

综述

激光表面织构化与固体润滑技术复合处理改善表面摩擦学性能的研究现状

王睿哲¹, 朱丽娜^{1,2}, 岳文^{1,2}, 付志强^{1,2}, 康嘉杰^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京) 郑州研究院, 河南 郑州 451283)

[摘要] 激光表面织构化技术(LST)具有加工速度快、对环境无污染并且可以实现加工图案尺寸和形状的精确控制等优点,可以有效改善表面的摩擦学性能。通过将激光表面织构化技术与固体润滑复合处理,可以起到“1+1>2”的协同作用,从而使得基体材料的表面摩擦学性能达到进一步的优化。对国内外LST与不同的固体润滑技术复合处理的研究现状进行了综述。系统归纳了表面织构的几何形状、尺寸、密度等对不同固体润滑材料寿命的影响,分析了二者协同润滑效应的机理,并对LST与固体润滑技术复合处理的发展方向进行了展望。

[关键词] 激光表面织构化; 固体润滑技术; 复合处理; 摩擦学性能

[中图分类号] TG178 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-1560(2019)10-0110-06

DOI:10.16577/j.cnki.42-1215/tb.2019.10.022

Research Status of Compound Treatment of Laser Surface Texturing and Solid Lubrication Technology to Improve Surface Tribological Properties

WANG Rui-zhe¹, ZHU Li-na^{1,2}, YUE Wen^{1,2}, FU Zhi-qiang^{1,2}, KANG Jia-jie^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Zhengzhou Research Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou 451283, China)

Abstract: Laser Surface Texturing (LST) Technology has the advantages of fast processing speed, no pollution to the environment and precise control of the size and shape of the processed pattern, which can effectively improve the tribological properties of the surface. By combining the laser surface texture technology with the solid lubrication technology, the synergistic effect of “1+1>2” can be achieved, so that the surface tribological properties of the matrix material can be further optimized. In this paper the research status of LST and different solid lubrication technology composite treatments at home and abroad was reviewed. The influence of the geometric shape, size and density of surface texture on the life of different solid lubricants was summarized. The mechanism of synergistic lubrication effect was analyzed. Furthermore, the development direction of LST and solid lubrication technology was prospected.

Key words: laser surface texturing; solid lubrication technology; compound treatment; tribological properties

0 前言

在表面加工出具有一定尺寸和排列图案阵列的技术称为表面织构技术。目前,国内外对表面织构技术已有广泛的研究,常用的表面织构的制备方法有机械加工法、反应离子刻蚀、电子束刻蚀、化学沉积法、溶胶凝胶法及激光表面织构等等^[1-4]。其中,激光表面织构

技术^[5](LST)具有对环境无污染、制作简单、耗时短、成本低、加工范围宽,并可控制表面织构的尺寸和形貌等优点,已经被广泛应用于多种材料表面来改善其摩擦学性能。

固体润滑是将固态物质涂(镀)于摩擦界面,以降低摩擦、减少磨损的措施。这种能够降低摩擦、减少磨

[收稿日期] 2019-04-21

[基金项目] 国家自然科学基金(51605451, 41872183, 41772389);北京市自然科学基金(3182032);装备预研教育部联合基金青年人才基金项目(6141A02033120)资助

[通信作者] 朱丽娜(1984-), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事涂层表面润湿性和耐磨性研究, E-mail: zhulina@cugb.edu.cn

损的固态物质称为固体润滑剂。目前,可作为固体润滑剂的物质有石墨、二硫化钼等层状固态物质、塑料和树脂等其他高分子材料还有软金属及各种化合物等^[6,7]。固体润滑剂摩擦性能优良、承载能力强、耐磨性较高、时效性良好,可以应用在不能使用润滑油脂的地方和环境恶劣的场合。但是,固体润滑剂无冷却作用,不能带走摩擦热,在润滑油中具有易沉淀及在摩擦面上附着不牢、易脱落等缺点,也限制了它的使用^[8,9]。

近年来,通过将2种或多种表面技术复合应用,起到“1+1>2”的协同效应,从而使基体材料的表面润滑性能、质量、经济性达到优化的方法称为复合表面工程技术,例如热喷涂与激光重熔的复合技术、热喷涂与表面沉积的复合技术、表面织构与渗氮的复合技术、复合镀膜技术、表面织构与固体润滑剂复合技术等^[10-12]。

