

织构化提高表面摩擦学性能的研究进展

赵文杰^{1,2}, 王立平^{2*}, 薛群基^{1,2}

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 宁波市海洋防护材料工程技术重点实验室, 浙江 宁波 315201;
2. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 表面织构化作为一种可以显著提高表面摩擦学性能的方法已得到国内外科学技术工作者的广泛关注. 从表面织构化的应用领域和研究背景着手, 评述了织构化在改善表面宏观、微观和仿生摩擦学等方面的研究进展和发展现状, 阐明了表面织构化对于改善表面宏/微观摩擦学行为的重大意义, 并指出当前表面织构化存在的问题和下一步的发展方向.

关键词: 表面织构化; 宏观摩擦; 微观摩擦; 仿生摩擦

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2011)06-0622-10

Development and Research Progress of Surface Texturing on Improving Tribological Performance of Surface

ZHAO Wen-jie^{1,2}, WANG Li-ping^{2*}, XUE Qun-ji^{1,2}

(1. Ningbo Key Laboratory of Marine Protection Materials, Ningbo Institute of Materials Technology
and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication,

Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Surface texturing as an attractive means or method to significantly improve the tribological performances of sliding pairs has aroused great attention by worldwide scientists during recent years. In the present review, the applications fields and research background of surface texturing were introduced firstly. The recent progress and current status of surface texturing on improving macrofriction, microfriction and biofriction of surfaces were summarized in detail. The benefit of surface texturing to improve macro/micro-tribological behaviors was analyzed. Finally, the problems existed on surface texturing were pointed out and it is also suggested that more efforts should be made to what in the future.

Key words: surface texturing, macro-tribology, micro-tribology, bio-tribology

随着纳米科技的飞速发展, 磁记录存储系统、微/纳机电系统 (M/NEMS) 及航空航天工程等多个领域对宏/微观尺度下摩擦副表面的润滑、防护和抗磨减摩等性能提出了更严峻的要求^[1-3]. 科学家们在减摩和耐磨材料、表面镀层、润滑油和添加剂等方面已取得巨大进展^[4-5]. 相对而言, 摩擦副表面的织

构化拓扑形貌的设计及相关研究仍是其中的薄弱环节. 研究者已经意识到表面织构化对改善摩擦副表面摩擦学性能的重要意义, 已开始在这个领域开展相关研究.

传统摩擦学理论认为: 相互接触的表面越光滑磨损量越小. 近年来大量研究表明: 表面并非越光滑

Received 5 September 2010, revised 24 January 2011, accepted 15 May 2011, available online 28 November 2011.

* Corresponding author. E-mail: lpwang@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968080.

The project was supported by the National 973 program (2011CB706603), Ningbo Municipal Nature Science Foundation (2011A610098) and China Postdoctoral Science Foundation (20110491832).

国家 973 计划项目 (2011CB706603)、宁波市自然科学基金 (2011A610098) 和中国博士后基金 (20110491832) 资助.

就越耐磨,具有一定非光滑形态的表面反而具有更好的抗磨性^[6-12].表面织构,即在表面加工制备出具有一定尺寸和排列的图案阵列.织构化包括图案化微结构和仿生功能表面是高性能润滑表面研究的重要内容.织构化可以改变表面形貌,进而影响到摩擦副表面的接触状态和润滑状态.因此设计合适的表面几何造型可显著改善摩擦副表面的摩擦磨损性能,延长其使用寿命,对提高摩擦副表面性能和润滑效果具有较大的工程价值,对节约能源、保护环境有着重要的意义^[10-12].多种材料表面已实现织构化,如发动机的汽缸/活塞、滑动轴承、密封环,高尔夫球表面、磁存储介质和 M/NEMS 的表面等.

研究不同几何形状和参数的表面形貌造型及其摩擦学性能,对根据润滑摩擦性能要求设计并制造出与之匹配的微观几何形貌具有重要的理论研究价值和前景.利用可控的精细加工技术在表面构筑规则或仿生织构来改善摩擦副的摩擦学性能日益引起国内外科学家的广泛兴趣^[10-12].目前国内在织构表面构筑及其摩擦润滑性能方面研究较多的高校和科研院所包括清华大学、南京航空航天大学、中国科学院兰州化学物理研究所、吉林大学、中国矿业大学、合肥工业大学等单位.

1 表面织构改善宏观摩擦学性能研究进展

1.1 表面织构的加工方法

织构化表面的制备和加工方法有很多,常见的技

术手段包括:激光熔融烧蚀,模板复制,扫描探针加工,阳极氧化,光刻掩模技术,电加工,化学沉积,溶胶-凝胶以及自组合法.这些方法在材料加工范围和尺寸精度方面都有各自的特点和应用范围.因此,要根据实际情况选择合适的表面织构化制备方法.

1.2 织构的存在可以显著提高表面的摩擦学性能

通过人为控制在表面制备一定的微织构可显著改善其摩擦磨损性能.表面织构在不同条件下分别起到充当微小流体动压润滑轴承、增强动压效应而提高承载能力、润滑剂储存器提供持续润滑及捕获磨损粒子而减小犁沟等作用^[13-15].在对磨过程中,摩擦副相对运动速度较大,无织构试样表面的润滑油较大部分被甩出,同时产生的磨粒会加剧表面的磨损.而表面织构可以存贮润滑油,当表面发生部分磨损后,存储在织构中的润滑油就会溢出,一定程度上补给了润滑油,可以对摩擦副提供持续润滑,从而改善了摩擦副间的润滑状态;另一方面,表面织构起到了容纳磨屑的作用,这就会改善由于磨粒造成的磨损.图1是3种常见的织构图案,分别是柱状、凹坑状和沟槽状.

刘一静等^[16]利用微细电解加工技术在真实的活塞裙部表面制作了几种直径和深度不同的微米级表面织构,模拟发动机的运动状态考察了表面织构对发动机活塞/缸套之间的摩擦特性的影响.结果表明:表面织构表现出很好的减摩效果,也起到了较为明显的减磨作用. Wakuda 等^[17]在 Si_3N_4 表面制备了

