

图形化固体薄膜技术及其摩擦学性能的研究进展^{*}

邵天敏, 耿 哲

(清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 固体薄膜技术可以用于显著提高材料的摩擦学性能, 表面图形化技术则通过在部件表面制备预先设计的图形来改善摩擦副的接触和润滑行为。近年来, 人们尝试将表面图形化技术和固体薄膜技术相结合, 出现了一类称之为图形化薄膜的技术。研究表明: 在很多情况下, 与单纯的完整薄膜或图形化表面相比, 图形化薄膜能够同时发挥薄膜的强化作用和图形化改变摩擦界面行为的作用, 在改善和提高摩擦学性能方面具有综合优势。文中总结了图形化薄膜技术方面的研究工作; 介绍了图形化薄膜的制备技术、分类、摩擦学性能以及应用; 分析讨论了图形化薄膜的作用机理; 并展望了图形化薄膜的发展前景。

关键词: 图形化固体薄膜; 制备技术; 摩擦学性能; 减摩耐磨机理; 应用研究

中图分类号: TH117; TB43

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)02-0001-26

Research Progress in Patterned Thin Solid Film Techniques and Their Tribological Performance

SHAO Tian-min, GENG Zhe

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Tribological performance of materials can be significantly increased by applying thin solid film technologies. Surface pattern technology can also be used to improve the contact and lubrication behaviors of friction pairs by producing pre-designed patterns on components. In recent years, techniques named as patterned thin solid films which combine surface patterning technology with thin solid film technology have been developed. It has been indicated that in many cases, compared with simply applying surface patterns or full thin solid films, patterned thin films demonstrate comprehensive advantages in improving tribological performance due to the synergy between the enhancement of thin solid films and the regulation of interfacial performance by surface patterns. In this paper, studies on patterned thin film technologies are summarized. Production techniques for patterned thin solid films are introduced and classified. Research work on tribological performance and application of patterned thin solid films are also introduced. The mechanism of the patterned thin solid film techniques are analyzed and discussed. Prospects for the development of the technology are also discussed.

Keywords: patterned thin solid film; preparation technology; tribological performance; mechanism of friction reduction and anti-wear; application research

收稿日期: 2015-02-02; **修回日期:** 2015-03-17; **基金项目:** * 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB934101); 国家自然科学基金(51321092)

通讯作者: 邵天敏(1963—), 男(汉), 研究员, 博士; **研究方向:** 表面涂层技术、材料摩擦磨损; **Tel:** (010) 6278 3160; **E-mail:** shaotm@tsinghua.edu.cn

网络出版日期: 2015-03-17 11:26; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150317.1126.001.html>

引文格式: 邵天敏, 耿哲. 图形化固体薄膜技术及其摩擦学性能的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 1-26. Shao T M, Geng Z. Research progress in patterned thin solid film techniques and their tribological performance [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(2): 1-26.

0 引言

在摩擦学领域,传统上认为光滑表面通常比粗糙表面具有更好的摩擦学性能。然而在很多情况下事实并非如此,1966 年 Hamilton 等人^[1]在机械密封润滑部件表面光刻微凹凸图案,结果发现可以提高其承载能力。1980 年 Rohde^[2]以活塞环润滑为背景建立数学模型描述混合润滑区动态加载摩擦行为,分析了表面粗糙度大小和纹理方向对摩擦力、能量消耗和润滑油膜厚度的影响。随后的研究^[3-9]进一步表明,通过在材料表面制备具有一定形状、尺寸和分布的凹坑、凸起、条纹凹槽等图案阵列,均可以改善材料表面行为,起到一定的减摩耐磨作用。这类技术称之为表面图形化技术或者表面织构技术。目前对表面图形化的主要作用机理一般可以解释为,表面图形的存在改变了摩擦副的接触状态,降低了粘着发生的可能,同时也有助于降低起始摩擦;表面图形化形成的凹陷可以起到储存磨粒的作用,减缓和改善磨料磨损的程度;在乏油状态下,表面图形可以储存润滑剂,有助于改善润滑;在流体润滑条件下,表面图形的存在可以改变局部的润滑状态,形成局部的流体动压润滑,提高润滑剂的成膜能力和承载能力^[10-12]。

在材料表面沉积异质材料薄膜来提高表面性能是近几十年来材料科学领域的研究热点之一。在摩擦学领域,表面性能在很大程度上决定或影响着材料的摩擦学行为。利用薄膜技术改变表面的物理、化学性质从而改善摩擦副之间的界面行为是提高摩擦学性能的有效途径^[13-15]。一般而言,通常所指的固体薄膜,其厚度在纳米量级到微米量级,薄膜材料可以是单一材料,也可以是复合材料。在单一材料薄膜方面,近年来,以氮化物薄膜、氧化物薄膜、碳基薄膜、碳化物薄膜、硼化物薄膜等为代表的硬质薄膜以及以硫化物薄膜、类石墨薄膜、软金属薄膜、高分子聚合物薄膜等为代表的固体自润滑薄膜,由于其明显改善材料的摩擦、磨损、耐腐蚀等性能,因而在摩擦学领域得到广泛的研究和应用。为进一步提高薄膜的性能以满足摩擦学系统的需要,以元素掺杂技术、梯度薄膜技术、多层膜技术为代表的复合薄膜技术也得到了广泛的研究和重视。

表面图形化技术虽然能够在一定程度上改善材料表面的摩擦学性能,但是由于表面材料本

身并没有改变,因而在经历一定时间的摩擦后,初始的表面图形几何特征会由于磨损而改变甚至完全被磨掉,表面图形的作用会减弱直至消失。如何延缓这一过程是延长表面图形寿命的重要问题,通过对其表面进行改性是解决这一问题的有效途径。对于硬质薄膜而言,其重要的力学机械性能包括硬度、薄膜/基体的结合强度等。通常,薄膜内部存在残余应力,在膜基界面也存在由于晶格不匹配导致的界面应力。一般认为,薄膜的硬度与残余压应力相关,膜基结合强度也与残余应力密切相关。因此薄膜的残余应力在一定程度上对薄膜的性能产生影响。控制薄膜的残余应力及残余应力的分布,对于提高薄膜的工作寿命具有重要的意义。对于软材料薄膜,例如固体润滑膜等而言,由于在服役中容易发生磨损,因而如何提高其工作寿命是这类薄膜面临的重要问题。

近年来,人们开始考虑将表面图形化技术和薄膜技术相结合以充分发挥其技术优势,出现了一类称之为图形化薄膜(或织构薄膜)的技术。所谓图形化薄膜,是指表面图形与表面薄膜共存的状态。图形化薄膜研究近年来开始引起研究人员越来越多的关注,在相关方面有一定数量的文献发表。文中将从图形化薄膜的制备、图形化薄膜的摩擦学性能、图形化薄膜在摩擦学领域的应用及其研究展望等几个方面对图形化薄膜技术进行介绍和展望。

1 图形化薄膜的制备

1.1 表面图形制备技术

传统和现代制造技术很多都可以用来进行表面图形的加工。常用的表面图形化加工技术包括机械加工、电加工、光刻、激光加工、离子束加工、电子束加工、压印技术等,利用它们可以在材料表面加工出不同形状、尺寸和分布的图形如微坑、沟槽、凸台以及特殊微纳结构等^[3, 16-20]。

1.2 表面薄膜制备技术

液相沉积技术和气相沉积技术是两类最为常用的表面薄膜制备技术^[21-22]。液相沉积技术包括电镀、化学镀、溶胶-凝胶、自组装等。气相沉积技术包括物理气相沉积(Physical vapor deposition, PVD)、化学气相沉积(Chemical vapor deposition, CVD)、复合沉积技术等等。利用它

们可以在材料表面制备金属、陶瓷、聚合物、碳基材料等单一材料薄膜以及各种复合材料和复合结构薄膜。

1.3 图形化薄膜制备技术

将表面图形制备技术与薄膜制备技术相结合可以制备图形化薄膜,按照图形和薄膜的制备顺序可将图形化薄膜制备方法分为以下3类:①薄膜—图形法:先制备薄膜,然后在其上加工表面图形;②图形—薄膜法:先在表面加工图形,再在图形化表面沉积薄膜;③薄膜—图形共生法:薄膜制备和图形制备同时进行。

1.3.1 薄膜—图形法

这种直接图形化薄膜表面的方法需要注意两个问题:一是能在可控的尺度范围内精确去除薄膜材料;二是尽可能避免薄膜机械性能的损失、裂纹的产生和薄膜/基材结合强度的下降^[23]。人们尝试利用各种表面图形加工技术对薄膜进行直接加工,期望获得具有理想摩擦学性能的图形化薄膜表面。

机械加工是常见的表面图形化方法,也有用其对薄膜进行图形化处理的报道,De Mello 等人^[24]曾尝试对 Cr 电镀层表面直接进行喷丸图形化处理。但由于机械加工方法易对薄膜造成损伤,甚至导致薄膜被去除,因此较少采用这种方法直接对薄膜进行图形化加工。

电加工方法具有无切削力,可对高硬度、高强度、高熔点、高韧性、高脆性等特殊材料进行高效、精密和微细表面图形化加工的特点^[25-27],其中的电解加工^[28-29]、电刻蚀^[30]等方法可以直接在薄膜表面加工图形。Qian 等人^[31]采用改进的掩模电解加工方法在硬 Cr 镀层表面制备了直径 220~320 μm 、深度 4~16 μm 的微坑阵列。Hiraoka 等人^[30]采用电刻蚀的方法在以铝合金为基体的 Cr 电镀层(厚度 10 μm)表面腐蚀出针尖形和通道形的孔隙,从而制备出表面呈岛状分布的不连续涂层。

光刻方法包括紫外线光刻、激光光刻、电子束光刻等技术,可以制备精细复杂图形结构,工作效率较高,可以直接对薄膜进行图形化处理。Chouquet 等人^[7]开发了利用激光光刻技术在 CVD 含氢($a\text{-C:H}$)类金刚石薄膜(Diamond-like carbon, DLC)表面制备微坑阵列的方法,具体分为5步:①DLC 薄膜表面沉积 SiO_2 掩模和

光刻胶;②激光图形化光刻胶;③ SF_6/CHF_3 等离子体刻蚀 SiO_2 层;④ O_2 等离子体刻蚀 DLC 薄膜;⑤ SF_6/CHF_3 等离子体刻蚀剩余的 SiO_2 层。该方法具有3个优点:①直接图形化薄膜表面,不造成附加损伤;②工艺可精确控制且可重复;③表面图形具有高的深宽比。

利用能量束可以直接在薄膜表面加工图形。常用的能量束加工方法包括电子束刻蚀^[32]、离子束刻蚀^[33-35]和激光束加工。在能量束加工技术中,激光图形化技术在工程上的应用最为普遍。激光表面图形化(Laser surface texturing, LST)技术具有加工效率高、精度高、环境清洁以及可在常温、常压下加工的特点,相比其它表面图形化技术占有较大优势,近年来的相关研究开展的较为普遍^[15, 36-42]。研究表明:激光的能量密度、偏振方向、波长、脉冲宽度、脉冲数、光斑尺寸等参数是影响薄膜表面图形化效果的重要因素。Dumitru 等人^[43-47]采用飞秒激光对 TiCN 和 TiN 薄膜表面进行图形化加工,确定了薄膜破坏和消融的激光能量密度阈值和使热扩散距离小于薄膜厚度(约 1 μm)的激光脉冲波长。Dong 等人^[48]的研究表明:飞秒激光图形化 DLC 薄膜表面的消融阈值明显低于皮秒激光,且激光脉冲数会影响 DLC 薄膜表面微坑的形貌。Yasumaru 等人^[49-50]研究了飞秒激光偏振方向、波长和脉冲宽度对 TiN 和 DLC 薄膜表面纳米图形化效果的影响,结果表明:激光偏振方向影响薄膜表面图形形状和尺寸,图形化表面结构尺寸与激光波长成正比。Kononenko 等人^[23]研究了皮秒和纳秒激光脉冲宽度、波长和光斑尺寸对 TiN 薄膜表面微坑图形制备的影响,结果表明:薄膜消融速率随光斑尺寸减小而迅速增加。

在利用激光对薄膜表面进行直接图形化的过程中,会使薄膜的成分和微观结构发生变化,改变薄膜性能,可能会对薄膜造成损伤。Dumitru 等人^[40]研究发现:在利用飞秒和纳秒激光对 CVD 方法沉积的厚度为 1 μm 的含氢 DLC($a\text{-C:H}$)薄膜进行微坑图形加工过程中,薄膜出现剥落并发生非晶碳膜的石墨化。Ding 等人^[51]采用纳秒激光在磁控溅射非晶碳($a\text{-C:H}$)膜表面制备了微凸起图形(直径 40 μm ,高 120 nm),结果发现:微凸起的中心出现多孔结构和纳米石墨相,纳米硬度和弹性模量明显下降,并且激光还

会引起 $\alpha\text{-C:H}$ 薄膜层间剥落^[52]。但是也有研究者发现激光对薄膜微观结构的改变会提高薄膜性能。Amanov 等人^[53]采用纳秒激光在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 厚化学气相沉积的 Si-DLC 薄膜表面制备深度 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的微圆坑,发现薄膜表面图形化区域由于激光作用而产生纳米晶石墨,使薄膜硬度和弹性模量都有所提高。

为了降低和避免激光表面图形化过程对薄膜性能产生的不利影响,有必要改进激光直接图形化薄膜表面的工艺。Demir 等人^[54-56]采用纳秒光纤激光在 TiN 薄膜表面制备圆坑阵列,通过引入倾斜脉冲序列和调整激光束的散焦,有效控制圆坑的半径和深度,保持了薄膜与基体的结合强度,并使薄膜在有限范围内熔化,热裂纹只出现在圆坑内;摩擦磨损试验表明:在重载条件下,薄膜仍然没有出现碎裂。Roch 等人^[57-58]开发了直接激光干涉图形化(Direct laser interference patterning, DLIP)方法,他们将纳秒激光的主光束分成 2 个或 3 个光束,使其在 ta-C 薄膜表面发生干涉,通过调整激光能量密度控制薄膜的石墨化、剥落或烧蚀过程,从而在薄膜表面制备出点、线阵列。Dowling 等人^[59]通过在 TiN 薄膜下面引入数百纳米厚的 Cr 或 Cu 过渡层,被 KrF 准分子激光通过掩模板选择性烧蚀去除,所得到的图形化 TiN 薄膜质量优于没有过渡层的薄膜。

纳米压印技术具有超高分辨率、高产量和低成本的优势,可望成为一种工业化生产技术应用。Tani 等人^[61]将 Si 模压入聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜表面的紫外光固化树脂层,制备出柱状和圆坑纳米图形(直径 200 nm , 间距 500 nm , 深度 200 nm),再采用离子注入和沉积方法将 8 nm 厚 DLC 薄膜沉积在纳米图形化表面,最后采用浸渍工艺将全氟聚醚(PFPE)自组装到薄膜表面形成 4 nm 厚防污膜。所制备的图形化薄膜具有减摩、耐磨和防油性能。

1.3.2 图形—薄膜法

这种方法可以利用各种表面图形化技术预先在基材表面制备图案,再沉积所需要的薄膜,因而不受薄膜材料的限制,与薄膜—图形法相比,避免了后加工对薄膜的直接作用而产生的损伤,在很多情况下有利于提高膜/基结合力^[62]。

