

表面织构加工方法的研究

楚帅震¹ 陈 竞² 牛 赢¹ 王壮飞¹

(1 河南理工大学机械与动力工程学院, 焦作 454003)

(2 河南工业和信息化职业学院, 焦作 454003)

文 摘 总结了激光加工、电解加工、电火花加工、化学刻蚀、光刻蚀以及超声振动辅助加工技术等方法;分析了表面织构形状对材料表面性能的影响;论述了表面织构几何参数对润滑性、摩擦学特性和疏水性等材料表面性能的影响。得出了合适的表面织构形状、面积率、深径比等表面织构设计参数可有效改善机械零部件表面性能的结论;发现了为获得理想表面性能,不仅需要考虑织构形状和几何参数,还需考虑工况条件、工件材料性质以及加工技术带来的影响。最后对关于表面织构加工技术所存在的问题进行了总结,并对如何提高表面织构技术对材料性能的影响进行展望。

关键词 表面织构,加工方法,几何结构,材料性能

中图分类号: TG66

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.001

Surface Texture Processing Methods

CHU Shuaizhen¹ CHEN Jing² NIU Ying¹ WANG Zhuangfei¹

(1 School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003)

(2 Henan College of Industry & Information Technology, Jiaozuo 454003)

Abstract In this work, the methods of laser machining, electrochemical machining, electrospark machining, chemical etching, photoetching and ultrasonic vibration-assisted machining were reviewed. The influence of surface texture shape on surface properties of material was analyzed. The influence of surface texture geometry parameters on surface properties such as lubricity, tribological properties and hydrophobicity was discussed. The results concluded appropriate surface texture design parameters such as surface texture shape, area ratio and depth diameter ratio to improve the surface properties of mechanical parts. It was found that in order to obtain ideal surface properties, not only the texture shape and geometric parameters, but also operating conditions, material properties of workpiece and machining technology should be considered. Finally, the problems existed in surface texture processing technology were summarized and the influence of surface texture technology on material properties was prospected.

Key words Surface texture, Processing method, Geometric structure, Material surface properties

0 引言

纳米科技的飞速发展对航空航天工程领域宏/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高的要求,已有研究表明在航空燃气涡轮发动机的叶片根部上加工一定几何结构的表面织构,可增强涂层材料与叶片直接的接触能力,减小叶片根部与圆盘之间的微动磨损^[1],在飞机表面加工出具有疏水性的表面织构可有效防范飞机表面水滴结

冰,降低飞机坠落的风险^[2]。随着研究人员对表面微观物理及化学现象的深入理解,以及先进制造技术的发展,表面织构的设计与制造在减摩抗磨、减阻降噪^[3]、超疏水等领域已得到广泛应用。

表面织构技术是在材料表面加工出一定形状、尺寸、面积率和排列规律的凹坑或沟槽阵列。与未织构化表面相比,织构化表面具有更好的材料表面性能。目前常用的表面织构技术有激光加工^[4-5]、电

收稿日期:2022-03-09

基金项目:国家自然科学基金(52175399);河南省自然科学基金(202300410172);河南省高等学校重点科研项目(21A460002)

第一作者简介:楚帅震,1997年出生,硕士,研究方向为超声加工。E-mail:1937565361@qq.com

通信作者:牛赢,1987年出生,副教授。E-mail:niuying@hpu.edu.cn

解加工^[6-7]、化学刻蚀^[8]、电火花加工^[9-10]、光刻蚀和超声振动辅助加工^[11-12]等技术。

激光加工技术因精度高、效率高的特点被认为是最有前途的织构加工技术;电解加工技术在加工金属时具有不产生机械热损伤、毛刺和碎屑的特点,且可以在非平面表面加工织构;化学刻蚀技术因操作简便、成本低廉、实用性强等特点被广泛应用于工业化的织构加工;电火花加工技术因具有不产生毛刺和刀痕沟纹的特点被广泛应用于金属表面织构加工;光刻蚀因设备简单和表面织构加工缺陷小而被广泛应用于集成电路的制造中;超声振动辅助加工技术在加工表面织构中具有效率高、工艺简单等特点,在工业领域具有广阔的应用前景。

表面织构的几何结构对材料表面性能有较大影响,织构的形状、直径、深度、面积率和排列规律会影响到材料表面的润滑性、摩擦学性能及疏水性,在加工表面织构几何结构时,结合工件的工作环境、材料性质、织构加工技术以及该技术的相关加工参数等因素,可获得较理想的材料表面性能。

本文主要介绍表面织构的加工方法,分析几何结构对材料表面性能的影响,得出合适的表面织构几何结构可有效改善机械零部件表面性能的结果,发现为获得理想表面性能,还需考虑工况条件、工件材料性质以及加工技术的影响,随后对表面织构加工技术所存在的问题进行总结,最后对表面织构的

发展方向进行展望。

1 表面织构的加工方法

目前获得表面织构的加工方法主要有激光加工、电化学加工、化学刻蚀、电火花加工、光刻蚀和超声振动辅助加工等方法。

1.1 激光加工

激光表面织构技术是利用纳秒或飞秒激光在工件表面加工一定形状和分布的微细形貌,其工作原理是利用激光产生的高温灼烧被加工表面,使物质升华、熔化和气化,从而得到理想的表面织构^[13]。

许骏杰等^[14]基于激光雕刻技术在35CrMo钢基体的涂层表面加工均匀分布的点阵织构(图1),研究发现当激光扫描次数为7次时,涂层表面水接触角最高,具有良好的疏水性。华希俊等^[15]研究发现当皮秒激光重复频率、持续时间、功率等参数达到一定范围时,微凹坑织构加工质量最好。刘宇航等^[16]研究激光功率、扫描速度及扫描次数对激光加工后的沟槽织构宽度和深度的影响,发现激光加工工艺参数对沟槽织构宽度和深度影响规律不同。徐晨辉等^[17]采用不同的激光扫描间距加工钕片,研究发现过低或过高的扫描间距都会抑制表面织构对材料性能的作用效果。纪玲玲等^[18]采用激光在镍基合金镀层表面加工织构,通过改变激光单脉冲能量密度、脉冲宽度和脉冲数量等参数获得了W状凹坑、火山口凹坑、两个同轴火山口叠加状凹坑形的复杂织构。

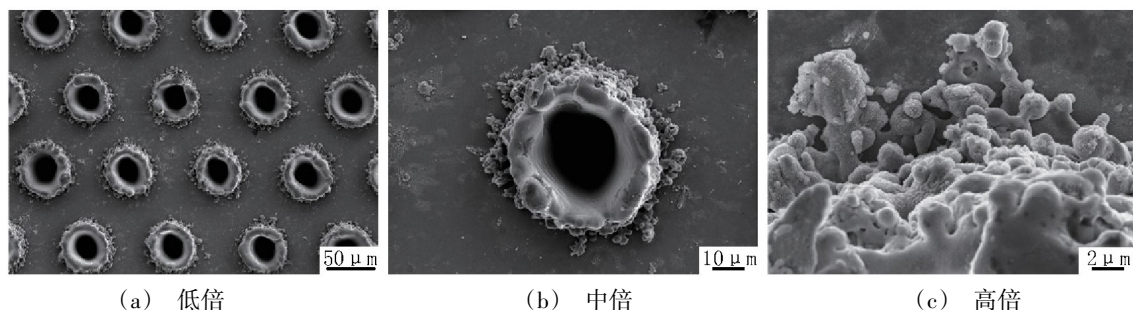


图1 不同倍数的涂层激光微织构表面形貌^[14]

Fig. 1 Micro texture surface morphology of Laser machined coatings with different magnification^[14]

综上,激光加工表面织构的几何结构以及表面性能受激光加工工艺参数影响,采用激光加工技术加工出的织构形状规整、尺寸精准,合适的激光加工工艺参数可获得理想的表面性能,同时还可提高材料硬度和耐磨性,但激光设备成本高,加工材料多为硬质合金或其他高硬材料,在软材料方面应用较少。

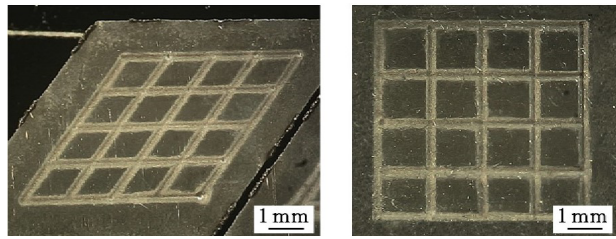
1.2 电解加工

电解加工是利用电化学反应去除阳极金属材料的一种加工方法,其原理是工具与电源负极连接,工件与电源正极连接,在工件和工具间隙通入电解液,接通电源后工件表面发生化学反应,工件材料逐渐被溶解^[19]。

