

\* 专题评述 \*

非光滑表面仿生学(I)<sup>\*</sup>孙久荣<sup>1\*\*</sup> 戴振东<sup>2</sup>

1. 北京大学生命科学学院, 北京 100871; 2. 南京航空航天大学高新技术研究院, 南京 210016

**摘要** 介绍了生活在不同环境的动物, 如鲨鱼、沙鱼、蜥蜴、甲虫和蜣螂体表的非光滑性. 这些动物体表的沟槽型(肋条样)、鳞片型、凸包型和凹坑型形态和结构与其生活习性相适应. 它们特异的微结构使非光滑表面具有优异的减阻、减摩、抗粘附和抗磨损的特性, 因此成为仿生学研究和应用的一个新领域.

**关键词** 非光滑表面 鲨鱼 沙鱼 蜥蜴 甲虫 蜣螂 仿生学

生物体表面不仅保护机体内部组织免受外环境的损害, 还与外界进行着物质、能量和信息的交流. 其优美的宏观和有序的微结构, 具有形态、结构和功能的多样性, 与机体的生活环境和习性相适应. 近年来, 科学家发现了许多生物体的表面结构是非光滑的. 所谓的非光滑表面是指在界面粘附系统中, 若一个光滑表面( $S$ )内的任何宏观区块( $\Delta S_i$ )上存在一个或几种因素构成的非光滑效应, 则该表面为非光滑表面. 这种构成非光滑效应的因素被称为非光滑表面结构的几何单元. 为了便于研究和仿生学应用, 有人将构成非光滑表面的几何单元进行了定义和分类<sup>[1]</sup>. 其中研究较多的是沟槽型、鳞片型、凸包型和凹坑型表面. 本文以在不同环境生活和具有不同习性的动物, 如鲨鱼(shark)、沙鱼(sandfish)、蜥蜴(*Moloch horridus*)、甲虫(*Stenocara*)和蜣螂(*Copris ochus*)等的体表为例, 介绍非光滑表面具有优异的减粘、减阻和抗磨损等特性及其仿生学应用. 这对加深生物体表的认识, 扩展材料应用范围和提高材料性能有着重要的启迪.

## 1 鲨鱼的沟槽型非光滑表面及其仿生学应用

沟槽型非光滑表面又称肋条样表面, 其几何单

元由薄条和其间的沟槽构成, 研究较多的是鲨鱼皮. 鲨鱼皮肤上布满了许多盾鳞. 这些鳞片呈齿状样突起, 顺着头尾方向, 每个鳞片上有3—5条径向的肋条(图1(a), (b)). Walsh等的早期研究发现, 顺流方向的微小沟槽表面能有效地降低壁面的摩擦阻力<sup>[2]</sup>. 后来的科学家肯定了沟槽型非光滑表面具有的减阻作用<sup>[3]</sup>.

目前有关沟槽表面的减阻机制尚未定论. 流体阻力的产生大体有3个来源: 一是层流边界的粘性阻力; 二是流体微团的相互撞击; 三是流线变化产生的旋涡. 主要有两种假说解析沟槽表面的减阻机制: 其中“次生涡”论认为, 沟槽结构与流向涡相互作用产生二次涡. 此过程抑制了流向涡的横向展开和喷射, 导致沟槽壁面摩擦阻力减小; “突出高度”论则强调, 沟槽增加了边界层中的粘性底层, 沟槽内保留低速的安静的流体, 从而降低了摩擦阻力. 科研人员对肋条状表面的薄条及其间隔的几何形貌进行了实验观测. 其中Luchini发现薄条高度( $h$ )与间隔宽度( $s$ )之比  $h/s \geq 0.6$  倍时, 减阻效果较好<sup>[4]</sup>; 这一结果启示了Bruse等在原有的两个薄条间再插入一个小薄条, 这样可能抑制流体在原有薄

2007-07-02 收稿, 2007-08-16 收修改稿

\* 国家科技部(批准号: 2002CCA01200)和国家自然科学基金(批准号: 30470230, 30400086, 50635030)资助项目

\*\* E-mail: sjr@pku.edu.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

条间的紊乱，达到减阻的目的(图 2(c))<sup>[5]</sup>。而 Bechert 等发现， $h/s=0.5$  时，减阻效果更好，比对照的光滑表面减阻 9.9%<sup>[9]</sup>，并认为如果  $h/s >$