在利用传统的机械加工方法^[63-68]首先加工

图形再在其上制备薄膜方面,Sui 等人^[69]采用金刚石砂轮研磨的方法在 SiC 表面制备 $10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 宽、 $4\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 深的 U 形和 V 形平行沟槽,再沉积碳薄膜,薄膜表面保留了沟槽形貌。De Mello 等人^[24]采用喷丸(钢球 $\Phi 0.7\text{ mm}$)方法对冷轧辊表面进行图形化,再电镀 Cr 层,Cr 镀层保留了喷丸后的表面形貌。

在采用电加工技术先制备图形再沉积薄膜方面,彭钧钧和周飞等人^[70]采用电火花线切割方法在钛合金表面加工 $0.15\sim 0.3\text{ mm}$ 宽、 0.1 mm 深的沟槽和网纹图案,再在图形化表面沉积 CrN 和 DLC 薄膜,从而获得图形化薄膜。Pimentel 等人^[71]采用电火花方法在 AISI D2 钢表面加工出平行、交叉和径向排列的宽 $45\sim 170\text{ }\mu\text{m}$ 、深 $1\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 的沟槽,再磁控溅射沉积 W-S-C-Cr 薄膜,从而制备出具有沟槽形貌的薄膜。Zhou 等人^[33-34]采用离子束辅助沉积(Ion beam assisted deposition, IBAD)系统对钕稳定氧化锆硬盘磁头表面进行氮离子束刻蚀,刻蚀后的表面包含许多不同尺寸(直径 $0.3\sim 4\text{ }\mu\text{m}$, 高度 $3\sim 20\text{ nm}$)的上窄下宽的岛状图案,再在表面分别沉积 $\alpha\text{-C}$ 、 $\alpha\text{-CN}_x$ 、 BN_x 和 TiN_x 薄膜,从而获得图形化薄膜。吴文斌和王晓雷等人^[29]采用光刻—掩模微细电解技术在 45 钢表面制备圆形凹坑阵列,再采用微细电沉积技术在凹坑中沉积 CoNiMnP 磁性薄膜,从而获得磁性薄膜阵列。

光刻方法虽然操作相对复杂,但在制备精细图形方面具有优势,因此广泛应用于图形化表面制备。Pettersson^[72]、Nakano^[73]和 Mo^[74]等人采用掩模紫外光刻方法制备了尺寸和分布达到微米精度且边界清晰的图案,并在 Si 图形化表面分别采用 PVD 方法制备 TiN、DLC、NiFe 等薄膜或利用旋涂法制备碳纳米管图形化薄膜。Zhao^[75]、Wang^[76]等人直接在 Si 片表面沉积光刻胶并掩模紫外曝光,再以光刻胶为掩模采用电感耦合等离子体方法刻蚀 Si 表面,然后用 SF_6 和 C_2H_4 气体进一步刻蚀 Si 表面,再去除光刻胶,最后在图形化 Si 片表面磁控溅射沉积 DLC 薄膜。Corbella 等人^[77]将 SiO_2 微球通过 LB(Langmuir-blodgett)膜技术自组装到 5 cm^2 的 Si 片上,形成颗粒($\Phi 307\text{ nm}$)紧密堆积的六边形图案,再采用 SiO_2 颗粒退火后直接作底板或者基于 SiO_2 颗粒掩模离子刻蚀的胶体光刻方法图形化 Si 表面,最

后利用 CVD 方法沉积 DLC 薄膜,从而获得紧密堆积半球形或微柱网络图案的图形化 DLC 薄膜。

激光直接图形化薄膜表面会造成薄膜损伤。为避免这一问题,部分研究者先采用激光对表面进行图形化处理再沉积薄膜。Shum 等人^[78]先采用激光在 M2 钢表面制备不同直径和图形面积率的微坑,再在图形化表面磁控溅射沉积 DLC 薄膜,发现图形化表面影响薄膜表面附近的电场和等离子体分布,从而影响薄膜结构和机械性能。该图形化方法会影响微坑最终的尺寸并且 DLC 薄膜不能有效沉积在微坑的底部和侧面。他们^[79]还利用激光先在 316L 不锈钢表面制做柱形结构(宽 100 μm ,深 10 μm ,间距 50 μm),再叠加尺寸更小的柱形结构(宽 30 μm ,深 1 μm ,间距 10 μm),最后沉积 DLC 薄膜,从而制备出具有超疏水性质的双尺寸图形化 DLC 薄膜表面。Ding 等人^[80]采用激光(4 ns,10 kHz)在不锈钢表面制备一系列平行沟槽(宽 40 μm ,深 3~4 μm ,间距 60~800 μm),再在不锈钢表面磁控溅射沉积 0.8 μm 厚的 DLC 薄膜,发现沟槽内表面的薄膜厚度仅为 0.4 μm ,小于外表面的薄膜厚度。

自组装方法具有过程自发迅速,可组装不同尺度组分和不同材料的特点。采用先图形化基底、再自组装的方法制备的图形化自组装膜可在基底上实现功能化图形,在表面改性和微观结构设计方面发挥重要作用^[81-82]。Mo 等人^[83]先在超高真空环境中,利用 H_2 裂解得到的 H 原子将 Si 片钝化,再以原子力显微镜中导电铂覆盖的圆锥探头为阴极,化学活性 Si 片为阳极,水分子在高压电场中分解得到的离子(H^+ , OH^- , O^{2-})为电解液,在 Si 片表面生长圆柱状(直径 700 nm,高度 6.4 nm)的 SiO_2 ,探头以一定速度移动,在 Si 片表面形成圆柱 SiO_2 阵列,最后将离子液体分子自组装到 SiO_2 阵列表面,形成图形化的离子液体膜。他们发现纳米图形化结合疏水阴离子改性的表面能明显降低粘着力。Wan 等人^[84]将抛光、清洗后的新鲜 Cu 箔表面浸入 75 $^\circ\text{C}$ 、1 mol NaOH 溶液 2 h,刻蚀生成颗粒状 Cu_2O 薄膜表面,经去离子水清洗后再浸入室温含 0.01 mol 烷基磷酸的乙醇溶液 24 h,烷基磷酸分子自组装到 Cu_2O 薄膜表面形成图形化薄膜。他们还用类似方法在 Zn 表面自组装了硬脂酸图形化薄膜^[85]。

彭倚天等人^[82]先对 Si 片表面光刻图形化,再对 Si 片表面进行两次羟基化,形成氨基与甲基交替的图形化自组装膜,该薄膜的不同区域具有不同的表面性质,能选择性吸附碳纳米管。

仿生方法是通过向自然界生物学习,模拟生物系统进化过程中已优化好的材料和形态结构,采用有机物复制生物表面再沉积薄膜的方法,获得所需要的薄膜表面微观结构,实现理想的摩擦学性能^[86-89]和防污效果^[90-93]。Shafiei 等人^[94-96]采用醋酸纤维薄膜复制荷叶和蛇皮表面形貌,在纤维薄膜表面沉积 Au 膜提高导电性,然后在 Au 膜表面电镀沉积纳米晶 Ni 薄膜,最后用丙酮去除醋酸纤维薄膜,从而获得具有生物表面形貌的纳米晶(30 $\pm$ 4 nm)Ni 图形化薄膜。Wang 等人^[97]先采用二甲基硅氧烷(PDMS)固化复型荷叶的表面形貌,得到与荷叶形貌相反的图形,再在图形表面溅射一层金膜,以便于下一步电沉积 100 μm 厚的 Ni 镀层,然后将 PDMS 去除,最后在 Ni 镀层表面磁控溅射沉积 1.5 μm 厚的 DLC 薄膜,从而获得具有荷叶表面形貌的 DLC 薄膜。他们^[98]还采用类似方法制备了复制稻叶和蛇皮表面形貌且具有超疏水性质的 Ni 电镀层。

1.3.3 薄膜—图形共生法

薄膜—图形共生法是利用特定的方法,在材料表面直接制备图形化的薄膜。与图形—薄膜法或者薄膜—图形法的区别在于,图形和薄膜的生成过程同步进行。这类方法中比较典型的有掩模沉积法、激光诱导改性法、图形化原位生长法等。

1.3.3.1 掩模沉积

掩模沉积方法采用具有不同图案的掩模板将基体表面部分区域掩盖,再采用 PVD 或 CVD 方法进行薄膜沉积,在未被掩模板掩盖的基体表面区域生长薄膜,沉积过程结束后,将掩模板与基体分开,最终获得与掩模板图案一致的图形化薄膜(见图 1)。掩模沉积制备图形化薄膜的方法操作简单,可以根据需要沉积任意材料和形状的薄膜,具有广阔的工业应用前景。其技术关键是制备出满足以下条件的掩模板:①承受薄膜制备过程中的高温环境;②镀膜过程中保持形状稳定不发生翘曲;③保证沉积材料顺利通过掩模板的空白处到达基材表面;④保证薄膜图形与预先设计的一致^[99]。

掩模沉积方法在电子工业中应用较多^[100],近年来在以摩擦学应用为背景的薄膜制备方面也引起了关注。Lyashenko 和 Soroka 等人^[99, 101-104]采用各种几何参数并且经过特殊成形的不锈钢掩模板,结合离子镀膜技术沉积 TiN 薄膜。由于在矩形网状钢丝掩模板阴影处发生轻微沉积,因此沉积好的薄膜不是矩形而是梯形,他们还优化了薄膜的图形尺寸。邵天敏、张远月和王喜眉等人^[105-108]将具有各种图案的不锈钢掩模板与基材表面贴紧,采用多弧离子镀、激光真空弧沉积和离子束辅助沉积等方法制备 Ti、TiN 和 TiAlN 图形化薄膜。上述研究者均发现图形化薄膜能提高膜/基结合力和薄膜的内聚强度,残余应力也比完整薄膜明显下降。Hua 等人^[109-110]在 2 mm 厚的 M2 钢片上钻出一系列沿不同半径圆周分布的圆孔(Φ 2 mm),并将其作为掩模板,再采用多弧离子镀技术在 M2 钢表面沉积出 2~3 μm 厚呈辐射状排列的 TiN 薄膜圆点阵列。

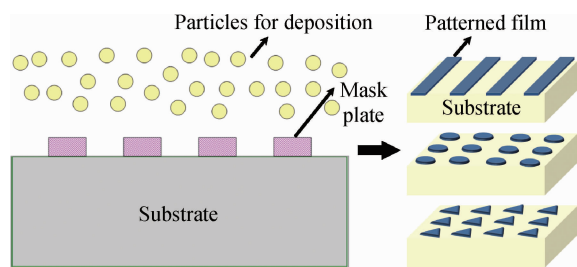


图 1 掩模沉积示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the masked deposition

为了使掩模沉积方法获得工业应用,研究者对该方法做了有益的探索和改进。Aoki^[111], Takashima^[112], Nakagawa^[113]等人采用 Φ 0.1 mm 的钨丝构成网格间距为 1 mm 的钨丝网作为掩模放在铝、橡胶、高分子等软材料表面,再采用 CVD 方法沉积 1 μm 厚 DLC 薄膜,从而获得边长 1 mm,间距 0.1 mm 的正方形 DLC 薄膜。Takashima 等人^[114]采用 6 自由度机器人和微喷墨系统将树脂墨喷涂在基体表面形成细网格图案作为掩模,同时控制基体温度使网格线条细化,最后采用 CVD 方法沉积 DLC 薄膜。这种掩模沉积方法可以在三维物体如圆柱、球等表面制备图形化薄膜。Liu 等人^[115-116]提出了一种利用掩模沉积制备图形化涂层的方法。该方法采用的掩模可以是任意材料,包括各种树脂材料、墨水、颜料或胶带等

等。掩模图案可以直接在部件表面画出,也可通过橡胶滚轴将掩模材料通过模板或网板印在部件表面。掩模施加到表面后,可以采用 PVD 或 CVD 方法沉积涂层到部件表面显露区域,最后超声空化去除掩模,得到图形化的涂层。

1.3.3.2 激光诱发表面改性

激光诱发表面改性技术是指在利用激光对基体局部区域照射过程中,引入具有化学活性的气体,在激光诱导下,反应气体与基体材料发生化学反应,在激光作用区形成新的化合物,同时通过控制激光照射区域可以形成所需几何形状的表面图形。这类技术也可以称之为激光诱导反应直写技术。通过选择合适的激光工艺参数和活性气体,结合激光表面图形化技术,可以获得所需表面成分和结构的图形化薄膜。金永吉、邵天敏等人^[117-119]在不同的环境气氛下利用激光对钛、铝等金属表面进行选择性照射,通过激光局部诱导改性,分别获得了图形化的 TiN、 Al_2O_3 化合物。

1.3.3.3 图形化原位生长

原位生成方法可以直接生长图形化薄膜。Singh 等人^[120]在 Si 片表面磁控溅射一层 9 nm 厚 Ni 薄膜,再将 Ni 薄膜在 800 $^{\circ}\text{C}$ 的纯 H_2 气氛中退火 15 min,使薄膜转变成纳米点阵列的图形化薄膜,在此基础上再通过 CVD 方法获得图形化 DLC 薄膜。李东山等人^[121]在 45 钢表面电沉积 Ni-W 镀层,采用酸性镀液体系,选择较大的电流,使沉积的镀层由于应力释放在表面产生网状裂纹,从而获得原位生成的图形化薄膜。Aouadi 等人^[122-123]采用 CVD 方法在铬镍铁合金表面生长垂直排列约 20 μm 长的碳纳米管,直接获得图形化表面,再电沉积 MoS_2 至相邻碳纳米管的间隙内,从而获得以碳纳米管为基的图形化薄膜。

占位法是一种类似掩模沉积的方法,它是将颗粒或光刻胶先沉积在基材表面形成图形化阵列,再沉积薄膜,最后去除颗粒或光刻胶,从而获得图形化薄膜。Zimmerman 等人^[124]将含微颗粒(Φ 1.5~10 μm)的溶液喷涂到不锈钢基材表面,随后反应溅射沉积 TiN 薄膜,最后采用超声搅拌方法去除微颗粒,从而制得表面含有微坑的 TiN 薄膜。Guleryuz 等人^[125]先在 Si 片表面旋涂 2 层光刻胶,然后通过烘烤使光刻胶在 Si 片表面形成圆形岛状阵列,再反应溅射沉积 0.75~1 μm 厚

的 TiN 薄膜,最后采用抛光和在溶液中浸渍的方法去除光刻胶,从而获得表面具有微坑阵列的图形化薄膜。

旋涂法具有精确控制薄膜厚度,所制备的薄膜平整致密,操作简单,性价比高的特点,其制备的表面图形化薄膜主要应用于微纳机电系统(Micro/nano electro mechanical systems, M/NEMS)器件^[126-127]。Zou 等人^[128-130]将胶体 SiO₂ 纳米颗粒(Φ 18~25 nm)溶液以速度 4 000 r/min 持续 1 min 旋涂至 Si 片表面,再在 900 ℃、N₂ 环境中退火 2 h,从而得到表面颗粒直径介于几十到 200 nm 的纳米图形化表面。Zhang 等人^[131]将 5 μ L 聚苯乙烯微球(Φ 0.44 μ m 和 2 μ m)悬浮液以速度 200 r/min 持续 30 min 旋转涂覆到 Si 片表面,在 110 ℃ 烘干 10 min 后得到聚苯乙烯微球组成的图形化表面。这种图形化表面有助于降低粘着和摩擦。

