仿生摩擦学研究及发展

戴振东① 佟 金② 任露泉②

(① 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016; ② 吉林大学地面机械仿生教育部重点实验室, 长春 130022.
E-mail: zddai@nuaa.edu.cn)

摘要 在进化和生存竞争中, 生物形成了具有优异摩擦学性能的优化的结构设计、精巧的材料拓扑和多功能表面织构, 成为仿生摩擦学的楷模. 本文提出仿生摩擦学的定义和学科基础, 从流固界面的黏附与自清洁、生物脚掌与固体表面的黏附、生物表面磨损特性及仿生耐磨设计、流固界面的黏附及仿生等方面回顾了仿生摩擦学的研究和进展, 讨论了仿生摩擦学进一步发展存在的问题.

关键词 摩擦学 仿生学 自清洁 黏附 摩擦 生物摩擦

摩擦学(Tribology)是研究作相对运动的相互作用表面及有关理论和实践的科学技术 [1]. 运动是动物捕食、逃逸、生殖和繁衍等行为的基础, 因此从最原始的生物形成的那一天起, 摩擦学问题就一直伴随其演化和进化的全过程. 在 35 亿年的进化和生存竞争中, 动物形成了许多优异的几何结构、巧妙的材料拓扑、简约而有效的控制方式和功能丰富的表面织构. 这些结构、材料、表面及其运动控制的方式, 使动物运动平稳性、灵活性、健壮性、环境适应性及高能源利用效率等方面优于现代机械系统 [2]. 例如在摩擦驱动方面, 猫脚掌的精巧结构, 使之得以快速、无声的运动, 这需要脚掌和接触表面间具有高的摩擦力和低的冲击力, 研究动物脚掌几何构形和材料物理力学性能的拓扑特征对汽车轮胎的改进设计具有重要的参考价值[1]; 在润滑方面, 人体关节的摩擦系数可以低到 0.005, 是普通中碳钢间摩擦系数的 2%[3]; 沙鱼的皮肤结构能够降低它在水中运动时的阻力, 其表面织构的设计已经被用到游泳运动员的服装设计, 可降低阻力 4%~8%[4]; 在耐磨性方面, 生物体系的磨损自诊断能力一直为人们所重视, 如手掌的接触部分会因为摩擦而产生老茧, 达到抗磨的目的. 同样植物在长期的演化中, 也形成了许多具有优异摩擦学特性的表面织构和材料拓扑, 如竹子的增强相结构, 猪笼草的唇边抗黏附织构等. 这些具有优异摩擦学性能的生物体的结构设计、材料拓扑和表面织构的规律, 成为现代摩擦学设计的楷模, 因此被称为科学的永无止境的前沿 [5].

本文概述仿生摩擦学的学科基础, 回顾仿生摩擦学研究的主要进展, 提出仿生摩擦学发展面临的主要问题, 并试图探讨仿生摩擦学未来几年最有可能取得突破的领域.

1 定义、学科基础及历史回顾

摩擦学具有学科前沿性、广泛实用性及多学科交叉的特点, 其学科基础涉及到力学、材料科学、制造科学和机械设计等领域. 从科学内涵看, 研究内容包括认识和理解生物表面润湿、黏附、摩擦、润滑、磨损的生物物理机制; 包括不同工作条件下, 仿生原则的建立和仿生设计的实现等. 从研究对象看, 涉及到固-固表面、固-液界面和固-气界面间的相互摩擦作用和由此产生的磨损. 与生命科学的交叉使摩擦学的研究领域和科学基础更加广阔. 通过对生物体系的减摩、抗黏附、增摩、抗磨损及高效润滑机制的研究, 从几何、物理、材料和控制等角度借鉴生物体的成功经验和创成规律, 研究、发展和提升工程摩擦副的性能, 这一领域称为仿生摩擦学. 而将摩擦学的理论、技术和方法应用到生物体系(主要是人体)的摩擦副, 研究生物体系内或生物外表面的摩擦学问题, 如人体置换关节的摩擦、磨损及其与生物组织的相互作用, 血液在人造心脏瓣膜上的黏附, 牙齿的磨损和由于摩擦造成的皮肤损伤等领域, 称为生物摩擦学.

组成生物材料的主要化学成分是轻元素(碳、氢、氧、氮等), 在生物进化、演化和生长的过程中, 生物对其组成材料的化学成分的选择是非常保守的, 因此生物体和生物材料实现优化的主要途径是材料拓扑结构的优化和表面织构的优化. 上述优化通过几何结构的演化实现. 而人们在设计中, 最难于实现创新的方面是对几何构形的优化, 因为几何构形具有无穷的选择性, 而且难于发现其中的规律性. 所以仿生摩擦学研究的重点是: (ⅰ) 评价和揭示生物材料的摩擦学性能(减摩、耐磨、减黏、增黏等); (ⅱ) 研

1) 杜家纬. 21 世纪仿生学研究对我国高新技术产业的影响. 220 次香山科学会议, 北京香山, 2003

究具有优异摩擦学性能的生物结构和材料的宏观几何、材料拓扑、表面织构等几何构形的规律性; (iii) 研究生物结构和材料的创成规律及其仿生制造技术.

