

# 典型植物叶片非光滑表面的纳米力学特性

任露泉,王淑杰,韩志武,邱兆美

(吉林大学 地面机械仿生技术教育部重点实验室,长春 130022)

**摘要:**利用纳米技术对几种典型植物叶片表面进行了纳米级硬度的测定。结果表明:不同质地、不同生存环境的植物叶表面形态、结构不同,从而使植物叶表面的硬度不同。其中革质鲜叶片(毛竹、紫丁香)表面硬度较大,蜡质叶片(水莲、美人蕉等)硬度较小;植物非光滑叶表形态中凸包处硬度较凹坑处的硬度大;同一叶片表层的硬度大于内层的硬度。本研究为工程仿生的表面耐磨涂层设计及其自然复合材料的选择提供有益参考。

**关键词:**工程仿生学;非光滑叶片表面;纳米力学;硬度;植物

**中图分类号:** TB17; Q944 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2007)05-1121-05

## Nanometer mechanical characteristics of sculptured surfaces of typical plant leaves

Ren Lu-quan, Wang Shu-jie, Han Zhi-wu, Qiu Zhao-mei

(Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The hardness of typical plant leaves was measured using nanometer technology. Results show that the surface morphology and structure of the leaves vary with the leaf texture and living condition, leading to the differences in the nanometer hardness. The hardness of leaves with leather texture (such as fresh bamboo and lilac) is higher, while that with wax texture (such as lotus and canna) is lower. The hardness of convex hull is higher than that of pit portion on the sculptured leaf surfaces. For the same leaf, the hardness of the inside is lower than that of the surface. The results may provide important information to be referred in surface coating design of bionic materials and in choosing natural composite biomaterials.

**Key words:** engineering bionics; sculptured surface; nanometer mechanics; hardness; plant

非光滑表面是生物界普遍存在的一种现象,是自然界生物“适者生存”的自然规律作用的必然结果。无论是水生动物、土壤动物、植物、昆虫还是飞鸟都具有非光滑体表面,由于生物的多样性,生存环境的复杂性决定其非光滑表面的多型性,并且具有多种不同的功能(如疏水、脱附、减黏、耐

磨、降噪、消声等)。德国波恩大学植物学家 Barthlot 最早发现,荷叶微米级非光滑表面具有明显的疏水自清洁效应,即所谓的“莲叶效应”现象,并开始对多种植物非光滑形态与疏水性之间的关系进行了相关研究,取得了一系列成果<sup>[1-3]</sup>。中国吉林大学地面机械仿生技术课题组对植物表

收稿日期:2006-05-31.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50635030);国家重大基础研究前期专项基金资助项目(2002CCA012000);教育部科学技术研究重点资助项目(105059)。

作者简介:任露泉(1944-),男,教授,博士生导师。研究方向:工程仿生学。E-mail: lqren@jlu.edu.cn

通讯联系人:王淑杰(1966-),女,副教授,博士。研究方向:工程仿生学。E-mail: shujie@jlu.edu.cn

面的疏水防黏特性也进行了相关的研究,创建了非光滑表面脱附理论<sup>[4-7]</sup>,并筛选出几种理想的植物脱附表面原型<sup>[8-10]</sup>。此外,课题组还对植物叶表面组织结构与力学特性的相关性作了研究<sup>[11]</sup>,但是关于纳米力学特性方面至今未见报道。作者尝试对几种典型非光滑植物叶片的纳米力学特性进行研究,旨在为工程仿生的表面设计以及耐磨生物复合材料的选择提供有益参考。

## 1 实验设备与方法

### 1.1 材料的选择

选毛竹、紫丁香、翠菊、水莲、美人蕉等植物在旺盛生长期的特征叶片。

### 1.2 仪器设备

实验采用的纳米硬度计是由美国 hysitron 公司生产的 Triboindenter 原位纳米力学测试系统。力和位移分辨率分别为 1 nN 和 0.2 nm。该硬度计主要包括 XYZ 移动工作台、Berkovichsan 三棱锥压头、传感器 (transducer)、扫描仪 (triboscanner) 和光学显微镜 (optics) 等元件。

纳米压痕仪由压头、扫描控制系统、传感系统组成。最大加载载荷为 30 mN,最小加载载荷为 100 nN,纵向位移步长为 13 nm,热漂移小于 0.05 nN/s,具有原位成像、原位声发射检测的功能<sup>[12]</sup>。

