片呈覆瓦状排列,每个鳞片的表面由纳米级的肋(或槽)以及柱状结构组成,纵肋或沟槽的间距约为1.0~2.7  $\mu\text{m}$ 。鳞片长为55~150  $\mu\text{m}$ ,宽为35~105  $\mu\text{m}$ 。暴露在空气中的尺寸为35~100  $\mu\text{m}$ ,而鳞片上纳米级突起的尺寸为200~950 nm(表1)。

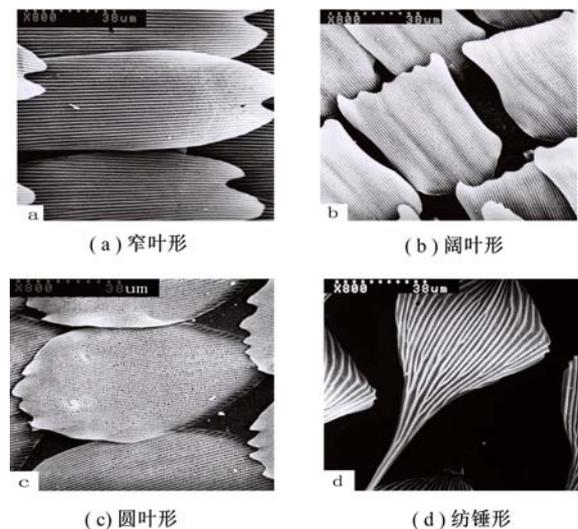


图1 鳞片分类

Fig. 1 Classification of scales

### 2.2 接触角

对48种蝴蝶翅膀表面鳞片进行了接触角(CA)测量(表1)。蝴蝶翅膀均具有较强疏水性(接触角 $134.0^{\circ}\sim 159.2^{\circ}$ ),具有超疏水性(接触角 $> 150^{\circ}$ )的蝴蝶有11种,其中蛱蝶科(Nymphalidae)7种,粉蝶科(Pieridae)、弄蝶科(Hesperiidae)、灰蝶科(Lycaenidae)、凤蝶科(Papilionidae)各1种。由于非光滑鳞片的存在,使蝴蝶翅膀的接触角增加8.20%~40.96%,尤其在小鳞片蝴蝶中增加的幅度较大。这与Wenzel模型一致<sup>[9-11]</sup>。蛱蝶科、灰

表 1 鳞片相关数据及接触角  
Table 1 Scale data and contact angle

蝴蝶种类	鳞片尺寸/ $\mu\text{m}$	长度/宽度	间距/ $\mu\text{m}$	宽度/间距	突起高度/ $\text{nm}$	无鳞 CA/ $(^\circ)$	有鳞 CA/ $(^\circ)$
绿豹蛱蝶	70×35	2.0	54	0.65	340	123.0	156.6
红线蛱蝶	90×50	1.8	76	0.66	200	129.0	150.3
白矩珠蛱蝶	135×75	1.8	112	0.67	400	112.6	149.0
老豹蛱蝶	85×55	1.5	77	0.71	400	104.2	146.0
曲纹银豹蛱蝶	90×45	2.0	60	0.75	250	121.5	146.0
银斑豹蛱蝶	70×60	1.2	77	0.78	280	126.4	140.7
断眉线蛱蝶	70×45	1.6	58	0.78	410	116.7	150.6
柳紫闪蛱蝶	105×50	2.1	70	0.71	590	119.4	147.0
白斑迷蛱蝶	105×70	1.5	86	0.81	530	115.6	146.5
紫闪蛱蝶	120×50	2.4	69	0.72	460	127.0	156.9
伊诺小豹蛱蝶	65×60	1.1	79	0.76	450	123.6	147.7
云豹蛱蝶	125×65	1.9	78	0.83	420	114.5	149.9
夜迷蛱蝶	80×35	2.3	48	0.73	560	108.7	144.8
伊络环蛱蝶	100×60	1.7	76	0.79	480	110.2	149.5
福蛱蝶	75×55	1.4	74	0.74	340	133.3	154.1
青豹蛱蝶	95×55	1.7	80	0.69	390	117.2	153.3
黄钩蛱蝶	115×65	1.8	84	0.77	540	109.1	152.4
小红蛱蝶	95×65	1.5	91	0.71	310	116.5	140.3
单环蛱蝶	70×35	2.0	56	0.62	400	120.1	147.2
朝鲜环蛱蝶	70×40	1.8	56	0.71	350	123.9	140.2
曲带闪蛱蝶	90×50	1.8	71	0.70	300	116.8	142.3
白钩蛱蝶	105×70	1.5	90	0.78	600	102.4	140.3
黄环链眼蝶	80×35	2.3	51	0.69	500	105.8	148.7
蛇眼蝶	150×50	3.0	66	0.76	700	129.3	143.8
牧女珍眼蝶	70×65	1.1	85	0.76	550	112.4	148.0
白眼蝶	115×45	2.6	68	0.66	760	105.5	136.5
黑酒眼蝶	70×40	1.8	62	0.65	700	122.9	135.9
钩粉蝶	75×55	1.4	67	0.82	800	114.2	143.8
菜粉蝶	95×40	2.4	64	0.62	450	118.7	146.5
黑脉粉蝶	75×40	1.9	63	0.63	450	122.6	142.6
云粉蝶	80×60	1.3	74	0.81	500	112.1	139.3
暗脉菜粉蝶	95×40	2.4	67	0.60	650	119.0	136.3
斑缘豆粉蝶	75×40	1.9	52	0.77	750	122.2	143.8
欧洲粉蝶	80×45	1.8	60	0.75	600	118.5	140.8
绢粉蝶	70×50	1.5	58	0.86	700	106.7	150.4
优秀洒灰蝶	75×45	1.7	50	0.90	300	129.3	146.5
蓝灰蝶	55×50	1.1	65	0.77	350	127.9	147.7
红珠灰蝶	65×50	1.3	68	0.74	300	119.8	159.2
金凤蝶	90×65	1.4	82	0.79	500	111.1	134.0
碧凤蝶	130×70	1.9	92	0.76	600	117.7	138.5
柑橘凤蝶	95×50	1.9	68	0.74	750	109.1	138.3
麝凤蝶	135×80	1.7	104	0.77	550	115.4	142.8
绿带翠凤蝶	95×60	1.6	65	0.92	950	118.3	158.0
冰清绢蝶	60×65	0.9	70	0.93	700	112.0	143.2
红珠绢蝶	70×105	0.7	170	0.62	500	115.1	136.2
锦葵花弄蝶	90×45	2.0	60	0.75	400	112.4	146.8
白弄蝶	95×35	2.7	48	0.73	600	122.4	150.4
朴喙蝶	80×45	1.8	66	0.68	450	109.2	143.0