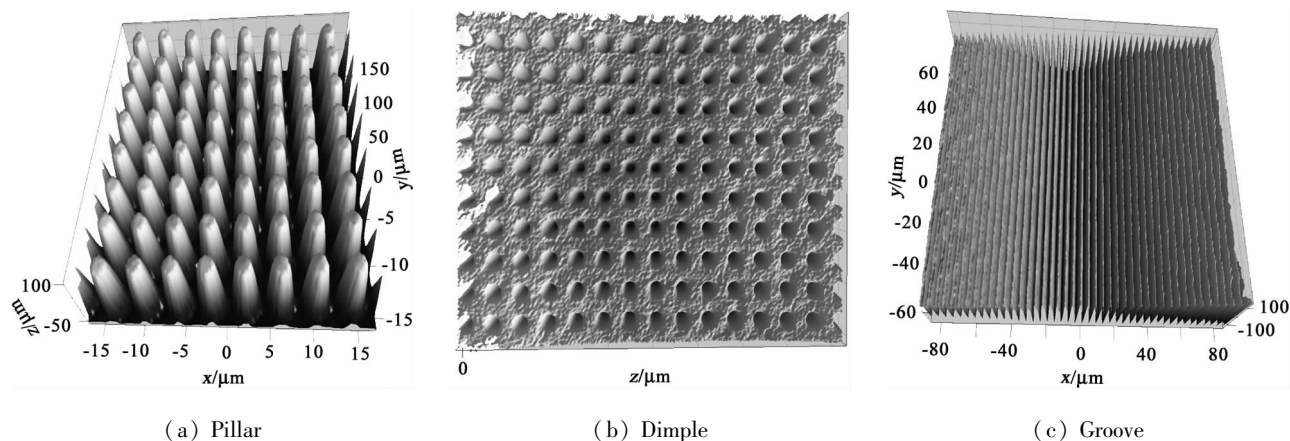


Fig. 1 There kinds of common texture

图1 3种常见的织构形状

具有不同直径、密度和形状的坑状织构,考察了坑状织构对 Si_3N_4 表面与钢对磨时摩擦性能的影响.发现织构化后表面摩擦系数从 0.12 降到 0.10. Si_3N_4 表面的摩擦学性能受坑状织构的尺寸和密度影响,而坑状

织构的形状,无论是圆形或有角的对摩擦系数没有明显影响. Andersson 等^[18]采用激光烧蚀抛光技术在钢表面制备并考察了织构对表面润滑行为的影响.研究发现:织构的存在极大地减小了表面摩擦,降低了磨

损.其中低密度、深坑和直径小的坑状织构与高黏度润滑油搭配时对摩擦性能的提升幅度最大.胡天昌等^[19]采用声光调的固体 Nd:YAG 激光器在 45# 钢表面进行了织构化处理,并采用栓-盘摩擦试验机评价了织构对其摩擦性能的影响.研究表明:经过激光处理的 45# 钢表面形成了较为规整的微坑型织构,在相同试验条件下与未织构化表面对比,其摩擦系数均有不同程度的减小且更为稳定,磨损率也得到一定程度的降低,这是由于制备的表面微坑起到了捕获磨屑的作用从而减小了磨粒磨损.对不同织构密度及织构尺寸样品摩擦性能的考察结果表明较大的织构密度及孔径更有利于提高表面减摩抗磨性能.

微凹坑织构不仅可以作为润滑油的储存器,还可以作为固体润滑剂如 MoS₂ 和石墨的储存器,从而对自适应涂层表面的润滑性能有很大的增强作用.Voevodin 等^[20]利用激光加工技术在 TiCN 硬质自适应涂层表面制备了微米尺寸的坑状阵列.通过改变微坑的直径和间距控制微坑的表面密度在 0.5%~50% 之间,然后将固体润滑剂 MoS₂ 和石墨溅射到织构化表面.以钢球作为摩擦对偶评价了上述表面在干/湿氮气环境下的摩擦学表现.研究发现:织构最优化的表面密度为 10%,织构化处理后的 TiCN 表面耐磨寿命提高了 1 个数量级,其主要原因是在干/湿氮气环境下,激光产生的微坑有助于保持润滑剂对表面的持续润滑.利用相同的原理,Basnyat^[21]采用等离子体刻蚀制备了 TiAlCN 薄膜微凹坑表面,然后利用磁控溅射在微凹坑中填充单相 MoS₂ 和多相 MoS₂-Ag 固体润滑剂,以 Si₃N₄ 球作为对偶在 25 和 570 °C 考察了这些材料的摩擦系数.比较表面织构化前后的摩擦磨损情况发现,在所测试条件下摩擦磨损均显著减低,主要是微凹坑作为润滑剂的储存器能够对接触对偶表面提供持续润滑.织构化作为表面的 1 类新颖设计思路,为自适应涂层的构筑提供了多种选择,包括改善和优化微凹坑的尺寸(直径和深度),以及固体润滑剂的化学组份.通过在不同材料表面设计多层结构可以适应不同的环境需求.

1.3 织构的形貌和几何参数是影响表面摩擦学行为的主要因素

表面形貌对摩擦副的摩擦行为及润滑性能有很大的影响.通过在表面加工具有一定规则的织构可以改善其摩擦特性和润滑效果,其中织构形状的几何参数是关键因素之一,只有在合适的范围内才会得到优异的润滑效果,否则适得其反.

刘东雷等^[22]采用皮秒激光在铸铁表面实现了微

织构化,考察了光滑、凹坑、网纹和断纹 4 种不同表面的摩擦磨损性能.研究发现:在干摩擦条件下,相对于光滑表面,表面微织构能够显著改善摩擦系数的稳定性,但不同的织构对摩擦系数的稳定性和初值影响不同.对于摩擦系数稳定值的影响,4 种形貌优劣依次为凹坑、网纹、断纹和光滑;而对于摩擦系数初值的影响,4 种形貌优劣依次为凹坑、断纹、网纹和光滑.汪家道等^[23]考察了面接触情况下不同尺寸的规则凹坑对表面润滑性能的影响,结果表明,只有当规则凹坑表面尺寸适当时,其润滑效果比没有规则凹坑的表面有较大提高,否则适得其反.规则凹坑对表面摩擦学性能影响的主要原因是规则凹坑造成真实接触面积与塑性接触面积的变化.因此在选择凹坑尺寸时,应使表面真实接触面积,尤其是粗糙峰塑性变形程度降低.此外,凹坑深度的优化也很重要.摩擦副接触面上由于凹坑织构的存在,可观察到有气泡稳定存在于油膜中,为了研究凹坑织构引起的气泡对摩擦副表面的承载以及减摩能力的影响,汪家道^[24-25]等采用腐蚀的方法在 45# 钢表面加工了不同深度的正方形凹坑形貌,利用自制的试验装置评价了面接触状态下改变润滑油量时不同凹坑表面的润滑性能.结果表明:面接触润滑时,如气泡能稳定存在于凹坑中,凹坑深度越浅,气泡对增加油膜厚度和提高承载能力的积极影响越显著.但是凹坑深度越浅,气泡越容易跑出凹坑而减少气泡的承载减阻作用,因此只有在合适的深度下,摩擦系数才达到极小值,减阻效果最好.同时,油量从少到多,从乏油润滑到全膜润滑的过程中,存在 1 个最优凹坑深度,在此深度时,减阻效果最显著.与全膜润滑相比,乏油润滑时减阻率较大,这是气泡和润滑油共同承载的结果.