薛腾等^[20]采用电解加工技术在工件表面加工沟

槽,通过控制电解参数来控制沟槽织构的加工形貌。宋曼等^[21]通过电解转印法在材料表面加工出凹坑阵列,优化加工参数提高了凹坑织构阵列的均匀性和凹坑织构的加工精度。钱双庆等^[22-23]采用新型活动模板电解加工表面织构技术在活塞和活塞环表面加工出微坑织构,发现表面织构形貌随电流密度、加工时间的变化而变化。童文俊等^[24]采用气膜屏蔽微细电解加工方法在金属平面加工菱形和方形织构,选定合适加工参数后的表面加工织构如图2所示。

以上研究表明,电解加工参数对表面织构结构参数有较大影响,电解加工不仅可以获得较好的表面织构形貌,同时具有工具损耗低、可成型范围广等



(a) 菱形结构 (b) 方形结构

图2 不同形状的阵列结构^[24]

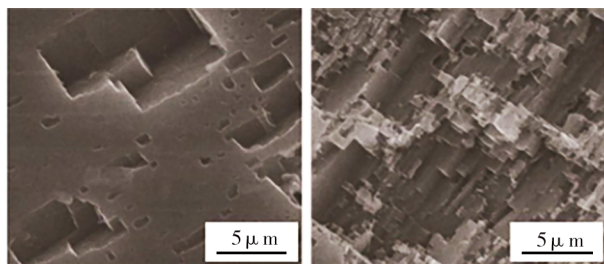
Fig. 2 Array texture of different shapes^[24]

优点,且加工后的金相组织基本不发生变化,但电化学加工不适合非导电材料,且加工时间较长。

1.3 化学刻蚀

化学刻蚀是指通过配制不同成分的化学试剂采用浸泡或涂抹的方式与预刻蚀材料之间发生化学反应去除材料,从而在试样表面构筑出具有某种功能的表面结构^[25]。

QIAN等^[26]将铝块放入位错刻蚀液,发现不同刻蚀时间会造成不同的表面形态(图3)。李丽萍等^[27]研究盐酸含量和氧化时间对铝合金表面性能的影响,发现在其他参数一定的情况下,当盐酸浓度为0.015 mol/L,氧化时间为20 min时,铝合金超疏水表面性能最佳。林立群等^[28]采用化学刻蚀加工回转体表面微沟槽阵列,发现刻蚀量随温度升高而增大。



(a) 5 s (b) 10 s

图3 刻蚀不同时间的铝表面形貌^[31]

Fig. 3 Surface morphology of aluminum after different etching time^[31]

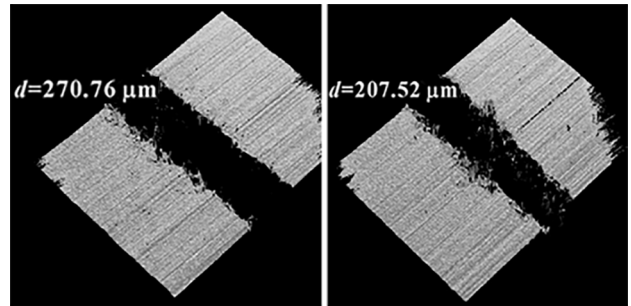
以上研究表明,化学刻蚀表面结构特征与化学刻蚀参数紧密相关,化学刻蚀因具备操作简便、成本低廉、实用性强、加工精度高等特点被广泛应用在表面织构成形加工中,但化学刻蚀技术对不同的金属基体材料,应配制与其匹配的刻蚀试剂,同时材料表面钻刻较为严重,且对表面织构形状的控制性较差。

1.4 电火花加工

电火花加工又称放电加工或电蚀加工,是通过工具电极与工件电极之间脉冲性火花放电,并产生高温来熔融工件材料的加工方法^[29]。

电火花加工表面织构受线切割参数和电极丝材料的影响。杨凤双等^[10]采用不同线切割电极丝材料在45#钢表面进行微槽织构加工,在其他参数一定的

情况下,微槽尺寸见图4。赵昌龙等^[30]采用电火花加工技术在GCr15淬硬钢零件表层加工凹坑状表面织构,发现随着加工时间的延长,凹坑织构直径和深度呈增大趋势。KOSHY^[31]等采用电火花加工技术在高速钢刀具表面加工织构,试验中将平均间隙电压、占空比、放电电流和时间间隔等参数设置到合适范围内,可加工出促进润滑剂渗透和保留的表面织构。



(a) 钨丝线切割 (b) 铜丝线切割

图4 不同线切割下的微槽尺寸^[10]

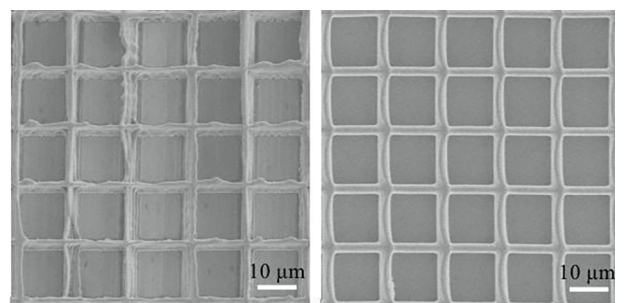
Fig. 4 Microgroove sizes under different wire cuts^[10]

大量研究表明,电火花加工方法能够加工硬脆和高熔点的材料,以及深孔、曲面、复杂形状的工件,具有无切削力、不产生毛刺和刀痕沟纹等优点,但此加工方法主要用于金属材料,加工后的表面会生成变质层,且工作废液和烟雾会污染环境。

1.5 光刻蚀

光刻蚀是利用光刻胶制作的抗蚀掩膜来保护基片的刻蚀方法。使用化学试剂进行刻蚀的为湿法刻蚀,使用离子光束进行刻蚀的为干法刻蚀^[32]。

干法刻蚀因加工表面织构精度高、效率高而被大量研究。在干法刻蚀中,所加工出的织构受光刻胶材料、基底材料以及光束参数的影响。顾银炜等^[33]发现在纯光刻胶中加入水溶性石墨烯制作的混合光刻胶在基片上刻蚀表面织构的过程中更高效。胡绪瑞等^[34]利用双光子聚合在铜和硅两种材料基底表面上制备二维网格表面织构,如图5所示,研究发现在有效光刻距离的情况下,不同材料的基底所加工出的表面织构质量不同。李伟霞等^[35]采用二氧化



(a) 铜片 (b) 硅片

图5 不同材料加工下的表面织构^[34]

Fig. 5 Processed surface texture of different materials^[34]

碳激光器对载玻片进行光刻加工,研究表明激光功率、打标速度以及Q频等参数对表面织构凹坑的深度均有较大影响。

以上研究表明,在光刻蚀中,光刻胶和基底材料,以及光束参数等因素均对基底表面所加工的织构有较大影响,光刻技术所需设备简单且加工缺陷较小,能极大地提高加工表面的摩擦学性能,但该技术对所用光的波长要求较高,刻蚀过程复杂。

1.6 超声振动辅助加工

超声振动辅助加工系统由超声振动系统和电能无线传输系统组成,其工作原理是超声电源将交流电转变为超声频电信号,然后由换能器将超声频电信号转换为超声频机械振动信号,再由变幅杆将振动振幅放大后传给工具^[36-37],其加工原理见图6。

超声振动辅助加工可在工件表面形成具有特定形状的表面微型凹坑阵列结构,通过改变超声振动参数、振动方向、振动维数可以加工出不同形状的表面微结构阵列^[38-39]。KIM等^[40]采用椭圆超声振动的加工方法,成功制备出整齐规则的微金字塔阵列。BREHL等^[41]采用超声振动辅助加工方法在工件表面加工出正三面体织构。赵波等^[42-43]采用超声振动