蝶科等接触角较大,是由于它们的鳞片尺寸较小,在水滴与翅膀表面接触时鳞片间隙承担了较多的接触面积,提高了表面的疏水性。红珠灰蝶的接触角最大( $159.2^\circ$ ),鳞片呈阔叶形,鳞片面积为  $65\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ,鳞片上的纳米突起间距为  $1.49\ \mu\text{m}$ ,高为  $290\ \text{nm}$ ,宽为  $420\ \text{nm}$ (图 2(a))。金凤蝶的接触角最小( $134.0^\circ$ ),鳞片呈阔叶形,鳞片面积为  $90\ \mu\text{m} \times 65\ \mu\text{m}$ ,鳞片上的纳米突起间距为  $1.92\ \mu\text{m}$ ,高为  $470\ \text{nm}$ ,宽为  $510\ \text{nm}$ (图 2(b))。

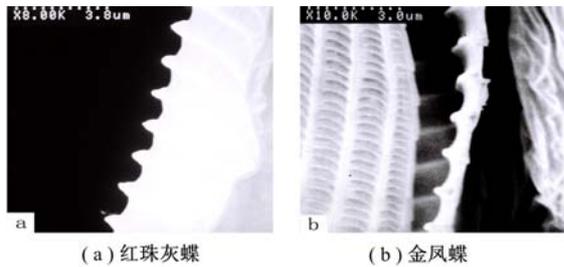


图 2 鳞片横切电镜扫描

Fig. 2 SEM photos of scales from transverse section

### 2.3 滚动角

对 48 种蝴蝶的翅膀进行了正向和逆向滚动角测量。沿体轴至翅膀末端倾斜水滴时,所有蝴蝶翅膀表面开始自流的倾角(正向滚动角)均小于  $3^\circ$ ;相反方向放置时,自流角度(逆向滚动角)均大于  $65^\circ$ ,说明蝴蝶翅膀具有明显的各向异性。鳞片以及鳞片上纳米突起的规则排列形成了各向异性(图 3)。自然界中的蝴蝶可以借助上下扇动翅膀使水滴携带着污染物快速离开翅膀表面,同样由雨、雾、露等形成的水滴也会很快流走,从而减轻体重、减小阻力、提高飞行速度。

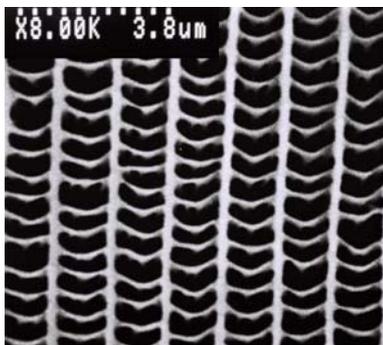


图 3 鳞片电镜扫描(白钩蛱蝶纵脊)

Fig. 3 SEM photos of scales(vertical ridge of *Polygonia c-album*)

### 2.4 无鳞片接触角

把 48 种蝴蝶去掉鳞片,测量其接触角(见表 1)。由于鳞片的存在,改变了蝴蝶翅膀表面的润

湿性,使疏水性增强。翅膀表面的接触角增加了  $13.0^\circ \sim 43.3^\circ$ ,增加幅度为  $8.2\% \sim 41.0\%$ 。