激光表面织构化技术与固体润滑剂复合形成表面复合润滑结构是较为成功的表面复合技术,该技术复合起来简单、成本低、协同效应显著,得到研究人员的广泛关注^[13]。这种表面复合润滑结构主要是利用表面织构图案作为固体润滑剂的存储器,为摩擦副提供“二次润滑补给”作用,同时表面织构自身具有减摩抗磨作用,可起到显著的协同润滑效应^[14]。

本文通过总结国内外学者对不同基体材料上的激光表面织构与不同固体润滑技术复合对于材料表面摩擦学性能影响的研究现状,就激光表面织构参数对固体润滑膜摩擦系数、磨损率及其寿命的影响机制进行了综述。

1 织构参数对固体润滑膜摩擦学性能的影响

1.1 织构参数对摩擦系数的影响

1.1.1 织构密度对摩擦系数的影响

Rapoport等^[15]将MoS₂加入到激光表面织构的微型储存器中,研究了其对摩擦学性能的影响。结果表

明,在其他参数相同的情况下,密度较大的织构样品在摩擦系数低时保持了更久的时间。这是因为大密度的织构能为润滑剂提供更多的“微型储存器”,可提供二次润滑效果。

Hu等^[16]利用激光技术在Ti-6Al-4V表面制备了不同密度的微凹坑图案,利用表面织构来改善Ti-6Al-4V较差的摩擦学性能,在干摩擦和有无涂覆MoS₂下研究了凹坑密度对钛合金摩擦学性能的影响。结果表明,具有较高凹坑密度的织构表面在干摩擦下仅在低载荷和低速下具有较低的摩擦系数。但是,当将涂覆的MoS₂固体润滑剂与凹坑结合时,一些织构样品在所有施加的载荷下表现出优异的摩擦性能。

Li等^[17]通过激光在钽涂层钢上制造织构凹坑,并通过DC磁控溅射将Ag涂层沉积在织构化钽中间层上,其凹坑密度为0.2%、4%、6%、8%。结果在600℃的凹坑密度为6%时获得了最低的摩擦系数($\mu=0.2$)。

然而,Meng等^[18]对于W-S-C固体润滑剂与激光表面织构结合的研究表明,织构密度在较低的范围,较大密度的织构可以起到更好的减摩作用,可以显著降低摩擦系数。但是当织构密度高于一定的范围时,织构对于摩擦系数的降低反而没有低密度范围的织构明显。发现织构密度在0~9%时最有利于降低表面摩擦系数。大密度时,高密度的织构会对原有W-S-C涂层起到破坏的反作用,导致摩擦系数不减反升。也就是说,固体润滑剂与表面织构的协同作用存在密度上限,当密度高于这个上限时,反而会降低原固体润滑剂的摩擦学性能。

1.1.2 织构尺寸对摩擦系数的影响

胡天昌等^[19]研究45钢表面MoS₂润滑剂和激光表面织构复合润滑机构的制备方法和摩擦学性能时发现,当织构面密度为5%和20%时,65 μm小孔径织构面的摩擦系数较其他孔径织构面低(图1a~图1b)。