0.6，减阻效果可随薄条的高度增加而增加。研究人员认为在汽车、轮船和飞机上涂上这样“粗糙”的表层，将减少阻力，节省燃料。

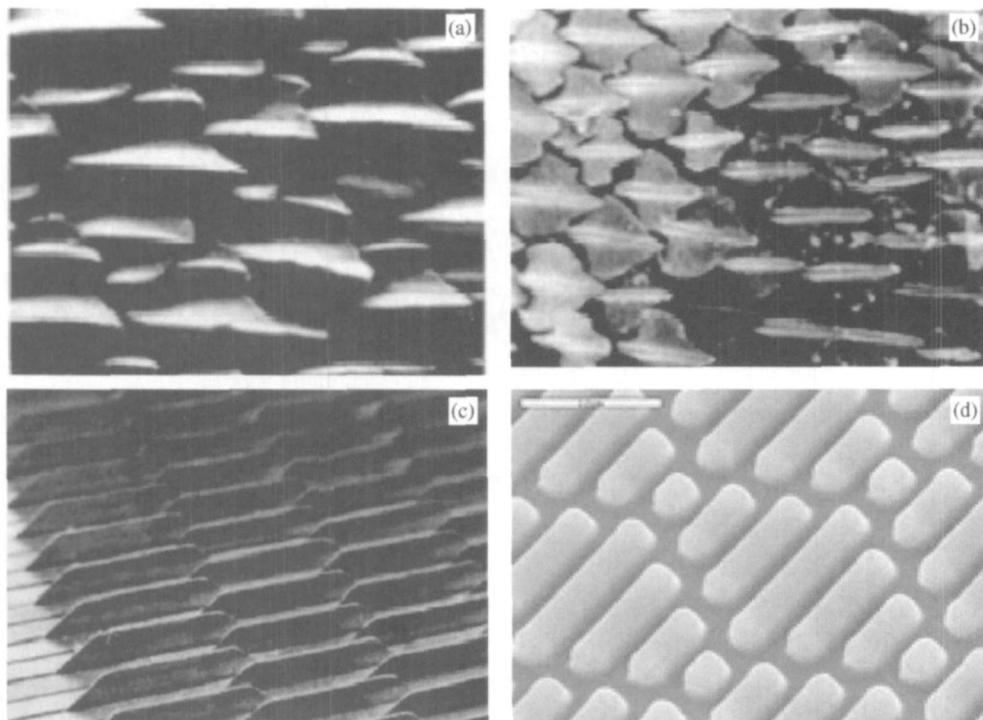


图1 鲨鱼皮肤的显微结构及其仿生制品(根据文献[5, 10]修改)

(a) 白斑角鲨(*Squalus acanthia*)表皮; (b) 虎鲨(*Caliocerdo cuvieri*)表皮; (c) 仿鲨鱼的肋条状表面, 薄条高 0.1 mm, 间隔 4.6 mm; (d) PDMS 涂层材料

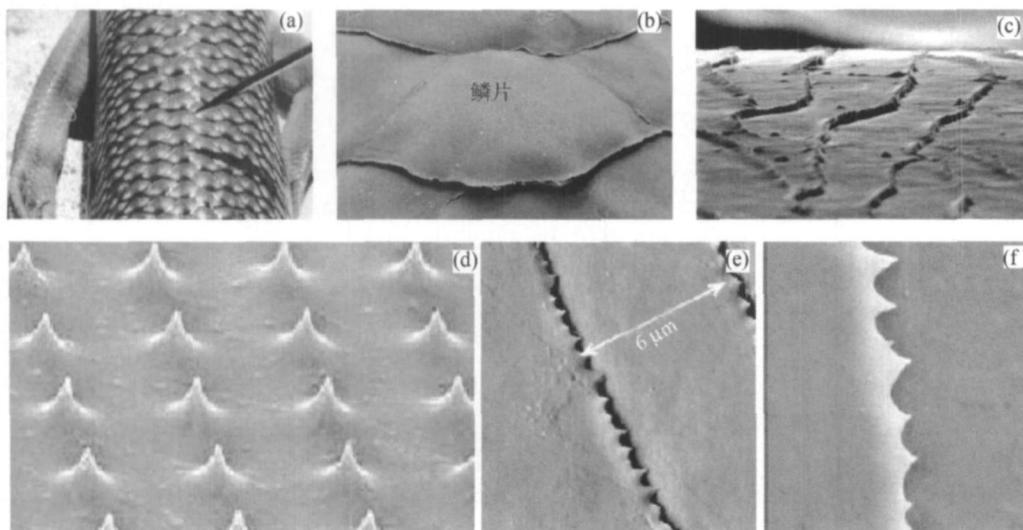


图2 沙鱼的鳞片状非光滑表面(根据文献[11]修改)