2 重要研究进展及发展评述

2.1 流固界面的黏附与自清洁仿生

从严格意义上讲, 以液体在固体表面的润湿能力及固体表面的织构对润湿性的影响为特征的自清洁技术并不属于摩擦学研究的范畴, 但这种特性与润滑剂对固体的润湿有密切关系. 光合作用是植物生长的能量-质量转化环节, 叶子是光合作用的器官, 因此保持叶子的洁净对植物生长至关重要. Barthlott和Neinhuis[6]发现水在荷叶表面有很高的接触角, 这种超常的疏水性, 源于荷叶表面复杂的三维介于微米-纳米尺度的表面织构(图 1). 这种超疏水表面, 使水滴和沾染物与荷叶表面的实际接触面积变得很小; 水在荷叶上形成水滴, 实现对污染物的润湿和黏附, 当水滴从荷叶上滚动时便将污染物颗粒带走, 形成降雨即可自清洁的表面, 并称这种现象为“荷叶效应”(lotus-effect). 他们测定了考察了 200 多种疏水性植物, 其接触角均大于 150°[7], 这种疏水性是生物材料的表面微纳米织构与蜡质晶体材料固有的疏水性结合的产物. 其理论基础是物理化学中研究的润湿滞后. 在德国该技术已经获得200多项专利, 在纺织品、油漆、玻璃、瓷砖和塑料等领域得到广泛应用. 动物的许多部位同样具有显著的疏水性, 如水黾脚掌的疏水性使它能够在水面上健步如飞 [8]. 对 97 种昆虫翅的表面微观结构和水在表皮上的润湿性研究发现, 一些昆虫翅表面呈亲水性, 而另外一些翅表面呈疏水性, 具有强疏水性的翅表面在雨水或露水作用下同样具有自清洁功能 [9]. 臭蜣螂前胸背板表面具有91°~106°的水接触角 [10], 这种疏水性与其表面非光滑结构相结合, 使臭蜣螂表面在重污染环境下具有明显的抗黏附功能.

在MEMS器件中, 表面力(毛细力和Van der Waals力等)是主要的运动阻力源, 而较高的疏水性对于提高 MEMS 器件的性能、降低 MEMS 器件的能耗、提高可靠性具有重要价值. 但类似于荷叶的表面织构, 由于接触面积太小, 可能不能直接用于 MEMS 器件的表面设计, 如何利用其良好的自清洁功能, 同时具有高的承载能力, 是需要大力研究的内容.

在自清洁表面研究和应用开发方面, 存在的主要问题是:

(i) 对大型结构表面, 未来研究的核心是取得具有自主知识产权的制造方法和相关材料, 获得仿生微结构表面的低成本制造技术.

(ii) 对微结构表面和大载荷下的表面, 抗黏附和自清洁技术的基本理论问题需要进一步探索, 相关的微制造技术还不够成熟.

2.2 生物脚掌与固体表面的黏附及其仿生技术

固体间的黏附具有广泛的工程和生物学背景. 各种车辆的驱动和从动轮与支撑面间的附着行为, 对驱动效率和车辆运动的稳定性影响很大 [11], 细胞对固体的黏附是其生长的必要条件 [12]. 自然界中脚掌对地面的附着对陆上动物的运动至关重要. 若要像蚂蚁、苍蝇、蜜蜂、蝗虫、甲虫、蜘蛛和壁虎等动物那样具有在各种各样的表面上的运动能力, 脚掌的设计就成为核心技术之一. 为此这类动物演化形成了各种保证良好附着的机构和微结构. 从形态上分, 动物的附着器官可以分为三种: 爪子、光滑爪垫和刚毛爪垫. 在粗糙表面上动物使用爪子, 爪子的附着能力与表面粗糙度、爪子尖端的几何尺寸及摩擦系数有关 [13]; 在光滑表面上使用光滑或者刚毛爪垫, 光滑的爪垫呈现软且可变形的表面, 例如蟑螂、蜜蜂、蝗虫和臭虫的爪垫(图 2); 这类爪垫与接触表面的黏附力以表皮与外物表面之间的分泌液膜作为介