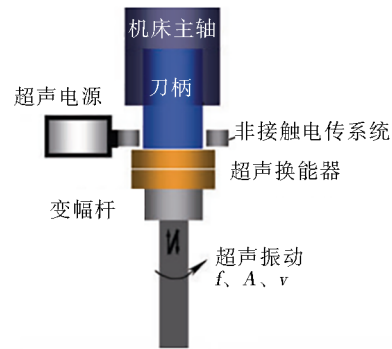


图6 超声振动辅助加工原理图

Fig. 6 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted machining

辅助加工技术对TC4钛合金进行切削试验,通过改变纵扭幅值比、振幅、转速、振动方向等加工参数来观察其对表面织构形貌的影响,不同振幅下的表面织构形貌如图7所示,发现在同等加工参数下,轴向振动比水平振动更有利于表面形成织构。马嘉明等^[44]通过增大超声振动系统振幅,发现凹坑织构深度宽度均增大。原路生等^[45]采用超声椭圆振动车削7075铝合金,研究发现,相比传统车削,超声椭圆振动车削后表面呈现类椭圆状的微织构凹槽。

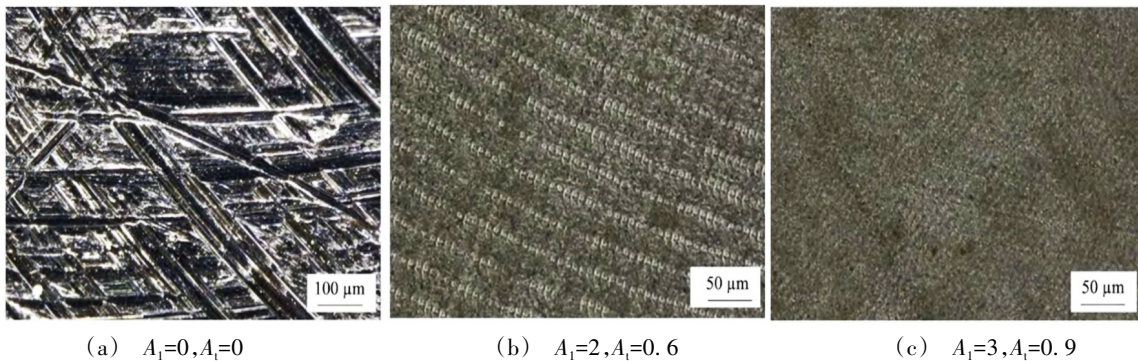


图7 不同振幅的加工表面^[42]

Fig. 7 Machining surfaces with different amplitudes^[42]

超声振动辅助加工在加工零部件时,可在其表面产生织构,因此其加工表面织构的效率很高,超声加工改变了已加工零件的表面生成机理和表面微观形貌特征,不仅可以改善其表面织构特性、提高加工表面质量,还延长了刀具的使用寿命。与其他织构加工方法相比,超声振动辅助加工技术具有不需昂

贵复杂的设备、工艺过程简单、加工效率高等优点。

通过以上特种加工方法在材料表面制备出具有一定几何结构的表面织构,能够有效提高零部件的材料表面性能。以上表面织构制备技术简化后的加工原理、加工织构特点和主要应用材料如表1所示。

表1 各加工技术的加工原理、加工织构特点和主要应用材料

Tab. 1 Machining principle, texture characteristics and main applied materials of each processing technology

加工技术	加工原理	加工织构特点	主要应用材料
激光加工	产生高温灼烧加工表面	织构加工精度高、效率高	金属、高硬度、高脆性材料
电解加工	利用电解液溶解工件材料	加工织构形状广泛、成本低	导电材料
化学刻蚀	利用化学试剂刻蚀材料	织构加工均匀性好	金属材料
电火花加工	火花放电产生高温熔融工件材料	可在复杂形状工件表面加工织构	硬脆材料和导电材料
光刻蚀	通过掩膜版图形刻蚀材料	织构加工缺陷小	金属、塑料、半导体材料
超声振动辅助加工	利用超声频振动加工材料	织构加工效率高、面密度高	硬脆材料

2 表面织构对材料表面性能的影响

对同一种材料,加工表面上表面织构形状和几何参数不同,材料表面性能不同。表面织构的几何结构包括织构形状、深度、宽度和面积率,通过改善表面织构的几何结构可有效提高机械零部件表面摩擦学性能、润滑性能、疏水性能等材料表面性能。

2.1 表面织构几何结构对润滑性的影响

在边界润滑和流体润滑的情况下,表面织构通过储存润滑剂影响摩擦副之间的油膜承载力、油膜厚度和油膜压力,进而提高零件表面润滑性能,因此,织构的几何结构对摩擦副之间的润滑性有较大影响^[46]。

2.1.1 表面织构形状对润滑性的影响

表面织构形状有单一形状织构和复杂的复合形状织构,不同表面织构形状对表面润滑性能影响不同,目前主要研究的是凹坑型和凹槽型的表面织构^[47],如图8所示。尹必峰等^[48]在发动机缸套表面加工出凹腔织构和沟槽织构,研究发现沟槽织构膜厚比增加幅度为15%左右,而凹腔织构膜厚比增加了约29%。在流体润滑下,路慧彪等^[49]通过CFD方法分析发现,增加入口压力,凹槽织构的油膜承载力会显著增加。李超等^[50]研究半正弦波、矩形、三角形等表面织构对错位瓦轴承的静动特性的影响,结果表明,在定载荷及不同转速工况下矩形织构最小油膜厚度最小。MENGFM等^[51]提出一种矩形-半圆形双层的复杂织构进一步改善了摩擦表面的润滑性能。

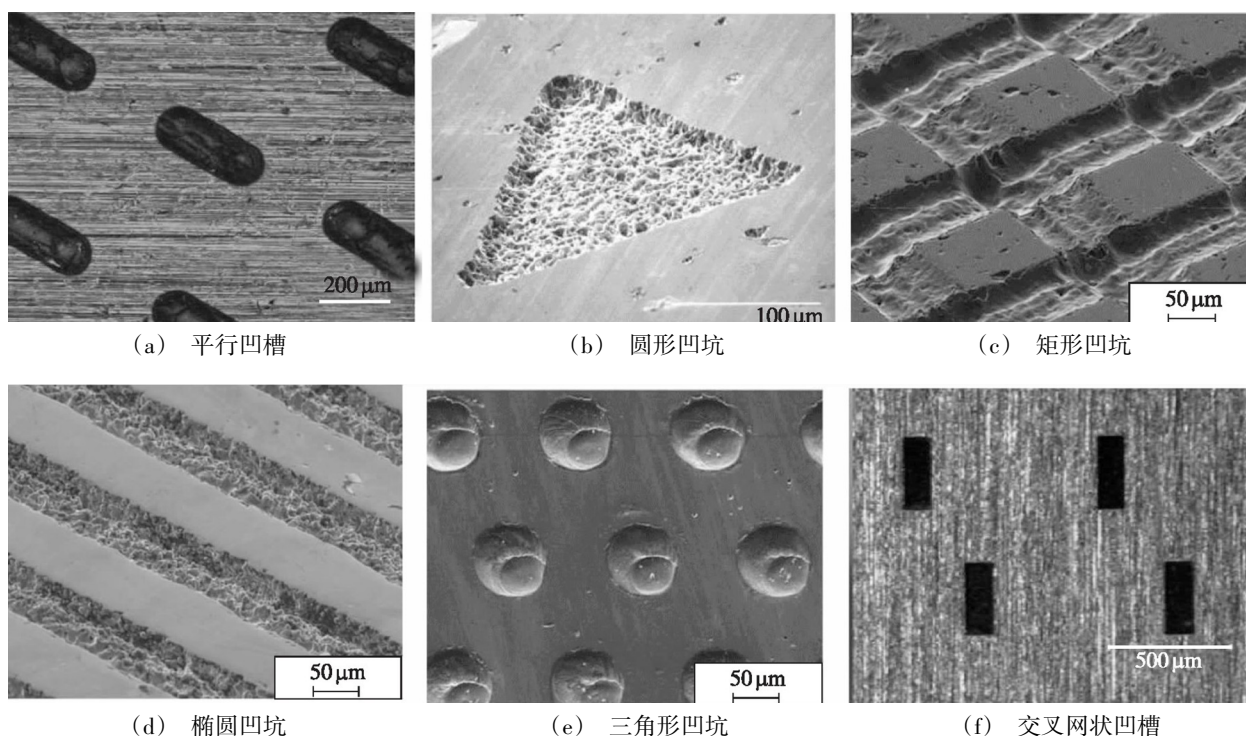


图8 表面织构形态特征^[47]

Fig. 8 Morphological characteristics of surface textures^[47]