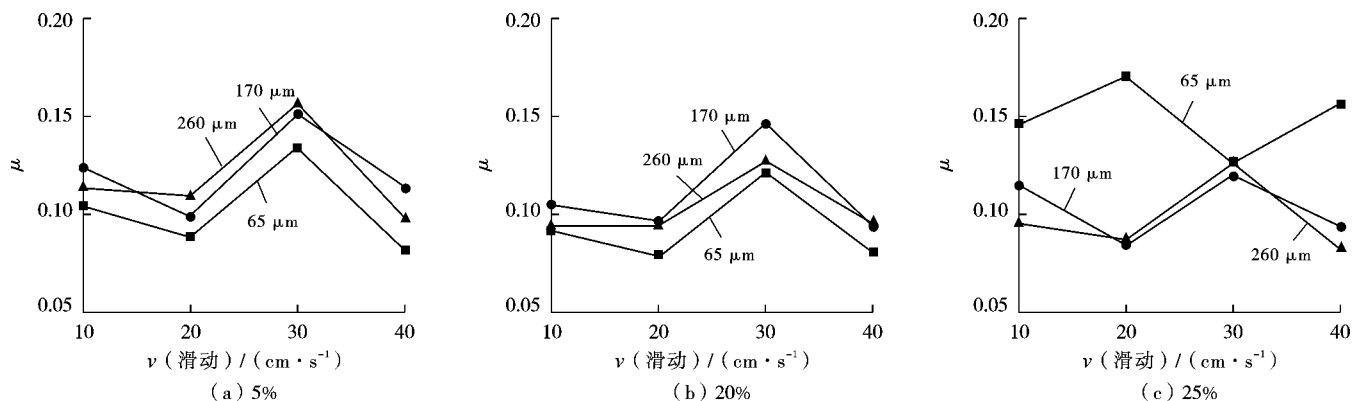


图1 同一织构密度下不同孔径织构面的摩擦系数比较^[19]

随着织构面密度增至 35% ,较大孔径织构面的摩擦系数相较于 65 μm 孔径织构面要小(图 1c)。分析原因认为:织构面密度小于 20% 时,对于较大微坑孔径织构面,其表面的坑间距较大,因此坑内转移出的润滑剂很难在较长距离的坑间形成连续的润滑薄膜。而较小的孔径如 65 μm 孔径织构面则具有较合适的坑间距,从而有利于连续润滑薄膜的形成。然而随着织构面密度的增大,坑径越小,其相应的坑边缘间距比坑径要小得多,这使得织构面的粗糙度显著增加,因此与较大坑径织构面相比,65 μm 孔径织构面的摩擦系数要大一些。

1.1.3 织构形状对摩擦系数的影响

Segu 等^[20]在研究激光织构表面沉积 MoS_2 涂层的摩擦磨损性能时,制备了圆形三角形相间排布和圆形正方形相间排布的 2 种织构图案。在不同的载荷下,对无织构样品、圆形三角形相间排布的织构样品和圆形正方形相间排布的织构样品进行了摩擦磨损试验。结果表明,织构样品相比于无织构样品的摩擦系数有了明显降低。其中,圆形三角形相间排布的织构样品摩擦系数降低了 35%~55%,而圆形正方形相间排布的织构样品摩擦系数降低了 45%~65%。圆形正方形相间排布的织构样品的减摩效果更好。

彭约钧等^[21]对沟槽、网格和凹坑 3 种形状的织构化 CrN 、DLC 薄膜与 Si_3N_4 球配副在去离子水中进行了旋转摩擦试验。试验结果表明,沟槽和网格的织构化 CrN 薄膜摩擦系数低于无织构薄膜。但是凹坑形织构化 CrN 薄膜和 3 种形状的 DLC 薄膜的摩擦系数均高于无织构薄膜。织构具有储存磨屑和润滑液作用,当织构深度较低时,就无法很好地获得这 2 种效果,反而会增大接触面积,溢出的磨屑还会造成二次磨损,会增加摩擦系数。

织构的密度、尺寸、形状参数均会对固体润滑膜的摩擦系数造成影响。其中织构密度对摩擦系数的影响最大,织构尺寸和织构形状对摩擦系数的影响相对较小。织构参数对固体润滑膜摩擦系数影响的整体规律还难以把握。

Qi 等^[22]主要针对织构参数之间的相互作用对摩擦学性能的影响进行了研究,在不同参数方面进行了全面的探索。结果表明,深度为 10~30 μm ,直径为 50~150 μm ,深径比为 0.1~0.2 是合适的数值范围。根据结果,交互参数进行了摩擦学测试。LST 凹坑的直径 100 μm ,面密度 30%,深径比 0.1,深度 10 μm 被确定为最佳参数,摩擦系数降低 64%,磨损率为 $1.105 \times 10^{-9} \text{ g}/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。微凸起减少了表面织构边缘上的应力集

中,捕获和储存的润滑材料,以快速形成稳定的 PTFE 转移膜层。

Meng^[23]等通过激光表面织构和各种固体润滑剂改变 AISI316 不锈钢表面的摩擦学性能,研究中使用的固体润滑剂包括 CaF_2 、h-BN、 WS_2 和石墨。结果表明:只有特定类型的固体润滑剂与表面纹理相结合才能提高 AISI 316 不锈钢的摩擦学性能。当织构密度低时,织构化样品的平均摩擦系数值低于光滑样品的平均摩擦系数值。无论织构密度如何变化, CaF_2 固体润滑剂抛光的织构化样品均未显示出平均摩擦系数的任何变化。这可以用 CaF_2 在室温下的脆性来解释。用 h-BN 固体润滑剂抛光的图案化样品得到的平均摩擦系数值比扁平样品高得多。对这一发现的合理解释是,几乎所有的 h-BN 固体润滑剂都被挤出接触界面。此外,在磨损表面上不能形成低摩擦的摩擦膜。用 WS_2 抛光的 2 个图案样品或石墨固体润滑剂显示出相对低的摩擦系数。这可能是由于在磨损表面上形成了润滑摩擦膜所致;而且,石墨的黏合强度值相对较低,导致摩擦和磨损增加。

