DOI: 10.3901/JME.2019.17.085

织构化表面设计及其摩擦学应用*

张辉^{1,2} 刘洋^{1,2} 王伟^{1,2} 秦立果^{1,2} 董光能^{1,2}

(1. 西安交通大学设计科学与基础部件研究所 西安 710049;

2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049)

摘要: 织构化表面作为近年来涌现的表面摩擦学改性新技术, 具有降低摩擦磨损的作用, 在机械摩擦副中得到了广泛的研究和应用。随着先进制造技术的发展, 复杂、精细织构的加工制造成为了可能。与此同时, 表面织构的摩擦学设计也由试验试错筛选阶段逐步走向理论优化阶段。概述了近年来表面织构化设计及其摩擦学应用的发展前沿和进展。介绍了凹形和凸形织构在加工、润滑方面的特点, 以及凹形织构在不同工况下的润滑机理。探讨了近年来织构流体动压润滑和混合润滑模型的发展, 并概述了织构典型规则形状的选择和不规则形状优化研究。归纳了针对不同材料和不同工况, 圆形织构尺寸参数的选择和优化设计, 总结了合理的参数范围。进而重点探讨了圆形织构排布影响, 分析了几种典型的织构排布研究; 同时概述了针对典型摩擦副, 如轴承, 织构排布形式的选择和设计方法。最后, 对织构化表面设计研究进行了总结, 提出了表面织构设计面临的问题挑战, 并对织构设计未来的发展方向进行了分析和展望。

关键词: 织构; 表面; 摩擦学; 优化; 设计

中图分类号: TG156

Surface Texture Design and Its Tribological Application

ZHANG Hui^{1,2} LIU Yang^{1,2} WANG Wei^{1,2} QIN Ligu^{1,2} DONG Guangneng^{1,2}

(1. Institute of Design Science and Basic Components, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: As a popular surface modification technology for improving tribological performance in recent years, surface textures have been widely studied by research groups and have been applied to different friction units to reduce friction and wear. With the development of advanced manufacturing technology, it is possible to fabricate surface texture of complex shape and small dimension efficiently and economically. At the same time, study on design of surface textures is transferred from experimental trial and error method to theoretical optimization. The development of surface texturing design and its tribological application in recent years is discussed. Firstly, the manufacturing of concave/convex textures and the lubrication characters of concave textures in various lubrication regimes are introduced. Then, the development of hydrodynamic lubrication and mixed lubrication model is discussed. Meanwhile, typical regular shapes and irregular shapes on the tribological behaviors of surface texturing are summarized. Followed by is the summarization of recent studies on the selection and optimization of the dimension of circular dimples for various materials and under different operating conditions. Effects of the distribution/layout of circular dimples are mainly discussed by taking several typical researches as examples. For specific friction pairs, such as bearings, corresponding texture distribution/layout design are also introduced in this overview. Lastly, this overview summarizes the limitations of surface texturing design in available literature and gives the prospect in future.

Key words: texture; surface; tribology; optimization; design

0 前言

半个世纪以来, 抗-摩(磨)材料、表面涂层、润

滑油添加剂技术被广泛应用于改善机械支承表面的摩擦学特性。然而, 随着机械系统摩擦学特性改善要求的不断提高, 机械支承表面形貌设计成为了系统摩擦学设计中相对薄弱的环节。人们曾经凭经验认为光滑表面具有较低的摩擦力和磨损, 反之, 非光滑表面会带来较大的摩擦力和磨损。但随着制造

技术和相关理论的发展,相关研究证明具有一定粗糙度或纹理的表面可以减小粘着摩擦力、防止胶合并改善润滑,从而得到更好的摩擦学特性^[1-2],如汽缸壁磨纹纹理的加工。自然界中,生物的进化也同样产生了很多具有特定功能性的非光滑生物表面^[3]。例如:鲨鱼皮表面纵向微结构可以有效降低其游动阻力;荷叶表面微纳结构形成超疏水表面,有利于减少灰尘的堆积。这些生物表面同样暗示了光滑表面并不一定总是最好的摩擦学表面。

通过主动设计和制造,获得按一定规则排布的表面微纳结构,即在表面加工出具有微纳尺寸和排列的图案阵列,从而获得特定功能的表面,称之为结构化表面^[1,2,4]。近年来,表面结构化作为一种改善机械支承表面摩擦学特性的手段,已经在工程领域广泛应用。典型实例有:①在机械硬盘的起始/终止区域设置点状凹形结构,以提升其读写性能,延长寿命^[5];②结构化表面应用于机械密封中,以减小摩擦力,减少泄漏^[6];③微沟槽应用于汽车汽缸壁-活塞系统,以减少磨损降低能耗^[7]等。由于具有显著摩擦学改善作用,结构化表面技术得到了全世界的关注。除机械配副结构化表面摩擦磨损等基本摩擦学性能研究以外,也有很多研究关注结构的抗粘附^[8]、降低摩擦振动(西南交通大学莫继良等)^[9]、船舶减阻(武汉理工大学袁成清等)^[10]、降低空气摩擦噪声(浙江大学汪久根等)^[11]等效应。近年来随着加工制造技术的发展,表面结构的加工精度越来越高,尺度范围也越来越广^[12-18],这也激励着更多的人投入结构化表面的研究。