### 1.3 纳米力学分析样品的制备

在样品某部位 0.075 mm × 0.01 mm 区域内作 10 次压痕实验,取平均值作为实验硬度值。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 最适加载量的确定

采用三角加载法,无保压时间。以水莲叶为例,首先测定叶片的厚度,再将叶片切成小块,用酒精擦净、阴干,并用两面胶固定在工作台上。加载 200  $\mu\text{N}$  的力时,凸包压深  $H_{\max} = 719$  nm,硬度值  $H$  均为 0.02 GPa;凹坑压深  $H_{\max} = 704$  nm,硬度值  $H$  均为 0.01 GPa。加载 100  $\mu\text{N}$  时,凸包压深  $H_{\max} = 204.2$  nm,硬度值  $H$  为 0.03 GPa,凹坑压深  $H_{\max} = 212.3$  nm,硬度值  $H$  为 0.02 GPa。加载 50  $\mu\text{N}$  时,凹坑处压痕深  $H_{\max} = 157.8$  nm,硬度值  $H$  为 0.03 GPa;凸包处压深  $H_{\max} = 157.2$  nm,硬度值  $H$  为 0.04 GPa。水莲叶在不同加载条件下的载荷-位移曲线如图 1 所示。

文献[13]指出,纳米硬度计用于测定薄层形

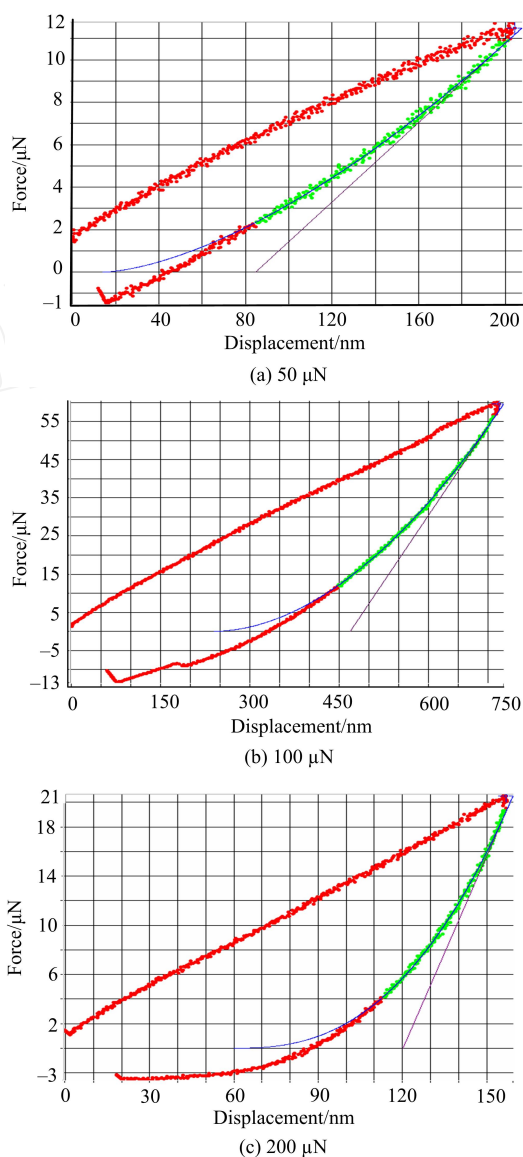


图 1 水莲叶在不同加载条件下的载荷-位移曲线图

Fig. 1 Force-displacement curves of lotus leaf under different loads

多层材料,压痕深不超过均匀的结构材料厚度的 10%。水莲叶表皮细胞为多层结构,本实验得到水莲叶的最大压痕深度远远小于莲叶厚层的 10%,所以用纳米硬度计可以实现对莲叶等植物表面微观层状复合结构的纳米力学性能的测定。实验结果表明,随着加载压力的增加,压痕加深,硬度值变小;而且表层的硬度大,内层的硬度小。作者选用 50  $\mu\text{N}$  来测定各种样品的表面硬度。