1.2 织构参数对固体润滑膜磨损率的影响

1.2.1 织构密度对磨损率的影响

为了研究织构密度对磨损率的影响,刘珍等^[24]采用固体 Nd:YAG 激光器对离子镀 TiN 薄膜进行织构化处理。他们在不同滑动速度下测试了织构的面积率(织构密度)对磨损率的影响,结果表明,在一定载荷和滑动速度条件下,织构面的磨损率均明显小于未织构面的磨损率。这说明激光织构化处理改善了 TiN 硬质薄膜在干摩擦条件下的耐磨性,但是滑动速度对不同面积率的织构化 TiN 硬质薄膜磨损率有差异化影响。这是由于随滑动速度的增大,薄膜表面剪切率增大,表面强度增大及摩擦表面局部温度升高,也会对磨损率造成影响。这与华希俊等^[25]的研究结果一致,在不同的滑动速度的工况下,磨损率最低的织构密度均不相同。

He 等^[26]通过对磨损轨迹的 3D 图像和 2D 横截面轮廓进行分析,研究了有无织构的钛合金表面沉积 DLC 薄膜的磨损率的变化规律,发现随着织构化试样表面凹坑面积密度的增大,磨损率开始减小,然后增大;且低密度的织构样品的磨损率明显低于光滑的 DLC 样品。相比于低面积密度的织构样品,DLC-T44% 的样品由于表面石墨化发生了严重的黏着磨损,光滑的 DLC 样品发生了混合磨损(磨粒磨损和黏着磨损),而其他 2 种低密度的样品只发生了轻微的磨粒磨损。

因此,只有适当的凹坑面积密度才能提高抗磨损性能。

Daniel^[27]等采用激光表面织构法对钛合金(Ti6Al4V)表面进行了处理,使用纳秒脉冲激光制备了线性织构,来改善其耐磨性。结果表明,在固体润滑油润滑条件下,只有5%密度的通道填充密度有效,与未织构参考样品相比,激光织构样品具有恒定的低摩擦系数,且磨损量显著降低了160倍。

Yuan^[28]等采用双辉等离子钎化技术结合激光表面织构(LST)来提高Ti6Al4V(TC4)合金的耐磨性,即将直径为300 μm且梯度密度为5%、7%、11%的凹坑织构分别以正方形阵列分布在涂覆和未涂覆Zr涂层的TC4合金盘的表面上。结果显示,织构密度为5%的织构样本与其他样本相比显示出质量损失的最低值,涂覆和未涂覆Zr涂层的TC4合金盘表面的磨损率分别降低了20%和26%。双重处理的TC4充分利用了双辉等离子体表面钎化和LST,表现出优异的综合性能。

1.2.2 织构尺寸对磨损率的影响

Arslan等^[29]研究了润滑滑动条件下织构直径和深度对DLC涂层磨损率的影响。对无织构、直径50 μm、直径100 μm、直径150 μm、直径300 μm织构进行摩擦磨损试验,结果显示,直径100 μm织构样品显示出最低的磨损系数,表明DLC涂层的耐磨性可以通过适当的凹坑直径得到改善。与DLC无织构样品相比,直径100 μm织构样品的磨损率降低至89.7%。但是直径超过100 μm后磨损性能下降。直径300 μm织构样品的磨损率DLC无织构样品相比磨损率反而增大。相应的,织构深度对于磨损率的影响也呈现出先减少后增长的趋势。