一般而言,由表面结构相对于金属基体表面的位置,可以简单地将其分为凹形结构和凸形结构两种形式。凹形结构可以通过如激光烧融、冲压、腐蚀等传统或先进制造方法,快速低成本地减材加工制造。凸形结构则既可以通过增材制造也可以通过去除量较大的减材制造的方法加工,其制造成本较高。因此,凹形结构在工程领域的应用更为广泛。如图1所示,典型凹形结构分别应用于人造关节、机床刀具上。

相比于凸形结构,凹形结构可以形成半封闭的空间,从而可以更有效地储存润滑油、磨屑、磨粒等。然而储存的磨屑、磨粒可能会沉积于凹形结构内部,从而在某种程度上减小了凹形结构的作用。对于凸形结构,润滑剂的流动会较为容易地将凸形结构表面的磨屑、磨粒带走,从而减小了类似于凹形结构的沉积作用。总体而言,尽管凹形结构可能造成一定的磨屑、磨粒积累,但它具有易于制造,储存润滑油、磨屑和磨粒作用更为显著的优势。因

此,凹形结构的研究和应用更为广泛。本文探讨的结构化表面以凹形结构为主。

(a) 人工关节

(b) 机床刀具

图1 典型凹形结构在工程中的应用

相关研究者从不同的角度探讨了凹形结构表面对于摩擦学特性改善作用的机理。当前为广泛接受的机理主要有:①微流体动压作用^[21];②“二次润滑”效应^[22];③磨粒“储存”作用^[23];④接触面积减少效应^[24]。在低速重载或乏油工况条件下,机械配副处于干摩擦或边界润滑状态,其载荷主要由表面微凸体接触承担。此时,支承表面的接触状态影响其摩擦学特性。而结构化表面可以有效减小接触面积,从而减小黏着摩擦力。凹形结构可以储存润滑剂,并在支承表面接触结构时,释放润滑剂,从而改善润滑状态。该作用称为结构“二次润滑”作用。此外,凹形结构还能储存“磨屑、磨粒”,从而将三体磨损转变为二体磨损。随着配副相对运动速度的增加,表面结构可以产生微流体动压作用,从而分担部分载荷。此时系统处于混合(部分)润滑状态,其摩擦学特性由结构流体动压作用和微凸体接触状态共同决定。当配副相对运动速度继续增加,系统处于流体动压(全膜)润滑状态,此时结构产生的流体动压力可以完全承担载荷,两摩擦副配合表面的微凸体随着油膜的增厚,已经完全分离不再接触,这时摩擦阻力来源于流体的剪切。

当前关于结构化表面的设计研究主要分为试验研究和理论研究。早期的结构设计往往集中于试验研究, 通过不断试错, 选择适合自己配副结构、材料和运行工况的结构设计。这种试验试错的方法低效且不经济。近年来, 结构的设计从试验试错阶段逐步走向理论优化阶段。通过建立结构润滑模型, 预测不同结构设计的润滑效果, 从而更有效地选择和优化结构的尺寸参数、形状和排布。上述结构研究发展过程在本文后续的第2、3、4节都有所体现。

1 结构润滑模型

如第0节所述, 尽管结构的润滑改善作用具有多种机理, 然而这些机理往往在不同工况下起到的作用效果不尽相同。在早期的研究中, 结构润滑模型往往基于 Reynolds 方程, 将结构群看作一个个微型阶梯轴承, 其作用在于提高系统流体动压效应, 从而改善摩擦学行为。由于 Reynolds 方程仅仅适合于流体动压润滑状态, 这些模型的基本假设为厚油膜(膜厚比 $\lambda > 3$), 而表面微凸体的接触和挤压作用往往被忽略。典型的研究有: ETSION 等^[25]基于 Reynolds 方程建立了结构化机械密封的润滑模型, 并以此为基础研究了部分结构化密封的摩擦性行为。BURSTEIN 和 INGMAN^[26]通过建立考虑挤压效应的 Reynolds 方程分析了矩形截面结构在往复运动下气缸-活塞环系统中的润滑状况。此外, 也有一些研究针对结构化表面周期性排布的特点, 改进算法以提高 Reynolds 方程计算效率, 比如, 西安交通大学的裴世源等^[27]开发了一种有限细胞法提高了流体动压计算的效率。作为应用较为广泛的机械配副—滑动轴承往往处于流体动压润滑状态, 具有 10 μm 以上的膜厚, 摩擦配副两表面处于完全脱离的状态, 因此适合于全膜润滑的 Reynolds 方程。在这方面也有很多相关研究。较早的工作多采用较为简易的边界条件, 如 BOUNIF 等^[28], RAHMANI 等^[29], 和 MARIAN 等^[30]分别建立了基于厚膜流体动压效应的数学模型对结构化表面在轴承上的设计进行了研究。而后的研究考虑质量守恒等边界条件以提高模拟精确性, 比如, FOWELL 等^[31]利用考虑质量守恒边界条件的 Reynolds 方程研究了结构化轴承的摩擦性行为。