王晓雷等^[13,26]在 SiC 表面制备了坑状织构,并模拟了推力轴承在水环境下的摩擦情况.研究发现:相对于未织构化表面,采用适宜的形状和分布密度的织构,承载能力最少增加 2 倍.他们^[27]采用球-盘式摩擦机研究了具有不同尺寸凹坑阵列的软质材料聚二甲基硅氧烷(PDMS)表面织构在混合至流体动压润滑区域的润滑特性.结果表明:对于 PDMS,凹坑直径是影响摩擦特性的主要因素.与无织构试样相比,在低速条件下的混合润滑区域较小直径的织构能够减小摩擦,而较大直径的织构表现出增大摩擦的效果.并且,凹坑的面积率越大,表面织构的作用越显著.他们^[28]利用纳米压痕仪在碳钢表面制作了具有不同密度和深度的划痕点阵,并通过改进的四球试验机对其在边界润滑下条件的摩擦性能进

行了评价.研究发现:不同密度和深度的表面织构所具有的减摩效果不同,深度为125 nm的低密度“划痕”点阵具有良好的减摩效果.他们^[29]还研究了微凹坑形状对织构化表面润滑性能的影响.他们设计并制备了形状为圆形、正方形和椭圆形的微凹坑表面织构.结果表明:在微凹坑面积和深度不变的条件下,每种形状的微凹坑表面织构都存在1个最优的面积率使得摩擦副表面具有最低的摩擦系数.通过对各种形状微凹坑最优面积率下的减摩效果进行比较,椭圆形微凹坑表现出了最好的减摩效果,在试验转速400 r/min时,与无织构表面相比摩擦系数可降低26.3%.瑞典学者Pettersson等^[14,30]通过光刻和湿法刻蚀在硅表面制作了规则凹坑,测试了边界润滑情况下的摩擦.结果表明高密度的凹坑形貌摩擦系数较低,并且当滑动方向和凹坑排布方向成30度角时会降低摩擦,作者认为这是因为凹坑具有蓄油池的功能.高东海等^[31]也发现在钢表面加工一定密度,并且尺寸大小和深度适当的凹坑可以改善线接触摩擦副的摩擦性能,降低其摩擦系数.

当前对表面织构的研究大多在摩擦副的1个试件表面上制备织构,然后进行摩擦学性能评价,对摩擦副进行织构化处理存在任意性,忽视了不同表面织构对整个摩擦副体系抗磨减摩的影响机理.马晨波^[15]等研究了无表面织构、上试件单表面织构、下试件单表面织构和上下试件双表面织构4种不同形式的摩擦副分别在富油和乏油润滑条件和不同载荷下进行摩擦磨损试验,考察了摩擦系数变化规律.试验结果表明:载荷越大,表面织构对摩擦系数的影响越显著;富油条件下,较高载荷时上、下试件单表面织构均能减小摩擦系数,而且上试件单表面织构更加有效,较低载荷时有无织构对表面的摩擦系数影响不大;乏油条件下,下试件单表面织构减小而上试件单表面织构却起到了相反的作用;双表面织构在不同的润滑条件下均不能减小摩擦系数.

由于表面织构可组合种类太多,包括织构的形貌类型、几何参数、摩擦工况、接触方式,界面材料,润滑剂以及环境影响等因素,目前尚无一定的最优的织构图案,只是针对不同的材料存在不同的最优设计,并且大都以实验为主,缺乏较好的理论解释.国际上Jane Wang和Dong Zhu等^[32-33]提出了虚拟织构(Virtual texture)的概念,采用计算机数值模拟、计算机仿真等方法预先设计织构参数和织构类型,改善接触行为和摩擦行为.图2是他们提出的织构

化模拟示意图.这样就可以节省大量的人力物力,使得研究人员工作更有针对性和目的性.

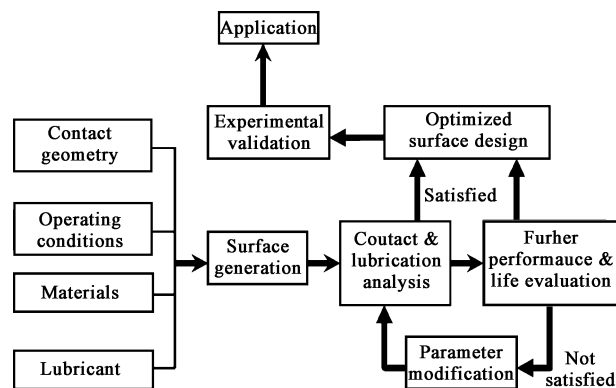


Fig. 2 Logic of the virtual surface texturing technology^[32]

Fig. 2 虚拟织构技术的逻辑图^[32]

1.4 织构与其他手段复合改善表面宏观摩擦学行为

将表面织构与其他技术手段结合起来会大大改善界面间的摩擦磨损情况.邵天敏等^[34]利用电加工的方法在钢表面制备了条纹状织构,研究了Cu颗粒和条纹织构的协同作用对摩擦副摩擦磨损性能的影响.研究发现:摩擦过程中,条纹状织构一方面增大了表面摩擦,同时也起到了容纳磨屑的作用;摩擦系数与条纹织构的面积率以及施加的载荷密切相关,在较大的载荷条件下,表面织构与Cu微粒的协同作用可以有效降低摩擦系数,载荷越大,降低摩擦系数所需要的织构面积率越大.王晓雷等^[35]率先进行了磁性表面织构润滑特性的研究.他们在摩擦副表面加工出表面织构,采用电沉积方法在微坑中沉积出1层永磁薄膜,这样就形成了周期性分布的微小的磁体,当磁流体润滑剂涂覆于摩擦副表面时,永磁薄膜将对磁流体产生吸附作用.研究结果表明:在滑动速度低于0.01 m/s时,凹坑直径为500 μm的磁性表面织构采用磁流体进行润滑时,相对于普通润滑液润滑和普通表面采用磁流体润滑具有较好的减小摩擦、降低磨损的作用.接着他们又研究了直径为300、200和100 μm的凹坑磁性表面织构,发现磁性表面织构的存在可以有效降低摩擦,尤其在载荷较大时(20 N)效果更加明显.磁性表面织构的几何尺寸对减摩效果有重要影响,对于圆形凹坑小于500 μm的磁性表面织构而言,凹坑直径越大,减摩效果越好.以上思路拓宽了我们的思考空间,对于从事摩擦和润滑材料的研究者来说,如何把织构化与其他技术手段很好的结合起来以改善表界面的摩擦学行为将是1个很有前景的方向.

2 表面织构改善微观摩擦学性能研究进展

硬盘存储系统和 M/NEMS 的飞速发展对摩擦学研究提出了更高要求,促使人们在微/纳尺度水平深入研究表面的润滑防护问题.在微/纳器件中,摩擦副表面的间隙处于纳米级.由于尺寸效应和表面效应,微构件间的表面张力、摩擦力和黏着力成为影响 M/NEMS 功能、可靠性和使用寿命的关键因素^[1,36-37].M/NEMS 的摩擦副表面的摩擦力很小,宏观摩擦学规律和理论已不适用,必须研究界面上以分子、原子为分析对象的纳米摩擦学规律.