Shun等^[30]在研究往复式润滑条件下不同织构DLC涂层的摩擦学性能时也有类似的结论。在织构直径为100 μm、深度为10 μm时在油润滑条件下获得了最低的磨损率。在织构低于或高于100 μm时不利于减少磨损率。分析得出,当织构直径小于最佳直径时,则流体/磨损碎屑储存器的功能变得无关紧要,所以不会明显地降低磨损率;当织构直径大于最佳直径时,织构不能被磨损轨道完全封闭,在这种情况下,凹坑不能将润滑剂供给到接触区域或有效地截留磨损碎屑,所以反而会使磨损率上升。他们认为样品的磨损性能与织构直径和接触宽度的比率密切相关,并用这个比率来更加形象地定义这样一个最佳直径,并且确定该样品的最佳比率为0.4。

1.2.3 织构形状对磨损率的影响

彭约钧^[21]对沟槽、网格和凹坑3种形状的织构化

CrN、DLC薄膜与Si₃N₄球配副在去离子水中进行了旋转摩擦试验。通过对小球磨损率的分析可知,沟槽、网格微结构CrN薄膜改性表面的小球磨损率要低于光滑CrN表面,且沟槽微结构CrN薄膜改性表面对小球的磨损要比网格微结构CrN薄膜改性表面低,而凹坑微结构CrN薄膜改性表面却比光滑CrN表面的磨损率要高。

Kim等^[31]的研究表明,同样厚2 μm的CrZrSiN的蜂窝型薄膜在机油润滑条件下,密度较大的织构化薄膜磨损率大幅降低,但是密度较低的织构化薄膜磨损率反而增加。这说明织构化薄膜不一定可以起到减少薄膜磨损率的作用,还要受其他的参数的影响。在其他参数不同的情况下,同一种形状的织构化薄膜可能表现出截然不同的效果。

固体润滑膜的磨损率受到织构参数以及试验材料等因素的共同影响。现有的大部分研究工作主要是针对特定的试验条件开展的有限的研究,控制只有1个变量来研究该因素的影响,且理论分析和建模研究较少,由于存在这些局限性,还无法确切获得固体润滑膜与织构不同参数之间的整体规律。

2 织构对固体润滑膜寿命的影响

固体润滑剂的主要使用性能有耐磨寿命、承载能力、耐油性、耐高温性、耐辐射性等等。其中,固体润滑剂的使用寿命是评价固体润滑剂使用性能的最重要、最直观的一项指标^[32-34]。

乔蛟飞等^[35]在研究表面织构对二硫化钼喷涂膜摩擦学性能的影响时,通过控制激光加工参数,加工了相同宽度不同深度,面积比为10%、20%、30%的3种沟槽织构,对比了3种密度织构下固体润滑膜的使用寿命,发现20%面积比的织构获得了最长的使用寿命。结合试样的SEM形貌分析得到,织构面密度为10%时的固体润滑膜寿命之所以比面密度为20%时的寿命短,是因为织构面积占有率不足,从沟槽内转移的固体润滑剂与损耗的固体润滑剂不平衡,最后导致失效。织构面密度为30%时的固体润滑膜寿命之所以比面密度为20%时的寿命短,是因为当面密度增加到30%时,使得沟槽与沟槽之间的间距缩短,而激光加工使得沟槽边缘部分硬度大,在环试件转动过程中,由于环上加工有沟槽,当面密度增大后,块试件的上下波动会比较明显,这样会导致固体润滑膜的寿命降低。

胡天昌等^[13]在45钢、6061铝合金、Ti6Al4V等金

属表面进行激光织构化,然后在图案表面涂覆 MoS_2 制备复合润滑层,考察了复合润滑层的寿命。结果表明,织构表面涂覆固体 MoS_2 润滑剂能显著改善金属材料表面磨损和显著提高 MoS_2 磨损寿命。

方媛等^[36]在陶瓷复合材料表面将表面织构与固体润滑剂进行复合形成表面复合润滑结构,考察了室温至 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 阶段连续升温下复合润滑结构表面的摩擦系数,分析探讨了复合润滑结构的润滑机理,认为织构微坑主要起储存固体润滑剂的作用;在摩擦过程中,微坑内润滑剂被拖敷至滑动表面,形成连续润滑膜,有利于固体润滑剂寿命的提高。

Rapoport 等^[15]研究了织构密度和织构凹坑的凸起高度和凹陷深度对 MoS_2 固体润滑剂寿命的影响,发现织构最佳密度在 $40\% \sim 50\%$ 之间,凹坑凸起的最佳高度为原始全高度的一半。抛光层的磨损寿命主要取决于固体润滑剂在凹坑中保存量的多少,而固体润滑剂可以更好地保存在较深的凹坑中,所以深度增加有利于延长固体润滑剂的寿命。