近年来, 结构在混合润滑条件下($1 < \lambda < 3$)的作用越来越多地得到了重视, 这是因为机械摩擦配副在低速重载条件下或者启停阶段容易出现严重的磨损, 从而导致失效。此时摩擦表面很难形成足够的

流体动压力, 表面微凸体的接触会承载一部分载荷, 并在接触界面发生磨损。此外, 油膜厚度较小时, 微凸体对系统的流体动压效应影响显著, 相关研究最具影响的是 PATIR 和 CHENG 的平均流量 Reynolds 方程^[32], 该模型考虑微凸体作用对经典 Reynolds 方程进行了修正, 适合于混合润滑状态下流体动压力的计算。对于考虑润滑界面接触的结构混合润滑数学建模, 当前研究主要考虑到载荷的分担, 通过分别计算全油膜区和接触区的载荷和摩擦力来综合考虑。典型的研究有: 清华大学张生光等^[33]建立了统一计算表面接触和流体动压效应的数学模型, 从而实现了混合润滑问题的快速求解。北京理工大学 WANG 等^[34]在乏油工况下的求解修正雷诺方程, 获得乏油工况下考虑结构表面的润滑油膜厚度以及压力分布, 依据求得的润滑油膜厚度判断计算域内各点润滑状态, 通过接触压力及油膜厚度分别计算边界润滑、混合润滑以及流体润滑状态下的摩擦因数。西安交通大学 ZHANG 等^[21]通过生成虚拟粗糙表面, 并利用 K-E 接触模型和平均流量 Reynolds 方程建立了一种混合润滑模型, 并绘制了结构的 Stribeck 曲线。该模型考虑了微凸体的弹塑性接触变形和基体的弹性变形, 因而具有较好的精度。

结构润滑模型的不断发展为结构化表面理论设计提供了强有力的理论工具。研究者根据自己的润滑工况条件和材料性质对结构的形状、尺寸和排布进行了研究和优化, 如第2、3、4章。尽管这些研究的结果不尽相同, 但这些研究大体上勾勒出了结构设计的基本参数和准则。

2 结构形状设计

随着加工制造技术的发展, 近年来涌现出如激光加工、光刻、腐蚀等很多先进制造技术^[12-17]。这使得圆形以外其他形状甚至不规则形状结构的精确加工制造成为了可能。一些研究尝试了方形^[29, 35]、三角形^[36]等结构形状。甚至也有研究提出了其他不规则形状结构, 如重庆大学 MENG 等^[37]根据硅藻壳设计了一种复合型结构; 清华大学邵天敏等提出了一种葫芦形结构^[38], 用以减小不锈钢表面的摩擦因数; UDDIN 等^[39]设计了一种“星形”结构。除了少量研究关于不规则结构形状设计, 更多的研究则关注于对比几种典型结构形状的摩擦学行为, 从而择优筛选。西北工业大学尹明虎等^[40]研究了方形、圆柱形和三角形三种结构对滑动轴承的影响, 研究认为方形结构对承载力的提升效果最为显著。河南

科技大学的 QIU 等^[41-42]理论评估了球体、椭圆体、椭圆形、圆形、椭圆形、三角形、V 形织构对气体轴承承载力和摩擦因数的影响,并得出椭圆形织构具有最优摩擦学特性。GALDA 等^[43]通过试验的方法对比了几种不同织构形状对 Stribeck 曲线的影响。研究表明长液滴形织构具有优于其他织构形式的摩擦学行为。南京航空航天大学 YU 等^[44]对比研究了具有圆形、椭圆形和三角形织构在不同滑动方向上的摩擦学性能,结果证明了织构形状和运动方向对承载力有显著影响。除了织构对摩擦学性能的影响,也有学者初步探讨了织构形状对润滑剂润湿性的影响,西安交通大学 QIN 等^[15]对圆形、方形、三角形织构对水润湿性及其摩擦学行为进行了研究,研究表明圆形织构可以获得更好的疏水效果和摩擦学性能。