2.1 通过改变接触面积改善表面微观摩擦学性能

在微/纳器件表面构筑一定形状和密度的织构可以减小摩擦对偶的接触面积,增强表面的疏水性,从而大大降低了表面的黏着力和摩擦力.1991年 Ranjan 等^[38]在计算机硬盘的启动停止区采用激光技术加工了由直径 20 μm ,深 10 nm 左右的凹坑组成的点阵,成功地降低了盘片与磁头的吸附力,减小了摩擦,延长了使用寿命. Suh 等^[39]在磁头或磁盘表面制造微小隆起或凹陷状织构以增加接触表面的粗糙度,结果表明织构化处理可以有效减小磁头与磁盘表面之间的真实接触面积,从而降低了摩擦和黏着力. Tan 等^[40]也在硬盘片上制备了织构图案,结果表明:相对于传统的设计,织构化处理后硬盘片表现出低黏着、长耐磨寿命、减轻了润滑剂分解、降低了滑行倾斜和失败的发生可能性. Zou 等^[41]用旋涂的方法在光滑的硅表面制备了胶体氧化硅球纳米织构表面,用 2 种曲率半径的金刚石针尖测定了织构表面的摩擦和黏着性质.结果显示:与非织构表面相比,用 100 μm 的金刚石针尖测定的织构表面的黏着力和摩擦力分别减少了 98% 和 88%.这主要是由于织构化处理后,表面与金刚石针尖的真实接触面积减小了. He 等^[42]用纳米压入-划痕研究了表面织构对 PDMS 弹性体在宏观和微观尺度下摩擦性质的影响.结果发现:织构化的表面摩擦系数远远低于非织构化表面,宏观尺度下约减小 59%,微观尺度下减小 38%.摩擦系数的降低归结于接触面积的减小.沟槽状织构在不同的滑动方向下测定的摩擦系数表现出各向异性的特点. Bhushan 等^[43-44]也发现通过改变微/纳米尺度的粗糙度可以获得超疏水和低黏着的表面. M/NEMS 在应用过程中要求低摩擦、低黏着.通过改变材料表面的拓扑形貌,如在表面设计特殊的纳米织构,黏着和摩擦问题就会得到控制,器件的寿命和稳定性将得到显著提高.

Marchetto 等^[45]研究了具有平行沟槽状织构的硅片表面,其中原子力针尖被加工成一平台以便于表征织构化硅表面,研究发现:在分离力范围内,侧向力随载荷的增加线性增长,织构化表面的摩擦系数明显低于原始表面.他们^[46]又研究了上述表面和针尖之间在室温和 180 $^{\circ}\text{C}$ 时大气和高真空环境下的黏着力和摩擦力.由于水分子弯月力的存在,未织构化的硅片表面在高真空条件下的摩擦系数相对于室温约低 64%,而织构化表面在不同条件下的摩擦系数几无明显差别;同样,由于水层的存在,未织构化表面的黏着力大于织构化表面.

2.2 通过改变接触面积和化学修饰来改善表面微观摩擦学性能

表面织构的存在可以有效减小摩擦对偶的实际接触面积,在此基础上,如果对表面进行化学修饰,将会进一步降低摩擦对偶之间的摩擦和黏着力. Zou 等^[47]通过等离子增强化学气相沉积技术和选择性刻蚀铝得到具有岛状结构的织构化硅片表面,并对表面进行了化学修饰.发现相对于未处理的硅片表面,具有微/纳结构的工程表面疏水性能大大增强,具有良好的抗粘和减摩表现,黏着力约减小 90%,接触角越大,织构表面的摩擦系数和黏着力越小.白明武等^[48]利用原子力局部阳极氧化功能在 H 钝化硅片表面构筑了具有不同表面覆盖率的纳米尺度柱状织构,然后以自制的胶体探针小球考察了表面的摩擦和黏着性质.研究发现:纳米尺度织构的存在有效改善了表面的纳米摩擦学性能,随着织构表面覆盖率的增加,摩擦力和黏着力均有增大的趋势.接着他们^[49]又在此基础之上,将织构化处理的硅片在 0.1 mg/mL 的多烷基环戊烷溶液中浸渍提拉,发现润滑剂分子全部聚集在圆柱状织构处,实现了润滑剂分子在表面上的定向分布,如图 3 所示.实验结果表明表面织构的存在与润滑剂分子共同促使表面黏着力和摩擦力的降低.王立平等^[50-51]以织构硅片作为模板,采用复制模塑方法构筑了圆柱状和坑状微/纳织构化金表面,然后对表面进行了化学修饰.研究发现:织构的形状、表面覆盖率、高度或深度、表面粗糙度以及化学修饰对表面的纳米摩擦学性能影响很大,随着柱状高度和表面覆盖率的增加,针尖与织构金表面的接触面积将减小,导致了黏着力减小.摩擦力随柱状织构的高度和表面覆盖率的增加而减小,化学修饰后,摩擦力进一步显著的减小.在同样的针尖扫描速率下,增加柱状织构的高度和覆盖率就会减小针尖与表面的接触面积,摩擦力会减小.坑状表

面的摩擦力和黏着力也随着织构表面覆盖率的增加而降低,表面化学处理后,纳米摩擦学性能得到进一步改善.总而言之,增加表面粗糙度和降低表面能,织构化表面会更疏水,黏着力和摩擦力将显著减小.他们还基于软印章和自组装技术,在硅表面构筑了多烷基环戊烷-十八烷基三氯硅烷(MACs-OTS)图案化双组份润滑膜.结果表明:与图案化OTS自组装薄膜和MACs润滑膜作对比,MACs-OTS图案化双组份润滑膜展现最好的承载能力和耐磨性.这

是因为在MACs-OTS图案化双组份润滑膜体系中,流动性较好的MACs润滑剂镶嵌在图案化OTS自组装薄膜的阵列中.OTS分子键合在表面,MACs润滑剂分子具有较好的流动性,从而产生了最好的摩擦性能.根据研究结果可以看出:材料表面的化学修饰决定了表面的基本化学性质,如亲水和疏水性,而织构的作用犹如放大器,如果表面具有亲水性,织构化处理后表面将更加亲水;如果表面具有疏水性,织构化处理后表面将更加疏水.所以,应该将