大量研究表明,在润滑条件下,凹坑型织构有助于形成较高的流体动压力,而凹槽型织构则有利于为摩擦面提供润滑油。为获得较好表面润滑特性,在实际工程应用中,表面织构形状的选择要结合摩擦副的工作状况、织构几何参数以及外部载荷状况。

2.1.2 表面织构几何参数对润滑性的影响

郑清春等^[52]通过研究菱形织构对角线长度对油膜压力的影响,发现润滑膜压力随菱形织构对角线长度的增加出现先增加后减小的趋势。黄丰云等^[53]以球冠凹坑织构为对象,研究发现当织构单元间距是凹坑半径的3.4倍,长宽比为0.82时,可以获得最优的油膜承载力。路继松等^[54]通过研究证明了表面

织构的面积率和深径比存在最优值,能使水润滑轴承获得最大的膜厚比,进而提高了材料表面润滑性能。HU等^[55]研究发现当球凸形织构面积率过低时,不利于提高润滑膜的承载能力,面积率过大也会直接阻碍连续润滑膜的形成。何霞等^[56]在开展不同润滑介质下销-盘摩擦实验中,研究发现在1.5 MPa接触压力、0.2 m/s速度工况下,相较于低黏度的LCKD150润滑油,采用高黏度复合锂基润滑脂时,最优织构直径更大。胡宇等^[57]在研究矩形-半球型、矩形-椭球型、圆柱-半球型及圆柱-椭球型等不同形状复合织构对轴承润滑性能的影响时发现,在获得最高油膜压力情况下,4种类型织构的面积率依次为

25%、25%、35%、25%，相应的最佳深度分别为0.9、1.1、1.1、0.9 mm。

以上研究表明，合适的表面织构几何参数能有效提高材料表面的润滑性能，对于表面织构形状和织构几何尺寸的选择，不仅要考虑摩擦润滑表面工况条件，还要考虑织构形状与几何尺寸的相互影响。

2.2 表面织构几何结构对摩擦学特性的影响

表面织构通过实现捕捉磨屑、储存润滑剂的作用实现减摩，表面织构几何结构很大程度地影响材料表面的摩擦学特性，不合理的表面织构几何结构可能比无织构表面产生更大程度的磨损^[58-59]。

2.2.1 表面织构形状对摩擦学特性的影响

朱玮等^[60]研究发现T型槽织构化的机床导轨可有效降低摩擦系数。谢永等^[61]研究发现在304钢表面加工出三角形织构可显著提高钢的减摩、抗磨特性，加工织构后的表面磨痕如图9所示。薛超等^[62]利用精密加工方法在铝合金表面加工网状织构，研究发现摩擦系数随网状织构夹角由小变大呈抛物线变化，磨损程度也随之增大。GALDA等^[63]研究发现与规则形状的表面织构相比，长滴状织构能够更好地降低零部件之间的摩擦因数。ZHANG等^[64]指出相较于规则圆形织构，子弹形或鱼形织构具有更低的摩擦因数。李穗平^[65]在轴承钢GCr15表面加工方孔、圆孔和三角孔等织构，在润滑条件下，当载荷和往复运动频率一定时，圆孔织构表面耐磨性最好。郭万朋等^[66]研究发现随着载荷的增加，六边形织构表面的平均摩擦系数逐渐减小，相较于未织构表面，摩擦阻力降低40%。宋克峰^[67]研究发现，对于PTFE材料，长条状织构表面比点状织构表面耐磨性好，当工况条件为载荷5 N、滑动速度5 cm/s时，可获得最优的摩擦学特性。马明明等^[68]测试了圆台形凹坑织构表面在水、海水和油介质中的摩擦学性能，发现织构表面在油介质中的摩擦系数和磨损量最小。

以上研究表明，表面织构形状对摩擦学特性有较大影响，在一定条件下，复杂形状的结构比普通形状织构具有更好的摩擦学特性。在零部件表面选择所要加工的结构形状之前，应先考虑摩擦副表面工况和润滑形式，其次对所选结构的参数进行优化并相互比较，最后选择最合适的结构图形。

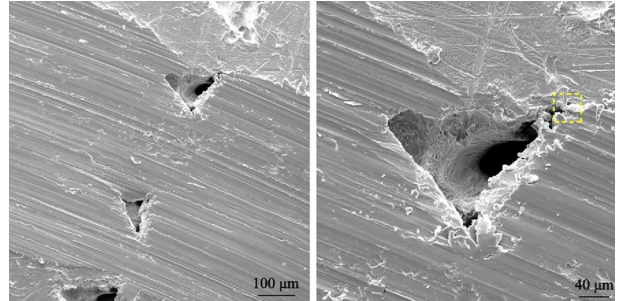
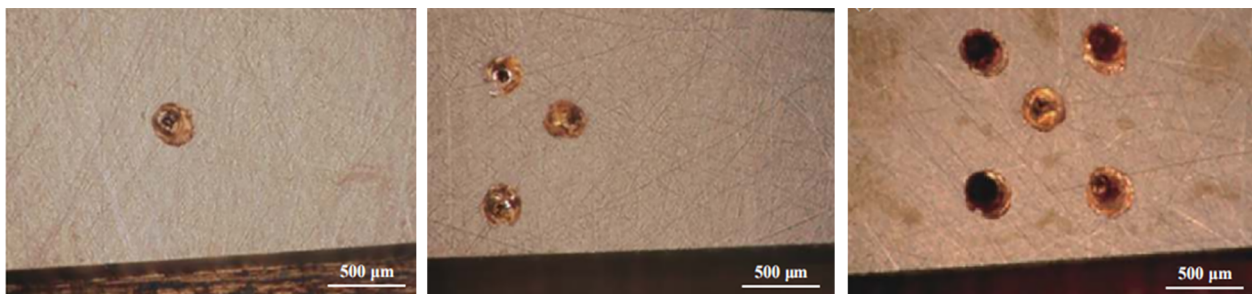


图9 表面磨痕形貌^[61]

Fig. 9 Surface wear morphology^[61]

2.2.2 表面织构几何参数对摩擦学特性的影响

曾帅帅等^[69]在电机定子表面加工3种不同面积率的圆形凹坑织构，如图10所示，研究发现随面积率的增加，材料表面的摩擦学特性降低。张幼军等^[70]在研究圆形表面织构对轴承耐磨性的影响中发现，当凹坑织构的直径在超出一定范围时，表面织构对摩擦系数的影响降低。金志浩等^[71]在轴承内圈滚道制备凹坑型织构，当凹坑型织构直径和深度达到一定取值时，织构轴承具有优异的耐磨性。ARSLAND等^[72]通过对非晶态氢化金刚石类碳试样在油润滑下的摩擦试验，证明了合适的表面织构深径比可有效改善表面摩擦学性能。蔡兴兴^[73]发现在轻载荷和混合润滑状态下，当圆形织构几何参数为面积率20%，半径100 μm，深度17 μm，可以获得最优摩擦润滑性能。杨国来等^[74]在轴向柱塞泵配流副表面加工矩形、圆弧、三角形和等腰梯形等织构，为获得良好的减磨性，对于矩形和圆弧织构，最佳深径比为1:5，对于三角形和等腰梯形织构，最佳深径比为1:4。



(a) 1-凹坑织构

(b) 3-凹坑织构

(c) 5-凹坑织构

图10 不同面积率的表面织构^[69]

Fig. 10 Surface texture with different area ratio^[69]

以上研究表明，合适的表面织构几何参数可以使材料表面获得较好的摩擦学特性，在干摩擦、边界润滑或混合润滑条件下，织构面密度对磨损颗粒的

捕捉能力和表面的接触面积影响较大，在润滑条件下，凹坑类织构直径和深度存在的最优比值有助于降低摩擦副的摩擦因数。

2.3 表面织构几何结构对疏水性的影响

材料表面能和表面织构对材料表面疏水性有较大影响,接触角是评价固体亲疏水性能的重要参数,

不同接触角的表面状态如图 11 所示,合适的表面织构几何结构可有效改善材料表面的疏水性特性^[75-77]。

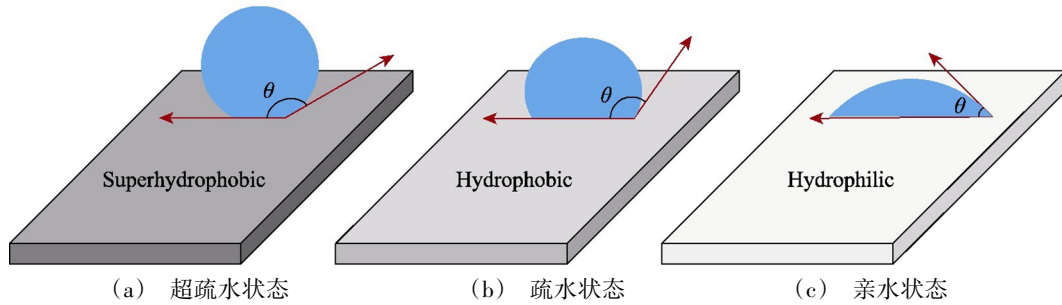


图 11 不同接触角的表面状态^[77]