(a) 鲨鱼鳞片状表面; (b) 鲨鱼鳞片; (c) 术箭头示沙粒流动方向; (d) 鳞片的扫描电子显微镜照片, 小棘高 10 nm, 棘间距 50 nm; (e) 鳞片间距 6 μm, 鳞片边缘呈锯齿状; (f) 鳞片边缘的锯齿状突起直径为 50 nm

沟槽样表面首先在航空器上得到应用。国产运七飞机的表面贴上沟槽膜可减少阻力5%—8%<sup>[7]</sup>。在NACA 0012飞机的表面贴上V型沟槽膜后,阻力减少6.6%<sup>[8]</sup>。英国的SPEEDO公司研发的仿鲨鱼皮泳衣在2000年悉尼奥运会上创造了奇迹。2004年SPEEDO公司在雅典奥运会上推出“鲨鱼皮”第二代产品——FASTSKINFS II泳衣,该泳衣充分运用了仿生学原理和新材料技术,在第一代产品的基础上更加接近鲨鱼皮特性,改进了面料(主要材料聚四氟乙烯)的质地和纹理,同时保持了更大的弹性。通过压迫身体来减少肌肤及肌肉的震动而减少能量损耗,并采用计算流体力学和风洞测试技术,在运动员全身最突出的部位(前胸和后背肩胛骨区)增加了微小突起物,以减低阻力<sup>[9]</sup>。

很多海藻和海洋生物经常会附在船体上,影响船的机动性。现有的防污涂料可杀死它们,但对其他海洋生物将造成损害。美国Florida和英国Birmingham大学的科学家找到一种无毒又能阻止藻类附着的新涂层材料。他们发现;大型海洋生物(如鲸鱼等)很容易被其他海洋生物吸附,而鲨鱼一生都生活在海底,为什么没有被海藻或其他海洋生物缠身呢?原来,鲨鱼的保洁机制来自鳞片沟槽中的刺状突起。这种不规则表面使植物孢子等难以附着。科学家用一种塑料与橡胶合成一种被称为PDMSe (poly-dimethyl siloxane elastomers)的仿鲨鱼皮涂层材料,其表面由数十亿个细小的菱形凸起组成,每个小菱形凸起约15  $\mu\text{m}$ (图1(c))。表面的突起会随着电流强度的变化而膨胀或收缩,使它们在船体表面不断进行伸缩运动。这种运动不影响船的航速,但有效地防止淤泥和其他生物对船体的粘附。在实验室测试中,它能使舰艇底/侧部常见的藻类和石莼等海底生物孢子的沉降率下降85%,效果非常明显<sup>[10]</sup>。

## 2 沙鱼的鳞片型非光滑表面及其仿生学应用

鳞片型非光滑表面的几何单元呈鳞片样分布。生活在非洲撒哈拉大沙漠的一种小蜥蜴(Sandskink)像一条鱼游动在沙丘之间,因而被称为沙鱼(sandfish)。沙鱼在沙丘中能快捷地游动得力于其鳞片型皮肤。Rechenberg等观测了沙鱼皮肤的鳞片表面(图2)。在扫描电子显微镜下,鳞片表面呈精妙的纳米结构:规则排列着一排排小棘,小棘高10 nm,前后左右间距50 nm<sup>[11]</sup>。介质(土壤、沙砾)对体表的摩擦阻力( $F$ )可用Coulomb方程( $F = CA + P \cdot \tan \Phi$ )表示,其中 $C$ 为介质黏附力, $A$ 为接触面积, $P$ 为垂直界面正压力, $\Phi$ 为介质对动物体表的外摩擦角<sup>[12]</sup>。在一定介质条件下,黏附程度主要取决于接触面积,所以,减少接触面积是减阻的关键。非光滑表面的凸起有效地减少接触面积。例如,沙鱼的一个小棘顶端的接触面积小于100 nm<sup>2</sup>。其可减少的接触面积约为 $50 \times 50 - 10 \times 10 = 2400 \text{ nm}^2$ ,比光滑表面降低24倍。