Shen^[37]等在单晶硅片上制备了 20% 密度的激光表面织构,以提高通过枝接 PSVBA 聚合物刷子制备的聚合物涂层的表面摩擦学性能。结果显示,聚合物刷与激光表面织构技术(LST)具有明显的协同作用,所制备的聚合物刷复合表面具有较强的减摩耐磨性。此外,聚合物刷的磨损寿命可以大大延长,因为织构表面的微凹坑可以有效地保护聚合物刷。聚合物刷可以有效地锁定润滑剂并将其存储在微凹坑中,以便于在摩擦过程中形成流体润滑膜。

3 结论与展望

(1) 激光表面织构与固体润滑剂结合能极大改善其摩擦学性能,增加固体润滑剂的使用寿命。

(2) 织构图案作为固体润滑剂的存储器,为摩擦副提供“二次润滑补给”作用,同时织构自身具有减摩抗磨作用,可起到显著的协同润滑效应。

(3) 织构的密度、尺寸和形状对摩擦学性能都有影响,但是密度、尺寸都存在一个最优值,且不同材料最优值不同。

(4) 表面织构特殊形貌具有“机械互锁功能”,能够显著提高薄膜/涂层与基底之间的结合强度,进而可实现材料表面的长寿命润滑。

虽然激光表面织构化与固体润滑剂结合的复合润

滑结构已经获得了广泛的研究,但是在某些方面还是存在不足,需要进一步研究或者创新:(1)关于本文中综述的国内外学者的研究都是单一在材料基体进行激光表面织构化。然而,对于基体和固体润滑膜双重织构化的研究还较少,接下来可以对双重织构化进行进一步的研究,探究其对材料摩擦学性能的影响。(2)目前对于激光表面织构化的工艺控制的研究文献还较少,对于激光表面织构和固体润滑剂结合的密度、尺寸最优值仍旧需要摸索,没有明确的方向性。

[参 考 文 献]

- [1] 徐滨士,朱绍华,刘世参.材料表面工程技术[M].沈阳:哈尔滨工业大学出版社,2014:7.
- [2] 徐滨士,刘世参.表面工程技术手册[M].北京:化学工业出版社,2009:244.
- [3] 王静秋,王晓雷.表面织构创新设计的研究回顾及展望[J].机械工程学报,2015,51(23):84-95.
- [4] 刘东雷,孟小霞,袁春俭,等.多种规则微造型表面摩擦特性的试验研究[J].润滑与密封,2008,33(7):28-31.
- [5] NEVES D, DINIZ A E, DE LIMA, et al. Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 179: 139-145.
- [6] 石森森.固体润滑技术[M].北京:中国石化出版社,1998:31.
- [7] 王海斗,徐滨士,刘家浚.固体润滑膜层技术与应用[M].北京:国防工业出版社,2009:90-95.
- [8] 赵洋,谭业发,周永权,等.固体润滑技术及其工程应用[J].机械工程与自动化,2011(1):207-209.
- [9] 熊党生,李建亮,秦永坤.特种环境固体润滑涂层技术[M].北京:国防工业出版社,2016:23-25.
- [10] 金桂,肖定全.现代表面工程设计手册[M].北京:国防工业出版社,2000:1-6.
- [11] 余东海,王成勇,成晓玲,等.磁控溅射镀膜技术的发展[J].真空,2009,46(2):19-25.
- [12] 胡丽天.铝质材料及其表面改性层摩擦学性能的研究[D].兰州:中国科学院兰州化学物理研究所,2001:21-30.
- [13] 胡天昌.金属表面激光织构化设计及其摩擦学性能研究[D].兰州:中国科学院兰州化学物理研究所,2012:20-34.
- [14] BASNYAT R, LUSTER B, MURATORE C, et al. Surface texturing for adaptive solid lubrication[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 203: 73-79.
- [15] RAPOPORT L, MOSHKOVICH A, PERFILYEV V, et al.