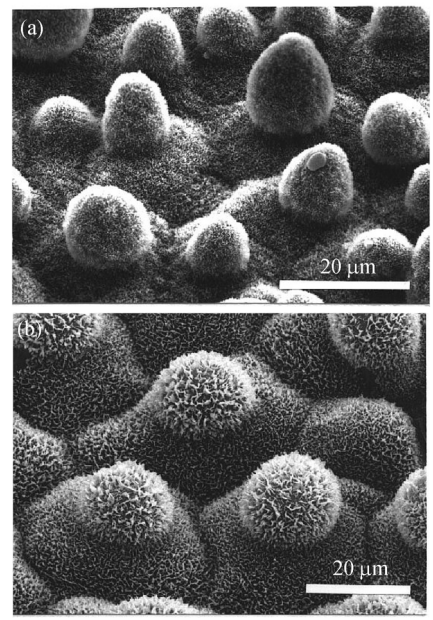


图 1 莲属 *Nelumbo nucifera* (a)和芋 *Colocasia esculenta* (b)的表面形态

质. 如蝗虫爪垫与外物表面之间存在黏性液体, 即存在所谓的湿黏附接触, 界面接触以爪垫表皮孔道分泌的黏性流体为介质 [14]. 这种脚掌宏观结构的有限元分析表明, 在接触过程中会产生冗余的摩擦力, 使得脚掌对表面的接触具有高度的稳定性 [15]. 昆虫的幼虫采用类同的原理实现黏附. Hasenfuss[16]用光干涉方法研究了 71 种鳞翅类的幼虫借助于薄液体油脂层对光滑表面的黏附. 物理化学理论表明, 由于表面张力和黏度的作用, 存在于两个光滑的刚性固体之间的液体膜将产生由界面膜的毛细引力引起的法向黏附力. 而昆虫幼虫的附着器(脚掌)对表面的黏附和毛细力的理论有一定的差异. 原因有两个: (ⅰ) 动物黏附垫是由很软的黏弹性材料组成, 其接触力学和接触几何与经典的弹性接触有很大的不同; (ⅱ) 昆虫脚掌脱附的过程是一个逐渐剥离的过程, 爪垫表面的某些部分还可能与接触表面上的凸体直接接触.

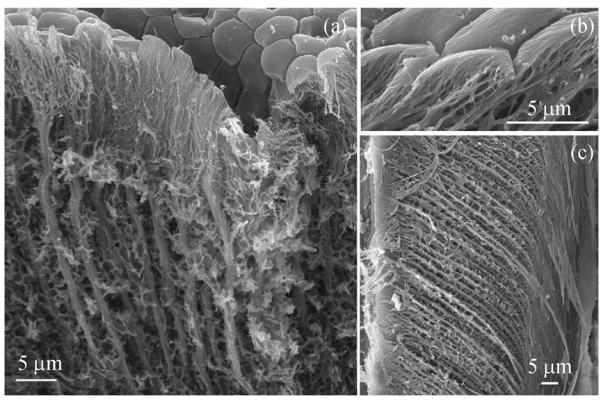


图 2 蝗虫爪垫的微结构

表面由许多六角形结构组成(b), 表面下为直径 0.08 μm 垂直于外表面紧密排列的棒状组织, 该层的厚度为 6~10 μm(a), 次表面为相互平行并偶尔有所交联的树丛结构, 树丛直径为 1.12 μm, 延续深度 40~50 μm(c)

刚毛爪垫覆盖有细长、可变形的刚毛(图 3)[17], 例如壁虎、苍蝇、某些甲虫和蜘蛛的爪垫, 这里每个刚毛具有很好的变形能力, 而使每个刚毛能够与表面形成众多的微接触区. Peressadko和Gorb[18]认为刚毛尖端部位总体上是平的, 构成端部接触单元(terminal elements, TE), 其尺寸随着动物质量的增加而降低, 对金龟子 7 μm, 苍蝇 1~2 μm, 壁虎 10~100 nm. 按照Autuman的观点, TE与表面形成Van der Waals力. 整个垫的黏附取决于TE数量和与外物表面产生紧密接触的能力. TE数量对于不同动物或同种动物的不同个体是不同的, 如壁虎约为 50 万个. 昆虫依靠冗余的黏附机构, 实现不仅能附着在光滑的表面, 也能够附着在粗糙表面上. 如蝗虫同时具有爪子和光滑脚垫, 壁虎同时具有爪子和刚毛脚垫.