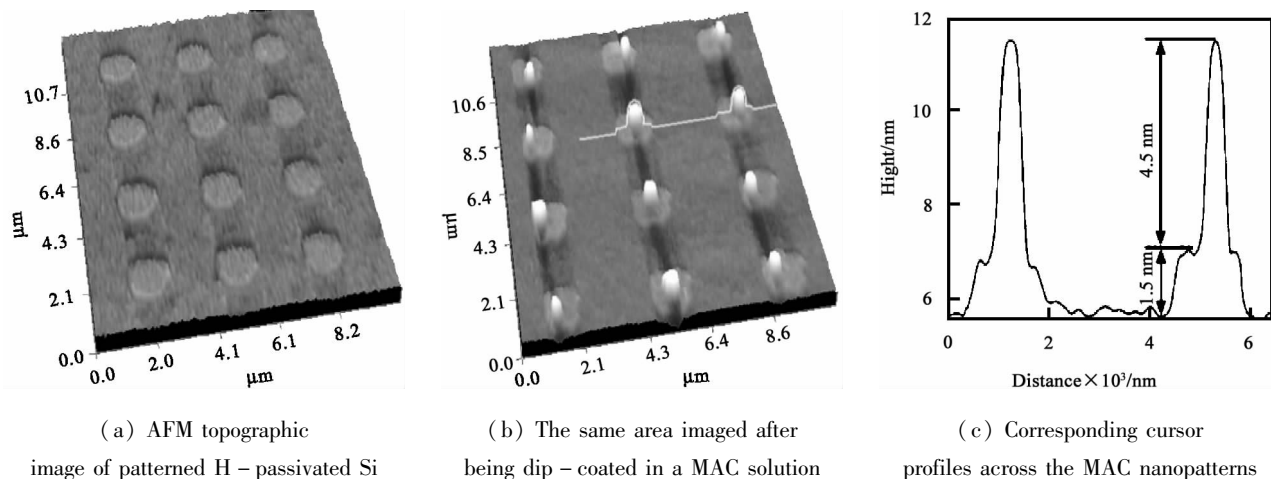


Fig. 3 Formation of nanopatterns and MAC lubricant layer^[49]

图3 MAC在纳米织构上的形貌图^[49]

表面化学修饰与织构化相结合,以获得对表面的最大改性,从而得到具有最优化摩擦学表现的面。

3 仿生织构改善摩擦学性能研究进展

仿生织构是为解决工程和应用中遇到的实际问题而向自然界生物学习,从中汲取其精髓和灵感.摩擦学问题是动物在进化过程中面临的问题之一,为适应自然界的淘汰法则,许多动物有其应对策略.其中,最常见的就是动物在体表形成许多不同几何形状和材料拓扑的表面织构.如穿山甲长期穿梭于沙石中体表却未发生损伤,原因是其体表的非光滑形态具有优异的抗磨和抗挤压能力;海豚皮肤结构形成的动态非光滑形态使表层附近水的涡流层变成阻力小的层流层,这是海豚成为速泳高手的秘密武器;土壤动物体表呈现多种形态的非光滑几何特征,如凸包型和凹坑形非光滑表面,这种体表形态具有减小土壤滑动阻力的功能,图4是几种动、植物表面的形貌图.

3.1 动、植物表面的摩擦学性能研究

戴振东等^[54]开展了壁虎运动及仿生学研究,研究揭示:壁虎脚底为具有活性的细胞组织,靠分子间

作用力实现在表面上的黏附.他们^[55]制备了2种具有斜截面的倾斜人工刚毛,利用微摩擦试验机测试了刚毛表面的黏附性能.结果表明:在无滑移的平面接触下,刚毛阵列的黏附力随法向载荷增加而增大,当法向载荷超过一定值后,黏附力增加缓慢并趋于饱和.他们还发现^[56]:动物体表的刚毛形态各异,功能多样,不仅参与感觉器官的构成,还是重要的运动器官.刚毛在运动中的功能因结构不同而异,刚毛的功能可以粘附,也可以脱附,关键在于刚毛的形态结构.戴振东等^[57]认为仿生摩擦学研究的重点是评价和揭示生物材料的摩擦学性能;研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. Bhushan 等^[58-59]研究了多种植物表面,如荷叶和芋头叶都具有超疏水、低黏着和低摩擦的性质.这些性质是其表面化学组份和微/纳多尺度结构共同决定的.因此,在微/纳器件表面制备仿生微/纳米二元织构可以减小2个表面的接触面积,从而减小摩擦力和黏着力.