### 2.2 植物叶片表面硬度的比较分析

采用上述方法加载 50  $\mu\text{N}$  对不同植物表面的硬度进行测定(每点测 5~10 次取均值),其结果如表 1 所示。

表 1 不同种类植物的硬度  
Table 1 Hardness of different plant leaves

植物 (叶)	正面 深度	凸处 硬度	正面 深度	凹处 硬度	反面 深度	凹处 硬度	反面 深度	凸处 硬度
种类	/nm	/GPa	/nm	/GPa	/nm	/GPa	/nm	/GPa
银杏	152.1	0.07	159.2	0.05	191.2	0.03	199.6	0.04
绿背天 鹅绒竹	215.4	0.015	218.8	0.01	166.8	0.02	233.4	0.03
水莲	157.2	0.04	151.8	0.03	212.3	0.02	204.2	0.03
美人蕉	215	0.02	213.2	0.02	201.1	0.03	192.1	0.03
毛竹	94.5	0.160	92.6	0.150	70.1	0.350	88.1	0.380
铁十字 海棠	81.7	-	80.6	-	66.8	-	70.5	-
翠菊	76.5	-	75.8	-	60.5	-	64.8	-
紫丁香	145.8	0.135	140.4	0.110	190.4	0.040	192.4	0.050

由表 1 可以看出,不同种类叶片的表面硬度不同,大致范围为 0.02 ~ 0.38 GPa。革质竹叶(毛竹 *Bambusa phyllostachys pubescens*)、木质树叶(紫丁香 *Syringa oblate* Linn (*Var giraldii*)、银杏 *Ginkgobiloba* Linn、绿背天鹅绒竹 *Calathea zebrine Humilior*) 表面的硬度较大;多年生草本植物(水莲 *Nelumbo nucifera aertn*、美人蕉 *Canna indica* Linn(*generalis*) 叶片纤维含量多,表面硬度较小;一年生草本植物(翠菊 *Callistephus chinensis*、铁十字海棠 *Begonia masoniana*) 叶片水分含量较多,叶表面硬度极小。通过分析发现,非光滑叶表面凸包处的硬度比凹坑处的硬度大。主要是由于非光滑使叶表面粗糙,只有在较大的力的作用下,才能使峰值表面变形,获得一定的接触面积。也就是说,在同样的力的作用下,凸处接触面积小,即叶面的耐压强度(硬度)较大;反之,光滑叶表面在一定力的作用下表面变形较大,获得了较大的接触面积,即叶表面的耐压强度(硬度)较小。美人蕉叶表光滑、凸凹不明显,硬度值相同。由于铁十字海棠、翠菊叶片含水量过高,叶面表皮毛非光滑结构显著,未测出其表面硬度真值。

3 结果与讨论

在不同生存环境下进化的植物表面形态不同,其表面硬度也不同。植物叶片的这种形态结构与力学特性之间的关系符合达尔文的生物进化论的观点。进化论认为:适者生存,不适者被淘汰,自然选择是生物与环境生存斗争的结果。植物为了适应生存环境需要表现出各种形态结构。

然而,结构与功能是辨证的统一,在生物进化的过程中,表现出机体结构与环境的统一。生物进化受自然选择的支配,即生物形态结构都是适应环境的产物。

叶片的结构、功能与生活环境相适应。这里以两类具有代表性的植物(毛竹和水莲)来加以分析。

毛竹是禾本科毛竹属植物,多生长在湿热<sup>[7]</sup>多雨<sup>[8]</sup>低纬度的山麓及丘陵地带,为了适应这种不良的生存环境,植物需抵御病虫害的侵染,抵抗各种强光照射,竹叶组织结构就形成了特定的形式,表现最为显著的是叶表面特征和组织结构特性。在光学显微镜下观察毛竹叶片的横切面(见图 2)可以看到,其叶结构包括表皮、叶肉和维管束(叶脉)。对表皮细胞进一步用透射扫描电镜放大(见图 3),可以看见其表面有发达的角质层,并可清晰地看见表皮细胞分为长形细胞和短形细胞两种,前者的长径沿纵轴方向排列,为硅细胞,胞壁已硅质化;另一种是位于 2 个长细胞之间的短细胞,为栓细胞,细胞壁栓质化。硅细胞向外突出,使叶表面坚硬而粗糙(微米级)。相邻两叶脉之间中部的表皮由几个特殊的大型薄壁细胞 N 所代替,其细胞的外壁一般角质加厚,细胞内具有很大的液泡,称为泡状细胞,与叶脉平行纵向排列。横切片上,每相邻两叶脉之间的泡状细胞数为 4~7 个,中央的最大,截面积可比表皮细胞大 10 倍左右,向两侧逐渐变小。叶肉组织 A:竹类植物的叶比较接近于等面叶,其叶肉无栅栏组织和海绵组织的分化,细胞壁都向内折叠,以增加容纳叶绿体的面积,细胞间隙较小,在气孔内方有较大的孔下室。但细胞形状、大小及层次还因竹种不同而异。叶脉 E:主脉和侧脉平行包埋于叶肉