沙鱼鳞片型非光滑表面的减阻效应还反映其具有小的滑动摩擦角度和系数。Rechenberg等在2000—2004年实地测量了沙鱼的皮肤摩擦状况(图3(a))。他们制造了小圆柱形的喷砂漏斗,砂粒填入后自动下漏。测试时将漏斗下的测试面(沙鱼的背部或其他对比材料)逐渐倾斜,直到下漏的砂粒沿测试面向下流动,此时的测试面的倾斜角度为滑动摩擦角( $\theta$ ),该材料的滑动摩擦系数 $\mu = \tan \theta$ (图3(b), (c))。结果显示特福龙、尼龙、玻璃和打磨光滑的铁表面的滑动摩擦角 $\theta$ 分别为36°, 30°, 28°和26°,而沙鱼体表的 $\theta$ 为22°,显著低于其他材料(图3(d))。这表明,鳞片非光滑表面在沙砾运动中阻力非常小。仿沙鱼鳞片非光滑表面的材料比打磨得非常光滑的铁制品在沙中运动的阻力下降25%<sup>[13]</sup>。这给了科学家制备新型滑动轴承的理念,并应用于滑沙板的制作。

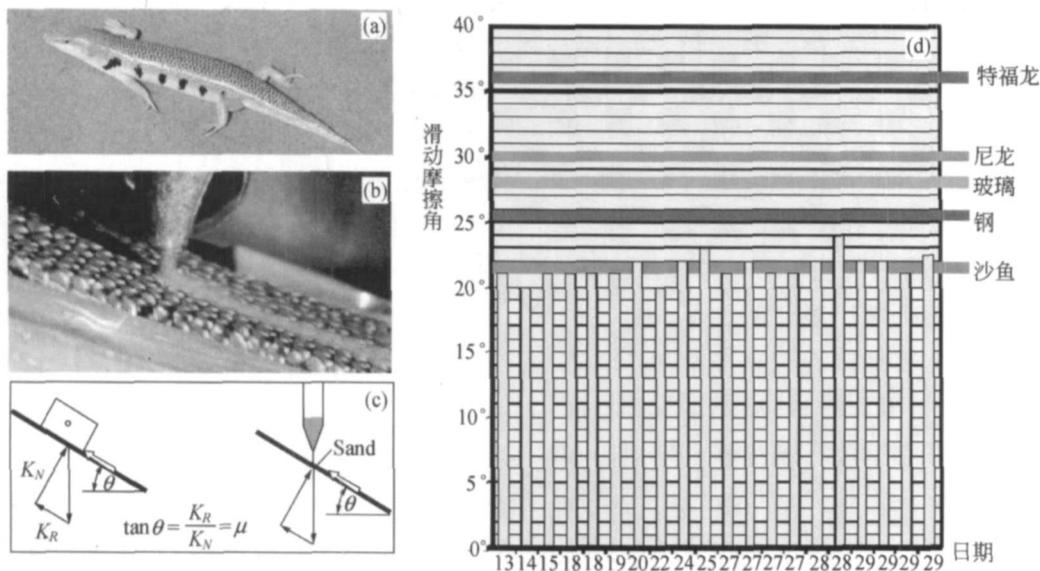


图 3 沙鱼及其沙粒在不同表面滑动摩擦角和系数 μ 的测量(根据文献[ 13] 修改)

(a) 沙鱼; (b) 沙粒在沙鱼表面下滑实验; (c) 滑动摩擦角 θ 和摩擦系数 μ 的测量; (d) 不同材料表面的滑动摩擦角

### 3 沙漠蜥蜴和甲虫的凸包型非光滑表面及其仿生学应用

凸包型非光滑表面的几何单元呈凸包样分布. 沙漠里匮乏淡水, 动物围绕着水展开生存竞争. 为适应这种恶劣环境, 沙漠动物具有特异的觅水本领. 在澳大利亚的沙漠里有一种背上长有许多突起和小倒刺的蜥蜴 (*Moloch horridus*). 这种凸包型非光滑表面不仅是防身武器, 还有特殊的蓄水功能. 夜晚温度低, 皮肤暴露在空气中, 身上的突起能从空气中聚集水分而形成水滴, 并迅速被皮肤吸收. 蜥蜴皮肤的角质层上有无数的小孔, 小孔的开口在小刺之间的凹陷处, 水滴正是通过小孔进入皮肤并在皮肤里朝其头部流动, 进入嘴角两侧由毛细管网汇合成的两个多孔小囊里, 成为一对绝妙的水分收集器<sup>[14]</sup>.