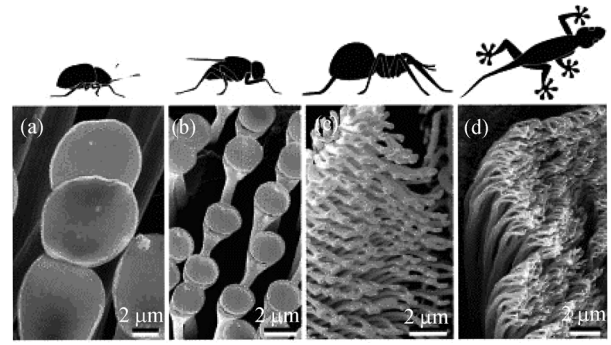


图 3 几种动物爪垫的纳米尺度刚毛结构

(a) 甲虫; (b) 苍蝇; (c) 蜘蛛; (d) 壁虎

基于几何仿生的理念和黏着接触的JKR模型 [19], 国内外学者广泛开展了刚毛型黏附脚掌的研制, 认为仿生刚毛直径越小, 能够产生的黏附力就越大. Gorb等人 [20]用聚乙烯硅氧烷(PVS)和模压方法, 研制了高 0.4 mm、断面 0.250 mm × 0.125 mm的“人工刚毛”, 在预载荷 150~400 mN下, 黏附力达 60 mN, 单个仿生刚毛的黏附力约 0.56 mN. 这种仿生结构的黏附性能高于光滑表面. 用覆膜方法制得的 4 面锥形的刚毛 [21]和用电子束加工方法获得的柱形刚毛都证实刚毛几何效应的重要性, 但所测得的黏着力没有达到预测值 [22]. 图 4(a)为MIT等单位用腹膜方法联合研制的刚毛阵列, 其黏附力远低于生物体的黏附力. 图 4(b)为电子束方法获得的刚毛阵列, 可见存在刚毛间粘连的问题, 而相互黏结的刚毛阵不能产生预期的黏附力.

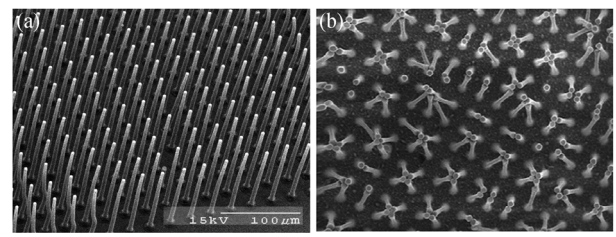


图 4 仿生刚毛群

(a) 覆膜法制得的阵列; (b) 相互粘连的刚毛

壁虎等刚毛型附着器的工作机理中是否包含生物学的因素? 黏附力学的测定表明, 壁虎脚底刚毛为活的细胞, 且活体壁虎脚爪和死体脚爪间的黏附力有显著差异 [23].

仿刚毛型脚掌的研究和研制方面存在的主要问题如下:

(ⅰ) 刚毛型脚掌附着的生物及物理机制有待于彻底澄清, 其中活体效应的影响特别需要关注, 相关研究仪器的研制也具有迫切的需求.

(ⅱ) 刚毛型脚掌的微制造是这类仿生器件研制的瓶颈, 新的制造原理、技术和工艺保证体系还没有建立.

(ⅲ) 纳米级刚毛群的自黏附问题还没有得到解决, 这可能成为这类仿生脚掌研究的关键问题之一.

(ⅳ) 对“光滑”附着器的仿生研究开展不够, 这类结构在高承载方面可能具有重要价值. 仿生表面附着结构的几何构形设计、单元材料的力学性能、表面能、毛细作用等因素对黏附性能的影响缺乏系统的研究.

2.3 生物表面磨损特性及仿生耐磨技术

生物体外表面材料在与外界环境接触的过程中, 发生磨损是必然的. 生物体在亿万年的演化和进化中, 形成了与结构体所受到的应力状态向适应的材料拓扑结构, 一般而言, 受力大的部分(高应力区)材料的微结构更加致密, 强度也更高. 低应力区材料的微结构比较疏松, 强度较低. 这样的结构, 使材料得到充分的利用, 达到优化的目的. 另一方面, 生物体通过表面织构的优化, 达到提高耐磨性的目的.

生物的耐磨表面包括昆虫和鸟类的脚爪、动物的牙齿、毛发、鸟类的羽毛、鱼和爬行类的鳞片、哺乳动物的脚底或者蹄子等, 其主要生化成分为角蛋白、甲壳素和黏性蛋白. 相关的动物包括在土中穿行的穿山甲, 在沙地等环境下自如运动的蛇等.

图 5 为甲虫脚爪的截面, 这种需要高度耐磨性的部位, 材料的微结构表现出明显的拓扑特征. 这种硬质材料的拓扑特征在牙齿上也有同样的特征.

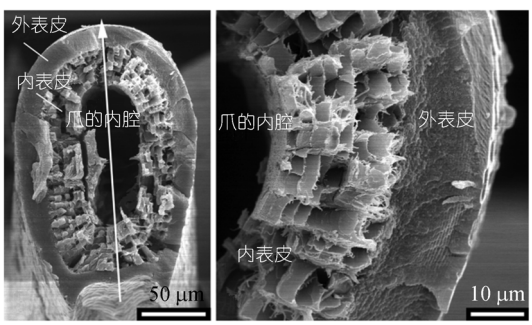


图 5 甲虫脚爪截面的微结构

生活在Sahara沙漠的沙鱼(sandfish), 经常在沙中潜行, 其表面具有优异的抗沙冲蚀的能力. 在同样条件下, 经 10 h冲蚀实验, 沙鱼表面的冲蚀磨损低于钢和玻璃表面 [24](图 6). 这种优异的耐冲蚀性能, 可能与沙鱼表面的织构特征、材料成分及其微结构, 甚至下表层的组织结构和材料强度拓扑等具有相关性. 这种结构特征的耐磨表面在蛇和穿山甲上同样有体现, 但目前缺乏深入的研究.