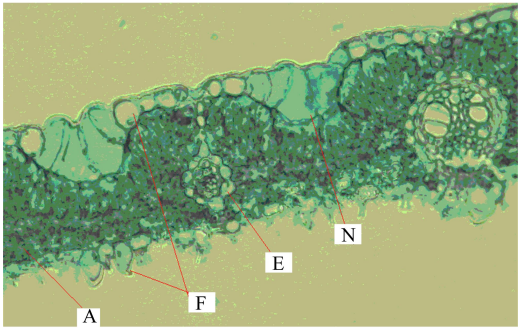
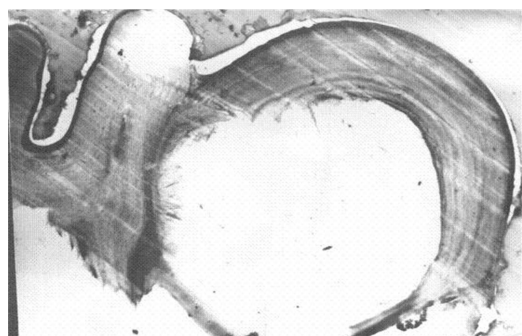


图 2 毛竹叶横切面光学显微切片图  
Fig. 2 Microscopic structure of cross-section of *Bambusa phyllostachys pubescens* leaf





(a)



(b)

图 3 毛竹叶表皮细胞的透射扫描电镜图

Fig. 3 Epicuticular cells of *Bambusa phyllostachys pubescens* leaf (3000X, scale: 2  $\mu$ m)

组织中,其间有横的细脉互相连结。叶脉由维管束及其外围的维管束鞘组成,它与上、下表皮之间常有成束或成片的厚壁纤维相连。维管束鞘分内、外两层,外层的细胞壁薄,不含叶绿体,内层的细胞壁厚,这种结构正反映出该竹类,维管束为有限维管束,由木质部和韧皮部组成,木质部在上表皮一边,韧皮部在靠下表皮一边。

水莲是(莲科)水生植物,为了适应水生环境,叶表皮细胞外壁变厚,不发生角质化,具有的蜡层较薄。叶肉组织不够发达,导管和机械组织欠发达。水莲的叶肉细胞分化不发达,细胞中具有大的空腔,生存环境决定其具有这种特异的结构(如图 4 所示),表皮细胞具有蜡质,呈微米级凸状非光滑(见图 5、图 6),叶肉细胞有一层长形栅栏细胞,海绵组织排列疏松欠发达。

综上,不同生存环境下进化的植物叶表面的形态不同,组织结构各异,表面材料组成也不同,其纳米硬度也各不相同。与具有角质层表面的叶面(如紫丁香,毛竹子)相比,具有蜡质层表面的叶片(如银杏,水莲)的硬度较小。即木质、革质叶片