非洲 Namib 沙漠生活着一种甲虫 *Stenocara* (拟步甲科), 鞘翅上有很多突起, 密密麻麻(图 4). 英国牛津大学的 Parker 等发现了这种甲虫背部非光滑表面的亲水性结构和疏水性区, 它们在集水过程中有着不同的作用<sup>[15]</sup>. 利用 Namib 沙漠少雨而大雾常见的条件, 这种甲虫在雾中集水. 表面上直径约 100 μm 的凸包就像一座山峰, 凸包之间的就是山谷. 山峰是亲水结构, 山谷是疏水性区. 电子显微镜下, 可以见到山谷上覆盖着蜡状的微小球状物,

形成防水层. 大雾来临时, 该甲虫身体倒立, 迎着雾气前后转动翅膀, 将雾中的微小水珠凝聚在这种亲水性突起上, 当水滴达一定重量后便因重力而滑落, 顺着“山谷”的疏水区导入甲虫嘴中<sup>[15]</sup>. 科学家们受此启发, 制作了一个“雾气集水器”, 他们在集水器的蜡质集水面上, 安上了一些小玻璃珠. 与普通平面玻璃的集水面或者上蜡的普通集水面相比, 它的集水量较大. 人们还用黑色尼龙网做一个网墙, 支在沙丘上, 网墙下面有集水槽, 槽下有一个水管伸到桶里, 每天可以收集足够的大自然的蒸馏水. 这项技术将来可以用于减少机场的雾, 集水灌溉, 还可用于多雾干旱地区收集饮用水等.

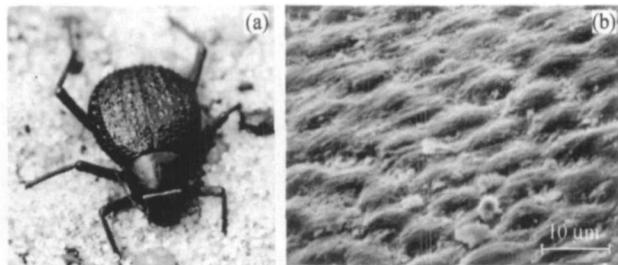


图 4 沙漠 *Stenocara* 甲虫及其鞘翅表面的显微形貌(根据文献[ 15] 修改)

(a) 成年雌性 *Stenocara* 甲虫背部的突起, 直径约 0.5mm, 突起间距 0.5—1.5mm; (b) 电子显微镜下的疏水表面, 直径约 10 μm 的突起呈六边形排列

Cebeci 等做了更精细的仿生学应用<sup>[16]</sup>。他们在半氟硅烷制作的超疏水性网络结构中,用聚酰丙基胺盐酸盐/二氧化硅纳米粒子来修饰聚丙烯酸的微孔结构,在二氧化硅纳米粒子上制作出超亲水的粗糙表面,使人造的表面能像甲虫翅膀样凝聚水气。Cebeci 指出,这种具有亲水/超疏水相间结构的仿生表面可广泛应用于集水、药物释放控制;也可将超亲水多层结构涂布在超疏水表面的凹槽中,应用在开放式微流装置及芯片上。