Fig. 11 Surface state with different contact angles^[77]

2.3.1 表面织构形状对疏水性影响

织构形状不同对材料表面疏水性影响不同。赵美云等^[78]采用激光雕刻机在陶瓷表面加工出 3 种不同形状的织构,发现方柱形织构表面疏水性能最好。HAN 等^[79]人采用激光加工与化学处理相结合的方法在铜表面制备了周期性微米锥结构,对其进行氟硅烷改性后,这种复杂的三维微纳结构具有良好的超疏水能。余剑武等^[80]研究不同织构形状对有机玻璃表面疏水性能的影响,得出椭圆形阵列表面织构疏水性效果最好,椭圆形阵列表面织构如图 12 所示。BICO 等^[81]在硅表面制备出具有针状、孔状及条状的表面织构,经氟化处理后的水接触角分别达到 167°、131°和 151°。唐军等^[82]研究发现,相较于普通铣削加工出的条纹状织构,纵扭复合超声铣削系统在铝合金材料表面形成的“鱼鳞网纹”的表面织构具有良好的疏水性能。许骏杰等^[83]在 35CrMo 钢基体上制

备非晶合金涂层,通过激光加工技术在涂层表面构造乳突、点阵和凹槽织构等三种类型织构,结果表明,与未织构涂层表面相比,涂层后织构表面与去离子水的接触角提升至 $(151.6 \pm 0.3)^\circ$,其中乳突织构的间距变化对疏水性影响较小。

2.3.2 表面织构几何参数对疏水性影响

合适的表面织构几何参数可获得较好的表面疏水性。WANG 等^[84]在玻璃表面上加工出一系列具有不同间距的微槽阵列结构,研究发现随着微槽间距的减小,玻璃表面逐渐趋于疏水性。赵美云等^[85]采用激光雕刻机在复合绝缘子硅橡胶表面加工多种不同类型的织构,发现改变织构的间距和宽度对不同类型织构表面疏水性能的影响不同。李坤等^[86]通过改变激光加工参数在硬质合金刀片上加工不同面积率的环形凸起织构,如图 13 所示,研究发现在一定范围内,表面织构密度越大,表面疏水性能越好。逢明华等^[87]研究发现在相同表面织构下,空气介质中激光加工表面的接触角为 65.85°,液相辅助下激光加工表面的接触角为 55.4°。温永美等^[88]在研究不同加工环境下表面织构对 304 不锈钢表面润湿性的影响中发现,空气环境中制备织构的表面接触角为 10.61°,无水乙醇中制备织构的表面接触角为 66.14°~117.83°。

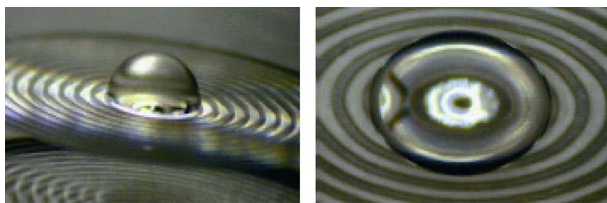
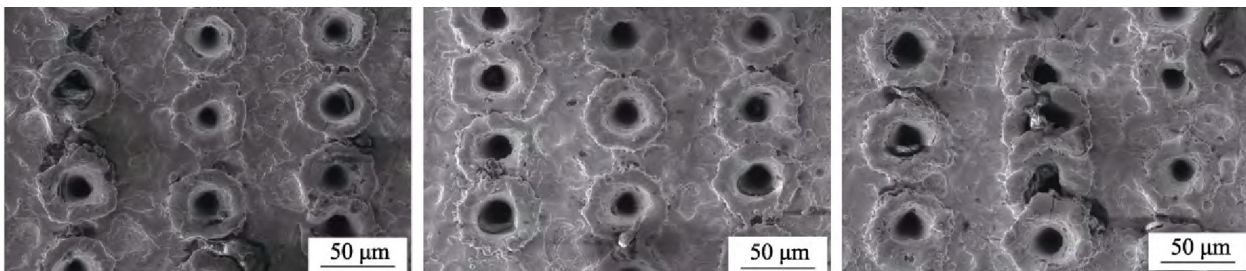


图 12 椭圆形织构阵列^[80]

Fig. 12 Micro ellipse array^[80]



(a) 激光功率 12 W

(b) 激光功率 14 W

(c) 激光功率 16 W

图 13 不同面积率的激光加工表面织构^[86]

Fig. 13 Laser processed surface texture of with different area ratio^[86]

大量研究表明,表面织构的几何结构对疏水性影响很大,但获得疏水表面之前,应考虑加工材料本身的固有特性和加工技术的加工条件,对于大部分材料,选用凹坑类织构能获得较好的疏水表面,对于固有表面能较高的材料,需在其表面加工织构后,通过后续的化学改性降低表面的自由能。

3 结语

通过对文献总结分析,目前表面织构的加工技术以激光加工、化学刻蚀、电火花加工、电解加工、光刻蚀和超声振动辅助加工为主。在表面织构的加工方面,各加工技术在加工精度,加工效率、加工成本以及可加工材料等方面各有特点。激光刻蚀虽具有加工精度高、加工效率高、无污染等优点,但在加工织构时易出现热变形,通过改变激光波长、功率以及扫描速度等参数,来降低织构化表面热变形的缺陷仍需继续研究。化学刻蚀具有成本低廉、加工材料范围广、实用性强等特点,但难以准确配比出合适浓度的化学溶液而无法完成定向刻蚀,对于特定的加工材料,需重点研究配比出合适浓度的化学溶液来确定刻蚀时间,并根据材料化学分子性质来实现定向刻蚀。电解加工具有效率高、便宜等优点,但是只对导电材料有用。电火花加工技术在加工时具有无切削力、不产生毛刺和划痕等优点,但受工件材料限制。光刻蚀具有设备简单、加工缺陷小等优点,但加工过程复杂。超声振动辅助加工技术具有加工效率高、织构形状与面积率可控性好、加工表面质量高以及环保等优点,代表了一种特定表面织构可再生的制造方法,但对于有特殊应用要求的复杂声学系统设计精度与实际情况有一定偏差,从而影响表面织构的加工结果,因而如何提高多维复杂超声振动系统的设计精度,是超声振动辅助加工应用在表面织构方向需要关注的内容之一。

表面织构的形状、宽度、深径比和面积率等参数都对材料性能有较大影响,表面织构的几何结构决定着材料表面性能的质量,在加工所需特定性能表面织构的同时,不仅要考虑合适的表面织构几何结构,还要考虑到工件的工况条件、材料性质、织构加工技术以及该加工技术的相关参数。

目前,表面织构技术在工业领域的覆盖较为广泛,但仍存在一些不足,未来对表面织构的研究应着重从以下几个方面开展:

(1) 不同的表面织构几何尺寸和结构会对材料性能产生不同影响,大多相关研究内容主要基于理论研究,因数学模拟工况与实际工作环境存在差异,在实际工作环境下,表面织构对材料性能的作用机制是未来需要关注的重点;

(2) 表面织构在重载荷作用下对材料表面润滑性能的影响并不明显,因此当具有织构化表面的零部件在受到重载时,将表面织构技术与润滑油添加

剂技术、表面涂层技术等结合,以提高材料在边界润滑条件下的润滑性能是未来需要关注的重点;

(3) 对表面织构的研究大多拘束于单一形状织构,为了获得更好的材料表面性能,应加强多种形状复合的织构研究;

(4) 超声振动辅助加工技术由于其织构加工密度高、效率高的加工方式被广泛应用于工业领域,在复杂的声学系统中,表面织构的加工结果往往与理想表面织构几何结构有一定偏差,如何提高多维复杂超声振动系统的设计精度需要被深入研究。