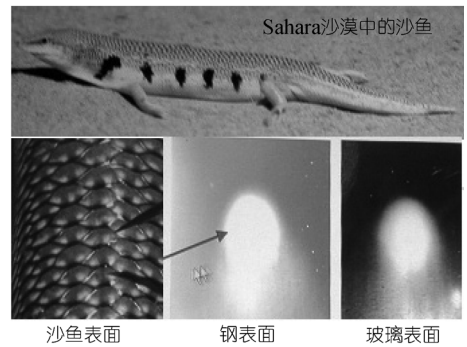


图 6 沙鱼的耐沙冲蚀性能

贝类生活在海滩环境, 受到海水和沙石的冲蚀. 作为生物陶瓷材料贝壳具有良好的耐磨性能, 有些贝壳的干滑动耐磨性可与类金刚石碳涂层相比. 贝壳表面具有各种棱纹型结构, 因此在泥沙磨料冲蚀条件下的磨损行为首先受控于表面织构, 当织构表面被磨去之后, 才转入纯材料磨损阶段.

以泥沙、煤粉和粮食等颗粒状物料为作业对象的工程机械, 耐磨性设计是其重要环节. Tong等人 [25]研制了基于几何非光滑织构表面耐磨性仿生的高耐磨表面, 实验发现这类设计具有减小土壤滑动阻力和高耐磨性双重优点, 结果表明处于前列的凸包之磨损较快, 但总体磨损速率较低的特点.

目前高耐磨性表面的仿生设计还没有形成系统的理论, 可见的研究尚处于分散实验阶段, 预期未来几年以下几个方面可能取得重要进展:

(ⅰ) 不同生物特征的表面(硬质表面和软质表面)材料力学性能拓扑分布的规律性.

(ⅱ) 拟生物材料工作环境条件的实验评价技术, 生物材料实际磨损特征及其失效机制.

(ⅲ) 生物材料磨损自诊断和自修复中的传感、控制和物质输送机制.

(ⅳ) 仿生耐磨表面的制造工艺、技术和材料.

(ⅴ) 颗粒状介质与粉红色表面相互作用的数值模拟技术.

2.4 流固界面的摩擦及仿生

固体与流体表面的摩擦是典型的摩擦学问题之

一，在国民经济的许多领域具广泛的背景．如水下航行器和船舶的减阻、流体在管道内的输送等．因此以水生动物为仿生对象的减阻设计具有重要意义．

动物学的研究表明，许多水生动物具有并非光滑的表皮形态．已经证明鲨鱼表皮的肋条结构(如图7)具有很好的减阻功能，以此为基础开发的仿生表面织构被用于降低阻力，以提高游泳运动员的成绩；用透明塑料薄膜制成平行于流动方向的肋条，可使飞机阻力减小 8%，这意味着节省燃油消耗约 1.5%[26]．基于鲨鱼皮表面织构的减阻表面结构已经完成飞机模拟飞行实验(图 8)[27]．

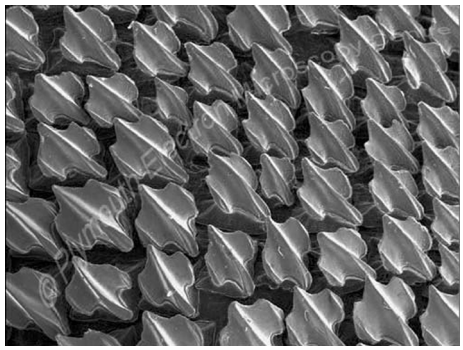


图 7　鲨鱼皮上的肋条形态

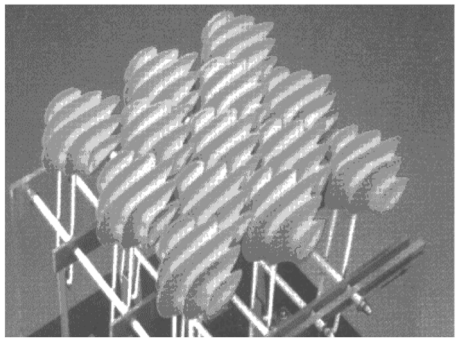


图 8　飞机表面仿生减阻结构模型

表面织构对流固阻力影响的研究已经有了多年的研究积累．风洞实验和飞行实验结果已证明从低速到中等超音速马赫数肋条减阻的有效性．在二维结构上优化的肋条结构，在低速时减阻 5%~8%[28]．图 9 是一种减阻肋条几何模型 [29]．此外方棱柱的减阻研究也有研究 [30]．有报道肋条减阻的最大减阻效果是 12%．