#### 4 臭蜣螂的凹坑型非光滑表面及其仿生学应用

凹坑型非光滑表面的几何单元呈凹坑状分布。为什么汽车的轮胎、坦克的履带会附着粘附物而蜣螂推粪球时不被粘附?我们发现,蜣螂与土壤/粪

便接触密切的主要表面呈凹坑状。臭蜣螂(*Copris ochus*)头部、胸腹部和足部体表上的凹坑型结构可分为 4 种:简单凹坑、环状凹坑、带中央隆起的凹坑和沟纹状凹陷。简单凹坑,坑深约 16—30 μm,长约 50—100 μm,广泛分布于除腹部以外的各部分,特别是与土壤/粪便接触密切的头部和俗称“推粪板”的上唇基(clypeus);环状凹坑,直径约为 8—9 μm,凹陷中央多有短刚毛,分布在前胸背板的内侧;带中央隆起的凹坑,凹坑形状像铜钱样,深约 25—35 μm,长径 50—100 μm,中央呈小丘状或乳头状隆起,隆起基部直径约为 33—43 μm,高 10—12 μm。在隆起中央有一根短刚毛,分布在前胸背板的外侧缘;沟纹状凹陷,凹陷呈现念珠状,分布在鞘翅的背面(图 5)<sup>[12,17]</sup>。

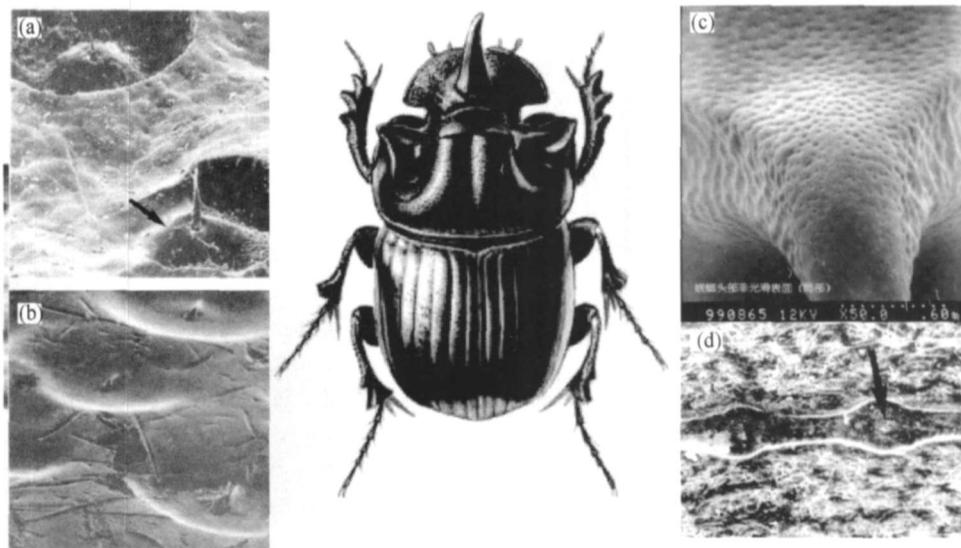


图 5 臭蜣螂(*Copris ochus* Motschulsky)凹坑型非光滑表面<sup>[17]</sup>

(a) 分布在胸节外缘的带中央隆起的凹坑; (b) 分布在胸节内部的环状凹坑; (c) 分布在头部的简单凹坑; (d) 分布在鞘翅背面的沟纹状凹陷

任露泉等选择与蜣螂推粪球行为最相关的头部唇基进行研究,仿其非光滑表面设计的推土板和犁壁具有良好的脱附作用。在相同土壤的耕地实验中,与普通 20 钢光滑犁相比,仿生 20 犁降阻 12.7%;与普通 35 钢光滑犁相比,仿生 35 犁降阻 18%,省油 12.6%<sup>[18]</sup>。蜣螂非光滑表面的减粘机制在于它有效地减少土壤粘附表面,在凹坑产生有气、无土和无水区,限制连续水膜的形成,降低界

面的空气负压。

为了使高尔夫球飞得更远,人们把高尔夫球表面做成了凹坑型非光滑表面(图 6)。大多数高尔夫球有 300—500 个凹坑,坑深约为 0.025 cm。凹坑状表面降阻的机制是减少尾流区。高尔夫球飞行的前方有一高压区,气流在球表面形成薄薄的边界层,空气流经球的后方时,边界层与球体分离,在球的后方产生一个紊流尾流区,紊流的扰动导致球

体后区压力较低,尾流区越大,压力就越小,对球的阻力就越大.光滑球面的界面层容易剥离而产生大的尾流区;凹坑使空气形成的边界层紧贴球的表面,使平滑的气流顺着球形多往后走一些,减小尾流区,增加球后方的压力,使球飞得较远.笔者参观了吉林陨石馆,这里陈列着1976年3月8日在吉林地区降落的许多陨石,其中最大的一块重量为1770 kg.有意思的是,许多陨石都是典型的凹坑型表面(图6).陨石来自太空,在高速坠落过程中与大气层激烈撞击和摩擦,在这种条件下形成的凹坑型表面应该是耐摩擦、耐磨损和耐高温的.这是非光滑表面特异性的天证.我们相信,这些非光滑表面的特性在航天、航空和其他机械工程领域中有广泛的应用前景.