近年来,一些研究尝试对织构形状进行优化,得到了一系列最优的织构不规则形状,这些优化形状具有更为优良的摩擦学性能。SHEN 和 KHONSARI^[45]开发了一种序列二次规划程序优化织构不规则形状轮廓,以获得最大承载力。他们研究得到了一种 V 形和梯形织构分别作为单方向和双方向滑动条件下的最优织构形状,如图 2 所示。西安交通大学 ZHANG 等^[46-47]通过遗传算法优化了凹形织构形状,得到了子弹形和鱼形织构适合于单向运动工况;椭圆形织构适用于往复运动工况,如图 3 所示,并且发现优化的织构形状在高速轻载工况下摩擦学特性改善显著,然而在低速重载工况优化织构形状并不比圆坑织构具有优势。

图 2 V 型和梯形织构

(a) 子弹形

(b) 鱼形

(c) 椭圆形

图 3 子弹形、鱼形和椭圆形织构

尽管当前很多研究对比了多种织构形状,甚至对不规则织构形状进行了优化。但实际上圆坑织构的设计更为简单,加工制造成本低、较为方便,并且其摩擦学特性(特别是在低速重载工况下^[46-47])也相对较好,因此圆坑织构得到了更为广泛的应用。

3 圆坑织构几何尺寸设计

如第 2 节所述,由于圆坑织构的易于加工制造和相对优良的摩擦学特性,该织构形式得到相关研究者广泛应用^[48-50]。很多研究将圆坑织构应用于不同材料和工况的机械配副中,从理论和试验两方面和普通光滑表面相对比,证实了圆坑织构优良的摩擦学特性。一些研究甚至优化得到了最佳面积比、深径比等关于圆坑织构的最优几何参数。具有代表性的文献有: ETSION 等^[6, 25, 51]研究了圆坑织构在机械零件中的润滑性能,得到了 5 % 面积比和 0.01-0.05 深径比的最优参数。BRIZMER 等^[52]利用激光烧蚀技术在滑动止推轴承上加工了表面织构,其研究结果证明 0.13 的织构表面占比和 0.6 的深径比为织构最优参数。南京航空航天的 WANG 等^[53]在 SiC 止推轴承表面加工了微坑,并得到了使承载力最大的织构几何参数为 10 % 的面积比和 0.01~0.02 的深径比。中国科学院兰州化学物理研究所的胡天昌等^[54]研究了织构在干摩擦和贫油润滑条件下的摩擦性能,并得出结论:在低载低速下具有较小直径的织构具有较低的摩擦因数,随着速度及载荷的增大,较大孔径织构面表现较好的摩擦特性。南京理工大学万轶等^[55]研究了激光表面织构的形状、直径、深度、取向和密度等结构参数对润滑状态及其磨损机理的影响,并得到了低密度的织构有更低的摩擦因数。中国矿业大学的 MA 等^[56]通过数值模拟研究了椭圆纵截面圆坑织构在不同几何参数和不同工况对其摩擦因数的影响,发现最优深径比为 0.005~0.010。WANG 和 ZHU^[57]通过理论分析了混合润滑状态下织构的摩擦学特性,并得到了

3%~12%的最优深径比。西安理工大学吕延军等^[58]针对内燃机曲轴系统的径向滑动轴承系统, 对其表面织构深度和面积比进行了优化, 分析了织构的结构参数(数量、面积率和最大深度)对径向滑动轴承承载力和摩擦因数的影响。西安交通大学的ZHANG等^[23]在巴氏合金盘表面设计了矩形和辐射形排布的圆坑织构, 并证明了织构表面占比为8.6%时, 摩擦因数最低。YAN等^[59]系统地试验研究了织构参数的影响, 并提出了5%表面占比、5~10 μm 深度、100~200 μm 直径的织构具有最优减摩效果。除了最为常见的金属表面的织构设计, 还有一些研究将结构化技术应用于其他非金属表面, 并探索了织构参数设计。南京航空航天大学赵帅等^[60]率先在聚合物表面加工了表面织构, 并得出了直径100 μm 、面积率10%的织构化表面具有较好抗磨损性能。

尽管以上研究针对的织构化表面的材料、工况各不相同, 采用的研究方法也有很大区别, 最终得到的织构参数也不完全一致。但从总体上看, 上述研究基本给出表面织构具有的较优摩擦学性能的几何参数范围: 直径为几百微米、深度为几微米到几十微米、深径比为0.001~0.020、表面占比5%~15%。