总体而言,无论是采用薄膜—图形法、图形—薄膜法还是薄膜—图形共生法,均可实现从纳米、微米量级到宏观尺度的图形化薄膜的制备。

2 图形化薄膜的摩擦学性能

改善和提高摩擦学性能是图形化薄膜技术的一个主要目标。近年来,关于表面图形化薄膜的摩擦学性能研究工作主要集中在:优化设计各类图形参数,发挥薄膜和图形化的综合优势;在不同摩擦学试验条件下评价图形化薄膜适应工况的能力;图形化薄膜作用机理的探索和分析等几个方面。其中通过研究揭示图形化参数(几何形状、尺寸和分布)和工况条件(温度、载荷、润滑状态等)的相关性是图形化薄膜获得正确应用的关键^[7]。

需要指出的是,在传统的表面图形化研究中,表面凹陷和凸起均为同一种材料,一般定义凹陷部分投影面积所占总面积的比例为图形面积率。在图形化薄膜的研究中,依制备方法的不同,会出现表面凹陷和凸起部分为不同材料的情况。为避免混淆,仍然定义凹陷部分的投影面积与整个面积的比例为图形面积率,而不考虑材料的区别。

2.1 表面图形参数的影响

2.1.1 图形形状的影响

近年来,人们尝试制备各种表面图形来提高薄膜的摩擦磨损性能。图 2 列出的是不同参考文献中报道的图形化薄膜的摩擦系数测试结果。

为方便对比,图中给出的是与完整薄膜相比,图形化薄膜摩擦系数的变化百分比。从图 2 可以看出,各种图形形状均能不同程度地改变摩擦系数。在一些情况下,摩擦系数会有所增大,而另一些情况下,表面图形化会起到降低薄膜摩擦系数的作用。摩擦系数的改变程度与薄膜材料、图形形状、尺寸、面积率等图形参数和润滑条件等密切相关。Lee 等人^[132]研究了微坑和蜂窝图形化 AlCrSiN 薄膜与 Al₂O₃ 球(Φ 9.25 mm)配副在载荷 5 N、速度 0.25 m/s、滑动距离 1 000 m 条件下的旋转滑动摩擦学性能,结果表明:与完整薄膜相比,图形化薄膜使摩擦系数明显降低且更平稳,蜂窝图形化表面使磨痕宽度最小。彭钧钧和周飞等人^[70]研究了沟槽、网纹和凹坑图形化 CrN、DLC 薄膜与 Si₃N₄ 球配副在去离子水环境中的旋转滑动摩擦学性能,结果表明:沟槽和网纹图形化 CrN 薄膜的摩擦系数低于完整薄膜,且随沟槽、网纹宽度的增加而减小,图形化 DLC 薄膜的稳态摩擦系数低于或接近完整薄膜;图形化薄膜的磨损失重均低于完整薄膜。

但是也有关于图形化薄膜未能起到改善摩擦学性能作用的报道。如图 2 所示,圆坑图形化 CrN 薄膜的摩擦系数高于完整薄膜,圆坑图形化 DLC 薄膜在干摩擦条件下和网格沟槽图形化 DLC 薄膜在模拟体液环境中的摩擦系数均高于完整薄膜,造成上述现象的原因是图形化薄膜的圆坑深度较浅,储存磨屑的能力有限,当圆坑中填满磨屑时,增加了接触面积^[70, 133];沟槽易使润滑液挤出,且沟槽具有边刃效应,因此使薄膜的摩擦磨损严重^[134]。

除了试验研究外,还有学者对薄膜表面图形影响摩擦学性能的原因作了理论分析。Ovaert 等人^[135]采用弹性应力模型研究了薄膜表面图形对正压力分布的影响,计算结果表明,表面图形具有锋利或圆形边缘的薄膜,其正压力分布在图形边缘处出现尖锐的峰值;表面图形具有球冠形状时,正压力峰值减小或消失。正压力尖峰使图形边缘薄膜的磨损加速,没有尖峰的接触压力分布能延长薄膜的磨损寿命。

综合图 2 和上述分析结果可以看出,图形化薄膜的摩擦学行为受到薄膜材料、表面图形参数、摩擦条件等因素的共同影响,其摩擦学行为呈现

出一定的离散性。现有的大部分研究工作主要还是针对特定的试验条件开展的有限的研究,包括材料、参数、试验条件和结果等,研究工作之间缺乏可比性,且研究工作以试验研究为主,相关的理论分析和建模研究较少。由于目前认识的局限性,还难以确切获得图形化薄膜的摩擦学行为与各种影响因素之间的整体规律。

2.1.2 表面图形尺寸的影响

薄膜表面图形参数如直径、宽度、间距、深度,以及由这些参数引申出来的图形面积率、深宽比等是影响图形化薄膜摩擦学性能的重要参数。

图形化薄膜的图形面积率影响薄膜与对磨副的接触面积,从而影响薄膜的摩擦学性能^[136],图3给出了一些文献中报道的摩擦系数随图形面积率的变化情况。图形面积率增加意味着接触面积减少,在多数情况下可以降低摩擦系数;部分曲线呈“V”字形,说明存在最优的图形面积率,使薄膜的摩擦系数最低。Kim等人研究表明,2 μm 厚 CrZrSiN 薄膜在 5W30 机油润滑条件下,蜂窝图形面积率较高的薄膜摩擦系数仅为完整薄膜的 1/5,而面积率较低的蜂窝图形使薄膜的摩擦学性能降低^[137]。具有同心圆图案的 DLC 薄膜在同心圆间距选择恰当时,才能因接触面积减小使薄膜的摩擦系数比完整薄膜明显降低^[138-139]。

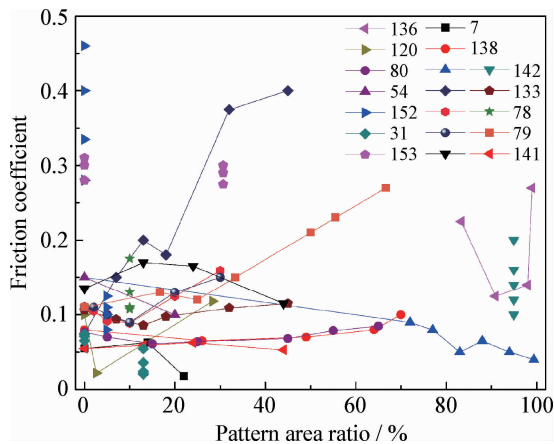


图3 图形化薄膜的摩擦系数随图形面积率的变化(①图中数字为参考文献号;②同一篇文章中相同面积率对应的多个摩擦系数值表示的是不同图形参数或摩擦条件下得到的结果)

Fig. 3 Variation of friction coefficient of patterned coatings with pattern area ratio (① Figures are reference numbers; ② Multi values of friction coefficient at the same area ratio in one reference represent the results from different pattern parameters or friction conditions)

Shum等人^[78, 133]详细研究了圆坑面积率对DLC薄膜往复滑动摩擦学性能的影响,结果表明:在油润滑条件下,圆坑面积率为13%的薄膜可以明显降低摩擦磨损,归因于圆坑能储油和捕获磨屑,可以提供持续润滑。圆坑面积率太小,起不到储存润滑油和磨屑的作用;圆坑面积率太大使真实接触面积减少,导致平均接触压力增大,均对薄膜的摩擦学性能不利。

Shum等人^[79, 134]还将图形化DLC薄膜在模拟体液环境中进行了类似试验,结果表明具有合适面积率和尺寸的图形化薄膜能改善摩擦学性能,具备生物医学应用潜力。徐中等人^[140]发现摩擦过程中树脂基仿生涂层表面凹坑面积率随摩擦次数增加而逐渐减小;随凹坑面积率减小,涂层磨损失重先减少后增加,使涂层耐磨性较好的凹坑分布率范围与载荷有关。He等人^[141]的研究表明微坑面积率为44%的DLC薄膜由于微坑数量过多,导致接触面积减小,摩擦接触应力增大,诱导DLC薄膜发生石墨化转变,同时结合微坑储存磨屑、润滑液的功能,从而使摩擦系数较完整薄膜的明显降低,但磨损率有所上升;微坑面积率为24%的薄膜虽然没能降低摩擦系数,但由于微坑数量合适且能容纳磨屑,降低了石墨化转变程度,维持了薄膜硬度,从而使磨损率最低。

图形面积率选择不当也会降低薄膜的摩擦学性能。如图3中厚度为2 μm 的DLC图形化薄膜(圆坑直径400 μm ,深100 μm)与WC销(Φ 3 mm)配副,在接触应力9 MPa、滑动速度0.005 m/s的干摩擦条件下,圆坑面积率为7%的薄膜能减轻磨损,其余薄膜的摩擦系数和磨损量均随圆坑图形面积率增加而上升^[133]。Bandorf等人^[142]研究了微圆点(Φ 12 μm)图形化250 nm厚 α -C薄膜的摩擦学性能,结果表明:随圆点间距减小,对磨副间的接触面积增加,导致摩擦系数上升。

除图形面积率外,图形直径、宽度、深度等特征尺寸以及间距等参数同样对图形化表面的摩擦学行为产生重要影响^[143]。表面图形深度较浅难以有效储存磨屑或润滑液,并且图形特征易随磨损过程进行而逐渐消失,对薄膜摩擦学性能不利;结合图2可见,多数情况下表面图形尺寸较大时,由于接触面积减少过多,润滑膜厚降低等原因而使摩擦系数升高。表面图形深度较大有

利于储存磨屑或润滑液并能保持图形特征;尺寸较小的图形在润滑液存在时更容易发挥局部弹流润滑作用,从而对改善薄膜的摩擦学性能有利。

Chouquet 等人^[7]研究了圆坑直径(65 μm 和 7 μm)和深度(1.3 μm 和 0.3 μm)对 2 μm 厚含氢 DLC 薄膜($a\text{-C:H}$)与 100Cr6 钢球(Φ 5 mm)在接触应力 1.1 GPa、速度 5.5 cm/s、油润滑条件下对摩时的摩擦学性能的影响,结果表明:圆坑深度增加使润滑油膜厚度局部下降,导致高的摩擦系数和薄膜破坏;圆坑直径减小,使接触压力局部增加,从而使润滑油粘度局部上升,在这种情况下,剪切应力使圆坑里的润滑油减少,从而使润滑油膜厚度局部增加,对改善薄膜的摩擦学性能起到有利作用。Pimentel 等人^[71]研究了沟槽间距对 2.4 μm 厚 W-S-C-Cr 薄膜与 100Cr6 钢球(Φ 6 mm)配副在载荷 1~15 N、速度 0.1 m/s、旋转半径 3 mm 和 20 mm 条件下的摩擦学性能的影响,结果表明:摩擦会在界面产生 WS_2 润滑膜,较大的沟槽间距有利于 WS_2 的形成,使图形化薄膜的摩擦系数低于完整薄膜;沟槽间距太小则不利于 WS_2 的形成,摩擦系数较高。Demir 等人^[144]采用光纤激光制备表面微坑,然后利用阴极弧沉积 3 μm 厚的 TiN 薄膜,研究了圆坑直径、深度和间距对薄膜划痕性能的影响,结果表明:圆坑较浅时,图形面积率较高的薄膜抗划痕性能最好,在苛刻试验条件下没有出现裂纹。此外在干摩擦条件下,深度较浅的微坑易被磨屑填满,使图形化薄膜和完整薄膜的摩擦系数接近^[138-139]。

考虑到图形面积率对图形化表面的摩擦学性能会产生影响^[145],研究者们在图形面积率固定的前提下,进一步研究了图形尺寸的影响。Bandorf 等人^[142]在 250 nm 厚 $a\text{-C}$ 薄膜表面同时增加圆坑直径和间距,发现薄膜的摩擦系数虽有波动,但在试验参数范围内大体呈下降趋势,并在圆坑直径为 32 μm 时达到最小。Shum 等人^[78]研究了圆坑直径(40~300 μm)对 1.5 μm 厚 DLC 薄膜与 WC-6Co 球(Φ 5 mm)配副在接触应力 2.5 GPa、速度 0.005 m/s、行程 3 mm、时间 200 min、油润滑条件下的往复滑动摩擦学性能的影响,结果表明:与完整薄膜相比,合适的圆坑直径(100 μm)可以明显改善薄膜的摩擦学性能。圆坑直径过小,影响其储存磨屑的能力;圆坑直

径过大则不易建立油膜压力,同时还会使圆坑边缘产生大的接触应力;上述两种情况均会降低其改善摩擦学性能的作用。

2.1.3 表面图形分布的影响

表面图形方向与滑动方向的关系、表面图形的排列等也会明显影响图形化薄膜的摩擦学性能^[146]。Pettersson 等人^[72]研究了沟槽和方坑(宽度 5、20 和 50 μm)的方向与滑动方向间的关系对 Si 表面沉积的 1 μm 厚 DLC 薄膜在聚 α 烯边界润滑条件下往复滑动摩擦学性能的影响。对偶件为 Φ 10 mm 的轴承钢球,试验条件为:接触应力 0.68 GPa、频率 5 Hz、行程 2.5 mm,结果如图 4 所示。当 5 μm 和 20 μm 宽沟槽的方向与滑动方向垂直时,滑动路径被沟槽隔断,沟槽可使润滑油从侧面泄漏出去,从而能避免由于润滑油局部压力过高导致其向薄膜内部及界面渗透造成的薄膜剥落,因此薄膜的摩擦学性能较优;当沟槽方向与滑动方向平行时,楔形效应可能在局部不断起作用,促进润滑油高压的形成,使薄膜的摩擦学性能变差;20 μm 宽方坑的方向与滑动方向成 30°角时,薄膜的摩擦系数迅速下降,5 μm 宽方坑不管与滑动方向夹角如何,均保持低摩擦。上述结果表明:在边界润滑条件下,有效接触区内尺寸小、分布密的图案或者图案欠密集但方向能保证接触区频繁通过凹陷,都可以降低摩擦减轻磨损。

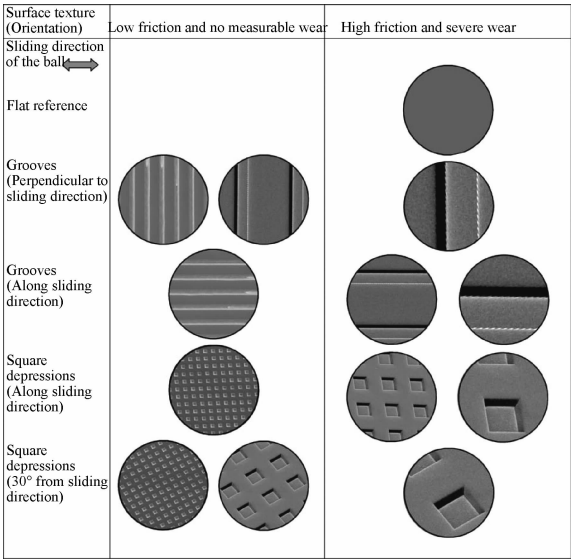


图 4 表面图形方向对薄膜摩擦学性能的影响^[72]
Fig.4 Effects of the orientation of the surface pattern on the tribological properties of coatings^[72]