V-型减阻是表面减阻的另一种表面织构形式(图10)．研究表明，在飞行、燃料管道输送等高雷诺数情况下，涡流阻力是主要的阻力源 [31]．实验表明，阻力对V-型突起分布的变化具有高度的敏感性，随机排列与规则的排列相比，阻力更低，效果可达到 12%以上，与数值实验分析结果相一致．肋条减阻和V-型突起减阻在机理上有差别，这从一个侧面说明了涡流的复杂性．表面突起减阻方法在飞机上应用涉及成本问题，对于巡航飞行的亚音速飞机而言，表面摩擦阻力是飞机全部阻力的 30%，随机突起能够减阻 3%左右，可使单个飞机的运行成本减小 0.3%左右，就全世界而言这应该是一个巨大的节约技术．但考虑维修和安全因素，总体上可能会导致成本的增大，因此认为这类仿生表面不大可能用于商业飞机．

仿荷叶表面微结构是流固界面减阻另一种织构形式．利用铜箔并经表面处理，涂覆一层疏水材料粒子，其微结构单元(颗粒)具有约 300 nm的高度和宽度，研制成仿生表面(图 11)[32]．当水与这种表面接触时，微结构与水表面张力的综合作用使得在微结构之间产生空气截留，这样当水在表面上流过时，水会有效地越过空气层，由于空气的动态黏度(1.8×10^{-5}

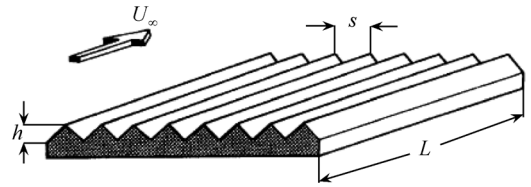


图 9　一种肋条几何模型

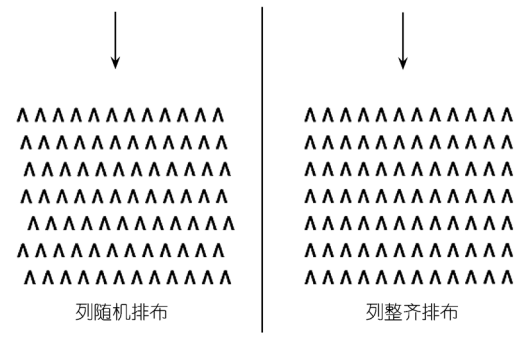


图 10　减小涡流阻力的 V-型结构表面

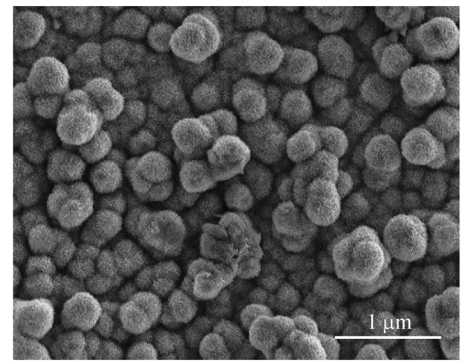


图 11　微结构皮肤表面 SEM 照片

kgr/(m·s))明显小于水的动态黏度(10^{-3} kgr/(m·s)), 表面摩擦减小, 进而减小了流体动力学阻力. 实验证实这种结构表面可减阻 20%.

流固界面的减阻机制还没有形成系统的理论, 大量水生动物和飞行动物的减阻织构和减阻机制还没有被揭示. 仿生减阻在船舶、水下航行器和各种飞行器上具有广泛的应用前景. 未来具有挑战性的研究内容可以包括:

(ⅰ) 水生动物减阻机制的研究. 其中硬性水生动物的减阻机制对工业减阻更加具有借鉴意义, 需要大力推进. 而柔性减阻机制的揭示和创成方法的实现, 可能获得更好的结果.

(ⅱ) 织构减阻的物理模型、数学模型及其仿真技术. 该工作大幅度降低仿生设计的成本, 进而获得不同条件下(如黏度、外界压力、流速等)仿生织构的最佳形式.

(ⅲ) 高性能织构的制造技术及其织构的智能化.

3 仿生摩擦学的发展

从生物的生长过程看, 在进化和演化过程中实现对生物材料化学成分的变化是非常困难的. 因此生物体适应环境、提高材料利用率及节约能源的主要途径是实现对材料拓扑结构优化和表面织构的优化. 这种优化主要表现为材料拓扑结构的复合化和非均质化、表面织构的特异性. 材料拓扑结构设计的规律性及其分析手段还没有得到很好的发展, 表面织构的特异性更包涵着许多人们尚未认识的科学内涵. 因此我们认为, 仿生摩擦学的未来有以下几个方面值得特别重视:

(ⅰ) 生物体优异摩擦性能的生物物理本质 对生物优异摩擦性能实现的生物物理和生物化学的揭示在仿生设计中具有核心的地位. 目前已经揭示"荷叶效应" 的微纳尺度表面织构和材料特性造成的润湿滞后是自清洁的基本机制, 在此基础上已经实现了"源于自然, 超越自然"的仿生理念. 但仍有大量生物摩擦学的关键科学问题没有得到很好的揭示, 如壁虎脚底毛快速黏附和脱附的生物物理机制, 刚毛结构及其分布的规律与黏附和脱附间的关系. 对生物体摩擦性能本质的认识将为建立摩擦学仿生设计的相似性原则奠定基础.