参考文献

- [1] BAGADE V U, DURAISLVAM M, SARANGI N, et al. Laser surface texturing to enhance cuniin anti-fretting coating adhesion on Ti6Al4V alloy for aerospace application[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2020, 7(2): 141-153.
- [2] NAEEM A, BUTT E, KHAWAJA H et al. Microsecond laser texturing of an aerospace grade aluminum alloy to synthesize super hydrophobic, anti-water clogging surfaces[J]. *Key Engineering Materials*, 2021, 875: 322-328.
- [3] 王正国, 莫继良, 陈光雄, 等. 沟槽型织构化表面摩擦噪声特性试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(03): 304-310.
- [4] WANG Z G, MO J L, CHEN G X, et al. An experimental study on friction noise properties of groove extured surfaces[J]. *Tribology*, 2013, 33(03): 304-310.
- [5] SHUAI Y, CHIBIN W, HONGBO Z, et al. Fabrication and tribological characterization of laser textured engineering ceramics: Si_3N_4 , SiC and ZrO_2 [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(10): 13789-13805.
- [6] DAMIAN G, TOMASZ B, TOMASZ K, et al. Multiscale analysis of surface texture quality of models manufactured by laser powder-bed fusion technology and machining from 316l steel[J]. *Materials*, 2021, 14(11): 2794.
- [7] KOYANO T, HOSOKAWA A, TAKAHASHI T, et al. One-process surface texturing of a large area by electrochemical machining with short voltage pulses [J]. *CIRP annals-manufacturing technology*, 2019, 68(1): 181-184.
- [8] 王清清, 傅秀清, 张震, 等. 回转体表面掩膜微细电解加工有限元分析及试验研究[J]. *机械设计*, 2020, 37(03): 47-53.
- [9] WANG Q, FU X, ZHANG Z, Finite-element simulation and experimental study on the mask micro electrochemical machining of the revolving surface [J]. *Journal of Machine Design*, 2020, 37(03): 47-53.
- [10] LIU T, WEI H, LI J, et al. Wettability control of sapphire by surface texturing in combination with femtosecond laser irradiation and chemical etching [J]. *Chemistry Select*, 2020, 5(31): 9555-9562.
- [11] 郭江, 王兴宇, 赵勇, 等. 微织构刀具制备技术及加工性能研究新进展[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(13): 172-200.
- [12] GUO J, WANG X, ZHAO Y. et al. Recent progress on fabrication technologies and machining performance of textured

cutting tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (13):172-200.

[10] 杨凤双, 林伟, 段景淞, 等. 电火花线切割加工表面微织构技术研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(06):27-31.

YANG F, LIN W, DUAN J et al. Research on surface micro-texture technology of WEDM [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(06):27-31.

[11] ZHU W, XING Y, EHMANN K F, et al. Ultrasonic elliptical vibration texturing of the rake face of carbide cutting tools for adhesion reduction [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9-12).

[12] 赵波. 超声加工技术的研究现状和发展方向简介[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(01):1-4.

ZHAO B. Research status and development direction of ultrasonic machining technology [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(01):1-4.

[13] 钟兵, 邢志国, 王海斗, 等. 织构化表面摩擦学性能的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(23):23171-23178.

ZHONG B, XING Z, WANG H. et al. Research progress on the tribological properties of textured surfaces [J]. Materials Reports, 2020, 34(23):23171-23178.

[14] 许骏杰, 苏娟, 康嘉杰, 等. 激光织构对Fe基非晶合金涂层润湿性的影响研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(4):8.

XU J, SU J, KANG J, et al. Effect of laser texture on wettability of Fe-based amorphous alloy coating [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4):8.

[15] 华希俊, 王成, 郝静文, 等. TC11钛合金表面微凹坑织构皮秒激光加工工艺[J]. 表面技术, 2018, 47(03):42-47.

HUA X, WANG C, HAO J, et al. Picosecond laser processing technology of micro-dimple texture on surface of tc11 titanium alloy[J]. Surface Technology, 2018, 47(03):42-47.

[16] 刘宇航, 李岩, 李林, 等. 316L不锈钢表面微织构激光加工工艺参数[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2021, 34(03):266-271.

LIU Y, LI Y, LI L, et al. Technological parameters of laser machining of 316L stainless steel surface micro-texture [J]. Journal Of Yantai University (Natural Science And Engineering Edition), 2021, 34(03):266-271.

[17] 许晨辉, 徐锋, 施莉莉, 等. 基于纳秒激光加工技术的表面织构工艺参数研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(06):11-13, 46.

XU C, XU F, SHI L, et al. Research on laser surface texturing parameters based on nanosecond laser processing technology [J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(06):11-13, 46.

[18] 纪玲玲, 黎宁慧, 康敏. Ni-Co-Si₃N₄复合镀层表面激光加工微织构的形貌演化规律[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(09):264-273.

JI L, LI N, KANG M. Evolution law of laser-textured microstructure on Ni-Co-Si₃N₄ composite coating surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(09):264-273.

[19] 赵铁军, 吴楠. 表面织构技术的研究现状分析[J]. 机电工程技术, 2020, 49(11):116-118.

ZHAO T, WU N. Analysis of the research status of surface texture technology [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(11):116-118.

[20] 薛腾, 朱嘉澄, 钱彩虹, 等. 基于干膜的表面织构微沟槽阵列电解加工研究[J]. 电加工与模具, 2017(04):34-37.

XUE T, ZHU J, QIAN C, et al. Study on electrochemical machining of micro-groove arrays using dry-film mask [J]. Electromachining & Mould, 2017(04):34-37.

[21] 宋曼, 曲宁松, 钱双庆, 等. 微小凹坑阵列的电解转印加工试验研究[J]. 电加工与模具, 2009(05):30-34.

SONG M, QU N, QIAN S, et al. Experimental study of machining array micro-pits in electrochemical machining method with a mask onto the cathode [J]. Electromachining & Mould, 2009(05):30-34.

[22] 钱双庆, 朱荻, 曲宁松, 等. 活动模板电解加工活塞表面织构技术研究[J]. 内燃机与配件, 2010(12):22-24.

QIAN S, ZHU D, QU N, et al. Study on surface texture technology of piston in electrochemical machining with movable template [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2010(12):22-24.

[23] 钱双庆, 曲宁松, 朱荻, 等. 电解转印表面织构的定域性研究[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(02):127-133.

QIAN S, QU N, ZHU D, et al. Study on localization of surface texture in electrolytic transfer printing [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 9(02):127-133.

[24] 童文俊, 王明环, 邱国志, 等. 摩擦副表面气膜屏蔽微细电解加工微织构及摩擦性能分析[J]. 中国机械工程, 2020, 31(11):1331-1336.

TONG W, WANG M, QIU G, et al. Analysis of micro texture and friction properties of friction coupling surfaces produced by as-emb [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(11):1331-1336.

[25] 刘晓燕, 赵雨新, 赵海谦, 等. 刻蚀法制备超疏水金属表面的研究综述[J]. 功能材料与器件学报, 2019, 25(04):221-228.

LIU X, ZHAO Y, ZHAO H et al. A review on preparation of superhydrophobic metal surface by etching [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2019, 25(04):221-228.

[26] QIAN B, SHEN Z. Fabrication of superhydrophobic surfaces by dislocation-selective chemical etching on aluminum, copper, and zinc substrates. [J]. Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids, 2005, 21(20):9007-9009.

[27] 李丽萍, 周吉成, 刘元伟, 等. 超疏水铝表面的一步法电化学制备及其耐腐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2021, 54(06):117-121.

LI L, ZHOU J, LIU Y, et al. One-step electrochemical preparation of super-hydrophobic aluminum surface and the anti-corrosion performance [J]. Materials Protection, 2021, 54(06):117-121.

[28] 杜立群, 张希, 肖海涛, 等. 回转体表面微沟槽阵列化学刻蚀加工[J]. 模具制造, 2021, 21(02):73-78.

DU L, ZHANG X, XIAO H, et al. Chemical etching of micro-groove array on the surface of rotating body [J]. Die & Mould Manufacture, 2021,21(02):73-78.

[29] 黎毅锋, 刘智, 刘俊, 等. 基于电火花线切割工艺的发动机连杆裂解槽加工技术综述[J]. 制造技术与机床, 2021(08):108-112.

LI Y, LIU Z, LIU J, et al. Overview of machining technology of engine connecting rod cracking groove based on WEDM [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(08):108-112.