Hua^[109]、Dong^[147]等人比较研究了圆点沿径向对齐排列和交错排列的图形化 TiN 薄膜和完整薄膜与 ASSAB 17 工具钢平底销(Φ 6 mm)配副,在载荷 900 N、速度 0.07~0.23 m/s、时间 4 h、T32 油润滑条件下的摩擦学性能,结果表明:圆点沿径向对齐排列的图形能更有效地增厚润滑膜,产生流体动力润滑效应和排走磨屑,使该图形化薄膜的摩擦学性能优于完整薄膜和圆点交错排列的薄膜。Yasumaru 等人^[49]研究了激光平行和交错条纹图形化后具有纳米结构表面的 DLC 薄膜的旋转滑动摩擦学性能,结果表明:激光扫描区的部分 DLC 薄膜由于发生结构变化使硬度降低,因此交错条纹图形化薄膜可以使表面硬度呈现周期变化特点,导致摩擦系数增大。

2.2 不同试验条件下图形化薄膜的摩擦学行为

摩擦条件对图形化薄膜的摩擦学行为具有重要影响,表面图形只有在合适的工况条件下,才能充分发挥其减摩耐磨作用^[148-149]。

2.2.1 图形化薄膜的高温摩擦学行为

温度影响图形化薄膜的微观结构、机械性能、表面润滑膜的状态、氧化物的形成等,从而影响薄膜的摩擦学性能。Amanov 等人^[53]研究了激光图形化 Si-DLC 薄膜与 Al₂O₃ 球(Φ 10 mm)配副在室温至 200 ℃、聚 α 烯润滑条件下的往复

滑动摩擦学性能,结果表明:在上述温度条件下,图形化薄膜的摩擦系数和磨损率均明显低于完整薄膜。随温度从室温升到 100 ℃,图形化薄膜的摩擦系数上升,归因于磨屑团聚和磨痕表面氧含量的上升,薄膜的磨损率没有明显变化。200 ℃时薄膜稳定阶段的摩擦系数和磨损率均降至最低,归因于薄膜接触表面的石墨化以及机械性能和油的状态的变化。

Soroka 等人^[99]进行了掩模沉积 TiN 图形化薄膜与硬化钢配副在室温和 200 ℃、干摩擦和润滑条件下的环块试验,结果表明:随温度升高,图形化薄膜的磨损增加量低于完整薄膜。Oksanen 等人^[150]研究了微圆坑图形化 ta-C 薄膜结合 WS₂ 固体润滑膜,与不锈钢球配副在接触应力 1 GPa、速度 0.05 m/s、滑动距离 250 m、室温和 250 ℃条件下的摩擦学性能,结果表明:与室温相比,250 ℃时图形化薄膜明显延长了初始 WS₂ 层的磨损寿命,同时 WS₂ 氧化生成 WO₃,使微坑能够承担部分载荷,保护薄膜表面,减少了磨损。庄业^[151]研究了掩模沉积法制备的条纹状金属氮化物(AlTiN、TiN)薄膜在 850 ℃条件下与熔融玻璃间的界面摩擦行为,结果见图 5,可知:薄膜表面沿运动方向的条纹图形能够显著改善材料的高温界面摩擦性能。

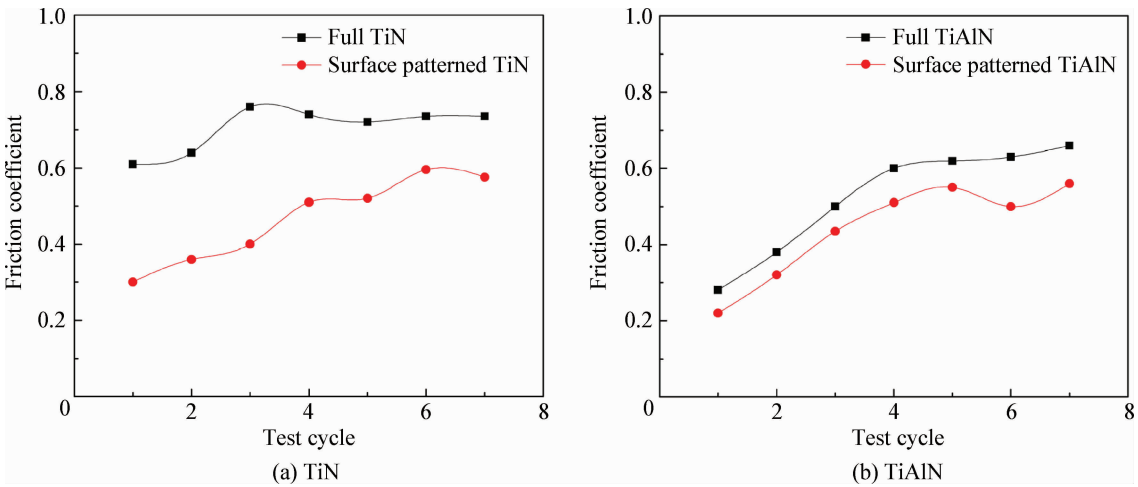


图 5 TiN 和 TiAlN 完整薄膜和图形化薄膜在 850 ℃条件下与熔融玻璃的摩擦系数随试验次数的变化^[151]
Fig. 5 Variation of friction coefficient of molten glass to full and patterned TiN and TiAlN films under 850 ℃ with test cycles^[151]

2.2.2 不同载荷和速度条件下的摩擦学行为

图 6 为不同文献报道的图形化薄膜在不同载荷条件下的摩擦系数,载荷涵盖从纳牛至数千

牛很宽的范围,可以看出,对于大多数情况,在相同的试验条件下,图形化薄膜的摩擦系数大体上随载荷增加呈下降趋势。Singh 等人^[120]研究了

薄膜在大多数速度条件下相比完整薄膜均能降低摩擦系数,且摩擦系数随速度增加呈降低趋势。Chouquet^[7]、Shafie^[94]、Singh^[120] 等人分别研究了图形化薄膜和完整薄膜在低速($\leq 0.05\text{ m/s}$)条件下的摩擦学性能,结果表明:图形化薄膜的摩擦系数比完整薄膜明显降低,且表面破坏减少,这是因为图形化薄膜可以扩大流体动力润滑区的范围^[7],减少真实接触面积^[94]和降低粘着力^[120]。彭约钧^[70]、Qian^[31]、Muthuvel^[153] 等人比较了图形化薄膜和完整薄膜在速度 $>0.05\text{ m/s}$ 条件下

的摩擦学性能,结果表明:薄膜表面图形能储存磨屑,并为接触表面提供润滑剂,从而使摩擦系数低于完整薄膜。Hua 等人^[109]研究了点阵 TiN 图形化薄膜在滑动速度 $0.07\sim 0.23\text{ m/s}$ 、T32 油润滑条件下的摩擦学性能,结果表明:增加滑动速度提高了薄膜阵点前的润滑油压力,可以更有效地冲走磨屑,并且能增大配副间的间隙,使流体动力润滑膜厚度增加,对摩副材料的转移减少和犁削程度减轻,从而使图形化薄膜的摩擦系数和磨损失重均随速度增加而下降。

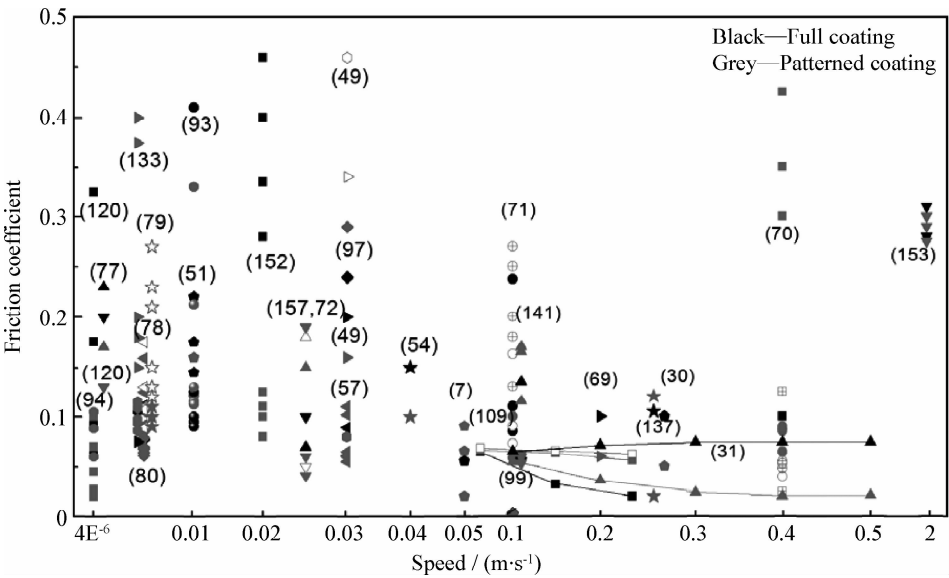


图 7 图形化薄膜在不同滑动速度条件下的摩擦系数(① 括号中数字为参考文献号;② 同一篇文献中相同速度对应的多个摩擦系数值表示的是不同图形参数或摩擦条件下得到的结果)

Fig. 7 Friction coefficient of patterned coatings under different sliding speeds (① Figures in the brackets are reference numbers; ② Multi values of friction coefficient at the same sliding speed in one reference represent the results from different pattern parameters or friction conditions)

2.2.3 对摩副材料及其表面结构的影响

图形化薄膜与其摩擦对偶材料的匹配性也在很大程度上影响其摩擦系数。Ding 等人^[51]研究了 Si_3N_4 陶瓷球和 AISI-52100 不锈钢球($\Phi 6\text{ mm}$)对摩副材料对微凸起(直径 $40\text{ }\mu\text{m}$,高 120 nm)图形化非晶碳($a\text{-C}$)膜在载荷 $100\sim 1\text{ }000\text{ mN}$ 、速度 10 mm/s 、时间 30 min 条件下的往复滑动摩擦学性能的影响,结果表明: $a\text{-C}$ 图形化薄膜与 Si_3N_4 球配副时,薄膜表面的高粗糙度和非均匀的硬度使摩擦系数升高;与 AISI-52100 钢球配副时,薄膜表面微凸起和多孔结构使真实接触面积减小,从而降低粘着,并且摩擦过程中接触表面间形成富含纳米石墨的软润滑膜,因此使摩擦系数与完整薄膜相比明显下降。

Bandorf 等人^[138-139]研究了圆形和菱形微坑图形化 W 掺杂 $a\text{-C}:\text{H}$ 薄膜与具有不同图形化表面的对偶件配副在面接触条件下的摩擦学性能,结果如图 8 所示。由图 8 可知:两个图案尺寸类似的图形化表面接触时,易互相阻碍而使摩擦系数较高;当图形化薄膜与抛光表面接触时,摩擦系数最低。

2.2.4 不同润滑条件和环境气氛下的摩擦学行为

Song 等人^[155]在激光沟槽(宽 $30\text{ }\mu\text{m}$,深 $35\text{ }\mu\text{m}$,间距 $0.1, 0.3, 0.5$ 和 1 mm)图形化 1Cr18Ni9Ti 钢表面制备 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 厚的含氢非晶碳($a\text{-C}:\text{H}$) DLC 薄膜,研究了该薄膜与 GCr15 钢球($\Phi 6\text{ mm}$)配副在真空环境中的摩擦学性能,结果表明:图形

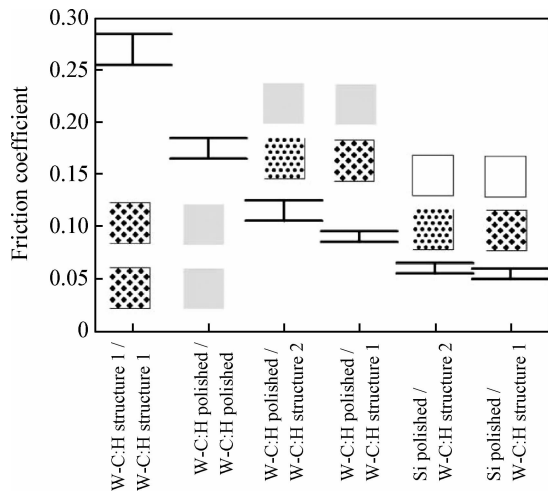


图8 摩擦配对对图形化薄膜摩擦系数的影响^[138]

Fig. 8 Effects of the pairing on the friction coefficient of surface patterning coatings^[138]

化薄膜的硬度和残余应力降低,减少了硬脆磨屑的生成,同时沟槽能捕获磨屑,有效延长了 $a-C:H$ 薄膜的磨损寿命,其中具有合适沟槽间距 (0.5 mm) 薄膜的磨损寿命最长。Voevodin 等人^[156]将图形化薄膜与固体润滑剂结合,在 Ti-TiC-TiC/DLC 薄膜表面采用激光制备沟槽图案,再在图形化薄膜表面溅射一层 MoS_2 薄膜,形成三维薄膜结构,在不同湿度条件下 MoS_2 能补充到接触表面,从而使薄膜具有自适应功能,延长了磨损寿命。Bandorf 等人^[142]研究发现微圆点图形化 DLC 薄膜的摩擦系数随湿度增加而缓慢升高。

Pettersson 等人^[72, 157]研究了沟槽和方坑图形化 TiN 和 DLC 薄膜与轴承钢球 (Φ 10mm) 配副在干摩擦和聚 α 烯边界润滑条件下的往复滑动摩擦学性能,结果表明:在干摩擦条件下,带有沟槽图形的 TiN 薄膜能明显降低摩擦,图形化 DLC 薄膜的摩擦系数升高且不稳定,但薄膜的磨损都很轻微;乏油边界润滑条件下,图形化 TiN 薄膜的摩擦系数在滑动摩擦一段时间后急剧上升,图形尺寸较小的 DLC 薄膜能更好地提供润滑,使摩擦系数较低且长久保持平稳;富油润滑条件下,表面图形化对摩擦系数的影响较小。

Nakano 等人^[73]研究了表面具有圆形和方形凹陷或凸起图案的 NiFe 薄膜与平底铸铁销 (Φ 3 mm) 配副,在载荷 9.8~98 mN、速度 1~5 mm/s、3 种不同粘度的润滑油、面接触条件下的往复滑动摩擦学性能,结果表明:图案形状对

摩擦系数的影响与润滑状态相关,在 Stribeck 曲线的混合润滑区域,图形化薄膜与完整薄膜的摩擦系数几乎相同;在全膜润滑区域,具有凹陷或凸起图案的薄膜的摩擦系数变化趋势相近,这归因于图案边缘压力作用的影响,圆形图案薄膜的摩擦系数比方图案的更低,归因于圆形图案的楔形效应更强。Al-Azizi 等人^[158]研究了纳米表面图形化和润滑剂分子结构对液体边界润滑往复滑动摩擦性能的影响,结果表明:具有线性分子结构的润滑剂在接触表面间易发生固化,但是纳米图形化表面凹陷区域内的液体润滑剂不会发生固化,有效减少了接触表面间固态润滑剂的面积,从而降低摩擦;具有支链分子结构的润滑剂不易形成长程有序结构,因此纳米图形化表面对此类润滑剂边界润滑的影响可以忽略。

