

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.05.028

仿生织构对材料表面的摩擦学性能影响研究现状与展望

文怀兴¹, 任锐锐¹, 宋浩杰²

(1. 陕西科技大学, 机电工程学院, 西安 710021; 2. 陕西科技大学, 材料科学与工程学院, 西安 710021)

摘要: 随着科学技术的不断发展与进步, 飞机、高铁等已经成为人们日常出行的首选交通工具。然而由于速度的提高, 对其中关键零部件配副的摩擦学性能的要求也越来越高, 传统的材料或者加工方法已达不到要求。因此需要对材料表面进行改性。而表面织构技术可以有效的模仿自然界中超疏水植物叶片的表面结构, 使得在材料表面实现自润滑效果, 减少摩擦带来的耗损。基于此, 主要介绍了自然界具有疏水性能的生物表面结构、织构化对金属表面、聚合物表面摩擦学性能的影响, 并结合表面织构对材料表面的摩擦学性能影响研究现状, 对表面织构技术对聚合物的摩擦学性能影响, 以及减磨机理的研究做出了相应的展望。

关键词: 表面织构; 疏水表面; 自润滑; 摩擦学

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)05-0130-04

Current Situation and Prospect of Study on Effect of Surface Texture on Tribological Properties of Materials

Wen Huaixing¹, Ren Ruirui¹, Song Haojie²

(1. Shaanxi University of Science and Technology, Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an 710021, China;

2. Shaanxi University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering, Xi'an 710021, China)

Abstract: With the continuous development and progress of science and technology, aircraft, high-speed rail and other people's daily travel has become the preferred means of transportation. However, the demand of the key components and pairs' tribological properties are increasing, because of the raise speed. Traditional materials or processing methods have failed to meet the requirements, therefore, surface modification of materials is required. Surface texture technology can effectively mimic the surface structure of superhydrophobic plant leaves in nature. The self-lubricating effect is realized on the material surface and the wear caused by friction is reduced. Based on this, the structure of natural hydrophobic biological surface, the effect of texture on the tribological properties of metal surface and polymer surface, and the effect of texture on the tribological properties of metal surface and polymer surface were mainly introduced. According to the present situation of the study on the effect of surface texture on the tribological properties of materials, the influence of surface texture technology on the tribological properties of polymers and the study of wear reduction mechanism were prospected.

Keywords: surface texture; hydrophobic surface; self-lubricating; tribology

21 世纪是科学技术飞速发展的世纪, 而能源与环境问题是制约社会发展与进步的重要因素, 各个国家都相继提出了不同的发展战略。在调查研究中发现, 世界上总能源的三分之一以上都是由摩擦所耗损的, 磨损是机器零部件的主要失效形式之一^[1-2]。因此世界各国都非常重视并迫切的需要解决摩擦磨损问题。这表明, 进一步的研究材料的摩擦学性能, 解决摩擦磨损难题, 对我国的可持续发展有着很大意义。

经典摩擦学理论认为, 相对摩擦的两物体表面越光滑,

摩擦学性能就越好^[3-6]。因此, 在之后的很长一段时间里, 研究者都在试图不断提高材料表面的精度, 以达到提高摩擦学性能的目的。但精加工成本过高, 没有办法广泛使用, 而我们的摩擦磨损又无处不在。随着科技的不断发展, 研究人员的深入研究, 发现并不是材料表面的粗糙度变小, 精度变高, 就可以大大减小摩擦, 降低磨损, 反而是拥有特定不平整形态的表面具备较好的摩擦学特性。特定不平整形态的表面在学术上通常称为加工有表面织构的摩擦面^[7-8]。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51372103)

通讯作者: 宋浩杰, 博士, 教授, 主要从事聚合物复合材料摩擦学研究 E-mail: songhaojie@sust.edu.cn

收稿日期: 2018-02-28

引用格式: 文怀兴, 任锐锐, 宋浩杰. 仿生织构对材料表面的摩擦学性能影响研究现状与展望 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(5): 130-133.