(ⅱ) 仿生对象的选择原则 生物体种类繁多, 生存环境不尽相同, 仿生摩擦学的首要任务选定仿生研究的对象, 即揭示生物体在特定生存环境下的摩擦性能, 获得可以和特定工业背景相比拟的仿生对象. 如水中航行体这种固液界面的减阻仿生以金枪鱼等为仿生对象, 3DOF 机器人固固界面的黏着以壁虎和苍蝇等为仿生对象, 在一定物理尺度一定条件下仿生设计的原则需要开展广泛深入的研究. 例如固液界面的摩擦问题, 通常以同样雷诺数下的物理行为作为设计的基础. 对于固-固界面的黏着和脱附问题, 其相似性设计的物理机制、特征物理测量等问题还需要探索. 观察、测试和分析生物体间、生物体与非生物体间接触面几何织构和材料物理化学性能的变化规律, 宏观-微观几何构形的跨尺度变化规律, 探索生物出现上述变化与其宏观行为之间的联系, 如在运动、附着和承载等方面发挥的作用及机理, 确定作用机理中哪些属于生命体本身的反应, 哪些属于调控性机械反应, 从结构、物理、化学及材料等不同层面展开机械部件的仿生. 这方面特别需要强调了解动物的系统分类和动物行为规律.

(ⅲ) 生物体表面织构与生物材料性能拓扑的规律性及其创成技术 摩擦学是研究相互运动表面间作用规律的科学, 生物体的外表面和有相对运动的内表面织构已经有了大量的观察, 但对这类织构的生物学功能研究还不够系统, 织构宏-微观几何的规律性缺乏定量的研究, 织构的形成与生物体生存环境间的依存关系尚没有很好的揭示, 织构所引发的生物物理效应还没有系统的研究. 微纳尺度下, 表面织构的创成技术有待于突破. 例如生物体表面的毛状结构, 有时表现出增加黏附, 有时则是减小黏附, 其中的转化规律如何? 已有研究揭示, 生物表面织构的规律具有毫米、微米到纳米跨尺度的特点, 其中的分形特征有待于揭示, 而这类结构与环境的相互作用需要工程科学家和生物学家的协作努力方可能深入. 生物表面形态和生物材料的生长方式为仿生摩擦学结构表面和仿生摩擦学材料加工提供了一个可供借鉴的方法策略, 但更重要的是需要用现代制造技术来实现仿生表面. 摩擦学表面仿生的最终发展依赖于仿生表面的低成本创成技术的研究和仿生材料制备技术的新发展. 快速成型技术和现代表面加工技术(如激光加工)为仿生摩擦学结构表面研究与开发提供了加工手段, 但精度还不能满足需要. 在仿生摩擦学表面制备技术方面, 一种方法是将表面结构加工技术与材料加工技术相结合, 在材料(包括涂层)加工过程中实现所需要的表面微观结构, 即通过材料的特定生长方式实现与模拟生物系统的材料和形态结构, 使其尺寸及其分布的优化形式满足对表面摩擦学功能

的需求, 例如表面矿化、自组装和表面晶化, 这类方法对于从材料技术与表面结构技术上实现所希望的摩擦学性能或功能是非常重要的技术手段.

(ⅳ) 创新测试方法和研制测试仪器 近年来微纳加工、信息和生物技术的发展, 使定量、动态和微纳尺度上的测试和分析成为可能. 例如原子力显微镜(AFM)能够做到纳米几何尺度和纳牛力尺度的测量. 非接触测量技术(白光干涉和共聚焦显微镜等)能够实现跨尺度的几何测定(从纳米到毫米). 但鉴于仿生对象及其生存环境的多样性, 针对不同生物的实验方法和测试设备的研制在未来具有迫切的需求, 现有测量仪器多数还难于实现在体的测试, 对生物组织相关的物理规律的认识还需要相关设备加以深化. 例如土壤动物在生存环境下的运动接触力学, 3DOF 动物运动过程的四维黏附和接触力学, 飞行过程的阻力测试, 水生动物的运动阻力测定, 及活体生物组织的机械力学性能的分布规律等.

(ⅴ) 仿生摩擦学的人才队伍建设 仿生的核心是理解自然、学习自然和改造自然, 这一过程需要生命科学、自然科学和工程科学的交融和渗透. 具有交叉学科背景的科技人才匮乏, 跨学科的人才培养十分迫切. 建议从如下几个方面开展工作, 促成跨学科人才的快速成长. 1) 对第一线的研究人员, 从研究经费的支持方面给予适度倾斜, 通过加大对跨学科课题的支持, 培养这部分力量成为国际学术交流和原创技术形成的主力军. 政府主导的研究基金的管理机制创新迫在眉睫; 对博士后研究人员和博士研究生, 鼓励开展跨学科的研究和工作; 对研究生和本科生, 开展跨学科的素质教育. 2) 强化国际学术交流, 高起点建设我国的仿生摩擦学研究基地.