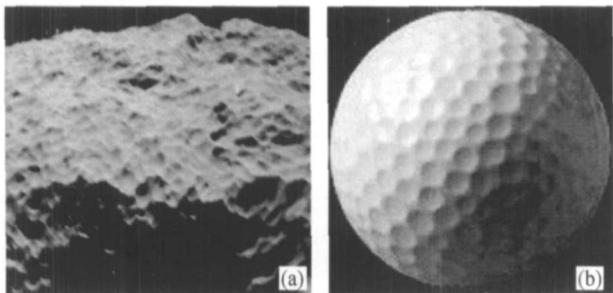


图6 吉林陨石馆藏的最大陨石的表面(a)和高尔夫球表面(b)

### 参 考 文 献

- 1 丛茜,任露泉,吴连奎.几何非光滑生物体表面形态的分类和研究.农业工程学报,1992,8(2):7-12
- 2 Walsh MJ, Michael J. Riblets as a viscous drag reduction technique. AIAA Journal, 1983, 21: 485-486
- 3 Gaudet L. Properties of riblets at supersonic speed. Appl Sci Res, 1989, 46: 245-254
- 4 Lu chini P, Manzo F, Pozzi A. Resistance of a grooved surface to parallel flow and cross flow. J Fluid Mech, 1991, 228: 87-109
- 5 Bruse M, Bechert DW, Hoeven JGT, et al. Experiments with

- conventional and with novel adjustable drag-reducing surface. In: Near-Wall Turbulent Flows. Amsterdam: Elsevier, 1993, 719-738
- 6 Bechert DW, Bruse M, Hage W, et al. Experiments on drag-reducing surface and their optimization with an adjustable geometry. J Fluid Mech, 1997, 338: 59-87
- 7 李育斌,乔志德,苗福友.沟槽面湍流边界层减阻特性研究.气动实验与测量控制,1995,9(3):21-26
- 8 Lee SJ, Jan YG. Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film. J Fluids and Structures, 2005, 20(5): 659-672
- 9 Bechert DW, Bruse M, Hage W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin. Experiments in Fluids, 2000, 28: 403-412
- 10 Wilson LH, Schumacher JF, Carman ML, et al. Antifouling potential of lubricious, micro-engineered, PDMS, elastomers against zoospores of the green fouling alga ulva (*Enteromorpha*). Biofouling, 2004, 20(1): 53-63
- 11 Rechenberg I, Khyari ARE. Friction and wear of sandfish in the Sahara (in German). www.bionik.tu-berlin.de/institut/festo04.pdf
- 12 孙久荣,程红,丛茜,等.蜚蠊粘脱附的仿生学研究.生物物理学报,2001,17(4):785-793
- 13 Rechenberg I. Tribological characteristics of sandfish. In: Nature as Engineer and Teacher: Learning for Technology. From Biological Systems. Shanghai, 2003, Oct. 8-11
- 14 Clemente CJ, Thompson GG, Withers PC, et al. Kinematics, maximal metabolic rate, sprint and endurance for a slow-moving lizard, the thorny devil (*Moloch horridus*). Australian Journal of Zoology, 2004, 52: 487-503
- 15 Parker AR, Lawrence CR. Water capture by a desert beetle. Nature, 2001, 414: 33-34
- 16 Zhai L, Berg MC, Cebeci FC, et al. Patterned superhydrophobic surfaces: Toward a synthetic mimic of the Namib desert beetle. Nano Letters, 2006, 6(6): 1213-1217
- 17 程红,孙久荣,李连桥,等.臭蜚蠊体壁体表结构及其与减粘脱附发关系.昆虫学报,2002,45(2):175-181
- 18 Ren LQ, Tong J, Li JQ, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: A review. J Agriculture Engineering, 2001, 79(3): 239-263