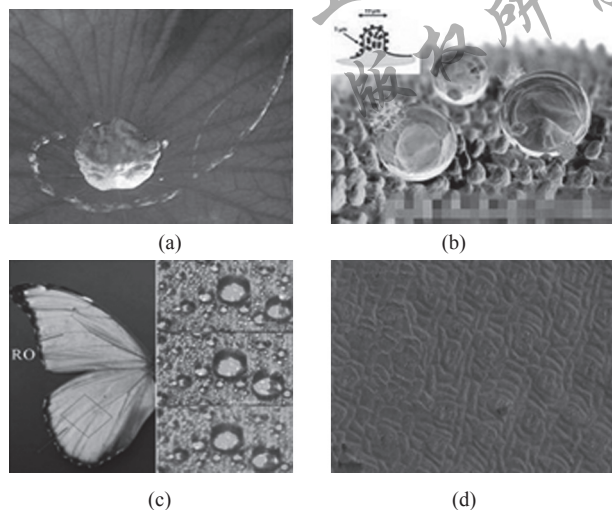
Wen Huaixing, Ren Ruirui, Song Haojie. Current situation and prospect of study on the effect of surface texture on tribological properties of Materials[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5): 130-133.

表面织构以其优异的减摩抗磨性能被证明是继表面改性、表面镀层等表面处理工艺后的一种新颖且有效的表面处理方法。这种方法的大力发展和成熟应用会对我们研究材料表面改性及摩擦学性能产生意义非凡的影响。基于此,笔者对表面织构处理对材料表面的摩擦学性能影响研究进行了汇总与分析,着重介绍了表面织构的方法,金属表面织构的摩擦学性能和聚合物表面织构的摩擦学性能研究现状及发展趋势,并对该领域提出了展望。

1 表面织构概述

广义的表面织构是指利用各种特种加工方法在材料表面制造出拥有特定形状,合适尺寸,和分布的点阵,以此来改变材料表面的摩擦学性能^[5-6]。而狭义表面织构即是基于自然界的各种具有自清洁能力的叶片,通过复制模塑法将叶片表面形貌复制在聚合物表面,从而对聚合物表面进行织构。

自然界中的许多生物都具备表面看起来光滑,但实际上却拥有微纳结构的凸起,实现一种自清洁能力,最具代表性的是荷叶,素有“出淤泥而不染”的美誉,因此将这种效应称为“荷叶效应”^[7-9]。不仅仅是植物,许多动物、昆虫等也具备这种能力。它们体表的不规则几何形貌都是经由大自然上亿年鬼斧神工雕琢而成的,这样它们就可以适应各自的生态环境而不被自然所淘汰。图1是几种天然存在不规则几何形态的生物。



a—荷叶表面乳突形貌;b—荷叶表面乳突形貌(放大100倍);
c—蝴蝶翅膀形貌;d—美人蕉表面形貌

图1 自然界中几种特定的表面形貌

图1a为具有自清洁能力的荷叶,其表面看起来是光滑的,但其实生长着微米级的乳突和纳米级的蜡晶,这些乳突和蜡晶共同赋予荷叶“出淤泥而不染”的性能,即是荷叶效应。图1b为可以在空中自由飞翔的蝴蝶,其翅膀表面有条纹和网格状的非光滑表面结构,这种结构使蝴蝶能在雨天轻易抖落雨滴,不易被雨水打落。图1c为美人蕉表面形貌。

美人蕉叶片微观形貌排列着致密、有序、规整的四变形^[10]。这些特殊的几何形貌赋予了这些生物不同于其它自然界生物的功能,也成为学术界研究的热点。

2 金属基表面织构及其摩擦学性能研究进展

1966年,Hamilton等利用软刻蚀技术在一些机械密封件上加工出不同形状的微观凸起,综合理论分析和实验验证的结果,得到了性能最佳的表面织构尺寸,此结果证明,材料表面的这些微凸结构可以充当流体动压轴承,可以有效地提高摩擦副的承载能力,降低摩擦系数^[11-12]。此后,研究者们又推出不同的表面织构技术来改变材料表面的摩擦学性能。Li Jianliang等^[13]报道了镍基复合材料的激光织构加工和其摩擦学性能。它们加工出直径150 μm和深度30~50 μm的凹坑并设计使用1.8%,7.1%和11.2%的面积密度,这些相对于其他研究者设计的相对较低。研究发现凹坑中填满了二硫化钼,摩擦系数最低值发生在面积密度为7.1%的时候。