- Friction and wear of MoS₂ films on laser textured steel surfaces [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202 (14): 3 332-3 340.
- [16] HU T C, HU L T, DING Q. Effective solution for the tribological problems of Ti-6Al-4V: Combination of laser surface texturing and solid lubricant film [J]. *Surface and Coatings Technology* 2012 206(24): 5 060-5 066.
- [17] LI J L, ZHANG X F, WANG J, et al. Frictional properties of silver over-coated on surface textured tantalum interlayer at elevated temperatures [J]. *Surface and Coatings Technology* 2018 365: 189-199.
- [18] MENG R, DENG J X, LIU Y Y, et al. Improving tribological performance of cemented carbides by combining laser surface texturing and W-S-C solid lubricant coating [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 72: 163-171.
- [19] 胡天昌 胡丽天 张永胜. 45 钢表面复合润滑结构的制备及其摩擦性能研究 [J]. *摩擦学学报* 2012(1): 14-20.
- [20] 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 and Coatings Technology*, 2013, 232(10): 504-514.
- [21] 彭鈞钧. 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: 10-21.
- [22] QI X W, WANG H, DONG Y, et al. Experimental analysis of the effects of laser surface texturing on tribological properties of PTFE/Kevlar fabric composite weave structures [J]. *Tribology International* 2019, 135: 104-111.
- [23] MENG R, DENG J X, DUAN R, et al. Modifying tribological performances of AISI 316 stainless steel surfaces by laser surface texturing and various solid lubricants [J]. *Optics and Laser Technology* 2019, 109: 401-411.
- [24] 剡 珍 孙嘉奕 姜 栋, 等. 激光织构化 TiN 薄膜的干摩擦性能研究 [J]. *摩擦学学报* 2017 37(4): 518-526.
- [25] 华希俊 刘 明 杜志华, 等. 织构化表面固体润滑性能试验 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)* 2014 35(1): 91-95.
- [26] HE D Q, ZHENG X S, 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.
- [27] DANIEL K, MARCUS H S, HARALD H, et al. Tribological behavior of nanosecond-laser surface textured Ti6Al4V [J]. *Wear* 2019 422-423: 261-268.
- [28] YUAN S, LIN N, ZOU J J, et al. Effect of laser surface texturing (LST) on tribological behavior of double glow plasma surface zirconizing coating on Ti6Al4V alloy [J]. *Surface and Coatings Technology* 2019 368: 97-109.
- [29] 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: 1 135-1 149.
- [30] SHUN 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.
- [31] KIM D, LA J, KIM S, et al. The tribological performance of laser surface treated CrZrSiN thin films [J]. *Materials Research Bulletin* 2014 58: 39-43.
- [32] 温诗铸, 黄 平. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 171-187.
- [33] 郑友华, 李冀生, 王美玲. 固体润滑涂层的评价和使用 [J]. *润滑与密封* 2003(2): 14-17.
- [34] 赵学敏, 汪刘应, 张 虎, 等. 固体润滑涂层制备工艺的研究进展 [J]. *材料导报* 2013(C2): 68-71.
- [35] 乔姣飞, 常秋英. 表面织构对二硫化钼喷涂膜摩擦学性能的影响 [J]. *润滑与密封* 2016 41(1): 55-58.
- [36] 方 媛. 结构/润滑功能一体化陶瓷复合材料的设计、制备及性能研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 20-34.
- [37] SHEN M X, ZHANG Z X, YANG J T, et al. Wetting Behavior and Tribological Properties of Polymer Brushes on Laser-Textured Surface [J]. *Polymers* 2019, 11(6): 981.

[编校: 秦 维]

(上接第 95 页)

- [4] 王金东, 赵 岩, 朱砚葛, 等. 磁场强度对磁场-电沉积 Ni-TiN 镀层的影响 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2016, 39(3): 83-85.
- [5] 马春阳, 刘滨瑜, 朱永永, 等. 正交试验优化脉冲磁场-电沉积 Ni-TiN 复合镀层工艺研究 [J]. *功能材料*, 2015, 46(9): 19 115-19 117.
- [6] 冯秋元. Ni-Al₂O₃ 纳米镀层制备及性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 112-119.
- [7] 刘娜娜, 吴蒙华, 李 智, 等. 磁场作用下电沉积镀层技术的研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(3): 649-654.
- [8] 龙 琼, 钟云波, 伍玉娇, 等. 稳恒磁场对循环镀液电沉积铁-硅复合镀层的影响 [J]. *电镀与涂饰*, 2017, 36(24): 1 295-1 300.
- [9] 李 洋. 泥浆泵易损件表面磁场-脉冲电沉积 Ni-TiN 纳米镀层研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2016: 33-42.

[编校: 魏兆军]