致谢 本工作受国家自然科学基金重点项目(批准号: 60535020)、杰出青年基金(批准号: 50025516)和国家高技术研究发展计划(编号: 2002AA423230)资助.

参 考 文 献

1 Czichos H, 著. 刘钟华, 王夏鋆, 陈善雄, 等, 译. 摩擦学——对摩擦、润滑和磨损的科学技术的系统分析. 北京: 机械工业出版社, 1984. 10
2 Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: An integrative view. Science, 2000, 288(7): 100—106[DOI]
3 Furey M J, Burkhardt B M. Biotribology: Friction, wear and lubrication of natureal synovial joints. Lubr Sci. 1997, 9(3): 255—271[DOI]
4 张华祝. 像鲨鱼一样游泳高科技泳装蛊惑难挡. 国外科技动态, 2004, 8: 24—25
5 Lu Y X. Significance and progress of bionics. J Bionics Eng, 2004, 1(1): 1—3
6 Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. Planta, 1997, 202: 1—8[DOI]
7 Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. Annals Botany, 1997, 79: 667—677[DOI]
8 Gao X, Jiang L. Water-repellent legs of water striders. Nature, 2004, 432: 36[DOI]
9 Wagner T, Neinhuis C, Barthlott W. Wettability and contaminability of insect wings as a function of their surface sculptures. Acta Zoologica (Stockholm), 1996, 77(3): 213—225
10 Tong J, Sun J, Chen D H, et al. Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements. Soil Tillage Res, 2005, 80: 1—12[DOI]
11 韩建保, 张鲁滨, 李邦国. 轮胎路面附着系数实时感应识别系统. 车辆与动力技术, 2005, 2: 62—64
12 李春蕊, 刘文励, 孙汉英. 焦点黏附物及其在细胞迁移中的作用. 国外医学·生理、病理科学与临床分册, 2002, 22(6): 583—586
13 Dai Z D, Gorb S N, Schwarz U. Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae). J Exp Biol, 2002, 205: 2479—2488
14 Jiao Y K, Gorb N S, Scherge M. Adhesion measured on the attachment pads of *Tettigonia viridissima* (Orthoptera Insecta). J Exp Biol, 2000, 203: 1887—1895
15 戴振东, Gorb S N. 蝗虫脚掌微结构及其接触的有限元研究. 上海交通大学学报, 2003, 37(1): 66—69
16 Hasenfuss I. The adhesive devices in larvae of lepidoptera (Insecta, Pterygota). Zoomorphology, 1999, 119(3): 143—162[DOI]
17 Gao H, Yao H. Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures. Proc Natl Acad Sci, 2004, 101(21): 7851—7856[DOI]
18 Peressadko A G, Gorb S N. Surface profile and friction force generated by insect. Proceedings of the First International Industrial Conference Bionik, 2004. 257—263
19 Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and the contact of elastic solids. Proc R Soc Lond A, 1971, 324: 301—313
20 Gorb S N, Peressadko A, Spolenak R, et al. Biological hairy attachment devices as a prototype for artificial adhesive systems. Proceedings of the First International Industrial Conference Bionik, 2004. 237—242
21 Sitti M, Fearing R S. Nanomolding based fabrication of synthetic gecko foot-hairs. IEEE Conference on Nanotechnology, Washington DC, 2002
22 Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. Nature Mater, 2003, 2(7): 461—463[DOI]
23 孙久荣, 郭策, 程红, 等. 壁虎脚底刚毛是一细胞样结构. 动物学报, 2005, 51(4): 761—767
24 Rechenberg I. Tribological characteristics of sandfish. Nature as Engineer and Teacher: Learning for Technology from Biological Systems, Shanghai, 2003
25 Tong J, Moayad B Z, Ren L, et al. Biomimetics in soft terrain machines: A review. Intern Agr Eng J, 2004, 13(3): 71—86
26 Carpenter P. The right sort of roughness. Nature, 1997, 388: 713—714[DOI]
27 Ball P. Engineering shark skin and other solutions. Nature, 1999, 400: 507—509[DOI]
28 Viswanath P R. Aircraft viscous drag reduction using riblets. Prog Aerosp Sci, 2002, 38: 571—600[DOI]
29 Robert J P. Drag reduction: An industrial challenge. Special Course on Skin Friction Drag Reduction, AGARD- R-786, 1992
30 Igarashi T. Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod. J Wind Eng Indust Aerodyn, 1997, 69-71: 141—153[DOI]
31 Sirovich L, Karlsson S. Turbulent drag reduction by passive mechanisms. Nature, 1997, 388: 753—755[DOI]
32 Balasubramanian A K, Miller A C, Rediniotis O K. Microstructured hydrophobic skin for hydrodynamic drag reduction. AIAA J, 2004, 42(2): 411—414

(2006-02-07 收稿, 2006-09-01 接受)