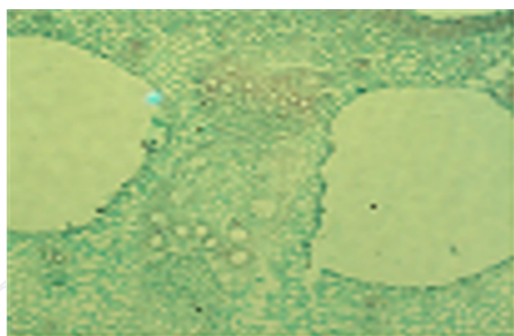


图 4 水莲叶横切面图

Fig. 4 Cross-section of lotus leaf

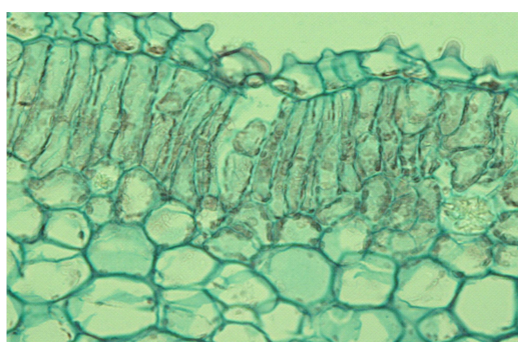


图 5 水莲叶上表皮细胞横切面图

Fig. 5 Cross-section of epicuticular cells of lotus leaf



图 6 水莲表皮细胞的透射扫描电镜图

Fig. 6 Epicuticular cells of lotus leaf

比蜡质叶片表面硬度小,即木质、革质叶片比蜡质叶片表面硬度大。

## 4 结 论

(1)非光滑程度对叶片表面硬度有一定的影响,叶表面材料组成成分对表面硬度影响较大。表层含有木质素与纤维素多的叶片硬度较大,表面含蜡质及碳水化合物多的叶片硬度小。

(2)非光滑叶片的凸凹处硬度比较复杂。一般情况下,叶表面凸包处的硬度大于凹坑处硬度。由于非光滑使叶表面粗糙,只有在较大的力的作

用下,才能使峰值表面变形,获得一定的接触面积。也就是说,在相同的力的作用下,凸处接触面积小,即叶面的耐压强度(硬度)较大;反之,对于光滑叶表面,在一定力的作用下表面变形较大,获得了较大的接触面积,即叶表面的耐压强度(硬度)较小。

(3)同一叶片的表层硬度大于内层硬度。主要是因为组织、细胞在形成的过程中遵循自我保护的原则,能够自觉地抵御外界的不良环境的侵袭,使表层细胞的(细胞壁)物质多由纤维、木质素等高密度物质构成。

#### 参考文献:

- [1] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Panta*, 1997, 202:1-8.
- [2] Baker E A. Chemistry and Morphology of Plant Epicuticular Waxes[M]. London: The Plant Cuticle Academic Press, 1982.
- [3] Barthlott W. Epicuticular Wax Ultrastructure and Systematics[M]. Berlin: Springer, 1993.
- [4] Ren Lu-quan, Wang Shur-jie, Tian Xi-mei, et al. Non-smooth morphologies of typical plant leaf surfaces and their anti-adhesion effects[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2007, 4(1):33-40.
- [5] Ren Lu-quan, Yan Bei-zhan, Tong Jin. Experimental study on bionic non-smooth surface soil electro osmosis [J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 1999, 8(3):185-196.
- [6] Ren Lu-quan, Deng Shi-qiao, Wang Jing-chun. Design principles of the non-smooth surface of bionic plow moldboard[J]. *Journal of Bionics Engineering*, 2004, 1(1):9-19.
- [7] Shun Jing-rong, Li Jian-qiao, Cheng Hong. Restudies on body surface of dung beetle and application of its bionics flexible technique[J]. *Journal of Bionics Engineering*, 2004, 1(1):53-60.
- [8] 王淑杰, 任露泉, 韩志武, 等. 典型植物叶表面非光滑形态的疏水防粘效应[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9):16-19.
- Wang Shur-jie, Ren Lu-quan, Han Zhi-wu, et al. Non-smooth morphology of typical plant leaf surface and its hydrophobicity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(9):16-19.
- [9] 王淑杰, 任露泉, 韩志武, 等. 植物叶表面非光滑形态及其疏水特性的研究[J]. *科技通报*, 2005(5):553-556.
- Wang Shur-jie, Ren Lu-quan, Han Zhi-wu, et al. The research of non-smooth structure of plant leaf surface and Its hydrophobic stickiness-proof function [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2005(5):553-556.
- [10] 任露泉, 王淑杰, 周长海, 等. 典型植物非光滑疏水表面的理想模型[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2006(增刊2):97-102.
- Ren Lu-quan, Wang Shur-jie, Zhou Chang-hai, et al. Ideal model of the non-smooth hydrophobic surface of typical plants[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2006(Sup 2):97-102.
- [11] Wang Shur-jie, Ren Lu-quan. Study on mechanical properties characteristics of surfaces morphology of typical plant leaves[J]. *Scientific Research Monthly*, 2006, 5(16):185-189.
- [12] 孙霁宇. 臭蜣螂表皮纳米力学测试方法和纳米力学行为[D]. 长春:吉林大学生物与农业工程学院, 2005.
- Sun Ji-yu. Analyzing methods for nanoindentation and nanomechanical properties of the cuticle of dung beetle *Copris ochus motschulsky* [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2005.
- [13] ASTM standard test method E384. Annual Book of Standards 3.01[S].