离子液体润滑膜可以进一步降低图形化薄膜的摩擦系数,使薄膜有望在 M/NEMS 器件中获得更好的应用。Zhao 等人^[75, 159]的研究表明,与未加离子液体的 DLC 图形化薄膜相比,离子液体的加入使薄膜的粘着力和摩擦力明显下降。蒲吉斌等人^[160]研究了凹坑图形化 DLC 薄膜在载荷 0.1 N 和 3 N、离子液体润滑条件下的摩擦学性能,并与完整薄膜进行了对比,结果表明:在 0.1 N 载荷下,图形化薄膜由于具有相对较小的接触面积,而使摩擦系数低于完整薄膜;在 3 N 载荷下,图形化薄膜的摩擦系数明显高于完整薄膜且非常不稳定,这是因为在长时间往复摩擦过程中,图形边缘的薄膜萌生疲劳裂纹,裂纹扩展导致薄膜局部脱落。

2.3 图形化薄膜与固体润滑剂的协同作用

研究表明:图形化薄膜与固体润滑剂的相互协同作用能改善材料表面的摩擦学性能^[123, 161-174]。

薄膜表面图形可以储存固体润滑剂并在摩擦过程中不断将其提供到接触表面,从而改善薄膜的摩擦学性能。Zimmerman 等人^[124]对比研究了包含和不包含固体润滑剂(微晶石墨或非晶碳膜)的微坑图形化 TiN 薄膜与 Al_2O_3 球配副 (Φ 6.35 mm) 在载荷 1 N、速度 0.1~0.2 m/s 条件下的摩擦学性能,结果表明:加入固体润滑剂后,由于微坑能储藏固体润滑剂并提供它们到磨痕表面,使图形化 TiN 薄膜的摩擦学性能与完整薄膜相比明显得到改善。Luster 等人^[175]研究了微坑图形化 VN 薄膜结合 Ag_3VO_4 固体润滑膜

与 Si_3N_4 球(Φ 6 mm)配副在室温和 750 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的摩擦学性能,结果表明:与完整薄膜相比,微坑能储存 Ag_3VO_4 、 V_2O_5 、 AgVO_3 等氧化物,使薄膜的磨损率和摩擦系数明显下降。图形化薄膜表面微坑容纳的物质不同,会影响薄膜的摩擦学性能。Guleryuz 等人^[125, 176]研究了微坑图形化 TiN 薄膜与 Al_2O_3 球或 440C 钢球配副在石墨和钢润滑条件下的摩擦学性能,结果表明:较硬的 Al_2O_3 球产生较高的接触压力,易造成 TiN 薄膜的磨损和促进 TiN 经摩擦氧化反应生成 TiO_2 , TiO_2 堆积在微坑内部及周围,使微坑内储存的石墨润滑剂减少,因此薄膜的摩擦系数没有明显下降;较软的 440C 钢球易被磨损出现平台,降低接触应力,同时薄膜微坑内的固体润滑剂和钢的磨损产物并存,从而使薄膜的摩擦系数较低且保持稳定。

固体润滑膜可以提高图形化薄膜适应不同工况环境的能力。Voevodin 等人^[177]研究了微坑图形化 TiCN 薄膜结合 MoS_2 、石墨和 Sb_2O_3 固体润滑膜,与 M50 钢球(Φ 6.35 mm)配副在潮湿空气和干燥 N_2 环境中的滑动摩擦学性能。结果表明:在潮湿空气和干燥 N_2 循环变化的环境中,

薄膜表面转移层在石墨和 MoS_2 间来回重复变化,微坑不断提供新的润滑剂,使薄膜具有自适应能力,从而一直保持低摩擦系数。他们^[178]还研究了微坑图形化 TiAlCN 薄膜结合 $\text{Mo}/\text{MoS}_2/\text{Ag}$ 固体润滑膜在室温和 570 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的摩擦学性能,结果表明:固体润滑膜使图形化薄膜更能适应温度变化,室温时由 MoS_2 提供润滑,570 $^{\circ}\text{C}$ 时由银和钼酸银提供润滑,从而使摩擦系数在较宽的温度范围内低于完整薄膜。Aouadi 等人^[122-123]将碳纳米管图形化薄膜与 MoS_2 相结合,利用 ① 纳米管的高强度和韧性;② 纳米管可以变为具有自润滑性能的石墨;③ MoS_2 保持纳米管不发生断裂;④ 碳纳米管高热导率延缓 MoS_2 氧化等特点,使薄膜具有适应环境的能力,在室温和 350 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的使用寿命明显延长,并在干湿空气循环变化环境中一直保持低摩擦。

2.4 图形化薄膜摩擦磨损作用机理的探讨

图形化薄膜表现出良好的摩擦学性能与表面图形化的作用和薄膜自身的作用都密不可分。图形化薄膜中图形、薄膜以及图形化薄膜的综合作用见图 9。对于其作用机理可以做如下分析。

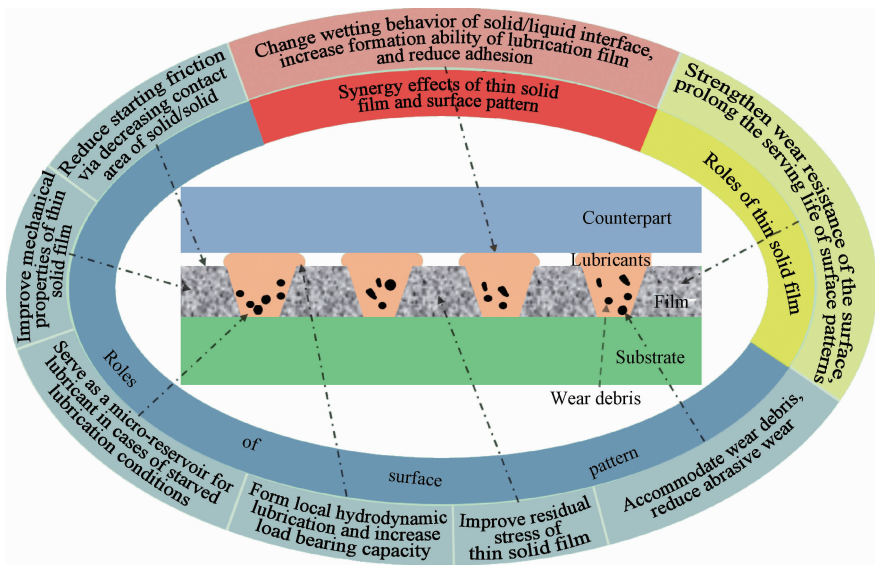


图 9 图形化薄膜在摩擦磨损过程中的作用

Fig. 9 Roles of patterned thin solid films in the process of friction and wear

对于图形化薄膜而言,薄膜的作用主要是提供所需的材料性质,例如硬度、弹性模量、表面能、与润滑介质的配伍性等等。根据应用需要,不同的薄膜材料所能提供的材料性质各不相同。而图形的作用则包括:改变摩擦副的接触几何特

性减少粘着的发生;图形区域存储润滑介质改善乏油条件下的润滑^[54, 72, 179];图形凹陷处容纳磨屑减少三体磨粒磨损^[44, 180-181];促进图形区域局部弹性流体动压润滑的形成^[54, 182],扩大不同载荷和滑动速度条件下的流体动压润滑范围^[149, 183],提高

润滑油膜的承载能力^[184]等等。图形与薄膜的复合作用可以改变接触表面的润湿行为,以此控制薄膜表面的亲水或疏水性质,从而起到降低粘着和摩擦的作用^[97, 185]。

相比于无薄膜的情况,薄膜的存在强化了表面的抗磨损能力,使得所制备的表面图形得以更持久的保持,提高了表面图形的工作寿命。另一方面,伴随着图形化过程,薄膜材料的微观结构有时也会发生改变。例如在激光图形化 DLC 薄膜过程中,高能量激光使薄膜微观结构发生变化(出现纳米石墨),提高薄膜的硬度、弹性模量和抵抗塑性变形的能力,从而明显提高薄膜的摩擦磨损性能^[53, 152]。Ding 等人^[80]研究发现在 DLC 薄膜沉积过程中,不锈钢表面的沟槽图案使局部电场增强,形成硬软交替的薄膜结构。这种薄膜结构通过缓解剪切应力和耗散裂纹能量,抑制裂纹的萌生、扩展和薄膜的剥落。此外,图形的存在使得薄膜不连续,产生应力释放,可以明显改善薄膜内的应力分布,使得薄膜的机械力学性质分布更均匀,有助于缓解工作过程中由于应力不均导致的应力集中和裂纹萌生,提高薄膜的抗破坏能力。

王喜眉和邵天敏的研究^[107-108]表明,与完整薄膜相比,图形化 TiAlN 薄膜明显降低了残余应力,提高了薄膜与基材的结合力,从而改善了薄膜的摩擦学性能。Soroka 等人^[99]研究了 TiN 薄膜在干燥和润滑状态下的滑动摩擦和切削性能,结果表明:表面图形化能增强薄膜的内聚强度和薄膜/基材的结合强度,降低薄膜残余应力,限制裂纹沿界面的扩展,从而减少薄膜在弯矩或拉力作用下的剥离失效,减少接触载荷作用下的薄膜边缘的脱落失效,降低薄膜与基体分离的可能,因此改善了薄膜的摩擦学性能。Hiroshi 等人^[61]对图形化薄膜表面微凸体的静态应力分布进行有限元分析,结果表明:柱状图形的 von Mises 应力主要集中在微凸体的中心和底部,且应力数值较高,使微凸体易磨损剥落,薄膜寿命较短;圆坑图形的 von Mises 应力分布在微凸体表面周围,且应力数值较低,使薄膜摩擦学性能更优。Yui-chi 等人^[111]采用有限元方法分析了刚性圆柱压入时,Al 基体表面 0.01 mm 厚方块图形化 DLC 薄膜的应变分布,结果表明:图形化薄膜的拉应变明显低于连续薄膜,且随单块薄膜区域尺寸的

减小而降低;图形化薄膜应变的降低归因于单块薄膜区域间 Al 基体的变形。

薄膜表面的图形还会通过影响摩擦过程中薄膜的剥落行为和结构变化,起到降低摩擦、延长磨损寿命的作用。Ding 等人^[80]的研究表明 DLC 薄膜表面的沟槽能捕获磨屑,避免了硬质磨屑造成局部压力过高引起石墨化温度降低导致的石墨化相变,从而保持了薄膜硬度,延长了磨损寿命。Yuichi 等人^[111]研究发现在方块图形化 DLC 薄膜与不锈钢球(Φ 6 mm)配副的旋转滑动摩擦过程中,方块薄膜间的空隙能有效避免薄膜的断裂。Amanov 等人^[53]发现图形化 Si-DLC 薄膜促进磨痕表面发生结构变化,包含较多的 sp^3 键,有利于改善薄膜的摩擦学性能。

3 图形化薄膜在摩擦学领域的应用研究

由于合理设计的图形化薄膜有助于明显改善摩擦学性能,近年来,图形化薄膜在诸如传统润滑机械部件(如缸套表面)、切削刀具、成形工具(如用于金属板材成形的辊、冷冲模)和机械端面密封表面获得应用^[24, 72, 157]。在计算机硬盘、生物医学、M/NEMS 和海洋装备等领域的减摩耐磨方面的应用也开始得到重视^[86, 186-189]。

在切削刀具方面的应用是表面图形化技术应用研究的一个典型代表^[190],在刀具表面制备图形化薄膜,可以进一步提高刀具的减摩耐磨性能和改善刀具的切削特性。图形形状、尺寸和面积率等参数是影响刀具表面图形化薄膜摩擦学性能和使用寿命的重要因素。Antonyuk 等人^[101]在硬质合金刀尖采用掩模法制备 8 μ m 厚的图形化 TiN 薄膜,发现薄膜残余应力随图形尺寸减小而降低。在车削钢材(HRC62-64)试验中,完整薄膜出现开裂和剥落,图形化薄膜没有出现剥落,并且存在一个最优的图形面积率,使刀具寿命最长。

Obikawa 等人^[191]在硬质合金刀具前刀面制备了具有沟槽、方坑或方块阵列图案的 DLC 或 TiN 薄膜,在油润滑条件下进行车削 A6061-T6 铝合金的试验,结果表明:平行于刀刃的沟槽和方块阵列能有效降低切削过程中的摩擦力;图形尺寸减小或深度增加有利于改善润滑效果。Popp 等人^[192]利用图形化薄膜技术来提高生产铆钉的冷锻冲头寿命。他们首先在冷锻冲头表

面沉积 2 μm 厚的 TiN 薄膜,然后采用准分子激光(波长 248 nm)结合掩模投影技术,在 TiN 薄膜表面制备图形化面积率不同(10%~25%)的圆坑(直径 10 μm ,深度 1 μm),结果表明:图形面积率为 20%的薄膜延长冲头寿命达 183%,超过 MoS_2 润滑条件下的冲头寿命。图形面积率太高,使接触压力快速上升,导致冲头与工件阻力增加,对减轻磨损不利。表面图形的侧角和深度对冲头和工件间的摩擦磨损都起到重要影响。

刀具薄膜表面的微坑和沟槽图案有利于排走切屑、储存切削液和改善切削温度分布,从而提高刀具的切削性能。榎本俊之等人^[193]在铣刀切削刃上制备 0.8 μm 厚 150 μm ×150 μm 的方块 DLC 薄膜阵列,充分润滑和极微量润滑(供液量 17 mL/h)条件下的切削试验结果表明:薄膜表面的微槽使切削液持续提供润滑,减小切削力,使刀具保持良好的摩擦学性能。da Silva 等人^[194]采用激光在 WC-Co 刀具前刀面化学气相沉积 TiCN-Al₂O₃-TiN 3 层薄膜(TiCN 8 μm , Al₂O₃ 1.5 μm , TiN 1 μm)表面,制备平行和垂直于切削方向的 2 μm 深的沟槽图案,切削试验结果表明:前刀面经表面图形化后明显提高刀具寿命,并且垂直于切削方向的沟槽延长刀具寿命的效果更佳。孙华亮等人^[195]采用聚焦离子束在硬质合金刀具 TiAlN 薄膜表面加工出深度小于薄膜厚度的沟槽图案,车削试验和有限元计算结果表明:薄膜表面图形化有利于改善刀具表面的切削温度分布,降低切削温度,提高刀具耐磨性。

薄膜表面图形化结合固体润滑材料是改善刀具切削性能的重要途径。Xing 等人^[196-197]采用飞秒激光在 Al₂O₃/TiC 刀具前刀面 WS₂/Zr 软涂层表面制备纳米沟槽(宽 350~400 nm,深 120~150 nm,间距 700~800 nm),干切削试验结果表明:图形化薄膜降低了切削力、切削温度、摩擦系数和刀具磨损,归因于低剪切强度软涂层能减小刀具/切屑间的摩擦和图形化表面能减少刀具/切屑间的接触长度。Guleryuz 等人^[198]在车刀刀片微坑图形化 TiN 薄膜表面溅射一层钨膜固体润滑剂,车削试验结果表明:与单一 TiN 薄膜相比,图形化薄膜结合固体润滑剂能明显延长刀片寿命,减少刀刃磨损;钨膜在切削液存在时对减少刀片磨损起重要作用,在干切削时由于温度过高而失去润滑作用。