[30] 赵昌龙, 王旭旭, 吕起印, 等. 电火花加工表面微结构仿真与实验研究[J]. 制造技术与机床, 2021(07):21-26.

ZHAO C, WANG X, LV Q, et al. Simulation and experimental study on micro texture of EDM surface [J]. Manufacturing Technology & Machine tool, 2021(07):21-26.

[31] KOSHY P, TOVEY J. Performance of electrical discharge textured cutting tools[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2011,60(1).

[32] 周易, 芯片制造中的化学反应[J]. 山西化工, 2018, 38(05):140-142.

ZHOU Y. Chemical reactions in chip manufacturing [J]. Shanxi Chemical Industry, 2018,38(05):140-142.

[33] 顾银炜, 陈达, 李久荣, 等. 飞秒激光双光子聚合构建水溶性石墨烯-光刻胶的3D微结构[J]. 红外与激光工程, 2018,47(10):202-208.

GU Y, CHEN D, LI J, et al. Three-dimensional microstructure doped with water soluble graphene fabricated by laser pulse two-photon polymerization [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018,47(10):202-208.

[34] 胡绪瑞, 陈达, 王刚, 等. 利用双光子聚合在非透明基底上制备微结构[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019,32(05):85-90.

HU X, CHEN D, WANG G, et al. Fabrication of microstructures on non-transparent substrates by two-photon polymerization [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2019,32(05):85-90.

[35] 李伟霞, 黄素娟, 闫成. 基于数字全息玻璃微加工形貌测量[J]. 光子学报, 2021,50(09):32-43.

LI W, HUANG S, YAN C. Morphology measurement of glass micromachining based on digital holography [J]. Acta Photonica Sinica, 2021,50(09):32-43.

[36] 姜立平, 孙增光, 邢政鹏, 等. 超声加工技术研究进展[J]. 现代制造技术与装备, 2020,56(12):76-79.

JIANG L, SUN Z, XING Z, et al. Research progress of ultrasonic machining technology [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020,56(12):76-79.

[37] 赵波. 超声加工技术的研究现状和发展方向简介[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020,40(01):1-4.

ZHAO B. Introduction to the research status and development direction of ultrasonic processing technology [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020,40(01):1-4.

[38] BREHL D E. 3-D microstructure creation using elliptical vibration-assisted machining (EVAM) [D]. North

Carolina State University, 2014:

[39] 焦锋, 孙海猛, 牛赢, 等. 切削法制备超细晶材料研究进展与展望[J]. 表面技术, 2022,51(04):37-49,65.

JIAO F, SUN H, NIU Y, et al. Research progress and prospect of ultrafine grained material prepared by cutting method [J]. Surface Technology, 2022,51(04):37-49,65.

[40] BREHL D E, DOW T A. 3-D microstructure creation using elliptical vibration-assisted machining (EVAM) [J]. Dissertations & Theses-gradworks, 2014, 40:21-26.

[41] KIM G D, LOH B G. Machining of micro-channels and pyramid patterns using elliptical vibration cutting [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9-12):961-968.

[42] 赵波, 李鹏涛, 张存鹰, 等. 超声振动方向对TC4钛合金铣削特性的影响[J]. 航空学报, 2020,41(02):39-49.

ZHAO B, LI P, ZHANG C, et al. Effect of ultrasonic vibration direction on milling characteristics of TC4 titanium alloy [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2020, 41(02):39-49.

[43] 张存鹰, 赵波. 超声振动辅助加工表面微结构及其特性研究进展[J]. 表面技术, 2019,48(05):259-274.

ZHANG C, ZHAO B. Research progress of properties of surface micro-structure in ultrasonic vibration assisted machining [J]. Surface Technology, 2019,48(05):259-274.

[44] 马嘉明, 郑建明, 刘驰, 等. 超声振动冲击表面织构方法及试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020,43(01):62-67.

MA J, ZHENG J, LIU C, et al. Ultrasonic vibration impact surface texture method and experimental study [J]. Ordnance Material Science And Engineering, 2020,43(01):62-67.

[45] 原路生, 赵波, 王毅, 等. 椭圆振动辅助车削7075铝合金表面微结构及其特性[J]. 中国机械工程, 2020,31(15):1831-1838.

YUAN L, ZHAO B, WANG Y, et al. Surface micro-texture characteristics of 7050 aluminum alloys by elliptical vibration assisted turning [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(15):1831-1838.

[46] 张培耘, 张彦虎, 华希俊, 等. 微织构化表面润滑设计与发展分析[J]. 表面技术, 2021,50(09):14-32.

ZHANG P, ZHANG Y, HUA X, et al. Lubrication design and development analysis of micro-texturing surfaces [J]. Surface Technology, 2021,50(09):14-32.

[47] 汤勇, 唐恒, 万珍平, 等. 表面织构流体动压润滑性能的研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),

TANG Y, TANG H, WAN Z, et al. Research progress of hydrodynamic lubrication of surface texture [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017,45(09):1-11.

[48] 尹必峰, 卢振涛, 刘胜吉, 等. 缸套表面织构润滑性能理论及试验研究[J]. 机械工程学报, 2012,48(21):91-96.

YIN Bifeng, LU Zhentao, LIU Shengji, et al. Theoretical and experimental research on lubrication performance of laser surface texturing cylinder liner [J]. Journal of Mechanical

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第6期

Engineering, 2012, 48(21):91-96.

[49] 路慧彪, 曹淑华, 唐平. 入口压力对织构表面承载力的影响[J]. 机床与液压, 2018, 46(5): 111-113, 154.

LU H, CAO S, TANG P. Influence of supply pressure on carrying capacity of texture surface [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(5): 111-113, 154.

[50] 李超, 裴世源, 郑文斌, 等. 表面织构对错位瓦轴承静动特性的影响[J]. 润滑与密封, 2020, 45(05):18-24.

LI C, PEI S, ZHENG W, et al. Effects of surface texture on static and dynamic performances of offset bearings [J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(05):18-24.

[51] ENG F M, ZHANG W. Effects of compound groove texture on noise of journal bearing [J]. Journal of Tribology, 2018, 140 (3): 031703.

[52] 郑清春, 毛璐璐, 史于涛, 等. 仿生织构表面对人工髋关节副动压润滑性能及减摩性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(11):102-111.

ZHENG Q, MAO L, SHI Y, et al. Analysis of biomimetic texture surface on dynamic compression lubrication and friction reduction of artificial hip pair [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11):102-111.

[53] 黄丰云, 杨晓兵, 朱继伟, 等. 表面织构分布参数对流体动压润滑的影响及其数值优化[J]. 润滑与密封, 2021, 46(04):18-25.

HUANG F, YANG X, ZHU J, et al. Effect of surface texture distribution parameters on hydrodynamic lubrication and their numerical optimization[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(04):18-25.

[54] 路继松, 宋新涛, 王晓力. 表面织构对水润滑轴承混合润滑性能的影响[J]. 润滑与密封, 2019, 44(11):29-33.

LU J, SONG X, WANG X. The influence of surface texture on mixed lubrication performance of water-lubricated bearing [J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(11):29-33.

[55] HU D, GUO Z, XIE X, et al. Effect of spherical-convex surface texture on tribological performance of water-lubricated bearing [J]. Tribology International, 2019, 134: 341-351.

[56] 何霞, 李梦媛, 江士凯, 等. 润滑介质对织构化表面摩擦学性能影响的实验研究[J]. 润滑与密封, 2018, 43(4): 8-14.

HE Xia, LI Mengyuan, JIANG Shikai, et al. Experimental study on the influence of different lubrication mediums on tribological properties of textured surface [J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(4): 8-14.

[57] 胡宇, 王优强, 菅光霄, 等. 平行滑块表面不同形状复合型织构的润滑性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(01): 43-51.

HU Y, WANG Y, GUAN G, et al. Study on lubrication properties of parallel slider surface with different shape compound texture. [J]. Surface Technology, 2022, 51 (01) : 43-51.

[58] ZEDA C, ZHIBIN W, JIANFANG S, et al. Improved load-bearing capacity and tribological properties of ptfе coatings induced by surface texturing and the addition of go[J]. Tribology 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第6期

letters, 2021, 69(2):1-15.

[59] CHUNXING G, XIANGHUI M, SHUWEN W, et al. Study on the mutual influence of surface roughness and texture features of rough-textured surfaces on the tribological properties [J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, 2021, 235(2): 256-273.