4 圆坑织构排布设计

除了形状和尺寸之外, 织构排布也对系统摩擦学行为有显著影响。当前研究多采用典型的正方、交错、辐射点阵织构排布^[23, 61], 而对不同织构排布影响的研究较少。香港城市大学HUA等^[20]在DF2工具刀表面布置了正方形和交错形排布的织构, 对比试验表明, 交错形排布织构润滑效果更为优良。西安交通大学ZHANG等^[23]在巴氏合金圆盘激光加工了正方形和辐射形织构排布, 旋转试验证实了正方形点阵排布具有较优的摩擦学特性。REN等^[62]通过建模研究了鱼骨形、正弦形, 三角形、蜂巢形织构排布, 得到了具有较小“长深比”的短沟槽织构在低面积比正弦排布下有最大的流体动压效果。此外, 也有一些研究深入地探讨了织构排布的影响, 通过仿生或者其他特殊方法, 提出了较优的织构排布方案或者描述织构排布的参数。LU等^[63]尝试用叶序排布设计织构化表面, 取得了很好的效果, 如图4所示。ZHAN和YANG^[64]研究了具有一定倾斜角的正方形点阵排布, 发现当倾角为60°时, 润滑效果达到最佳。中国矿业大学的王洪涛等^[65]利用数值模拟的方法研究了具有微圆柱凹坑织构平面在往复运动下的摩擦学性能, 以织构单元位置偏移

率为排布描述参数, 分析了织构排布以及表面间相对运动速度对摩擦力和动压承载能力的影响。合肥工业大学的李敦桥等^[66]通过表面连通性的独特角度描述和表征表面织构分布, 并分析了其对摩擦学特性的影响。

图4 叶序织构排布

以上研究讨论了织构不同排布的影响, 但却很少涉及应用到具体的摩擦副。对于滑动轴承、机械密封等摩擦副表面, 织构设计区域往往并不一定要覆盖整个摩擦表面, 而是采用局部(部分)织构化设计。典型的研究有: MARIAN^[30]理论上研究了局部覆盖止推轴承的方形织构化表面, 并对其几何参数进行了优化。FOWELL等^[31]通过数值分析研究了不同覆盖区域织构化表面的影响, 并证明了部分织构化表面对于提高承载力和减小摩擦力的作用。BRIZMER等^[67]以获得最高的承载力为目标在径向滑动轴承上优化了织构排布。TALA-IGHIL等^[68]通过对比25种织构排布设计对阻力矩、承载力、流体动压力的影响, 证明了在轴承收敛区的部分织构化表面设计具有更高的流体动压效果。KANGO等^[69]通过数值计算的方法研究了球形织构和沟槽对径向滑动轴承摩擦因数和温升的影响, 并得到了位于收敛区部分织构化表面具有较好的性能。LIANG等^[70]通过计算流体动力学方法(CFD)研究了织构深度和位置对径向滑动轴承摩擦学性能的影响, 他们的研究表明位于径向滑动轴承入口区的浅织构具有较为显著的改善摩擦学特性效果。清华大学张金星等^[71]在推力滑动轴承上设计了扇形部分织构化表面, 并对其参数进行了优化, 提出了计算摩擦因数的拟合公式。除了如上述针对多种织构排布的对比筛选研究, 近年来也有一些研究尝试对织构排布进行优化设计。西安交通大学ZHANG等^[72]优化了径向滑动轴承的织构排布(覆盖区域), 发现在轴承收敛区域呈“半椭圆形”的织构排布(图5)具有更优良的摩擦学性能。类似地, 楔形滑块轴承表面织构也优化得到了“三角形或梯形”的排布^[73]。

目前来看, 织构排布的设计研究还未达成一致结论, 各个研究强调的排布形式和参数不尽相同, 也缺少描述和表征织构排布的参数。然而对于具体

图 5 半椭圆形织构排布

的摩擦副如轴承, 当前研究已有较为一致的优化结果, 这些研究一般认为将织构设计在轴承收敛区入口处会得到较好的润滑改善作用。

5 结论及展望

织构化技术及其摩擦学设计在近年来得到了广泛的研究, 并逐步应用于机械摩擦副表面, 以减小摩擦磨损, 延长寿命。20 年来大量的研究和探索基本勾勒出了织构化表面设计的形式和参数, 研究也从早期的试错法向更为精细的形状排布优化发展。然而, 以下几个方面仍面临着重大的挑战。