图形化薄膜不仅在传统工业获得应用,而且在医学、M/NEMS、电子产品等领域也有应用价值。Yadroitsev 等人^[199]采用选区激光熔化技术制备具有特殊粗糙和多孔特征的牙冠表面,再在图形化表面沉积耐磨陶瓷薄膜,用这种方法制备的植入下颚骨的支撑义齿的人工牙根,与天然牙的构造类似;表面特殊尺寸和分布的孔可以允许骨组织穿过植入物生长,从而使植入物与生物体牢固结合。选区激光熔化技术还可制备具有凸起和凹陷特殊结构表面的骺椎,沉积生物相容性薄膜后作为人体植入材料应用。Zhou 等人^[33, 200-201]采用离子束刻蚀和沉积方法在硬盘磁头表面制备图形化 $\alpha\text{-C}$ 、 $\alpha\text{-CN}_x$ 、BN_x 和 TiN_x 薄膜,研究了图形化薄膜与硬盘凹凸表面 DLC 薄膜配副在载荷 50 mN 和 80 mN、速度 0.5 m/s 条件下的旋转滑动摩擦学性能,结果表明:图形化 $\alpha\text{-CN}_x$ 薄膜相比其它薄膜具有更高的耐磨性和更低的摩擦系数,主要原因在于 $\alpha\text{-CN}_x$ 薄膜的高硬度以及图形化表面能降低静摩擦力。Tani 等人^[61]研究发现:DLC 结合 PFPE(全氟聚醚)自组装单分子层的表面图形化薄膜,具有减摩耐磨和防污性能,可以应用于平板电脑和智能手机触摸屏的防污保护膜。Burton^[202]和 Singh^[203-205]等人在 Si(100)表面制备具有纳米图案、荷叶、香芋图案的图形化 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)薄膜,能增大接触角,减小粘着力,从而明显降低摩擦系数,可望在 M/NEMS 中获得应用。

4 总结及展望

研究表明,表面图形化薄膜技术综合了表面图形化技术和固体薄膜技术的优势,能够在很大程度上改善摩擦副的摩擦、磨损及润滑性能。其适用范围包括不同的温度环境和湿度环境、真空及各种气体环境、不同载荷、速度条件及各种润滑条件如干摩擦、油润滑、水润滑、其它润滑介质等,在摩擦学技术领域具有很好的应用前景。

目前,关于图形化薄膜的研究大都是试验研究。由于薄膜材料、结构,图形种类、尺寸、分布,图形化薄膜的制备方法和工艺的多样性,摩擦磨损试验和工况条件的复杂性,目前所得到的研究结果具有很大的离散性,尚无一个广泛适用的图形化薄膜的设计准则。

制备方法在很大程度上影响图形化薄膜的

性能,是图形化薄膜技术应用的关键。在完善现有制备方法的基础上,通过借鉴薄膜技术和表面加工技术特别是微纳加工技术的最新成果开发更先进的表面图形化薄膜制备方法是图形化薄膜技术发展的重要方向之一。

目前对于图形化薄膜的摩擦学行为机理尚没有形成统一的认识。需要从图形化薄膜表面的应力分布、接触状态、图形参数对润滑状态的影响、薄膜图形化处理对薄膜微观结构和膜基结合的影响等方面开展系统的研究。

基于现有摩擦学理论和通过大量试验获得的规律,建立图形化薄膜的相关模型和优化设计准则,对于图形化薄膜技术的研究和应用将具有重要的理论和实际意义。

根据图形化薄膜技术的特点,拓展其应用领域是图形化薄膜技术研究的重要任务之一。

目前,对于图形化薄膜的研究工作尚处于开始阶段,相关研究工作开展的也并不普遍,通过开展系统的研究工作,有望使图形化薄膜这一具有特色的技术获得更为广泛的应用。

参考文献

- [1] Hamilton D B, Walowit J A, Allen C M. A theory of lubrication by micro-irregularities [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1966, 88(1): 177-185.
- [2] Rohde. A mixed friction model for dynamically loaded contacts with application to piston ring lubrication [C]. *Surface Roughness Effects in Hydrodynamic and Mixed Lubrication*, Chicago, 1980: 19-50.
- [3] Podchernyaeva I A, Yurechko D V, Panashenko V M. Some trends in the development of wear-resistant functional coatings [J]. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2013, 52(3/4): 176-188.
- [4] Cai M R, Guo R S, Zhou F, et al. Lubricating a bright future: lubrication contribution to energy saving and low carbon emission [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(12): 2888-913.
- [5] 雒建斌, 李津津. 摩擦学的进展和未来 [J]. *润滑与密封*, 2010, 35(12): 1-12.
Luo J B, Li J J. Advancements and future of tribology [J]. *Lubrication Engineering*, 2010, 35(12): 1-12 (in Chinese).
- [6] 王素华, 吴新跃. 基于摩擦学的表面织构技术应用研究进展 [J]. *工具技术*, 2011, 45(12): 7-11.
Wang S H, Wu X Y. Research on applications of surface texturing based on tribology [J]. *Tool Engineering*, 2011, 45(12): 7-11 (in Chinese).
- [7] Chouquet C, Gavillet J, Ducros C, et al. Effect of DLC surface texturing on friction and wear during lubricated sliding [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, 123(2/3): 367-371.
- [8] Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components [J]. *Tribology Transactions*, 2001, 44(3): 359-366.
- [9] 韩志武, 任露露, 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(4): 289-293.
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(4): 289-293 (in Chinese).
- [10] 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(2): 94-97, 103.
Li J Q, Zhu H. Surface texture and its influence on tribological properties [J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(2): 94-97, 103 (in Chinese).
- [11] 邱孝聪, 樊曙天, 伍勇. 表面织构改善摩擦磨损性能的研究进展 [J]. *润滑与密封*, 2013, 38(8): 121-124.
Qiu X C, Fan S T, Wu Y. Study of surface texture for improving friction and wear properties [J]. *Lubrication Engineering*, 2013, 38(8): 121-124 (in Chinese).
- [12] 张玉周. 表面织构化改善摩擦学性能研究综述 [J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(1): 64-67, 70.
Zhang Y Z. Review of research on surface texturing for improving tribological performance [J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*, 2013, 32(1): 64-67, 70 (in Chinese).
- [13] Holmberg K, Matthews A. *Coatings tribology* [M]. 2nd edition. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [14] 蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 多尺度强韧化碳基润滑薄膜的研究进展 [J]. *中国表面工程*, 2014, 27(6): 4-27.
Pu J B, Wang L P, Xue Q J. Progress in strengthening and toughening carbon-based films [J]. *China Surface Engineering*, 2014, 27(6): 4-27 (in Chinese).
- [15] Roy M. *Surface engineering for enhanced performance against wear* [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [16] Donnet C, Erdemir A. Solid lubricant coatings: recent developments and future trends [J]. *Tribology Letters*, 2004, 17(3): 389-397.
- [17] 董志伟, 万勇, 屠婷婷, 等. 45# 钢表面织构上硬脂酸薄膜减摩性能的研究 [J]. *摩擦学学报*, 2014, 34(1): 1-7.
Dong Z W, Wan Y, Tu T T, et al. Tribological performance of stearic acid film on textured 45 # steel substrate [J]. *Tribology*, 2014, 34(1): 1-7 (in Chinese).
- [18] 郑森森. 材料表面微纳结构的制备及其研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2011, 40(24): 145-149.
Zheng M Y. Preparation of micro-nano-structure of materials surface and its research process [J]. *Material & Heat Treatment*, 2011, 40(24): 145-149 (in Chinese).
- [19] 郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(11): 119-134.
Guo D M, Sun Y W, Jia Z Y. Methods and research pro-

- gress of high performance manufacturing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 119-134(in Chinese).
- [20] Siripuram R B, Stephens L S. Effect of deterministic asperity geometry on hydrodynamic lubrication [J]. Journal of Tribology-Transactions of the Asme, 2004, 126(3): 527-534.
- [21] 唐伟忠. 薄膜材料制备原理、技术及应用 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
Tang W Z. The thin film material preparation principle, technology and application [M]. 2nd edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003(in Chinese).
- [22] 姜银方, 王宏宇. 现代表面工程技术 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2014.
Jiang Y F, Wang H Y. Modern surface engineering technology [M]. 2nd edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2014(in Chinese).
- [23] Kononenko T V, Garnov S V, Pimenov S M, et al. Laser ablation and micropatterning of thin TiN coatings [J]. Applied Physics a-Materials Science & Processing, 2000, 71(6): 627-631.
- [24] De Mello J D B, Goncalves J L, Jr., Costa H L. Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls [J]. Wear, 2013, 302(1/2): 1295-1309.
- [25] 叶军. 电加工产业和技术发展现状及转型升级 [C]. 第 15 届全国特种加工学术会议, 南京, 2013: 18-29.
Ye J. Development and transformation of electric processing industry and technology [C]. The Fifteenth National Conference on Special Processing, Nanjing, 2013: 18-29 (in Chinese).
- [26] 杨明. 电化学加工技术的原理与应用 [J]. 机械, 2011(S): 81-83.
Yang M. The principle and application of electrochemical machining technology [J]. Machinery, 2011(S): 81-83(in Chinese).
- [27] 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(4): 20-25, 30.
Zhou J, Shao T M. Influence of synergistic effect of Cu particles and striated surface texture on tribological properties [J]. China Surface Engineering, 2009, 22(4): 20-25, 30(in Chinese).
- [28] 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(6): 866-871.
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(6): 866-871(in Chinese).
- [29] 吴文彬. 磁性薄膜阵列作用下铁磁性材料的润滑特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Wu W B. Study on lubrication of ferromagnetic material with magnetic film array [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012(in Chinese).
- [30] Hiraoka N, Sasaki A. Effect of discontinuous hard under-coating on the life of solid film lubricant under extreme contact pressure [J]. Tribology International, 1997, 30(6): 429-434.
- [31] Qian S Q, Zhu D, Qu N S, et al. Generating micro-dimples array on the hard chrome-coated surface by modified through mask electrochemical micromachining [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(9/10/11/12): 1121-7.
- [32] 王守绪, 何为, 孙睿. 图形化技术在纳米器件制造中的应用研究进展 [J]. 材料导报, 2006, 20(9): 105-108, 119.
Wang S X, He W, Sun R. Development of surface patterning in nano-electronic devices [J]. Materials Review, 2006, 20(9): 105-108, 119(in Chinese).
- [33] Zhou L, Kato K, Umehara N, et al. Friction and wear properties of hard coating materials on textured hard disk sliders [J]. Wear, 2000, 243(1/2): 133-139.
- [34] Zhou L, Kato K, Umehara N, et al. Nanometre scale island-type texture with controllable height and area ratio formed by ion-beam etching on hard-disk head sliders [J]. Nanotechnology, 1999, 10(4): 363-372.
- [35] Wang X L, Kato K. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing [J]. Tribology Letters, 2003, 14(4): 275-280.
- [36] 万铁, 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(6): 603-607.
Wan Y, Xiong D S. Study of laser surface texturing for improving tribological properties [J]. Tribology, 2006, 26(6): 603-607(in Chinese).
- [37] 刘明朗, 黄仲佳. 激光表面织构在摩擦学中的应用 [J]. 材料保护, 2012, 45(5): 48-50.
Liu M L, Huang Z J. Application of laser surface texturing in tribology [J]. Journal of materials protection, 2012, 45(5): 48-50(in Chinese).
- [38] Etsion I. State of the art in laser surface texturing [J]. Journal of Tribology-Transactions of the Asme, 2005, 127(1): 248-253.
- [39] Erdemir A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication [J]. Tribology International, 2005, 38(3): 249-256.
- [40] Dumitru G, Romano V, Weber H P, et al. Laser treatment of tribological DLC films [J]. Diamond and Related Materials, 2003, 12(3/4/5/6/7): 1034-40.
- [41] 周一倩. 基于光纤聚焦的激光表面织构加工及其摩擦学行为研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
Zhou Y Q. Micro laser surface texturing based on optical fiber focusing and tribological behavior of textured surfaces [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009(in Chinese).
- [42] Ryk G, Kligerman Y, Etsion I. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive com-

- ponents [J]. Tribology Transactions, 2002, 45(4): 444-449.
- [43] Dumitru G, Romano V, Weber H P, et al. Femtosecond ablation of ultrahard materials [J]. Applied Physics a-Materials Science & Processing, 2002, 74(6): 729-739.
- [44] Dumitru G, Romano V, Gerbig Y, et al. Femtosecond laser processing of nitride-based thin films to improve their tribological performance [J]. Applied Physics a-Materials Science & Processing, 2005, 80(2): 283-287.
- [45] Romano V, Weber H P, Dumitru G, et al. Laser surface microstructuring to improve tribological systems [C]. Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies, Bellingham, 2003: 199-211.
- [46] Dumitru G, Romano V, Weber H P, et al. Femtosecond laser ablation of diamond-like carbon films [J]. Applied Surface Science, 2004, 222(1/2/3/4): 226-233.
- [47] Donnet C, Erdemir A. Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications [M]. New York: Springer, 2008: 571-590.
- [48] Dong Y, Sakata H, Molian P. Femtosecond pulsed laser ablation of diamond-like carbon films on silicon [J]. Applied Surface Science, 2005, 252(2): 352-357.
- [49] Yasumaru N, Miyazaki K, Kiuchi J. Control of tribological properties of diamond-like carbon films with femtosecond-laser-induced nanostructuring [J]. Applied Surface Science, 2008, 254(8): 2364-8.
- [50] Yasumaru N, Miyazaki K, Kiuchi J. Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on hard thin films of TiN and DLC [J]. Applied Physics a-Materials Science & Processing, 2003, 76(6): 983-985.
- [51] Ding Q, Wang L P, Hu L T, et al. The pairing-dependent effects of laser surface texturing on micro tribological behavior of amorphous carbon film [J]. Wear, 2012, 274: 43-49.
- [52] Ding Q, Wang L P, Hu L T, et al. An explanation for laser-induced spallation effect in a-C:H films: altered phase evolution route caused by hydrogen doping [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(1): 013501.
- [53] Amanov A, Watabe T, Tsuboi R, et al. Improvement in the tribological characteristics of Si-DLC coating by laser surface texturing under oil-lubricated point contacts at various temperatures [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 232: 549-560.
- [54] Vandoni L, Demir A G, Previtali B, et al. Wear behavior of fiber laser textured tin coatings in a heavy loaded sliding regime [J]. Materials, 2012, 5(11): 2360-82.
- [55] Demir A G, Previtali B, Lecis N. Development of laser dimpling strategies on TiN coatings for tribological applications with a highly energetic Q-switched fibre laser [J]. Optics and Laser Technology, 2013, 54: 53-61.
- [56] Demir A G, Maressa P, Previtali B. Fibre laser texturing for surface functionalization [J]. Physics Procedia, 2013, 41: 759-768.
- [57] Roch T, Weihnacht V, Scheibe H J, et al. Direct laser interference patterning of tetrahedral amorphous carbon films for tribological applications [J]. Diamond and Related Materials, 2013, 33: 20-26.
- [58] Roch T, Beyer E, Lasagni A. Surface modification of thin tetrahedral amorphous carbon films by means of UV direct laser interference patterning [J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19(12): 1472-7.
- [59] Dowling A J, Ghantasala M K, Hayes J P, et al. Excimer laser micromachining of TiN films from chromium and copper sacrificial layers [J]. Smart Materials & Structures, 2002, 11(5): 715-721.
- [60] 崔铮, 陶佳瑞. 纳米压印加工技术发展综述 [J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26(1): 7-12.
- Cui Z, Tao J R. Overview of nanoimprinting technology development [J]. World Sci-tech R & D, 2004, 26(1): 7-12(in Chinese).
- [61] Tani H, Takahashi H, Koganezawa S, et al. Tribological properties of ultrathin DLC-coated nanotextured surface on a PET film [J]. Tribology Letters, 2014, 54(3): 221-227.
- [62] Nevesa D, Diniz A E, Fernandes Lima M S. Microstructural analyses and wear behavior of the cemented carbide tools after laser surface treatment and PVD coating [J]. Applied Surface Science, 2013, 282: 680-688.
- [63] Pettersson U, Jacobson S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors [J]. Tribology International, 2007, 40(2): 355-359.
- [64] Pettersson U, Jacobson S. Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique [J]. Tribology International, 2006, 39(7): 695-700.
- [65] 王晓雷, 王静秋, 韩文非. 边界润滑条件下表面微细结构减摩特性的研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(12): 36-39.
- Wang X L, Wang J Q, Han W F. Effect of surface texture on friction reduction under boundary lubrication [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(12): 36-39(in Chinese).
- [66] Koszela W, Pawlus P, Galda L. The effect of oil pockets size and distribution on wear in lubricated sliding [J]. Wear, 2007, 263: 1585-92.
- [67] Uehara Y, Wakuda M, Yamauchi Y, et al. Tribological properties of dimpled silicon nitride under oil lubrication [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(2): 369-373.
- [68] 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(3/4): 356-363.
- [69] Sui J, Lu J J. Grinding texture as a useful surface to reduce the friction of carbide-derived carbon coatings [J]. New Carbon Materials, 2013, 28(1): 71-75.
- [70] 彭约钧. 表面微结构在大气和水环境下的摩擦学特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