3.2 仿生表面的摩擦学性能研究

任露泉教授课题组^[7, 60-63]对一些典型土壤动

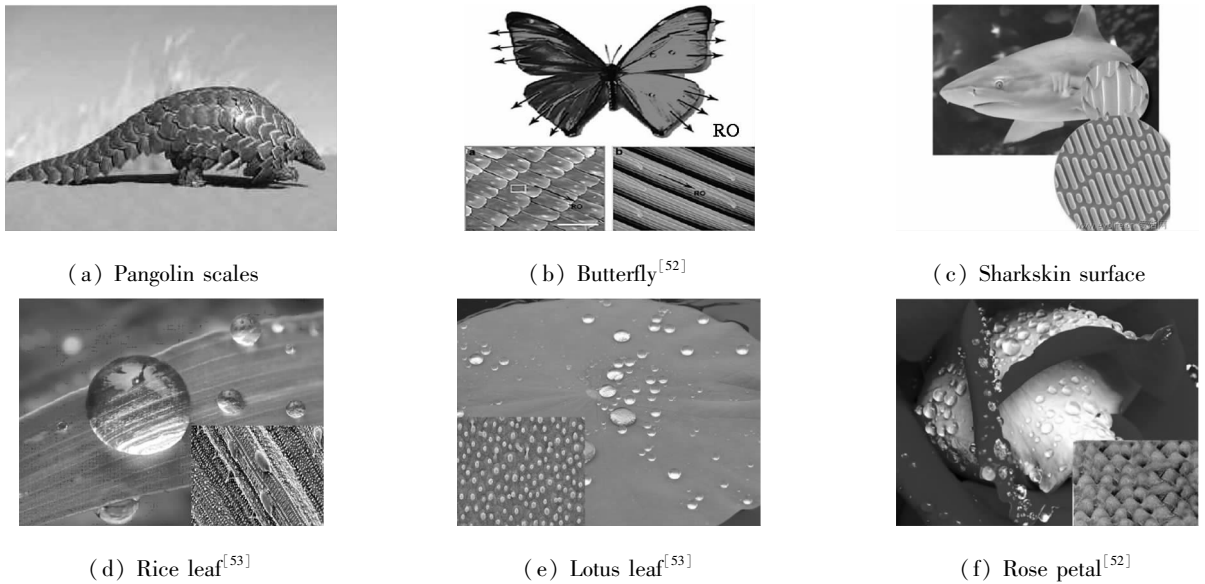


Fig.4 Surface textures of several animals and plant leaves

图4 几种动、植物的表面形貌

物进行了大量的脱附减阻研究,进行了仿生理论与技术的探索,提出生物非光滑概念和非光滑耐磨理论.认为动物体表普遍存在非光滑结构,具有减黏、降阻和耐磨等功能,基于这一原理设计的仿生推土板和仿生犁壁具有显著的减阻性能^[61].韩志武等^[7]根据生物非光滑形态理论在轧辊模型试件表面加工出鳞片形、凸包形、凹坑形及波纹形4种非光滑形态,针对不同形态表面进行了摩擦磨损试验.研究发现:经过激光织构处理的仿生非光滑表面的抗磨性能远远优于未加工的光滑表面(二者的磨损率相差几十倍甚至上百倍),其中具有鳞片形仿生非光滑表面形态的试件的抗磨性能最佳.杨卓娟等^[62]在W9Cr4V钢表面制备了不同直径和间距的凹坑形,考察了其在不同温度下的摩擦特性.结果表明:在室温至500℃,非光滑试件的耐磨性随着温度的升高而降低,不同尺寸及分布规律的凹坑对零件耐磨性的影响不同,凹坑直径及其间距越大,试件的耐磨性越好;温度愈高,试件摩擦系数越小.宋起飞等^[63]模仿动物体表形态,通过激光加工在铸铁表面制备了具有规则分布的凹坑条纹以及网格等非光滑单元形貌,研究了具有非光滑表面材料的摩擦磨损性能.结果表明:非光滑表面材料的耐磨性较光滑表面提高1倍以上,摩擦系数提高66%以上;当非光滑表面的单元体硬度越高、直径越大而间距越小时,其耐磨性越好,摩擦系数越大.这是由于激光加工的单元体相当于在母体上增加了许多强化质点,比母体具有更高的硬度和致密性,能够提高抗磨性.

Shafiei等^[64]以荷叶为模板,采用醋酸纤维素复制、电化学沉积和化学修饰方法相结合制备了具有荷叶表面形貌的微/纳尺度仿生织构镍表面.研究发现:相对于光滑镍表面,织构化处理后表面具有很强的疏水性,摩擦系数明显降低;经全氟聚醚(PFPE)化学修饰后,表面呈现出超疏水效应,接触角高达156°,摩擦系数进一步降低.摩擦系数降低的主要原因是织构化处理后,表面粗糙度增加,减小了摩擦副界面的接触面积,提高了表面疏水性.并且在织构化处理前,摩擦系数存在1个高峰,而后逐渐下降,处理后对偶表面不会形成转移层,摩擦系数很稳定.以同样的方法,他们^[65]还制备了具有蛇皮形貌的镍表面,该织构化表面的摩擦行为具有各向异性,摩擦系数随摩擦方向的不同而不同,从头到尾最小,从尾到头居中,横向摩擦系数最大.具有蛇皮横向织构的镍表面的摩擦性能在离合器上有潜在的应用.Yoon等进行了一系列关于表面织构对材料表面摩擦学影响规律的研究^[66-68].他们主要采用软印章模板法制备了具有规则的和仿生的微/纳织构化的聚甲基丙烯酸甲酯表面,然后利用原子力显微镜和微摩擦试验机评价了其表面性质.研究发现织构的存在一方面改变了摩擦副界面接触状态,另一方面也改变了表面的润湿性,而这两方面的改变均显著提高了表面的摩擦学表现.他们^[68]还利用光刻法在硅片表面制备了柱状和沟槽状织构,结合DLC和PFPE表面改性,也得到了很好的结果.

3.3 仿生摩擦学存在的问题

仿生织构在改善宏观摩擦学方面的应用已有很

多,包括一些实现工业化生产的农业器具,但是目前很多研究仍停留在实验室探索和生物体本身研究阶段,其在微观乃至纳米摩擦学方面的研究还很缺乏,这方面的工作还有待于加强.同时,也应注意生物体本身的活性对表面织构的影响.因此,研究仿生织构的抗粘减摩耐磨机理,拓宽仿生织构的应用范围尚需进行深入探索.

4 结束语

可以看到:①织构在干摩擦条件下能够提高材料的耐磨性和摩擦系数,而在有润滑剂存在的条件下能够起到提高耐磨性和降低摩擦系数的作用^[12];②表面凹坑或凹槽状织构能够起到储油器的作用,能够对摩擦副表面持续润滑,从而减少摩擦副的磨损,降低摩擦系数,同时织构还能起到提高承载能力的作用;③织构图案几何形状、参数以及表面覆盖率对摩擦副的摩擦学性能都有着明显的影响;④织构的存在可以改变摩擦副界面的接触状态,有效降低界面间的黏着力和摩擦力.

虽然表面织构化的科学研究已取得了重要进展,但目前的表面织构化研究主要以单一的规则织构化图案如凹坑和凹槽为主,缺少对复杂织构和仿生织构的系统研究,同时对表面织构的设计缺乏相应的理论计算和模拟研究^[12].我们认为将来应着重从以下五方面开展对表面织构的研究:

①根据研究结果,找出摩擦工况与润滑要求,织构制备工艺参数、织构化几何形状及参数等因素与摩擦润滑理论之间的关系,积极展开相关的理论模拟与计算研究;②开展多元化织构,包括更多形状、复杂形状、仿生形状和复合织构的深入研究;③发展织构加工技术(精密可控,大面积制备),拓宽材料类型范围,对织构进行深入、系统的研究;④在微观摩擦学领域,将表面织构化与新型润滑剂包括液相、固相润滑剂以及其他类型自适应涂层结合,研究其对表面摩擦学性能贡献的协同作用;⑤织构在宏观摩擦学方面,最大的问题就是摩擦不稳定性,比如随着磨损程度增加,织构形貌,参数和接触状态均发生非线性变化,导致润滑和摩擦变化,这方面的研究有待于加强.

参考文献:

[1] Hsu S M. Nano - lubrication: concept and design [J]. Tribology International, 2004, 37: 537 - 545.
[2] Liu H W, Bhushan B. Nanotribological characterization of

molecularly thick lubricant films for applications to MEMS/ NEMS by AFM [J]. Ultramicroscopy, 2003, 97: 321 - 340.
[3] Weng L J, Liu W M, Sun J Y, *et al.* Opportunities and challenges to space tribology [J]. Tribology, 2005, 25: 92 - 95 (in Chinese) [翁立军, 刘维民, 孙嘉奕, 等. 空间摩擦学的机遇和挑战 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25: 92 - 95].
[4] Xue Q J, Zhang J Y. Tribochemistry and lubricating materials [J]. Progress in Chemistry, 2009, 21: 2 445 - 2 457 (in Chinese) [薛群基, 张俊彦. 润滑材料摩擦化学 [J]. 化学进展, 2009, 21: 2 445 - 2 457].
[5] Zhou F, Liang Y M, Liu W M. Ionic liquid lubricants: designed chemistry for engineering applications [J]. Chemical Society Reviews, 2009, 38: 2 590 - 2 599.
[6] Etsion, I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing [J]. Tribology Letters, 2004, 17: 733 - 737.
[7] Han Z W, Ren L Q, Liu Z B. Investigation on anti - wear ability of bionic nonsmooth surfaces made by laser texturing [J]. Tribology, 2004, 24: 289 - 293 (in Chinese) [韩志武, 任露泉, 刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2004, 24: 289 - 293].
[8] Wan Y, Xiong D S. Study of laser surface texturing for improving tribological properties [J]. Tribology, 2006, 26: 603 - 607 (in Chinese) [万轶, 熊党生. 激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26: 603 - 607].
[9] Gualtieri E, Borghi A, Calabri L, *et al.* Increasing nanohardness and reducing friction of nitride steel by laser surface texturing [J]. Tribology International, 2009, 42: 699 - 705.
[10] Marchetto D, Rota A, Calabri L, *et al.* AFM investigation of tribological properties of nano - patterned silicon surface [J]. Wear, 2008, 265: 577 - 582.
[11] Sung I H, Lee H S, Kim D E. Effect of surface topography on the frictional behavior at the micro/nano - scale [J]. Wear, 2003, 254: 1 019 - 1 031.
[12] Li J Q, Zhu H. Surface texture and its influence on tribological properties [J]. Lubrication and Engineering, 2009, 34: 94 - 97 (in Chinese) [历建全, 朱华. 表面织构及其对摩擦学性能的影响 [J]. 润滑与密封, 2009, 34: 94 - 97].
[13] Wang X L, Kato K, Adachi K, *et al.* Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water [J]. Tribology International, 2003, 36: 189 - 197.
[14] Pettersson U, Jacobson S. Friction and wear properties of micro textured DLC coated surfaces in boundary lubricated sliding [J]. Tribology Letters, 2004, 17: 553 - 559.
[15] Ma C B, Zhu H, Li J Q. Experimental study of tribological properties of texture on different surfaces of frictional pairs [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39: 245 - 248 (in Chinese) [马晨波, 朱华, 历建全. 摩擦副不同表面织构化的润滑减摩性能试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39: 245 - 248].