### 2.5 统计分析

对蝴蝶翅膀表面鳞片的面积、长度、宽度、间距、长度/宽度、宽度/间距等指标与接触角的相关关系的统计分析结果见表 2。

表 2 统计分析结果

Table 2 The results of statistical analysis

变量	回归系数	平均值	标准误差	T 值	P 值
鳞片面积	0.0008	$4852.6000\ \mu\text{m}^2$	0.0039	0.1962	0.8455
鳞片长度	0.0899	$89.3800\ \mu\text{m}$	0.3556	0.2528	0.8017
鳞片宽度	-0.4183	$53.3300\ \mu\text{m}$	0.4252	-0.9838	0.3310
鳞片间距	0.1341	$19.3300\ \mu\text{m}$	0.3806	0.3523	0.7264
长度/宽度	-6.9722	1.7500	10.1970	-0.6850	0.4972
宽度/间距	1.6597	3.0200	2.3566	0.7043	0.4852

各项指标与接触角的回归系数均极小,  $P$  值均大于 0.05,表明蝴蝶翅膀表面鳞片的面积、长度、宽度、间距、长度/宽度、宽度/间距等指标与接触角均不具相关性。同时也说明蝴蝶翅膀表面鳞片的润湿由微米级微观结构和纳米级微观结构协同作用的结果。纳米级结构对蝴蝶翅膀表面润湿性的影响值得进一步研究。

## 3 结 论

(1) 蝴蝶翅膀具有较强疏水性(接触角为  $134.0^\circ \sim 159.2^\circ$ ),48 种蝴蝶中的 11 种具有超疏水性(接触角大于  $150^\circ$ ),占  $22.9\%$ 。

(2) 由于蝴蝶翅膀表面非光滑鳞片的存在,使蝴蝶翅膀表面的润湿性增强,接触角增加  $8.2\% \sim 41.0\%$ 。

(3) 蝴蝶翅膀表面鳞片具有明显的各向异性,正向滚动角均小于  $3^\circ$ ,逆向滚动角均大于  $65^\circ$ 。

(4) 蝴蝶翅膀表面鳞片的面积、长度、宽度、间距、长度/宽度、宽度/间距等指标与接触角均不具相关性。蝴蝶翅膀鳞片表面的润湿性是微米级微观结构和纳米级微观结构协同作用的结果。

### 参考文献:

- [1] 江雷. 从自然到仿生的超疏水纳米界面材料[J]. 现代科学仪器, 2003(3): 6-10.  
Jiang Lei. Super-hydrophobic surfaces from natural to artificial[J]. Modern Scientific Instruments, 2003 (3): 6-10.
- [2] Chen Guang-hua, Cong Qian, Feng Yun, et al. Study

- on the wettability and self-cleaning butterfly wing surface[C]// Design and Nature II(COLLINS M, BREBBIA C ed). Boston: WIT Press, 2004: 245-252.
- [3] 丛茜, 王连成, 任露泉, 等. 鳞片形非光滑表面的仿生设计[J]. 吉林工业大学学报, 1998, 28(2): 12-17.  
Cong Qian, Wang Lian-cheng, Ren Lu-quan, et al. Bionics design for scaly nonsmooth surfaces[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1998, 28(2): 12-17.
- [4] 任露泉, 杨晓东, 佟金. 动物皮毛柔性减阻作用的试验研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(11): 1271-1274.  
Ren Lu-quan, Yang Xiao-dong, Tong Jin. Experimental study on effect of the resistance-reducing of the animal fur flexibility[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2000, 11(11): 1271-1274.
- [5] 任露泉, 尚广瑞, 杨晓东. 禽羽结构及羽表脂质对其润湿性能的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(2): 213-218.  
Ren Lu-quan, Shang Guang-rui, Yang Xiao-dong. Influence of typical poultry feather structure and surface lipid on wettability[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2006, 36(2): 213-218.
- [6] Wagner T, Neinhuis C, Barthlott W. Wettability and contaminability of insect wings as a function of their surface sculptures[J]. Acta Zoologica(Stockholm), 1996, 77(3): 213-225.
- [7] 周尧. 中国蝴蝶分类与鉴定[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1998.
- [8] 周繇, 朱俊义. 中国长白山蝶类彩色图志[M]. 长春: 吉林教育出版社, 2003.
- [9] Cong Q, Chen G H, Fang Y, et al. Study on the super-hydrophobic characteristic of butterfly wing surface[J]. Journal of Bionics Engineering, 2004, 1(4): 249-255.
- [10] Athanassiou A, Lygeraki M I, Pisignano D, et al. Photocontrolled variations in the wetting capability of photochromic polymers enhanced by surface nanostructuring[J]. Langmuir, 2006, 22: 2329-2333.
- [11] Edwin N, Markus O. Lotus-effects-surfaces[J]. Macromol Symp, 2002, 187: 677-682.