- Peng Y J. Tribological characteristics of surface micro-structures in water and air [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011(in Chinese).
- [71] Pimentel J V, Danek M, Polcar T, et al. Effect of rough surface patterning on the tribology of W-S-C-Cr self-lubricant coatings [J]. Tribology International, 2014, 69: 77-83.
- [72] Pettersson U, Jacobson S. Friction and wear properties of micro textured DLC coated surfaces in boundary lubricated sliding [J]. Tribology Letters, 2004, 17(3): 553-559.
- [73] Nakano M, Miyake K, Korenaga A, et al. Tribological properties of patterned NiFe-covered Si surfaces [J]. Tribology Letters, 2009, 35(2): 133-139.
- [74] Mo Y F, Yan D Y, Huang F C. Mechanical and wettability properties of chemically modified surface texture with carbon nanotubes [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2014, 114(4): 1387-92.
- [75] Zhao W J, Pu J B, Yu Q Y, et al. A Novel strategy to enhance micro/nano-tribological properties of DLC film by combining micro-pattern and thin ionic liquids film [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 428: 70-78.
- [76] Wang Y, Wang L P, Xue Q J, et al. A facile method to improve tribological properties of silicon surface by combining nanogrooves patterning and thin film lubrication [J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 372(1/2/3): 139-145.
- [77] Corbella C, Portal S, Rubio-Roy M, et al. Surface structuring of diamond-like carbon films by colloidal lithography with silica sub-micron particles [J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19(7/8/9): 1124-30.
- [78] Shum P W, Zhou Z F, Li K Y. Investigation of the tribological properties of the different textured DLC coatings under reciprocating lubricated conditions [J]. Tribology International, 2013, 65: 259-264.
- [79] Shum P W, Zhou Z F, Li K Y. To increase the hydrophobicity and wear resistance of diamond-like carbon coatings by surface texturing using laser ablation process [J]. Thin Solid Films, 2013, 544: 472-476.
- [80] Ding Q, Wang L P, Wang Y X, et al. Improved tribological behavior of DLC films under water lubrication by surface texturing [J]. Tribology Letters, 2011, 41(2): 439-449.
- [81] 邢丽, 张复实, 向军辉, 等. 自组装技术及其研究进展 [J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(3): 39-44.
- Xing L, Zhang F S, Xiang J H, et al. Technology and research progress based on self-assembly [J]. World Science R & D, 2007, 29(3): 39-44(in Chinese).
- [82] 彭倚天, 胡元中, 王慧. 硅基底上图形化自组装膜的构筑 [J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(4): 136-138.
- Peng Y T, Hu Y Z, Wang H. Fabrication of patterned self-assembled monolayers on silicon substrate [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(4): 136-138 (in Chinese).
- [83] Mo Y F, Huang F C, Pan S L, et al. Fabrication and adhesion measurement of a nanotextured surface with ionic liquid monolayers [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115(20): 10125-30.
- [84] Wan Y, Wang Y, Zhang Q, et al. Enhanced tribology durability of a self-assembled monolayer of alkylphosphonic acid on a textured copper substrate [J]. Applied Surface Science, 2012, 259: 147-152.
- [85] Wan Y, Wang Z, Liu Y, et al. Reducing friction and wear of a zinc substrate by combining a stearic acid overcoat with a nanostructured zinc oxide underlying film: perspectives to super-hydrophobicity [J]. Tribology Letters, 2011, 44(3): 327-333.
- [86] 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(20): 2353-9.
- Dai Z D, Tong J, Ren L Q. Research and development of bionic tribology [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(20): 2353-9(in Chinese).
- [87] 任露泉, 杨卓娟, 韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 144-147.
- Ren L Q, Yang Z J, Han Z W. Non-smooth wearable surfaces of living creatures and their bionic application [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 144-147(in Chinese).
- [88] Guo Z G, Zhou F, Hao J C, et al. Stable biomimetic super-hydrophobic engineering materials [J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(45): 15670-1.
- [89] Wang Y, Yang J, Guo X, et al. Fabrication and tribological properties of superhydrophobic nickel films with positive and negative biomimetic microtextures [J]. Friction, 2014, 2(3): 287-294.
- [90] 赵文杰, 陈子飞, 莫梦婷, 等. 绿色海洋防污材料的表面构筑研究进展 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 14-31.
- Zhao W J, Chen Z F, Mo M T, et al. Progress in surface tailoring for environment-friendly anti-biofouling materials [J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 14-31(in Chinese).
- [91] Cheng Y T, Rodak D E, Wong C A, et al. Effects of micro- and nano-structures on the self-cleaning behaviour of lotus leaves [J]. Nanotechnology, 2006, 17(5): 1359-62.
- [92] 陈子飞, 许季海, 赵文杰, 等. 仿甲鱼壳织构化有机硅改性丙烯酸酯涂层的制备及其防污行为 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(6): 80-85.
- Chen Z F, Xu J H, Zhao W J, et al. Preparation and anti-fouling performance of organic silicone coatings with turtle bionic texture [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(6): 80-85(in Chinese).
- [93] 许季海, 赵文杰, 周成旭, 等. 有机硅改性丙烯酸酯涂层的微/纳凸柱状织构化及其防污性能 [J]. 科学通报, 2013, 58(10): 946-953.

- Xu J H, Zhao W J, Zhou C X, et al. Fabrication and anti-fouling property of acrylic ester modified by siloxane coatings with regular micro/nano-pillar textures [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(10): 946-953(in Chinese).
- [94] Shafiei M, Alpas A T. Fabrication of biotextured nanocrystalline nickel films for the reduction and control of friction [J]. Materials Science & Engineering C-Biomimetic and Supramolecular Systems, 2008, 28(8): 1340-6.
- [95] Haubold L, Schuelke T, Becker M, et al. The influence of the surface texture of hydrogen-free tetrahedral amorphous carbon films on their wear performance [J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19(2/3): 225-228.
- [96] Shafiei M, Alpas A T. Nanocrystalline nickel films with lotus leaf texture for superhydrophobic and low friction surfaces [J]. Applied Surface Science, 2009, 256(3): 710-719.
- [97] Wang Y, Wang L P, Wang S C, et al. From natural lotus leaf to highly hard-flexible diamond-like carbon surface with superhydrophobic and good tribological performance [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2258-64.
- [98] Wang Y, Mo Y F, Zhu M, et al. Wettability of metal coatings with biomimic micro textures [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 203(1/2): 137-141.
- [99] Soroka E, Lyashenko B, Qiao S R, et al. Tribological behaviour and cutting performance of PVD-TiN coating/substrate system with discontinuous surface architecture [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(4): 580-584.
- [100] 莘海维, 奚正蕾, 凌行, 等. 金刚石薄膜图形化技术的研究 [J]. 航空精密制造技术, 2002, 38(1): 9-12.
- Shen H W, Xi Z L, Ling X, et al. Study on patterning techniques of diamond films [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2002, 38(1): 9-12(in Chinese).
- [101] Antonyuk V S, Soroka E B, Lyashenko B A, et al. Discontinuous coatings on cutting tools [J]. Strength of Materials, 2007, 39(1): 99-102.
- [102] Lyashenko B A, Soroka E B, Rutkovskii A V, et al. Determination of discrete-structure parameters of coatings with allowance for residual stresses [J]. Strength of Materials, 2002, 34(4): 402-406.
- [103] Lyashenko B A, Rutkovskii A V, Soroka E B, et al. On the reduction of residual stresses in plasma-vacuum-deposited coatings [J]. Strength of Materials, 2001, 33(4): 344-348.
- [104] Soroka O B, Klymenko S A, Kopeikina M Y. Evaluation of residual stresses in pvd-coatings. part 2 [J]. Strength of Materials, 2010, 42(4): 450-458.
- [105] Zhang Y Y, Shao T M. Tribological Properties of textured ti coating prepared by masked deposition [J]. Advanced Tribology, 2009: 804-805.
- [106] 张远月. 基于掩模沉积技术的表面织构制备及其摩擦学性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- Zhang Y Y. Preparation and tribological performance of surface texture based on masked deposition technology [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008(in Chinese).
- [107] 王喜眉. 图形化 TiAlN 涂层的制备及其摩擦学性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- Wang X M. Study on preparation and tribological properties of textured TiAlN coatings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011(in Chinese).
- [108] 邵天敏, 王喜眉, 张远月. 一种降低硬质薄膜应力的薄膜制备方法 [P]. 中国: ZL201110174305.0. 2012-11-09.
- Shao T M, Wang X M, Zhang Y Y. A preparation method for reducing the stress in thin hard films [P]. China: ZL201110174305.0. 2012-11-09(in Chinese).
- [109] Hua M, Tam H Y, Ma H Y, et al. Patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel: tribological behaviors under different sliding speeds [J]. Wear, 2006, 260(11/12): 1153-65.
- [110] Hua M, Ma H Y, Li J, et al. Tribological behaviours of patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel coated with different bias voltages [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(11): 3612-25.
- [111] Aoki Y, Ohtake N. Tribological properties of segment-structured diamond-like carbon films [J]. Tribology International, 2004, 37(11/12): 941-947.
- [112] Takashima M, Kuroda T, Saito M, et al. Development of antiwear shim inserts utilizing segment-structured DLC coatings [J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2009, 3(6): 841-852.
- [113] Nakagawa T, Ohishi R, Ohtake N, et al. Segment-structured diamond-like carbon coatings on polymer catheter [J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2009, 3(2): 358-365.
- [114] Takashima M, Kanzawa K, Matsuo S, et al. Fabrication of textured DLC films using three-dimensional masking system [J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2011, 5(12): 891-897.
- [115] Liu S, Dam C Q, Feng B, et al. Method for making textured coating on wear surface of component involves removing mask, after depositing tribological coating on surface and applying mask on surface [P]. USA: US2008131604-A1, WO2008066636-A1. 2008-06-05.
- [116] 刘 S, 达姆 C Q, 冯暴, 等. 在部件表面上的纹理涂层 [P]. 中国: CN103038386A. 2013-04-10.
- Liu S, Dam C Q, Feng B, et al. Textured coating on the surface of component [P]. China: CN103038386A. 2013-04-10(in Chinese).
- [117] 金永吉. 激光诱导钛、铝、铬金属表面改性研究 [D]. 北京: 清华大学, 2005.
- Jin Y J. Investigations on laser induced surface modifica-

- tion of titanium, aluminum and chromium [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005(in Chinese).
- [118] 金永吉, 邵天敏, 尹亮, 等. 脉冲激光诱导钛表面氮化的研究 [J]. 材料工程, 2006(1): 53-56.
- Jin Y J, Shao T M, Yin L, et al. Investigation on surface nitridation of titanium by pulsed laser [J]. Journal of Materials Engineering, 2006(1): 53-56(in Chinese).
- [119] 金永吉, 邵天敏. 一种基于激光诱发原位化学反应的表面改性装置[P]. 中国: ZL200610011701.0. 2008-07-23.
- Jin Y J, Shao T M. A surface modification equipment based on laser induced in situ chemical reaction [P]. China: ZL200610011701.0. 2008-07-23(in Chinese).
- [120] Singh R A, Na K, Yi J W, et al. DLC nano-dot surfaces for tribological applications in MEMS devices [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(8): 3153-7.
- [121] 李东山, 徐立新, 王龙支. 电沉积裂纹 Ni-W 合金镀层的摩擦磨损性能 [J]. 电镀与精饰, 2014, 36(3): 29-33.
- Li D S, Xu L X, Wang L Z. Friction and wear properties of electrodeposited crack Ni-W alloy coating [J]. Plating & Finishing, 2014, 36(3): 29-33(in Chinese).
- [122] Zhang X, Luster B, Church A, et al. Carbon nanotube-MoS₂ composites as solid lubricants [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2009, 1(3): 735-739.
- [123] Aouadi S M, Luster B, Kohli P, et al. Progress in the development of adaptive nitride-based coatings for high temperature tribological applications [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204(6/7): 962-968.
- [124] Zimmerman J H, Guleryuz C G, Krzanowski J E. Fabrication and tribological properties of titanium nitride coatings incorporating solid lubricant microreservoirs [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(10): 2023-32.
- [125] Guleryuz C G, Krzanowski J E. Mechanisms of self-lubrication in patterned TiN coatings containing solid lubricant microreservoirs [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(15): 2392-9.
- [126] 王东, 刘红缨, 贺军辉, 等. 旋涂法制备功能薄膜的研究进展 [J]. 影像科学与光化学, 2012, 30(2): 91-101.
- Wang D, Liu H Y, He J H, et al. Progress in preparation of functional films by spin-coating [J]. Imaging Science and Photochemistry, 2012, 30(2): 91-101(in Chinese).
- [127] 李琰, 潘庆谊, 张剑平, 等. 旋涂法制备纳米有机/无机复合膜成膜过程的研究 [J]. 无机材料学报, 2004, 19(5): 1065-72.
- Li Y, Pan Q Y, Zhang J P, et al. Preparation process of nanosized organic/inorganic thin films by sol-gel spin-coating method [J]. Journal of Inorganic Materials, 2004, 19(5): 1065-72(in Chinese).
- [128] 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(1): 25-30.
- [129] Zou M, Cai L, Yang D H. Nanotribology of a silica nanoparticle-textured surface [J]. Tribology Transactions, 2006, 49(1): 66-71.
- [130] Zou M, Seale W, Wang H. Comparison of tribological performances of nano- and micro-textured surfaces [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N (Journal of Nanoengineering and Nanosystems), 2005, 219(3): 103-110.
- [131] Zhang X L, Lu Y J, Liu E Y, et al. Adhesion and friction studies of microsphere-patterned surfaces in contact with atomic force microscopy colloidal probe [J]. Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects, 2012, 401: 90-96.
- [132] Kim B S, Chung W Y, Rhee M H, et al. Studies on the application of laser surface texturing to improve the tribological performance of AlCrSiN-coated surfaces [J]. Metals and Materials International, 2012, 18(6): 1023-7.
- [133] Shum P W, Zhou Z F, Li K Y. Feasibility study of using DLC coating in conjunction with laser ablation process to improve the tribological performance of an engineering surface [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41: 52-56.
- [134] Shum P W, Zhou Z F, Li K Y. To increase the hydrophobicity, non-stickiness and wear resistance of DLC surface by surface texturing using a laser ablation process [J]. Tribology International, 2014, 78: 1-6.
- [135] Ramachandra S, Ovaert T C. Effect of coating geometry on contact stresses in two-dimensional discontinuous coatings [J]. Journal of Tribology-Transactions of the Asme, 2000, 122(4): 665-671.
- [136] Bandorf R, Paulkowski D M, Schiffmann K I, et al. Tribological improvement of moving microparts by application of thin films and micropatterning [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2008, 20(35): 1-9.
- [137] Kim D, La J, Kim S M, et al. The tribological performance of laser surface treated CrZrSiN thin films [J]. Materials Research Bulletin, 2014, 58: 39-43.
- [138] Bandorf R, Luthje H, Henke C, et al. Tribological behaviour of thin a-C and a-C:H films with different topographic structure under rotating and oscillating motion for dry lubrication [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188: 530-533.
- [139] Bandorf R, Luthje H, Wortmann A, et al. Influence of substrate material and topography on the tribological behaviour of submicron coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 174-175: 461-464.
- [140] 徐中, 王健, 李颖. 仿生涂层磨损及其与表面形貌的关联性研究 [J]. 表面技术, 2013, 42(4): 9-11, 114.