宋起飞等^[14]模拟生物体表形貌,在试件表面运用激光工艺加工出规律分布的凹坑与条纹等微结构,使用摩擦磨损试验机探究带表面织构试件的减摩抗磨特性。结果表明:加工有表面织构试件的抗磨性比未加工表面的两倍还多,摩擦系数提升三分之二之上。Xiong Dangsheng^[15]用Nd:YAG脉冲激光在不锈钢表面制备了凹坑状表面织构。研究了不锈钢与聚四氟乙烯在乏油条件下的摩擦学性能,结果显示,由于变形,不锈钢的摩擦系数由0.08降低到0.05,延长的油膜的寿命。

Wang Xinjian等^[16]报道了一种选择性激光熔炼油墨印刷(SLM-IP)铜(Cu)纳米粒子(NPs)的工艺,在环境条件下在金属表面制备全致密的Cu减摩织构,并在不锈钢表面制备了圆盘阵列,测量了在润滑油润滑条件下的摩擦系数。盘状织构表面相对于环形织构表面和Cu膜表面,Cu膜表面具有相对较低的摩擦系数。

胡天昌等^[17]采用激光在45°钢表面加工了不同的织构形状,摩擦学性能测试结果表明,织构的存在可以有效的起到减摩抗磨作用。王素华等^[18]利用选择性激光熔炼油墨印刷(SLM-IP)铜纳米粒子(NPs)的工艺,在金属表面制备全致密的盘状和环状铜减摩织构,实验结果表明,与未处理的基片相比,摩擦系数都有所下降。

Li Jinbang等^[19]利用激光织构法在青铜盘上制备了栅格槽,星形槽,圆槽三种织构表面,分别考察了三种织构表面和光滑表面的摩擦系数和磨损率。结果表明三种织构表面较光滑表面的摩擦系数分别降低了10.55%,6.03%,9.50%,而对偶的磨损率却分别上升了47.05%,41.48%,27.21%。

Z. S. Dawit等^[20]通过激光烧蚀技术,在金属刚表面同

时加工了圆形和椭圆形两种织构,经研究表明,多种形状织构的材料表面摩擦系数与未织构表面相比不仅低且比较稳定。P. W. Shum 等^[21]利用激光加工法在基体表面加工出密度在 0~30%,直径为 40~3 000 μm 的凹坑,利用磁控溅射技术在织构表面沉积类金刚石镀膜(DLC)涂层,后利用往复滑动磨损试验机在油润滑条件下研究了几何参数对磨损性能的影响,结果表明,具有适当凹坑密度(10%)和直径 100 μm 的 DLC 涂层具有明显的改进效果。

3 聚合物基表面织构的摩擦学性能研究

聚合物因其优异的性能:如强度高,质量轻,优良的热稳定性、耐磨性和耐溶剂性,从而被广泛应用于工程机械的结构和摩擦材料^[22]。这些优异性能使得聚合物在汽车、航天和电子工业中得到广泛应用。近几年来也成为人们研究的热点问题,而聚合物轴承更是可以弥补我们传统轴承的缺点,提高轴承的耐磨性和耐腐蚀性能。研究如何改变聚合物表面的摩擦学性能为新型轴承的开发和使用提供了新的可能。因此许多研究人员利用表面织构技术对聚合物表面进行改性,以此来提高聚合物本身的摩擦磨损性能。

陈旭^[23]模拟螯斯与树蛙足部附着垫的微型构造,在丁苯橡胶表面制备和附着垫相仿的六边形表面形貌,然后使用摩擦磨损试验机,对制备有六边形织构的橡胶试件做摩擦试验,数据处理得知制备有六边形纹理橡胶表面拥有更好的摩擦或附着效果。这样的研究可以应用到汽车轮胎胎纹的改进中。

王丰等^[24]利用激光熔融法在聚酰亚胺表面刻蚀出不同形状的表面织构,经摩擦学性能研究发现,相对于光滑聚酰亚胺薄膜,表面织构化薄膜摩擦系数降低且摩擦系数更加稳定,磨损率有所降低。

W. M. Niemczewska 等^[25]研究了织构对金属-聚合物摩擦副的摩擦学性能影响,发现织构的存在可以降低摩擦系数,降低磨损率。

D. Johnny 等^[26]采用激光表面织构化与 DLC 涂层的结合增强聚醚醚酮的摩擦学性能,研究发现 DLC 涂层织构化的薄膜的在水润滑的条件下可以有效的降低材料表面的磨损率和摩擦系数。

Bo He 等^[27]采用纳米压痕-划痕系统,研究了表面织构对聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性体宏观和微观性能的影响。采用直径为 1.6 mm 的不锈钢轴承球和曲率半径为 25 μm 的洛氏金刚石头在 5, 10, 25 mN 的正常载荷下,以 1 $\mu\text{m/s}$ 的速度进行了摩擦试验。结果表明柱状织构表面的摩擦系数(COF)明显低于同一材料光滑表面的 COF,宏观试验降低了 59%,微尺度试验降低了 38%。