[60] 朱玮, 吴玉国, 时礼平, 等. T型槽织构化机床滑动导轨的摩擦学特性[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2020, 37(04):356-363.

ZHU W, WU Y, SHI L, et al. Tribological properties of sliding guide rail of t-groove textured machine tool [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2020, 37 (04):356-363.

[61] 谢永, 宋文涛, 陈文刚, 等. 三角表面微织构对304钢摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(04):225-234.

XIE Y, SONG W, CHEN W, et al. Effect of triangular surface micro-texture on tribological properties of 304 steel [J]. Surface Technology, 2021, 50(04):225-234.

[62] 薛超, 卢艳, 陈娟. 织构化的铝合金表面摩擦学特性研究[J]. 武汉科技大学学报, 2020, 43(04):269-275.

XUE C, LU Y, CHEN J, Tribological properties of surface textured aluminum ally [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2020, 43(04):269-275.

[63] GALDA L, PAWLUS P, SEP J. Dimples shape and distribution effect on characteristics of stribeck curve [J]. Tribology International, 2009, 42(10): 1505-1512.

[64] ZHANG H, HUA M, DONG G, et al. Optimization of texture shape based on genetic algorithm under unidirectional sliding [J]. Tribology International, 2017, 115: 222-232.

[65] 李穗平. 激光织构GCr15钢油润滑摩擦磨损性能试验[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(07):35-40.

LI H. Experimental study on friction and wear properties of laser-textured GCr15 steel under oil lubrication condition [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(07):35-40.

[66] 郭方朋, 高艺, 胡嵩, 等. 仿生织构对抽油泵柱塞表面摩擦性能影响[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(02):62-67.

GUO W, GAO Y, HU S, et al. The effect of bionic texture on pump plunger surface tribological properties [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2022, 42(02):62-67.

[67] 宋克峰. 模压烧结制备复杂织构的PTFE表面及其摩擦学性能[D]. 燕山大学, 2020.

SONG Kefeng. Preparation and tribological properties of complex textured ptfе surfaes by embossing and thermal [D]. Yanshan University, 2020.

[68] 马明明, 连峰, 臧路莘, 等. 凹坑深度对铝合金表面在不同润滑介质中摩擦学性能的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(4): 406-414

MA M, LIAN F, ZANG L, et al. Effect of dimple depth on friction properties of aluminum alloy under different lubrication conditions [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53 (4) : 406-414.

[69] 曾帅帅, 李锦棒, 陈鹏飞, 等. 定子表面织构对超声电机性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(04):504-510.

ZENG S, LI J, CHEN P, et al. Effect of stator surface

texture on the performances of an ultrasonic motor [J]. Tribology, 2019,39(04):504-510.

[70] 张幼军, 孙静婷, 苑泽伟, 等. 表面微结构对关节轴承耐磨性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2021,43(02):169-176.

ZHANG Y, SUN J, YUAN Z, et al. Effect of surface micro-textures on wear-resisting performance of joint bearings [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43 (02):169-176.

[71] 金志浩, 鞠子辰, 龙日升, 等. 凹坑型织构对 81107-TN 推力圆柱滚子轴承干摩擦性能的影响[J]. 轴承, 2021(08):11-15.

JIN Z, JU Z, LONG R, et al. Influence of pit texture on dry friction properties of 81107-TN cylindrical thrust roller bearings[J]. Bearing, 2021(08):11-15.

[72] ARSLAN A, MASJUKI H H, VARMAN M, et al. Effects of texture diameter and depth on the tribological performance of DLC coating under lubricated sliding condition [J]. Applied surface science, 2015,356: 1135-1149.

[73] 蔡兴兴. 混合润滑状态下织构化表面摩擦特性的数值计算与试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

CAI X. Numerical calculation and experimental study on textured surface tribology performance under mixed lubrication [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[74] 杨国来, 金晶, 张明明, 等. 不同织构几何参数对轴向柱塞泵配流副动压支承的影响研究[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(10): 32-35.

YANG G, JIN J, ZHANG M, et al. Study on the influence of different texture geometric parameters on the dynamic pressure support of axial piston pump valve plate [J]. Hydraulics Pneumatics & seals, 2019, 39(10): 32-35.

[75] KOUKOULOPOULOS E, PAPAPOULOS C I. Piston ring performance in two-stroke marine diesel engines: Effect of hydrophobicity and artificial surface texturing on power efficiency [J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2018, 232 (8): 940-963.

[76] EZHILMARAN V, DAMODARAM R. Laser surface texturing on nickel-aluminium-bronze alloy for improving the hydrophobicity [J]. Lasers in Manufacturing And Materials Processing, 2021, 8(1):15-27.

[77] 卢志成, 郑佳宜, 余延顺. 润湿性表面液滴导向运动的研究进展[J]. 表面技术, 2021,50(01):138-149.

LU Z, ZHENG J, YU Y. Research progress of droplet guided motion on wetting surface [J]. Surface Technology, 2021, 50(01):138-149.

[78] 赵美云, 何钱, 雷波, 等. 基于激光雕刻技术的陶瓷超疏水表面制备[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(01):107-112.

ZHAO Meiyun, HE Qian, LEI Bo, et al. Preparation of ceramic superhydrophobic surface based on laser engraving technology [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021,43(01):107-112.

[79] HAN J, CAI M, LIN Y, et al. 3D re-entrant

nanoglass on microcones for durable superamphiphobic surfaces via laser-chemical hybrid method [J]. Applied Surface Science, 2018,456.

[80] 余剑武, 陆岳托, 罗红, 等. 基于微铣削的微结构尺寸与形状对 PMMA 表面疏水性的影响[J]. 表面技术, 2021,50(01):287-295.

YU J, LU Y, LUO H, et al. Effects of dimension and shape of micro-milled microstructure on PMMA surface hydrophobicity [J]. Surface Technology, 2021, 50 (01) : 287-295.

[81] BICO J, MARZOLIN C, QUÉRÉ D, et al. Pearl drops [J]. EPL (europhysics letters), 1999,47(2):220.

[82] 唐军, 陈小静, 赵波. 微织构超声振动铣削系统的研究[J]. 应用声学, 2020,39(06):885-893.

TANG J, CHEN X, ZHAO B. A research on the micro texture ultrasonic vibration milling system [J]. Journal of Applied Acoustics, 2020,39(06):885-893.

[83] 许俊杰, 康嘉杰, 岳文, 等. 纳秒激光制备 Fe 基非晶合金涂层表面织构的疏水性研究[J]. 材料导报, 2022, 36 (07):103-108

XU J, KANG J, YUE W, et al. Study on hydrophobicity of surface 'texture on fe-based amorphous alloy coating treated by nanosecond laser [J]. Materials Reports, 2022,36(07):103-108

[84] WANG B, HUA Y, YE Y, et al. Transparent superhydrophobic solar glass prepared by fabricating groove-shaped arrays on the surface [J]. Applied Surface Science, 2017, 426: 957-964.

[85] 赵美云, 田森, 吴阳, 等. 织构参数对复合绝缘子硅橡胶表面疏水性能的影响[J]. 中国表面工程, 2019,32 (01):12-21.

ZHAO M, TIAN S, WU Y, et al. Effects of texture parameters on surface hydrophobicity of silicone rubber composite insulator [J]. China Surface Engineering, 2019, 32 (01):12-21.

[86] 李坤, 杜家熙, 刘莉莉, 等. 乙醇辅助激光一步法制备硬质合金疏水表面[J]. 表面技术, 2021,50(07):90-96.

LI K, DU J, LIU L, et al. One-step preparation of hydrophobic surface of cemented carbide by ethanol-assisted laser [J] Surface Technology, 2021,50(07):90-96.

[87] 逢明华, 翟帅杰, 冯启高, 等. 硬质合金表面织构液相辅助激光制备及摩擦性能[J]. 摩擦学学报, 2022,42(05):1001-1011.

FENG M, ZHAI S, FENG Q, et al. Liquid-phase assisted laser preparation of cemented carbide surface textures and study on their tribological properties [J]. Tribology, 2022, 42 (05) : 1001-1011.

[88] 温永美, 赵向阳, 王国盛, 等. 空气/液体环境下一步法制备 304 不锈钢织构表面的润湿性研究[J]. 中国表面工程, 2021,34(01):97-103.

WEN Y, ZHAO X, WANG G, et al. Wettability of textured surface of 304 stainless steel prepared by one step method in air / liquid environment [J]. China Surface Engineering, 2021, 34 (01):97-103.