(1) 当前织构润滑模型主要是考虑微凸体接触和流体动压效应, 几乎没有针对织构“二次润滑效应”和磨粒储存的数值模型研究。

(2) 织构在不同工况条件下的润滑机理及其“负作用”仍没有非常明确的解释, 需要更深入地探讨。

(3) 针对不同摩擦副的不同材料和工况的表面织构设计虽然有一定的规范和准则, 但具体参数仍然需要大量试验试错来验证。

未来的织构设计可能会更多地关注于以下两方面。

(1) 织构设计理论和设计方法研究, 提出更通用的织构设计理论和准则, 从而更好地指导其工程应用。

(2) 织构润滑的机理研究。对织构在各种工况下的机理进行更精确地描述, 从而更好地理解织构对摩擦学性能的改善作用。

参 考 文 献

- [1] 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.
WANG Jingqiu. WANG Xiaolei. State of the art in innovative design of surface texture[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 84-95.
- [2] 赵文杰, 王立平, 薛群基. 织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 Wenjie. WANG Liping. XUE Qunji. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface[J]. Tribology, 2011, 31(6): 622-631.
- [3] 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): 2353-2359.
DAI Zhendong, TONG Jin, REN Luquan. Research and development of bionic tribology[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(20): 2353-2359.
- [4] EVANS C J, BRYAN J B. “Structured”, “Textured” or “Engineered” surfaces[J]. CIRP Annals, 1999, 48: 541-56.
- [5] TAGAWA N, BOGY D B. Air film dynamics for micro-textured flying head slider bearings in magnetic hard disk drives[J]. Journal of Tribology, 2002, 124: 568-574.
- [6] ETSION I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. Tribology Letters, 2004, 17: 733-737.
- [7] ASHIHARA K, HASHIMOTO H. Friction characteristics of microgrooved bearings under mixed lubrication[J]. Tribology, 2008, 3: 304-309.
- [8] WANG Y, HU H, SHAO J, et al. Fabrication of well-defined mushroom-shaped structures for biomimetic dry adhesive by conventional photolithography and molding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6: 2213.
- [9] 胡利鸿, 莫继良, 王东伟, 等. 沟槽和圆坑织构抑制摩擦尖叫噪声研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(9): 1158-1164.
HU Lihong. MO Jiliang. WANG Dongwei. et al. Groove-textured and pit-textured surfaces to suppress friction-induced squeal noise[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(9): 1158-1164.
- [10] 王雄, 白秀琴, 袁成清. 基于仿生的非光滑表面防污减阻技术发展现状分析[J]. 船舶工程, 2015(6): 1-5.
WANG Xiong. BAI Xiuqin. YUAN Chengqing. Analysis of present development on technologies of antifouling and drag reduction based on bionic non-smooth surface[J]. Ship Engineering, 2015(6): 1-5.
- [11] 汪久根, 陈仕洪. Koch 雪花表面织构设计与高铁空气摩擦噪声分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 78-83.
WANG Jiugen. CHEN Shihong. Bionic design of Koch snowflake surface texture and its effects on air frictional noise of high speed train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(7): 78-83.
- [12] STEPHENS LS, SIRIPURAM R, HAYDEN M, et al. Deterministic micro asperities on bearings and seals using a modified LIGA process[J]. ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air: American Society of

- Mechanical Engineers, 2002: 573-580.
- [13] PETTERSSON U, JACOBSON S. Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique[J]. Tribology International, 2006, 39: 695-700.
- [14] VASYLYEV M A, TINKOV V A, FILATOVA V S, et al. Generation of the periodic surface structures on the dental Co-Cr-Mo alloy by Nd: YAG laser in an inert atmosphere[J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 4424-4427.
- [15] QIN L, LIN P, ZHANG Y, et al. Influence of surface wettability on the tribological properties of laser textured Co-Cr-Mo alloy in aqueous bovine serum albumin solution[J]. Applied Surface Science, 2013, 268: 79-86.
- [16] WAN D, CHEN B, SHAO Y, et al. Microstructure and mechanical characteristics of laser coating-texturing alloying dimples[J]. Applied Surface Science, 2008, 255: 3251-3256.
- [17] YILBAS B S, KHALED M, ABU D N, et al. Laser texturing of alumina surface for improved hydrophobicity[J]. Applied Surface Science, 2013, 286: 161-170.
- [18] TANG G, HO J K, DONG G, et al. Fabrication self-recovery bulge textures on TiNi shape memory alloy and its tribological properties in lubricated sliding[J]. Tribology International, 2015, 96: 11-22.
- [19] ZHANG H, QIN L, HUA M, et al. A tribological study of the petaloid surface texturing for Co-Cr-Mo alloy artificial joints[J]. Applied Surface Science, 2015, 332: 557-564.
- [20] HUA M, DONG G, ZHANG H, et al. The wet tribological behaviors of doughnut patterns laser-textured on DF2 tool steel under different loading conditions[J]. Applied Physics A, 2013, 111: 997-1011.
- [21] ZHANG H, HUA M, DONG G N, et al. A mixed lubrication model for studying tribological behaviors of surface texturing[J]. Tribology International, 2015, 93: 583-592.
- [22] RYK G, ETSION I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction[J]. Wear, 2006, 261: 792-806.
- [23] ZHANG H, ZHANG D, HUA M, et al. A study on the tribological behavior of surface texturing on Babbitt alloy under mixed or starved lubrication[J]. Tribology Letters, 2014, 56: 305-315.
- [24] TANG W, ZHOU Y, ZHU H, et al. The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact[J]. Applied Surface Science, 2013, 273: 199-204.
- [25] ETSION I, HALPERIN G. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal[J]. Tribology Transactions, 2002, 45: 430-434.
- [26] BURSTEIN L, INGMAN D. Pore ensemble statistics in application to lubrication under reciprocating motion[J]. Tribology Transactions, 2000, 43: 205-212.
- [27] PEI S, MA S, XU H, et al. A multiscale method of modeling surface texture in hydrodynamic regime[J]. Tribology International, 2011, 44: 1810-8.
- [28] FOWELL MT, MEDINA S, OLIVER AV, et al. Parametric study of texturing in convergent bearings[J]. Tribology International, 2012, 52: 7-16.
- [29] BOUNIF A, FILLON M, MAS P P, et al. Effects of surface texture on journal-bearing characteristics under steady-state operating conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2007, 221: 623-633.
- [30] RAHMANI R, SHIRVANI A, SHIRVANI H. Optimization of partially textured parallel thrust bearings with square-shaped micro-dimples[J]. Tribology Transactions, 2008, 50: 401-406.
- [31] MARIAN V, KILIAN M, SCHOLZ W. Theoretical and experimental analysis of a partially textured thrust bearing with square dimples[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2007, 221: 771-778.
- [32] PATIR N, CHENG H. An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication[J]. Journal of Lubrication Technology, 1978, 100: 12-17.
- [33] HU Y, ZHU D. A full numerical solution to the mixed lubrication in point contacts[J]. Journal of Tribology, 2000, 122: 1-9.
- [34] 张生光, 王文中, 赵自强. 表面织构及供油量对润滑性能影响的建模分析[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 1-8.
- ZHANG Shengguang, WANG Wenzhong, ZHAO Ziqiang. Effect of surface texture and oil supply on lubricating performance based on modeling[J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 1-8.
- [35] WANG J D, HAN Z L, CHEN H S, et al. Drag reduction by dimples on surfaces in plane-plane contact lubrication[J]. Tribology Letters, 2008, 31: 159-166.
- [36] WANG W, HUANG Z, SHEN D, et al. The effect of triangle-shaped surface textures on the performance of the lubricated point-contacts[J]. Journal of Tribology, 2013, 135: 021503-1-11.
- [37] MENG F, LI T. Study of tribological performances of compound dimples based on diatom shell structures[J]. International Journal of Surface Science & Engineering, 2015, 9: 538-560.