4 仿生织构方法

4.1 化学气相沉积法

一种特殊的化学气相沉积(ICVD)技术能够在复杂的衬底上形成薄的聚合物层。在 ICVD 中,衬底上方电阻加热的长丝提供了反应能量;因此,涂覆的衬底保持不受溶剂、高温、等离子体或光源的影响,这会改变脆弱衬底的化学或物理性质。此外,共形性质的 ICVD 工艺允许均匀涂层周围的基材具有复杂的几何形状。因此,ICVD 被认为是理想的仿生研究方法^[28]。K. Mustafa 等^[28]利用化学沉积法,以甲基丙烯酸缩水甘油酯(PGMA)为支撑层,以疏水型聚(1H, 1H, 2H-全氟十二烷基丙烯酸酯)(PPFDA)为功能层,经 ICVD 工艺沉积而成的两层聚合物片,经 SEM 测试,玫瑰花表面形貌完全复制在了材料表面,与水接触角为 $(152 \pm 3)^\circ$ 。

4.2 复制模塑法

图 2 所示为仿生复制模塑法的原理图。此方法是指先采用一种聚合物 A 直接流涎在植物叶片表面,复制得到叶片表面的微观结构,然后将另一种聚合物浇铸在 A 模板上,得到软模板 B^[29-30]。

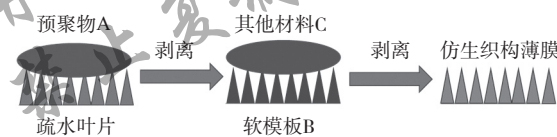


图 2 复制模塑法示意图

(1) 直接复制模塑法

直接复制模塑法在 2 次图形转移过程中都使用预聚物,预聚物材料可相同也可不同。马润恬等人以玫瑰花瓣为母版,在 PDMS 中引入 Fe_3O_4 制备得到了仿玫瑰花超疏水表面。疏水角可高达 169.11° ^[31]。

(2) 溶液复制模塑法

溶液复制模塑法是指将某些聚合物溶液,如聚醚醚酮(PEEK),聚乙烯醇(PVAL),聚苯乙烯(PS)等,直接用于制备超疏水表面,此种方法操作简单,成本低,复制效果好。杨晓华等人将 PVAL 溶液直接浇铸在美人蕉叶片表面,经固化后得到仿美人蕉织构疏水薄膜,疏水角可达 156° ^[32]。

(3) 热模塑法。

由于 PDMS 软模的耐溶剂性很好,因此经常被用作复制模板。但是,当有仿生微织构在其表面时,另一种模板的溶剂可能会对这种微织构产生影响。因此,对于一些热塑性聚合物,我们可采用直接加热使其软化,然后再进行复制模塑,从而实现了热模塑超疏水表面制备技术^[33]。

5 结语

能源的有效利用和可持续发展是当今社会必须解决的问题。摩擦学作为一门重要的边缘性学科,近几年来引起了人们广泛的关注。而随着表面织构技术及其聚合物材料的

不断发展,通过表面仿生结构来改变聚合物表面的摩擦学性能将会是人们关注的热点问题,但目前的研究还存在以下问题,还需要进一步的解决:

(1) 目前的表面织构技术还局限于机械加工,这种方法成本高,但却不能完全织构生物表面的形貌,因此还有缺陷。

(2) 目前织构主要局限在金属材料表面,而对现在快速发展的聚合物研究较少。

(3) 从研究发现,表面织构确实可以提高材料表面的摩擦学性能,但对于其中的机理却没有更多的研究。

(4) 目前对于聚合物表面仿生结构的应用主要局限在超疏水材料表面,对于其摩擦学性能的研究却很少。

基于上述问题,提出了一些新的研究建议:

(1) 借助复制模塑法,将聚合物溶液与具有疏水功能的叶片原位贴合,从而在聚合物表面形成织构。

(2) 借助数学模型,来研究其中的减磨机理。

参考文献

- [1] 张永辉. 利用表面织构改善超高分子量聚乙烯润滑特性的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Zhang Yonghui. Study on improving lubrication properties of UHMWPE by surface texture [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [2] Bhushan B. 摩擦学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Bhushan B. Introduction to tribology[M]. Beijing: Machine Press, 2007.
- [3] 李劲峰. 柔性材料表面织构润滑机理的实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Li Jingfeng. Experimental study on the Mechanism of texture lubrication on the surface of flexible materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [4] 邱孝聪, 等. 润滑与密封, 2013, 38(8): 121-124.
Qiu Xiacong, et al. Lubrication Engineering, 2013, 38(8): 121-124.
- [5] 历健全, 等. 润滑与密封, 2009, 34(2): 94-97.
Li Jianquan, et al. Lubrication Engineering, 2009, 34(2): 94-97.
- [6] 赵文杰, 等. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 621-631.
Zhao Wenjie, et al. Tribology, 2011, 31(6): 621-631.
- [7] 袁春俭. 激光表面微造型在干摩擦条件下的摩擦磨损性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008: 1-12.
Yuan Chunjian. Study on friction and Wear Properties of Laser Surface Micromoulding under dry friction condition [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008, 1-12.
- [8] Yu fei, et al. Appl Phys A, 2014, 114: 1387-1392.
- [9] Murali A, et al. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 4764-4770.
- [10] 杨晓华, 等. 中国塑料, 2013, 27(8): 77-80.
Yang Xiaohua, et al. Chinese plastics, 2013, 27(8): 77-80.
- [11] Hamilton, et al. 1966, 88(1): 85-17.
- [12] Vladescu S C, et al. Tribology International, 2015, 82: 28-42.
- [13] Li Jianliang, et al. Tribology International, 2010, 43: 1193-1199.
- [14] 宋起飞, 等. 摩擦学学报, 2006, 26(1): 24-27.
Song Qifei, et al. Tribology, 2006, 26(1): 24-27.
- [15] Xiong Dangsheng, et al. Tribology international, 2015, 82: 305-310.
- [16] Wang Xinjian, et al. Applied Surface Science, 2017, 396: 659-664.
- [17] 胡天昌, 等. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 46-52.
Hu Tianchang, et al. Tribology, 2010, 30(1): 46-52.
- [18] 王素华, 等. 工具技术, 2011, 45(12): 7-11.
Wang Suhua, et al. Tool Engineering, 2011, 45(12): 7-11.
- [19] Li Jinbang, et al. Tribology International, 2018, 118: 37-45.
- [20] Dawit Z S, et al. Applied Surface Science, 2013, 58-63.
- [21] Shum P W, et al. Tribology International, 2013, 65: 259-264.
- [22] 叶相元. 新型聚酰亚胺复合材料的制备及其力学和摩擦学性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016, 5-28.
Ye Xiangyuan. Preparation and Mechanical and tribological Properties of novel Polyimide Composites[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 5-28.
- [23] 陈旭. 改善橡胶表面摩擦学特性的仿生结构设计及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Chen Xu. Biomimetic structure design and experimental study on improving the tribological properties of rubber surface[D]. Changchun: Jiling University, 2008.
- [24] 王丰, 等. 应用化工, 2017(7): 1-8.
Wang feng, et al. Applied Chemical Industry, 2017(7): 1-8.
- [25] Niemczewska W M, et al. Archives of civil and mechanical engineering, 2017, 17(2): 344-353.
- [26] Johhy D, et al. Surface and Coatings Technology, 2017, 25: 29-41.
- [27] Bo He, et al. Tribology Letter, 2008, 31: 187-197.
- [28] Mustafa K, et al. Applied Surface Science, 2012, 259: 542-546.
- [29] 周明, 等. 物理化学学报, 2007, 23(8): 1296-1300.
Zhou Ming, et al. Acta Physico-Chimica Sinica, 2007, 23(8): 1296-1300.
- [30] Liu Yunhui, et al. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012, 404: 52-55.
- [31] 马润恬, 等. 科学通报, 2013, 58(14): 1326-1331.
Ma Runtian, et al. China Science Bulletin, 2013, 58: 1326-1331.
- [32] 杨晓华, 等. 中国塑料, 2013, 27(8): 77-80.
Yang Xiaohua, et al. China Plastics, 2010, 24(19): 84-86.
- [33] 刘建平, 等. 材料导报, 2010, 24(19): 84-86.
Liu Jianping, et al. Materials Review, 2010, 24(19): 84-86.