- Xu Z, Wang J, Li Y. Research of abrasion of bionic coatings and its relevance with surface morphology [J]. *Surface Technology*, 2013, 42(4): 9-11, 114(in Chinese).
- [141] He D Q, Zheng S X, Pu J B, et al. Improving tribological properties of titanium alloys by combining laser surface texturing and diamond-like carbon film [J]. *Tribology International*, 2015, 82: 20-27.
- [142] Bandorf R, L  thje H, Henke C, et al. Different carbon based thin films and their microtribological behaviour in MEMS applications [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 200(5/6): 1777-82.
- [143] 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(3): 189-197.
- [144] Demir A G, Lecis N, Previtali B, et al. Scratch resistance of fibre laser surface textured TiN coatings [J]. *Surface Engineering*, 2013, 29(9): 654-659.
- [145] Wang X L, Kato K, Adachi K, et al. The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed [J]. *Tribology International*, 2001, 34(10): 703-711.
- [146] Yuan S H, Huang W, Wang X L. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces [J]. *Tribology International*, 2011, 44(9): 1047-54.
- [147] Dong G N, Hua M, Li J, et al. Tribological behaviors of spot-textured TiN coatings on M2 high-speed steel under boundary lubricated conditions [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 14(4): 350-355.
- [148] 吕文斐, 方亮. 润滑条件下激光加工纹理的摩擦磨损 [J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(1): 1-4.
Lu W F, Fang L. Tribological properties of steel surface textured by laser under lubrication [J]. *Tribology*, 2009, 29(1): 1-4(in Chinese).
- [149] Kovalchenko A, Ajayi O, Erdemir A, et al. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact [J]. *Tribology International*, 2005, 38(3): 219-225.
- [150] Oksanen J, Hakala T J, Tervakangas S, et al. Tribological properties of laser-textured and ta-C coated surfaces with burnished WS₂ at elevated temperatures [J]. *Tribology International*, 2014, 70: 94-103.
- [151] 庄业. 几种氮化物薄膜与熔融玻璃之间的高温界面摩擦行为 [D]. 北京: 清华大学, 2006.
Zhuang Y. The interfacial friction behavior between nitride films and molten glass under elevated temperature [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006(in Chinese).
- [152] Amanov A, Sasak S. A study on the tribological characteristics of duplex-treated Ti-6Al-4V alloy under oil-lubricated sliding conditions [J]. *Tribology International*, 2013, 64: 155-163.
- [153] Muthuvel P A, Rajagopal R. Influence of surface texture on tribological performance of AlCrN nanocomposite coated titanium alloy surfaces [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*, 2013, 227(10): 1157-64.
- [154] Hua M, Ma H Y, Mok C K, et al. Tribological behavior of patterned PVD TiN coatings on M2 steel [J]. *Tribology Letters*, 2004, 17(3): 645-653.
- [155] Song H, Ji L, Li H X, et al. Improving the tribological performance of a-C:H film in a high vacuum by surface texture [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(23): 1-11.
- [156] Voevodin A A, Bultman J, Zabinski J S. Investigation into three-dimensional laser processing of tribological coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 1998, 107(1): 12-19.
- [157] Pettersson U, Jacobson S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts [J]. *Tribology International*, 2003, 36(11): 857-864.
- [158] Al-Azizi A A, Eryilmaz O, Erdemir A, et al. Effects of nanoscale surface texture and lubricant molecular structure on boundary lubrication in liquid [J]. *Langmuir*, 2013, 29(44): 13419-26.
- [159] Zhao W J, Wang Y X, Zeng Z X, et al. Micro/nano-texture design for improving tribological properties of DLC-IL composite films [J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2012, 4(9): 901-909.
- [160] 蒲吉斌, 万善宏, 胡天昌, 等. 离子液体/织构化类金刚石碳复合润滑薄膜的构筑及其摩擦学性能的研究 [J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(5): 472-479.
Pu J B, Wan S H, Hu T C, et al. Fabrication and tribological study of ionic liquid/texturing diamond-like carbon composite lubrication films [J]. *Tribology*, 2012, 32(5): 472-479(in Chinese).
- [161] Hu T C, Hu L L, Ding Q. Effective solution for the tribological problems of Ti-6Al-4V: Combination of laser surface texturing and solid lubricant film [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206(24): 5060-6.
- [162] Hu T C, Zhang Y S, Hu L T. Tribological investigation of MoS₂ coatings deposited on the laser textured surface [J]. *Wear*, 2012, 278: 77-82.
- [163] Segu D Z, Kim J-H, Choi S G, et al. Application of Taguchi techniques to study friction and wear properties of MoS₂ coatings deposited on laser textured surface [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 232: 504-514.
- [164] Hu T C, Hu L T. Tribological properties of lubricating films on the Al-Si alloy surface via laser surface texturing [J]. *Tribology Transactions*, 2011, 54(5): 800-805.
- [165] Rapoport L, Moshkovich A, Perfilyev V, et al. Friction and wear of MoS₂ films on laser textured steel surfaces [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(14):

- 3332-40.
- [166] Li J L, Xiong D S, Zhang Y K, et al. Friction and wear properties of MoS₂-overcoated laser surface-textured silver-containing nickel-based alloy at elevated temperatures [J]. Tribology Letters, 2011, 43(2): 221-228.
- [167] Deng J X, Lian Y S, Wu Z, et al. Performance of femto-second laser-textured cutting tools deposited with WS₂ solid lubricant coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 222: 135-143.
- [168] Rapoport L, Moshkovich A, Perfilov V, et al. Wear life and adhesion of solid lubricant films on laser-textured steel surfaces [J]. Wear, 2009, 267(5/6/7/8): 1203-7.
- [169] Huang Z J, Liu M L, Xiong D S, et al. Surface texturing for adaptive Ag/MoS₂ solid lubricant plating [J]. Rare Metals, 2012, 31(6): 560-565.
- [170] 华希俊,周万,吴锦泉,等.激光微织构表面黏结型固体润滑膜性能研究[J].润滑与密封,2014,39(1):1-4.
Hua X J, Zhou W, Wu J Q, et al. The properties of bonded solid lubricant film on laser texturing surfaces [J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(1): 1-4(in Chinese).
- [171] Wu Z, Deng J X, Zhang H, et al. Tribological behavior of textured cemented carbide filled with solid lubricants in dry sliding with titanium alloys [J]. Wear, 2012, 292: 135-143.
- [172] Donnet C, Erdemir A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 180: 76-84.
- [173] 赵文杰,王立平,薛群基.结构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J].摩擦学学报,2011,31(6):622-631.
Zhao W J, Wang L P, Xue Q J. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface [J]. Tribology, 2011, 31(6): 622-631(in Chinese).
- [174] Ripoll M R, Simic R, Brenner J, et al. Friction and lifetime of laser surface-textured and MoS₂-coated Ti6Al4V under dry reciprocating sliding [J]. Tribology Letters, 2013, 51(2): 261-271.
- [175] Luster B, Stone D, Singh D P, et al. Textured VN coatings with Ag₃VO₄ solid lubricant reservoirs [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 206(7): 1932-5.
- [176] Krzanowski J E. Fabrication and tribological properties of composite coatings produced by lithographic and microbeading methods [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204(6/7): 955-961.
- [177] Voevodin A A, Zabinski J S. Laser surface texturing for adaptive solid lubrication [J]. Wear, 2006, 261(11/12): 1285-92.
- [178] Basnyat P, Luster B, Muratore C, et al. Surface texturing for adaptive solid lubrication [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 203(1/2): 73-79.
- [179] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing [J]. Tribology Letters, 2004, 17(4): 733-737.
- [180] Schreck S, Zum Gahr K H. Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties [J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1/2/3/4): 616-622.
- [181] Borghi A, Gualtieri E, Marchetto D, et al. Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications [J]. Wear, 2008, 265(7/8): 1046-51.
- [182] Etsion I. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication [J]. Friction, 2013, 1(3): 195-209.
- [183] Higuera Garrido A, Gonzalez R, Cadenas M, et al. Tribological behavior of laser-textured NiCrBSi coatings [J]. Wear, 2011, 271(5/6): 925-933.
- [184] 吴行阳,黄夏婧,张建华.非晶碳基薄膜及其表面织构化后的水润滑性能研究进展[J].表面技术,2012,41(4):87-90,121.
Wu X Y, Huang X J, Zhang J H. Progress in water lubrication of amorphous carbon films and surface texturing [J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 87-90, 121(in Chinese).
- [185] Singh R A, Pham D C, Kim J, et al. Bio-inspired dual surface modification to improve tribological properties at small-scale [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(9): 4821-8.
- [186] 李建国,丰杰,梅军.超纳米金刚石薄膜及其在MEMS上的应用研究进展[J].材料导报,2008,22(7):1-4.
Li J G, Feng J, Mei J. Development of study on ultrananocrystalline diamond films and their application in microelectronmechanical system [J]. Materials Review, 2008, 22(7): 1-4(in Chinese).
- [187] 雒建斌,何雨,温诗铸,等.微/纳米制造技术的摩擦学挑战[J].摩擦学学报,2005,25(5):283-288.
Luo J B, He Y, Wen S Z, et al. Challenges to tribology arisen from the development of micro- and nano-manufacturing technology [J]. Tribology, 2005, 25(5): 283-288(in Chinese).
- [188] 董从林,白秀琴,严新平,等.海洋环境下的材料摩擦学研究进展与展望[J].摩擦学学报,2013,33(3):311-320.
Dong C L, Bai X Q, Yan X P, et al. Research status and advances on tribological study of materials under ocean environment [J]. Tribology, 2013, 33(3): 311-320(in Chinese).
- [189] Xiao H P, Wang K, Fox G, et al. Spatial evolution of friction of a textured wafer surface [J]. Friction, 2013, 1(1): 92-97.
- [190] 戚宝运,李亮,何宁,等.表面织构在刀具减磨技术中的应用[J].工具技术,2010,44(12):3-6.
Qi B Y, Li L, He N, et al. Application of surface texture in tool antifriction technology [J]. Tool Engineer-

- ing, 2010, 44(12): 3-6(in Chinese).
- [191] Obikawa T, Kamio A, Takaoka H, et al. Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(12): 966-972.
- [192] Popp U, Engel U. Microtexturing of cold-forging tools - influence on tool life [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220(1): 27-33.
- [193] 榎本俊之, 蒋修治. 具有微细表面形状的 DLC 涂层切削刀具的开发 [J]. 超硬材料工程, 2008, 20(3): 49-54.
Jia B J Z, Jiang X Z. Development of DLC coated cutting tool with micro surface shape [J]. Superhard Material Engineering, 2008, 20(3): 49-54(in Chinese).
- [194] da Silva W M, Suarez M P, Machado A R, et al. Effect of laser surface modification on the micro-abrasive wear resistance of coated cemented carbide tools [J]. Wear, 2013, 302(1/2): 1230-40.
- [195] 孙华亮, 涂杰松, 商宏飞, 等. 织构对涂层刀具切削性能影响的有限元分析及实验研究 [J]. 现代制造工程, 2013(9): 1-6.
Sun H L, Tu J S, Shang H F, et al. Study on the effect of texture on cutting performance of the coated tool with finite element analysis and experimental method [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(9): 1-6(in Chinese).
- [196] Xing Y Q, Deng J X, Li S P, et al. Cutting performance and wear characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ ceramic cutting tools with WS_2/Zr soft-coatings and nano-textures in dry cutting [J]. Wear, 2014, 318(1/2): 12-26.
- [197] 邢佑强, 邓建新, 岳鸿志, 等. WS_2/Zr 软涂层微纳结构陶瓷刀具的制备及其切削性能 [J]. 航空制造技术, 2014(12): 48-53.
Xing Y Q, Deng J X, Yue H Z, et al. Fabrication and cutting performance of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ ceramic tools combined with micro/nano-textures and WS_2/Zr soft-coatings [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(12): 48-53(in Chinese).
- [198] Guleryuz C G, Krzanowski J E, Veldhuis S C, et al. Machining performance of TiN coatings incorporating indium as a solid lubricant [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(22): 3370-6.
- [199] Yadroitsev I, Bertrand P, Antonenkova G, et al. Use of track/layer morphology to develop functional parts by selective laser melting [J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(5): 052003.
- [200] Zhou L, Kato K, Umehara N, et al. The effects of texture height and thickness of amorphous carbon nitride coating of a hard disk slider on the friction and wear of the slider against a disk [J]. Tribology International, 2000, 33(9): 665-672.
- [201] Zhou L, Kato K, Vurens G, et al. The effect of slider surface texture on flyability and lubricant migration under near contact conditions [J]. Tribology International, 2003, 36(4/5/6): 269-277.
- [202] 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(8): 1607-13.
- [203] Singh R A, Yoon E-S. Friction of chemically and topographically modified Si (100) surfaces [J]. Wear, 2007, 263: 912-919.
- [204] Singh R A, Yoon E S, Kim H J, et al. Replication of surfaces of natural leaves for enhanced micro-scale tribological property [J]. Materials Science & Engineering C-Biomimetic and Supramolecular Systems, 2007, 27(4): 875-879.
- [205] Yoon E S, Singh R A, Kong H, et al. Tribological properties of bio-mimetic nano-patterned polymeric surfaces on silicon wafer [J]. Tribology Letters, 2006, 21(1): 31-37.

(责任编辑: 黄艳斐)