- [38] 李俊玲, 陈平, 邵天敏, 等. 葫芦形微凹坑对不锈钢表面摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(2): 207-214.
- LI Junling, CHEN Ping, SHAO Tianmin, et al. The effect of gourd-shaped surface texture on tribological performance of stainless steel[J]. Tribology, 2016, 36(2): 207-214.
- [39] UDDIN M S, LIU Y W. Design and optimization of a new geometric texture shape for the enhancement of hydrodynamic lubrication performance of parallel slider surfaces[J]. Biosurface & Biotribology, 2016, 2: 59-69.
- [40] 尹明虎, 陈国定, 高当成, 等. 3 种微结构对径向滑动轴承性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(1): 159-164.
- YIN Minghu, CHEN Guoding, GAO Dangcheng, et al. Effects of three types of surface texture on the performances of journal bearing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(1): 159-164.
- [41] QIU M, DELIC A, RAEYMAEKERS B. The effect of texture shape on the load-carrying capacity of gas-lubricated parallel slider bearings[J]. Tribology Letters, 2012, 48: 315-327.
- [42] QIU M, MINSON BR, RAEYMAEKERS B. The effect of texture shape on the friction coefficient and stiffness of gas-lubricated parallel slider bearings[J]. Tribology International, 2013, 67: 278-288.
- [43] GALDA L, PAWLUS P, SEP J. Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve[J]. Tribology International, 2009, 42: 1505-1512.
- [44] YU H, WANG X, ZHOU F. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces[J]. Tribology Letters, 2009, 37: 123-130.
- [45] SHEN C, KHONSARI MM. Numerical optimization of texture shape for parallel surfaces under unidirectional and bidirectional sliding[J]. Tribology International, 2015, 82: 1-11.
- [46] ZHANG H, DONG GN, HUA M, et al. Improvement of tribological behaviors by optimizing concave texture shape under reciprocating sliding motion[J]. Journal of Tribology, 2016, 139: 011701-1-9.
- [47] ZHANG H, HUA M, DONG G Z, et al. Optimization of texture shape based on genetic algorithm under unidirectional sliding[J]. Tribology International, 2017, 115.
- [48] YU H, HUANG W, WANG X. Dimple patterns design for different circumstances[J]. Lubrication Science, 2013, 25: 67-78.
- [49] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. Journal of Tribology, 2005, 127: 248-253.
- [50] DUMITRU G, ROMANO V, WEBER H, HAEFKE H, GERBIG Y, PFLUGER E. Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications[J]. Applied Physics A: Material Science & Processing, 2000, 70: 485-7.
- [51] ETSION I, KLIGERMAN Y, HALPERIN G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces[J]. Tribology Transactions, 1999, 42: 511-516.
- [52] BRIZMER V, KLIGERMAN Y, ETSION I. A laser surface textured parallel thrust bearing[J]. Tribology Transactions, 2003, 46: 397-403.
- [53] WANG X, KATO K, ADACHI K, et al. Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water[J]. Tribology International, 2003, 36: 189-197.
- [54] 胡天昌, 丁奇, 胡丽天. 激光表面织构化对 GCr15 钢摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(5): 447-451.
- HU Tianchang, DING Qi, HU Litian. The effect of laser texturing of GCr15 steel surfaces on their tribological properties[J]. Tribology, 2011, 31(5): 447-451.
- [55] 万轶, 熊党生. 激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(6): 603-607.
- WAN Tie, XIONG Dangsheng. Study of laser surface texturing for improving tribological properties[J]. Tribology, 2006, 26(6): 603-607.
- [56] MA C, ZHU H. An optimum design model for textured surface with elliptical-shape dimples under hydrodynamic lubrication[J]. Tribology International, 2011, 44: 987-995.
- [57] WANG Q, ZHU D. Virtual texturing: Modeling the performance of lubricated contacts of engineered surfaces[J]. Journal of Tribology, 2005, 127: 722-728.
- [58] 张永芳, 刘成, 李莎, 等. 基于混合遗传算法的径向滑动轴承表面织构优化[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 90-98.
- ZHANG Yongfang, LIU Cheng, LI Sha, et al. Surface texture optimization of journal bearing based on hybrid genetic algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(3): 90-98.
- [59] YAN D, QU N, LI H, WANG X. Significance of dimple parameters on the friction of sliding surfaces investigated by orthogonal experiments[J]. Tribology Transactions, 2010, 53: 703-712.
- [60] 赵帅, 王晓雷. 高分子材料机械密封磨损特性及表面织构的影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 761-767.
- ZHAO Shuai, WANG Xiaolei. The effects of surface texture on the wear properties of mechanical seals made of metal and polymers[J]. Tribology, 2015, 35(6):