- [16] Liu Y J, Yuan M C, Wang X L. Influence of the surface texture on the tribological performances of piston skirt/liner[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38: 866 – 871(in Chinese)[刘一静, 袁明超, 王晓雷. 表面织构对发动机活塞/缸套摩擦性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38: 866 – 871].
- [17] Wakuda M, Yamauchi Y, Kanzaki S, *et al.* Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact [J]. Wear, 2003, 254: 356 – 363.
- [18] Andersson P, Koskinen J, Varjus S, *et al.* Microlubrication effect by laser – textured steel surfaces [J]. Wear, 2007, 262: 369 – 379.
- [19] Hu T C, Hu L T, Ding Q. Tribological properties of laser textured surfaces of 45[#] steel under dry friction [J]. Tribology, 2010, 30: 46 – 52(in Chinese)[胡天昌, 胡丽天, 丁奇. 45[#]钢表面激光织构化及其干摩擦特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30: 46 – 52].
- [20] Voevodin A A, Zabinski J S. Laser surface texturing for adaptive solid lubrication [J]. Wear, 2006, 261: 1 285 – 1 292.
- [21] Basnyat P, Luster B, Muratore C, *et al.* Surface texturing for adaptive solid lubrication [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 203: 73 – 79.
- [22] Liu D L, Meng X X, Yuan C J, *et al.* Research on tribological performance of texturing surfaces [J]. Lubrication and Engineering, 2008, 33: 28 – 31 (in Chinese)[刘东雷, 孟小霞, 袁春俭, 等. 多种规则微造型表面摩擦特性的试验研究[J]. 润滑与密封, 2008, 33: 28 – 31].
- [23] Wang J D, Chen D R, Kong X M. Study on lubrication of regular concave surface [J]. Tribology, 2003, 23: 52 – 55 (in Chinese)[汪家道, 陈大融, 孔宪梅. 规则凹坑表面形貌润滑研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23: 52 – 55].
- [24] Han Z L, Wang J D, Chen D R. Drag reduction by dimples on surfaces in plane – plane contact lubrication [J]. Tribology, 2009, 29: 10 – 16(in Chinese)[韩中领, 汪家道, 陈大融. 凹坑表面形貌在面接触润滑状态下的减阻研究[J]. 摩擦学学报, 2009, 29: 10 – 16].
- [25] Han Z L, Wang J D, Chen D R. The friction – reduce effect with different depth of concave on the Oil – lack lubrication [J]. Lubrication and Engineering, 2007, 32: 18 – 20 (in Chinese)[韩中领, 汪家道, 陈大融. 不同凹坑深度在乏油润滑状态下的减阻实验 [J]. 润滑与密封, 2007, 32: 18 – 20].
- [26] Wang X L, Adachi K, Otuska K, *et al.* Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water [J]. Applied Surface Science, 2006, 253: 1 282 – 1 286.
- [27] Jiang L, Ma G L, Wang X L. Lubrication properties of surface texture on PDMS [J]. Tribology, 2010, 30: 262 – 267 (in Chinese)[姜亮, 马国亮, 王晓雷. PDMS表面织构润滑特性的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30: 262 – 267].
- [28] Wang X L, Wang J Q, Han W F. Effect of surface texture on friction reduction under boundary lubrication [J]. Lubrication and Engineering, 2007, 32: 36 – 39 (in Chinese)[王晓雷, 王静秋, 韩文非. 边界润滑条件下表面微织构减摩特性的研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32: 36 – 39].
- [29] Yu H W, Yuan S H, Sun Z, *et al.* Effect of dimple shape on the tribological performance of textured surface [C]. Hangzhou: Proceedings of 2010 National Youth Symposium on Tribology and Industrial Application, 2010, 140 – 143 (in Chinese)[于海武, 袁思欢, 孙造, 等. 微凹坑形状对织构化表面润滑性能的影响 [C]. 杭州: 2010年全国青年摩擦学及工业应用研讨会论文集, 2010, 140 – 143].
- [30] Pettersson U, Jacobson S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts [J]. Tribology International, 2003, 36: 857 – 864.
- [31] Gao D H, Liu K, Yuan G F. Test research on tribological properties of the laser – textured surface with micropores [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2008, 31: 1 581 – 1 584 (in Chinese)[高东海, 刘焜, 袁根福. 激光微加工凹坑表面形貌摩擦特性的试验研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2008, 31: 1 581 – 1 584].
- [32] Wang Q J, Zhu D. Virtual texturing: modeling the performance of lubricated contacts of engineered surfaces [J]. Tribology Transactions, 2005, 127: 722 – 728.
- [33] Epstein D, Keer L M, Wang Q J. Effect of surface topography on contact fatigue in mixed lubrication [J]. Tribology Transactions, 2003, 46: 506 – 512.
- [34] Zhou J, Shao T M. Influence of synergistic effect of Cu particles and striated surface texture on tribological properties [J]. Chinese Surface Engineering, 2009, 22: 20 – 25 (in Chinese)[周吉, 邵天敏. Cu颗粒和条纹表面织构的协同作用对摩擦副摩擦磨损性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2009, 22: 20 – 25].
- [35] Shen C, Huang W, Ma G L, *et al.* A novel surface texture for magnetic fluid lubrication [J]. Surface & Coating Technology, 2004, 204: 433 – 439.
- [36] Kim S H, Asay D B, Dugger M T. Nanotribology and MEMS [J]. Nanotoday, 2007, 2: 22 – 29.
- [37] Zhao W J, Wang Y, Wang L P, *et al.* Influence of heat treatment on the micro/nano – tribological properties of ultra – thin ionic liquid films on silicon [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 361: 118 – 125.
- [38] Ranjan R, Lambeth D N, Tromel M P, *et al.* Laser texturing for low flying height media [J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69: 5 745 – 5 747.
- [39] Suh A Y, Lee S C, Polycarpou A A. Adhesion and friction evaluation of textured slider surfaces in ultra – low flying head – disk interfaces [J]. Tribology Letters, 2004, 17: 739 – 749.
- [40] Tan A H, Cheng S W. A novel textured design for hard disk tribology improvement [J]. Tribology International, 2006, 39: 506 – 511.
- [41] Zou M, Cai L, Wang. H. Adhesion and friction studies of a nano – textured surface produced by spin coating of colloidal