- 761-767.
- [61] HUA M, MA H, LI J, et al. Tribological behaviours of patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel coated with different bias voltages[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200: 3612-3625.
- [62] REN N, NANBU T, YASUDA Y, et al. Micro textures in concentrated-conformal-contact lubrication: effect of distribution patterns[J]. Tribology Letters, 2007, 28: 275-285.
- [63] LU Y, LIU H. Design and fabrication of the lubricating dimple of the headface sliding bearing with phyllotactic pattern[J]. Advanced Materials Research, 2013, 658: 367-371.
- [64] ZHAN J, YANG M. Investigation on dimples distribution angle in laser texturing of cylinder-piston ring system[J]. Tribology Transactions, 2012, 55: 693-697.
- [65] 王洪涛, 朱华. 圆柱形微凹坑排布形式对织构表面摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 414-419.
- WANG Hong-tao. ZHU Hua. Effect of cylindrical Micro-Pit's distribution form on tribology properties of textured surface[J]. Tribology, 2014, 34(4): 414-419.
- [66] 李敦桥, 刘小君, 黄毅, 等. 规则凹坑表面的连通性分析[J]. 合肥工业大学学报, 2009, 32(11): 1633-1636.
- LI Dunqiao. LIU Xiaojun. HUANG Yi, et al. Connectivity analysis of regular concave surfaces[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009, 32(11): 1633-1636.
- [67] BRIZMER V, KLIGERMAN Y. A laser surface textured journal bearing[J]. Journal of Tribology, 2012, 134: 031702.
- [68] TALA-IGHIL N, FILLION M, MASPEYROT P. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing[J]. Tribology International, 2011, 44: 211-219.
- [69] KANGO S, SHARMA R, PANDEY R. Comparative analysis of textured and grooved hydrodynamic journal bearing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2013, 228: 82-95.
- [70] LIANG X, LIU Z, WANG H, et al. Hydrodynamic lubrication of partial textured sliding journal bearing based on three-dimensional CFD[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2016, 68: 106-115.
- [71] 张金煜, 孟永钢. 推力滑动轴承表面织构的优化设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 91-99.
- ZHANG Jinyu, MENG Yonggang. Optimal design of surface texture in parallel thrust bearings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 91-99.
- [72] ZHANG H, HAFEZI M, DONG G, et al. A design of coverage area for textured surface of sliding journal bearing based on genetic algorithm[J]. Journal of Tribology, 2018, 140: 061702-8
- [73] ZHANG H, LIU Y, HUA M, et al. An optimization research on the coverage of micro-textures arranged on bearing sliders[J]. Tribology International, 2018, 128: 231-239.
-
- 作者简介: 张辉, 男, 1988 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为表面织构化。
E-mail: zhanghui7@xjtu.edu.cn
- 董光能(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为摩擦学功能材料。
E-mail: donggn@xjtu.edu.cn