- silica nanoparticle solution [J]. Tribology Letters, 2006, 21: 25 - 30.
- [42] He B, Chen W, Wang Q J. Surface texture effect on friction of a microtextured poly(dimethylsiloxane) (PDMS) [J]. Tribology Letters, 2008, 31: 187 - 197.
- [43] Bhushan B, Koch K, Jung, Y C. Nanostructures for superhydrophobicity and low adhesion [J]. Soft Matter, 2008, 4: 1 799 - 1 804.
- [44] Nosonovsky M, Bhushan B. Roughness - induced superhydrophobicity: a way to design non - adhesive surfaces [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2008, 20: 225009 (1 - 30).
- [45] Marchetto D, Rota A, Calabri L, *et al.* AFM investigation of tribological properties of nano - patterned silicon surface [J]. Wear, 2008, 265: 577 - 582.
- [46] Marchetto, D Rota, A Calabri, *et al.* Hydrophobic effect of surface patterning on Si surface [J]. Wear, 2010, 268: 488 - 492.
- [47] Song Y, Nair R P, Zou M, *et al.* Adhesion and friction properties of micro/nano - engineered superhydrophobic/hydrophobic surfaces[J]. Thin Solid Films, 2010, 518:3 801 - 3 807.
- [48] Mo Y F, Zhao W J, Huang D M, *et al.* Nanotribological properties of precision - controlled regular nanotexture on H - passivated Si surface by current - induced local anodic oxidation [J]. Ultramicroscopy, 2009, 109: 247 - 252.
- [49] Mo Y F, Wang Y, Pu J B, *et al.* Precise positioning of lubricant on a surface using the local anodic oxide method [J]. Langmuir, 2009, 25: 40 - 42.
- [50] Zhao W J, Wang L P, Xue Q J. Influence of micro/nano - textures and chemical modification on the nanotribological property of Au surface [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2010, 366: 191 - 196.
- [51] Zhao W J, Wang L P, Xue Q J. Design and fabrication of nanopillar patterned Au textures for improving nanotribological performance[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2010, 2: 788 - 794.
- [52] Liu M J, Zheng Y M, Zhai J, *et al.* Bioinspired super - antiwetting interfaces with special liquid - solid adhesion[J]. Accounts of Chemical Research, 2010, 43: 368 - 377.
- [53] Zhao W J, Wang L P, Xue Q J. Fabrication of low and high adhesion hydrophobic Au surfaces with micro/nano - biomimetic structures [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114: 11 509 - 11 514.
- [54] Dai Z D, Sun J R. Motion of gecko and related bionic research [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16: 519 - 523 (in Chinese)[戴振东, 孙久荣. 壁虎的运动及仿生研究进展 [J]. 自然科学进展, 2006, 16: 519 - 523].
- [55] Liu B, Zhang H, Guo D J, *et al.* Design, fabrication and adhesion test of lean bio - inspired seta[J]. Tribology, 2009, 29: 393 - 398 (in Chinese)[刘彬, 张昊, 郭东洁, 等. 倾斜仿生刚毛的设计、制备及黏附性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2009, 29: 393 - 398].
- [56] Sun J R, Guo C, Dai Z D. Structure and bionics of several setae [J]. Acta Biophysica Sinica, 2007, 23: 428 - 435 (in Chinese)[孙久荣, 郭策, 戴振东. 几种刚毛的结构及其仿生学[J]. 生物物理学报, 2007, 23: 428 - 435].
- [57] Dai Z D, Tong J, Ren L Q. Research progress in bionic tribology[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51: 2 353 - 2 359 (in Chinese)[戴振东, 佟金, 任露泉. 仿生摩擦学研究及发展[J]. 科学通报, 2006, 51: 2 353 - 2 359].
- [58] Burton Z, Bhushan B. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces [J]. Ultramicroscopy, 2006, 106: 709 - 719.
- [59] Burton Z, Bhushan B. Hydrophobicity, adhesion, and friction properties of nanopatterned polymers and scale dependence for micro - and nanoelectromechanical systems [J]. Nano Letters, 2005, 5: 1 607 - 1 613.
- [60] Tong J, Arnell R D, Ren L Q. Dry sliding wear behavior of bamboo[J]. Wear, 1998, 221: 37 - 46.
- [61] Tong J, Ma Y H, Ren L Q. Naturally biological materials and their tribology: a review [J]. Tribology, 2001, 21: 315 - 320 (in Chinese)[佟金, 马云海, 任露泉. 天然生物材料及其摩擦学[J]. 摩擦学学报, 2001, 21: 315 - 320].
- [62] Yang Z J, Han Z W, Ren L Q. Friction and wear behavior of bionic non - smooth surfaces at high temperature [J]. Tribology, 2005, 25: 374 - 378 (in Chinese)[杨卓娟, 韩志武, 任露泉. 激光处理凹坑形仿生非光滑表面试件的高温摩擦磨损特性研究 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25: 374 - 378].
- [63] Song Q F, Zhou H, Li Y, *et al.* Friction and wear properties of cast - iron material with bionic non - smooth surface under normal temperature [J]. Tribology, 2006, 26: 24 - 27 (in Chinese)[宋起飞, 周宏, 李跃, 等. 仿生非光滑表面铸铁材料的常温摩擦磨损性能 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26: 24 - 27].
- [64] Shafiei M, Alpas A T. Nanocrystalline nickel films with lotus leaf texture for superhydrophobic and low friction surfaces [J]. Applied Surface Science, 2001, 256: 710 - 719.
- [65] Shafiei M, Alpas A T. Fabrication of biotextured nanocrystalline nickel films for the reduction and control of friction [J]. Materials Science and Engineering C, 2008, 28: 1 340 - 1 346.
- [66] Yoon E S, Singh R A, Kong H, *et al.* Tribological properties of bio - mimetic nano - patterned polymeric surfaces on silicon wafer [J]. Tribology Letter, 2006, 21: 31 - 37.
- [67] Singh R A, Yoon E S. Biomimetics in tribology - recent developments [J]. Journal of Korean Physical Society, 2008, 52: 656 - 668.
- [68] Singh R A, Pham D C, Kim H J, *et al.* Bio - inspired dual surface modification to improve tribological properties at small - scale[J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 4 821 - 4 828.